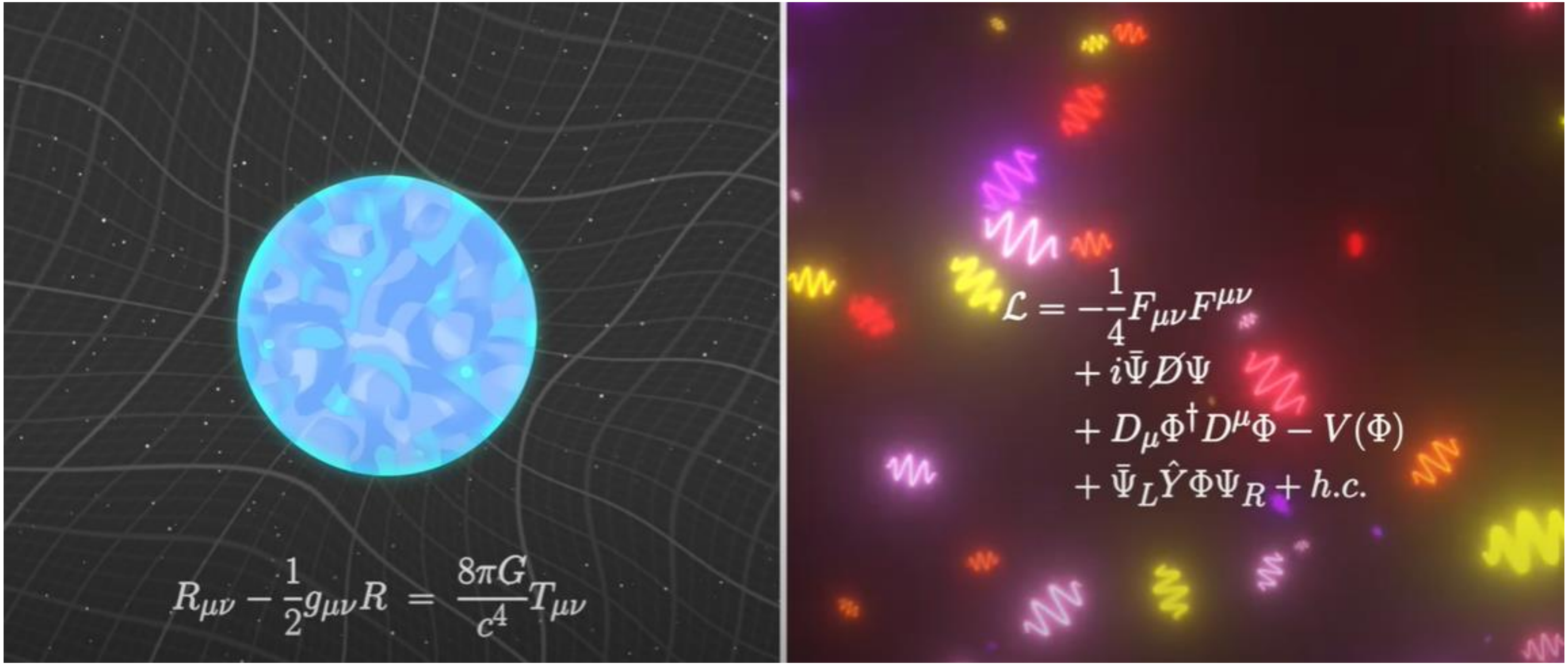
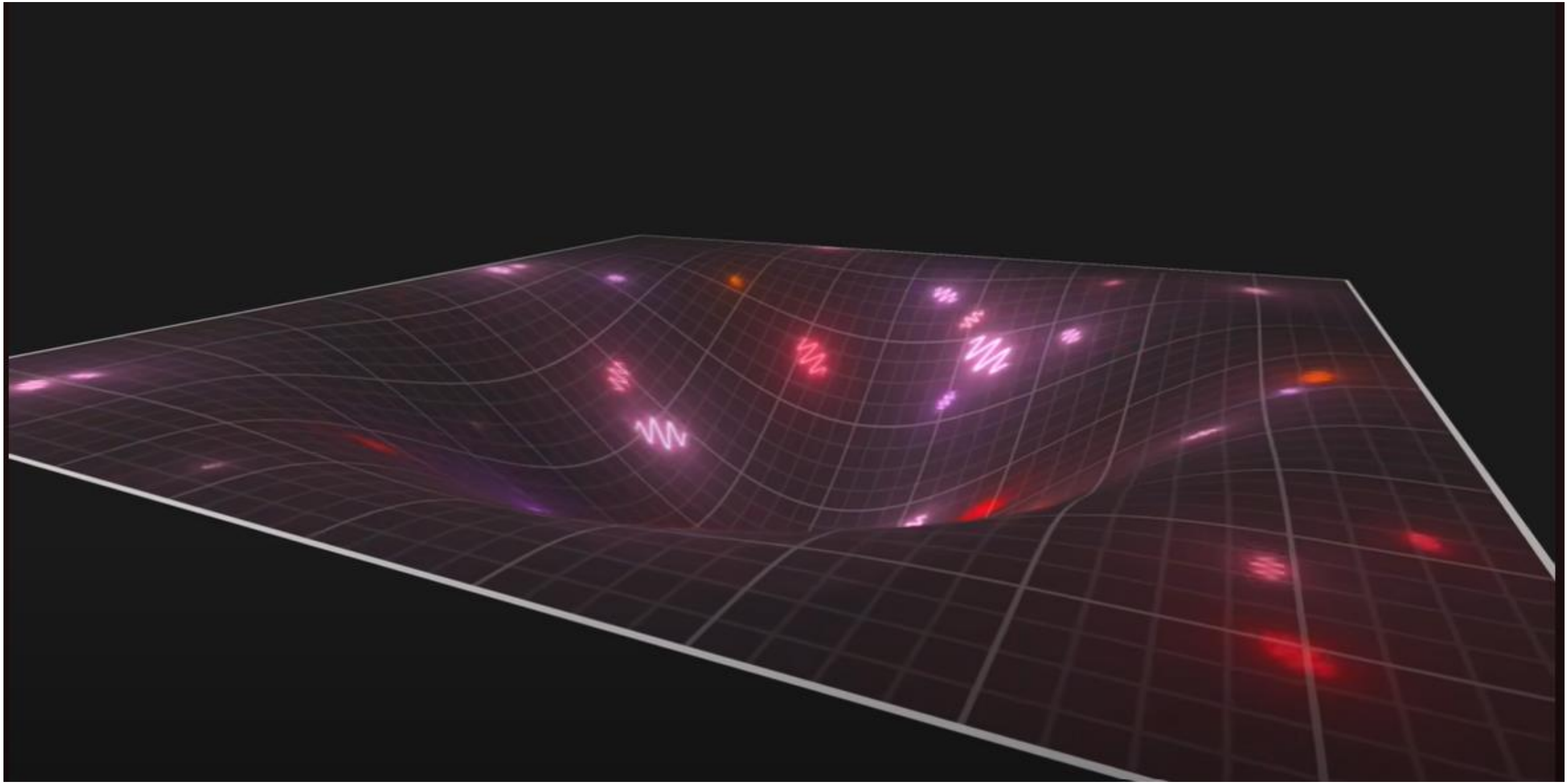
ჰოკინგის რადიაცია

