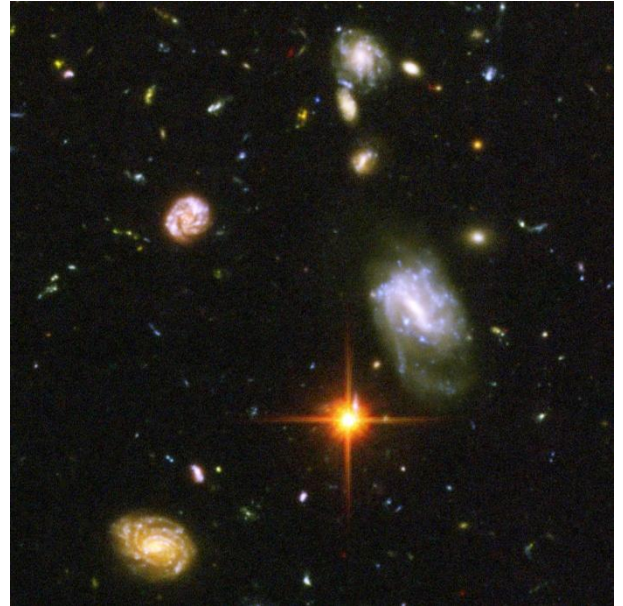


თანამედროვე და მოწინავე ტელესკოპებით დამის ცის დაკვირვებებმა ცხადყო, რომ სამყარო წარმოუდგენლად დიდი რაოდენობის გალაქტიკებს მოიცავს. ეს თვალწარმტაცი ობიექტები, ათასობით სინათლის წლის რადიუსით და მილიარდობით ვარსკვლავისგან შემდგარნი, ციურ სხეულთა შორის ერთ-ერთ ყველაზე ამაღელვებელ და ლამაზ სანახაობას წარმოადგენენ. თუმცა, გალაქტიკებს ასევე აქვთ „ბნელი მხარე“: უკანასკნელი ათწლეულების კვლევებმა და დაკვირვებებმა გამოავლინეს, რომ პრაქტიკულად ყველა დიდ გალაქტიკაში, ჩვენი ირმის ნახტომის ჩათვლით, ბინადრობენ ეგზოტიკური ობიექტები, რომელთაც ზემასიური შავი ხვრელები ეწოდებათ.

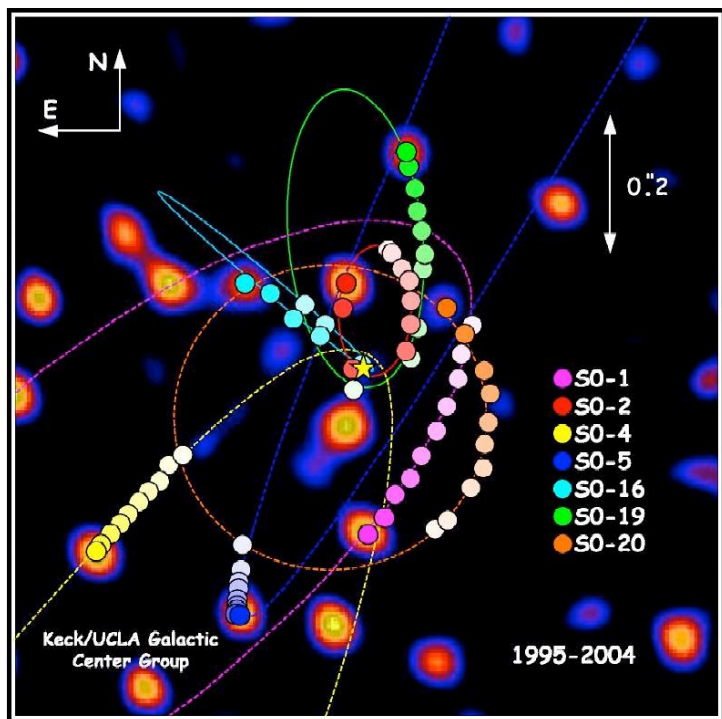
ალბათ ყველაზე მარტივი და ინტუიციური დახასიათება შავი ხვრელის არის მისი წარმოდგენა, როგორც ობიექტის იმდენად ძლიერი გრავიტაციული მიზიდულობით, რომ სინათლესაც კი არ შეუძლია მისგან თავის დაღწევა. აქ რა თქმა უნდა იგულისხმება ე.წ. მოვლენათა ჰორიზონტი, რომლის გადაკვეთის შემდეგ უკან დაბრუნება შეუძლებელია.

