

მ. გიგოლაშვილი, მ. გოგბერაშვილი, ნ. როინიშვილი

# ასტრონომიის, ასტროფიზიკისა და კოსმოლოგიის კვლევის საგანი და მეთოდები

რედაქტორი  
ი. მანჯავიძე

უხსოვარი დროიდან კაცობრიობა, მისი დაუოკებელი ცნობისმოყვარეობის წყალობით, გარემომცველი სამყაროს წარმოშობის და მოწყობის შემეცნებისკენ მიილტვის: ხან ტაატიო, ხან წინგადადგმული უზარმაზარი ნაბიჯებით, ხან ფესვმაგარი და შეურყეველი „ქეშმარიტებების“ იავარქმნით... კაცობრიობის გენიალური შვილებისა და საყვარელი საქმისადმი ერთგული, ენთუზიასტი ადამიანების ყოველდღიური დაუღალავი ძალისხმევით, დღეს საკმაოდ მკაფიო წარმოდგენა გვაქვს სამყაროს დასაბამიდან განვითარებულ და ამჟამად მიმდინარე ფიზიკურ მოვლენებზე – როგორც ჩვენი დედამიწის უშუალო მახლობლობაში, ასევე ჩვენგან მრავალი მილიარდი სინათლის წლით დაშორებულ ციურ ობიექტებში. წიგნის ავტორებმა მიზნად დაისახეს პოპულარული ენით გაეცნოთ დაინტერესებული მკითხველისთვის, თუ რაოდენ გამჭვირავი ხერხებითა და ნატიფი მოწყობილობებით მოხერხდა სადღეისოდ დაგროვილი ცოდნის მოპოვება და როგორ იხვეწება ხელსაწყოები, რათა ნათელი მოეფინოს ჯერ კიდევ ბურუსით მოცულ საკითხებს.

წიგნის შექმნის იდეა ეკუთვნის პროფესორ **ნინა როინიშვილს**, რომელიც მრავალი ათეული წლის განმავლობაში გახლდათ ელევთერ ანდრონიკაშვილის ფიზიკის ინსტიტუტის წამყვანი მეცნიერ-თანამშრომელი. იგი ერთ-ერთი ავტორია ბროშურის „სამყაროს ევოლუციის ისტორია, დიდი აფეთქებიდან დიდ გახლეჩამდე?“ („საქართველოს მაცნე“, 2006), რომელიც წიგნის პირველ, შესავალ ნაწილად შეიძლება ჩაითვალოს. მეცნიერებათა დოქტორი **მარინა გიგოლაშვილი** იყო ევგენი ხარაძის აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორიის თანამშრომელი და ილიას სახელმწიფო უნივერსიტეტის მთავარი მკვლევარი. მას გამოცემული აქვს ასტრონომიული ენციკლოპედია „ჩვენი გალაქტიკა“ („ელფი“, 2006) და წიგნი „მზე და პლანეტები“ („საქართველოს მაცნე“, 2007). **მერაბ გოგბერაშვილი** ივანე ჯავახიშვილის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის პროფესორია და ელევთერ ანდრონიკაშვილის ფიზიკის ინსტიტუტის უფროსი მეცნიერ-თანამშრომელი. წიგნის რედაქტორია საფრანგეთის ატომური და ალტერნატიული ენერგიების კომისარიატის საკლეს კვლევით ცენტრთან არსებული სამყაროს ფუნდამენტური კანონების კვლევის ინსტიტუტის მეცნიერ-თანამშრომელი, ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა კანდიდატი **ირაკლი მანჯავიძე**. იგი წლების განმავლობაში მონაწილეობს CERN-ის, მეტადრე დიდი ადრონული კოლაიდერის, ექსპერიმენტებში.

წიგნი გამიზნულია როგორც დამხმარე სახელმძღვანელო ბაკალავრიატის უფროსი კურსების სტუდენტებისა და მაგისტრანტებისთვის. ავტორები იმედოვნებენ, რომ იგი საინტერესო იქნება მეცნიერებით დაინტერესებული ცნობისმოყვარე ადამიანებისთვის.

გარეკანზე გამოყენებული გამოსახულებები:

მთვარის, ვენერისა და მერკურის ალბუმი ავსტრალიური რადიოტელესკოპების თავზე  
© Graeme L. White & Glen Cozens (James Cook University)

ლაზერული ხელოვნური ვარსკვლავი VLT ტელესკოპისთვის  
© ESO / Y. Beletsky

კოსმოსური ობსერვატორია Planck და კოსმოსური მიკროტალღური ფონის რუკა  
© ESA and the Planck Collaboration / D. Ducros

ტირაჟი: 250



9 789941 073395



დაბავთიძე სტამბაში "ომეგა ტეგი"  
საპატიჟაილო, თბილისი, სახაიშვილი 17  
ბაღალონი: 00 995 322 53 03 62

PRINTED BY "OMEGA TEGI" PRINT HOUSE  
TBILISI, GEORGIA, 17 SARAJISHVILI STREET  
TELEPHONE: 00 995 322 53 03 62

# სარჩევი

<b>წინათქმა</b>		<b>5</b>
<b>თავი I</b>	<b>ასტრონომიის მიმართულებები</b>	<b>8</b>
1.1	ზოგადი შენიშვნები	8
1.2	ოპტიკური ასტრონომია	10
1.3	ინფრაწითელი და ულტრაიისფერი ასტრონომია	14
1.4	რადიოასტრონომია	18
1.5	რენტგენული ასტრონომია	19
1.6	გამა-ასტრონომია	21
1.7	ნეიტრინული ასტრონომია	22
1.8	კოსმოსური სხივების ასტრონომია	25
1.9	ბირთვული ასტრონომია	26
1.10	გრავიტაციული ასტრონომია	27
1.11	თეორიული ასტრონომია	33
<b>თავი II</b>	<b>ასტრონომიული და ასტროფიზიკური ხელსაწყოები</b>	<b>35</b>
2.1	ზოგადი შენიშვნები	35
2.2	ოპტიკური ტელესკოპები	35
2.3	რადიოტელესკოპები	40
2.4	ინტერფერომეტრები	42
2.5	სპექტრომეტრები	45
2.6	რენტგენის გამოსხივების რეგისტრაცია	47
2.7	გამა-გამოსხივების რეგისტრაცია	50
2.8	გამა-აფეთქებების რეგისტრაცია	54
2.9	ნეიტრინოს რეგისტრაცია	57
2.10	კოსმოსური სხივების რეგისტრაცია	68
2.11	გრავიტაციულ ტალღებზე ნადირობა	73
<b>თავი III</b>	<b>რას და როგორ ზომავენ ასტრონომები</b>	<b>77</b>
3.1	ზოგადი შენიშვნები	77
3.2	ციური კოორდინატები	77
3.3	კოსმოსური ობიექტების სიკაშკაშე და ნათობა	80
3.4	ვარსკვლავის ტემპერატურა, მასა და რადიუსი	86
3.5	ვარსკვლავების ევოლუცია	90
3.6	მანძილები კოსმოსურ ობიექტებამდე	96
3.7	მზის და სხვა ვარსკვლავების ასაკი	102
3.8	ბირთვული საათი, ანუ რადიოაქტიური ქრონომეტრია	104
3.9	სამყაროს ასაკი	106
<b>თავი IV</b>	<b>რას და როგორ სწავლობენ კოსმოლოგები</b>	<b>108</b>
4.1	ზოგადი შენიშვნები	108
4.2	რას წარმოადგენს შავი ხვრელები?	108
4.3	რელიქტური მიკროტალღური ფონი	112
4.4	სამყაროს ინფლაციური გაფართოების მოდელი	118
4.5	სამყაროს ჰორიზონტი	120
4.6	მსხვილმასშტაბიანი არაერთგვაროვნებები	122
4.7	სამყაროს სამგანზომილებიანი რუკა	123
4.8	მსხვილმასშტაბიანი ფლუქტუაციები და ფარული მატერია	126
4.9	ფარული მატერია და გალაქტიკების კლასტერები	127

4.10	ფარული ენერგია და გალაქტიკების კლასტერები	131
4.11	სამყაროს გაფართოების რეჟიმი	133
<b>თავი V</b>	<b>უპასუხოდ დარჩენილი კითხვები</b>	<b>136</b>
5.1	შესავალი	136
5.2	უსასრულოა თუ არა სამყარო?	136
5.3	უნიკალურია თუ არა სამყარო?	137
5.4	სამყაროთა შესაძლო მრავალფეროვნება	138
5.5	დროის ათვლის დასაწყისი	141
5.6	სამყაროს „ქვაკუთხედის“ ძიების გზაზე	144
<b>ბოლოექმა:</b>	<b>ფრენა სატურნისკენ</b>	<b>147</b>
<b>დანართი I</b>	<b>ასტრონომიული კვლევები საქართველოში</b>	<b>152</b>
დ1.1	ისტორიული წყაროები	152
დ1.2	აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორია	154
დ1.3	თეორიული ასტროფიზიკის ცენტრი	168
დ1.4	ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი	170
დ1.5	ასტრონომია ისტორიის სამსახურში	175
<b>დანართი II</b>	<b>კოსმოსური სხივების კვლევა საქართველოში</b>	<b>177</b>
<b>დანართი III</b>	<b>ელემენტარულ ნაწილაკთა ფიზიკა</b>	<b>183</b>
<b>დანართი IV</b>	<b>ფიზიკური და ასტრონომიული ერთეულები</b>	<b>187</b>
<b>დანართი V</b>	<b>ობსერვატორიები</b>	<b>191</b>
<b>Executive Summary</b>		<b>197</b>
<b>სამიგბელი</b>		<b>209</b>



## წინათქმა

სტანდარტული კოსმოლოგიური მოდელის თანახმად სპონტანურად მოხდა „დიდი აფეთქება“, რომლის შედეგად ერთდროულად წარმოიშვა დრო, სივრცე, მატერია და მათი წარმმართველი ფიზიკური კანონები. ითვლება, რომ ამ მომენტში ტემპერატურა და მატერიის სიმკვრივე უსასრულოდ დიდი იყო. ამის შემდგომ სივრცემ იწყო გაფართოება და თან წარიტაცა მატერია. საწყის მყისიერ სტადიაზე, რომელიც სულ  $10^{-35}$  წამს გრძელდებოდა, გაფართოების სიჩქარე მრავალი რიგით აჭარბებდა სინათლის სიჩქარეს. სამყაროს განვითარების ამ ეპოქას ინფლაცია ეწოდება. საბედნიეროდ, როცა სამყაროს ზომა დაახლოებით გრეიპფრუტის სიდიდეს გაუტოლდა, სამყაროს გაფართოება უფრო ზომიერი გახდა და ის ახლაც გრძელდება. ზესწრაფი გაფართოების სტადიამ განსაზღვრა სამყაროს ბევრი თვისება: მისი ზომა და იზოტროპია, მატერიის განაწილების ერთგვაროვნება, მისი შემადგენელი ნაწილაკების ტიპები და სხვ.

სამყაროს გაფართოებასთან ერთად მატერიის სიმკვრივე და ტემპერატურა განუხრელად ეცემოდა. დიდი აფეთქებიდან 300 000 წლის შემდეგ სამყაროს ტემპერატურა ისე შემცირდა, რომ მატერიის ნაწილაკებისგან (ძირითადად ელექტრონებისა და პროტონებისგან) შეიქმნა პირველი ნეიტრალური ატომები, რომლებიც გაცილებით ნაკლებად ურთიერთქმედებდნენ ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებასთან (ფოტონებთან). ვინაიდან ამ მომენტამდე მატერიისა და გამოსხივების ნაწილაკთა რაოდენობა თანაბარი უნდა ყოფილიყო, ნეიტრალური ატომების გაჩენის შემდეგ სამყაროში დარჩა უამრავი „მიუსაფარი“ ფოტონი, რომლებმაც შექმნეს ეგრეთ წოდებული კოსმოსური მიკროტალღური რადიაციული ფონი. 1965 წელს ამ ფონის აღმოჩენა გაფართოებადი ცხელი სამყაროს მოდელის ტრიუმფი იყო.

სამყაროს გაჩენიდან 200-300 მილიონი წლის შემდეგ წარმოიქმნა პირველადი ვარსკვლავები, რომლებმაც გაანათეს იმ დროისთვის არსებული უსტრუქტურო, ბნელი, ცივი კოსმოსი. კოსმოსური ობიექტები წონასწორობის მდგომარეობაში არ იმყოფებოდნენ, მათში მიმდინარეობდა აქტიური, ფეთქებადი პროცესები. თავდაპირველი ვარსკვლავების სიცოცხლის ხანგრძლივობა კოსმოსური მასშტაბებით საკმაოდ ხანმოკლე იყო – არა უმეტეს 100 000 წლისა. თერმობირთვული აფეთქებების შედეგად, ისინი გარდაიქმნებოდნენ ნეიტრონულ ვარსკვლავებად ან შავ ხვრელებად. ამ აფეთქებებისას ვარსკვლავთა ბირთვებში წარმოქმნილი მძიმე ელემენტებით გამდიდრებული მატერიის დიდი რაოდენობა კოსმოსურ სივრცეში გამოიტყორცნებოდა. შემდგომ, გრავიტაციული ძალები კვლავ ახდენდნენ ამ მატერიის ლოკალიზაციას და იქმნებოდა ახალი ციური ობიექტები: ვარსკვლავები, ვარსკვლავთა გროვები, გალაქტიკები და გალაქტიკების გროვები. ყველა ეს ობიექტი მიმოზნეულია უზარმაზარ, ცივ კოსმოსურ სივრცეში. მაგრამ ვარსკვლავთშორისი და გალაქტიკათაშორისი სივრცე არ არის ცარიელი, ის „სავსე“ აირით (ზოგან – ძალიან ცხელით), კოსმოსური მტვრით, ელექტრული და მაგნიტური ველებით, და სხვ.

ეს მოვლენები გაშუქებულია წიგნში „სამყაროს ევოლუციის ისტორია, დიდი აფეთქებიდან დიდ გახლეჩამდე“\*, რომელშიც ჩამოყალიბებულია თანამედროვე წარმოდგენები სამყაროს შექმნისა და განვითარების შესახებ. ჩვენ გავგიჟნდა

---

\* ნ. როინიშვილი, მ. სვანიძე „სამყაროს ევოლუციის ისტორია, დიდი აფეთქებიდან დიდ გახლეჩამდე“, გამომცემლობა „საქართველოს მაცნე“, ISBN 999406611-0, 2006 წ.

დაუკმაყოფილებლობის გრძნობა, რადგან ნაშრომში ღიად დარჩა შეკითხვა, თუ როგორ შეიმცნეს მეცნიერებმა სამყაროს ისტორია. ლოგიკისა და დედუქციის გარდა არსებობს ობიექტური მონაცემები და მათი მოპოვების მეთოდები, რომელთა განხილვის გარეშე სამყაროს წარმოშობისა და განვითარების არსებული თეორია შეიძლება ჩავთვალოთ ლამაზ, მაგრამ ნაკლებად დამაჯერებელ ჰიპოთეზად. სწორედ ამიტომ შემოთავაზებულ წიგნში გვინდა მოგითხროთ, თუ როგორ მუშაობენ ასტრონომები, ასტროფიზიკოსები და კოსმოლოგები.

ახალი ციური ობიექტების აღმოჩენა და მათი მდებარეობების დადგენა ასტრონომიის საგანია. ციურ სხეულებში მიმდინარე ფიზიკური პროცესების შესწავლა ასტროფიზიკოსების საქმეა. კოსმოლოგები კი იკვლევენ სამყაროს გაჩენას, განვითარებას და მის მომავალს.

წიგნი შედგება ხუთი თავისგან, ბოლოთქმისა და ხუთი დანართისგან.

წიგნის პირველ თავში მიმოვიხილავთ ასტრონომიის სხვადასხვა დარგს, რომლებიც კოსმოსურ ობიექტებს გარკვეული სახის გამოსხივების მეშვეობით შეისწავლიან. ეს შეიძლება იყოს როგორც სხვადასხვა ტალღის სიგრძის მქონე ელექტრომაგნიტური გამოსხივება (რადიო, მიკროტალღური, ინფრაწითელი, ოპტიკური, ულტრაიისფერი, რენტგენის, გამა), ასევე კორპუსკულური გამოსხივება – ობიექტის მიერ ნაწილაკების ემისია (მაგალითად ნეიტრინოსი). შესაბამისად, არსებობს რადიო, ოპტიკური, რენტგენული, გამა, ნეიტრინული ასტრონომია. ამავე თავში მოყვანილია ასტრონომიის სხვადასხვა დარგში მიღებული ყველაზე მნიშვნელოვანი შედეგები და დღემდე გადაუჭრელი პრობლემები.

მეორე თავში აღწერილია აპარატურა, რომელსაც ასტრონომები იყენებენ სხვადასხვა ტიპის გამოსხივების დასაფიქსირებლად.

მესამე თავში მოთხრობილია კოსმოსური ობიექტების დამახასიათებელი ასტროფიზიკური სიდიდეების (მდებარეობა, ტემპერატურა, ასაკი და სხვ.) განსაზღვრის მეთოდების შესახებ.

მეოთხე თავი ეძღვნება კოსმოლოგიურ კვლევებს: როგორ ადასტურებენ მეცნიერები გალაქტიკებში შავი ხვრელების არსებობას; კოსმოსური მიკროტალღური ფონის ანალიზით როგორ ასკვნიან, რომ სამყარო არის ბრტყელი და შეიცავს ფარულ მატერიას და ფარულ ენერგიას; რა მეთოდებით აპირებენ სამყაროს ფარული კომპონენტების შესწავლას.

ბოლო თავში მოკლედია მოთხრობილი ჯერ კიდევ გადაუწყვეტელი პრობლემების შესახებ. იმედი გვაქვს, რომ ამ პრობლემების განხილვა მუშაობის სტიმულს მისცემს მომავალ მეცნიერებს.

ბოლოსიტყვაობაში თანამედროვე ასტრონომიის ტრიუმფალური გამარჯვებების შესახებ მოგითხრობთ. კოსმოსური აპარატების დედამიწიდან მართვის საოცარი წარმატების მაგალითად მოყვანილია სატურნის მიმართულებით კოსმოსური ხომალდის ოდისეა.

პირველი დანართი ეძღვნება საქართველოში შესრულებულ და მიმდინარე კვლევებს ასტრონომიის, ასტროფიზიკისა და კოსმოლოგიის მიმართულებებით.

მეორე დანართში ყურადღება გამახვილებულია საქართველოში კოსმოსური სხივების შესასწავლად გამიზნულ სამუშაოებზე.

მესამე დანართში მოთხრობილია უკანასკნელ მიღწევებზე სუბატომურ ნაწილაკთა ფიზიკის დარგში და მოყვანილია მონაცემები ელემენტარულ ნაწილაკთა შესახებ.

მეოთხე დანართში მოცემულია წიგნის ტექსტში გამოყენებული ასტრონომიული და ფიზიკური მუდმივების ცხრილი.

მეხუთე დანართში მოყვანილია რიგი მიწისზედა და კოსმოსური ობსერვატორიის ჩამონათვალი და შესაბამისი აპარატურის პარამეტრები.

სანამ სასიამოვნო და წარმტაც კითხვას გისურვებდეთ, გვინდა მადლიერებით მოვიხსენიოთ ყველა ის ადამიანი, რომელთა თანადგომას ვგრძნობდით წიგნზე მუშაობის განმავლობაში.

საქართველოში ასტრონომიის, ასტროფიზიკისა და კოსმოლოგიის დარგების ჩამოყალიბების ისტორია იმდენად მდიდარია, რომ მას შეიძლება ცალკე ნაშრომი მიეძღვნას. მიუხედავად ამისა, ჩვენ გადავწყვიტეთ წიგნის პირველ და მეორე დანართებში შევხედოდეთ ამ საკითხს, რადგან უცნაური იქნებოდა ქართულენოვან წიგნში არ გვესაუბრა ჩვენში მეცნიერების ამ მიმართულებების დამკვიდრების შესახებ. გვინდა აღვნიშნოთ ქართველი მეცნიერები, რომლებმაც მონაწილეობა მიიღეს ამ დანართების დაწერაში: ქალბატონი თ. კახნიაშვილი (დანართი დ1.2 აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორია – კოსმოლოგიური კვლევები), ბატონი გ. მაჩაბელი (დანართი დ1.3 თეორიული ასტროფიზიკის ცენტრი), ბატონი შ. საბაშვილი (დანართი დ1.4 ასტრონომიული განათლება და კვლევა ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტში) და ბატონი მ. ალანია (დანართი დ2 კოსმოსური სხივების კვლევა საქართველოში – კოსმოსური სხივების კვლევის ასტროფიზიკური მიმართულება). გასაკვირი არაა, რომ შეზღუდული სივრცის ფარგლებში ვერ მოხერხდა ესოდენ მრავალფეროვანი სიუჟეტის სრულად განხილვა, რასაც იმედია, მკითხველი მიგვითხრობს.

ესარგებლობთ შემთხვევით და გულწრფელ მადლობას ვუხდით ქალბატონებსა და ბატონებს ა. თევზაძეს, ა. როგავას, მ. სვანიძეს, ნ. შათაშვილს, გ. ჩაგელიშვილს, დ. ჯაოშვილს, ჩვენს კოლეგებსა და მეგობრებს – ევგენი ხარაძის აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორიის, თეორიული ასტროფიზიკის ცენტრის, ელევთერ ანდრონიკაშვილის ფიზიკის ინსტიტუტისა და ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის თანამშრომლებს – მათ მიერ მოწოდებულმა მასალამ და რჩევებმა საგრძნობლად გააუმჯობესა ნაშრომი.

განსაკუთრებულად გვინდა გამოვყოთ ბატონი ი. მანჯავიძის წვლილი მის მიერ გაწეული სარედაქციო სამუშაოსთვის.

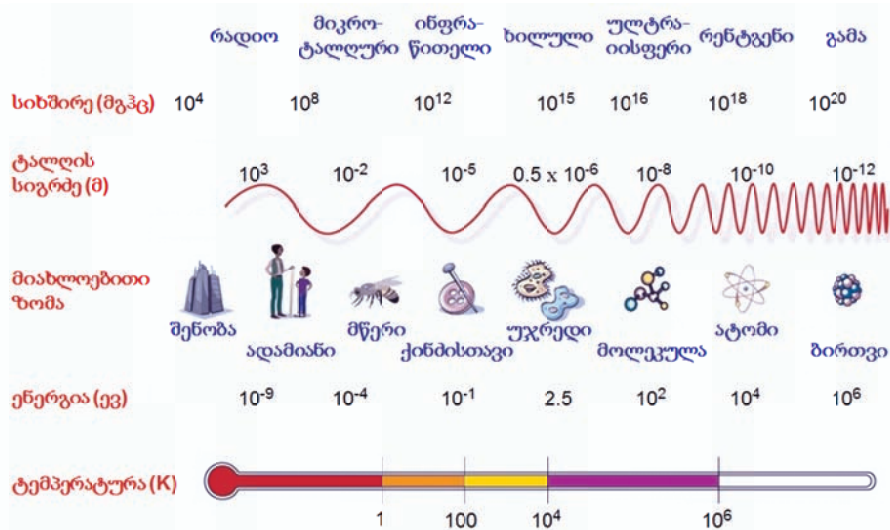
# თავი I ასტრონომიის მიმართულებები

## 1.1 ზოგადი შენიშვნები

ასტრონომები კოსმოსურ ობიექტებს მათი გამოსხივების მეშვეობით სწავლობენ. ძირითადად, ესაა სხვადასხვა სიხშირის მქონე ელექტრომაგნიტური ტალღები. თუმცა ზოგიერთი ტიპის გამოსხივებას კორპუსკულური ხასიათი აქვს, მაგალითად, ატომების ბირთვებისა და ნეიტრონების ემისია. ასტრონომიის დარგებს განასხვავებენ ციური ობიექტების შესასწავლად გამოყენებული გამოსხივების მიხედვით. მიმდინარე თავში მკითხველს გავაცნობთ ამ დარგების უმრავლესობას.

თანამედროვე ასტრონომიულმა კვლევებმა გამოავლინა, რომ სამყაროს აქტივობა აისახება ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სრულ დიაპაზონში. დედამიწის ატმოსფერო, შთანთქავს რა გამოსხივების ძირითად ნაწილს, მხოლოდ მცირე „სარკმელს“ უტოვებს ხილული სინათლის სხივებს. ამიტომ ელექტრომაგნიტური გამოსხივების მთელ სპექტრში არსებული ინფორმაციის მისაღებად ხშირად აუცილებელია შესაბამისი აპარატურის კოსმოსში გატანა.

პირველ სურათზე მოყვანილია ელექტრომაგნიტური ტალღების სკალა სხვადასხვა ერთეულებში. ტალღებს ძირითადად ახასიათებენ მათი სიგრძით ან სიხშირით. ხანდახან მიუთითებენ ტალღების (უფრო ზუსტად კი მათი კვანტების) ენერგიას. სურათზე თვალსაჩინოებისთვის მოყვანილია სხვადასხვა ობიექტი, რომელთა ზომა დაახლოებით შესაბამისი ტალღის სიგრძის ტოლია.



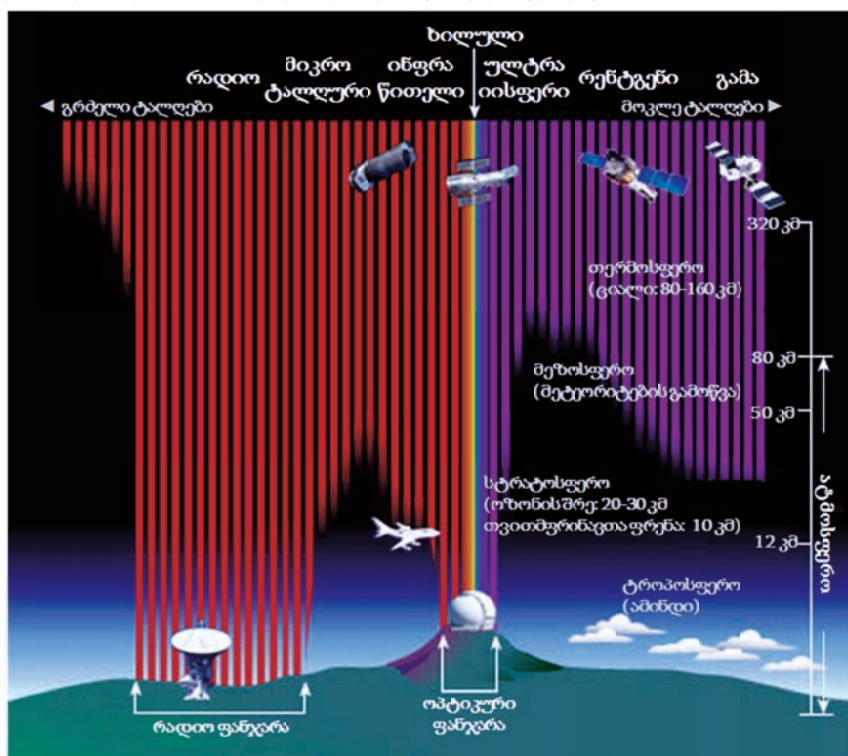
სურ. 1 ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სპექტრი

© NASA

ყურადღება მივაქციოთ იმ ფაქტს, თუ რამდენად მცირეა ტალღების ოპტიკური (ანუ ხილული სინათლის) დიაპაზონი და გავიხსენოთ, რომ XX საუკუნის 30-იან წლებამდე ასტრონომებს შეეძლოთ მხოლოდ ოპტიკური ხელსაწყოების გამოყენება. ხოლო ინფორმაცია, რომელსაც იძლევა ტალღების დანარჩენი, ბევრად უფრო ფართო დიაპაზონი, ხელმისაწვდომი გახდა მხოლოდ XX საუკუნის ტექნიკური პროგრესის შედეგად. ელექტრომაგნიტური გამოსხივების უმრავლეს სახეობას მკითხველი იცნობს

ყოველდღიური ცხოვრებიდან, უკიდურეს შემთხვევაში, მათზე რაიმე სმენია მაინც. ერთადერთი ნაკლებად ცნობილი გამოსხივების სახე ალბათ არის გამა-სხივები. ეს არის ყველაზე მაღალი ენერგიის გამოსხივება, რომლის წყაროები დედამიწაზე რადიოაქტიური ნივთიერებები და ელემენტარულ ნაწილაკთა ამაჩქარებლებია.

სურ. 2 კიდევ უფრო ნათელს ხდის თანამედროვე ასტრონომიული დაკვირვებებისთვის ტექნიკის განვითარების აუცილებლობას. დედამიწის ატმოსფერო ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებათა უმრავლესობისთვის შესანიშნავი შთანთქმელი გარემო გამოდგა და, ხილული სხივების გარდა, გამჭვირვალე მხოლოდ რადიო ტალღებისთვის აღმოჩნდა. მიკროტალღური, უკიდურესი სიხშირეების ინფრაწითელი და ულტრაიისფერი, რენტგენისა და გამა-დიაპაზონის ტალღების მისაღებად ობსერვატორიების კოსმოსში გაგზავნა გახდა აუცილებელი.



სურ. 2 ელექტრომაგნიტური გამოსხივება და დედამიწის ატმოსფერო  
© STCI/JHU/NASA

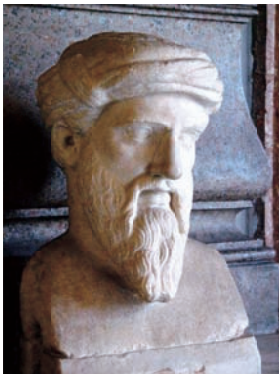
დედამიწის ატმოსფერო გადაულახავი დაბრკოლებაა კოსმოსიდან მომავალი კორპუსკულური გამოსხივების ერთი ნაწილისთვისაც. თუკი პოლარული ცილის გამომწვევი მზის ქარის დამუხტული ნაწილაკების სრბოლას თერმოსფეროს ატომებთან ურთიერთმოქმედება აჩერებს, მზიდან წამოსული პროტონები მეზოსფეროს ვერ სცდებიან. ატმოსფეროში შედარებით ღრმად – სტრატოსფეროში კოსმოსური სხივების ნაწილაკები აღწევენ და იქ ფართო ატმოსფერულ ღვარებს უდებენ დასაბამს.

ასტრონომიის დარგები, რომლებსაც ამ თავის მომდევნო პარაგრაფებში შევეხებით, ატარებს შესაბამისი გამოსხივების სახელებს. მეცნიერებისთვის მნიშვნელოვანია, რომ ერთი და იგივე მოვლენა თუ ობიექტის თვისება შესწავლილ იქნეს სხვადასხვა მეთოდის

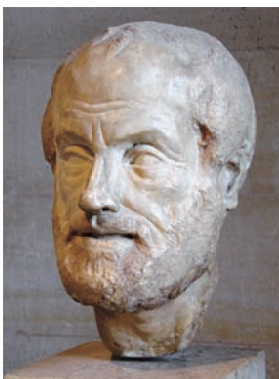
გამოყენებით. მხოლოდ შედეგების თანხვედრამ შეიძლება დაადასტუროს კვლევისას მიღებული დასკვნების სისწორე. ამიტომ გასაკვირი არაა, რომ ასტრონომიის სხვადასხვა მიმართულება ხშირად ერთსა და იმავე ობიექტს სწავლობს. წიგნის მეოთხე თავის გაცნობისას დარწმუნდებით კვლევის სხვადასხვა მეთოდების გამოყენების მნიშვნელობაში.

## 1.2 ოპტიკური ასტრონომია

ოპტიკური ასტრონომია მეცნიერების ერთ-ერთი ყველაზე ძველი დარგია. ჩვენს წელთაღრიცხვამდე რამდენიმე ათასი წლის წინ ციურ სხეულებს აკვირდებოდნენ ბაბილონში, ეგვიპტეში, ჩინეთსა და ინდოეთში. უძველესი დროიდანვე ადამიანთა წარმოდგენამ ვარსკვლავები გააერთიანა თანავარსკვლავედებში, შეიქმნა ვარსკვლავთა და თანავარსკვლავედთა მდებარეობების ამსახველი პირველი ცხრილები, აღმოჩენილი იქნა ვარსკვლავებისა და პლანეტების მოძრაობებს შორის განსხვავება. თუმცა ამ განსხვავებისა და საერთოდ ციური სხეულების მოძრაობის სხვადასხვა ასპექტების ახსნის ჩვენამდე მოღწეულ პირველ მცდელობას ძველი საბერძნეთის მეცნიერების ნაშრომებში ვხვდებით. ჩვენ გვინდა ადრეული ასტრონომიის ძირითადი ეტაპები მიმოვიხილოთ იმ დროს მოღვაწე მეცნიერების ღვაწლის აღნიშვნით.



სურ. 3 პითაგორე (582-507 ძვ. წ.)  
პითაგორე და მისი მიმდევრები ფიქრობდნენ, რომ ყველაფრის წარმოდგენა, აბსტრაქტული იდეების ჩათვლით, რიცხვითი ფორმით იყო შესაძლებელი. პითაგორეს მათემატიკური ნაშრომები ასტრონომიისთვისაც გამოდგა სასარგებლო. მან ასევე პირველმა გამოთქვა მოსაზრება, რომ დედამიწა წარმოადგენს სფეროს.



სურ. 4 არისტოტელე (384-322 ძვ. წ.)  
არისტოტელე იყო ბერძენი ფილოსოფოსი და მეცნიერი, პლატონის მოწაფე და ალექსანდრე მაკედონელის აღმზრდელი. მისი ნაშრომები არ შემონახულა, თუმცა ვარაუდობენ, რომ მას ჩამოყალიბებული ჰქონდა სამყაროს აგებულების გეოცენტრული მოდელი.

© Eric Gaba





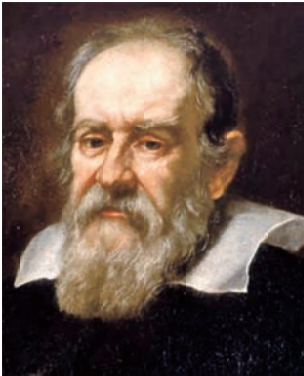
სურ. 5 პტოლემე (დაახლოებით 87-168 წწ.)  
 პტოლემე სამყაროს ჩვენამდე მოღწეული  
 პირველი მოდელის შემქმნელია. ამ მოდელის  
 თანახმად სამყარო წარმოადგენდა  
 კონცენტრული სფეროების რთულ სისტემას,  
 რომლის შუაგულში დედამიწა მდებარეობდა.  
 ვინაიდან მზის, მთვარისა და პლანეტების  
 სფეროთა ცენტრები ამ მოდელში  
 წანაცვლებული იყო დედამიწის მიმართ, ციურ  
 თაღზე დედამიწის გარშემო პლანეტების  
 არათანაბარი ხილული მოძრაობა შედარებით  
 კარგად აღიწერებოდა.



სურ. 6 ნიკოლოზ კოპერნიკი (1473-1543 წწ.)  
 პოლონელი მეცნიერი ნიკოლოზ კოპერნიკი  
 არის სამყაროს პირველი ჰელიოცენტრული  
 მოდელის ავტორი. ამ მოდელის თანახმად  
 პლანეტები მზის გარშემო ბრუნავენ. ცნობილია,  
 რომ კოპერნიკი ფრიად ეწინააღმდეგებოდა  
 თავისი ნაშრომის გამოქვეყნებას, თუმცა მას  
 ცხოვრების 40-ზე მეტი წელი მოანდომა, და  
 ნაბეჭდი სახით ის მხოლოდ სიკვდილის დღეს  
 იხილა.



სურ. 7 ჯორდანო ბრუნო (1548-1600 წწ.)  
 იტალიელი მოაზროვნე ჯორდანო ბრუნო  
 კოპერნიკის ჰელიოცენტრული მოდელის  
 აქტიური თანამდგომი გახლდათ. იგი მრავალი  
 „კოსმოლოგიური“ იდეის ავტორი იყო,  
 როგორებიცაა სამყაროს უსასრულობა, სხვა  
 მზეებისა და მათ გარშემო მბრუნავი  
 დასახლებული პლანეტების არსებობა,  
 პტოლემეს სფეროების არარეალობა. ესოდენ  
 გაბედულმა მოსაზრებებმა საბოლოოდ მისი  
 სიკვდილით დასჯა განაპირობა.



სურ. 8      გალილეო გალილეი (1564-1642 წწ.)  
იტალიელი მეცნიერი გალილეო გალილეი იყო  
კოპერნიკის მიმდევარი. მან პირველად  
გამოიყენა ტელესკოპი ციური სხეულების  
შესასწავლად და შექმნა ახალი ტიპის  
ტელესკოპი – რეფრაქტორი. მან პირველმა  
აღწერა მთები მთვარეზე, ირმის ნახტომის  
ვარსკვლავები და იუპიტერის გარშემო  
მზრუნავი ოთხი თანამგზავრი.



სურ. 9      იოჰანეს კეპლერი (1571-1630 წწ.)  
გერმანელმა ასტრონომმა და მათემატიკოსმა  
იოჰანეს კეპლერმა აღმოაჩინა პლანეტების  
მოძრაობის სამი კანონი. პირველი კანონის  
თანახმად პლანეტის ტრაექტორია წარმოადგენს  
არა წრეს, არამედ ელიფსს, რომლის ერთ-ერთ  
ფოკუსში მზე მდებარეობს. ამდენად პლანეტასა  
და მზეს შორის მანძილი არ არის მუდმივი.  
მეორე კანონით მათემატიკურად მტკიცდება,  
რომ პლანეტა მით უფრო სწრაფად მოძრაობს,  
რაც უფრო ახლოსაა მზესთან. ხოლო მესამე  
კანონი აღწერს პლანეტის მზის გარშემო  
ბრუნვის პერიოდსა და მზემდე მის საშუალო  
მანძილს შორის თანაფარდობას.



სურ. 10      ისააკ ნიუტონი (1642-1727 წწ.)  
ინგლისელი მეცნიერი ისააკ ნიუტონი არის  
ყველა დროის ერთ-ერთი გამორჩეული  
მეცნიერი. ასტრონომიის დარგში იგი ცნობილია  
როგორც ახალი ტიპის ტელესკოპის –  
რეფლექტორის გამომგონებელი, რითაც მან  
ლონდონის სამეფო საზოგადოებაში  
დაიმკვიდრა ადგილი. ფიზიკის სხვა  
დარგებიდან აღსანიშნავია მისი გრავიტაციის  
თეორია და მექანიკის სამი კანონი.





სურ. 11 ედმონდ ჰალი (1656-1742 წწ.)

ჰალი იყო ნიუტონის მეგობარი და მიმდევარი. იგი ცნობილია თავისი შრომებით კომეტების შესახებ. მან პირველმა გამოთქვა მოსაზრება, რომ ობიექტები, რომლებსაც დედამიწიდან 76 წლის ინტერვალით აკვირდებოდნენ, სინამდვილეში უნდა ყოფილიყო ერთი და იგივე კომეტა, რომელიც მოძრაობდა მზის გარშემო ძალზე გაწევილ ორბიტაზე. ეს კომეტა, რომლის მორიგი გამოჩენა მან იწინასწარმეტყველა, ჰალეის კომეტის სახელითაა ცნობილი.

საზოგადოდ, კომეტები ძალიან საინტერესო ობიექტებია, ვინაიდან მათი საშუალებით მზის სისტემის ფიზიკურ-ქიმიური მახასიათებლების დადგენაა შესაძლებელი. დღესდღეობით მრავალი კომეტა აღმოჩენილი, მაგალითად, უიფლ-ფედკე-თევზადის, ფეის, ჩურიუმოვ-გერასიმენკოს, თუთოლისა და სხვ. მაგრამ აღსანიშნავია, რომ პირველი სწორედ ჰალი ჩაწვდა ამ ციური ობიექტების სისტემატური გამოჩენის ბუნებას. თუმცა პერიოდული კომეტების გარდა, რომლებიც მოძრაობენ ელიფსურ ორბიტებზე გარკვეული კანონზომიერების მიხედვით, არსებობენ ასევე პარაბოლურ ორბიტაზე მოძრავი კომეტები, რომლებიც მხოლოდ ერთხელ გამოჩნდებიან და შემდეგ თავის სრბოლას აგრძელებენ სამყაროს უსასრულო სივრცეებში.

როგორც წესი, კომეტა შედგება ბირთვისგან, რომელსაც გარშემო მტვროვან-აიროვანი ნათელი ნისლოვანი გარსი, ე.წ. კომა აკრავს. მზესთან მიახლოებისას კომეტებს მკრთალი ნათელი ზოლის სახით კუდი წარმოექმნებათ. იგი სინათლის წნევისა და მზის ქარის ზემოქმედებით ყოველთვის მზის საწინააღმდეგო მხარესაა მიმართული. კომეტის კუდი შედგება მტვროვან-აიროვანი ნაზავისგან, რომელსაც მკვეთრი საზღვარი არ გააჩნია. ის იმდენად გაიშვიათებული ნივთიერებისგანაა შემდგარი, რომ მის მიღმა ვარსკვლავები მოჩანს. კომეტის კუდის შემადგენელი აირი მზის ულტრაიისფერი გამოსხივების და მზის ზედაპირიდან გამოფრქვეული ნაწილაკების ნაკადის ზეგავლენით იონიზაციას განიცდის, ხოლო მტვრის ნაწილაკები გააბზევენ მზის სინათლეს. სწორედ ამიტომ ვხედავთ ჩვენ კომეტების კუდს.

კაცობრიობის დიდ მიღწევად უნდა ჩაითვალოს 2014 წლის ნოემბერში, ევროპული კოსმოსური სააგენტოს (ESA) 2004 წელს დაწყებული მისია Rosetta-ს ფარგლებში, ჩურიუმოვ-გერასიმენკოს კომეტის ზედაპირზე დასაშვები მოდულის Philae-ს დასმა.

მზის სისტემის ჰიპოთეტური სფერული არე, რომელსაც ოორტის ღრუბელს უწოდებენ, გრძელპერიოდიანი კომეტების წყაროა. ოორტის ღრუბლის არსებობა მეოცე საუკუნის 50-იან წლებში იყო შემოთავაზებული ჰოლანდიელი ასტრონომის იან ჰენდრიკ ოორტის (Jan Hendrik Oort, 1900-1999) მიერ. თუმცა ინსტრუმენტულად ოორტის ღრუბელი ჯერ არ არის დაკვირვებული, მრავალი ირიბი ფაქტი მიუთითებს მის არსებობაზე. ამ სფერული არის გარე ნაწილი მზის სისტემას შემოსაზღვრავს, ხოლო ცენტრში მზე მდებარეობს. ზოგიერთ მეცნიერს მიაჩნია, რომ ღრუბლის კიდეები მზიდან 50 ათასი ასტრონომიული ერთეულით არის დაშორებული, ზოგი კი თვლის, რომ ეს მანძილი 100 ან 200 ათასი ასტრონომიული ერთეულის ტოლია (ასტრონომიული ერთეული შეესაბამება მზესა და დედამიწას შორის საშუალო მანძილს – 150 მლნ. კმ-ს).

ამ მოკლე მიმოხილვაში ჩვენ შევეხეთ ადრეული ეპოქების ოპტიკური ასტრონომიის რამდენიმე ძირითად მიღწევას. შემდგომი წლების ოპტიკური ასტრონომიის აღმოჩენების რიცხვი იმდენად დიდია, რომ მათი ჩამოთვლაც კი შეუძლებელია. მხოლოდ აღვნიშნავთ, რომ ამჟამად ცნობილია მილიარდობით გალაქტიკების არსებობის შესახებ, აღმოჩენილია კოსმოსური ობიექტების მრავალი ახალი ტიპი: ეგზოპლანეტები, კვაზარები, პულსარები და ასე შემდეგ.

მიუხედავად მრავალწლიანი ისტორიისა, ოპტიკურ ასტრონომიას ჯერ არ დაუპარგავს თავისი მნიშვნელობა. ის უკვე გასცდა ატმოსფეროს საზღვრებს და კოსმოსური „სიმაღლეებიდან“ აწარმოებს დაკვირვებებს. დედამიწაზე განლაგებული ანალოგიური კლასის ტელესკოპთან შედარებით, კოსმოსურ ოპტიკურ ტელესკოპს შეუძლია გაარჩიოს 10-ჯერ უფრო მკრთალი ციური ობიექტები. ეს დაკავშირებულია იმასთან, რომ ატმოსფეროში მიმდინარე სხვადასხვა მოვლენები ამახინჯებს გამოსახულებას და ზღუდავს დედამიწის ზედაპირზე განთავსებული ხელსაწყოების გარჩევისუნარიანობას.

### 1.3 ინფრაწითელი და ულტრაიისფერი ასტრონომია

#### ინფრაწითელი გამოსხივება

ეგრეთ წოდებული „ცივი“ ასტრონომიული ობიექტების შესწავლა შესაძლებელია მათგან მოსული ინფრაწითელი გამოსხივების საშუალებით. ცივს უწოდებენ ციურ სხეულებს, რომელთა ტემპერატურა რამდენიმე ასეულ კელვინზე დაბალია. ასეთი ობიექტები მრავლადაა როგორც ახლო (ზოგიერთი პლანეტა), ისე შორეულ კოსმოსში (მაგალითად, ვარსკვლავთშორისი სივრცის მტვერი).

დაკვირვებები ინფრაწითელ დიაპაზონში იძლევა ინფორმაციას ჩვენი გალაქტიკის ცენტრალური არის შესახებ, რომელიც, დიდი რაოდენობის შთანთქმელი მტვრის არსებობის გამო, უხილავია ოპტიკურ დიაპაზონში. ინფრაწითელი გამოსხივება განსაკუთრებით ინტენსიურია კომპაქტური მკვრივი ბირთვის მქონე გალაქტიკებისთვის. ის ასევე დიდ ინფორმაციას იძლევა მზის სისტემის პლანეტებისა და სხვა ვარსკვლავთა პლანეტების – ეგზოპლანეტების – ატმოსფეროების შესახებ.

ამერიკის კოსმოსური სააგენტო (NASA) აწარმოებს პროექტს "დიდი ობსერვატორიების პროგრამა" (Great Observatories Program), რომლის მიზანია გალაქტიკების, ვარსკვლავებისა და პლანეტების ჩამოყალიბების მექანიზმების შესწავლა. სხვადასხვა თანამგზავრებთან ერთად პროექტში ჩართულია ინფრაწითელ დიაპაზონში მომუშავე ორბიტული ტელესკოპი Spitzer-ი (SST, იხ. დანართი V). ეს არის ერთ-ერთი ყველაზე დიდი ინფრაწითელი ტელესკოპი სარკის დიამეტრით 0.85 მ.

ევროპული კოსმოსური სააგენტოს თანამგზავრზე ISO (Infrared Space Observatory) დამონტაჟებულია ინფრაწითელი კამერა და გრძელტალღოვანი სპექტრომეტრი. ინფრაწითელი გამოსხივების საშუალებით, ზემოთ ჩამოთვლილი ციური ობიექტების გარდა, შეისწავლება კომეტები და საპლანეტათაშორისო სივრცეში არსებული მტვერი.

2009 წლის მაისში ESA-მ გაუშვა ინფრაწითელი სპექტრის დიაპაზონის კოსმოსური ობსერვატორია Herschel-ი, რომელსაც სახელი დაარქვეს ინფრაწითელი გამოსხივების აღმოჩენის უილიამ ჰერშელის (Friedrich Wilhelm Herschel, 1738-1822) პატივსაცემად. Herschel-ის შესაძლებლობები ბევრად აღემატებოდა მის წინამორბედებს. ობსერვატორიის ერთ-ერთი ამოცანა ეგზოპლანეტების აღმოჩენა და შესწავლა იყო (იხ. დანართი V).



სურ. 12 ESA-ს ინფრაწითელი  
კოსმოსური ობსერვატორია Herschel-ი,  
რომლის ტელესკოპს გააჩნია დღეისათვის  
უდიდესი სარკე, დიამეტრით 3.5 მ  
© ESA/AOES Medialab (Background NASA/ESA/STScI)

ინფრაწითელ დიაპაზონში მომუშავე თანამგზავრებიდან ასევე აღსანიშნავია შვედური ODIN-ი (ოდინი – სკანდინავიური მითოლოგიის მთავარი ღმერთია). მასზე განთავსებულია აკუსტიკურ-ოპტიკური სპექტრომეტრი, რომელიც ვარსკვლავთშორის სივრცეში მიმდინარე ფიზიკურ-ქიმიური მოვლენების შესწავლის საშუალებას იძლევა.

დედამიწის ატმოსფერო გამჭვირვალე აღმოჩნდა ინფრაწითელი გამოსხივების სიხშირეთა გარკვეული ინტერვალებისთვის, რომლებსაც ინფრაწითელი ფანჯრები ეწოდა. ერთ-ერთი ასეთი ფანჯარა ხილული სინათლის ტალღის სიგრძეთა უშუალო გაგრძელებაა: 0.65-1 მკმ. მაგრამ არსებობს ფანჯრები უფრო გრძელი ტალღებით ე.წ. ახლო (5 მკმ-მდე), შუა (25 მკმ-მდე) და შორეული (450 მკმ-მდე) ინფრაწითელი ფანჯრები. სიხშირეთა ამ ინტერვალებში ციური ობიექტების შესწავლა შესაძლებელია დედამიწის ზედაპირზე განლაგებული ტელესკოპების საშუალებითაც.

ატმოსფერული ორთქლით ინფრაწითელი გამოსხივების შთანთქმის შესამცირებლად დანადგარები განთავსებულია მაღალმთიან პლატოებზე, რომლებიც მშრალი ჰავით ხასიათდება. თვით დეტექტორების მიერ წარმოქმნილი სითბური ფონის მინიმუმამდე დასაყვანად, მათ უკიდურესად დაბალ ტემპერატურებამდე აცივებენ. შესასწავლი ციური ობიექტის ინფრაწითელ გამოსხივებასთან ერთად რეგისტრირდება ატმოსფერული წარმოშობის ინფრაწითელი ფონიც, რომელსაც შემდგომ ითვალისწინებენ მონაცემთა დამუშავებისას. მიუხედავად გარემომცველი პირობებით გამოწვეული სირთულეებისა, დედამიწის ზედაპირზე განლაგებულ ინფრაწითელი გამოსხივების შემსწავლელ დანადგარებს გარკვეული უპირატესობა გააჩნია კოსმოსური მისიების დეტექტორებთან შედარებით. ესაა ტელესკოპების სარკეების დიდი ზომები, რომელთა საშუალებით შესაძლებელია უკეთესი ხარისხის გამოსახულების მიღება.

დედამიწის ზედაპირზე განლაგებული ინფრაწითელ დიაპაზონში მომუშავე დანადგარების მაგალითებად გამოდგება 8.1 მ დიამეტრის სარკეების მქონე ტელესკოპების წყვილი Gemini. ჩრდილო Gemini შედის ჰავაის Mauna Kea-ს მთაზე განლაგებული ობსერვატორიების კომპლექსში (ზღვის დონიდან 4213 მ), ხოლო სამხრეთ Gemini მიეკუთვნება ჩილეს Cerro Pachón-ის ობსერვატორიების კომპლექსს (2722 მ). შორეული ინფრაწითელი ფანჯრის დიაპაზონში მოქმედებს Mauna Kea-ს ობსერვატორიის კიდევ ერთი ტელესკოპი – JCMT (James Clerk Maxwell Telescope), რომლის სარკის დიამეტრი 15 მეტრია.

ამ პარაგრაფის ბოლოს გვინდა მოვიყვანოთ ინფრაწითელი ასტრონომიის კიდევ ერთი ამოცანა. კოსმოსური ობიექტების უმრავლესობა დედამიწას ძალიან დიდი სიჩქარით შორდება. ამიტომ, დოპლერის ეფექტის გამო, მათ მიერ ოპტიკურ

დიაპაზონში გამოსხივებული სინათლე ხშირად გადაინაცვლებს ინფრაწითელ უბანში. ცხადია, რომ ამ გამოსხივების შესწავლაც ხდება ინფრაწითელი ასტრონომიის მეთოდებითა და ხელსაწყოებით.

*შენიშვნა: ნებისმიერი ობიექტის მოძრაობისას დამკვირვებლის მიერ მისი გამოსხივების სიხშირის აღქმა იცვლება. როცა ობიექტი დამკვირვებელს შორდება, სიხშირე მცირდება (წითელი წანაცვლება), ხოლო როცა უახლოვდება – სიხშირე იზრდება (იისფერი წანაცვლება). ამ მოვლენას დოპლერის ეფექტს უწოდებენ, ვინაიდან იგი ავსტრიელმა მათემატიკოსმა და ფიზიკოსმა ქრისტიან დოპლერმა (Christian Doppler, 1803-1853) აღმოაჩინა.*

### **ულტრაიისფერი გამოსხივება**

ვარსკვლავები ენერგიის დიდ რაოდენობას ულტრაიისფერ დიაპაზონში ასხივებენ. ცნობილია, რომ ვარსკვლავები სხვადასხვა თაობებს მიეკუთვნება. ყოველი თაობა იქმნება წინა თაობის ვარსკვლავების აფეთქების შედეგად გამოტყორცნილი ნივთიერებისგან. ამიტომ ვარსკვლავთა ევოლუციის შესასწავლად მნიშვნელოვანია მათი გარემომცველი სივრცის ქიმიური შემადგენლობის ცოდნა. ამ არის სპექტრული მახასიათებლები კი ულტრაიისფერ დიაპაზონშიც ძვეს.

ვარსკვლავთშორისი სივრცე შეიცავს გაიშვიათებულ აირსა და მტვერს, რომელთა სიმკვრივე ( $10^{-4} - 10^6$  ნაწილაკი/სმ<sup>3</sup>) მრავალი რიგით ჩამოუვარდება დედამიწის პირობებისთვის დამახასიათებელ და ჩვენთვის ჩვეულ ნივთიერებათა სიმკვრივეებს (მაგალითად,  $10^{22}$  მოლეკულა/სმ<sup>3</sup> წყალში). ვარსკვლავთშორისი აირი იონიზებულ, ატომურ ან მოლეკულურ მდგომარეობაშია. მცირე სიმკვრივეების მიუხედავად ვარსკვლავთშორისი სივრცის აირი და მტვერი წარმოქმნიან უზარმაზარი ზომების „ღრუბლებს“ – ნებულებს. ზოგიერთი ნებულა გარს ერტყმის ახალგაზრდა ვარსკვლავებს, რომელთა გამოსხივება ულტრაიისფერ დიაპაზონში კულმინირებს. ასეთი ნებულების აირი, შთანთქავს რა ენერგეტიკულ ულტრაიისფერ სხივებს, განიცდის იონიზაციას, ხოლო შემდგომში ელექტრონებთან რეკომბინაციის შედეგად ასხივებს ოპტიკურ დიაპაზონში.

ვარსკვლავთშორისი სივრცის წარმონაქმნებს მიეკუთვნება აგრეთვე ბნელი მტვრის ღრუბლები. ასეთი ნებულები (ჯერ კიდევ) არ შეიცავენ მძიმე მასიურ ვარსკვლავებს. მათ შესაძლოა, თითქმის მთლიანად შთანთქან ხილული დიაპაზონის გამოსხივება და რადიო დიაპაზონის ტალღები გამოასხივონ. გარდა ამისა, მტვრის ნებულები მათზე დაცემული ხილული გამოსხივების გაბნევის გამო მოლურჯო იერს იღებენ, ვინაიდან მოკლე ცისფერი ტალღები უფრო ადვილად განიბნევა, ვიდრე გრძელი წითელი ტალღები. (ცის ფერს გაბნევის იგივე მექანიზმი იწვევს.)

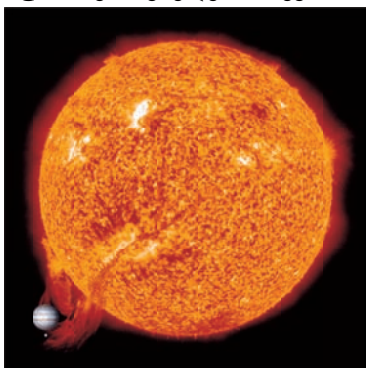
ულტრაიისფერი ასტრონომიის ერთ-ერთი აღმოჩენაა ვარსკვლავთშორისი სივრცეში ე.წ. „ბუშტების“ არსებობა. ასეთი ბუშტების ცენტრში ცხელი მასიური ვარსკვლავებია, რომლებიც ულტრაიისფერ დიაპაზონში ასხივებენ. ბუშტების პერიფერია კი ცივია და რადიოტალღების დიაპაზონში დაიმზირება. ჩვენი მზე განლაგებულია 100 პარსეკის ( $3 \times 10^{14}$  კმ) ზომის ერთ-ერთ ასეთ ბუშტში, რომელიც სავარაუდოდ ზეახალი ვარსკვლავის აფეთქების შედეგად გაჩნდა.

დედამიწის ატმოსფეროს მიერ შთანთქმის გამო ულტრაიისფერი გამოსხივება პრაქტიკულად ვერ აღწევს დედამიწის ზედაპირამდე. ამიტომ ის რეგისტრირდება მხოლოდ ხელოვნურ თანამგზავრებზე განთავსებული ხელსაწყოების საშუალებით.



ქვემოთ მოყვანილია ინფორმაცია ულტრაიისფერ დიაპაზონში მოქმედი რიგი თანამგზავრების შესახებ.

თანამგზავრი SOHO (Solar and Heliospheric Observatory, ESA) აფიქსირებს მზის გამოსხივების სხვადასხვა კომპონენტს, მზის სიღრმისეული ფენების რადიაციის ჩათვლით. ეს საშუალებას იძლევა, შესწავლილ იქნას ვარსკვლავთა სხვადასხვა ფენებს შორის ურთიერთქმედების მექანიზმები.



სურ. 13 მარცხენა ქვედა კუთხეში ჩანს მზიდან ამოტყორცნილი პროტუბერანცი – გავარვარებული გაზების მნათი წარმონაქმნი, რომელიც შეინიშნება შვერილის სახით მზის დისკოს კიდეზე. (თვალსაჩინოებისთვის ზომების აღსაქმელად შედარებულია იუპიტერსა და დედამიწას)  
© SOHO

ფრანგული თანამგზავრის COROT (COncvection ROTation and planetary Transits) საშუალებით მეცნიერები სწავლობენ ვარსკვლავთა შიდა სტრუქტურას ვარსკვლავური სეისმოლოგიის მეთოდით. თანამგზავრის კიდევ ერთი ამოცანაა ეგზოპლანეტების აღმოჩენა და შესწავლა. მისი მეშვეობით უკვე ნაპოვნია რამდენიმე ასეული ეგზოპლანეტა.

NASA-ს თანამგზავრი GALEX (Galaxy Evolution Explorer) კოსმოსში გაყვანილი იქნა 2003 წლის აპრილში. მასზე განთავსებულია ულტრაიისფერი გამოსხივების მიმღები კომპლექსური აპარატურა.



სურ. 14 NASA-ს ულტრაიისფერი კოსმოსური ტელესკოპი GALEX  
© GALEX NASA/JPL-Caltech

GALEX-ის საშუალებით მთელი რიგი მოულოდნელი ფაქტია აღმოჩენილი. მაგალითად, გაირკვა, რომ ელიფსური გალაქტიკები, რომლებიც ოპტიკური დიაპაზონის მონაცემებზე დაყრდნობით ყველაზე ხანდაზმულად ითვლებოდა, შეიცავს დიდი რაოდენობით ახალგაზრდა ვარსკვლავებს. ამის დასტურია მათი გამოსხივება ულტრაიისფერ დიაპაზონში, რომელიც მიუთითებს, რომ მათ წიაღში არ არის ძველი ვარსკვლავებისთვის დამახასიათებელი მძიმე ქიმიური ელემენტები. ცხადია, რომ ამ აღმოჩენამ გარკვეულწილად შეცვალა ასტრონომების წარმოდგენა ვარსკვლავებისა და გალაქტიკების ევოლუციის შესახებ.

## 1.4 რადიოასტრონომია

მეცნიერებაში ხშირად ხდება, რომ რაიმე მოვლენის შესწავლას მოჰყვება მოულოდნელი აღმოჩენა. ასე იყო კოსმოსური რადიოგამოსხივების შემთხვევაშიც. კომპანიამ Bell Telefon Laboratories თავის თანამშრომელს კარლ იანსკის (Karl Guthe Jansky, 1905-1950) დაავალა ტრანსატლანტიკური რადიოკავშირის განხორციელების შესაძლებლობის შესწავლა. იანსკიმ ააგო 14.5 მეტრის ტალღებზე მომუშავე ანტენა, რომლის ბრუნვით შესაძლებელი იყო მიღებული სიგნალის მიმართულების დადგენა. ელვის მიერ გამოწვეულ რადიოხარვეზებს შორის მან აღმოაჩინა მუდმივი შიშინი (ხმაური). ერთწლიანი კვლევის შედეგად იანსკი მივიდა დასკვნამდე, რომ ამ ხმაურის წყარო დედამიწის ატმოსფეროს გარედან მოსული გამოსხივებაა. ამ აღმოჩენის შესახებ ფართო საზოგადოებამ შეიტყო New York Times-ში 1933 წელს გამოქვეყნებული პოპულარული სამეცნიერო ნარკვევიდან. სამწუხაროდ, იანსკი იძულებული იყო ამ მიმართულებით სამუშაოები შეეწყვიტა, რადგან მისი ლაბორატორია სამეცნიერო კვლევებით არ იყო დაინტერესებული. მიუხედავად ამისა, იანსკის ხშირად რადიოასტრონომიის მამად მოიხსენიებენ.

1957 წელს კოსმოსური რადიოგამოსხივებით დაინტერესდა ასტრონომი გროტე რებერი (Grote Reber, 1911-2002), რომელმაც წარმატებით გააგრძელა იანსკის კვლევები. რებერმა აღმოაჩინა, რომ იანსკის რადიოგამოსხივების ინტენსივობა მცირდება სიხშირის ზრდასთან ერთად, რაც ეწინააღმდეგება ცხელი სხეულების (მაგალითად, მზის) სითბური გამოსხივების თეორიას. მან ასევე შეამჩნია, რომ გამოსხივების პერიოდულობა ემთხვევა არა მზისმიერ დღე-ღამეს (24 სთ), არამედ ვარსკვლავიერ დღე-ღამეს (23 სთ 56 წთ). ამ მონაცემებზე დაყრდნობით რებერმა დაასკვნა, რომ რადიოგამოსხივების წყაროა ირმის ნახტომი და არა მზე, როგორც მანამდე ეგონათ.

მეოცე საუკუნის 50-იან წლებში ვიტალი გინზბურგმა (Виталий Гинзбург, 1916-2009) შეიმუშავა სინქროტრონული გამოსხივების თეორია, რომელმაც აღწერა კოსმოსური რადიაციის სპექტრი. სინქროტრონული გამოსხივება ჩნდება მაგნიტური ველის ზემოქმედებით ელექტრონების გამრუდებულ ტრაექტორიაზე მოძრაობის შედეგად. ჩვენს გალაქტიკაში უზვადაა მაგნიტური ველები და მაღალი ენერგიის მქონე ნაწილაკები, მათ შორის – ელექტრონები. სწორედ ელექტრონების სინქროტრონულ გამოსხივებას ზომავდნენ იანსკი და რებერი.

აღმოჩნდა, რომ დედამიწის ატმოსფერო ძლიერ ამახინჯებს კოსმოსიდან მოსულ რადიოსიგნალებს. 20 სმ-ზე მეტი ტალღის სიგრძის მქონე რადიოსიგნალი „ციმციმებს“, 1 სმ-ზე ნაკლები და 10 მ-ზე მეტი ტალღის სიგრძეებისთვის კი ატმოსფერო პრაქტიკულად გაუმჭვირვალეა. ასე რომ დედამიწის ზედაპირზე განლაგებული რადიოტელესკოპები ციური სხეულების რადიოგამოსხივების შესასწავლად მხოლოდ ძალიან მცირე, დაახლოებით 10 სმ-დან 20 სმ-მდე დიაპაზონში შეიძლება იქნას გამოყენებული. ამ არეში გამოსახულების ხარისხი დამოკიდებულია მხოლოდ რადიოტელესკოპის ზომაზე, ანუ მარტივად, გამოსხივების მიმღები თევზის დიამეტრზე. შესაბამისად, თანამედროვე რადიოტელესკოპები გიგანტური ზომებით გამოირჩევა (იხ. ამ წიგნის შემდეგი თავი).

რადიოასტრონომიის განვითარების შედეგად მეცნიერებს გაუჩნდათ ახალი „თვალეები“, მათ წინაშე წარსდგა რადიო-სამყარო, რომელიც ხილულთან შედარებით არანაკლებ მრავალფეროვანი გამოდგა. ასე მაგალითად, აღმოჩენილი იქნა კოსმოსური ობიექტების ახალი კლასი – რადიოგალაქტიკები.

ახლა გვინდა შევხვთ რადიოასტრონომიის კიდევ ორ შთამბეჭდავ აღმოჩენას.

Bell Telefon Laboratories კიდევ ორმა თანამშრომელმა, 1978 წლის ნობელის პრემიის ლაურეატებმა არნო პენზიასმა (Arno Allan Penzias, 1933) და რობერტ უილსონმა (Robert Woodrow Wilson, 1936), 1964 წელს აღმოაჩინეს იზოტროპული მიკროტალღური გამოსხივება ტემპერატურით 2.7 კელვინი. ასეთი გამოსხივება, რომელსაც უწოდეს რელიქტური მიკროტალღური ფონი, ნაწინასწარმეტყველები იყო გიორგი გამოვის (Георгий Гамов, 1904-1968) მიერ ჯერ კიდევ მეოცე საუკუნის 40-იან წლებში, გაფართოებადი ცხელი სამყაროს მოდელის ფარგლებში. იმის შესახებ, თუ რელიქტური ფონის შესწავლით რა ფუნდამენტური დასკვნების გამოტანა შეიძლება სამყაროს ევოლუციისა და მისი თვისებების შესახებ, მოთხრობილი იქნება ამ წიგნის მეოთხე თავში.

რადიოასტრონომიის ეკუთვნის კიდევ ერთი ფუნდამენტური აღმოჩენა. 1967 წელს ენტონი ჰიუიშის (Antony Hewish, 1924) მოწაფემ, Cavendish Laboratory-ის ასპირანტმა ჯოსელინ ბელმა (Jocelyn Bell, 1943) დააფიქსირა კოსმოსიდან მოღწეული პერიოდული რადიოსიგნალი. ამ სიგნალების წყარო – პულსარი, წარმოადგენს სწრაფად მბრუნავ ნეიტრონულ ვარსკვლავს, რომელსაც აქვს ძლიერი მაგნიტური ველი და ამიტომ ელექტრომაგნიტურ ტალღებს ასხივებს მხოლოდ პოლუსების მახლობელი არეებიდან. ამის გამო გამოსხივების ნაკადი დედამიწაზე რეგისტრირდება თანაბარ დროით ინტერვალში, რომელიც ემთხვევა პულსარის ბრუნვის პერიოდს. 1974 წელს პირველი პულსარის აღმოჩენისთვის ენტონი ჰიუიშს ნობელის პრემია მიენიჭა. დღეისთვის კი ცნობილია ორ ათასამდე რადიოპულსარი. უახლოესი მათგანი ჩვენგან დაახლოებით 390 სინათლის წლითაა დაშორებული. აღსანიშნავია, რომ არსებობს სხვა ტიპის პულსარებიც, რომელთა ციმციმი გამოწვეულია იმით, რომ ისინი შედიან ვარსკვლავთა ორჯერად სისტემებში, სადაც ერთ-ერთი ვარსკვლავი პერიოდულად ჩრდილავს თავის პარტნიორს მის გარშემო ბრუნვისას.

*მითითება: სამყაროში განვითარებული მრავალი მოვლენა უკავშირდება ნეიტრონულ ვარსკვლავებს. ამ პარაგრაფში უკვე ვახსენეთ მათი ერთ-ერთი ნაირსახეობა – პულსარები. შემდგომში ამ ობიექტებს ხშირად მივუბრუნდებით. ნეიტრონული ვარსკვლავი წარმოადგენს მასიური ვარსკვლავის ევოლუციის შესაძლო პროდუქტს, ნეიტრონებისგან შემდგარი ბირთვითა და მძიმე ატომებისგან შემდგარი თხელი ზედაპირული შრით. ნეიტრონულ ვარსკვლავს კოლოსალური სიმკვრივე ახასიათებს, მისი მასა მზის მასას მცირედ აღემატება, თუმცა რადიუსი მხოლოდ 10 კმ რიგისაა. პარაგრაფში 3.5 აღწერილია თუ რა პირობებში ჩნდება ნეიტრონული ვარსკვლავი.*

## 1.5 რენტგენული ასტრონომია

რენტგენული ასტრონომია არის დაკვირვებითი ასტრონომიის მიმართულება, რომელიც სწავლობს ციური ობიექტების მიერ გამოსხივებულ რენტგენის სხივებს. კოსმოსური ობიექტების უმრავლესობა რენტგენის სხივების წყაროს წარმოადგენს. ესენია აქტიური გალაქტიკები, ორმაგი ვარსკვლავები, შავი ხვრელების მახლობლად არსებული მატერია, ნეიტრონული ვარსკვლავები, პულსარები, ჩვეულებრივი და ზეახალი ვარსკვლავები, მათი ნარჩენები და სხვ.

რენტგენის სხივების ემისია დამახასიათებელია მხოლოდ იმ ობიექტებისთვის, რომლებიც შეიცავენ ძალიან მაღალი ტემპერატურის, ასეულობით მილიონი გრადუსის მქონე აირს. პირველად რენტგენის სხივების წყარო მოულოდნელად იქნა აღმოჩენილი

ღრიანკალის თანავარსკვლავედში, რომელიც მდებარეობს ირმის ნახტომის ცენტრის მიმართულებით. ამ ობიექტის გამოსხივება რენტგენულ დიაპაზონში ოპტიკურზე ათიათასჯერ მეტია, ხოლო მის მიერ ენერგიის კარგვა ასიათასჯერ აღემატება მზისას. ამ აღმოჩენისთვის მის ავტორს – რიკარდო ჯიაკონის (Riccardo Giacconi, 1931), 2002 წლის ნობელის პრემია მიენიჭა ფიზიკის დარგში.

დღესდღეობით დამზერილია რენტგენის გამოსხივების მრავალი ათასი წყარო. რენტგენის გამოსხივების წყაროა ჩვენი მზეც. ამის შესახებ მოგითხრობთ მომდევნო თავში.

რენტგენის გამოსხივების მიმართ განსაკუთრებული ინტერესი გამოწვეულია იმით, რომ მისთვის დამახასიათებელი მაღალი ენერგიის გამო კოსმოსურ სივრცეში გავრცელებისას რენტგენის სხივების ტრაექტორია ნაკლებად მრუდდება. მაშასადამე, სხივების ტრაექტორიის მიხედვით, შესაძლებელია რენტგენის გამოსხივების წყაროს მდებარეობის განსაზღვრა ცაზე. ამგვარად, რენტგენის გამოსხივება შავი ხვრელებისა და ნეიტრონული ვარსკვლავების „დანახვის“ საშუალებას იძლევა.

დედამიწის ატმოსფერო შთანთქავს რენტგენის სხივებს, ამიტომ მათი რეგისტრაციისთვის აპარატურა დიდ სიმაღლეზე უნდა იყოს ატანილი, ან გატანილ იქნას კოსმოსში. წარსულში ასეთ აპარატურას აეროსტატებსა და რაკეტებზე განათავსებდნენ. ამჟამად რენტგენული ასტრონომია კოსმოსური კვლევების შემადგენელი ნაწილია და შესაბამისი დეტექტორები ხელოვნურ თანამგზავრებზეა დამონტაჟებული.

### რაკეტები

დეტექტორები თავსდება რაკეტების წვეროზე და იგზავნებოდა კოსმოსში. ამ მეთოდის ნაკლი იყო მხედველობის არის შეზღუდულობა და ექსპოზიციის მცირე დრო – მხოლოდ რამდენიმე წუთი.



სურ. 15 პირველად რენტგენის სხივები ციური ობიექტებიდან რეგისტრირებული იქნა 1962 წელს, სურათზე გამოსახული მოწყობილობით, რომელიც რაკეტაზე Aerobee 150 იყო დამონტაჟებული

### აეროსტატები

აეროსტატების საშუალებით სამეცნიერო აპარატურა ააქვთ 35 კმ სიმაღლემდე და იქ რამდენიმე თვის განმავლობაში ამუშავებენ. ასეთი სიმაღლის მიუხედავად 35 კევ-ზე ნაკლები ენერგიის რენტგენის სხივები აეროსტატამდე ვერ აღწევს.

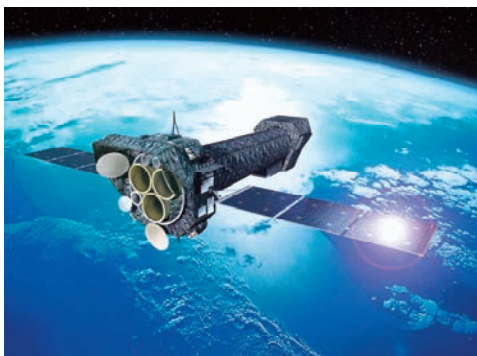




სურ. 16 აეროსტატი მაღალი გარჩევისუნარიანი სპექტრომეტრით HIREGS (High REsolution Gamma-ray and hard x-ray Spectrometer) სამხრეთ პოლუსის გარშემო ორი თვის განმავლობაში დაფრინავდა.

### ხელოვნური თანამგზავრები

ხელოვნურ თანამგზავრებს დეტექტორები დედამიწის ატმოსფეროს გარეთ გააქვთ. დანადგარების ექსპლუატაცია წლების განმავლობაში მიმდინარეობს.



სურ. 17 ESA-ს რენტგენული ობსერვატორია XMM-Newton (X-ray Multi-Mirror Mission) კოსმოსში ფუნქციონირებს 1999 წლიდან  
© ESA/D. Ducros

ამჟამად ორბიტაზე იმყოფება NASA-ს თანამგზავრი Chandra (იხ. დანართი V), ESA-ს რენტგენული ობსერვატორია XMM-Newton და სხვ.

## 1.6 გამა-ასტრონომია

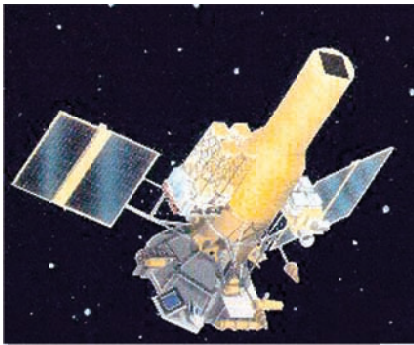
ჩვენს სამყაროში მიმდინარეობს მრავალი აქტიური პროცესი, როგორიცაა, მაგალითად, მოვლენები გალაქტიკების ბირთვებში, ან ზეახალი ვარსკვლავების აფეთქებები. ამ პროცესებისას გამოიყოფილება ნაწილაკები (ელექტრონები, პროტონები და სხვადასხვა ქიმიური ელემენტების ბირთვები), რომლებსაც კოსმოსურ სხივებს უწოდებენ. კოსმოსურ სივრცეში გადაადგილებისას ეს ნაწილაკები ურთიერთქმედებენ სამყაროში არსებულ მატერიასთან და ელექტრომაგნიტურ ველებთან. ამ ურთიერთქმედებების ერთ-ერთი შედეგია ძალიან მაღალი ენერგიის ელექტრომაგნიტური გამოსხივების – გამა-სხივების – გაჩენა. ზოგჯერ გამა-სხივები თავად ციურ ობიექტებში წარმოიქმნება.

გამა-სხივები წარმოადგენს ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ყველაზე ენერგიულ ნაწილს. მათი ენერგია ასიათასჯერ მაინც აღემატება ხილული სინათლის ენერგიას. ასეთი მაღალი ენერგიის მქონე გამოსხივების შესწავლა მეცნიერებს საშუალებას აძლევს აღმოაჩინონ ახალი მოვლენები, შეამოწმონ თავიანთი თეორიები და „ჩაატარონ“ ექსპერიმენტები, რომელთა განხორციელება დედამიწის პირობებში შეუძლებელია.

გამა-ასტრონომიის ერთ-ერთი საინტერესო შესაძლებლობა დაკავშირებულია იმასთან, რომ მაღალი ენერგიის გამა-სხივები თითქმის არ განიბნევა შემხვედრ

ნივთიერებაზე და წყაროდან დამკვირვებლამდე, რენტგენის სხივების მსგავსად, პრაქტიკულად სწორხაზოვნად ვრცელდება. ამიტომ გამა-ასტრონომია საშუალებას იძლევა ლოკალიზებული და შესწავლილი იქნას გამა-სხივების წყაროები, მათ შორის პულსარები, ნეიტრონული ვარსკვლავები, ვარსკვლავები ევოლუციის საწყის სტადიაში, შავი ხვრელების აკრეციული დისკოები და სხვ.

გამა-ასტრონომიის კიდევ ერთი ასპექტია ეგრეთ წოდებული გამა-აფეთქებების შესწავლა. გამა-აფეთქებები დაახლოებით დღეში ერთხელ ხდება. ისინი ცაზე იზოტროპულად არიან განაწილებული. ეს აფეთქებები წარმოადგენს სამყაროში ენერგიის ყველაზე დიდ გამონატყორცნებს, რომლებიც დღესდღეობითაა ცნობილი. აფეთქებების ხანგრძლივობა მერყეობს რამდენიმე მილიწამიდან რამდენიმე წამამდე, ხანდახან რამდენიმე წუთამდეც კი. გამა-აფეთქებები, ტიპიურ ზეახალ ვარსკვლავებთან შედარებით, რამდენიმე ასეულჯერ, ხოლო მზესთან შედარებით  $10^{15}$ -ჯერ უფრო კაშკაშაა. დაკვირვებების ანალიზის შედეგებზე დაყრდნობით გამა-აფეთქებების ერთ-ერთ სავარაუდო წყაროდ შავი ხვრელები ითვლება. თუმცა ახლახან ნაჩვენები იქნა, რომ ერთ-ერთი გამა-აფეთქება დაკავშირებული იყო ნეიტრონულ ვარსკვლავთან და არა შავ ხვრელთან.



სურ. 18 საბჭოთა თანამგზავრის GRANAT-ის ფერადი გამოსახულება, მასზე დამონტაჟებული გამა-ტელესკოპი SIGMA იკვლევს შავ ხვრელს, რომლის აკრეციის დისკოდან გამოდის მაღალი ენერგიის ნაწილაკთა ორი ჭავლი

გამა-აფეთქებების შემდეგ რამდენიმე თვის განმავლობაში დაიკვირვება ე.წ. ნარჩენი გამოსხივება, რომლის შესწავლით მეცნიერები იმედოვნებენ გამა-აფეთქებების ბუნების დადგენას.

## 1.7 ნეიტრინული ასტრონომია

აქამდე განვიხილავდით სამყაროს შესახებ ელექტრომაგნიტური ტალღების საშუალებით მოპოვებულ ინფორმაციას. საინტერესოა, რა ინფორმაციის მოწოდება შეუძლია კორპუსკულურ გამოსხივებას, ისეთს, როგორიცაა კოსმოსური სხივები? ჩვენ უკვე აღვნიშნეთ, რომ კოსმოსურ სხივებს უწოდებენ დედამიწაზე კოსმოსიდან დაცემული ნაწილაკების, მაგალითად, ატომების ბირთვებისა თუ პროტონების ნაკადს. დაწვრილებით მათ შესახებ მოგითხრობთ შემდეგ პარაგრაფში. ახლა კი აღვნიშნავთ, რომ გალაქტიკური და გალაქტიკათაშორისი მაგნიტური ველები ამრუდებენ კოსმოსური სხივების ტრაექტორიებს, ამიტომ ისინი არ მიუთითებენ მათი გამომსხივებელი წყაროს მდებარეობაზე. უფრო სრული კვლევებისთვის საჭიროა ისეთი ნაწილაკების რეგისტრაცია, რომლებიც ძალიან სუსტად ურთიერთქმედებენ კოსმოსურ სივრცეში არსებულ ელექტრომაგნიტურ ველებთან და მატერიასთან (აირი, მტვერი და ა.შ.). ასეთი ნაწილაკის მაგალითია ნეიტრინო – დაუმუხტავი, თითქმის უმასო ნაწილაკი, რომელზეც არ მოქმედებს ბირთვული და ელექტრომაგნიტური ველები.

## რელიქტური ნეიტრინო

სამყაროში არსებულ ნაწილაკთა უმრავლესობას ნეიტრინოები შეადგენს. ისინი დიდი რაოდენობით გაჩნდნენ დიდი აფეთქების დროს, ხოლო უკვე ორი წამის შემდეგ, სამყაროს გაფართოების გამო, მათ შეწყვიტეს სხვა მატერიასთან ურთიერთქმედება. შედეგად უნდა შექმნილიყო მიკროტალღური რელიქტური ფონის ანალოგიური ნეიტრინული რელიქტური ფონი, რომლის ტემპერატურა ამჟამად უნდა იყოს 1.7 K.

სამყაროში ზემცირე ენერგიის ნეიტრინო მატერიის ყველაზე გავრცელებული ფორმაა. გალაქტიკებში მათი საშუალო სიმკვრივე უნდა შეადგენდეს  $10^7$ - $10^8$  ნაწილაკს კუბურ სანტიმეტრში, ხოლო ციური სხეულების გრავიტაციულ ველებში მათი კონცენტრაცია უფრო მაღალიც კი უნდა იყოს. რელიქტური ფონის ზემცირე ენერგიის ნეიტრინო მატერიასთან ბევრად უფრო ეფექტურად ურთიერთმოქმედებს, ვიდრე „ბირთვული“ ენერგიების ნეიტრინო. ეს დაკავშირებულია იმასთან, რომ კვანტური მექანიკის პრინციპების თანახმად, რაიმე ნაწილაკის ურთიერთქმედების არის ზომა მათი დე-ბროილის ტალღის სიგრძის რიგისაა. ზემცირე ენერგიის ნეიტრინოებისთვის კი ეს ზომა რამდენიმე მილიმეტრს აღწევს. ნივთიერებაში ასეთი ნაწილაკის ურთიერთქმედების არეში ატომების უამრავი რაოდენობა მოხვდება და მიუხედავად ინდივიდუალური ურთიერთქმედებების ალბათობის სიმცირისა, მათი რაოდენობა მაინც დიდია. აღვნიშნოთ, რომ „ბირთვული“ ნეიტრინოების დე-ბროილის ტალღის სიგრძე ბევრად ნაკლებია ატომის ზომებზე, ამიტომ მათ მხოლოდ ერთ ელექტრონთან ან ბირთვთან შეუძლია ურთიერთქმედება.

საინტერესო იქნებოდა რელიქტური ნეიტრინოების დამზერა, მაგრამ ჯერ იდეაც კი არ არსებობს, თუ როგორ შეიძლება ამის განხორციელება. სირთულე იმაში მდგომარეობს, რომ რელიქტური ნეიტრინოს ენერგია ძალზე მცირეა. ასეთი ნეიტრინოს ურთიერთქმედების სიგნალი იმდენად სუსტია, რომ ამჟამად არსებულ დეტექტორებს არ ძალუძთ მისი დაფიქსირება.

## ვარსკვლავიერი ნეიტრინო

ვარსკვლავების წიაღში მიმდინარე პროცესების კვლევა მათი ელექტრომაგნიტური გამოსხივების საშუალებით შეუძლებელია, რადგან ვარსკვლავის გარე ფენები მთლიანად შთანთქავს ამ გამოსხივებას. მეორეს მხრივ, ვარსკვლავების ცენტრში მიმდინარე ბირთვული რეაქციებისას დაბადებული ნეიტრინოები შეუფერხებლად ტოვებენ ვარსკვლავთა სიღრმეებს.

რელიქტურ ნეიტრინოებთან შედარებით, ვარსკვლავთა თერმობირთვული წვის შედეგად დაბადებულ ნეიტრინოთა დამზერა უფრო რეალურია. მზე საკმარისად მაღალი ენერგიების მქონე ნეიტრინოებს იმდენად დიდი რაოდენობით ასხივებს, რომ ექსპერიმენტული დანადგარის ნივთიერებასთან მათი ურთიერთქმედების ძალზე უმნიშვნელო ალბათობის მიუხედავად, ხერხდება სანდო სტატისტიკური მასალის დაგროვება.

დაახლოებით 30 წლის წინ პირველად იქნა გაზომილი მზიდან დედამიწამდე მოღწეული ნეიტრინოების ნაკადი. ეს ნაკადი მზის სტანდარტული მოდელის მიხედვით მოსალოდნელზე რამდენჯერმე ნაკლები აღმოჩნდა. ამჟამად ნეიტრინოების ნაკადს ხუთ ლაბორატორიაში აკვირდებიან. მიღებული შედეგები ადასტურებს ნეიტრინოების დეფიციტს. ამ დეფიციტს ხსნიან ნეიტრინოების ოსცილაციებით, რომლებსაც ეს ნაწილაკები განიცდიან მზიდან დედამიწამდე სრბოლისას.

მცირე ექსკურსი ფიზიკაში: ნაკადის ოსცილაცია – ეს არის რაიმე გამოსხივების ინტენსივობის, ჩვენ შემთხვევაში მზიდან დედამიწამდე მოღწეული ნეიტრინოების ნაკადის, პერიოდული ცვლილება. ნეიტრინოებისთვის ეს მოვლენა დაკავშირებულია ბუნებაში მათი სამი სახეობის არსებობასთან. ფიზიკურ რეაქციებში ნეიტრინოები ყოველთვის იბადებიან წყვილში ელექტრონებთან, მიუონებთან ან ტაუ-ნაწილაკებთან. სწორედ ამ ნაწილაკების სახელებს ატარებს ნეიტრინოს სახეობები. თუ სხვადასხვა ტიპის ნეიტრინოებს არანულოვანი, თუნდაც ძალზე მცირე, მასები გააჩნიათ, მათ შეუძლიათ ერთმანეთში გარდაქმნა. ეს კვანტური ეფექტია, რომელიც განსაზღვრავს ნეიტრინოების ოსცილაციებს. მზეში მიმდინარე ბირთვული სინთეზის რეაქციებში იბადება მხოლოდ ელექტრონული ნეიტრინოები. გზად მზიდან დედამიწისკენ მათი ნაწილი მიუონურ ან ტაუ-ნეიტრინოდ გარდაიქმნება, რაც ამცირებს ელექტრონული ნეიტრინოს ნაკადის ინტენსივობას. ექსპერიმენტულად კი მხოლოდ ელექტრონული ნეიტრინო ფიქსირდება და ამიტომ დაკვირვებულ ნაკადში ჩნდება ნეიტრინოს დეფიციტი.

მზის ნეიტრინული ნაკადების გაზომვები საფუძვლად დაედო ნეიტრინულ ასტრონომიას. მიღებულმა შედეგებმა დაადასტურა ვარსკვლავთა წვის და ევოლუციის ბირთვული ბუნება. აღსანიშნავია, რომ მზიდან ჩვენამდე მოღწეული ნეიტრინოების ნაკადი ბევრად აღემატება სხვა ვარსკვლავებიდან მოღწეულ ნეიტრინულ ნაკადებს, ამიტომ ჩვეულებრივი ვარსკვლავების შესწავლა ნეიტრინული ასტრონომიის საშუალებით ამჟამად შეუძლებელია.

### **ზეახალი ვარსკვლავები და ნეიტრინო**

ნეიტრინული ასტრონომიის შესწავლის კიდევ ერთი საგანია ვარსკვლავების ზეახალებად აფეთქების დროს წარმოშობილი ნეიტრინოები.

1989 წლის 23 თებერვალს, გრინვიჩის დროით 07:35:41, ღრმა მაღაროებში განთავსებულმა ორმა ნეიტრინულმა დეტექტორმა (IMB აშშ-ში და Kamiokande იაპონიაში) 13 წამის განმავლობაში დააფიქსირა 19 ნეიტრინო. ნეიტრინოების რეგისტრაციის ალბათობა იმდენად მცირეა, რომ აღნიშნული რიცხვი შეესაბამება დეტექტორში  $10^{15}$  ნეიტრინოს გავლას. 2.5 საათის შემდეგ კი ასტრონომები სამხრეთ ნახევარსფეროში დააკვირდნენ ზეახალი ვარსკვლავის აფეთქებას, რომელიც შეუიარაღებელი თვალითაც კი კარგად ჩანდა. მსგავსი უცაბედი ანთება ჯერ კიდევ ძველ ჩინელ ასტრონომებს ჰქონდათ შენიშნული. 400 წლის წინათ კი ასეთივე მოვლენას იოჰან კეპლერი აკვირდებოდა. ზეახალი ვარსკვლავის აფეთქებისას იბადება დაახლოებით  $10^{58}$  ნეიტრინო ჯამური ენერგიით  $3 \times 10^{53}$  ერგი. ეს მრავალ ათასჯერ აჭარბებს მთელი თავისი არსებობის მანძილზე მზის მიერ გამოსხივებულ ენერგიას.

მიაქციეთ ყურადღება, რომ 1989 წლის 23 თებერვალს ნეიტრინოები დაფიქსირდა დედამიწის ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში განთავსებული დეტექტორებით, მაშინ, როდესაც ზეახლის აფეთქება დამზერილი იყო სამხრეთ ნახევარსფეროს ცაზე. აქ არაფერია გასაკვირი, ვინაიდან ნეიტრინული დეტექტორები აფიქსირებენ დედამიწის წიაღის გავლით, ამ შემთხვევაში, სამხრეთიდან ჩრდილოეთისკენ მიმართულ ნეიტრინოებს. თუ რატომ მოქმედებენ ასეთი პრინციპით ნეიტრინული დეტექტორები, ახსნილი იქნება მეორე თავის მეცხრე პარაგრაფში.

გარდა ამისა, აფეთქება დამზერილი იყო ნეიტრინოების დაფიქსირებიდან 2.5 საათის შემდეგ. ეს დაკავშირებულია იმასთან, რომ აფეთქებისას ამოფრქვეული ყველა



დანარჩენი ნაწილაკი, ფოტონების ჩათვლით, შემდგომში ურთიერთმოქმედებად აფეთქებისას წარმოშობილი მატერიის ღრუბელთან. ითვლება, რომ სწორედ ამ ურთიერთქმედებამ შეაყოვნა ფოტონები და სხვა ნაწილაკები, რომლებიც ნეიტრინოებს „ჩამორჩნენ“.

ზეახალი ვარსკვლავების ნეიტრინულ ასტრონომიას შეუძლია მოგვაწოდოს მნიშვნელოვანი ინფორმაცია ვარსკვლავთა კოლაფსის და შემდგომ მათი ნეიტრინულ ვარსკვლავებად გარდაქმნის შესახებ. არსებულ ნეიტრინულ დეტექტორებს (Kamiokande – იაპონია, SNO – კანადა, LVD და MACRO – იტალია, BNO – რუსეთი) უნარი შესწევთ დააფიქსირონ ზეახალი ვარსკვლავების აფეთქებისას წარმოქმნილი ნეიტრინოები. ამ დეტექტორებზე და ნეიტრინული ასტრონომიის შესაძლებლობებზე,  $10^{12}$ - $10^{14}$  ევ ენერგიების ფარგლებში, მოთხრობილი იქნება შემდეგ თავში.

## 1.8 კოსმოსური სხივების ასტრონომია

ჩვენ უკვე ვახსენეთ, რომ კოსმოსურ სხივებს უწოდებენ კოსმოსიდან დედამიწაზე დაცემულ ნაწილაკთა ნაკადს. ეს ნაკადი ძირითადად შედგება პროტონების, ელექტრონების და სხვადასხვა ქიმიური ელემენტების ბირთვებისგან. დედამიწის ზედაპირის კვადრატულ კილომეტრზე წელიწადში  $3 \times 10^{17}$  ევ ენერგიის მილიონამდე ნაწილაკი ეცემა. ნაწილაკები ენერგიის მიხედვით ისეა განაწილებული, რომ ენერგიის ზრდასთან ერთად მათი რაოდენობა მკვეთრად ეცემა. მაგალითისთვის მოვიყვანოთ ასეთი მონაცემები. კოსმოსურ სხივებში დღეისათვის დარეგისტრირებულია  $3.2 \times 10^{20}$  ევ ენერგიის მქონე ნაწილაკის ერთადერთი შემთხვევა, ხოლო მასზე ათასჯერ ნაკლები ენერგიის ნაწილაკთა რიცხვი მილიონჯერ მეტია.

მაღალი ენერგიის კოსმოსურ სხივებთან, რომელთა ენერგია აჭარბებს  $5 \times 10^{19}$  ევ, დაკავშირებულია ორი პრობლემა.

პირველი პრობლემა შეეხება მაღალი ენერგიის ნაწილაკთა მოძრაობის მიმართულებას. ასეთ ნაწილაკებს აქვს ძალიან დიდი იმპულსი და კოსმოსურ მაგნიტურ ველებს არ ძალუბთ მათი ტრაექტორიის გამრუდება. ამდენად მოსალოდნელია, რომ ზემადღაი ენერგიის ნაწილაკთა მოძრაობის მიმართულების პროექცია ცის თაღზე უნდა ჯგუფდებოდეს რაიმე წერტილების გარშემო, რომლებიც მიანიშნებენ ამ ნაწილაკთა წყაროებზე. მაგრამ აღმოჩნდა, რომ მაღალი ენერგიის ნაწილაკთა მოსვლის მიმართულებები თითქმის თანაბრადაა განაწილებული ცის სფეროზე.

არსებობს უფრო რთული პრობლემაც. ცნობილია, რომ სამყაროში არსებობს მიკროტალღური რელიქტური ფონი, რომელთანაც ურთიერთქმედებისას ზემადღაი ენერგიის ნაწილაკები კარგავენ თავისი ენერგიის ნაწილს. ჯერ კიდევ 1966 წელს გრეიზენმა (Kenneth Greisen, 1918-2007), ზაცეპინმა (Георгий Зацепин, 1917-2010) და კუზმინმა (Вадим Кузьмин, 1937) თეორიულად გამოთვალეს შორეული წყაროებიდან გამოსხივებული კოსმოსური სხივების ენერგიის ზღვრული მნიშვნელობა. გამოთვლების თანახმად ენერგიის დანაკარგი იმდენად დიდია, რომ დედამიწამდე მოღწეული ნაწილაკების ენერგია  $5 \times 10^{19}$  ევ-ს არ უნდა აღემატებოდეს. ამ შეფასებისას გათვალისწინებული იყო, რომ ზემადღაი ენერგიის ნაწილაკთა წყაროები მდებარეობს ჩვენგან 50 მილიონ პარსეკზე უფრო შორეულ მანძილებზე. მიუხედავად ასეთი მყარი არგუმენტისა, იაპონურმა დეტექტორმა AGASA-მ (მასზე დაწვრილებით საუბარი გვექნება პარაგრაფში 2.10) დააფიქსირა რამდენიმე ათეული ნაწილაკი, რომელთა

ენერგია აჭარბებს თეორიულ ზღვარს, ხოლო რამდენიმე შემთხვევაში ენერგია  $3 \times 10^{20}$  ევ-საც კი უტოლდება.

ამ თავსატეხის ასახსნელად უამრავი რადიკალური მოდელი იქნა შემოთავაზებული: ცნობილი ნაწილაკების თვისებების რევიზია; დიდი აფეთქებიდან  $10^{-35}$  წამის შემდეგ გაჩენილი, რელიქტური ზემასიური ნაწილაკების არსებობა; კოსმოსური მაგნიტური ველების ცნებათა ძირეული გადახედვა; ლორენც-სიმეტრიის ანუ ფარდობითობის სპეციალურ თეორიაში სიჩქარეების შეკრების კანონის დარღვევა, და სხვ.

დედამიწის ატმოსფეროში შემოჭრისას კოსმოსური სხივები იწვევენ „ფართო ატმოსფერული ღვარების“ გაჩენას. ეს ღვარები წარმოიქმნება კოსმოსური სხივების ნაწილაკების ატმოსფეროს ატომების ბირთვებთან ურთიერთქმედების გამო. პირველი ურთიერთქმედების შედეგად ჩნდება მეორადი ნაწილაკები, რომლებიც ჰაერის ატომებთან ურთიერთქმედებისას თავის მხრივ ქმნიან კიდევ ახალ ნაწილაკებს. ასე, რომ ადგილი აქვს ნაწილაკების კასკადურ გამრავლებას. შედეგად, დედამიწის ზედაპირს აღწევს მილიონამდე მცირე ენერგიის ნაწილაკისგან შემდგარი „ფართო ატმოსფერული ღვარი“, რომელიც ათიათასობით კვადრატული მეტრის ფართობს ფარავს.

კოსმოსური სხივების შესასწავლად ამჟამად ფართო ატმოსფერული ღვარების მარეგისტრირებელი რამდენიმე დიდმასშტაბიანი დანადგარი მოქმედებს. ერთ-ერთი მათგანია AGASA. ახლახან არგენტინაში მწყობრში ჩადაგა ყველაზე მძლავრი დანადგარი, რომელსაც ფართო ატმოსფერული ღვარების აღმომჩენი მეცნიერის – პიერ ოჟეს (Pierre Victor Auger, 1899-1993) სახელი ეწოდა. ამ დანადგარის ფართობი შეადგენს  $3000 \text{ კმ}^2$ -ს. მსგავსი დანადგარის აწყობა ამჟამად ჩრდილოეთ ნახევარსფეროშიც (კალიფორნიაში) მიმდინარეობს. დაგეგმილია ასევე მძლავრი ფართო ატმოსფერული ღვარების მიერ ატმოსფეროში გამოწვეული ფლუორესცენციის გამზომი დეტექტორების განლაგება თანამგზავრებზე. ზემოაღნიშნულის შესახებ დაწვრილებით შემდეგ თავში ვისაუბრებთ.

## 1.9 ბირთვული ასტრონომია

ბოლო წლებში ბირთვული ასტრონომია ასტროფიზიკის ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს მიმართულებად იქცა. ეს განპირობებულია იმით, რომ ბირთვული ასტრონომია წარმოადგენს მეცნიერების დარგს, რომელიც აკავშირებს ასტრონომიას, ასტროფიზიკას, ბირთვულ ფიზიკასა და ელემენტარულ ნაწილაკთა ფიზიკას. მომდევნო მიმოხილვაში გაგაცნობთ ბირთვული ასტრონომიის ზოგიერთ ამოცანასა და მის წინაშე მდგარ პრობლემებს, რომლებიც სამყაროს ევოლუციასთანაა დაკავშირებული მისი ადრეული სტადიიდან დღემდე.

2009 წელს გამოქვეყნდა NASA-ს კოსმოსური ტელესკოპის IBEX (Interstellar Boundary Explorer) მონაცემები კოსმოსური წარმოშობის ნეიტრალური ატომების, კერძოდ, იონიზირებული ჰელიუმის დაფიქსირების შესახებ. ნეიტრალური ბუნების გამო ჰელიუმის ბირთვები არ ექცევიან მზის მაგნიტური ველის ზემოქმედების ქვეშ და მათ შეუძლიათ გადმოკვეთონ მზის სისტემის საზღვრები, სადაც მზის ქარი ურთიერთქმედებს ვარსკვლავთშორისო სივრცის გამოსხივებასთან. აღსანიშნავია, რომ კოსმოსური წარმოშობის ნეიტრალური ატომები პირველად დაიმზირა. კოსმოსიდან მომავალი ბირთვების რეგისტრაციისთვის სხვა კოსმოსური მისიებიც არის დაგეგმილი.

ბირთვული წვის წონასწორული სტადია ვარსკვლავების განვითარების ყველაზე ხანგრძლივი პერიოდია. შინაგან სითბურ წნევასა და გრავიტაციულ შეკუმშვას შორის წონასწორობის მიღწევა ვარსკვლავში რამდენიმე საფეხურის გავლით ხორციელდება.

დასაწყისში ბირთვული სინთეზი მიმდინარეობს წყალბადის წვის ხარჯზე. ამ დროს გამოიყოფა ენერგიის დიდი რაოდენობა და წარმოიქმნება დეიტერიუმი და ჰელიუმი. წყალბადის გამოწვის შემდეგ იწყება უფრო მძიმე ელემენტების – CNO (ნახშირბადი-აზოტი-ჟანგბადი) ჯგუფის ბირთვების სინთეზი. შემდგომ კი წარმოიშვება კიდევ უფრო მძიმე ელემენტები რკინის ჯგუფის ბირთვების ჩათვლით. ყველა ეტაპზე მიმდინარე ბირთვული რეაქციების თვისებები, ვარსკვლავებისთვის დამახასიათებელი ექსტრემალური ტემპერატურებისა და წნევების პირობებისთვის, უმრავლეს შემთხვევაში ნაკლებადაა შესწავლილი, ან საერთოდ არ არის ცნობილი. ამიტომ ბირთვული ასტრონომიის მიერ მოწოდებული მონაცემები მნიშვნელოვანია არა მარტო ვარსკვლავების შესასწავლად, არამედ ბირთვული ფიზიკისთვისაც.

ვარსკვლავების ევოლუცია აფეთქების სტადიით მთავრდება, რაც გამოწვეულია შინაგან სითბურ წნევასა და გრავიტაციულ შეკუმშვას შორის წონასწორობის დარღვევით. ამ დროს დიდი რაოდენობით ხორციელდება ჯერ კიდევ შეუსწავლელი რეაქციები, როგორცაა, მაგალითად, ბირთვების მიერ ნეიტრონებისა და პროტონების სწრაფი ჩაჭერა, მისი თანმხლები სხვადასხვა არასტაბილური იზოტოპების წარმოშობით. როგორც ასტროფიზიკის, ასევე ბირთვული ფიზიკის თვალსაზრისით, მნიშვნელოვანია სად და რა პირობებში ხდება მსგავსი რეაქციები, მხოლოდ ზეახალი ვარსკვლავების აფეთქებისას თუ სხვა პროცესებშიც.

სხვადასხვა ტიპის ბირთვული პრობლემა აგრეთვე თავს იჩენს მასიური ვარსკვლავების რკინის ბირთვების კოლაფსის მექანიზმის ახსნისას. და ბოლოს, ლაბორატორიულ პირობებში ვერ ხერხდება ვარსკვლავთშორის და გალაქტიკათაშორის პლაზმაში მიმდინარე რეაქციების განხორციელება და შესწავლა.

ყველა ჩამოთვლილი პრობლემა შეიძლება ნაწილობრივ ან სრულად იქნეს გადაწყვეტილი ციურ სხეულებში სხვადასხვა ბირთვების განაწილების შესწავლის საფუძველზე და ბირთვული რეაქციების ტიპიურ გამოვლინებებზე დაკვირვებებით.

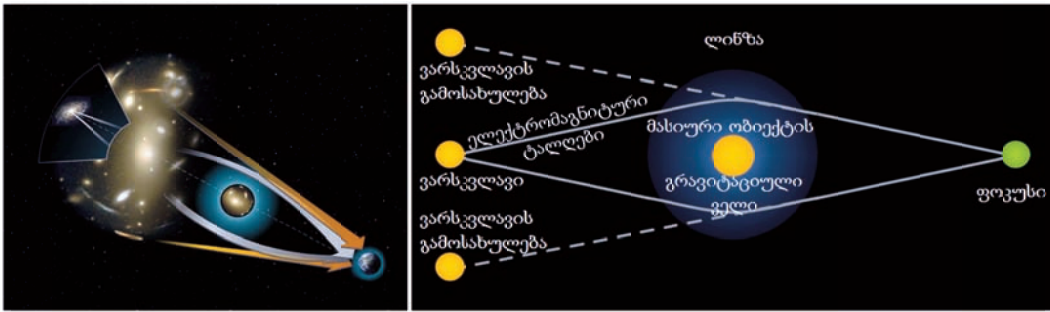
ბირთვული ასტრონომია აგრეთვე ქიმიური ელემენტების წარმოშობის შესწავლაში გვებმარება. ცნობილია, რომ არც ქიმიურ და არც ბიოლოგიურ პროცესებს არ შეუძლიათ ერთი ელემენტის მეორეში გარდაქმნა. მხოლოდ ბირთვულ რეაქციებსა და რადიაციულ დაშლებს ძალუძთ ელემენტების სახეცვლილება. ამიტომ ამჟამად არსებული ქიმიური ელემენტების ფარდობითი რაოდენობა წარმოადგენს სამყაროს ისტორიის მანძილზე მიმდინარე ბირთვული რეაქციების გამოძახილს.

## 1.10 გრავიტაციული ასტრონომია

გრავიტაციული ასტრონომია არის ასტრონომიის ყველაზე ახალგაზრდა დარგი. იგი ორი მიმართულებით ვითარდება.

### გრავიტაციული ლინზები

ფარდობითობის ზოგადი თეორიის თანახმად მატერია იწვევს სივრცის გამრუდებას, რის შედეგად სინათლისთვის და, საზოგადოდ, ელექტრომაგნიტური გამოსხივებისთვის, უმოკლესი მანძილი სწორი ხაზი კი არ არის, არამედ მრუდია. ამიტომ ნებისმიერი მასიური ციური სხეული, რომელიც მნათობიდან დამკვირვებლამდე გავრცელებული გამოსხივების უშუალო მახლობლობაშია, ამრუდებს გამოსხივების ტრაექტორიას და, მინის ლინზის ანალოგიურად, მოქმედებს როგორც გრავიტაციული ლინზა (სურ. 19).



სურ. 19 ძლიერი ლინზირების პრინციპი

წარმოვიდგინოთ რაიმე შორეული კოსმოსური ობიექტი, რომლის გამოსხივებაც, სანამ დამკვირვებლამდე მოაღწევდეს, გზად ხვდება გრავიტაციული წინააღმდეგობა – ლინზა. ამ დროს შეიძლება გამოვლინდეს ყველა ის ეფექტი, რომელიც ჩვეულებრივ ლინზებს ახასიათებს. კერძოდ, ციური ობიექტის სიკაშკაშე შეიძლება გაძლიერდეს, გამოსახულება – დამახინჯდეს (მაგალითად გაიწელოს) ანდა ერთის მაგივრად შეიძლება რამდენიმე გამოსახულებაც კი გამოჩნდეს, როგორც ეს ჩვეულებრივ ხდება მრავალსარკიან სისტემებში. მე-20 სურათზე ნაჩვენებია სხვადასხვა ტიპის გრავიტაციული დამახინჯებების ნიმუშები Hubble ტელესკოპის მიერ გადაღებულ გალაქტიკურ კლასტერში ABELL 2218.



სურ. 20 გრავიტაციული ლინზირება ABELL 2218 კლასტერში

© NASA, A. Fruchter, the ERO Team

მიუხედავად გრავიტაციული ლინზების ოპტიკურ ლინზებთან მსგავსებისა, მათ შორის არსებობს პრინციპული განსხვავებები. ცნობილია, რომ ოპტიკური ლინზა მით უფრო ძლიერ გარდატეხს სინათლის სხივს, რაც უფრო დაშორებულია სხივი ლინზის ღერძიდან. ამ თვისების გამო ლინზაზე დაცემული პარალელური სხივები იკრიბება ერთ წერტილში – ლინზის ფოკუსში. გრავიტაციული ლინზის შემთხვევაში კი სხივის გადახრის კუთხე ლინზის ღერძიდან მის დაშორებაზე არაა დამოკიდებული. ამიტომ ფოკალური წერტილის ნაცვლად ჩნდება ფოკალური წრფე, რაც იწვევს ეგრეთ წოდებული სინათლის თაღების და აინშტაინის რგოლების გაჩენას. მეორე განსხვავება, რომელიც მდგომარეობს ყველა ტალღის სიგრძის მქონე სხივის ერთნაირ გადახრაში,



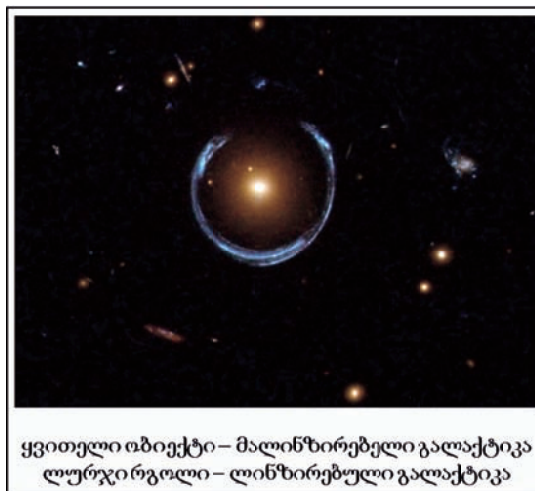
ძალზე ხელსაყრელია გრავიტაციული ლინზების გამოყენების თვალსაზრისით. ამ თვისების გამო გრავიტაციული ლინზები მოქმედებს არა მხოლოდ ოპტიკურ, არამედ ელექტრომაგნიტური ტალღების სრული სპექტრის დიაპაზონში (რენტგენის ჩათვლით).

ასტრონომებმა გრავიტაციული ლინზების გამოყენება დაიწყეს 1979 წელს, მას შემდეგ, რაც აღმოჩენილ იქნა კვაზარი Q0957+561 ორმაგი გამოსახულებით. ამჟამად ცნობილია 50-ზე მეტი განმეორებადი გამოსახულების მქონე კვაზარი. თუმცა ეს მაინც საკმაოდ იშვიათი მოვლენაა, დაახლოებით ერთი – 500 კვაზარზე.