რევაზ ზედელაშვილის მოხსენება

ზოგადი ფარდობითობა და კვანტური თეორია ერთმანეთთან შეუთავსებელია

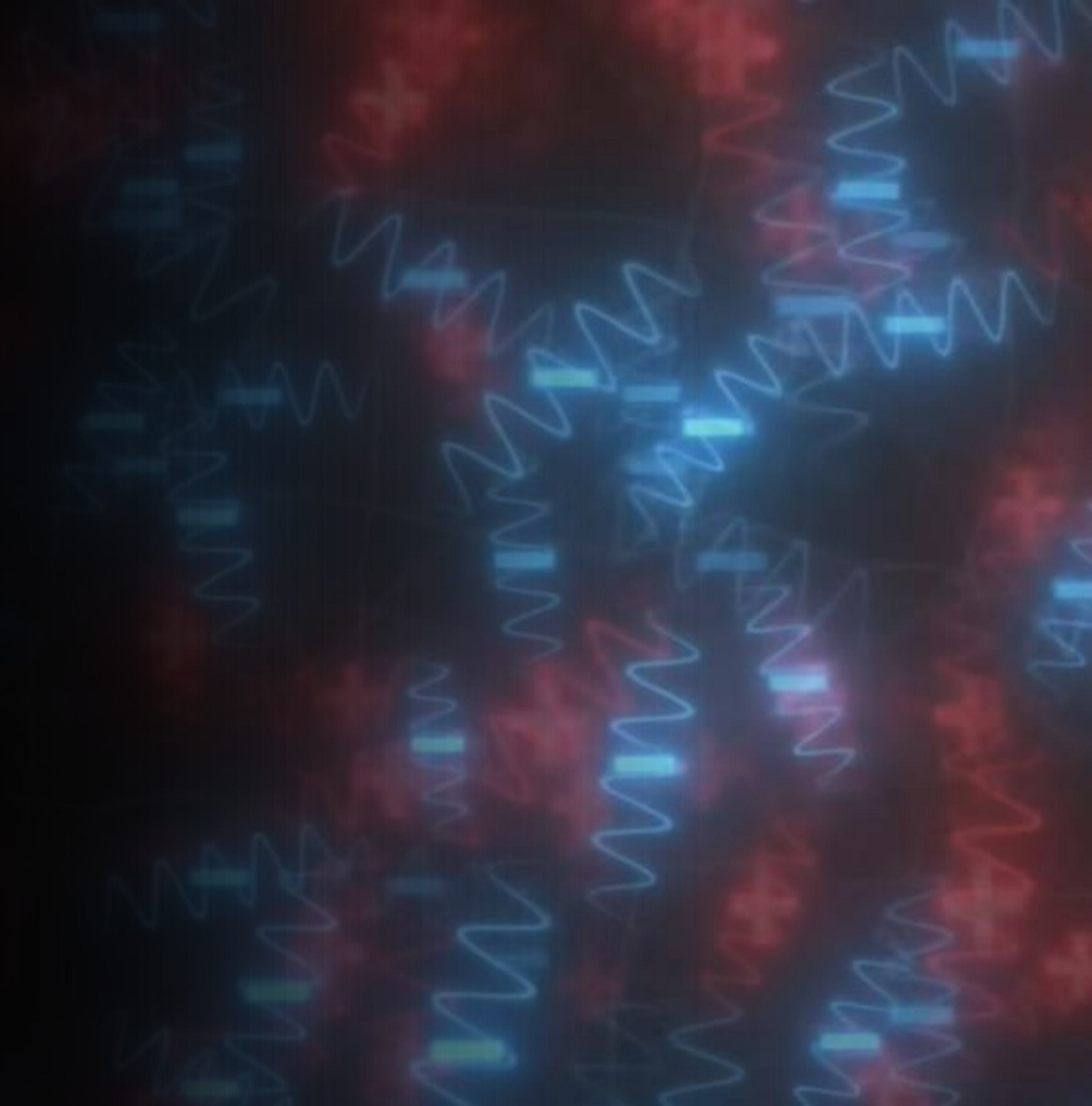


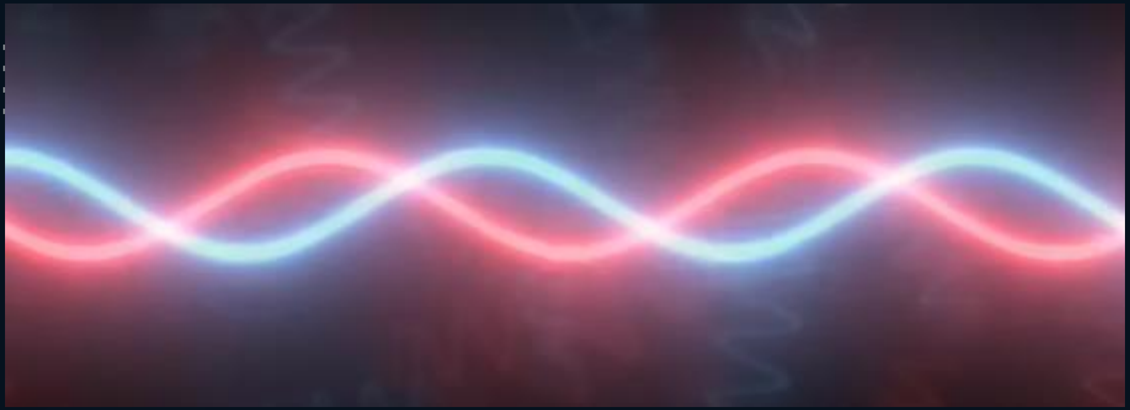
კვანტურ ნაწილაკთა თვისებების შესასწავლად გამრუდებულ დრო-სივრცეში შეგვიძლია გავაკეთოთ დაშვება რომ ეს ნაწილაკები არ ახდენენ სიმრუდეზე გავლენას



ვაკუუმის მიმოხილვა არსებული გეომეტრიის პირობებში:

- ვირტუალური ნაწილაკი -> აღგზნება კვანტურ ველში
- დადებითი და უარყოფითი ენერგიის აღგზნება
- ვაკუუმის ფარდობითობა

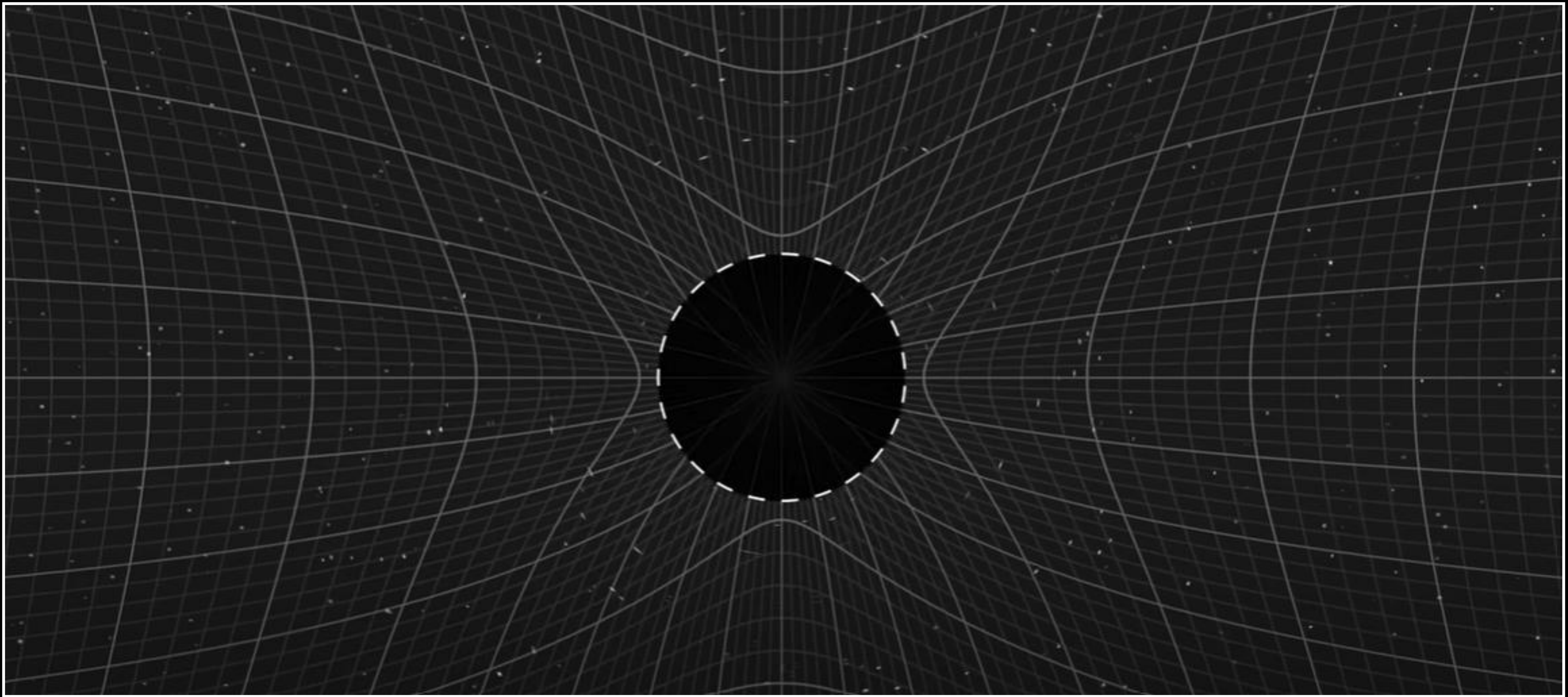




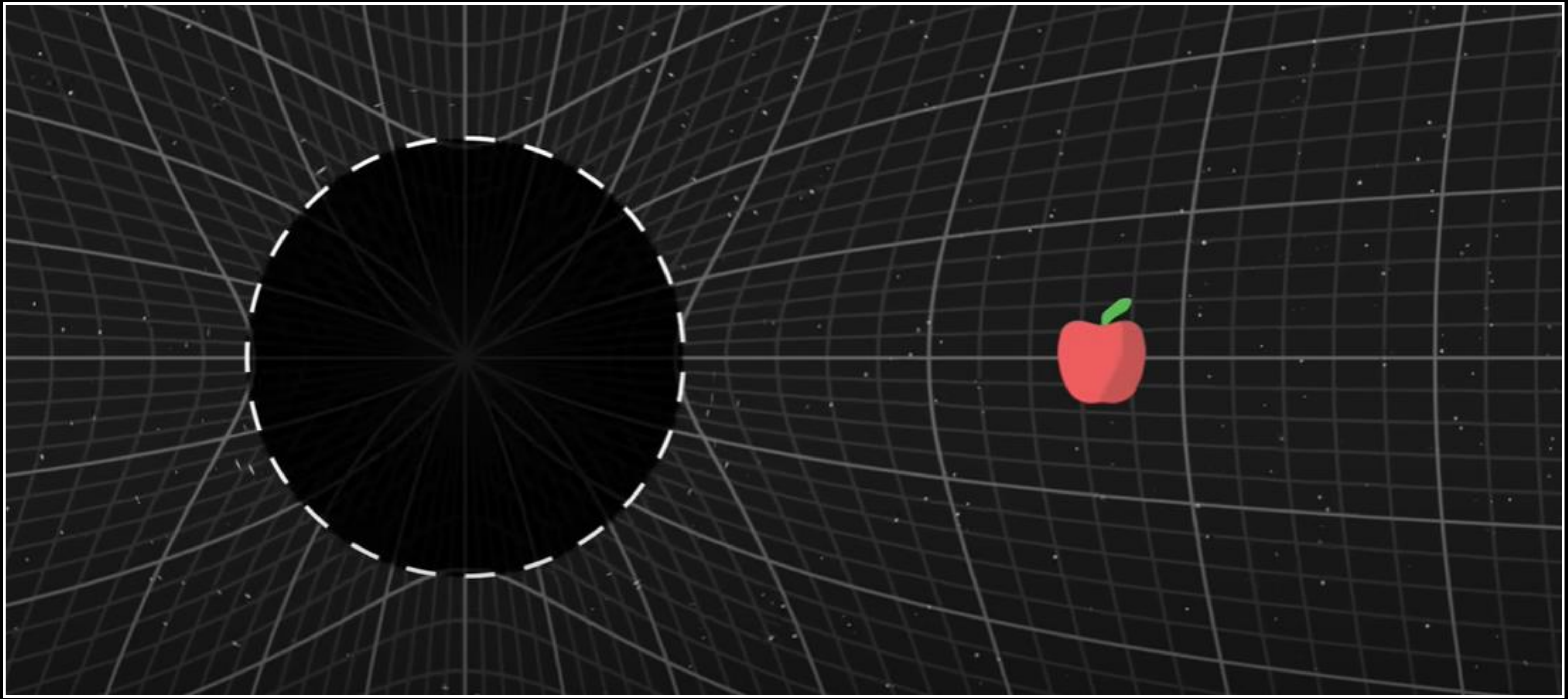
ვაკუუმი

- დადებითი და უარყოფითი ენერგიის ზედდების შედეგად ვიღებთ მდგარ ტალღას
- გვაქვს ფლუქტუაციები

