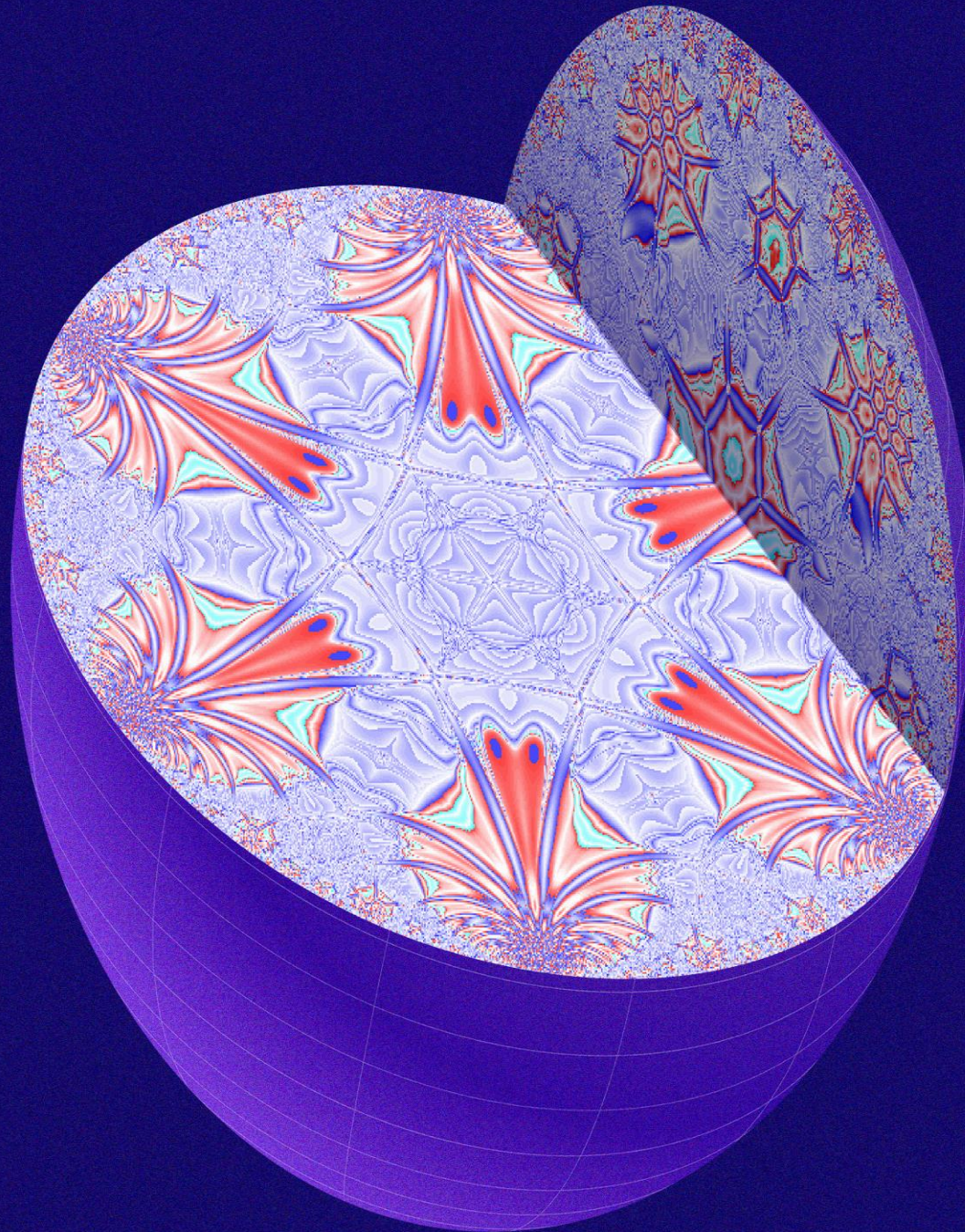


# ჰოლოგრაფიული პრინციპი

1. თეორიის საწყისები
2. სამყაროს გეომეტრია
3. ჰოლოგრაფიული  
სამყარო





# თეორიის საწყისები

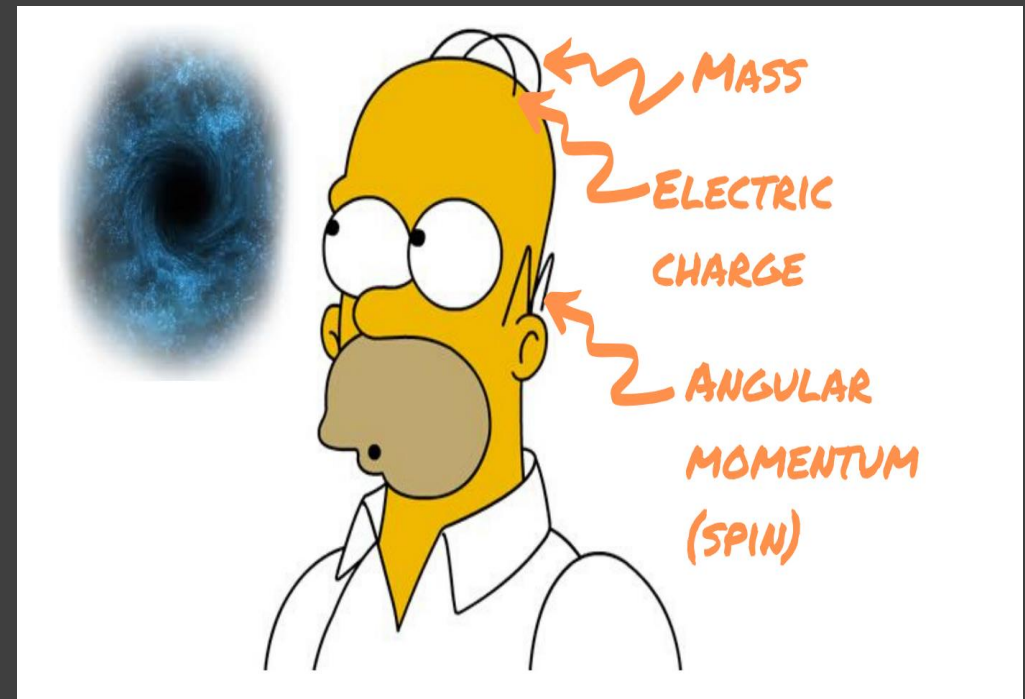
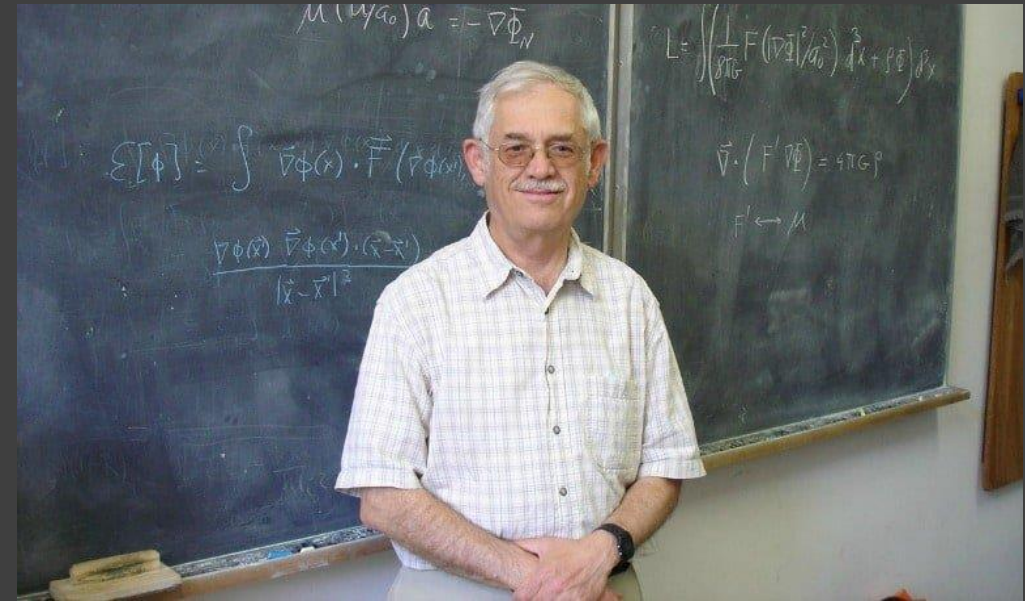