*შენიშვნა: კვაზარს უწოდებენ შორეული მასიური გალაქტიკის კომპაქტურ ბირთვს, რომელიც გარს ერტყმის გალაქტიკის ცენტრში არსებულ ზემასიურ შავ ხვრელს და გაცილებით უფრო კაშკაშაა, ვიდრე გალაქტიკის პერიფერია. ყველაზე ხშირად კვაზარები ახალგაზრდა აქტიურ გალაქტიკებში დაიშვირება.*

ასტრონომები გრავიტაციულ ლინზებს სამ კლასად ყოფენ: ძლიერ, სუსტ და მიკროლინზებად.

**ძლიერი ლინზები** იწვევს აინშტაინის რგოლების, სინათლის თაღების, ციური ობიექტის განმეორებადი გამოსახულებების წარმოქმნას. ლინზირების ეფექტის გამომწვევი ობიექტის მასა არ უნდა იყოს ნაკლები  $10^{12}$  მზის მასაზე.



სურ. 21 აინშტაინის რგოლი

© ESA/Hubble & NASA

1964 წელს გამოითქვა იდეა, რომ ძლიერი გრავიტაციული ლინზების საშუალებით დაზუსტებულიყო ჰაბლის კონსტანტას მნიშვნელობა, რომლის შეზღუდვით სიდიდე შეესაბამება სამყაროს ასაკს. ამ მიზნით გამოყენებული იყო კვაზარები ორმაგი გამოსახულებით. ნაჩვენები იქნა, რომ კვაზარის ერთი გამოსახულების სიკაშკაშის ცვლილებას მეორე გამოსახულება იმეორებს გარკვეული დაგვიანებით, რომელიც დამოკიდებულია ამ კვაზარამდე მანძილზე. ასეთი მეთოდით გამოთვლილი და წითელი წანაცვლებით ნაპოვნი მანძილების ერთმანეთთან შედარებით კი შესაძლებელია კვაზარის ასაკის შეფასება. მაგალითად, Q0957+561 კვაზარის ერთ-ერთი გამოსახულების სიკაშკაშის ცვლილებას მეორე გამოსახულება იმეორებს 417 დღის შემდეგ, რაც ამ კვაზარის ასაკისთვის იძლევა დაახლოებით 14 მილიარდ წელს.

აღწერილი მეთოდი ამჟამად გამოყენებულია შვიდი კვაზარისთვის. ჰაბლის მუდმივასთვის მიღებული მნიშვნელობა, ცდომილების ფარგლებში, გამოთვლის ტრადიციული მეთოდებით მიღებულ შეფასებებს კარგად ეთანხმება.

**სუსტი ლინზები** იწვევს მათ მიღმა მდებარე ობიექტების გამოსახულებათა შედარებით მცირე დამახინჯებას. სუსტი ლინზირების გამოსავლენად საჭიროა დიდი რაოდენობის ციური ობიექტების მონაცემების სტატისტიკური შესწავლა.

სუსტი ლინზების მცირე ეფექტის მიუხედავად, ის გამოიყენება რაიმე მოცულობაში არსებული მასის, მათ შორის ფარული მატერიის, განაწილების დასადგენად.

გალაქტიკური კლასტერები და სუპერკლასტერები სამყაროში არსებული ყველაზე დიდი ზომის წარმონაქმნებია. მათი მასის დაახლოებით 80%-ს ბნელი მატერია შეადგენს. გალაქტიკური კლასტერები, ძლიერი ლინზირების გარდა, სუსტ ლინზირებასაც იწვევს, რაც პირველად 1990 წელს იქნა შესწავლილი Bell Laboratories თანამშრომლების მიერ. ისინი აკვირდებოდნენ კლასტერის მიღმა მდებარე გალაქტიკების სისტემატურ ელიფსურ გაწელებებს და ამ დამახინჯებებით აფასებდნენ კლასტერში მატერიის განაწილებას. ამ მეთოდით შესწავლილი იქნა მატერიის განაწილება ათასობით გალაქტიკურ კლასტერში.

სუსტი ლინზირებით შექმნილი კლასტერების მასათა განაწილების რუკები მნიშვნელოვანია გალაქტიკებში ფარული მატერიის შესასწავლად. გარდა ამისა, მათი საშუალებით აღმოჩენილია ეგრეთ წოდებული ბნელი კლასტერები, რომლებიც თითქმის არ შეიცავს მნათ ობიექტებს.

მაშასადამე, სუსტი ლინზირების მეთოდით შესაძლებელია მატერიის განაწილების რუკის შექმნა მთელი სამყაროსთვის, რაც თავის მხრივ სამყაროში ფარული მატერიის რაოდენობის შეფასების საშუალებას იძლევა. თუმცა ამ მიზნის მისაღწევად ჯერ კიდევ ბევრი სამუშაო ჩასატარებელი.

**მიკროლინზები** იწვევს რაიმე ობიექტის გამოსხივების ცვლილებას დროში. მიკროლინზირება გალაქტიკაში არსებული მკრთალი ობიექტების შესწავლის ერთ-ერთი ძირითადი მეთოდია. კოსმოლოგიური მონაცემების ანალიზიდან გამომდინარეობს, რომ სამყაროს სიმკვრივის დაახლოებით 22%-ს განაპირობებს ფარული მატერია, რომლის დამზერა ელექტრომაგნიტური გამოსხივების საშუალებით ვერ ხერხდება. ბუნებრივად იზადება კითხვა, ხომ არ შედგება ფარული მატერია გალაქტიკის ჰალოში არსებული მკრთალი მნათი ობიექტებისგან? ეს შეიძლება იყოს შავი ხვრელები, ნეიტრონული ვარსკვლავები, ეგზოპლანეტები, თეთრი, ყავისფერი ან წითელი ჯუჯები. ასეთ ობიექტებს შეარქვეს საერთო სახელი – MACHO (Massive Compact Halo Object).

მიკროლინზირებით ბნელი ობიექტების შესწავლის მეთოდის არსი იმაში მდგომარეობს, რომ როცა MACHO რომელიმე ციური სხეულის წინ ჩაივლის, ის რაღაც დროის განმავლობაში ცვლის მის სიკაშკაშეს. სიკაშკაშის ცვლილების ფორმა და ხანგრძლივობა კი დამოკიდებულია ამ პროცესში მონაწილე ობიექტებზე.

სამყაროში, უამრავი ცვალებადი სიკაშკაშის ვარსკვლავის არსებობის გამო, მიკროლინზირების დამზერა საკმაოდ რთულია. ის მოითხოვს ვარსკვლავებზე უწყვეტ დაკვირვებებს სიკაშკაშის მოულოდნელი ცვლილების დასაფიქსირებლად. მიუხედავად სირთულეებისა, ამ მეთოდით ფარული ბარიონული მატერია აღმოჩენილი იყო ჯერ კიდევ 1993 წელს, ავსტრალიაში, სტრომლოს მთაზე მდებარე ობსერვატორიის თანამშრომლების მიერ. ამისთვის საჭირო გახდა რვა წლის განმავლობაში ათ

მილიონამდე ვარსკვლავის გამოსხივების მონიტორინგი. თავდაპირველი მონაცემებით გამოდიოდა, რომ გალაქტიკებში ფარული მატერიის დიდი ნაწილი შეიძლება წარმოდგენილი ყოფილიყო სუსტი სიკაშკაშის მქონე ვარსკვლავებით. ეს შედეგი ხელახლა იქნა შემოწმებული NASA-ს Hubble კოსმოსური ტელესკოპისა და ESA-ს VLT ტელესკოპის მეშვეობით. აღმოჩნდა, რომ ფარულ მატერიაში MACHO-ს წვლილი 4% არ უნდა აღემატებოდეს. ამიტომ ამჟამად ფარული მატერიის ძირითადი მოდელი ემყარება ჰიპოთეტური ნაწილაკების ე.წ. WIMP-ების (Weakly Interacting Massive Particles) არსებობის დაშვებას.



სურ. 22 ტელესკოპი MOA  
© Frazer Gunn



სურ. 23 ახალი „მზის სისტემა“  
© Science

2008 წლის დეკემბერში ახალი ზელანდიის ობსერვატორიაში (Mt John Observatory) ოფიციალურად ამოქმედდა იაპონურ-ზელანდიური ტელესკოპი MOA (Microlensing Observations in Astrophysics), რომელიც გამიზნულია ბარიონული შემადგენლობის ფარული მატერიის შესასწავლად. თუმცა ჯერ კიდევ 2007 წელს MOA ტელესკოპის საშუალებით აღმოჩენილი იქნა ეგზოპლანეტა თბილი ოკეანით. ხოლო 2008 წელს იაპონურ-ზელანდიური თანამშრომლობის მიერ დაშვებული იყო ვარსკვლავისა და მისი პლანეტების სისტემა, რომელიც ძალიან წააგავს ჩვენი მზის სისტემას (სურ. 23).

### გრავიტონებზე ნადირობა

ცნობილია, რომ სამყაროში მიმდინარე პროცესები განპირობებულია მხოლოდ ოთხი ფუნდამენტური ურთიერთქმედებით: ძლიერით, ელექტრომაგნიტურით, სუსტითა და გრავიტაციულით (იხ. დანართი III).

ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედებით გამოწვეული გამოსხივებებისა და მათი დეტექტირების საშუალებით ციური ობიექტების შესწავლა განხილული იყო წინა პარაგრაფებში. ძლიერი და სუსტი ურთიერთქმედებები ძალიან სწრაფად მცირდება ურთიერთმოქმედ ნაწილაკებს შორის მანძილის ზრდასთან ერთად. ამიტომ ისინი თავს იჩენენ მხოლოდ სუბატომურ ობიექტებს შორის მიმდინარე პროცესებში. გრავიტაციული ურთიერთქმედება კი, თავისი სისუსტის მიუხედავად, მნიშვნელოვანია მაკროსხეულებისთვის, მით უმეტეს კოსმოსური ობიექტებისთვის.

ძლიერი, ელექტრომაგნიტური და სუსტი ურთიერთქმედება ხორციელდება ე.წ. გადამტანი ნაწილაკების საშუალებით: ურთიერთმოქმედი ობიექტების მიერ შესაბამისი გადამტანების მიმოცვლა წარმოებს. ამ სამი ფუნდამენტური ურთიერთქმედების გადამტანი ნაწილაკები კარგად არის შესწავლილი.

მეცნიერები თითქმის დარწმუნებული არიან, რომ გრავიტაციულ ურთიერთქმედებასაც შეესაბამება გადამტანი ნაწილაკი – გრავიტონი. ამ წარმოდგენის შესაბამისად დედამიწასა და მზეს შორის გრავიტაციული ურთიერთქმედება ხორციელდება ვაკუუმში გრავიტონების ნაკადების ანუ გრავიტაციული ტალღების გაცვლით, რაც იძლევა ფარდობითობის ზოგად თეორიაში გამოყენებული მრუდე სივრცის ფორმალიზმის ექვივალენტურ შედეგებს.

გრავიტონები ჯერ არ არის აღმოჩენილი. მათი აღმოჩენის იმედს კოსმოსში მიმდინარე მოვლენების შესწავლაზე ამყარებენ. გრავიტონების მოდელის თანახმად, გალაქტიკების შერწყმის ან სხვა მსგავსი კატასტროფული მოვლენების დროს ჩნდება გრავიტაციული ტალღები. ყველაზე მძლავრი კატაკლიზმი დაკავშირებულია დიდ აფეთქებასთან. ამ დროს უნდა წარმოშობილიყო გრავიტაციული ტალღები, რომელთა სიგრძე სამყაროს რადიუსის რიგისაა. სამყაროში ეს ტალღები ჯერ კიდევ უნდა არსებობდეს. რელიქტური ნეიტრინოების ანალოგიურად, ისინი სამყაროს მატერიასთან არ ურთიერთქმედებენ. მიუხედავად ამისა, მეცნიერებს რელიქტური გრავიტონების არაპირდაპირი დაფიქსირების იმედი მაინც აქვთ, ვინაიდან მათ უნდა გამოეწვიათ მიკროტალღური რელიქტური ფონის ფოტონების პოლარიზაცია.

XX საუკუნის 70-იან წლებში აღმოჩენილი იქნა მოვლენა, რომელიც ირიბად მიუთითებს გრავიტონების არსებობის შესაძლებლობაზე. დამზერილი იქნა ორმაგი პულსარი PSR1913+16, რომელიც შედგებოდა ორი, ერთმანეთის გარშემო მბრუნავი ნეიტრონული ვარსკვლავისგან. ერთ-ერთი ვარსკვლავი დედამიწის მიმართ ისე არის ორიენტირებული, რომ ყოველი შემობრუნებისას მისი პოლუსიდან წამოსული რადიოგამოსხივება ფიქსირდება დედამიწაზე. ეს რადიოგამოსხივება ამ სისტემის პარამეტრების შესწავლის საშუალებას იძლევა. აღმოჩნდა, რომ ნეიტრონული ვარსკვლავების ორბიტა წარმოადგენს სპირალს და ყოველი შემობრუნებისას ისინი უახლოვდებიან ერთმანეთს. ორბიტის პარამეტრები კარგად ემთხვევა მოდელს, რომლის თანახმად ვარსკვლავების ურთიერთდაახლოების მიზეზი მათ მიერ გრავიტაციული ტალღების გამოსხივებაა.



სურ. 24 გალაქტიკების  
შეჯახების გამოსახულება  
© NASA / Hubble Heritage Team

სპირალურად მოძრავი ორმაგი ნეიტრონული ვარსკვლავების შერწყმის მომენტში გაჩენილ გრავიტაციულ სიგნალს უნდა ჰქონდეს გარკვეული დამახასიათებელი ფორმა, რომლის ამოცნობის შემთხვევაში შესაძლებელი უნდა იყოს გრავიტაციული ტალღების აღმოჩენა. სამწუხაროდ, ორმაგი ვარსკვლავების სიცოცხლის ხანგრძლივობა მილიონობით წელია. მაგალითად, PSR1913+16 პულსარის შერწყმა 200 მილიონი წლის შემდეგ მოხდება. ვარაუდობენ, რომ დედამიწის მახლობლად მდებარე სპირალური

ორბიტების მქონე ორმაგი ვარსკვლავების იმდენი რაოდენობაა, რომ ერთი შერწყმა დაახლოებით ათ წელიწადში ერთხელ უნდა ხდებოდეს. მიუხედავად მცდელობებისა, ექსპერიმენტული თვალსაზრისით ასეთი იშვიათი მოვლენა ჯერჯერობით არ არის დამზერილი.

ამჟამად მოქმედებს რამდენიმე დანადგარი, რომელიც გრავიტაციული ტალღების დაფიქსირებისთვისაა გამიზნული. ამ აპარატურისთვის ხელმისაწვდომი ენერგიის მქონე ტალღების შესაძლო წყაროდ, გარდა პულსარებისა, აგრეთვე განიხილება გალაქტიკების შეჯახებებიც, რადგან მათ ბირთვებში არსებული შავი ხვრელების ურთიერთქმედებამ მძლავრი გრავიტაციული ტალღები უნდა წარმოქმნას.

## 1.11 თეორიული ასტრონომია

ამ თავის ბოლო ქვეგანყოფი გვინდა დავუთმოთ ბოლო წლებში ერთ-ერთ ყველაზე დინამიურად განვითარებად დარგს – თეორიულ ასტრონომიას. ასტრონომიის მიმართულებათა შემოთავაზებულმა რაკურსმა, იმედია, კიდევ უფრო გაულრმავა მკითხველს წარმოდგენა სამყაროში განვითარებულ და მიმდინარე მოვლენათა მრავალფეროვნებაზე და, უმრავლეს შემთხვევაში, მათ სირთულეზე. თეორიული ასტრონომიის მიზანია კონცეპტუალური თეორიების შემუშავება, რათა აიხსნას და, შესაძლებლობისდაგვარად, მათემატიკური აპარატის საშუალებით აღიწეროს ასტრონომიული მოვლენების ბუნება, გააზრებული იქნეს მათი წარსული მსვლელობა და ნაწინასწარმეტყველები იყოს მათი მომავალი განვითარება. ხშირად, შესასწავლი ფენომენი იმდენად რთულია, რომ პრობლემის გადასაჭრელად აუცილებელია მრავალსაათიანი, თუნდაც მრავალდღიანი, მოდელირება სულ უფრო მზარდი გამოთვლითი სიმძლავრის კომპიუტერული ქსელების გამოყენებით. ანალიტიკურ მოდელებთან ერთად, კომპიუტერული მოდელირება მეცნიერებს დროის „უკუსვლის“ და მისი „აჩქარების“ საშუალებას აძლევს. არაჩვეულებრივად შთამბეჭდავია თანამედროვე სამგანზომილებიანი გრაფიკული საშუალებებით მოდელირების შედეგების ხილვა, როდესაც მილიარდი წლის წინ დაწყებული მოვლენის მსვლელობა (მაგალითად, გალაქტიკების შეჯახება) სულ რამდენიმე წუთში განვითარდება და მილიარდი წლის შემდეგ მოსალოდნელი შედეგი თვალწინ დაგვიდგება.

მაგრამ ვიზუალურ მომხიბვლელობაზე გაცილებით უფრო მნიშვნელოვანია თეორიული ასტრონომიის უნარი, ანალიზური და რიცხვითი გათვლების საშუალებით მეცნიერებს მიუთითოს ამა თუ იმ მოსალოდნელი მოვლენის ადგილმდებარეობა ცის თალზე და მისი განვითარების დროის ინტერვალი. ეს ხელს უწყობს დამკვირვებლებს ეძიონ მონაცემები, რომელთა საშუალებით შეიძლება დადასტურდეს ან უარყოფილ იქნას ესა თუ ის თეორიული მოდელი, ანდა აირჩეს საუკეთესო რამდენიმე ალტერნატიულ მოდელს შორის. თავის მხრივ, დაკვირვებით მონაცემებზე დაყრდნობით თეორეტიკოსები აზუსტებენ არსებულ მოდელებს.

თითქოსდა, საქმე პარადოქსთან გვაქვს. სამყაროში მიმდინარე პროცესების ხანგრძლივობა, როგორც წესი, გაცილებით აღემატება კაცობრიობის არსებობის ხანგრძლივობას. მაგალითებად გამოდგება ვარსკვლავების ევოლუცია, გალაქტიკების შეჯახებები, პლანეტების წარმოქმნა და ა.შ. მიუხედავად ამისა, მეცნიერები ახერხებენ ამ პროცესების მსვლელობის მოდელების შემუშავებას. მეტიც, მიუხედავად იმისა, რომ შესასწავლი პროცესები ადამიანის თვალსაზრისით უსასრულო დროის განმავლობაში ვითარდება, წარმატებული მოდელებისთვის დასტურდება მათ მიერ ამ პროცესების



მსვლელობის აღწერის სიზუსტე. საქმე იმაშია, რომ სამყაროს მრავალფეროვნება იმდენად დიდია, რომ უმრავლეს შემთხვევაში მოიძებნება თავისი ბუნებით მსგავსი პროცესები (მაგალითად, გალაქტიკების შეჯახებები), რომლებიც ამჟამად განვითარების სხვადასხვა სტადიაზე იმყოფებიან. ამრიგად, ციური თალის სხვადასხვა არეში წარმოებული დაკვირვებების შედეგები წარმოგვიდგება თითქოსდა ერთი და იგივე ფენომენის სხვადასხვა დროის ინტერვალში გადაღებულ „ფოტოსურათებად“, რომელთა დროში მოწესრიგება ამ ფენომენის მსვლელობის „კინოსურათს“ წარმოაჩენს.

მაინც რა საკითხებს შეისწავლის თეორიული ასტრონომია? ამ დარგის ტრაქტატის პირველ ნიმუშად შეიძლება ჩათვალოს პტოლემეს „ალმაგესტის“ ფრაგმენტები, რომლებმაც სამყაროს მოწყობის გეოცენტრული მოდელი 12 საუკუნის განმავლობაში დაამკვიდრეს, ვიდრე იგი კოპერნიკის შრომების შედეგად ჰელიოცენტრული მზის სისტემით არ შეიცვალა. და მაინც, მეცნიერთა უმრავლესობა ასტრონომიაში თეორიული მოდელების გამოყენების საწყისად მიიჩნევს პლანეტების მოძრაობის კეპლერის კანონების აღმოჩენას, რაც ასტრონომიული დაკვირვებების მათემატიკური ანალიზის შედეგად იყო მიღებული.

თანამედროვე თეორიული ასტრონომიის ინტერესების სფერო განვრცობილია ასტრონომიის ყველა დარგზე. თავად განსაჯეთ: პლანეტების, ვარსკვლავების, გალაქტიკებისა და სხვა ციური ობიექტების დინამიკა და ევოლუცია; კოსმოსური სხივების სტრუქტურა და ბუნება; სამყაროში მატერიის მსხვილმასშტაბიანი სტრუქტურების განაწილება; ფარული მატერიისა და ფარული ენერგიის ბუნება; თვით სამყაროს გაჩენა და მისი ევოლუცია – აი ძალიან შეზღუდული ნუსხა იმ კითხვებისა, რომლებზედაც პასუხის გაცემას ცდილობენ თეორიული ასტრონომიის დარგში მომუშავე მეცნიერები.

წიგნის მეოთხე და მეხუთე თავებში მკითხველი გაეცნობა თეორიული ასტრონომიის, და უფრო ფართო გაგებით, ასტროფიზიკისა და კოსმოლოგიის წარმატებებს და დარწმუნდება, თუ რაოდენ მდიდარია კაცობრიობის ცოდნა სამყაროსა და მასში მიმდინარე პროცესების შესახებ, და რაოდენ ბევრია ჯერ კიდევ გასარკვევი. პირველი დანართი კი მკითხველს გააცნობს ქართველი თეორეტიკოსების ინტერესთა სფეროს.

## თავი II ასტრონომიული და ასტროფიზიკური ხელსაწყოები

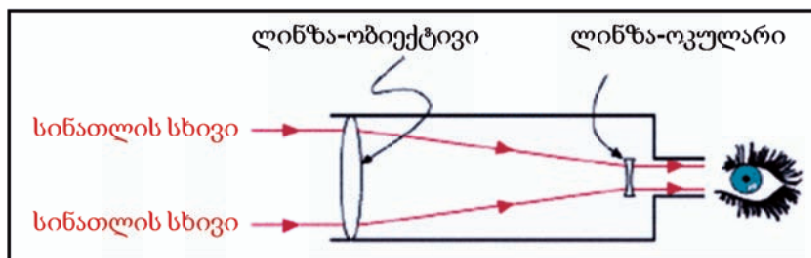
### 2.1 ზოგადი შენიშვნები

ციური სხეულების სხვადასხვა ტიპის გამოსხივების შესასწავლად ასტრონომები იყენებენ ტელესკოპებს, ინტერფერომეტრებს, სპექტოგრაფებსა და სხვა ხელსაწყოებს. გამოსხივების ტიპის შესაბამისად ამ ხელსაწყოების სხვადასხვა სახეობა არსებობს. მაგალითად, ხილულ დიაპაზონში გამოიყენება ოპტიკური ტელესკოპები, ხოლო რადიოტალღების რეგისტრაცია ხორციელდება რადიოტელესკოპების საშუალებით. იგივე შეიძლება ითქვას ინტერფერომეტრებსა და სპექტრომეტრებზე. მაგალითად, გრავიტაციული ტალღების აღმოჩენის მიზნით აგებულია გიგანტური ზემგრძნობიარე ინტერფერომეტრები. განსაკუთრებული ტექნიკა გამოიყენება კოსმოსური სხივებისა და ნეიტრინოების შესასწავლად. წინამდებარე თავში მოკლედ მოგითხრობთ ამ ხელსაწყოების შესახებ.

### 2.2 ოპტიკური ტელესკოპები

ჩვეულებრივი დურბინდის მსგავსად, ტელესკოპის დანიშნულება სინათლის წყაროს, მაგალითად, ვარსკვლავის, დამკვირვებელთან „მოახლოებაა“. ლინზების ან სარკეების საშუალებით ტელესკოპები „კრებენ“ ციური სხეულების მიერ გამოსხივებულ სინათლეს და „აძლიერებენ“ მის ინტენსივობას. პირველად ლინზას ან სარკეს, რომელიც წყაროს მიერ გამოსხივებულ სინათლეს კრებს, ობიექტივი ეწოდება.

არსებობს ტელესკოპების ორი ძირითადი ნაირსახეობა: რეფრაქტორები და რეფლექტორები. რეფრაქტორებში ობიექტივებად გამოიყენება ლინზები, ხოლო რეფლექტორებში – სარკეები. ორივე ტიპის ტელესკოპში გამოსახულება დაიზიანება ოკულარით. როგორც წესი, რეფრაქტორების საშუალებით შეისწავლება შედარებით ახლო მანძილებზე მდებარე ობიექტები, მაგალითად, მთვარე და პლანეტები. გალილეო გალილეი დაკვირვებებისას სწორედ ტელესკოპ-რეფრაქტორს იყენებდა (სურ. 25). ჩვენი გალაქტიკისა თუ გარეგალაქტიკური ციური სხეულების დამზერისას კი უპირატესობას რეფლექტორებს ანიჭებენ.

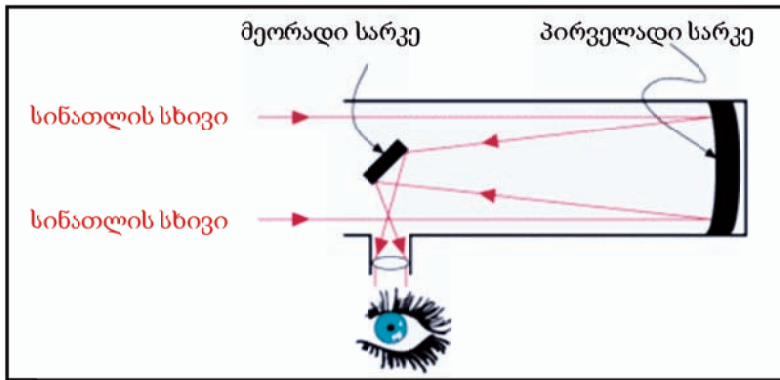


სურ. 25 ტელესკოპ-რეფრაქტორის სქემა

ლინზის გარდატეხის კუთხე დამოკიდებულია მასში გამავალი სინათლის ტალღის სიგრძეზე. ამიტომ რეფრაქტორში ადგილი აქვს ობიექტის სხვადასხვა ფერის გამონასახების ერთმანეთში შერევას. ეს იწვევს მისი გამოსახულების დამახინჯებას, რომელსაც ქრომატული აბერაცია ეწოდება. შედეგად ვარსკვლავის გამოსახულება

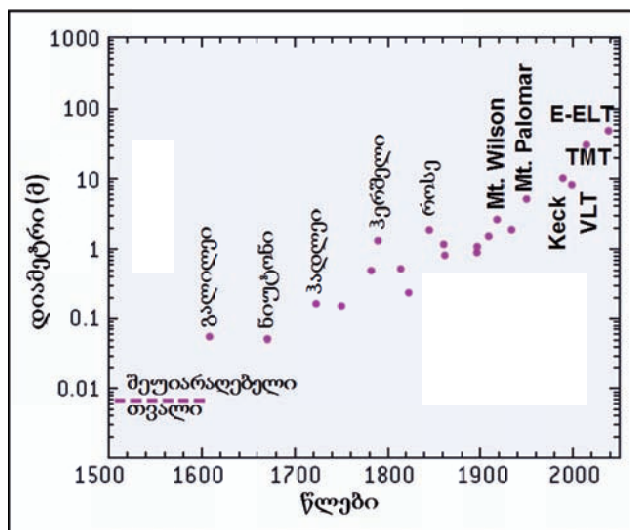
მოჩანს როგორც ნაირფერადი რგოლების ერთობლიობა. ჩვეულებრივ, ქრომატული აბერაციის გასასწორებლად ტელესკოპებში აქრომატულ ლინზებს იყენებენ.

ტელესკოპი-რეფლექტორი ისააკ ნიუტონმა გამოიგონა. ასეთ ტელესკოპში სინათლის სხივი ჯერ პირველად სარკეს ეცემა, შემდეგ კი მეორად სარკეს. დამკვირვებელს შეუძლია გამოსახულებას შეუიარაღებელი თვალით დააკვირდეს, ან დააპროექციოს იგი ფოტოფირფიტასა თუ სპექტრომეტრზე.



სურ. 26 ტელესკოპ-რეფლექტორის სქემა

ტელესკოპის ძირითადი მახასიათებელია სინათლის შეკრების უნარი. რაც უფრო დიდია პირველადი სარკის ფართობი, მით უფრო მძლავრია იგი და მით უფრო შორეული ციური ობიექტების დამზერაა შესაძლებელი. თანამედროვე ტელესკოპებში გამოიყენება სხვადასხვა სახის ელექტრონული დეტექტორები, რომლებსაც ძალუძთ ციური სხეულებიდან მიღებული სინათლის აკუმულაცია. შედეგად ტელესკოპების ეფექტურობა, რომელიც სულ ახლახან 10%-ს არ აღემატებოდა, დღესდღეობით თითქმის 100%-იან მნიშვნელობას აღწევს. ეს ნიშნავს გამოსახულების ათმაგ გაუმჯობესებას, ანუ ციური სხეულების დამზერის ზღვრული მანძილის ათჯერად გაზრდას.



სურ. 27 ოპტიკური ტელესკოპების ობიექტივების ზრდა

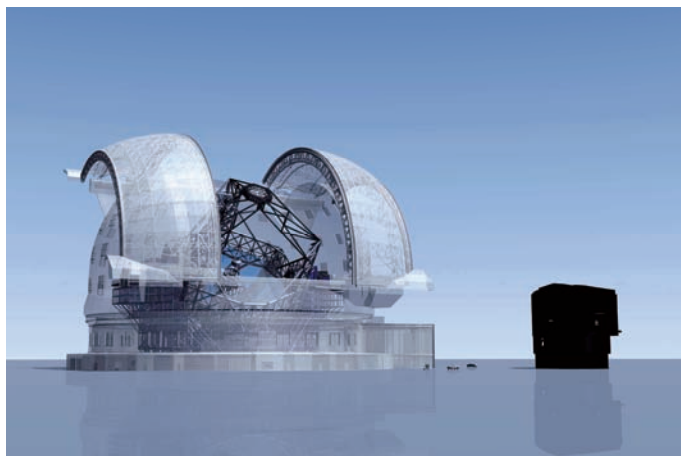
© Scientific American



ტელესკოპების ობიექტივების დიამეტრების ზრდის გრაფიკზე (სურ. 27) მითითებულია გალილეისა და ნიუტონის ტელესკოპები, რომელთა სქემები მოყვანილია 25-ე და 26-ე სურათებზე. როგორც გრაფიკიდან ჩანს, მათი დიამეტრები არ აღემატებოდა 10 სანტიმეტრს.

1917 წელს, კალიფორნიაში Wilson-ის მთაზე, ააგეს 2.5 მ დიამეტრის მქონე ტელესკოპი, რომელიც შემდგომი 30 წელიწადის განმავლობაში მსოფლიოს უდიდესი ტელესკოპის სახელს ინარჩუნებდა. სწორედ ამ ტელესკოპით ჩატარებული დაკვირვებებით ჩაეყარა საფუძველი ფიზიკის ორ ახალ დარგს: გარეგალაქტიკურ ასტრონომიასა და კოსმოლოგიას.

სქემაზე ასევე აღნიშნულია: მთაზე Palomar (პასადენა, კალიფორნია) 1948 წელს აშენებული 5 მ დიამეტრის ტელესკოპი Hale; ორი 10 მეტრიანი ოპტიკური ტელესკოპი W.M. Keck (ჰავაის კუნძულები); 4 ტელესკოპისგან შემდგარი კომპლექსი VLT (Very Large Telescope) 8.2-მ დიამეტრის სარკეებით (ჩილე), ასევე, ამჟამად მშენებარე ორი ტელესკოპი, – 30 მეტრიანი TMT (Thirty Meter Telescope) და 40 მეტრიანი E-ELT (European Extremely Large Telescope), რომელთა მწყობრში ჩადგომა 2018-2022 წლებშია ნაგარაუდები. ზოგიერთი ტელესკოპის მახასიათებლები მოყვანილია მეხუთე დანართში.



სურ. 28 მშენებარე ტელესკოპი E-ELT (მასშტაბების აღსაქმელად შედარებულია ამჟამად მოქმედი VLT კომპლექსის ერთ-ერთ ტელესკოპთან)

© ESO

საქართველოში არსებული ობსერვატორიებიდან აღსანიშნავია აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორია, რომელიც 1932 წელს დაარსდა. საბჭოთა კავშირში იგი პირველი მაღალმთიანი ასტროფიზიკური ობსერვატორია იყო. თუმცა მისი ტელესკოპები არ გამოირჩევა სიდიდით (ყველაზე დიდ ტელესკოპს 1.25 მ დიამეტრის სარკე აქვს), ასტრონომიული დაკვირვებებისთვის აუცილებელი შესანიშნავი მიკროკლიმატის პირობებში, აბასთუმანში სრულდებოდა და სრულდება მაღალი დონის სამეცნიერო კვლევები (იხ. დანართი I).

ოპტიკური ტელესკოპების სარკეების დიამეტრის შემდგომი ზრდა ნაკლებად ალბათურია, რადგან დიამეტრის ზრდასთან ერთად მათი წონა მნიშვნელოვნად იზრდება. ასეთი ტელესკოპების აგება არახელსაყრელი ხდება სხვადასხვა კონსტრუქციულ-ტექნიკური და ფინანსური სირთულეების გამო. ამიტომ, სავარაუდოა,

რომ მომავლის ტელესკოპები აღჭურვილი იქნება სეგმენტური სარკეებით. ასეთი ტექნოლოგიის მაგალითად გამოდგება ამჟამად მოქმედი ტელესკოპის Keck-ის ორივე ათმეტრიანი პირველადი სარკე, რომლებიც წარმოადგენენ 36 ჰექსაგონური ფორმის სარკის მოზაიკას.

ტელესკოპით ჩატარებული დაკვირვებების ხარისხი დამოკიდებულია მისი სარკის ფორმის სიზუსტეზე და ზედაპირის სიგლუვეზე. ყველა ტელესკოპისთვის საყოველთაო წესია, რომ მათი ამრეკლავი ზედაპირის არაერთგვაროვნებების ზომა არ უნდა აღემატებოდეს მათზე დაცემული ტალღის სიგრძის  $1/5$ -ს. ამით არის განპირობებული განსაკუთრებული მოთხოვნები ოპტიკური ტელესკოპების სარკეების გაპრიალების მიმართ. ვინაიდან ოპტიკური დიაფაზონის ტალღის სიგრძე  $10^{-5}$  სმ რიგისაა, სარკის ზედაპირის არაერთგვაროვნებების ზომები არ უნდა აღემატებოდეს ამ სიდიდეს.

სარკის გაპრიალება ძალიან შრომატევადი საქმეა. მაგალითად Hale-ს ტელესკოპის ერთ-ერთი 5-მეტრიანი სარკის გაპრიალებას 11 წელი დასჭირდა, თანაც ყოველ ორ დღეში აუცილებელი იყო პარაბოლური სარკის შიდა ზედაპირის ფორმის შემოწმება და დაზუსტება. მოგვიანებით, VLT ტელესკოპის 8.2-მეტრიანი სარკეების დამზადებისას, გაპრიალება კომპიუტერული მართვისა და კონტროლის საშუალებით სრულდებოდა, რის შედეგადაც სამუშაოები ორ წელიწადში დასრულდა.

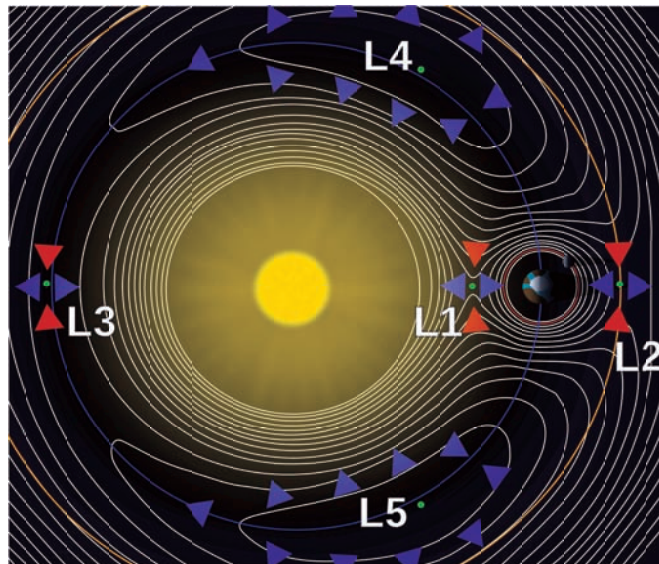
ტელესკოპების მნიშვნელოვანი მახასიათებელია გამოსახულების გადიდების უნარი. ეს პარამეტრი ობიექტივისა და ოკულარის ფოკუსური მანძილების შეფარდების პროპორციულია. ყველაზე მაღალი გადიდების უნარი აქვს ჰიპერბოლური ფორმის სარკეებს. მიუხედავად ასეთი ფორმის დამზადების სირთულისა, მომავლის გიგანტურ ტელესკოპებში სწორედ ჰიპერბოლური ფორმის სარკეები იქნება გამოყენებული.

ტელესკოპის მესამე მნიშვნელოვანი მახასიათებელია მისი გარჩევისუნარიანობა, ანუ მინიმალური კუთხური დაშორება წერტილოვანი ციური ობიექტებისა, რომელთა გარჩევა შეუძლია ტელესკოპს. იგი იზომება რკალურ წამებში (აღინიშნება სიმბოლოთი ", იხ. დანართი IV). ერთი რკალური წამი დაახლოებით შეესაბამება კუთხეს, რომლითაც ფეხბურთის ბურთი ჩანს 45 კილომეტრის მანძილიდან. მოვიყვანოთ გარჩევისუნარიანობის მაჩვენებელი ზოგიერთი ტელესკოპისთვის. მაგალითად, VLT ტელესკოპის გარჩევისუნარიანობა შეადგენს  $0.012''$ , ხოლო OWL ტელესკოპისა კი –  $0.001''$  იქნება, ანუ მას მთვარეზე მდებარე ავტომობილის ანთებული ფარების გარჩევის პოტენციალი ექნება.

გარჩევისუნარიანობა დამოკიდებულია ტელესკოპის ობიექტივის ზომაზე (რაც უფრო დიდია ის, მით უკეთესია გამოსახულება), სინათლის ტალღის სიგრძეზე, რომლის მიმართაც მგრძნობიარეა ტელესკოპი, და იმ გარემოზე, რომელშიც სინათლე ვრცელდება წყაროდან ტელესკოპამდე. დედამიწის ატმოსფერო, ან უფრო ზუსტად, ატმოსფეროში ჰაერის სითბური მიმოქცევა, დედამიწის ზედაპირზე განლაგებულ ხელსაწყოთა გარჩევისუნარიანობას მნიშვნელოვნად ამცირებს. ამიტომ ზღვრული ან ზღვრულთან მიახლოებული გარჩევისუნარიანობის მიღწევა რთულ ამოცანას წარმოადგენს. ზოგიერთი ტელესკოპისთვის გარკვეული სიხშირის ლაზერის სხივით, რომელსაც ატმოსფეროს ზედა ფენების ატომები ირეკლავენ, ქმნიან „ხელოვნურ ვარსკვლავს“ (Laser guide star). არეკლილი სინათლე ატმოსფეროში გავლისას ისევე მახინჯდება, როგორც ტელესკოპით დამზერილი ვარსკვლავებისა. ეტალონური „ხელოვნური ვარსკვლავის“ გამოსახულების ხარვეზების გათვალისწინება საშუალებას

იძლევა „შესწორდეს“ ტელესკოპით მიღებული ვარსკვლავების გამოსახულება. ამ ტექნიკას ადაპტირებადი ოპტიკა ეწოდება.

ბუნებრივია, რომ კოსმოსურ ტელესკოპებს დედამიწის ატმოსფეროს ტურბულენტობით გამოწვეული შემფოთებების პრობლემა არ გააჩნია. სამწუხაროდ, ჭარბი წონის გამო შეუძლებელია დიდი ზომის სარკეების კოსმოსურ სივრცეში გატანა. ყველაზე დიდი კოსმოსური ტელესკოპის – Hubble-ის სარკის დიამეტრი მხოლოდ 2.4 მეტრს შეადგენს. აღსანიშნავია, რომ მისი გარჩევისუნარიანობა 0.04 გრადუსია, რაც ასეთი დიამეტრის სარკეების მქონე ტელესკოპების გარჩევისუნარიანობის თეორიულ ზღვრულ მნიშვნელობასთან ძალზე ახლოსაა (დანართი V).



სურ. 29 მზე-დედამიწის სისტემის ლაგრანჟის წერტილები

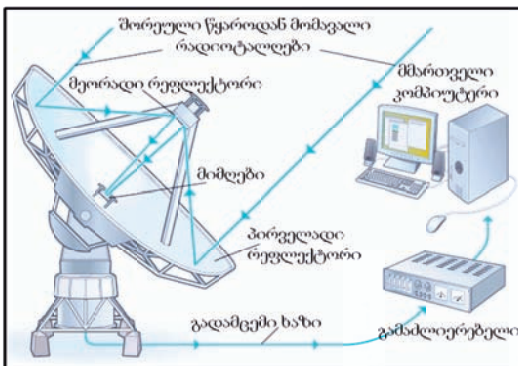
2009 წლის 14 მაისს ევროპულმა კოსმოსურმა სააგენტომ გაუშვა ორი კოსმოსური ობსერვატორია – Herschel-ი და Planck-ი (იხ. დანართი V). ობსერვატორიების კოსმოსში გაყვანა განხორციელდა Ariane-5 რაკეტის საშუალებით კურუს კოსმოდრომიდან (საფრანგეთის გვიანა). შემდგომ, ობსერვატორიები, საკუთარი მრავების დახმარებით, დედამიწიდან დაახლოებით 1.5 მილიონი კილომეტრით დაშორებულ განსაკუთრებულ, ე.წ. ლაგრანჟის L2 წერტილის ორბიტაზე განთავსდნენ. მზის სისტემაში არსებობს ხუთი ლაგრანჟის წერტილი, სადაც შედარებით პატარა ობიექტი, მაგალითად, კოსმოსური თანამგზავრი, მზისა და დედამიწის გრავიტაციული ძალის ზემოქმედებით პრაქტიკულად უძრავია ორივე ციური სხეულის მიმართ. ერთ-ერთი მათგანია L2 წერტილი (სურ. 29), რომელშიც Herschel-ისა და Planck-ის ობსერვატორიები თავისთავად ინარჩუნებდნენ სასურველ ორიენტაციას. ამგვარად ობსერვატორიების მართვა ხდებოდა ენერგიის მინიმალური დანახარჯებით. განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, რომ ობსერვატორიები მუდმივად იმყოფებოდნენ დედამიწის ჩრდილში და ამით დაცულები იყვნენ მზის გამოსხივებისგან. ეს გარემოება აადვილებდა დამზერებს, ვინაიდან დამზერის პირობები დროში პრაქტიკულად უცვლელი რჩებოდა და ხელსაწყოთა დაკალიბრება შედარებით იშვიათად იყო საჭირო.

ორივე კოსმოსური ობსერვატორია განკუთვნილი იყო სამყაროს განვითარების ადრეული ეტაპების შესასწავლად. Herschel-ი გალაქტიკებისა და ვარსკვლავთა სისტემების წარმოშობის, სხვადასხვა პლანეტების ატმოსფეროსა და ქიმიური შედგენილობის, ასევე ეგზოპლანეტების გარკვეული მახასიათებლების შესახებ ინფორმაციას ინფრაწითელ დიაპაზონში აწვდიდა. ეგზოპლანეტებზე გრავიტაციული მიზიდულობის ძალის მნიშვნელობის, მათი ატმოსფეროს ქიმიური შემადგენლობისა და ტემპერატურის ცოდნა აუცილებელია მათზე სიცოცხლის რაიმე ცნობილი ფორმის არსებობის შესაძლებლობის შესაფასებლად. Planck-ი აგროვებდა მონაცემებს რელიქტური ფონური გამოსხივების შესახებ ამჟამად არსებული საუკეთესო სიზუსტით, რაც ადრეული სამყაროს შესახებ ახალი მონაცემების მოპოვებაში დაგვეხმარება. კერძოდ, შესაძლოა მოხერხდეს პირველადი გრავიტაციული ტალღებით გამოწვეული ფონური გამოსხივების პოლარიზაციის შესწავლა.

## 2.3 რადიოტელესკოპები

რადიოტელესკოპებში, კოსმოსიდან მოსული რადიოტალღების შესაკრებად, გამოიყენება დიდი, თეფშის მაგვარი ანტენები, რომლებსაც რეფლექტორული ოპტიკური ტელესკოპების სარკეების ანალოგიურად, პარაბოლური ფორმა აქვთ. რადიოტალღების სიგრძე ოპტიკურზე ბევრად დიდია (ერთი მეტრიდან ას კილომეტრამდე), ამიტომ მოთხოვნები რადიოტელესკოპების მიმართ ბევრად უფრო ნაკლებია. სახალისო მაგალითია არესიბოს ობსერვატორია (პუერტო-რიკო), რომელიც ამჟამად ყველაზე მგრძნობიარე ინსტრუმენტია ერთთეფშიან რადიოტელესკოპებს შორის. ამ ობსერვატორიაში რადიოტელესკოპის ამრეკლავ ზედაპირად გამოიყენება ფიალის ფორმის 305 მ-იანი დიამეტრის კირქვის ბუნებრივი ღრმული, რომლის ზედაპირი 38 ათასი ალუმინის ნასვრეტებიანი პანელით არის დაფარული.

როგორც წესი, რადიოტელესკოპი შედგება სამი ძირითადი ელემენტისგან: პარაბოლური რეფლექტორი, მეორადი რეფლექტორი და მიმღები მოწყობილობა. პარაბოლური რეფლექტორი წყაროს რადიოსიგნალებს თავის ფოკუსში განლაგებულ მეორად რეფლექტორში აგროვებს. ეს უკანასკნელი სიგნალებს პარაბოლოიდის ცენტრისკენ მიმართავს. აქ განთავსებული მიმღები კი განახორციელებს სამუშაო სიხშირეების დიაპაზონში რადიოსიგნალების გაძლიერებას.



სურ. 30 რადიოტელესკოპის სქემა  
© Encyclopædia Britannica



სურ. 31 ტიპიური რადიოტელესკოპი  
© NRAO/AUI



რადიოტელესკოპები ასტრონომიაში დიდ როლს ასრულებენ, ვინაიდან მრავალი ციური ობიექტის გამოსხივების რეგისტრაცია სხვა საშუალებებით ვერ ხერხდება. როგორც წესი, რადიოტელესკოპი ოპტიკურ ტელესკოპზე ბევრად უფრო დიდი ზომისაა, რადგან ტელესკოპის კუთხური გარჩევისუნარიანობა ტალღის სიგრძის და ტელესკოპის დიამეტრის შეფარდების პროპორციულია, ხოლო რადიოტალღების სიგრძე ოპტიკურზე ბევრად უფრო მეტია. გარდა ამისა, ტელესკოპების მგრძნობიარობა ასევე პროპორციულია მათი ამრეკლავი ზედაპირების ფართობისა.

ვინაიდან დედამიწის ატმოსფერო რადიოსიგნალებისთვის პრაქტიკულად გამჭვირვალეა, შესაძლებელია მაღალი გარჩევისუნარიანობის რადიოტელესკოპების აწყობა. საკმარისად დიდი ფართობის რადიოტელესკოპის მისაღებად საკმარისია შედარებით მომცრო ზომის ანტენების ერთობლიობის გამოყენება. ანტენების ერთმანეთთან დაშორება განისაზღვრება შესასწავლი ტალღების სიგრძეებით. ასეთ ხელსაწყოს რადიოინტერფერომეტრი ეწოდება.

ერთ-ერთი ყველაზე მძლავრი რადიოინტერფერომეტრია VLA (Very Large Array), რომელიც მდებარეობს ნიუ მექსიკოში (აშშ). VLA შედგება ერთმანეთთან დაკავშირებული 27 თევზისგან. ყოველი თევზის დიამეტრი 25 მეტრია, წონა კი – 230 ტონა. VLA გამოიყენება ოთხ სხვადასხვა კონფიგურაციაში, ანტენების 36, 10, 3.6 და 1 კილომეტრის დაშორებით, რაც 0.7 სანტიმეტრიდან 400 სანტიმეტრამდე სიგრძის რადიოტალღების რეგისტრაციის საშუალებას იძლევა. VLA ინტერფერომეტრის კუთხური გარჩევისუნარიანობა იმდენად მაღალია, რომ მას 36 კილომეტრით დაშორებული გოლფის ბურთის ზომის რადიოწყაროების გარჩევა შეუძლია.



სურ. 32 მარცხენა სურათზე გამოსახულია VLA რადიოტელესკოპის საერთო ხედი, მარჯვენაზე კი – მისი ცენტრალური ნაწილი

© NRAO/AUI/Dave Finley

ყველაზე შორეული ციური ობიექტების, მაგალითად კვაზარების, გამოკვლევა მოითხოვს კიდევ უფრო დიდი ზომისა და მაღალი გარჩევისუნარიანობის მქონე რადიოინტერფერომეტრების შექმნას. ამ მიზნით გამოიყენება VLBI (Very Long Baseline Interferometry) ტექნიკა, რომელიც რამდენიმე დამოუკიდებელი ტელესკოპით მიღებული მონაცემების კომპიუტერულ ცენტრებში გაერთიანების შედეგად მათი ერთობლივი დამუშავების საშუალებას იძლევა. ზუსტი ატომური საათების გამოყენებით ხერხდება ძალიან დაშორებული, სხვადასხვა კონტინენტზე თუ კოსმოსურ ორბიტაზე მდებარე ტელესკოპების მონაცემთა სინქრონიზაცია. ამრიგად, იქმნება უზარმაზარი ეფექტური ფართობის მქონე „ვირტუალური“ რადიოინტერფერომეტრები. უკანასკნელ წლებში, კომპიუტერული ქსელების გამტარუნარიანობის ზრდასთან



ერთად, შესაძლებელი გახდა გაერთიანებული ტელესკოპების მონაცემთა რეალურ დროში დამუშავება. მაგალითად მოვიყვანოთ წარმატებული e-VLBI პროექტი, რომელიც ექვს ევროპულ რადიოტელესკოპს აერთიანებს ეროვნული და ევროპული სამეცნიერო კომპიუტერული ქსელების მეშვეობით.

## 2.4 ინტერფერომეტრები

წინა პარაგრაფში აღვნიშნეთ, რომ რადიოტელესკოპებს ხშირად ერთმანეთთან ახლოს, ჯგუფურად განლაგებენ, რათა მათ ინტერფერომეტრიის რეჟიმში იმუშაონ. ასეთი დაჯგუფებების მაგალითად მოვიყვანეთ დანადგარები VLA და VLBI.

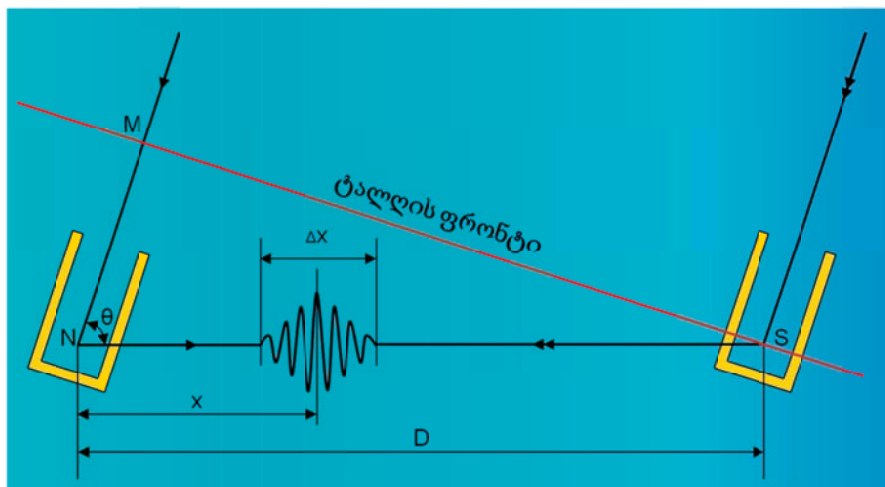
მოკლედ აღვწეროთ ინტერფერომეტრების მოქმედების პრინციპი. ორი ტალღის სუპერპოზიციის შემთხვევაში, მათი სიხშირეებისა და ფაზების გარკვეული თანაფარდობებისას, ადგილი აქვს სხვადასხვა მოვლენებს, რომლებიც ინტერფერენციის სახელითაა ცნობილი. მაგალითად, ორი ტალღის შეკრებისას ამპლიტუდა შეიძლება გაიზარდოს ან შემცირდეს. ტალღებმა შეიძლება ერთმანეთი სულაც ჩაახშონ. ერთი და იგივე სიხშირისა და ფაზის ტალღების ინტენსივობის პიკები ერთმანეთს ემთხვევა, ამიტომ ასეთი ტალღების სუპერპოზიციისას წარმოიქმნება მძლავრი ტალღა უფრო დიდი ამპლიტუდით. ხილული სინათლის ინტერფერენცია ხასიათდება ინტენსივობის მაქსიმუმებისა და მინიმუმების მორიგეობითი ცვლილებით, რომელიც რაიმე სიბრტყეზე ტალღების დაცემისას განათებული და ჩაბნელებული უბნების დამახასიათებელ, ე.წ. ინტერფერენციულ სურათს ქმნის.

ასტრონომიაში ინტერფერომეტრები ფართოდ გამოიყენება მაღალი გარჩევისუნარიანობის რადიო- და ოპტიკური დანადგარების შესაქმნელად. საკმარისი გარჩევისუნარიანობის მისაღებად დიდი აპერტურის ტელესკოპების დამზადება შეიძლება ტექნიკურად და ფინანსურად არახელსაყრელი, ან შეუძლებელიც კი აღმოჩნდეს. ინტერფერენციის პრინციპებზე დაყრდნობით კი დასახული ტექნიკური მახასიათებლების მისაღწევად შესაძლებელია შედარებით მომცრო აპერტურიანი ტელესკოპების დაჯგუფება. აღსანიშნავია აგრეთვე, რომ შეიძლება მოხერხდეს საერთო გარჩევისუნარიანობის გაუმჯობესება უკვე არსებული ტელესკოპებისთვისაც, როდესაც მათ გაერთიანებენ ინტერფერომეტრებში.

ასტრონომიული ინტერფერომეტრების მოქმედების პრინციპი იგივეა, რაც ლაბორატორიული დანადგარებისა, რომლებიც ინტერფერენციის დასამზერად გამოიყენება. მაგრამ უნდა აღინიშნოს რამდენიმე განსხვავებაც. უპირველეს ყოვლისა, შესასწავლი ვარსკვლავის დედამიწიდან დიდი დაშორების გამო, ვარსკვლავიდან წამოსული ელექტრომაგნიტური ტალღები ინტერფერომეტრის შემადგენელ ტელესკოპებს სხივთა პარალელურ კონად ეცემა. აუცილებელია, აგრეთვე, რომ დაკვირვების განმავლობაში ტელესკოპები განუწყვეტლივ იყვნენ მიმართული საკვლევი ვარსკვლავისკენ. მაგრამ თავისი ღერძის გარშემო დედამიწის ბრუნვის გამო ვარსკვლავი გამუდმებით გადის ტელესკოპის დაკვირვების არედან. ამიტომაც დაკვირვებისას მიმდინარეობს ტელესკოპების დამზერის კუთხის კორექტირება კომპიუტერული მართვის მეშვეობით. და ბოლოს, ციური სხეულების გამოსხივება არ არის მონოქრომატული, ანუ იგი სხვადასხვა სიხშირის ტალღებისაგან შედგება, რაც აქვეითებს ინტერფერენციული სურათის სიმკვეთრეს. მაგრამ არსებობს ყველაზე მკვეთრი ზოლი, რომელსაც ძირითადად უწოდებენ (სურ. 34). ინტერფერენციული

სურათის ძირითადი ზოლი სხვადასხვა სიხშირის ყველა ტალღის ინტერფერენციის შედეგია. სწორედ ძირითადი ზოლი გამოიყენება გაზომვების ჩასატარებლად.

ასტრონომიული ინტერფერომეტრის კონკრეტული მაგალითის აღწერის მიზნით 33-ე სურათზე მოყვანილია „ორტელესკოპიანი დიდი ინტერფერომეტრის“ – GI2T (Grand Interféromètre à 2 Télescopes) გამარტივებული სქემა. ტელესკოპები გამოსახულია ყვითელი ღია მართკუთხედების სახით. ისინი ერთმანეთისგან  $D$  მანძილითაა დაშორებული. როგორც სურათიდან ჩანს, ვარსკვლავიდან წამოსული პარალელური გამოსხივების ფრონტი მარცხენა ტელესკოპს, მარჯვენა ტელესკოპთან შედარებით, დაგვიანებით დაეცემა, რაც ინტერფერენციული სურათის გაჩენას იწვევს. სხივები M-N-S გზის გავლისას ერთმანეთს სხვადასხვა ფაზაში შეხვდებიან და ინტერფერირებენ ერთმანეთთან. N-S მონაკვეთზე დაყენებულია ინტერფერენციის დეტექტორი. დეტექტორის გადაადგილებით იცვლება ვარსკვლავიდან დეტექტორამდე მოსული ტალღების ფაზები და შესაბამისად, ინტერფერენციული სურათიც. დეტექტორის ადგილმდებარეობა  $X$ , რომლის დროსაც ჩნდება ინტერფერენციული სურათის ძირითადი ზოლი, განსაზღვრავს დანადგარის ბაზისს. დეტექტორის ადგილმდებარეობის ცვლილებით იცვლება ბაზისი. GI2T ინტერფერომეტრის შემთხვევაში ბაზისის ცვლილება შესაძლებელია 12-დან 65 მეტრამდე დიაპაზონში.

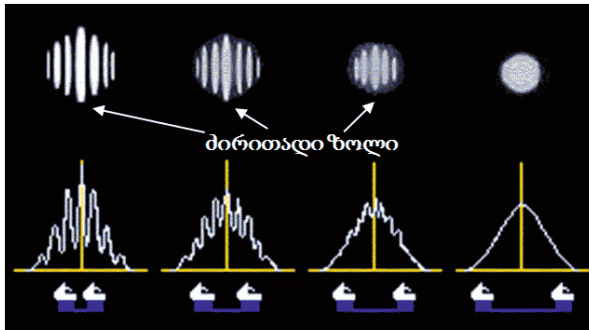


სურ. 33 ტელესკოპების ადგილმდებარეობა N და S,  
მათ შორის მანძილი  $D$ ,  
ტალღების მიერ განვლილი მანძილების სხვაობა  $MN+2X-D$

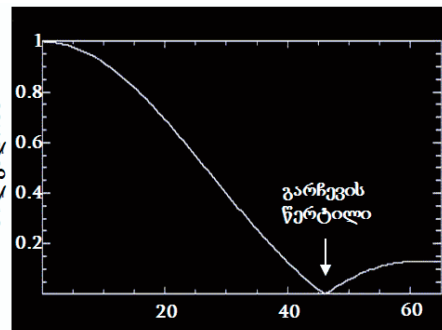
აღვნიშნოთ, რომ ერთ-ერთი უძველესი ასტრონომიული ინტერფერომეტრი გამოყენებული იყო ავსტრალიის ობსერვატორიაში Narrabri. ინტერფერომეტრის ბაზისის შესაცვლელად ტელესკოპები ერთიმეორის მიმართ გადაადგილდებოდნენ საგანგებოდ გაყვანილი სარკინიგზო რელსების საშუალებით.

ასტრონომიული ინტერფერომეტრების ძირითადი პარამეტრებია მათი ბაზისი, ანუ ტელესკოპებს შორის მანძილი, და „ხილვადობა“ – ინტერფერენციული სურათის ნათელ და ბნელ უბნებს შორის სხვაობა. ინტერფერენციის დეტექტორის (სურ. 33) თუ ტელესკოპების (Narrabri) ერთმანეთის მიმართ გადაადგილებისას, შესაძლებელია ბაზისის შეცვლა და ისეთი ადგილმდებარეობის შერჩევა, სადაც ინტერფერენციული

სურათის ძირითადი ზოლი ქრება. ამ ადგილმდებარეობას ინტერფერომეტრის „გარჩევის წერტილს“ უწოდებენ (სურ. 35).



სურ. 34 ძირითადი ზოლი  
© Gemini



სურ. 35 გარჩევის წერტილი  
© Gemini

გარჩევის წერტილში ინტერფერენციისთვის შერჩეული ტალღის სიგრძის ბაზისთან შეფარდება განსაზღვრავს შესასწავლი ციური ობიექტის (ვარსკვლავის) კუთხურ ზომას. შემდგომ, დედამიწიდან ობიექტამდე მანძილის ცოდნის შემთხვევაში (მაგალითად, წითელი წანაცვლების საშუალებით), შესაძლებელია ობიექტის ზომის დადგენა.

ინტერფერომეტრების ფართო გამოყენება განპირობებულია მათი ძალიან მაღალი სიზუსტით. იგი განისაზღვრება სინათლის ბნელი და ნათელი ზოლების სიგანით, რომელიც გაზომვების ჩასატარებლად შერჩეული ტალღის სიგრძის ტოლია. შეგახსენებთ, რომ ოპტიკური ტალღების სიგრძეები ასეული ნანომეტრის რიგისაა. ინტერფერომეტრის სარკეებისა თუ ტელესკოპების გადანაცვლება იწვევს ინტერფერენციული სურათის გადაადგილებას ბნელი და ნათელი ზოლების შესაბამისი რაოდენობით, რაც ტალღის სიგრძის ბიჯის სიზუსტის ფარგლებში, გადანაცვლების ზედმიწევნით გაზომვის საშუალებას იძლევა.

ამერიკელმა მეცნიერმა ალბერტ აბრაჰამ მაიკელსონმა (Albert Abraham Michelson, 1852-1931) ე.წ. ციური ინტერფერომეტრის საშუალებით, პირველმა შეაფასა რამდენიმე ვარსკვლავის დიამეტრი. ინტერფერენციულ მეთოდს ამჟამად იყენებენ ციური ობიექტების ზომების განსაზღვრის მიზნით. ცნობისათვის აღვნიშნოთ, რომ ლაბორატორიული ინტერფერომეტრის მეშვეობით, მაიკელსონმა შეისწავლა დედამიწის მოძრაობის ზეგავლენა სინათლის გავრცელების სიჩქარეზე და ექსპერიმენტულად დაადასტურა აინშტაინის სპეციალური ფარდობითობის თეორია, რომლის თანახმად ვაკუუმში სინათლის გავრცელების სიჩქარე წარმოადგენს სიჩქარეთა აბსოლუტურ ზღვარს.

აქამდე საუბარი იყო ოპტიკურ ინტერფერომეტრებზე. მაგრამ უფრო ხშირად გამოიყენება რადიოინტერფერომეტრები, ვინაიდან ციური ობიექტების დიდი რაოდენობა წარმოადგენს რადიოტალღების წყაროს. მათი საშუალებით შესაძლებელია ორი ან რამდენიმე ახლომდებარე რადიოობიექტების გარჩევა.

აღვნიშნოთ ასტრონომიული ინტერფერომეტრის კიდევ რამდენიმე შესაძლებლობა. ინტერფერომეტრების საშუალებით ასტრონომები სწავლობენ ორჯერად ვარსკვლავთა სისტემებს, რომლებშიც დაწყვილებული ვარსკვლავები ერთიმეორის მიმართ ბრუნავენ, ასევე ვარსკვლავების დისკოებს, პერიოდულად ცვალებადი სიკაშკაშის ვარსკვლავებს –

ცეფეიდებს, და სხვ. ზოგჯერ იქმნება დანადგარები, რომლებშიც ერთიანდება ინტერფერომეტრები და სპექტრომეტრები. შედეგად, პირველი ტიპის ინსტრუმენტების მძლავრი კუთხური გარჩევისუნარიანობა ერწყმის მეორეთა მაღალ სივრცულ გარჩევისუნარიანობას და მეცნიერები შესასწავლი ობიექტების შესახებ უფრო მდიდარ ინფორმაციას იღებენ. კიდევ უფრო დიდი შესაძლებლობები იქმნება მრავალტელესკოპიან ინტერფერომეტრებში, სადაც შესასწავლ ობიექტებს დაწყვილებული ტელესკოპებით აკვირდებიან. ტელესკოპების წყვილებიდან მიღებული ინტერფერენციული სურათების კომბინაციით უმჯობესდება ციური სხეულის შესახებ მიღებული მონაცემების სიზუსტე.

ჩვენ უკვე აღვწერეთ ყველაზე დიდი ტელესკოპების წყვილი, რომელიც W.M.Keck-ის სახელითაა ცნობილი. იქვე, ჰავაის მაუნა კეას ვულკანზე, ძირითადი დანადგარებიდან მოშორებით, მოქმედებს ოთხი შედარებით მომცრო ტელესკოპი. მთლიანობაში ეს სისტემა წარმოადგენს ინტერფერომეტრს Keck.

გრავიტაციული ტალღების დეტექტირების იმედს მხოლოდ უზარმაზარი, მრავალკილომეტრიანი ბაზისების მქონე, ზემგრძნობიარე ინტერფერომეტრები იძლევიან. მათ რიგს მიეკუთვნება დანადგარები LIGO, VIRGO, GEO და TAMA, რომელთა ექსპლუატაცია სულ ახლახან დაიწყო.

ინტერფერომეტრები ძალზე მგრძნობიარე ინსტრუმენტებია. ნებისმიერი ვიბრაცია, სითბური გაფართოება თუ შეკუმშვა, ტრანსპორტის მოძრაობა და სხვა, მათ გამართულ მოქმედებას აბრკოლებს. ასეთ უხერხულობებს ჯერ კიდევ მაიკელსონი წააწყდა. გრავიტაციული ინტერფერომეტრების უზარმაზარი ბაზისები კიდევ უფრო ართულებს ფონური „ხმაურის“ აღმოფხვრის შესაძლებლობას. უნდა აღინიშნოს, რომ ფონური დაბრკოლებების ჩახშობის ტექნიკა განსაკუთრებულ როლს თამაშობს ინტერფერომეტრიაში.

ინტერფერომეტრების დედამიწის ატმოსფეროს გარეთ გატანა მკვეთრად გაზრდის მათ შესაძლებლობებს. ასეთი ინტერფერომეტრებით გალაქტიკების ოპტიკური გამოსახულებები ასეული და ათასეული კუთხური წამის სიზუსტით გაიზომება, ვარსკვლავთა კუთხური მანძილების გაზომვის სიზუსტე რამდენიმე რიგით გაიზრდება, შესაძლებელი იქნება ვარსკვლავთა მცირე პარალაქსების გაზომვა და ეგზოპლანეტების აღმოჩენის მცდელობა. ამ მიმართულებით ძირითადი დაბრკოლებაა თანამგზავრების კოსმოსურ სივრცეში მაღალი სტაბილიზაციისა და ერთმანეთის მიმართ ზუსტი ორიენტაციის სისტემის შექმნა. მიუხედავად ამისა, კოსმოსური ინტერფერომეტრების პროექტები უკვე შემუშავების სტადიაშია. ერთ-ერთი მათგანია საერთაშორისო სამეცნიერო კონსორციუმის კოსმოსური ინტერფერომეტრი eLISA/NGO (evolved Laser Interferometer Space Antenna / New Gravitational Wave Observatory). მისი მიზანია ციური ობიექტების გრავიტაციული ტალღების დაფიქსირება და გაზომვა. დედამიწის ატმოსფეროს შემფოთებებისა და სხვა ფონური ხმაურის გარეშე, დანადგარის მგრძნობიარობა იმდენად მაღალი უნდა იყოს, რომ შესაძლებელი იქნება 5 მილიონი კილომეტრით დაშორებული სისტემის შემადგენელი კოსმოსური ხომალდების 20 პიკომეტრის რიგის გადანაცვლებების დაფიქსირება (იხ. პარაგრაფი 2.11 და სურ. 63).

## 2.5 სპექტრომეტრები

ასტრონომიული ობიექტის მიერ გამოსხივებული სინათლე, როგორც წესი, არ არის მონოქრომატული და შედგება სხვადასხვა სიგრძის ტალღებისგან. ამ ტალღების

ერთობლიობას სპექტრი ეწოდება. გამოსხივების სპექტრის შესწავლით ასტრონომები ამ გამოსხივების წყაროს შესახებ მდიდარ ინფორმაციას იღებენ, კერძოდ, ადგენენ გამოსხივების წყაროს ქიმიურ შემადგენლობას, ტემპერატურას, მოძრაობის სიჩქარეს და ა. შ.

ხელსაწყოს, რომლითაც უშუალოდ ვაკვირდებით სხვადასხვა სიგრძის ტალღებად დაშლილ სინათლეს, სპექტროსკოპი ეწოდება. უმარტივესი სპექტროსკოპის მაგალითია სამწახნაგა პრიზმა, რომელიც სპექტრად შლის მასში გამავალ სინათლეს. პრიზმის მეორე მხარეს დამკვირვებელი ხედავს ყველასთვის კარგად ცნობილ ცისარტყელასმაგვარ ფერად სურათს. თუმცა თანამედროვე სპექტროსკოპებში სპექტრის მისაღებად ძირითადად დიფრაქციულ მესერს იყენებენ. თუ ობიექტი ძალიან მკრთალია და მისი გამოსახულების მისაღებად ხანგრძლივი ექსპოზიციაა საჭირო, იყენებენ სპექტროგრაფს, ხელსაწყოს, რომელსაც სპექტროსკოპიის შედეგები ინფორმაციის მატარებელ რომელიმე სახის მოწყობილობაზე, მაგალითად ფოტოფირფიტაზე, გადააქვს.

ცნობილია, რომ ნივთიერებები მაღალი ტემპერატურის პირობებში მათი ატომური და მოლეკულური შემადგენლობისთვის დამახასიათებელ სინათლეს ასხივებენ. გამოსხივების სპექტრი ხასიათდება სხვადასხვა ტალღის სიგრძის შესაბამისი სპექტრული ხაზებით. ამ დამახასიათებელი ხაზების მეშვეობით ასტრონომებს შეუძლიათ ციურ ობიექტებში აღმოაჩინონ შესაბამისი ქიმიური ელემენტი, ხოლო ხაზების ინტენსივობის მიხედვით ქიმიური ელემენტების რაოდენობაც კი განსაზღვრონ. ეს არაა იოლი საქმე, მაგრამ რამდენიმე ათასი ვარსკვლავისა თუ სხვა ასტრონომიული ობიექტისთვის ასეთი ტიპის სამუშაოები უკვე შესრულებულია.

გვინდა მოკლედ ჩამოვთვალოთ, თუ რა ინფორმაცია იქნა მოპოვებული სპექტროსკოპიის საშუალებით. დადგინდა, რომ:

- სამყაროში ყველაზე გავრცელებული ელემენტებია წყალბადი და ჰელიუმი;
- უფრო მძიმე ელემენტების წარმოშობას იწვევს ვარსკვლავთა სიღრმეში მიმდინარე თერმობირთვული რეაქციები;
- გარკვეული სახის ვარსკვლავებში მიმდინარე ბირთვული სინთეზის საბოლოო სტადიაზე რკინის ელემენტების კონცენტრაცია აღწევს ზღვრულ მნიშვნელობას, რის შედეგადაც ხდება ვარსკვლავის აფეთქება და ზეახალი ვარსკვლავის წარმოშობა;
- რკინაზე უფრო მძიმე ელემენტები, ოქროსა და ურანის ჩათვლით, წარმოიქმნება წითელ გიგანტებში;
- გალაქტიკის ცენტრის გარშემო მზე თითქმის წრიულ ორბიტაზე მოძრაობს, დაახლოებით 250 მილიონი წლის პერიოდულობით.

წითელი წანაცვლების სიდიდის გაზომვით გამოთვლილ იქნა ჩვენი გალაქტიკის ათასობით ვარსკვლავის რადიალური სიჩქარე. ასევე ნაპოვნია შორეული გალაქტიკების და კვაზარების სიჩქარეები. შეგახსენებთ, რომ წითელ წანაცვლებას უწოდებენ რომელიმე ქიმიური ელემენტის გამოსხივების შესაბამისი სპექტრული ხაზების წითელი არისკენ წანაცვლებას, რომელსაც ადგილი აქვს მაშინ, როდესაც გამოსხივების წყარო გვშორდება (დოპლერის ეფექტი).

შორეული გალაქტიკების რადიალური სიჩქარეების გაზომვამ აჩვენა, რომ სამყარო ფართოვდება, თანაც ციური ობიექტების სიჩქარე მით უფრო დიდია, რაც უფრო მეტია მათი დაშორება დედამიწიდან.



და ბოლოს, სპექტროსკოპიამ მიკროტალღოვან არეში საშუალება მოგვცა შეგვესწავლა რელიქტური ფონური გამოსხივება, რომელიც სამყაროს გაჩენის ადრეულ ეტაპებზე წარმოიქმნა.

თანამედროვე სპექტროგრაფებში ტელესკოპის მიერ შეკრებილი სინათლე იგზავნება ვერეთ წოდებულ კოლიმატორში, რომელიც გაბნეულ სხივებს გარდაქმნის პარალელურ კონად და ამით აძლიერებს ნაკადს. კოლიმატორი ამ ნაკადს შემდგომ მიმართავს დიფრაქციული მესრისკენ, რომელიც სპექტრად შლის სინათლეს. მონოქრომატულ ფერებად დაშლილი სინათლე სპეციალური კამერის საშუალებით ფოკუსდება დეტექტორზე. ჩვეულებრივ, დეტექტორი, რომელსაც მუხტ-კავშირიანი მოწყობილობა (CCD – charge-coupled device) ეწოდება, ახდენს სპექტრის ციფრულ რეგისტრაციას.

სპექტროგრაფები, როგორც წესი, წარმოადგენს დიდი რაოდენობის აპარატების კომპლექსს. მაგალითად, 4.2-მეტრიანი ტელესკოპის William Herschel (ლა პალმა) სპექტროგრაფი მსუბუქი ავტომატის ზომისაა, ხოლო მისი ოპტიკური სისტემა  $10^{-3}$  მმ სიზუსტით რეგულირდება. აღსანიშნავია, რომ ეს სპექტროგრაფი არა მხოლოდ ოპტიკურ, არამედ რადიო, ინფრაწითელ და რენტგენულ დიაპაზონშიც მუშაობს.

## 2.6 რენტგენის გამოსხივების რეგისტრაცია

ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებას, რომლის ტალღის სიგრძე 0.005-10 ნმ, ხოლო ენერგია 100 ევ-250 კევ ინტერვალშია, რენტგენის გამოსხივება ეწოდა მისი აღმოჩენის, ფიზიკის დარგში ნობელის პრემიის პირველი ლაურეატის ვილჰელმ კონრად რენტგენის (Wilhelm Conrad Röntgen, 1845-1923) საპატივცემულოდ.

პირველი თავის მე-5 პარაგრაფში ჩვენ უკვე ვისაუბრეთ რენტგენის გამოსხივების კოსმოსურ წყაროებზე. აღნიშნული იყო, რომ დედამიწის ატმოსფეროს მიერ რენტგენის გამოსხივების შთანთქმის გამო, საჭიროა დანადგარების სტრატოსფეროში ან კოსმოსში გატანა. იქვე შეგპირდით, რომ მეორე თავში დავუბრუნდებოდით რენტგენის გამოსხივების წყაროების განხილვას.

მზის რენტგენის გამოსხივება იყო პირველი, რომელიც დედამიწის ატმოსფეროს მიღმა დაფიქსირდა. იგი აღმოჩენილ იქნა 1948 წლის 5 აგვისტოს სამხედრო დანიშნულების ამერიკულ რაკეტაზე დამონტაჟებული აპარატურით. ასეთი გამოსხივება, დედამიწის იონოსფეროს გეოფიზიკურ მონაცემებზე დაყრდნობით, მანამდეც იყო ნაწინასწარმეტყველები. მეოცე საუკუნის 70-იან წლებში მზის რენტგენის გამოსხივება დეტალურად იქნა შესწავლილი ელექტრომაგნიტური სპექტრის მთელ დიაპაზონში. გაირკვა, რომ მზეზე აქტიური არეების არსებობა იწვევს ხისტი (მაღალენერგიული) რენტგენისა და გამა გამოსხივების გაჩენას. რენტგენის გამოსხივება წარმოიქმნება მზის გვირგვინში, ასევე ქრომოსფეროსა და მზის ატმოსფეროს გარდამავალი ფენის ძალიან ვიწრო შრეში. რენტგენის გამოსხივების სპექტრში დაიკვირვება მრავალჯერ იონიზირებული Fe, Ni, Mn, Ar, Co და სხვა ქიმიური ელემენტების შესაბამისი ხაზები. აღმოჩენილია ასევე, რომ ზოგჯერ, მზის ძლიერ ამოფრქვევებში, რენტგენის გამოსხივება პოლარიზებულია.

პირველი რენტგენის გამოსხივების წყარო, რომელიც მზის სიტემის მიღმა მდებარეობს, 1962 წელს აღმოაჩინა რიკარდო ჯიაკონიმ. ეს იყო Sco X-1, რომელიც მდებარეობს ღრიანკალის თანავარსკვლავედში. დაახლოებით იმავე დროს კოსმოსური წარმოშობის რენტგენის სხივები შემთხვევით იქნა აღმოჩენილი ბრუნო როსის (Bruno

Rossi, 1905-1993) მიერ, როცა ის კოსმოსური სხივებით გამოწვეულ მთვარის ფლუორესცენციას სწავლობდა.

კოსმოსური წარმოშობის რენტგენის სხივების შესწავლა თავდაპირველად პენტაგონის ეგიდით ხორციელდებოდა. ატმოსფეროში ატომური აფეთქების დაფიქსირების მიზნით ვაშინგტონის სამხედრო-საზღვაო კვლევითი ლაბორატორიის თანამშრომელმა ჰერბერტ ფრიდმანმა (Herbert Friedman, 1916-2000) შექმნა გეიგერის მოდიფიცირებული მთვლელი, რომელსაც შეეძლო მაღალი ენერგიის კვანტების რეგისტრაცია. 1964 წელს ფრიდმანმა, თანამშრომლებთან ერთად, კიბორჩხალას ნისლეულთან გააიგივა ისტორიულად მეორე კოსმოსური რენტგენის წყარო Tau X-1, რომელიც 1963 წელს კუროს თანავარსკვლავედში იყო აღმოჩენილი. მანამდე კიბორჩხალას ნისლეულს ოპტიკურ დიაპაზონში სწავლობდნენ. იგი წარმოშვა 1054 წელს აფეთქებულმა ზეახალმა ვარსკვლავმა, რომელმაც თავის ადგილას, კიბორჩხალას ნისლეულის გარდა, ნეიტრონული ვარსკვლავიც დატოვა.

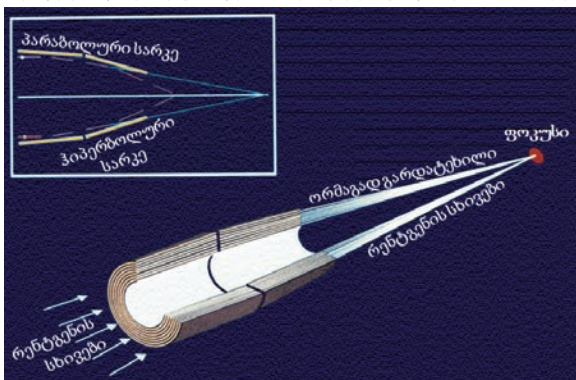
1975 წლისთვის აღნუსხული იყო 150-მდე რენტგენის წყარო, რომელთა უმრავლესობა ჩვენი გალაქტიკის სიბრტყეში მდებარეობდა. სხვადასხვა შეფასებებით, ირმის ნახტომში  $10^3$ - $10^4$  რენტგენის წყაროა დაფიქსირებული. რენტგენული წყაროების მხოლოდ ძალიან მცირე ნაწილია გაიგივებული კოსმოსურ ობიექტებთან, რომლებიც ოპტიკური დაკვირვებებითაა შესწავლილი. ვარაუდობენ, რომ ერთ-ერთი ასეთი წყარო, Cyg X-1, წარმოადგენს შავ ხვრელს. აღმოჩენილია აგრეთვე რენტგენის წყაროები, რომლებიც ჩვენი გალაქტიკის მიღმა მდებარეობენ, მაგალითად ჩვენს მეზობლად მდებარე მაგელანის ღრუბლებსა და ანდრომედეს გალაქტიკაში. რენტგენის წყაროები აგრეთვე ნაპოვნია გალაქტიკურ გროვებში, რადიოგალაქტიკებში ქალწულის (M87) და კენტავრის (NGC 5128) თანავარსკვლავედებში, კვზარში 3C 273 და სხვ.

ამჟამად ცნობილია, რომ რენტგენის წყარო შეიძლება იყოს კომპაქტური კოსმოსური სხეული, მაგალითად ნეიტრონული ვარსკვლავი, ან შავი ხვრელის უშუალო შემოგარენი. ენერგიის წყარო ამ ობიექტების გრავიტაციული შეკუმშვაა. გარდა ამისა, აღმოჩენილია, რომ გალაქტიკური გროვების გალაქტიკათაშორის სივრცეში არის აირი, რომლის ტემპერატურა ასი მილიონი გრადუსის რიგისაა. ცხელი აირის საერთო რაოდენობა გალაქტიკურ გროვებში 5-10-ჯერ აღემატება თვით გალაქტიკების მასას. რენტგენის გამოსხივების წყაროს ასეთი აირებიც წარმოადგენენ. ამის შესახებ დაწვრილებითაა მოთხრობილი წიგნის მეოთხე თავში.

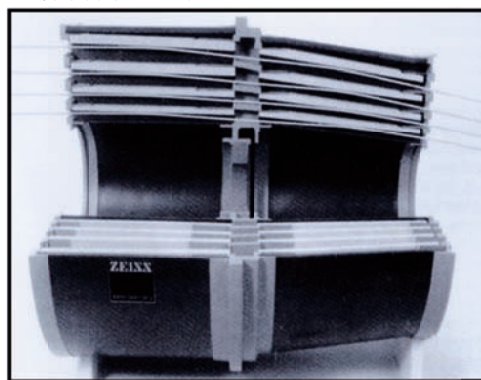
რენტგენის გამოსხივების დასაფიქსირებლად გამოიყენება სპეციალური ფოტომასალა (ძირითადად, მზის შესწავლისას), გეიგერ-მიულერის მოდიფიცირებული მთვლელები, აიროვანი პროპორციული მთვლელები, სცინტილაციური დეტექტორები და სხვ. ჩამოთვლილი დანადგარების ენერგიის გარჩევისუნარიანობა 1-20 ევ-ია. მაღალი კუთხური გარჩევისუნარიანობის მისაღწევად ამ დეტექტორებთან ერთად იყენებენ რენტგენის სხივების კოლიმატორებს. კოლიმატორები შეიცავს მშთანთქმელ ნივთიერებას, მაგალითად ტყვიას, რომელშიც ჩატანებულია ვიწრო გამჭოლი პარალელური ხვრელები. ამრიგად, კოლიმატორების შემდეგ განლაგებულ დეტექტორებში მოხვდება მხოლოდ შერჩეული კუთხით მოსული პარალელური სხივები.

დეტექტორებად გამოიყენება აგრეთვე ჰიპერბოლური და პარაბოლური კვეთის მქონე სარკეები, რომლებსაც სხივები დამრეცად, 88 გრადუსზე მეტი კუთხით ეცემა. სხივის ტრაექტორია პრაქტიკულად სარკის ზედაპირის პარალელურია. ასეთი სარკეები

გამოდგება რენტგენული გამოსახულების მისაღებად დაბალი ენერგიების არეში, ხოლო მათი კუთხური გარჩევისუნარიანობა დაახლოებით 5" შეადგენს. პირველი ნამდვილი რენტგენული ტელესკოპის პრინციპული სქემა, ფოკუსირებადი სარკეების სისტემით, შექმნეს ზემოხსენებულმა მეცნიერებმა – რიკარდო ჯიაკონიმ და ბრუნო როსიმ. რენტგენის სხივი, თავისი დიდი ენერგიის გამო, პრაქტიკულად არც გარდატყდება და არც აირეკლება ნივთიერების მიერ. ის ან გაივლის ნივთიერებაში, ან შთაინთქმება ნივთიერების მიერ. ამიტომ ეფექტური რენტგენული სარკის შესაქმნელად დაცემული სხივი ამრეკლავი ზედაპირის თითქმის პარალელურად უნდა ვრცელდებოდეს და სარკეს უკიდურესად მახვილი კუთხით უნდა „ეხებოდეს“. დეტექტორული ბლოკი, რომელიც ჯიაკონიმ და როსიმ შექმნეს, შედგებოდა საერთო ცენტრალური ღერძის მქონე რამდენიმე ერთმანეთში ჩადგმული ჰიპერბოლური და პარაბოლური ფორმის მქონე სარკის მილისგან, რომელთა ზედაპირები ერთმანეთისკენ იყო მიმართული. ტელესკოპზე დაცემული სხივები, სარკეების ზედაპირიდან მრავალჯერადი არეკვლის შედეგად, ფოკუსდება რენტგენული გამოსხივების დეტექტორზე.



სურ. 36 რენტგენული ტელესკოპის სქემა  
© ESA/ESTEC



სურ. 37 რენტგენული ტელესკოპის სარკეები

რენტგენის გამოსხივების კოსმოსური წყაროების სისტემატური ძიებისთვის აუცილებელია უწყვეტი დაკვირვებების ჩატარება დროის ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში. მეოცე საუკუნის 60-იან წლებში ასტროფიზიკოსები დარწმუნდნენ, რომ საჭირო იყო რენტგენის დეტექტორების კოსმოსში განთავსება. მოხერხდა NASA-ს ხელმძღვანელობის დარწმუნება რენტგენული თანამგზავრის აუცილებლობაში. პირველი ასეთი თანამგზავრი გაშვებული იქნა კენიის სანაპირო ზოლთან ახლოს მდებარე პლატფორმიდან, 1970 წლის 12 დეკემბერს, კენიის განთავისუფლების დღეს. თანამგზავრმა სახელად Uhuru (რაც სუაჰილის ენაზე თავისუფლებას ნიშნავს) დაახლოებით ორნახევარი წელიწადი იმუშავა. მისი საშუალებით აღმოჩენილია 339 რენტგენის წყარო, მათ შორის ობიექტი გედის თანავარსკვლავედში – Cyg X-1 – ასტრონომიის ისტორიაში შავი ხვრელის პირველი კანდიდატი.

1999 წლის 23 ივლისს კოსმოსში გაყვანილ იქნა NASA-ს რენტგენული ობსერვატორია, რომელსაც გამოჩენილი ინდოელი ასტროფიზიკოსის სუბრაჰმანიან ჩანდრასეკარის (Subrahmanyan Chandrasekhar, 1910-1995) საპატივცემულოდ ეწოდა Chandra (იხ. დანართი V). ორი კვირის განმავლობაში, დედამიწიდან მიღებული ბრძანებების შესაბამისად, ტრაექტორიის ხუთჯერ კორექტირების შემდეგ, სადგური გავიდა სამუშაო ორბიტაზე აპოგეუმით 139 200 კმ და პერიგეუმით 9 700 კმ. 1999 წლის

12 აგვისტოს გაიხსნა ტელესკოპის დამცავი ეკრანი და დედამიწაზე გადმოიკა რენტგენის სხივებში გადაღებული პირველი შესანიშნავი სურათი. ეს იყო უზარმაზარი გავრვარებული აირის ღრუბლის გამოსახულება, რომელიც წარმოიშვა ზეახალი ვარსკვლავის აფეთქების შედეგად კასიოპეას თანავარსკვლავედში.

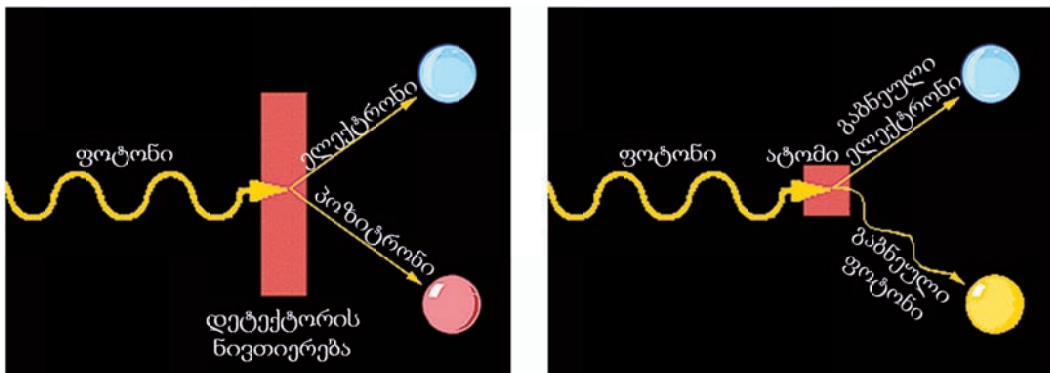
Chandra-ს მიერ გადმოცემული ინფორმაციიდან ალბათ ყველაზე მნიშვნელოვანია გალაქტიკების ბირთვებში ზემასიური შავი ხვრელების აღმოჩენა. შავი ხვრელების დაკვირვება პრინციპში ოპტიკური ტელესკოპებითაც შეიძლება, მაგრამ Chandra წარმატებით აფიქსირებს „ახალგაზრდა“ შავ ხვრელებსაც, რომელთა ასაკი დაახლოებით სამყაროს ასაკის ნახევარია, ოპტიკურ ტელესკოპებს კი მხოლოდ ბევრად უფრო ადრე გაჩენილი შავი ხვრელების რეგისტრაცია ძალუძთ.

Chandra-ს რეკორდული კუთხური გარჩევისუნარიანობა ერთმანეთთან ახლოს განლაგებული შავი ხვრელების რეგისტრაციის საშუალებას იძლევა. მაგალითად, 2002 წლის ბოლოს, მან ერთსა და იმავე გალაქტიკაში აღმოაჩინა ორი შავი ხვრელი. მაღალი გარჩევისუნარიანობის წყალობით Chandra-მ გადაიღო შავ ხვრელთან ძალზე მიახლოებული ჩვეულებრივი ვარსკვლავის დაშლის პროცესიც. 2000 წელს ობსერვატორიამ დააფიქსირა ახალი სახის შავი ხვრელი, რომელიც მასის მხრივ შუალედურია მზის მასის მქონე და ზემასიურ შავ ხვრელებს შორის. გარდა ამისა, ორბიტული ობსერვატორიის – Chandra-ს მიერ მოპოვებული ინფორმაციის საფუძველზე დადგენილია, რომ სამყარო უნდა შეიცავდეს არანაკლებ 300 მილიონ შავ ხვრელს.

რა თქმა უნდა, არსებობს სხვა კოსმოსური ხომალდებიც რენტგენის დიაპაზონში მოქმედი დეტექტორებით, მაგალითად ESA-ს თანამგზავრი XMM-Newton (იხილეთ პარაგრაფი 1.5).

## 2.7 გამა-გამოსხივების რეგისტრაცია

გამა-გამოსხივების – ზემადიდი ენერგიის ფოტონების – რეგისტრაციისთვის იყენებენ ორ პროცესს: ნივთიერების ატომებთან გამა-გამოსხივების ურთიერთქმედებით ელექტრონულ-პოზიტრონული წყვილების გაჩენას და ატომის გარსის ელექტრონებზე ფოტონების კომპტონის გაბნევას. ორივე შემთხვევაში ჩნდება დამუხტული ნაწილაკები, რომლებიც ფიქსირდება დეტექტორების საშუალებით.



სურ. 38 ფოტონის მიერ ელექტრონულ-პოზიტრონული წყვილის გაჩენისა და ელექტრონზე ფოტონის კომპტონისეული გაბნევის დიაგრამები.

თანამედროვე ასტრონომიული გამა-დეტექტორების უმრავლესობა შეიძლება ორ კლასად დაიყოს.

პირველი სახის დეტექტორებია სპექტრომეტრები, რომელთა საშუალებით შეისწავლება გამა-გამოსხივების წყაროთა ენერგიების სპექტრები. გამა-გამოსხივება ბირთვულ ხასიათს ატარებს. ატომების მსგავსად ბირთვებსაც გააჩნიათ ენერგიათა დონეები. გარკვეულ პირობებში ერთი დონიდან მეორეზე გადასვლისას ხდება ატომის ბირთვის მიერ გამა-კვანტის გამოსხივება. მაგრამ ბირთვული ენერგეტიკული დონეების ცვლილებისას გამოსხივებული ტალღების ენერგიები მრავალი რიგით, ათასჯერ და მილიონჯერაც, აღემატება ატომური დონეების ცვლილებისას გამოსხივებული ოპტიკური ფოტონების ენერგიებს. გამა-ფოტონების ენერგიები იმდენად დიდია, რომ შესაძლებელია ცალკეული კვანტების არა მარტო რეგისტრაცია, როგორც ეს ჩვეულებრივ მთვლელებში ხდება, არამედ მათი ენერგიების ზუსტი გაზომვაც, რაც თავის მხრივ, ენერგეტიკული სპექტრების აგების საშუალებას იძლევა. 10 კევ-იდან 10 მევ-ამდე ენერგიების ფარგლებში ბირთვების მიერ გამოსხივებული გამა-ფოტონების ენერგიები კვანტურ, დისკრეტულ ხასიათს ატარებენ. ამიტომ გამოსხივების სპექტრი გამოსხივების წყაროს ქიმიური შემადგენლობის დადგენის საშუალებას იძლევა. ასეთი სპექტრების დასადგენად აუცილებელია ენერგიის მაღალი გარჩევისუნარიანობის მქონე დანადგარები. ასეთია კაჟბადის (სილიციუმის) ან გაცივებული გერმანიუმის შემავსებელზე დაფუძნებული დეტექტორები. უფრო მძლავრი, ერთ ტევ-ამდე ენერგიების გამა-გამოსხივების სპექტრი წარმოადგენს ენერგიათა უწყვეტ რიგს. ამიტომ ენერგიათა ამ დიაპაზონში გამოიყენება ნატრიუმ იოდის (NaI) ან ცეზიუმ იოდის (CsI) სცინტილაციური დანადგარები, რომელთა შედარებით დაბალი გარჩევისუნარიანობა სავსებით საკმარისია სპექტრომეტრული ამოცანების გადასაწყვეტად.

ხილული გამოსხივებისგან განსხვავებით, გამა-გამოსხივების გაძლიერება დასაფოკუსებელი ლინზების საშუალებით ვერ ხერხდება. ამიტომ, მაღალი სივრცული გარჩევისუნარიანობის მისაღწევად, მეორე სახის გამა-დეტექტორებში სარგებლობენ განსხვავებული პრინციპით, რომელიც კოდირების ნიღბის გამოყენებაზეა დაფუძნებული. კოდირების ნიღაბი ბრტყელი ფირფიტაა, რომელიც გამა-სხივებისთვის გამჭვირვალე და გაუმჭვირვალე მომიჯნავე უჯრედებისაგან შედგება. უჯრედების ფორმა და განლაგება საგანგებოდაა შემუშავებული და დამოკიდებულია გადასაწყვეტ ამოცანაზე. კოდირების ნიღაბი თავსდება მრავალარხიანი დეტექტორის ზემოთ. შორეული წყაროდან წამოსული გამა-გამოსხივება, ეცემა რა კოდირების ნიღაბს, ან გაივლის გამჭვირვალე უჯრედებს, ან შთაინთქმება გაუმჭვირვალე უბნებით. შედარებით ხანგრძლივი ექსპოზიციის შემდეგ მრავალარხიანი დეტექტორის გარკვეულ არეში აღიბეჭდება კოდირების ნიღბის გამოსახულება, რომელიც თავისი ინტენსივობით საგრძნობლად აღემატება დეტექტორის არხების ელექტრონულ ხმაურს, ყოველ შემთხვევაში იმდენად, რომ შეგროვილი მონაცემების კომპიუტერული დამუშავების საშუალებით კოდირების ნიღბის გამოსახულების მაღალი სიზუსტით ამოცნობაა შესაძლებელი. დეტექტორის სიბრტყეზე კოდირების ნიღბის გამოსახულების მდებარეობის მიხედვით შესაძლებელია გამა-სხივების დაცემის კუთხისა და შესაბამისად, მათი წყაროს ადგილმდებარეობის განსაზღვრა. მეტიც, თუ კოდირების ნიღაბს ორი წყაროდან წამოსული სხივები ეცემა, დეტექტორი ნიღბის ორ გამოსახულებას დააფიქსირებს, რაც გამა-წყაროების კუთხური გარჩევის საშუალებას იძლევა. მონაცემების ანალიზით შესაძლებელია ორი ან სამი გამოსახულების



ნაწილობრივი გადაფარვის ამოცნობაც კი. შედეგად კოდირების ნიღბებით აღჭურვილ დანადგარებს გააჩნია მაღალი სივრცული გარჩევისუნარიანობა. ხშირად, კოსმოსური სივრცის გამა-გამოსხივების დიაპაზონში შესასწავლად, თანამგზავრებზე განთავსებულია კოდირების ნიღბით აღჭურვილი რამდენიმე დანადგარი, რომლებიც ფოტონების სპექტრის სხვადასხვა უბნებზეა გათვლილი, ან სხვადასხვა სახის გამა-გამოსხივების წყაროების დასამზერადაა გამოიზნული. გარდა ამისა, როგორც წესი, თანამგზავრებზე განლაგებულია სპექტრომეტრებიც.

კოსმოსიდან მოსული გამა-სხივების უდიდესი ნაწილი დედამიწის ატმოსფეროს მიერ შთაინთქმება. ამიტომ ატმოსფეროს გავლენის შესამცირებლად გამა-გამოსხივების დეტექტორები აეროსტატით ან თანამგზავრით დიდ სიმაღლეზე უნდა იქნას ატანილი. დედამიწის ზედაპირიდან 40 კმ-ზე ჰაერი უკვე საკმაოდ გაიშვიათებულია, უფრო ზემოთ ატმოსფეროს ატომების მხოლოდ 0.3%-ია დარჩენილი. ამ სიმაღლეებზე აეროსტატით ატანილ ხელსაწყოებს ძალიან წარმატებულად შეუძლია გამა-სხივების რეგისტრაცია. პირველად სწორედ რომ აეროსტატზე განლაგებული რენტგენული და გამა-დანადგარების საშუალებით დადასტურდა გამა-გამოსხივების წყაროების მდებარეობის დადგენის შესაძლებლობა, აღმოჩენილი იქნა შავი ხვრელი ჩვენი გალაქტიკის ცენტრში და SN 1987A ზეახალი ვარსკვლავის გამა-გამოსხივება.

გამა-აპარატურის მატარებელ ყველაზე ცნობილ აეროსტატზე – GRIP-2 (Gamma Ray Imaging Payload) – განთავსებულია ზემოთ აღწერილი მეორე ტიპის დეტექტორი, მბრუნავი კოდირების ნიღბით. ამ დეტექტორის დიამეტრია 70 სმ.

ჯერ კიდევ ცოტა ხნის წინ აეროსტატების ფრენის ხანგრძლივობა რამდენიმე საათს, უკეთეს შემთხვევაში, რამდენიმე დღეს არ აღემატებოდა. ამჟამად შექმნილია საჰაერო ბალონები ULDB (Ultra Long-Duration Balloons), რომლებსაც შეუძლიათ თვეობით იფრინონ და 2000 კგ წონისა და 30 მ<sup>2</sup> ფართობის მქონე აპარატურა ზიდონ. თანამგზავრებთან შედარებით ULDB ბევრად იაფი ჯდება.

სურათებზე 39 და 40 ნაჩვენებია ხანგრძლივი ქმედების საჰაერო ბალონის (ULDB) მზადებისა და მისი გაშვების მომენტები.



სურ. 39 ULDB-ს შევსების მომენტი



სურ. 40 ULDB ფრენისას

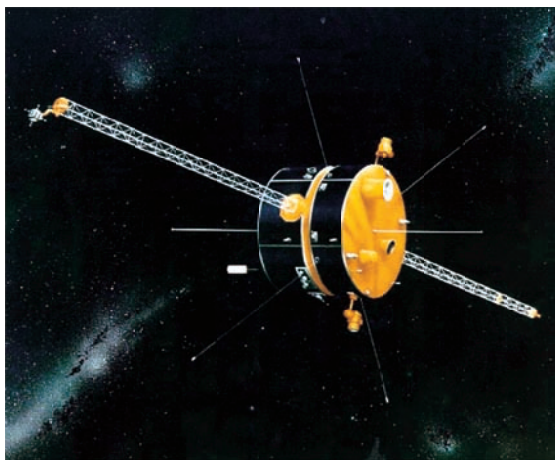
სხვა სახის კოსმოსურ გამოსხივებასთან შედარებით გამა-სხივების ნაკადი ბევრად უფრო მცირეა, ამიტომ მხოლოდ მრავალწლიანი ექსპოზიცია იძლევა მათი

გამოკვლევისთვის საკმარისი სტატისტიკის დაგროვების საშუალებას. სწორედ ეს ფაქტი წარმოადგენს ასეთი სახის გაზომვებისთვის ხელოვნური თანამგზავრების გამოყენების აუცილებლობის ერთ-ერთ მიზეზს. თანამგზავრები მრავალი წლის განმავლობაში მოძრაობენ დედამიწის გარშემო, რაც უზრუნველყოფს აპარატურის გრძელვადიან ექსპოზიციას და კოსმოსური გამა-გამოსხივების გამოკვლევის შესაძლებლობას იძლევა.

პირველი ხელოვნური თანამგზავრი, რომელზეც განთავსებული იყო 50 მევ-ზე მეტი ენერგიის მქონე გამა-გამოსხივების მიმღები ხელსაწყო, სახელად Explorer-11, გაშვებულ იქნა 1961 წელს. მან აჩვენა, რომ გამა-სხივები აპარატურას ყველა მიმართულებიდან იზოტროპულად ეცემა, ანუ გამა-გამოსხივება ქმნის თავისებურ ფონს. ეს ფონი ვარსკვლავთშორის აირთან კოსმოსური სხივების ურთიერთქმედების შედეგად წარმოიშობება. 1961 წლის შემდეგ კოსმოსური სივრცის გამა-დიაპაზონში შესასწავლად გაშვებულია ათზე მეტი თანამგზავრი.

გამა-ასტრონომიის საწყისად ითვლება ESA-ს მიერ 1975 წელს ხელოვნური თანამგზავრის COS-ის გაშვება. მას მოჰყვა საბჭოთა Granat-ის (1989) და NASA-ს კოსმოსური ობსერვატორიის CGRO-ს (Compton Gamma Ray Observatory, 1991) მისიები. თანამგზავრების ერთმანეთის მიყოლებით გაშვებასთან ერთად იზრდებოდა მათზე განთავსებული ხელსაწყოების მგრძნობიარობა. თანამგზავრების საშუალებით მეცნიერებმა აღმოაჩინეს მრავალი მნიშვნელოვანი ფაქტი, კერძოდ, მოხერხდა გამა-პულსარების დამზერა. დაკვირვებებს შორის განსაკუთრებით აღსანიშნავია კოლოსალური ენერგიის გამა-აფეთქებები, რომელთა წყარო ჯერჯერობით დაუდგენელია.

1994 წლის შემდეგ გამა-აფეთქებების მონიტორინგს აწარმოებს NASA-ს თანამგზავრი WIND. სხვა ხელსაწყოებთან ერთად WIND-ზე დამონტაჟებულია გამა-სპექტრომეტრი TGRS (Transient Gamma-Ray Spectrometer) და გამა-აფეთქებების დეტექტორი KONUS.



სურ. 41 თანამგზავრი WIND

© NASA

2008 წლის 3 ივნისს NASA-მ კანავერალის კონცხიდან (ფლორიდა) კოსმოსში გააგზავნა მორიგი დიდი გამა-ტელესკოპი Fermi Gamma-ray Space Telescope. ეს ტელესკოპი ძალიან დიდი სიზუსტით იკვლევს გალაქტიკების გამა-ჰალოებს, გალაქტიკათაშორის მაგნიტურ ველებსა და კოსმოსური სტრუქტურების ჩამოყალიბების პროცესებს. Fermi აგრეთვე გამიზნულია გამა-აფეთქებების დიდი რაოდენობის დასაკვირვებლად.

## 2.8 გამა-აფეთქებების რეგისტრაცია

მაღალი ენერგიის გამა-კვანტების მოკლე, მაგრამ ინტენსიური ნაკადები აღმოჩენილ იქნა მეოცე საუკუნის 60-იან წლებში და მათ გამა-აფეთქებები ეწოდა. ეს მოვლენა ბოლომდე ჯერ კიდევ აუხსნელია, ვინაიდან გამა-აფეთქებების რომელიმე ცნობილ ასტრონომიულ პროცესთან დაკავშირება ვერ ხერხდება. ყველაზე უცნაური ისაა, რომ გამა-აფეთქებები საკმაოდ ხშირად ხდება (საშუალოდ, დღეში ერთხელ) და ამ დროს გამოიყოფა კოლოსალური ენერგია, რომელიც აღემატება სამყაროში განვითარებული დღემდე ცნობილი მოვლენების შედეგად გამოყოფილ ყველა ენერგიას, გარდა დიდი აფეთქებისა.

გამა-აფეთქებები ორი სახისაა: მოკლე, რომელთა ხანგრძლივობა წამზე (ხანდახან კი მხოლოდ რამდენიმე მილიწამზე) ნაკლებია, და გრძელი, რომლებიც რამდენიმე წამი (ხანდახან კი რამდენიმე წუთი) მიმდინარეობს. ორივე შემთხვევაში გამა-აფეთქებების მცირე ხანგრძლივობა აფერხებს მათ შესწავლას.

რა იწვევს გამა-აფეთქებებს – შავი ხვრელების გაჩენა, ნეიტრონული ვარსკვლავების შეჯახება, თუ ჯერ კიდევ უცნობი ეგზოტიკური მოვლენა? ეს და კიდევ მრავალი სხვა შეკითხვა დიდხანს უპასუხოდ იყო დარჩენილი. სწორედ ამიტომ, მიუხედავად ბოლოდროინდელი წარმატებებისა, გამა-აფეთქებების მიმართ ინტერესი არ კლებულობს.

ათეული წლების განმავლობაში უცნობი რჩებოდა აფეთქებების წყაროებამდე მანძილი. ზოგიერთი მეცნიერის ვარაუდით წყაროები ჩვენი გალაქტიკის ჰალოში არსებობდა, ხოლო სხვები თვლიდნენ, რომ ისინი დამზერადი სამყაროს კიდეში უნდა მდებარეობდნენ. ამ მანძილებს შორის ისეთივე განსხვავებაა, როგორც თმის ღერის სისქესა და დედამიწის რადიუსს შორის. ამ უზუსტობის შედეგი იყო აფეთქების დროს გამოტყორცნილი ენერგიის შეფასებაში გაჩენილი  $10^{24}$  რიგის განუზღვრელობაც, რაც იგივეა, რომ ქვიშის ნამცეცის სანტიმეტრის მესაღებზე გადაადგილებისთვის საჭირო ენერგია ვერ განვასხვავოთ 20 მეგატონის სიმძლავრის ატომური ბომბის აფეთქების ენერგიისგან.

ასეთი იყო გამა-აფეთქებების შემსწავლელი მეცნიერების მდგომარეობა ე.წ. „ნარჩენი გამოსხივების“ (afterglow) აღმოჩენამდე. ენერგეტიკული სპექტრის სხვადასხვა დიაპაზონში ნარჩენი გამოსხივების დამზერა შესაძლებელია აფეთქებიდან რამდენიმე საათისა თუ დღის განმავლობაში. 1997 წლის დეკემბერში რამდენიმე თანამგზავრმა დააფიქსირა იმ დროისთვის ყველაზე მძლავრი გამა-აფეთქება, რომლის ნარჩენ გამოსხივებაც Keck-ის ობსერვატორიის ასტრონომები 10-მეტრიანი ტელესკოპის საშუალებით ოთხი თვის განმავლობაში აკვირდებოდნენ. ნარჩენი გამოსხივების გაქრობის შემდეგ მის ადგილზე კოსმოსურმა ტელესკოპმა Hubble-მა დაინახა მკრთალი გალაქტიკა. ამ ფაქტით გამოირიცხა თეორია, რომლის მიხედვით გამა-აფეთქების წყაროები მხოლოდ ჩვენი გალაქტიკის ჰალოში მდებარეობს. უფრო მეტიც, ნარჩენი გამოსხივების სისტემატიურმა გამოკვლევებმა უჩვენა, რომ აფეთქებების უმრავლესობა შორეულ კოსმოსში ხდება.

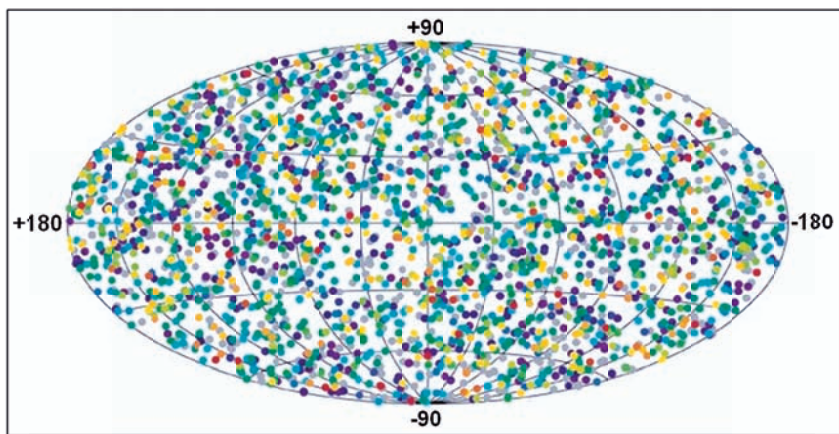
დედამიწის ზედაპირზე და კოსმოსურ თანამგზავრებზე განლაგებული ხელსაწყოების ერთობლივი კვლევის მაგალითია ყველაზე შორეული გამა-აფეთქების აღმოჩენა. 2009 წლის 23 აპრილს NASA-ს თანამგზავრის Swift-ის მიერ დაფიქსირდა ათწამიანი ძალიან სუსტი აფეთქება. სხვა თანამგზავრებისა და დედამიწაზე დამონტაჟებული ხელსაწყოების საშუალებით, შესწავლილი იქნა ნარჩენი გამოსხივება.