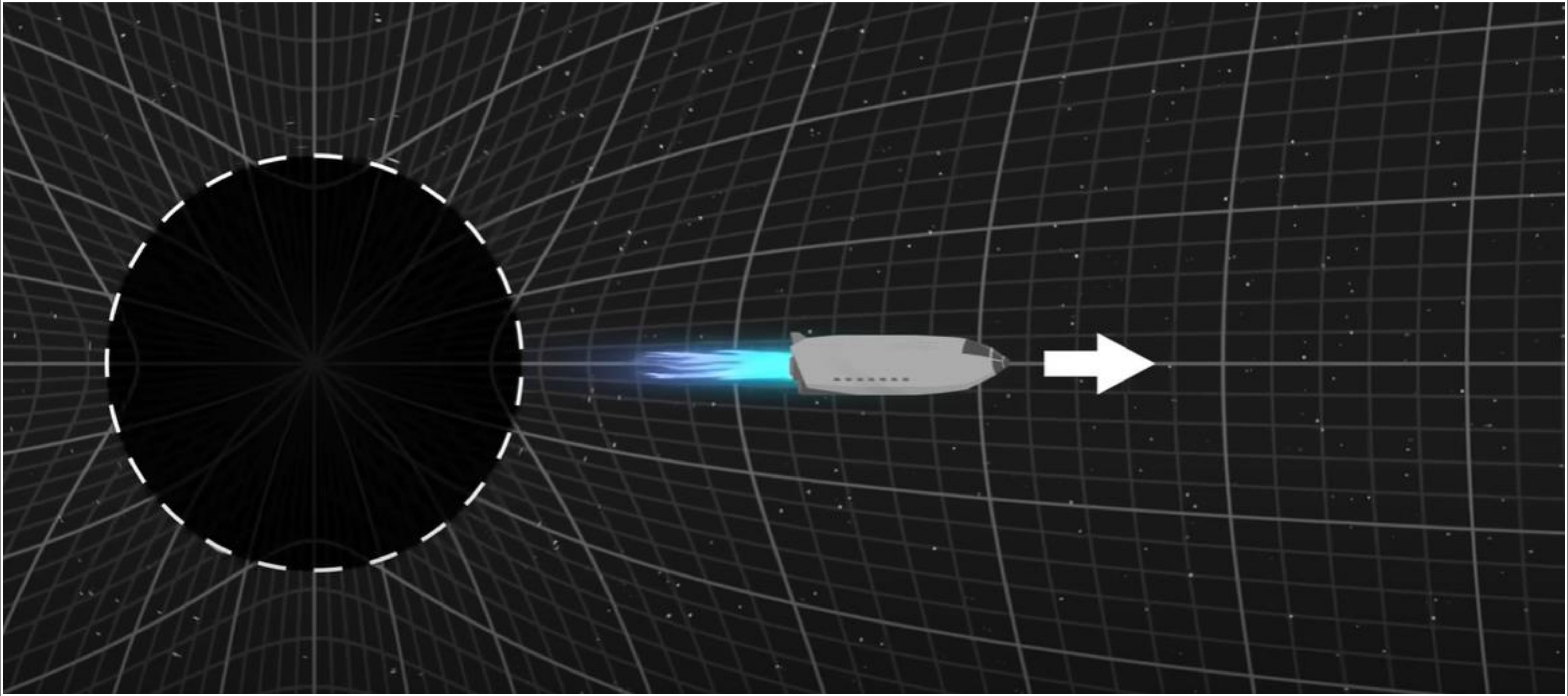
რეალური ნაწილაკი



წარმოვიდგინოთ დრო-სივრცის ფაბრიკის კონტრაქცია



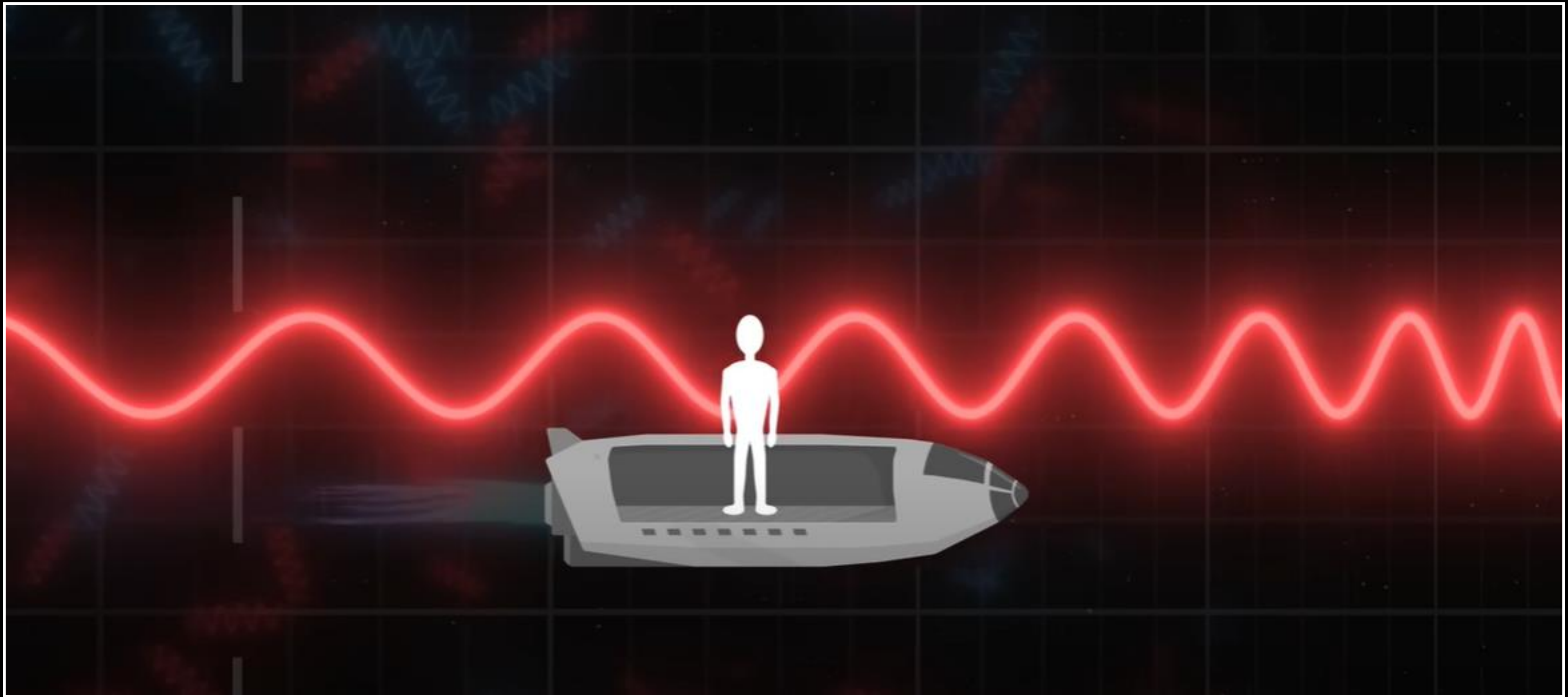
თავისუფალი ვარდნა - ვაშლი მიყვება ხაზს.
ვაშლის სიჩქარე ფაბრიკის მიმართ თანაბარია



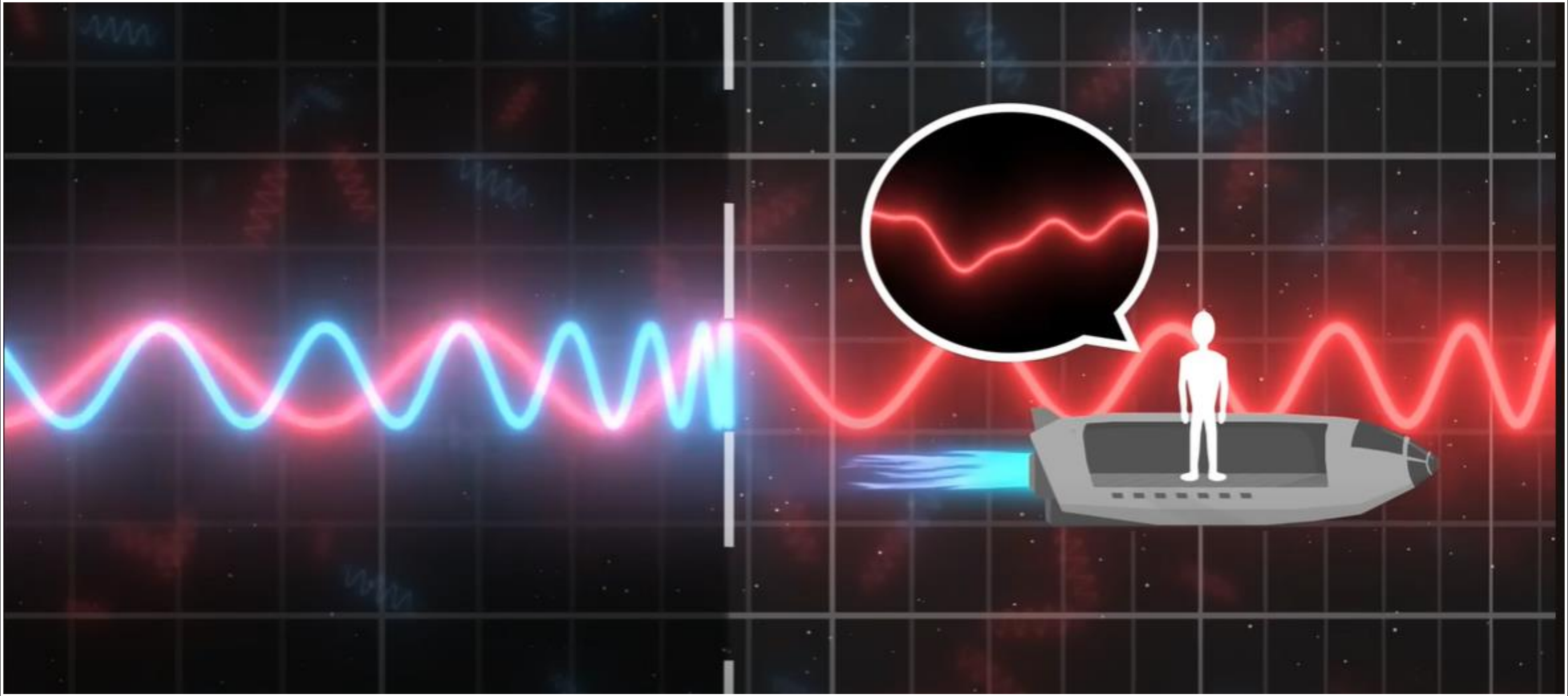
იმისათვის რომ არ ჩავარდეს ობიექტი შავ ხვრელში, საჭიროა საწინააღმდეგო მიმართულებით აჩქარება