# No-hair theorem

1972 წელს **Jacob Bekenstein**-მა წამოაყენა **No-hair theorem** ამ თეორიის მიხედვით, მოვლენათა ჰორიზონტის გარეთ მყოფი დამკვირვებლისათვის შავი ხვრელი შეიძლება დახასიათდეს მხოლოდ სამი პარამეტრით ესენია :

- **M** - მასა
- **Q** - ელექტრული მუხტი
- **L** - კუთხური მომენტი / სპინი

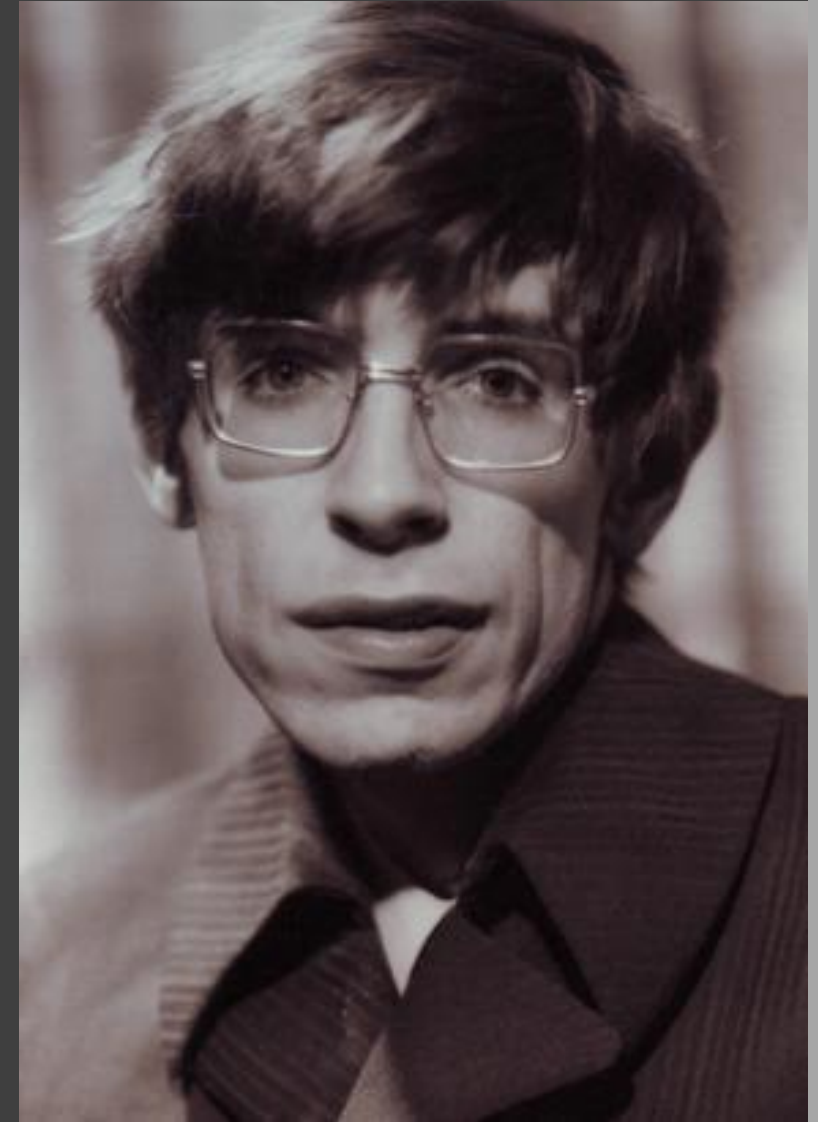
ხოლო ყველა დანარჩენი ინფორმაცია კი (მაგალითად ბარიონული და ლეპტონური რიცხვები) შავი ხვრელის მოვლენათა ჰორიზონტის გადაკვეთის შემდეგ გარე დამკვირვებელთათვის „ქრება“.