დადგენილ იქნა, რომ ნარჩენი გამოსხივების წითელი წანაცვლება 8.2-ის ტოლია. ეს კი ნიშნავს, რომ გამა-აფეთქების წყარო ჩვენი გალაქტიკიდან 13.035 მილიარდი სინათლის წლის დაშორებით მდებარეობს. აღსანიშნავია, რომ გამა-აფეთქება გამოიწვია ერთ-ერთი ვარსკვლავის კოლაფსმა სამყაროს გაჩენიდან მხოლოდ 630 მილიონი წლის შემდეგ.

დღევანდელი წარმოდგენებით გამა-აფეთქებები წარმოიქმნება ორი ნეიტრონული ვარსკვლავის შერწყმისას, ან ზეახალი ვარსკვლავის აფეთქებისას, რომელსაც მოსდევს შავი ხვრელის გაჩენა.

აღსანიშნავია კიდევ რამდენიმე მნიშვნელოვანი ფაქტი გამა-აფეთქებების ასტრონომიის ისტორიიდან.

გამა-აფეთქებების კვლევაში დიდი წარმატებები იქნა მიღწეული NASA-ს კოსმოსური გამა-ობსერვატორიის CGRO (Compton Gamma Ray Observatory) საშუალებით. ობსერვატორია, თანამგზავრზე განთავსებული 17-ტონიანი აპარატურით, ორბიტაზე გაყვანილი იქნა 1991 წელს, ხოლო 2000 წელს იგი დედამიწაზე დააბრუნეს. ობსერვატორია აღჭურვილი იყო ოთხი დეტექტორით, რომლებსაც გამა-კვანთების დაფიქსირება შეეძლოთ ენერგიის დიდ დიაპაზონში (30 კეე-იდან 30 გეე-ამდე). ამ დეტექტორებიდან გამა-აფეთქებების შესწავლისთვის ყველაზე მნიშვნელოვანი იყო დანადგარი BATSE (Burst and Transient Source Experiment). ფრენის განმავლობაში BATSE-მ დააფიქსირა დაახლოებით 8000 შემთხვევა, რომელთა შესწავლის ერთ-ერთი ძირითადი შედეგი იყო გამა-აფეთქებების იზოტროპულობის დადასტურება. ეს თვისება ადრეც იყო შემჩნეული, თუმცა BATSE-მ, ადრეულ კვლევებთან შედარებით, ბევრად დიდი სტატისტიკა დააგროვა. აფეთქებათა განაწილების იზოტროპულობა მათი გალაქტიკური წარმოშობის მოდელს გამორიცხავს, რადგან წყაროები ჩვენს გალაქტიკაში რომ მდებარეობდეს, მაშინ აფეთქებები უპირატესად გალაქტიკურ სიბრტყეში იქნებოდა განლაგებული.



სურ. 42 გამა-აფეთქებების ციური რუკა

© NASA/BATSE Team

42-ე სურათზე მოყვანილია ცის თაღზე გამა-აფეთქებების მიმართულებების პროექციები BATSE-ს მონაცემების მიხედვით. სხვადასხვა ფერის წერტილები შეესაბამება სხვადასხვა სიმძლავრის გამა-აფეთქებებს.

გამა-ასტრონომიის მორიგი თაობის თანამგზავრის მაგალითია ESA-ს ასტროფიზიკური ლაბორატორია INTEGRAL (International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory), რომელიც კოსმოსში რუსული რაკეტით Протон-ი 2002 წელს იქნა გაყვანილი



ბაიკონურის კოსმოდრომიდან. INTEGRAL-ის მუშაობის საორიენტაციო ვადა 10-15 წელიწადია. ის მოძრაობს გეოცენტრულ ელიფსურ ორბიტაზე (პერიგეუმი – 9000 კმ, აპოგეუმი – 153 000 კმ) 72-საათიანი პერიოდით. თანამგზავრის საშუალებით მიმდინარეობს დაკვირვებები ოპტიკურ, რენტგენისა და გამა-დიაპაზონებში, რის შედეგადაც ზუსტდება მაღალი ენერგიის გამა-სხივების ციური რუკა.



სურ. 43 ასტროფიზიკური  
ლაბორატორია INTEGRAL  
© ESA, D. Ducros

როგორც წინა ქვეთავის ბოლოს უკვე აღვნიშნეთ, გამა-გამოსხივებისა და გამა-აფეთქებების რეგისტრაცია ერთ-ერთი ძირითადი მიზანია Fermi ობსერვატორიის, რომელიც 2008 წელს იქნა NASA-ს მიერ გაშვებული.

დედამიწის ზედაპირზე განლაგებული აპარატურა ასევე მნიშვნელოვანია გამა-აფეთქებებისა და ნარჩენი გამოსხივების შესასწავლად. აღვნიშნოთ მხოლოდ იდენტურ ტელესკოპთა წყვილი, რომელიც ერთობლივად აშენდა ჰალეაკალას ობსერვატორიისა და ვისკონსინის საინჟინრო უნივერსიტეტის მიერ. ერთ-ერთი მათგანი – Equatorial Mount – 1980 წელს დამონტაჟდა ჰავაის კუნძულებზე მაუის მთაზე, ხოლო მეორე – GASP (Gamma Astronomy-South Pole) – 1994 წელს სამხრეთ პოლუსზე აიგო.

*შენიშვნა: ტელესკოპის ე.წ. ეკვატორული დამონტაჟებისას (Equatorial Mount) მისი ბრუნვის ერთ-ერთი ღერძი დედამიწის ბრუნვის ღერძის პარალელურია. ასეთი ტელესკოპი ზუსტად „მიაყოლებს თვალს“ შესასწავლ ობიექტს ციურ თაღზე მისი დღე-ღამური მოძრაობისას.*



სურ. 44 ჰალეაკალას მთაზე განლაგებული გამა-ტელესკოპი



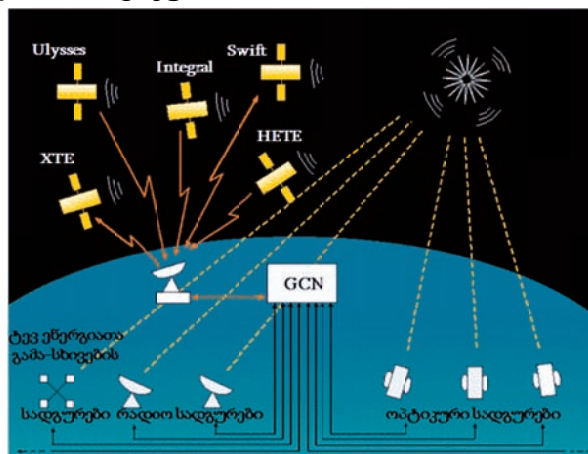
ორივე ტელესკოპი გამა-სხივების ენერგიას ზომავს ჩერენკოვის გამოსხივების საშუალებით, რომელიც წარმოიქმნება ატმოსფეროში კოსმოსური ნაწილაკების სინათლის სიჩქარეზე მეტი სიჩქარით გადაადგილებისას. ჩერენკოვის გამოსხივება ტელესკოპების სარკეების მეშვეობით ფოკუსდება ფოტომამრავლებების კლასტერზე, რომელიც შემდგომ სიგნალს მონაცემთა შეგროვების სისტემაში აგზავნის.

ბოლოს გვინდა აღვნიშნოთ, რომ ამჟამად ფუნქციონირებს NASA-ს მიერ ორგანიზებული გამა-აფეთქებების საკოორდინაციო ქსელი – GCN (Gamma Burst Coordinates Network). ამ ქსელის მიზანია თანამგზავრების მიერ დაფიქსირებული გამა-აფეთქებების კოორდინატების სწრაფი მიწოდება დედამიწის ზედაპირზე განლაგებული ოპტიკური და რადიოტელესკოპების სადგურებისთვის, მათი მეშვეობით აფეთქებების ნარჩენი გამოსხივების დეტალური დაკვირვება და მიღებული მონაცემების სამეცნიერო წრეებში გავრცელება მათი შემდგომი დამუშავების მიზნით (სურ. 45). მოვიყვანოთ GCN-ის მიერ გავრცელებული ერთ-ერთი ინფორმაციის მაგალითი. სრული ჩანაწერი ასე გამოიყურება:

GRB050219

GCN Circ archive: Swift-BAT, X-ray, UV, optical

პირველ სტრიქონში ჩანაწერი GRB050219 ნიშნავს გამა-აფეთქების (GRB) რეგისტრაციის თარიღს – 050219 – 2005 წლის 19 თებერვალი. მეორე სტრიქონში ჩანაწერი – GCN Circ archive – ნიშნავს, რომ მონაცემები შენახულია GCN-ის არქივში. მოცემულია ინფორმაცია თანამგზავრზე, რომელმაც ეს აფეთქება დააფიქსირა (ამ შემთხვევაში Swift-BAT), და ნარჩენი გამოსხივების ტიპი: X-ray – რენტგენი, UV – ულტრაიისფერი, optical – ოპტიკური.



სურ. 45 გამა-აფეთქებების საკოორდინაციო GCN ქსელის სქემა

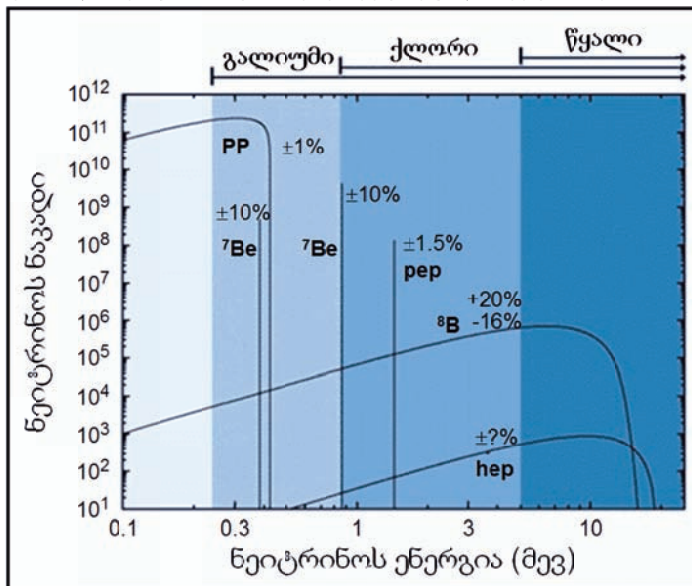
## 2.9 ნეიტრინოს რეგისტრაცია

### მზის ნეიტრინოს დეტექტორები

სანამ დავიწყებდეთ ნეიტრინოების სარეგისტრაციო ხელსაწყოების აღწერას, გვინდა გაგახსენოთ თუ რაში მდგომარეობს მზის ნეიტრინოს დეფიციტის პრობლემა (ჩვენ ის უკვე ვახსენეთ 1.7 პარაგრაფში).

ამჟამად კარგადაა დამუშავებული მზის სტანდარტული მოდელი SSM (Solar Standard Model), რომლის თანახმადაც ნეიტრინო იზადება მზეში მსუბუქი ბირთვების უფრო მძიმე ბირთვებად გარდაქმნის (სინთეზის) პროცესში. ამ მოდელის მიხედვით ნაწინასწარმეტყველებია ნეიტრინოების ნაკადი, რომელიც მზიდან დედამიწამდე უნდა აღწევდეს. თუმცა, ყველა ჩატარებული ექსპერიმენტის თანახმად, ნეიტრინოების ნაკადი მოსალოდნელთან შედარებით რამდენჯერმე ნაკლები აღმოჩნდა. ამ მოვლენას მზის ნეიტრინოების დეფიციტს უწოდებენ.

ახლა დავუბრუნდეთ ამ პარაგრაფის თემას. იმისთვის, რომ ავხსნათ ნეიტრინული დეტექტორების მუშაობის პრინციპები, უნდა გავითვალისწინოთ, თუ როგორია მზიდან დედამიწამდე მოღწეული ნეიტრინოების სპექტრი. SSM წინასწარმეტყველებს არა მხოლოდ ნეიტრინოს სრული ნაკადის სიდიდეს, არამედ მზეზე მიმდინარე რეაქციების შედეგად წარმოქმნილი ნეიტრინოების ენერგეტიკულ სპექტრსაც.



სურ. 46 მზის ნეიტრინოების სპექტრი

© John Bahcall

46-ე სურათზე ლოგარითმულ მასშტაბში მოყვანილია მზის ნეიტრინოების სპექტრი. გრაფიკიდან ჩანს, რომ ნეიტრინოების ნაკადის ცვალებადობის ინტერვალი კოლოსალურია, ფარდობით ერთეულებში ის იცვლება 10-დან 10<sup>12</sup>-მდე. მზეზე რეაქციების მწკრივი იწყება ორი პროტონის შეჯახებით (p + p) გამოწვეული დეიტერიუმის სინთეზით. დეიტერიუმის ბირთვი – D (ან რაც იგივეა H<sup>2</sup>) ერთი პროტონისა და ერთი ნეიტრონისგან შედგება. სინთეზის დროს ერთ-ერთი შეჯახებული პროტონი გარდაიქმნება ნეიტრონად, ელექტრონად და ელექტრონულ ნეიტრინოდ. ამ რეაქციების დროს წარმოქმნილი ნეიტრინოების ენერგეტიკული სპექტრი სურათზე აღნიშნულია ასოებით „pp“. სურათიდან ჩანს, რომ ასეთი ნეიტრინოების რაოდენობა მრავალი რიგით აღემატება ერთად აღებული ყველა დანარჩენი ნეიტრინოების რაოდენობას. გაცილებით ნაკლებად ალბათურია დეიტერიუმის გაჩენა სამნაწილაკოვანი რეაქციებით (p + e + p). ამ რეაქციისას წარმოშობილი უფრო დიდი ენერგიის ნეიტრინოს შესაბამისი მონოქრომატული ხაზი სურათზე „pep“ ნიშნითაა

აღნიშნული. სურათზე ბერილიუმის შესაბამისი ორი მონოქრომატული ხაზიც ჩანს.  ${}^7\text{Be}$  ჩნდება ჰელიუმის ორი იზოტოპის სინთეზისას:



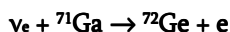
გარდა ამისა, არსებობს  ${}^8\text{B}$ -ს შესაბამისი ხაზი, რომელიც 15 მეგ ენერგიასთან ახლოსაა. აღსანიშნავია, რომ ყველა ამ რეაქციის დროს მხოლოდ ერთი ტიპის – ელექტრონული ნეიტრინო წარმოიქმნება.

46-ე სურათზე ფერადი ზოლებით მოცემულია ნეიტრინოების ენერგეტიკული ინტერვალები, რომლებიც შეესაბამება სხვადასხვა შიგთავსის (გალიუმი, ქლორი, წყალი) მქონე დეტექტორების გაზომვის არეებს.

მზის ნეიტრინო პირველად 1967 წელს იქნა რეგისტრირებული რაიმონდ დევისის (Raymond Davis, Jr., 1914-2004) და მისი თანამშრომლების მიერ ჰოუმსთეიკის (სამხრეთ დაკოტა) ოქროს მადაროებში განთავსებულ დანადგარზე. 680 ტონიან დეტექტორში, რომელიც დღესაც მუშაობს, ავზის შესავსებად იყენებენ  ${}^{37}\text{Cl}$  შემცველ ორგანულ სითხეს. 0.814 მეგ-ზე მაღალი ენერგიის ნეიტრინო მიიტაცება  ${}^{37}\text{Cl}$  ბირთვის მიერ და ამ დროს წარმოიქმნება არგონის რადიოაქტიური ბირთვი –  ${}^{37}\text{Ar}$ . ამ უკანასკნელთა რაოდენობით განისაზღვრება ხელსაწყოში გავლილი ნეიტრინოების ნაკადი. ასეთ მეთოდს რადიოქიმიურ ანალიზს უწოდებენ. როგორც ზემოთ მოყვანილი სურათიდან ჩანს, ქლორის შემცველი დეტექტორები ძირითადად  ${}^8\text{B}$ -ს სინთეზის შედეგად წარმოქმნილ ნეიტრინოებს აფიქსირებს. ასეთი ნეიტრინოები კი მზეზე საკმაოდ იშვიათად წარმოიქმნება, ისინი სრული ნაკადის მხოლოდ  $10^{-5}$  ნაწილს შეადგენენ.

ბევრად უფრო ეფექტურია დეტექტორი, რომელშიც ავზის შესავსებად თხევადი გალიუმი გამოყენებული, რადგან გალიუმს ნეიტრინოს მიტაცება შეუძლია ენერგიის გაცილებით ფართო ინტერვალში (0.233 მეგ-იდან 20 მეგ-ამდე). ამ ინტერვალში ხვდება  $p + p$  რეაქციების დროს წარმოქმნილი ნეიტრინოები. როგორც უკვე აღვნიშნეთ,  $p + p$  რეაქციების ალბათობა ნეიტრინოს წარმომშობ ყველა დანარჩენი რეაქციების ალბათობას მრავალი რიგით აღემატება.

${}^{71}\text{Ga}$ -ის მიერ ნეიტრინოს მიტაცება მას  ${}^{72}\text{Ge}$ -ში გარდაქმნის რეაქციით:



ამჟამად მზის ნეიტრინოს დასაფიქსირებლად თხევადი გალიუმით შევსებულ ავზებს იყენებენ ექსპერიმენტებში SAGE (Soviet-American Gallium Experiment) და GALLEX (Gallium Experiment). SAGE განთავსებულია ბაქსანის ნეიტრინულ ობსერვატორიაში (ბალყარეთი, რუსეთი). დეტექტორი იყენებს თხევად მეტალურ გალიუმს, რომლის წონა 57 ტონაა. GALLEX მდებარეობს გრან სასოს ეროვნულ ლაბორატორიაში (იტალია) და შეიცავს 30 ტონა გალიუმს. ბოლო წლებში ევროკავშირის ქვეყნებთან თანამშრომლობით ამ უკანასკნელი ექსპერიმენტის მასშტაბი გაიზარდა და მას GNO (Gallium Neutrino Observatory) ეწოდა.

მიუხედავად იმისა, რომ რადიოქიმიურ ანალიზზე დამყარებულ ექსპერიმენტებში მოხერხდა დასარეგისტრირებელი ნეიტრინოების ენერგეტიკული ზღურბლის შემცირება (შესაბამისად, სტატისტიკის გაზრდა და შედეგების საიმედოობის გაუმჯობესება), ეს ექსპერიმენტები ეფექტურობით მაინც მნიშვნელოვნად ჩამორჩება რეგისტრაციის ელექტრონულ მეთოდზე დაფუძნებულ ექსპერიმენტებს. ელექტრონული დანადგარები აფიქსირებენ ნეიტრინოს ურთიერთქმედებისას

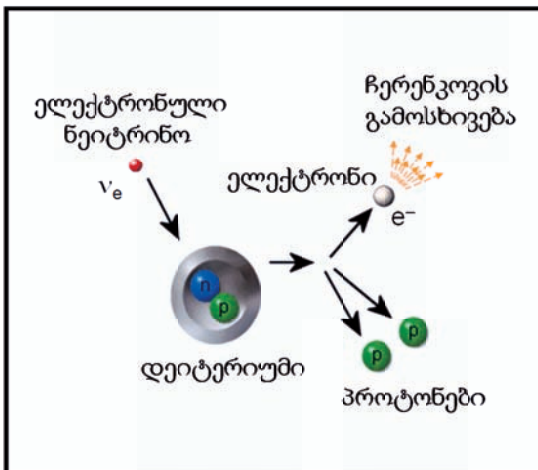
წარმოქმნილი დამუხტული ნაწილაკების ჩერენკოვის გამოსხივებას, ან მათ მიერ გამოწვეულ სცინტილაციას.

მზის ნეიტრინოების დასარეგისტრირებლად უფრო ეფექტურ, ელექტრონული ტიპის, დეტექტორს იყენებს ობსერვატორია SNO (Sudbury Neutrino Observatory). ამ ობსერვატორიაში ავზის შესავსებად მძიმე წყალი  $D_2O$  არის გამოყენებული. დანადგარი არეგისტრირებს 5 მევ-ზე მეტი ენერგიის ნეიტრინოებს.

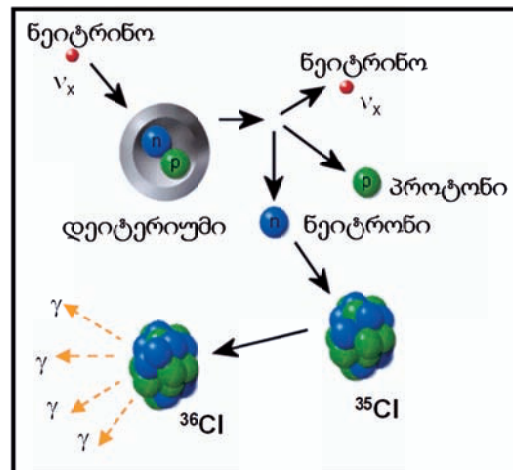
47-ე და 48-ე სურათებზე ნაჩვენებია  $D_2$ -ის ბირთვთან ნეიტრინოს ურთიერთქმედების სხვადასხვა რეაქციები. ამ ურთიერთქმედებისას ჩნდება დამუხტული ნაწილაკები, რომლებსაც შემდგომ შესაბამისი დეტექტორები არეგისტრირებენ.

პირველი ტიპის რეაქციაში (მარცხენა სურათი) მხოლოდ ელექტრონული ნეიტრინო მონაწილეობს, ვინაიდან მხოლოდ მას შეუძლია დეიტერიუმის ისეთი დაშლა, რომლის შედეგად წარმოიქმნება ელექტრონი. ამ შემთხვევაში დეტექტორი სწრაფი ელექტრონის ჩერენკოვის გამოსხივებას აფიქსირებს.

მეორე ტიპის რეაქცია (მარჯვენა სურათი) შესაძლებელია სამივე სახის ნეიტრინომ გამოიწვიოს ( $x$  ინდექსს სამი მნიშვნელობა შეიძლება ჰქონდეს), რადგან დეიტერიუმის დაშლისას იბადება დაჯახებული ნეიტრინოს ანალოგიური ტიპის ნეიტრინო. ამიტომ ასეთი რეაქციით მიღებული ნეიტრინოების ნაკადი მზის სტანდარტული მოდელის მიერ ნაწინასწარმეტყველებს უნდა ემთხვეოდეს. მეორე ტიპის რეაქციის დასარეგისტრირებლად მძიმე წყალში ხსნიან სუფრის მარილს –  $NaCl$ .  $^{35}Cl$  ბირთვით ნეიტრონის მიტაცება იწვევს ფოტონების გაჩენას, რაც შემდგომ ფოტომამრავლებლებით ფიქსირდება.



სურ. 47  $\nu_e + D \rightarrow p + p + e$   
© SNO



სურ. 48  $\nu_x + D \rightarrow p + n + \nu_x$   
© SNO

49-ე სურათზე გამოსახულია ობსერვატორია SNO-ს მიწისზედა ნაწილის ფოტო და მისი დანადგარის სქემა. დანადგარი განთავსებულია სადბერის (კანადა) ნიკელის მადაროში 2070 მ სიღრმეზე. დეტექტორი შეიცავს 12 მ დიამეტრის გამჭვირვალე, პლასტიკურ ჭურჭელში მოთავსებულ 1000 ტონა უკიდურესად სუფთა მძიმე წყალს –  $D_2O$ . ამ ჭურჭელს გარს არტყია 7000 ტონა ზესუფთა ჩვეულებრივი წყალი –  $H_2O$ , რომელიც იცავს დეტექტორს ფონური ნაწილაკებისგან. გარე ჭურჭელში მოთავსებულია 9600

ფოტომამრავლებელი, რომლებიც არეგისტრირებს  $D_2O$ -ს ბირთვთან ნეიტრინოს ურთიერთქმედების შედეგად წარმოქმნილ ჩერენკოვის გამოსხივებას.



სურ. 49 SNO-ს მიწისზედა ნაწილი და მისი დანადგარის სქემა  
© SNO

ამჟამად მზის ნეიტრინო რეგისტრირდება შემდეგ ექსპერიმენტებში:

- SNO (ონტარიო, კანადა);
- BOREXINO, ICARUS და GNO (გრან სასო, იტალია);
- SAGE (ჩრდილოეთ კავკასია, რუსეთი);
- CHLORINE (ჰოუმსთეიკის მაღაროები, აშშ).

SAGE, CHLORINE და GNO რადიოქიმიური ექსპერიმენტებია, ხოლო ყველა დანარჩენი – ელექტრონული. ბოლო თაობის ელექტრონული ექსპერიმენტები წელიწადში რამდენიმე ათას ნეიტრინოს არეგისტრირებს.

პარაგრაფში 1.7 ჩვენ უკვე ვახსენეთ, რომ ყველა ექსპერიმენტში, რომელიც მზის ნეიტრინოს რეგისტრაციას ახდენს, დაიკვირვება ელექტრონული ნეიტრინოების დეფიციტი. ნეიტრინოების დეფიციტს ხსნიან მათი კვანტური თვისებებით. კერძოდ, თუ ნეიტრინოს აქვს მასა, მაშინ, შესაძლებელია არსებული სამი სახის ნეიტრინოს (ელექტრონული –  $\nu_e$ , მიუონური –  $\nu_\mu$  და ტაუ –  $\nu_\tau$ ) ერთმანეთში თავისთავადი გარდაქმნა. ამ მოვლენას ნეიტრინოული ოსცილაცია ეწოდება. მზიდან დედამიწამდე სრბოლისას ელექტრონული ნეიტრინოების  $\nu_e$  ოსცილაციების შედეგად, მათი ნაკადი მცირდება: ზოგიერთი მათგანი გარდაიქმნება ან  $\nu_\mu$  ან  $\nu_\tau$  ნეიტრინოდ.

### ატმოსფერული ნეიტრინოს დეტექტორები

აღვნიშნოთ იაპონური დეტექტორი Kamiokande, რომელიც ნეიტრინოების ოსცილაციების შესასწავლადაა გამიზნული. ამჟამად ამ დანადგარის ზომები გაიზარდა და მას Super Kamiokande-ს, უწოდებენ. დანადგარი განთავსებულია 1000 მ სიღრმის კამიოკას მაღაროში. დეტექტორი წარმოადგენს 50 000 ტონა სუფთა წყლით სავსე ცისტერნას. ცისტერნა ორი ნაწილისგან შედგება. შიდა რეზერვუარი შეიცავს 32 000 ტონა წყალს, ხოლო გარეთა – 18 000 ტონას. გარე დეტექტორი შთანთქავს კოსმოსური გარემოდან მოსულ მიუონებსა და დეტექტორის გარემომცველი კლდეების ბუნებრივ რადიაციას. შიდა ნაწილში ჭურჭლის ცენტრის მიმართულებით განთავსებულია 11 200 ფოტომამრავლებელი, რომლებიც აფიქსირებენ დეტექტორში ნეიტრინოს



ურთიერთქმედებისას წარმოქმნილი ნაწილაკების ჩერენკოვის გამოსხივებას. ამ უკანასკნელისთვის დამახასიათებელი ვიწრო კონუსური ფორმის მიხედვით ადგენენ ნეიტრინოს მოძრაობის მიმართულებას.

აღწერილი ხელსაწყოებისგან განსხვავებით Kamiokande არეგისტრირებს არა მზის, არამედ ატმოსფერულ ნეიტრინოებს. ატმოსფერული ნეიტრინოები წარმოიქმნება კოსმოსური სხივების ჰაერის მოლეკულებთან ურთიერთქმედებისას. ურთიერთქმედების ერთ-ერთი პროდუქტია მაღალენერგიული მიუონი, რომლის დაშლისას ჩნდება მიუონური ნეიტრინო. ეს კიდევ ერთი განსხვავებაა ზემოთ აღწერილ ექსპერიმენტებთან შედარებით, რომლებიც მხოლოდ ელექტრონულ ნეიტრინოებს იკვლევს.

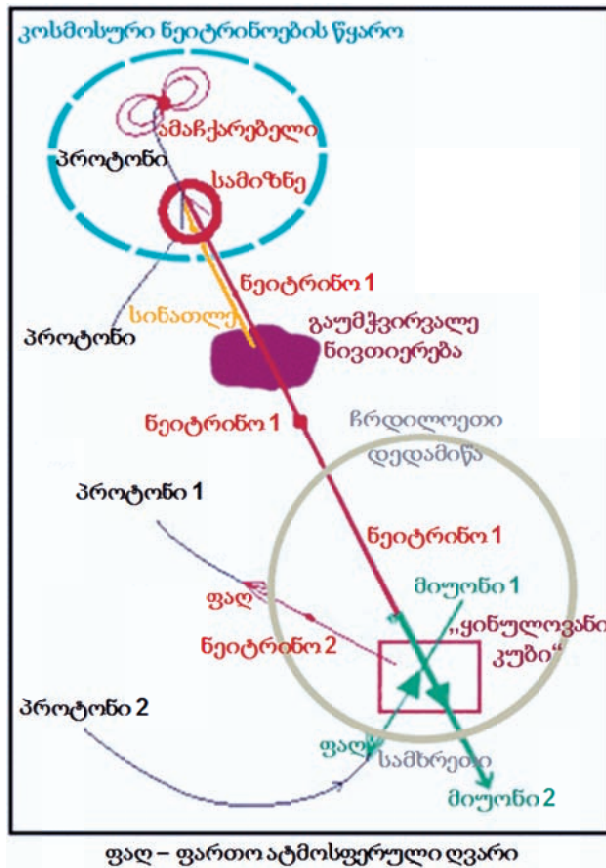
ნეიტრინოს მოძრაობის მიმართულების ცოდნა საშუალებას იძლევა განისაზღვროს მის მიერ განვლილი მანძილი. თუ ნეიტრინო დანადგარს ზემოდან დაეცა, მაშინ მის მიერ განვლილი მანძილი დაახლოებით 10 კილომეტრია (დანადგარის ზემოთ არსებული კლდოვანი ქანისა და ატმოსფეროს სისქის ჩათვლით). თუ ნეიტრინომ ქვემოდან მიაღწია დეტექტორს, მაშინ მან ატმოსფეროსთან ერთად დედამიწა მთლიანად გადაჭრა და დაახლოებით 12 000 კმ გაიარა. ეს მანძილი კი საკმარისია, რომ ოსცილაციების გამო ნეიტრინოს ნაკადი მნიშვნელოვნად შეიცვალოს. თუ ნეიტრინული ოსცილაციები მართლაც არსებობს, მაშინ მიუონური ნეიტრინოების ზემოდან და ქვემოდან მოსულ ნაკადებს შორის სხვაობა უნდა დაიშვირებოდეს. სწორედ ეს ეფექტი აღმოაჩინეს Kamiokande-ს დანადგარზე.

მოცემული განარბენისა და ენერგიის შემთხვევაში ნეიტრინოს დეფიციტი განისაზღვრება ნეიტრინოს მასით, უფრო სწორად, სხვადასხვა სახის ნეიტრინოების მასათა კვადრატის სხვაობით. Kamiokande-ს დანადგარზე მიღებული მონაცემების შედეგების მიხედვით ეს სხვაობა დაახლოებით 0.07 ევ-ის ტოლია. რადგან ელექტრონული ნეიტრინოს მასა დიდი ალბათობით მიუონური ნეიტრინოს მასაზე ბევრად მცირე უნდა იყოს, ამიტომ, როგორც ჩანს, ეს 0.07 ევ შეესაბამება მიუონური ნეიტრინოს მასას, რომელიც ნაწილაკების სტანდარტული მოდელის თანახმად, ნული უნდა ყოფილიყო (დანართი III). შესაძარებლად, ელექტრონის მასა 0.5 მევ-ია, ანუ ხუთ მილიონჯერ მეტი.

### **კოსმოსური ნეიტრინოს დეტექტორები**

კოსმოსურ ნეიტრინოს უწოდებენ კოსმოსში მიმდინარე პროცესებში, მაგალითად, ზეახალი ვარსკვლავის აფეთქებისას წარმოქმნილი მაღალი ენერგიის მქონე ნეიტრინოს. მათ ხშირად კოსმოსური ობიექტების წიაღიდან მოსულ გზავნილებად მოიხსენიებენ, რადგან კოსმოსური ნეიტრინოები მათი წყაროდან დედამიწამდე უზარმაზარ მანძილებს ისე გაივლიან, რომ არც შთაინთქმებიან და არც გაიზნევიან ვარსკვლავური, გალაქტიკური და გალაქტიკათაშორისი მატერიის მიერ.

50-ე სურათზე წარმოდგენილია ნეიტრინოების წარმოშობისა და რეგისტრაციის ზოგადი სქემა. კოსმოსური ელექტრომაგნიტური ველები აჩქარებენ პროტონებს, რომლებიც ჩრდილოეთის ცის ნახევარსფეროს შორეულ კოსმოსურ ნივთიერებასთან – „სამიზნესთან“ – ურთიერთქმედებისას წარმოქმნიან სხვადასხვა ტიპის ნაწილაკებს. პროტონი და „სამიზნე“ ქმნის „ამაჩქარებელს“, რომელიც წარმოშობს მაღალენერგიულ ნეიტრინოებს. ნეიტრინოები თავისუფლად გადაადგილდებიან კოსმოსურ სივრცეში და დედამიწას ჩრდილოეთის მხრიდან კვეთენ.



სურ. 50 კოსმოსური ნეიტრინოების წარმოშობისა და რეგისტრაციის სქემა  
© NSF

არსებობს ძალიან მცირე ალბათობა, რომ დეტექტორის უშუალო მახლობლობაში ან თვით დეტექტორში ნეიტრინო განიცდის ურთიერთქმედებას ნივთიერებასთან (ნეიტრინო 1). ასეთი ურთიერთქმედების შედეგად ჩნდება მაღალენერგიული მიუონი, რომლის მოძრაობის მიმართულება ემთხვევა საწყისი ნეიტრინოს მიმართულებას (მიუონი 1). დანადგარი სწორედ რომ დედამიწის წიაღის გავლით, ჩრდილოეთიდან სამხრეთისკენ მოძრავ მიუონს აფიქსირებს და მის მიმართულებას ზუსტად განსაზღვრავს, შესაბამისად კი განისაზღვრება ნეიტრინოს წყაროს მიმართულება. რა თქმა უნდა, დეტექტორი სხვა ნაწილაკებსაც არეგისტრირებს, მაგრამ მათი უმრავლესობა, ნეიტრინული მიუონისგან განსხვავებით, დანადგარს ეცემა აღმოსავლეთიდან, სამხრეთიდან ან დასავლეთიდან (მაგალითად, მიუონი 2), ვინაიდან დედამიწა გარკვეულწილად ასრულებს „ფილტრის“ როლს: მის წიაღში შთაინთქმება ჩრდილოეთიდან სამხრეთის მიმართულებით მოძრავი ნაწილაკების უმრავლესობა. ამრიგად კოსმოსური ნეიტრინოს ძირითადი მანიშნებელია დედამიწის წიაღიდან მოსული და დანადგარში დაფიქსირებული მიუონი.

ნეიტრინოების დეტექტორის მაგალითად 50-ე სურათზე მოყვანილია დანადგარი, რომელსაც „ყინულოვანი კუბი“ (IceCube) ეწოდება. 1000 მ წიბოს მქონე ყინულოვანი

კუბი მდებარეობს ანტარქტიკის მყინვარის სიღრმეში. მასზე ჩვენ ცოტა მოგვიანებით მოგიტხრობთ.

მაღალი ენერგიის ნეიტრინოები დედამიწის სიღრმეებში გავლისას წარმოშობენ მეორად დამუხტულ ნაწილაკებს, რომლებიც ჩერენკოვის სინათლეს ასხივებენ. ჩერენკოვის გამოსხივება ვრცელდება ნაწილაკის ტრაექტორიის გასწვრივ, ვიწრო სხეულოვან კუთხეში. მნიშვნელოვანია ის ფაქტი, რომ რაც უფრო დიდია ნაწილაკის ენერგია, მით უფრო მცირეა ამ გამოსხივების სხეულოვანი კუთხე. 50-ე სურათზე, ასეთ მეორად დამუხტულ ნაწილაკად, მწვანე ფერით ნაჩვენებია მიუონი 1.

ნათქვამიდან გამომდინარე, მაღალი ენერგიის ნეიტრინოების რეგისტრაციისთვის საჭირო ხელსაწყო წარმოადგენს ოპტიკური მოდულების ერთობლიობას, რომელიც აფიქსირებს ჩერენკოვის გამოსხივებას და მის ინტენსივობას. ეს მონაცემები კი ნეიტრინოს მოძრაობის მიმართულების და მისი ენერგიის პოვნის საშუალებას იძლევა.

მზის ნეიტრინოსთან შედარებით მაღალი ენერგიის ნეიტრინოს დეტექტირებას აადვილებს შემდგომი ორი გარემოება:

მაღალი ენერგიების შემთხვევაში ნეიტრინოს მატერიასთან ურთიერთქმედების ალბათობა დაახლოებით მისი ენერგიის პროპორციულია. კოსმოსური ნეიტრინოების შესწავლა ყველაზე უფრო პერსპექტიული აღმოჩნდა ენერგიებისთვის ერთი ტევ-იდან ერთ პევ-ამდე დიაპაზონში.

მაღალი ენერგიის ნეიტრინოების ურთიერთქმედებისას გაჩენილი მიუონები, ერთი ტევ-ის რიგის ენერგიებით, საშუალოდ რამდენიმე კილომეტრის მანძილს გადიან, სანამ დაიშლებიან ან თავის მხრივ, გარემომცველ ნივთიერებასთან განიცდიან ურთიერთქმედებას (მიუონი 1). ამ სრბოლისას ისინი ასხივებენ ჩერენკოვის ნათებას, რომელიც ანტარქტიკის ყინულოვან გარემოში პრაქტიკულად შთანთქმის გარეშე ვრცელდება და დანადგარს აღწევს მცირე დანაკარგებით. ამგვარად, დანადგარს ჩერენკოვის ნათების აღწერა შეუძლია მიუონის განარბენის იმ ნაწილიდანაც კი, რომელიც დანადგარის მოცულობის გარეთ მდებარეობს. ცხადია, რომ ამ ეფექტის წყალობით, გამჭვირვალე გარემოში (წყალში ან ყინულში) განთავსებული დანადგარების რეგისტრაციის ეფექტურობა იზრდება.

ვინაიდან კოსმოსური ნეიტრინოს ნაკადი მცირეა, მათი მეორადი ნაწილაკების ჩერენკოვის გამოსხივების დასაფიქსირებლად დეტექტორები ძალიან დიდი ზომის უნდა იყოს. გარდა ამისა, ისინი კარგად უნდა იყვნენ დაცული კოსმოსური სხივების მიერ შექმნილი ფონისგან. ასეთ დეტექტორებად იყენებენ წყლის ან ყინულის ღრმა ფენებს შესაბამისად ზღვებსა თუ მყინვარებში.

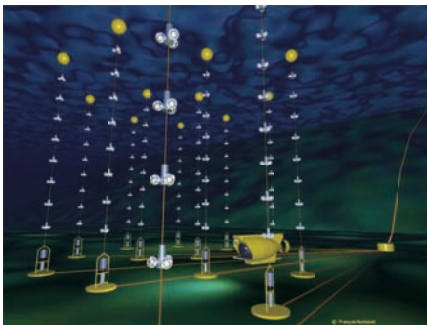
### **კოსმოსური ნეიტრინოს წყალქვეშა დეტექტორები**

პირველი წყალქვეშა ნეიტრინული ტელესკოპი DUMAND (Deep Undersea Muon and Neutrino Detector), მდებარეობდა ჰავაის კუნძულებთან. ფინანსური სიძნელეების გამო DUMAND-ი დახურეს 1995 წელს. თუმცა ამ დანადგარმა დიდი როლი ითამაშა აუცილებელი ტექნოლოგიების შექმნაში, ფონის შესწავლაში და რაც მთავარია, მან ნეიტრინული ასტრონომიის განვითარებას შეუწყო ხელი.

შემდეგი მრავალწლიანი პროექტი განხორციელდა მსოფლიოში ყველაზე ღრმა ტბის – ბაიკალის სიღრმეში. დანადგარი შედგებოდა 0.5 მ დიამეტრის მრავალი მსუბუქი დეტექტორისგან, რომლებიც თანაბარი ინტერვალით იქნა ჩაშვებული ტბაში. თუმცა ბაიკალის დეტექტორის ფართობი ნეიტრინული ასტრონომიისთვის არასაკმარისი აღმოჩნდა.

ხმელთაშუა ზღვაში არის ადგილები, სადაც შესანიშნავი პირობებია ნეიტრინული ასტრონომიისთვის. ამ ადგილებში ექსპერიმენტისთვის საჭირო სიღრმეებზე წყალი პრაქტიკულად გამჭვირვალე და წყნარია. სამი პროექტი, ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch), NEMO (Neutrino Mediterranean Observatory) და NESTOR (Neutrino Extended Submarine Telescope with Oceanographic Research) განთავსებულია ხმელთაშუა ზღვაში, შესაბამისად, ქალაქ მარსელთან, კუნძულ სიცილიასთან და ბერძნულ კუნძულ პილოსთან. ეს დანადგარები, რომლებიც მრავალი პარამეტრით DUMAND-ის ანალოგიურებია, მეორად მიუონებს 20-100 ათასი კვადრატული მეტრის ფართობიდან აგროვებენ. შედარებისთვის აღვნიშნოთ, რომ ამჟამად ყველაზე დიდი მიწისქვეშა დანადგარის ფართობი დაახლოებით 1000 მ<sup>2</sup>, ხოლო ნეიტრინული ასტრონომიისთვის სასურველი ზომა კი მილიონი კვადრატული მეტრია.

ANTARES-ი, ხმელთაშუა ზღვის ყველაზე დიდი დანადგარი, შედგება 2.5 კმ სიღრმეზე ჩაშვებული 12 ვერტიკალური ბაგირისგან, რომლებიც დაახლოებით 0.1 კმ<sup>2</sup> ფართობზეა განაწილებული (სურ. 51). ბაგირების 350 მ სიგრძის აქტიური ნაწილი შედგება „საფეხურებისგან“, რომლებიც ამ ბაგირებზეა დამაგრებული 14.5 მ ინტერვალით. 52-ე სურათზე გამოსახულია ოპტიკური მოდულები, რომელთა ძირითად ნაწილს წარმოადგენს ფოტომამრავლებელი. თითოეული საფეხური შედგება სამი ოპტიკური მოდულისა და მათთვის საჭირო ელექტროაპარატურისგან.



სურ. 51 ზღვის ფსკერზე დამაგრებული ANTARES-ის 12 ვერტიკალური ბაგირი

© F.Montanet, CNRS/IN2P3 & UJF for Antares



სურ. 52 ერთ-ერთი ბაგირი და სამი ოპტიკური მოდულისგან შემდგარი საფეხურები

© L. Fabre/CEA

ამჟამად საერთაშორისო თანამშრომლობა ხმელთაშუა ზღვაში ამზადებს ახალ ნეიტრინულ დანადგარს KM3NeT-ს, რომლის მოცულობამ უნდა შეადგინოს ერთი კუბური კილომეტრი. KM3NeT-ის კოლაბორაციაში გაერთიანდნენ სამეცნიერო ინსტიტუტები, რომლებმაც განახორციელეს ხმელთაშუა ზღვაში განლაგებული ზემოთხსენებული სამი წყალქვეშა ექსპერიმენტი: ANTARES, NEMO და NESTOR. პროექტის მიხედვით დანადგარი შედგენილი იქნება დაახლოებით ათი ათასამდე ოპტიკური მოდულისგან, რათა 10 ტევ-ის ენერგიების ნეიტრინოებით გაჩენილი მიუონებისთვის კუთხური გარჩევისუნარიანობა 0.1 გრადუსს შეადგენდეს. აღსანიშნავია დანადგარის მაღალი 100 გეე-იანი ზღურბლიც, რაც არასასურველ ფონურ მოვლენებს ეფექტურად ჩაახშობს. და ბოლოს, დანადგარი KM3NeT-ი მგრძნობიარე

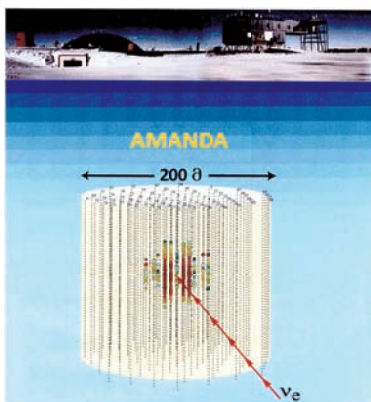


იქნება სამივე სახის ნეიტრინოს მიმართ. ვარაუდობენ, რომ დეტექტორი მწყობრში 2016-2017 წლებში ჩადგება.

### ნეიტრინული ტელესკოპები ყინულებში

განსხვავებული სახის ნეიტრინულ ტელესკოპებს მიეკუთვნება დანადგარი AMANDA (Antarctic Muon and Neutrino Detector Array), რომელიც განლაგებული იყო ანტარქტიკის ყინულოვან შრეებში. AMANDA-ს აწყობა 1994 წელს დაიწყო. ნეიტრინოს რეგისტრაციისთვის გამოიყენებოდა ყინულში ვერტიკალურად განთავსებული ფოტომამრავლებლიანი სფეროების გირლიანდები. ფოტომამრავლებლები მილიარდჯერ აძლიერებენ ყინულის მოლეკულებთან ნეიტრინოს ურთიერთქმედების შედეგად გაჩენილი მიუონის ჩერენკოვის გამოსხივების სუსტ სინათლეს. ფოტომამრავლებლების სიგნალები, ბოჭკოვანი ოპტიკური კაბელების საშუალებით, იგზავნებოდა ზედაპირზე განთავსებულ ლაბორატორიაში. რამდენიმე დეტექტორიდან მიღებული ინფორმაციით შესაძლებელი იყო ნეიტრინოს მოძრაობის მიმართულების დადგენა. პოლარული კოსმოსური სხივებით გამოწვეული ფონური სიგნალის გამოსარიცხად ფიქსირდებოდა მხოლოდ დედამიწის წიაღიდან ზედაპირის მიმართულებით – ჩრდილოეთიდან სამხრეთისკენ – მოძრავი ნეიტრინოები, ამასთანავე დედამიწა გამოიყენებოდა, როგორც ეკვატორულ ზონებსა და ჩრდილოეთის ნახევარსფეროში გაჩენილი ფონური ნაწილაკების ეკრანი. ამრიგად, ნეიტრინული ტელესკოპი, ოპტიკურისგან განსხვავებით, „ქვემოთ იყურება“.

ანტარქტიდის ყინული იდეალური გარემოა ნეიტრინოების რეგისტრაციისთვის, რადგან მასში ძალიან მცირეა ბუნებრივი რადიოაქტიური ნივთიერებების მინარევი. რა თქმა უნდა, ძალზე ძნელია ყინულში რამდენიმე კილომეტრის სიღრმის ჭის გათხრა. ამ მიზნით გამოიყენება ცხელი წყლის ჭავლი, რომელსაც მიმართავენ სასურველი ზომის საწყის ორმოში, რათა მან ვერტიკალური ჭა „გათხაროს“. შემდგომ დეტექტორები ჩაიყინება ამ ჭებში, რაც მათ მდებარეობას აფიქსირებს და გარდა ამისა, კარგად იცავს მექანიკური დაზიანებებისგან.



სურ. 53 AMANDA ყინულში



სურ. 54 IceCube-ის დეტექტორი  
© Amble

AMANDA-ს პირველი 80 დეტექტორი ყინულში, 800-1000 მეტრის სიღრმეზე, 1994 წელს ჩაუშვეს. დეტექტორების მეორე ჯგუფი (296 ცალი) 1500-დან 1900 მეტრ სიღრმემდე 1997 წელს განალაგეს. 1999 წელს 1300-2300 მეტრ სიღრმეზე განთავსდა კიდევ 462 დეტექტორისგან შედგენილი დანადგარი AMANDA-II. საბოლოო სახით AMANDA



წარმოადგენდა 200-მეტრიანი დიამეტრის მქონე ცილინდრს ყინულში ჩაშვებული 19 ბაგირით (სურ. 53), რომლებზეც 677 დეტექტორი იყო განლაგებული. ცხრა წლის მუშაობის შემდეგ, 2005 წელს, AMANDA გახდა კიდევ უფრო დიდი ანტარქტიკული პროექტის – IceCube-ის (ყინულოვანი კუბის) – ნაწილი. IceCube-ის წიბოს ზომა დაახლოებით ერთი კილომეტრია. ამგვარად, მისი მოცულობა გაცილებით აღემატება არსებული დეტექტორების მოცულობას.

IceCube-ის მონტაჟი დასრულდა 2010 წელს. საბოლოო კონფიგურაციაში დანადგარში გამოყენებულია 5 160 სფერული ოპტიკური დეტექტორი (სურ. 54). თითოეული მათგანი შეიცავს ფოტომამრავლებელსა და მონაცემთა შემგროვებელ კომპიუტერულ მოწყობილობას, რომელიც მონაცემებს ციფრული ფორმით გადასცემს ყინულის ზედაპირზე განლაგებულ მართვისა და დამუშავების ლაბორატორიას. სულ ყინულში ჩაშვებულია 86 ბაგირი, ყოველი მათგანი 60 დეტექტორითაა აღჭურვილი 1450 მეტრიდან 2450 მეტრამდე სიღრმის ინტერვალში. IceCube, რომელსაც ხშირად ნეიტრინულ ობსერვატორიას უწოდებენ, გამიზნულია ტევ-ის რიგის ენერგიების მქონე ნეიტრინოთა წყაროების შესასწავლად. გარდა ამისა, ყინულის ზედაპირზე ყოველი ბაგირის ზემოთ განლაგებულია ჩერენკოვის ორ-ორი დეტექტორი, რაც კოსმოსური სხივების ფართო ატმოსფერული ღვარების შემადგენლობის კვლევისა და კოსმოსური სხივებით გამოწვეული ფონური შემთხვევების გამორიცხვის საშუალებას იძლევა.

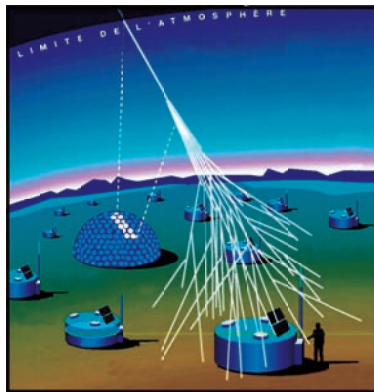
მკითხველს შეიძლება გაუჩნდეს ბუნებრივი კითხვა: რატომ ხდება თითქმის ერთნაირი შესაძლებლობების მქონე ასეთი ძვირადღირებული მოწყობილობების განთავსება ხმელთაშუა ზღვასა და ანტარქტიკის ყინულებში? მართლაც, ANTARES-ი იმეორებს AMANDA-ს, ხოლო IceCube და KM3NeT-ი თავისი მონაცემებით თითქმის იდენტურია. საქმე იმაშია, რომ სამხრეთ პოლუსთან განლაგებული ხელსაწყოები შეისწავლიან ჩრდილოეთ ჰემისფეროს ნეიტრინოების წყაროებს, ხოლო ხმელთაშუა ზღვის დანადგარები იკვლევენ სამხრეთ ნახევარსფეროს. დროთა განმავლობაში შესაძლებელი იქნება მიკროტალღური ფონისა და გამა-გამოსხივების ანალოგიური ნეიტრინოების წყაროების სრული რუკის შედგენა.

IceCube-მა პირველი ნეიტრინოს რეგისტრაცია 2006 წლის 29 იანვარს მოახდინა. 2014 წლისთვის დაფიქსირდა 30-მდე, სავარაუდოდ ექსტრაგალაქტიკური წარმოშობის, ნეიტრინო. მათ შორის სამი, რომელთა ენერგია პეე-ის რიგისაა, დღესდღეობით დამზერილი ნეიტრინოებიდან ყველაზე ენერგიულია.

*შენიშვნა: გვინდა ხაზი გავუსვათ, რომ ნეიტრინოების ოსცილაციების შესწავლა არ შემოიფარგლება ატმოსფერული, მზისა თუ კოსმოსური ნეიტრინოების დამზერით. ნეიტრინოების ინტენსიურ წყაროებად გამოიყენება ნაწილაკების ამაჩქარებლებზე თუ ატომურ სადგურებზე გაჩენილი ნეიტრინოების სხივები. ატომური სადგურების ნეიტრინოებთან მომუშავე ექსპერიმენტების მაგალითებია Double Chooz (საფრანგეთი), KamLAND (იაპონია) და სხვ. ნაწილაკების ამაჩქარებლებთან მოქმედი დანადგარებიდან შეგვიძლია აღვნიშნოთ საერთაშორისო თანამშრომლობა T2K (Tokai to Kamioka, იაპონია), პროექტი MINOS (Main Injector Neutrino Oscillation Search, აშშ) და ექსპერიმენტი OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus), რომელიც რომთან ახლოს მდებარე გრან სასოს მიწისქვეშა ლაბორატორიაშია განთავსებული. მის ფარგლებში 2010 წელს მიღებული იქნა პირდაპირი მტკიცებულება, რომ მიუონური ნეიტრინოები, რომლებიც 730 კმ-ით დაშორებულ CERN-ის პროტონულ სინქროტრონში წარმოიქმნებიან, შეიძლება ტაუ-ნეიტრინოებად გარდაიქმნას.*

## 2.10 კოსმოსური სხივების რეგისტრაცია

მაღალი და ზემოდალი ენერგიის ( $>10^{17}$  ევ) კოსმოსური სხივები დედამიწის ატმოსფეროში წარმოქმნიან მეორადი ნაწილაკების კასკადს, რომელსაც ფართო ატმოსფერული ღვარი ეწოდება. ეს კასკადი, აღწევს რა დედამიწის ზედაპირს, შედგება რამდენიმე მილიარდი, ხანდახან კი რამდენიმე ასეული მილიარდი ნაწილაკისგან, რომელთა უმრავლესობა ელექტრონებია. დედამიწის ზედაპირზე ფართო ატმოსფერული ღვარის ფართობი დაახლოებით 20 კვადრატული კილომეტრია. ცხადია, რომ ესოდენ დიდი მასშტაბის ღვარების დასაფიქსირებლად დეტექტორები ძალიან დიდ ტერიტორიაზე მონტაჟდება. შეისწავლება მხოლოდ ის შემთხვევები, როცა დაცემულ ნაწილაკებს პრაქტიკულად ერთდროულად აფიქსირებს დეტექტორების დიდი რაოდენობა. დამუშავებულია ექსპერიმენტული მონაცემების ანალიზის მეთოდები, რომელთა საშუალებითაც ფართო ატმოსფერული ღვარის ცალკეული ნაწილების რეგისტრაციის დროის მიხედვით შესაძლებელია პირველადი ნაწილაკის მოძრაობის მიმართულების განსაზღვრა, ხოლო მეორადი ნაწილაკების რაოდენობისა და მიმოფანტვის ტერიტორიაზე მათი განწილების მიხედვით – მისი ენერგიის დადგენა.



სურ. 55 ფართო ატმოსფერული ღვარების რეგისტრაციის სქემა

არსებობს კოსმოსური სხივების ენერგიის დადგენის სხვა მეთოდიც. ღვარის ნაწილაკთა კასკადი, განვითარების გარკვეულ უბანზე, ფლუორესცირებს ჰაერში არსებული აზოტის ატომებთან ურთიერთქმედების შედეგად. ნათების ინტენსივობა პირველადი ნაწილაკის ენერგიის პროპორციულია. გარკვეული ხელსაწყოების გამოყენებით ფლუორესცენციის დამზერა შესაძლებელია უმთვარო ღამისას. ამ ხელსაწყოებს ბუზის თვალის სტრუქტურა გააჩნიათ და ამიტომ მათ Fly's Eye (ბუზის თვალი) უწოდებენ. Fly's Eye-ს ტიპის დეტექტორი უშუალოდ „ადევნებს თვალს“ ატმოსფეროში კასკადების ჩამოყალიბებას. იგი ფართო ატმოსფერულ ღვარს დედამიწის ზედაპირიდან დაახლოებით 15 კმ-ის სიმაღლეზე „ხედავს“. მისთვის ღვარი ჩანს როგორც სფერო, რომელიც ულტრაიისფერ სინათლეს ასხივებს და დედამიწის ზედაპირს სინათლის სიჩქარით უახლოვდება. ხელსაწყო ღვარის განვითარების ფლუორესცენციულ ინტერვალში ზომავს გამოსხივებული სინათლის ინტენსივობას.

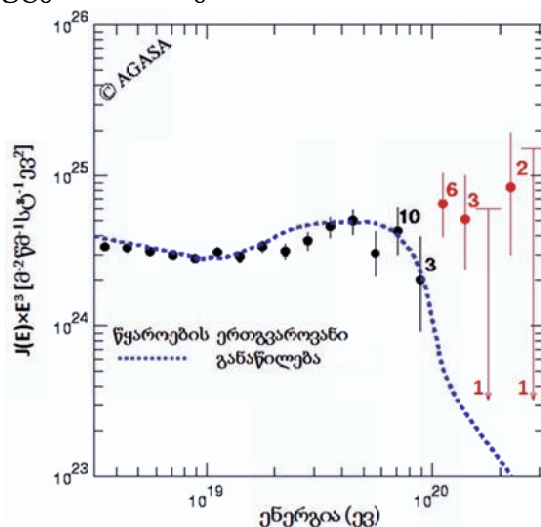
55-ე სურათზე ეს ხელსაწყო, რომელსაც ეცემა ფლუორესცირებული სინათლე, ცისფერი ნახევარსფეროთია აღნიშნული. ფლუორესცენციულ სხივებს, რომლებიც

სურათზე პუნქტირებითაა აღნიშნული, ფართო ატმოსფერული ღვარის მხოლოდ ზედა, ყველაზე მაღალენერგიული ნაწილი ასხივებს.

2007 წლამდე ფართო ატმოსფერული ღვარების შესასწავლი ყველაზე მძლავრი ხელსაწყო AGASA (Akeno Giant Air Shower Array) მდებარეობდა იაპონიაში, აკენოს ობსერვატორიის ტერიტორიაზე. AGASA გამიზნულია ყველაზე მაღალი ენერგიების მქონე კოსმოსური სხივების შესასწავლად. მისი აპარატურა  $100 \text{ კმ}^2$  ტერიტორიას ფარავს და შედგება 111 მიწისზედა და 27 მიწისქვეშა დეტექტორისგან. მიწისქვეშა დეტექტორების ზემოთ მოთავსებულია მშთანთქმელები, რომლებიც ატარებენ მიუონებს და შთანთქავენ ფართო ატმოსფერული ღვარის ყველა დანარჩენ ნაწილს. მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ მიუონების რაოდენობა მიუთითებს პირველადი ნაწილაკის ატომურ რიცხვზე. რაც უფრო მეტია ფართო ატმოსფერულ ღვარში მიუონების რიცხვი, მით უფრო დიდია ალბათობა, რომ იგი მძიმე ბირთვმა შექმნა. მიწისზედა დეტექტორები ერთმანეთისგან დაახლოებით ერთი კილომეტრით არის დაშორებული და ცენტრალური კომპიუტერთი იმართება.



სურ. 56 აკენოს ობსერვატორია



სურ. 57 ფართო ატმოსფერული ღვარის სპექტრი

57-ე სურათზე მოყვანილია AGASA-ს დანადგარზე დაფიქსირებული კოსმოსური სხივების ენერგიათა დიფერენციალური სპექტრი ( $J$ ), გამრავლებული ენერგიის მესამე ხარისხზე ( $E^3$ ). ექსპერიმენტული მონაცემების ასეთი ფართოდ გავრცელებული ფორმით წარმოდგენა საკმაოდ თვალსაჩინოა, ვინაიდან  $10^{12}$  ევ-დან დაწყებული, ექსპერიმენტული მრუდი პრაქტიკულად ენერგიათა ღერძის პარალელურია. სპექტრის ზემოდალ არეში ექსპერიმენტულ წერტილებთან მითითებულია შესაბამისი შემთხვევების რაოდენობაც.

AGASA-ს დანადგარზე დამზერილია  $10^{20}$  ევ-ზე მეტი ენერგიის პირველადი ნაწილაკის შესაბამისი ათამდე ფართო ატმოსფერული ღვარი. აღსანიშნავია, რომ შემთხვევა უდიდესი ენერგიით –  $3.2 \times 10^{20}$  ევ, დარეგისტრირდა იუტას შტატში განლაგებულ დანადგარზე HiRes (High Resolution Fly's Eye), რომელიც იყენებს Fly's Eye დეტექტორებს.

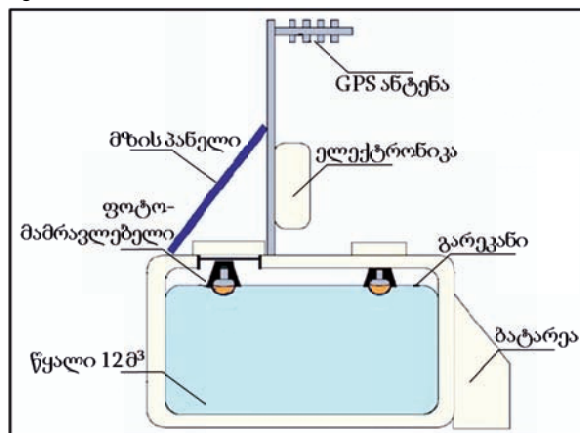
მიაქციეთ ყურადღება, რომ  $10^{20}$  ევ ენერგიებამდე სპექტრი კარგად ეთანხმება თეორიულ მრუდს, რომელიც ეფუძნება სამყაროში მაღალენერგიული კოსმოსური სხივების წყაროთა თანაბარ განაწილებას (პუნქტირი).

როგორც უკვე აღვნიშნეთ პარაგრაფში 1.8, გრეიზენმა, ზაცეპინმა და კუზმინმა ჯერ კიდევ 1966 წელს მიუთითეს, რომ კოსმოსიდან დედამიწაზე დაცემული ნაწილაკების ენერგიას უნდა ჰქონდეს ზღვრული მნიშვნელობა. კოსმოსური სხივები კარგავენ ენერგიას ფონური მიკროტალღური გამოსხივების ფოტონებთან ურთიერთქმედებისას. შედეგად, რაც არ უნდა დიდი იყოს კოსმოსური ნაწილაკების საწყისი ენერგია, დიდ მანძილებზე გადაადგილებისას, მათი ენერგია არ შეიძლება აღემატებოდეს  $5 \times 10^{19}$  ევ-ს (დაახლოებით 8 ჯოულს), ე.წ. GZK მაღალენერგეტიკულ ზღვარს (GZK-cutoff). მიუხედავად იმისა, რომ გრეიზენის, ზაცეპინისა და კუზმინის მოსაზრება თეორიულად გამართულია და ექვს არ იწვევს, უკვე დარეგისტრირებულია რამდენიმე ათეული ნაწილაკი GZK ზღვარზე მეტი ენერგიით. ერთ შემთხვევაში პირველადი კოსმოსური ნაწილაკის ენერგია  $3.2 \times 10^{20}$  ევ-საც კი აღწევდა. პარაგრაფში 1.8 აღნიშნული იყო, რომ თეორიასა და ექსპერიმენტს შორის არსებული წინააღმდეგობის ასახსნელად მრავალი რადიკალური იდეა იქნა შემოთავაზებული.

შემოთქმულიდან ჩანს, თუ რა მნიშვნელოვანია ზემადალი ენერგიის კოსმოსური სხივების შესწავლა, მათი წყაროების მოძიება და იდენტიფიცირება. რა ბუნებისაა ზემადალი ენერგიის ნაწილაკები (პროტონები, ბირთვები, ან სხვ.)? რა პროცესების დროს იზადებიან ისინი? ამ კითხვებზე პასუხის გასაცემად საჭიროა დავაფიქსიროთ ზემადალი ენერგიის ნაწილაკების ათასობით შემთხვევა. სამწუხაროდ, ასეთი ნაწილაკების ნაკადი ძალზე მცირეა. პრობლემა რომ უფრო ცხადი გახდეს, მოვიყვანოთ შემდეგი რიცხვები. ექსპერიმენტული მონაცემების ექსტრაპოლაციის თანახმად წელიწადში  $1 \text{ კმ}^2$  ფართობზე  $10^{19}$  ევ ენერგიის მქონე მხოლოდ 1-2 ნაწილაკი უნდა ეცემოდეს, ხოლო  $10^{20}$  ევ ნაწილაკთა რიცხვი კი ასჯერ ნაკლებია, ანუ  $1 \text{ კმ}^2$  ფართობზე მოსალოდნელია ერთი ან ორი ნაწილაკი საუკუნეში. ამიტომ აღნიშნული სტატისტიკის მისაღებად საჭიროა გიგანტური ფართობის მქონე დანადგარები.



სურ. 58 ოქეს ობსერვატორიის ავზი-დეტექტორი



სურ. 59 ავზის მართვის სქემა  
© NIM

ცხრამეტი ქვეყნის მეცნიერთა გაერთიანებული ძალისხმევით პამპა ამარილოში (არგენტინის ანდები) აშენდა პირ ოქეს კოსმოსური სხივების ობსერვატორია, რომლის



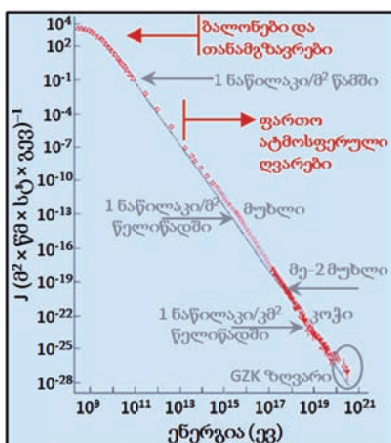
ფართობია 3000 კმ<sup>2</sup>. კოსმოსური სხივების ინტენსივობის AGASA-ს მონაცემებზე დაყრდნობით ვარაუდობენ, რომ ოქეს დანადგარი წელიწადში დაარეგისტრირებს სამიდან ექვს ათასამდე ღვარს, რომელთა ენერგია აღემატება 10<sup>19</sup> ევ, აქედან დაახლოებით 30-60 შემთხვევაში ენერგიამ 10<sup>20</sup> ევ-საც კი უნდა გადააჭარბოს.

პიერ ოქეს ობსერვატორია შედგება 3000 კმ<sup>2</sup> ფართობზე განლაგებული ჩერენკოვის 1600 დეტექტორისგან. დეტექტორები წარმოადგენს 12 ტონა გამოხდილი წყლით სავსე დახურულ ავზებს (სურათები 58 და 59). თითოეული მათგანის შიგთავსს აკვირდება 7.5×20 სმ<sup>2</sup> ფართობის მქონე სამი ფოტომამრავლებელი. ავზებში სრული სიბნელეა და წყალში სინათლეზე სწრაფად მოძრავი ნაწილაკების ტრაექტორიის გასწვრივ ჩერენკოვის ნათების გაჩენა ფიქსირდება ფოტომამრავლებლების საშუალებით. ავზები ერთმანეთისგან 1.5 კილომეტრითაა დაშორებული. მათი მონაცემები საკომუნიკაციო ანტენების საშუალებით გადაეცემა ცენტრალური მართვისა და დამუშავების კომპიუტერს. ენერგიის წყაროდ გამოიყენება ავტონომიური მზის პანელები და ბატარეები. 59-ე სურათზე ნაჩვენებია პიერ ოქეს დანადგარის ავტონომიური სადგურის სქემა.

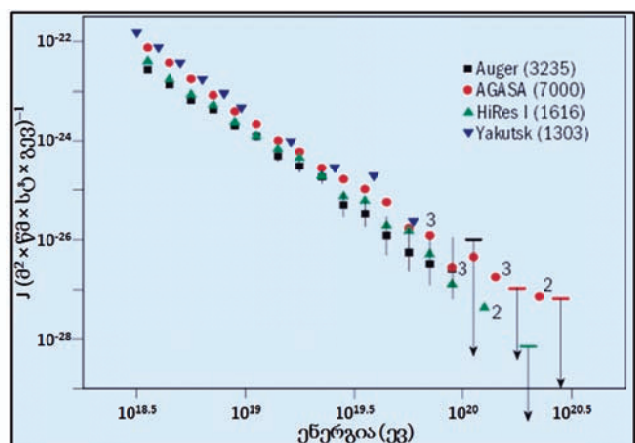
ფართო ატმოსფერული ღვარების ნაწილაკებს, როგორც წესი, ხუთი ან უფრო მეტი ავზი აფიქსირებს. მათ მიერ გაზომილი ჩერენკოვის ნათების საერთო ინტენსივობა განსაზღვრავს პირველადი კოსმოსური ნაწილაკის ენერგიას. სხვადასხვა ავზის მიერ ფართო ატმოსფერული ღვარის რეგისტრაციის დროში მიღებული მცირე განსხვავებებით ხერხდება პირველადი ნაწილაკის მოძრაობის მიმართულების დადგენა.

ჩერენკოვის დეტექტორების გარდა ოქეს ობსერვატორია აღჭურვილია ოთხი Fly's Eye მოწყობილობით. წყვილ-წყვილად ისინი დიდი სიზუსტით ზომავენ კოსმოსური ნაწილაკის ენერგიას და ადგენენ მისი მოძრაობის მიმართულებას.

ფართო ატმოსფერული ღვარების ორი სხვადასხვა სახის დეტექტორებით შესწავლა მეცნიერებს საშუალებას აძლევს მიიღონ უფრო სრული ინფორმაცია პირველადი ნაწილაკების ბუნების შესახებ და უფრო ზუსტად გაზომონ მათი ენერგიები. გარდა ამისა, კვლევის ორი დამოუკიდებელი მეთოდი ამცირებს თითოეული მათგანის სისტემატურ ცდომილებას.



ენერგიათა სრული ინტერვალი



ზემაღალი ენერგიების ინტერვალი

სურ. 60 კოსმოსური სხივების ენერგიათა სპექტრი



მე-60 სურათზე მოყვანილია კოსმოსური სხივების ნაწილაკების ენერგიათა სპექტრი, რომელიც მიღებულია საჰაერო ბალონებსა და თანამგზავრებზე განლაგებული აპარატურით და დედამიწის ზედაპირზე ფართო ატმოსფერული ღვარების რეგისტრაციის ექსპერიმენტებით. სურათის მარცხენა ნაწილიდან მკვეთრად ჩანს სპექტრის ექსპონენტური ხასიათი. თვალსაჩინოებისთვის, ნაცრისფერი მრუდი ექსპერიმენტული მონაცემების ექსპონენტური ფუნქციით ფიტირების შედეგს ასახავს. ენერგიათა უზარმაზარ ინტერვალში,  $10^9$  ევ-დან  $10^{20}$  ევ-მდე და მეტი, თითქოსდა საკმაოდ მდორე სპექტრს გააჩნია ოთხი განსაკუთრებული რეგიონი: მუხლი  $10^{15}$ – $10^{16}$  ევ არეში, მეორე მუხლი დაახლოებით  $4 \times 10^{17}$  ევ-ის მახლობლად, ტერფი  $10^{18}$ – $10^{19}$  ევ არეში და უკვე ნახსენები GZK ზღვარი. ყოველი მუხლიდან იწყება კოსმოსური სხივების ნაწილაკთა ნაკადის შედარებით სწრაფი შემცირება ენერგიის ზრდასთან ერთად. ტერფიდან დაწყებული და GZK ზღვარის რეგიონამდე კი ენერგიის ზრდასთან ერთად კოსმოსური სხივების ნაწილაკთა ნაკადი შედარებით ნელა მცირდება.

ამჟამად არსებობს მრავალი მოდელი, რომლებიც კოსმოსური ნაწილაკების ენერგიათა სპექტრს მეტნაკლები სიზუსტით აღწერენ. სპექტრის მახასიათებლების ერთ-ერთი პოპულარული ახსნის თანახმად, პირველ მუხლამდე არეში სპექტრში ჩვენს გალაქტიკაში გაჩენილი ნაწილაკების წვლილი დომინირებს და მუხლი უკავშირდება ჩვენს გალაქტიკაში არსებული ზეახალი ვარსკვლავების მიერ ნაწილაკების აჩქარების ზღვარს. ტერფის არიდან დაწყებული კი გარეგალაქტიკური კოსმოსური ნაწილაკების წვლილი ჭარბობს.

ამდენად, სპექტრის მუხლსა და ტერფს შორის გარდამავალი ინტერვალში უნდა იყოს გალაქტიკური და გარეგალაქტიკური ბუნების კოსმოსურ სხივებს შორის. ამის მიზეზი შეიძლება იყოს ჩვენი გალაქტიკიდან ნაწილაკების გაჟონვა. გალაქტიკურ მაგნიტურ ველებს არ ძალუძს გარკვეულ ენერგიებამდე აჩქარებული ნაწილაკების შეკავება და ისინი ტოვებენ გალაქტიკის ფარგლებს. რაც უფრო მსუბუქია ნაწილაკი, მით უფრო სწრაფად შეუძლია მას ზღვრული ენერგიის მიღწევა და შესაბამისად გალაქტიკიდან გაუჩინარება. მუხლის არის დეტალური შესწავლა მიუთითებს, რომ ნაკადის შემცირების სიჩქარე ერთბაშად კი არ იცვლება, არამედ საფეხურებრივად, რაც უნდა შეესაბამებოდეს სულ უფრო და უფრო მძიმე ელემენტების გაუჩინარებას გალაქტიკური ბუნების კოსმოსური სხივების შემადგენლობიდან. ერთ-ერთი მოდელის თანახმად მეორე მუხლი უნდა შეესაბამებოდეს ზემომდე (რკინაზე მძიმე) ელემენტების წვლილის დაკნინებას.

60-ე სურათის მარჯვენა ნაწილში მოყვანილია ფართო ატმოსფერული ღვარების მარეგისტრირებელი ოთხი დანადგარის საშუალებით მიღებული კოსმოსური სხივების ნაწილაკების დიფერენციალური სპექტრები ზემოაღნიშნული ენერგიების ინტერვალში. სპექტრები კარგად ეთანხმება ერთმანეთს. მცირე განსხვავებები, ძირითადად, აიხსნება ენერგიის დაყალიბების სირთულით გამოწვეული სისტემატური ცდომილებით. მარჯვენა ზედა კუთხეში ფრჩხილებში მითითებულია სპექტრების გასაზომად გამოყენებული შემთხვევების რაოდენობა.

არგენტინაში პიერ ოჟეს დანადგარის მონტაჟი 2006 წელს პრაქტიკულად დასრულდა, თუმცა ფართო ატმოსფერული ღვარების რეგისტრაცია მისი საშუალებით ჯერ კიდევ 2005 წელს დაიწყო. გრაფიკზე მოყვანილი შედეგები ადასტურებს თეორიულ ზღვარზე უფრო დიდი ენერგიის მქონე ნაწილაკების არსებობას. პიერ ოჟეს დანადგარის მუშაობის პირველი სამი წლის შემდეგ დადგინდა, რომ ზემოაღნიშნული ენერგიის ნაწილაკები

მეზობელი გალაქტიკური წყაროებიდან გამოსხივდება. თვლიან, რომ ისინი შეიძლება იბადებოდნენ ე.წ. აქტიურ გალაქტიკათა ბირთვებში (Active Galactic Nuclei – AGN) მდებარე შავი ხვრელების მიდამოებში.

დედამიწის სამხრეთ ნახევარსფეროში მდებარე პიერ ოჟეს ობსერვატორიას მხოლოდ სამხრეთ ჰემისფეროს ზემაღალი კოსმოსური სხივების წყაროების შესწავლა შეუძლია. ჩრდილოეთ ჰემისფეროში მდებარე წყაროებზე ინფორმაციის მისაღებად მსგავსი დანადგარი ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში უნდა აიგოს. ესოდენ მასშტაბური პროექტის განსახორციელებლად საჭიროა შესაბამისი დაფინანსების მოპოვება, რასაც არგენტინაში მდებარე დანადგარზე საინტერესო შედეგების მიღება მნიშვნელოვნად შეუწყობს ხელს. სავარაუდოდ მეორე დანადგარი განთავსდება კოლორადოში, აშშ.

გინდა გავამახვილოთ ყურადღება, რომ ზემაღალი ენერგიების ინტერვალში სანდო სტატისტიკური მონაცემების დაგროვება მოითხოვს დანადგარებს, რომლებმაც უნდა შეძლონ ფართო ატმოსფერული ღვარების რეგისტრაცია კიდევ უფრო დიდი ფართობის ზედაპირზე. ერთ-ერთი პროექტი JEM-EUSO (Japanese Experiment Module Extreme Universe Space Observatory) ითვალისწინებს სამეცნიერო აპარატურის განთავსებას საერთაშორისო კოსმოსურ სადგურზე. დანადგარი დაახლოებით 400 კმ სიმაღლიდან დააკვირდება კოსმოსური სხივების დედამიწის ატმოსფეროსთან ურთიერთქმედებისას გაჩენილ ფლუორესცენციას (ულტრაიისფერი ინტერვალის ფოტონები) და მაღალი სიზუსტით აღადგენს ფართო ატმოსფერული ღვარების განვითარების სურათებს. შესაძარებლად, JEM-EUSO დაკვირვების არე ორი რიგით აღემატება პიერ ოჟეს ობსერვატორიის არეს. JEM-EUSO დანადგარის ამუშავება 2016 წლისთვისაა დაგეგმილი.

ფართო ატმოსფერული ღვარების რეგისტრაციის ფართის გაზრდის კიდევ ერთი შესაძლებლობა უკავშირდება შედარებით მომცრო სადგურების მსოფლიოს მასშტაბით განთავსებას სამეცნიერო ორგანიზაციებსა და უმაღლეს სასწავლებლებში და მათ საერთო ქსელში გაერთიანებას. ამჟამად ეს მიმართულება საკმაოდ აქტიურად ვითარდება. აღსანიშნავია, რომ ე. ანდრონიკაშვილის ფიზიკის ინსტიტუტი, სადაც დიდი ხანია მიმდინარეობს კოსმოსური სხივების კვლევა, მონაწილეობს ერთ-ერთ ასეთ პროექტში. ამაზე მოთხრობილია წიგნის მეორე დანართში.

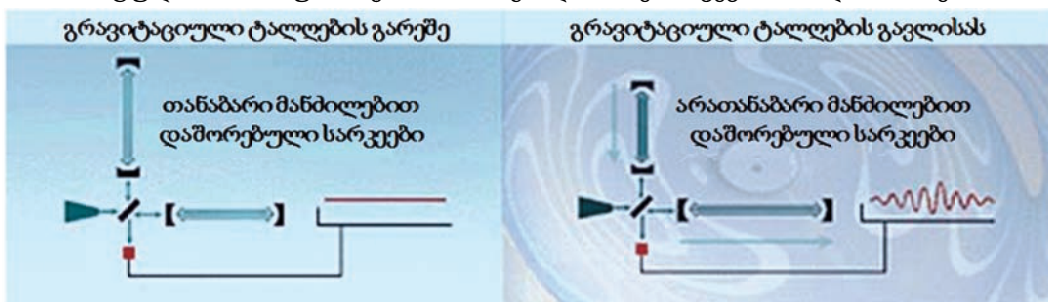
## 2.11 გრავიტაციულ ტალღებზე ნადირობა

გრავიტაციული ტალღების (გრავიტონების) დეტექტირებას მეცნიერები ზემგრძნობიარე ინტერფერომეტრების საშუალებით ცდილობენ. მგრძნობიარობის მიმართ განსაკუთრებული მოთხოვნები ორი გარემოებითაა განპირობებული. ერთის მხრივ, გრავიტაციული ტალღების სიგრძე ძალიან დიდი უნდა იყოს (ასობით კილომეტრი). შესაბამისად, ინტერფერომეტრის ბაზისის სიგრძეც, სასურველია, რამდენიმე კილომეტრს აღემატებოდეს. მეორეს მხრივ, გრავიტონები, თუკი ისინი არსებობენ, ძალზე სუსტ ტალღებს მიეკუთვნებიან.

განვიხილოთ გრავიტაციული ტალღების ინტერფერომეტრის საშუალებით რეგისტრაციის პრინციპი. შეგახსენებთ, რომ უმარტივესი ინტერფერომეტრი შედგება ერთმანეთის მიმართ პერპენდიკულარულად განლაგებული ორი სარკისგან (სურ. 61). გრავიტაციულმა ტალღამ, ინტერფერომეტრში გავლისას, უნდა გამოიწვიოს სარკეების ურთიერთგანლაგების ცვლილება, მაგალითად, პერიოდულად უნდა დააგრძელოს ერთი მხარი და შეკუმშოს მეორე, და პირიქით. აღვნიშნოთ, რომ სარკეების ერთმანეთის

მიმართ გადანაცვლების სიდიდე მათ შორის მანძილის პროპორციულია. სწორედ ამიტომ გრავიტაციულ ინტერფერომეტრებს დიდი ბაზისი (მხრები) უნდა ჰქონდეს.

როგორც აღნიშნული იყო, გრავიტაციული ტალღის გავლის მაჩვენებელად ინტერფერომეტრებში სარკეების პერიოდულ ურთიერთგაანაცვლებას იყენებენ. სურათის ქვედა მარცხენა კუთხესთან გამოსახული ნახევრად გამჭვირვალე სარკე მასზე დაცემულ ლაზერულ სხივს ორ ნაწილად ყოფს. სხივის ერთი ნაწილი სურათის ზედა სარკისკენ, ხოლო მეორე კი მარჯვენა სარკისკენაა მიმართული. შემდგომ, ორივე სხივი დამატებითი სარკეებით უკან ირეკლება, უბრუნდება გამყოფ ნახევრად გამჭვირვალე სარკეს და ინტერფერენციას განიცდის დეტექტორში, რომელიც სქემის ქვედა ნაწილში მუქი წითელი კვადრატითაა აღნიშნული. სისტემა ისე არის დარეგულირებული, რომ გრავიტაციული ტალღების გარეშე ლაზერის სხივები დეტექტორში საწინააღმდეგო ფაზაში ხვდება და აქრობს ერთმანეთს. მარცხენა სურათზე გამოსახული მუქი წითელი ჰორიზონტული ხაზი მიუთითებს, რომ სიგნალი ამ შემთხვევაში არ დაიმზირება.



სურ. 61 გრავიტაციული ინტერფერომეტრის პრინციპი

თუ სისტემას გრავიტაციული ტალღა დაეცემა (მარჯვენა სურათი), სარკეები გადაინაცვლებს. სხივების გავლილ მანძილებს შორის გაჩენილი სხვაობის გამო, სხივები ერთმანეთს აღარ ჩაახშობს და დეტექტორში გაჩნდება სიგნალი (მარჯვენა სურათზე გამოსახული წითელი სინუსოიდალური მრუდი).

გრავიტაციული ტალღების ზემოქმედების სიმძლავრე რომ შევავსოთ, უნდა გაიზომოს სარკეების საწყისი მდგომარეობებიდან გადახრების სიდიდე. გრავიტაციული ძალები ისეთი სუსტია, რომ ეს გადახრები ატომთა ზომის რიგისაა. სწორედ ამასთანაა დაკავშირებული გრავიტაციული ტალღების რეგისტრაციის ერთ-ერთი მთავარი სირთულე და განსაკუთრებული მოთხოვნები გრავიტაციული ინტერფერომეტრების მგრძნობიარობის მიმართ. საჭირო მგრძნობიარობის მისაღწევად აუცილებელია სარკეების ზედაპირის გაპრიალება დაახლოებით 16 ატომის ზომის სიზუსტით მაშინ, როცა ეს სარკეები საყოფაცხოვრებო თევზის ზომისა და 10 სმ სისქისაა. ამრეკლავი აფსკის სისქის არაერთგვაროვნება კი ორი ატომის ზომას არ უნდა აღემატებოდეს.

გრავიტაციული ტალღების რეგისტრაციისთვის მაღალი მგრძნობიარობის გარდა ხელსაწყოს უნდა გააჩნდეს ფუჭი სიგნალების (ხმაურის) გამორიცხვის უზადლო შესაძლებლობა. ხმაურის წყაროები კი, რომლებსაც ძალუძთ გრავიტაციული ტალღის მსგავსი სიგნალის გამოწვევა, ძალიან ბევრია, მაგალითად, ატმოსფერული რხევები, სუსტი სეისმური პროცესები და სხვ. ხმაური წარმოადგენს გრავიტაციული ექსპერიმენტების ურთულეს დაბრკოლებას და მის გასაწმენდებლად განსაკუთრებულ ზომებს მიმართავენ. მაგალითად, ხელსაწყობს ათავსებენ ვაკუუმში,

სადაც ჰაერის წნევა ატმოსფერულთან შედარებით ტრილიონჯერ ნაკლებია, სარკეებს ჰკიდებენ წვრილ სიმეზზე, და ასე შემდეგ.

ამჟამად მოქმედებს ექვსი გრავიტაციული ინტერფერომეტრი. ერთ-ერთი სისტემა – LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory), რომელიც დღეისთვის ყველაზე მგრძნობიარე სამი ინტერფერომეტრისგან შედგება, აშშ-შია განთავსებული. LIGO-ს სამი ინტერფერომეტრიდან ერთი მდებარეობს ლივინგსტონში (მზრის სიგრძე – 4 კმ), და ორი – ჰანფორდში (მზრის სიგრძე – 2 და 4 კმ). ლივინგსტონსა და ჰანფორდს შორის მანძილი 3000 კმ-ია. აღვნიშნოთ, რომ ინტერფერომეტრის თითოეულ მხარში არეკლილი სინათლე ასჯერ გადის სარკეებს შორის მანძილს, რაც მათ მიერ გავლილ მანძილს 100-ჯერ ზრდის, ანუ ეფექტური ბაზისები 200 და 400 კმ-ის ტოლი გამოდის. LIGO-ს გარდა არსებობს სხვა გიგანტური ინტერფერომეტრები. ესენია VIRGO (იტალია, მხარი – 3 კმ), TAMA (იაპონია, მხარი – 3 კმ) და GEO (გერმანია, მხარი – 6 კმ).

ჩნდება ბუნებრივი კითხვა: რატომ შეიქმნა ასეულობით მილიონი დოლარის ღირებულების რამდენიმე დანადგარი, რომლებსაც პრაქტიკულად ერთნაირი შესაძლებლობები გააჩნია? ცხადია, რომ ყოველი ახალი დანადგარისთვის უმჯობესდებოდა მგრძნობიარობისა და ფონური სიგნალების ჩახშობის უნარის მახასიათებლები. მაგრამ ეს არ არის მეცნიერთა კოლოსალური ძალისხმევის მთავარი მიზეზი. საქმე იმაშია, რომ გრავიტაციული ტალღების მიღების მანიშნებელი უნდა იყოს ორი ან მეტი ერთმანეთისგან დაშორებული ინტერფერომეტრით მათი ერთდროული რეგისტრაცია. მაგალითად შეიძლება მოვიყვანოთ ჰანფორდის ორი ინტერფერომეტრისგან შემდგარი სისტემა. შემთხვევა რომ გრავიტაციული ტალღის გავლის სანდო კანდიდატად ჩაითვალოს, იგი ორივე ინტერფერომეტრმა უნდა დააფიქსიროს, თანაც სიგნალებს შორის თანაფარდობას უნდა ჰქონდეს მკაცრად განსაზღვრული მნიშვნელობა, რომელიც ინტერფერომეტრების მხარეთა სიგრძეებზეა დამოკიდებული.

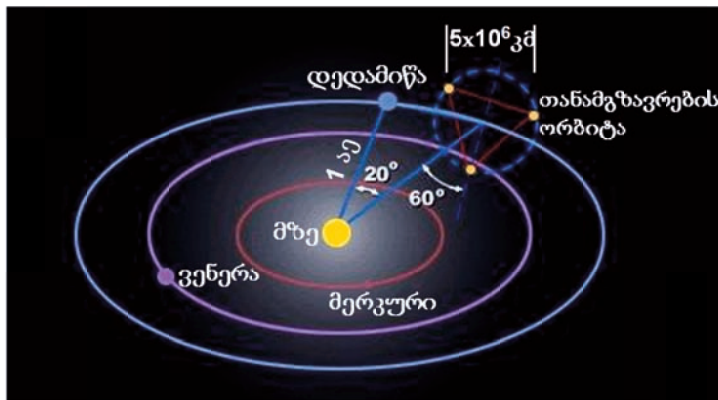


სურ. 62 ფრანგულ-  
იტალიური ინტერფერომეტრი  
VIRGO (მზრის სიგრძე – 3 კმ).  
მას შეუძლია 1000 კმ-მდე  
სიგრძის მქონე გრავიტაციული  
ტალღის რეგისტრაცია  
© CNRS/IN2P3

ზემოთ ნახსენები ექვსივე ინტერფერომეტრის მონტაჟი 2002 წელს დასრულდა, თუმცა მათი მოდიფიკაცია უწყვეტად გრძელდება მგრძნობიარობისა და სიგნალი/ფონი შეფარდების გაზრდის მიზნით. დაკვირვებები LIGO-ზე 2002 წლიდან მიმდინარეობს. შემდგომ მას GEO-ც შეუერთდა. ამჟამად ამ პროექტების დანადგარები სიგნალების თანხვედრის რეჟიმში მოქმედებენ.

პირველი დაკვირვებების მასალების დამუშავების შედეგად გრავიტაციული ტალღები ვერ იქნა აღმოჩენილი, თუმცა გარკვეული სახის შემთხვევებისთვის დადგინდა ე.წ. ზედა ზღვარი. მაგალითად, ირმის ნახტომის ტიპის გალაქტიკებში მძლავრი გრავიტაციული ტალღების ერთ-ერთი შესაძლო წყარო ორჯერადი ნეიტრონული ვარსკვლავების შერწყმაა. მათ შესახებ მოთხრობილი იყო პირველი თავის ბოლოს. როგორც მაშინ აღვნიშნეთ, გათვლების თანახმად გალაქტიკური მასშტაბებით დედამიწის მახლობლობაში ერთი შერწყმა დაახლოებით ათ წელიწადში ერთხელ უნდა ხდებოდეს. ექსპერიმენტული მონაცემების თანახმად კი ასეთი შემთხვევების რაოდენობა წელიწადში 50-ს არ უნდა აღემატებოდეს.

ამჟამად შეისწავლება კოსმოსური ობსერვატორიის eLISA/NGO (evolved Laser Interferometer Space Antenna / New Gravitational Wave Observatory) 2034 წლისთვის გაშვების შესაძლებლობა. შვიდი ევროპული ქვეყნის (საფრანგეთის, გერმანიის, იტალიის, ჰოლანდიის, ესპანეთის, შვეიცარიისა და დიდი ბრიტანეთის) მეცნიერთა ძალისხმევას მხარს უჭერს ევროპული კოსმოსური სააგენტო ESA. eLISA/NGO შედგენილი იქნება 5 მილიონი კილომეტრის (13-ჯერ მეტი, ვიდრე მანძილი დედამიწიდან მთვარემდე) წიბოს მქონე სამკუთხედის წვეროებში განლაგებული სამი თანამგზავრისგან, რომლებიც შექმნიან გიგანტურ ინტერფერომეტრს.



სურ. 63 eLISA/NGO-ს კოსმოსური ინტერფერომეტრის თანამგზავრების განლაგების სქემა  
© ESA

თანამგზავრებისგან შექმნილი სამკუთხედი მზის გარშემო დედამიწიდან 5 მილიონი კილომეტრით დაშორებულ ორბიტაზე იბრუნებს. მისი მოძრაობისას თანამგზავრების ურთიერთდაშორების განსაზღვრის სიზუსტე  $4 \times 10^{-11}$  მეტრი იქნება. ასეთ ინტერფერომეტრს მილიონი კილომეტრის რიგის ტალღის სიგრძის გრავიტონის რეგისტრაციის პოტენციალი ექნება.



## თავი III რას და როგორ ზომავენ ასტრონომები

### 3.1 ზოგადი შენიშვნები

წინა თავებში ჩვენ განვიხილეთ ასტრონომიის დარგები, განვსაზღვრეთ შესასწავლი საკითხების არეალი და აღვწერეთ ამ მიზნების მისაღწევად გამოყენებული აპარატურა. მესამე და მეოთხე თავებში ჩვენ შევეცდებით ავხსნათ, თუ როგორ ხდება ასტრონომიის, ასტროფიზიკისა და კოსმოლოგიის ძირითადი პრობლემების გადაწყვეტა. დამახასიათებელი ამოცანების ერთმანეთისგან განცალკევება ხშირად პირობითია, ამიტომ ზოგიერთი პრობლემა შესაძლოა მივაკუთვნოთ მეცნიერების როგორც ერთ, ასევე მეორე სფეროს. ამიტომ გასაკვირი არაა, რომ ერთი და იგივე საკითხი რამდენიმე თავში იყოს განხილული, ოღონდ სხვადასხვა რაკურსით.

წინამდებარე თავში შევხებით ასტრონომიის შემდეგ საკითხებს: ციური სხეულების კოორდინატების, სიკაშკაშისა და ნათობის განსაზღვრა, მათი ტემპერატურის „გაზომვა“, ვარსკვლავების მასებისა და ზომების დადგენა, კოსმოსური ობიექტების ასაკისა და მათი დედამიწიდან დაშორების შეფასება.

### 3.2 ციური კოორდინატები

ასტრონომიის ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი ამოცანაა ცაზე ვარსკვლავთა მდებარეობების განსაზღვრა.

დედამიწის ზედაპირზე ობიექტის მდებარეობის მისანიშნებლად, ჩვეულებრივ, მიუთითებენ მის კოორდინატებს, როგორიცაა ადგილის გეოგრაფიული განედი, გრძედი და ზღვის დონიდან მისი სიმაღლე.

კოორდინატთა ასტრონომიული სისტემები უფრო რთულია, ვინაიდან მნათობების კოორდინატები ცის თაღზე უნდა განისაზღვროს. ამ მიზნით ნებისმიერი რადიუსის მქონე წარმოსახვითი ციური სფერო გამოიყენება. გამოთვლების გასამარტივებლად ციური სფეროს რადიუსი ერთეულის ტოლადაა მიჩნეული.

ციურ მნათობთა კოორდინატები განისაზღვრება ორი კუთხური სიდიდით (ან ორი რკალით), რომლებიც ცის სფეროზე ობიექტების მდებარეობას ცალსახად მიუთითებენ. ამგვარად, კოორდინატთა ციური სისტემა წარმოადგენს სფერულ სისტემას, რომელშიც მესამე კოორდინატი – დედამიწამდე მანძილი – განუსაზღვრელი სიდიდეა.

ციურ კოორდინატთა სისტემები ერთმანეთისგან განსხვავდება ძირითადი სიბრტყისა და ათვლის სისტემის სათავის მიხედვით. კოორდინატთა სისტემის არჩევანი დამოკიდებულია გადასაჭრელ ამოცანაზე. ყველაზე ხშირად გამოიყენება ჰორიზონტული და ეკვატორული სისტემები. შედარებით იშვიათად – ეკლიპტიკური და სხვა სისტემები.

იმისათვის, რომ არ გადავტვირთოთ თხრობა, განვიხილავთ კოორდინატთა მხოლოდ ორ სისტემას: ჰორიზონტულს და ეკვატორულს.

#### ციური კოორდინატების ჰორიზონტული სისტემა

ნებისმიერ სისტემაში კოორდინატების ასათვლელად ორი ძირითადი სიბრტყე და სივრცის ძირითადი წერტილები გამოიყენება.

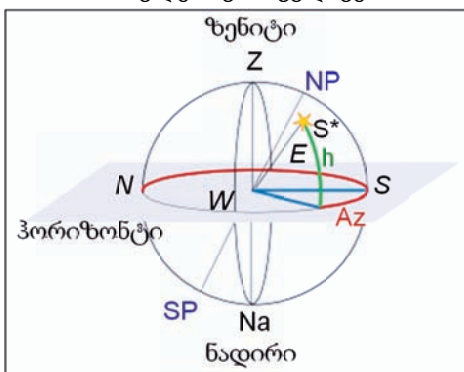
ციური კოორდინატების ჰორიზონტულ სისტემაში (სურ. 64) დამკვირვებელი იმყოფება სისტემის ცენტრში, ძირითადი სიბრტყე – ჰორიზონტია, ხოლო ძირითადი წერტილები ქვეყნის მხარეებია: აღმოსავლეთი (E), დასავლეთი (W), ჩრდილოეთი (N) და

სამხრეთი (S). წერტილი, რომელიც უშუალოდ დამკვირვებლის ზემოთ მდებარეობს, ზენიტად იწოდება (Z).

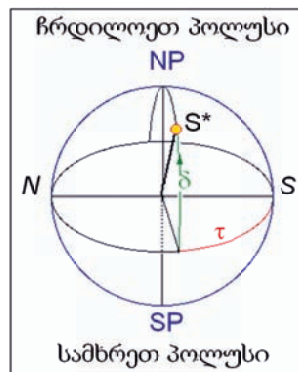
ჰორიზონტულ სისტემაში ციური სხეულების კოორდინატების განსაზღვრა შემდეგნაირად წარმოებს: ჰორიზონტის სიბრტყიდან აითვლება ერთი კოორდინატი – მნათობის სიმაღლე. ამ მიზნით ზენიტიდან ჰორიზონტამდე უნდა დავუშვათ რკალი, რომელიც ვარსკვლავზე გაივლის. მიღებული რკალის ჰორიზონტიდან ვარსკვლავამდე კუთხურ ზომას ეწოდება მნათობის სიმაღლე  $h$  (მწვანე რკალი). მისი მნიშვნელობა დადებითია ჰორიზონტის სიბრტყის ჩრდილოეთით და უარყოფითია – ჰორიზონტს ქვემოთ, სამხრეთ ნახევარსფეროში. მაშასადამე, სიმაღლეს, ისევე, როგორც დედამიწის განედს, შეუძლია მიიღოს მნიშვნელობები  $+90^\circ$ -დან  $-90^\circ$ -მდე. ასტრონომები, ჩვეულებრივ, მნათობის სიმაღლის მაგივრად იყენებენ მნათობის ზენიტურ მანძილს  $z = 90^\circ - h$ .

ჰორიზონტული სისტემის მეორე კოორდინატია აზიმუტი (Az). აზიმუტი კუთხეა, რომელიც ჰორიზონტის სიბრტყეში იზომება ცის სფეროს მოძრაობის მიმართულებით (აღმოსავლეთიდან დასავლეთისკენ). თანამედროვე განსაზღვრით იგი ჩრდილოეთის წერტილიდან აითვლება (წითელი რკალი) და იღებს მნიშვნელობებს  $0^\circ$ -დან  $360^\circ$ -მდე. ათვლის ადრეულ სისტემაში  $0^\circ$  შეესაბამებოდა სამხრეთის წერტილს და აზიმუტი მნიშვნელობებს იღებდა  $0^\circ$ -დან  $180^\circ$ -მდე სამხრეთიდან დასავლეთის მიმართულებით (ცისფერი კუთხე) და  $0^\circ$ -დან  $-180^\circ$ -მდე აღმოსავლეთის მიმართულებით.

ცის მერიდიანი ეწოდება წრეს, რომელიც გადის ჰორიზონტის ჩრდილოეთის წერტილიდან (N) ზენიტის გავლით სამხრეთის წერტილისკენ (S). კოორდინატთა ჰორიზონტულ სისტემაში ეს სიბრტყე მეორე ძირითადი სიბრტყეა, ვინაიდან სწორედ მის მიმართ აითვლება ვარსკვლავების აზიმუტი.



სურ. 64 ჰორიზონტული სისტემა  
© F. J. B. González



სურ. 65 პირველი ეკვატორული სისტემა

ცაზე რაიმე ობიექტის დაკვირვებისას, დედამიწის ღერძის გარშემო ბრუნვის გამო, ობიექტი გადაადგილდება როგორც სიმაღლის, ასევე აზიმუტის მიხედვით. ეს გარემოება აძნელებს ობიექტზე დაკვირვებას, ვინაიდან ვარსკვლავი მუდმივად გადის ტელესკოპის მხედველობის არიდან. ამ სირთულის თავიდან აცილების მიზნით ტელესკოპს ბრუნვის ორი ღერძი უნდა გააჩნდეს. ტელესკოპის ე.წ. აზიმუტური მონტირებისას იგი გამოსაკვლევი ობიექტის მოძრაობას მიყვება და ორი მიმართულებით გადაადგილდება: ვარსკვლავის სიმაღლის (ჰორიზონტის სიბრტყის

პერპენდიკულარული) და აზიმუტის (ჰორიზონტის სიბრტყის პარალელური) მიმართულებებით.

აღსანიშნავია, რომ კოორდინატთა ჰორიზონტულ სისტემაში ციური ობიექტის სიმაღლე და აზიმუტი იცვლება არა მარტო დროის მიხედვით, არამედ დამკვირვებლის დედამიწის ზედაპირზე ადგილმდებარეობის მიხედვითაც.

### **ციური კოორდინატების პირველი ეკვატორული სისტემა**

გაცილებით მოხერხებულია კოორდინატთა ისეთი სისტემა, რომელშიც ერთი კოორდინატი მაინც არ იცვლება დროის მიხედვით. ასეთი სისტემის მაგალითია კოორდინატთა ეკვატორული სისტემა. მასში ძირითად სიბრტყედ გამოყენებულია ცის ეკვატორი – დედამიწის ეკვატორის სიბრტყის ცის სფეროსთან გადაკვეთა. ძირითადი წერტილებია ციური პოლუსები. დამკვირვებელი კოორდინატთა სისტემის ცენტრში იმყოფება. ერთი კოორდინატია მნათობის დახრილობა, ხოლო მეორე – საათიერი კუთხე (სურ. 65).

აღვნიშნოთ  $S^*$ -ით ვარსკვლავის მდებარეობა ცაზე. მისი დახრილობა ( $\delta$ ) არის კუთხე ციური ობიექტის მიმართულებასა და ცის ეკვატორის სიბრტყეს შორის. იგი დადებით მნიშვნელობებს იძენს ცის სფეროს ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში, ხოლო უარყოფითს – სამხრეთ ნახევარსფეროში,  $+90^\circ$ -დან  $-90^\circ$ -მდე შუალედში. თუ ვარსკვლავი ცის ჩრდილოეთ პოლუსთან მდებარეობს, მისი დახრილობა  $+90^\circ$ -ია, ხოლო თუ ცის ეკვატორზე მდებარეობს, მისი დახრილობა  $0^\circ$ -ის ტოლია. მნათობის დახრილობა დედამიწის ღერძის გარშემო ბრუნვის გამო თავის მნიშვნელობას არ იცვლის, ვინაიდან ის, დღეღამური მოძრაობის შედეგად, ცაზე გადაადგილდება ციური ეკვატორის პარალელურად. მნიშვნელოვანია, რომ ნებისმიერი ვარსკვლავის დახრილობა, ნებისმიერ დროს და დედამიწის ნებისმიერი ადგილისთვის, უცვლელია და ერთადერთი მნიშვნელობა აქვს.

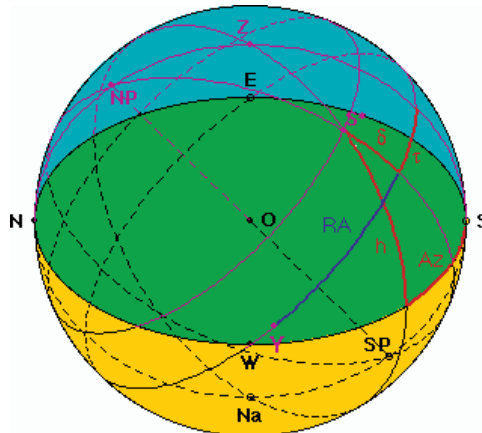
საათიერი კუთხე ( $\tau$ ) აითვლება ეკვატორის გასწვრივ  $S-NP-N$  მერიდიანის სამხრეთ წერტილიდან ცის დღე-ღამური ბრუნვის მიმართულებით მნათობის  $NP-S^*-SP$  საათიერ წრემდე (სამყაროს ჩრდილოეთ წერტილიდან ცის ეკვატორის მიმართ დაშვებული და მნათობზე გამავალი დიდი რკალი). იგი იზომება საათებში, წუთებსა და წამებში. ცის თაღის ბრუნვის გამო მნათობის საათიერი კუთხე  $\tau$  დღე-ღამის განმავლობაში  $0$ -დან  $24$  საათამდე იცვლება.

ამგვარად, ციური ობიექტის საათიერი კუთხე მიუთითებს, თუ რა ვარსკვლავიერი დრო გავიდა მას შემდეგ, რაც ობიექტმა გადაკვეთა  $S-NP-N$  მერიდიანი. აგრეთვე იგი დროის ერთეულებში გაზომილი რკალური კუთხეა ობიექტსა და მერიდიანს შორის ( $1$  სთ შეესაბამება  $15^\circ$ ).

### **ციური კოორდინატების მეორე ეკვატორული სისტემა**

ასტრონომები იყენებენ მეორე ეკვატორულ სისტემასაც, რომელშიც ორივე კოორდინატი უცვლელია და, ამდენად, ძალზე მოსახერხებელია დაკვირვებების ჩასატარებლად (სურ. 66). პირველი კოორდინატი ისევ დახრილობაა, ხოლო საათიერი კუთხე აითვლება გაზაფხულის ბუნიობის (დღედამტოლობის) წერტილიდან. გაზაფხულის დღედამტოლობის წერტილი წარმოადგენს ცის თაღის იმ წერტილს, რომელშიც მზე გადაკვეთს ციურ ეკვატორს  $21$  მარტს, ანუ ციური ეკვატორის და ეკლიპტიკის (დედამიწის ორბიტის სიბრტყე) გადაკვეთის წერტილს  $\Upsilon$  (vernal equinox). ამ კოორდინატს ეწოდება პირდაპირი აღვლენა  $RA$  (Right Ascension). ისევე როგორც

საათიერი კუთხე, იგი დროის ერთეულებში იზომება. ვინაიდან, პირდაპირი აღვლენის ათვლის წერტილი თავად მონაწილეობს ცის დღელამურ ბრუნვაში, იგი დროის მიხედვით არ იცვლება.



სურ. 66 ჰორიზონტული და ეკვატორული სისტემები

თვალსაჩინოებისთვის 66-ე სურათზე შედარებულია ჰორიზონტული და ეკვატორული კოორდინატების სისტემები.

### 3.3 კოსმოსური ობიექტების სიკაშკაშე და ნათობა

#### სიკაშკაშე

პირველი, რასაც ადამიანი ღამის ცაზე ხედავს, ციურ სფეროზე მიმოფანტული სხვადასხვა სიკაშკაშის მქონე ვარსკვლავებია. ვარსკვლავთა სიკაშკაშის მნიშვნელობა მერყეობს უზარმაზარ დიაპაზონში, რომლის გრანდიოზულობაზე წარმოდგენის შესაქმნელად გვინდა მოვიყვანოთ რამდენიმე მონაცემი.

დედამიწაზე მყოფი დამკვირვებლისთვის მზე 10 მილიარდჯერ უფრო კაშკაშაა, ვიდრე ჩრდილოეთ ნახევარსფეროს ყველაზე კაშკაშა ვარსკვლავი სირიუსი. თავის მხრივ, სირიუსი შეუიარაღებელი თვალით შესამჩნევ ყველაზე მკრთალ ვარსკვლავთან შედარებით, 1000-ჯერ მეტ სინათლეს ასხივებს. ეს უკანასკნელი კი 6 მილიარდჯერ უფრო კაშკაშაა, ვიდრე მძლავრი ტელესკოპით დანახული ყველაზე მკრთალი ობიექტი. შესაბამისად მზე  $6 \times 10^{19}$ -ჯერ უფრო კაშკაშაა, ვიდრე ყველაზე შორეული გალაქტიკა, რომლის აღმოჩენაც თანამედროვე ტექნიკითაა შესაძლებელი.

ციური ობიექტების სიკაშკაშის სკალა ჯერ კიდევ ჩვენ ერამდე 135 წელს იქნა შემოთავაზებული ძველი ბერძენი ასტრონომის ჰიპარქე ნიკეელის მიერ (Hipparchos, 190-120 ძვ.წ.). ვარსკვლავიერი სიდიდის სკალა ლოგარითმულია. პირველ ვარსკვლავიერ სიდიდეს ყველაზე კაშკაშა ვარსკვლავებს მიაკუთვნებენ. მეორე ვარსკვლავიერი სიდიდის ვარსკვლავი პირველზე 2.512-ჯერ მკრთალია. მესამე ვარსკვლავიერი სიდიდე – კიდევ 2.512-ჯერ ნაკლები, და ასე შემდეგ. შედეგად, ხუთი ვარსკვლავიერი სიდიდით სხვაობა ნიშნავს სიკაშკაშის ასჯერად ცვლილებას. მაგალითად, მეექვსე ვარსკვლავიერი სიდიდის ვარსკვლავის სიკაშკაშე 100-ჯერ, ხოლო მეთერთმეტესი 10000-ჯერ ნაკლებია პირველთან შედარებით, და ასე შემდეგ.