თუ შავი ხვრელები არ ასხივებენ, მაშინ ჩნდება კითხვა თუ როგორ ვაკვირდებით მათ ან საიდან ვიცით მათი არსებობის შესახებ. მიუხედავად იმისა რომ შავი ხვრელების დაკვირვება პირდაპირ შეუძლებელია, ჩვენ შეგვიძლია დავაკვირდეთ შავი ხვრელის მძლავრ გრავიტაციულ ზემოქმედებას მის გარშემო არსებულ მატერიასა თუ გაზზე. ასეთი ტიპის დაკვირვებებმა აჩვენა, რომ არსებობენ შავი ხვრელების ორი კლასი. ერთნი გაცილებით მცირე ზომის, რომელთა მასა არ აღემატება რამდენიმე ათეულ მზის მასას. მათი დაკვირვება შესაძლებელია ბინარულ სისტემებში, სადაც ერთი ობიექტი შავი ხვრელია მეორე კი ვარსკვლავი, რომელსაც წყალბადის მარაგი ამოწურული აქვს და წითელ გიგანტად გადაქცევის პროცესში მისი მასის გარკვეული ნაწილის მიზიდვით შავი ხვრელის გარშემო წარმოიქმნება აკრეციის დისკი. კომპანიონი ვარსკვლავის მატერია ხახუნის შედეგად მილიონობით გრადუს ტემპერატურამდე ცხელდება და ასხივებს ელექტრომაგნიტურ რადიაციას, ძირითადად რენტგენულ სპექტრში, რომლის დაკვირვებაც შესაძლებელია.

მეორე კლასს მიეკუთვნებიან გაცილებით მასიური შავი ხვრელები, რამდენიმე მილიონიდან რამდენიმე მილიარდამდე მზის მასით და გვხვდებიან გალაქტიკის ცენტრებში. მათ ზემასიური შავი ხვრელები ეწოდებათ. ერთერთი ასეთი ობიექტი ჩვენს გალაქტიკის ცენტრშიც იმყოფება, Sagittarius A*. მასზე დაკვირვება წლების განმავლობაში მიმდინარეობდა. უფრო კონკრეტულად კი ის წარმოადგენდა რადიო სიხშირის წყაროს. იფრაწითელ დიაპაზონში დაკვირვების შედეგად გამოვლინდა ვარსკვლავების გარკვეული ჯგუფი, რომლებიც ბრუნავენ ამ რადიო წყაროს მდებარეობის გარშემო. ვარსკვლავთა



Hubble deep field: წითელი კაშკაშა ობიექტი ვარსკვლავია. დანარჩენი ყველა წერტილი გალაქტიკა



ორბიტების გამოთვლებმა მისცა მეცნიერებს საშუალება, რომ დაედგინათ ცენტრალური ობიექტის მასა. ის დაახლოებით ოთხ მილიონჯერ უფრო მასიურია მზეზე.