ლოკალურად დრო-სივრცე ბრტყელია

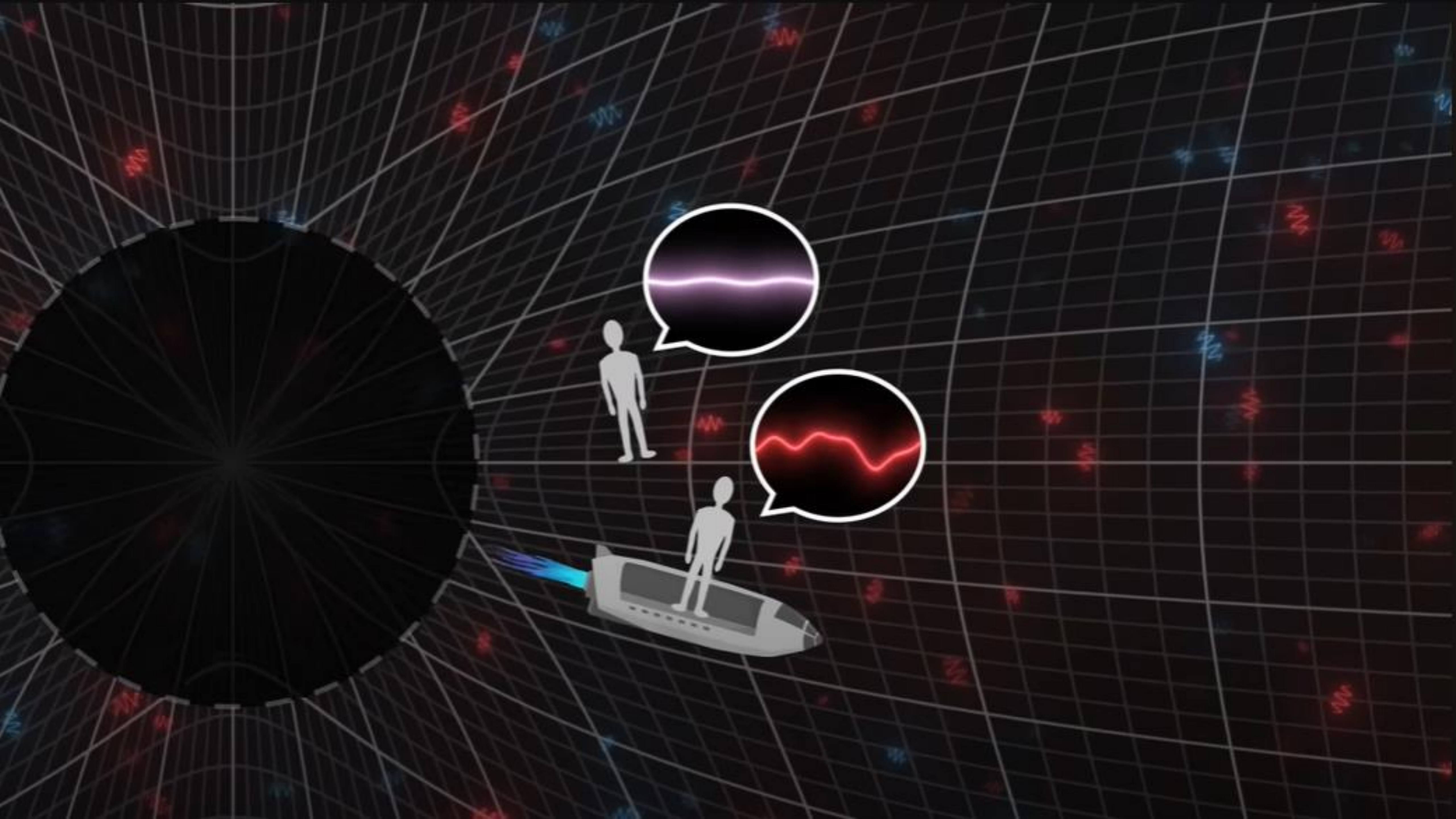
- კვანტური ველები განმარტებულია დრო სივრცის ფაბრიკის მიმართ
- თავისუფალ ვარდნაში მყოფი დამკვირვებელი ხედავს ვაკუუმს