# No-hair theorem, Conservation of quantum information და Hawking radiation

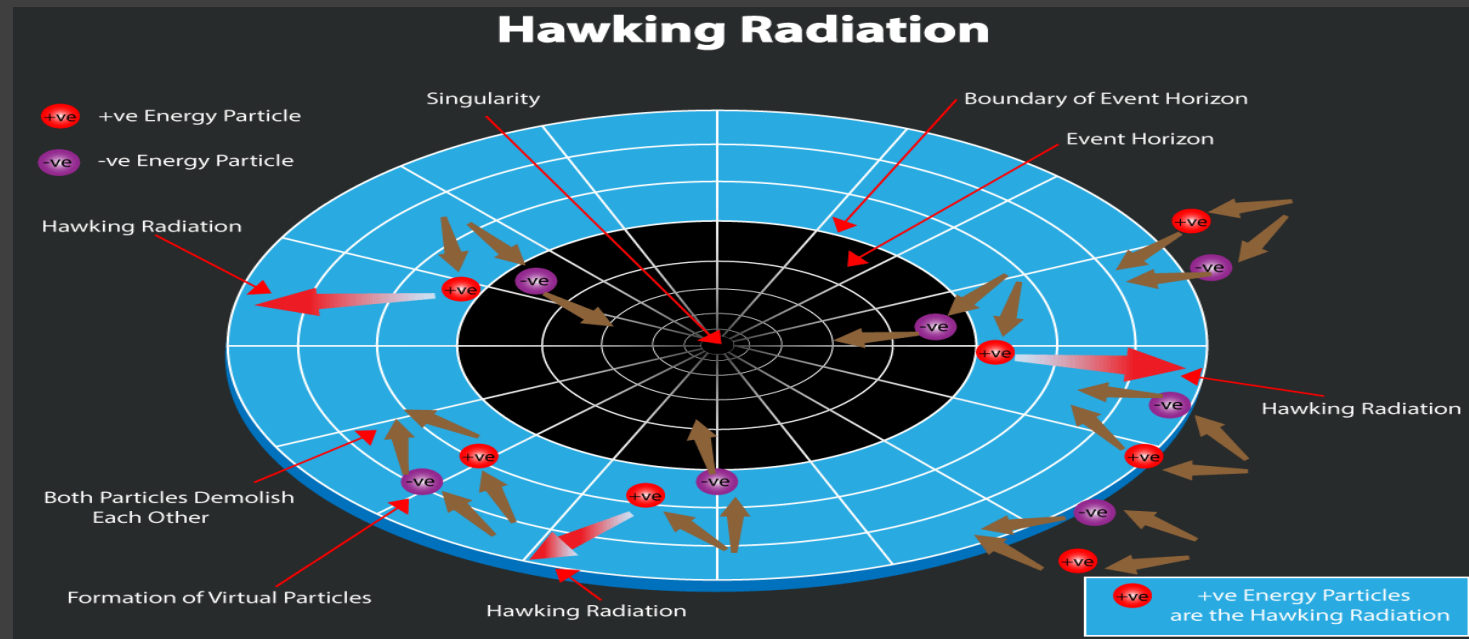
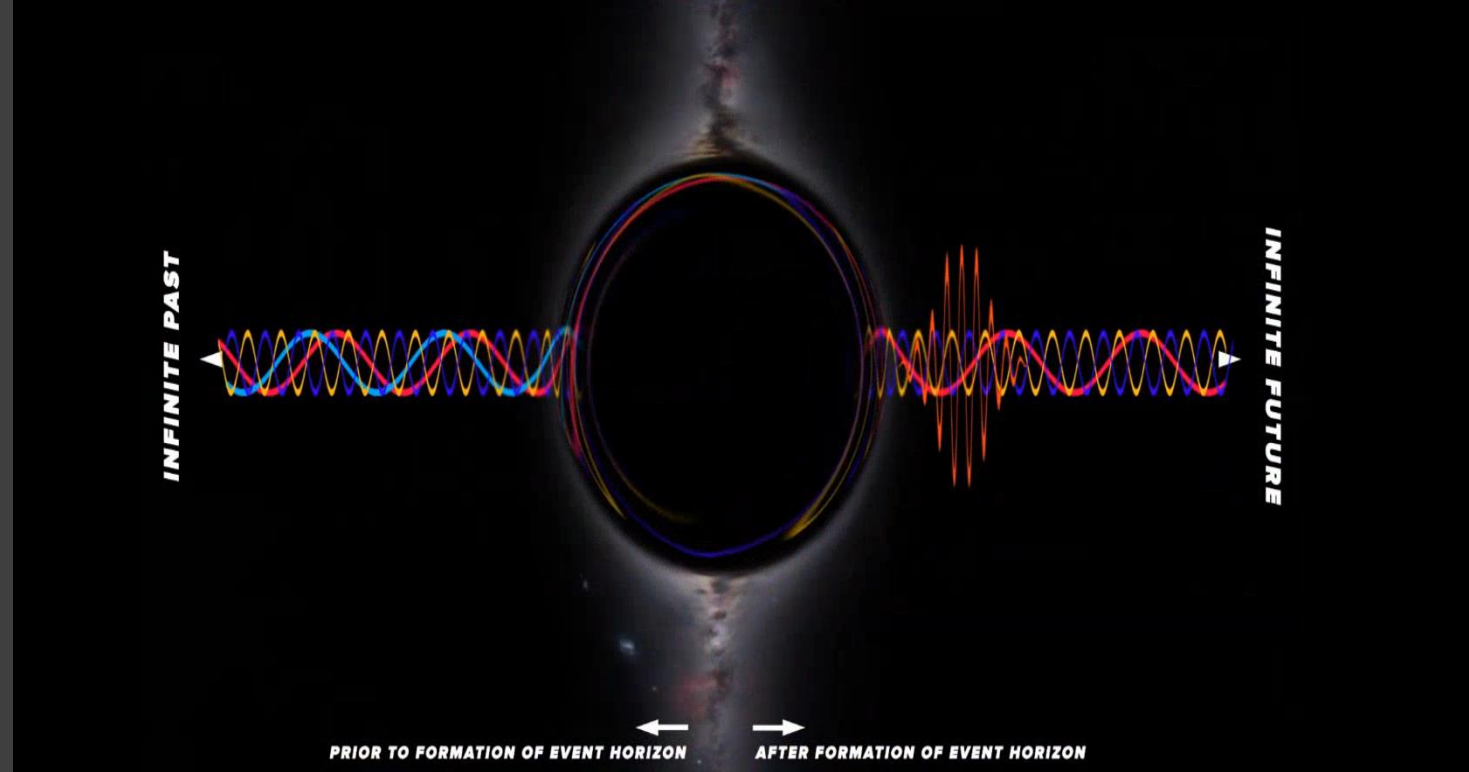
ერთი შეხედვით შეიძლება მოგვეჩვენოს, რომ **No-hair theorem** ეწინააღმდეგება კვანტური ინფორმაციის შენახვის კანონს, მაგრამ იმის მიუხედავად, რომ ჩვენ, როგორც შავი ხვრელის მოვლენათა ჰორიზონტის გარეთ მყოფი დამკვირვებლები, ვერ ვხედავთ თუ რა ინფორმაცია „ჩაყლაპა“ შავმა ხვრელმა ეს კვანტური ინფორმაცია შავი ხვრელის შიგნით მაინც იარსებებს.

პრობლემა თავს იჩვენებს თუ ჩვენ შემოვიტანთ ჰოკინგის რადიაციას, რომლის მეშვეობითაც შავი ხვრელი „ორთქლდება“ სრულიად შემთხვევითი ბუნების მქონე რადიაციის მეშვეობით. ეს გამოსხივებული რადიაცია კი არ უნდა შეიცავდეს არანაირ ორიგინალურ (შავ ხვრელში არსებულ) ინფორმაციას.



# Hawking radiation

მოსალოდნელია, რომ შავი ხვრელის გრავიტაციულმა ველმა გარშემო არსებული კვანტური ველების „დისტორცია“ უნდა მოახდინოს, ამ „დისტორციის“ შედეგად კი „ჩანს“, რომ ნაწილაკები გამოედებინებიან შავი ხვრელიდან. ნაწილაკების შესაქმნელად საჭირო ენერგია კი უნდა მოდიოდეს შავი ხვრელის მასიდან.





## Hawking radiation და Information paradox

ჰოკინგის გამოთვლების მიხედვით კი შავი ხვრელის გამოსხივება უნდა გავდეს შავი სხეულის თერმულ გამოსხივებას

მისი დაშვებით შავმა ხვრელებმა ისე უნდა გამოასხივოს როგორც **T ტემპერატურის** მქონე შავმა სხეულმა

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi G k_B M} \approx 1.2 \times 10^{23} \text{K} \times \frac{1 \text{ kg}}{M} = 6 \times 10^{-8} \text{K} \times \frac{M_\odot}{M}$$

ხოლო რადგანაც გამოსხივების სპექტრი ტემპერატურაზეა დამოკიდებული, ხოლო ტემპერატურა მასის უკუპროპორციული სიდიდეა, გამოდის, რომ შავი ხვრელის მასა უნდა იყოს ერთადერთი რამ რაც განსაზღვრავს მისი რადიაციის ბუნებას. ანუ ჰოკინგის რადიაცია არ არის დამოკიდებული იმაზე თუ რისგან არის შემდგარი შავი ხვრელი.