ნათქვამიდან გამომდინარეობს, რომ ჰიპარქეს მიერ შემოტანილი ვარსკვლავიერი სიდიდეები სიკაშკაშესთან შემდეგი თანაფარდობითაა დაკავშირებული:

$$n - m = 2.5 \lg (E_m/E_n),$$

სადაც  $m$  და  $n$  ვარსკვლავიერი სიდიდეებია, ხოლო  $E_m$  და  $E_n$  – მათი სიკაშკაშე. თუ ნულოვანი სიდიდის ვარსკვლავის ( $n = 0$ ) სიკაშკაშეს ჩავთვლით ერთის ტოლად ( $E_n = 1$ ), მაშინ

$$m = - 2.5 \lg E_m$$

ამ გამოსახულებებს, ინგლისელი ასტრონომის ნორმან პოგსონის (Norman Robert Pogson, 1829-1891) საპატივცემულოდ, პოგსონის განტოლებები ეწოდება.

მიუხედავად სიკაშკაშის ასეთ დიდ დიაპაზონში ცვლილებისა, მისი გაზომვა არაა რთული. გამოცდილ ასტრონომს შეუიარაღებელი თვალით შეუძლია შედარებით კაშკაშა ვარსკვლავების კლასიფიკაცია ვარსკვლავიერი სიდიდის მიხედვით. მკრთალი ვარსკვლავებისთვის კი იყენებენ ფოტომიმდებებით აღჭურვილ ტელესკოპებს. ხანდახან ციური ობიექტი ისე სუსტად ანათებს, რომ მათი გამოსახულების მისაღებად საჭიროა ფოტოექსპოზიციის რამდენიმე დღე.

სიკაშკაშის გაზომვებით მიღებულ ვარსკვლავიერ სიდიდეს „ვიზუალურს“ ან „ხილულს“ უწოდებენ და აღნიშნავენ ლათინური ალფავიტის პატარა ასოთი  $m$ . ცხადია, რომ ზემოთ განსაზღვრული ვარსკვლავიერი სიდიდის სკალის მიხედვით ციური ობიექტების კლასიფიკაციისას არ არის გათვალისწინებული მათი დედამიწიდან დაშორება. მოცემული ციური ობიექტის „აბსოლუტური“ ვარსკვლავიერი სიდიდე, რომელსაც აღნიშნავენ დიდი ასოთი  $M$ , განსაზღვრავს, თუ რა ხილული სიდიდე ექნებოდა ამ ობიექტს, დედამიწიდან იგი ე.წ. სიკაშკაშის სტანდარტული მანძილით რომ ყოფილიყო დაშორებული. სიკაშკაშის სტანდარტულ მანძილად მიღებულია 10 პარსეკი (1 პარსეკი  $\approx 3 \times 10^{12}$  კმ). ამრიგად, აბსოლუტური ვარსკვლავიერი სიდიდით ხდება სიკაშკაშეების ნორმალიზაცია ობიექტებამდე მანძილის გათვალისწინებით. აბსოლუტურ  $M$  და ხილულ  $m$  სიდიდეებს შორის კავშირი მოიცემა შემდეგი თანაფარდობით:

$$M = m - 5 \log(d/10),$$

სადაც  $d$  პარსეკებში გამოსახული მანძილია დედამიწიდან ვარსკვლავამდე. ასე, რომ ნებისმიერი ვარსკვლავის აბსოლუტური ვარსკვლავიერი სიდიდე ხილულის ტოლია, თუ ის ჩვენგან 10 პარსეკის მანძილზე მდებარეობს. ხაზი გვინდა გავუსვათ, რომ აბსოლუტური ვარსკვლავიერი სიდიდის დასადგენად საჭიროა დედამიწიდან ვარსკვლავის დაშორების ცოდნა, ეს მანძილი კი, როგორც შემდეგ გახდება ცხადი, საკმაოდ რთული „გასაზომია“.

ვარსკვლავიერი სიდიდე დამოკიდებულია მის გასაზომად გამოყენებულ ხელსაწყოზე. ხელსაწყოს მგრძნობიარობა კი ტალღის სიგრძით განისაზღვრება, ვინაიდან სხვადასხვა გამოსხივების მიმღები სხვადასხვა ტალღის სიგრძის მიმართაა მგრძნობიარე. ასე, რომ ყოველი ხელსაწყო ციური ობიექტის გამოსხივების სრული ნაკადის მხოლოდ გარკვეულ ნაწილს ზომავს.

ადამიანის თვალი ყველაზე მგრძნობიარეა  $\lambda \approx 550$  ნმ (ყვითელი) ტალღის სიგრძის გამოსხივებისთვის. თვალის მგრძნობელობის შესაბამის სიდიდეს უწოდებენ „ვიზუალურ“ ვარსკვლავიერ სიდიდეს –  $m_V$ .

ფოტოფირფიტები, რომლებსაც ადამიანის თვალისთვის მიუწვდომელი გამოსხივების რეგისტრაცია შეუძლია, როგორც წესი, ყველაზე მგრძნობიარეა



სინათლის ცისფერი და იისფერი დიაპაზონებისთვის. ყვითელი ფილტრების საშუალებით ფოტოფირფიტების მგრძნობიარობა იზრდება ყვითელი და მწვანე სინათლის მიმართ, ანუ შესაძლებელი ხდება მათი გამოყენება „თვალის“ დიაპაზონში, რომელსაც „ვიზუალურ“ დიაპაზონს უწოდებენ.

ძირითადად იყენებენ ეტალონურ სინათლის ფილტრებს, რომლებიც მიმღებამდე მხოლოდ განსაზღვრული ტალღის სიგრძის მქონე გამოსხივებას ატარებენ. მაგალითად, ასტრონომიაში ფართოდ გამოიყენება მრავალფერიანი ფოტომეტრიული UBV სისტემა, სადაც U, B და V ფილტრები ვარსკვლავიერ სიდიდეს ზომავენ შესაბამისად სპექტრის ულტრაიისფერ, ცისფერ და ვიზუალურ არეში. ფოტომეტრიულ UBV სისტემაში ფილტრები ისეა შერჩეული, რომ U ფილტრის გაშვების ზოლის საშუალო ტალღის სიგრძე 364 ნანომეტრია, B ფილტრისა – 442 ნმ, ხოლო V ფილტრისა კი – 540 ნმ.

ნებისმიერი ფოტომეტრიული სისტემისთვის შეიძლება შემოტანილი იქნას ეგრეთ წოდებული ფერის ინდექსი (color-index), რომელიც ერთი და იმავე ობიექტის ორი, სხვადასხვა ფილტრით გაზომილი, ვარსკვლავიერი სიდიდის სხვაობას წარმოადგენს. მაგალითად, თუ U ვარსკვლავიერ სიდიდეს B-ს გამოვაკლებთ, მივიღებთ ფერის მაჩვენებელს (U – B) და ასე შემდეგ. UBV სისტემის გამოყენების შემთხვევაში, როგორც წესი, მოცემულია V-სიდიდე და ფერის მაჩვენებლები (U – B) და (B – V). ყველაზე მცირე ფერის ინდექსი აქვს ყველაზე ცისფერ (ანუ ყველაზე ცხელ) ვარსკვლავებს და პირიქით, ყველაზე დიდი ფერის ინდექსი უფრო წითელი (ანუ უფრო ცივი) ვარსკვლავებისთვისაა დამახასიათებელი.

### ნათობა

ზემოაღნიშნულიდან ნათლად ჩანს, რომ დედამიწიდან ხილული ვარსკვლავიერი სიდიდეები M და m პირობითია. სინამდვილეში, ზოგიერთი ვარსკვლავი სინათლეს უფრო მძლავრად ასხივებს, ზოგი კი – ნაკლებად. ვარსკვლავის სიმძლავრეს, ანუ ერთ წამში მის მიერ გამოსხივებულ სრულ ენერგიას, ნათობას უწოდებენ. ნათობა ახასიათებს ვარსკვლავის მიერ ყველა მიმართულებით გამოსხივებულ ენერგიას. იგი სიმძლავრის ერთეულებში იზომება (ჯ/წმ, ან ვატი). ციური ობიექტის ნათობის დასადგენად საჭიროა მისი ხილული ვარსკვლავიერი სიდიდის და ამ ობიექტამდე მანძილის ცოდნა. ხილული ვარსკვლავიერი სიდიდის დადგენა ასტრონომიული ხელსაწყოებით საიმედოდაა შესაძლებელი, ვარსკვლავებამდე მანძილის შეფასება კი საკმაოდ რთულია.

ჩვენი მზე არის ერთადერთი მნათობი, რომლის მანძილი ჩვენამდე ცნობილია, და ამიტომ მისი ნათობის  $L_{\odot}$  გაზომვა შესაძლებელია. მზის ნათობა ტოლია:

$$L_{\odot} = 3.8 \times 10^{26} \text{ ვატი}$$

სხვა რომელიმე ვარსკვლავის ნათობა L განისაზღვრება ფარდობით ერთეულებში:

$$M - M_{\odot} = -2.5 \log (L/L_{\odot}),$$

სადაც  $M_{\odot}$  მზის, ხოლო M შესაბამისი ვარსკვლავის აბსოლუტური ვარსკვლავიერი სიდიდეებია. ქვემოთ მაგალითისთვის მოყვანილია რამდენიმე ვარსკვლავის ნათობა მზის ნათობის ერთეულებში.

### ვარსკვლავთა ნათობების მაგალითები

ვარსკვლავი	ნათობა
სირიუსი	22 $L_{\odot}$
კანოპუსი	4 700 $L_{\odot}$
არქტური	107 $L_{\odot}$
ვება	50 $L_{\odot}$

ნათობას, ისევე როგორც სიკაშკაშეს, ახასიათებს ცვლილების დიდი დიაპაზონი. ცნობილია ვარსკვლავები, რომლებიც მზესთან შედარებით ათობით ათასჯერ ნაკლებად ასხივებს. ზოგი კი ბევრად მეტად. მაგალითად, სამხრეთ ნახევარსფეროში მდებარე ოქროს თევზის თანავარსკვლავედის S ვარსკვლავი (S Doradus) მეცხრე ვარსკვლავიერი სიდიდის მქონე ობიექტია (ანუ შეუიარაღებელი თვალით საერთოდ არ ჩანს). მაგრამ იგი, მზესთან შედარებით, სინათლეს მილიონჯერ უფრო მძლავრად ასხივებს.

ძალიან დიდი ნათობის მქონე ვარსკვლავებს შორის გამოყოფენ გიგანტებს და ზეგიგანტებს. გიგანტების უმრავლესობის რადიუსი მზის რადიუსს 10–100-ჯერ აჭარბებს, ხოლო მათი ნათობა 10-დან 1000-მდე უფრო მეტია, ვიდრე მზის ნათობა. თუმცა გიგანტების ნათობა საკმაოდ მაღალია, მათი ტემპერატურა 3000–5000 K-ს არ აღემატება. ამიტომ მათ წითელ გიგანტებს უწოდებენ. ვარსკვლავები, რომლებსაც 30 000-ჯერ, ან ასობით ათასჯერ უფრო მეტი ნათობა აქვთ, ვიდრე მზეს, ზეგიგანტებად იწოდება.

კოსმოსური ობიექტის ნათობის დადგენა საკმაოდ რთული ამოცანაა. მხოლოდ ზოგიერთი სპეციფიკური სახის ვარსკვლავი იძლევა მათი ნათობის არაპირდაპირი გზით შეფასების საშუალებას. ყველა დანარჩენი მნათობისთვის კი აუცილებელია დედამიწამდე მანძილის ზუსტი ცოდნა. მანძილების გაზომვას ჩვენ 3.6 პარაგრაფში შევეხებით, ახლა კი განვიხილავთ ვარსკვლავებს, რომელთა ნათობის შეფასება დედამიწამდე მათი მანძილის ცოდნის გარეშე შესაძლებელია.

ბოლოს მოვიყვანოთ ნათობის მიხედვით ვარსკვლავების განაწილების რამდენიმე მონაცემი. ვარსკვლავთა უმრავლესობის ნათობა ( $L$ ) მზის ნათობაზე ( $L_{\odot}$ ) ნაკლებია. ხშირად გვხვდება ვარსკვლავები, რომელთა ნათობა  $L \approx 0.001 \times L_{\odot}$ . ვარსკვლავთა მხოლოდ მცირე ნაწილის ნათობაა მზის ნათობაზე მეტი. დიდი ნათობის მქონე ვარსკვლავის მაგალითია წითელი ზეგიგანტი ბეტელგეიზე, რომლის ნათობაა  $L \approx 14\,000 \times L_{\odot}$ .

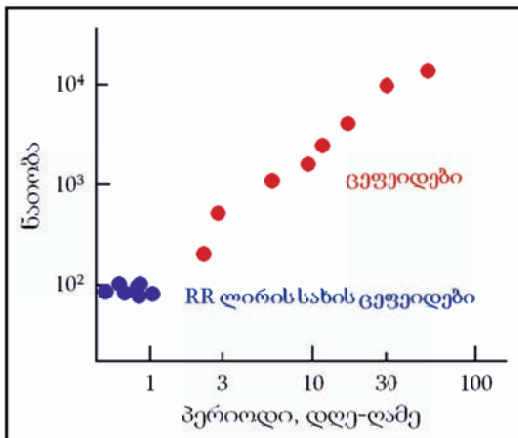
### ცეფეიდების ნათობა

ცეფეიდებს უწოდებენ პერიოდულად ცვალებადი ნათობის მქონე ვარსკვლავებს, რომელთა ნათობის ცვალებადობა მათ წიაღში მიმდინარე პროცესებითაა განპირობებული. ასეთი ვარსკვლავების ერთ-ერთი ტიპიური წარმომადგენელია ცეფეისის დელტა, რომლის მიხედვითაც ვარსკვლავთა ამ ჯგუფმა მიიღო შესაბამისი სახელწოდება. ცეფეისის დელტას (Cep δ) სიკაშკაშე 5.366 დღე-ღამის პერიოდით იცვლება 3.5-დან 4.4 ვარსკვლავიერ სიდიდემდე.

რამდენიმე ცეფეიდი პირველად აღმოჩენილი იქნა ჯერ კიდევ 1784 წელს ასტრონომების ედუარდ პიგოტის (Edward Pigott, 1753–1825) და ჯონ გუდრაიკის (John

Goodricke, 1764-1786) მიერ. შემდგომი 100 წლის განმავლობაში ნაპოვნი იქნა ცეფეიდების ტიპის 33 ვარსკვლავი, რომელთა პულსაციის პერიოდი იცვლებოდა რამდენიმე დღიდან 40 დღე-ღამემდე. 1885 წელს ჩარლზ პიკერინგმა (Edward Charles Pickering, 1846-1919) აღმოაჩინა ცეფეიდების მთელი კლასტერი. ცეფეიდების რიცხვი ყოველწლიურად მკვეთრად იზრდება.

1912 წელს ჰენრიეტა ლივიტმა (Henrietta Swan Leavitt, 1868-1921) აღმოაჩინა ცეფეიდებთან დაკავშირებული ძირითადი კანონზომიერება. ერთ-ერთი უახლოესი გალაქტიკის, მცირე მაგელანის ღრუბლის ფოტოფირფიტების კატალოგის შესწავლისას, მან შეამჩნია ათასამდე ცვალებადი სიკაშკაშის ვარსკვლავი. ლივიტმა დაადგინა, რომ ამ ცეფეიდების სიკაშკაშე მათი პულსაციის პერიოდის ლოგარითმის პროპორციულია, ანუ რაც უფრო დიდია პერიოდი, მით მეტია სიკაშკაშე. ლივიტმა დაუშვა, რომ დედამიწიდან ცეფეიდებამდე მანძილი, საკმარისი სიზუსტით, შეიძლება ჩაითვალოს მაგელანის ღრუბლებამდე მანძილის ტოლად და ცეფეიდების სიკაშკაშის მეშვეობით მათი ნათობა დაადგინა. ამრიგად, ცეფეიდების ნათობა პულსაციის პერიოდის ლოგარითმულ სკალაზე სწორი ხაზის გასწვრივ დალაგდა (სურ. 67). მას შემდეგ, რაც ეს თანაფარდობა დადასტურდა ჩვენი გალაქტიკის ცვალებადი სიკაშკაშის ვარსკვლავებისთვისაც, ცეფეიდების ნათობის დადგენის ლივიტისეულმა მეთოდმა ფართო აღიარება მოიპოვა. ლივიტის მეთოდით შეფასებული იქნა მრავალი შორეული გალაქტიკის მდებარეობა, რამაც საგრძნობლად „გააფართოვა“ სამყარო.



სურ. 67 ცეფეიდების ნათობის დამოკიდებულება მათი პულსაციის პერიოდზე

ამჟამად ცეფეიდის ვიზუალური აბსოლუტური ვარსკვლავიერი სიდიდის,  $M_v$ -ს, საშუალო მნიშვნელობის შესაფასებლად იყენებენ ფორმულას:

$$M_v = 2.81 \log (P) - (1.43 \pm 0.1),$$

სადაც  $P$  ცეფეიდის სიკაშკაშის ცვლილების პერიოდია.

1915 წელს ჰარლოუ შეპლიმ (Harlow Shapley, 1885-1972) აჩვენა, რომ ჰენრიეტა ლივიტის მიერ აღმოჩენილი კანონი ყველა ცეფეიდისთვის არის ჭეშმარიტი, მაგრამ არსებობს ცეფეიდების ორი სახე, ნათობის პერიოდთან დამაკავშირებელი წირის განსხვავებული დახრით. 67-ე სურათზე ცეფეიდების ეს სახეები წითელი და ლურჯი წერტილებითაა აღნიშნული.

გვინდა აღვნიშნოთ, რომ ცეფეიდების ტიპის ცვალებადი ვარსკვლავები საკმაოდ გავრცელებულია სამყაროში. მაგალითად, ამ ტიპის ვარსკვლავებს მიეკუთვნება ყველასთვის კარგად ცნობილი პოლარული ვარსკვლავი, რომლის პერიოდი 3.97 დღე-

დამეა. მისი სიკაშკაშე ვარსკვლავიერი სიდიდის მხოლოდ 1/10-ით იცვლება, მაგრამ ასეთი ცვლილების დამხერა თანამედროვე ფოტომეტრებისთვის სირთულეს არ წარმოადგენს.

არსებობს მოსაზრება, რომ მზეზე მეტი მასის მქონე ყველა ვარსკვლავი, როდესაც ის წყალბადის მარაგის ამოწურვის შემდეგ ტოვებს ეგრეთ წოდებულ ვარსკვლავთა ძირითად მიმდევრობას, გაივლის ცეფეიდების სტადიას.

### **ზეახალი ვარსკვლავების აფეთქებები**

კიდევ ერთი კოსმოსური ობიექტი, რომლის ნათობის განსაზღვრაც მისი თვისებებითაა შესაძლებელი, არის „პირველი ა“ ტიპის ზეახალი ვარსკვლავი (Ia). ამ სახის ზეახალი აფეთქება მაშინ, როდესაც განვითარების საბოლოო სტადიაზე მყოფი პატარა მასის ვარსკვლავი ამოწურავს თავის ბირთვულ საწვავს და იწყებს გაცივებასა და შეკუმშვას. ამ პროცესის შედეგად წარმოიშვება ეგრეთ წოდებული თეთრი ჯუჯა, რომლის მასა, უკიდურეს შემთხვევაში, 1.4 მზის მასას აღწევს. იზოლირებული ჯუჯა ვარსკვლავის მასა მუდმივი რჩება. მაგრამ, თუ ჯუჯა შედის ორმაგ სისტემაში (როგორც წესი, მისი პარტნიორი წითელი გიგანტია), ის იწყებს პარტნიორის მასის გადმოქაჩვას, სანამ მის წიაღში არ ჩამოყალიბდება თერმობირთვული აფეთქების პირობები. სწორედ თეთრი ჯუჯის აფეთქებას უწოდებენ Ia ტიპის ზეახალს.

ზეახლის აფეთქებისას აკვირდებიან მისი სიკაშკაშის დროში ცვლილებას. ამავდროულად ზეახლის სპექტრის წითელი წანაცვლების მეშვეობით ადგენენ მანძილს ზეახალ ვარსკვლავამდე, რაც საბოლოოდ ზეახლის ნათობის შეფასების საშუალებას იძლევა.

რადგან აფეთქებების პირობები ზღვრული მასით მკაცრადაა განსაზღვრული, მათ პრაქტიკულად ერთნაირი ნათობა ახასიათებს. ნათობის მცირე სხვაობის კორექტირება შესაძლებელია იმ ფაქტზე დაყრდნობით, რომ აფეთქების ხანგრძლივობა მისი ნათობის პროპორციულია.

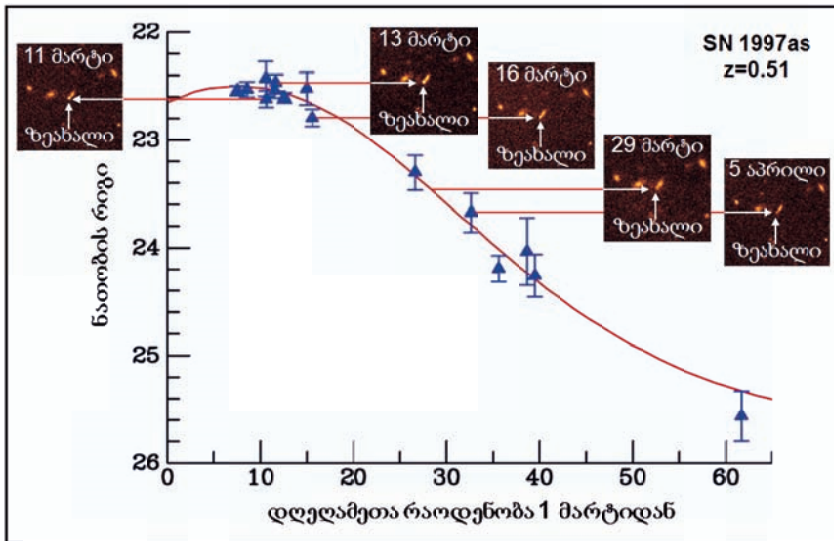
68-ე სურათზე, SN 1997as ზეახლის მაგალითზე, ნაჩვენებია, თუ როგორ იცვლება ზეახლის ნათობა დროის განმავლობაში.

Ia ტიპის ზეახალი ვარსკვლავები მთელ კოსმოსშია მიმოფანტული. ვინაიდან მათი ნათობა თითქმის ერთნაირია, ეს ობიექტები შეიძლება გამოყენებული იქნას როგორც დიდი სიმძლავრის მქონე სტანდარტული სანთლები. მაგალითად, სამყაროში ერთ-ერთი ყველაზე შორეული იზოლირებული ობიექტი, რომლის დანახვაც თანამედროვე საშუალებებითაა შესაძლებელი, ჩვენგან მილიარდი სინათლის წლით დაშორებული ზეახალი ვარსკვლავია.

Ia ტიპის ზეახალი ვარსკვლავების იდენტიფიცირება ადვილია მათთვის დამახასიათებელი სპექტრის საშუალებით. სიკაშკაშის მაქსიმუმისას მათი სპექტრი შეიცავს საშუალო მასის მქონე ელემენტების (ჟანგბადიდან კალციუმამდე) შესაბამის ხაზებს. როცა აფეთქება ჩაქრობას იწყებს, სპექტრში უკვე იონიზებული რკინის შესაბამისი ხაზები დომინირებს.

Ia ტიპის ზეახლის აფეთქება საკმაოდ იშვიათი მოვლენაა. მაგალითად, ჩვენ გალაქტიკაში იგი საშუალოდ 100 წელიწადში ერთხელ უნდა ხდებოდეს (თუმცა უკანასკნელად ზეახლის აფეთქებას, რომლის ნარჩენები Cassiopeia A სახელით ცნობილ რადიოგამოსხივების წყაროს წარმოადგენს, მე-17 საუკუნის მეორე ნახევარში უნდა ჰქონოდა ადგილი). მაგრამ ასტრონომებს გააჩნიათ აპარატურა, რომლის საშუალებით ისინი ზეახალი ვარსკვლავების აფეთქებებს შორეულ გალაქტიკებშიც აკვირდებიან.

შედეგად წელიწადში საშუალოდ ასამდე ზეახალი ვარსკვლავის აფეთქების დამზერაა შესაძლებელი.



სურ. 68 ზეახალი ვარსკვლავის ნათობის ცვლილება დროში  
© ESO

### 3.4 ვარსკვლავის ტემპერატურა, მასა და რადიუსი

#### ტემპერატურა

სიკაშკაშისა და ნათობისგან განსხვავებით, ვარსკვლავების ტემპერატურის ცვლილების დიაპაზონი ძალზე მოკრძალებულია: ყველაზე ცხელი ვარსკვლავების ტემპერატურა მზის ტემპერატურას მხოლოდ 40-ჯერ აჭარბებს.

ვარსკვლავების გამოსხივების სპექტრისთვის დამახასიათებელია სხვადასხვა ქიმიური ელემენტების შესაბამისი ხაზების დიდი რაოდენობა. ამ ხაზების დეტალური ანალიზით შესაძლებელია მნიშვნელოვანი ინფორმაციის მიღება ვარსკვლავების გარე შრეების ბუნების შესახებ. გარე შრეები, რომლებიც ჩვენამდე მოსული გამოსხივების ძირითადი წყაროა, თითქმის მთლიანად წყალბადისგან შედგება. მეორე ადგილზეა ჰელიუმი, ხოლო სხვა ელემენტების რაოდენობა სრულიად უმნიშვნელოა. მაგალითად, წყალბადის ყოველ 10 000 ატომზე მოდის დაახლოებით ჰელიუმის 1000 ატომი, ჟანგბადის 10 ატომი, ნახშირბადისა და აზოტის ოდნავ ნაკლები რაოდენობა და რკინის მხოლოდ 1 ატომი. სხვა ელემენტების მინარევები კიდევ უფრო ნაკლებია. ამიტომ, შეიძლება ითქვას, რომ ვარსკვლავები შედგება წყალბადისა და ჰელიუმისგან, უფრო მძიმე ელემენტების მცირე მინარევით.

დადგენილია, რომ ვარსკვლავების გამოსხივების სპექტრი პლანკის განაწილების კარგად ცნობილ კანონს ემორჩილება. ამ განაწილების ფორმა მხოლოდ გამოსხივების წყაროს ზედაპირულ ტემპერატურაზეა დამოკიდებული, რაც უფრო მაღალია ტემპერატურა, ვარსკვლავი მით უფრო მოკლე ტალღებს ასხივებს. ყველაზე ცხელი ვარსკვლავები მოცისფროდ ანათებს, ხოლო თითქმის ცივი – წითლად. ვარსკვლავების ფერის საშუალებით ტემპერატურის გაზომვის მეთოდს სპექტრულ კლასიფიკაციას უწოდებენ.



ვარსკვლავების ტემპერატურის გაზომვის მეორე მეთოდი ეფუძნება მათი ფერის ინდექსის გაზომვებს. არსებობს ცხრილები, რომელთა საშუალებითაც ცისფერი და ყვითელი დიაპაზონის ხილული ვარსკვლავიერი სიდიდეების სხვაობით შესაძლებელია დადგინდეს ვარსკვლავის ტემპერატურა T. რადგან ხილული სიკაშკაშის გაზომვა დიდი სიზუსტითაა შესაძლებელი, ტემპერატურის განსაზღვრა ამ მეთოდით საკმაოდ საიმედოა.

და ბოლოს, ვარსკვლავის ტემპერატურა T შეიძლება განისაზღვროს ეგრეთ წოდებული ვინის (Wilhelm Franz Wien, 1864-1928) კანონით, რომლის თანახმად გამოსხივების მაქსიმუმის შესაბამისი ტალღის სიგრძისთვის სრულდება თანაფარდობა:

$$\lambda = 0.29/T,$$

სადაც ტალღის სიგრძე სანტიმეტრებში, ხოლო ტემპერატურა კელვინებშია მოცემული.

1890 წელს ჰარვარდის ასტრონომიულმა ობსერვატორიამ გამოსცა ვარსკვლავთა სპექტრების დიდი კატალოგი, რომელიც შეიცავდა მონაცემებს 10 350 ვარსკვლავის შესახებ მერვე ვარსკვლავიერ სიდიდემდე. კატალოგი მიემდგვნა ჰენრი დრეპერის (Henry Draper, 1837-1882) ხსოვნას. სპეციალობით ექიმი, იგი იყო ამერიკელი მოყვარული ასტრონომი, ასტრონომიაში ფოტოგრაფირების დანერგვის ერთ-ერთი პიონერი. ჰენრი დრეპერმა 1872 წელს გადაიღო ვარსკვლავის სპექტრის პირველი ფოტოსურათი (სპექტროგრამა), შემდგომში კი კაშკაშა ვარსკვლავების, მთვარის, პლანეტების, კომეტებისა და ნისლეულების მრავალი სპექტროგრამა მიიღო. პირველი გამოცემის შემდეგ მრავალჯერ იქნა გამოცემული ჰარვარდის კატალოგის დამატებები და შესწავლილი ვარსკვლავების რაოდენობა 350 000-მდე გაიზარდა.

ჰარვარდის სპექტრული კლასიფიკაცია (Harvard spectral classification), რომელიც ძირითადად 1890-1924 წლებში იქნა დამუშავებული, ვარსკვლავებს აჯგუფებს მათი ტემპერატურის მიხედვით. ტემპერატურული კლასიფიკაციისთვის 60 000-2 000 K დიაპაზონში იყენებენ ლათინური ალფავიტის ასოებს: O, B, A, F, G, K და M. (ამ მიმდევრობის ადვილად დასამახსოვრებლად ხანდახან იყენებენ შემდეგ წინადადებაში შემავალი სიტყვების პირველ ასოებს: “Oh, be a fine girl, kiss me!”.) ასო O შეესაბამება ვარსკვლავთა ყველაზე ცხელ კლასს, ხოლო M – ყველაზე ცივს. მომიჯნავე კლასებს შორის დიაპაზონი იყოფა კიდევ 10 ქვეკლასად, ნომრებით 0-დან 9-მდე, ნომრის ზრდა ტემპერატურის კლებას შეესაბამება<sup>‡</sup>.

როგორც უკვე ვთქვით, ვარსკვლავის გარე შრეების ტემპერატურის კარგი ინდიკატორია მისი ფერი. O და B სპექტრული კლასის ვარსკვლავები ცისფერი ვარსკვლავებია, ჩვენი მზის ტიპის ვარსკვლავები, რომელთა სპექტრული კლასია G2, ყვითელი ფერისაა, ხოლო K და M კლასის ვარსკვლავები – წითელი. ვარსკვლავის ფერის ინდექსის განსაზღვრის ტექნიკა იმდენად ზუსტია, რომ გაზომილი ცისფერი და ყვითელი დიაპაზონის ხილული ვარსკვლავიერი სიდიდეების სხვაობით შესაძლებელია ვარსკვლავის სპექტრული კლასის დადგენა, ქვეკლასის სიზუსტით. ხოლო მკრთალი ვარსკვლავებისთვის ფერების ანალიზი მათი სპექტრული კლასიფიკაციის ერთადერთი

<sup>‡</sup> ჩამოთვლილი ძირითადი კლასების გარდა არსებობს კიდევ რამდენიმე დამატებითი კლასი. მაგალითად, მძიმე ელემენტებით მდიდარი ვარსკვლავების დასახასიათებლად R, N და S კლასები გამოიყენება. ე.წ. პეკულარული ვარსკვლავები მიეკუთვნება WR (Wolf-Rayet) კლასს, ხოლო განსაკუთრებით ახალგაზრდა ვარსკვლავები კი T (Tauri) კლასს.

საშუალებაა. ქვემოთ მოყვანილ ცხრილში გამოყენებულია ვარსკვლავთა ჰარვარდის კლასიფიკაცია.

სპექტრული კლასები და ზოგიერთი ვარსკვლავის პარამეტრი

კლასი	ფერი	$T_{\max}$ K	$T_{\min}$ K	მაგალითები
O	ცისფერი		25 000	ζ-პერსევსი
B	მოთეთრო-მოცისფრო	25 000	11 000	რიგელი
A	თეთრი	11 000	7 500	სპიკა
F	მოყვითალო-მოთეთრო	7 500	6 000	სირიუსი
G	ყვითელი	6 000	5 000	მზე
K	ნარინჯისფერი	5 000	3 500	არქტური
M	წითელი	3 500		ანტარესი

ჰარვარდის კლასიფიკაციის გარდა არსებობს უფრო ახალი, იერკის (Yerkes) სპექტრული კლასიფიკაციაც, რომელიც ითვალისწინებს ვარსკვლავთა ნათობასაც. იგი შემუშავებული იქნა 1943 წელს იერკის ობსერვატორიაში. ავტორებია უილიამ მორგანი (William Wilson Morgan, 1906-1994), ფილიპ კინანი (Philip Childs Keenan, 1908-2000) და ედიტ კელმანი (Edith Kellman, 1911-2007). მას ხანდახან, ავტორების საპატივცემულოდ, MKK კლასიფიკაციასაც უწოდებენ. ამ კლასიფიკაციით ნათობის კლასები, რომლებიც ქვემოთაა მოყვანილი, აღნიშნულია რომაული ციფრებით.

I – ზეგიგანტები

II – კაშკაშა გიგანტები

III – გიგანტები

IV – სუბგიგანტები

V – ჯუჯა ვარსკვლავები

VI – სუბჯუჯა ვარსკვლავები

VII – თეთრი ჯუჯები

ჰარვარდის კლასიფიკაციასთან შედარებით იერკის კლასიფიკაციის უპირატესობა ისაა, რომ შესაძლებელია ვარსკვლავის სპექტრის საშუალებით შეფასდეს მისი ნათობა, ანუ ხილული ვარსკვლავიერი სიდიდით ნაპოვნი იქნეს ვარსკვლავამდე მანძილი. მანძილების ამგვარ შეფასებას სპექტრული პარალაქსის მეთოდს უწოდებენ.

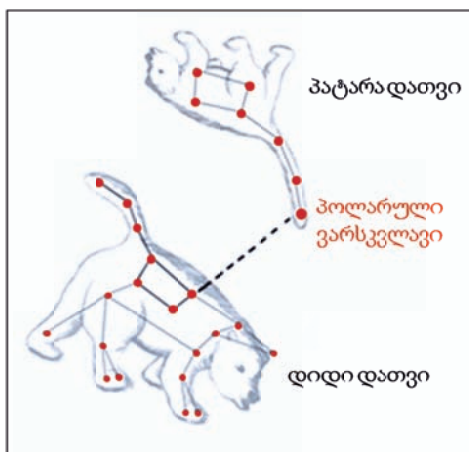
ახალი კვლევებით უფრო დეტალური სამეცნიერო ინფორმაციის მიღებასთან ერთად ვარსკვლავების კლასიფიკაციის სისტემა მუდმივად ვითარდება და იხვეწება.

სისრულისთვის გვინდა მოვიყვანოთ ჩვენი მზის და რამდენიმე კარგად ცნობილი ვარსკვლავის ზოგიერთი მახასიათებელი.

**მზის** სპექტრული კლასია G2. დედამიწიდან იგი დაშორებულია  $d = 0.000016$  სინათლის წელიწადით. მისი ნათობაა  $L = 3.8 \times 10^{26}$  ვატი. მზის ხილული ვარსკვლავიერი სიდიდე არის  $m = -26.8$ , ხოლო აბსოლუტური ვარსკვლავური სიდიდეა  $M = 4.8$ .

**პოლარული ვარსკვლავი** ჩრდილოეთ ნახევარსფეროს პოლუსთან ყველაზე ახლოს მდებარე ცოტა თუ ბევრად კაშკაშა ვარსკვლავია. მისი ხილული ვარსკვლავიერი

სიდიდე 2.1-ია. იგი მდებარეობს პატარა დათვის თანავარსკვლავედში და მიეკუთვნება F სპექტრული კლასის ყვითელ ზეგიგანტებს.

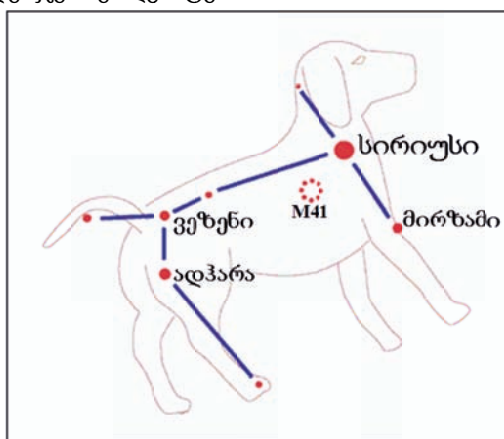


სურ. 69 პოლარული ვარსკვლავის მდებარეობა პატარა დათვის თანავარსკვლავედში

**სირიუსი**, ღამის ცის ყველაზე კაშკაშა ვარსკვლავი, მდებარეობს დიდი ქოფაკის თანავარსკვლავედში. მას დიდი ქოფაკის  $\alpha$ -ს უწოდებენ. სირიუსის სპექტრული კლასია A, თეთრი ჯუჯა. მისი მასა მზის მასას რამდენჯერმე აღემატება.



სურ. 70 სირიუსის მდებარეობა დიდი ქოფაკის თანავარსკვლავედში



სურ. 71 დიდი ქოფაკის (Canis Major) თანავარსკვლავედი

ამ ნაწილის ბოლოს გვინდა აღვნიშნოთ, რომ ვარსკვლავების სპექტრულ კლასიფიკაციაში უკვე მრავალი წელია მონაწილეობს აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორია. აქ 150 000 ვარსკვლავისთვის, 11.5 ვარსკვლავიერ სიდიდემდე, შედგენილია სპექტრული კატალოგი ტემპერატურის, სიკაშკაშისა და ვარსკვლავთ პეკულარობის გათვალისწინებით (ე. ხარამე, რ. ბართაია; იხ. დანართი I).

## ვარსკვლავის მასა

კოსმოსური ობიექტის მასის შეფასება შესაძლებელია სხვა სხეულთან მისი გრავიტაციული ურთიერთქმედების საშუალებით. ვარსკვლავთა დიდი რაოდენობა ქმნის ორჯერად სისტემებს. ასეთ სისტემაში ორი ვარსკვლავი ერთმანეთთან ახლოს მდებარეობს და მოძრაობს საერთო სიმძიმის ცენტრის გარშემო. კეპლერის კანონების თანახმად, ორჯერად სისტემაში შემავალი ვარსკვლავის ორბიტა განისაზღვრება მისი პარტნიორის მასითა და მდებარეობით. ამიტომ ორჯერად სისტემაზე დაკვირვებით ასტრონომებს შეუძლიათ დაადგინონ მასში შემავალი ვარსკვლავების მასები.

აღმოჩნდა, რომ ორჯერად სისტემაში შემავალი ორივე ვარსკვლავის დანახვა მხოლოდ ზოგიერთ შემთხვევაშია შესაძლებელი. ასეთ სისტემებს ხილულს უწოდებენ, განსხვავებით სისტემებისგან, რომელშიც ერთი ვარსკვლავია ხილული, ხოლო მეორის არსებობა მხოლოდ არაპირდაპირი მონაცემებით დგინდება. მაგალითად, არსებობს ვარსკვლავები, რომელთა სპექტრული ხაზები პერიოდულად გადაინაცვლებს სპექტრის ხან წითელი, ხან კი ცისფერი უბნისკენ. ეს ნიშნავს, რომ, ბრუნავს რა ჩვენთვის უჩინარი პარტნიორის გარშემო, ეს ვარსკვლავი ხან უახლოვდება, ხან კი შორდება დედამიწას. ასეთ სისტემებს სპექტრულ ორჯერად სისტემებს უწოდებენ. არსებობენ ასევე ელიფსური ორჯერადი სისტემები, რომლებშიც ვარსკვლავების ერთმანეთის გარშემო ბრუნვის ორბიტის სიბრტყე ჩვენს მიმართ ისეა ორიენტირებული, რომ ისინი დრო და დრო ფარავენ ერთმანეთს. ასტრონომები ასეთ სისტემებს, ძირითადად, აღმოაჩენენ იმ ფაქტიდან გამომდინარე, რომ მათი სიკაშკაშე პერიოდულად იცვლება. მათ ბნელებად-ცვალებად ვარსკვლავებს უწოდებენ.

ზემოთ ჩამოთვლილ სამივე შემთხვევაში შესაძლებელია ორჯერად სისტემაში შემავალი ორივე ვარსკვლავის ორბიტის აღდგენა და, შესაბამისად, მათი მასების დადგენა.

## ვარსკვლავის რადიუსი

ვარსკვლავის ნათობა  $L$  განისაზღვრება მისი ტემპერატურით  $T$  და ზედაპირის ფართობით, რომელიც ვარსკვლავის  $R$  რადიუსის კვადრატის პროპორციულია,

$$L \sim R^2 \times T^4$$

ამ თანაფარდობით შესაძლებელია ნებისმიერი მნათობის რადიუსის დადგენა, თუ მისი ნათობა და ტემპერატურა ცნობილია. ვარსკვლავებისთვის ეს ამოცანა განსაკუთრებით მარტივია, საკმარისია მხოლოდ მათი ტემპერატურის ცოდნა. რაც შეეხება ვარსკვლავის რადიუსს, მისი შეფასება შესაძლებელია ჰერცშპრუნგ-რასელის (Hertzsprung-Russell) დიაგრამის საშუალებით, რომელიც მომდევნო პარაგრაფში იქნება განხილული.

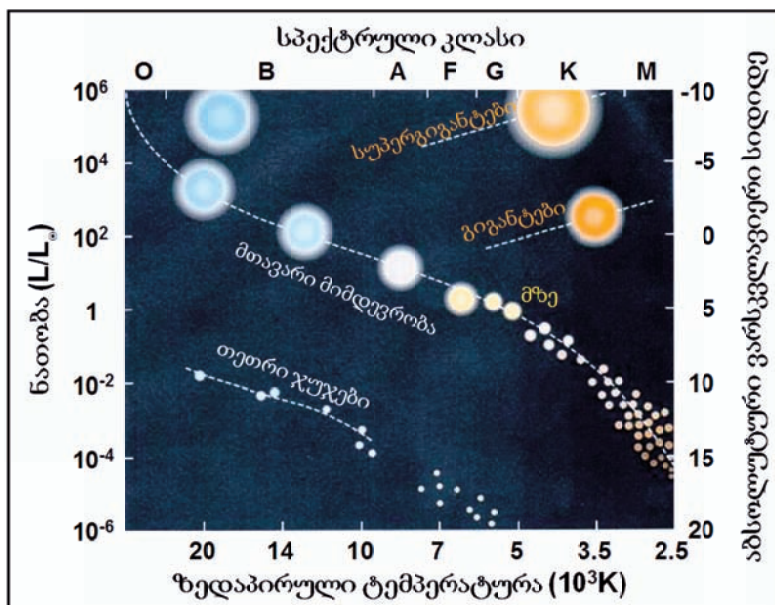
## 3.5 ვარსკვლავების ევოლუცია

1905 წელს ჰოლანდიელმა მეცნიერმა ეინარ ჰერცშპრუნგმა (Ejnar Hertzsprung, 1873-1967) დაკვირვებითი მონაცემების შესწავლისას დაადგინა, რომ ვარსკვლავის ნათობა დამოკიდებულია მის სპექტრულ კლასზე. ჰერცშპრუნგის მიერ მიღებული მონაცემები 1905-1907 წლებში გამოქვეყნდა სპეციალისტების ვიწრო წრისთვის განკუთვნილ სამეცნიერო ფოტოგრაფიის გერმანულ ჟურნალში (Zeitschrift für Wissenschaftliche Photographie) და თავდაპირველად შეუმჩნეველი დარჩა. 1910 წელს ამერიკელმა მეცნიერმა ჰენრი რასელმა (Henry Norris Russell, 1877-1959) დამოუკიდებლად დაადგინა

იგივე დამოკიდებულება და წარმოადგინა ის გრაფიკულად. ამჟამად სპექტრსა და ნათობას შორის დამოკიდებულებას „ჰერცშპრუნგ-რასელის დიაგრამა“ ეწოდება.

ჰერცშპრუნგ-რასელის დიაგრამა აბსოლუტური ვარსკვლავიერი სიდიდის, ნათობის, სპექტრული კლასისა და ვარსკვლავის ზედაპირული ტემპერატურის ურთიერთდამოკიდებულებას გამოავლენს. არსებობს დიაგრამის რამდენიმე სახესხვაობა. ადრინდელ ვერსიებში აბსცისის ღერძზე გადაზომილი იყო ვარსკვლავის სპექტრული კლასი, ხოლო ორდინატთა ღერძზე – აბსოლუტური ვარსკვლავიერი სიდიდე. თანამედროვე დიაგრამებზე აბსცისის ღერძზე ძირითადად ფერის ინდექსი B-V, ან ვარსკვლავის ზედაპირული ტემპერატურაა გადაზომილი.

როგორც 72-ე სურათიდან ჩანს, ჰერცშპრუნგ-რასელის დიაგრამაზე ვარსკვლავები გარკვეულ არეებში ჯგუფდება, რაც სხვადასხვა სახის ვარსკვლავების ევოლუციის თავისებურებებითაა განპირობებული. ასეთი მკვეთრი დაყოფა მიგვანიშნებს, რომ არსებობს ვარსკვლავთა სამი ძირითადი ჯგუფი, ეგრეთ წოდებული მთავარი მიმდევრობის ვარსკვლავები, გიგანტები და ჯუჯები.



სურ. 72 ჰერცშპრუნგ-რასელის დიაგრამა

ითვლება, რომ ყოველი ვარსკვლავი, თავისი განვითარების სხვადასხვა საფეხურზე, თანამიმდევრობით გაივლის ამ არეებს. ვარსკვლავის მასა მისი არსებობის განმავლობაში მცირედ იცვლება. ამიტომ ჰერცშპრუნგ-რასელის დიაგრამაზე ერთნაირი მასის მქონე ვარსკვლავების შესაბამისი წერტილები შეიძლება შევუსაბამოთ ერთი რომელიმე ვარსკვლავის ისტორიას. თითქოს ვარსკვლავი თავისი არსებობის სხვადასხვა პერიოდში დიაგრამის სხვადასხვა წერტილში იმყოფებოდა. ამგვარად შესაძლებელია დავაკვირდეთ ვარსკვლავთა ევოლუციას. ჰერცშპრუნგ-რასელის დიაგრამით შეიძლება გამოვსახოთ ვარსკვლავის ფერისა და ნათობის ცვლილება მისი ევოლუციის განმავლობაში.



ვარსკვლავის ისტორია მოკლედ ასე შეიძლება აღიწეროს. როგორც კი პროტოვარსკვლავის ცენტრალურ არეში ჩნდება წყალბადის ჰელიუმში გარდაქმნის, ანუ სინთეზის პირობები, ვარსკვლავი „აინთება“. ვარსკვლავის შესაბამისი წერტილი მოხვდება ჰერცშპრუნგ-რასელის დიაგრამის მთავარ მიმდევრობაზე, სადაც მისი ადგილმდებარეობა ძირითადად ვარსკვლავის მასითაა განპირობებული. ვარსკვლავი თავისი სიცოცხლის 90% მთავარი მიმდევრობის ფაზაში ატარებს. იგი რჩება მთავარი მიმდევრობის შტოზე მანამდე, სანამ არ ამოწურავს წყალბადის მარაგს. ამის შემდეგ იგი ნელ-ნელა ცივდება, ანუ ჰერცშპრუნგ-რასელის დიაგრამაზე მარჯვნივ ინაცვლებს და ხვდება გიგანტების ზონაში. თუ ვარსკვლავის მასა მზის მასაზე რამდენჯერმე მეტია, ის ზეგიგანტების არეში მოხვდება, თუ ნაკლები – მაშინ ის წითელ გიგანტად გადაიქცევა.

განვიხილოთ მოკლედ ჰერცშპრუნგ-რასელის დიაგრამაზე ნაჩვენები ვარსკვლავების სამი ძირითადი ჯგუფის თვისებები.

### **მთავარი მიმდევრობა**

ვარსკვლავების უმრავლესობა მთავარ მიმდევრობას მიეკუთვნება. მთავარი მიმდევრობა დიაგონალურად კვეთს ჰერცშპრუნგ-რასელის დიაგრამას ქვემო მარჯვენა კუთხიდან ზედა მარცხენა კუთხემდე. ქვემო მარჯვენა კუთხე შეესაბამება მცირე ნათობისა და მასის ( $M \geq 0.08 M_{\odot}$ ) მქონე ცივ ვარსკვლავებს. ხოლო ზედა მარცხენა კუთხეში თავმოყრილია დიდი ნათობის მქონე ცხელი ვარსკვლავები, რომელთა მასა 100-150 მზის მასის რიგისაა. ჯერ არ არის გარკვეული 150 მზის მასაზე მეტი მასის მქონე ვარსკვლავების მდგრადობის საკითხი. ამჟამად აღმოჩენილი ყველაზე მასიური ვარსკვლავია RMC 136a1, რომელიც მდებარეობს ჩვენგან 165 ათასი სინათლის წელიწადით დაშორებულ მეზობელ გალაქტიკაში – მაგელანის დიდ ღრუბელში. შეფასებების თანახმად მისი მასა 265-ჯერ, ნათება – 10 მილიონჯერ, ხოლო ზედაპირული ტემპერატურა კი შვიდჯერ აღემატება ჩვენი მზის შესაბამის მაჩვენებლებს.

მთავარი მიმდევრობის ვარსკვლავების ევოლუცია მათი ენერგიის წყაროთი არის განპირობებული: ყველა ასეთ ვარსკვლავში მიმდინარეობს წყალბადის ჰელიუმში გადასვლის რეაქციები. ამიტომ, მთავარი მიმდევრობის ვარსკვლავების მდებარეობა ჰერცშპრუნგ-რასელის დიაგრამაზე ძირითადად დამოკიდებულია მათ მასაზე და ნაკლებადაა განპირობებული მათი ქიმიური შედგენილობით. რაც უფრო დიდია ვარსკვლავის მასა, მით უფრო სწრაფად ამოწურავს ის თავისი წყალბადის რესურსს და მით მალე გადაინაცვლებს მთავარი მიმდევრობის შტოდან წითელი გიგანტების მიმართულებით. აღვნიშნოთ, რომ ამ სტადიას აღწევს მხოლოდ ის ვარსკვლავები, რომელთა მასა მზის მასის ნახევარზე მეტია.

1911-1924 წლებში ჰენრი რასელმა, ეინარ ჰერცშპრუნგმა და არტურ ედინგტონმა (Arthur Stanley Eddington, 1882-1944) დაადგინეს, რომ მთავარი მიმდევრობის ვარსკვლავებისთვის არსებობს დამოკიდებულება მათ ნათობასა ( $L$ ) და მასას ( $M$ ) შორის, რომელსაც ვარსკვლავთა უმრავლესობისთვის შემდეგი სახე აქვს:

$$L \sim M^4$$

აგრეთვე აღმოჩნდა, რომ ყველაზე მასიური ვარსკვლავებისთვის ნათობის მასაზე დამოკიდებულება წრფივ კანონს ემორჩილება,

$$L \sim M$$

ამიტომ ასეთი ვარსკვლავების სიცოცხლის ხანგრძლივობა ნაკლებადაა დამოკიდებული მათ მასაზე და დაახლოებით 3.5 მილიონ წელს შეადგენს, რაც კოსმოსური მასშტაბებით ძალზე მცირე დროა.

ჩვენი მზე შედარებით პატარა ვარსკვლავია. შეფასებების თანახმად, მან მთავარ მიმდევრობაზე  $10^{10}$  წელიწადი უნდა დაჰყოს. მისი ასაკი ამჟამად ამ დროის დაახლოებით ნახევარია. ანუ გაივლის კიდევ 5 მილიარდი წელიწადი და მზე დატოვებს მთავარ მიმდევრობას, გადაინაცვლებს წითელი გიგანტებისკენ და სიცოცხლის ბოლოს თეთრ ჯუჯად გადაიქცევა.

### **წითელი გიგანტები და ზეგიგანტები**

წითელი გიგანტებისა და ზეგიგანტების წიაღში წყალბადის მარაგი ამოწურულია, მათ ბირთვებში, რომლებიც ძირითადად ჰელიუმისგან შედგება, მიმდინარეობს ჰელიუმის უფრო მძიმე ელემენტებად გარდაქმნის რეაქციები. აღვნიშნოთ ასევე, რომ სამი მზის მასაზე ნაკლები მასის ვარსკვლავებისთვის ჰელიუმის „ანთება“ აფეთქების სახე აქვს, ხოლო უფრო დიდი მასების შემთხვევაში ეს რეაქციები შედარებით ნელა იწყება. პერცშპრუნგ-რასელის დიაგრამაზე გამოიკვეთება გიგანტების შესაბამისი რამდენიმე არე.

მოკლედ ავხსნათ გიგანტი ვარსკვლავების დიდი ზომები და მათი სხვა თვისებები. ჰელიუმის უფრო მძიმე ბირთვებად გარდაქმნის რეაქციის ტემპერატურა წყალბადის ჰელიუმად გარდაქმნის ტემპერატურაზე მეტია. ამიტომ წყალბადის მარაგის ამოწურვის შემდეგ მთავარი მიმდევრობის ვარსკვლავში წყდება ბირთვული გარდაქმნები და ბირთვიდან ენერგიის ნაკადის გამოდინება. ეს იწვევს ვარსკვლავის ჰიდროსტატიკური წონასწორობის დარღვევას, გრავიტაციული ძალები ვარსკვლავს სწრაფად კუმშავს და, შესაბამისად, აცხელებს მას. ტემპერატურის მომატებით ბირთვის გარშემო დარჩენილ წყალბადის თხელ შრეში ისევ იწყება სინთეზის რეაქციები და ხდება ვარსკვლავის შრეობრივი წვა. წყალბადის შრეში წარმოქმნილი ენერგია ვარსკვლავის გარე შრეებს აფართოებს, რაც მათ გაცივებას იწვევს, თუმცა თავისი უზარმაზარი რადიუსის გამო, ასეთი ვარსკვლავის ნათობა იმატებს. ვარსკვლავის გაცივებით მისი გამოსხივება წითლდება, ანუ წარმოიშვება წითელი გიგანტი, რომელიც ხასიათდება მთავარი მიმდევრობის ვარსკვლავებთან შედარებით მცირე ტემპერატურით (3000-5000 K) და დიდი ნათობით (მზის ნათობაზე  $10^2$ - $10^6$ -ჯერ მეტი). როდესაც ვარსკვლავი აღწევს გიგანტის სტადიას, მისი ზედაპირული შერევის არე იწყებს სიღრმისკენ გაფართოებას ბირთვული რეაქციის შრეებამდე. ღრმა შრეებთან შერევის გამო ვარსკვლავის ზედაპირის ქიმიური შემადგენლობა იცვლება, რაც დასტურდება დაკვირვებებით.

ჰელიუმის გარდაქმნით Be, C, N ჯგუფის ელემენტების სინთეზისას გარკვეული პერიოდის განმავლობაში გიგანტები ისევ ცხელდება, და მათი ევოლუციური წირები პერცშპრუნგ-რასელის დიაგრამის მარჯვენა ზედა კუთხისკენ არის მიმართული. ჰელიუმის მარაგის ამოწურვის შემდეგ მცირე ზომის ვარსკვლავების ევოლუცია დასასრულისკენ მიდის, ისინი უფრო და უფრო ცივდება და გადაიქცევა თეთრ ჯუჯებად. ზეგიგანტების ბედი უფრო რთულია, მათში თერმობირთვული რეაქციები გრძელდება რკინის სინთეზამდე, შემდეგ ისინი ასევე ცივდებიან და, როგორც წესი, გიგანტურ შავ ხვრელებად, ან II ტიპის ზეახალ ვარსკვლავებად გარდაიქმნებიან.

ჰელიუმის მარაგის ამოწურვის შემდეგ ვარსკვლავი გადადის წითელი ან ყვითელი ზეგიგანტების სტადიაში. ზეგიგანტებს აქვს რთული შემადგენლობა, რომელიც მრავალი სხვადასხვა წვის ზონითაა განპირობებული. თავდაპირველად მათ ბირთვებში

მიმდინარეობს ჰელიუმის ნახშირბადად და ჟანგბადად გარდაქმნა. გარდა ამისა, ბირთვს გააჩნია ჰელიუმისა და წყალბადის თხელი გარსები, რომლებშიც ბირთვული რეაქციები მიმდინარეობს. გარე წყალბადის შრეს ესაზღვრება ღრმა შერევის ზონა, რომელიც ახდენს ვარსკვლავის მთელი მასის, წყალბადის შრიდან ზედაპირამდე, ერთმანეთში შერევას.

ზეგიგანტების დამახასიათებელი თვისებაა ჰელიუმის შრის არასტაბილურობა. ამ შრეში ხდება სითბური აფეთქებები, რომელთა ენერგია მრავალ ასეულჯერ აჭარბებს წყალბადის შრეში გამოყოფილ ენერგიას. ეს აფეთქებები იწვევს ზეგიგანტების სითბურ პულსაციებს, რომელთა პერიოდი მერყეობს რამდენიმე ათასი წლიდან ასეულობით ათას წლამდე. აფეთქებები ასევე იწვევს ვარსკვლავის მთელი მასის ერთმანეთში შერევას. ამ პროცესის ერთ-ერთი შედეგია ვარსკვლავის ზედაპირული ნახშირბადის გაჩენა და ეგრეთ წოდებული ნახშირბადოვანი ვარსკვლავების ფორმირება.

ზეგიგანტების შემდგომი ევოლუცია დამოკიდებულია მათ მასაზე. განსხვავებულია რვა მზის მასაზე მეტი და ნაკლები მასის მქონე ვარსკვლავებისთვის.

8M<sub>☉</sub>-ზე ნაკლები მასის ვარსკვლავებს აქვს ნახშირბადოვანი ბირთვი. განვითარების ბოლო სტადიაზე მათი გარე შრეები კოსმოსურ სივრცეში გაიფანტება და წარმოქმნის პლანეტურ ნისლეულს, ხოლო ბირთვი უმრავლეს შემთხვევაში თეთრ ჯუჯად გადაიქცევა.

8M<sub>☉</sub>-ზე მეტი მასის ვარსკვლავი გააგრძელებს ევოლუციას სულ უფრო და უფრო მძიმე ელემენტების სინთეზით. ნახშირბადის მარაგის ამოწურვის შემდეგ შესაძლებელია თანამიმდევრულად შეიქმნას ჟანგბადის, კაჟბადის და რკინის ატომები. ყოველი ახალი ეტაპი ხასიათდება გამოყოფილი ენერგიის შემცირებით და როგორც შედეგი, მცირდება ახალი ელემენტების სინთეზის დროც. რკინაზე მძიმე ელემენტების სინთეზი აღარ ხდება. ასეთი რეაქციები ენერგეტიკულად ხელსაყრელი არ არის, რადგან რკინის ბირთვების ერთმანეთთან შერწყმას მოსდევს ენერგიის შთანთქმა და არა გამოყოფა, როგორც ეს უფრო მსუბუქი ბირთვებისთვის ხდება. ბირთვული გარდაქმნების დამთავრების შემდეგ ენერგიის გამოყოფა, ანუ ვარსკვლავის შინაგანი წნევა მცირდება და იწყება მისი გრავიტაციული კოლაფსი. შედეგად მივიღებთ შავ ხვრელს, ან მეორე ტიპის ზეახალ ვარსკვლავს, რომლის აფეთქებისას შესაძლებელია რკინაზე უფრო მძიმე ელემენტების სინთეზი.

გიგანტების და ზეგიგანტების გაფართოებას მოსდევს მათი ზედაპირიდან ნივთიერების ინტენსიური კარგვა, რაც პროტოპლანეტური ნისლეულების სახით დაიშვრება. გაფართოების გამო გიგანტები გადადიან არასტაბილურ მდგომარეობაში და გარკვეულ მომენტში ხდება გარე შრეების მოხლეტა. თუ რა ბედი ეწვევა ვარსკვლავებისგან დარჩენილ ბირთვებს, დამოკიდებულია მათ მასაზე. თუ ბირთვის მასა ნაკლებია 1.4 მზის მასაზე (ე.წ. ჩანდრასეკარის ზღვარი), გრავიტაციული შეკუმშვის შედეგად იგი თეთრ ჯუჯას წარმოქმნის. ბირთვის ნივთიერების შეკუმშვა წყდება მაშინ, როდესაც გრავიტაციული ძალები გაბათილდება გადაგვარებული ელექტრონული წნევით (მარტივი წარმოდგენისთვის, ურთიერთმიახლოებული ელექტრონები ეწინააღმდეგებიან შემდგომ შეკუმშვას). ვარსკვლავთა ნარჩენებისთვის, რომელთა მასა 1.4 და 3 მზის მასის ინტერვალშია (ე.წ. ტოლმან-ოპენჰაიმერ-ვოლკოფის ზღვარი), გრავიტაცია ჯაბნის გადაგვარებულ ელექტრონულ წნევას და მათი შეკუმშვა გრძელდება. შედეგად შიდა წნევა იმდენად იზრდება, რომ პროტონების მიერ ელექტრონების ჩაჭერით იქმნება ნეიტრონები. შემდგომი შეკუმშვა წყდება

გადაგვარებული ნეიტრონული წნევის გამო. ამგვარად ჩნდება ნეიტრონული ვარსკვლავები. ვინაიდან ნეიტრონული ვარსკვლავების ტემპერატურა O კლასის ვარსკვლავების ტემპერატურას აღემატება, ხოლო მათი ნათობა უაღრესად მცირეა, ისინი ჰერცშპრუნგ-რასელის დიაგრამაზე არ ფიგურირებენ, ან ახალგაზრდა ნეიტრონული ვარსკვლავების უკიდურეს შემთხვევაში, მარცხენა ქვედა კუთხეში, თეთრი ჯუჯების რეგიონის ქვეშ განლაგდებიან. ვარსკვლავთა ნარჩენებისთვის, რომელთა მასა აღემატება 3 მზის მასას, გადაგვარებული ნეიტრონული წნევა ვერ აბათილებს გრავიტაციულ ძალებს და შეკუმშვა გრძელდება მანამ, სანამ არ გაჩნდება სინგულარული ობიექტი – შავი ხვრელი.

### **თეთრი ჯუჯები**

თეთრი ჯუჯებს უწოდებენ წითელი გიგანტების მიერ გარე შრეების მოსხლეტის შემდეგ მათ ადგილას დარჩენილ ბირთვებს, რომლებშიც ბირთვული რეაქციები აღარ მიმდინარეობს. მათი შესაბამისი არე ჰერცშპრუნგ-რასელის დიაგრამის ქვემო მარცხენა კუთხეში მდებარეობს.

თეთრი ჯუჯები ხასიათდება დაახლოებით დედამიწის ზომის პატარა ბირთვით და მაღალი  $10^5$ - $10^9$  გ/სმ<sup>3</sup> სიმკვრივით, რაც მთავარი მიმდევრობის ვარსკვლავების სიმკვრივეზე თითქმის მილიონჯერ მეტია. მათი მასა კი 0.5-1.4 მზის მასის ინტერვალში მერყეობს. თეთრი ჯუჯებისთვის სრულდება თანაფარდობა „მასა-რადიუსი“ – რაც მეტია მასა, მით ნაკლებია მათი რადიუსი.

თეთრი ჯუჯების ანომალურად მაღალი სიმკვრივე და წნევა, გადაგვარებული ელექტრონული აირის – ფერმი-აირის თვისებების გამოყენებით, კვანტური მექანიკის ფარგლებში აღიწერება, მაშინ როცა მთავარი მიმდევრობის ვარსკვლავების მდგომარეობის განტოლება ეყრდნობა კლასიკური იდეალური აირის მოდელს.

თეთრი ჯუჯები ძირითადად შედგება ნახშირბადისა და ჟანგბადისგან, ჰელიუმისა და წყალბადის მცირე მინარევებით. მაგალითად, 2011 წელს ასტრონომებმა დაადგინეს, რომ PSR J1719-1438 პულსარის ორჯერად სისტემაში შემავალი თეთრი ჯუჯის მასა დაახლოებით იუპიტერის მასის ტოლია, ხოლო მისი დიამეტრი იუპიტერის დიამეტრის 40%-ია. თეთრი ჯუჯა თითქმის მთლიანად ზემკვრივი კრისტალური ნახშირბადისგან შედგება, რის გამოც მას „ალმასის პლანეტა“ დაერქვა. ზოგიერთი მასიური, დიდი ევოლუციური ისტორიის მქონე, ვარსკვლავის შესაბამისი ჯუჯა კი შეიძლება შედგებოდეს წყალბადის, ნეონისა და მაგნიუმისგან.

თეთრი ჯუჯები მცირე, მზის ნათობაზე 10 000-ჯერ ნაკლები ცისფერი ნათობით ხასიათდება, თუმცა მათი ზედაპირული ტემპერატურა თავდაპირველად საკმაოდ მაღალია (100 000-200 000 K). სხვადასხვა შეფასებით თეთრი ჯუჯები შეადგენს ჩვენი გალაქტიკის ვარსკვლავთა სრული რაოდენობის 3-10 პროცენტს. რადგან ამ ვარსკვლავებს ენერგიის წყარო არ გააჩნია, დროთა განმავლობაში ისინი ცივდება და მკვდარ ვარსკვლავად – შავ ჯუჯად გარდაიქმნება.

ამ პარაგრაფის ბოლოს გვინდა აღვნიშნოთ, რომ ჰერცშპრუნგ-რასელის დიაგრამის მეშვეობით ვარსკვლავების სიკაშკაშეთა ურთიერთშედარებამ წარმოქმნა ასტრონომიის ახალი დარგი – კოლორიმეტრია. კოლორიმეტრია ესაა ვარსკვლავის ფერისა და გამოსხივების გაზომვა. ადრე ჩვენ უკვე შემოვიღეთ B-V ფერის მაჩვენებლის ცნება, რომელიც გვიჩვენებს ვარსკვლავის ცისფერი და ყვითელი გამოსხივებების ინტენსივობების სხვაობას. ვარსკვლავების მთავარი მიმდევრობისთვის კოლორიმეტრია

ერთმანეთთან აკავშირებს ვარსკვლავის ფერის მაჩვენებელს B-V, მის სპექტრულ კლასსა და ფოტოსფერულ ტემპერატურას.

### 3.6 მანძილები კოსმოსურ ობიექტებამდე

სამყაროს შეცნობა მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული ციურ ობიექტებამდე მანძილის ცოდნაზე. ვარსკვლავებისა და გალაქტიკების ზევრი ფიზიკური პარამეტრის (ზომის, მასის და სხვ.) განსაზღვრა შესაძლებელია მხოლოდ დედამიწიდან მათი დაშორების დადგენის შემდეგ. ამჟამად, როცა არსებობს მანძილის გაზომვის სხვადასხვა მეთოდი ყველაზე დაშორებულ ობიექტებამდეც კი, სამყაროს მასშტაბი და სტრუქტურა უფრო ნათელი გახდა.

ციურ ობიექტებამდე მანძილის განსაზღვრას ასტრონომები შორეული წარსულიდან ცდილობდნენ, მაგრამ მხოლოდ XVII საუკუნის დასაწყისში გაჩნდა ტელესკოპები, რომელთა საშუალებით ასტრონომებმა გადაადგეს პირველი ნაბიჯები კოსმოსური სიღრმეებისკენ.

სანამ კოსმოსური მანძილების გაზომვის მეთოდებზე გავაგრძელებდეთ საუბარს, გვინდა გავიხსენოთ, თუ რა ერთეულებში ზომავენ ამ მანძილებს. პლანეტებს შორის მანძილების გასაზომად ძირითადად იყენებენ ეგრეთ წოდებულ ასტრონომიულ ერთეულს (astronomical unit, სიმბოლო – ა.ე.), რომელიც დედამიწიდან მზემდე მანძილის ტოლია და უდრის დაახლოებით 150 მილიონ კილომეტრს ( $1 \text{ ა.ე.} = 1.49 \times 10^8 \text{ კმ}$ ). უფრო დიდი მასშტაბებისთვის ერთ-ერთი ძირითადი ერთეულია სინათლის წელიწადი (light year), ანუ მანძილი, რომელსაც სინათლე გადის 1 წლის განმავლობაში, მოძრაობს რა 300 000 კმ/წმ სიჩქარით. სინათლის წელიწადი დაახლოებით 9 400 მილიარდი კილომეტრის ტოლია. ასეთი გრანდიოზული ერთეულის შემოტანის აუცილებლობა განპირობებულია იმ ფაქტით, რომ ვარსკვლავები ძალიან შორეული ობიექტებია. მაგალითად, მანძილი ჩვენგან უახლოეს ვარსკვლავამდე (ცენტავრის ალფა) 4.3 სინათლის წელიწადია. არსებობს კიდევ უფრო დიდი მანძილის გასაზომი ერთეულიც – პარსეკი (parallax of one arcsecond), რომელზეც ახლა მოგიტხრობთ.

#### პირველი საფეხური: პარალაქსი

1838 წელს, ერთმანეთისგან დამოუკიდებლად, სამმა ასტრონომმა პირველად გაზომა მანძილი ვარსკვლავებამდე ტრიგონომეტრიული პარალაქსის მეთოდით, რომელსაც მანამდე მხოლოდ ტოპოგრაფები იყენებდნენ.

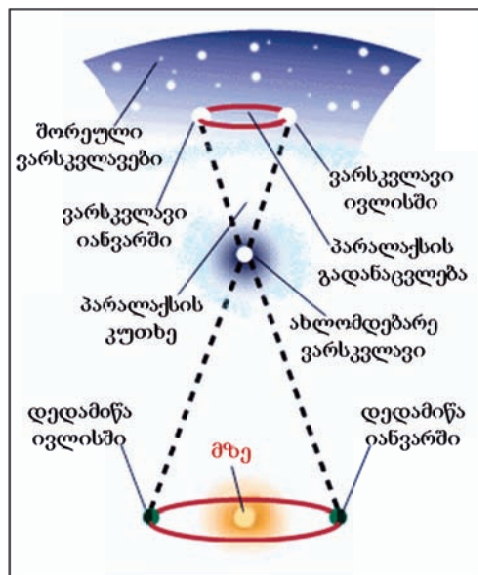
მეთოდის არსი რომ ავხსნათ, განვიხილოთ შემთხვევა, როდესაც ტოპოგრაფს სურს მდინარის გადაულახავად მისი სიგანის განსაზღვრა. ამისთვის ის მდინარის ნაპირას აყენებს კუთხეების გამოზომ ხელსაწყოს, მაგალითად თეოდოლიტს, და მიმართავს მას მდინარის მეორე ნაპირზე მდებარე რაიმე საგნისკენ. გაზომავს რა კუთხეს, რომლითაც ეს სხეული ჩანს მდინარის კალაპოტის ამ ადგილიდან, ტოპოგრაფს გადააქვს ხელსაწყო მდინარის გასწვრივ, სხვა ადგილას, და იმეორებს გაზომვას. ახლა მან იცის ორი კუთხე და კუთხეების გაზომვის ბაზისის ზომა – მანძილი ხელსაწყოს ორ მდებარეობას შორის. ეს სამი სიდიდე კი საკმარისია, რომ ტოპოგრაფმა იპოვოს სამკუთხედის ყველა პარამეტრი, კერძოდ, მისი სიმაღლე, რომელიც მდინარის ნაპირებს შორის მანძილს შეესაბამება.

73-ე სურათზე გამოსახულია დედამიწიდან ვარსკვლავებამდე მანძილის გაზომვის ტრიგონომეტრიული პარალაქსის მეთოდის ამსახველი სქემა. ამ შემთხვევაში ბაზისად გამოყენებულია დედამიწის ორბიტის დიამეტრი, ხოლო კუთხეზომი ხელსაწყო –



ტელესკოპი. სურათის მარჯვენა ქვედა კუთხეში გამოსახულია დედამიწა მასზე განლაგებული წარმოსახვითი დამკვირვებლითა და ტელესკოპით, მაგალითად, იანვრის თვეში (საწყისი მდებარეობა). ზედა მარცხენა კუთხეში გამოსახულია დედამიწიდან რომელიმე, შედარებით ახლომდებარე, ვარსკვლავის პროექცია ცის სფეროზე, ანუ როგორც მას დამკვირვებელი ხედავს შორეული ვარსკვლავების ფონზე. მარცხენა ქვედა კუთხეში გამოსახულია ტელესკოპის მდებარეობა ივლისის თვეში, როცა დედამიწა აღმოჩნდება თავისი ორბიტის საპირისპირო მხარეს, ანუ ვარსკვლავის მიმართ გადაინაცვლებს 300 მილიონი კილომეტრით. სურათის მარჯვენა ზედა კუთხეში ნაჩვენებია ამ დროისთვის ვარსკვლავის ხილული მდებარეობა დედამიწაზე დამონტაჟებული ტელესკოპისთვის. ცის თაღზე ვარსკვლავის იანვრისა და ივლისის მდებარეობებს შორის გადანაცვლების (პარალაქსი) და მზის ირგვლივ დედამიწის ორბიტის დიამეტრის ცოდნა საშუალებას იძლევა მარტივი, გეომეტრიული თანაფარდობებით, გაიზომოს ამ ვარსკვლავამდე მანძილი.

პარალაქსის მეთოდით გაზომილი მანძილებისთვის გამოიყენება ერთეული, რომელსაც პარსეკს უწოდებენ. ერთი პარსეკი არის მანძილი ვარსკვლავამდე, რომლის პარალაქსი შეადგენს 1 რკალურ წამს და იგი 3.26 სინათლის წელიწადს უტოლდება.



სურ. 73 ვარსკვლავამდე მანძილის გაზომვის პარალაქსის მეთოდი

ტრიგონომეტრიული პარალაქსის მეთოდით მანძილის გაზომვის ზღვარი დამოკიდებულია ტელესკოპის საშუალებით კუთხის გაზომვის სიზუსტეზე, რომელიც დაახლოებით 1 რკალური წამია (გრადუსის  $1/3600$  ნაწილი). ეს კი 10 სინათლის წელიწადის შეზღუდვას იძლევა, ანუ პარალაქსის მეთოდით შესაძლებელია მანძილის გაზომვა მხოლოდ ძალიან ახლოს მდებარე ციურ სხეულებამდე. თუმცა ასეთი ვარსკვლავების რაოდენობა არც ისე მცირეა, დაახლოებით – 6 000-ამდე.

პარალაქსის მეთოდის შესაძლებლობების გასაფართოებლად 1989 წელს გაშვებული იქნა პარალაქსის გამზომი კოსმოსური თანამგზავრი HIPPARCOS (High Precision Parallax Collecting Satellite). მისი ბაზისი დედამიწის ორბიტის დიამეტრს 50-ჯერ სჭარბობს და

ამიტომ შეუძლია მანძილების გაზომვა 500 სინათლის წელიწადის რადიუსში. კერძოდ, HIPPARCOS-მა გაზომა პოლარულ ვარსკვლავამდე მანძილი, რომელიც  $430 \pm 100$  სინათლის წელიწადი აღმოჩნდა. ასეთი დიდი ცდომილება იმის მიმანიშნებელია, რომ ეს მანძილი HIPPARCOS-ის შესაძლებლობის ზღვართანაა ახლოს.

2013 წლის დეკემბერში ESA-ამ გაუშვა ახალი თანამგზავრის Gaia (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics). საბოლოოდ თანამგზავრი განლაგდება ლაგრანჟის L2 წერტილში (იხ. სურ. 29), რომელიც დედამიწის ორბიტიდან 1.5 მილიონი კილომეტრითაა დაშორებული. კოსმოსური მისიის წარმატების შემთხვევაში პარალაქსის მეთოდით ციურ ობიექტებამდე მანძილების შეფასების ზღვარი 30 000 სინათლის წელიწადამდე გაიზრდება.

პარალაქსის პრინციპი შეიძლება გამოყენებული იქნას ასევე მძლავრი რადიოგამოსხივების მქონე წყაროებისთვის. ამ მიზნებისთვის ამჟამად გამოიყენება ათი 25-მეტრიანი რადიოტელესკოპისგან შემდგარი სისტემა, რომელიც 8 კილომეტრზეა გადაჭიმული ჰავაიდან (Mauna Kea) ვირჯინის კუნძულებამდე (St. Croix Virgin Islands). ამ სისტემას VLBA (Very Long Baseline Array) ეწოდება. ხანდახან უფრო დიდ სისტემებსაც იყენებენ. მაგალითად, NGC4258 რადიოგალაქტიკამდე მანძილის გასაზომად VLBA-ს მონაცემები გაერთიანდა ნიუ მექსიკოს (აშშ) რადიოტელესკოპის VLA (Very Large Array) დაკვირვების შედეგებთან. აღმოჩნდა, რომ რადიოგალაქტიკა NGC4258 ჩვენგან 23.5 მილიონი სინათლის წელიწადითაა დაშორებული.

### მეორე საფეხური: ცეფეიდები

ცეფეიდების სიკაშკაშის ცვლილების პერიოდზე მათი ნათობის დამოკიდებულების აღმოჩენის შემდეგ (იხ. პარაგრაფი 3.3) შესაძლებელი გახდა ბევრად უფრო დიდი მანძილების გაზომვა. ამ მეთოდის არსი შემდეგში მდგომარეობს:

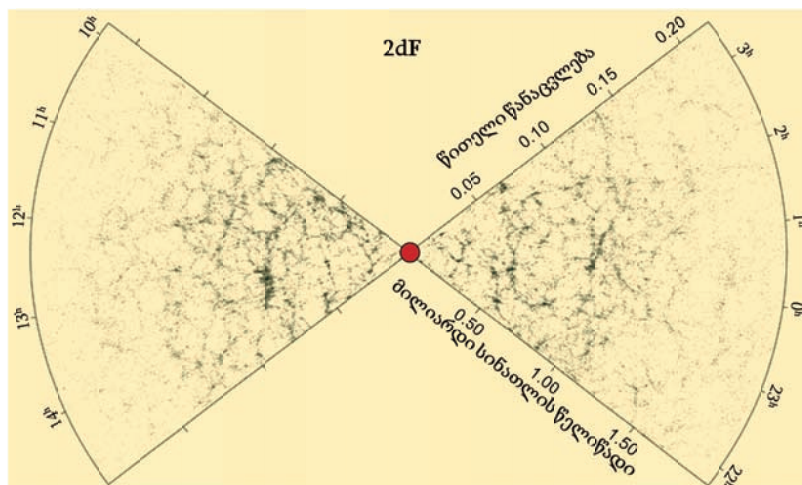
- ადგენენ ცეფეიდის ხილული სიკაშკაშის (B) ცვლილების პერიოდს;
- პერიოდი-ნათობა თანაფარდობით დგინდება ცეფეიდის ნათობა (L);
- L და B-ს მნიშვნელობების მიხედვით აფასებენ ცეფეიდამდე მანძილს (d):

$$d = d_0 \times (B/L)^{1/2} / (B_0/L_0)^{1/2},$$

სადაც  $d_0$  არის 32.6 სინათლის წელიწადის ტოლი სტანდარტული მანძილი, ხოლო  $B_0/L_0$  არის სიკაშკაშის ფარდობა ნათობასთან  $d_0$  მანძილისთვის.

აღწერილი მეთოდით შესაძლებელია იმ გალაქტიკამდე მანძილის დადგენა, რომელშიც ცეფეიდი მდებარეობს. ამრიგად, ჰენრიეტა ლივიტის აღმოჩენამ ცეფეიდების ნათობის შესახებ, საშუალება მოგვცა გაგვეზომა მანძილები რამდენიმე მილიონი სინათლის წელიწადის რადიუსში.

მანძილების გაზომვის ამ საფეხურზე, მეთოდის შესაძლებლობების ზღვარს ადგენს ცეფეიდების ნათობის მნიშვნელობა, რომელიც მზის ნათობაზე საშუალოდ მხოლოდ 5000-ჯერ მეტია. საშუალო ცეფეიდის სინათლე 5 მილიონი სინათლის წელიწადის გავლის შემდეგ ისე სუსტდება, რომ დედამიწაზე დამონტაჟებული ყველაზე მძლავრი ტელესკოპითაც კი შეუძლებელია მისი რეგისტრაცია. თუმცა ბოლო 10 წლის განმავლობაში კოსმოსური ტელესკოპების (მაგალითად, Hubble) საშუალებით მოხდა ცეფეიდების მეთოდის გამოყენებით მანძილების გაზომვა 80 მილიონი სინათლის წელიწადამდე. ეს მანძილი კი, რომელიც ერთი შეხედვით დიდი გვეჩვენება, ძალზე მცირეა სამყაროს მასშტაბებთან შედარებით.



სურ. 74 2dFGRS თანამშრომლობის მიერ მიღებული გალაქტიკების  
განაწილების რუკა

© M. Colless

თვალსაჩინოებისთვის 74-ე სურათზე მოყვანილია სამყაროს რუკის ნაწილი, რომელიც ციური ობიექტების წითელი წანაცვლების გაზომვებითაა შედგენილი. 2dFGRS პროექტის (2-degree Field facility Galaxy Redshift Survey) ფარგლებში, ინგლისურ-ავსტრალიური თანამშრომლობა 1997-2002 წლებში დაკვირვებებს აწარმოებდა ციური თალის მხოლოდ 5 პროცენტის არისთვის. ამ დროის განმავლობაში მან 221 000 გალაქტიკა შეისწავლა და სამყაროში სამი მილიარდი სინათლის წელიწადის სიღრმეზე „შეიჭრა“. შეგახსენებთ, რომ თანამედროვე შეფასებებით სამყაროს ზომა 13.8 მილიარდი სინათლის წელიწადია.

სურათის ცენტრში, წითელი რგოლით შემოსაზღვრულია არე, რომელშიც შესაძლებელია ცეფეიდების საშუალებით მანძილების გაზომვა. როგორც ვხედავთ, გალაქტიკების მხოლოდ უმნიშვნელო ნაწილისთვის შეიძლება ამ მეთოდის გამოყენება. პარალაქსის მეთოდით მანძილების განსაზღვრის არე კიდევ უფრო შეზღუდულია. თუმცა ორივე ამ მეთოდის მნიშვნელობა ძალიან დიდია, რადგან პირველი საფეხურების გარეშე გამორიცხულია ნებისმიერი წინსვლა.

### **შემდგომი საფეხურები: ზეგიგანტები, ზეახალისმაგვარი ვარსკვლავები, სფერული გროვები**

როგორც ადრე აღვნიშნეთ, ციური ობიექტის ნათობა ამ ობიექტამდე მანძილის კვადრატის უკუპროპორციულია. ეს დამოკიდებულება შორეულ მნათობებამდე მანძილების შეფასების საშუალებას იძლევა შემდეგი თანაფარდობის გამოყენებით:

$$d = d_e (L_e / L)^{1/2}$$

სადაც  $d_e$  და  $L_e$  რომელიმე ცნობილი ეტალონური ვარსკვლავის დაშორება და ნათობაა,  $L$  კი ნათობაა იმ ციური ობიექტისა, რომლის  $d$  დაშორებასაც ვეძებთ. აღსანიშნავია, რომ ციური სხეულების პრაქტიკულად ყველა კლასისთვის, როგორებიცაა ზეგიგანტები, ზეახალისმაგვარი ვარსკვლავები, სფერული გროვები და სხვა, მოიძებნება ცნობილი ნათობისა და დაშორების მქონე ობიექტი, რომლის ეტალონად გამოყენებაა შესაძლებელი. ამასთანავე, იმისდა მიხედვით, თუ რომელ კლასს მიეკუთვნება

ეტალონი, იგი ხასიათდება მეტ-ნაკლები ნათობითა და დაშორებით. ამდენად, სხვადასხვა ეტალონური მნათობების გამოყენებით შესაძლებელია სულ უფრო შორეული ობიექტების მანძილების შეფასება.

**ზეგიგანტები** – ზეგიგანტებს უწოდებენ ნებისმიერ გალაქტიკაში არსებულ ყველაზე კაშკაშა ვარსკვლავების განსაკუთრებულ კლასს. მათი ნათობა მზისას დაახლოებით 75 000-ჯერ სჭარბობს, ამიტომ მათი დამზერა 20 მილიონი სინათლის წელიწადის მანძილზეცაა შესაძლებელი. ზეგიგანტის შემცველ გალაქტიკამდე მანძილის დადგენა ცეფეიდების მეთოდის ანალოგიურად ხდება. განსხვავება ისაა, რომ ყველა ზეგიგანტის ნათობა საშუალო ნათობის, ანუ 75 000 მზის ნათობის ტოლადაა მიჩნეული. ცხადია, ეს ამცირებს მანძილის გაზომვის სიზუსტეს.

**ზეახალისმაგვარი ვარსკვლავი** – ზეახალისმაგვარ ვარსკვლავს უწოდებენ მჭიდრო ორჯერად სისტემაში შემავალ თეთრ ჯუჯას, რომელიც თავისი პარტნიორის, წითელი გიგანტის, მატერიას მიიტაცებს. წყალბადით მდიდარი ახალი მატერია იწვევს თეთრი ჯუჯის ზედაპირის გაცხელებას ბირთვული სინთეზის რეაქციების დაწყების ხარჯზე, რის შედეგად ჯუჯების ნათობა საშუალოდ 2.5-ჯერ აჭარბებს ზეგიგანტების ნათობას. ეს კი ასტრონომებს საშუალებას აძლევს საშუალო ნათობით, როგორც ზეგიგანტების შემთხვევაში, მანძილების სკალაზე კიდევ უფრო წინ, 30 მილიონ სინათლის წელიწადამდე წაიწიონ.

**სფერული გროვა** – სფერულ გროვას უწოდებენ კომპაქტურად თავმოყრილ ვარსკვლავებს, რომლებსაც ერთნაირი წარმოშობა, ანუ დაახლოებით ერთნაირი ასაკი და ქიმიური შემადგენლობა გააჩნია. სფერულ გროვაში საშუალოდ 100 000 და მეტი ვარსკვლავია. ასეთი წარმონაქმნის ნათობა შეიძლება 6-ჯერ სჭარბობდეს ზეახალისმაგვარი ვარსკვლავების ნათობას, რაც შორეული გალაქტიკების ყველაზე კაშკაშა სფერული გროვების გამოყენებით მანძილების გაზომვის საშუალებას იძლევა 80 მილიონი სინათლის წელიწადის ფარგლებში.

### **კიდევ ერთი საფეხური: ზეახალი ვარსკვლავები**

ზეახალი ვარსკვლავები ხასიათდება ერთმანეთის მსგავსი სიკაშკაშის მრუდებით და ასევე იმით, რომ სიკაშკაშის მაქსიმუმში მათ ერთნაირი ნათობა გააჩნიათ. ამ ფაქტის დადგენა მოხერხდა ცეფეიდების მეთოდით მანძილების გაზომვებით იმ გალაქტიკებამდე, რომლებშიც ზეახალი ვარსკვლავების აფეთქებებს ჰქონდა ადგილი. ეს აღმოჩენა საშუალებას იძლევა ზეახალი ვარსკვლავები გამოყენებულ იქნას მანძილების გასაზომ სტანდარტულ ვარსკვლავებად. ეს მეთოდი გამორჩეულია, რადგან წინა სამი მეთოდისგან განსხვავებით, ინდივიდუალური ზეახლის ნათობა კარგი სიზუსტით შეიძლება იქნას დადგენილი, ისევე როგორც ეს იყო ცეფეიდების შემთხვევაში. თანაც, თავის მაქსიმუმში ზეახლის აფეთქების სიკაშკაშე ისეთი დიდია, რომ შეუძლია თავისი ნათობით მთელი გალაქტიკა დაჩრდილოს, მიუხედავად იმისა, რომ გალაქტიკა ათობით და ასობით მილიარდ ვარსკვლავს შეიცავს. ზეახალი ვარსკვლავების საშუალებით შესაძლებელია მილიარდობით სინათლის წელიწადის შესაბამისი მანძილების გაზომვა.

### **უმაღლესი საფეხური: წითელი წანაცვლება**

როგორც უკვე არაერთხელ აღვნიშნეთ, სამყაროს გაფართოების გამო ციური ობიექტები ერთმანეთს შორდება. დოპლერის ეფექტის თანახმად, ეს იწვევს მათ მიერ გამოსხივებული ტალღების სპექტრის წითელი უბნისკენ წანაცვლებას. ობიექტების

ურთიერთდაშორების სიჩქარე ( $v$ ) და მათ შორის მანძილი ( $d$ ) ერთმანეთთან ჰაბლის კანონითაა დაკავშირებული:

$$v = H \cdot d,$$

სადაც  $H$ -ს ჰაბლის მუდმივას უწოდებენ. ამჟამად ითვლება, რომ 10%-ის სიზუსტით, ჰაბლის კონსტანტას მნიშვნელობაა

$$H = 67.4 \pm 1.4 \text{ კმ/წმ/მეგაპარსეკი}$$

ცხადია, რომ ჰაბლის კანონის მიხედვით შეიძლება დედამიწიდან რაიმე ობიექტის დაშორების შეფასება. მეთოდის არსი იმაში მდგომარეობს, რომ ზომავენ მნათობის წითელ წანაცვლებას და დოპლერის კანონით ადგენენ ჩვენს მიმართ მის სიჩქარეს. ამის შემდეგ კი ჰაბლის კანონით აფასებენ მანძილს ამ ობიექტამდე.

მეთოდის გამოყენების ზღვარი, როგორც ყოველთვის, დამოკიდებულია ობიექტის ნათობაზე. წითელი წანაცვლებით შესაძლებელია მანძილის შეფასება თვით სამყაროს „კიდეზე“. იქ მდებარეობს კვაზარები – დიდი ნათობის მქონე ობიექტები, სამყაროს ყველაზე მძლავრი „შუქურები“. ისინი, ისევე როგორც ზეახალი ვარსკვლავები, ჩრდილავენ თავიანთ მშობლიურ გალაქტიკებს. თუმცა ზეახალი ვარსკვლავები ასეთი კავშირით მხოლოდ აფეთქების მაქსიმუმის დროსაა, კვაზარები კი ყოველთვის მძლავრად ანათებენ.

ახლავე აღმოჩენილ იქნა კვაზარი წითელი წანაცვლებით  $z = 3.7$ . შევაფასოთ, თუ რა მანძილზეა ის ჩვენგან. კოსმოსური ობიექტის ჩვენგან დაშორების სიჩქარე და მისი წითელი წანაცვლება შემდეგი თანაფარდობითაა ერთმანეთთან დაკავშირებული:

$$v = c (z^2 + 2z) / (z^2 + 2z + 2),$$

სადაც  $c$  სინათლის სიჩქარეს აღნიშნავს.  $z = 3.7$  მნიშვნელობისთვის  $v$  სინათლის სიჩქარეს უახლოვდება:

$$v = 0.913 c$$

ჰაბლის კანონის გამოყენებით მივიღებთ:

$$d (z = 3.7) = 1.2 \times 10^{23} \text{ კმ}$$

ეს კი სამყაროს რადიუსის რიგის სიდიდეა, ანუ განხილული კვაზარი პრაქტიკულად ხილული სამყაროს კიდეში იმყოფება.

### სამყაროს კიდე

ასე, რომ ნაბიჯ-ნაბიჯ სამყაროს კიდეზე მივადექით. კი, მაგრამ რა ზომისაა სამყარო?

ამ შეკითხვაზე პასუხის გასაცემად უნდა შევაფასოთ, თუ რამდენად შორს შეედლო მატერიას გადაადგილება დიდი აფეთქების შემდეგ. ამისთვის კი საჭიროა სამყაროს ასაკის ცოდნა. ამ პარაგრაფის შემდგომ პუნქტში ჩვენ ამ საკითხს კიდევ შევეხებით. ახლა კი აღვნიშნავთ, რომ საკმაოდ კარგი სიზუსტით, სამყაროს ასაკი  $1/H$ , ანუ 13.8 მილიარდი წელიწადის ტოლია. ამ დროის განმავლობაში ზღვრული სიჩქარით (სინათლის სიჩქარე) მოძრაობის შემთხვევაში მატერიას შეედლო გაველო მხოლოდ  $1.3 \times 10^{23}$  კმ. აღვნიშნოთ, რომ სამყაროს რადიუსის ეს, ერთი შეხედვით, ლოგიკური შეფასება, არც ისე ზუსტია. სამყაროს გაფართოების უფრო ღრმა ანალიზის თანახმად სამყაროს რადიუსი ბევრად მეტია.



მნიშვნელოვანია, რომ სამყაროს ზომისა და მის კიდეში მდებარე კვაზარის დაშორების აბსოლუტური მნიშვნელობები ნაკლები სიზუსტით განისაზღვრება, ვიდრე ამ მანძილების შეფარდება. თითოეული მათგანის შეფასების ცდომილება დამოკიდებულია ჰაბლის მუდმივას (H) ზუსტ ცოდნაზე. მანძილების შეფარდება კი, რომელიც 0.913-ის ტოლია, დამოკიდებულია მხოლოდ წითელი წანაცვლების z მნიშვნელობაზე, რაც საკმაოდ კარგი სიზუსტით იზომება. ამდენად, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ მანძილების განსაზღვრის ბოლო საფეხურით – წითელი წანაცვლების მეთოდით – შესაძლებელია სამყაროს ზომის შეფასება დაახლოებით 10%-ის სიზუსტით.

### 3.7 მზის და სხვა ვარსკვლავების ასაკი

დიდი ხნის განმავლობაში ასტრონომები კამათობდნენ, თუ რა არის ვარსკვლავის კოლოსალური ენერგიის წყარო. ერთი ვერსიით ეს იყო ვარსკვლავის გრავიტაციული შეკუმშვის (კოლაფსის) შედეგად გამოყოფილი ენერგია. ამ მოდელით ვარსკვლავის სიცოცხლის ხანგრძლივობა შედარებით მცირე გამოდიოდა. მაგალითად, ასეთი სცენარის თანახმად, მზეს მხოლოდ 30 მილიონი წელიწადი უნდა ეარსება.

სიცოცხლის ხანგრძლივობის სულ სხვა შეფასებას იძლეოდა მეორე მოდელი, რომელიც ახლა სტანდარტულად ითვლება. ეს მოდელი ვარსკვლავების ენერგიას მათ წიაღში მიმდინარე ბირთვული სინთეზის ეგზოთერმულ რეაქციებს უკავშირებს, ანუ რეაქციებს, რომელთა თანხმობა მოვლენაა ენერგიის გამოყოფა. ბირთვული სინთეზის მოდელის თანახმად ვარსკვლავის სიცოცხლის ხანგრძლივობა მის მასაზე დამოკიდებული და საშუალოდ რამდენიმე მილიარდი წელიწადია. მაგალითად, გამოთვლების თანახმად, მზე უკვე ხუთი მილიარდი წელია, რაც ანათებს და დაახლოებით ამდენ ხანს კიდევ იარსებებს.

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, მასიური ვარსკვლავების სიცოცხლის ხანგრძლივობა მცირეა. მაგალითად, მზეზე 10-ჯერ უფრო მასიური ვარსკვლავების ნათობა 1000-ჯერ სჭარბობს მზისას და ისინი თავის რესურსებს 20 მილიონი წლის განმავლობაში ამოწურავენ. მეორეს მხრივ, 0.5 მზის მასის მქონე მსუბუქ ვარსკვლავს შეუძლია 20 მილიარდ წლამდე იცოცხლოს. გვინდა აღვნიშნოთ, რომ ვარსკვლავების ასაკის დადგენა ხერხდება გამოთვლებით, რომლებიც ეყრდნობა ბირთვული რეაქციების ლაბორატორიული ექსპერიმენტების მონაცემებს.

ბოლო წლებში ნეიტრინული ასტრონომიის მონაცემებით (პარაგრაფები 1.7 და 2.9) დადასტურდა მზის ნათობის ბირთვული სინთეზის მოდელი: მზიდან მომავალი ნეიტრინოების ენერგია და ნაკადი კარგ თანხმობაშია ამ მოდელით ნაწინასწარმეტყველევ მნიშვნელობებთან. ამრიგად, ვარსკვლავების მცირე ასაკის ვერსია, რომელიც ეფუძნებოდა ვარსკვლავების გრავიტაციული შეკუმშვით გამოწვეული გაცხელების მოდელს, გამოირიცხა.

ცხელი სამყაროს მოდელის თანახმად სამყაროს არსებობის საწყის მომენტში მხოლოდ ელემენტარული ნაწილაკები და ყველაზე მსუბუქი ბირთვები (წყალბადი, დეიტრონი და ჰელიუმი) გაჩნდა. ყველა დანარჩენი ელემენტი, ბერილიუმიდან დაწყებული ურანით დამთავრებული, ვარსკვლავებში ბირთვული რეაქციების შედეგად წარმოიშვა. ამიტომ ადრეული ვარსკვლავები „აენთო“ გარემოში, რომელიც არ შეიცავდა მძიმე ელემენტებს.

მზეზე უფრო მასიური ადრეული ვარსკვლავები სამყაროში უკვე დიდი ხანია, რაც გაქრა. მათ კოსმოსში დატოვეს წვის პროდუქტები – მძიმე ელემენტები. კოსმოსში

მიმოვანტული მატერიის გრავიტაციული აკრეციის გამო შემდგომ იზადებოდა ახალი ვარსკვლავები, რომლებიც უკვე შეიცავდა მძიმე ელემენტებს. ანუ რაც უფრო ახალგაზრდაა ვარსკვლავი, მით უფრო მდიდარი უნდა იყოს ის მძიმე ელემენტებით.

მეორეს მხრივ, მცირე მასის მქონე ადრეულმა ვარსკვლავებმა ჩვენამდე მოაღწია. ისინი პრაქტიკულად არ შეიცავენ ჰელიუმზე მძიმე ელემენტებს. სწორედ ამ ვარსკვლავებს შეუძლია შეგვიქმნას წარმოდგენა, თუ რამდენად დიდია სამყაროს ასაკი. ქვემოთ მოგიტოხრობთ სამყაროს ასაკის შეფასების ვარსკვლავიერი მოდელის შესახებ.

### ვარსკვლავთა სფერული გროვები

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, ვარსკვლავთა სფერულ გროვებს (კლასტერებს) უწოდებენ ჩვენს გალაქტიკაში არსებულ შეჯგუფებებს, რომლებიც შეიცავს მილიონობით თითქმის ერთნაირი ასაკის ვარსკვლავს. კლასტერის ცენტრთან რამდენიმე ასობით ათასი ვარსკვლავი შეიძლება არსებობდეს, რომელთა შორის მანძილი ჩვენგან უახლოეს ვარსკვლავამდე მანძილის რიგისაა. ყველა ეს გროვა, რომელთა რაოდენობა დაახლოებით 150-ია, გალაქტიკის ჰალოშია და გალაქტიკის ცენტრის გარშემო ბრუნავს.



სურ. 75 ვარსკვლავთა სფერული კლასტერი M15  
© NASA/ESA

სფერული გროვების შემადგენელი ყველა ვარსკვლავის ფორმირება დაახლოებით ერთდროულად მოხდა. ამიტომ ისინი შეიძლება გამოყენებული იქნას, როგორც კოსმოსური საათები. მართლაც, წარმოდგინეთ, რომ გროვაში არის ვარსკვლავი, რომლის ნათობა 10 000-ჯერ სჭარბობს მზისას. ვარსკვლავის მასაზე ნათობის დამოკიდებულების თანახმად, ასეთი ვარსკვლავის მასა მზის მასაზე 10-ჯერ მეტია. ვარსკვლავის სიცოცხლის ხანგრძლივობის მასაზე დამოკიდებულების თანახმად კი, ასეთი ვარსკვლავი (ანუ მთლიანად გროვა) მხოლოდ 20 მილიონი წლის წინათ შეიძლება გაჩენილიყო. იმ სფერული გროვაში კი, რომლის ასაკი 2 მილიარდი წელია, არ შეიძლება იყოს ვარსკვლავი, რომლის მასა მზისას 2-ჯერ ან მეტად აჭარბებს. ასე, რომ გროვაში ყველაზე ბრწყინვალე ვარსკვლავის სიკაშკაშე და დედამიწიდან მისი დაშორება თუ ვიცით, შესაძლებელია ვარსკვლავის ნათობისა და მასის გამოთვლა, აქედან კი ვარსკვლავისა და ვარსკვლავთა გროვის ასაკის შეფასება.

აღმოჩნდა, რომ ჩვენი გალაქტიკის ყველაზე ძველ სფერულ გროვაში თითოეული ვარსკვლავის მაქსიმალური მასა არ აჭარბებდა 0.7 მზის მასას. ეს ნიშნავს, რომ უფრო მასიური ვარსკვლავები ამ კლასტერში უკვე ჩაქრა. თეორიული გამოთვლებით ამ

პროცესისთვის 11-18 მილიარდი წელი იყო საჭირო, ეს კი სამყაროს სავარაუდო ასაკის (13.8 მილიარდი წელიწადი) რიგისაა. ამჟამად შეფასებულია რამდენიმე ათეული კლასტერის ასაკი. რამდენადაც გასაკვირი არ უნდა იყოს, აღმოჩნდა, რომ კოსმოსური მასშტაბებით ისინი თითქმის ერთდროულად, ჩვენი გალაქტიკის ფორმირების საწყის ეტაპზე, ანუ 10-20 მილიარდი წლის წინ წარმოიშვა. აღვნიშნოთ, რომ კლასტერების ასაკის შეფასების ასეთი დიდი ცდომილება (9-10 მილიარდი წელი) გამოწვეულია კლასტერის დედამიწამდე მანძილის გაზომვის უზუსტობით.

### 3.8 ბირთვული საათი, ანუ რადიოაქტიური ქრონომეტრია

კოსმოსური ობიექტების ასაკის დადგენის ერთ-ერთი პერსპექტიული მეთოდი ეყრდნობა მათ წიაღში ურანის რადიოაქტიური იზოტოპის U-238-ის რაოდენობის გაზომვას. რადიოაქტიური U-238-ის ნახევარდაშლის პერიოდი 4.5 მილიარდი წელია. ზემდლავრი VLT ტელესკოპისა და მასზე დამონტაჟებული მაღალი გარჩევისუნარიანობის UVES სპექტროგრაფის გამოყენებით შეფასებული იქნა U-238-ის რაოდენობა ვარსკვლავისთვის, რომელიც ჩვენი გალაქტიკის ფორმირების საწყის პერიოდში წარმოიშვა. ვარსკვლავის გაჩენასთან ერთად, „ურანის საათი“ ჩაირთო და რადიოაქტიურმა იზოტოპმა U-238 დაიწყო ტყვიის სტაბილურ Pb-206 იზოტოპად დაშლა. ურანის იზოტოპის რაოდენობა მცირდებოდა, ხოლო ტყვიისა – იზრდებოდა. U-238-ის და Pb-206-ის რაოდენობების შეფარდებით შესაძლებელია დადგინდეს რადიოაქტიური დაშლის დაწყების დრო, ანუ ვარსკვლავის ასაკი,

$$t = t_{1/2} \times \ln(P/U-1)$$

აქ  $t$  – ვარსკვლავის ასაკია,  $P$  და  $U$  – შესაბამისად, ტყვიისა და ურანის იზოტოპების ამჟამინდელი რაოდენობებია, ხოლო  $t_{1/2}$  კი – ურანის ნახევარდაშლის პერიოდი.

აღწერილი მეთოდი არქეოლოგიაში რადიოაქტიური C-14 ნახშირბადის საშუალებით დათარიღების კარგად ცნობილი მეთოდის ანალოგიურია. ცხადია, რომ კოსმოსური ობიექტების დათარიღებისთვის უნდა იქნეს გამოყენებული ისეთი რადიოაქტიური ელემენტები, რომელთა ნახევარდაშლის პერიოდი მრავალი მილიონი ან მილიარდი წელია. ასეთი ელემენტები მრავლადაა, მაგალითად, რუბიდიუმი Rb-87 (ნახევარდაშლის პერიოდი –  $48 \times 10^9$  წელი), რენიუმი Re-187 ( $42.3 \times 10^9$  წელი), თორიუმი Th-232 ( $14 \times 10^9$  წელი), ურანი U-238 ( $4.5 \times 10^9$  წელი) და სხვა არამდგრადი ელემენტები. ჩამოთვლილი მაგალითების შემთხვევაში დაშლის საბოლოო შედეგებია შესაბამისად სტრონციუმი Sr-87, ოსმიუმი Os-187, ტყვია Pb-208 და უკვე ნახსენები ტყვია Pb-206.

უნდა აღინიშნოს, რომ იზოტოპი Pb-206, ისევე როგორც კოსმოქრონომეტრიისთვის გამოყენებული სხვა ელემენტები, წარმოიქმნება არა მარტო რადიაციული დაშლების რეაქციების შედეგად, არამედ ბირთვული სინთეზის რეაქციებშიც, რომლებიც ზეახალი აფეთქებების პირობებში და ვარსკვლავების წიაღში მიმდინარეობენ. ციურ ობიექტში დათარიღებისთვის საჭირო დამზერილი ელემენტების რაოდენობა განპირობებულია ორივე სახის პროცესებით. სწორედ ამიტომ, ბირთვული კოსმოლოგიური ქრონომეტრიის მეთოდი საჭიროებს ბირთვული სინთეზის მოდელის გამოყენებას, რათა ელემენტების სიჭარბის შეფასებისას გათვალისწინებული იყოს მათი წარმოქმნის ორივე სახის პროცესების წვლილი.

კოსმოსური ობიექტების რადიოაქტიური ქრონომეტრიის ძირითადი პრობლემა იმაში მდგომარეობს, რომ დღესდღეობით არსებული ექსპერიმენტული მასალის

საფუძველზე ძალზე რთულია ამ ელემენტების გაზომილი სპექტრული ხაზების ინტენსივობიდან გამომდინარე, ციურ სხეულებში მათი სიუხვის დადგენა. მაგალითად, ვარსკვლავებში თორიუმისა (Th-232) და ურანის (U-238) უკიდურესად მცირე შემცველობის გამო, მათი სპექტრული ხაზები „იჩრდილება“ სხვა მძიმე ელემენტების სპექტრული ხაზებით. მაგრამ აღმოჩნდა რამდენიმე „ხანდაზმული“ ციური ობიექტი, რომლებმაც ასტრონომების ყურადღება მიიპყრეს.

ვარსკვლავი CS 31082-001 არის ერთ-ერთი ყველაზე ძველი კოსმოსური ობიექტი, რომლის ასაკი დადგინდა რადიოაქტიური საათის მეშვეობით. ამ ვარსკვლავის დამახასიათებელი ნიშანია მძიმე ელემენტების ნაკლებობა. მაგალითად რკინისა და წყალბადის ატომების რაოდენობათა თანაფარდობა 800-ჯერ ნაკლებია მზეზე ამ ელემენტების რაოდენობათა თანაფარდობაზე. ეს კი იმას ნიშნავს, რომ CS 31082-001 მზეზე ბევრად ხანდაზმულია, ვინაიდან მისი გაჩენის დროისთვის სამყარო გაცილებით უფრო ღარიბი იყო მძიმე ელემენტებით. აღვნიშნოთ, რომ მზისთვისაც კი ლითიუმზე მძიმე ელემენტების ხვედრითი წონა არ აღემატება 2%<sup>‡</sup>.

სწორედ მძიმე ელემენტების სიმცირე იძლევა საშუალებას CS 31082-001 ვარსკვლავის სპექტრში დამზერილი იქნას ისეთი იშვიათი ელემენტები, როგორიცაა ურანი და თორიუმი. ჩვეულებრივ ვარსკვლავებში შეუძლებელია მათი შესაბამისი ხაზების გამორჩევა სხვა ელემენტების სპექტრებიდან. CS 31082-001-ზე დაკვირვება ხორციელდებოდა UVES სპექტროგრაფით აღჭურვილი VLT ტელესკოპის საშუალებით. აღმოჩნდა, რომ ამ ვარსკვლავზე სტაბილური ელემენტების რაოდენობა მზეზე მათი რაოდენობის 0.12%-ია, ურანის U-238 – 0.06%, ხოლო თორიუმის Th-232 კი – 0.09%. ასეთი პროპორცია იმის მაჩვენებელია, რომ დროთა განმავლობაში U-238 და Th-232 დაიშალა და მათი რაოდენობა შემცირდა სტაბილურ ელემენტებთან შედარებით. სწორედ ამ სხვაობის საშუალებით მოხერხდა CS 31082-001 ვარსკვლავის სავარაუდო ასაკის დადგენა. პირველი შეფასებების თანახმად იგი 11-16 მილიარდი წელი იყო, უკანასკნელი დაზუსტებული მონაცემებით კი  $14.1 \pm 2.5$  მილიარდი წელია.

1997 წელს აღმოჩენილი იყო კიდევ ერთი ვარსკვლავი – CS 22892-052, რომელიც აგრეთვე ხასიათდებოდა რკინის ნაკლებობით. თორიუმის საკმაოდ მკვეთრი სპექტრული ხაზების საშუალებით მოხერხდა ვარსკვლავში ამ ნივთიერების რაოდენობის დადგენა. მზესა და CS 22892-052 ვარსკვლავში თორიუმისა და ევროპიუმის რაოდენობათა შეფარდებების შედარებით განისაზღვრა ამ ვარსკვლავის ასაკი:  $15.12 \pm 3.5$  მილიარდი წელი. 1999 წელს ჩატარდა ახალი სამუშაოები, რომლებიც მიზნად ისახავდნენ CS 22892-052 ვარსკვლავის ასაკის დაზუსტებას და HD 115444 გიგანტის ასაკის დადგენას. ისევე, როგორც წინამორბედი ორი ვარსკვლავი, HD 115444

---

<sup>‡</sup> აღსანიშნავია, რომ ვარსკვლავების ასაკის დადგენა შესაძლებელია მათში მძიმე ელემენტების რაოდენობის შეფასებით: რაც უფრო ღარიბია ვარსკვლავი მძიმე ელემენტებით, მით უფრო ხანდაზმულია იგი. 2014 წლის თებერვალში ჩვენს გალაქტიკაში აღმოჩენილი იქნა ვარსკვლავი SM0313. თუ მასში შემავალი ქიმიური ელემენტების სპექტრული ანაბეჭდის მიხედვით ვიმსჯელებთ, იგი 13.6 მილიარდი წლის წინ უნდა გაჩენილიყო. ასე მაგალითად, მისი რკინის შემცველობა 10 მილიონჯერ ჩამოუვარდება მზისას. საინტერესოა, რომ თვით ირმის ნახტომის ასაკი 13.2 მილიარდი წლითაა შეფასებული. მეცნიერები ვარაუდობენ, რომ ცნობილი სამყაროს ერთ-ერთი ყველაზე ასაკოვანი ვარსკვლავი ჩვენს გალაქტიკაში აღმოჩნდა ამ უკანასკნელის სწრაფი გაფართოების შედეგად.