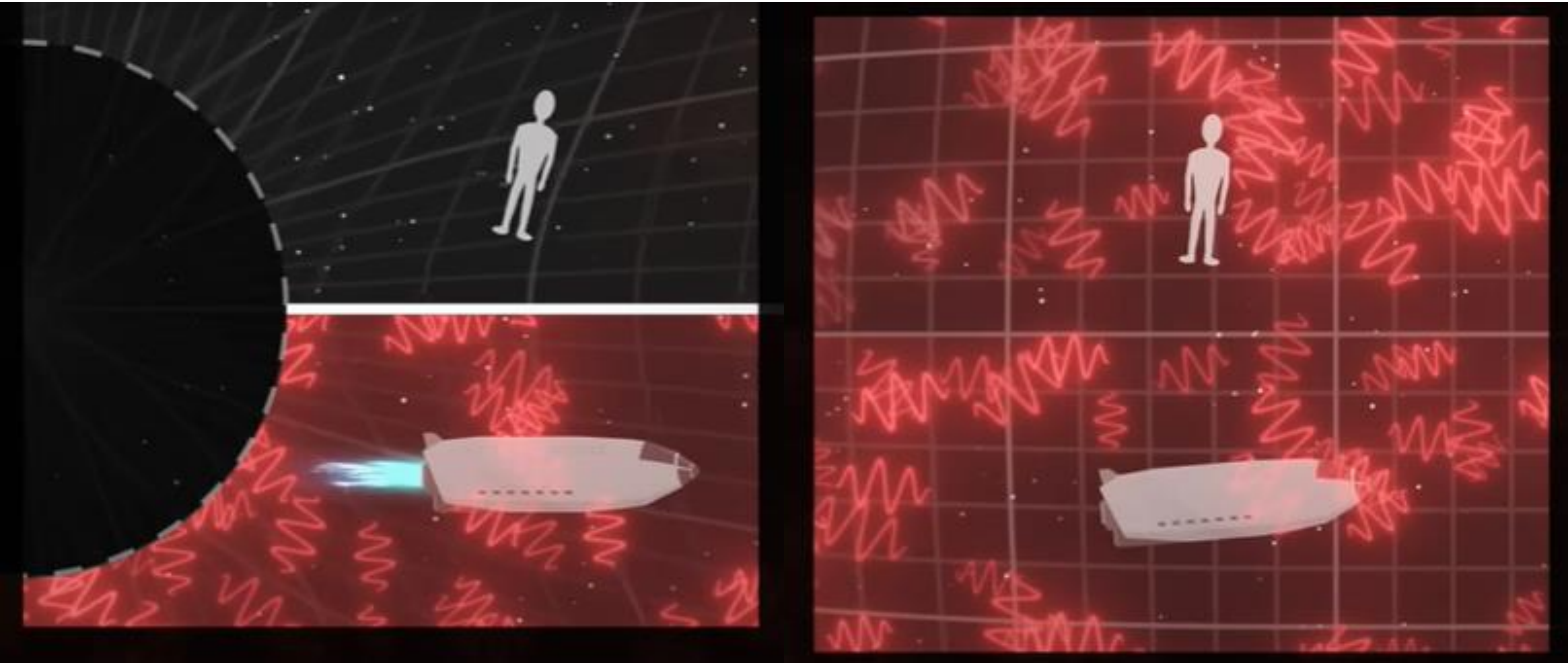
აჩქარება და ნაწილაკთა გაჩენა

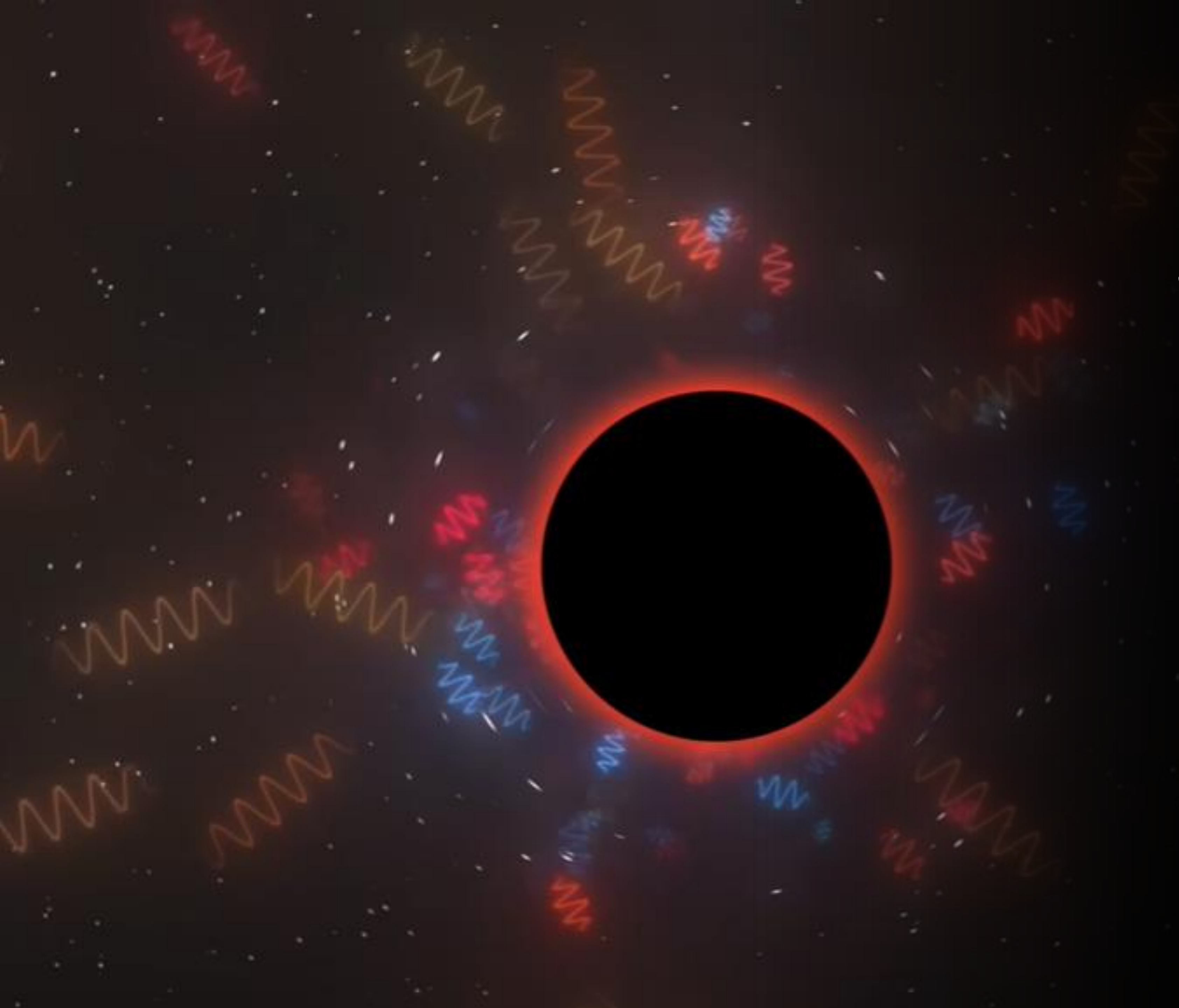


მოვლენათა ჰორიზონტი: ტალღები აღარ აკომპენსირებენ ერთმანეთს, ჩნდება ნაწილაკები

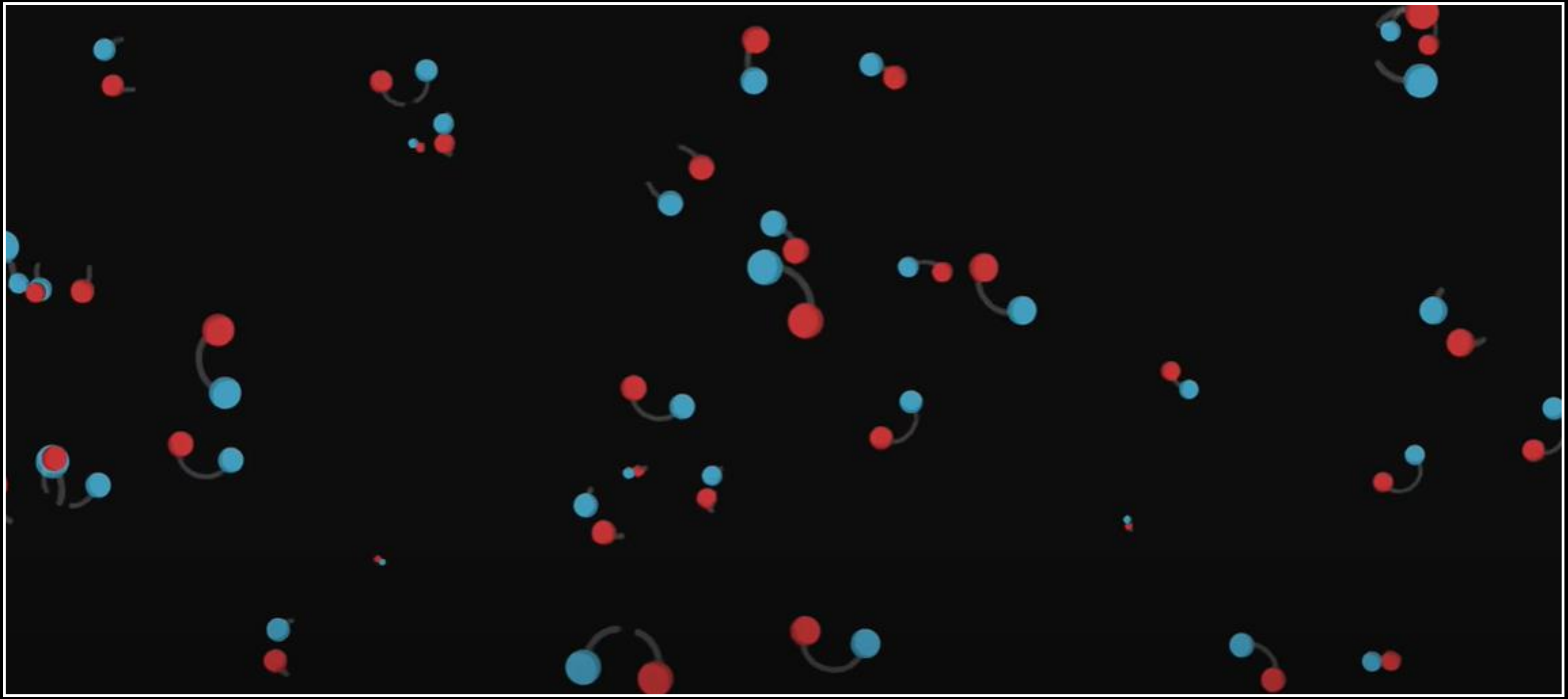


მოვლენათა ჰორიზონტთან ნაწილაკთა არსებობა ფარდობით მოვლენაა:

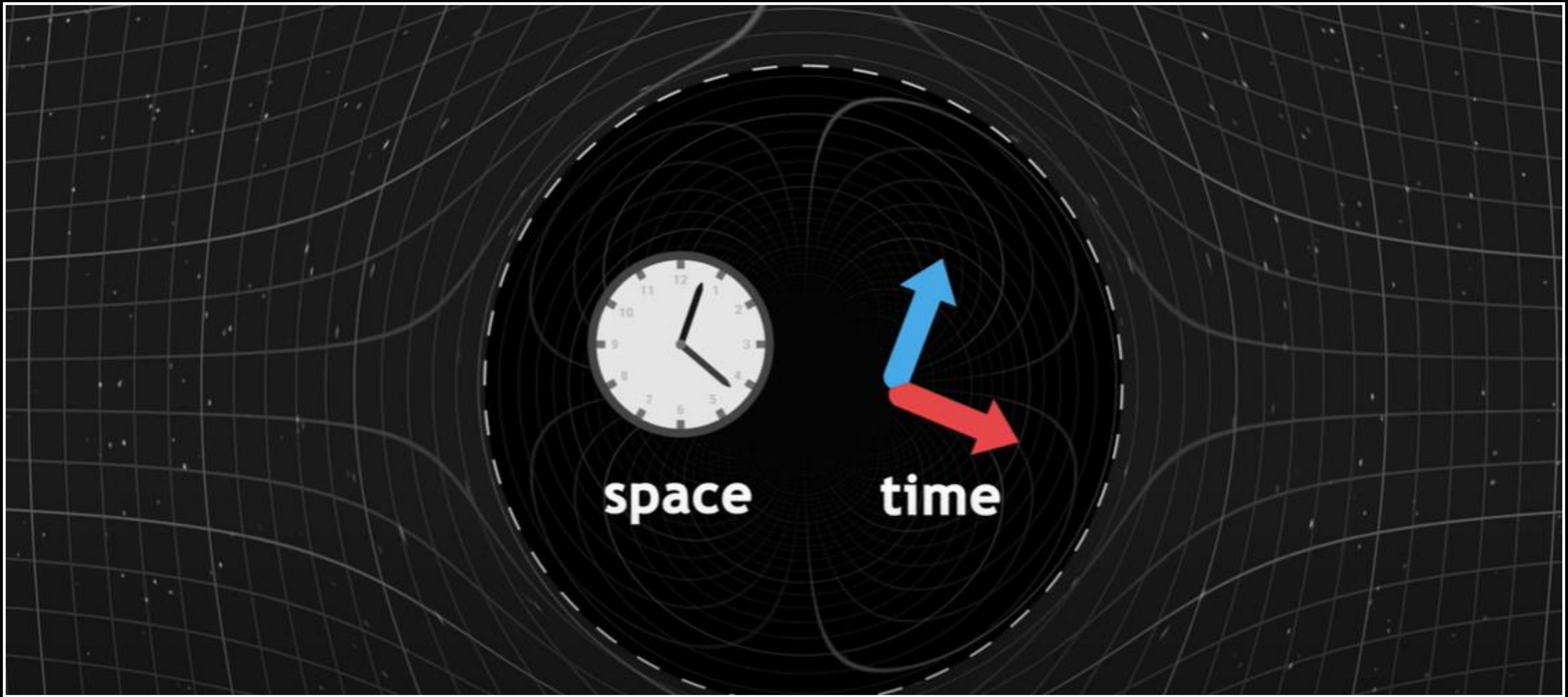




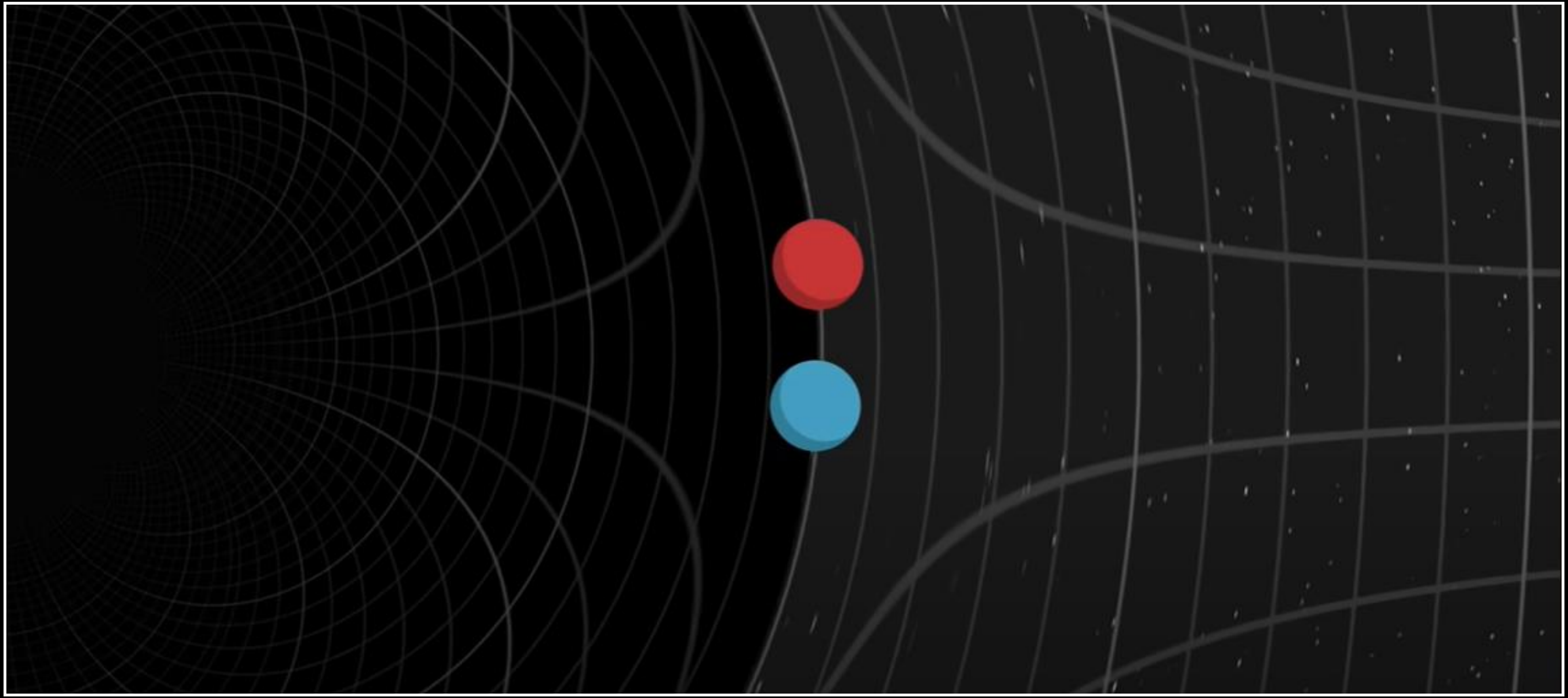
კვანტური
ფლუქტუაციები
ქმნიან ნაწილაკებს
რომლებიც
გამოსხივდებიან



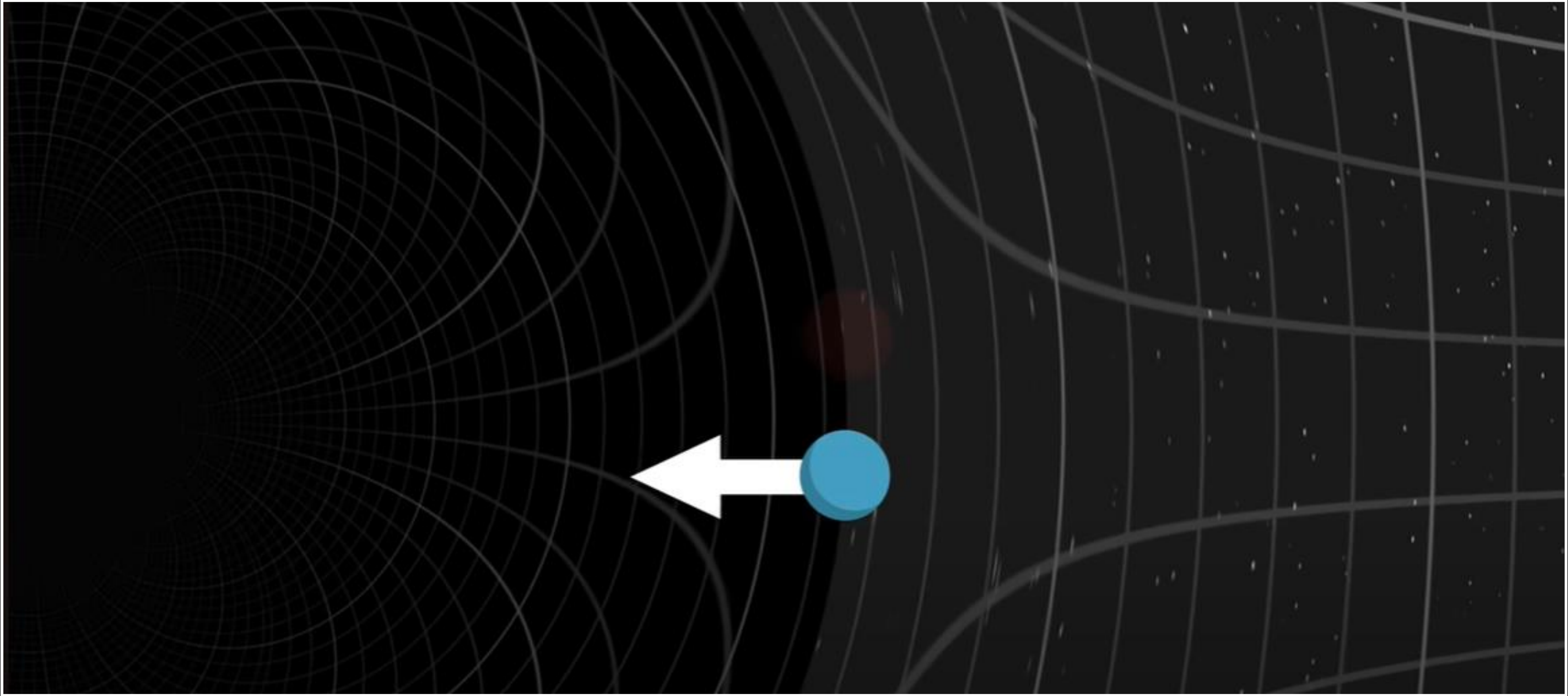
დადებითი და უარყოფითი ენერგიის მქონე ვირტუალური ნაწილაკები, გაჩენა და ანიჰილაცია



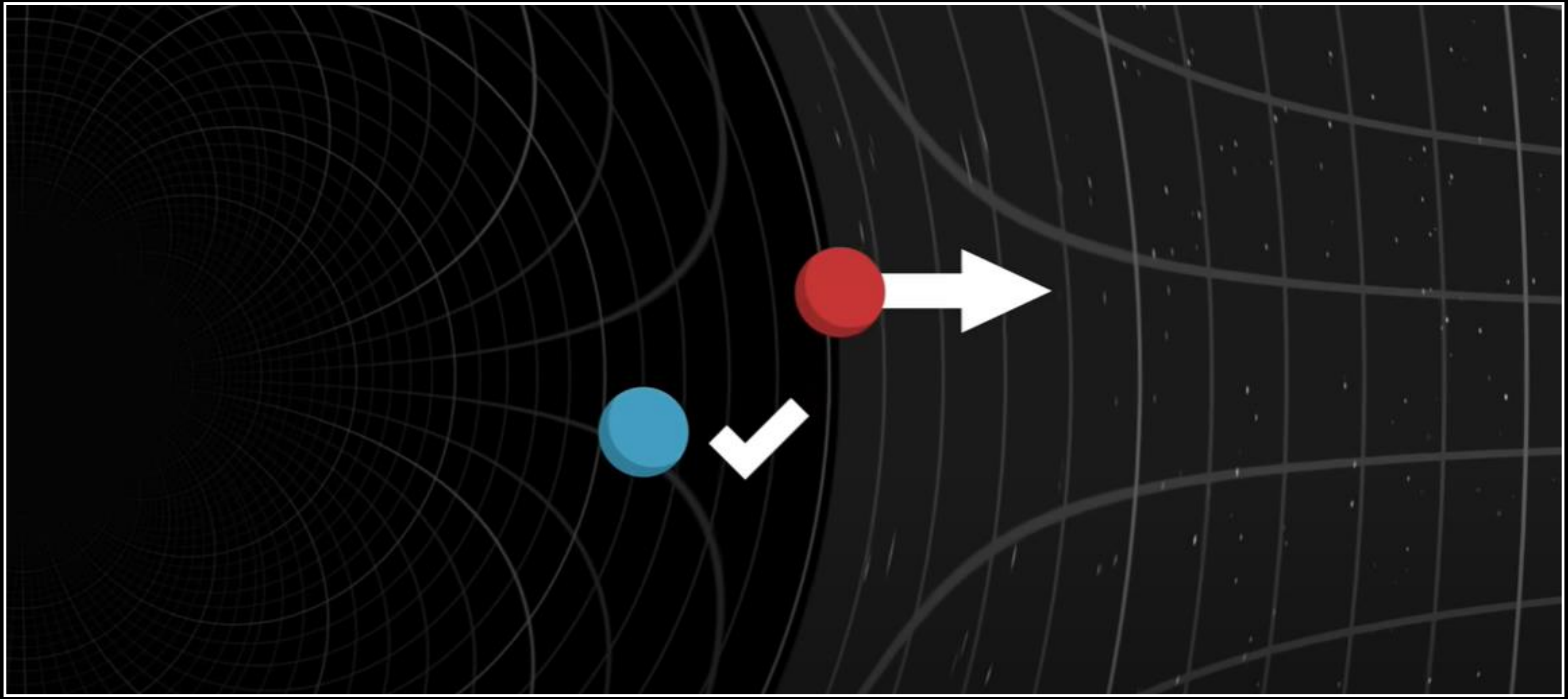
შავი ხვრელის შიგნით სიმრუდე ძალიან იზრდება, შედეგად ოთხ-სივრცეში დრო და სივრცე როლებს ცვლიან