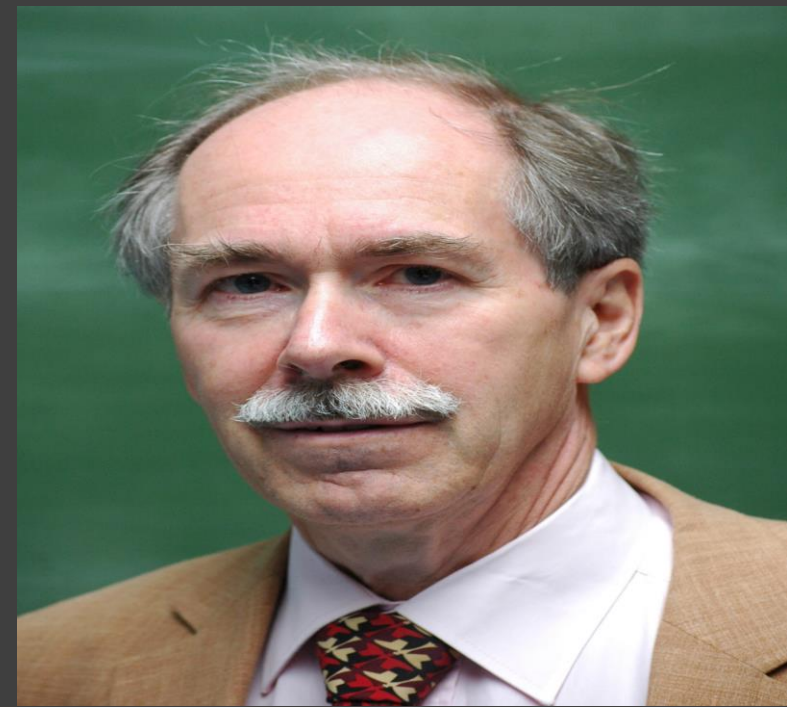
როგორც უკვე ვნახეთ შავი ხვრელის მიერ გამოსხივებულ ნაწილაკებს არავითარი ინფორმაცია არ გადააქვთ, დროთა განმავლობაში კი ჰოკინგის რადიაციის შედეგად შავი ხვრელი მთლიანად აორთქლდება და მასში თავდაპირველად არსებული ინფორმაცია გაქრება. ამ ყოველივეს კი მივყავართ ინფორმაციულ პარადოქსამდე.

## ინფორმაციული პარადოქსის „გადაჭრა“

**Gerard 't Hooft**-ის იდეის მიხედვით, გარე დამკვირვებლისათვის შავ ხვრელში „ჩავარდნილი“ ინფორმაცია, გრავიტაციული დროის შენელების გამო (Gravitational time dilation), თავის იყრის შავი ხვრელის მოვლენათა ჰორიზონტზე და მისი „დეფორმაციის“ (გრავიტაციული ველის გამო) წყალობით ზეგავლენას ახდენს ჰოკინგის რადიაციაზე.

Gerard 't Hooft-ის მოსაზრებით შავი ხვრელის 3 განზომილებანი გრავიტაციული და კვანტურ მექანიკური ინტერიერი შეიძლება სრულად იქნას აღწერილი ურთიერთქმედებებით 2 განზომილებიდან ზედაპირზე.

მოგვიანებით კი Gerard 't Hooft-მა და Leonard Susskind-მა ექსტრაპოლაცია მოახდინეს ზემოთხსენებული თეორიის და წამოაყენეს მოსაზრება, რომ **ნებისმიერი სივრცის შესახებ სრული ინფორმაცია თავმოყრილია ამავე სივრცის შემომსაზღვრელ ზედაპირზე.**



# Black hole entropy

Jacob Bekenstein-მა წამოაყენა მოსაზრება, რომ შავ ხვრელებს გააჩნიათ კონკრეტულ სივრცეში არსებული ენტროპიის შესაძლო მაქსიმალური მნიშვნელობა.

თუ გვაქვს R რადიუსის სფეროში მოთავსებული გაზი, მისი ენერგიის გაზრდით შეგვიძლია გავზარდოთ ამ გაზის ენტროპია, ჩვენ ეს პროცესი შეგვიძლია გავაგრძელოთ იქამდე სანამ არ მივაღწევთ ენერგიის კრიტიკულ ზღვარს და გაზი კოლაფსირდება შავ ხვრელად.

Bekenstein-მა სწორედ ამ მოსაზრების გამოყენებით დაითვალა კონკრეტულ სივრცის რეგიონში არსებული შესაძლო მაქსიმალური ენტროპიის რაოდენობა (Bekenstein bound) და დაასკვნა რომ სივრცის მაქსიმალური, ანუ შავი ხვრელის, ენტროპია პროპორციულია მოვლენათა ჰორიზონტის ფართობის.

მისი გამოთვლებით კი პრორუსულობის კოეფიციენტი ენტროპიასა და ზედაპირის ფართობს შორის იყო  $\frac{\ln(2)}{0.8\pi} \approx 0.276$  ენტროპიას კი ქონდა შემდეგი სახე:

$$S_B = \frac{\ln(2) K_B c^3}{0.8\pi \hbar G} A$$



# Black hole entropy

Bekenstein - ის თეორიიდან ერთი წლის შემდეგ კი 1974 წელს სტივენ ჰოკინგმა, ჰოკინგის რადიაციისა და ენტროპიის თერმოდინამიკური განმარტების მეშვეობით დამოუკიდებლად მიიღო შავი ხვრელის ენტროპიის ფართობზე დამოკიდებულება:

$$dS = \frac{dE}{T}$$

$$R = \frac{2GM}{c^2}$$

$$A = 4\pi R^2 = \frac{16\pi G^2 M^2}{c^4}$$

$$l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$$

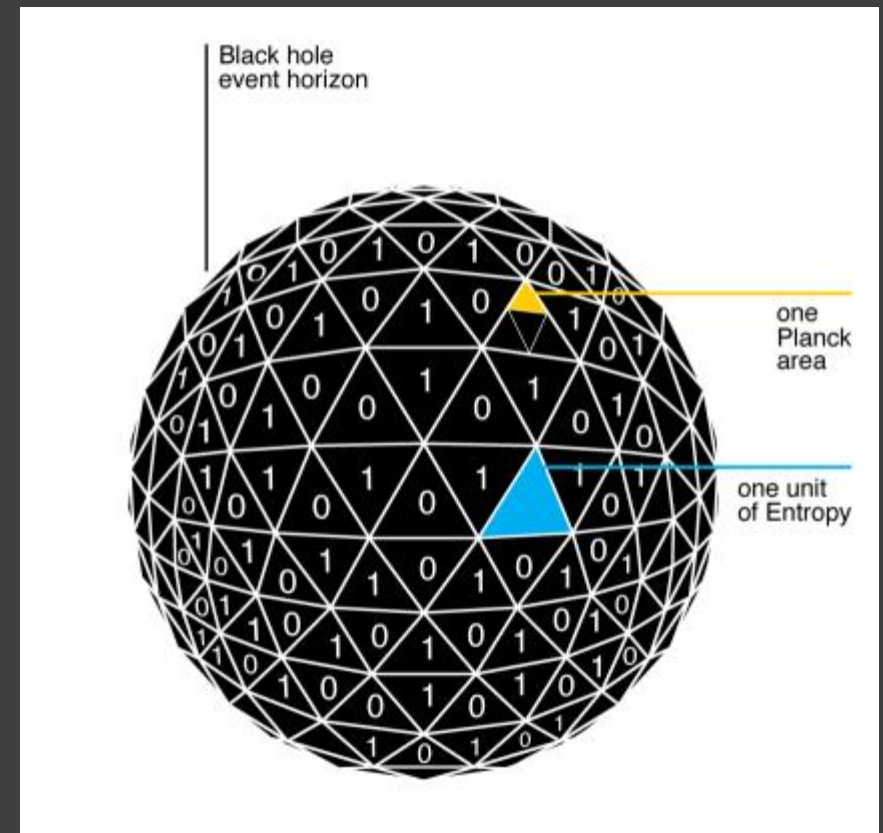
$$dE = T ds$$

$$dMC^2 = \frac{\hbar c^3}{8\pi G k_B M} ds$$

$$\int MC^2 dM = \int \frac{\hbar c^3 ds}{8\pi G k_B}$$

$$S = \frac{4\pi G k_B M^2}{c\hbar} = \frac{k_B c^3}{4G\hbar} A$$

$$S = \frac{K_B A}{4l_p^2}$$



Bekenstein-ისა და Hawking-ის შედეგებმა გვაჩვენეს რომ რაიმე მოცულობაში არსებული ინფორმაციის (ენტროპიის) ლიმიტს განსაზღვრავს არა ამ მოცულობის სიდიდე არამედ მისი შემოსაზღვრელი ზედაპირის ფართობი.

# სამყაროს გეომეტრია





# Cosmological constant

Einstein field equations -ერთმანეთთან აკავშირებს დრო-სივრცის გეომეტრიასა და მასში მატერიის განაწილებას:

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = kT_{\mu\nu}$$

$G_{\mu\nu}$  – აინშტაინის ტენზორი

$g_{\mu\nu}$  – მეტრიკული ტენზორი

$T_{\mu\nu}$  – ენერგია-იმპულსის ტენზორი

$\Lambda$  – კოსმოლოგიური მუდმივა

$k$  – აინშტაინის გრავიტაციული მუდმივა

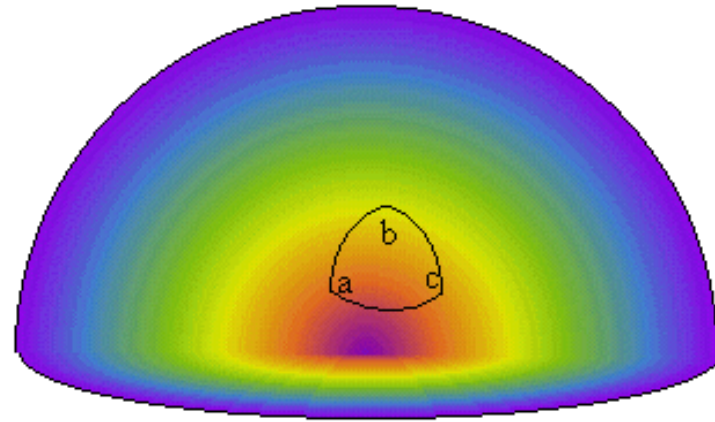
ხოლო იმის მიხედვით თუ რა მნიშვნელობა გააჩნია  $\Lambda$ -ს ჩვენს სამყაროს შეიძლება გააჩნდეს სამგვარი გეომეტრია :

1. სფეროსებრი / **de Sitter space**
2. უნაგირა / **Anti-de Sitter space (ADS)**
3. ბრტყელი / **Minkowski space**