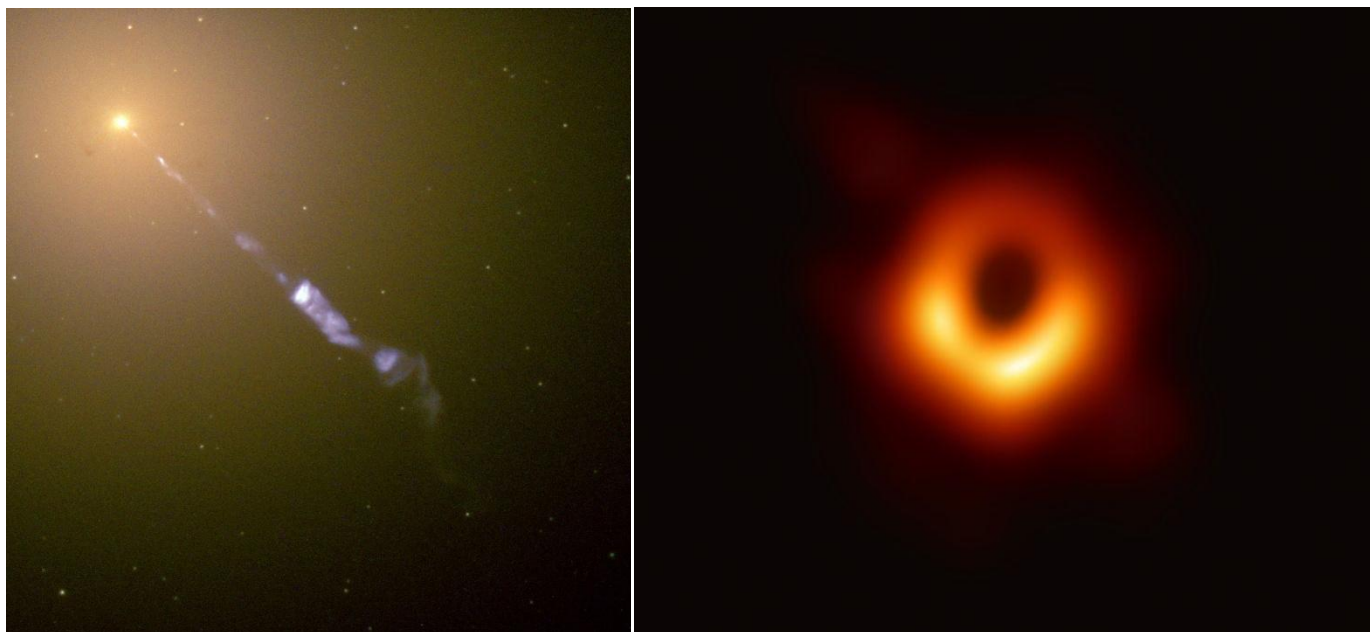
(სურ 2)

სურ 2:

წლების განმავლობაში გაზომილი ვარსკვლავების პოზიციები, მოცემული ფერადი წერტილებით, რომელთა ექსტრაპოლირებით ნაჩვენებია მათი ტრაექტორიები. ვარსკვლავთა ორბიტების ზომები ათობით სინათლის დღისაა.

დღეს უკვე გვაქვს ზემასიური შავი ხვრელის პირდაპირი სურათიც,

რომლის გარჩევადობა იმდენად დიდია, რომ მისი აკრეციის დისკის დანახვაა შესაძლებელი. პირველი შავი ხვრელი, რომლის სურათიც 2019 წლის 11 აპრილს გამოქვეყნდა, მდებარეობს M87 ელიფსური გალაქტიკის ცენტრში. (სურ 3)