გიგანტი მიეკუთვნება ციური ობიექტების კლასს, რომელსაც მეტალების მცირე შემცველობის გამო ეწოდება UMP (ultra-metal-poor).

დღესდღეობით რადიოაქტიური ქრონომეტრის შედეგების მიხედვით ყველაზე ხანდაზმული ვარსკვლავების ასაკის საშუალო მნიშვნელობად მიჩნეულია  $14 \pm 2.2$  მილიარდი წელი.

### 3.9 სამყაროს ასაკი

ჯერჯერობით, სამყაროს ასაკის შეფასების ორი მეთოდი არსებობს. პირველ მეთოდზე ჩვენ წინა პარაგრაფში ვისაუბრეთ. ყველაზე ძველი (ე.ი. ხანდაზმული) ვარსკვლავების ასაკით ასტრონომებს შეუძლიათ დაადგინონ სამყაროს ასაკის მინიმალურ მნიშვნელობა, რომელიც დღეისათვის  $14 \pm 2.2$  მილიარდ წელს შეადგენს.

მეორე მეთოდის ფარგლებში სამყაროს ასაკის დადგენა შესაძლებელია ჰაბლის მუდმივას (H) საშუალებით. აინშტაინის ზოგადი ფარდობითობის თეორიის თანახმად, თუ სივრცე ბრტყელია და მატერია მასში ძირითადად ჩვეულებრივი ნივთიერებითაა წარმოდგენილი, მაშინ სამყაროს ასაკსა (T) და ჰაბლის მუდმივას შორის თანაფარდობას შემდეგი სახე აქვს:

$$T = 2/(3 \times H),$$

ხოლო თუ სამყაროში მატერიის არსებობის ძირითადი ფორმა ენერგიაა, მაშინ

$$T = 1/H$$

სწორედ ეს უკანასკნელი ფორმულა შეესაბამება ასტრონომიულ დაკვირვებებსა და Planck კოსმოსური მისიის მონაცემებს, რომლებიც მიუთითებენ, რომ სამყარო ბრტყელია და მისი სიმკვრივის 68% განპირობებულია ეგრეთ წოდებული ფარული ენერგიით.

ჰაბლის კანონის თანახმად, რომელიმე გალაქტიკის ჩვენგან დაშორების (d) და მისი სიჩქარის (v) ცოდნის შემთხვევაში, შესაძლებელია ჰაბლის მუდმივას (H) დადგენა შემდეგი თანაფარდობიდან:  $v = H \times d$ . რომელიმე მნათობის ჩვენს მიმართ სიჩქარე საკმაოდ ზუსტად იზომება მისი ატომების სპექტრის წითელი წანაცვლების მეშვეობით,

$$z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0,$$

სადაც  $\lambda$  და  $\lambda_0$ , შესაბამისად, აღნიშნავს მოძრავი და უძრავი ატომის მიერ გამოსხივებულ ტალღის სიგრძეებს. მოძრავი მნათობის სიჩქარე კი გამოითვლება ფორმულით:

$$v = c (z^2 + 2z)/(z^2 + 2z + 2),$$

სადაც c სინათლის სიჩქარეა.

სირთულეები იწყება მნათობამდე d მანძილის დადგენის მცდელობისას. ამჟამად შორეული ობიექტების მანძილების სკალის, ანუ ჰაბლის კანონის დასაზუსტებლად, გამოიყენება წითელი წანაცვლების მანძილზე დამოკიდებულების კანონი Ia ტიპის ზეახალი ვარსკვლავებისთვის. ისინი კოსმოსში ზემდგომად „შუქურებს“ წარმოადგენენ ყველა ზეახლისთვის ერთნაირი, სტანდარტული ნათობით. კონკრეტული Ia ზეახლის ნათობის უფრო ზუსტად გასაზომად შეიძლება მათი აფეთქების თავისებურებების გამოყენება. ასეთი აფეთქების სიკაშკაშე მაქსიმუმს აღწევს აფეთქებიდან დაახლოებით სამ კვირაში, ჩაქრობას კი რამდენიმე თვე სჭირდება (იხ. სურ. 68). შესაბამისად,



ვარსკვლავის ნათობა ჯერ მკვეთრად იზრდება, შემდეგ კი ნელ-ნელა მცირდება. ამასთან ერთად, აფეთქების ხანგრძლივობა დამოკიდებულია ვარსკვლავის ნათობაზე: რაც მეტია ნათობა, უფრო დიდხანს გრძელდება აფეთქება. ზუსტად ეს გარემოება იძლევა ზეახლის აფეთქების ნათობის დადგენის საშუალებას. გავიხსენოთ, რომ რომელიმე მნათობის ხილული სიკაშკაშე (B) უკუპროპორციულია დედამიწამდე მისი მანძილის კვადრატისა. ამიტომ ნათობის (L) ზუსტი ცოდნა შესაძლებლობას გვაძლევს გავზომოთ მანძილი (d) ზეახალ ვარსკვლავამდე და გალაქტიკამდეც, რომელშიც ზეახალი მდებარეობს, ფორმულით:  $d = (L/B)^{1/2}$ .

ტიპიურ სპირალურ გალაქტიკაში Ia ტიპის ზეახლის აფეთქება საუკუნეში საშუალოდ ერთხელ ხდება. მაგრამ თუ ერთდროულად მრავალ ათას გალაქტიკას დავაკვირდებით, მაშინ თვეში ათი და მეტი ასეთი აფეთქების დაფიქსირებაა შესაძლებელი. თანამედროვე გიგანტური ტელესკოპები (მაგალითად NASA-ს კოსმოსური ტელესკოპი Hubble), რომლებიც აღჭურვილია სპეციალური ციფრული კამერებით, უწყვეტად აკვირდებიან ათასობით გალაქტიკას. ყოველ 10 წუთში მათ 5 000 გალაქტიკის ციფრული მონაცემების დამუშავების უნარი აქვთ. მათი საშუალებით უკვე რამდენიმე ათასი Ia ტიპის ზეახალი ვარსკვლავია აღმოჩენილი. შედგენილია ზეახალი ვარსკვლავების ციური რუკა და შესწავლილია სამყაროს გაფართოების დინამიკა, რომელიც საკმაოდ რთული აღმოჩნდა. სამყაროს პარამეტრების შემდგომი დაზუსტებისთვის საჭიროა ზეახალი ვარსკვლავების აფეთქებების ბევრად დიდი სტატისტიკური მონაცემები. ამის შესახებ შემდგომ თავში მოგითხრობთ.

ამ თავის დასასრულს კი აღვნიშნოთ, რომ ჰაბლის მუდმივას მნიშვნელობიდან გამომდინარე, სამყაროს ასაკი  $13.81 \pm 0.06$  მილიარდ წელს უნდა შეადგენდეს.

## თავი IV რას და როგორ სწავლობენ კოსმოლოგიები

### 4.1 ზოგადი შენიშვნები

მეოთხე თავში მოგიტხრობთ თანამედროვე კოსმოლოგიის პრობლემებზე, რომელთა გადაწყვეტას მეცნიერები ოცდამეერთე საუკუნეში იმედოვნებენ.

რა ევოლუცია განიცადა სამყარომ მისი მძვინვარე წარმოქმნიდან დღემდე, რისგან შედგება იგი, როგორია მისი სიმკვრივე, როგორი სახისაა სამყაროს სივრცე, როგორ განისაზღვრება სამყაროს თვისებები მისი ევოლუციით და მასში წარმოდგენილი მატერიითა და ენერგიით – აი ის საკითხები, რომლებსაც მიმდინარე თავში შევხებით.

თხრობას კი შავი ხვრელების განხილვით დავიწყებთ.

### 4.2 რას წარმოადგენს შავი ხვრელები?

აინშტაინის ზოგადი ფარდობითობის თეორიის თანახმად, უნდა არსებობდეს განსაკუთრებული ობიექტები, რომელთა გრავიტაციული ველი იმდენად ძლიერია, რომ არაფერს, მათ შორის სინათლესაც კი, არ ძალუძს დააღწიოს თავი ამ სხეულების მიზიდულობას. ასეთ ობიექტებს შავი ხვრელები ეწოდება.

იმისათვის, რომ გავიაზროთ, თუ რატომ ვერ ტოვებს ვერაფერი შავ ხვრელს, გავიხსენოთ, რომ არსებობს მოწყვეტის, ანუ ეგრეთ წოდებული მეორე კოსმოსური სიჩქარე. თუ სხეულის სიჩქარე მოწყვეტის სიჩქარეზე ნაკლებია, მაშინ ის ვერ დატოვებს კოსმოსურ ობიექტს. ხოლო თუ სხეულს მივანიჭებთ მეტ სიჩქარეს, ვიდრე ამ ობიექტის მასის შესაბამისი მეორე კოსმოსური სიჩქარეა, მაშინ ის მოსწყდება ობიექტს და კოსმოსში გაიჭრება. დედამიწისთვის, მაგალითად, მეორე კოსმოსური სიჩქარის მნიშვნელობა არის 11.2 კმ/წმ.

რაც უფრო დიდია ობიექტის მასა, მით უფრო დიდია მისი მოწყვეტის სიჩქარე. გარდა ამისა, მოწყვეტის სიჩქარე დამოკიდებულია ობიექტის სიმკვრივეზე. რაც უფრო დიდია სიმკვრივე, მით მეტია მოწყვეტის სიჩქარე. შავი ხვრელის განმარტების თანახმად, მისი მოწყვეტის სიჩქარე სინათლის სიჩქარეს აჭარბებს. ამიტომ არაფერს შეუძლია მოსწყდეს შავ ხვრელს. ყოველივე ზემოაღნიშნულიდან ცხადია, რომ შავ ხვრელებს უნდა ჰქონდეს ძალზე დიდი სიმკვრივე.

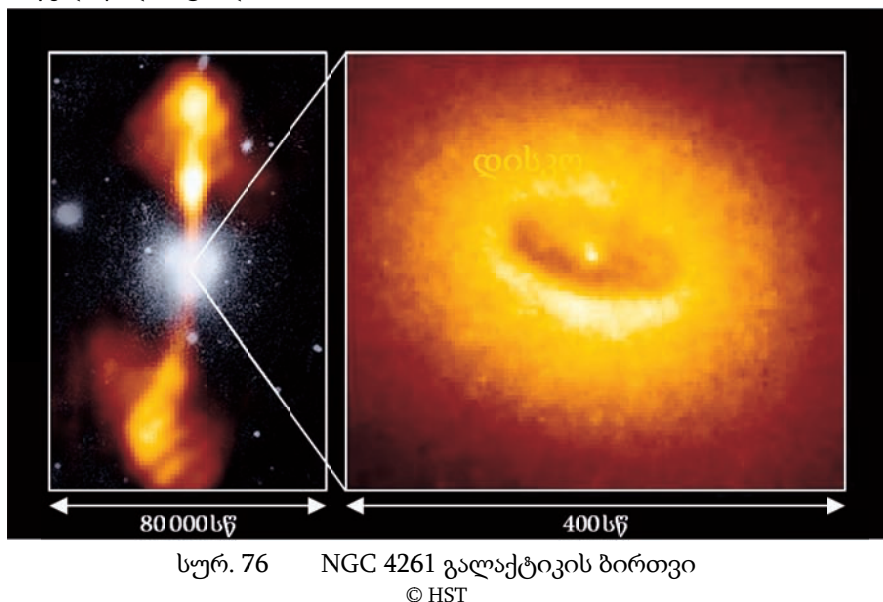
დღესდღეობით ორი სახის, ვარსკვლავური და ზემასიური შავი ხვრელების არსებობის არაპირდაპირი მტკიცებულებები მოიპოვება.

შავი ხვრელების უმეტესობის მასა მხოლოდ რამდენჯერმე აღემატება მზისას. ისინი წარმოიქმნენ და ახლაც წარმოიქმნებიან ზეახალი ვარსკვლავების აფეთქებისას გარე შრეების მოწყვეტისა და მათ ადგილას დარჩენილი ვარსკვლავების შემდგომი კოლაფსის შედეგად. კოლაფსის დროს ნარჩენი ვარსკვლავი მიიტაცებს მთელ თავის მასას მკვრივ ბირთვში, რომელიც საბოლოოდ შავ ხვრელად გარდაიქმნება.

არსებობს ბევრად უფრო მძიმე შავი ხვრელებიც, რომლებიც გალაქტიკების ბირთვებში მდებარეობს. ზემძიმე შავი ხვრელი ჩვენი გალაქტიკის ცენტრშიც უნდა არსებობდეს. მას მშვილდოსნის A\*-ს (Sagittarius A\*, საყოველთაოდ მიღებული შემოკლებით – Sag A\*) უწოდებენ და მისი მასა 4.1 მილიონი მზის მასის ტოლდაა შეფასებული. ზემასიური შავი ხვრელების წარმოშობას ვარსკვლავური შავი ხვრელების წარმოშობისგან განსხვავებული ბუნება აქვს. თუმცა ჯერჯერობით ზუსტი მექანიზმები ცალსახად ცნობილი არაა. ერთ-ერთი მოდელის თანახმად, გალაქტიკების ჩასახვის საწყის ეტაპებზე მათ ბირთვებში ვარსკვლავების კონცენტრაცია ბევრად მაღალი იყო.

სწორედ ამ ვარსკვლავების შერწყმას უნდა შეექმნა  $10^6$ - $10^9$  მზის მასის მქონე შავი ხვრელები. სხვა მოდელის მიხედვით, ზემასიური შავი ხვრელის წარმოქმნას წინ უძღვის უზარმაზარი აიროვანი ღრუბლის კოლაფსის შედეგად რელატივისტური ვარსკვლავის გაჩენა. გარკვეულ პირობებში ასეთი ვარსკვლავი შესაძლოა, არამდგრადი იყოს და ზემასიურ შავ ხვრელად იქცეს. გამორიცხული არაა, რომ ზემასიური შავი ხვრელის ფორმირება ხდებოდეს შედარებით მომცრო, ვარსკვლავის ზომის შავი ხვრელის მიერ გარემომცველი ნივთიერების თანდათანობითი მიტაცებით.

საზოგადოდ, ვარსკვლავთშორისი აირი შავი ხვრელების მიერ მუდმივად შეიწოვება და გადის აკრეციული დისკოს სტადიას. ეს დისკოები ელექტრომაგნიტური გამოსხივების მთელ დიაპაზონში კოლოსალური ენერგიის ჭავლებს გამოტყორცნიან (იხ. პარაგრაფები 1.5 და 2.6). 76-ე სურათზე მოყვანილია ჰაბლის ტელესკოპით დაფიქსირებული NGC 4261 გალაქტიკის აქტიური ბირთვის „მხატვრული გამოსახულება“, რომელიც პირველადი ექსპერიმენტული მონაცემების დამუშავების შედეგად იქნა მიღებული. ამ გალაქტიკის ცენტრში მდებარეობს ზემასიური შავი ხვრელი 400 მილიონი მზის მასითა და აკრეციული დისკოთი, რომლის ზომა 800 სინათლის წელიწადის ტოლია.



ვინაიდან შავი ხვრელები არაფერს ასხივებს, უშუალოდ მათი დანახვა შეუძლებელია. ამიტომ შავი ხვრელების შესასწავლად არაპირდაპირი მეთოდები გამოიყენება.

ერთ-ერთი მეთოდი ემყარება იმ ბნელი (უჩინარი) ობიექტის მასის განსაზღვრას, რომელიც მიიტაცებს მის გარშემო არსებულ მატერიას. ასეთი ობიექტის მასის შეფასება ხდება მის გარშემო მბრუნავი სხეულების სიჩქარის მიხედვით, ისევე, როგორც ჩვენი მზის მასის დასადგენად გამოიყენება პლანეტების მოძრაობის სიჩქარე. ამ მეთოდს წარმატებით იყენებენ გალაქტიკების ცენტრებში ზემასიური შავი ხვრელების არსებობის შესამოწმებლად და მათი მასების შესაფასებლად, ვინაიდან ასეთი ხვრელების მოსალოდნელი ადგილმდებარეობა თითქმის ზუსტადაა ცნობილი.

როგორც ზემოთ ვახსენეთ, გალაქტიკების ბირთვებში შავი ხვრელების გარშემო ჩნდება აკრეციული დისკოები. დისკოების სიბრტყის პერპენდიკულარულად გამოიტყორცნება ცხელი იონიზებული გაზის ვიწრო ჭავლები, რომელთა გამოსხივებას რადიოტელესკოპები არეგისტრირებს. ბოლო წლებში შეიქმნა რადიოტელესკოპების ქსელები, რომლებიც გალაქტიკის ბირთვებს სხვადასხვა მხრიდან „ათვალიერებენ“ და შავი ხვრელების „პროფილს“ ადგენენ. ხვრელთან ყველაზე ახლოს მდებარე ვარსკვლავების საშუალებით შესაძლებელია ასევე შავი ხვრელის მაქსიმალური რადიუსისა და მისი სიმკვრივის დადგენა. ამ მეთოდით წარმოებს ჩვენი გალაქტიკისა და უახლოესი დიდი M87 გალაქტიკის ცენტრებში არსებული ზემასიური შავი ხვრელების შესწავლა. აღვნიშნოთ, რომ ამ კვლევებით უნდა შემოწმდეს აინშტაინის ზოგადი ფარდობითობის თეორია, რომლის ფარგლებშიც იყო ნაწინასწარმეტყველები შავი ხვრელების არსებობა.

ბნელი ობიექტების მასისა და სიმკვრივის დასადგენად ასევე იყენებენ ძალიან დიდი ბაზისის მქონე ინტერფერომეტრებს. მათი საშუალებით ზომავენ საკვლევი ობიექტების გარშემო ძალიან ახლო მანძილზე მბრუნავი აირის სიჩქარეს. აღმოჩნდა, რომ მბრუნავი აირი გალაქტიკების ცენტრებში მდებარე ბნელ ობიექტებთან მიახლოებულია ნახევარი სინათლის წელიწადის მანძილზე. ეს ნიშნავს, რომ გალაქტიკის ცენტრში არსებული ზემასიური შავი ხვრელის რადიუსი სინათლის წელიწადის ნახევარზე ნაკლებია და მას კოლოსალური სიმკვრივე გააჩნია.

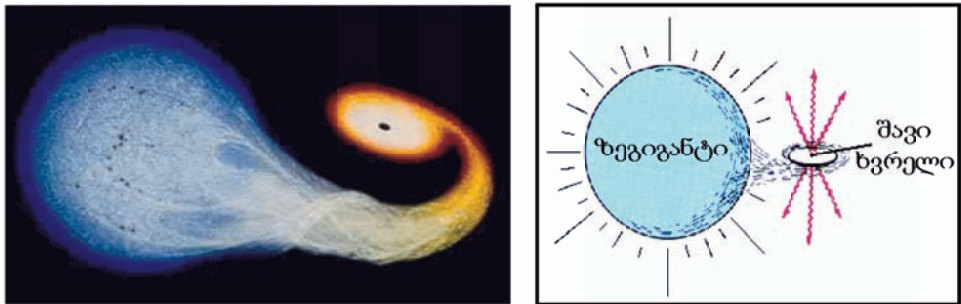
რამდენიმე გალაქტიკის ცენტრის მახლობლად, გამოსხივების სპექტრის საშუალებით, აღმოაჩინეს წყალბადი, რომელიც 1/3 სინათლის სიჩქარით მოძრაობს. ეს მნიშვნელობა შავი ხვრელის მოვლენათა ჰორიზონტთან ახლოს მდებარე სხეულის მოწყვეტის სიჩქარესთანაა ახლოს; ვერც ერთი სხვა ობიექტი წყალბადს ასე ვერ ააჩქარებდა – რაც გალაქტიკების ცენტრებში ზემასიური შავი ხვრელების არსებობის კიდევ ერთი დასტურია.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ვარსკვლავური, რამდენიმე მზის მასის მქონე შავი ხვრელი შეიძლება გაჩნდეს ზეახალი ვარსკვლავის აფეთქების შედეგად. ასეთი ობიექტი ბევრია, მაგრამ, ზემასიური შავი ხვრელებისგან განსხვავებით, მათი ადგილმდებარეობა უცნობია. ამიტომ ვარსკვლავური შავი ხვრელების აღმოჩენა და შესწავლა შეუძლებელი იქნებოდა, რომ არა ერთი გარემოება. ვარსკვლავები უმეტეს შემთხვევაში ჯგუფ-ჯგუფად არსებობს. ყველაზე ხშირად ისინი ორჯერად სისტემებს ქმნიან. ჩვენი მზე ერთ-ერთი გამონაკლისია, მას პარტნიორი არ ჰყავს. ასე, რომ ვარსკვლავური შავი ხვრელების ნაწილი ორჯერად სისტემებში შედის. ასეთ სისტემაში ხილული ვარსკვლავის ნივთიერება გადაიქაჩება უჩინარი პარტნიორის მიერ და იქმნება აკრეციული დისკო. ამ დისკოს შემადგენელი ნივთიერება ხვრელთან მიახლოებისას სულ უფრო და უფრო ცხელდება და აქტიურად ასხივებს რენტგენის დიაპაზონში. 77-ე სურათზე გამოსახულია ეს მოვლენა.

ორჯერად სისტემაში შავი ხვრელის არსებობის დასადასტურებლად უნდა გაიზომოს უჩინარი ობიექტის მასა, რომელიც რამდენიმე მზის მასის ტოლი უნდა აღმოჩნდეს. ამ მიზნით იკვლევენ რენტგენის გამოსხივების წყაროების ორბიტის მახასიათებლებს, რომლებიც დამოკიდებულია უჩინარი ობიექტის მასაზე.

პირველი ვარსკვლავური შავი ხვრელის კანდიდატი აღმოჩენილი იქნა 1971 წელს ორჯერად სისტემაში გედი X-1. მას შემდეგ ამ მიმართულებით სისტემატური კვლევა მიმდინარეობს და საჭირო თვისებების მქონე რენტგენული ორჯერადი სისტემების

რიცხვი საკმაოდ გაიზარდა. ახლაბან ჩვენი გალაქტიკის ზემასიური შავი ხვრელის Sag A\* მახლობლად, 3 სინათლის წელიწადზე ნაკლებ მანძილზე, რენტგენის გამოსხივების საშუალებით აღმოჩენილი იქნა ოთხი ორჯერადი სისტემა. ფიქრობენ, რომ ისინი შეიცავენ ვარსკვლავურ შავ ხვრელებს. მოსალოდნელია, რომ Sag A\* გარშემო ათასობით ასეთი ობიექტია კონცენტრირებული. ორჯერადი სისტემები აღმოჩენილია სხვა გალაქტიკებშიც, მაგალითად მაგელანის დიდ ღრუბელში.



სურ. 77 ორჯერადი სისტემა შავი ხვრელით. მარჯვენა სურათზე გამოსახულია აკრეციული დისკოს რენტგენის გამოსხივების სქემა

© Tim Kuzniar, Lochness Productions

არსებობს შავ ხვრელებთან დაკავშირებული კიდევ ერთი საკითხი, რომელიც ცნობილი კოსმოლოგის სტივენ ჰოუკინგის (Stephen Hawking, 1942) სახელს უკავშირდება. ჯერ კიდევ გასული საუკუნის 70-იან წლებში ჰოუკინგმა შექმნა თეორია, რომლის თანახმად შავი ხვრელი, გარკვეული კვანტური ეფექტების გამო, ასხივებს შავი სხეულის სითბური სპექტრის დიაპაზონში. ჰოუკინგის რადიაციის გამო შავი ხვრელი კარგავს მასას. ხვრელი, რომელიც იტაცებს ამ ეფექტით დაკარგულ მასაზე ნაკლებ მატერიას, მცირდება ზომამი და დროთა განმავლობაში ორთქლდება.

ჰოუკინგის ეს შრომები მეცნიერთა მრავალწლიან დაპირისპირებას იწვევს. ყველაზე მწვავე კამათი კვანტური ინფორმაციის დანაკარგის პარადოქსის გარშემო წარიმართა. პარადოქსის არსი შემდეგში მდგომარეობს. ჰოუკინგის შავი სხეულის გამოსხივება არ შეიცავს არანაირ ინფორმაციას შავ ხვრელში არსებული მატერიის შესახებ. შავი ხვრელის აორთქლების შემდეგ მასში არსებული სრული ინფორმაცია სამუდამოდ უნდა გაქრეს. მაგრამ კვანტური ფიზიკის კანონები არ უშვებენ ინფორმაციის მთლიან დანაკარგს. პარადოქსის თავიდან აცილების მიზნით, ჰოუკინგმა დაუშვა, რომ შავი ხვრელის უზარმაზარი გრავიტაციული ველი კვანტური ფიზიკის კანონებს არღვევს, რამაც მეცნიერთა დიდი წინააღმდეგობა გამოიწვია. საქმე ჰოუკინგსა და მის კოლეგებს შორის გახმაურებულ სანადიმომდეც კი მივიდა. თავისი პირველი ნაშრომების გამოქვეყნებიდან 30 წლის შემდეგ, თავად ჰოუკინგმა მოახერხა ინფორმაციის დანაკარგის პარადოქსის გადაჭრა. კლასიკური ფიზიკის შავი ხვრელების მოდელისგან განსხვავებით, მის მიერ შემუშავებულ მოდელში შავი ხვრელების მოვლენათა ჰორიზონტი არ არის მკვეთრი, რაც ინფორმაციის გაჟონვის შესაძლებლობას ქმნის. მიუხედავად იმისა, რომ ჰოუკინგმა თავისივე გათვლების საფუძველზე თავი დამარცხებულად სცნო, მრავალი მეცნიერი არ ეთანხმება შავი ხვრელების მისეულ მოდელს, ხოლო კვანტური ინფორმაციის დანაკარგის პარადოქსი მეცნიერთა შორის ისევ კამათის მიზეზად რჩება.



### 4.3 რელიქტური მიკროტალღური ფონი

როგორც უკვე აღვნიშნეთ პარაგრაფში 1.4, 1964 წელს არნო პენზიასმა და რობერტ უილსონმა აღმოაჩინეს მიკროტალღური გამოსხივება, რომელიც დედამიწას ყველა მხრიდან თანაბრად, ანუ იზოტროპულად, ეცემოდა. მათი შეფასებებით, იგი შეესაბამებოდა დაახლოებით 3.5 K ტემპერატურის მქონე შავი სხეულის გამოსხივებას. იქვე ხაზი გავესვით, რომ გასული საუკუნის 40-იან წლებში, ცხელი სამყაროს მოდელის საფუძველზე, ასეთი გამოსხივების არსებობა გიორგი გამოვმა იწინასწარმეტყველა. იგი უნდა წარმოშობილიყო მაშინ, როდესაც სამყაროს ტემპერატურა 3000 K-მდე დაეცა და შეიქმნა პროტონებისა და ელექტრონების ნეიტრალურ ატომებად გაერთიანების პირობები. ამ დროს მოხდა მატერიისა და გამოსხივების ერთმანეთისგან განცალკევება. პროტონებისა და ელექტრონების რეკომბინაციამდე წონასწორობის მდგომარეობაში არსებულ პლაზმაში ფოტონების რიცხვი უდრიდა ფერმიონების რიცხვს. ნეიტრალური ატომების გაჩენის შემდეგ მათი შემადგენელი დამუხტული ნაწილაკების შესაბამისი ფოტონები „მიუსაფარი“ აღმოჩნდა და ჩვენამდე იმ სახით მოადწია, რა სახითაც მათ „უკანასკნელი გაბნევის“ ეპოქამ მოუსწრო. ამიტომ ეწოდება მათ რელიქტური, ხოლო მათ ერთობლიობას – კოსმოსური მიკროტალღური ფონი (CMB – Cosmic Microwave Background). სწორედ ეს რელიქტური გამოსხივება აღმოაჩინეს პენზიასმა და უილსონმა. სამყაროს გაფართოების გამო ფოტონების ტალღის სიგრძე იზრდებოდა, შესაბამისად მათი ენერგია იკლებდა და რელიქტური ფონის ტემპერატურა ეცემოდა. დაზუსტებული ექსპერიმენტული მონაცემებით, რელიქტური ფონის ტემპერატურა დაახლოებით 2.7 K შეადგენს, რაც საკმაოდ კარგი სიზუსტით ემთხვევა გამოვის მიერ იწინასწარმეტყველებულ მნიშვნელობას.

CMB-ის აღმოჩენის დღიდან იგი მეცნიერთა ყურადღების ობიექტი გახდა. მრავალმხრივი შესწავლის შემდეგ, CMB-ის მახასიათებლების საფუძველზე, ასტროფიზიკოსებმა დაადასტურეს ცხელი სამყაროს მოდელი, რომელიც დამკვიდრდა როგორც სტანდარტული კოსმოლოგიური მოდელი.

#### სტანდარტული კოსმოლოგიური მოდელის ძირითადი დებულებები

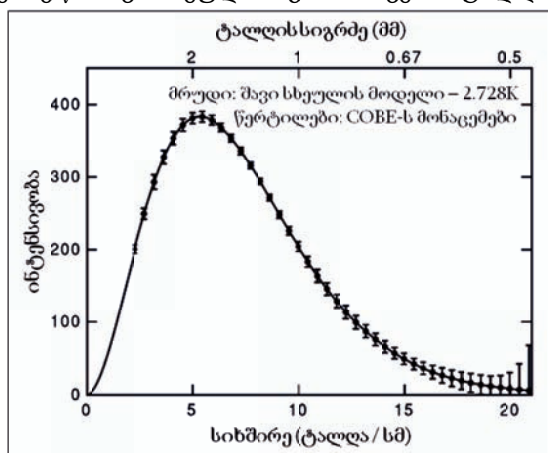
სამყარო გაჩნდა დიდი აფეთქების შედეგად. საწყისი კვანტური მდგომარეობის შემდეგ, დიდი აფეთქებიდან  $10^{-35}$ – $10^{-32}$  წამის ინტერვალში, მიმდინარეობდა სივრცის ზესწრაფი გაფართოება, რომელსაც ინფლაციას უწოდებენ. მას შემდეგ სამყარო შედარებით ნელა ფართოვდებოდა და ეს გაფართოება დღესაც გრძელდება. ინფლაციამ განსაზღვრა სამყაროს ბევრი თვისება, რომელიც მას დღეს, სამყაროს გაჩენიდან 13.8 მილიარდი წლის შემდეგ გააჩნია. კერძოდ:

- სამყარო პრაქტიკულად ბრტყელია, ანუ მისი გეომეტრია ევკლიდურია – პარალელური ხაზები არასდროს იკვეთება, სამკუთხედთა კუთხეების ჯამი 180 გრადუსია, სინათლის სხივი სწორხაზოვნად ვრცელდება და ა.შ.;
- სამყარო შედგება დაახლოებით 4.9% ბარიონული მატერიისგან, რასაც ჩვენ ჩვეულებრივ მატერიას ვუწოდებთ; კიდევ 26.8% წარმოადგენს ცივ, სინათლის სიჩქარესთან შედარებით ბევრად ნელა მოძრავ, ფარულ მატერიას; სამყაროს სიმკვრივის დანარჩენი 68.3% წარმოადგენს ფარულ ენერგიას, რომლის ბუნების შესახებ, ფარულ მატერიასთან შედარებით, კიდევ უფრო ნაკლები ინფორმაცია მოგვეპოვება;

- სამყარო ძალზე ერთგვაროვანია – ანუ მასში მატერიისა და ენერგიის განაწილებას ახასიათებს მეტად მცირე ცვლილებები და თანაც, სამყაროში მატერიის სიმკვრივის საშუალო მნიშვნელობიდან გადახრები არაა დამოკიდებული დაკვირვების არის ზომაზე;
- სამყაროში მატერიისა და ენერგიის განაწილება იზოტროპულია, ანუ არ დაიკვირვება გამორჩეული მიმართულებები;
- სამყაროში სიმკვრივე მეტად ახლოსაა გარკვეულ კრიტიკულ მნიშვნელობასთან, რომელიც შეესაბამება სამყაროში საკმარისი მატერიის არსებობას, რათა გრავიტაციულმა ძალებმა საბოლოოდ მოახერხონ სამყაროს გაფართოების შეჩერება, თუნდაც ამისთვის „უსასრულოდ“ დიდი დრო იყოს საჭირო. კრიტიკული სიმკვრივე სამყაროს ალტერნატიული განვითარების განმსაზღვრელ სიმკვრივეთა არეებს გამოაცალკევებს: სიმკვრივის მეტი მნიშვნელობებისთვის სამყარო „ჩაკეტილია“, ანუ საბოლოოდ კოლაფსამდე მივა; სიმკვრივის ნაკლები მნიშვნელობებისთვის სამყარო „ღიაა“, ანუ უსასრულოდ გაფართოვდება.

### CMB-ის თვისებები

CMB-ის ერთ-ერთი დამახასიათებელი ნიშანია ის, რომ მისი სპექტრი, ძალიან მაღალი სიზუსტით, შეესაბამება ე.წ. „შავი სხეულის“ გამოსხივების ტალღის სიგრძეთა სპექტრს.



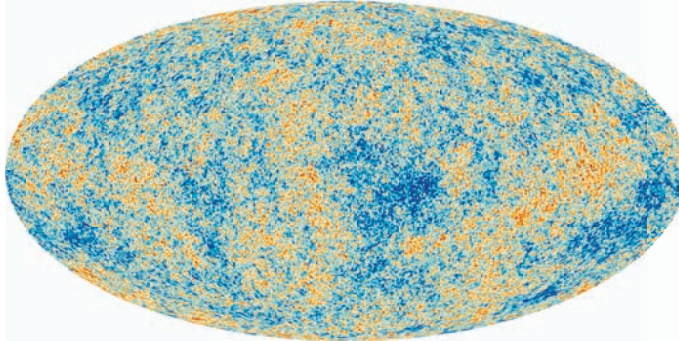
სურ. 78 კოსმოსური მიკროტალღური ფონის (CMB) სპექტრი

© FIRAS

შავი სხეულის სპექტრი ცალსახად განისაზღვრება მისი ტემპერატურით. ამ გარემოებაზე დაყრდნობით განსაზღვრულ იქნა CMB-ის საშუალო ტემპერატურა, რომელიც უდრის  $2.7250 \pm 0.0002$  K. 78-ე სურათზე მოყვანილია CMB-ის ტალღის სიგრძეთა განაწილება. ცნობისთვის გვინდა აღვნიშნოთ, რომ არც დედამიწაზე და არც კოსმოსში არ არსებობს ობიექტი, რომლის გამოსხივება ესოდენ კარგად ემთხვეოდეს შავი სხეულის გამოსხივებას. აღსანიშნავია, აგრეთვე, რომ სწორედ ასეთი განსაკუთრებული სპექტრის გამო, შედარებით გამარტივებულია ცის მოცემულ არეში დაკვირვებების შედეგად მიღებული სრული გამოსხივებიდან CMB-ის გამოყოფა.

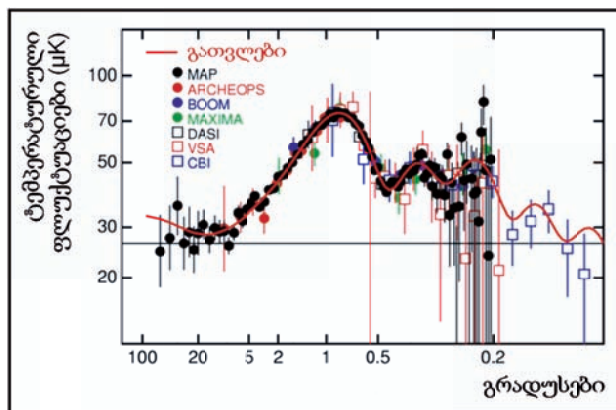
CMB-ის მეორე თვისება მდგომარეობს მის ერთგვაროვნებაში. სივრცის სხვადასხვა არეში გაზომილი CMB-ის ტემპერატურის საშუალო ფლუქტუაციები  $1.8 \times 10^{-5}$  K

შეადგენს. 79-ე სურათზე მოყვანილია CMB-ის რუკა, რომელიც შედგენილია თანამგზავრ Planck-ის მიერ მიკროტალღურ დიაპაზონში მიღებულ მონაცემებზე დაყრდნობით. მუქი იისფერი არეები შეესაბამება ფონის ყველაზე ცივ ადგილებს (2.7248 K), ხოლო წითელი – ყველაზე ცხელს (2.7252 K). აღსანიშნავია, რომ ამ არაერთგვაროვნებებმა, მათი სიმცირის მიუხედავად, გადამწყვეტი როლი ითამაშა სამყაროს განვითარებისა და მასში მსხვილმასშტაბიანი სტრუქტურების (ვარსკვლავების, გალაქტიკების, გალაქტიკების გროვებისა და სხვ.) გაჩენის შესახებ თანამედროვე წარმოდგენების ჩამოყალიბებაში.



სურ. 79 კოსმოსური მიკროტალღური ფონის (CMB) ფლუქტუაციების რუკა  
© ESA/Planck

79-ე სურათზე გამოსახული ფერადი რუკის მიღმა კოლოსალური ინფორმაცია იმალება. CMB-ის ექსპერიმენტული მონაცემების დამუშავებისას იყენებენ რთულ მათემატიკურ მეთოდს, რომელსაც სპექტრის სფერულ ჰარმონიკებად დაშლა ეწოდება. ცაზე ირჩევენ გარკვეული ზომის არეს, ფანჯარას, რომელიც გრადუსებით იზომება. ამ ფანჯრის ზომის ბიჯით შემოუვლიან მთელ ცას და თითოეულ ფანჯარაში საშუალო ტემპერატურასა და საშუალო ტემპერატურიდან გადახრას ადგენენ. შემდეგ ცვლიან ფანჯრის (ბიჯის) ზომას და იმეორებენ პროცედურას. ამრიგად, ტემპერატურული ფლუქტუაციების შესახებ გროვდება ინფორმაცია, რომელიც მოიცავს ყველა ზომის ფანჯარას, დაწყებული ყველაზე დიდით (მთელი ცა) და დამთავრებული ყველაზე მცირეთი (რომელიც აპარატურის გარჩევისუნარიანობაზეა დამოკიდებული).



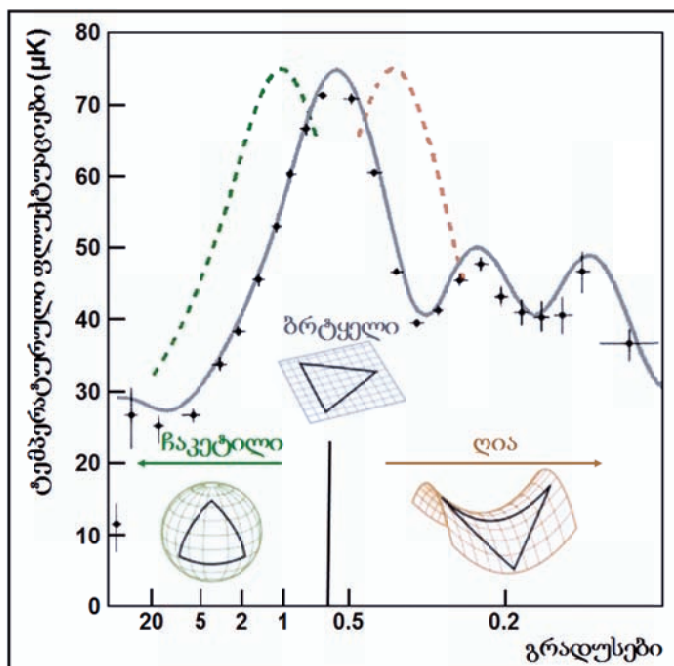
სურ. 80 CMB-ის ფლუქტუაციების სპექტრი  
© Edward L. Wright

მე-80 სურათზე ნაჩვენებია CMB-ის ფლუქტუაციების სპექტრი, რომელიც მიღებულია სურათის მარცხენა ზედა კუთხეში ჩამოთვლილი სხვადასხვა დანადგარის ექსპერიმენტული მონაცემების დამუშავების შედეგად.

ყურადღება მივაქციოთ იმ გარემოებას, თუ როგორი რთულია ტემპერატურული ფლუქტუაციების დამოკიდებულება გასაზომი არის ზომაზე. ზოგიერთი ზომის ფანჯრისთვის ტემპერატურის საშუალოდან გადახრა მაქსიმუმს აღწევს. შესაბამისად, გრაფიკზე დაიმზირება პიკები და ჩაღრმავებები. სხვადასხვა დანადგარზე მიღებული მრუდები კარგად ეთანხმება ერთმანეთს, ისევე როგორც სტანდარტულ კოსმოლოგიურ მოდელზე დამყარებულ თეორიულ გამოთვლებს (წითელი მრუდი).

### CMB-ის მონაცემების ინტერპრეტაცია

რელიქტური ფონის ტემპერატურული ფლუქტუაციების სპექტრის ყოველი პიკი გარკვეულ ინფორმაციას იძლევა სამყაროს თვისებების და მასში მატერიის განაწილების შესახებ. 81-ე სურათზე გამოსახულია სპექტრის პირველი პიკის გათვლილი მდებარეობა სფერული, ბრტყელი და უნაგირისმაგვარი სივრცისთვის. სურათიდან ცხადად ჩანს, რომ პირველი პიკის დაკვირვებით მიღებული მდებარეობა (შავი ექსპერიმენტული წერტილები) ბრტყელ სამყაროს შეესაბამება.



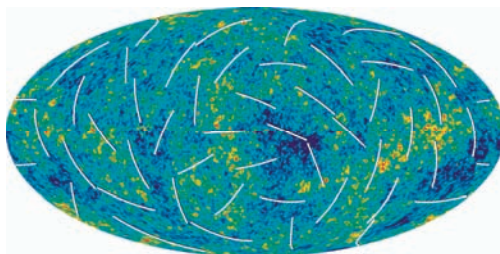
სურ. 81 CMB-ის ფლუქტუაციების სპექტრი და სამყაროს გეომეტრიის მოდელები  
© S. Nadis, Sky & Telescope

მეორე და პირველი პიკების სიმაღლეთა ფარდობით განისაზღვრება ბარიონული მატერიის სიმკვრივე, რომელიც სრული სიმკვრივის დაახლოებით 5% შეადგენს. მესამე პიკის სიმაღლის საშუალებით ადგენენ ფარული მატერიის რაოდენობას: დაახლოებით 27%. სამყაროს შემადგენელი „სუბსტანციის“ დარჩენილ 68%-ს მიაკუთვნებენ ჯერჯერობით იდუმალებით მოცულ ფარულ ენერგიას.

## CMB-ის პოლარიზაცია

კოსმოსურ მიკროტალღურ ფონში არსებობს არეები, სადაც ფოტონების რხევის სიბრტყეებს გამორჩეული ორიენტაცია, ე.წ. პოლარიზაცია გააჩნია. CMB-ის ტემპერატურული ფლუქტუაციების რუკაზე, რომელიც 82-ე სურათზეა მოყვანილი, თეთრი ხაზებით აღნიშნულია რელიქტური ფონის პოლარიზაციის მიმართულებები.

პოლარიზაცია, ნაწილობრივ, პირველი ვარსკვლავების გაჩენის შედეგად სამყაროს ხელმეორე იონიზაციით (ანუ რეიონიზაციით) არის განპირობებული. CMB-ის ეს თვისება პირველად WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) თანამგზავრის მიერ იქნა აღმოჩენილი, რამაც კოსმოლოგებს პირველი ვარსკვლავების გაჩენის დროის შეფასების საშუალება მისცა: პირველი ვარსკვლავები დიდი აფეთქებიდან 200 მილიონი წლის შემდეგ „აინთო“.



სურ. 82 კოსმოსური რელიქტური ფონის პოლარიზაცია

© NASA/WMAP

გარდა ამისა, უნდა არსებობდეს უფრო ადრეული, დიდი აფეთქების დროს გაჩენილი გრავიტაციული ტალღებით გამოწვეული პოლარიზაციაც. თანამგზავრ WMAP-ის მონაცემების საშუალებით ასეთი პოლარიზაციის მხოლოდ ზედა ზღვარის დადგენა მოხერხდა. იმედოვნებენ, რომ პირველადი გრავიტაციული ტალღების ანაბეჭდი აღმოჩენილი იქნება WMAP-ის მემკვიდრის – Planck-ის მეშვეობით. ამ თანამგზავრის პირველი ფიზიკური მონაცემები 2013 წელს გამოქვეყნდა.\*

## CMB-ის გამოზომი აპარატურა

ცხადია, რომ სამყაროს ფუნდამენტური თვისებების დადგენის მიზნით მოპოვებული ექსპერიმენტული მონაცემები მოითხოვს მრავალჯერად შემოწმებას, დაზუსტებასა და დადასტურებას. ამიტომ მიკროტალღური ფონის შესასწავლად მრავალ სხვადასხვა ხელსაწყოს იყენებენ. ჩვენ მხოლოდ რამდენიმეს ჩამოვთვლით. განთავსების ადგილის მიხედვით მათი დაყოფა სამ კლასადაა შესაძლებელი:

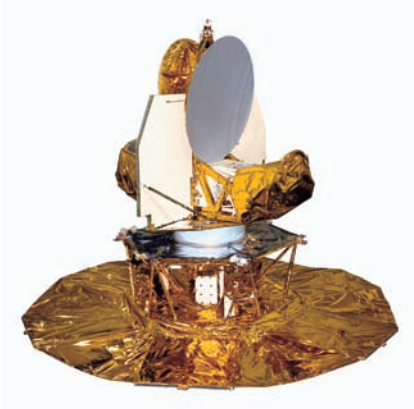
- თანამგზავრები: COBE, WMAP, Planck;
- აეროსტატები: BOOMERanG, MAXIMA, ARGON;
- სტაციონარული: CBI.

\* 2014 წლის 17 მარტს სამხრეთ პოლუსთან განლაგებული BICEP2 (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization) ექსპერიმენტის თანამშრომლობამ საჯაროდ განაცხადა მიკროტალღურ ფონში პირველადი გრავიტაციული ტალღებით გამოწვეული პოლარიზაციის აღმოჩენის შესახებ. სამეცნიერო სკეპტიციზმის ფონზე, ამჟამად მიმდინარეობს ექსპერიმენტული მონაცემების გადამოწმება, რათა დამზერილი გამოსხივებიდან გამოირიცხოს ვარსკვლავთშორისი სივრცის მტვერის ზეგავლენა. BICEP2-სა და Planck-ის კოლაბორაციები მჭიდროდ თანამშრომლობენ მონაცემების სიზუსტის გასაუმჯობესებლად.



უფრო დეტალურად გვინდა განვიხილოთ NASA-ს კოსმოსური ობსერვატორია WMAP, რომელიც გამოსახულია 83-ე სურათზე. WMAP კოსმოსში გაშვებული იქნა 2001 წლის 30 ივნისს კანავერალის კონცხიდან რაკეტით Delta II.

WMAP-ის ამოცანა იყო მთლიანი ცის CMB-ის ტემპერატურული რუკის შედგენა. ხელსაწყოს მიერ ტემპერატურის გაზომვის სიზუსტე არის  $20 \mu\text{K}$ , კუთხური გარჩევისუნარიანობა –  $0.3^\circ$ , ხოლო სისტემატური ცდომილებების დონე –  $5 \mu\text{K}$ . ასეთი სიზუსტის მისაღწევად WMAP იყენებს გაზომვის დიფერენციალურ მეთოდს: ტელესკოპების წყვილი, ათი დიფერენციალური მიმღების საშუალებით, აფიქსირებს ცის ორი, ერთმანეთისგან  $140$  გრადუსით დაშორებული არის მიკროტალღურ გამოსხივებას. მიმღებები ტელესკოპების ოპტიკური სისტემის უკან არის განლაგებული. დიდი რადიატორები, რომლებსაც „სპილოს ყურებს“ უწოდებენ, უზრუნველყოფს მიმღებებისა და გამამღიერებლების გაცივებას (CMB-ის მიმღები ანტენა ძალზე ცივი უნდა იყოს). თევზის ფორმის მქონე ქვედა ეკრანი კი დანადგარს იცავს მზისა და დედამიწის მძლავრი მიკროტალღური გამოსხივებისგან.



სურ. 83 კოსმოსური ობსერვატორია WMAP  
© NASA/WMAP

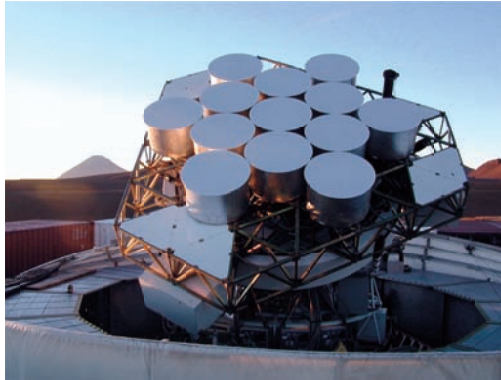
2009 წლის ივლისში ESA-ს მიერ ორბიტაზე გაყვანილია ახალი კოსმოსური ობსერვატორია Planck-ი, რომელზეც WMAP-ის ანალოგიური ხელსაწყოებია განლაგებული, ოღონდ მათ გაზომვათა გაორმაგებული სიზუსტე გააჩნიათ. სწორედ ამ თანამგზავრის საშუალებითაა მიღებული CMB-ს შესახებ უკანასკნელი, ყველაზე ზუსტი მონაცემები.

რამდენიმე სიტყვა დედამიწის ზედაპირზე განთავსებული ხელსაწყოების შესახებ. ერთის მხრივ, კოსმოსურ თანამგზავრებთან შედარებით, სტაციონარული ობსერვატორიები არაა შეზღუდული აპარატურის წონის მხრივ. მაგრამ ატმოსფეროს მდგომარეობა, განსაკუთრებით მისი ტენიანობა, მნიშვნელოვნად აქვეითებს გამოსახულების სიმკვეთრეს. ამიტომ CMB-ის შემსწავლელი სტაციონარული ობსერვატორიები შენდება ხელოვნური რადიოწყაროებიდან მოშორებით და ძალიან მშრალი კლიმატის მქონე ადგილებში. ზუსტად ასეთ ადგილებს განეკუთვნება დედამიწის სამხრეთ პოლუსი და ჩილეს ანდეზი.

რელიქტური ფონის ტემპერატურული ფლუქტუაციების სპექტრი მცირე კუთხეებისთვის (სურ. 80) გაზომილი იქნა სტაციონარული ტელესკოპით CBI (Cosmic Background Imager). CBI განთავსებულია ჩილეს ანდეზში მდებარე ატამაკას პლატოზე,

5 080 მ სიმაღლეზე (სურ. 84). იგი წარმოადგენს 13 ელემენტისგან შედგენილ რადიოინტერფერომეტრს.

CBI-ის საშუალებით მიღებული მონაცემების დამუშავების სპეციალური მეთოდი  $0.1^\circ$  გარჩევისუნარიანობის მიღწევის საშუალებას იძლევა. გავიხსენოთ, რომ WMAP სამჯერ უფრო უხეშია ( $0.3^\circ$ ). სწორედ მცირე კუთხეების გაზომვა წარმოადგენს CBI-ის კვლევების ძირითად მიზანს.



სურ. 84 ჩილეს ანდეზში განთავსებული რადიოტელესკოპი CBI  
© California Institute of Technology

#### 4.4 სამყაროს ინფლაციური გაფართოების მოდელი

მიკროტალღური რელიქტური ფონის შესწავლის საფუძველზე გამოტანილი დასკვნები მრავალ კითხვას ბადებს. რამ განაპირობა სამყაროს ბრტყელი გეომეტრია? მართლაც, თითქოსდა სამყაროს სივრცისთვის მრავალი სხვადასხვა არჩევანი უნდა არსებულებოდა, მისი სიმრუდე კი დიდი სიზუსტით ნულის ტოლი აღმოჩნდა. ასევე საოცარია რელიქტური ფონის სითბური წონასწორობა. როგორ მოხდა, რომ სამყაროს „კიდით კიდემდე“ რელიქტურ ფონს ერთნაირი ტემპერატურა გააჩნია? ამ საკითხებს უკავშირდება ე.წ. სამყაროს ჰორიზონტის პრობლემა.

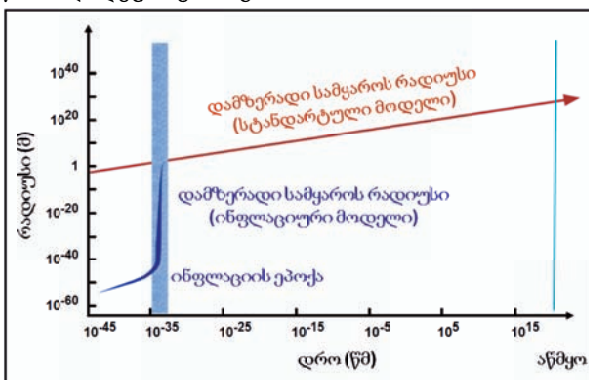
დიდი აფეთქებიდან, რომელიც სამყაროს საწყისს წარმოადგენს, გასულია 13.8 მილიარდი წელი. შესაბამისად, შორეული ობიექტები, რომელთა „დანახვა“ დედამიწიდანაა შესაძლებელი, თითქოსდა, უნდა მდებარეობდნენ არაუმეტეს 13.8 მილიარდი სინათლის წელიწადის მანძილზე. ანუ დედამიწაზე მყოფ დამკვირვებელს უნდა ჰქონდეს ჰორიზონტი, რომლის იქით „გახედვა“ მას არ უნდა შეეძლოს.

წესით, ჰორიზონტი უნდა შემოსაზღვრავდეს არა მხოლოდ სინათლის, არამედ ნებისმიერი მატერიის არეალს, რადგან მატერიასაც არ ძალუძს განავითაროს სინათლის სიჩქარეზე მეტი სიჩქარე. ამ ლოგიკით ჰორიზონტს იქით ციური ობიექტები არ უნდა არსებობდეს. ეს დასკვნა დამაჯერებელ შთაბეჭდილებას ტოვებს, თუმცა მისგან მაინც თავი უნდა შევიკავოთ. სამყაროს ჰორიზონტის შესახებ მომდევნო პარაგრაფში ვისაუბრებთ. ახლა კი აღვნიშნავთ, რომ დღეს ჰორიზონტის მიღმა მატერიის არსებობის ან არარსებობის შემოწმება პრინციპულად შეუძლებელია: თუ კი ჰორიზონტს მიღმა რაიმე არსებობს, ჩვენსა და მას შორის კავშირი არ დამყარებულა.

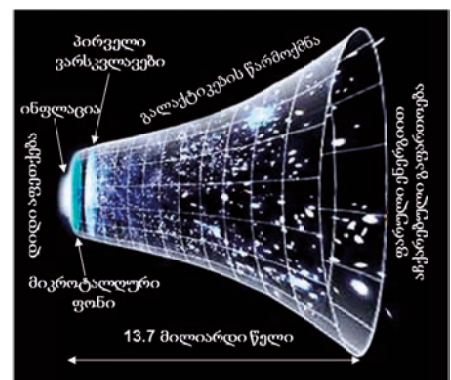
წარმოვიდგინოთ ორი შორეული გალაქტიკა, რომელიც ჩვენგან ურთიერთსაწინააღმდეგო მიმართულებითაა განლაგებული და ორივე ჩვენგან 13 მილიარდი სინათლის წელიწადითაა დაშორებული. მათ შორის მანძილი 26 მილიარდი

სინათლის წელიწადია. სამყაროს არსებობის დროის განმავლობაში ვერც ამ ობიექტს შორის ვერ დამყარდებოდა კავშირი, ვინაიდან ინფორმაციის გადატანა, ან რომელიმე ფიზიკური პროცესის განვითარება, შეუძლებელია სინათლის გავრცელებაზე სწრაფად. მიუხედავად ამისა, შორეული გალაქტიკები წარმოუდგენლად მსგავსია, ისევე როგორც მიკროტალღური რელიქტური ფონის ტემპერატურაა არაჩვეულებრივად თანაბარი.

ძნელი წარმოსადგენია, რომ დიდი აფეთქების ბოზოქარ პირობებში წარმოიქმნა ძალზე ერთგვაროვანი გაწონასწორებული სამყარო, რომელმაც შემდგომი გაფართოების განმავლობაში შეინარჩუნა თავისი პირვანდელი თვისებები. თეორია, რომელიც სამყაროს ასეთ წარმოშობასა და განვითარებას აღწერს, ალბათ, ნაკლებ დამაჯერებელია. მიკროტალღური რელიქტური ფონის თვისებების შესწავლის შემდეგ, დიდი აფეთქების საწყისი მოდელი, რომელიც წინა საუკუნის სამოცდაათიანი წლების დასაწყისში ჩამოყალიბდა, დამაკმაყოფილებლად აღარ გამოიყურებოდა, სწორედ ასეთი წინააღმდეგობების გამო.



სურ. 85 დიდი აფეთქების სტანდარტული და ინფლაციური მოდელები



სურ. 86 სამყაროს განვითარება

1980-იან წლებში შემოთავაზებული იქნა სამყაროს განვითარების ინფლაციური მოდელი. ამ მოდელის თანახმად, სამყაროს „ისტორია“ მისი გაჩენიდან დღემდე, ასეთია:

- სამყაროს „მყისიერი“ წარმოქმნისას მთელი მატერია „სივრცის ერთ წერტილში“ იყო თავმოყრილი. ასეთი მდგომარეობა კოსმოლოგიურ ენაზე აღიწერება ე.წ. სინგულარობის ცნებით. იგი შეესაბამება სივრცე-დროის ერთ წერტილში თავმოყრილი მატერიის უსასრულო რაოდენობას.
- დიდი აფეთქების შემდგომ საწყისი კვანტური მდგომარეობიდან სამყარო განუწყვეტელივ ფართოვდებოდა და ამჟამადც აგრძელებს გაფართოებას.
- დიდი აფეთქებიდან  $10^{-36}$  წამიდან  $10^{-32}$  წამამდე დროის ინტერვალში სამყარომ განიცადა განსაკუთრებით სწრაფი, ექსპონენტური ტემპით მიმდინარე გაფართოება, რომელსაც ინფლაციას უწოდებენ. ინფლაციის დაწყებამდე სამყარო შედგებოდა უამრავი რეგიონისგან, რომლებსაც მიზეზ-შედეგობრივი კავშირები არ აერთიანებდა. სამყარო არ უნდა ყოფილიყო არც სითბური წონასწორობის მდგომარეობაში და არც ერთგვაროვანი. ინფლაციის მცირე დროის განმავლობაში სამყაროს ზომები გაიზარდა  $10^{50}$ -ჯერ, ზოგიერთი თეორიული მოდელის მიხედვით კი უფრო მეტადაც. ხილული სამყარო საწყისს იღებს ინფლაციის ეპოქამდე არსებული ერთ-ერთი რეგიონიდან, რომელიც საკმარისად მცირე იყო, რათა მის საზღვრებში მიზეზ-შედეგობრივი კავშირები

დამყარებულიყო – ამიტომაა ხილული სამყარო ესოდენ ერთგვაროვანი. საწყისი რეგიონი რაც არ უნდა გამრუდებული ყოფილიყო, ინფლაციური გაფართოების განმავლობაში მისი სიმრუდე პრაქტიკულად გაუჩინარდებოდა – სწორედ ამიტომაა ხილული სამყარო ბრტყელი.

ინფლაციური ეპოქის დასასრულის შემდეგ, სამყაროს განვითარება კარგად აღიწერება დიდი აფეთქების სტანდარტული მოდელით:

- დიდი აფეთქებიდან 100 000 წლის შემდეგ მთელი სამყარო წარმოადგენდა წყალბადისა და ჰელიუმის იონებისგან და ელექტრონებისგან შემდგარ თითქმის ერთგვაროვან პლაზმას.
- 300 000 წლის შემდეგ სამყაროს ტემპერატურა 4 500 K დაეცა, რამაც იონებისა და ელექტრონების გაერთიანება გამოიწვია წყალბადის, დეიტერიუმისა და ჰელიუმის ნეიტრალურ ატომებად. მატერიას გამოსხივება გამოეყო და სამყარო გამჭვირვალე გახდა.
- 200 000 მილიონი წლის შემდეგ გაჩნდა პირველი ვარსკვლავები, მოგვიანებით კი, ვარსკვლავების მეორე თაობა, გალაქტიკები და გალაქტიკების გროვები.
- სამყაროს გაფართოება გრძელდებოდა. გაფართოებასთან ერთად ეცემოდა ტემპერატურა. დიდი აფეთქებიდან 300 000 წლის შემდეგ გაჩენილი გამოსხივება ამჟამად, 13.8 მილიარდი წლის შემდეგ, გვევლინება როგორც მიკროტალღური რელიქტური ფონი, რომლის ტემპერატურა 2.7 K შეადგენს.

სამყაროს ექსპონენტური ტემპით გაფართოებას მეცნიერები უკავშირებენ ე.წ. „ინფლაციურ“ ველს, რომელიც მიეკუთვნება „სკალარული“ სახის ველებს. სკალარული ველების არსებობას წინასწარმეტყველებს თეორიული ფიზიკის სხვადასხვა განხრები. მაგალითისთვის შეგვიძლია მოვიყვანოთ ჰიგსის ბოზონი – ნაწილაკი, რომელიც გარკვეული სახის სკალარული ველის გამოვლინებაა და რომლის შესწავლა დიდ ადრონულ კოლაიდერზე წარმოებული ექსპერიმენტების ერთ-ერთი მთავარი ამოცანაა. სკალარული ველების გამორჩეული თვისება არის სივრცის გაფართოების დროს მათი ენერგიის სიმკვრივის შედარებით ნელი ტემპით შემცირება. სწორედ ამ თვისების გამო უნდა მოეხერხებინა ინფლაციურ ველს სამყაროს გაფართოების ექსპონენტური ზრდის ტემპის შენარჩუნება.

მაშასადამე, სამყაროს ინფლაციური მოდელი ხსნის როგორც ერთგვაროვნების, ასევე ბრტყელი სივრცის თვისებებს. დამოუკიდებლად იმისა, თუ რაოდენ არაერთგვაროვანი სამყარო აღმოცენდა დიდი აფეთქების წიაღიდან, რამდენად რთული იყო მისი სივრცის საწყისი გეომეტრია, ექსპონენტური გაფართოების ეპოქის შემდეგ იგი იმდენად „გაიჭიმა“, რომ ჩვენთვის ხილული სამყაროს ნაწილი პრაქტიკულად ერთგვაროვანი და ბრტყელი აღმოჩნდა. გავიხსენოთ, რაოდენ გლუვი ხდება ბუშტის ზედაპირი გაბერვის შემდეგ და წარმოვიდგინოთ, რომ ასეთ ბუშტზე მცოცავ ჭიანჭველას მისთვის ხილული არე ნამდვილად ბრტყელად მოეჩვენება.

## 4.5 სამყაროს ჰორიზონტი

წინა პარაგრაფში ჩვენ ვახსენეთ სამყაროს ჰორიზონტის პრობლემა – სამყაროს დაშორებულ რეგიონებს, რომლებიც წარსულშიც არ უნდა ყოფილიყვნენ ერთმანეთთან მიზეზ-შედეგობრივ კავშირში, გააჩნიათ თითქმის იდენტური ტემპერატურა და სხვა ფიზიკური მახასიათებლები. როგორც აღვნიშნეთ, სამყაროს ინფლაციური გაფართოების მოდელის შემოღებით ეს პრობლემა იხსნება.

მიზეზობრივი ჰორიზონტის გარდა არსებობს ე.წ. ნაწილაკების ჰორიზონტი. იგი შემოსაზღვრავს სამყაროს იმ არეს, რომლის ფარგლებში არსებული ობიექტებიდან წამოსული გამოსხივების დაფიქსირების პრინციპული შესაძლებლობა გაგვაჩნია – მხოლოდ და მხოლოდ იმიტომ, რომ სამყაროს დასაბამიდან, უფრო ზუსტად კი მისი გაფართოების დასაწყისიდან, ამ გამოსხივებამ ჩვენამდე მოაღწია. სწორედ ამიტომ, ნაწილაკების ჰორიზონტით შემოსაზღვრულ არეს დაკვირვებად სამყაროს უწოდებენ. იზოტროპული სამყაროს პირობებში, ნაწილაკების ჰორიზონტი სფერული ზედაპირია, საიდანაც გამოსხივებულ სინათლეს შეუძლია მოაღწიოს ცენტრში მყოფ დამკვირვებლამდე სამყაროს ასაკის ტოლი დროის განმავლობაში (13.8 მილიარდი წელიწადი). დამკვირვებლებს სხვადასხვა გალაქტიკებში, თუკი ასეთები არსებობენ, უნდა ჰქონდეთ საკუთარი, განსხვავებული დაკვირვებადი სამყაროები. ცხადია, რომ ამრიგად განსაზღვრული დაკვირვებადი სამყარო ჟამთასვლასთან ერთად მუდმივად იზრდება.

სინათლის სიჩქარის სასრულობის გამო, რაც უფრო შორეულია რაიმე ობიექტი, მით უფრო „ახალგაზრდას“ ვხედავთ მას. ამრიგად, მთლიანი დაკვირვებადი სამყარო შემოსაზღვრულია სამყაროს ასაკით. პრინციპში შეგვეძლო ყველა მიმართულებით დიდი აფეთქების „წერტილი“ კი დაგვენახა. თუმცა საწყის მომენტში სამყარო პლაზმურ (გაუმჟღავნებელ) მდგომარეობაში იმყოფებოდა. რეალურად შეგვიძლია დიდი აფეთქებიდან მხოლოდ 300 ათასი წლის შემდეგ, რეკომბინაციის ეპოქის დროს წარმოშობილი სინათლის რეგისტრაცია CMB-ს ფოტონების სახით. WMAP-ის მონაცემები ამ ფოტონების წითელი წანაცვლებისთვის  $z$  დაახლოებით 1091 მნიშვნელობას იძლევა. ანუ ნაწილაკები, რომლებმაც ეს ფოტონები გამოასხივეს, ჩვენგან ამჟამად დაახლოებით 42 მილიარდი სინათლის წელიწადით უნდა იყვნენ დაშორებული, მაშინ როცა მთლიანი დაკვირვებადი სამყაროს რადიუსი 46-47 მილიარდი სინათლის წელიწადად არის შეფასებული ( $4.3 \times 10^{23}$  კმ).

გაგახსენებთ, რომ სამყაროს ასაკი „სულ რაღაც“ 13.8 მილიარდი წელია. ამ დროში სინათლეს მხოლოდ  $1.3 \times 10^{23}$  კმ ტოლი მანძილის დაფარვა შეეძლო. ეს თითქოსდა პარადოქსი იმით იხსნება, რომ სამყარო ფართოვდება. ანუ ხილული სამყაროს რადიუსი 13.8 მილიარდი სინათლის წელიწადი იქნებოდა მხოლოდ სტატიკური სამყაროს შემთხვევაში.

დროთა განმავლობაში, როცა სამყაროს სულ უფრო შორეული არეებიდან წამოსული სინათლე ჩვენამდე მოაღწევს, შესაძლოა, ახალი ობიექტები გახდნენ დაკვირვებადი სამყაროს ნაწილი. თუმცა, ვინაიდან სამყაროს მოცულობა ერთიანად „იწელება“, შესაძლოა, ადგილი ჰქონდეს უკუ პროცესს: არსებობდეს არეები, საიდანაც ამჟამად გამოსხივებული სინათლე ჩვენამდე ვერასდროს მოაღწევს. ამას კი ისევ მიზეზობრივი ჰორიზონტის არსებობასთან მივყავართ. მაგალითად, სამყაროს თანაბარი, რა გინდ მცირე სიჩქარით გაფართოების შემთხვევაში აუცილებლად იარსებებს გარკვეული მანძილით დაშორებული არე, რომელიც დამკვირვებელს სინათლის სიჩქარით სცილდება. ამ მტკიცების საილუსტრაციოდ წარმოიდგინეთ, რა მოსდის საჰაერო ბუმტის ზედაპირზე მონიშნულ წერტილებს ბუმტის თანაბარი გაბერვისას. ყოველი წერტილი თავის მეზობელ წერტილებს მცირე სიჩქარით სცილდება. თუმცა რომელიმე მოცემული არიდან შორს მყოფი წერტილების „გაქცევის“ სიჩქარე მით უფრო დიდია, რამდენადაც დიდია მათ შორის მანძილი. საკმარისად დიდი ბუმტის შემთხვევაში



შორეული წერტილების დაშორების სიჩქარემ შეიძლება სინათლის სიჩქარესაც კი გადააჭარბოს.

ხაზი გვინდა გავუსვათ, რომ მიზეზობრივი ჰორიზონტი განსხვავდება ნაწილაკების ჰორიზონტისაგან. მიზეზობრივი ჰორიზონტი არის ის სფერული ზედაპირი, რომლის მიღმა ამჟამად გამოსხივებული სინათლე ჩვენამდე ვერასდროს მოაღწევს სამყაროს გაფართოების გამო. მიზეზობრივი ჰორიზონტი ემთხვევა ე.წ. ჰაბლის სფეროს ( $c/H$ ) და დღეისთვის დაახლოებით 13.9 მილიარდ სინათლის წელიწადად არის შეფასებული.

თანამედროვე კოსმოლოგიური მოდელის მიხედვით, მიზეზობრივი ჰორიზონტი ხილული სამყაროს შიგნითაა მოქცეული: არსებობენ ობიექტები მიზეზობრივი ჰორიზონტის მიღმა, მაგრამ ნაწილაკების ჰორიზონტის შიგნით. მაგალითად, ითვლება, რომ შორეული კვაზარებიდან წარსულში გამოსხივებულ სინათლეს ჩვენ ახლა ვხედავთ, მაგრამ მათ მიერ ამჟამად გამოსხივებული ფოტონები დედამიწამდე ვერასდროს მოაღწევნ. შესაბამისად, დროთა განმავლობაში ასეთი ობიექტები გავა ჩვენი ხედვის არიდან. თუ ამჟამინდელი აჩქარებული გაფართოება საკმარისად დიდხანს გაგრძელდა, შესაძლოა მომავლის დამკვირვებლისთვის მთელი ხილული სამყარო მხოლოდ ჩვენი გალაქტიკის ვარსკვლავებით იყოს შემოფარგლული.

#### **4.6 მსხვილმასშტაბიანი არაერთგვაროვნებები**

ინფლაციურმა გაფართოებამ სამყარო ერთგვაროვანი კი გახადა, მაგრამ ეს ერთგვაროვნება არ იყო „სრულყოფილი“ (ისევე როგორც გაბერილი ბუშტის ზედაპირი არ არის აბსოლუტურად გლუვი). კვანტური მექანიკის კანონების თანახმად, შემთხვევითი კვანტური ფლუქტუაციების გამო, ინფლაციური ველის სიმძლავრე ყველგან ერთნაირი არ უნდა ყოფილიყო. შედეგად, სამყაროს სხვადასხვა ადგილებში ინფლაცია მეტ-ნაკლებად ადრე დამთავრდა, რასაც ამ ადგილებში ტემპერატურების მეტ-ნაკლები სხვაობა მოჰყვა. მიკროტალღური რელიქტური ფონის მცირე არაერთგვაროვნებები (სურ. 79), რომლებიც სხვადასხვა ექსპერიმენტული დანადგარის საშუალებით იქნა აღმოჩენილი, სწორედ ტემპერატურათა ამ განსხვავებების გამოვლინებაა.

თითქმის ერთგვაროვან სამყაროში მატერიისა და ენერგიის სიმკვრივის თითქოს უმნიშვნელო სივრცულმა ფლუქტუაციებმა დასაბამი მისცა პირველი ვარსკვლავების წარმოქმნას. დროთა განმავლობაში არაერთგვაროვნებების სივრცული ზომები იზრდებოდა ძირითადად მასში არსებულ ფარულ მატერიაზე გრავიტაციული ძალების ზემოქმედების შედეგად. მზარდი სტრუქტურების მიერ დაიწყო ახლომდებარე მიდამოებიდან აირის გრავიტაციული მიზიდვა, რამაც პროცესი პირველი ვარსკვლავების გაჩენით დაავიროვინა. შემდგომში, გრავიტაციის სამყაროს დანარჩენ ურთიერთქმედებებთან ჭიდილმა შექმნა ლოკალური მსხვილმასშტაბიანი არაერთგვაროვნებები, როგორიცაა მეორე თაობის ვარსკვლავები, გალაქტიკები და გალაქტიკური გროვები.

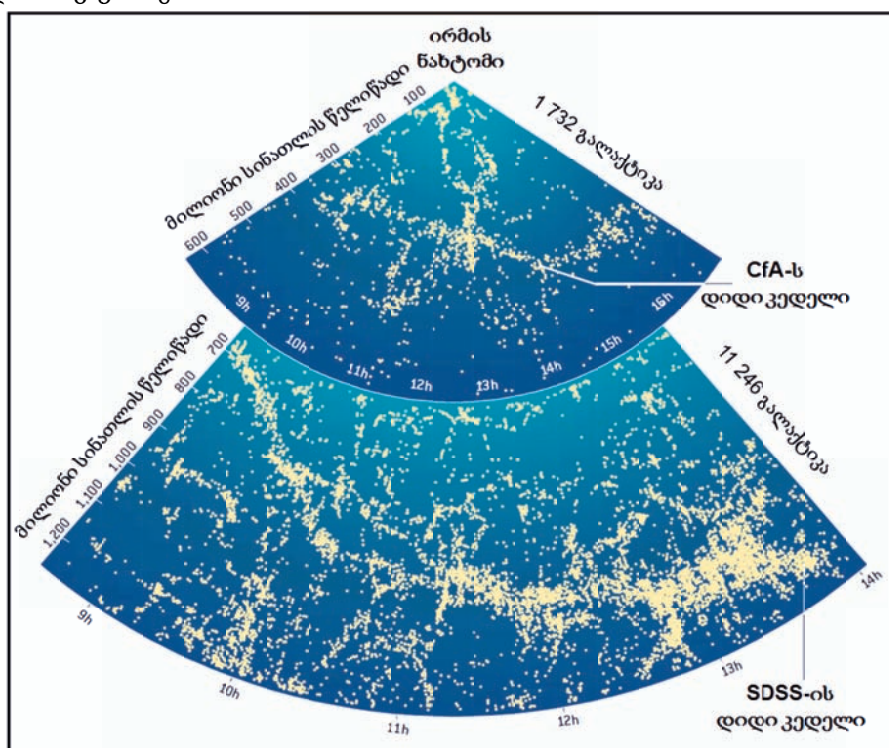
#### **კოსმოლოგიური პრინციპი**

ფარდობითობის ზოგადი თეორიის საშუალებით სამყაროს აღწერისას აინშტაინმა სიმარტივისთვის დაუშვა, რომ სამყარო არის ერთგვაროვანი (ანუ მატერია მასში თანაბრადაა განაწილებული) და იზოტროპული (ის ყველა მხარეს ერთნაირია, ანუ არ არსებობს რაიმე გამორჩეული მიმართულება). ამ დაშვებას აინშტაინმა კოსმოლოგიური პრინციპი უწოდა. კოსმოლოგიური პრინციპი ახლაც საფუძვლად უდევს ყველა

თანამედროვე კოსმოლოგიურ მოდელს. ცხადია, რომ მსხვილმასშტაბიანი ფლუქტუაციების შესწავლის ძირითადი მიზანია აინშტაინის ეს მოსაზრება ან დაამტკიცოს, ან უარყოს.

#### 4.7 სამყაროს სამგანზომილებიანი რუკა

ის, რასაც ჩვენ ცაზე ვხედავთ, არის ციური სფეროს ორგანზომილებიან ზედაპირზე მნათობების პროექცია. ხოლო იმისთვის, რომ შევადგინოთ სამყაროს სამგანზომილებიანი რუკა, საჭიროა თითოეულ ციურ ობიექტებამდე მანძილი ვიცოდეთ. ციურ სხეულებამდე მანძილის დადგენა შესაძლებელია ჰაბლის კანონით, რომელიც ობიექტის გამოსხივების სპექტრის წითელ წანაცვლებას ამ ობიექტამდე მანძილთან აკავშირებს.



სურ. 87 გალაქტიკების განაწილება დედამიწიდან დაშორების მიხედვით

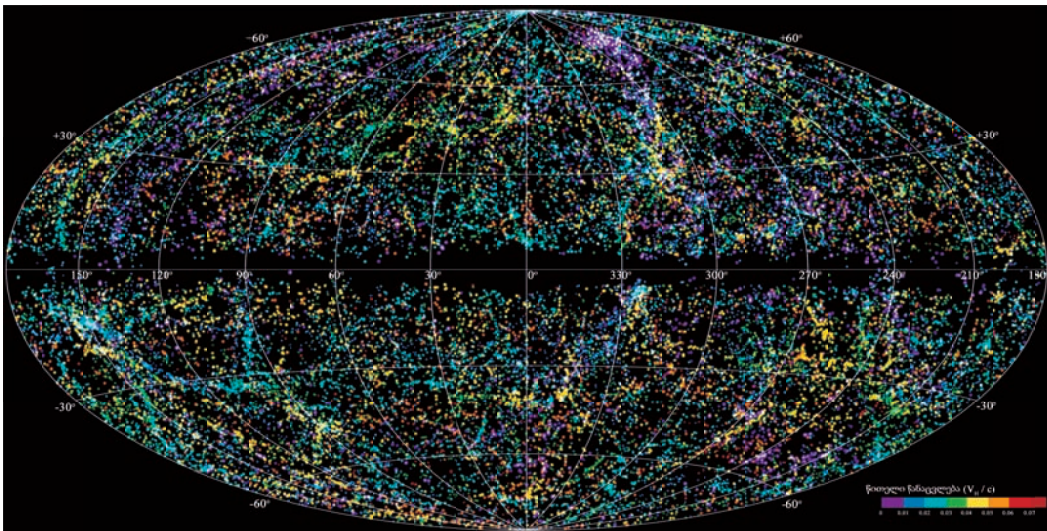
© Scientific American

გასული საუკუნის 70-იანი წლების ბოლოს ტელესკოპების კონსტრუქციამ და ციურმა სპექტროსკოპიამ ისეთ დონეს მიაღწია, რომ მოხერხდა სამყაროს პირველი სამგანზომილებიანი რუკის შედგენა. ხოლო 1986 წელს ჰარვარდის ასტროფიზიკურმა ცენტრმა CfA (Center for Astrophysics) გამოაქვეყნა 1100 გალაქტიკის შემცველი პირველი ასეთი რუკა, რომელმაც გალაქტიკური სტრუქტურების დიდი მრავალფეროვნება გამოავლინა. კერძოდ, აღმოჩენილი იქნა 0.7 მილიარდი სინათლის წელიწადის მანძილზე გადაჭიმული გალაქტიკების უზარმაზარი გროვა, ე.წ. „დიდი კედელი“ (სურ. 87). გალაქტიკების განაწილება იმდენად არაერთგვაროვანი ჩანდა, რომ რაღაც პერიოდში კოსმოლოგიური პრინციპის დარღვევასაც კი უშვებდნენ. CfA რუკამ მოიცვა

ჩვენს გარშემო 0.6 მილიარდი წელიწადის რადიუსის მქონე სფერო. სამყაროს სიღრმეებისკენ მისწრაფება გაგრძელდა ლას-კამპანას (ჩილე) 2.5 მეტრიანი ტელესკოპით, რომლის საშუალებით „დიდი კედელი“ ბოლომდე იქნა დანახული.

მეოცე საუკუნის ბოლოს აპაჩის ობსერვატორიის (ნიუ მექსიკო) ტელესკოპთან, ოპტიკურ დიაპაზონში, ამუშავდა დანადგარი SDSS (Sloan Digital Sky Survey – ალფრედ სლოუნის სახელობის ფონდის მიერ ორგანიზებული ცის ციფრული ზონდირება). ათი წლის კვლევის შემდეგ, 2011 წლისთვის, ამ ხელსაწყომ, მანამდე არნახული სიზუსტით, მოახდინა ციური სფეროს მესამედზე მეტის – 14 555 კვადრატული გრადუსის ზომის სივრცის შესწავლა (ციური სფეროს სრული ფართობი 41 253 კვადრატული გრადუსია). SDSS-ის მონაცემებით აღმოაჩინეს მეორე, უფრო გრძელი „დიდი კედელი“, რომელიც ჩვენგან 0.7-1.1 მილიარდი სინათლის წელიწადითაა დაშორებული (სურ. 87).

SDSS-ის პარალელურად და იგივე ამოცანებზე მუშაობს ინგლისურ-ავსტრალიური ტელესკოპი, რომლის მხედველობის არე ორი გრადუსია და ამ არეში მას ერთდროულად 400 ობიექტის სპექტრის შესწავლა შეუძლია. აქედან გამომდინარეობს ამ ხელსაწყოს სახელიც 2dFGRS. 2dFGRS-ის მონაცემებითაც შედგენილია ცის ატლასი, რომელიც 200 000-ზე მეტ გალაქტიკას მოიცავს (სურ. 74).



სურ. 88 ვარსკვლავების განაწილების რუკა ახლომდებარე სამყაროში

© T.H. Jarrett, IPAC/SSC

SDSS და 2dFGRS პროექტების ფარგლებში შესაძლებელია არაუმეტეს 1.2 მილიარდი სინათლის წელიწადის ზომის სივრცის დაკვირვება. უფრო შორეულ გალაქტიკებსა და კლასტერებს გააჩნია დიდი წითელი წანაცვლება, რომლის დაფიქსირება მხოლოდ ინფრაწითელ ან რენტგენის დიაპაზონშია შესაძლებელი. ორივე შემთხვევაში, შემოფოთებების გამოსარიცხად, აუცილებელია გაზომვების კოსმოსში ჩატარება.

დედამიწის ზედაპირზე ინფრაწითელ დიაპაზონში მომუშავე პროექტებიდან გვინდა აღვნიშნოთ Two-Micron All-Sky Survey (2MASS) Redshift Survey (2MRS), რომელიც მიზნად ისახავდა ირმის ნახტომისა და ახლომდებარე გალაქტიკების სამგანზომილებიანი რუკის შექმნას. ვინაიდან ასეთ მანძილებზე, გალაქტიკების გამოსხივების სპექტრის მაქსიმუმი დაახლოებით 1.6 მიკრომეტრია, გამოყენებული იქნა ვიფლის ობსერვატორიისა (არიზონა, აშშ) და ცერო ტოლელოს ობსერვატორიის (სერანა,

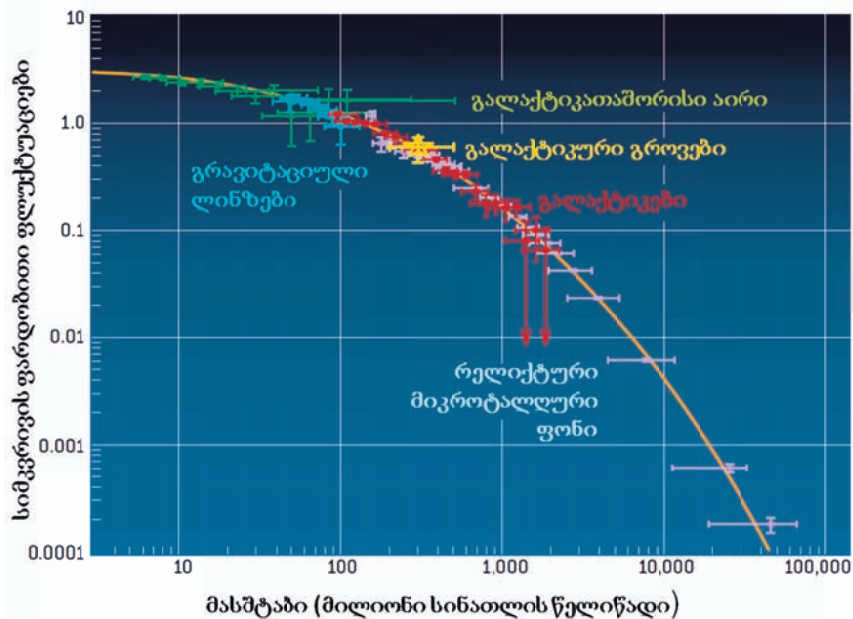


ჩილე) ტელესკოპები, რომლებიც ტალღის სიგრძეთა 1.25, 1.65 და 2.15 მკმ ზოლებში მუშაობენ. პროექტის სახელიც სწორედ მოქმედების 2 მკმ-იან დიაპაზონთანაა დაკავშირებული. ათი წლის განმავლობაში მოხერხდა ციური თაღის 95 %-ის შესწავლა. რადგან ინფრაწითელი სხივებისთვის კოსმოსური მტვერი გამჭვირვალეა, დამზერილ იქნა ისეთი ობიექტები, რომლებიც არ ჩანდნენ ოპტიკურ დიაპაზონში. წითელი წანაცვლების საშუალებით სპეციალისტებმა დაადგინეს გალაქტიკების განაწილება ჩვენგან 380 მილიონი სინათლის წლის ფარგლებში.

2MASS პროექტის ფარგლებში შედგენილ რუკაზე (სურ. 88) ვარსკვლავთა გროვების ჩვენგან დაშორება ფერითაა კოდირებული. მაგალითად, ყველაზე შორეული ობიექტები წითლადაა შეფერილი, ყველაზე ახლო კი – იისფრად.

### სამგანზომილებიანი ციური რუკების დამუშავება და ანალიზი

ცის სამგანზომილებიანი რუკების ანალიზის მიზანია მსხვილმასშტაბიანი ფლუქტუაციების შესწავლა, კოსმოლოგიური პრინციპის შემოწმება და თანამედროვე სამყაროში მატერიის განაწილების შედარება CMB-ის ფლუქტუაციებთან. ამისთვის გამოიყენება პრაქტიკულად იგივე მეთოდი, რომელიც კარგად მუშაობს CMB-ის მონაცემების ინტერპრეტაციის თვალსაზრისით. კერძოდ, ირჩევენ გარკვეული ზომის, მაგალითად, 40 მილიონი კვადრატული სინათლის წელიწადის ზომის ფანჯარას, რომელშიც ითვლიან გალაქტიკების რაოდენობას და ამ ბიჯით შემოუვლიან მთელ ცას. ეს საშუალებას იძლევა მოცემული ფანჯრის ზომისთვის დათვლილი იქნას მატერიის სიმკვრივის ფლუქტუაციები. შემდეგ ცვლიან ფანჯრის ზომას და იმეორებენ პროცედურას. ამ ანალიზის მონაცემები 89-ე სურათზეა გამოსახული.



სურ. 89 ხილული მატერიის სიმკვრივის ფლუქტუაციები სამყაროში  
© Scientific American

89-ე სურათი, რომელიც მე-80 სურათის ანალოგიურია, გვიჩვენებს მატერიის ფლუქტუაციების (ორდინატა ღერძი) დამოკიდებულებას სივრცული არის ზომაზე

(აბსცისათა ღერძი). წარმოვიდგინოთ კოსმოსი როგორც ერთმანეთში ჩადგმული, გამჭვირვალე სფეროების ერთობლიობა, რომლის ცენტრში დამკვირვებელი იმყოფება. როდესაც ცას გარკვეული ზომის ფანჯრიდან ვუმზერთ, ანუ ფანჯარას ციურ სფეროებზე ვაგეგმილებთ, რაც უფრო შორეულ სფეროს ვაკვირდებით, მით უფრო დიდი მასშტაბის სივრცულ არეს შევისწავლით. მაშასადამე, ერთი და იგივე ზომის ფანჯარა საშუალებას გვაძლევს შევაფასოთ მატერიის განაწილება სხვადასხვა მასშტაბის სივრცულ არეში.

89-ე სურათიდან ცხადია, რომ სხვადასხვა ტიპის მატერიის შესაბამისი ფლუქტუაციების ყოფაქცევა ერთსა და იმავე მრუდზე ძვეს. სწორედ ამიტომ ითვლება, რომ სამყაროს მსხვილმასშტაბიანი ფლუქტუაციები ეთანხმება CMB-ის ფლუქტუაციებს. რადგან ამ მრუდზე კოსმოსური ობიექტების მთელი მრავალსახეობაა წარმოდგენილი (ჩვენთან ყველაზე ახლოს მდებარე გალაქტიკათაშორისი აირი, გრავიტაციული ლინზები, გალაქტიკები და გალაქტიკური გროვები, რელიქტური ფონი), შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ ყველა მასშტაბის ფლუქტუაციებს ერთი და იგივე ბუნება აქვს. გარდა ამისა, რადგან ფლუქტუაციების დამოკიდებულება მანძილზე წრფივ კანონს არ ემორჩილება, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ სამყაროს ევოლუციის დროს მისი გაფართოების დინამიკა ცვალებადი იყო. ჩვენ ამ საკითხს დაწვრილებით 4.11 პარაგრაფში შევხებით.

## 4.8 მსხვილმასშტაბიანი ფლუქტუაციები და ფარული მატერია

სამყაროში ხილული მატერიის სიმკვრივის შედარებით მცირე ფლუქტუაციები აინშტაინის კოსმოლოგიური პრინციპის მართებულებას გვაფიქრებინებს. მაგრამ ხილული ობიექტები კოსმოსში არსებული გრავიტაციულად ურთიერთმოქმედი მატერიის 10%-ზე ნაკლებს შეადგენს. ამიტომ, სანამ დაკვირვებების საშუალებით კოსმოლოგიური პრინციპის დადასტურების შესახებ დასკვნას გამოვიტანდეთ, აუცილებელია დავამტკიცოთ, რომ ფარული მატერია ხილულის მსგავსადაა განაწილებული. ასეთი დამთხვევის შესაძლებლობის შესახებ პირველი მინიშნება SDSS-ის მონაცემებზე დაყრდნობით იქნა მიღებული. შემდგომ, 2dFGRS ექსპერიმენტის მეშვეობით, შესწავლილი იქნა გალაქტიკების სამეულები, რომელთა წარმოქმნა დაკავშირებულია ფარულ მატერიასთან. კვლევების საფუძველზე ცხადი გახდა, რომ კოსმოსში ფარული მასა ისევე თანაბრადაა განაწილებული, როგორც ხილული (ამ საკითხს უფრო დაწვრილებით შემდეგ პარაგრაფში განვიხილავთ). უდავოა, რომ ასეთი შედეგი კოსმოლოგიურ პრინციპს დამაჯერებლობას მატებს.

კიდევ ერთი საკითხი ეხება ფარული მატერიის ბუნებას. არსებობს ორი მოსაზრება. ერთ-ერთი თვალსაზრისის მიხედვით, ფარული მატერია შეიძლება შედგებოდეს ძალიან მცირე მასის სუსტად ურთიერთმოქმედი ნაწილაკებისგან. ვინაიდან ასეთი ნაწილაკები თითქმის სინათლის სიჩქარით უნდა მოძრაობდეს, ფარული მატერიის ასეთ ტიპს ცხელს უწოდებენ. ცხელი ფარული მასის ბუნებრივი კანდიდატია ნეიტრინო.

ფარული მატერიის მეორე მოდელის თანახმად, მას მცირე სიჩქარით მოძრავი მასიური ნაწილაკები ქმნის. ამიტომ ასეთ ფარულ მატერიას ცივს უწოდებენ. ასეთ ნაწილაკთა რიგს განეკუთვნება, მაგალითად, ე.წ. SUSY ნაწილაკები, რომელთა არსებობას ელემენტარულ ნაწილაკთა სუპერსიმეტრიული მოდელები წინასწარმეტყველებს.



საინტერესოა, რომ ცივი და ცხელი ფარული მატერიის მოდელებში მსხვილმასშტაბიანი სტრუქტურების წარმოქმნის პროცესები ძალიან განსხვავდება ერთმანეთისგან. პირველ შემთხვევაში ჯერ ჩნდება მცირე ფორმები, ანუ ცალკეული გალაქტიკები, რომლებიც შემდგომ, გრავიტაციული ძალის ზეგავლენით, სხვადასხვა სიდიდის კლასტერებში ერთიანდებიან. ამიტომ ყველაზე დიდი სტრუქტურები, მაგალითად „დიდი კედლები“, ცივი ფარული მატერიის შემთხვევაში, შედარებით ახალი წარმონაქმნებია.

მეორე მოდელის ფარგლებში, ცხელი ფარული მატერიის შემადგენელი ნაწილაკები ადრეულ სამყაროში იმდენად სწრაფად მოძრაობდნენ, რომ მცირე მასშტაბის საწყისი არაერთგვაროვნებების გათანაბრებას ახერხებდნენ და ამდენად, მცირე ზომის ობიექტების გაჩენას ეწინააღმდეგებოდნენ. ამ ვარიანტში ჯერ ყველაზე დიდი სტრუქტურები ყალიბდება, მერე კი ისინი იშლება ცალკეულ გროვებად და გალაქტიკებად. ასე რომ ცხელი ფარული მასის მოდელებში „დიდი კედლები“ ყველაზე ძველი წარმონაქმნებია.

მნიშვნელოვანია, რომ ცხელი ფარული მატერიის შემთხვევაში, პატარა ზომის სტრუქტურების ფლუქტუაციები მცირე უნდა იყოს. ეს კი ეწინააღმდეგება 89-ე სურათზე მოყვანილ მონაცემებს (გრაფიკის მარცხენა მხარე). მაშასადამე, სამყაროში მატერიის მსხვილმასშტაბიანი არაერთგვაროვნებების განაწილება ექვის ქვეშ აყენებს ცხელი ფარული მასის არსებობას – ფარული მატერია ცივი უნდა იყოს.

## 4.9 ფარული მატერია და გალაქტიკების კლასტერები

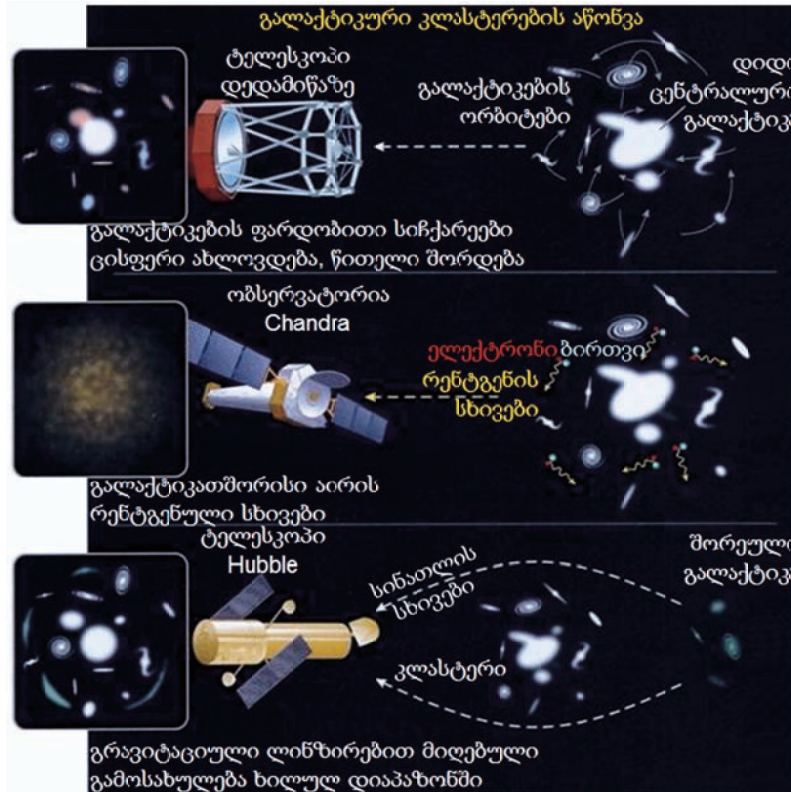
### გალაქტიკების კლასტერების „აწონვა“

ფარული მატერიის ბუნების დადგენა ოცდამეერთე საუკუნის კოსმოლოგიის ერთ-ერთი მთავარი გამოწვევაა. ფარული მასის არსებობას CMB-ის თვისებები ადასტურებს. თუმცა CMB-ის შესწავლით გამოტანილი დასკვნები დამაჯერებელია, ისინი მაინც ირიბ მტკიცებულებას წარმოადგენენ.

ფარული მატერიის არსებობის თითქმის პირდაპირ მტკიცებულებებს გალაქტიკების კლასტერებზე დაკვირვებები იძლევა. სამყაროში არსებული გალაქტიკების დაახლოებით 10% თავმოყრილია გიგანტურ კლასტერებში, რომელთა მასა  $10^{14}$ - $10^{15}$  მზის მასას აღწევს. თითოეულ კლასტერში ასობით და ათასობით გალაქტიკაა გაერთიანებული. გალაქტიკების კლასტერების შესწავლა საშუალებას იძლევა რამდენიმე მეთოდით დადგინდეს მათში არსებული ფარული მატერიის რაოდენობა. 90-ე სურათზე ნაჩვენებია „კლასტერების აწონვის“ მეთოდების არსი.

ოპტიკური მეთოდი პირველად ფრიც ცვიკის (Fritz Zwicky, 1898-1974) მიერ იქნა დამუშავებული და გამოყენებული. იგი 90-ე სურათის ზემო ნაწილშია განმარტებული. მეთოდი ცალკეული გალაქტიკების საერთო ცენტრის გარშემო მოძრაობებზე დაკვირვებებს ემყარება. გალაქტიკები მით უფრო სწრაფად გადაადგილდებიან, რაც უფრო დიდია ამ მოძრაობების გამომწვევი მასა. გალაქტიკების მოძრაობის სიჩქარისა და მათი მასის გაზომვით შესაძლებელია მთელი კლასტერის კინეტიკური ენერგიის დადგენა. კლასტერის სტაბილურობისთვის (ანუ იმისთვის, რომ ცალკეული გალაქტიკები არ მოწყდნენ კლასტერს) საჭიროა, რომ კლასტერის პოტენციური ენერგია მისი კინეტიკური ენერგიის ნახევარი იყოს. პოტენციური ენერგია კი კლასტერის გრავიტაციით, ესე იგი მისი მასით განისაზღვრება. შესაბამისი გაზომვების ჩატარებით ცვიკიმ და მისმა მიმდევრებმა ათობით კლასტერის სრული მასა შეაფასეს. აღმოჩნდა,

რომ ყველა შემთხვევაში ეს მასა შესაბამის კლასტერში შემავალი ხილული გალაქტიკების მასათა ჯამს ათჯერ მაინც აღემატებოდა. ცვიკის დროს დაკვირვებები ხორციელდებოდა დედამიწაზე განთავსებული ტელესკოპების საშუალებით, კერძოდ, პალომარისა და ვილსონის მთებზე (კალიფორნია, აშშ) მდებარე ობსერვატორიებში. გაზომვები ამჟამად ტარდება, მაგალითად, ჩილეს ანდებში განლაგებულ ტელესკოპთა კომპლექსზე VLT (Very Large Telescope).



სურ. 90 ფარული მატერიის მასის შეფასების მეთოდები  
© S&T

სამყაროში ფარული მატერიის განსაზღვრის მეორე მეთოდი ეფუძნება გალაქტიკების კლასტერების რენტგენის გამოსხივების შესწავლას. მეთოდის არსი ნაჩვენებია 90-ე სურათის შუა ნაწილში. რენტგენულ დიაპაზონში კლასტერები ჩანს, როგორც დიდი ბურთები. აღმოჩნდა, რომ რენტგენის სხივების ძირითადი წყარო გალაქტიკები კი არა, გავრვარებული გალაქტიკათაშორისი აირია. რენტგენის სხივები ჩნდებიან მაშინ, როდესაც აირში შემავალი რელატივისტური ელექტრონები პლაზმის პროტონებზე გაიბნევა. გალაქტიკათაშორისი აირის სიმკვრივე, ესე იგი მისი ტემპერატურაც, კლასტერის ცენტრთან მიახლოების პროპორციულად იზრდება და ზრდის ეს კანონი დამოკიდებულია კლასტერის სრულ მასაზე (დედამიწის ატმოსფეროს ქვედა ფენებში ატმოსფერული წნევის ზრდის მსგავსად). კლასტერების ცენტრიდან სხვადასხვა მანძილებზე გაზომილი რენტგენის გამოსხივების ინტენსივობების შესწავლამ გვიჩვენა, რომ კლასტერების გრავიტაციული მასა მათ ხილულ მასაზე ბევრად დიდია. ეს შედეგები მიღებული იქნა კოსმოსური რენტგენული

ობსერვატორიების Chandra და XMM-Newton საშუალებით (ორივე ობსერვატორია კოსმოსში 1999 წელსაა გაშვებული).

ფარული მატერიის რაოდენობის შეფასების მესამე მეთოდი ეფუძნება კლასტერებით გამოწვეულ გრავიტაციული ლინზირების ეფექტს. თუ რა არის გრავიტაციული ლინზა, ახსნილი იყო წიგნის პირველი თავის „გრავიტაციული ასტრონომიის“ ნაწილში. შეგახსენებთ, რომ ფარდობითობის ზოგადი თეორიის თანახმად, მასიურ ობიექტებს შეუძლია გარემომცველი სივრცის გამრუდება, რაც იწვევს სინათლის სხივების გადახრას. შედეგად, ოპტიკური ლინზების მსგავსად, კოსმოსურ ობიექტებსაც გააჩნია ლინზირების თვისებები: მათ მიღმა მდებარე მნათობების გამოსხივების გაძლიერება, გამრუდება და სხვ. გრავიტაციული ლინზირების ეფექტების სიდიდე დამოკიდებულია მისი გამომწვევი ციური ობიექტის მასაზე.

წარმოვიდგინოთ, რომ ჩვენსა და შორეულ გალაქტიკას შორის შესასწავლი მასიური კლასტერი მდებარეობს. ეს კლასტერი აძლიერებს შორეული გალაქტიკის ნათებას და ამახინჯებს მის გამოსახულებას. გამოსახულება შეიძლება გაწელილი ან დაგრეხილი აღმოჩნდეს. როგორც უკვე ვთქვით, დამახინჯებების დონე დამოკიდებულია კლასტერის მასაზე, რომელიც ამ მეთოდით შეიძლება შევაფასოთ. კოსმოსური ტელესკოპის Hubble-ის მეშვეობით უკვე შეფასებულია რამდენიმე ათეული კლასტერის მასა. ფარული მასის გაზომვის ეს მეთოდი 90-ე სურათის ქვედა ნაწილშია მოყვანილი.

ყურადღება მიაქციეთ იმ ფაქტს, რომ გალაქტიკების კლასტერებში არსებული ფარული მასის შეფასების სამივე მეთოდი ერთმანეთისგან დამოუკიდებელია. უფრო მეტიც, ისინი განეკუთვნებიან ასტრონომიის სხვადასხვა დარგს: ოპტიკურს, რენტგენულსა და გრავიტაციულს. ამიტომაცაა დამაჯერებელი ამ მეთოდებით მიღებული ერთი და იგივე დასკვნა: გალაქტიკების კლასტერების გრავიტაციული მასა ათჯერ მაინც აღემატება მათი ხილული მატერიის მასას.

იმავე დასკვნამდე მივყავართ გალაქტიკების მცირე გროვების შესწავლასაც. XMM-Newton კოსმოსური ობსერვატორიის გამოყენებით განსაზღვრული იქნა მცირე გროვების გარშემო არსებული გაზის ტემპერატურა და აღმოჩნდა, რომ ფარული მასა ამ შემთხვევაშიც ათჯერ აჭარბებს ხილულს. მცირე გალაქტიკური გროვების რაოდენობა დიდ კლასტერებს ბევრად აღემატება. ამიტომ გაცილებით დიდი სტატისტიკური მასალა გროვდება. თუმცა, გროვების შედარებით მომცრო მასა გალაქტიკების „აწონვის“ ზემოაღნიშნული ორი სხვა მეთოდის გამოყენების საშუალებას არ იძლევა.

### **ბარიონების დათვლა**

ფარული მატერიის შესწავლის შემდგომი ეტაპია კლასტერების მასის სტრუქტურის დადგენა. კლასტერებში მასას, ჩვეულებრივ, თითქმის მთლიანად პროტონები და ნეიტრონები (ბარიონები) და იგივე რაოდენობის ელექტრონები (ლეპტონები) ქმნიან. ვინაიდან ელექტრონების მასა ბარიონების მასას დაახლოებით 2000-ჯერ ჩამოუვარდება, რომელიმე კოსმოსური ობიექტის მასის შესაფასებლად მხოლოდ მასში შემავალი ბარიონების რაოდენობას ითვლიან. ბარიონების „დათვლის“ ორ მეთოდს იყენებენ.

ერთი მეთოდი თითქმის პირდაპირია, იყენებს რა რენტგენის გამოსხივების ინტენსივობის მონაცემებს. რადგან რენტგენის სხივები ელექტრონების პროტონებზე გაბნევისას წარმოიქმნება, ამიტომ მათი ინტენსივობა პროტონების (ბარიონები) რიცხვის პროპორციულია. ინტენსივობას კი ზომავენ კოსმოსური რენტგენული ტელესკოპებით, როგორიცაა, მაგალითად, Chandra.

მეორე მეთოდი, ეგრეთ წოდებულ სიუნიაევ-ზელდოვიჩის (Рашид Сюняев, 1943; Яков Зельдович, 1914-1987) ეფექტს ეფუძნება. ამ ეფექტის თანახმად, CMB-ის ფოტონები, გალაქტიკათაშორისი აირის მაღალი ენერგიის ელექტრონებთან ურთიერთქმედებით, დამატებით ენერგიას იძენს. ამიტომ გალაქტიკების კლასტერებში, სადაც მრავლად მოიპოვება მაღალი ენერგიის ელექტრონები, მახინჯდება CMB-ის სპექტრი. ცხადია, რომ ამ დამახინჯების ხარისხი კლასტერში არსებული ელექტრონების რაოდენობის და, შესაბამისად, ბარიონების რაოდენობის პროპორციულია. რადიოასტრონომებმა ამ მეთოდით რამდენიმე ათეული კლასტერი შეისწავლეს.

ორივე მეთოდით მიღებული შედეგები კარგად ემთხვევა ერთმანეთს. მათი საშუალებით, ერთმანეთისგან დამოუკიდებლად, მოხერხდა კლასტერებში ბარიონების სრული მასის დადგენა. მიღებული შედეგები სრულ თანხმობაშია CMB-ის თვისებებზე დამყარებული კვლევების შედეგებთანაც. აღმოჩნდა, რომ ვარსკვლავები შეადგენს კლასტერების მასის მხოლოდ 2%, გალაქტიკათაშორისი გაზის მასა ვარსკვლავების მასას 7-ჯერ აღემატება და კლასტერის მასის 12-14 % შეადგენს, ხოლო დანარჩენი გრავიტირებადი მატერია (სრული მასის დაახლოებით 80%) წარმოდგენილია არაბარიონული, ფარული მასის სახით.

საინტერესოა, რომ 2005 წლის დასაწყისში ფრანგმა, იტალიელმა და ავსტრალიელმა ასტრონომებმა აღმოაჩინეს გალაქტიკა VIRGOHI21, რომელიც ძირითადად ფარული მატერიისგან შედგება. ისინი აკვირდებოდნენ გალაქტიკას, რომელიც შეიცავდა ნეიტრალური წყალბადის უზარმაზარ ღრუბელს, მზის მასაზე 100 მილიონჯერ მეტი მასით. ღრუბლის ბრუნვის სიჩქარე იმაზე მიუთითებდა, რომ გალაქტიკის სრული მასა მასში არსებულ წყალბადის მასას 1000-ჯერ აჭარბებდა. ეს გალაქტიკა ქალწულის (Virgo) თანავარსკვლავედის კლასტერში მდებარეობს. დედამიწიდან იგი ისეთ მანძილზეა დაშორებული, რომ იქ ჩვეულებრივ გალაქტიკას მე-12 ვარსკვლავიერი სიდიდის ნათობა უნდა ჰქონოდა. მაგრამ ლა პალმას (ჰავაის კუნძულები) ტელესკოპმა ოპტიკურ დიაპაზონში ვერაფერი დაინახა. ამჟამად ფიქრობენ, რომ ეს ბნელი გალაქტიკა იმ პერიოდში წარმოიქმნა, როცა მასში არსებული ჩვეულებრივი მატერიის სიმკვრივე ვარსკვლავების წარმოსაშობად საკმარისი არ იყო.

ფარული მატერიის ნაწილაკების რეგისტრაციას სხვადასხვა ექსპერიმენტებით ცდილობენ. მაგალითად, მინესოტას (აშშ) მაღაროებში ღრმად განთავსებულ დანადგარში CDMS (Cryogenic Dark Matter Search), თითქმის აბსოლუტურ ნულამდე აცივებენ გერმანიუმითა და სილიციუმით სავსე დანადგარს – ბოლომეტრს. მასში გავლისას ფარული მატერიის ჰიპოთეტურმა ნაწილაკებმა, ე.წ. WIMP-ებმა უნდა გამოიწვიოს ლოკალური გათბობა. რამდენიმე ასეთი შემთხვევა უკვე დაფიქსირდა. თუმცა საკმაოდ მაღალია იმის ალბათობა, რომ ეს მოვლენები თვით მაღაროს რადიაციული ფონის შედეგია და ამიტომ WIMP-ების აღმოჩენაზე საუბარი ნაადრევია.