ეს ცვლილება ნიშნავს, რომ ნაწილაკს შეუძლია იარსებოს
უარყოფითი ენერგიით შავი ხვრელის შიგნით

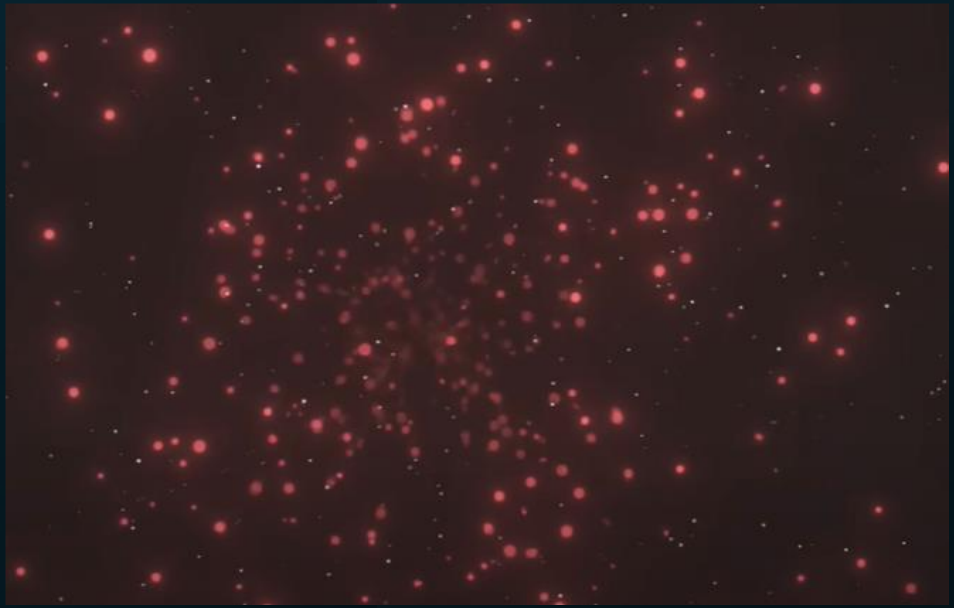


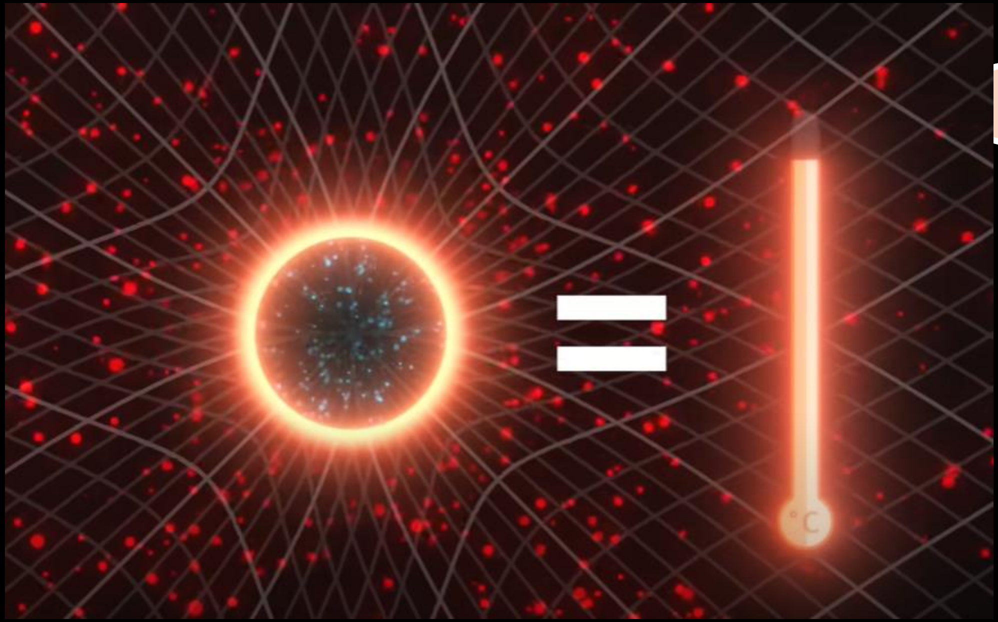
ე.ი. არსებობს ალბათომა რომ ჰორიზონტზე შექმნილი წყვილიდან
უარყოფითი ენერგიის მქონე ჩავარდეს შავ ხვრელში