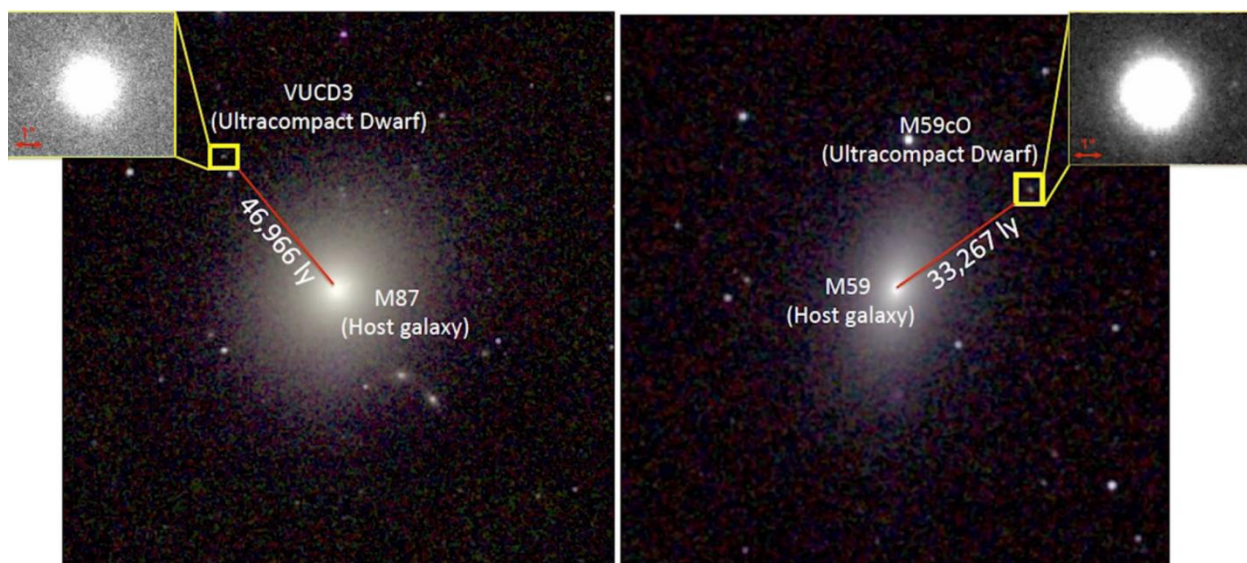


სურ 3:

მარცხნივ M87 გალაქტიკა, ჰაბლის ტელესკოპის სურათი. მარჯვნივ M87 გალაქტიკის ცენტრში არსებული ზემასიური შავი ხვრელის რადიო სიხშირულ დიაპაზონში გადაღებული სურათი. კაშკაშა არე წარმოადგენს აკრეციის დისკს.

ზემასიური შავი ხვრელების ფორმირება

ზემასიური შავი ხვრელების წარმოშობის დეტალები ბოლომდე დადგენილი არ არის, თუმცა ასტროფიზიკოსები თანხმდებიან, რომ მას შემდეგ რაც შავი ხვრელი აღმოჩნდება გალაქტიკის ცენტრში, ის იზრდება ერთი მხრივ იმ მატერიის ხარჯზე, რომელიც მის აკრეციის დისკში იმყოფება და მეორეს მხრივ სხვა შავ ხვრელებთან შერწყმის შედეგად. ამასთან არსებობს რამდენიმე ჰიპოთეზა პირველადი შავი ხვრელების წარმოქმნის მექანიზმთან დაკავშირებით. ყველაზე ფართოდ აღიარებული და გავრცელებული მოდელის თანახმად, პირველი თაობის ვარსკვლავები შედგებოდნენ მხოლოდ წყალბადისა და ჰელიუმისგან და იყვნენ გაცილებით მასიურნი დღევანდელ ვარსკვლავებთან შედარებით. შედეგად მათი სიცოცხლის ხანგრძლივობა ძალიან მცირე იყო. პირველადი შავი ხვრელები წარმოიქმნენ სწორედ ასეთი, მზეზე რამდენიმე ათეულჯერ უფრო მასიურ ვარსკვლავების კოლაფსის შედეგად. შემდეგ ისინი იზრდებოდნენ აკრეციის დისკისა და სხვა შავ ხვრელებთან შერწყმის შედეგად. ამასთან მიჩნეულია, რომ ზემასიური შავი ხვრელების მისაღებად აკრეციის დისკის წვლილი უმნიშვნელოა და ძირითადი წყარო მათი წარმოქმნის ხშირი შერწყმის პროცესები უნდა ყოფილიყო. ამ მოსაზრებას ამტკიცებს იუტას უნივერსიტეტის ასტრონომების მიერ 2017 წელს აღმოჩენილი ორი მცირე ზომის, ე.წ. ულტრაკომპაქტური გალაქტიკა, შავი ხვრელებით რომელთა მასები 4,5 ჯერ და 5,8 ჯერ აღემატება მზის მასას (სურ 4). მნიშვნელოვანი ის არის, რომ პროცენტულად ისინი მტელი გალაქტიკის მასის 13% და 18% შეადგენენ შესაბამისად. შედარებისთვის, ჩვენი გალაქტიკის ცენტრში არსებული შავი ხვრელის მასაც თითქმის ანალოგიურია, თუმცა ის მხოლოდ 0,01% წარმოადგენს გალაქტიკის მთელი მასის.