გერმანიუმით შევსებული ბოლომეტრები სხვა ექსპერიმენტებშიც გამოიყენება. ჩვენ აქ მხოლოდ EDELWEISS მოვიხსენიებთ. ამ კოლაბორაციაში მონაწილეობს დიდი ბრიტანეთი, საფრანგეთი, რუსეთი და იტალია. დანადგარი მალე გავა საპროექტო სიმძლავრეზე. იგი განლაგებულია საფრანგეთისა და იტალიის საზღვართან არსებულ ძალზე ღრმა მაღაროში, რომელშიც კოსმოსური სხივების ფონი 30-ჯერ ნაკლებია CDMS ექსპერიმენტთან შედარებით.

აღსანიშნავია, რომ აღნიშნულ დანადგარებს გააჩნია ძალიან მაღალი სითბური მგრძნობიარობა – 20 კევ. შედარებისთვის, ელექტრონის მასა დაახლოებით 500 კევ-ია.

#### 4.10 ფარული ენერგია და გალაქტიკების კლასტერები

ფარულ მატერიასთან შედარებით, ჩვენი წარმოდგენები ფარული ენერგიის შესახებ კიდევ უფრო მეტადაა ბურუსით მოცული. მის არსებობაზე ირიბად მიუთითებს მიკროტალღური ფონის სტრუქტურა. CMB-ის ანალიზიდან გამომდინარეობს, რომ ჩვენი სამყარო თითქმის ბრტყელია, რაც განაპირობებს მოთხოვნას მატერიის გარკვეული კრიტიკული სიმკვრივის არსებობის შესახებ. ხილული და ფარული მატერია, საერთო ჯამში, კრიტიკული სიმკვრივის მხოლოდ 32%-ს შეადგენს, ხოლო მატერიის 68%-იან დანაკლისს ფარულ ენერგიას მიაწერენ. ფარულ ენერგიაზე მხოლოდ ისაა ცნობილი, რომ მისი წილი სამყაროს სრული სიმკვრივის 68%-ს შეადგენს და რომ ის განზიდველ ძალებთანაა დაკავშირებული. ხაზი გავუსვით იმ ფაქტს, რომ დღევანდელი წარმოდგენებით სამყაროს სუბსტანციის 32% გრავიტაციულ ურთიერთმიზიდულობას ექვემდებარება, ხოლო 68%-ს – განზიდველი ბუნება გააჩნია. ცხადია, რომ სამყაროს განვითარება მეტწილად ამ ორი ძალის ურთიერთქმედებითაა განპირობებული.

ფარული ენერგიის კვალი, პირველ ყოვლისა, სამყაროს ადრეულ ეტაპებზე გაჩენილი ობიექტების თვისებებში უნდა ვეძიოთ. მაგალითად, Ia ტიპის ზეახალ ვარსკვლავებამდე მანძილის და მათი ნათობის დადგენით შესაძლებელი აღმოჩნდა ფარული ენერგიის შესწავლა და სხვადასხვა დროს სამყაროს გაფართოების კანონის დადგენა. ამ მეთოდზე ჩვენ შემდგომში ვისაუბრებთ, ახლა კი შევხებით სხვა, დამოუკიდებელ მეთოდს, რომელიც გალაქტიკური კლასტერების შესწავლას ეფუძნება.

##### გალაქტიკური კლასტერების დემოგრაფია

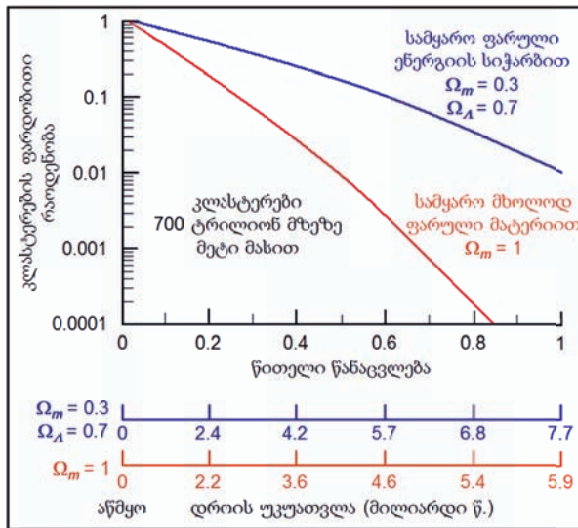
ჩვენ უკვე აღვნიშნეთ, რომ სამყაროს განვითარების ადრეულ ეტაპებზე სივრცეს ავსებდა ძალზე ერთგვაროვანი მატერია, რომელიც, ძირითადად, შედგებოდა ნეიტრინოებისგან, პროტონებისა და მათი გამანეიტრალებული ელექტრონებისგან. იმ დროინდელ მატერიას ადარებენ სითხეს, რომელშიც ვრცელდება ოდნავ შესამჩნევი ტალღები – სიმკვრივის მცირე არაერთგვაროვნებები. ზუსტად ამ მცირე არაერთგვაროვნებებმა გამოიწვია შემდგომ სამყაროში ისეთი მსხვილმასშტაბიანი სტრუქტურების გაჩენა, როგორიცაა ვარსკვლავები, გალაქტიკები და მათი გროვები.

სტრუქტურების გაჩენა უზრუნველყო პროცესმა, რომელსაც გრავიტაციულ არამდგრადობას უწოდებენ. სწორედ ის განაპირობებს, რომ დიდი ობიექტები მსხვილდებიან მცირეთა მიზიდვის ხარჯზე, ხოლო პატარა ობიექტები ქრებიან და ტოვებენ ცარიელ სივრცეს. სამყაროში ამჟამად ცნობილი ყველაზე დიდი ობიექტები გალაქტიკური კლასტერებია.

91-ე სურათზე ნაჩვენებია  $7 \times 10^{14}$  მზის ტოლი და უფრო მეტი მასის მქონე გალაქტიკური კლასტერების ფარდობითი რაოდენობის დამოკიდებულება მათ წითელ წანაცვლებაზე, ანუ მათი წარმოშობის დროზე. სურათზე Ω-თი აღნიშნულია რომელიმე ტიპის მატერიის სიმკვრივის შეფარდება კრიტიკულ სიმკვრივესთან. მაგალითად, მნიშვნელობა  $\Omega_m = 1$  შეესაბამება სიტუაციას, როცა სამყაროს სრული მატერია მხოლოდ გრავიტაციული მასითაა წარმოდგენილი, ანუ როდესაც სამყაროში ფარული ენერგია არ არსებობს. გრაფიკიდან ცხადად ჩანს, რომ კლასტერების რაოდენობა ძალზე დიდადაა დამოკიდებული იმაზე, თუ რა რაოდენობითაა სამყაროში გრავიტაციული მასა –  $\Omega_m$  და ფარული ენერგია –  $\Omega_\Lambda$ .



გალაქტიკების კლასტერების წითელ წანაცვლებას შესაძლებელია შევუსაბამოთ კლასტერების გაჩენის დროები, რომლებიც, თავის მხრივ, დამოკიდებულია სამყაროს გაფართოების რეჟიმზე. რაც უფრო სწრაფად ფართოვდება სამყარო, მით უფრო მოკლე დრო სჭირდება კოსმოსურ ობიექტებს მოცემული წითელი წანაცვლების მისაღწევად. სამყაროს გაფართოების რეჟიმი კი მიზიდვა-განზიდვის ძალების შეფარდებით განისაზღვრება. ამიტომ 91-ე სურათზე დროის ორი სკალაა მითითებული. ერთ-ერთი მათგანი შეესაბამება შემთხვევას, როცა გრავიტაციული მასა სამყაროს სრული მასის 30%-ს შეადგენს, ხოლო მეორე – 100%-ს. იგივე პირობებს აკმაყოფილებს სურათზე მოყვანილი მრუდები. მრუდები აჩვენებს, რომ კლასტერების რიცხვი ამჟამად ბევრად მეტია, ვიდრე ეს იყო 5-8 მილიარდი წლის წინ.



სურ. 91 გალაქტიკური კლასტერების რაოდენობის დამოკიდებულება წითელ წანაცვლებაზე  
© S&T

ახლა კი განვიხილოთ განმზიდველი ძალის, ანუ ფარული ენერგიის შესწავლის შესაძლებლობები. ამისათვის უნდა ვიცოდეთ გალაქტიკური კლასტერების დემოგრაფია, ანუ კლასტერების რაოდენობა სამყაროს განვითარების სხვადასხვა ეტაპზე. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, დაკვირვებების შედეგები უნდა გადავიტანოთ 91-ე სურათზე. მსგავსი კვლევები უკვე ჩატარებულია. მათი მონაცემების თანახმად, ფარული ენერგია რამდენჯერმე აჭარბებს გრავიტაციულ მასას. თუმცა ამ მონაცემების სტატისტიკა მცირეა, საჭიროა უფრო მეტი კლასტერების პოვნა. განსაკუთრებით საინტერესოა ადრეული, ანუ დიდი წითელი წანაცვლების მქონე კლასტერები. ამ მიზნით რამდენიმე სტაციონარული და კოსმოსური პროექტი შემუშავდა.

ოპტიკურ დიაპაზონში კლასტერების რეგისტრაცია და კვლევა წარმოებს სტაციონარული დანადგარით SDSS, რომლის შესახებ ჩვენ 4.7 პარაგრაფში ვისაუბრეთ. ასევე აღვნიშნეთ, რომ ოპტიკურ დიაპაზონში სივრცის მხოლოდ 1.2 მილიარდი სინათლის წელიწადის რადიუსის მქონე არის შესწავლა შესაძლებელი. უფრო შორეული კლასტერების დაფიქსირება მხოლოდ ინფრაწითელ (ამ დიაპაზონისთვის დამახასიათებელი დიდი წითელი წანაცვლების გამო) ან რენტგენულ დიაპაზონშია შესაძლებელი. ორივე შემთხვევაში, შეფერხებების ასაცილებლად, კოსმოსური

დანადგარების გამოყენებაა საჭირო. ამჟამად NASA და ESA ამზადებენ კოსმოსურ მისიებს WFIRST (Wide-Field Infrared Survey Telescope), Euclid, IXO (International X-ray Observatory), და Athena (Advanced Telescope for High ENergy Astrophysics), რომელთა მრავალმხრივ მიზნებს შორის გალაქტიკური კლასტერების ინფრაწითელ და რენტგენულ დიაპაზონებში შესწავლაც შედის.

წინა პარაგრაფში ავხსენით, რომ გალაქტიკურ კლასტერებში არსებული თავისუფალი ელექტრონებით შექმნილი აირი, სიუნიაევ-ზელდოვიჩის ეფექტის გამო, ამახინჯებს მიკროტალღურ ფონს. სწორედ ეს ეფექტი გამოიყენება სამხრეთ პოლუსის მახლობლად აგებული 10-მეტრიანი SPT (South Pole Telescope) რადიოტელესკოპით გალაქტიკური კლასტერების შესწავლისას. ტელესკოპი ცის 1000 კვადრატულ გრადუსს „ათვალიერებს“. 2008 წელს ამ ტელესკოპმა, სიუნიაევ-ზელდოვიჩის ეფექტით, დააფიქსირა  $8 \times 10^{14}$  მზის მასის SPT-CL J0546-5345 კლასტერი. 2009 წლიდან კი ESA-ს კოსმოსური ობსერვატორია Planck-ი აწარმოებდა ცის ერთიანი კვლევის პროგრამას, მათ შორის სიუნიაევ-ზელდოვიჩის ეფექტის გამოყენებითაც. იმედია, რომ არსებული დანადგარებით საკმარის სტატისტიკურ მასალა დაგროვდება ფარული მატერიისა და ფარული ენერგიის თვისებების დასაზუსტებლად.

#### 4.11 სამყაროს გაფართოების რეჟიმი

სამყაროში ფარული ენერგიის რაოდენობაზე ყველაზე ზუსტ მონაცემებს CMB იძლევა, თუმცა, როგორც რელიქტური ფონის თვისებების განხილვიდან ჩანს (4.3 პარაგრაფი), ეს არაპირდაპირი მონაცემებია. ამიტომ კოსმოლოგები ეძებენ კვლევის ალტერნატიულ მეთოდებს, რომლებიც შეიძლება არც ისე ზუსტი, მაგრამ უფრო უშუალო აღმოჩნდეს. ერთ-ერთ ასეთ მეთოდზე წინა პარაგრაფში უკვე ვისაუბრეთ.

ფარული ენერგიის რაობის დასადგენად მეცნიერები დიდ იმედებს ამყარებენ Ia ტიპის ზეახალი ვარსკვლავების შესწავლაზე. ასეთი ვარსკვლავების წითელი წანაცვლება გვიჩვენებს ჩვენს მიმართ მათი მოძრაობის სიჩქარეს, ხოლო მათი ნათობა ჩვენამდე მანძილის მიმანიშნებელია. გამოთვლების თანახმად, Ia ტიპის ზეახალი ვარსკვლავების აფეთქებისას, ყველა მათგანის ნათობა თითქმის ერთნაირი უნდა იყოს, მცირე გადახრების კორექტირება კი აფეთქების ხანგრძლივობაზე დამოკიდებული სპეციალური პარამეტრებითაა შესაძლებელი. ამიტომ დედამიწიდან ხილული ზეახალი ვარსკვლავის ნათობა (შესწორებების შემდგომ) მხოლოდ ამ ვარსკვლავამდე მანძილზეა დამოკიდებული. მეორეს მხრივ, როგორც უკვე აღვნიშნეთ, კოსმოსური ობიექტების ურთიერთდაშორების სიჩქარე მიზიდვა-განზიდვის ძალების თანაფარდობაზეა დამოკიდებული.

განზიდვის ძალები რომ არ არსებობდეს, სამყაროს გაფართოების სიჩქარე, გრავიტაციის გამო, ნელ-ნელა უნდა მცირდებოდეს. ზეახალი ვარსკვლავების ნათობის და მათი წითელი წანაცვლების შედარება მიუთითებს, რომ სამყარო უფრო სწრაფად ფართოვდება, ვიდრე ამას განზიდვის ძალების არარსებობის შემთხვევაში ექნებოდა ადგილი. აღსანიშნავია, რომ ამ აღმოჩენისთვის სოლ პერლმუტერს (Saul Perlmutter, 1959), ადამ რიისსა (Adam Riess, 1969) და ბრაიან შმიდტს (Brian Paul Schmidt, 1967) მიენიჭათ 2011 წლის ნობელის პრემია ფიზიკის დარგში.

ამჟამად მეცნიერები სწავლობენ სამყაროს გაფართოების რეჟიმს. ისინი ცდილობენ დაადგინონ, გაფართოების სიჩქარე მუდმივია თუ ცვალებადი. ბოლო მონაცემების თანახმად, ეს რეჟიმი საკმაოდ რთულია: ადრეულ ეტაპებზე გაფართოება ნელდებოდა,

ხოლო ბოლო რამდენიმე მილიარდი წლის განმავლობაში სამყარომ დაიწყო აჩქარებული გაფართოება.

პირველი მინიშნებები ამ ფაქტზე ნაპოვნია დღეისთვის აღმოჩენილი ერთ-ერთი ყველაზე ხანდაზმული ზეახალი ვარსკვლავის გამოსახულებების ანალიზისას. ზეახალი 1997 წელს დაფიქსირდა ტელესკოპით Hubble. მისი წითელი წანაცვლების პარამეტრი მიახლოებით 3-ის ტოლია, რაც იმაზე მიუთითებს, რომ იგი 11 მილიარდი წლის წინ აფეთქდა (სამყაროს გაჩენიდან თითქმის 3 მილიარდი წლის შემდეგ). ამ აფეთქების ნათობა 2-ჯერ უფრო მეტი აღმოჩნდა, ვიდრე სამყაროს თანაბარი გაფართოების შემთხვევაში იყო მოსალოდნელი. ანუ ზეახალი ვარსკვლავი ჩვენთან უფრო ახლოსაა, ვიდრე ასტრონომებს ეგონათ. ეს კი იმ შემთხვევაშია შესაძლებელი, თუ დავუშვებთ, რომ ამ ვარსკვლავის აფეთქებისას გრავიტაციული ძალები სჭარბობდნენ ფარულ ენერგიას და სამყარო შენელებულად ფართოვდებოდა.

მეორე მინიშნება პირველის საწინააღმდეგოა, თუმცა სამყაროს ისტორიის სხვა ეპოქას ეხება. როდესაც სწავლობდნენ ზეახალი ვარსკვლავების აფეთქებებს, რომლებიც მოხდა დიდი აფეთქებიდან 7 მილიარდი წლის შემდეგ (წითელი წანაცვლებებით 0.7-1.5). აღმოჩნდა, რომ მათი ნათობა მოსალოდნელზე ბევრად ნაკლები იყო. როცა გამოირიცხა სხვა ეფექტები, რომლებსაც შეეძლო ნათობის შემცირება (მაგალითად, სინათლის შთანთქმა გალაქტიკათაშორისი მტვრის მიერ), მეცნიერები მივიდნენ დასკვნამდე, რომ ეს ვარსკვლავები უფრო შორს იმყოფებიან, ვიდრე ამას თანაბარი გაფართოების შესაბამისი წითელი წანაცვლება გვიჩვენებს. ეს კი ნიშნავს, რომ ამ პერიოდში სამყარო აჩქარებულად ფართოვდებოდა.

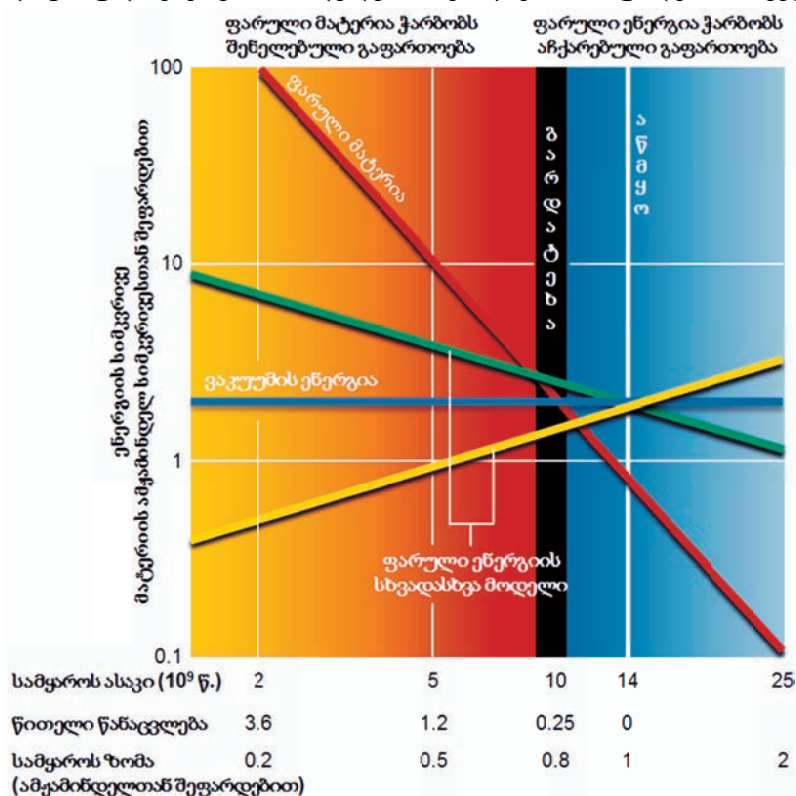
იქმნება შთაბეჭდილება, თითქოს დროთა განმავლობაში, სამყაროს გაფართოების გამო, გრავიტაციული ძალა მცირდებოდა, ხოლო განზიდვის ძალები არ იცვლებოდა და საბოლოოდ, მათ გადააჭარბეს მიზიდულობის ძალებს. თუ ეს დასკვნა სწორია, დღესაც ძალების ასეთ თანაფარდობას უნდა ჰქონდეს ადგილი, ანუ სამყარო აჩქარებულად უნდა ფართოვდებოდეს.

ასე რომ სამყაროს გაფართოების რეჟიმი საკმაოდ რთული აღმოჩნდა. ამჟამად ითვლება, რომ დიდი აფეთქების და შემდგომი ზესწრაფი (ინფლაციური) გაფართოების შემდეგ, სამყაროს გაფართოების სიჩქარემ კლება დაიწყო. შენელება დაახლოებით 7 მილიარდი წელიწადი გრძელდებოდა, რის შემდეგ სამყარომ დაიწყო აჩქარებული გაფართოება.

მნიშვნელოვანია, რომ სამყაროს გაფართოების შენელების აჩქარებით შეცვლის დროის მომენტი დამოკიდებულია ფარული ენერგიის ბუნებაზე. 92-ე სურათზე ნაჩვენებია, თუ როგორ მცირდება ფარული მასის სიმკვრივე (წითელი ხაზი) სამყაროს ასაკის ზრდასთან ერთად და როგორ იცვლება სამი სხვადასხვა მოდელით შემოთავაზებული ფარული ენერგიის სიმკვრივე: ცისფერი შეესაბამება ვაკუუმის ენერგიის უცვლელ მნიშვნელობას (სტანდარტული კოსმოლოგიური მოდელი), მწვანე – მის შემცირებას, ხოლო ყვითელი – ზრდას. ამ ხაზების მიერ წითელი ხაზის გადაკვეთის ადგილი მიუთითებს დროის იმ მომენტზე, როდესაც ფარული მასის და ფარული ენერგიის სიმკვრივეები ერთმანეთს გაუტოლდა.

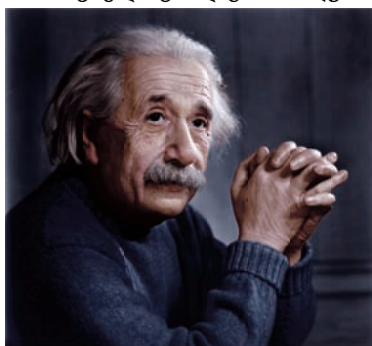
ზემოაღნიშნულიდან ცხადია, თუ რატომ ცდილობენ კოსმოლოგები დააგროვონ ზეახალი ვარსკვლავების აფეთქებების დიდი სტატისტიკური მონაცემები წითელი წანაცვლების 0.7-1.5 დიაპაზონში. ზუსტად ამ ინტერვალშია მოსალოდნელი აჩქარების რეჟიმის შეცვლა (შავი ხაზი 92-ე სურათზე). თუ მეცნიერებისთვის ამჟამად ასამდე

ასეთი ზეახალი ვარსკვლავის აფეთქებაა ცნობილი, რამდენიმე წელიწადში მოსალოდნელია ამ რიცხვის ათასამდე გაზრდა. ეს კი უფრო ზუსტი დასკვნების გამოტანის და ფარული ენერგიის მოდელების შემოწმების საშუალებას მოგვცემს.



სურ. 92 სამყაროს გაფართოების რეჟიმის ცვლილების დროის დამოკიდებულება ფარული ენერგიის სახეზე  
© Scientific American

ამ თავის ბოლოს გვინდა პატივი მივავოთ ორ შესანიშნავ მეცნიერს, ალბერტ აინშტაინს (Albert Einstein, 1879-1957) და ედუინ ჰაბლს (Edwin Powell Hubble, 1889-1963), რომელთა შრომებმა მნიშვნელოვნად განსაზღვრა კოსმოლოგიის განვითარება.



სურ. 93 ალბერტ აინშტაინი



სურ. 94 ედუინ ჰაბლი  
© Carnegie Observatories

## თავი V უპასუხოდ დარჩენილი კითხვები

### 5.1 შესავალი

წინა თავებში, ძირითადად, ვეხებოდით დაკვირვებითი ასტრონომიის და ექსპერიმენტული კოსმოლოგიის მიღწევებსა და პრობლემებს. წინამდებარე თავი კი მეტწილად თეორიულ კოსმოლოგიას ეძღვნება, რათა უფრო ნათელი შთაბეჭდილება შეგიქმნათ იმ საკითხებზე, რომლებიც ამჟამად აღელვებენ კოსმოლოგებს: დიდი აფეთქება, ინფლაცია, პარალელური სამყაროები და ბევრი სხვ. აგრეთვე, გვსურს, შეძლებისდაგვარად ცხადად აღვწეროთ (მეტადრე თეორიული მეცნიერებით დაინტერესებული ახალგაზრდებისთვის), თუ რაოდენ ბევრია ჯერ კიდევ გასარკვევი.

გვინდა წინდაწინ გაგაფრთხილოთ, რომ ამ თავის კითხვისას თქვენ შეხვდებით ურთიერთ გამომრიცხავ მოსაზრებებს; გაეცნობით სამყაროს აღმწერ მოდელებს, რომელთა დასაბუთება პირდაპირი დაკვირვებებით შეუძლებელია; დაფიქრდებით საკითხებზე, რომლებიც თითქოსდა უფრო ფილოსოფიის საგანია, ვიდრე კოსმოლოგიისა. მაგრამ კაცობრიობის ისტორია გვასწავლის, რომ მეცნიერების შესაძლებლობები განუწყვეტლივ იზრდება. ვინ იცის, გავა ხანი და სამყაროს მოწყობის შემეცნების გზაზე დღესდღეობით გადაულახავი დაბრკოლებები უკან დაგვრჩება, წინ კი მეცნიერულ გამოწვევასთან კიდევ უფრო წარმტაცი ჰორიზონტი გადაგვეშლება.

### 5.2 უსასრულოა თუ არა სამყარო?

ადამიანის ინტუიტიური აზროვნებისთვის როგორც სასრული, ასევე უსასრულო სამყარო ძნელი მისაღებია, ვინაიდან ორივე შესაძლებლობა ჩვენს ყოველდღიურ გამოცდილებასთან მეტად თუ ნაკლებად წინააღმდეგობაშია. ერთის მხრივ, ჩვენს გარშემო არსებულ სივრცეში უსასრულო არაფერია და რაც არ უნდა უზარმაზარი იყოს ესა თუ ის სუბსტანცია, ან ამა თუ იმ ობიექტების რაოდენობა (მაგალითად, ხილულ სამყაროში არსებული ატომების რიცხვი) იგი ახლოსაც ვერ მივა მათემატიკური უსასრულობის ცნებით გამოხატულ სიდიდესთან, თუ რაოდენობასთან. მაშ, რეალურად არსებული სამყარო რატომ უნდა იყოს უსასრულო? მეორეს მხრივ, სასრული სამყაროს წარმოდგენასთან ერთად ჩვენს გონებაში მაშინვე მისი ზღვარი ამოტივტივდება და უნებურად ჩნდება კითხვა: „და რა არის ზღვარს იქით, სხვა უსასრულო სამყარო, თუ სხვა სასრული სამყარო?“

გავიხსენოთ ბნელი ღამის ცის პარადოქსი, რომელიც დაკავშირებულია ადრეულ წარმოდგენასთან უსასრულო, უცვლელი და მუდმივად არსებული სამყაროს შესახებ. პარადოქსი იმაშია, რომ ასეთი სამყაროს შემთხვევაში, ადამიანის ხილვის ნებისმიერ არეს უნდა ხვდებოდეს რომელიმე ვარსკვლავის ზედაპირიდან წამოსული სინათლის სხივი, რის შედეგად ღამე დღესავით ნათელი უნდა იყოს. ეს კი ნამდვილად ეწინააღმდეგება ჩვენს ყოველდღიურ, უფრო სწორედ, ყოველდღიურ, გამოცდილებას. თითქოსდა, პარადოქსი მარტივად იხსნება, თუ დავუშვებთ, რომ სამყარო სასრულია ღრობი და სივრცეში. მაგრამ, სინამდვილეში, საქმე უფრო რთულადაა.

წინა თავის პარაგრაფში 4.5 ვისაუბრეთ ნაწილაკთა ჰორიზონტზე, რომელიც ჩვენს დამზერად სამყაროს შემოსაზღვრავს. ნაწილაკთა ჰორიზონტის ფარგლებში გამოსხივებულ სინათლეს დიდი აფეთქებიდან გასული 13.8 მილიარდი წელიწადის განმავლობაში ჩვენამდე მოღწევის საშუალება ჰქონდა. ჰორიზონტს მიღმა გამოსხივებული სინათლე ჩვენამდე არ მოსულა და სამყაროს გაფართოების გამო



შეიძლება ვერც ვერასდროს მოაღწევს. ასე რომ, ჰორიზონტის არსებობა ხსნის ბნელი ღამის ცის პარადოქსს, მაგრამ არ იძლევა პასუხს შეკითხვაზე: უსასრულოა თუ არა სამყარო? დიახ, ჩვენი ხედვის არე შემოსაზღვრულია, მაგრამ ეს არ ნიშნავს, რომ ჰორიზონტს იქით სივრცე არ არსებობს. ოკეანეში გემზე მყოფი დამკვირვებელი, დედამიწის სფერული ფორმის გამო, მუდმივად აწყდება ჰორიზონტის პრობლემას. მაგრამ ოკეანის ჰორიზონტს მიღმა იმალება მთელი მიწიერი სამყარო კონტინენტების მრავალფეროვნებით.

შესაძლოა დავუშვათ, რომ ხილული სამყაროს ჰორიზონტს მიღმა ყოვლად ცარიელი უსასრულო სივრცეა, რადგან ამის შემოწმებას ჩვენ მაინც ვერასდროს შევძლებთ. მაგრამ გავიხსენოთ მატერიისა და რელიქტური მიკროტალღური ფონის საოცრად თანაბარი განაწილება მთელს ხილულ სამყაროში. თანაც CMB-ის თვისებები ერთნაირია სამყაროს არეებში, რომლებიც ერთმანეთთან მიზეზ-შედეგობრივ კავშირში არ არიან. ეს ფაქტი თავისთავად გვაფიქრებინებს, რომ ჰორიზონტის ხაზი არაა მკვეთრი გარდატეხის საზღვარი და რომ მატერიის განაწილება ჰორიზონტს იმიერ და ამიერ მსგავსია. სავარაუდოა, რომ ინფლაციური ეპოქის არსებობის გამო მატერიის ნაწილი ჰორიზონტს მიღმა უნდა დარჩენილიყო და ის ახლაც იქ უნდა იყოს.

არსებობს ერთი მარტივი მოსაზრება, რომელიც ართულებს უსასრულო სამყაროს არსებობის წარმოდგენას. უსასრულო სამყარო ნიშნავს, რომ სამყაროს გარდა არაფერი არსებობს, ყველგან და ყოველთვის სამყაროა. მაგრამ ექსპერიმენტულად დანამდვილებით ვიცით, რომ სამყარო ფართოვდება. მნელი წარმოსადგენია სამყარო, რომელიც ერთდროულად უსასრულოცაა და ფართოვდება კიდევ. სამყარო, რომელიც ფართოვდება, სასრული უნდა იყოს და ის უსათუოდ რაიმეში უნდა ფართოვდებოდეს. მაგრამ აქაც კი, ჩვენი ყოველდღიური გამოცდილება შეიძლება გვღალატობდეს, ვინაიდან ზოგიერთი თეორიული მოდელის თანახმად, გამორიცხული არაა, რომ ინფლაციას სასრულ სივრცეში უსასრულო სამყარო გაეჩინა, თუკი სივრცული განზომილებები მრუდდება უსასრულო დროითი განზომილებისკენ.

რა შეიძლება იყოს ის, რაშიც სასრული თუ უსასრულო სამყარო ფართოვდება? ამ კითხვაზე ექსპერიმენტული პასუხის მიღება შეუძლებელია, ჩვენ ჩვენი სამყაროს სასრულ ჰორიზონტში ვართ მომწყვდეული და მას ვერასოდეს გავცდებით. სამაგიეროდ არსებობს მრავალი თეორიული მოდელი, რომელთა ფარგლებში ამ კითხვაზე სხვადასხვა პასუხის გაცემა შესაძლებელია.

### 5.3 უნიკალურია თუ არა სამყარო?

ცხადია, რომ ჩვეულებრივი, ადამიანური თვალსაზრისით, ჩვენი სამყარო უნიკალურია და საწინააღმდეგოს მტკიცება ერთობ რთულია. ჩვენ მხოლოდ უნიკალური პირობების საოცარი თანხვედრის გამო ვარსებობთ. რომელი ერთი ჩამოვთვალოთ? აღსაქმელად მნელი – ოთხი ძირითადი ურთიერთქმედების ინტენსივობათა და ელემენტარულ ნაწილაკთა მასათა თანაფარდობები, ან იქნებ სხვადასხვა ფუნდამენტური მუდმივების გასაოცრად შეთავსებადი მნიშვნელობები? თუ ჩვენი შეგრძნებისთვის უფრო ადვილად მისაღები – მზის თვისებები და დედამიწაზე თხევადი წყლის არსებობის მათთან დაკავშირებული პირობები?

არადა, სამყაროს თვისებათა ფუნდამენტური პარამეტრების მნიშვნელობები უფრო შემთხვევით რიცხვებს გვაგონებს, ვიდრე ბუნების ჰარმონიის ღრმა გამოვლინებას. მაგალითად, ელექტრონის მასა დაახლოებით ორიათასჯერ ნაკლებია პროტონის მასაზე,

რომელიც W-ბოზონის მასას დაახლოებით ასჯერ ჩამოუვარდება. ეს უკანასკნელი კი ფუნდამენტურ პლანკის მასაზე 17 რიგით ნაკლებია. დიდი ხნის წინ იქნა აღნიშნული, რომ ელექტრონის მასის, ან რომელიმე ფუნდამენტური მუდმივის, შედარებით მცირე (2-3-ჯერ) ცვლილებაც კი, სამყაროში ჩვენთვის ცნობილი სიცოცხლის აღმოცენებას შეუძლებელს გახდიდა.

ამ და ზოგიერთმა სხვა არგუმენტმა გამოიწვია ანტროპული პრინციპის ვარიანტების ფორმულირება. ძლიერი ანტროპული პრინციპის თანახმად სამყაროს პარამეტრების შეთავსებადობა განპირობებულია გონიერი სიცოცხლის აღმოცენების აუცილებლობით. სუსტი ანტროპული პრინციპის თანახმად კი, საწყისი პირობების მრავალი არჩევანის არსებობის შემთხვევაში, სამყაროს პარამეტრების საოცარ შეთავსებადობაზე საუბარი შესაძლებელია მხოლოდ იქ, სადაც გონიერი სიცოცხლე წარმოიშვა და გადარჩა. თითქოსდა, ორივე შემთხვევაში, სამყარო არის ასეთი იმიტომ, რომ მხოლოდ ასეთ სამყაროში შეიძლებოდა გაჩენილიყო სიცოცხლე და გონიერი ადამიანი. მაგრამ პირველ შემთხვევაში, ანტროპული პრინციპი ითხოვს მხოლოდ გონიერი სიცოცხლის შემცველი სამყარო(ები)ს არსებობას, ხოლო მეორე შემთხვევაში, უნდა არსებობდეს სამყაროები ან სამყარო(ები)ს არეები, სადაც გონიერი სიცოცხლის არსებობა არაა აუცილებელი.

დიახ, ჩვენი სამყარო გამორჩეულია იმიტომ, რომ ჩვენ ვარსებობთ. მაგრამ მეცნიერები ვერაფრით ვერ დაკმაყოფილდებიან ჩვენი არსებობისთვის აუცილებელი პირობების უბრალო ან სასწაულებრივი თანხვედრის არგუმენტით. ისინი იმედოვნებენ, რომ სამყაროში ამჟამად შექმნილ პირობებს, რომლებიც თითქოს საგანგებოდაა ჩვენი არსებობისთვის თავმოყრილი, დროთა განმავლობაში მეცნიერული ახსნა მოეძებნება. კოსმოლოგები ამუშავებენ სხვადასხვა იდეებს და, როგორც უკვე აღვნიშნეთ, ქმნიან სხვადასხვა თეორიულ მოდელებს. მეცნიერებს კარგად ესმით, რომ ფუნდამენტური თეორიების ექსპერიმენტული მონაცემებით შემოწმებისას, არჩევანის არსებობით გამოწვეული ეფექტების უგულებელყოფას შესაძლოა, არასწორი დასკვნების გამოტანა მოჰყვას. სწორედ ამიტომ, მეცნიერები ცდილობენ პასუხი გასცენ კითხვას, რომელიც პარაგრაფის სათაურში დასმული კითხვისგან განსხვავებით, ასე ჟღერს: „**ერთადერთია თუ არა სამყარო?**“

## 5.4 სამყაროთა შესაძლო მრავალფეროვნება

სამყაროს ერთადერთობის შესახებ წარმოდგენების შესარყევად, მოვიყვანოთ ლატარეის გათამაშებაში მონაწილეობის მისაღებად ადამიანთა მოზიდვის საკმაოდ იაფი ხერხი, რომელსაც რეკლამის ოსტატები ხმარობენ. დევიზი ძალიან სწორხაზოვანია: „გამარჯვებულთა 100%-მა ერთხელ მაინც მიიღო ლატარეის გათამაშებაში მონაწილეობა, თქვენ რაღას უცდით?!“. თუ შემოვიფარგლებით მხოლოდ ლატარეაში გამარჯვებული ადამიანების ერთობლიობით, ცხადია, ერთხელ მაინც ყველამ სცადა ბედი. მაგრამ ამ ბედისმწყალობელ ინდივიდუუმთა გვერდით არსებობს გაწილებული ადამიანების შეუდარებლად უფრო დიდი რაოდენობა – ადამიანებისა, რომლებმაც ლატარეის ორგანიზატორთა სიმდიდრე შექმნეს. საბედნიეროდ, უმრავლესობა ადვილად ახერხებს იმის განჭვრეტას, თუ რა იმალება ასეთი იაფფასიანი ხრიკის უკან.

სრული ჭეშმარიტებაა, რომ „გონიერი სიცოცხლე, რომელმაც მარცვლეული მეცნარეები და საქონელი მოიშინაურა, შექმნა რთულ სოციალურ ურთიერთობებზე დამყარებული საზოგადოება, მოიგონა ვიოლინო, ააგო დიდი ადრონული კოლაიდერი,

მხოლოდ დედამიწაზე არსებობს“. მაგრამ ამ ჭეშმარიტების გამოყენება ჩვენი სამყაროს ერთადერთობის დასამტკიცებლად ხომ არ გაგონებთ რამეს?

„სამყაროებთან ურთიერთობის“ ჩვენი გამოცდილება შემოსაზღვრულია სამყაროთი, რომელშიც ვარსებობთ. ჩვენ გაგვაჩნია ფიზიკური კანონების ერთობლიობის ერთადერთი ნიმუში. დღესდღეობით ჩვენთვის ცნობილია გონიერი სიცოცხლის ერთადერთი სახე. ესოდენ შემოფარგლული გადასახედიდან, გვაქვს თუ არა იმის უფლება, რომ უპირობოდ განვაცხადოთ, სამყარო მხოლოდ ასეთი შეიძლება იყოს და საერთოდ, ის ერთადერთია?

კაცობრიობის ხედვის არე გამუდმებით იზრდება. ჯერ იყო და უძველეს დროში დედამიწის რადიუსი გაიზომა, შემდგომ რენესანსის ეპოქაში – მზის სისტემისა; წინა საუკუნეში გალაქტიკების „სიგრძე-სიგანე“ შეფასდა, ამ საუკუნეში კი, მიკროტალღური რელიქტური ფონის მონაცემებზე დაყრდნობით, ხილვადი სამყაროს ჰორიზონტის ფარგლები დაზუსტდა.

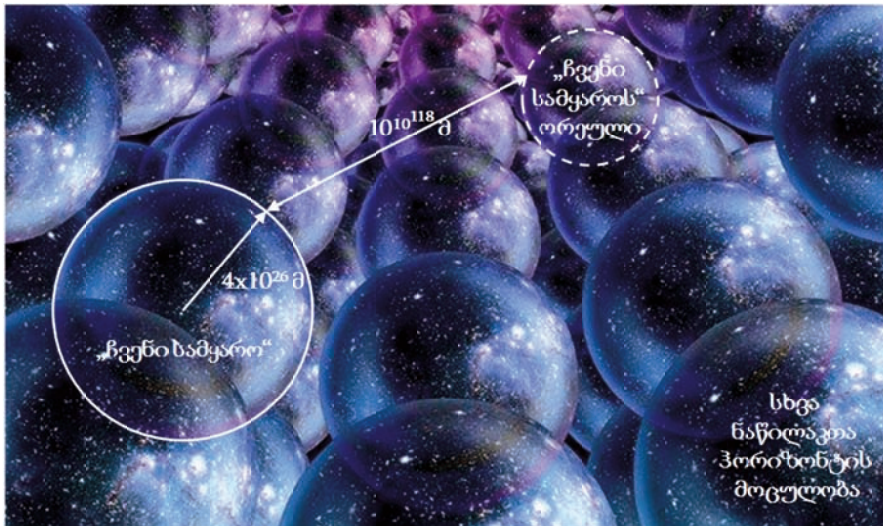
ყველაზე შორეული ობიექტი, რომლის ხილვა პრინციპშია შესაძლებელი, ჩვენგან  $4 \times 10^{26}$  მეტრით არის დაშორებული. ეს ის მანძილია, რომელიც სინათლის სხივმა 13.8 მილიარდი წლის განმავლობაში დაფარა სამყაროს გაფართოებით გამოწვეული მანძილების ზრდის გათვალისწინებით. ასეთი რადიუსის სფეროს უწოდებენ ნაწილაკთა ჰორიზონტის მოცულობას, ან დამზერად სამყაროს ან სულაც უფრო მარტივად – „ჩვენს სამყაროს“ ვიწრო გაგებით.

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, „ჩვენი სამყარო“ არ არის ჰორიზონტის ხაზით შემოფარგლული კუნძული და ჰორიზონტს მიღმა მატერიისა და ენერგიის განაწილება, სივრცე-დროის თვისებები, დიდი ალბათობით, ისეთივე უნდა იყოს, როგორც „ჩვენს სამყაროში“. მაშასადამე, სამყაროს მრავალფეროვნებათა ყველაზე მარტივ ვარიანტად გვევლინება გაფართოებად „ზესამყაროში“ ნაწილაკთა ჰორიზონტების მოცულობათა არსებობა. ასეთ მოცულობებში უნდა მოქმედებდეს ისეთივე ფიზიკური კანონების ერთობლიობა, როგორიც „ჩვენს სამყაროს“ ახასიათებს. ოღონდ, დიდი აფეთქების შემდგომი ინფლაციური ეპოქის შედეგად, მათი საწყისი პირობები განსხვავებული იყო. სხვა ნაწილაკთა ჰორიზონტებით შემოფარგლული მოცულობები და „ჩვენი სამყარო“ განსხვავებულად ვითარდებოდნენ და ვითარდებიან სწორედ საწყის პირობებში განსხვავების გამო.

სხვათაშორის, სამყაროთა მრავალფეროვნების ამ მარტივ მოდელთან დაკავშირებულია ერთი საკმაოდ სახალისო შესაძლებლობა. გარკვეული ალბათობით, ინფლაცია წარმოქმნის ყველა დასაშვებ საწყის პირობას. უსასრულო ზესამყაროს პირობებში არსებობს გარკვეული, სავსებით განსაზღვრული ალბათობა იმისა, რომ ორი ჰორიზონტის მოცულობის როგორც საწყისი პირობები, ასევე მათი განვითარების გზები ერთნაირი აღმოჩნდეს. ამიტომ ნუ გაგიკვირდებათ, რომ სადმე, რომელიმე სამყაროში თქვენი ორეული წინამდებარე წიგნს კითხულობდეს. ნეტა, როგორი იქნება მისი შეგრძნება წაკითხულთან დაკავშირებით, რამდენად მსგავსი თუ განსხვავებული თქვენი რეაქციისგან?

ჩვენ უკვე არაერთხელ ვახსენეთ ინფლაცია. გაგახსენებთ, რომ ინფლაციას კოსმოლოგიაში უწოდებენ დიდი აფეთქების შემდგომ სამყაროს ზესწრაფი გაფართოების ეპოქას, რომლის დროსაც სივრცის გაფართოების სიჩქარე სინათლის სიჩქარეს აჭარბებდა. ზუსტად ამ ეპოქის არსებობასთან აკავშირებენ ჩვენი სამყაროს

რამდენიმე ძირითად თვისებას, მაგალითად, მატერიის განაწილების ერთგვაროვნებასა და სივრცის სიბრტყელს.



სურ. 95 პარალელური სამყაროები – შორეული არეები, რომელთა შორის მიზეზ-შედეგობრივი კავშირი არ არსებობს  
© D. Van Ravenswaay/Science Photo Library

ელემენტარული ნაწილაკების თეორიების დიდი ნაწილი ითვალისწინებს ისეთი ველების არსებობას, რომლებსაც შეუძლიათ ინფლაციის გამოწვევა: სივრცის ექსპონენტური კანონით გაფართოება და შემდეგ ასეთი გაფართოების დასრულება. ქაოტური ინფლაციის სახელით ცნობილი ერთ-ერთი გავრცელებული მოდელის თანახმად, ინფლაცია შეიძლება დასრულდეს სივრცის რომელიმე არეში, მაგრამ სივრცის სხვა არეში, კვანტური ფლუქტუაციების შედეგად, იგი შეიძლება გრძელდებოდეს ან ჩნდებოდეს და მიმდინარეობდეს კიდევ უფრო მზარდი ტემპებით, რაც ერთი ინფლაციური „ბუშტიდან“ ახალი ინფლაციური „ბუშტის“ წარმოქმნას იწვევს. ინფლაციური ეპოქის დასრულების არეები წარმოადგენენ სამყაროებს, სადაც „ვითარებათა მდორე განვითარების“ შედეგად, ხელშემწყობი პირობების თავმოყრის შემთხვევაში, გონიერი სიცოცხლის აღმოცენება არ არის გამორიცხული.

ქაოტური ინფლაციით გაჩენილი სამყაროები გაცილებით მრავალფეროვანი უნდა იყოს, ვიდრე ერთსა და იმავე ზესივრცეში ნაწილაკთა ჰორიზონტებით შემოფარგლული სამყაროები. საკმე იმაშია, რომ გონიერი დამკვირვებლები ბინადრობენ შედარებით „დამშვიდებულ“ სამყაროებში, რომელთა მდგომარეობა, თეორიული მოდელების თანახმად, აღიწერება დაბალი ენერგიების ფიზიკის კანონებით. მაღალი ენერგიების მდგომარეობიდან დაბალი ენერგიების მდგომარეობაში გარდამავალ გზაზე თავს იჩენს ე.წ. სიმეტრიების რღვევა, როდესაც ხდება სხვადასხვა ურთიერთქმედებათა დიფერენციაცია, სივრცული განზომილებების ზომების ცვლილება, ელემენტარულ ნაწილაკთა რაოდენობათა და მათი თვისებების განსაზღვრა, ფუნდამენტური მუდმივების მნიშვნელობათა დაფიქსირება. ჩვენს სამყაროში, მაგალითად, ელემენტარულ ნაწილაკთა სამი ოჯახია, სამი გამოკვეთილი სივრცული განზომილება, სინათლის სიჩქარე დაახლოებით 299 792 კმ/წმ, და ა.შ. რომელიმე სხვა სამყაროში სივრცული განზომილებების რიცხვი შეიძლება ოთხის ტოლი აღმოჩნდეს. ამდენად,



ქაოტური ინფლაციით გაჩენილი სამყაროები მხოლოდ საწყისი პირობებით როდი განსხვავდებიან ერთმანეთისგან, არამედ გამოკვეთილი სივრცული განზომილებების რიცხვით, ანდა ელემენტარულ ნაწილაკთა ოჯახების რაოდენობით და სხვ. თუმცა სამყაროებში მოქმედი ფიზიკური კანონები უნდა აღიწერებოდეს ერთი და იგივე თეორიული მოდელის ფარგლებში, მათი რეალური გამოვლინება სხვადასხვა უნდა იყოს. მაგალითად, თუ ჩვენს სამგანზომილებიან სამყაროში გრავიტაციული ძალა მანძილის კვადრატის უკუპროპორციულია, ოთხგანზომილებიან ჰიპოთეტურ სამყაროში იგი მანძილის კუბის უკუპროპორციული იქნება.



სურ. 96 ქაოტური ინფლაციით გაჩენილი პარალელური სამყაროები  
© Scientific American & Slim Film

ჩვენს სამყაროში თავმოყრილი გამორჩეული პირობების ასახსნელად არსებობს ერთ-ერთი შესაძლებლობა, რომელიც თავისი არსით ქაოტური ინფლაციით წარმოქმნილი სამყაროების თვისებათა მრავალფეროვნების საკმაოდ მსგავს შედეგს იძლევა. წარმოიდგინეთ სამყაროთა გაჩენისა და განადგურების უწყვეტი ციკლი, მაგალითად დიდი აფეთქების, ინფლაციის, გაფართოების, შეკუმშვისა და შემდგომი კოლაფსის ფაზებით. ყოველი ახალი ციკლის დროს შესაძლებელია წარმოიქმნას განსხვავებული თვისებების მქონე სამყარო.

კიდევ სხვა მოდელების თანახმად, სამყაროთა გაჩენა შესაძლებელია არა ინფლაციის მექანიზმით, არამედ შავი ხვრელების მეშვეობით. სიმების თეორიის ერთ-ერთი პოპულარული ვარიანტი ითვალისწინებს სამგანზომილებიანი სამყაროების ერთმანეთის პარალელურ არსებობას. ისინი ერთმანეთისგან ერთი განზომილებით უნდა იყვნენ გადანაცვლებული სამზე მეტი განზომილებების მქონე ზესამყაროში. ამ შემთხვევაში გამორიცხებული არაა, რომ გრავიტაცია სამყაროებს შორის „ჟონავს“, და მაშასადამე, სამყაროები ერთმანეთთან ურთიერთქმედებენ.

## 5.5 დროის ათვლის დასაწყისი

ბავშვობიდან დაგროვებული გამოცდილება გვასწავლის, რომ ყოველდღიური ცხოვრება მიზეზ-შედეგობრივი კავშირით იმართება. ჩვენ ვიცით, რომ თავისით არაფერი ჩნდება, ნებისმიერ მოვლენას მისი გამომწვევი წინამორბედი მოვლენა უნდა უსწრებდეს. მითუმეტეს, რაიმეს უნდა მიეცა ბიძგი დიდი აფეთქებისთვის, რომელსაც ჩვენი სამყაროს ჩამოყალიბება მოჰყვა.

შეგვიძლია წარმოვიდგინოთ, რომ ჩვენი სამყარო უსასრულოდ არსებობდა და მას არ ჰქონდა დასაწყისი. ასეთ წარმოდგენას მარტივი მოსაზრება ეწინააღმდეგება. უსასრულო



დროის განმავლობაში, ნებისმიერი ფიზიკური პროცესი, რომლის მსვლელობის ალბათობა არანულოვანია, უკვე უნდა წარმართულიყო და სამყაროს უნდა მიეღწია საბოლოო მდგომარეობისთვის, როდესაც ყველაფერი მოსახდენი უკვე მოხდა. საბედნიეროდ, ჩვენი სამყარო ჯერ კიდევ აღსავსეა მოულოდნელობებით. გარდა ამისა, დანამდვილებით ვიცით, რომ სამყარო ფართოვდება და მისი ისტორიის ბოლოქარი დასაწყისის, დიდი აფეთქების, უტყუარი ნიშნებიც სახეზეა. ამიტომ, ჩვენი სამყაროს უსასრულო არსებობის არგუმენტი მიუღებელი უნდა იყოს.

კოსმოლოგიაში, არც თუ ისე დიდი ხნის წინ, ბატონობდა დიდი აფეთქების მოდელი, რომლის მიხედვით სივრცე და დრო სამყაროს განუყოფელი ატრიბუტია და ისინი სამყაროსთან ერთად გაჩნდნენ. ასეთი წარმოდგენის ფარგლებში, დიდ აფეთქებამდე, დრო და სივრცე უბრალოდ არ არსებობდა. შეგვიძლია წარმოვიდგინოთ, რომ დიდ აფეთქებამდე იყო „არაფერი“ (თუ გნებავთ, „უსასრულო არაფერი“) და რომ სამყარო ამჟამად ამ „არაფერში“ ფართოვდება.

ჩვენი სამყაროს ერთადერთობას, როგორც წინა პარაგრაფში უკვე აღვნიშნეთ, მივყავართ ანტროპულ პრინციპამდე, რომელიც მეცნიერული თვალსაზრისით არადამაკმაყოფილებელია. მაგრამ თავი დავანებოთ ამ წინააღმდეგობას და დავსვათ კითხვა, რატომ უნდა გაჩენილიყო სპონტანურად სამყარო, დრო და სივრცე?

პასუხი შეიძლება კვანტური მექანიკის თეორიაში ვეძოთ. კვანტური ფიზიკის კანონები, რომლებიც ელემენტარული ნაწილაკებისა და ატომების მასშტაბებზე მოქმედებს, საკმაოდ განსხვავებულია ჩვენთვის ჩვეული მიზეზ-შედეგობრივად დაკავშირებული მაკრო ფიზიკის კანონებისგან. კვანტურ სამყაროში მოქმედებს განუზღვრელობის პრინციპი, რაც კერძოდ, ამა თუ იმ პროცესის წარმოქმნის დროისა თუ ადგილმდებარეობის ზუსტ განსაზღვრას შეუძლებელს ხდის. მიკრო სამყაროში პროცესების განსაზღვრული მსვლელობა იცვლება მათი მსვლელობის ალბათობებით. კვანტური მექანიკის კანონების თანახმად, ნაწილაკთა და ანტინაწილაკთა წყვილების სპონტანური გაჩენა არ არის ზეზუნებრივი მოვლენა. უბრალოდ, ასეთი მოვლენის ალბათობა არსებობს, ამიტომ იგი დასაშვებია და მისი განხორციელების დამზერის საშუალებაც არსებობს.

ცხადია, რომ მიკრო მასშტაბებზე ბუნების ძირეული სპონტანურობის თვისებებიდან გამომდინარე, სამყაროს გაჩენის ახსნამდე გრძელი გზაა გასავლელი. მაგრამ სამყაროს არსებობის პირველ ეტაპებზე კვანტური მექანიკის კანონების უგულებელყოფა დაუშვებელია, ვინაიდან ჩველი სამყაროს „უზომო“ სიმცირის გამო კვანტურ ეფექტებს გადამწყვეტი გავლენა უნდა ჰქონოდათ. ასე ჩამოყალიბდა მეცნიერების მიმართულება კვანტური კოსმოლოგია.

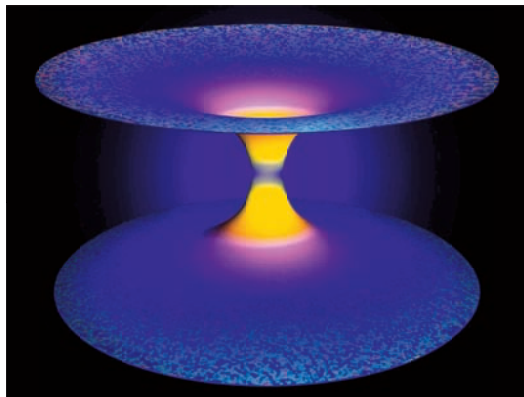
კვანტური ეფექტების გათვალისწინებით, ჯეიმს ჰარტლი (James Burkett Hartle, 1939) და სტივენ ჰოუკინგი საკმაოდ მოულოდნელ დასკვნამდე მივიდნენ. მათი მოდელის თანახმად, კვანტური განუზღვრელობა ვრცელდება აინშტაინის მიერ შემოთავაზებულ სივრცე-დროის ერთობლიობაზეც. ანუ კვანტურ მასშტაბებზე შესაძლებელია დროისა და სივრცის რაობის სახეცვლილება, დრომ შეიძლება სივრცის რომელიმე განზომილების თვისებები მიიღოს – „გასივრცდეს“, და რაც უფრო საინტერესოა, სივრცის რომელიმე განზომილებას დროის თვისებები გაუჩნდეს – „გადროვდეს“.

გადროება არ არის უცაბედი პროცესი, ანუ მისი შედეგი არ აღიწერება როგორც „არ იყო – არის“. გადროება თანამიმდევრულ სახეცვლილებათა უწყვეტი პროცესია. ჰარტლი-ჰოუკინგის მოდელის თანახმად, დიდი აფეთქება არ ყოფილა ჟამთასვლის

მყისიერი ჩართვა, არამედ უწყვეტი პროცესი გახლდათ. ჩვენი მასშტაბებიდან ყველაფერი უეცრად მოხდა, სამყარო, სივრცე და დრო უცხად წარმოიქმნა, მაგრამ თუ სამყაროს ისტორიას უკან ავუყვებით, სანამ იგი ჯერ კიდევ მიკროსკოპული იყო, აღმოვაჩენთ გარდაქმნათა უწყვეტ პროცესს, რომელსაც საწყისი ნულოვანი წერტილი არ გააჩნია. საკითხავია, გაკმაყოფილებთ თუ არა კვანტურ უცნაურობებზე დაფუძნებული ასეთი ახსნა?!

როგორც მიხვდით, ფიზიკური კანონების აღწერა უზარმაზარ პრობლემას აწყდება, როდესაც დრო ნულის ტოლია. პირველი ნანო-ნანო-ნანო-ნანო-წამის შემდგომ განვითარებულ მოვლენებზე მეცნიერებს ცხადი წარმოდგენა აქვთ, მათი მოდელირება საკმაოდ კარგი სიზუსტით ხერხდება. მაგრამ ნულოვანი, და მით უმეტეს, უარყოფითი დრო კოსმოლოგებს თავსატეხს უჩენს.

შექმნილი მდგომარეობიდან თავის დაღწევა გამორიცხული არ არის ე.წ. გრავიტაციის მარყუჟოვანი მოდელის საშუალებით (Loop Quantum Gravity), რომელიც სამყაროს განვითარების საწყისი ეტაპების ასახსნელად აინშტაინის ზოგადი ფარდობითობის თეორიას კვანტური მექანიკის კანონებით ამდიდრებს. მოდელის თანახმად, სამყარო არ გაჩენილა ნულოვანი ზომის არიდან – უსასრულო სიმკვრივისა და უსასრულო ენერგიის მქონე წერტილიდან. სამყარო თავის ბოხოქარ საწყისს სასრული ზომის არიდან იწყებს, რაც უსასრულობების პრობლემასაც ხსნის, მათემატიკური აპარატის ნულოვანი დროის შეზღუდვებსაც თავს არიდებს და უარყოფით დროში „გახედვის“ საშუალებასაც იძლევა.



სურ. 97 დიდი ნახტომი

© A. Corichi, JP Ruiz

მარყუჟოვან მოდელს მივყავართ შეკუმშვისა და გაფართოების თანამიმდევრულ ფაზებში გარდამავალ სამყარომდე. შეკუმშვის პერიოდის გარკვეულ ეტაპზე სამყარო იმდენად მცირდება, რომ კვანტური პროცესების დომინირება იწყება. მათ მიერ გამოწვეული უკიდურესი პირობების ზეგავლენით სივრცე-დროის თვისებები იმდენად იცვლება, რომ გრავიტაცია განმზიდველი ხდება და არა მიმზიდველი. შედეგად, სამყარო კი არ ქრება ნულოვანი ზომის წერტილში, როგორც ამას ზოგადი ფარდობითობის თეორია ითვალისწინებს, არამედ ზესწრაფ გაფართოებას იწყებს, რაც ახალი სამყაროს გაჩენის საწინდარია. ამ პროცესს, დიდი აფეთქებიდან განსხვავებით, დიდ ნახტომს (Big Bounce) უწოდებენ.

მაშასადამე, მარყუჟოვანი მოდელის თანახმად, ჩვენს სამყაროს წინამორბედი სამყარო ჰყავდა. მაგრამ ჩვენი სამყარო მისი წინამორბედის იდენტური არ არის,

ვინაიდან დიდი ნახტომის პერიოდში, კვანტური განუზღვრელობის გამო, მშობელი სამყაროს ყველა თვისება შეიღობილ სამყაროს უცვლელად არ გადაეცემა. ამდენად, მოდელი ანტროპული პრინციპისგანაცაა დაცული.

წინა პარაგრაფში განხილულ სამყაროთა მრავალფეროვნებასთან მიმართებაში, შეგვიძლია დავუშვათ, რომ ჩვენი სამყარო (ვიწრო გაგებით) იმყოფება ზესამყაროს ერთ-ერთ არეში. ვინაიდან ზესამყაროს თითოეულ არეს როდესღაც ჰქონდა დასაბამი, მისი გონიერი დამკვირვებლისთვის, თუ კი ასეთი არსებობს, აზრი აქვს დროის ათვლის საწყის მომენტზე საუბარს. ჩვენ ვიცით, რომ ჩვენ სამყაროში დიდი აფეთქება, ან თუ გნებავთ, დიდი ნახტომი, 13.8 მილიარდი წლის წინ მოხდა. სწორედ ამ მომენტიდან აითვლება ყველაფერი, რაც ხდებოდა და კიდევ მოხდება ჩვენს სამყაროში. მაგრამ ზესამყაროში ასეთი პროცესები შემდგომი ინფლაციითა და ქვესივრცეების ან პარალელური სამყაროების ფორმირებით, ერთმანეთთან ყოველგვარი მიზეზ-შედეგობრივი კავშირის გარეშე შეიძლება განუწყვეტლივ ხდებოდეს. აქედან გამომდინარე, აქვს თუ არა აზრი ზესამყაროსთან მიმართებაში დროის ათვლის მომენტის ცნებას? იქნებ სწორედ ამიტომ შეიძლება ჩაითვალოს ზესამყარო უსასრულოდ სივრცესა და დროში?

## 5.6 სამყაროს „ქვაკუთხედის“ ძიების გზაზე

ორი კითხვა, რომლებითაც, როგორც წესი, ასტრონომებსა და კოსმოლოგებს ჟურნალისტები და მეცნიერებით დაინტერესებული არასპეციალისტები მიმართავენ, დაახლოებით ასე ჟღერს: რა იყო დიდ აფეთქებამდე, რა არის სამყაროს იქით? წინა პარაგრაფებში სამყაროთა შესაძლებელ მრავალფეროვნებაზე საუბრისას, თითქოსდა გავვეცით დასმულ კითხვებს გულახდილი პასუხი: არ ვიცით. მაგრამ ასეთი პასუხი არ არის მეცნიერების სისუსტის გამოვლინება. პირიქით, შეიძლება ითქვას, რომ ის წინ გადადგმული ნაბიჯია.

მეცნიერების ძლიერება სწორედ იმაში გამოიხატება, რომ იგი არ უშინდება დამკვიდრებული წარმოდგენების ექვის ქვეშ დაყენებას და გადაუჭრელ კითხვებზე პასუხების ძიებისას, არ ერიდება „ავტორიტეტების“ შერყევას. უპირველეს ყოვლისა, მეცნიერები ძალიან დიდი გულმოდგინებით ამოწმებენ მიღებული ექსპერიმენტული მონაცემების სიზუსტეს. შემდგომ ამ მონაცემებით თეორიული მოდელების შემოწმება ხდება. თუ დაკვირვებები ეწინააღმდეგება მოდელებს, რაოდენ ავტორიტეტულიც არ უნდა იყვნენ ისინი, მეცნიერები „კრიზისის“ გამოცხადებას არ ერიდებიან და ახალი მოდელების შექმნას და მათ გადამოწმებას იწყებენ.

ამ მხრივ კოსმოლოგია შესანიშნავ მაგალითს იძლევა. დიდი აფეთქების მოდელი საწყისს იღებს წინა საუკუნის 20-ანი წლების მიწურულს, მას შემდეგ, რაც ედუინ ჰაბლმა დაადგინა, რომ სამყარო ფართოვდება. მარტივი მოდელი საკმაოდ კარგად აღწერდა ყველაფერს, რისი დამხერაც კოსმოსში იყო შესაძლებელი. მაგრამ 1981 წელს ალან გუტმა (Alan Harvey Guth, 1947), სამყაროში მატერიის განაწილების ერთგვაროვნებისა და მასში არსებული დიდი მასშტაბის სტრუქტურების ასახსნელად, მოდელი ინფლაციის მექანიზმით გაამდიდრა.

ერთის მხრივ, თითქოს დიდი აფეთქების მოდელის ტრიუმფალური სვლა უნდა გაგრძელებულიყო, ვინაიდან ექსპერიმენტულ დაკვირვებებთან იგი იყო და დღესაც სრულ თანხვედრაშია. თუმცა მოდელი ვერ ხსნის სამყაროში მიმდინარე პროცესების მეტად ზუსტ, ნატივ „შეხმატკბილებას“, რომელიც თითქოსდა საგანგებოდ, გონიერი

სიცოცხლის გაჩენისთვისაა მორგებული. ამიტომ მეცნიერებმა წარმატებული მოდელი ეჭვის ქვეშ დააყენეს: რატომ გამოიღო ინფლაციამ ჩვენი გაჩენისთვის ესოდენ ხელსაყრელი შედეგები? მისი, ინფლაციის, მსვლელობის შესაძლო განვითარებებიდან მხოლოდ უმცირესობა დაგვირგვინდებოდა სამყაროში ისეთი მსხვილმასშტაბიანი სტრუქტურებით, რომლებსაც დღესდღეობით ვაკვირდებით. ან იყო კი ინფლაცია აუცილებელი? სამყაროს განვითარების შესაძლო გზებიდან, რომლებიც სამყაროს ესოდენ ერთგვაროვან მდგომარეობამდე მიიყვანდნენ, მხოლოდ პაწია უმცირესობა გადის ინფლაციურ მონაკვეთს. იგივე შედეგის – ერთგვაროვანი სამყაროს მისაღებად უმრავლეს შემთხვევაში ინფლაცია, ალბათ, სულაც არ იყო საჭირო.

ცხადია, რომ მეცნიერები ვერ დაკმაყოფილდებოდნენ მოდელით, რომელიც მხოლოდ აღნუსხავს ხელსაყრელი პირობების უჩვეულო თანხვედრას და არ ხსნის მას. ამიტომაც დაიწყო დიდი აფეთქების ინფლაციური მოდელის ახალი მექანიზმებით გამდიდრების მცდელობები, ახალი მოდელების ჩამოყალიბება და ახალი ინტერდისციპლინარული თეორიების შემუშავება. წინა პარაგრაფებში ასეთი მცდელობების რამდენიმე მაგალითი შემოგთავაზეთ.

ამავე დროს, მეცნიერები ყოველთვის განასხვავებენ მეტაფიზიკურ წარმოდგენებსა და მკაცრ ლოგიკაზე და ზუსტ მათემატიკურ აპარატზე დაფუძნებულ თეორიებს, რომლებიც აუცილებლად გამყარებულია მათი ექსპერიმენტული დასაბუთების ან უარყოფის პერსპექტივებით.

კარგი მაგალითია სიმების თეორიაზე დაფუძნებული „დიდი ნახტომის“ კოსმოლოგიური მოდელი, რომელიც შემოთავაზებული იყო პოლ სტეინჰარდტისა (Paul J. Steinhardt, 1952) და ნეილ ტუროკის (Neil Turok, 1958) მიერ. სიმების თეორია თავისთავად არაჩვეულებრივად მომხიბლავია, ვინაიდან ის ოთხი ფუნდამენტური ურთიერთქმედების გაერთიანების პერსპექტივას იძლევა. სიმების თეორიის მიხედვით, სივრცე მრავალგანზომილებიანია, რომელთაგან უმრავლესობა იმდენად მცირეა, რომ ჩვენს მასშტაბებში მათი არსებობა არ შეინიშნება. სტეინჰარდტისა და ტუროკის დიდი ნახტომის მოდელის თანახმად, სამყარო, მრავალგანზომილებიან სივრცეში, ძვეს სამგანზომილებიან „ბრანაზე“ (brane – multidimensional membrane). მის მახლობლად არსებობს სხვა მემბრანა, რომელიც მცირედაა გადანაცვლებული დამატებითი განზომილების მიმართულებით. სანამ მემბრანები დაშორებულია ერთმანეთისგან, მათი სამყაროები პრაქტიკულად მოკლებულია ყოველგვარ მატერიას. მაგრამ მემბრანების შეჯახებისას და შემდგომი ასხლეტისას გამოიყოფა უზარმაზარი ენერგია, რომლის ნაწილი მატერიად იქცევა. შემდგომ ბრანები ისევ სცილდებიან ერთმანეთს და დროის ამ პერიოდში კოსმოსი ფართოვდება.

როგორც ინფლაციური მოდელი, ასევე დიდი ნახტომის სიმების მოდელი, ითვალისწინებს რელიქტური გრავიტაციული ტალღების არსებობას. მაგრამ ინფლაციის დროს გაჩენილი სივრცე-დროის დამახინჯებები გაცილებით უფრო ძლიერი უნდა იყოს, ვიდრე დიდი ნახტომისას. თუ ინფლაციური რელიქტური გრავიტაციული ტალღების დამზერის შანსი პრინციპში არსებობს, დიდი ნახტომის გრავიტაციული ტალღები იმდენად სუსტია, რომ მათი დამზერა შეუძლებელია. ევროპული კოსმოსური მისია Planck-ი (იხ. პარაგრაფები 2.2, 4.3 და 4.10) მიკროტალღურ რელიქტურ ფონზე გრავიტაციული ტალღების ანაბეჭდს ეძებს. თუ ასეთი ანაბეჭდები დაიშვია, დიდი ნახტომის სტეინჰარდტისა და ტუროკის მოდელი დავიწყებას მიეცემა.

სხვათაშორის, გამორიცხული არაა, რომ Planck-ის მონაცემებზე დაყრდნობით შემოწმდეს კიდევ ერთი მოდელი, რომელიც გაფართოებადი სამყაროების შეჯახებებს ითვალისწინებს. ასეთ შეჯახებებს, გრავიტაციული ტალღების მსგავსად, მიკროტალღურ რელიქტურ ფონზე უნდა დაეტოვებინათ გარკვეული ფორმის ანაბეჭდი. WMAP-ის კოსმოსური მისიისა და BOOMERanG-ის საჭაერო ბუმტის ექსპერიმენტის (იხ. პარაგრაფი 4.3) მონაცემების ანალიზისას, ვაჰე გურზადიანმა (Vahe Gurzadyan, 1955) და როჯერ პენროუზმა (Roger Penrose, 1931) რელიქტურ ფონში აღმოაჩინეს შედარებით მცირეტემპერატურიანი არეები, რომლებსაც კარგად გამოკვეთილი კონცენტრული რგოლების ფორმა გააჩნიათ. მეცნიერები ასეთი რგოლების არსებობას მიაწერენ ჩვენი სამყაროს ზემასიურ შავ ხვრელთან შეჯახებას, რომელიც დიდ აფეთქებამდე მოხდა. ცხადია, რომ საბოლოო დასკვნამდე მონაცემებისა და მათი ანალიზის ხარისხი უნდა შემოწმდეს მეცნიერთა სხვა ჯგუფების მიერ. გარდა ამისა, ეს არაერთგვაროვნებები უნდა დააფიქსიროს Planck-ის მისიამაც, რომელსაც მის წინამორბედებთან შედარებით, გაუმჯობესებული ექსპერიმენტული მახასიათებლები გააჩნია.

კოსმოლოგიური მნიშვნელობის აღმოჩენები მოსალოდნელია დიდ ადრონულ კოლაიდერზეც (LHC, იხ. დანართი III), რომლის მახასიათებლები, მუშაობის სტაბილურ რეჟიმში გადასვლასთან ერთად, 2010 წლიდან დაწყებული, თვიდან თვემდე უმჯობესდება. ინტერდისციპლინარული კვლევების დიაპაზონი საკმაოდ ფართოა. LHC-ის ექსპერიმენტებს შეუძლია შეამოწმოს შედარებით დიდი, მილიმეტრამდე ზომის დამატებითი განზომილებების არსებობა, რომელსაც არ გამორიცხავს ე.წ. ADD მოდელი (შემოთავაზებულია ნიმა არკანი-ჰამედის (Nima Arkani-Hamed, 1972), სავას დიმოპულოსისა (Savas Dimopoulos, 1952) და გია დვალის (Gia Dvali, 1964) მიერ). კიდევ უფრო ალბათურია ლიზა რენდალისა (Lisa Randall, 1962) და რამან სუნდრუმის (Raman Sundrum) მოდელის მართებულობის გარკვევა გახსნილი დამატებითი განზომილებების შესახებ. განსაკუთრებულად უნდა გავუსვათ ხაზი ამ მიმართულებით წიგნის ერთ-ერთი ავტორის, მ. გოგბერაშვილის პიონერულ შრომებს, რომლებსაც გადამწყვეტი წვლილი მიუძღვით რენდალ-სუნდრუმის მოდელის ჩამოყალიბებაში. კოსმოლოგიური თვალსაზრისით, ალბათ ყველაზე დიდი იმედები დაკავშირებულია ფარული მატერიის რაობის გარკვევასთან. ფარული მატერიის ურთიერთქმედების ინტენსივობა უნდა ხვდებოდეს ელექტროსუსტი ურთიერთქმედების სკალის ფარგლებში, რომლის შესწავლა LHC-ის ერთ-ერთი ძირითადი ამოცანაა. ზემოაღნიშნულიდან ცხადია, რომ დიდი ადრონული კოლაიდერის დაგეგმილი ენერგიისა და ნათობის სამუშაო რეჟიმზე გასვლას, მაღალი ენერგიების ფიზიკის მეცნიერებთან ერთად, მოუთმენლად ელიან კოსმოლოგებიც – ამ არაჩვეულებრივი მანქანის საშუალებით სამყაროს მრავალი იდუმალეობით მოცულ ისტორიას, შესაძლებელია, უფრო მეტად აეხდებოდა ფარდა.

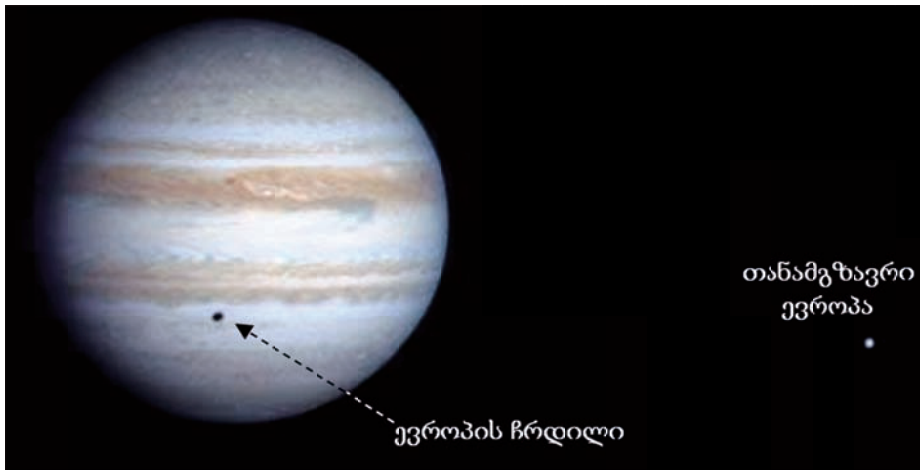
დასასრულს გვინდა საგანგებოდ აღვნიშნოთ, რომ დღეს თანამედროვე კოსმოლოგიაში იწყება დიდი ძვრების ერა, რომელიც მეცნიერთა მომავალ თაობას მოულოდნელობებით სავსე და ძალიან საინტერესო ასპარეზს უქადის, კაცობრიობას კი კიდევ ერთხელ მისცემს საშუალებას, იამაყოს ადამიანის დაუოკებელი ცნობისმოყვარეობითა და უსაზღვრო გამჭირაბობით.



## ბოლოთქმა: ფრენა სატურნისკენ

ბოლოსიტყვაობის სანაცვლოდ, დაკვირვებითი ასტრონომიის შთამბეჭდავი წინსვლისა და კოსმოსური კვლევების ტექნიკის მიღწევათა ხაზგასმის მიზნით, გადავწყვიტეთ, მოგვეთხორო ბოლო წლების ერთ-ერთ ყველაზე წარმატებულ კოსმოსურ ოდისეაზე: NASA-ს კოსმოსური ხომალდის Cassini-სა და მასზე დამონტაჟებული ავტონომური ზონდის Huygens-ის ფრენაზე სატურნისკენ.

Cassini-Huygens-ის სატურნისეული პროექტი დაიგეგმა NASA-ს კოსმოსური ხომალდის – Galileo-ს იუპიტერზე 2003 წელს წარმატებით დასრულებული მისიის შემდეგ. Cassini-მ ინფორმაციის შეგროვება სწორედ იუპიტერის მახლობლად გავლისას დაიწყო. მან შეისწავლა იუპიტერის გარე მაგნიტოსფერო. Galileo-ს კი ინფორმაცია იუპიტერის მაგნიტოსფეროს შიდა ნაწილზე ჰქონდა მოპოვებული.



სურ. 98 იუპიტერისა და მისი ერთ-ერთი თანამგზავრის – ევროპის სურათი, Cassini, 2000 წლის 4 ოქტომბერი  
© NASA/JPL/UA

Cassini-ს ეპოპეამდე სატურნის შემოგარენზე ინფორმაცია ძირითადად მეოცე საუკუნის სამოცდაათიან და ოთხმოციან წლებში იქნა მოპოვებული Pioneer 11, Voyager 1 და Voyager 2 კოსმოსური ხომალდების მიერ რგოლებიანი პლანეტის მახლობლად ჩაფრენისას.

Cassini-Huygens-ის მისიის ფინანსური ხარჯები ერთობლივად NASA-მ და ESA-მ გაიღეს. მისიის სახელი შეირჩა იტალიური წარმოშობის ფრანგი ასტრონომის ჯიოვანი კასინის (Giovanni Domenico Cassini, 1625-1712) და ჰოლანდიელი მეცნიერის კრისტიან ჰიუგენსის (Christiaan Huygens, 1629-1695) პატივსაცემად. ჰიუგენსმა 1655 წელს აღმოაჩინა სატურნის ყველაზე დიდი თანამგზავრი, რომელსაც ტიტანი ეწოდა. მოგვიანებით კი, 1671, 1672 და 1684 წლებში, კასინიმ რგოლებიანი პლანეტის კიდევ სამი დიდი თანამგზავრის არსებობა გამოაშკარავა. მათ იაპეტი, რეა და დიონისე დაერქვათ.

მოგზაურობამ სტარტი კანავერალის კონცხიდან, 1997 წლის 15 ოქტომბერს აიღო. ხომალდ Cassini-ის სიგრძე 6.8 მეტრი იყო და იწონიდა 5.5 ტონას. ესოდენ მძიმე ხომალდის ასაჩქარებლად და სატურნის ორბიტაზე გასაყვანად საჭირო გახდა ვენერის, დედამიწისა და იუპიტერის გრავიტაციული ველების გამოყენება: დედამიწიდან

კოსმოსში გაჭრის შემდეგ Cassini-მ იუპიტერამდე საჭირო იმპულსის მისაღებად ორჯერ ჩაუფრინა ვენერას (1998 წლის აპრილი და 1999 წლის ივნისი), შემდეგ კი დედამიწას (1999 წლის აგვისტო). საბოლოოდ კი ხომალდი 2000 წლის დეკემბერში იუპიტერმა ააჩქარა და სატურნისკენ „მიმავალ გზაზე დააყენა“. Cassini-მ სატურნს სტარტიდან 7 წლის შემდეგ, 2004 წლის ივლისში მიაღწია. თავდაპირველად მისია 2008 წლამდე იგეგმებოდა, თუმცა პროექტის კარგი ტექნიკური მდგომარეობის წყალობით, იგი რამდენჯერმე იქნა გაგრძელებული და ამჟამად საუბარია მის დაფინანსებაზე 2017 წლამდე.



სურ. 99 კოსმოსური ხომალდი Cassini  
© NASA

Cassini-Huygens-ის მისიის ფარგლებში მიმდინარეობს თვით სატურნის, მისი შთამბეჭდავი რგოლების, მაგნიტოსფეროს და, რაც მთავარია, სატურნის თანამგზავრების შესწავლა. კვლევის პროგრამა დიდი და მრავალფეროვანია. აქ მხოლოდ მისი ზოგადი მიმოხილვით შემოვიფარგლებით.

სატურნი ჩვენგან დაახლოებით 1.4 მილიარდი კილომეტრითაა დაცილებული, რაც იუპიტერამდე მანძილთან შედარებით თითქმის ორჯერ მეტია. სატურნი ძირითადად წყალბადისა და ჰელიუმისგან შედგება. სხვა ელემენტებიდან აღსანიშნავია მეთანისა და ამიაკის მცირე მინარევები. სატურნი პლანეტისთვის უჩვეულოდ დიდი სითბური გამოსხივებით ხასიათდება. ამ ფაქტის ასახსნელად არსებობს სხვადასხვა მოსაზრება, რომელთა შემოწმების იმედი მეცნიერებს Cassini-ის მონაცემებზე დაყრდნობით აქვთ.

სატურნის მაგნიტოსფერო იუპიტერთან შედარებით ბევრად ნაკლებ რადიოშეფერხებებს წარმოქმნის. შესაძლებელია, ამის მიზეზი იყოს სატურნის წიაღის ელექტროგამტარობის სიმცირე. მიუხედავად ამისა, სატურნის მაგნიტური ველი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს თავის თანამგზავრებზე, მაგალითად, იწვევს ტიტანის ზედაპირული ქანების დაშლას.

რატომ აქვს სატურნს მზის სისტემის სხვა გიგანტურ აიროვან პლანეტებთან შედარებით ბევრად მძლავრი რგოლების სისტემა? რომ დავადგინოთ რგოლების ასაკი, რომელიც, შესაძლებელია, თვით პლანეტის ასაკს უტოლდება, ან გაცილებით ნაკლებია მასზე, საჭიროა მათი სტრუქტურისა და ევოლუციის შესწავლა.



სურ. 100 სატურნით მზის დაბნელება, Cassini, 2006 წლის 15 სექტემბერი  
© NASA/JPL/SSI

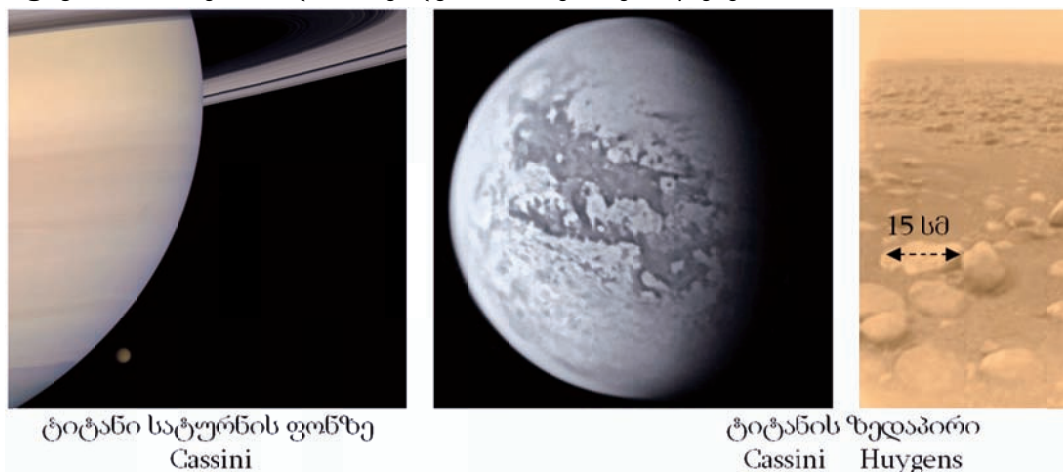
სატურნის უდიდესი თანამგზავრია ტიტანი. მისი დიამეტრი დაახლოებით 5150 კილომეტრია, რაც მერკურის დიამეტრს ოდნავ აღემატება. კლიმატური და ქიმიური მრავალფეროვნებით ტიტანი დედამიწასაც კი უწევს კონკურენციას, თუმცა იქ ტემპერატურა, დედამიწასთან შედარებით, ბევრად დაბალია. 2005 წელს, Huygens-ის ტიტანზე დაშვებისას, დიდი რაოდენობით ღრუბლები და მეთანის ტბები იქნა აღმოჩენილი.

ვინაიდან ეს მისია ძალზე შთამბეჭდავია, გვინდა უფრო დაწვრილებით აღვწეროთ Huygens-ის ტიტანზე დაშვების დეტალები. 2004 წლის 25 დეკემბერს Huygens-ი გამოეყო Cassini-ს და 2005 წლის 14 იანვარს, 20 ათასი კილომეტრი საათში სიჩქარით, შეიჭრა ტიტანის ატმოსფეროში. როცა ტიტანის ზედაპირამდე 170 კმ რჩებოდა, გაიხსნა პირველი პარაშუტი. სიჩქარე შემცირდა, ზონდმა მოიცვალა სითბური დამცავი ეკრანი და დაიწყო ტიტანის შესწავლა. სამი სპეციალური ხელსაწყო საშუალებით მოხდა ატმოსფეროს შემადგენელი აირის ანალიზი, ატმოსფეროში მყარი ნაწილაკების იდენტიფიცირება და მეთანის ღრუბლების ფოტოგადაღება. 50 კმ სიმაღლიდან გადაღებული იქნა ტიტანის ლანდშაფტის პანორამული სურათი. უკანასკნელი ასეული მეტრის სიმაღლეზე ჩაირთო თეთრი სინათლის ნათურა. შედეგად ტიტანის ზედაპირი განათდა და მისი შემადგენლობის ანალიზის ჩატარება გახდა შესაძლებელი. დაშვების საბოლოო სტადიაზე ტიტანის ზედაპირისკენ გაიგზავნა სპეციალური ხმოვანი სიგნალი, რომლის ექო გამოყენებული იქნა ზედაპირის სტრუქტურის შესასწავლად.



სურ. 101 Huygens-ის ტიტანზე დაშვების სქემა  
© Scientific American & Don Dixon Space Art

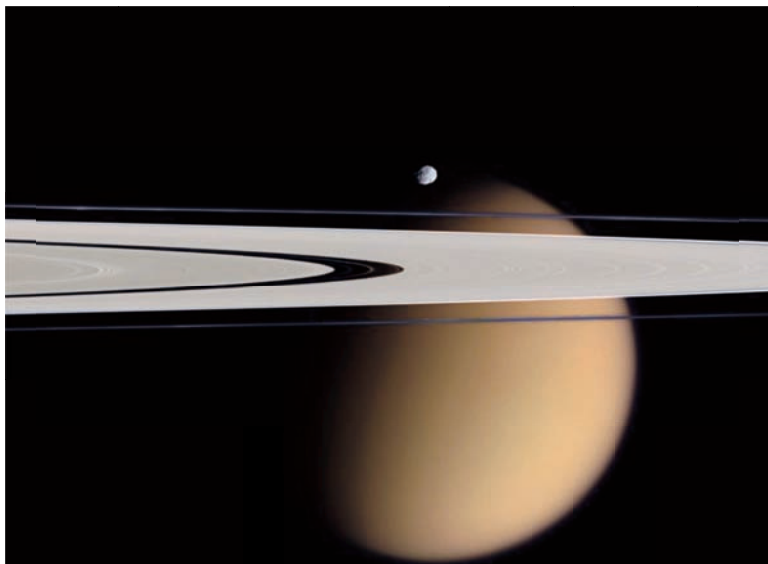
ტიტანის ზედაპირს ნარინჯისფერი დაჰკრავს, რასაც მეცნიერები ორგანული მოლეკულების არსებობას მიაწერენ. სხვადასხვა მოსაზრების თანახმად მზის სხივებს და შინაგან სითბოს შეეძლოთ შეექმნათ ტიტანზე სიცოცხლის ჩასახვის პირობები. თუმცა ამ ჰიპოთეზას, ალბათ, შემდგომი მისიები შეამოწმებენ.



სურ. 102 ტიტანის ხედები  
© NASA/JPL/SSI & NASA/JPL/UA

სატურნის ყინულოვან თანამგზავრებს, რომლებსაც ძირითადი წვლილი შეაქვთ სატურნის რგოლების ფორმირებაში, ევოლუციის დიდი გზა და მრავალფეროვანი სტრუქტურა გააჩნიათ. განსაკუთრებით საინტერესოა ენცელადა, თავისი ყინულოვანი გეიზერებით, რომლებიც პირდაპირ კოსმოსში გამოიტყორცნებიან. სატურნის ყინულოვანი თანამგზავრების შესწავლა ხორციელდება Cassini-ის ბორტზე დამონტაჟებული სპექტრომეტრით, რადარითა და ნაწილაკთა დეტექტორებით.





სურ. 103 სატურნის რგოლები და თანამგზავრი ეპიმეთე ტიტანის ფონზე  
© NASA/JPL/SSI

მთელი მისიის მანძილზე Cassini-ს ენერგომომარაგება, სამეცნიერო აპარატურის, რადიოგადამცემების, ძრავისა და მართვის სისტემის ჩათვლით, ხდება მის ბორტზე განთავსებული პლუტონიუმის რადიოაქტიური იზოტოპის  $\text{Pu-238}$  ხარჯზე. პლუტონიუმის დაშლის დროს გამოყოფილი სითბო ელექტროენერგიად გარდაიქმნება. Huygens-ის ენერგომომარაგება კი ელექტრობატარეების ხარჯზე ხდებოდა. Huygens-ის მიერ მოპოვებული ინფორმაცია ჯერ Cassini-ზე გადაიცემოდა, ხოლო ეს უკანასკნელი ახდენდა დედამიწაზე მის რეტრანსლაციას.

ბოლოს გვინდა აღვნიშნოთ, რომ Cassini-Huygens-ის პროექტის წარმატებამ მნიშვნელოვნად განაპირობა იუპიტერზე NASA-ს ახალი მისიის დაგეგმვა. 2011 წლის 5 აგვისტოს კანავერალის კონცხიდან Atlas V რაკეტა-მატარებლის საშუალებით იუპიტერისკენ გაშვებული იქნა საპლანეტათაშორისო სადგური Juno (იუნონა), რომელმაც დასახულ მიზანს 2016 წელს უნდა მიაღწიოს. ხომალდზე განთავსებულია Cassini-სთან შედარებით ბევრად უფრო მგრძნობიარე ხელსაწყოები. იმედია, Juno-ს მისიაც წარმატებით დაგვირგვინდება. დაველოდოთ 2016 წელს!



## დანართი I ასტრონომიული კვლევები საქართველოში

### დ1.1 ისტორიული წყაროები

ადრეულ საქართველოში ასტრალური აზროვნების დონის შესახებ მსჯელობა შეგვიძლია შემონახული ხელნაწერების მიხედვით. მათში გვხვდება უძველესი ქართული ასტრონომიული ტერმინები, ზოდიაქოს ნიშანთა და ციურ მნათობთა სახელწოდებები, მათ შესახებ იმდროინდელი წარმოდგენები. ისევე, როგორც მსოფლიოს ერთა უმეტესობა, საქართველოს მოსახლეობაც უძველესი დროიდან „ცის კიდობანის ბინადართ“ საორიენტაციოდ და ჟამთასვლის აღრიცხვის მიზნით იყენებდა, რაზეც ეკლესიებსა და ტაძრებზე მზის საათების ამოტვიფრის ტრადიციაც მეტყველებს.



გელათი



გომარეთი



კაცხი

სურ. 104 მზის საათების მაგალითები ქართულ ეკლესიებსა და ტაძრებზე

© B. Kudava, A. TuraShvili

ძველი ხელნაწერებიდან განსაკუთრებულად საინტერესოა 1188-1210 წლებში შედგენილი კრებული, რომელიც შეიცავს ასტრონომიულ-ასტროლოგიურ თხზულებას „ეტლთა და შვიდთა მნათობთათვის“. აკაკი შანიძის (1887-1987) თვალსაზრისით თხზულება არაბულიდან უნდა ყოფილიყო ნათარგმნი. მასში დახასიათებულია ზოდიაქოები, რომლებიც ქართულ მეტყველებაში ეტლებად იწოდებოდა. ხელნაწერი გადმოგვცემს მოძღვრებას შვიდი მნათობის მზის, მთვარის (მთოვარეს), მერკურის (ოტარიდის), ვენერას (ასპიროზის), მარსის (მარიხის), იუპიტერის (მუშთარის) და სატურნის (ზუალის) შესახებ. აგრეთვე აღწერილია „მთოვარის“ მოძრაობა.

მეცამეტე საუკუნეში მწერალმა და მეცნიერმა აბუსერიძე-ტბელმა შეადგინა ანთოლოგიის ტიპის კრებული. მასში თავად ტბელის ასტრონომიული შინაარსის თხზულებაცაა შესული. შემონახული ხელნაწერიდან ვეცნობით იმდროინდელ ბიზანტიასა და ახლო აღმოსავლეთში გავრცელებულ კალენდარულ სისტემებს. ასტრონომიულ-ასტროლოგიური და გეოგრაფიული ტერმინები უხვადაა სულხან-საბა ორბელიანის (1658-1725) ქართული ენის განმარტებით ლექსიკონში „სიტყვის კონა“. სულხან-საბას აღზრდილმა და მოწაფემ, მეფე ვახტანგ VI-მ (1675-1737) ქართულად თარგმნა შუასაუკუნეების ცნობილი ასტრონომის ულულ ბეგის (1394-1449) ვარსკვლავთა კატალოგი „ზიჯი-გურგანი“, რომელიც 1018 ვარსკვლავის კოორდინატებს შეიცავდა. ვახტანგ VI-ვე ააღორძინა საქართველოში ასტროლაბების გამოყენება. ტელესკოპების გამოგონებამდე ციურ სხეულთა მდებარეობები ცაზე კუთხსაზომი ხელსაწყოებით განისაზღვრებოდა. მათ შორის ყველაზე დახვეწილი და მოხერხებული ინსტრუმენტი იყო ასტროლაბი. იგი საუკუნეების განმავლობაში გამოიყენებოდა, როგორც სამყაროს მექანიკური რუკა. ასტროლაბები სხვადასხვა ტიპისაა. მათი მოძრავი შიდა ციფერბლატის, ან გრადუსებად დაყოფილი რგოლისა და წინა მხარეს მოძრავი ისრის ან მოძრავი გრადუირებული ციფერბლატის საშუალებით დამზერილი ციური

სხეულის კოორდინატების განსაზღვრა შესაძლებელი. ასტროლაბები გამოიყენებოდა VI-XVIII საუკუნეებში ჩრდილოეთ აფრიკიდან და ესპანეთიდან ინდოეთამდე გადაჭიმული არაბული სახელმწიფოების ასტრონომებისა და ასტროლოგების მიერ. მას პრაქტიკული ასტრონომიული ამოცანების – პლანეტათა მდებარეობების, კალენდარული და მეტროლოგიური საკითხების გადასაწყვეტად იყენებდნენ.



სურ. 105 სულხან-საბას „სიტყვის კონის“ ფრაგმენტი  
© GeoManuscript



სურ. 106 ვახტანგ VI-ის „ზიჯი-გურგანის“ თარგმანის ფრაგმენტი  
© GeoManuscript

ქართველი ფილოსოფოსის იოანე პეტრიწის (XI-XII საუკუნეები) ცნობით დავით აღმაშენებლის სახელთანაა დაკავშირებული საქართველოში პირველი ასტროლაბის დამზადება და მისი პრაქტიკული გამოყენება. თუმცა დღემდე შემონახულია მხოლოდ ვახტანგ VI-ის მიერ შედგენილი ნახაზების მიხედვით, ოსტატის აზდულ აზიმ უმცროსის მიერ დამზადებული ასტროლაბი, სავარაუდოდ, 1712-1719 წლებში, როდესაც მეფე ვახტანგი იძულებით იმყოფებოდა სპარსეთის მეფის კარზე.



სურ. 107 ვახტანგ VI-ის ასტროლაბი

სურათზე წარმოდგენილია ერთ-ერთი ასტროლაბი იმ წყებიდან, რომელიც ვახტანგ მეფემ შეუკვეთა ოსტატს. ასტროლაბზე წარწერები ქართულადაა ამოტვიფრული. ერთ-ერთი წარწერაა „ვახტანგი“, რაც მიუთითებს იმ ფაქტზე, რომ ეს ასტროლაბი თავად მეფეს ეკუთვნოდა. ვახტანგ VI-ის ასტრონომიით დიდი დაინტერესების მაგალითია ასტროლაბით ვარსკვლავთა მდებარეობების მის მიერ ორგანიზებული განსაზღვრა და კავკასიის რეგიონის 66 დასახელებული პუნქტის გეოგრაფიული კოორდინატების გაზომვა, მათ შორის თბილისის, ქუთაისის, ახალციხის, განჯისა და სხვ.

აღნიშვნის ღირსია დავით ბაგრატიონის (1767-1819) ნაშრომი „შემოკლებული ფისიკა“ და იოანე ბატონიშვილის (1768-1830) ენციკლოპედიური „კალმასობა“, რომელშიც ასტრონომიის მსოფლიო მიღწევები მაღალი სიზუსტით იყო ასახული.

## დ1.2 აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორია

საქართველოს სამხრეთ-დასავლეთ ნაწილში, აჭარა-იმერეთის მთიანეთის მესხეთის ქედის სამხრეთ განშტოებაზე, 1932 წლის 8 თებერვალს აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორია დაარსდა. ეს იყო პირველი მაღალმთიანი ასტროფიზიკური ობსერვატორია ყოფილი საბჭოთა კავშირის ტერიტორიაზე. აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორიის კოორდინატებია: ჩრდილოეთი განედის  $41^{\circ} 45' 18.19''$ ; აღმოსავლეთი გრძედის  $42^{\circ} 49' 31.2''$ . მისი სიმაღლე ზღვის დონიდან 1650 მ-ია.



სურ. 108 აბასთუმნის ობსერვატორიის საერთო ხედი

აბასთუმნის შემოგარენმა, უჩვეულოდ წყნარი ატმოსფერული პირობების წყალობით, მეცნიერთა ყურადღება მიიპყრო და 1930-1931 წლებში ლენინგრადის ასტრონომიული ინსტიტუტის, თბილისის გეოფიზიკური ობსერვატორიისა და სხვა დაწესებულებების საგანგებო ექსპედიციის მიერ ახალი ობსერვატორიისთვის შესაბამისი ადგილი შეირჩა – კურორტ აბასთუმნის მახლობლად, ყანობილის მთაზე.

მთა ყანობილი ასტრონომიული დაკვირვებებისთვის უნიკალური პირობებით ხასიათდება. ეს ფაქტი ჯერ კიდევ XIX საუკუნის მიწურულს გახდა ცნობილი, როდესაც ტუბერკულოზით დაავადებული რუსეთის ტახტის მემკვიდრე გიორგი რომანოვი თავისი სიცოცხლის ბოლო წლებს ცნობილ სამთო კურორტში, აბასთუმანში ატარებდა. გიორგი რომანოვის მასწავლებელი და მეგობარი, რუსეთის ასტრონომიული საზოგადოების დამფუძნებელი, პროფესორი ს. ფონ გლაზენაპი (Sergej von Glasenapp, 1848-1937), მეფისწულის მოწვევით, პეტერბურგიდან აბასთუმანში ჩამოვიდა. ის ასტრონომიაში ლექციებს უკითხავდა გიორგი რომანოვს. მეფისწული გიორგი იმდენად იყო გატაცებული ასტრონომიით, რომ მან საკუთარი სახსრებით ააგო ე.წ. „გლაზენაპის კოშკი“, რომელშიც გლაზენაპი მცირე ლინზური ტელესკოპით აკვირდებოდა მჭიდრო ორჯერად ვარსკვლავებს. შესანიშნავი ატმოსფერული პირობების წყალობით მოხერხდა ისეთი ორჯერადი ვარსკვლავების დაკვირვება, რომლებიც სხვა ობსერვატორიებში განცალკევებულად არ ჩანდნენ და ერთ ვარსკვლავად დაიკვირვებოდნენ. უფლისწული



გიორგი აბასთუმანში დაიღუპა, ხოლო პროფ. გლაზენაპი დაბრუნდა პეტერბურგში, სადაც მოკლე ხანში კიდევ გამოაქვეყნა თავისი მეცნიერული კვლევის შედეგები.

გლაზენაპის მიერ ჩატარებულ დაკვირვებებთან დაკავშირებით შ. ბერნჰამი (Sherburne Wesley Burnham, 1838-1921) 1893 წელს წერდა: „... ტიფლისის შემოგარენი (იგულისხმება აბასთუმანი) უაღრესად მიზანშეწონილია ასტრონომიული სამუშაოებისთვის ... არსად ევროპაში არ არსებობს ისეთი ადგილმდებარეობა, ... , სადაც პირობები ასეთივე მიზანშეწონილია“.



სურ. 109 ახალი სამთო ასტროფიზიკური ობსერვატორიისთვის ადგილის შესარჩევი ექსპედიცია "გლაზენაპის კოშკთან", 1931 წ.



სურ. 110 ობსერვატორიის თანამშრომელთა ჯგუფი. ცენტრში – ე. ხარაძე და მ. ვაშაკიძე. აბასთუმანი, 1939 წ.

1932 წელს დაიწყო აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორიის მშენებლობა და ამავე წელს, 33-სმ რეფლექტორით, რომელიც ამჟამად ობსერვატორიის სამუზეუმო ექსპონატს წარმოადგენს, ჩატარდა პირველი დაკვირვებები. 1937 წელს გამოიცა აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორიის "ბიულეტენის" პირველი ნომერი. დაარსების პირველივე დღიდან ობსერვატორიის დირექტორად დაინიშნა ახალგაზრდა მეცნიერი ევგენი ხარაძე (1907-2001), რომელიც მას 60 წლის განმავლობაში ხელმძღვანელობდა, ხოლო 1992 წლიდან გარდაცვალებამდე მისი საპატიო დირექტორი იყო. შემდგომ ობსერვატორიის დირექტორები იყვნენ ჯ. ლომინაძე (1992-2000), ი. ჩხიკვაძე (2000-2001), რ. კილაძე (2001-2006), ო. კურტანიძე (2006-2007), გ. ჯავახიშვილი (2007-2009), ვ. კუხიანიძე (2010-2011). 2011 წლის ბოლოდან ობსერვატორიის დირექტორია მ. თოდუა. 2007 წლიდან ობსერვატორია შეუერთდა ილიას სახელმწიფო უნივერსიტეტს. მას ეწოდება ილიას სახელმწიფო უნივერსიტეტის ევგენი ხარაძის აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორია.

ობსერვატორიის ძირითადი ინსტრუმენტებია 1.25 მ რეფლექტორი, 70 სმ მენისკური ტელესკოპი, 40 სმ ორმაგი ასტროგრაფი, 40 სმ რეფრაქტორი, 44 სმ შმიდტის ტელესკოპი, 53 სმ დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფი, სამზეო ჰორიზონტული ტელესკოპი, ფოტოსფერულ-ქრომოსფერული ტელესკოპი, დანადგართა კომპლექსი ბინდის და ღამის ცის შესასწავლად და სხვ.

აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორია მრავალპროფილიანი სამეცნიერო-კვლევითი დაწესებულებაა. თეორიული და დაკვირვებითი კვლევის ძირითადი მიმართულებებია ვარსკვლავთა სპექტრული კლასიფიკაცია; ჩვენი და სხვა გალაქტიკების სტრუქტურა და ევოლუცია; ორჯერადი და ცვალებადი ვარსკვლავები; მზე; მზის სისტემა: პლანეტები, მათი თანამგზავრები და მცირე პლანეტები, კომეტები, საპლანეტათაშორისო სივრცე; მზე-დედამიწის კავშირები; ვარსკვლავების მთვარით დაფარვა; მზისა და მთვარის დაბნელებები; დედამიწის ზედა ატმოსფეროს აგებულება; პლაზმური ასტროფიზიკა; ასტრონომიის ისტორია.

აბასთუმნის ობსერვატორიაში ჩატარებული დაკვირვებების და მათი ინტერპრეტაციის შედეგად გამოქვეყნებულია უამრავი სამეცნიერო ნაშრომი საერთაშორისო ჟურნალებსა და კონფერენციების შრომებში. ჩვენ გამოვყოფთ მხოლოდ იმ მნიშვნელოვან შედეგებს, რომლებიც უშუალოდაა დაკავშირებული წიგნში განხილულ ამოცანებთან და ზოგადად საინტერესოა შემეცნების თვალსაზრისით.



სურ. 111 აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორიის დირექტორი აკად. ე. ხარაძე და პროფ. მ. ვაშაკიძე

დავიწყებთ ქართული ასტრონომიული მეცნიერების ერთ-ერთი პირველი წარმატებით საერთაშორისო ასპარეზზე. 1937 წელს, აბასთუმნის ობსერვატორიის ბიულეტენის პირველსავე ნომერში, დაისტამბა ქართველი ასტროფიზიკოსის მიხეილ ვაშაკიძის (1907-1956) ფართოდ გახმაურებული შრომა, რომელშიც იგი ჩვენი გალაქტიკის ვარსკვლავთა დასახლებას იკვლევდა. მ. ვაშაკიძემ რიცხვითი მეთოდით ვარსკვლავთა სტატისტიკის შვარცშილდის ინტეგრალური განტოლება ამოხსნა გალაქტიკის განედის ნებისმიერი მიმართულებისთვის. ნაშრომში აღწერილი ვარსკვლავთა სივრცული სიმკვრივის განსაზღვრის ხერხი ვარსკვლავთა ასტრონომიის ქრესტომათიებში შესულია



ვაშაკიძე-ოორტის მეთოდის სახელწოდებით (ამ მეთოდს დამოუკიდებლად მიაკვლია ჰოლანდიელმა ასტრონომმა იან ოორტმა – Jan Hendrik Oort, 1900-1992).

პირველ წარმატებას მოჰყვა მთელი რიგი ბრწყინვალე შრომებისა, რომლებმაც ფართოდ გაუთქვეს სახელი ობსერვატორიასა და მის კოლექტივს. მაგრამ გვინდა ხაზი გავუსვათ, რომ ხშირ შემთხვევებში ასტრონომიული მიღწევები დაკავშირებულია ციური ობიექტების – ვარსკვლავების, ზეახლების, გალაქტიკებისა თუ მათი გროვების, ძალზე დიდი რაოდენობის გულდასმით დაკვირვებებთან, მათი სხვადასხვა მახასიათებლების შესწავლასა და შედარებასთან და ციური ობიექტების თვისებათა ანალიზის საფუძველზე მათ კლასიფიკაციასთან.

ამ მხივ აბასთუმნის ობსერვატორიამ მნიშვნელოვანი წვლილი შეიტანა საერთაშორისო ძალისხმევაში. საკმარისია აღინიშნოს, რომ აბასთუმნის ობსერვატორიაში წლების განმავლობაში მოპოვებული მონაცემებით შეიქმნა ახალი და გამდიდრდა უკვე არსებული ციური ობიექტების კატალოგები, როგორებიცაა გრძელპერიოდიანი ცეფეიდებისა და გარეგალაქიკური ნისლეულების ფერის მაჩვენებელთა კატალოგები, ვარსკვლავთა სპექტრული კლასებისა და ნათობის ოთხი კატალოგი (1978-1992), ე.წ. „პარენაგოს გეგმის“ ფარგლებში 40 000-ზე მეტი ვარსკვლავის კლასიფიკაციისა და ფოტომეტრიის შედეგების სამი კატალოგი, გალაქტიკის ანტიცენტრის არეში 6037 ვარსკვლავის სპექტრული კლასებისა და ნათობის კლასების კატალოგი (1988), გალაქტიკის ანტიცენტრის მიმართულებით აბასთუმანში აღმოჩენილ ახალ ე.წ. პეკულარულ ვარსკვლავთა კატალოგი (1990), ვარსკვლავთა საკუთარი მოძრაობების მაკორმიკის კატალოგის 1236 არის ვარსკვლავთა სპექტრული კლასიფიკაცია (1986) და სხვ.

აბასთუმნის ობსერვატორიაში შედგენილია ატლასი (1960), რომელიც შეიცავს გალაქტიკური ბნელი ნისლეულების გრაფიკულ გამოსახულებებს გალაქტიკური ეკვატორის გასწვრივ ზოლში. ატლასში აგრეთვე შეტანილია ემისიური დიფუზური ნისლეულები, ღია და სფერული ვარსკვლავთ გროვები, კაშკაშა ვარსკვლავები მეოთხე ხილულ ვარსკვლავიერ სიდიდეებამდე. 40 სმ ცეისის ტელესკოპის მეშვეობით მიღებული უნიკალური დაკვირვებების საფუძველზე შედგენილია მთვარის ელექტროპოლარიზაციული ატლასი (1982).

ზეახალი ვარსკვლავების ფოტოგრაფიული პატრულირების საერთაშორისო პროგრამის ფარგლებში მიღებული მდიდარი დაკვირვებითი მასალის დამუშავების შედეგად აღმოჩენილია რვა ზეახალი ვარსკვლავი (შ. ინასარიძე, გ. ქიმერიძე, ა. ჭუაძე). ზეახალი ვარსკვლავების გარდა აღმოჩენილია რამდენიმე მცირე პლანეტა, 107 ახალი ანთებადი ვარსკვლავი, ერთი განმეორებადი ახალი ვარსკვლავი, 17 პლანეტური ნისლეული, სამი ვარსკვლავთ გროვა და მრავალი ემისიური ვარსკვლავი, მათ შორის ორი ე.წ. ვოლფ-რაიეს ტიპისა. 1942 წელს ქართველი ასტრონომის გიორგი თევზაძის (1914-1988) მიერ აღმოჩენილ იქნა ორი კომეტა „1942 თევზაძე 1“ და „1942 თევზაძე 2“.