# Cosmological constant

Spherical space

$$\Lambda > 0$$

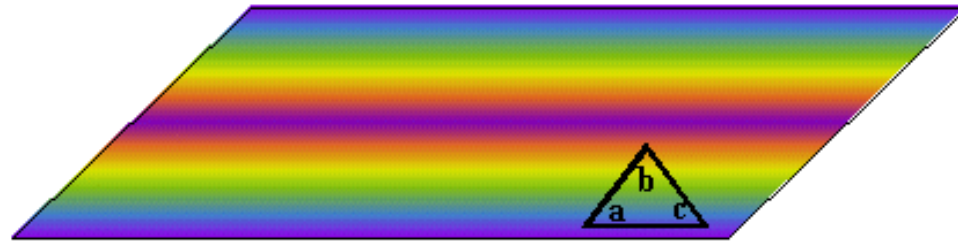


$$a + b + c > 180$$

curvature = positive

Flat Space

$$\Lambda = 0$$

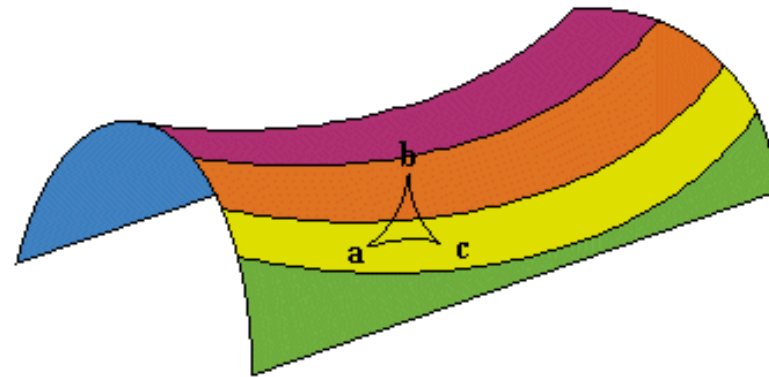


$$a + b + c = 180$$

curvature = 0

Hyperbolic space

$$\Lambda < 0$$



$$a + b + c < 180$$

curvature = negative

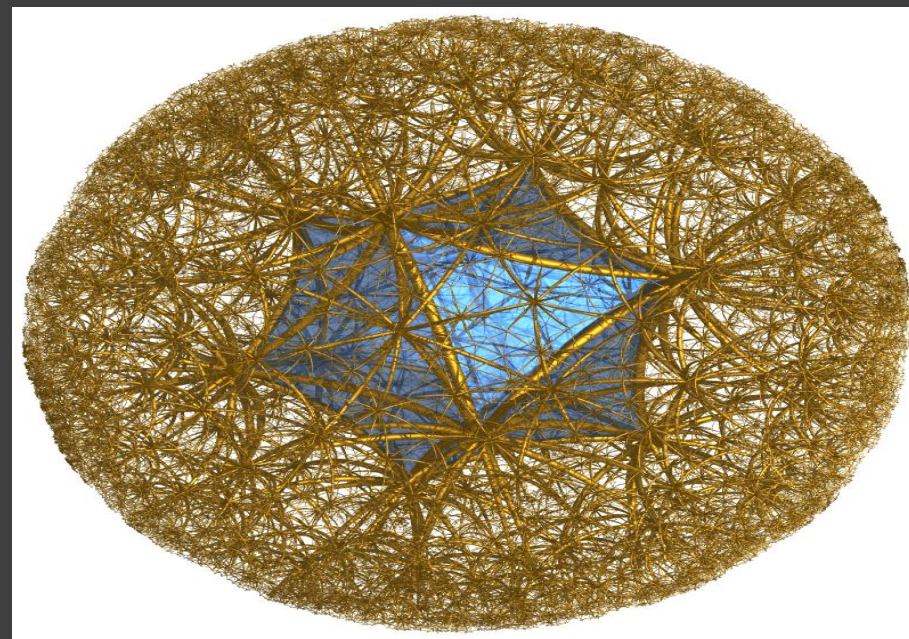
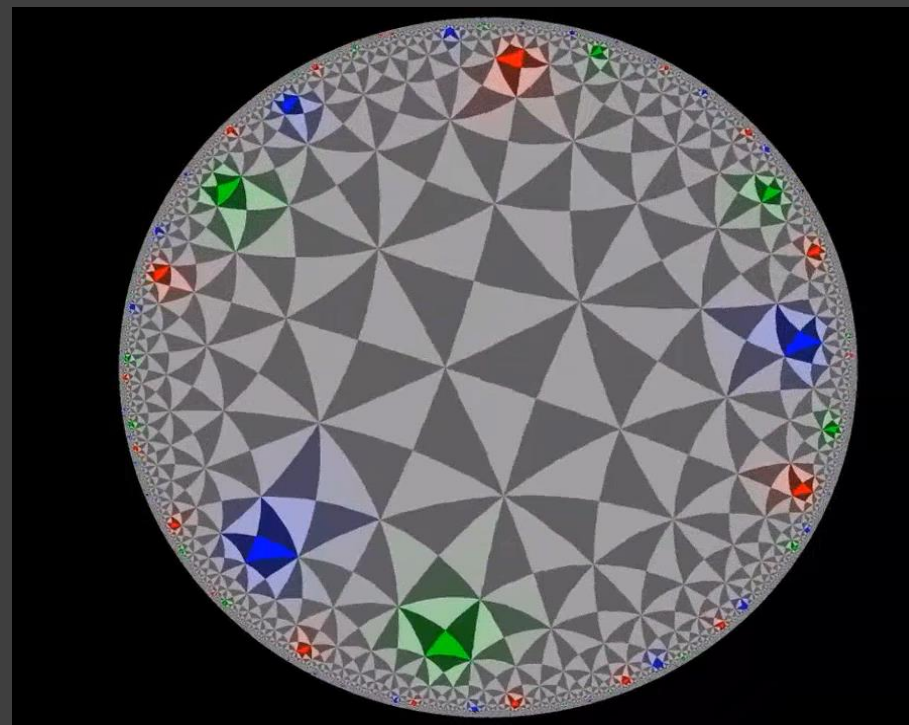


## Anti-de Sitter space (ADS)

2 განზომილებიანი ჰიპერბოლური სივრცე შეგვიძლია წარმოვადგინოთ როგორც პუანკარეს დისკი, სადაც ყოველი წერტილი დისკის კიდედან უსასრულოდაა დაშორებული.

3 განზომილებიანი ADS სამყაროს რეპრეზენტაციისათვის კი შეგვიძლია გამოვიყენოთ პუანკარეს ბურთი.

ასეთი წარმოდგენები ჩვენ საშუალებას გვაძლევს, რომ უსასრულო ADS სამყაროს მათემატიკურად მივაკუთვნოთ საზღვრები.



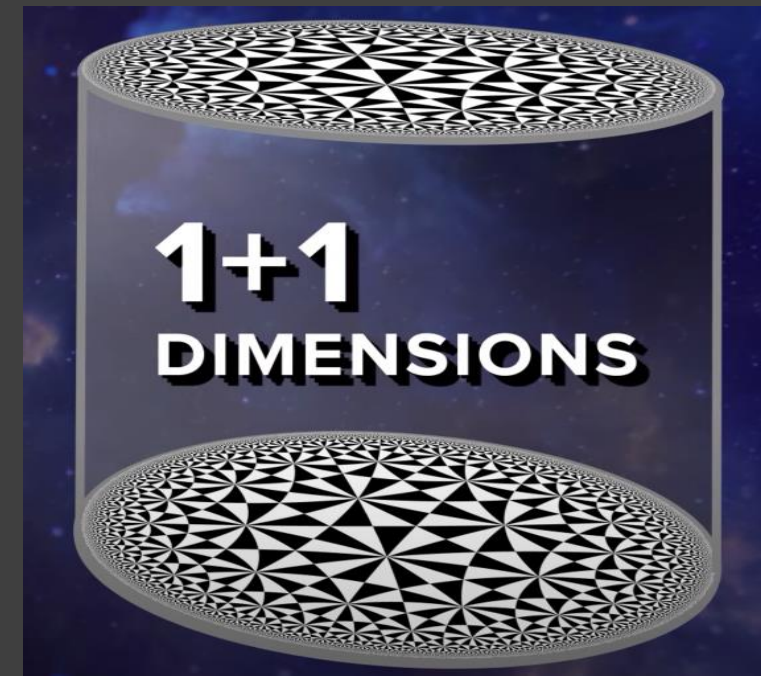
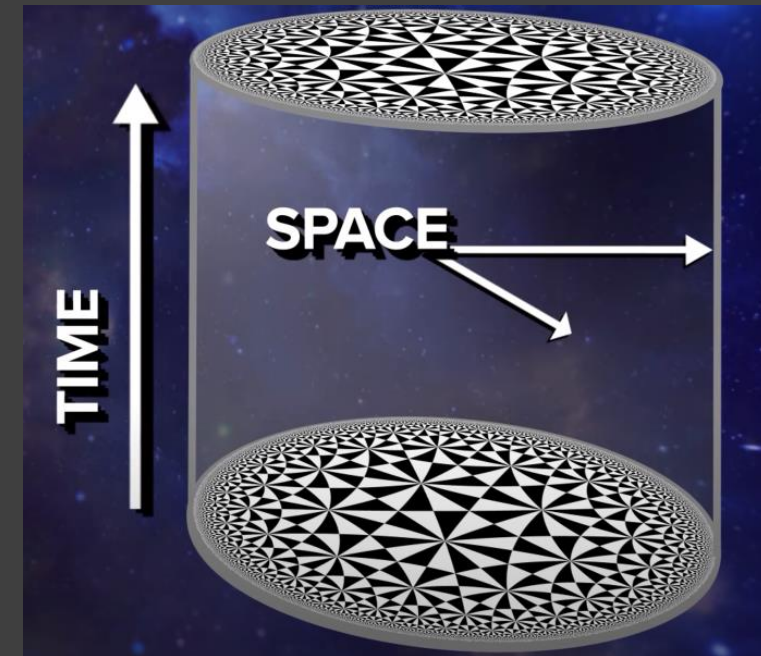
# Anti-de Sitter space (ADS)

კონფორმულად კომპაქტირებული **Anti-de Sitter** სივრცის საზღვარს წამოადგენს კონფორმულად კომპაქტირებული მინკოვსკის სივრცე ერთით ნაკლები განზომილებით.

თუ ჩვენს თავდაპირველ 2 განზომილებიან ჰიპერბოლურ პროექციას დროს დავამატებთ, მივიღებთ ცილინდრს, რომელიც წარმოადგენს ADS დრო-სივრცეს 2 სივრცითი და ერთი დროითი განზომილებით.