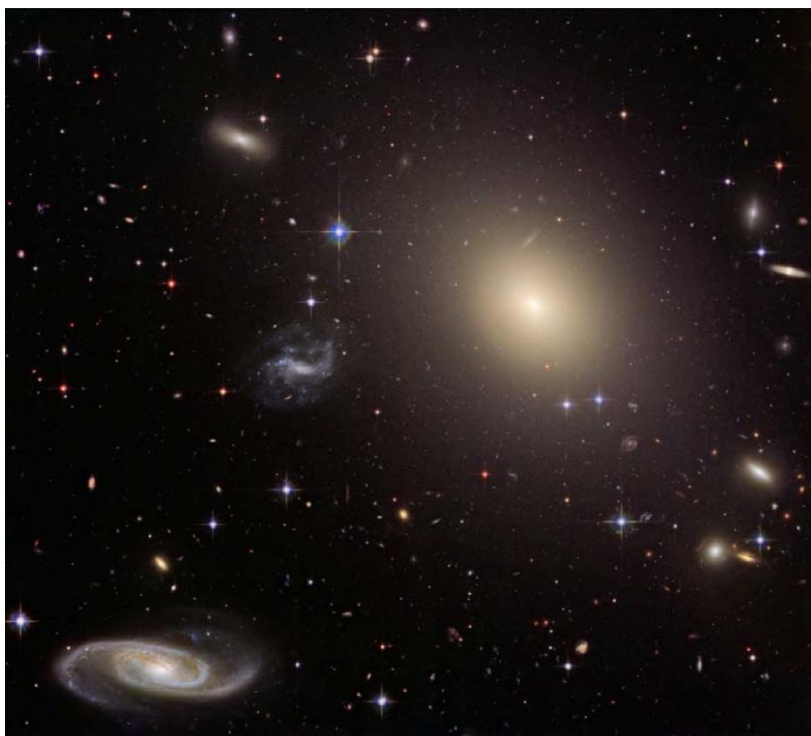
სურ 4:

იუტას უნივერსიტეტის ასტრონომების მიერ
აღმოჩენილი ულტრა კომპაქტური გალაქტიკები

მოსაზრება იმაში მდგომარეობს, რომ ამ გალაქტიკების არსებობის ადრეულ პერიოდში მათ ხშირი შეჯახებები უნდა განეცადათ სხვა გალაქტიკებთან, რის შედეგადაც მათი ვარსკვლავების დიდი ნაწილი განიბნეოდა სივრცეში. ისინი წარმოადგენენ „მსხვერპლს“ სამყაროს იმ ადრეული პერიოდისა, რომლის დროსაც გალაქტიკათა შერწყმები ხშირი მოვლენა იყო.

გალაქტიკების ფორმირება

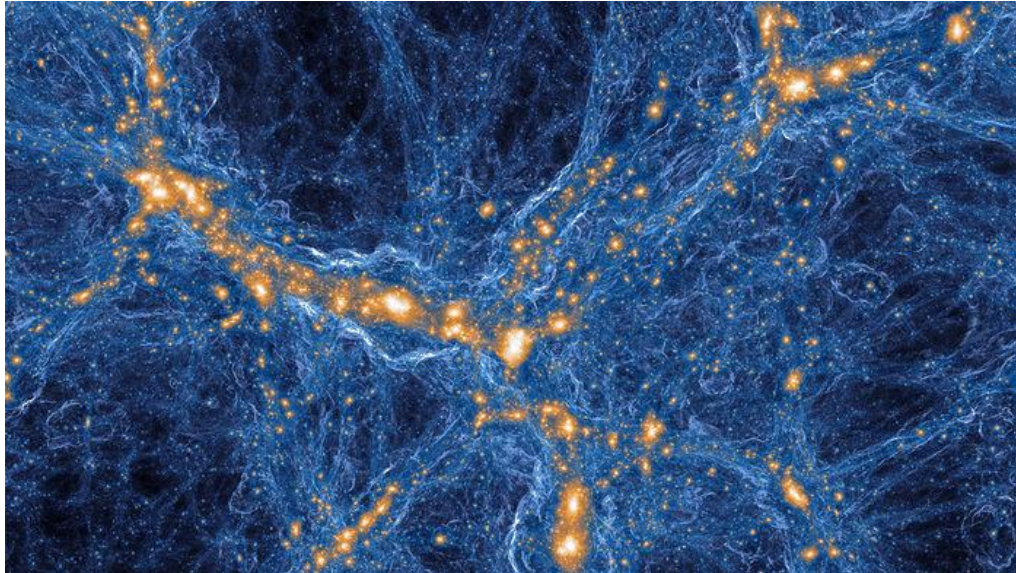
გალაქტიკები შეიძლება უხეშად დაიყოს ორ ძირითად ტიპად: სპირალური (disk-dominated) და ელიფსური (bulge-dominated). დისკისებრ გალაქტიკებს აქვთ ვარსკვლავთა სიმკვრივეში მბრუნავი განაწილება და ხშირად სპირალური სტრუქტურა, მსგავსად ჩვენი ირმის ნახტომისა. ამასთან მათში მიმდინარეობს ინტენსიური ვარსკვლავთ ფორმირება. ვარსკვლავების შექმნის ეს აქტიური პროცესი ანიჭებს ასეთი ტიპის გალაქტიკებს დამახასიათებელ მოლურჯო ფერს. მათგან წამოსული სინათლის უდიდესი ნაწილი მოდის მცირე რაოდენობის მასიურ, კაშკაშა და ცხელ ვარსკვლავებზე, რომლებიც ანათებენ ინტენსიურად სანამ ბირთვებში არ გამოეღვავათ „საწვავი“ და გადაიქცევიან ზეახალ ვარსკვლავებად.