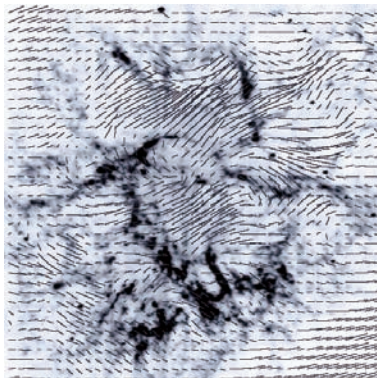
ეს ერთადერთი შემთხვევა არაა, როდესაც საერთაშორისო ასტრონომიულმა საზოგადოებამ ქართველი მეცნიერების ღვაწლის დაფასების ნიშნად ქართული დასახელებები მიანიჭა ციურ ობიექტებს. მცირე პლანეტათა საერთაშორისო კატალოგში ნომრით 4737 რეგისტრირებულ პლანეტას 1996 წელს, ქართველი ასტროფიზიკოსის როლან კილაძის (1931-2010) პატივსაცემად, ეწოდა „კილაძე“ (4737 Kiladze). 1970 წელს, ქ. ბრაიტონში (ინგლისი), საერთაშორისო ასტრონომიული კავშირის XIV ასამბლეაზე, პროფ. მიხეილ ვაშაკიძის სახელი ეწოდა მთვარის ერთ-ერთ კრატერს, რომლის

დიამეტრი 50 კმ-ს აღემატება. ქართული დასახელებები მინიჭებული აქვთ მსოფლიოს სხვადასხვა მეცნიერთა მიერ აღმოჩენილ ასტეროიდებს: „ხარაძე“, „გუდიაშვილი“, „კაკაბაძე“, „ყაზბეგი“, „ხერგიანი“, „რუსთაველი“, „თამარი“, „ანდრონიკოვი“, „თბილისი“, „მცხეთა“, „სოხუმი“, „აფხაზეთი“, „აჭარა“ და სხვ.

1986 წელს აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორია შეუერთდა საბჭოთა ორბიტულ სადგურ Мир-ზე კოსმოსური გამოსხივების შესასწავლი აპარატურის შექმნის სამუშაოებს (ხელმძღვანელი გ. კახიძე). 1988 წელს კი გაფორმდა ხელშეკრულება NASA-სთან ორბიტულ ტელესკოპ Hubble-ზე ქართველი სპეციალისტების მონაწილეობით შექმნილი აპარატურის განთავსების შესახებ. თუმცა 1991-92 წლებში საქართველოში განვითარებულმა მოვლენებმა ხელი შეუშალეს ამ პროექტების განხორციელებას.

### **გალაქტიკური და გარეგალაქტიკური ნისლეულების გამოსხივების პოლარიზაცია**

პროფ. ვაშაკიძის მიერ შესწავლილი ობიექტებიდან ყველაზე საინტერესო ობიექტი კიბორჩხალას ნისლეულია, რომელიც 1054 წელს კუროს თანავარსკვლავედში აფეთქებული ზეახალი ვარსკვლავის ნარჩენს წარმოადგენს. XX საუკუნის 50-იან წლებში კიბორჩხალას ნისლეულში აღმოაჩინეს ძლიერი რადიოგამოსხივება. გამოჩენილმა ასტროფიზიკოსმა ი. შკლოვსკიმ (Иосиф Шкловский, 1916-1985) ეს ფაქტი ნისლეულის ძლიერ მაგნიტურ ველში სწრაფი (რელატივისტური) ელექტრონების მოძრაობით ახსნა. 1953 წ. მან გამოთქვა მოსაზრება, რომ ხილული სპექტრის გამოსხივება ძლიერად უნდა იყოს პოლარიზებული, თუ კი მას იწვევს იგივე მექანიზმი, რომელიც რადიოდიაპაზონში მოქმედებს.

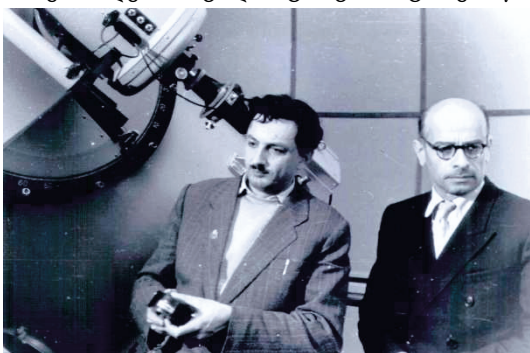


სურ. 112 კიბორჩხალას ნისლეულში პოლარიზაციის განსაზღვრა (ვაშაკიძე, 1954 წ.)

მ. ვაშაკიძემ აბასთუმნის ობსერვატორიის შმიდტის ანაბერაციულ კამერას მორგო პოლარიოდი და კიბორჩხალას ნისლეულის გამოსხივების პოლარიზაციული დაკვირვებების მთელი სერია მიიღო. მაღალხარისხოვანი, უნიკალური დაკვირვებების დამუშავების შედეგად აღმოჩნდა, რომ სპექტრის ხილულ უბანში კიბორჩხალას ნისლეულის გამოსხივება მართლაც ძლიერად იყო პოლარიზებული. ამგვარად, მ. ვაშაკიძის, და თითქმის ერთდროულად, ვ. დომბროვსკის (Виктор Домбровский, 1913-1972) მიერ ჩატარებულმა დაკვირვებებმა აჩვენა, რომ კიბორჩხალას ნისლეული ოპტიკურ დიაპაზონში გამოასხივებს არა სითბური, არამედ სინქროტრონული მექანიზმით. ამ შედეგმა ასტრონომიული საზოგადოების დიდი ინტერესი გამოიწვია და კიბორჩხალას ნისლეული ოპტიკურ, რადიო და რენტგენულ დიაპაზონებში ინტენსიური დაკვირვებებისა და თეორიული გამოკვლევების ობიექტი გახდა.

## პლანეტების წარმოშობის მექანიზმები

1966 წელს როლან კილაძის (1931-2010) მიერ შექმნილია პლანეტების წარმოშობის თეორია, რომლის საფუძველზე მეცნიერმა პლუტონის თანამგზავრის – ქარონის არსებობა იწინასწარმეტყველა. ერთი წლის შემდეგ ამერიკელმა ასტრონომმა ჯ. კრისტიმ (James Walter Christy, 1938) მართლაც აღმოაჩინა პლუტონის თანამგზავრი. ჰაბლის ტელესკოპით 2006 წელს ორი და 2011 წელს ერთი მცირე ზომის თანამგზავრის აღმოჩენამ ისევ დაადასტურა რ. კილაძის თეორიიდან გამომდინარე დასკვნები იმის შესახებ, რომ პლუტონი დღესაც ჩამოყალიბების სტადიაშია და მის გარშემო უნდა არსებობდეს მრავალრიცხოვანი მცირე ნაწილაკების გროვა.



სურ. 113 რ. კილაძე და ე. ხარამბე მენისკური ტელესკოპის მეშვეობით დაკვირვების ჩატარებისას (1957 წ.)

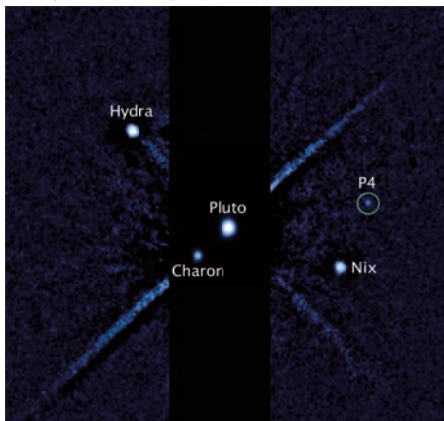


სურ. 114 აკადემიკოსები ი. ვეკუა, ე. ხარამბე და ვ. ამბარცუმიანი აბასთუმნის ობსერვატორიაში (1976 წ.)

რ. კილაძემ განსაზღვრა მერკურის მასა (1966), ფოტომეტრული მეთოდით შეაფასა სატურნის რგოლის სისქე (1967), რომლის მნიშვნელობა დადასტურდა ფრანგი მეცნიერების (1981) და ჰაბლის ტელესკოპის დაკვირვებებით (1995). რ. კილაძემ, მზის დისკოზე მერკურის გავლისას, 1977 წელს აღმოაჩინა მერკურის ატმოსფერო. მან აგრეთვე ჩამოაყალიბა თეორია პლანეტების თანამედროვე ბრუნვის შესახებ (1986).



სურ. 115 პლუტონი, ქარონი და 2006 წელს აღმოჩენილი ორი ახალი თანამგზავრი  
© NASA/ESA, Weaver, Stern & HST Pluto



სურ. 116 2011 წელს აღმოჩენილი პლუტონის მეოთხე თანამგზავრი (წრით შემოხაზული)  
© NASA/ESA & M.Showalter

სანკტ-პეტერბურგელ კოლეგებთან ერთად რ. კილაძემ შექმნა გეოსტაციონარული თანამგზავრების მოძრაობის თეორია (2001) და აღმოაჩინა მათი ნამსხვრევების ორბიტების რეგულარიზაციის მოვლენა (2003). როლან კილაძის მიერ მოძებნილ იქნა დროის მცირე პერიოდის განმავლობაში დაკვირვების საფუძველზე დედამიწასთან ასტეროიდის შეჯახების წინასწარმეტყველების კრიტერიუმი (2004). 1971 წელს როლან კილაძეს ზუსტი ასტრონომიული ხელსაწყოთმშენებლობის დარგში მიღწეული წარმატებისათვის მიენიჭა სსრკ სახელმწიფო პრემია.

#### ვარსკვლავთ სპექტრული კლასიფიკაცია

ვარსკვლავთ სპექტრულ სამუშაოებს აბასთუმნის ობსერვატორიაში 40-იან წლებში ჩაეყარა საფუძველი. ობსერვატორიაში დაიდგა ამ მიზნისათვის საგანგებოდ შექმნილი 70 სმ მენისკური ტელესკოპი 8°, 4° და 2°-იანი ობიექტივისწინა პრიზმებით, რომელთა დისპერსიებია შესაბამისად 166 Å/mm, 660 Å/mm და 1200 Å/mm წყალბადის სპექტრის H $\gamma$  ხაზთან. ე. ხარაძის ხელმძღვანელობით რ. ბართაიას მიერ ობსერვატორიაში მიღებული სპექტრების საფუძველზე შეიქმნა აბასთუმნის სპექტრული კრიტერიუმები და აბასთუმნის კლასიფიკაცია საერთაშორისო MK-სისტემაში მოექცა. აბასთუმნის კლასიფიკაციამ შესაძლებელი გახადა პეკულარულ ვარსკვლავთა მასიური გამოვლენა. მენისკური ტელესკოპის გარკვეულმა მახასიათებლებმა (ფართო ველი, დიდი შეღწევადობა) და აბასთუმნის ცის უნიკალურმა გამჭვირვალობამ, აბასთუმნის მასობრივ ორგანოზომილებიან კლასიფიკაციას მსოფლიოში წამყვანი ადგილი დაუმკვიდრა მიჩიგანისა და ევროპის სამხრეთ ობსერვატორიის (ESO) კლასიფიკაციის სამუშაოების გვერდით.



სურ. 117 აბასთუმნის ობსერვატორიის თანამშრომელთა ჯგუფი: ლ. ფიშკოვა, რ. ბართაია, ნ. კალანდაძე, თ. რაზმაძე, თ. მეგრელიშვილი და ნ. მაღალაშვილი, რომლებიც ათეულობით წლების განმავლობაში ასტრონომიის სხვადასხვა დარგში მუშაობდნენ



კლასიფიკაციის სამუშაო ორი მიმართულებით წარიმართა: 1) ირმის ნახტომის კვლევის კომპლექსური ე.წ. „პარენაგოს“ საკავშირო გეგმა (ხელმძღვანელი ე. ხარაძე, შემსრულებლები ობსერვატორიის მხრიდან ს. აფრიაშაშვილი, ნ. კალანდაძე და მ. მეტრეველი) და 2) ვარსკვლავთა ასოციაციებისა და დიფუზური ნისლეულების უბნების კვლევა მათი ფიზიკური მახასიათებლების შესწავლის მიზნით (ე. ხარაძე, რ. ბართაია). აღსანიშნავია, რომ 1967-2003 წლებში ჩატარებული სამუშაოების შედეგად შეიქმნა ვარსკვლავთა სპექტრული კლასებისა და ნათობის ათამდე კატალოგი.

### **ღია გროვების წევრობის განსაზღვრის ახალი მეთოდი**

ვარსკვლავები ხშირად ქმნიან გრავიტაციულად შეკრულ ჯგუფებს – ვარსკვლავთ გროვებს ძირითადად ორი ტიპის გროვა არსებობს: სფერული, რომელსაც მკვეთრად გამოხატული სფეროს ფორმა აქვს, და ღია, რომელსაც არ გააჩნია რაიმე ფორმა. სფერული გროვები, როგორც წესი, უფრო ასაკოვანია, ვიდრე ღია. გროვების კვლევას დიდი მნიშვნელობა აქვს ვარსკვლავთა წარმოშობისა და ევოლუციის შესწავლის თვალსაზრისით. ვარსკვლავთ გროვები პროეცირდებიან ცაზე სხვა ვარსკვლავებთან ერთად, რომლებიც არ მიეკუთვნებიან ამ წარმონაქმნებს. მათ ფონურ ვარსკვლავებს უწოდებენ. ზოგი ფონური ვარსკვლავი უფრო ახლოა ჩვენთან, ვიდრე გროვა, ზოგი კი უფრო შორს. ამიტომ გროვების შესწავლისას დიდი მნიშვნელობა აქვს იმის დადგენას, თუ რომელი ვარსკვლავი არის გროვის წევრი და რომელი – არა. თავდაპირველად გროვის წევრებს თვალთ საზღვრავდნენ. შემდგომ შემუშავებულ იქნა წევრობის დადგენის სხვადასხვა მეთოდი, რომლებიც ემყარებიან ვარსკვლავთა სიდიდეებს, მათ მდებარეობებს, საკუთარ მოძრაობებს, სხივურ სიჩქარეებსა და სხვ.



სურ. 118 ობსერვატორიის თანამშრომელთა ჯგუფი. მარცხნიდან მარჯვნივ: ა. კოროლი, რ. კილაძე, გ. სალუქვაძე და მ. გიგოლაშვილი (1982 წ.)

აბასთუმნის ობსერვატორიის თანამშრომლებმა შეიმუშავეს ღია გროვების წევრობის განსაზღვრის ახალი, ე.წ. აკუმულაციის მეთოდი (გ. ჯავახიშვილი, ვ. კუხიანიძე, მ. თოდუა, შ. ინასარიძე, 2006), რომლის მიხედვით შესაძლებელია ფონურ ვარსკვლავთა მიმართ ურთიერთ მდებარეობების ცვლილებების სიდიდის დაგროვების მიხედვით ღია გროვის წევრობის დადგენა ცალკეული ვარსკვლავისთვის. აკუმულაციის მეთოდით უფრო ეფექტურად ხდება გროვის ვარსკვლავების გამოცალკევება ფონისაგან.



სხვა მეთოდებისგან განსხვავებით, ეს პროცედურა არ მოითხოვს შესადარებელი ვარსკვლავებისა და ფონურ ვარსკვლავთა განაწილების მოდელირებას. გარდა ამისა, აკუმულაციის მეთოდი საშუალებას იძლევა გამოვლინდეს დინამიური სტრუქტურები, თუკი ასეთები არის გროვში. ეს ნაჩვენები იქნა ხომლის გროვის მაგალითზე, რომელიც მდებარეობს კუროს თანავარსკვლავედში.

### ცვალებადი ვარსკვლავები

ცვალებადი ვარსკვლავების კვლევა აბასთუმნის ობსერვატორიის ტრადიციულ მიმართულებას მიეკუთვნება. წლების განმავლობაში დაგროვილი დაკვირვებითი მასალისა და დღემდე მიმდინარე დაკვირვებების საფუძველზე ცვალებადი ვარსკვლავების კვლევები წარმოებდა და წარმოებს ე. ხარადის, ნ. მაღალაშვილის, ი. ქუმსიშვილის, ი. ალანას, ი. ჩხიკვაძის, მ. ქუმსიაშვილის და სხვა მეცნიერთა მიერ.

ცვალებად ვარსკვლავებს მიეკუთვნება ვარსკვლავები, რომელთა სიკაშკაშე დროის მიხედვით იცვლება, იქნება ეს თვით ვარსკვლავის ნათობის ცვლილებით გამოწვეული, თუ ორჯერადი ვარსკვლავის ორი კომპონენტის ურთიერთ გადაფარვისას მათი საერთო გამოსხივების მეტ-ნაკლები ვარიაციით. ობსერვატორიის დაარსებიდან ერთი წლის შემდეგ, 1933 წელს, იწყება ქნარის RR ტიპის ორი ცვალებადი ვარსკვლავის – გველშაპის XZ (Dra XZ) და ჰერკულესის DL (Her DL) სიკაშკაშის ცვალებადობის ვიზუალური შეფასება. ჩატარდა დიდი დათვის W (W UMa) ტიპის ბნელებად-ცვალებადი ვარსკვლავების ფოტოგრაფიული ფოტომეტრია 13 დუიმიანი რეფლექტორის მეშვეობით (ე. ხარაძე, 1936). 1936-37 წლებში, საბჭოთა კავშირის ხელსაწყოთმშენებლების მიერ დამზადებული პირველი ელექტროფოტომეტრის აბასთუმანში დამონტაჟების და ამუშავების შემდეგ, გედის P (P Cyg) დაკვირვებები განხორციელდა. სპექტრული დაკვირვებების შესწავლის საფუძველზე აღმოჩენილია, რომ გედის P ვარსკვლავის სპექტრში ხაზების წანაცვლება, რომელიც ახასიათებს ამ ვარსკვლავის ზედაპირიდან ატომების გამოტყორცნის სიჩქარეებს, დამოკიდებულია სათანადო ელემენტის იონიზაციის პოტენციალზე. უნდა აღინიშნოს, რომ ობსერვატორიაში შმიდტის ანაბერაციული კამერით, 70 სმ მენისკური ტელესკოპითა და 1.25 მ ტელესკოპით ქნარის RR ტიპის 100-ზე მეტი ვარსკვლავის შესწავლა მოხერხდა (ი. ალანა). ამ ვარსკვლავებისთვის დადგენილი სხვადასხვა მახასიათებლები შემდგომში გამოყენებული იქნა ვარსკვლავთმორის სივრცეში კოსმოსური ნივთიერების განაწილების გამოსავლენად.

დამზერები მიმდინარეობდა სხვადასხვა სახის ცვალებად ვარსკვლავებზე. სისტემატური ფოტოელექტრული დაკვირვებებით შესწავლილია 50-მდე ბნელებადი ცვალებადი ვარსკვლავი (ნ. მაღალაშვილი, ი. ქუმსიშვილი). ფოტოგრაფიული პატრულირების შედეგად ხომლის (Pleiades) არეში და ორიონის (Ori) ასოციაციაში აღმოჩენილია 107 ახალი ანთებადი ვარსკვლავი, რომელთა სიკაშკაშე, ჩვეულებრივ, მცირედ იცვლება, მაგრამ დროდადრო განიცდის მკვეთრ, აფეთქების მსგავს ცვლილებას (რ. ნაცვლიშვილი). აბასთუმნის და სხვა ობსერვატორიებში მოპოვებული დაკვირვებითი მასალის საფუძველზე სტატისტიკური მეთოდით შეფასებულია, რომ ორიონში დაახლოებით 2000 ანთებადი ვარსკვლავია, რაც იმაზე მეტყველებს, რომ ამ ასოციაციაში თითქმის ყველა წითელი ჯუჯა ვარსკვლავი ანთებადია. აღსანიშნავია ცეფეუსის (Cepheus) თანავარსკვლავედში აღმოჩენილი უჩვეულო ობიექტი, რომელმაც 1970 წლის 29 ივლისს ოპტიკურ სპექტრში მძლავრი ანთება განიცადა. ანთება, რომლის მაქსიმუმში ციური სხეული 3-4 ვარსკვლავიერი სიდიდით გაკაშკაშდა, 65 წამის

განმავლობაში მიმდინარეობდა. ობიექტი შეესაბამება B ტიპის ცისფერ გიგანტს, რომლის ვარსკვლავიერი სიდიდე დაახლოებით 7.3-ია (ი. ჩხიკვაძე, 1970). მოგვიანებით, ამ ობიექტს დაერქვა KY Cep-ის ტიპის ცვალებადი ვარსკვლავი. შესწავლილია Be ტიპის ვარსკვლავების სპექტრული და ფოტომეტრული თავისებურებები ანომალური ბალმერის ნახტომის მქონე ვარსკვლავებისთვის. ნაჩვენებია, რომ ამ ვარსკვლავების გამოსხივების სპექტრში დიდ როლს თამაშობს მათი აიროვანი გარსები (ი. ჩხიკვაძე, 1980). ფოტოელექტრული დაკვირვებებით შეისწავლება ჰერბიგის Ae/Be ვარსკვლავები, რომლებიც ჯერ კიდევ ჩამოყალიბების და ვარსკვლავთა მთავარ მიმდევრობასთან მიახლოების სტადიაში მყოფ A ან B ტიპის მასიურ ვარსკვლავებს მიეკუთვნება (ი. ჩხიკვაძე, 1990; 2002; 2004).

აბასთუმანში ფარის RY ობიექტის კვლევა 1972 წლიდან მიმდინარეობს, ხოლო 1980-იან წლებში ობსერვატორიას დაევალა ამ ობიექტის კოოპერირებული კვლევის კოორდინაცია (კოორდინატორი მ. ქუმსიაშვილი). 2004-2006 წლებში ამერიკელ (რ. გერცი, ნ. სმიტი) და აბასთუმნის ობსერვატორიის მეცნიერთა (მ. ქუმსიაშვილი, რ. ნაცვლიშვილი, ნ. ყოჩიაშვილი, ქ. ჩარგეიშვილი, ე. ჯანიაშვილი) თანამშრომლობით, ობსერვატორიაში არსებული ფოტოელექტრული მასალის საფუძველზე, ფაქტიურად დადასტურდა ამერიკელი ასტროფიზიკოსების ვარაუდი იმის შესახებ, რომ ფარის RY ჯერჯერობით ერთადერთი ორჯერადი სისტემაა, რომლის კომპონენტი შეიძლება იყოს LBV ტიპის ვარსკვლავი (Luminous Blue Variable). აღსანიშნავია, რომ ლურჯი კაშკაშა ცვალებადები გამოავლენენ სიკაშკაშის ხანგრძლივ, ნელ ცვალებადობას, რომელიც ზოგჯერ მოულოდნელი ამოფრქვევებით და მასის კატასტროფული დანაკარგით ხასიათდება. სამყაროში LBV ცვალებადები ძალიან იშვიათად გვხვდება, დღესდღეობით მათი რიცხვი 20-ს არ აღემატება.

### **სწრაფმსრბოლი ვარსკვლავები**

მძიმე ვარსკვლავებს, რომლებიც ვარსკვლავთშორის სივრცეში დიდი სიჩქარით გადაადგილდებიან, სწრაფმსრბოლ (runaway) ვარსკვლავებს უწოდებენ. ეს OB სპექტრული კლასის ვარსკვლავების ქვეკლასია. მათი სიჩქარეები OB ვარსკვლავებისთვის დადგენილ ზღვარს (30 კმ/წმ) აჭარბებს და 200 კმ/წმ აღწევს.

სწრაფმსრბოლი ვარსკვლავების სტატისტიკური კვლევა აქტუალურია მათი წარმოშობის მექანიზმის დადგენის თვალსაზრისით. ერთ-ერთი ვარაუდით, სწრაფმსრბოლი ობიექტი გამოიტყორცნება ღია კომპაქტური გროვიდან მის კომპონენტებს შორის დინამიური ურთიერთქმედების შედეგად. მეორე ვარაუდით, გამოტყორცნას იწვევს ორმაგი სისტემის ევოლუციის პროცესში გრავიტაციული მიზიდულობის მკვეთრი ვარდნა მასიური წევრის მიერ მასის ძირითადი ნაწილის სწრაფი დაკარგვის გამო. სწრაფმსრბოლი ვარსკვლავების შესწავლამ შეიძლება მნიშვნელოვანი როლი ითამაშოს ზეგიგანტების, ნეიტრონული ვარსკვლავებისა და შავი ხვრელების წარმოქმნის მექანიზმების გააზრების საქმეში.

აბასთუმნის ობსერვატორიაში შემოთავაზებულია მეთოდი, რომელიც OB ვარსკვლავების საკუთარ მოძრაობათა მონაცემების სტატისტიკური ანალიზის საფუძველზე ახალი სწრაფმსრბოლი ვარსკვლავების გამოვლინების საშუალებას იძლევა (თ. მძინარიშვილი). თანამგზავრ Hipparcos (ESA) მონაცემთა ბაზიდან შერჩეული O-ტიპის 275 ვარსკვლავიდან გამოვლენილია 19 სწრაფმსრბოლი ვარსკვლავი, მათ შორის 9 – ახალი (თ. მძინარიშვილი, 2004). შემდგომში შესწავლილი იყო 2228 O-B5V ტიპის ვარსკვლავი და O და B ზეგიგანტები და შეირჩა სწრაფმსრბოლი ვარსკვლავების 61

კანდიდატი. მათ შორის 8 ვარსკვლავია, რომელთა სიჩქარე 90% სანდოობის დონით 42 კმ/წმ აღემატება (თ. მძინარიშვილი და ქ. ჩარგეიშვილი, 2005).

### **მზის კვლევები აბასთუმანში**

მზე ჩვენი უახლოესი ვარსკვლავია. ამიტომ შესაძლებელია უფრო დაწვრილებით შევისწავლოთ როგორც მისი ზედაპირი, ასევე მზის ატმოსფეროს სხვადასხვა ფენები და აქტიური წარმონაქმნები. მზე შესანიშნავი ფიზიკური ლაბორატორიაა, სადაც განუწყვეტლივ მიმდინარეობს არაჩვეულებრივი ბუნებრივი ექსპერიმენტები, რომელთა შედეგების ანალიზი განსაკუთრებულად დიდ მნიშვნელობას იძენს სხვა ვარსკვლავების ბუნების შესწავლის საქმეში.

მზის შესწავლას აბასთუმნის ობსერვატორიის დაარსებისთანავე დიდი მნიშვნელობა ენიჭებოდა. უკვე 1932 წლიდან წარმოებდა მზის ფოტოსფეროს დაკვირვება, ხოლო 1934 წლიდან ამუშავდა სამზეო სპექტროჰელიოსკოპი. 1957 წელს მზე-დედამიწის კავშირების შესასწავლად შეიქმნა საერთაშორისო ქსელი, რომელსაც აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორიაც შეუერთდა. ამასთან დაკავშირებით, დამონტაჟდა ფოტოსფერულ-ქრომოსფერული ტელესკოპი და რადიოტელესკოპი, რომელიც მზის კორონის რადიოგამოსხივებას აკვირდება. ამუშავდა „მზის სამსახურის“ საერთაშორისო პროგრამა. 1964 წელს ობსერვატორიაში მწყობრში ჩადგა სამზეო ჰორიზონტული ტელესკოპი, ხოლო 1974 წელს – 53 სმ-იანი დიდი დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფი, რომელიც დღემდე მზის კორონის შესწავლისთვის გამიზნული ამ ტიპის უდიდესი ინსტრუმენტია. მცირე ზომის ინსტრუმენტებიდან აღსანიშნავია აგრეთვე ლიოს ტიპის დანბელებაგარეშე კორონოგრაფი. აბასთუმნის ობსერვატორიაში დაგროვებულია მდიდარი დაკვირვებითი მასალა მზის აქტივობის რამდენიმე ციკლისთვის.

აბასთუმანში დიდი ყურადღება ექცეოდა მზის გამოსხივების სპექტრის შესწავლას, რომელიც მდიდარ ინფორმაციას იძლევა მზის ქიმიური შემადგენლობის, მზის ატმოსფეროსა და მის წარმონაქმნებში ფიზიკური პირობების შესახებ. ინფრაწითელი გამოსხივების ანალიზით დადგინდა ფოტოსფეროს სპეციფიური მახასიათებლები (გ. ხეცურიანი, 1965). სამზეო ჰორიზონტული ტელესკოპის მეშვეობით მიღებული ემისიური ხაზების პარამეტრების ანალიზის საფუძველზე შესწავლილია მეტალური პროტუბერანცების (მზიდან ამოტყორცნილი იონიზებული გაზის უზარმაზარი ჭავლების) ფიზიკური მახასიათებლები (გ. ხეცურიანი და მ. გიგოლაშვილი, 1975). სპექტრული ხაზების შესწავლით გამოკვლეულია ე.წ. წყნარი პროტუბერანცების ფაქიზი სტრუქტურა, შემოთავაზებულია ჰიპოთეზა მათი უპირატესად ბოჭკოვანი შემადგენლობის შესახებ (მ. გიგოლაშვილი, 1978), მიღებულია ინფორმაცია მათი შიდა სივრცული სტრუქტურის შესახებ და შემუშავებულია წყნარი პროტუბერანცების ახალი მოდელი (მ. გიგოლაშვილი, ი. ჟუგუდა, 1982; 1983).

აბასთუმნის ობსერვატორიაში განსაზღვრულია და დაზუსტებულია ზოგიერთი იშვიათად დაკვირვებული ქიმიური ელემენტის ფარდობითი ქიმიური შედგენილობა მზის პროტუბერანცის ემისიური ხაზების ინტენსივობების მიხედვით. შემუშავებულია წყნარ პროტუბერანცში წყალბადის ატომების სრული რაოდენობის შეფასების მეთოდი. განსაზღვრულია იშვიათი ელემენტების – იტრიუმის, ცირკონიუმისა და სკანდიუმის ფარდობითი სიჭარბის ყველაზე ალბათური მნიშვნელობები (მ. გიგოლაშვილი, 1984).

## **მზის დიფერენციალური ბრუნვა**

მზის თეორიული მოდელის შესაქმნელად, რაც მზის აქტივობის გამოვლინებების ასახსნელადაა საჭირო, აუცილებელია მზის სხვადასხვა ფენისა და აქტიური წარმონაქმნების დიფერენციალური ბრუნვის თავისებურებების შესწავლა. აბასთუმნის ფოტოჰელიოგრამების კოლექციიდან 1950-1990 წლების განმავლობაში დაგროვილი დაკვირვებითი მასალის საფუძველზე შესწავლილია მზის ლაქების დიფერენციალური ბრუნვა მზის აქტივობის სხვადასხვა ციკლისთვის (მ. გიგოლაშვილი, თ. კვერნაძე, ე. ხუციშვილი, 1990; 2002). მონაცემების ანალიზის შედეგად დადგენილია, რომ არსებობს საკმაოდ მკაფიოდ გამოხატული კორელაცია ლაქების დიფერენციალურ ბრუნვასა და მზის აქტივობის ციკლურ ცვლილებებს შორის.

გამოთვლილია წყალბადის ბოჭკოების დიფერენციალური ბრუნვის წლიურ საშუალოსა და ციკლურ საშუალოებს შორის სხვაობა, რომელსაც ნარჩენი სიჩქარეები ეწოდა. ნარჩენი სიჩქარეების დროში ცვლილებების გათვალისწინებით მზის ორივე ნახევარსფეროში აღმოჩენილია მზის პოლარობის ცვლილების მომენტში ბოჭკოების იმპულსის დრეიფი მზის მაღალი განედებიდან ეკვატორის მიმართულებით (მ. გიგოლაშვილი, ვ. კუხიანიძე, დ. ჯაფარიძე, 1992; 2005). მზის №19-22 ციკლებისთვის წყალბადის ბოჭკოების დიფერენციალური ბრუნვის მიხედვით სტატისტიკურად დადგენილია მზის ბრუნვის ჩრდილო-სამხრეთული ასიმეტრიულობა. ლუწ ციკლებში მზის ჩრდილოეთ ნახევარსფერო ბრუნავს უფრო სწრაფად, ვიდრე სამხრეთ ნახევარსფერო, მაშინ, როდესაც სამხრეთ ნახევარსფეროს სიჩქარე დომინირებს კენტ ციკლებში. შემოთავაზებულია აღმოჩენილი ეფექტის ამხსნელი მექანიზმი (მ. გიგოლაშვილი, დ. ჯაფარიძე და სხვ., 2003-2013 წწ.).

## **დედამიწის ატმოსფეროს ზედა ფენების შესწავლა აბასთუმანში**

დედამიწის ატმოსფეროს ზედა ფენების გამოსხივების შესწავლა ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი გეოფიზიკური ამოცანაა, რომელიც ეფექტურად გამოიყენება ზედა ატმოსფეროს ფიზიკურ-ქიმიური თვისებების განსასაზღვრავად. აბასთუმნის ობსერვატორიაში დედამიწის ატმოსფეროს მაღალი ფენების, დილის და ღამის ცის ბინდის, ოზონის ფენის სისტემატური დაკვირვებების მრავალწლიანი, უნიკალური დამზერითი მასალა არის მოპოვებული. ლ. ფიშკოვას (1923-1996) მიერ 1952-1979 წლებში მიღებული დაკვირვებითი მასალის ანალიზის საფუძველზე მოხერხდა დედამიწის ატმოსფეროს ღამის ცის ნათების აღზნებისა და ინტენსივობის ვარიაციების კანონზომიერებათა განზოგადება საშუალო განედებისთვის.

გამოვლენილია სეისმური აქტივობა ღამის ცის ნათების ვარიაციებში (ლ. ფიშკოვა, თ. ტოროშელიძე, 1989). აბასთუმნის ობსერვატორიაში მიღებულია ოზონის დაკვირვებების მრავალწლიანი სერია. სტატისტიკური ანალიზის საშუალებით, ეპოქების ზედდების მეთოდით, მიღებულია, რომ მიწისძვრის დღეს, ან ერთი დღის შემდეგ, ოზონის საერთო რაოდენობა იზრდება (ვ. ისკანდაროვა, 1989).

აბასთუმანში 1978 წლის აგვისტოსა და 1979 წლის ივლისში, ფონური აეროზოლის შესასწავლად, ჩატარდა გაერთიანებული საბჭოთა-ამერიკული ექსპერიმენტები AFAEKS-78 და AFAEKS-79. გამოკვლეულია ასევე აირის ქიმიური შედგენილობა და აეროზოლის შემადგენელი ნაწილაკების გაბნევის დისპერსია (ბ. ვდოვინი, ვ. ისკანდაროვა, ე. ნეზვალი, 1982).

თ. ტოროშელიძის (1936-2002) მიერ, აბასთუმანში ბინდის ცის ნათების 630 ნმ ემისიის გაზომვების საფუძველზე, 1981-1986 წლებში შესწავლილია ეგზოსფეროს



ტემპერატურის ცვლილება და ქარების სიჩქარეები. მიღებულია, რომ საშუალო განედებზე ზედა ატმოსფერო თბება უცაბედი დასაწყისის მქონე მაგნიტური ქარიშხლების ძირითად ფაზაში წრიული ნაკადის მაღალენერგიული ნაწილაკების დალექვის გამო (თ. ტოროშელიძე, 1989).

1957-1997 წლებში სტრატოსფერული ოზონის, ასევე დაბალ-ენერგიული სტრატოსფერული კოსმოსური სხივების სხვადასხვა განედურ ზონებში მიწისპირა გაზომვებისა და კოსმოსური თანამგზავრებიდან ჩატარებული დაკვირვებითი მონაცემების ანალიზის შედეგად, აღმოჩენილია ოზონის ინტენსივობის 10%-იანი შემცირება გლობალური საშუალო სიდიდის მიმართ სხვადასხვა განედზე, მზის უკანასკნელი სამი ციკლის განმავლობაში. გამოკვლეულია კორელაციური კავშირები კოსმოსური სხივების ინტენსივობას, ოზონის ვარიაციებსა და მზის ლაქების რაოდენობას შორის (ი. მარტინი, თ. ტოროშელიძე და სხვ., 1999).

### **გლობალური დათბობა ატმოსფეროს ქვედა ფენაში**

გლობალური დათბობა ატმოსფეროს ქვედა ფენაში, ტროპოსფეროში, იწვევს ტემპერატურის კლებას მის ზედა ფენებში, მათ შორის, იონოსფეროში. ითვლება, რომ გლობალურ აცივებას ზედა ატმოსფეროში შედეგად უნდა მოჰყვეს იონოსფეროს ფენის დაწევა. იონოსფეროში, 200-300 კმ სიმაღლეზე ატომური ჟანგბადი გამოსხივდება წითელ უბანში, 630 ნმ ტალღის სიგრძეზე. სწორედ ამიტომ, ატმოსფეროს ამ არეში მიმდინარე ცვლილებები უნდა აისახოს სპექტრის წითელი ხაზის ინტენსივობაზე.

აბასთუმნის ობსერვატორიაში, რომელიც მდებარეობს შუა განედების რეგიონში, 1957 წლიდან წარმოებს დაკვირვებები ღამის ცის ნათებაზე სპექტრის სხვადასხვა უბანში, მათ შორის წითელ ხაზშიც. ობსერვატორიის მეცნიერებმა გ. დიდებულოძემ, გ. ჯავახიშვილმა, ნ. გუდაძემ, ლ. ლომიძემ და მ. თოდუამ (2008) შეისწავლეს ღამის განმავლობაში წითელი ხაზის ინტენსივობის ცვლილება 1957-1993 წლებში ჩატარებული დაკვირვებების მიხედვით. აღმოჩნდა, რომ ატომური ჟანგბადის წითელი ხაზის ინტენსივობა ამ პერიოდის განმავლობაში შეიცვალა. მეცნიერებმა ივარაუდეს, რომ ცვლილების მიზეზი უნდა ყოფილიყო იონოსფეროს F2 ფენის დაწევა. მოდელური გათვლების მიხედვით დაწევის სიდიდე უნდა ყოფილიყო 15-19 კმ. მიღებული შედეგი კარგ თანხვედრაში აღმოჩნდა თბილისის იონოსფერული სადგურის მონაცემებთან, რომელთა მიხედვით იონოსფეროს დაწევა ამავე პერიოდში 20 კმ-ით შეფასდა.

ამავე დროს, გლობალური დათბობის შედეგად გამოწვეულ ზედა ფენების აცივებას შეესაბამებოდა იონოსფეროს F2 ფენის ჩამოწევა მხოლოდ 6 კმ-ით. ობსერვატორიის თანამშრომლებმა ეს განსხვავება ახსნეს იონოსფერული ქარის გაძლიერებით ჩრდილოეთის მიმართულებით. მოდელურმა გამოთვლებმა აჩვენა, რომ ჩრდილოეთის ქარის გაძლიერება, აცივებასთან ერთად, მართლაც იწვევს იონოსფეროს F2 ფენის ჩამოწევას დაკვირვებული სიდიდით (ნ. გუდაძე, გ. დიდებულოძე და სხვ., 2008).

### **კოსმოლოგიური კვლევები**

აბასთუმნის ობსერვატორიაში კოსმოლოგიური ხასიათის კვლევებს დიდი ისტორია აქვს. ნათქვამის საუკეთესო ილუსტრაციას, ალბათ, მ. ვაშაკიძის 1949 წელს შესრულებული სამუშაო წარმოადგენს. ობსერვატორიაში ჩატარებული დაკვირვებების მიხედვით გრძელპერიოდიანი ცეფეიდებისა და გარეგალაქიკური ნისლეულის ფერის მაჩვენებელთა მის მიერ შექმნილი კატალოგების საფუძველზე, მ. ვაშაკიძემ გამოიკვლია და რაოდენობრივად შეაფასა ვარსკვლავთშორისი ნეიტრალური მთანთქმა.



გალაქტიკური მანძილების განსაზღვრის ფორმულაში მან შეიტანა მოდიფიკაცია, რომელიც ითვალისწინებს შთანთქმის ნეიტრალურ კომპონენტს. მ. ვაშაკიძემ განსაზღვრა შთანთქმის მნიშვნელობა გალაქტიკის პოლუსის მიმართულებით და აჩვენა, რომ ამერიკელი ასტრონომის ჰაბლის მიერ განსაზღვრული საერთო შთანთქმის მნიშვნელობა, რომელსაც ხშირად იყენებდნენ სამყაროს ასაკის გამოსათვლელად, ჭეშმარიტთან შედარებით შემცირებული იყო და მოითხოვდა შესწორებას. ამ ნაშრომით მ. ვაშაკიძემ მნიშვნელოვანი წვლილი შეიტანა ასტრონომიის იმ დროისთვის ახალი დარგის – კოსმოლოგიის განვითარებაში.

აბასთუმნის ობსერვატორიაში აქტიურად შეისწავლება მბრუნავი, დისკოებრი ობიექტები (ვ. ავსარჩისოვი, ჯ. ლომინაძე, გ. მამაცაშვილი, გ. ჩაგელიშვილი, რ. ჭანიშვილი, გ. ხუჯაძე და სხვ.). ასეთი ასტროფიზიკური ობიექტები წარმოადგენენ ჩვენი სამყაროს ფართოდ გავრცელებულ და მნიშვნელოვან სტრუქტურულ ელემენტებს. მათ რიცხვს მიეკუთვნება გალაქტიკები, კვაზარები, პროტოვარსკვლავური და პროტოპლანეტური დისკოები, აკრეციული დისკოები და სხვ. ამ ობიექტების ძირითადი მახასიათებელი თვისებაა არაერთგვაროვანი, ე.წ. დიფერენციალური ბრუნვა. სწორედ დიფერენციალური ბრუნვის ენერგია განაპირობებს ასტროფიზიკური დისკოების დინამიურ აქტივობას. მის ხარჯზე ხდება ტალღებისა და გრიგალების გაძლიერება, რამაც, თავის მხრივ, შესაძლოა, ქაოსური მოძრაობის (ტურბულენტობის) გაჩენა და დისკოში ნივთიერების აკრეცია განაპირობოს. ამ პროცესების შედეგად მიმდინარეობს კოლოსალური ენერგიის გამოყოფა, რომლის ეფექტურობა მნიშვნელოვნად აჭარბებს ბირთვული გარდაქმნების ენერგოეფექტურობას.

დიფერენციალური ბრუნვის ენერგიის ხარჯზე, დისკოებში, გარკვეულ პირობებში, წარმოიშვება რეგულარული სტრუქტურები, რომლებიც, თანამედროვე წარმოდგენებით, პროტოპლანეტურ დისკოებში პლანეტების „ჩანასახებს“ წარმოადგენენ. ამ საკითხების კვლევა განსაკუთრებით აქტუალური გახდა ოცდამეერთე საუკუნის დასაწყისიდან. თანამედროვე ტექნიკური შესაძლებლობების წყალობით 2013 წლისთვის აღმოჩენილია ათასამდე ეგზოპლანეტა.

აღსანიშნავია, რომ დედამიწის გულის თხევადი ლავა წარმოადგენს მაგნიტოაქტიურ, დიფერენციალურად მბრუნავ გარემოს, რომელიც წარმოქმნის და ინარჩუნებს დედამიწის მაგნიტურ ველს. ამდენად, ობსერვატორიაში ზემოაღნიშნული მიმართულებით წარმოებული კვლევების შედეგების გამოყენება შესაძლებელია დედამიწის მაგნიტური ველის დინამიკის შესასწავლად.

აბასთუმნის ობსერვატორიაში განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა ნეიტრინოებთან დაკავშირებულ კვლევებს, რომლებიც მიზნად ისახავენ ნეიტრინოების როლის გარკვევას სამყაროს მსხვილმასშტაბიანი სტრუქტურების (გალაქტიკებისა და გალაქტიკური გროვების) ჩამოყალიბებასა და გრავიტაციული ტალღების ფორმირებაში. შემუშავდა შესაბამისი მათემატიკური ფორმალიზმი, რომლის საშუალებით შეფასებული იქნა ნეიტრინოს მასის ქვედა ზღვარი. დასაბუთებული იყო, რომ ნეიტრინოს ყველა სახეობის მასათა ჯამი 2 ევ-ზე ნაკლები უნდა იყოს (თ. კახნიაშვილი და სხვ., 2005). მიღებულია, აგრეთვე, შეზღუდვა ნეიტრინოთა შესაძლო სახეობების რაოდენობისთვის, რომელიც არ უნდა აღემატებოდეს ოთხს (თ. კახნიაშვილი და ვ. ლუკაში, 1988, 1990). შეისწავლება ფარულ ენერგიასთან ნეიტრინოს ურთიერთქმედება, როგორც ნეიტრინოს მასის, ასევე სამყაროს აჩქარებით გაფართოების ახსნის მიზნით (გ. შიტოვი, ა. აუგუსტი და თ. კახნიაშვილი, 2009).

მეტად მნიშვნელოვანია კოსმოსური მაგნიტური ველების ევოლუციის შესწავლასთან დაკავშირებული კვლევები. სამუშაოები მიზნად ისახავენ როგორც გალაქტიკური მაგნიტური ველების დღესდღეობით დამზერილი  $10^{-6}$  გაუსის რიგის სიდიდეების ახსნას, ასევე ამ ველების წარმოქმნის მექანიზმების დადგენას. მიჩნეულია, რომ მაგნიტური ველები მცირე საწყისი ველების გაძლიერების შედეგად წარმოიქმნენ. თვით საწყისი მცირე მაგნიტური ველების ბუნება ჯერჯერობით უცნობია. გაჩნდნენ ისინი ასტროფიზიკური მექანიზმებით მცირე მასშტაბებში, მაგალითად, ორმაგ სისტემებში ანდა აქტიური გალაქტიკური ბირთვების მახლობლად ციური ობიექტების სწრაფი ბრუნვის შედეგად? თუ მათი წარმომავლობა კოსმოლოგიური ხასიათისაა და ისინი სამყაროს განვითარების ადრეულ ეტაპებზე გაჩნდნენ?

აბასთუმნის ობსერვატორიის თანამშრომლები (ა. თევზაძე, თ. კახნიაშვილი, გ. ლავრელაშვილი, გ. დოღობერიძე) აქტიურად მონაწილეობენ კოსმოლოგიური წარმოშობის მაგნიტური ველების მოდელის შემუშავებაში. დადგენილია საწყისი კოსმოლოგიური მაგნიტური ველების სიდიდეების ზედა ზღვარი. შესწავლილია რელიქტურ მიკროტალღურ ფონზე მაგნიტური ველების ზეგავლენა, რომელიც თავს უნდა იჩენდეს მისი იზოტროპულობის დარღვევით. კერძოდ, ნაჩვენებია, რომ მაგნიტური ველები, შესაძლოა, წარმოადგენდნენ რელიქტური გრავიტაციული ტალღების წყაროებს. შეფასებულია გრავიტაციული ტალღების ფონის დამზერის კრიტერიუმები ამჟამად მშენებარე ლაზერული ინტერფერომეტრისთვის eLISA/NGO (იხ. პარაგრაფები 2.4 და 2.11). ასევე, შემოთავაზებულია გარკვეული კოსმოლოგიური დაკვირვებებით ფუნდამენტური სიმეტრიების შენახვის კანონების, მაგალითად, ლორენც-ინვარიანტობის შემოწმება.

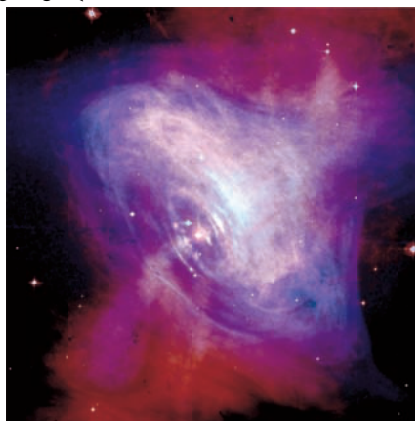
### **დ1.3 თეორიული ასტროფიზიკის ცენტრი**

კომპაქტური ციური ობიექტების შესწავლა თანამედროვე ასტროფიზიკის კვლევების ერთ-ერთ მნიშვნელოვან მიმართულებას წარმოადგენს. მათ შორის მეტად დიდი როლი ენიჭება პულსარების კვლევას. როგორც ცნობილია, პულსარი სწრაფად მბრუნავი ნეიტრონული ვარსკვლავია, რომელის ელექტრომაგნიტური გამოსხივება მისი მაგნიტური ღერძის გასწვრივაა მიმართული და დედამიწას მკაცრად განსაზღვრული პერიოდულობით აღწევს (იხ. პარაგრაფი 1.4). ეს ასტროფიზიკური ობიექტები გამოირჩევა თავისი უნიკალური თვისებებით. მათი ყველა პარამეტრი ექსტრემალურია. ასე, მაგალითად, ზომა არ აღემატება რამდენიმე ათეულ კილომეტრს; ბირთვებს ახასიათებს ძალზე მაღალი სიმკვრივე; მაგნიტური ველი ზემოლიერია; ბრუნვის სიჩქარე მეტად მაღალია; ხოლო მათ მაგნიტოსფეროებში ნაწილაკების (ელექტრონებისა და პოზიტრონების) სიჩქარეები რელატივისტურია. ასეთი პარამეტრების მიღწევა დედამიწაზე შეუძლებელია. ამიტომ ბუნებრივია, რომ ასეთი ობიექტებისადმი ინტერესი მრავალი პროფილის ფიზიკოსს აერთიანებს. ისინი შესანიშნავ კვლევით ლაბორატორიას წარმოადგენენ.

პულსარის ანუ მასიური ნეიტრონული ვარსკვლავის ბრუნვის შენელებისას გამოიყოფა დიდი ენერგია, მაგრამ პულსარის გამოსხივებაში მის მხოლოდ მცირე ნაწილს შეაქვს წვლილი. პულსარის გამოსხივების მექანიზმები დღესაც სამეცნიერო კვლევისა და კამათის საგანს წარმოადგენს. არსებობს პულსარის გამოსხივების აღმწერი რამდენიმე მოდელი, მათ შორის ე.წ. „ქართული მოდელი“, რომელიც თეორიული ასტროფიზიკის ცენტრის თანამშრომლების მიერაა შემუშავებული (ა. ყაზბეგი,

გ. მაჩაბელი, გ. მელიქიძე, 1987). მოდელი ფართოდაა აღიარებული ასტროფიზიკურ სამეცნიერო წრეებში. იგი წარმოადგენს ელექტრონულ-პოზიტრონული რელატივისტური პლაზმის ელექტროდინამიკის თანამიმდევრულ თეორიას, რომელიც დაკვირვებათა მონაცემების ახსნის საშუალებას იძლევა.

პულსარის ბრუნვისას მასში ჩაყინულმა მაგნიტურმა ველებმა შესაძლებელია ვარსკვლავის გარე ვაკუუმში აღძრან ელექტროსტატიკური ველი, რაც თავის მხრივ პულსარის მაგნიტოსფეროში ელექტრონულ-პოზიტრონულ პლაზმას წარმოშობს. ცენტრის თანამშრომლების მიერ მიმდინარეობს ასეთი უჩვეულო პლაზმის დეტალური შესწავლა. აღმოჩნდა, რომ არსებობს ორი მექანიზმი, რომლებსაც ძალუძთ პულსარის ელექტრონულ-პოზიტრონულ პლაზმაში ელექტრომაგნიტური ტალღების აღძვრა: ციკლოტრონული და ე.წ. ჩერენკოვ-დრეიფული (Cherenkov-drift) არამდგრადობები. ამ უკანასკნელის ანალოგი ტრადიციულ ელექტრონულ-იონურ (ლაბორატორიულ) პლაზმაში არ არსებობს. იგი წარმოადგენს სუსტად არაერთგვაროვან წყვილურ პლაზმაში ჩერენკოვის ეფექტის განზოგადებას. ეს ორი მექანიზმი რადიოდიამაჰონში დაკვირვებით მონაცემებს კარგად ხსნის.



სურ. 119 პულსარი კიბორჩხალას ნისლეულში, რომელიც გაჩნდა 1054 წელს დამზერილი ზეახალი ვარსკვლავის აფეთქების შედეგად

შესწავლილია პულსარის გამოსხივების არაწრფივი მექანიზმებიც. დადგენილია, რომ აღძრული ტალღების კვაზიწრფივ ურთიერთქმედებას ნაწილაკებთან შეუძლია შექმნას სათანადო პირობები სინქროტრონული გამოსხივების გასაჩენად, რაც თავის მხრივ მაღალი სიხშირის ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებას იწვევს. ამჟამად ცენტრის თანამშრომლები განაგრძობენ მაღალსიხშირული გამოსხივების კვლევას. ეს თემა მეტად მნიშვნელოვანია ზემაღალი ენერგიის მქონე ნაწილაკების აჩქარების მექანიზმების დასადგენად.

თეორიული ასტროფიზიკის ცენტრში მიმდინარეობს კვლევები კიდევ მრავალი საინტერესო მიმართულებით, როგორებიცაა დისკური აკრეცია შავ ხვრელებზე; აქტიური გალაქტიკური ბირთვები; სიმკვრივის ტალღების დინამიკა სპირალურ გალაქტიკებში; პულსარის ქარის დინამიკა; კოლექტიური მოვლენები მზის ატმოსფეროში; მზის ქარის დინამიკა; დინამიური მოვლენები დედამიწის ატმოსფეროში; ლაბორატორიული პლაზმის კვლევები და სხვ. თეორიული ასტროფიზიკის ცენტრი მჭიდროდ თანამშრომლობს როგორც საქართველოს, ასევე უცხოურ სამეცნიერო ორგანიზაციებთან.

## **დ1.4 ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი**

აბასთუმნის ობსერვატორიის დაარსების შემდეგ, აუცილებელი გახდა უმაღლესი ასტრონომიული განათლების შექმნა ზოგადსაგანმანათლებლო და უმაღლესი სასწავლებლებისთვის პედაგოგთა, ობსერვატორიებისთვის კი მკვლევართა კადრების მომზადების მიზნით. იმ დროისთვის საქართველოში ამის საფუძველი უკვე არსებობდა. ჯერ კიდევ XX საუკუნის დასაწყისში შეიქმნა სასკოლო ასტრონომიული კურსები (ი. გომართელი, ა. კალანდაძე, კ. კანდელაკი), ხოლო 1918 წელს თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის დაარსებისთანავე დაფუძნდა საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა სწავლება მაღალ დონეზე.

საუნივერსიტეტო ასტრონომიულ განათლებას დიდი ღვაწლი დასდო უმაღლესი კლასის ასტრონომ-გეოდეზისტმა, უნივერსიტეტის ერთ-ერთმა დამაარსებელმა, ანდრია ბენაშვილმა. მოსკოვის სამხედრო სასწავლებლისა და გენერალური შტაბის აკადემიის დამთავრების შემდეგ იგი წარმართავდა ტრიანგულაციის სამუშაოებს დასავლეთ რუსეთში, განაგებდა გეოდეზიის კათედრას პეტერბურგის ტექნოლოგიურ უნივერსიტეტში. შემდგომ გადმოვიდა საქართველოში. 1918-1921 წლებში იგი ხელმძღვანელობდა თბილისის გეოფიზიკურ ობსერვატორიას. წამყვანი ფიგურა იყო უნივერსიტეტის სამათემატიკო-საბუნებისმეტყველო ფაკულტეტზეც, სადაც ჩამოაყალიბა ასტრონომიის კაბინეტი. უძღვებოდა ასტრონომია-გეოდეზიის სწავლებას საქართველოს თითქმის ყველა უმაღლეს სასწავლებელში. კითხულობდა ლექციებს ასტრონომიაში, გეოდეზიასა და ტოპოგრაფიაში, ასევე მათემატიკურ საგნებში. მანვე შექმნა პირველი საუნივერსიტეტო სახელმძღვანელოები ქართულ ენაზე: უმაღლესი გეოდეზია, ტოპოგრაფიის კურსი, ცდომილებათა თეორია, სფერული ტრიგონომეტრია (1933) და სფერული ასტრონომია (1938). ამ უკანასკნელში, რომელიც უმაღლესი ასტრონომიის კურსების ფუნდამენტია, მეტყველი ენით, მაღალ მათემატიკურ დონეზე, განხილულია დროის აღრიცხვა, ციური სფეროს სტრუქტურა და დღეღამური ბრუნვა, ასტრონომიული საკოორდინატო სისტემები, პარალაქსი, აბერაცია, რეფრაქცია, პრეცესია, დაბნელებათა თეორია, სამყაროს აგებულება. კონკრეტულ საკითხთა ღრმა განხილვა შეთავსებულია საერთო-ასტრონომიულ სურათში მათი როლის გამოკვეთასთან. დახვეწილია ტერმინოლოგია. ანდრია ბენაშვილმა მოამზადა საფუძველი ასტრონომიის სწავლების კიდევ უფრო მაღალ საფეხურზე ასაყვანად.

1937 წელს აკადემიკოსმა ევგენი ხარაძემ უნივერსიტეტში ჩამოაყალიბა ასტრონომიის კათედრა. სწავლება ჯერ ფიზიკის, მერე კი მექანიკა-მათემატიკის ფაკულტეტზე ხდებოდა. ასტრონომიის კათედრა თავიდან განთავსდა უნივერსიტეტის მეორე კორპუსში. 1970 წლიდან კი, 2006 წელს კათედრის დახურვამდე, ასტრონომიის კათედრა გადავიდა უნივერსიტეტის მაღლივ კორპუსში. კათედრაზე, რომელსაც 1977 წლამდე ე. ხარაძე ხელმძღვანელობდა (1998-2006 წლებში კი შალვა საბაშვილი), მოხერხდა მაღალი დონის ასტრონომიის სფეროს პედაგოგიურ-სამეცნიერო კადრების მომზადების დაფუძნება, სახელმძღვანელოთა და სამეცნიერო-პოპულარული ლიტერატურის შექმნა. იკითხებოდა ლექციები ასტრონომიის მიღწევებზე უნივერსიტეტის პლანეტარიუმსა თუ აბასთუმნის ობსერვატორიაში მოწვეული ექსპურსანტებისთვის, ასევე რადიო-ტელევიზიაში, სკოლებსა და პიონერთა და მოსწავლეთა სასახლეში. კათედრა აღიჭურვა დასაკვირვებელი და გამოზომი

აპარატურითა და თვალსაჩინოებებით. დამყარდა კავშირი აბასთუმნის ობსერვატორიასთან: იქ სტუდენტები გადიოდნენ სასწავლო და სადიპლომო პრაქტიკას, ეცნობოდნენ დამზერის იარაღებსა და მეთოდებს, მონაწილეობდნენ კვლევით სამუშაოებში, ობსერვატორიის თანამშრომლები კი კითხულობდნენ ასტრონომიულ დისციპლინებს უნივერსიტეტში (ვ. ჯაფიაშვილი, რ. კილაძე, ნ. მაღალაშვილი, ც. ხეცურიანი, რ. მიგვაშვილი, ა. ტორონჯაძე, მ. ქუმსიაშვილი და სხვ.). დაინერგა ცნობილ ასტრონომთა მოწვევა სსრკ სამეცნიერო ცენტრებიდან სპეცკურსების (ვ. ამბარცუმიაძე, ა. მასვეიჩი და სხვ.), ან მოხსენებათა წასაკითხად (გ. დუბოშინი, ს. კაპლანი, ვ. ივანოვი და სხვ.), აგრეთვე სტუდენტების და ასპირანტების გაგზავნა სხვა სამეცნიერო დაწესებულებებში სტაჟირებისა და სადიპლომო შრომათა შესრულებისთვის. კათედრაზე მოქმედებდა სამეცნიერო სემინარი (ხელმძღვანელები ნ. მაღნარაძე და შ. საბაშვილი) და სტუდენტთა სამეცნიერო წრე. პროფესორ-მასწავლებლები და სტუდენტები მონაწილეობდნენ საფაკულტეტო კონფერენციებში.

XX საუკუნის 50-იანი წლების დასაწყისში უნივერსიტეტის მეორე კორპუსში ამოქმედდა მცირე ობსერვატორია ცაისის ხელსაწყოებით: 20 სანტიმეტრიანი ტელესკოპი მბრუნავი თალით (1981 წელს ხანძრის შედეგად ტელესკოპი მწყობრიდან გამოვიდა) და მცირე პლანეტარიუმი (მოქმედებს დღემდე). ობსერვატორია დიდ როლს ასრულებდა სტუდენტთა თეორიული ცოდნის პრაქტიკული გაღრმავების საქმეში.

კათედრაზე მიმდინარეობდა მეცნიერული კვლევა ცის მექანიკაში, ასტროფიზიკაში, ვარსკვლავთა ასტრონომიაში. მუშავდებოდა ტერმინოლოგია და ასტრონომიის ისტორიის საკითხებიც.

მნიშვნელოვანი შედეგები მიიღო ცის მექანიკასა და ასტროდინამიკაში პროფ. ნინო მაღნარაძემ (საქართველოში პირველი მეცნიერებათა დოქტორი საბუნებისმეტყველო დარგებში). მან შეისწავლა ცვლადმასიანი სხეულის მოძრაობა მრავალი სხეულის გრავიტაციულ ველში (შეესატყვისება კოსმოსური რაკეტების მოძრაობას სხვადასხვა ციურ სხეულთა სიახლოვეს). განიხილა მეტეორულ სხეულთა ნაკადებში მიზიდულობის პრობლემა, ხარისხოვან მწკრივებად გაშალა ნიუტონის პოტენციალი ელიფსური ორბიტისთვის და გამოიკვლია ამ მწკრივთა კრებადობა პარამეტრთა რიგი მნიშვნელობებისთვის. გამოიკვლია სამი სხეულის შეზღუდული ამოცანის კერძო შემთხვევები, როცა განსახილველი სხეულის მასა დროის წინასწარ ცნობილი ფუნქციებია (რეაქტიული ძალით რაკეტის მოძრაობა, ვთქვათ, ორი უძრავი ცენტრის შემთხვევაში). ამ ამოცანის ძირითადი დიფერენციალური განტოლებების ამონახსნი მან წარმოადგინა დროის ხარისხოვანი მწკრივებით, გამოიყვანა რეკურენტული თანაფარდობანი შესაბამის კოეფიციენტებს შორის და დაამტკიცა მიღებულ მწკრივთა კრებადობა. გამოიკვლია კოსმოსური რაკეტების მოძრაობა დედამიწასა და ვენერას ახლოს. შემდგომში განიხილა ცვლადმასიან სხეულთა მოძრაობა შეჯახების მახლობლად და შეისწავლა რელატივისტური ეფექტები ამ ამოცანაში. სტეფენსონის მეთოდის განზოგადებით განიხილა რაკეტის მოძრაობის რეგულარული და არარეგულარული ამოცანები გრავიტაციულ ველში რეაქციის ძალებისა და ატმოსფეროს წინააღმდეგობის გათვალისწინებით. ნ. მაღნარაძის შრომებმა ფართო ყურადღება მიიპყრეს აქტუალურობით და მაღალი მათემატიკური დონით (რამდენიმე შრომა ამავე დარგში გამოაქვეყნა მისმა მოსწავლემ ციური ჩიტალაძემ).

გალაქტიკების აგებულების, კერძოდ ე.წ. ვარსკვლავთა ასტრონომიის პრობლემებზე მუშაობდა კათედრის დოცენტი მიხეილ კოლხიდაშვილი. იგი იკვლევდა ვარსკვლავთა



სივრცული სიჩქარეების ცალკეულ მდგენელთა – სხივურ და ტანგენციურ სიჩქარეთა ამოცანას. ასევე გამოიკვლია კატალოგებში მოყვანილ ვარსკვლავთა პარალაქსების მნიშვნელობათა შეფასება. გამოიყვანა ვარსკვლავთა სივრცული სიჩქარეების ელიფსოიდური განაწილების ფორმულები. განაზოგადა ამ სფეროში ცნობილი კლაიბერის თეორემები. განიხილა შესაბამის ფორმულათა სივრცული წარმოდგენა. სტატისტიკური მეთოდებით დაამუშავა რამდენიმე ათასი ვარსკვლავის პარალაქსები და შეისწავლა მათი სიზუსტე, ანუ შეაფასა პარალაქსთა მნიშვნელობების საიმედოობა.

ამავე დარგში მუშაობდა კათედრის აღზრდილი ბესარიონ არჩემაშვილიც. მოსკოველ ასტრონომებთან თანამშრომლობით იგი სწავლობდა ვარსკვლავთა ზოგიერთი სფერული გროვის ნათობის ფუნქციას, გროვის გამოსხივების ძალის ცვლილებას ცენტრიდან პერიფერიისკენ. თავის გამოკვლევათა საფუძველზე მან შეაფასა კონკრეტულ გროვათა ასაკები, ააგო ამ გროვათა მოდელები, როგორც სივრცულ-სტრუქტურული, ისე კინემატიკური თვალსაზრისით. გამოიკვლია აგრეთვე მზის მახლობელ სივრცეში ახალგაზრდა ვარსკვლავთა მოძრაობა.

კათედრის დოცენტი გალაქტიონ ქევანიშვილი მუშაობდა ჩვენი გალაქტიკის ვარსკვლავთა სივრცული განაწილების საკითხებზე. კერძოდ, ეძებდა ისეთ არეებს, რომლებშიც დანარჩენ სივრცესთან შედარებით კონკრეტული ტიპის ობიექტები შედარებით მკვრივად არიან განლაგებული. ეს ამოცანა ეხმიანება ვარსკვლავთა წარმოქმნის პრობლემას: ამგვარი არეები, რომელთა ობიექტები შემდგომში სხვა უბნებში იფანტებიან, ჩვენი გალაქტიკის ვარსკვლავთა წარმოშობის ადგილებია. გ. ქევანიშვილმა მონტე-კარლოს მეთოდით შეისწავლა ადრინდელი (A) სპექტრული ტიპის 55 000 ვარსკვლავი და ალბათობის თეორიის ხერხებით გამოავლინა ჩვენ გალაქტიკაში ამ ტიპის ვარსკვლავთა 20-ზე მეტი სივრცული შეჯგუფება, შეაფასა მათი ზომები და მათში ობიექტთა კონცენტრაციის ხარისხი საერთო ფონის მიმართ.

კათედრის უფროსი მასწავლებელი გივი კვირკველია მუშაობდა პრაქტიკული ასტრონომიის საკითხებზე. თარგმნა ამ დარგის რუსული სახელმძღვანელოები და შემდგომში თვითონაც შეადგინა სალექციო კურსი. გამოქვეყნებული აქვს სამეცნიერო-პოპულარული ლიტერატურა. ზუსტად განსაზღვრა აბასთუმნის ობსერვატორიის ტელესკოპების ფუძეების მდებარეობები, რაც მნიშვნელოვანია ამ ტელესკოპებით გაზომილი მნათობების კოორდინატების სიზუსტის დასადგენად. იკვლევდა სინათლის საერთო შთანთქმას გალაქტიკაში. გადამწყვეტი როლი შეასრულა უნივერსიტეტში დედამიწის ხელოვნურ თანამგზავრებზე ვიზუალური და ოპტიკური დაკვირვების სადგურის შექმნისა და ხელმძღვანელობის საქმეში. ამ დაკვირვებებით ხდებოდა თანამგზავრთა კოორდინატების განსაზღვრა და საჭიროების შემთხვევაში ორბიტების კორექცია. მსგავსი სამსახური ხორციელდებოდა აბასთუმნისა და ბათუმშიც. იგი მნიშვნელოვან როლს თამაშობდა კოსმონავტიკის განვითარების საქმეში.

პროფ. შალვა საბაშვილის ძირითადი შრომები თეორიულ ასტროფიზიკას ეხება. მან ლოკალური თერმოდინამიკური წონასწორობის არარსებობისას ვარსკვლავთა სპექტრული ხაზების ფორმირების შესწავლით ააგო მილნ-ედინგტონის განზოგადებული მოდელი, მიიღო ინტეგრალურ განტოლებათა სისტემები წყაროს ფუნქციებისთვის წყალბადის ხაზებში. შექმნა მზის პროტუბერანცების ოპტიკური ზომების გაანგარიშების მეთოდი სპექტრული ხაზების პროფილთა მრუდების ასიმპტოტური ყოფაქცევის მიხედვით. შეადგინა გამოსხივების გადატანის აღმწერ ფუნქციათა მნიშვნელობების ცხრილები სპექტრულ ხაზებში შთანთქმის კოეფიციენტის

ლორენცისა და დოპლერის პროფილებისთვის და გარემოს ოპტიკური ზომებისა და გაზნევისას ხაზებში ფოტონთა გადარჩენის ალბათობის სხვადასხვა მნიშვნელობებისთვის. გამოიყვანა ბრტყელ და სფერულ გარემოებში გამოსხივების გაზნევის მახასიათებელ ფუნქციათა ასიმპტოტიკა ოპტიკური ზომების ზრდისას. უსასრულო გარემოში ატომთა აღზნების გადატანის განხილვისას, ალბათური მდგრადი განაწილებების გამოყენებით, გამოიყვანა კონსერვატიულ გარემოში აღზნების გავრცელების ასიმპტოტური სახე ფოტონის გაზნევითა რიცხვის უსასრულო ზრდისთვის. გარემოს ფიზიკურ პარამეტრთა არაერთგვაროვნებით ახსნა პროტუბერანცების სპექტრულ ხაზთა ასიმეტრიულობა. შეისწავლა წყაროს ფუნქციის რიცხვითი ამოხსნის დაჩქარების საკითხი სათანადო განტოლებების იტერაციათა, მხოლოდ შერჩეული რიცხვის გამოთვლის საფუძველზე. აქვს კვლევები საქართველოში ასტრონომიული ტერმინოლოგიისა და კოსმოსის შესახებ ცოდნის გავრცელების ისტორიაზე სხვადასხვა ეპოქის ლიტერატურულ თუ ენციკლოპედიურ-კალენდარულ ძეგლთა მიხედვით.

პროფ. გიორგი მაღასიძის შრომები ეძღვნებოდა ვარსკვლავთა სისტემებში გრავიტაციული ველის ხასიათისა და მათში სისტემის წევრთა მოძრაობის შესწავლას. დიდი ადგილი დაეთმო გალაქტიკაში გრავიტაციული ველის პოტენციალის ფორმების განხილვას. ერთ-ერთი სახის პოტენციალი ასტრონომიულ ლიტერატურაში შესულია კუზმინ-მაღასიძის პოტენციალის სახელწოდებით. გ. მაღასიძემ გამოიკვლია ვარსკვლავთა სისტემებში ობიექტთა მოძრაობის ბრტყელი და სივრცული ორბიტები გრავიტაციული პოტენციალის სხვადასხვა ფორმისათვის, დაადგინა ვარსკვლავთა სისტემებში მასათა განაწილება და ააგო ამ სისტემების ფიზიკური მოდელები. შეისწავლა კავშირი განსახილველი ობიექტების ფორმასა და მათ ასაკობრივ თუ ქიმიურ მახასიათებლებს შორის და სხვ.

დოცენტ იაკობ ჩხიკვაძის შრომები, შესრულებული ასტრონომიის კათედრაზე, ეძღვნებოდა განსაკუთრებული სპექტრული მახასიათებლების მქონე ზოგიერთი საინტერესო ტიპის ცვალებადი ვარსკვლავის შესწავლას. სახელდობრ, მათი გამოსხივების სპექტრების თავისებურებათა ახსნას სათანადო ვარსკვლავის ფიზიკური სივრცული მოდელის კვლევის საფუძველზე. მისი სადისერტაციო შრომა ეძღვნებოდა სხვადასხვა ფიზიკური ბუნების ვარსკვლავთა წყვილის (სიმბიოტიკური ვარსკვლავები) თვისებების კვლევას.

პროფ. რევაზ ჭილაძის კვლევის საგანი იყო მზის სისტემის ზოგიერთი პლანეტისა და მათი თანამგზავრების შესწავლა დამზერითი ასტრონომიის მეთოდებით. სახელდობრ, თანამგზავრების გამოსხივების პოლარიზაციასა და მათ ფიზიკურ, გეომეტრიულ თუ კინემატიკურ მახასიათებლებს შორის კავშირის გამოკვლევა. წლების განმავლობაში ამ მიმართულებით რ. ჭილაძემ აბასთუმნის ასტროფიზიკურ ობსერვატორიაში დიდი რაოდენობით შეასრულა სპეციალური დაკვირვებები, რომელთა დამუშავებით დაადგინა რიგი კანონზომიერებანი ზემოაღნიშნულ პარამეტრებს შორის. ბოლო ნაშრომებში იგი იკვლევდა თანამგზავრების ზედაპირთა ფიზიკურ-ქიმიურ პარამეტრებსაც მათი გამოსხივების თავისებურებების მიხედვით. ნაშრომებმა შეადგინა ავტორის დისერტაციები.

მიხეილ საგინაშვილი პეტერბურგელ ასტრონომებთან თანამშრომლობით იკვლევდა ვარსკვლავთა ასტრონომიისა და დინამიკის საკითხებს. მან შეისწავლა ვარსკვლავთა სისტემაში მოძრაობის მესამე ინტეგრალი და სიჩქარეთა ველი კვაზიჰუკისეული

პოტენციალების შემთხვევაში. ააგო მოცემულ სიჩქარეთა ველის შემქმნელი პოტენციალების სრული კლასის განსაზღვრის მეთოდი, შეისწავლა სხეულთა მოძრაობა როტაციულ-სიმეტრიული პოტენციალის ველში და სხვ.



სურ. 120 თსუ-ს ასტრონომიის კათედრის თანამშრომელთა ჯგუფი სტუდენტებთან ერთდ. მარცხნიდან მარჯვნივ: ც. ჩიტალაძე, მ. კაშია, შ. საბაშვილი, რ. ჭილაძე, ნ. მაღნარაძე, გ. ქევანიშვილი, ე. ხარაძე, მ. კოლხიდაშვილი (1981 წ.)

კათედრის წევრები (მ. კოლხიდაშვილი, გ. კვირკველია, გ. ქევანიშვილი, ა. კერესელიძე, მ. კაშია) მონაწილეობდნენ თანამგზავრებზე დაკვირვებებში და მზის დაბნელებების დამზერაში.

კათედრის წევრები აქვეყნებდნენ შრომებს რესპუბლიკურ, საკავშირო თუ საერთაშორისო ჟურნალებში, მონაწილეობდნენ სხვადასხვა სამეცნიერო სემინარებში, კონფერენციებში და სიმპოზიუმებში, ასევე მათ ორგანიზებაში, მაგალითად, მესამე ევროპული ასტრონომიული კონფერენცია (თბილისი, 1975) და ასტრონომიული კადრების მომზადების საკავშირო საბჭოს პლენუმი (თელავი, 1979). კათედრის წევრები მონაწილეობდნენ საკავშირო და საერთაშორისო ასტრონომიულ ორგანიზაციებში და დარგობრივ კომისიებში. ე. ხარაძე ათეული წლები ხელმძღვანელობდა გალაქტიკის შემსწავლელ საკავშირო კომისიას, შვიდი წელი იყო საერთაშორისო ასტრონომიული კავშირის ვიცე-პრეზიდენტი. დიდხანს ედგა სათავეში „აბასთუმნის ობსერვატორიის ბიულეტენს“ და „საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის მოამბეს“.

კათედრაზე შეიქმნა სახელმძღვანელოთა სერია როგორც ბაკალავრიატის, ისე მაგისტრატურის სტუდენტებისთვის. ითარგმნა ი. პოლაკის „ზოგადი ასტრონომია“ (შემდგომში ამავე საგნის კურსი შექმნა მ. იმნაძემ). ე. ხარაძემ შეადგინა ორტომეული „ასტრონომიის საფუძვლები“, ასევე „ზოგადი ასტროფიზიკა“, მოგვიანებით კი „ასტრონომიის ისტორია“ და „ვარსკვლავთა სპექტრული კლასიფიკაცია“ (თანავტორებთან ერთად). გამოიცა მ. კოლხიდაშვილის „ვარსკვლავთა ასტრონომია“; გ. ქევანიშვილის „სფერული ასტრონომია“, ორ ნაკვეთად; გ. კვირკველიას „პრაქტიკული

ასტრონომია“; რ. კილაძის „თეორიული ასტროფიზიკა“; ნ. მაღალაშვილის „ცვალებადი ვარსკვლავები“; შ. საბაშვილის „ლექციების კურსი ასტრონომიაში“, სამ ნაკვეთად; მ. ქუმსიაშვილის „ცვალებადი ვარსკვლავები“ და სხვ. იქმნებოდა დამხმარე სახელმძღვანელოებიც. მაგალითად, მეორე ასტრონომიული რევოლუციის შედეგები აისახა შ. საბაშვილის წიგნში „სამყაროს საინტერესო ობიექტები“ (1977).

დიდი მასშტაბი მიიღო სამეცნიერო, ენციკლოპედიური, კალენდარული და სამეცნიერო-პოპულარული ლიტერატურის გამოცემა. დაარსდა ყოველწლიური „ასტრონომიული კალენდარი“, რედაქტორები: ე. ხარაძე (1960-1992); შ. საბაშვილი (1993-დღემდე). ითარგმნა რუსული „საბავშვო ენციკლოპედია“, გამოიცა სამეცნიერო-პოპულარული წიგნები. ქართველმა ასტრონომებმა ასობით სტატია მოათავსეს „ქართული საბჭოთა ენციკლოპედიის“ 12-ტომულში (სამეცნიერო საბჭოს თავმჯდომარე ე. ხარაძე, რედაქტორი შ. საბაშვილი). ითარგმნა საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა (ასტრონომია, ფიზიკა, ქიმია და სხვ.) საბავშვო ენციკლოპედიები ინგლისური და გერმანული ენებიდან.

ასტრონომიის კათედრამ დიდი წვლილი შეიტანა სასკოლო ცხოვრებაშიც. ე. ხარაძის ორიგინალური სასკოლო სახელმძღვანელო 50 წელზე მეტხანს გამოიყენებოდა სკოლებში. ე. ხარაძე და შ. საბაშვილი ხელმძღვანელობდნენ საქართველოს მოსწავლეთა კონფერენციების დასკვნით სხდომებს და ასტრონომიულ ოლიმპიადებს. კათედრა ასტრონომიულ კონსულტაციებს უწევდა სკოლებს, პიონერთა და მოსწავლეთა სასახლეს, პრესას და რადიო-ტელევიზიას. ვარსკვლავიერი ცისა და მისი ბრუნვის დემონსტრირებას თანამედროვე ლექციებით წლების მანძილზე ასეულობით საექსკურსიო ჯგუფი დაესწრო. 2012 წლიდან სპეციალური კურსები ვიდეომასალის გამოყენებით იკითხება სკოლების შერჩეული კონტინგენტისთვის. იგი უკვე 100-ზე მეტმა ჯგუფმა მოისმინა.

ბოლო თხუთმეტი წლის მანძილზე შეიქმნა ასტრონომიული არჩევითი საბუნებისმეტყველო კურსები (შ. საბაშვილი, გ. მაღალაშვილი, რ. ჭილაძე), რომლებსაც ყოველწლიურად ასეულობით სტუდენტი ირჩევდა. გამოიცა სახელმძღვანელო „ასტრონომია და ცივილიზაცია“ (შ. საბაშვილი).

2006 წლიდან უნივერსიტეტში ასტრონომიის კათედრა და ასტრონომიის სწავლება ბაკალავრიატის დონეზე გაუქმდა. ამჟამად თსუ-ში ასტრონომიის, ასტროფიზიკისა და კოსმოლოგიის მიმართულებით კვლევები და სამივე საფეხურზე სწავლება ძირითადად ხორციელდება პლაზმის, ასტროფიზიკისა და კვანტური ველის თეორიის კათედრების პროფესორების მიერ (ა. თევზაძე, ნ. შათაშვილი); მოქმედებს ასევე ასტრობიოლოგიის ჯგუფი (ნ. ალექსიძე, ს. წერეთელი, მ. ტარასაშვილი, შ. საბაშვილი). ბოლო წლებში თსუ-დან ასტრობიოლოგიის, ასტროფიზიკისა და კოსმოლოგიის მიმართულებით წარდგენილმა რამდენიმე კვლევითმა პროექტმა მიიღო შოთა რუსთაველის სახელობის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის და სხვადასხვა საერთაშორისო ორგანიზაციის გრანტი.

## **დ1.5 ასტრონომია ისტორიის სამსახურში**

უძველეს ისტორიულ ჩანაწერებში ასტრონომიული ან მეტეოროლოგიური მოვლენის აღწერის მოძიებით ზოგჯერ შესაძლებელია ისტორიული თარიღის დაზუსტებაც. აბასთუმნის ობსერვატორიაში შესრულებულია სამუშაოები (მ. გიგოლაშვილი,

რ. კილაძე, გ. რამიშვილი და ვ. კუხიანიძე, 2007, 2009) საქართველოში ქრისტიანობის სახელმწიფო რელიგიად გამოცხადების თარიღის დაზუსტების მიზნით.

საქართველოს ისტორიის ეს ღირსშესანიშნავი მოვლენა დაკავშირებულია მირიანის სასწაულთან. ქართულ ქრონიკებში აღწერილია, რომ მეფე მირიანი, რომელიც თხოთის მთაზე მარტო აღმოჩნდა, უეცრად გარშემო ჩამოწოლილმა შემზარავმა სიბნელემ შეაძრწუნა, ვინაიდან მზე გაქრა ციდან. მირიანმა ტრადიციულ ქართულ ღმერთებს მიმართა საშველად, მაგრამ უშედეგოდ. მაშინ მან მიმართა ღმერთს, რომელიც სწამდა ნინო კაპადოკიელს, და მოხდა სასწაული: წყვდიადი უეცრად გაიფანტა და მზე ისევ გამობრწყინდა ცაზე. მაშინ მირიანმა ირწმუნა ჭეშმარიტი ღმერთი და მცირე ხანში საქართველოში ქრისტიანობა სახელმწიფო რელიგიად გამოცხადდა.

ქართულ ქრონიკებში აღწერილი მირიანის სასწაული ძალიან ჰგავს მზის დაბნელების ვითარებას. ისტორიკოსებისა და ასტრონომების სხვადასხვა თაობები ცდილობდნენ მიეგნოთ მზის სრული დაბნელებისთვის, რომელიც IV საუკუნის 20-იან წლებში გამოჩნდებოდა აღმოსავლეთ საქართველოში. წინამდებარე წიგნის ერთ-ერთმა ავტორმა – მ. გიგოლაშვილმა მიაკვლია მზის ასეთ დაბნელებას, რომლის ვითარებები ობსერვატორიის თანამშრომლების ზემოაღნიშნულმა ჯგუფმა დაწვრილებით შეისწავლა, ბესელის გაუმჯობესებული ელემენტების საშუალებით, ასევე დროთა განმავლობაში მოქცევითი ხახუნით გამოწვეული დღე-ღამის ხანგრძლივობის ცვლილების სრულად გათვალისწინებით. აღმოჩნდა, რომ 319 წლის 6 მაისის მზის სრული დაბნელების ცენტრალური ხაზი გადიოდა თხოთის მთაზე. გამოთვლების მიხედვით დაბნელება მოხდა საღამოს, მზის ჩასვლის წინ, რაც „ქართლის ცხოვრებაში“ მოცემულ აღწერას კარგად ემთხვევა.

ისევ და ისევ „ქართლის ცხოვრების“ მიხედვით 1 მაისს სურნელოვანი, სასწაულთმოქმედი ხიდან სამი ჯვარი იქნა გამოთლილი. იოანე ზოსიმეს თანახმად, ეს მოხდა აღდგომიდან მესამე კვირა დღეს. მაგრამ აღნიშნულ წყაროებში ამ ჯვრების გამოთლის წელი მითითებული არაა. ჯვრების გამოთლის ზუსტი თარიღის დასადგენად ყველა შესაძლო მეთოდით (კანონიკური და არაკანონიკური) გამოთვლილ იქნა მირიანის მეფობის სავარაუდო პერიოდის ის წლები, როდესაც აღდგომა დადგებოდა 17 აპრილს და, შესაბამისად, 1 მაისი აღდგომიდან მესამე კვირადღე იქნებოდა. გამოთვლებით დადგინდა, რომ ასეთი აღდგომა 320 წელს დადგა (მ. გიგოლაშვილი, რ. კილაძე, გ. რამიშვილი და ვ. კუხიანიძე, 2009, 2011).

მაშასადამე, მეფე მირიანის მიერ ხილული დაბნელება მოხდა ქრისტეშობიდან 319 წლის 6 მაისის საღამოს, ხოლო მოგვიანებით, 320 წლის მაისში, ჯვრები იყო გამოთლილი და აღმართული, ანუ სავარაუდოდ, ქრისტეს აღდგომა საქართველოში, სახელმწიფოებრივ დონეზე, პირველად აღინიშნა. ითვლება, რომ საქართველოში ქრისტიანობა სახელმწიფო რელიგიად გამოცხადდა ქრისტეშობიდან 326 წელს. აბასთუმნის ობსერვატორიაში ჩატარებული გამოთვლების მიხედვით კი ქრისტიანობა სახელმწიფო რელიგიად აღიარებული უნდა ყოფილიყო 319 წლის 6 მაისიდან 320 წლის 17 აპრილამდე პერიოდში, ანუ 6-7 წლით ადრე, ვიდრე ეს ამჟამადაა მიღებული.



## დანართი II კოსმოსური სხივების კვლევა საქართველოში

საქართველოში კოსმოსური სხივების კვლევა დაიწყო 1934 წელს, როდესაც თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ფიზიკა-მათემატიკის ფაკულტეტზე ჩამოყალიბდა კოსმოსური სხივების ლაბორატორია (ხელმძღვანელი ბ. ყიზილბაში). ამ დროს კოსმოსურ სხივებს ჯერ კიდევ ჰესეს სხივებს უწოდებდნენ. 1936-38 წლებში კი, ყაზბეგის მთის ფერდობზე, თბილისის უნივერსიტეტის თანამშრომლების მიერ (ბ. ყიზილბაში, დ. კეთილაძე, გ. მირიანაშვილი და სხვ.) მოეწყო პირველი სამეცნიერო ექსპედიციები. ცხადია, მეორე მსოფლიო ომის დროს კვლევები შეწყდა და მხოლოდ 1949 წელს განახლდა სხვადასხვა მიმართულებით.

კოსმოსური სხივების ფიზიკაში შეიძლება გამოიყოს ორი მიმართულება: ბირთვული და ასტროფიზიკური. პირველი მათგანი სწავლობს კოსმოსური ნაწილაკების ურთიერთქმედებებს ნივთიერებასთან, ხოლო მეორე – მათი გავრცელებისა და ენერგეტიკული სპექტრის თავისებურებებს. ორივე მიმართულება საქართველოში ფართოდ არის წარმოდგენილი: პირველი ე. ანდრონიკაშვილის ფიზიკის ინსტიტუტსა და ი. ჯავახიშვილის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტში, მეორე კი მ. ნოდის გეოფიზიკის ინსტიტუტში. ჩვენ მოგიტოვებთ კოსმოსური სხივების კვლევებზე ორივე სამეცნიერო ცენტრში. დავიწყოთ ასტროფიზიკური მიმართულებით, რადგან ეს თემა უფრო ახლოა ჩვენი წიგნის შინაარსთან.

### კოსმოსური სხივების კვლევის ასტროფიზიკური მიმართულება

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, საქართველოში კოსმოსური სხივების კვლევა ასტროფიზიკური მიმართულებით ძირითადად მ. ნოდის გეოფიზიკის ინსტიტუტში მიმდინარეობს.

1953 წელს თბილისში ვ. ქოიავას ხელმძღვანელობით დაარსდა კოსმოსური სხივების უწყვეტი რეგისტრაციისთვის განკუთვნილი პირველი სადგური. 1956 წელს სადგური გადაეცა საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის გეოფიზიკის ინსტიტუტის ატმოსფეროს ფიზიკის განყოფილებას. მალე სადგურის ბაზაზე ჩამოყალიბდა კოსმოსური სხივების ლაბორატორია, რომელიც შემდგომ კოსმოფიზიკის განყოფილებად გადაკეთდა. 1972 წლიდან კოსმოფიზიკის განყოფილება შეიცავდა ორ ლაბორატორიას: კოსმოსური სხივების ვარიაციისა (ხელმძღვანელი მ. ალანია) და მაღალი ენერგიის კოსმოსური სხივებისა (ხელმძღვანელი ლ. შათაშვილი). 2001 წელს კოსმოფიზიკის განყოფილება გადაკეთდა ვ. ქოიავას სახელობის კოსმოფიზიკურ ობსერვატორიად, რომელსაც სხვადასხვა დროს ხელმძღვანელობდნენ ნ. ნაჭყეპია, ნ. ლლონტი და ი. ტუსკია.

კოსმოსური სხივების ინტენსივობის ვარიაციის შესასწავლად, 1957-58 წლებში გეოფიზიკის ინსტიტუტში დამონტაჟდა სიმპსონის ტიპის ნეიტრონული მონიტორი და მეზონური ტელესკოპი (ა. ჩხეტია, გ. ბარათაშვილი, მ. ალანია). 1963-66 წლებში ინსტიტუტში აიგო ხუთდონიანი მაღარო, სადაც განთავსდა ნეიტრონებისა და მეზონების დიდი ზომის მთვლელები და ამოქმედდა ნეიტრონული სუპერ-მონიტორი (ვ. ქოიავა, მ. ალანია). დროთა განმავლობაში ეს მონიტორი ცხრა სექციამდე გაფართოვდა. მისი მართვა და ანათვლების აღება წარმოებს მონაცემთა რეგისტრაციის, ატმოსფერული წნევისა და ტემპერატურის გაზომვის ელექტრონული სიტემით, რომელიც ადგილობრივი ძალებით იყო შემუშავებული (ძირითადად, ი. ტუსკიას ჯგუფი). ამჟამად ეს სისტემა მიერთებულია რეალურ დროში მონაცემების გაცვლის

მსოფლიო მონიტორულ ქსელთან, რომელსაც NMDB (Network Multi-protocol Data Base) ეწოდება. ნეიტრონული მონიტორები სტანდარტული ხელსაწყოებია, რომლებიც დედამიწის სხვადასხვა ადგილებშია განლაგებული. ნეიტრონული მონიტორების ქსელი ატმოსფეროში შემოსული დამუხტული ნაწილაკების მიმართულებისა და ენერგიის დადგენის საშუალებას იძლევა.



სურ. 121 ნეიტრონული მონიტორების მსოფლიო ქსელი

121-ე სურათზე ნაჩვენებია მსოფლიოში ნეიტრონული ტელესკოპების განაწილების რუკა. სხვადასხვა მიმართულებით ორიენტირებული სადგურების ერთიან დეტექტორად გამოყენება მკვეთრად აუმჯობესებს გაზომვების სიზუსტეს. როგორც უკვე აღვნიშნეთ, თბილისის მონიტორი, რომელიც მდებარეობს ჩრდილოეთის განედზე  $41^{\circ}40' N$ , ზემოაღნიშნული ქსელის ერთ-ერთი კომპონენტია. იგი განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მზეზე მომხდარი კორონალური ამოფრქვევების დროს დედამიწის მიმართულებით წარმოშობილი პლაზმის ნაკადის შესწავლისა და საპლანეტათაშორისო შემოფოთებებით დედამიწის მაგნიტოსფეროს ვარიაციების დაკვირვებებისთვის. გარდა ამისა, მონიტორით აფიქსირებენ მზიდან მომავალ რამდენიმე გეგ-ის ენერგიის მქონე კოსმოსურ სხივებს, რომლებიც ჩნდებიან მზის მიერ კოსმოსური წარმოშობის ნაწილაკთა აჩქარების შედეგად.

კოსმოფიზიკის განყოფილების კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი მიღწევა იყო მიწისქვეშა ლაბორატორიისთვის მეზონური ტელესკოპების შექმნა. ლაბორატორიის ფართობი, რომელიც მიწის ქვეშ 60 მ სიღრმეზეა განთავსებული (მეხუთე დონე),  $120 m^2$  შეადგენს. სამწუხაროდ, საბჭოთა კავშირის დაშლის შემდეგ, მოხერხდა ლაბორატორიის მხოლოდ პირველი და მეორე დონეების ამოქმედება.

სამეცნიერო პრობლემები, რომელზეც მუშაობდნენ და მუშაობენ გეოფიზიკის ინსტიტუტის კოსმოფიზიკოსები, ძირითადად ეძღვნება კოსმოსური სხივების ნეიტრონული და მიუონური კომპონენტების კვლევას. ნეიტრონებისა და მიუონების ერთდროული რეგისტრაციისთვის მიწისქვეშა ლაბორატორიისთვის შეიქმნა კომბინირებული მონიტორი და მისი მონაცემების რეალურ დროში დამუშავების სისტემა (მ. ალანია, თ. ჯაფიაშვილი, დ. ბოჭიკაშვილი, ლ. ლლონტი, თ. ბაქრაძე, გ. ერქომაიშვილი, ი. ტუსკია და სხვ.). ამ სამუშაოსათვის ავტორებს მიენიჭათ საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის პრემია.

თეორიული სამუშაოები ინსტიტუტში ძირითადად ორი მიმართულებით მიმდინარეობდა – მზის ქარის ასიმეტრიისა და კოსმოსური სხივების ვარიაციების (ფორბუშის ეფექტი) შესწავლა. სისრულისთვის გვინდა მოკლედ ავხსნათ ამ ეფექტების ბუნება, რადგან მათი აღწერა არ მოხვდა წიგნის ძირითად ტექსტში.

**მზის ქარი** ეწოდება მზის გვირგვინიდან იონიზებული ნაწილაკების, ძირითადად, ჰელიუმ-წყალბადის პლაზმის ნაკადს, რომელიც კოსმოსში 300-1200 კმ/სთ სიჩქარით ვრცელდება. ამერიკული კოსმოსური ხომალდების Voyager 1 და Voyager 2 მონაცემების თანახმად (2005-2007), მზის ქარი 95-100 ასტრონომიულ ერთეულამდე ვრცელდება და თანდათან ერწყმის გალაქტიკათაშორისო ქარს. მზის ქარი არ უნდა აგვერიოს მზის ნათებასთან, რომელიც ფოტონების ნაკადს წარმოადგენს.

მზის ქართან დაკავშირებულია უამრავი მოვლენა დედამიწაზე, მაგალითად, მაგნიტური ქარიშხლები და პოლარული ნათება. მზეს ახასიათებს აქტივობის 11-წლიანი ციკლი, რომელსაც მის ზედაპირზე გაჩენილი ლაქების რაოდენობით ახასიათებენ. მაქსიმალური აქტივობის დროს ხდება მზის ჩრდილო და სამხრეთი მაგნიტური პოლუსების პოლარობის შეცვლა საწინააღმდეგო პოლარობით, ანუ ყოველ 22 წელიწადში პოლუსების მდებარეობა საწყისს უბრუნდება. პოლუსების შეცვლისას ხდება მზის ქარის ტურბულენტობის სტრუქტურის ტრანსფორმაცია, რაც კოსმოსური სხივების ენერგიითა 11-წლიანი ვარიაციების ძირითადი მიზეზია. ვარიაციების დიაპაზონი 1-150 გეე-ია. ნეიტრონული მონიტორებისა და მიუონური ტელესკოპების მგრძნობიარობის არე სწორედ ენერგიის ამ მნიშვნელობებზეა გათვლილი.

გეოფიზიკის ინსტიტუტის თანამშრომლების მიერ (მ. ალანია და სხვ.) მზის აქტივობის 11-წლიანი ციკლის დასახასიათებლად შემოთავაზებულ იქნა სპეციალური პარამეტრი – ენერგეტიკული სპექტრის ვარიაციის ექსპონენტის  $\gamma$ -ინდექსი. 1960-2002 წლების ექსპერიმენტულ მასალაზე დაყრდნობით, ნაჩვენები იქნა, რომ  $\gamma$ -ინდექსის დროში ცვლილება კარგად კორელირებს კოსმოსური სხივების ინტენსივობის 11-წლიან ციკლებთან.

**ფორბუშის ეფექტი** (Forbush decrease) მაგნიტური ქარიშხლის დროს გალაქტიკური კოსმოსური სხივების ინტენსივობის მკვეთრი შემცირებით იჩენს თავს. მზის ამოფრქვევებისას, გაძლიერებული მზის ქარის მაგნიტური ველის მიერ ხდება კოსმოსური სხივების გაბნევა. ამრიგად, მზის მაქსიმალური აქტივობის პერიოდში, კოსმოსური რადიაციის ინტენსივობა, მოლოდინის საწინააღმდეგოდ, ეცემა. ეს მოვლენა 1937 წელს აღმოაჩინა ამერიკელმა მეცნიერმა სკოტ ფორბუშმა (Scott Ellsworth Forbush, 1904-1984).

მზის კორონალურ ამოფრქვევებს, დამუხტული ნივთიერების გარდა, კოსმოსში გააქვთ მათში „ჩაყინული“ მაგნიტური ველის ძაღწირები. ამ ეფექტს ძაღწირების კატასტროფულ „გადაერთებას“ უწოდებენ. როცა მზის ქარი დედამიწას გარს უვლის, მისი მაგნიტური ველი გალაქტიკიდან მომავალი დამუხტული ნაწილაკების ეკრანირებას ახდენს. ფორბუშის ეფექტით გამოწვეული კოსმოსური სხივების გაფანტვა (25-30% დედამიწისთვის და 50%-მდე საპლანეტათაშორისო სივრცეში) დამახასიათებელია მზის ქარის გავრცელების მთელი არისთვის. ამის დამადასტურებელი მონაცემები მიღებული იქნა საბჭოთა კოსმოსური სადგურის Мир-ისა და საერთაშორისო კოსმოსური სადგურის ISS-ის მიერ. ხოლო ამერიკულმა ხომალდებმა Pioneer 10-მა, Pioneer 11-მა, Voyager 1-მა და Voyager 2-მა ფორბუშის ეფექტის არსებობა ნეპტუნის ორბიტის მიღმაც კი დააფიქსირეს.

მზის ერთ მძლავრ ამოფრქვევას შეუძლია კოსმოსური სხივების დათრგუნვა რამდენიმე კვირის განმავლობაში. მაგალითად, 2005 წელი მზის განსაკუთრებული აქტივობით გამოირჩეოდა. დარეგისტრირებული იქნა 14 მძლავრი ამოფრქვევა, რომელთა შედეგად საერთაშორისო კოსმოსური სადგურის ეკიპაჟი, მთელი წლის განმავლობაში, რეკორდულად მცირე რადიაციის დონეს აფიქსირებდა.

1980-იან წლებში გეოფიზიკის ინსტიტუტში ფორბუშის ეფექტს შეისწავლიდნენ მ. ალანია, ნ. ნაჭყეპია, მ. დესპოტაშვილი და სხვ. დაკვირვებების შედეგების ანალიზის საფუძველზე, მათ მიერ შემოთავაზებულ იქნა მათემატიკური მოდელი, რომელიც ფორბუშის ეფექტით გამოწვეული კოსმოსური სხივების ინტენსივობის შემცირებას ზუსტად ასახავს. შესრულებული სამუშაოები დღესაც არ კარგავენ აქტუალობას. თეორიული კვლევა გრძელდება მჭიდრო თანამშრომლობაში პოდლასკეს (პოლონეთი) მათემატიკისა და ფიზიკის ინსტიტუტთან, რომელსაც 1995 წლიდან მ. ალანია ხელმძღვანელობს.

### კოსმოსური სხივების კვლევის ბირთვული მიმართულება

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, საქართველოში კოსმოსური სხივების კვლევა ბირთვული მიმართულებით ძირითადად ე. ანდრონიკაშვილის ფიზიკის ინსტიტუტში მიმდინარეობს.



სურ. 122 „ყინულოვანი ბაზა“  
იალბუზზე  
© AIP & A. Kozlov



სურ. 123 „ცხრაწყაროს“ ლაბორატორია  
© AIP

მძლავრი ამაჩქარებლების მწყობრში ჩადგომამდე კოსმოსური სხივები ელემენტარულ ნაწილაკთა შესწავლის ძირითად საშუალებას წარმოადგენდა. კოსმოსური სხივების კვლევა ფიზიკის ინსტიტუტში ჯერ კიდევ 1949 წელს დაიწყო. ე. ანდრონიკაშვილის ხელმძღვანელობით ენთუზიასტების ჯგუფის მიერ (მ. ბიბილაშვილი, ლ. გედევანიშვილი, ზ. მანჯავიძე, ს. საყვარელიძე, გ. ჩიქოვანი და სხვ.) იალბუზის მწვერვალის მახლობლად დაარსდა „ყინულოვანი ბაზის“ სახელით ცნობილი კვლევითი სადგური. იქ განთავსებული ხელსაწყოების ექსპლუატაციის პირველივე წლები მნიშვნელოვანი წარმატებებით აღინიშნა: რეგისტრირებული იქნა ე.წ. უცნაური ნაწილაკების დაშლების 4 შემთხვევა. ამის შემდგომ ფიზიკის ინსტიტუტს გამოეყო დაფინანსება დაბა ბაკურიანთან ახლოს, ცხრაწყაროს უღელტეხილზე, უფრო მძლავრი აპარატურით აღჭურვილი ბაზის ასაშენებლად. 1965 წელს ცხრაწყაროს ბაზაზე ამუშავდა ორი, იმ დროისთვის რეკორდული ზომის ( $400 \times 200 \times 140$  სმ<sup>3</sup>), ვილსონის კამერა, რომელიც განთავსებული იყო გიგანტური ელექტრომაგნიტის ღრეოში და იმართებოდა სცინტილაციური მთვლელებითა და ნაპერწკლოვანი კალორიმეტრით (მ. ბიბილაშვილი, ზ. მანჯავიძე, ა. შტაერმანი, გ. ჩიქოვანი და სხვ.).



ფიზიკის ინსტიტუტში მიღწეულ ყველაზე დიდ წარმატებად კოსმოსური სხივების დარგში შეიძლება ჩაითვალოს სტრიმერული კამერის შექმნა. მისი შექმნისა და ფიზიკურ ექსპერიმენტებში დანერგვისთვის ინსტიტუტის თანამშრომლებს ვ. როინიშვილსა და გ. ჩიქოვანს საბჭოთა კავშირის ლენინის პრემია მიენიჭათ.

ფიზიკის ინსტიტუტის ერთ-ერთმა კვლევითმა ჯგუფმა დიდი წვლილი შეიტანა საბჭოთა კავშირის ეგიდით შექმნილი კოსმოსური სხივების საერთაშორისო კოლაბორაციაში *Памир-ი* (ხელმძღვანელი ფიზიკის ინსტიტუტიდან ნ. როინიშვილი). თანამშრომლობა პამირის მთებში, 4 400 მ სიმაღლეზე განლაგებული რენტგენულ-ემულსიური კამერების საშუალებით, შეისწავლიდა მაღალენერგიული კოსმოსური სხივების ნაწილაკთა ურთიერთქმედებას ატმოსფერულ ბირთვებთან. ქართულმა ჯგუფმა თავის თავზე აიღო მონაცემთა დამუშავების ალგორითმების შემუშავებისა და ანალიზის პროგრამების პირველადი სტრუქტურების შექმნის პასუხისმგებლობა. მანვე უზრუნველყო მონაცემთა დამუშავების ავტომატიზაცია გამომთვლელი მანქანების საშუალებით. აღსანიშნავია, რომ შემუშავებული მეთოდები შემდგომში დამკვიდრდა გაფართოებულ იაპონურ-ბრაზილიურ კოლაბორაციაში *Pamir-Chacaltaya*.



სურ. 124 „ცხრაწყაროს“  
დანადგარის მონტაჟი  
© AIP



სურ. 125 სტრიმერული კამერა და მისი  
შემქმნელები  
© AIP

მაღალმთიანი რენტგენულ-ემულსიური კამერების თანამშრომლობების ფარგლებში, ქართული ჯგუფი მონაწილეობას იღებდა პირველადი კოსმოსური სხივების ენერგეტიკული სპექტრისა და შედგენილობის შესწავლაში მათ მიერ წარმოქმნილი მცირე ღვარების, ე.წ. გამა-ადრონული ოჯახების დეტექტირებითა და თვისებების გამოკვლევით. დამზერილი იქნა მრავალი უცნაური მოვლენა, როგორებიცაა ე.წ. „ჰალო“, „კენტავრული“ და „გაწელილი“ შემთხვევები. ამ მოვლენების ახსნა არსებული ძლიერი ურთიერთქმედების მოდელის ფარგლებში ვერ ხერხდება<sup>‡</sup>.

ელემენტარული ნაწილაკების ფიზიკისთვის მნიშვნელოვანი შედეგები იქნა მიღებული ფიზიკის ინსტიტუტის კოსმოსური სხივების ლაბორატორიაში, რომელიც 1953 წელს განლაგდა თბილისის ბოტანიკური ბაღის გვირაბში. 1957 წელს ე. ანდრონიკაშვილმა და მ. ბიბილაშვილმა აღმოაჩინეს, რომ ფართო ატმოსფერული ღვარების მიუონური გასწვრივი და განივი კომპონენტები ავლენენ დიდ ასიმეტრიას,

<sup>‡</sup> ამ პრობლემის გადასაწყვეტად დიდ ადრონულ კოლაიდერზე საგანგებოდ შექმნილია ექსპერიმენტი LHCf (Large Hadron Collider forward).



რომლის მიზეზიც ღვარების შემადგენელი ნაწილაკების რთული სტრუქტურა აღმოჩნდა. 1964 წლიდან კოსმოსური სხივების მიუონური კომპონენტის შემსწავლელ ჯგუფს შეუერთდნენ თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ფიზიკის ფაკულტეტის თანამშრომლებიც ი. საყვარელიძისა და ლ. გედევანიშვილის ხელმძღვანელობით. ლაბორატორიაში ასევე მიმდინარეობდა კოსმოსური სხივების ასტროფიზიკური ასპექტების კვლევები. მაგალითად, თ. ბარნაველმა თანამშრომლებთან ერთად მიიღო მონაცემები, რომელთა თანახმად  $10^{16}$  ევ-ზე მეტი ენერგიის კოსმოსურ სხივებში მსუბუქი ელემენტების ბირთვები (პროტონები) დომინირებს.

საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის დაფინანსებით, 2006 წელს ფიზიკის ინსტიტუტში კოსმოსური სხივების მიმართულებით დაიწყო ახალი ფართომასშტაბიანი ექსპერიმენტი GELATICA (GEorgian Large-area Angle and TIme Coincidence Array, ხელმძღვანელი მ. სვანიძე). პროექტი საგანმანათლებლო ხასიათსაც ატარებს, რადგან იგეგმება საქართველოს ტერიტორიაზე, უმაღლეს სასწავლებლებსა და სკოლებში, კოსმოსური სხივების თანამედროვე აპარატურით აღჭურვილი სადგურების ქსელის შექმნა. ფართო ატმოსფერული ღვარების რეგისტრაციის მიზნით, GPS (Global Positioning System) სისტემით უზრუნველყოფილი იქნება სადგურების სინქრონიზაცია, რათა მოხერხდეს ასეულ კილომეტრზე რეგისტრირებული ღვარების სივრცე-დროითი კორელაციების დადგენა. გარდა ამისა, ზოგიერთი სადგური აღჭურვილი იქნება სპეციალური რადარული ანტენებით, რომლებიც ზემოდალი ენერგიის კოსმოსური სხივების დეტექტირებისა და შესწავლის საშუალებას იძლევა მათ მიერ დედამიწის ატმოსფეროს ზედა ფენებში გამოწვეული იონიზაციის ეფექტებზე დაკვირვებით.



სურ. 126 კოსმოსური სხივების მოქმედი და დაგეგმილი სადგურების ქსელი  
© World Sites Atlas

ამ პროექტის ფარგლებში ერთმანეთთან უკვე დაკავშირებულია მაღალი ენერგიების კოსმოსური სხივების სამი სადგური. ორი მათგანი განთავსებულია ე. ანდრონიკაშვილის ფიზიკის ინსტიტუტში, ხოლო მესამე – თელავის სახელმწიფო უნივერსიტეტში (იხილეთ რუკა). აღსანიშნავია, აგრეთვე, რომ ქსელის მოქმედი სადგურების მონაცემები გადაეცემა კოსმოსური სხივების საერთაშორისო საგანმანათლებლო ვირტუალურ ქსელს Cosmic Ray e-Lab.

### დანართი III ელემენტარულ ნაწილაკთა ფიზიკა

წიგნში არაერთხელ მოგვიწია ელემენტარული ნაწილაკების ხსენება. კოსმოლოგიის შესწავლა წარმოუდგენელია ელემენტარულ ნაწილაკთა თვისებების ცოდნის გარეშე. ამ დამატებაში გვინდა მოკლედ მიმოვიხილოთ ელემენტარულ ნაწილაკთა შესახებ თანამედროვე წარმოდგენების ძირითადი დებულებები.

მეოცე საუკუნის ბოლოს შეიქმნა ელემენტარულ ნაწილაკთა აღმწერი სტანდარტული მოდელი, რომლის ფარგლებში მიკროსამყაროში მიმდინარე მრავალფეროვანი პროცესები ახსნილი იქნა დაახლოებით ორი ათეული ნაწილაკის საშუალებით. ესენია ფუნდამენტური, ნახევარ სპინიანი ფერმიონები და მათ შორის ურთიერთქმედებების გადამტანი, მთელი სპინის მქონე ბოზონები.

ფუნდამენტურია ორი კვარკის, ერთი ლეპტონისა და ერთი ნეიტრინოსგან შემდგარი „ოჯახი“ და ამ ოჯახის კიდევ ორი, უფრო მასიური ასლი. აღსანიშნავია, რომ სამყაროს მატერიალური მრავალფეროვნების შესაქმნელად (ჩვენი ჩათვლით) ფუნდამენტური ნაწილაკების სამი ოჯახიდან მხოლოდ პირველია საკმარისი. სამივე ოჯახში შემავალ ნაწილაკებს გააჩნია თავისი ანტინაწილაკები – საწინააღმდეგო ელექტრული მუხტის მქონე „ტყუპისცალები“.