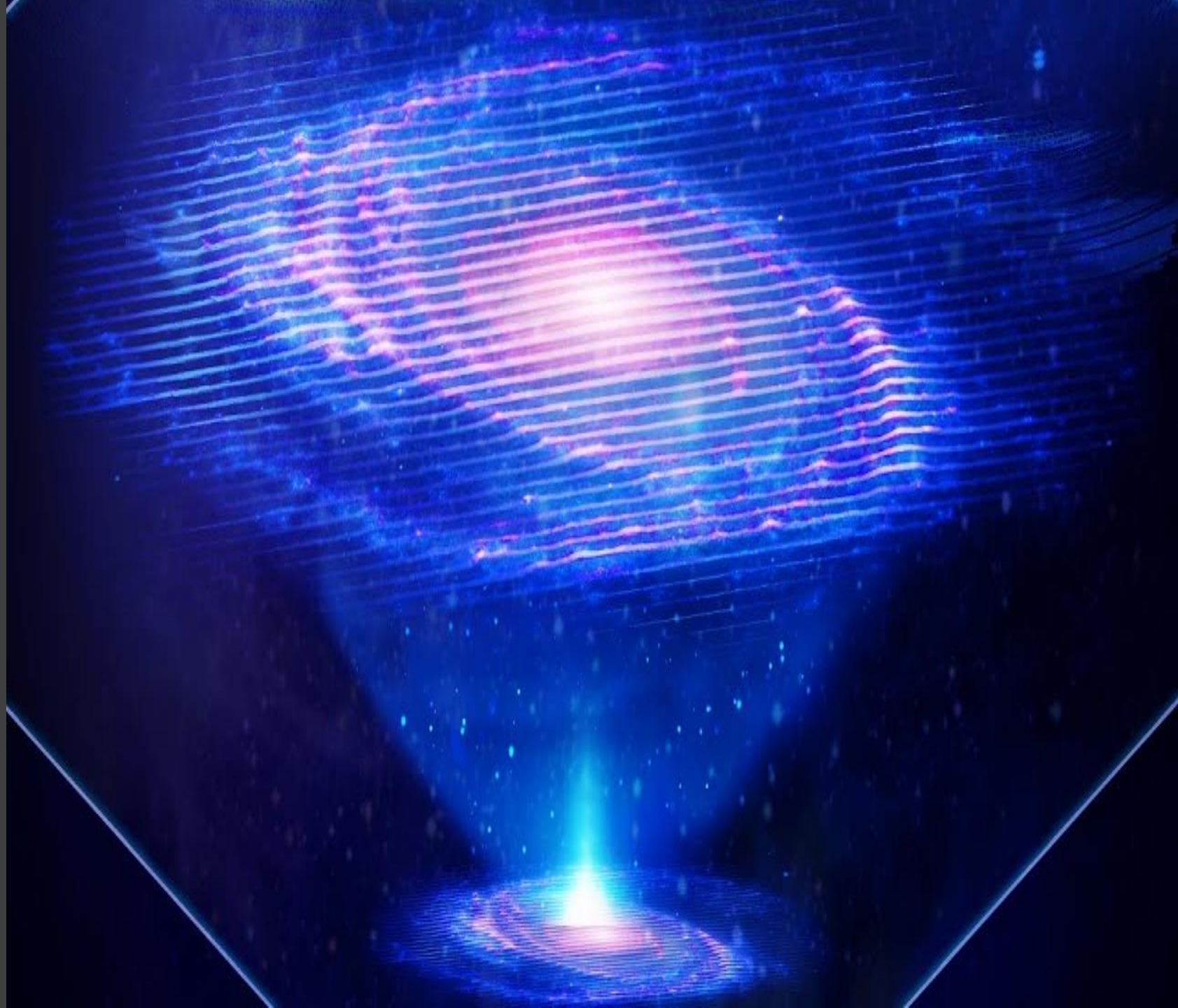
ხოლო ცილინდრის ზედაპირს კი ექნება მხოლოდ ერთი სივრცითი და ერთი დროითი განზომილება და ის მათემატიკურად ანალოგიურია იქნება ბრტყელი მინკოვსკის სივრცის.

ჩვენ სივრცის შემომსაზღვრელი ექსტერიერი და თავად ინტერიერი შეგვიძლია განვიხილოთ, როგორც ერთმანეთთან დაკავშირებული მაგრამ განსხვავებული დრო-სივრცეები რომელთაც „გააჩნიათ საკუთარი ფიზიკა“.





# ჰოლოგრაფიული სამყარო

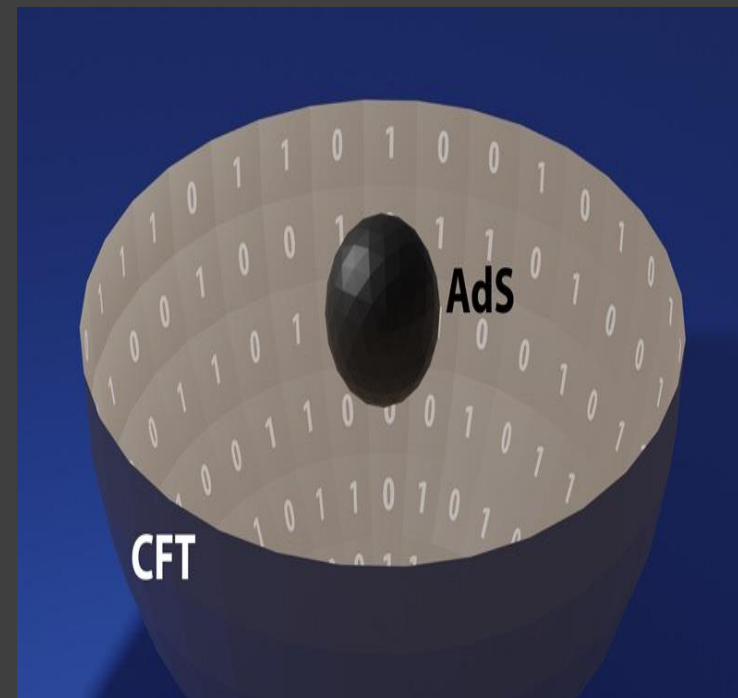
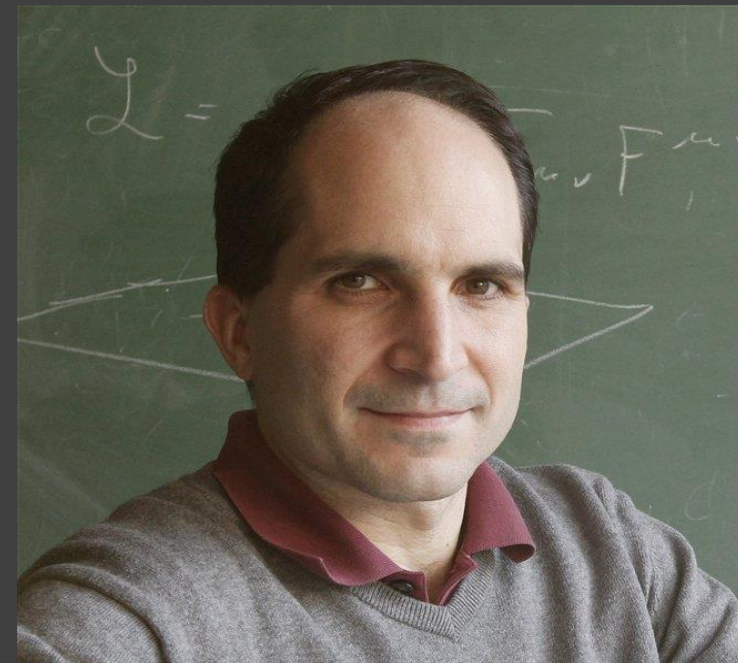