მათგან განსხვავებით, ელიფსური (bulge-dominated) გალაქტიკები არიან უფრო მასიურნი, ხასითდებიან მცირე ბრუნვით დიდ მამუტებში და მოწითალო შეფერილობით, რაც ვარსკვლავთ ფორმირების დაბალი ინტენსიობის მანიშნებელია.

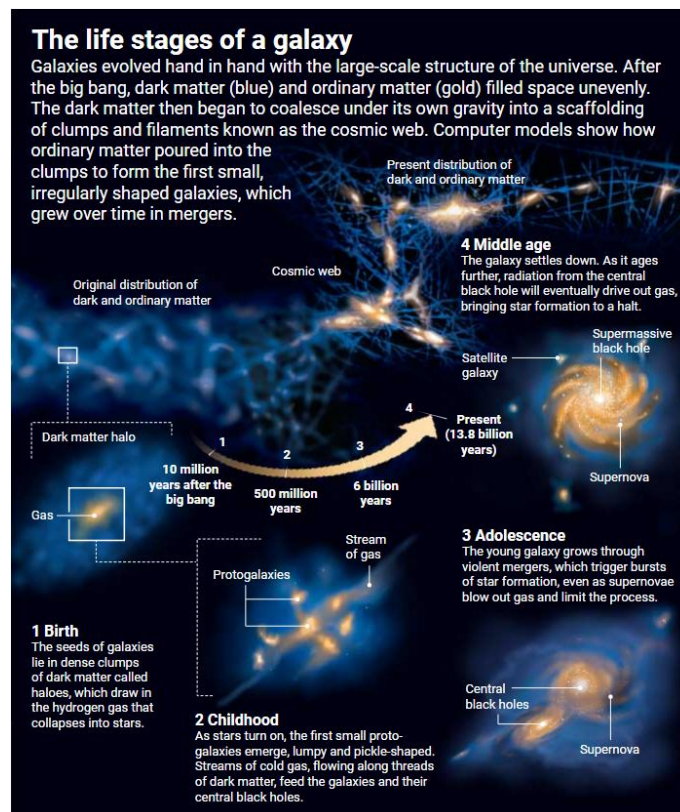
ცნობილია, რომ სამყაროში მასის უდიდესი ნაწილი წარმოდგენილია ბნელი მატერიის სახით, რომლისთვისაც ურთიერთმედების ერთადერთი მექანიზმი არის გრავიტაცია. სამყაროს საწყის ეტაპებზე, მცირე ზომის და დიდი სიმკვრივის არეები კოლაფსირდნენ გრავიტაციის გავლენით, რის შედეგადაც ჩამოყალიბდნენ ბნელი მატერიის ჰალოები. ეს ჰალოები იზრებოდნენ და ხდებოდნენ ძალზედ მასიურნი დროთა განმავლობაში, და საბოლოოდ განაწილდნენ ძაფისებრ (filamentary) სტრუქტურაში, რომელიც კოსმოსური ქსელის (cosmic web) სახელით არის ცნობილი (სურ 5). სწორედ ამ ბნელი მატერიის ჰალოებში ჩამოყალიბდნენ და გაიზარდნენ გალაქტიკები, როდესაც ჩვეულებრივი მატერია (ძირითადად წყალბადის და ჰელიუმის გაზი) გაცივდა და ბნელი მატერიის გრავიტაციული