გარდა ფუნდამენტური ფერმიონებისა, არსებობს ბუნებაში ცნობილი ოთხი ურთიერთქმედების გადამტანი ნაწილაკები, ბოზონები. ოთხი ურთიერთქმედებიდან ორს, გრავიტაციულსა და ელექტრო-მაგნიტურს, რომლებიც შესაბამისად გრავიტონებსა\* და ფოტონებს გადააქვთ, ჩვენ ყოველდღიურ ცხოვრებაში ვხვდებით. დანარჩენი ორი – ძლიერი (გადამტანი – გლუონები) და სუსტი (გადამტანი – W და Z ბოზონები) მხოლოდ მიკროსკოპულ დონეზე მოქმედებენ და ჩვენ მათ უშუალოდ ვერ შევიგრძნობთ.

სხვა ელემენტარული ნაწილაკებისგან განსხვავებით, ბუნებაში კვარკები თავისუფალი სახით არ არსებობენ. ისინი ელემენტარული ნაწილაკების შიგნით ძლიერი ურთიერთქმედებით არიან შებოჭილი. ყველა არაფუნდამენტური ელემენტარული ნაწილაკი (დაახლოებით 200) წარმოადგენს ორი ან სამი კვარკისა და ანტიკვარკის სხვადასხვა ერთობლიობას. მათი შეჭიდულობა უზრუნველყოფილია გლუონების განუწყვეტელი მიმოცვლით, რომელიც წარიმართება ურთიერთმოქმედი კვარკებისა და გლუონების „ფერისა“ და მუხტის მახასიათებლების მკაცრად განსაზღვრული კომბინაციების დაცვით. ყველა არაფუნდამენტური ელემენტარული ნაწილაკი, პროტონის გარდა, არასტაბილურია, ანუ იშლება სუსტი და ძლიერი ურთიერთქმედებების შედეგად.

ელემენტარული ნაწილაკების სტანდარტული მოდელი კარგად ხსნის ამჟამად არსებულ ექსპერიმენტულ მონაცემებს. თუმცა არსებობს რიგი საკითხებისა, რომლებზეც პასუხი ამ მოდელის ფარგლებში არ მოიპოვება. გვინდა, რამდენიმე მათგანი გავაშუქოთ.

**პირველი პრობლემა** დაკავშირებულია ელემენტარულ ნაწილაკთა მასებთან, რომელთა სპექტრი ძალზე ფართოა. ნაწილაკების მასების ამ მრავალფეროვნების ასახსნელად თეორიაში შემოტანილი იქნა ე.წ. ჰიგსის ბოზონი, რომელთან ურთიერთქმედებითაც ყველა ნაწილაკი იძენს მასას. ბოზონი, რომელიც სავარაუდოდ

---

\* შეგახსენებთ, რომ გრავიტონი დღესდღეობით აღმოჩენილი არაა. წიგნში სათანადო ადგილი დაეთმო გრავიტაციული ტალღების დამზერის მცდელობების აღწერას.

მოდელის ამ „მთავარ“ ნაწილას შეესაბამება, მხოლოდ 2012 წელს იქნა აღმოჩენილი, რადგან ამისთვის საჭირო ენერგიები ამაჩქარებლებზე მანამდე მიღწეული არ იყო. ამჟამად მიმდინარეობს ახალი ბოზონის მახასიათებლების დეტალური შესწავლა მისი ჰიგსის ბოზონთან უტყუარი გაიგივების მიზნით. მანამდე კი ნაწილაკების სტანდარტული მოდელი არ შეიძლება ჩაითვალოს დასრულებულ თეორიად.

**მეორე პრობლემა** უფრო რთულია. ცნობილია, რომ მიკროსამყარო კვანტური თეორიის კანონებს ემორჩილება, ხოლო მაკროსამყაროს აღსაწერად აინშტაინის ფარდობითობის თეორიას იყენებენ. მრავალი მეცნიერი, მათ შორის თვით აინშტაინიც, ცდილობდა ამ ორი მიდგომის გაერთიანებას, მაგრამ ყოველი მცდელობა ჯერჯერობით უშედეგო აღმოჩნდა.

ამჟამად არსებობს რამდენიმე მოდელი, რომლებიც „დიდი გაერთიანების“ მიღწევის იმედს იძლევიან. ერთ-ერთი მათგანია სუპერსიმეტრია (SUSY), რომლის ფარგლებშიც ყოველი ნაწილაკისთვის შემოჰყავთ მისი სუპერპარტნიორი. მოდელის თანახმად, ამ „ახალ“ ნაწილაკებს ძალიან დიდი მასები გააჩნიათ. მიუხედავად სუპერსიმეტრიული მიდგომის თეორიული მიმზიდველობისა, არც ერთი სუპერპარტნიორი დღესდღეობით აღმოჩენილი არ არის.

კვანტური და კლასიკური ფიზიკის გასაერთიანებლად დიდი იმედები მყარდება სიმების თეორიაზე, რომლის ფარგლებშიც ნაწილაკები წარმოდგენილია როგორც განსაკუთრებული ორგანზომილებიანი ობიექტები, რხევადი სიმები. ამ მოდელის თანახმად სამყარო მრავალგანზომილებიანია, ოღონდ დამატებითი განზომილებები იმდენად პატარაა (მაგალითად, ჩახვეულები არიან მცირე დიამეტრის წრეებად), რომ ჩვენ მათ ვერ ვამჩნევთ. სიმების თეორიის წინასწარმეტყველებებიდანაც ექსპერიმენტულად ჯერ არც ერთი არ დასტურდება.

**მესამე პრობლემა**, რომელიც მიკრო ფიზიკისთვის და კოსმოლოგიისთვის საერთოა, იმაში მდგომარეობს, რომ ნაწილაკების სტანდარტული მოდელი სამყაროში არსებული ნაწილაკებისა და ანტინაწილაკების რაოდენობებს შორის ასიმეტრიის ახსნის გასაღებს ვერ იძლევა. სტანდარტული მოდელი სიმეტრიულია ნაწილაკების ანტინაწილაკებით შეცვლის მიმართ. რაც ნიშნავს, რომ დიდი აფეთქებისას ორივე ტიპის ნაწილაკების თანაბარი რაოდენობა უნდა გაჩენილიყო. სამყარო კი პრაქტიკულად მხოლოდ ნაწილაკებისგან შედგება. სად გაქრნენ ანტინაწილაკები? ცნობილია, რომ ნაწილაკები და ანტინაწილაკები ურთიერთქმედებისას ანიჰილირებენ, ანუ გარდაიქმნებიან გამოსხივებად. შესაბამისად, მათი თანაბარი რაოდენობით არსებობის შემთხვევაში, სამყაროს მთელი მატერია, გამოსხივების გარდა, დიდი აფეთქების შემდგომ პერიოდში მთლიანად უნდა გამქრალიყო. ამ პარადოქსის ასახსნელად საკმარისია დავუშვათ, რომ არსებობს რაიმე პროცესი, რომელიც ნაწილაკ-ანტინაწილაკთა სიმეტრიას არღვევს და ნაწილაკთა ერთი მემილიარდედით სიჭარბეს იწვევს. ამ შემთხვევაში ანიჰილაციების შემდეგ ანტიმატერია გაქრა და სამყაროში დარჩა მხოლოდ მატერია იმ რაოდენობით, როგორც იგი დღესდღეობითაა წარმოდგენილი. ნაწილაკ-ანტინაწილაკთა სიმეტრიის დამრღვევი პროცესები მართლაც იქნა აღმოჩენილი, მაგრამ მათ მიერ გამოწვეული დისბალანსი მატერიის სიჭარბის ასახსნელად არ არის საკმარისი. საჭიროა სიმეტრიების დარღვევის ახალი მექანიზმების ძიება და, როგორც ეტყობა, ასეთი პროცესები სცილდებიან სტანდარტულ მოდელს.

მეცნიერები იმედოვნებენ, რომ შემდეგნაირად პასუხი გასცენ ჩამოთვლილ და მრავალ სხვა, ჯერ კიდევ გადაუჭრელ საკითხს, CERN-ში 2010 წელს ამოქმედებული დიდი

ადრონული კოლაიდერის LHC-ის (Large Hadron Collider) საშუალებით. შეგახსენებთ, რომ კოლაიდერი ესაა ამაჩქარებელი, რომელშიც ხდება ნაწილაკების ორი ერთმანეთის შემხვედრი ნაკადის შეჯახება. LHC-ის შემთხვევაში ესენია პროტონები (წყალბადის ბირთვები) ან ტყვიის იონები.



სურ. 127 LHC-ის 27 კმ სიგრძის გვირაბის კონტური  
© CERN

მოკლედ გვინდა აღვწეროთ LHC, რომელიც შვეიცარიისა და საფრანგეთის საზღვარზე მდებარეობს. იგი განლაგებულია მიწის ქვეშ, დაახლოებით 100 მეტრის სიღრმეზე. 27 კმ სიგრძის წრიულ გვირაბში დამონტაჟებულია 1624 ზეგამტარი მაგნიტი, რომლებიც არეგულირებენ პროტონების კონების მოძრაობას და აფოკუსებენ მათ ადამიანის თმის ღერის ზომამდე. მაგნიტების სამუშაო ტემპერატურა ძალიან დაბალია (1.9 K, ანუ  $-271^{\circ}\text{C}$ ). ნაწილაკების მძლავრი ნაკადის ორბიტაზე შესანარჩუნებლად აუცილებელია 9 ტესლას ტოლი მაგნიტური ველის შექმნა. შედარებისთვის დედამიწის მაგნიტური ველი 100 000-ჯერ ნაკლებია ამ სიდიდეზე. მუშაობის დროს კოლაიდერს ესაჭიროება 180 მეგავატი ელექტროენერგია, რაც დაახლოებით მთელი თბილისის მოთხოვნილების ნახევარს შეესაბამება. მაგნიტებში ზეგამტარი მავთულების სიგრძე 10-ჯერ აჭარბებს დედამიწიდან მზემდე მანძილს. აჩქარებული პროტონების გაბნევა რომ არ მოხდეს, მილში, რომელშიც ისინი მოძრაობენ, მიღწეულია ვაკუუმის ძალზე მაღალი ხარისხი, რომელსაც მხოლოდ კოსმოსური თუ შეედრება.

პროტონებისა და ტყვიის იონების დაჯახება ხდება გვირაბის ოთხ წერტილში, სადაც განლაგებულია უზარმაზარი დეტექტორები: ALICE, ATLAS, CMS და LHCb. მათი ზომები მრავალსართულიან სახლს შეიძლება შევადაროთ, ხოლო მათი წონა ათობით ათასი ტონაა. თითოეული დანადგარი ათიდან ასამდე მილიონ ელექტრონულ არხს შეიცავს.

ნომინალურ რეჟიმში მოქმედებისას პროტონების შეჯახებების სიხშირე წამში 800 მილიონს შეადგენს. შედეგად დანადგარები წამში 100 ტერაბაიტ ექსპერიმენტულ მონაცემს აწარმოებენ. გიგანტური ინფორმაციის რეალურ დროში დამუშავება ეტაპობრივად ხდება. ვიდრე მონაცემები არქივირების სისტემას გადაეგზავნება შემდგომი ხაზგარეშე დამუშავების მიზნით, მათი რაოდენობა დაახლოებით 25 მილიონჯერ მცირდება საინტერესო შემთხვევების მინიმალური დანაკარგებით.



მონაცემთა შერჩევის ესოდენ მძლავრი და ზუსტი სისტემა ეფუძნება როგორც საგანგებოდ შემუშავებულ ელექტრონულ მოწყობილობებს, ასევე ასამდე გამომთვლელი მანქანისგან შემდგარ კლასტერებსა და საინფორმაციო ქსელებს, რომელთა გამტარუნარიანობა ჭარბობს ევროპის სატელეფონო კავშირგაბმულობის ამჟამინდელ მოთხოვნილებას. საბოლოოდ გადარჩეული მონაცემები მეცნიერებს გადაეცემა. მათი რაოდენობა და ანალიზის სირთულე მოითხოვს მონაცემთა დამუშავების სიმძლავრისა და საინფორმაციო სახსრების მობილიზაციას ექსპერიმენტების მონაწილე ყველა ქვეყანაში.

აღსანიშნავია, რომ ესოდენ რთული პროექტის წარმატებით განხორციელება შესაძლებელი გახდა ასამდე ქვეყნის მეცნიერების, ინჟინერებისა და ტექნიკური პერსონალის შეწყობილი თანამშრომლობით. LHC-ის დანადგარების განხორციელებაში წვლილი მიუძღვით ქართველ ფიზიკოსებსაც, რომლებიც ამჟამად პირველი ექსპერიმენტული მონაცემების დამუშავებით არიან დაკავებული.

პირველმა შედეგებმაც არ დააყოვნა. უკვე 2011 წლის დასასრულისთვის, მიუხედავად იმისა, რომ პროტონების ნაკადში ნაწილაკთა რაოდენობა შედარებით მცირე იყო, ხოლო შეჯახებათა ენერგია მასათა ცენტრის სისტემაში 7 ტევ-ს არ აღემატებოდა, ჰიგსის ბოზონის ძიების გზაზე შესაძლებელი გახდა ამ ნაწილაკის დასაშვები მასის დიაპაზონის მნიშვნელოვანი შევიწროება. 2012 წელს შეჯახებათა ენერგია მასათა ცენტრის სისტემაში 8 ტევ-ამდე გაიზარდა. გაიზარდა პროტონების ნაკადში ნაწილაკთა რაოდენობაც. შედეგად, სამი თვის განუწყვეტელი მოქმედების შემდეგ, ATLAS-ისა და CMS-ის დანადგარებმა მოიპოვეს იმდენივე სტატისტიკური მასალა, რაც წინა ორი წლის განმავლობაში დაგროვდა. გაერთიანებული მონაცემების დამუშავების შემდეგ, ორივე კოლაბორაციის მეცნიერებმა ერთმანეთისგან დამოუკიდებლად აღმოაჩინეს ახალი ნაწილაკი, რომლის მასა დაახლოებით 126 გევ-ია და რომელიც თავისი მახასიათებლებით აქამდე უხილავ ჰიგსის ბოზონს შეესაბამება. ფართო საზოგადოებამ აღმოჩენის შესახებ 2012 წლის 4 ივლისს შეიტყო, როდესაც CERN-ში ATLAS-ისა და CMS-ის ექსპერიმენტების გაერთიანებული საგანგებო სემინარი ჩატარდა. მიუხედავად საერთო ენთუზიაზმისა, მეცნიერები კატეგორიული განცხადებებისგან ჯერ-ჯერობით თავს იკავებენ, ვინაიდან კიდევ ბევრია გასაკეთებელი, რათა ნათელი მოეფინოს ახალი ნაწილაკის რაობას: იგი სტანდარტული მოდელის ნაკლული ჰიგსის ბოზონია თუ სრულიად ახალი, ჯერ უცნობი ნაწილაკი?\*

2013 წლის თებერვალში LHC-ის რეკონსტრუქცია განახლდა, რათა 2015 წლისთვის მოხერხდეს საპროექტო სიმძლავრეების მიღწევა. დანადგარის სრულ დატვირთვაზე გასვლის შემდეგ, პროტონების თითოეული ნაკადის ენერგია 7 ტევ-ს მიაღწევს. ასეთი ენერგია შეესაბამება ნაწილაკთა აჩქარებას პრაქტიკულად სინათლის სიჩქარემდე – ისინი 0.999999991 სინათლის სიჩქარით იმოძრავენ. სანამ ასეთ სიჩქარეს მიაღწევენ, პროტონებმა კოლაიდერის წრიულ ორბიტაზე უნდა გაიარონ მანძილი, რომელიც სამჯერ აღემატება დედამიწიდან მზემდე მანძილს.

LHC-ის კოლაიდერის შესაძლებლობათა ზრდა კიდევ მრავალ მოულოდნელობას უქადის მეცნიერებს უახლოესი 20 წლის განმავლობაში.

---

\* 2013 წელს ნობელის პრემია მიენიჭა ფ. ენგლერტს (Francois Englert, 1932) და პ. ჰიგსს (Peter W. Higgs, 1929), რომლებმაც წინა საუკუნის 60-იან წლებში რ. ბრუტთან (Robert Brout, 1928-2011) ერთად სტანდარტული მოდელის ჰიგსის მექანიზმი შეიმუშავეს.



## დანართი IV ფიზიკური და ასტრონომიული ერთეულები

ეს დანართი შეიცავს წიგნის ტექსტში გამოყენებული მნიშვნელოვანი ფიზიკური სიდიდეების და მუდმივების აღნიშვნებისა და მნიშვნელობების ცხრილებს.

SI სისტემის 7 ძირითადი ერთეული

ფიზიკური სიდიდე	ერთეული	აღნიშვნა
სიგრძე	მეტრი	m
მასა	კილოგრამი	kg
დრო	წამი	s
ტემპერატურა	კელვინი	K
ელექტრული დენი	ამპერი	A
სინათლის ინტენსივობა	სანთელი	cd
ნივთიერების რაოდენობა	მოლი	mol

SI სისტემის ზოგიერთი დამხმარე და შედგენილი ერთეული

ფიზიკური სიდიდე	ერთეული	აღნიშვნა
ბრტყელი კუთხე	რადიანი	Rad
სფერული კუთხე	სტერადიანი	Sr
სიხშირე	ჰერცი	Hz = s <sup>-1</sup>
ძალა	ნიუტონი	N = Kg m s <sup>-2</sup>
წნევა	პასკალი	Pa = N m <sup>-2</sup>
სიმკვრივე		kg m <sup>-3</sup>
ენერგია	ჯოული	J = N m
ენერგიის სიმკვრივე		J m <sup>-3</sup>
სიმძლავრე	ვატი	W = J s <sup>-1</sup>
ელექტრული მუხტი	კულონი	C = A s
ელექტრული პოტენციალი	ვოლტი	V = J C <sup>-1</sup>
მაგნიტური ნაკადი	ვებერი	Wb = V s
მაგნიტური ნაკადის სიმკვრივე	ტესლა	T = Wb m <sup>-2</sup>
სინათლის ნაკადი	ლუმენი	lm = cd sr
ნათობა	ლუქსი	lx = lm m <sup>-2</sup>

SI სისტემის გარდა, ზოგიერთი სხვა გავრცელებული ერთეული

ფიზიკური სიდიდე	მნიშვნელობა	აღნიშვნა
ელექტრონვოლტი	$1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$	eV
ასტრონომიული ერთეული	$1.5 \times 10^{11} \text{ m}$	AU
პარსეკი	$206\,000 \text{ AU} \approx 31 \times 10^{15} \text{ m}$	pc
სინათლის წელიწადი	$0.3 \text{ pc} = 9.5 \times 10^{15} \text{ m}$	Ly
გრადუსი	$\pi/180 \text{ rad}$	°
რკალური წუთი (არკ-მინუტი)	$\pi/10\,800 \text{ rad}$	'
რკალური წამი (არკ-სეკუნდი)	$\pi/648\,000 \text{ rad}$	"
ანგსტრემი	$10^{-10} \text{ m}$	Å
მიკრონი	$10^{-6} \text{ m}$	μ

გვინდა მოვიყვანოთ ასტრონომიული მანძილების აღმნიშვნელი სხვადასხვა ერთეულის ერთმანეთში გადასაყვანი ფორმულა:

$$1 \text{ ps} = 3.26 \text{ ly} = 2.06 \times 10^5 \text{ AU} = 3.09 \times 10^{16} \text{ m}$$

5 ფუნდამენტური ფიზიკური მუდმივა

დასახელება	მნიშვნელობა	აღნიშვნა
პლანკის მუდმივა	$1.0 \times 10^{-34} \text{ J s}$	ħ
ნიუტონის კონსტანტა	$6.7 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$	G
სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში	$299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$	c
ბოლცმანის მუდმივა	$1.4 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$	k <sub>B</sub>
კულონის მუდმივა	$9.0 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$	k <sub>e</sub>

პლანკის შედგენილი ერთეულები

დასახელება	მნიშვნელობა	აღნიშვნა
პლანკის მასა	$2.2 \times 10^{-8} \text{ kg}$	$m_p = \hbar^{1/2} c^{1/2} G^{-1/2}$
პლანკის ენერგია	$2 \times 10^9 \text{ J}$	$E_p = m_p c^2$
პლანკის სიგრძე	$1.6 \times 10^{-35} \text{ m}$	$l_p = \hbar m_p^{-1} c^{-1}$
პლანკის დრო	$5.4 \times 10^{-44} \text{ s}$	$t_p = l_p c^{-1}$
პლანკის მუხტი	$1.9 \times 10^{-18} \text{ C}$	$q_p = \hbar^{1/2} c^{1/2} k_e^{-1/2}$
პლანკის ტემპერატურა	$1.4 \times 10^{32} \text{ K}$	$T_p = m_p c^2 k_B^{-1}$

ფიზიკაში ხშირად იყენებენ ეგრეთ წოდებულ ნატურალურ ფიზიკურ ერთეულთა სისტემასაც, სადაც

$$\hbar = G = c = k_B = k_e = 1.$$

ამ სისტემაში სიგრძესა და დროს, ისევე როგორც მასას, ენერგიასა და ტემპერატურას, ერთნაირი განზომილება აქვს. გვინდა მოვიყვანოთ ამ სისტემაში ენერგიის სხვადასხვა ერთეულებში გადასაყვანი ფორმულა:

$$1 \text{ eV} = 10^{-3} \text{ keV} = 10^{-6} \text{ MeV} = 10^{-9} \text{ GeV} = 10^{-12} \text{ TeV} = \\ = 11\,604 \text{ K} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} = 1.8 \times 10^{-18} \text{ kg} = 2.0 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1} = 0.7 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$$

ზოგიერთი ფიზიკური პარამეტრი

დასახელება	მნიშვნელობა	აღნიშვნა
ელემენტარული მუხტი	$1.6 \times 10^{-39} \text{ c}$	e
ელექტრონის მასა	$0.9 \times 10^{-30} \text{ kg}$	$m_e$
პროტონის მასა	$1.6 \times 10^{-27} \text{ kg}$	$m_p$
p და e მასათა ფარდობა	1836	$m_p / m_e$
მანძილი გალაქტიკის ცენტრიდან მზემდე	260 000 ly	
სამყაროს რადიუსი	$10^{10} \text{ ly} \approx 10^{26} \text{ m}$	
დედამიწასა და მთვარეს შორის მანძილი	$3.8 \times 10^8 \text{ m}$	
მზის მასა	$2.0 \times 10^{30} \text{ kg.}$	$M_s$
მზის რადიუსი	$6.9 \times 10^8 \text{ m}$	$R_s$
მზის ნათობა	$3.8 \times 10^{26} \text{ Wt}$	$L_s$
დედამიწის მასა	$6.0 \times 10^{24} \text{ kg.}$	$M_e$
დედამიწის რადიუსი	$6.4 \times 10^6 \text{ m}$	$R_e$

ინფორმაცია რამდენიმე კაშკაშა ვარსკვლავის შესახებ

ვარსკვლავის სახელწოდება	აღნიშვნა	ნათობა მზესთან შედარებით
სირიუსი	$\alpha \text{ CMa}$	22.9
არქტური	$\alpha \text{ Boo}$	100
რიგელი	$\beta \text{ Ori}$	52 500
სპიკა	$\alpha \text{ Vir}$	1905
ანტარესი	$\alpha \text{ Sco}$	6310

ზოგიერთი თანავარსკვლავედის სახელწოდება და აღნიშვნა, ზოდიაქოს ნიშნის მითითებით

ლათინური სახელწოდება	აღნიშვნა	ქართული სახელწოდება	ზოდიაქოს ნიშანი
Aries	Ari	ვერძი	♈
Bootes	Boo	მენახირე	
Canis Major	CMa	დიდი ქოფაკი	
Canis Minor	CMi	პატარა ქოფაკი	
Capricornus	Cap	თხის რქა	♐
Centaurus	Cen	კენტავრი	
Cepheus	Cep	ცეფეუსი	
Cygnus	Cyg	გედი	
Draco	Dra	გველეშაპი	
Gemini	Gem	მარჩბივი	♊
Herkules	Her	ჰერკულესი	
Libra	Lib	სასწორი	♎
Lira	Lir	ქნარი	
Orion	Ori	ორიონი	
Pegasus	Peg	პეგასი	
Pisces	Psc	თევზები	
Sagittarius	Sgr	მშვილდოსანი	
Scorpius	Sco	ღრიანკალი	
Virgo	Vir	ქალწული	

## დანართი V ობსერვატორიები

ასტრონომიული კვლევების მასშტაბებზე წარმოდგენის შესაქმნელად, გვინდა მოვიყვანოთ დედამიწაზე და კოსმოსში ამჟამად მოქმედი ობსერვატორიების არასრული გალერეა.



სურ. 128 LBT (Large Binocular Telescope)  
ობსერვატორია მდებარეობს არიზონას შტატში (აშშ); განლაგებულია 3300 მეტრის სიმაღლეზე.  
LBT ამჟამად მსოფლიოში ყველაზე დიდი გარჩევისუნარიანობის მქონე ოპტიკური ტელესკოპია. მას გააჩნია ორი შეწყვილებული 8.4 მ დიამეტრის სარკე. სინათლის ძალისა და გარჩევისუნარიანობის მიხედვით, LBT შეესაბამება ტელესკოპებს, შესაბამისად, 11.8 მ და 22.8 მ დიამეტრის სარკეებით.



სურ. 129 GTC (Gran Telescopio Canarias)  
ტელესკოპი მდებარეობს კანარის კუნძულებზე (ესპანეთი); განლაგებულია 2400 მეტრის სიმაღლეზე.  
GTC ამჟამად მსოფლიოში ერთ-ერთი ყველაზე დიდი ოპტიკური ტელესკოპია. მისი 10.4 მ დიამეტრის სარკე შედგება ერთმანეთთან სინქრონიზებული 36 ცალკეული სეგმენტისგან.



სურ. 130 SALT (Southern African Large Telescope)  
ტელესკოპი მდებარეობს ქალაქ საზერლანდთან (სამხრეთ აფრიკა); განლაგებულია 1800 მეტრის სიმაღლეზე.  
SALT თავისი 11.1 მ×9.8 მ ზომის სარკით, რომელიც 91 ერთნაირი ექვსკუთხედიდანაა აწყობილი, ამჟამად სამხრეთ ნახევარსფეროში არსებული ყველაზე დიდი ტელესკოპია.





სურ. 131 McDonald Observatory  
 ობსერვატორია მდებარეობს ტეხასის შტატში  
 (აშშ). იქ ფუნქციონირებს 4 ტელესკოპი,  
 რომელთაგანაც ერთ-ერთი, Hobby-Eberly  
 Telescope (HET), გიგანტურია. მისი სარკე SALT  
 ტელესკოპის სარკის იდენტურია. მიუხედავად  
 დედამიწის ბრუნვით გამოწვეული  
 წანაცვლებებისა, HET-ის საშუალებით  
 შესაძლებელია ციურ ობიექტებზე უწყვეტი  
 დაკვირვება 2 საათის განმავლობაში.



სურ. 132 APO (Apache Point Observatory)  
 ობსერვატორია მდებარეობს ნიუ მექსიკოს  
 შტატში (აშშ); განლაგებულია 2780 მეტრის  
 სიმაღლეზე.  
 აღსანიშნავია, რომ აქ არსებული ოთხი  
 ტელესკოპიდან ერთ-ერთი განკუთვნილია  
 SDSS-სთვის (Sloan Digital Sky Survey).  
 © SDSS



სურ. 133 CTIO (Cerro Tololo Inter-American  
 Observatory)  
 ობსერვატორიების კომპლექსი მდებარეობს  
 ქალაქ ლა სერენას (ჩილე) ახლოს;  
 განლაგებულია 2200 მეტრის სიმაღლეზე.  
 ძირითადი ტელესკოპებია 4 მეტრიანი V.M.  
 Blanco და 4.1 მეტრიანი SOAR (Southern  
 Astrophysical Research).  
 © CTIO/NOAO



სურ. 134 CFHT (Canada-France-Hawaii  
 Telescope)  
 ობსერვატორია განლაგებულია მაუნა-კეას  
 მთაზე (ჰავაი), 4200 მეტრის სიმაღლეზე.  
 ტელესკოპის სარკის დიამეტრია 3.6 მ.



სურ. 135 W. M. Keck Observatory  
ეს ობსერვატორიაც მაუნა-კეას მთაზეა  
(ჰავაი) განლაგებული, 4200 მეტრის  
სიმაღლეზე.  
თითოეული ტყუპი ტელესკოპის სარკის  
დiameterი 10 მეტრია.  
© NASA



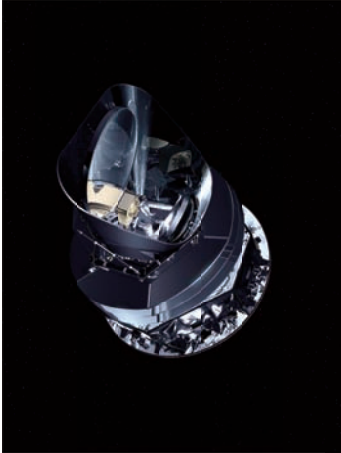
სურ. 136 La Silla Observatory  
კომპლექსი მდებარეობს ატაკამას უდაბნოში  
(ჩილე); განლაგებულია 2400 მეტრის  
სიმაღლეზე.  
ESO-ს (European Southern Observatory) ამ  
პროექტში მონაწილეობს ევროპის 12 ქვეყანა.  
ყველაზე დიდი ტელესკოპის სარკის  
დiameterი 3.6 მეტრია.  
© ESO



სურ. 137 Paranal Observatory  
მდებარეობს ატაკამას უდაბნოში (ჩილე);  
განლაგებულია 2635 მეტრის სიმაღლეზე.  
აქ მოქმედებს ESO-ს 4 ტელესკოპისაგან  
შემდგარი კომპლექსი VLT (Very Large  
Telescope). თითოეული ტელესკოპის სარკის  
დiameterი 8.2 მეტრია. 2011 წელს მათ დაემატა  
VST (VLT Survey Telescope) – ოპტიკურ  
დიაპაზონში მომუშავე მსოფლიოში უდიდესი  
ტელესკოპი.  
© ESO

მომავლის ტელესკოპებიდან აღსანიშნავია E-ELT (European Extremely Large Telescope) 39.3 მეტრიანი სარკით. იგი უნდა განთავსდეს ატაკამას უდაბნოში (ჩილე). ტელესკოპის მშენებლობა დაიწყო 2012 წელს და მისი დასრულება ნავარაუდევია 10-11 წელიწადში.

კოსმოსური თანამგზავრებიდან გვინდა აღვნიშნოთ ESA-ს ორი და NASA-ს ოთხი დანადგარი, მათ შორის ტელესკოპები „დიდი ობსერვატორიების“ სერიიდან.



სურ. 138 Planck

ESA-ს კოსმოსური ობსერვატორია. გაშვებული იქნა 2009 წლის 14 მაისს. მოქმედებდა ლაგრანჟის L2 წერტილში. მისია დასრულებულად გამოცხადდა 2013 წლის ოქტომბერში. საგანგებოდ შემუშავდა კოსმოსური მიკროტალღური ფონის ტემპერატურის ვარიაციების შესასწავლად და WMAP-ის მონაცემების დასაზუსტებლად. გაზომვების მონაცემები, რომელთა საშუალებით შესაძლებელი გახდა ძირითადი კოსმოლოგიური პარამეტრების დაზუსტება, გამოქვეყნდა 2013 წლის 21 მარტს.

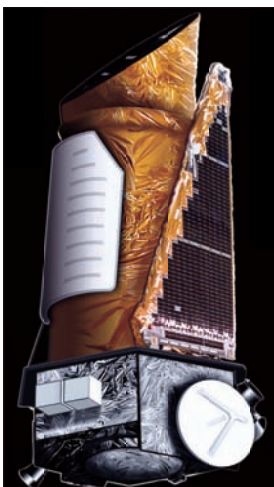
© ESA



სურ. 139 Herschel

ESA-ს კოსმოსური ტელესკოპი 3.5 მ დიამეტრის სარკით. გაშვებული იქნა 2009 წლის 14 მაისს. განთავსებულია ლაგრანჟის L2 წერტილში, ჰელიოცენტრულ ორბიტაზე. ობსერვატორიის ძირითად მიზანს შეადგენდა ვარსკვლავების გაჩენისა და გალაქტიკების ევოლუციის პროცესების შესწავლა ინფრაწითელ დიაპაზონში. 2013 წლის აპრილში ამოიწურა ხელსაწყოთა გასაცემებლად აუცილებელი თხევადი ჰელიუმის მარაგი (2 500 ლ.) და მისია დასრულებულად გამოცხადდა.

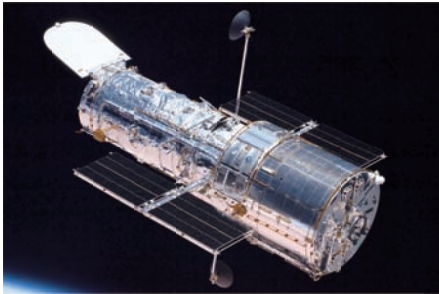
© ESA



სურ. 140 Kepler

NASA-ს ტელესკოპი კოსმოსში გაშვებული იქნა 2007 წლის 7 მარტს. ტელესკოპის წონაა 1 ტ. განთავსებულია დედამიწის ორბიტაზე. გამოიზნულია ჩვენი გალაქტიკის ვარსკვლავების გარშემო მბრუნავი დედამიწის ზომის პლანეტებისა და სხვა მცირე ზომის ობიექტების აღმოსაჩენად. მისია გაგრძელებულია 2016 წლამდე.

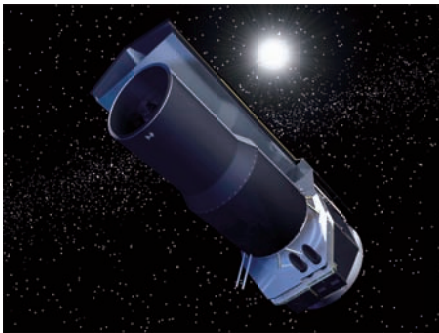
© NASA



სურ. 141 HST (Hubble Space Telescope)

NASA-ს და ESA-ს ტელესკოპი კოსმოსში გაშვებული იქნა 1990 წელს. ტელესკოპის წონაა 11 ტ, სარკის დიამეტრი – 2.4 მ. მუშაობს ძირითადად ხილულ დიაპაზონში. Hubble ერთადერთი ობიექტია, რომლის შეკეთება კოსმოსში მოხდა (უკანასკნელად 2009 წელს). ექსპლუატაცია დაგეგმილია 2018 წლამდე, მისი შემცვლელის, JWST-ს (James Webb Space Telescope) გაშვებამდე.

© NASA/ESA/Ruffnax



სურ. 142 SST (Spitzer Space Telescope)

NASA-ს ეს ტელესკოპი კოსმოსში გაშვებული იქნა 2003 წელს. მისი წონა 950 კგ-ია. გათვალისწინებულია ინფრაწითელი სხივების მისაღებად. ინფრაწითელი სხივებისთვის კოსმოსური მტვრის ღრუბლები, რომლებიც ფარავენ გალაქტიკების ცენტრებს, გამჭვირვალეა.

© NASA

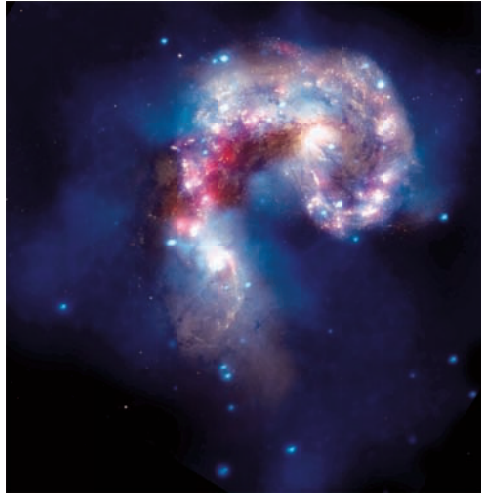


სურ. 143 Chandra X-ray Observatory

NASA-ს რენტგენის დიაპაზონში მოქმედი ტელესკოპი. კოსმოსში გაშვებული იქნა 1999 წელს. Chandra-ს მიწისზედა ანალოგი არ გააჩნია, რადგან დედამიწის ატმოსფერო თითქმის მთლიანად შთანთქავს რენტგენის სხივებს. Chandra-ს წონა დაახლოებით 23 ტონაა და Shuttle-ების მიერ კოსმოსში გატანილი ყველაზე მძიმე ობიექტია.



კოსმოსური ტელესკოპების მონაცემები ერთმანეთს ავსებენ და ელექტრომაგნიტური გამოსხივების თითქმის მთელ სპექტრს ფარავენ.



სურ. 144    გალაქტიკების NGC4038 და NGC4039 შეჯახება  
© NASA/CXC/JPL-Caltech/STScI

მაგალითად, 2010 წლის ზაფხულში NASA-მ გამოაქვეყნა ორი გალაქტიკის შეჯახების სურათი, რომელიც წარმოადგენს სამივე კოსმოსური ობსერვატორიის მიერ გამოსხივების სხვადასხვა დიაპაზონში მიღებული მონაცემების კომბინაციას (Chandra – ცისფერი, Spitzer – წითელი და Hubble – ყვითელი).

მომავლის კოსმოსური ტელესკოპებიდან მნიშვნელოვანია NASA-ს, ESA-სა და კანადის კოსმოსური სააგენტოს ერთობლივი პროექტი: 6.5 მ დიამეტრის სარკის მქონე ინფრაწითელი ობსერვატორია JWST (James Webb Space Telescope), რომელმაც 2018 წლიდან უნდა შეცვალოს Hubble (სარკის დიამეტრი 2.4 მ). აღსანიშნავია აგრეთვე რენტგენული ობსერვატორია Athena (Advanced Telescope for High-Energy Astrophysics), რომლის გაშვებასაც ESA 2028 წელს აპირებს. Athena-ს მგრძნობიარობა და თვალსაწიერი ამჟამად მოქმედ ობსერვატორიებთან შედარებით 100-ჯერ მეტი უნდა იყოს.



## Executive Summary

### **M. Gigolashvili, M. Gogberashvili, N. Roinishvili** **Subjects and Methods of** **Astronomy, Astrophysics and Cosmology** **(in Georgian)**

#### About the Authors

This popular scientific book about modern methods of astronomy, astrophysics and cosmology is intended for Georgian readers. The original idea belongs to prof. **Nina Roinishvili** who for decades has been a leading scientist at Andronikashvili Institute of Physics. She is one of the co-authors of a popular booklet “The History of the Universe Evolution: from the Big Bang to a Big Rip?” (in Georgian, edited by “Sakartvelos Matsne”, 2006). Prof. **Marina Gigolashvili** is a leading scientist at Kharadze Abastumani National Astrophysical Observatory and at Ilya State University. She is the author of an astronomical encyclopaedia “Our Galaxy” (in Georgian, edited by “Elphi”, 2006) and of a popular book “The Sun and the Planets” (in Georgian, edited by “Sakartvelos Matsne”, 2007). Prof. **Merab Gogberashvili** is a leading scientist at Javakhishvili Tbilisi State University and at Andronikashvili Institute of Physics.

The book has been revised by Dr. Irakli Mandjavidze who is a senior engineer at the Institute of Research into the Fundamental Laws of the Universe – Irfu, CEA Saclay, France<sup>‡</sup>. Since many years he participates in CERN experiments, especially in those conducted at LHC.

#### The Goals

Undoubtedly, during the last decades, observational astronomy, theoretical and experimental astrophysics and cosmology were extremely successful and obtained many remarkable results. The technical advances of the 20<sup>th</sup> century gave an enormous acceleration to the fundamental sciences in quest of the origins of the Universe and its evolution. On the eve of the third millennium the enthusiasm of scientists remains unshaken: they unify efforts to devise even more ambitious projects on the surface of the Earth, deep under the seas and in the profound Antarctic ice; at the same time they are planning and preparing farther and farther space Odysseys.

This restless effort of scientists gave the birth to the standard cosmological model and continues to refine it. The model describes with great accuracy the processes that have been taking place since the origin of the Universe. It is equally successful to explain and predict various phenomena whether in the immediate vicinity of the Earth or within the celestial bodies outlying by billions of light years from it. The scale of the Universe is so large, the size of the observable structures therein is so striking, the quantity thereof – so overwhelming, the conditions in its tranquil and turbulent areas – so diverse, that the success of the standard cosmological model is simply surprising. But even more astonishing is the perpetual creativity of the scientists, which has brought so many convincing victories to the ever satisfied curiosity of the mankind.

The authors aimed to explain in a popular way the essence of ingenious methods and of highly tailored experimental facilities that allowed acquiring current knowledge. Yet another intention was to show the evolution of the observational setups aiming at new discoveries and at exploration of the unknown. The key-note of the book is the diversified nature of astronomy, astrophysics and cosmology with their featured interdisciplinary approach, meaning that frequently the veracity of a scientific conclusion must be verified by several complementary approaches. With no resort to heavy mathematical equations, the authors managed to describe not only the fundamental tenets of the standard cosmological model, but also the general principles and more or less complicated facilities of experiments.

---

<sup>‡</sup> Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers (Irfu), Centre de Saclay, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), France

The book also discusses the future research directions. The palette is extremely colorful with a number of issues to be resolved, as well as a number of theoretical models to be verified. The authors use this diversity to explain that a scientific model has to go through long and scrupulous procedures before it may become a successful and acknowledged theory; that a model has to bear in itself a possibility of its experimental validation or refutation; that the models are constantly improved with newer and newer experimental results; that if new observations contradict even a proven and solid theory, the scientists do not hesitate to declare a “crisis” and begin to work on new models and their verifications.

Apart of international efforts, the book describes the contribution of Georgian scientists to the development of astronomy, astrophysics and cosmology. Following a small historical overview, the manuscript relates about the enthusiast scientists of the 20<sup>th</sup> century who, with their restless activity, managed to establish a high level scientific school in Georgia. New projects, leaded by the pupils of these enthusiasts and requiring participation of young scientists, are mentioned.

The manuscript is intended as a supporting textbook for students. The authors hope that the book will gain attention of curious people, especially of the adolescents interested in science. With its essence and aspiration the book joins the assiduous efforts of the scientists in the developed countries in promoting their treasured occupation.

## Structure and Short Description

The book is composed of foreword, five chapters, afterword and five addendums. It comprises 183 pages, 140 figures and 10 tables. The main goal of the manuscript is to show the methods and facilities used in Astronomy, Astrophysics and Cosmology. The first chapter is written as an introduction to different scientific fields. Chapters 2, 3 and 4 serve the main purpose; they are focused on the methods and experimental setups. Each of them is self-contained and can be read independently. Yet another independent part is Chapter 5 that an interested person can read without the need to consult the previous chapters.

In order to give a general idea about the book, a brief annotation for each chapter is provided in the following.

- In the **Foreword** the main principles of the standard cosmological model are briefly outlined and a reference is made to the popular booklet “History of the Universe Evolution: from the Big Bang to a Big Rip?” (N. Roinishvili, M. Svanidze, 2006) written by one of the authors of the manuscript. While the booklet is dedicated to the current cosmological knowledge, it does not answer the question of how the scientists have managed to acquire it. That is how the original idea was born to write a book about the ways of work of astronomers, astrophysicists and cosmologist. At the end of the Foreword, the structure of the book is discussed.

- In **Chapter One** the main areas of astronomy are reviewed. Astronomers investigate celestial objects based on the radiation emitted by them. The branches of astronomy are named according to the corresponding radiation. The atmosphere absorbs electromagnetic radiations of most types. In order to obtain information in the whole electromagnetic spectrum, in many cases experimental facilities need to be carried out in the outer space.

**Optical astronomy** is one of the oldest sciences. In ancient times stars were grouped in constellations by human imagination; the very first tables were created reflecting the positions of stars and of the planets; the difference between observable movements of the stars and the planets has been identified. The book describes the main findings of the optical astronomy of early epochs. Despite of numerous discoveries made during the following periods, the optical astronomy has not lost its importance. Since long, it has been extended beyond the boundaries of the atmosphere and performs observation from the “cosmic heights”.

**Infrared astronomy** studies “cold” celestial objects based on their infrared radiation. The objects with the temperature less than a few hundred Kelvins are considered cold. NASA's Spitzer Space Telescope, ESA's Herschel Space Observatory and Swedish Space Observatory ODIN are examples of the missions working in the infrared range.

**Ultraviolet astronomy** studies the radiation emitted by stars in this range of the electromagnetic spectrum. Because of the atmospheric absorption, only a tiny part of the ultraviolet waves attains the Earth. For their registration, detectors must be placed on satellite spaceships. Some examples are ESA's SOHO, French COROT and NASA's GALEX.

**Radio astronomy** studies the radio signals that reach the Earth from the space. The radio signals are significantly distorted by the atmosphere. This leaves a small fraction of the radio range accessible to ground based telescopes. With the advent of the radio astronomy the scientists become endowed with new "eyes": the whole new radio-universe opened in front of them, which turned out to be as colorful as the visible universe. The Cosmic Microwave Background (CMB) is one example of the crucial findings in the radio astronomy.

**X-ray astronomy** is a branch of observational astronomy that studies the X-ray radiation of celestial bodies. Several thousands of X-ray sources have been identified. As the atmosphere absorbs X-rays, experimental facilities must either be placed on high altitudes or brought out in the outer space. Initially, the detectors positioned on the very tips of rockets were used. Nowadays the scientific setups are carried by long-lived balloons as high in the altitude as 35 km or are placed on the orbital stations. Examples are NASA's satellite Chandra, ESA's X-Ray observatory XMM-Newton, etc.

**Gamma-ray astronomy** makes use of the most powerful part of the electromagnetic spectrum. The energy of gamma-rays is at least 100 000 times higher than the energy of visible light. The gamma-rays do not scatter on the incident matter and, like X-rays, they travel almost straightly from their sources towards the observer. Thus, they make it possible to localize and study their sources – such as pulsars, neutron stars, accretion discs of black holes and others. Yet another subject of investigations is the gamma-ray bursts that represent the most powerful surges of energy in the Universe.

**Neutrino astronomy** originated from the studies of the solar neutrinos. Neutral, almost massless neutrinos interact very little with the galactic fields. As a result, it is possible to pinpoint their sources. Neutrinos are far more numerous than any other known particles. They were born in an enormous quantity during the Big Bang. They had to create a cosmic neutrino background similar to the CMB. Neutrinos interact with the matter so rarely that current facilities are unable to detect the neutrino background. Compared to the relict neutrinos, it is more realistic to register neutrinos produced during the stellar thermonuclear reactions. Investigations of the solar neutrinos have revealed that their intensity was few times lower than expected. This deficit is explained by the oscillations that neutrinos undergo on their way from the Sun to the Earth. Another subject of investigations is the neutrinos produced during the explosions of supernovae.

**Cosmic ray studies** also belong to the corpuscular astronomy. Cosmic rays mostly consist of protons, electrons and nuclei of various chemical elements. The energy distribution of the cosmic ray particles is well known: with the increase of energy the number of energetic particles drastically decreases. The manuscript describes the primary energy spectrum highlighting its prominent features such as the knee, the 2nd knee and the ankle. There are two problems associated with the high energy cosmic rays. Firstly, it is expected that the trajectory of ultra-high energy cosmic rays should point to their sources. But observations show that their incoming directions are almost uniformly distributed over the celestial sphere. In addition, because the cosmic rays lose their energies in interactions with the CMB, their energy cannot exceed certain estimated value – the so called GZK cutoff. But cosmic rays with energies above the theoretical limit have been registered. Currently cosmic rays are studied with a number of large scale experiments detecting extensive air showers (EAS). One example is AGASA. Recently, a new facility became operational in Argentina, named Pierre Auger Observatory in honor of the scientist having discovered EAS.

**Nuclear astronomy** is probably the most interdisciplinary scientific field that brings together the competences of astronomy, astrophysics, nuclear physics and particle physics. The nuclear astronomy studies the production of chemical elements in the processes that take place under the conditions of extreme temperatures and pressure in the vicinity of the stars. At various stages of star explosions, many kinds of non-understood reactions take place such as, for example, the fast capture of neutrons and protons by nuclei and the production of various unstable isotopes. Several other problems of nuclear nature arise when attempting to explain the collapses of the iron nuclei of massive stars.

**Gravitational astronomy** is one of the youngest scientific subjects of interest. Any massive celestial body, which happens to be sufficiently close to the trajectory of radiation emitted from a star, bends it and, in some cases, acts like a lens. Astronomers have been using such gravitational lenses since 1979 when the very first double-imaged quasar was discovered. The manuscript describes three types of gravitational lenses (strong, weak and micro) and the scopes of their application. One subject of investigations is the hypothetical particle – graviton – the carrier of the gravitational force. The scientists hope to discover it by studying various phenomena that take place in the space. Several experiments are oriented on the detection of gravitational waves. In addition to pulsars, the sources of gravitational waves could be galactic collisions. Galactic nuclei host massive black holes and their interactions during the collisions can produce powerful waves with energies that occur in the acceptance range of experiments.

**Theoretical astronomy** is oriented towards the development of analytical and computer models in order to describe various astronomical phenomena. The field of application is extremely vast: evolution and dynamics of the planets, stars, galaxies and other celestial objects; distribution of large scale structures in the Universe; nature and structure of cosmic radiation; cosmological models; nature of the dark matter and the dark energy; etc. In order to achieve its goals, modern astronomy makes use of existing models of theoretical physics and extensively employs computer modeling. Theoretical and observational astronomies are complementary. While the models seek to explain experimental data and predict certain phenomena, observations are used to confirm theoretical results.

- **Chapter Two** is dedicated to the experimental methods and facilities used in astronomy and astrophysics. In order to study the different types of radiation emitted by celestial objects, astronomers use a large variety of detection systems, such as telescopes, interferometers, spectrometers, etc.

**Optical telescopes** collect the light produced by celestial bodies and amplify its intensity using lenses and/or mirrors. The principles of their operation are described using as examples the two main telescope classes – refractors and reflectors. Basic characteristics of telescopes are explained: light grasp and magnification, angular resolution and definition, etc. The manuscript relates about the evolution of telescopes and their gradual performance growth, about the difficulties in further increase of their mirrors and about the methods to overcome these complications.

**Radio telescopes** make use of large dish-like antennas to collect incoming radio waves. As in the case of reflector mirrors, these antennas have parabolic shape. In general, radio telescopes consist of a primary parabolic reflector, a secondary reflector and a receiver-amplifier with feed horn. The manuscript explains the requirements that condition the huge sizes of radio telescopes making them look so haughty. The method of radio interferometry is described. Combining radio telescopes in large networks allows for an important increase of collected signals as well as for improvement of combined resolution. Furthermore the scale of observations is significantly enlarged. The construction details of VLA – one of the most powerful observational setup – are given. Future projects aiming at the investigation of the most distant objects are outlined.

**Interferometers** are widely used in order to create high resolution radio and optical facilities. Their operation is based on well-known interference effect that takes place when two waves, with a certain relationship of their frequencies and phases, superpose. The example of the two-telescope interferometer GI2T is used to explain the main principles of operation. Construction and functioning of interferometers encounter certain difficulties. Nevertheless, interferometers are extremely sensitive instruments. Bringing them in the outer space, outside the Earth's atmosphere, increases their performance even further. Application areas of interferometers are discussed.

**Spectrometers** are used to study the light emitted by celestial bodies by splitting it in different wavelengths. In modern spectrometers diffractive grids are used to divide the incoming light waves into their component colours. Spectral lines indicate the presence of the corresponding chemical elements in the observed stars, while the intensities of the lines give the possibility to estimate their quantities. The spectroscopy allowed determining that hydrogen and helium are the two most abundant chemical elements in the Universe and that heavier elements are produced by the thermonuclear processes within the stars.

**X-ray detectors** make use of special photographic materials, such as plates and films, modified Geiger–Müller counters, gaseous proportional counters, scintillators, as well as X-ray telescopes with hyperbolic and parabolic mirrors. X-Ray radiation outside the Earth’s atmosphere was first detected in 1948. It was emanating from the Sun. The very first X-Ray source outside the solar system was discovered in 1962. Since then the number of known sources in our Galaxy is of the order of  $10^4$ .

**Gamma-ray detectors** have a specific construction because, contrary to the visible light, the use of lenses for wave collection and focusing is not possible. The principles of gamma-ray detection rely on their interaction with matter resulting in the production of electron-positron pairs or to the Compton scattering effects. In order to achieve high spatial resolution, coded masks are used. Most of the cosmic gamma-ray radiation is absorbed by the atmosphere. In order to decrease or avoid the atmospheric influence, detectors are placed on high altitudes with balloons or spaceships. As compared to other types of the electromagnetic radiation, the flux of gamma-rays is much lower and requires extremely long exposure times to get reliable statistics. Gamma-ray bursts raise a particular interest. NASA has organised and operates dedicated satellite network to scrutinize and detect gamma-ray bursts and rapidly transmit their coordinates to the ground-based optical and radio telescopes and facilities. This allows timely detection and investigation of the afterglow of the gamma-ray bursts. Next, the acquired data are shared among the scientific organizations for further detailed off-line analysis.

**Neutrino detectors** are used to study the atmospheric, solar and cosmic neutrinos. Interacting with the matter of experimental facilities, most frequently water, neutrinos give the birth to electrons and muons that emit Cherenkov radiation. Detection of the Cherenkov light reveals the neutrino interactions and allows their characterization. The solar neutrinos were detected in 1967 by means of a setup housed in the Homestake gold mines (South Dakota). Nowadays the solar neutrinos are studied by the following experiments: SNO (Ontario, Canada); BOREXINO, ICARUS and GNO (Gran Sasso, Italy); SAGE (North Caucasus, Russia); CHLORINE (Homestake mines, USA). Atmospheric neutrinos are produced during the interactions of cosmic rays with air molecules and atoms. Knowing their directions allows determining the distances covered by the neutrinos. If neutrino oscillations exist, then there should be a difference between the intensities of neutrino fluxes coming to the experimental setup from the opposite directions. For given travel distance and energy, the neutrino deficit depends on the neutrino masses. Such effect was first discovered by the Kamiokande experiment in Japan, thus giving the indication of the possible values of neutrino masses. The cosmic neutrinos originate from the processes that take place in the outer space. High energy cosmic neutrinos traveling through the Earth produce charged particles. These secondary particles emit Cherenkov light that can be detected by various types of optical photo-detection modules. The direction of the neutrino and its energy can be determined from the direction of the Cherenkov light and its intensity. Because the neutrino interactions have very low probability, detectors must have particularly big dimensions in order to obtain significant statistics. Moreover, they have to be protected against the background produced by cosmic rays. For these purposes the vast water and ice volumes in the depth of the seas and glaciers have been proposed as the detection matter of experimental setups. ANTARES is an example of a large area water Cherenkov detector constructed in the depth of the Mediterranean Sea, while AMANDA and its successor IceCube are the experiments held in the Antarctic.

**High energy cosmic ray detectors** rely on a variety of techniques such as the Cherenkov and scintillating counters, muon stations, Fly’s Eye type setups equipped with photomultipliers and others. High energy cosmic rays produce in the atmosphere the cascades of secondary particles – the EAS. Reaching the Earth, the surface of EAS is about 20 square kilometres. Obviously, this requires the detection stations covering very large areas. Combined use of different types of the complementary detectors makes possible to acquire more complete information about the nature of primary particles that constitute high energy cosmic rays and to measure more precisely their energies. The manuscript describes the AGASA experiment and Pierre Auger Observatory and outlines some of their most important results.

**Gravitational wave detection** techniques repose on extremely sensitive interferometers. The tremendous weakness of the gravitational forces represents the most challenging obstacle for registration of gravitational



waves. This places particularly difficult requirements on the sensitivity of experimental setups. In addition, the detectors must be able to accurately but strongly suppress the background noise of various origins. Six gravitational interferometers operate currently in the world. Gravitational waves could not be discovered after the analysis of current observational data sets; however, for certain types of events, high limit of their occurrences have been estimated.

- **Chapter Three** is dedicated to the following subjects of astronomy: definition of celestial coordinates; measurement of brightness and luminosity of stars and other stellar objects; estimation of their temperatures, masses and sizes; assessment of their ages and distance from the Earth.

**Localization of celestial bodies** is one of the main tasks of astronomy. Essentially, a celestial coordinate system is based on a kind of spherical coordinates with two angular values defining the location of a star on the celestial sphere, while the third, radial coordinate – the distance of the star from the Earth – is an undefined entity. There are several coordinate systems that mainly differ from one another by their fundamental planes and origins. The manuscript compares two frequently used coordinate systems – horizontal and equatorial – and explains various advantages of their variations.

Defining the brightness, luminosities, temperatures, masses and radii of celestial objects is of particular interest in astronomy, because the knowledge of these characteristics is necessary to apprehend the evolution of the Universe.

**Classification of celestial objects** according to their brightness and luminosity dates back to ancient times. Already in 135 BC, Greek astronomer Hipparchus of Nicaea proposed a scale of star magnitudes covering enormous range of brightness by virtue of its logarithmic nature. For relatively bright stars, an experienced astronomer is capable to determine their magnitudes even through naked eye observations, while for faint stars telescopes equipped with photo detectors are used. Astronomers distinguish between the apparent and the absolute magnitudes. The former is obtained by measurements and corrections for atmospheric absorption. The latter determines the apparent magnitude a star would have if it were at a standard luminosity distance (10 parsecs) away from the Earth. Relationships between the apparent and absolute magnitudes are given and brightness measurement methods are described.

The apparent magnitude as seen from the Earth is, of course, biased. In fact, some stars are much more powerful in light radiation than others. Luminosity is the total amount of electromagnetic energy that a celestial body emits in a unit of time. In order to determine the luminosity of a body, its apparent magnitude and distance have to be known. Regardless of the difficulties in distance measurements, in many cases the estimation of luminosities is possible based on the knowledge of electromagnetic radiation specificities of some stellar bodies. The manuscript describes the luminosity measurement methods that exploit some particular characteristics of Cepheids and Type Ia supernovae.

**Determining temperatures of celestial objects** is yet another task of extreme importance. The higher is the temperature of an object, the shorter are the waves it radiates. The spectral classification method allows estimating the temperature of a star based on its color. Measurements of color-indexes of stars give an indication of their temperature. The temperature can also be determined with the Wien's law. The manuscript discusses the Harvard spectral classification system that has been elaborated during the period from 1890 to 1924. A newer classification from Yerkes is also described. This latter system takes into account the luminosities of stellar bodies. For more clarity, corresponding characteristics of the Sun and of some other well-known stars are enumerated.

**The masses of celestial objects** can be estimated by their gravitational interaction with the other bodies. Most of the stars belong to bound binary systems. According to the Kepler's laws, the orbit of a binary system member is determined by the mass of its partner. By observing the binary systems astronomers can determine the masses of member stars. Mass estimation methods for visible, spectral and eclipsing types of binary systems are outlined.

**The radii of celestial objects** are determined from their surface area. The luminosity of a star is defined by its temperature and surface area. Measuring the star's luminosity and estimating the temperature make the calculation of its radius possible.

**Tracing the evolution of stars** has become possible by the accumulation and correlation of the above described parameters obtained by measurements and observations. Interdependence of absolute magnitudes, luminosity, spectral classes and surface temperatures of stars is clearly visible on the Hertzsprung-Russell Diagram (HRD). Depending on the specificities of their evolution, stars form well-identifiable groups and sequences on this diagram. At various stages of development every star successively slides from one group to another. Most stars belong to the main sequence. In these stars the hydrogen to helium transformation processes take place. In the entrails of red giants the stock of hydrogen is almost exhausted. Inside these stars the thermonuclear fusion reactions produce heavier elements out of helium. The red giants become red or yellow supergiant stars when their helium reserves are exhausted. White dwarfs are remnant cores left by the red giants after shedding their outer layers. These stars are characterized by their small size and high density: their volumes are of the order of the Earth volume and their masses are comparable to the solar mass. Based on the Hertzsprung-Russell Diagram, the manuscript describes all stages of star evolution.

**Determining stellar distances** is one of the most ancient concerns of astronomers. Many parameters of stars and galaxies (size, mass, etc.) can be refined only if their distance from the Earth is known. There are several methods with specific to them application areas and achievable limits: starting from the definitions of distances to nearby stars and ending with the estimations of the Universe radius. The book describes: a) the parallax method with its ultimate limit of the order of 10 thousand light years; b) the Cepheids method with its limits of 5 and 80 million light years respectively for the ground-based and space telescopes; c) the standard candle method with its limits depending on the choice of the etalon stars and approaching 20, 30 and 80 million light years respectively for the supergiant stars, supernova-like stars and globular clusters; d) the supernova luminosity method that allows distance measurements up to several billion light years; e) the redshift method that can be used to estimate distances of the order of the Universe radius.

**Ages of stellar bodies** are estimated with several complementary methods. The age of stars can be determined from the model of nuclear synthesis processes taking place within the stars. According to the model, the heavier is a star the shorter is its lifetime. The age of our Galaxy can be estimated by applying this relationship to the globular clusters located therein. The nuclear cosmochronology method is based on the measurements of quantities of radioactive isotopes of Uranium and Thorium within the stellar bodies. Regardless of some difficulties associated with this method, the age of one of the oldest celestial objects, namely the CS 31082-001 star, could be determined. The age of the oldest stars gives a hint of the minimal age of the Universe. Also, within General Relativity, the lifetime of the Universe can be estimated from the Hubble constant. The manuscript describes the above mentioned age measurement methods and illustrates the scopes of their applications with specific examples.

- In **Chapter Four** several topics of modern cosmology are discussed: what evolution the Universe has undergone since its violent origin, what it is composed of, what density it has, what is the nature of space-time, to what extent the features of the Universe have been influenced by its evolution and by the matter and energy contained therein.

**Black holes:** According to General Relativity, particular objects should exist with the gravitational field so powerful that nothing, even the light, could escape from their attraction. These objects are named black holes. At present, there are indirect confirmations of the existence of the so called supermassive and stellar black holes. Because the black holes do not radiate, it is impossible to observe them directly. Thus, the black hole studies require indirect methods. The book describes several of them, as well as the black hole features that could be identified based on the theoretical considerations and on the analysis of experimental data. The processes that might form and evolve black holes are discussed.

The discovery of the **Cosmic Microwave Background** has played an invaluable role in comprehension of the Universe development. Description of the methods used to study and interpret peculiar features of CMB is the *Ariadne's thread* of Chapter Four. It helps the authors to explain in a popular, comprehensive way the evolution of the Universe and the formation of its features. There is a large variety of ground-based, balloon-born and satellite experimental facilities intended for studying CMB. It has been discovered that CMB reaches Earth isotropically, that its spectrum corresponds to the black body radiation with an average temperature of

2.725 K and that it is extremely uniform. George Gamow was the first who predicted the existence of such radiation within the model of hot universe. Based on the discovered characteristics of CMB, scientists validated the model that has been established as the standard cosmological model since then. More accurate experimental data revealed that CMB features extremely small fluctuations with an average of  $1.8 \times 10^{-5}$  K, as well as the polarization of photon oscillations. While the spectrum of the thermal fluctuations gives important information about the geometry of the Universe and about the distribution of matter therein, the polarization is partially associated to the birth of the first generation stars.

Description of the **standard cosmological model** naturally follows the discussion of the CMB characteristics. According to the model: the Universe takes its origins from a violent process called the Big Bang that started its expansion from an extremely dense and hot state; since then, the Universe continues to expand; it is nearly flat; the ordinary matter contributes ~4% of its density, the dark matter – about 22%, while the remaining 74% is attributed to the dark energy; the Universe is extremely uniform and isotropic; the density of the Universe is close to a certain critical value.

**Inflationary expansion** of the early Universe is yet another important scientific deduction that resulted from the CMB studies and that consecutively enriched the standard cosmological model. According to the inflationary model, the Universe went through an extremely fast, exponential expansion within the time interval of  $10^{-36}$ – $10^{-32}$  sec after its creation. Development of the Universe after the end of the inflation epoch can be well described by the standard cosmological model. The manuscript enumerates the successive periods of the Universe evolution as they are comprehended today based on our current knowledge: creation of the Universe as the result of the Big Bang; inflation; slowed expansion; the epoch of an almost uniform plasma composed of hydrogen and helium ions and electrons; separation of the matter and radiation; formation of the first generation stars; development of large scale structures. The book describes how the Universe uniformity as well as the flatness of its space is explained by the inflationary epoch.

Discussing the inflationary model, the book also outlines the notion of the **Universe horizon** and covers the related paradox. Remote regions of the Universe that have no causal relationship and should never had one in the past, have nevertheless almost identical temperature and other characteristics. The paradox is resolved by the inflationary expansion of the early Universe. In addition to the casual horizon there is also the so called particle horizon. It delimits the area of the Universe from which information (particles, radiation) could have travelled toward the observer on Earth since the creation of the Universe. Thus, the particle horizon defines the boundaries of the observable universe. According to the modern cosmological model, the casual horizon is within the visible universe: there are objects existing beyond the casual horizon but within the particle horizon.

Existence of **large scale structures** (galaxies, clusters of galaxies) that can be observed in the Universe questions the Einstein's cosmological principle of the uniform and isotropic Universe. The manuscript describes the precursor conditions and the processes responsible for the creation of the large scale structures from the first generation stars to the large walls known today. It is underlined that the thermal fluctuations of CMB are the manifests of the extremely small initial violations of uniformity, which became the seeds for growth of the local large scale structures.

Elaboration of **three-dimensional maps** played decisive role in studying the distribution of matter in the Universe and its large scale fluctuations. The very first 3D map of the Universe including some 1100 galaxies was published in 1986 by the Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (CfA). Current most accurate map has been obtained within the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) project after a ten-year observational period. The manuscript describes the 3D map analysis methods that are quite similar to those used in the studies of CMB. This material helps to understand the notion of the Universe uniformity.

**Dark matter** and its distribution in the Universe can be studied by observing the large scale structures of the ordinary visible matter. There are two hypotheses about the nature of the dark matter. According to one of the points of view, the dark matter can be made of very lightweight weakly interacting particles. This type is called hot dark matter. Another model foresees that the dark matter is constituted from heavy particles moving at low speeds. This type is referenced as cold dark matter. The distribution of large scale structures in the Universe questions the existence of the hot dark matter. Observation of galactic clusters leads to the conclusion

that the dark matter is uniformly distributed in the Universe. Moreover, it is possible to estimate the amount of the dark matter contained within the galactic clusters. In the manuscript the methods of evaluation of total, baryonic and dark masses of galactic clusters are described. They are based on the observations in the optical and X-ray ranges of spectrum, on the gravitational lensing and on the Sunyaev-Zeldovich effect. Experiments aiming at discovering hypothetical dark matter particles are discussed.

The nature of **dark energy** is understood even less. It is expected that it contributes about 74% to the total density of the Universe, and somehow, it should be related to the repulsion forces expanding the Universe. The CMB studies give the most accurate data about the amount of the dark energy in the Universe. But these are indirect observations and cosmologists are looking for alternative research methods. It should be possible to estimate the amount of dark energy based on the redshift data of extremely heavy galactic clusters with more than 700 trillion solar masses. The manuscript describes the principles of this method and the efforts being taken in this direction. Scientists repose their hopes on the Type Ia supernovae studies that may reveal the nature of the dark energy. Based on the redshifts of the supernovae, it is possible to trace changes in the rate of the Universe expansion. Following the inflation epoch, the speed of expansion used to decrease during about 7 billion years. Thereafter, the Universe began an accelerated expansion that is still in progress. The period when the expansion rate changed from the deceleration to the acceleration should depend on the nature of the dark energy. That is why cosmologists try to acquire large statistics of the supernova explosions: they aim to verify different dark energy models through more accurate data.

- **Chapter Five** is mostly dedicated to the theoretical cosmology and to a number of actual questions that currently preoccupy cosmologists: the Big Bang, inflation, parallel universes, etc. An attempt is made to demonstrate in relatively simple terms, especially for the students interested in theory, how much is yet to be clarified. In certain cases the reader will look through contradictive opinions and models whereby cosmologists try to answer somewhat philosophical questions such as the infinity of our Universe, its uniqueness, existence of multiple universes and others. At the same time, the material clearly shows that the presence of conflicting models is not a handicap to the science; on the contrary, as it has already repeatedly happened, such contradictions are the motive power for its development.

Discussing the **size of the Universe**, it is noted that for our intuitive imagination both the finite and the infinite universe is difficult to accept. The “dark night sky paradox” and some CMB features are used to demonstrate arguments in favor of and against these two possibilities.

Denying the **uniqueness of our Universe** is extremely difficult especially from an ordinary, human standpoint just because the Universe confines all conditions that are necessary for our existence. But when discussing the strong and weak anthropic principles, the authors raise the question not about the singularity of the Universe, but about the existence of a single universe or of multiple universes.

Discussion of the **possible diversity of universes** begins with a reminder that the horizon of the Universe delimits the area accessible for scientific research and that having such “narrow view” it is difficult to unconditionally affirm the existence of a single Universe. Among the various possible scenarios of coexistence of universes, two options are detailed. Probably the simplest option would be the existence of independent Hubble volumes in meta-universe. Another possibility is associated with the chaotic inflation that would not have finished simultaneously in all areas, thus giving the birth to a multitude of independent universes. Yet another potential form derives from the string theory that predicts the parallel coexistence of three-dimensional universes in a multi-dimensional meta-universe.

Discussion concerning the **origin of time** also starts with contradictive considerations about finite or infinite existence of the Universe. Based on the quantum mechanics, James Hartle and Stephen Hawking described the possibility of spontaneous birth of the Universe. This example shows that the physics laws encounter enormous problems when the time variable equals zero. Scientists have sufficiently accurate idea about the processes that were taking place since the very first nano-nano-nano-nano seconds, but zero time and especially negative time are really puzzling. An escape from this uncomfortable situation might be associated with the loop quantum gravity model that attempts to enrich the Einstein’s General Relativity with the quantum laws. In order to explain the initial stages of the Universe, the model predicts the process that in contrast to the

Big Bang is called the Big Bounce. In particular, the loop quantum gravity model envisages the universe that successively goes through the expansion and contraction phases.

**Seeking for the “key-stone” of the Universe:** What was before the Big Bang, what is beyond the Universe? A frank answer to these questions is: we do not know. But the answer does not in any case manifest the weakness of the science; on the contrary, it is probably a step forward. The strength of science is reflected in the fact that it does not hesitate to question the already established opinions and in the search of answers to unsolved questions, it does not avoid undermining “authorities”. First of all, scientists check and recheck the accuracy of obtained experimental data. Then, the data are used to verify various theoretical models. If the observations contradict the models, regardless of their world-wide acknowledgement, the scientists do not hesitate to declare “crisis” and begin elaboration of new models. The manuscript illustrates these assertions taking as an example the laborious process of establishment of the standard cosmological model. It is underlined that scientists are never satisfied with the theories that only enumerate the characteristics of the Universe but do not explain them. In addition, scientists always distinguish metaphysical ideas from the models based on strict logic and accurate mathematical apparatus. These theories must be strengthened by the perspectives of their experimental validation or rejection. The manuscript brings an example of the string theory with its tenets and experimental methods for their verification. The need of interdisciplinary approach is underlined.

- The **Afterword** is intended to demonstrate impressive advances of the observational astronomy and of spatial research techniques. It relates about one of the most successful space odysseys of the recent years – the flight of NASA’s Cassini spacecraft with onboard Huygens probe towards the Saturn. The mission started from Cape Canaveral on October 15, 1997. In order to accelerate the spacecraft and settle it on the target orbit around the Saturn, the gravitational fields of the Venus, the Earth and the Jupiter were used. Cassini reached the Saturn in 2004 – after 7 years of journey. On December 25 of the same year, Huygens separated itself from Cassini and on January 14, 2005 landed at the surface of Titan – the largest satellite of the Saturn. The scientific program of the mission is vast and multifaceted. The research efforts are oriented on the studies of the Saturn, of its rings and satellites, of its magnetosphere. The mission was originally scheduled until 2008, but thanks to its good technical conditions, it has been extended several times. Current discussions aim at its technical and financial support until 2017.

- **Addendum One** narrates about astronomical research in Georgia. It starts with a brief historical overview. Preserved old manuscripts and astronomical facilities indicate the level of astral thinking in ancient Georgia.

Thereafter, **Abastumani Astrophysical Observatory** is described. The observatory has been founded on February 8, 1932. This is a multilateral research organization. Main orientations of theoretical and observational studies are: galactic structures and their evolution; binary and variable stars; the Sun and the solar system; the Sun-Earth couplings; solar and moon eclipses; the Earth’s atmosphere; plasma astrophysics; history of astronomy. The work performed in these directions, the methods and setups used and some of the most important results obtained are briefly described.

**Theoretical Astrophysical Center** of Abastumani Astrophysical Observatory conducts its research in various actual directions such as accretion disks of black holes, active galactic nuclei, dynamics of density waves within the spiral galaxies, dynamics of pulsar winds, collective phenomena in the solar atmosphere, dynamics of solar winds, dynamic events in the Earth’s atmosphere, modeling of laboratory plasma, etc.

At the end of the addendum, an excellent example of the **relationship between astronomy and history** is given. It is sometimes possible to refine the dates of historical events by confronting them with the preserved ancient manuscripts that refer to particular astronomical or meteorological events. The Miracle of King Mirian, described in Georgian chronicles, resembles the conditions characteristic to solar eclipses. The research work performed at Abastumani Observatory has revealed an exact date of the solar eclipse that happened during the reign of King Mirian. After comparing this date to the other historical events related in ancient Georgian



records, it is likely that Christianity in Georgia became the state religion during the period from May 6, 319 to April 17, 320, *i.e.* 6-7 years earlier than the date currently accepted.

- **Addendum Two** describes the cosmic ray studies conducted by the Georgian scientists. The astrophysical and nuclear research directions have been widely represented in the cosmic ray activities in Georgia.

The astrophysical research is mainly led by **Nodia Institute of Geophysics**. The studies began in 1953 when the first continuous registration station was constructed in Tbilisi under the leadership of V. Koiava. Since then more complex cosmic ray registration facilities have been installed and cosmophysical observatory has been founded at the Institute. The main research area is the study of the neutron and muon components of cosmic rays. Theoretical work is oriented towards the problems associated with the solar wind asymmetry and cosmic ray variations.

The nuclear research direction is mainly addressed at **Andronikashvili Institute of Physics**. The studies started in 1949 when under the leadership of E. Andronikashvili a high altitude cosmic ray station has been founded on Elbrus – the highest mountain in the Caucasus chain. Probably the most important contribution of the Georgian physicists in the cosmic ray research was the invention of the streamer chamber. Two members of the Institute, V. Roinisvili and G. Tchikovani, have been awarded the Lenin's Prize – the highest scientific distinction in the Soviet Union. Yet another group of Georgian researchers made a significant contribution to the international Pamir-Chacaltaya collaboration. Under the leadership of this group a large scale cosmic ray experiment GELATICA is being currently carried out. This effort is financially supported by Shota Rustaveli National Science Foundation (Georgia).

- In **Addendum Three**, in order to facilitate the reading of the book, the main tenets of the Elementary Particle Physics are outlined. In addition, a brief description is given of the most powerful particle accelerator – the Large Hadron Collider. Among the scientists from about 100 countries, who routinely participate in the LHC experiments, are also Georgian physicists and engineers. Scientists hope that LHC will allow finding answers on many cosmological questions that remain unresolved. Recently the hopes were strengthened as the LHC experiments ATLAS and CMS announced a stunning discovery of a new particle resembling the long-sought Higgs Boson.

- **Addendum Four** includes several tables with the fundamental constants, main physical quantities, their units and symbols, as well as with the names and signs of constellations mentioned in the book. Some characteristics of a number of brightest stars are also given.

- In **Addendum Five**, a gallery of some ground-based and space observatories is presented, showing the scale of the worldwide effort of astronomical research. Characteristics and technical data are given for the most elaborated telescopes and observational instruments.

## Conclusive Remarks

As it was already mentioned, the manuscript is intended as a supporting textbook for students. Thanks to the relatively simple, comprehensive language, it should be also useful for the senior pupils of secondary schools, who are interested in physics. It is equally important that the book is destined to a wide audience.

Regardless of the chosen specialization, reading the book will allow the students from natural science faculties, especially physics, to acquire basic knowledge on the traditional and latest methods of astronomy, astrophysics and cosmology. The manuscript gives many examples of ground based facilities, space missions and satellite observatories that are used for the research of various celestial objects and events. These examples make evident the necessity of multilateral approach in order to comprehend particular phenomenon. Understanding the complex process of establishment of the standard cosmological model, students will grasp the need of continuous refinement of already proven and well acknowledged theories. This in turn should assist in development of such important features as the capability of independent critical analysis of well-established opinions, and continuous search for new and original ideas and methods. The students standing on the

crossroad of choice of specialization might be influenced and oriented towards the astronomy, astrophysics and cosmology by the described list of yet unresolved issues that have to be tackled by the future generations of scientists.

The authors hope that the book will facilitate yet another choice. Reading the manuscript may strengthen or even spring up the will to study physics in senior pupils interested in natural sciences. First of all, the facts and figures concerning the Universe are simply startling. The quantifiable data, such as the size of the Universe, the number of galactic clusters in the large scale structures, the number of stars in the Milky Way, as well as the extreme conditions within the entrails of stars, or the features of black holes, are naturally impressive. But equally attractive are almost philosophical notions such as the finite or infinite nature of the Universe, existence of a single universe or of multiverses, the future of the Universe. The book underlines the necessity of multidisciplinary attitude to approach such cosmological questions. Indeed, the latest advances in the nuclear and particle physics have to be associated with the methods proper for astronomy and astrophysics. Along with the romantic greatness of the Universe, this multilateral approach and a broad choice of subjects of interests might be additional stimuli for senior pupils to continue their studies in physics at a high school.

Undoubtedly, the development of fundamental sciences in any country places an important burden on its population and requires a strong governmental support. Accordingly, a vital duty of scientists is the promotion of their work within the population: they have to raise interest in the field of their activities and explain the importance of the obtained results. In this regard, the manuscript written in Georgian is certainly an attempt to popularize astronomy, astrophysics and cosmology among the Georgian population. First of all, the book with a vast panorama of modern astronomical research and achievements should be the strong support for the secondary school teachers – probably the straightest path to attain the very heart of the society. It is extremely important that the manuscript clearly underlines the systematic scientific approach applied in investigating any issue, big or small. The book clearly describes the essence of this approach: every hypothesis must be verified and re-verified through observations; in order to study a new phenomenon, several complementary methods may be needed; validation of a theoretical model requires experimental confirmation of its predictions; scientific “certainties” are far from being dogmatic and, if necessary, their veracity is retested. The book with an abundance of amazing details about the Universe should be undoubtedly interesting for curious people. But just because the book gives a chance to understand the ways and efforts and the scientific methods of obtaining these data, the information presented in the manuscript must be more convincing. For the same reason, it should help a wide audience to better grasp the importance of fundamental sciences that may frequently look somewhat very abstract.

The authors hope that the exposure of unprecedented international scientific effort will be another favourable factor contributing to the development of astronomy, astrophysics and cosmology in Georgia – a noble aim of generations of Georgian scientists.

## სამიგბელი

<b>ა</b>	
აბუსერიძე-ტბელი .....	152
ადაპტირებადი ოპტიკა.....	39
აეროსტატი.....	20, 52, 116
ARGO.....	116
BOOMERanG.....	116, 146
GRIP-2 .....	52
HIREGS .....	21
MAXIMA.....	116
ULDB .....	52
აზიმუტი.....	78
აზოტი.....	27, 68, 86
აინშტაინი ა. ....	122, 135, 142, 184
აინშტაინის რგოლი .....	28, 29
აიროვანი პროპორციული მთვლეი .....	48
აკრეციული დისკო.....	22, 109, 110, 167
ამიაკი.....	148
ანაბერაციული კამერა.....	158, 162
ანიჰილაცია.....	184
ანტენა .....	18, 40, 41, 117
რადარული .....	182
საკომუნიკაციო.....	71
ანტინაწილაკი .....	142, 183, 184
ანტროპული პრინციპი .....	138, 142, 144
არამდგრადობა	
გრავიტაციული .....	131
ჩერენკოვ-დრეიფული .....	169
ციკლოტრონული .....	169
არგონი .....	59
არისტოტელე.....	10
არკანი-ჰამედი ნ. ....	146
ასტროლაბი.....	152
ასტრონომიული ერთეული .....	13, 96
აქრომატული ლინზა .....	36

<b>ბ</b>	
ბალმერის ნახტომი.....	163
ბარიონების დათვლა .....	129
ბარიონული მატერია .....	30, 112, 115, 130
ბელი ჯ. ....	19
ბერილიუმი .....	59, 102
ბირთვული რეაქცია . 23, 27, 46, 93, 94, 95, 102	
ბირთვული საათი.....	104
ბნელი ღამის ცის პარადოქსი.....	136
ბოზონი	
W .....	138, 183
Z .....	183
ჰიგსის.....	120, 183

ბოლომეტრი .....	130
ბრანა (brane) .....	145
ბრუნო ჯ. ....	11
ბრუტი რ. ....	186
ბუზის თვალი (Fly's Eye).....	68
ბუნიობა.....	79

<b>გ</b>	
გალაქტიკა	
NGC4038.....	196
NGC4039 .....	196
NGC4258.....	98
NGC4261.....	109
NGC5128.....	48
VIRGOHI21 .....	130
M87.....	48, 110
ანდრომედეს.....	48
ბირთვი.....	14, 109
განაწილების რუკა .....	99, 123, 124
გროვა (კლასტერი)...5, 30, 48, 114, 120, 122, 126, 127, 129, 130, 131, 157, 167	
ელიფსური.....	17
კლასტერების „აწონვა“.....	127, 129
კლასტერი ABELL 2218.....	28
კლასტერი SPT-CL J0546-5345 .....	133
მაგელანის ღრუბელი.....	48, 84, 92, 111
რადიო .....	18, 48, 98
სუპერკლასტერი.....	30
გალაქტიკის ჰალო .....	30, 54, 103
გალილეი გ. ....	12, 35
გალიუმი .....	59
გამა-აფეთქება.....	22, 53, 54
გრძელი .....	54
მოკლე.....	54
ქსელი (GCN) .....	57
გამოვი გ. ....	19, 112
გამოსხივება	
გამა.....	9, 21, 50
ელექტრომაგნიტური.....	8, 168, 196
ინფრაწითელი .....	9, 14
კორპუსკულური .....	9, 22
მიკროტალღური .....	9, 19, 40, 70, 112
ნარჩენი (afterglow) .....	22, 54
ოპტიკური .....	9, 10, 35, 158
რადიო .....	9, 18, 32, 158
რენტგენის .....	9, 20, 47, 111, 128, 129
სინქროტრონული .....	18, 169
ულტრაიისფერი .....	9, 16

შავი სხეულის .....	111, 112, 113
ჩერენკოვის .....	57, 60, 66
ჰოუკინგის .....	111
განუზღვრელობის პრინციპი .....	142
გეიგერის მთვლეელი .....	48
გერმანიუმი .....	51, 130
გინზბურგი ვ. ....	18
გლუონი .....	183
გოგბერაშვილი გ. ....	146
გრავიტაციის მარყუჟოვანი მოდელი .....	143
გრავიტაციული	
არამდგრადობა .....	131
ინტერფერომეტრი .....	45, 73
გრავიტაციული ლინზა .....	27, 126, 129
მიკრო .....	30
სუსტი .....	30
ძლიერი .....	29
გრავიტაციული ტალღები ..	32, 40, 45, 73, 116, 145, 167
რელიქტური .....	145, 168
გრავიტონი .....	32, 73, 183
რელიქტური .....	32
გრეიზენი კ. ....	25, 70
გუდრაიკი ჯ. ....	83
გურზადიანი ვ. ....	146
გუტი ა. ....	144

## დ

დამატებითი განზომილებები .....	146, 184
დევისი რ. ....	59
დეიტერიუმი .....	27, 58, 60, 120
დეიტრონი .....	102
დვალი გ. ....	146
დიდი ადრონული კოლაიდერი (LHC) .....	120, 146, 185
დანადგარები ALICE, ATLAS, CMS, LHCb ..	185
დანადგარი LHCf .....	181
დიდი აფეთქება .....	5, 23, 26, 32, 101, 112, 116, 118, 119, 121, 134, 136, 139, 141, 142, 144, 146
დიდი ნახტომი .....	143, 145
დიმოპულოსი ს. ....	146
დიფერენციალური ბრუნვა .....	167
მზის .....	165
დიფერენციალური სპექტრი .....	69, 72
დიფრაქციული მესერი .....	46
დოპლერი ქ. ....	16
დრეპერი ჰ. ....	87

## ე

ეგზოპლანეტები .....	14, 17, 30, 40, 45, 167
---------------------	-------------------------

ედინგტონი ა. ....	92
ევროპიუმი .....	105
ენგლერტი ფ. ....	186
ეფექტი	
დოპლერის .....	15, 46, 100
სიუნიაევ-ზელდოვიჩის .....	130, 133
ფორბუშის .....	179
ჩერენკოვის .....	169
ექსპერიმენტი	
2dFGRS .....	99, 124, 126
AFAEKS-78 .....	165
AFAEKS-79 .....	165
BATSE .....	55
CDMS .....	130
EDELWEISS .....	130
SDSS .....	124, 126, 132

## 3

ვარსკვლავი	
CS 22892-052 .....	105
CS 31082-001 .....	105
HD 115444 .....	105
KY Cep .....	163
RMC 136a1 .....	92
Sco X-1 .....	47
Tau X-1 .....	48
ანტარესი .....	88
არქტური .....	83, 88
ასაკი .....	104, 105
ბეტელგეიზე .....	83
განაწილების რუკა .....	124
გედი P (P Cyg) .....	162
გედი X-1 (Cyg X-1) .....	49, 110
გველეშაპი XZ (Dra XZ) .....	162
გიგანტი .....	83, 88, 91, 94, 105
გროვა .....	100, 103, 125, 157, 161, 163, 172
დიდი დათვის W (W UMa) .....	162
ევოლუცია .....	27, 90, 93
ვება .....	83
ვოლფ-რაიეს ტიპის .....	157
ზეახალი 16, 19, 21, 24, 27, 48, 50, 52, 55, 62, 72, 85, 93, 100, 104, 106, 108, 131, 133, 157, 158	
ზეგიგანტი .....	83, 88, 89, 92, 93, 94, 100, 163
კანოპუსი .....	83
კატალოგი ჰარვარდის .....	87
კლასტერი M15 .....	103
მასა .....	90, 92, 103
მთავარი მიმდევრობა .....	91, 92, 95, 163
მშვილდოსნის Sag A* .....	108, 111
ნახშირბადოვანი .....	94

ნეიტრონული...	19, 25, 30, 32, 48, 55, 76, 95, 163
ორჯერადი სისტემა .	19, 44, 76, 90, 95, 100, 110, 154, 156, 162, 163
პეკულარული .....	87, 89, 157, 160
პერსექსი ζ .....	88
პოლარული .....	84, 88, 98
რადიუსი .....	90
რიგელი .....	88
სირიუსი .....	80, 83, 88, 89
სპექტრული კლასიფიკაცია იერკის .....	88
სპექტრული კლასიფიკაცია ჰარვარდის .....	87
სპიკა.....	88
სწრაფმსრბოლი.....	163
ტემპერატურა.....	86, 90, 91
ფონური.....	161
შერევის ზონა .....	94
შრეობრივი წვა .....	93
ცენტავრის ალფა.....	96
ცეფეუსის დელტა Cep δ.....	83
ცვალებადი .....	84, 90, 156, 162, 173
წითელი გიგანტი. ....	46, 83, 85, 92, 93, 95, 100
ჯუჯა... ..	30, 85, 88, 89, 91, 93, 94, 95, 100, 162
ჰერბიგის Ae და Be .....	163
ჰერკულესის DL (Her DL) .....	162
ვარსკვლავიერი სიდიდე ....	80, 84, 87, 91, 130, 163
ვარსკვლავური სეისმოლოგია .....	17
ვაშაკიძე-ოორტის მეთოდი .....	157
ვილსონის კამერა .....	180
ვიმპი (WIMP) .....	31, 130
ვინი ვ. ....	87

**ზ**

ზაცეპინი გ. ....	25, 70
ზელდოვიჩი ი. ....	130
ზოგადი ფარდობითობის თეორია ...	106, 108, 110, 122, 129, 143, 184
ზღვარი	
GZK.....	25, 70, 72
ტოლმან-ოპენჰაიმერ-ვოლკოფის.....	94
ჩანდრასეკარის.....	94

**თ**

თანავარსკვლავედი .....	190
გედის.....	49
დიდი ქოფაკის .....	89
კასიოპეას .....	50
კენტავრის .....	48
კუროს.....	48, 158, 162
ოქროს თევზის .....	83

პატარა დათვის .....	89
ქალწულის.....	48, 130
ღრიანკალის .....	20, 47
ცეფეუსის .....	162
თეოდოლიტი .....	96
თერმოსფერო.....	9
თორიუმი .....	104, 105

**ი**

იანსკი კ.....	18
იდეალური აირი.....	95
ინტერფერენცია .....	42, 74
ინტერფერომეტრები გრავიტაციული	
eLISA/NGO (NASA/ESA) .....	45, 76, 168
GEO (გერმანია).....	45, 75
LIGO (აშშ) .....	45, 75
TAMA (იაპონია) .....	45, 75
VIRGO (იტალია).....	45, 75
ინტერფერომეტრები რადიო და ოპტიკური	
e-VLBI.....	42
GI2T.....	43
Keck.....	45
VLA.....	41, 42, 98
VLBA.....	98
VLBI .....	41
ინტერფერომეტრი.....	42, 110, 168
ბაზისი .....	43
გარჩევის წერტილი .....	44
გრავიტაციული .....	იხ. გრავიტაციული
ინტერფერომეტრი	
ოპტიკური .....	44
რადიო .....	41, 44, 118
ძირითადი ზოლი.....	43
ხილვადობა .....	43
ინფლაცია.....	112, 118, 120, 122, 134, 136, 137, 139, 144
ქაოტური.....	140
იონოსფერო .....	47, 166
იტრიუმი .....	164

**კ**

კანონი	
ვინის.....	87
კეპლერის.....	34, 90
ჰაბლის .....	101, 106, 123
კაჟბადი.....	51, 94, 130
კასინი ჯ.....	147
კეპლერი ი. ....	12, 24
კვაზარი .....	14, 29, 41, 101, 122, 167
Q0957+561 .....	29
3C 273 .....	48



კვანტური მექანიკა.....	23, 95, 122, 142
კვანტური ფლუქტუაციები .....	122, 140
კვარკი.....	183
კინანი ფ. ....	88
კლასი	
UMP.....	106
სპექტრული .....	86, 87, 88, 91, 156, 160
კოდირების ნილაბი .....	51
კოლაბორაცია	
2dFGRS .....	<i>იხ. ექსპერიმენტი 2dFGRS</i>
2MASS .....	124
2MRS .....	124
BICEP2 .....	116
EDELWEISS.....	<i>იხ. ექსპერიმენტი EDELWEISS</i>
Pamir-Chacaltaya.....	181
Памир .....	181
კოლიმატორი .....	47, 48
კოლორიმეტრია .....	95
კომეტა.....	13, 156
1942 თევზაძე 1 .....	157
1942 თევზაძე 2 .....	157
თუთლის .....	13
კუდი .....	13
უიფლ-ფედკე-თევზაძის .....	13
ფეის.....	13
ჩურიუმოვ-გერასიმენკოს .....	13
ჩურიუმოვ-გერესიმენკოს .....	13
ჰალეის .....	13
კომპტონის გაბნევა .....	50
კოორდინატი	
აზიმუტი.....	78
გალაქტიკური.....	77
დახრილობა .....	79
ეკვატორული.....	79
ეკლიპტიკური .....	77
ზენიტური მანძილი .....	78
მნათობის სიმაღლე.....	78
პირდაპირი აღვლენა .....	79
საათიერი კუთხე .....	79
ციური .....	77
ჰორიზონტული .....	77
კოპერნიკი ნ.....	11, 34
კორონოგრაფი.....	156, 164
კოსმოლოგიური პრინციპი.....	122, 125, 126
კოსმოსური მისიები	
Cassini-Huygens (NASA) .....	147
CGRO (NASA) .....	53, 55
Chandra (NASA) .....	21, 49, 129, 195
COBE (NASA).....	116
COROT (საფრანგეთი).....	17
COS (ESA).....	53
Euclid (ESA).....	133
Explorer-11 (NASA).....	53
Fermi (NASA) .....	53, 56
Gaia (ESA) .....	98
GALEX (NASA) .....	17
Galileo (NASA) .....	147
GRANAT (სსრკ) .....	22, 53
Herschel (ESA) .....	15, 39, 194
Hipparcos (ESA) .....	97, 163
Hubble (NASA).....	28, 31, 39, 54, 98, 107, 109, 129, 134, 158, 195
INTEGRAL (ESA) .....	56
ISO (ESA).....	14
ISS (NASA-რუსეთი) .....	179
IXO (NASA).....	133
Juno (NASA).....	151
JWST (NASA, ESA,კანადა).....	195
ODIN (შვედეთი) .....	15
Pioneer 10 (NASA) .....	179
Pioneer 11 (NASA) .....	147, 179
Planck (ESA) ...	39, 106, 114, 116, 133, 145, 194
Rosetta-Philae (ESA) .....	13
SOHO (ESA).....	17
Spitzer (NASA) .....	14, 195
Swift (NASA) .....	54, 57
Uhuru (NASA) .....	49
Voyager 1 (NASA) .....	147, 179
Voyager 2 (NASA) .....	147, 179
WFIRST (NASA) .....	133
WIND (NASA).....	53
WMAP (NASA) .....	116, 117, 121, 146
XMM-Newton (ESA) .....	21, 50, 129
Мир (სსრკ) .....	158, 179
კოსმოსური სხივები ..	9, 22, 25, 34, 67, 68, 166, 177
სპექტრი .....	72
კოსმოსური სხივების დეტექტორები	
AGASA (იაპონია).....	25, 26, 69, 71
Auger (არგენტინა) .....	26, 71
GELATICA (საქართველო) .....	182
HiRes (აშშ) .....	69
JEM-EUSO (იაპონია) .....	73
Памир (სსრკ) .....	181
Якутск (რუსეთი) .....	71
კუზმინი ვ.....	25, 70

## ლ

ლაგრანჟის წერტილი .....	39, 98
ლეპტონი .....	129, 183
ლივითი ჰ.....	84, 98
ლითიუმი .....	105

ლორენც-სიმეტრიის დარღვევა ..... 26, 168

## მ

მაგნიტური ქარიშხალი ..... 166, 179

მაგნიუმი ..... 95

მაიკელსონი ა. ა. .... 44, 45

მაკკორმიკის კატალოგი ..... 157

მანძილი

ზენიტური ..... 78

სიკაშკაშის სტანდარტული ..... 81

მასა

გრავიტაციული ..... 128, 131

ხილული ..... 125, 126, 128, 129

მაჩო (MACHO) ..... 30

მეზოსფერო ..... 9

მეთანი ..... 148, 149

მემბრანა ..... 145

მეორე კოსმოსური სიჩქარე ..... 108

მზე

ასაკი ..... 102

ატმოსფერო ..... 47, 164

აქტივობა ..... 164, 165, 179

გვირგვინი ..... 47, 179

დაბნელება ..... 176

დიფერენციალური ბრუნვა ..... 165

ვარსკვლავიერი სიდიდე ..... 82

ლაქები ..... 165, 179

მაგნიტური პოლუსი ..... 179

ნათობა ..... 82, 88

პროტუბერანცი ..... 17, 164, 172

სპექტრული კლასი ..... 88

ფოტოსფერო ..... 164

ქარი ..... 9, 13, 26, 169, 179

ქრომოსფერო ..... 47

მნათობის დახრილობა ..... 79

მორგანი უ. .... 88

მოწყვეტის სიჩქარე ..... 108, 110

მსოფლიო მონიტორულ ქსელი NMDB ..... 178

მუხტ-კავშირისანი მოწყობილობა (CCD) ..... 47

## ნ

ნათობა ..... 82, 90, 92, 98, 99, 101, 102, 107, 133

ზეახალი ვარსკვლავების ..... 85, 100, 134

თეთრი ჯუჯების ..... 95

მზის ..... იხ. მზის ნათობა

სფერული გროვის ..... 100

ცეფეიდების ..... 83

ნაპერწკლოვანი კალორიმეტრი ..... 180

ნაწილაკთა ოჯახები ..... 141, 183

ნახევარდაშლის პერიოდი ..... 104

ნახშირბადი ..... 27, 86, 94, 95, 104

ნებულა ..... 16

ნეიტრინო ..... 22, 24, 126, 167, 183

ატმოსფერული ..... 61

დეფიციტი ..... 58, 61, 62

ელექტრონული ..... 24, 58, 62

ვარსკვლავიერი ..... 23

კოსმოსური ..... 62, 64

მასა ..... 62, 167

მზის ..... 24, 57, 102

მიუონური ..... 24, 61, 62, 67

ოსცილაცია ..... 23, 61, 67

რელიქტური ..... 23, 32

სპექტრი ..... 58

ტაუ ..... 24, 61, 67

ნეიტრონული მონიტორი ..... 177, 179

ნეონი ..... 95

ნისლეული

გალაქიკური ..... 157

გარეგალაქიკური ..... 157, 166

დიფუზური ..... 157, 161

კიბორჩხალას ..... 48, 158

პლანეტური ..... 94

პროტოპლანეტური ..... 94

ნიუტონი ი. .... 12, 36

## ო

ოზონი ..... 165, 166

ოზონის ფენა ..... 165

ოორტი ი. ჰ. .... 13, 157

ოორტის დრუბელი ..... 13

ოპტიკური დეტექტორი ..... 64, 65, 67

ოჟე პ. .... 26

ოსმიუმი ..... 104

ოქრო ..... 46

## პ

პარალაქსი ..... 45, 96, 97, 170, 172

პარენაგოს გეგმა ..... 157

პარსეკი ..... 16, 25, 81, 96, 97

პენზიასი ა. .... 19, 112

პენროუზი რ. .... 146

პერლმატერი ს. .... 133

პიგოტი ე. .... 83

პითაგორე ..... 10

პიკერინგი ჩ. .... 84

პლაზმა ..... 27, 112, 120, 128, 169, 178, 179

პლანეტა

ვენერა ..... 147, 152, 171

იუპიტერი ..... 95, 147, 151, 152

მარსი .....	152
მერკური .....	149, 152, 159
ნეპტუნი .....	179
პლუტონი .....	159
სატურნი .....	147, 152, 159
პლანეტების თანამგზავრები	
დიონისე .....	147
ევროპა .....	147
ენცელადა .....	150
იაპეტი .....	147
რეა .....	147
ტიტანი .....	147, 149, 150
ქარონი .....	159
პლანკის განაწილება .....	86
პლუტონიუმი .....	151
პოგონი ნ. ....	81
პოგონის განტოლებები .....	81
პოლარული ციკლი .....	9, 179
პროტოპლანეტური დისკო .....	167
პტოლემე .....	11, 34
პულსარი .....	14, 19, 53, 168
PSR J1719-1438 .....	95
PSR1913+16 .....	32

## ქ

ქანგბადი .....	27, 85, 86, 94, 95, 166
----------------	-------------------------

## რ

რადიოაქტიური	
დაშლა .....	104
ქრონომეტრია .....	104
რადიოქიმიური ანალიზი .....	59
რაკეტა .....	20, 47, 171
Aerobee 150 .....	20
Ariane-5 .....	39
Atlas V .....	151
Delta II .....	117
Протон .....	55
რასელი ჰ. ....	90
რებერი გ. ....	18
რეკომინაცია .....	16, 112, 121
რელიქტური მიკროტალღური ფონი (CMB)	
..... 19, 23, 25, 32, 67, 112, 115, 116, 118, 119,	
121, 127, 131, 133, 137, 139, 145, 168	
პოლარიზაცია .....	116
სპექტრი .....	113, 130
ტემპერატურა .....	113
ფლუქტუაციები .....	114, 117, 122, 125, 126
რენდალი ლ. ....	146
რენიუმი .....	104
რენტგენი ვ. კ. ....	47

რენტგენულ-ემულსიური კამერა .....	181
რიისი ა. ....	133
რკინა .....	27, 46, 72, 85, 86, 93, 94, 105
როსი ბ. ....	47, 49
რუბიდიუმი .....	104

## ს

### სამყარო

ასაკი .....	29, 50, 101, 106, 121, 134, 167
აჩქარებული გაფართოება .....	122, 134
ბრტყელი .....	6, 106, 112, 118, 120, 131
გეოცენტრული მოდელი .....	10, 34
დაკვირვებადი .....	121
დასაწყისი .....	141
კიდე .....	54, 101
პარალელური .....	136, 140, 141, 144
რადიუსი .....	32, 101, 121
რეიონიზაცია .....	116
სამგანზომილებიანი რუკა .....	123, 124, 125
ტემპერატურა .....	5, 112, 120
ღია .....	113, 115
ჩაკეტილი .....	113, 115
ცხელი მოდელი .....	5, 19, 102, 112
ხილული ... 101, 119, 120, 121, 136, 137, 144	
ჰელიოცენტრული მოდელი .....	11, 34
ჰორიზონტი .....	118, 120, 137, 139

### სარკე

პარაბოლური .....	38, 40, 48, 49
სეგმენტური .....	38
ჰექსაგონური .....	38
ჰიპერბოლური .....	38, 48, 49

### სივრცე

ბრტყელი .....	106, 115, 120
სფერული .....	115
უნაგირისმაგვარი .....	115
სიკაშკაშე...28, 30, 80, 83, 85, 87, 90, 95, 98, 106,	
162	

სიმების თეორია .....	141, 145, 184
----------------------	---------------

### სიმკვრივე

ვარსკვლავთშორისი მატერიის .....	16
თეთრი ჯუჯების .....	95
კრიტიკული .....	113, 131
ნეიტრონული ვარსკვლავის .....	19
ფლუქტუაციები .....	122, 125, 126
სინათლის წელიწადი .....	96
სინგულარობა .....	119
სისტემა UVB .....	82
სიუნიავი რ. ....	130
სკალარული ველი .....	120
სკანდიუმი .....	164

სპექტროგრამა .....	87
სპექტროგრაფი .....	46, 47
UVES .....	104, 105
სპექტრომეტრი .....	14, 45, 51, 150
HIREGS .....	21
TGRS .....	53
სპექტროსკოპი .....	46
სპექტროპელიოსკოპი .....	164
სტანდარტული მოდელი	
ელემენტარულ ნაწილაკთა .....	62, 183, 184, 186
კოსმოლოგიური .....	112, 115, 120, 122, 123, 134
მზის .....	23, 58, 60
სტანდარტული შუქურა .....	106
სტეინჰარდტი პ. ....	145
სტრატოსფერო .....	9, 47
სტრიმერული კამერა .....	181
სტრონციუმი .....	104
სუნდრუმი რ. ....	146
სუპერსიმეტრია (SUSY) .....	126, 184
სფერულ ჰარმონიკებად დაშლა .....	114
სცინტილაციური დეტექტორები .....	48, 51, 60, 180

## ტ

ტალღის სიგრძე .....	8
U, B და V ფილტრების .....	82
გრავიტონის .....	76
დე-ბროილის .....	23
ინფრაწითელი .....	15
ოპტიკური .....	38, 81, 166
რადიოსიგნალის .....	18
რელიქტური მიკროტალღური ფონის .....	113
რენტგენის .....	47
ტელესკოპები ნეიტრინული	
AMANDA (ანტარქტიკა) .....	66
ANTARES (საფრანგეთი) .....	65
BNO (რუსეთი) .....	25, 59
BOREXINO (იტალია) .....	61
CHLORINE (აშშ) .....	61
Double Chooz (საფრანგეთი) .....	67
DUMAND (აშშ) .....	64
GALLEX (იტალია) .....	59
GNO (იტალია) .....	59, 61
ICARUS (იტალია) .....	61
IceCube (ანტარქტიკა) .....	63, 67
IMB (აშშ) .....	24
Kamiokande (იაპონია) .....	24, 25, 61
KamLAND (იაპონია) .....	67

LVD (იტალია) .....	25
MACRO (იტალია) .....	25
MINOS (აშშ) .....	67
NEMO (იტალია) .....	65
NESTOR (საბერძნეთი) .....	65
OPERA (იტალია) .....	67
SAGE (რუსეთი) .....	59, 61
SNO (კანადა) .....	25, 60, 61
T2K (იაპონია) .....	67
Байкал (რუსეთი) .....	64
KM3NeT (ევროპა) .....	65
ტელესკოპები სტაციონარული	
CBI (ჩილე) .....	116, 117
CFHT (აშშ) .....	192
E-ELT (ჩილე) .....	37, 193
GASP (სამხრეთ პოლუსი) .....	56
Gemini (აშშ და ჩილე) .....	15
Hale (აშშ) .....	37, 38
HET (აშშ) .....	192
JCMT (აშშ) .....	15
LBT (აშშ) .....	191
MOA (ახალი ზელანდია) .....	31
SALT სამხრეთ აფრიკა) .....	191
SOAR (ჩილე) .....	192
SPT (სამხრეთ პოლუსი) .....	133
V.M. Blanco (ჩილე) .....	192
VLT (ჩილე) .....	31, 37, 38, 104, 105, 128, 193
VST (ჩილე) .....	193
WHT (ესპანეთი) .....	47
TMT (აშშ) .....	37

ტელესკოპი	
აპერტურა .....	42
გარჩევისუნარიანობა .....	38, 41, 42
ეკვატორული დამონტაჟება .....	56
ეფექტურობა .....	36
ინფრაწითელი .....	14, 15
მგრძნობიარობა .....	41
მეზონური .....	177, 178
მენისკური .....	156, 160, 162
ნეიტრონული .....	178
ობიექტივი .....	35, 38
ოკულარი .....	35, 38
ოპტიკური .....	14, 35, 36, 38, 50, 57
რადიო .....	18, 40, 57, 98, 110, 133, 164
რენტგენული .....	49, 129
რეფლექტორი .....	12, 35, 36, 155, 156, 162
რეფრაქტორი .....	35, 156
სამზეო ჰორიზონტული .....	156
ფოტოსფერულ-ქრომოსფერული .....	156, 164

ტროპოსფერო.....	9, 166
ტუროკი ნ.....	145
ტყვია .....	48, 104, 185

## უ

უილსონი რ. ....	19, 112
ურანი .....	46, 102, 104, 105
ურთიერთქმედება	
გრავიტაციული.....	32, 39, 74, 93, 122, 127, 134, 141
ელექტრომაგნიტური .....	31, 146
სუსტი.....	31, 146
ძლიერი.....	31, 181, 183
უცნაური ნაწილაკები .....	180

## ფ

ფართო ატმოსფერულ ღვარი .	9, 26, 63, 67, 68, 72, 181
ფარული ენერგია ...	34, 106, 112, 115, 131, 133, 134, 167
ფარული მატერია.....	30, 34, 112, 115, 122, 126, 127, 128, 129, 131, 134, 146
ფერის ინდექსი .....	82, 87, 91
ფერმი-აირი .....	95
ფერმიონი .....	112, 183
ფლოუორესცენცია.....	26, 48, 68, 73
ფოკალური	
წერტილი .....	28
წრფე .....	28
ფორბუშის ეფექტი .....	იხ. ეფექტი ფორბუშის
ფოტოექსპოზიცია .....	81
ფოტომამრავლებელი .....	61, 65, 67, 71
ფოტომეტრი .....	85, 162
ფრიდმანი ჰ. ....	48
ფუნდამენტური მუდმივები .....	137, 140, 188

## ქ

ქლორი.....	59
ქრომატული აბერაცია .....	35

## შ

შავი სხეული .....	111, 113
გამოსხივება .....	იხ. გამოსხივება შავი სხეულის
სპექტრი .....	111, 113
შავი ხვრელი ...	19, 22, 30, 33, 48, 49, 52, 55, 73, 93, 95, 108, 141, 163, 169
აორთქლება .....	111
გამოსხივება ..	იხ. გამოსხივება ჰოუკინგის
ვარსკვლავური .....	108, 110
ზემასიური .....	29, 50, 108, 146

ინფორმაციის პარადოქსი.....	111
მოვლენათა ჰორიზონტი .....	110, 111
შეპლი ჰ. ....	84
შმიდტი ბ. ....	133

## ჩ

ჩანდრასეკარი ს. ....	49
----------------------	----

## ც

ცა	
ეკვატორი .....	79
ეკლიპტიკა .....	79
მერიდიანი .....	78
პოლუსი.....	79
ცეფეიდები .....	45, 83, 98
გრძელპერიოდიანი .....	157, 166
ცვიკი ფ.....	127

## წ

წითელი წანაცვლება..	16, 29, 44, 46, 55, 85, 99, 100, 102, 106, 121, 123, 124, 132, 133
წყალბადი .....	27, 46, 85, 86, 92, 93, 94, 95, 100, 102, 105, 110, 120, 130, 148, 160, 164, 172, 179, 185
წყალი	
ზესუფთა .....	60
მძიმე .....	60

## ჯ

ჯიაკონი რ. ....	20, 47, 49
-----------------	------------

## ჰ

ჰაბლი ე. ....	135, 144
ჰაბლის	
მუდმივა .....	29, 30, 101, 102, 106, 107
სფერო .....	122
ჰალეი ე. ....	13
ჰარტლი ჯ.....	142
ჰელიუმი.....	26, 46, 59, 86, 92, 93, 95, 102, 120, 148, 179
ჰერშელი უ. ....	14
ჰერცშპრუნგი ე. ....	90, 92
ჰერცშპრუნგ-რასელის დიაგრამა.....	90, 91, 92, 93, 95
ჰიგსი პ. ....	186
ჰიპარქე ნიკეელი .....	80
ჰიპარქოსის მონაცემთა ბაზა .....	163
ჰიუგენსი ქ.....	147
ჰილიში ე. ....	19
ჰოუკინგი ს. ....	111, 142