# ADS/CFT correspondence

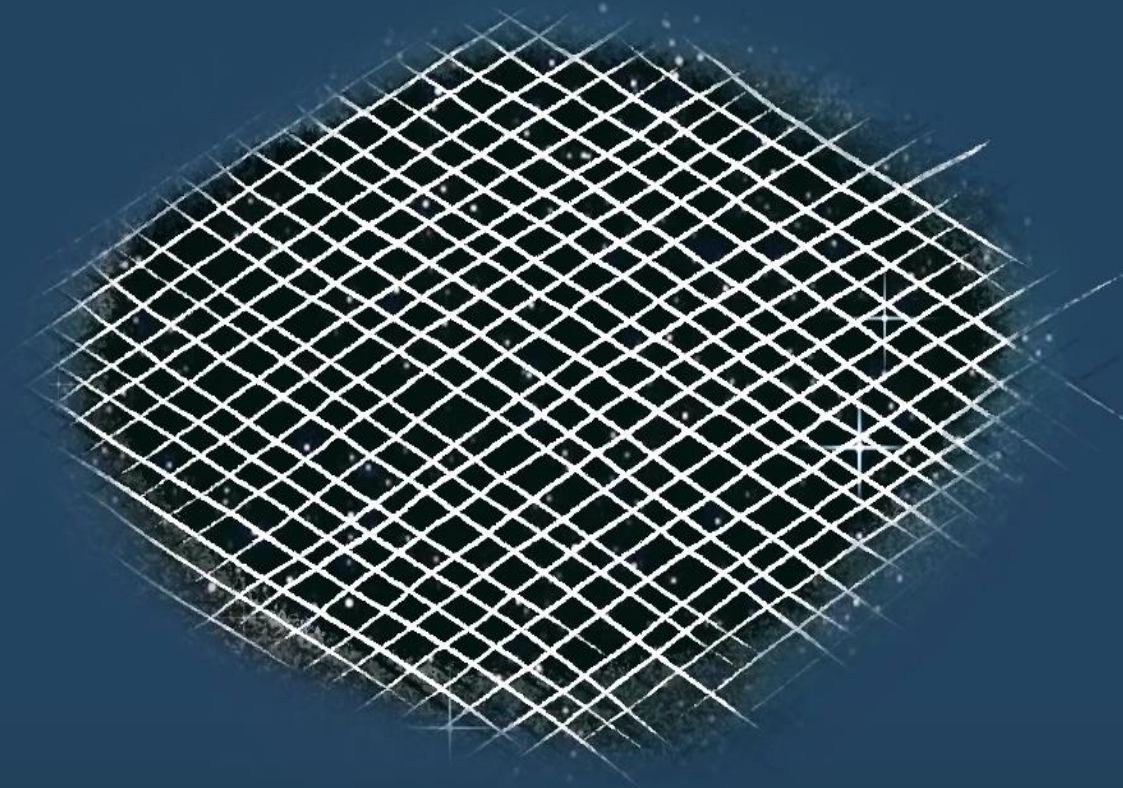
1997 წელს არგენტინელმა ფიზიკოსმა **Juan Martín Maldacena** - მ ჰოლოგრაფიული პრინციპისა და სიმების თეორიის გამოყენებით აღმოაჩინა შესაბამისობა **4+1** განზომილებიან **Anti-de Sitter** სივრცესა და მის შემომსაზღვრელ **3+1** მინკოვსკის სივრცეს შორის.

**Maldacena**-ს გამოთვლების თანახმად თუ განვსაზღვრავთ კონფორმულ კვანტური ველის თეორიას  $3+1$  განზომილებიან მინკოვსკის სივრცეში ის „გვაძლევს“ **გრაფიტაციის სრულად კვანტურ თეორიას**  $4+1$  ADS სივრცეში.

ADS/CFT correspondence წარმოადგენს **ძლიერ - სუსტ** დუალობას ანუ ჩვენ ძლიერად ბმული ნაწილაკები ADS/CFT მხარეზე შეგიძლია აღვწეროთ სუტად ბმული ნაწილაკების ურთიერთქმედებით CFT/ADS სივრცეში.

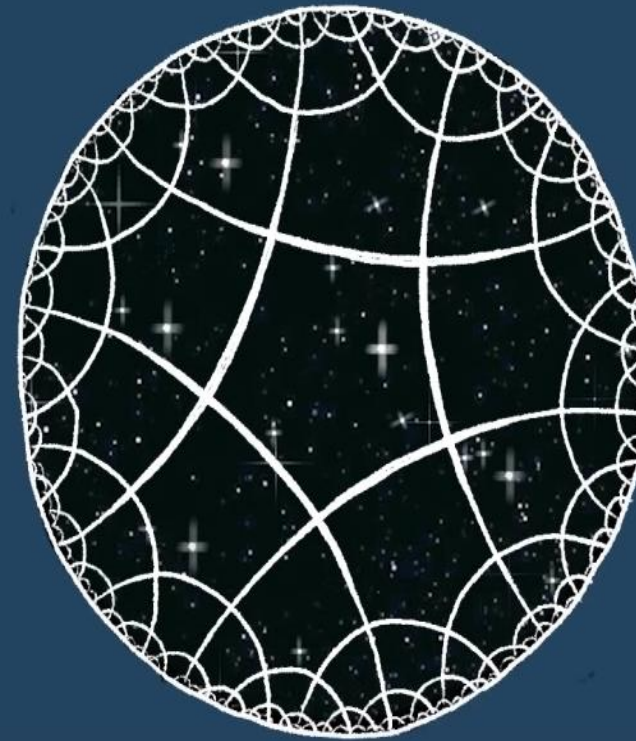






**Our universe**

(slight positive curvature, no boundary)



**AdS-CFT  
correspondence**

(negative curvature produces boundary)



# მადლობა ყურადღებისათვის

გამოყენებული რესურსები:

<https://www.quantamagazine.org/symmetries-reveal-clues-about-the-holographic-universe-20220112/>

<https://www.quantamagazine.org/what-is-the-geometry-of-the-universe-20200316/>

<https://arstechnica.com/science/2020/06/natures-cosmic-hard-drive-black-holes-could-store-information-like-holograms/>

<https://www.youtube.com/watch?v=T4DAGabiGms>

<https://www.youtube.com/watch?v=dmDKlcaAWO0>

<https://www.youtube.com/watch?v=9XkHBmE-N34>

<https://www.youtube.com/watch?v=GscfuQWZFAo>

<https://www.youtube.com/watch?v=qPKj0YnKANw>

[https://www.youtube.com/watch?v=Ab8JIzckx\\_M](https://www.youtube.com/watch?v=Ab8JIzckx_M)

<https://www.youtube.com/watch?v=tJevBNQsKtU>

<https://www.youtube.com/watch?v=klpDHn8viX8>