მიზიდვის ხარჯზე ჰალოს ცენტრში მოიყარა თავი. საბოლოოდ, გაზი გახდა საკმარისად ცივი და მკვრივი, რათა მისი ფრაგმენტაციითა და კოლაფსით პირველი ვარსკვლავების წარმოქმნის ხელსაყრელი გარემო შექმნილიყო. საწყის ეტაპზე, ახალგაზრდა გალაქტიკა გაციებული გაზის იმპულსის მომენტის შენახვის გამო დისკისებრი სტრუქტურისკენ

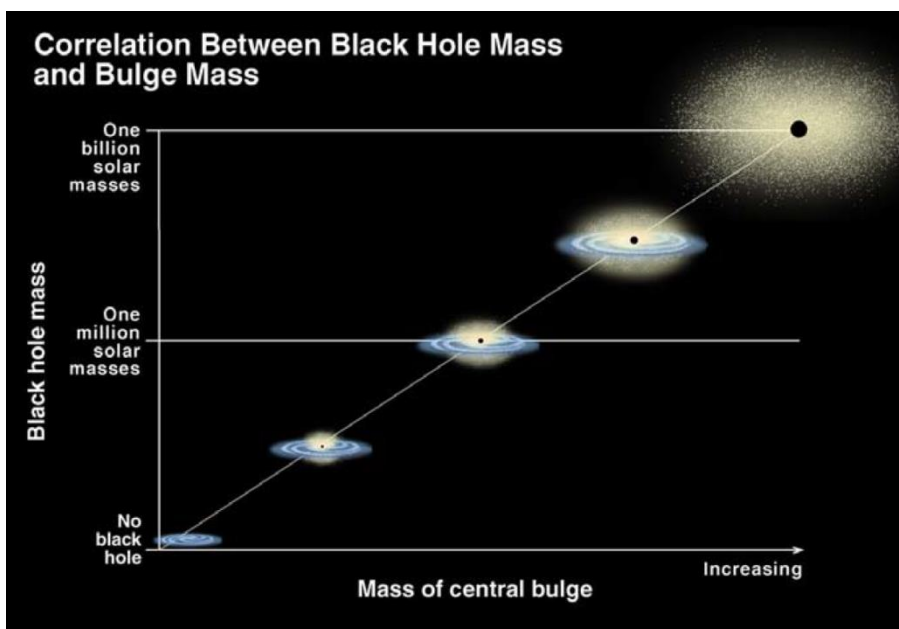


სურ 5: Filamentary structure distribution of dark matter halos known as the cosmic web

მიისწრაფის და განაგრძობს ზრდას კოსმოსური ქსელიდან (cosmic web) მატერიის „მომარაგების“ გზით. შემდგომი ზრდა ხორციელდება დაჯახებების შედეგად, ორი ან მეტი გალაქტიკის შეერწყმით, რითაც ერთი, უფრო დიდი ზომის გალაქტიკა მიიღება. დისკისებური გალაქტიკების შეერწყმის პროცესში ვარსკვლავთა ორბიტები ირევა და შემთხვევითი ხდება, რაც ნავარაუდებია, რომ წარმოადგენს უმეტესი გალაქტიკების ბალჯების (bulges) წარმოშობის მექანიზმს.



იმის გათვალისწინებით რომ შავი ხვრელების ფორმირება მსგავსად გალაქტიკის ბალჯის ფორმირებისა, გალაქტიკების შერწყმით ხასიათდება, გარკვეული კორელაცია შეიძლება დაიმზიებოდეს ამ ორ მოვლენას შორის. ახალმა კვლევებმა აჩვენეს, რომ კორელაცია დიდი ზემასიური შავი ხვრელების მასებსა და გალაქტიკების ბალჯების თვისებებს შორის, და არა მთელს გალაქტიკასთან (სურ 6). ეს დამოკიდებულება მიუთითებს მჭიდრო კავშირისაკენ შავი ხვრელების ზრდასა და გალაქტიკის განვითარებასა და სტრუქტურას შორის.



სურ 6:

შავი ხვრელის მასისა და გალაქტიკის ბალჯის მასის კორელაციის დიაგრამა. გალაქტიკები, რომელნიც უფრო მასიურნი არიან და გააჩნიათ დიდი ზომის ბალჯები შეიცავენ უფრო მასიურ შავ ხვრელებს.

შავი ხვრელების როლი

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, ელიფსური გალაქტიკები მიუხედავად მათი გაცილებით დიდი მასისა სპირალურ გალაქტიკებთან შედარებით, გამოირჩევიან წითელი შეფერილობით, რაც ახალი ვარსკვლავების შექმნის სიმცირისკენ მიუთითებს. დიდი ხნის განმავლობაში ეს ფაქტი ასტრონომებისთვის წარმოადგენდა საიდუმლოს. ყველა თანხმდებოდა, რომ რაც უფრო მასიურია გალაქტიკა მით მეტი მატერია უნდა მიიზიდოს კოსმოსური ქსელიდან (cosmic web) მათივე უზარმაზარ ბნელი მატერიის ჰალოებში. დროთა განმავლობაში გაზი უნდა გაცივდეს და წარმოქმნას ახალი ვარსკვლავები. ამიტომ მოლოდინი იყო, რომ მასიური ელიფსური გალაქტიკები უნდა ხასითდებოდნენ ინტენსიური ვარსკვლავთ ფორმირებით და თვალისმომჭრელი მოლურჯო შეფერილობით, რაც საუცხოო წინააღმდეგობაში მოდიოდა დაკვირვებებთან. ისინი მხოლოდ მოწითალო და პრაქტიკულად „მკვდარ“ ელიფსურ გალაქტიკებს ხედავდნენ. ვარსკვლავების წარმოშობისა და ჰიდროდინამიკის ნორმალური პროცესებით შეუძლებელი იყო ახსნილიყო თუ რა უშლიდა ხელს გაზის გაცივების ამ პროცესს. ეს კი სერიოზულ დილემას წარმოადგენდა გალაქტიკის ფორმირების თეორიათათვის.

ამ პრობლემის გადაწყვეტას საკმაოდ მოულოდნელი წყარო აღმოაჩნდა. ვიცით, რომ ყოველ მასიურ, ელიფსურ გალაქტიკას ცენტრში აქვს ზემასიური შავი ხვრელი, რომელიც აკრეციის დისკის მეშვეობით აგროვებს მასას. ასევე ცნობილია, რომ აკრეციის ამ პროცესს შეიძლება თანს სდევდეს უზარმაზარი ენერგიის გამონთავისუფლება. ჰიდროდინამიკურმა სიმულაციებმა აჩვენეს, რომ აქტიური შავი ხვრელების მიერ წარმოქმნილი ენერგიის ეს უზარმაზარი ნაკადები საკმარისია, რათა პრაქტიკულად სრულად გამოდევნოს გაზი გალაქტიკიდან და ამით მოკლას ვარსკვლავთ ფორმირების პროცესი, ან გააცხელოს გარემომცველი გაზი და შესაბამისად ხელი შეუშალოს მის გაციებასა და საბოლოოდ ვარსკვლავების წარმოქმნას. რიგ შემთხვევებში ამ პროცესების პირდაპირი დამზერაც მოხერხდა, როდესაც ზრდადი შავი ხვრელების აქტივობის შედეგად წარმოიქმნება გაზისგან გათავისუფლებული ჯიბეები (სურ 7). მიჩნეულია, რომ გალაქტიკის ევოლუციის სრულფასოვანი აღწერისთვის, აუცილებელია მათი ცენტრალური შავი ხვრელების აქტივობის და გამოყოფილი ენერგიების გათვალისწინება.



სურ 7:

X-ray and radio images of the massive galaxy cluster Hydra A, showing how energy released from black hole jets can profoundly affect the gaseous atmospheres around galaxies. The outer diffuse emission (in blue in the color version) is Chandra X-Ray Observatory data showing X-rays from the hot atmosphere in the cluster, thus tracing the distribution of the gas. Clearly, the radio emitting black hole jets (show in pink in the color version) are evacuating huge bubbles in the gas atmosphere. The strong interaction between the jet and the gas transfers energy from the black hole to the much larger atmosphere, keeping the gas hot and stopping gas from cooling to form new stars in the central galaxy