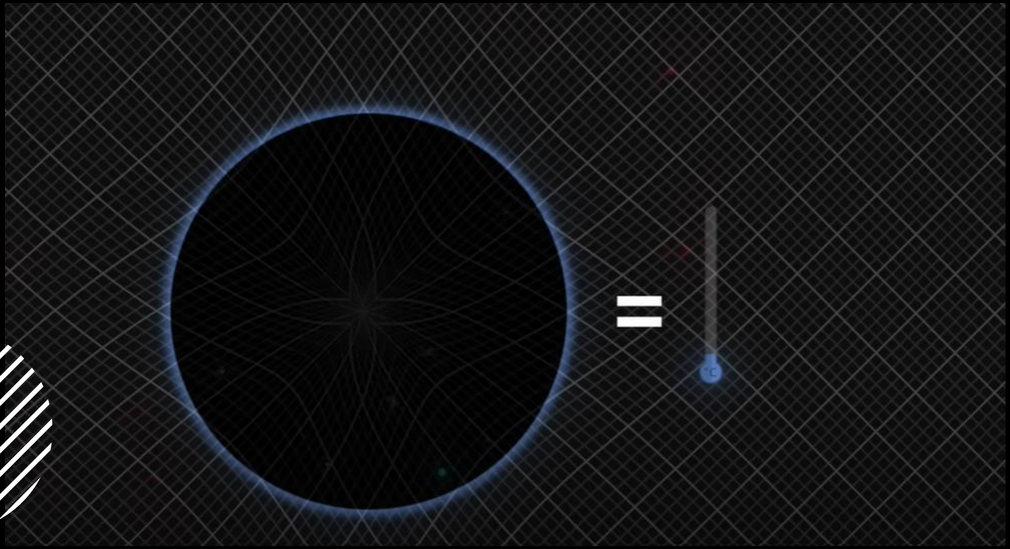


ანუ დადებითი ენერგიის მქონე ნაწილაკს შეუძლია გამოსვლა

უარყოფითი ენერგიის შთანთქმით შავი ხვრელი კარგავს ენერგიას და იწყებს დაშლას



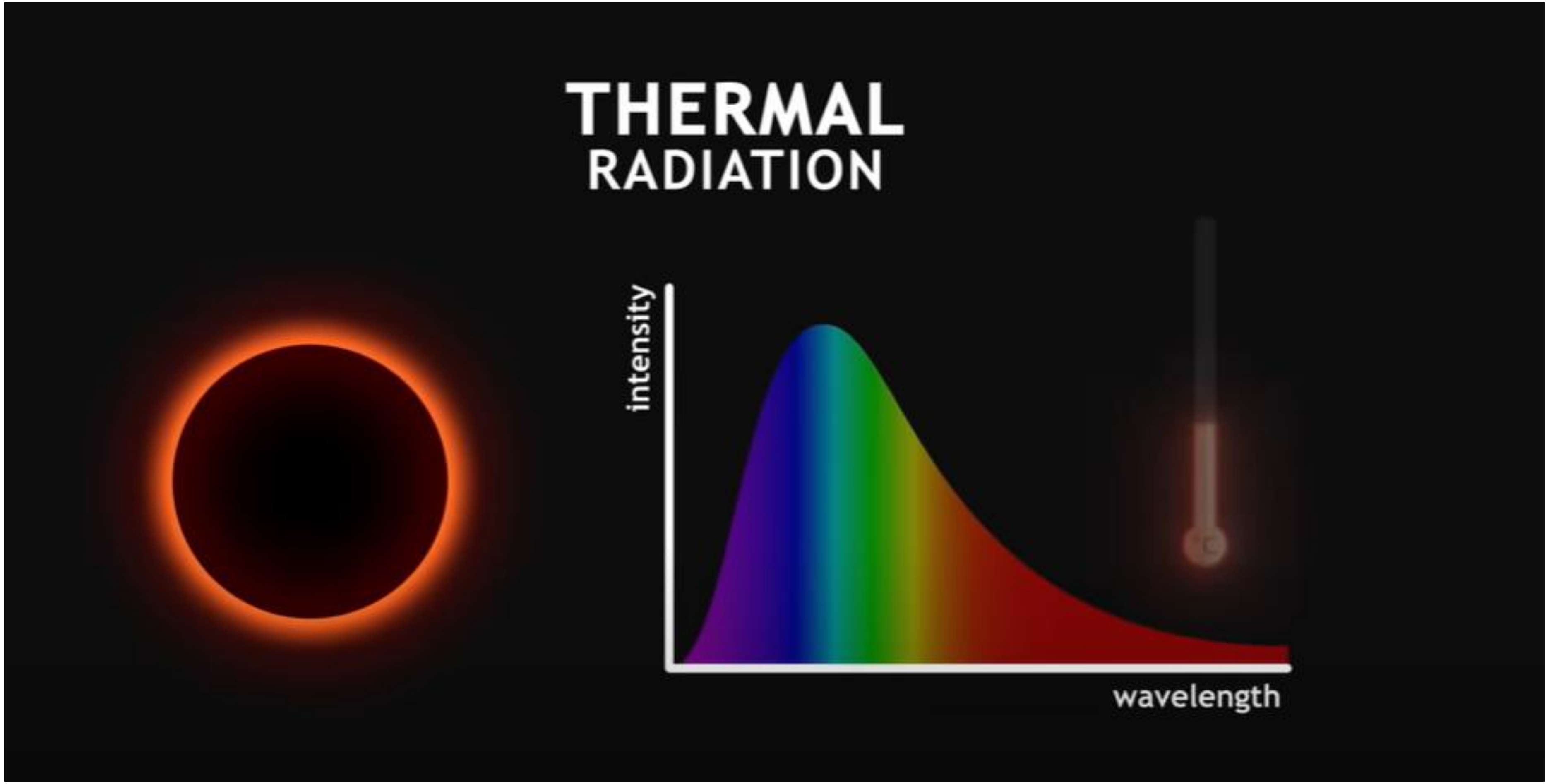


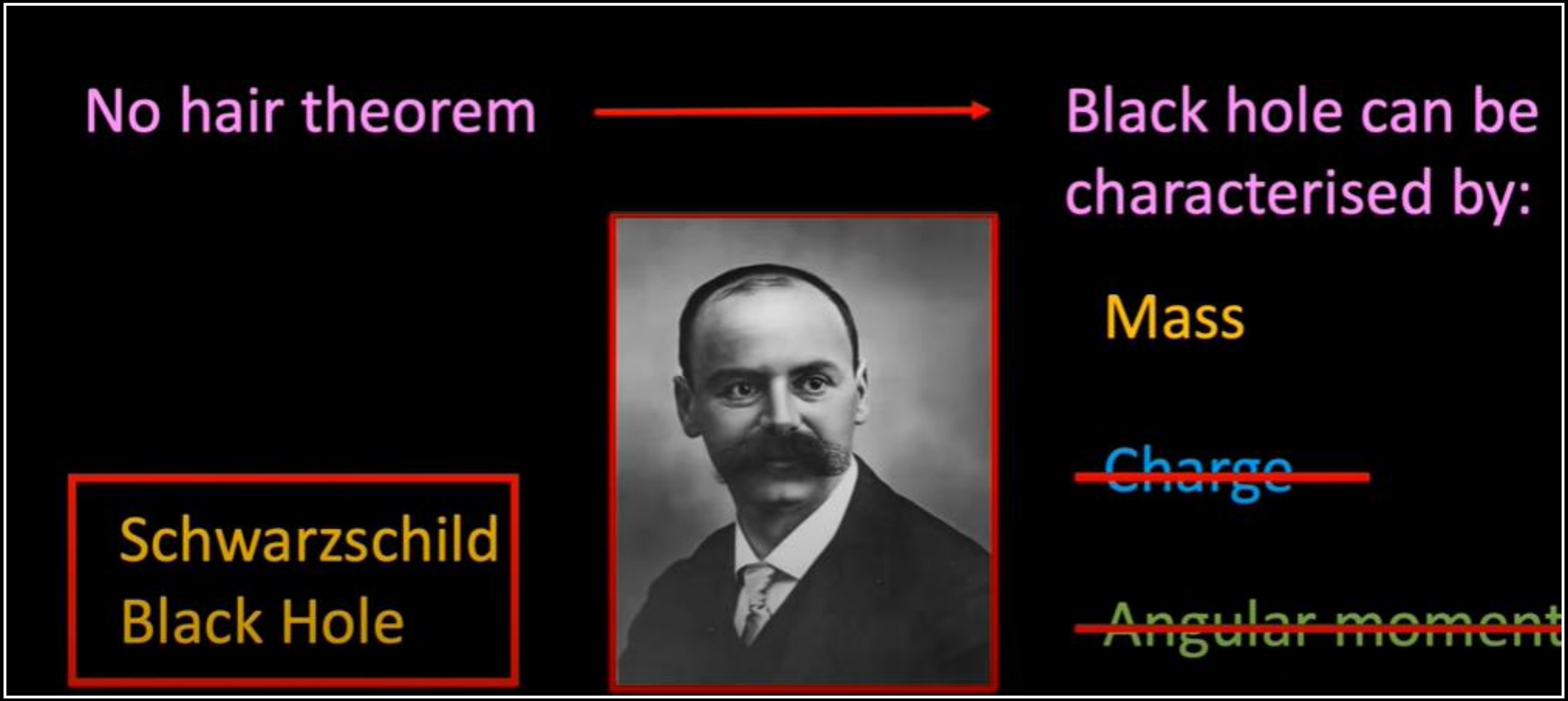


აორთქლების სიჩქარე დამოკიდებულია ზომაზე

- ზომა კავშირშია სიმრუდესთან
- რაც უფრო მაღალია სიმრუდე, მით უფრო მაღალია უარყოფით ენერგიის ნაწილაკის არსებობის ალბათობა შავ ხვრელში

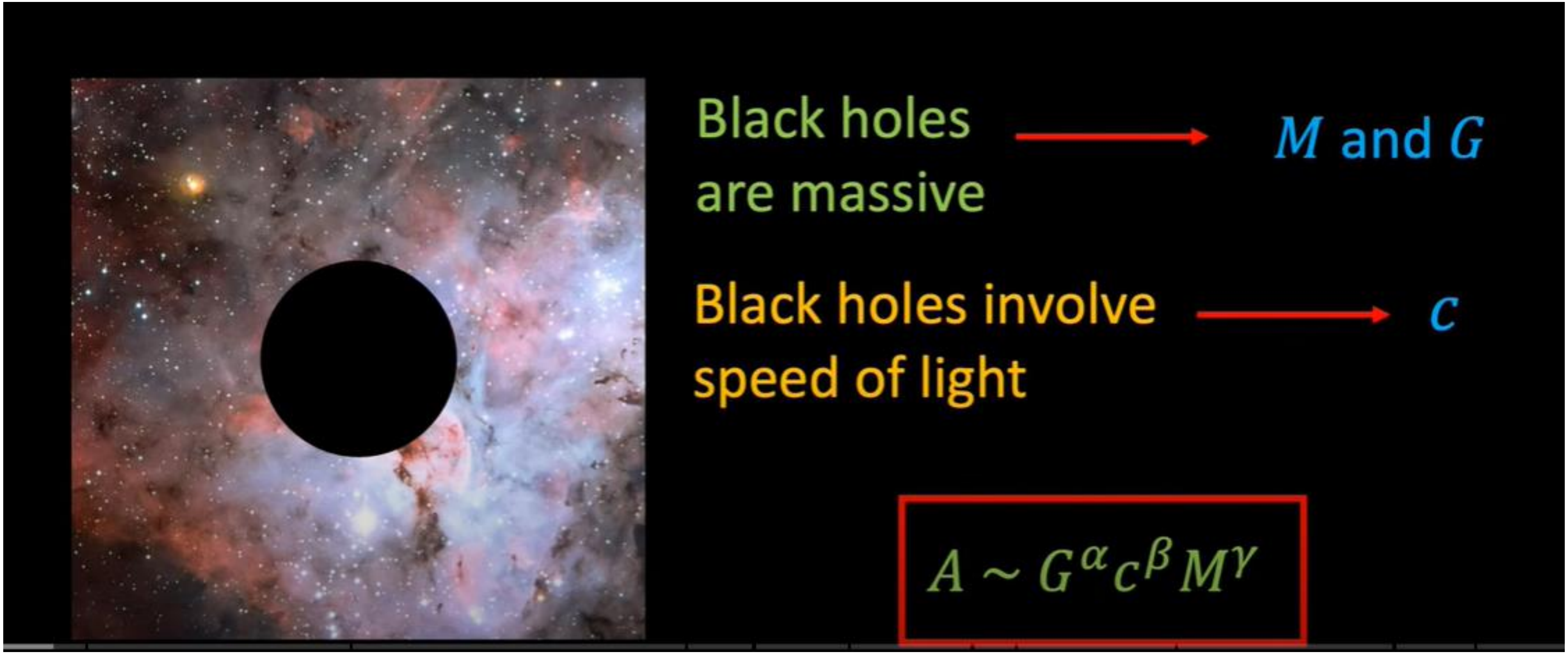
შავ ხვრელს შეგვიძლია შევუსაბამოთ ტემპერატურა





შევეცადოთ განზომილებათა ანალიზით გამოვიყვანოთ ჰოკინგის ფორმულა

ფართობისათვის :



$$[A] = [G]^{\alpha}[c]^{\beta}[M]^{\gamma}$$

$$L^2 = (L^3M^{-1}T^{-2})^{\alpha}(LT^{-1})^{\beta}M^{\gamma}$$

$$L^2T^0M^0 = L^{3\alpha+\beta}T^{-2\alpha-\beta}M^{-\alpha+\gamma}$$

$$\begin{aligned} 3\alpha + \beta &= 2 \\ -2\alpha - \beta &= 0 \\ -\alpha + \gamma &= 0 \end{aligned} \longrightarrow \begin{aligned} \alpha &= 2 \\ \beta &= -4 \\ \gamma &= 2 \end{aligned}$$

$$\boxed{A \sim G^{\alpha}c^{\beta}M^{\gamma}} \longrightarrow \boxed{A \sim \frac{G^2M^2}{c^4}}$$

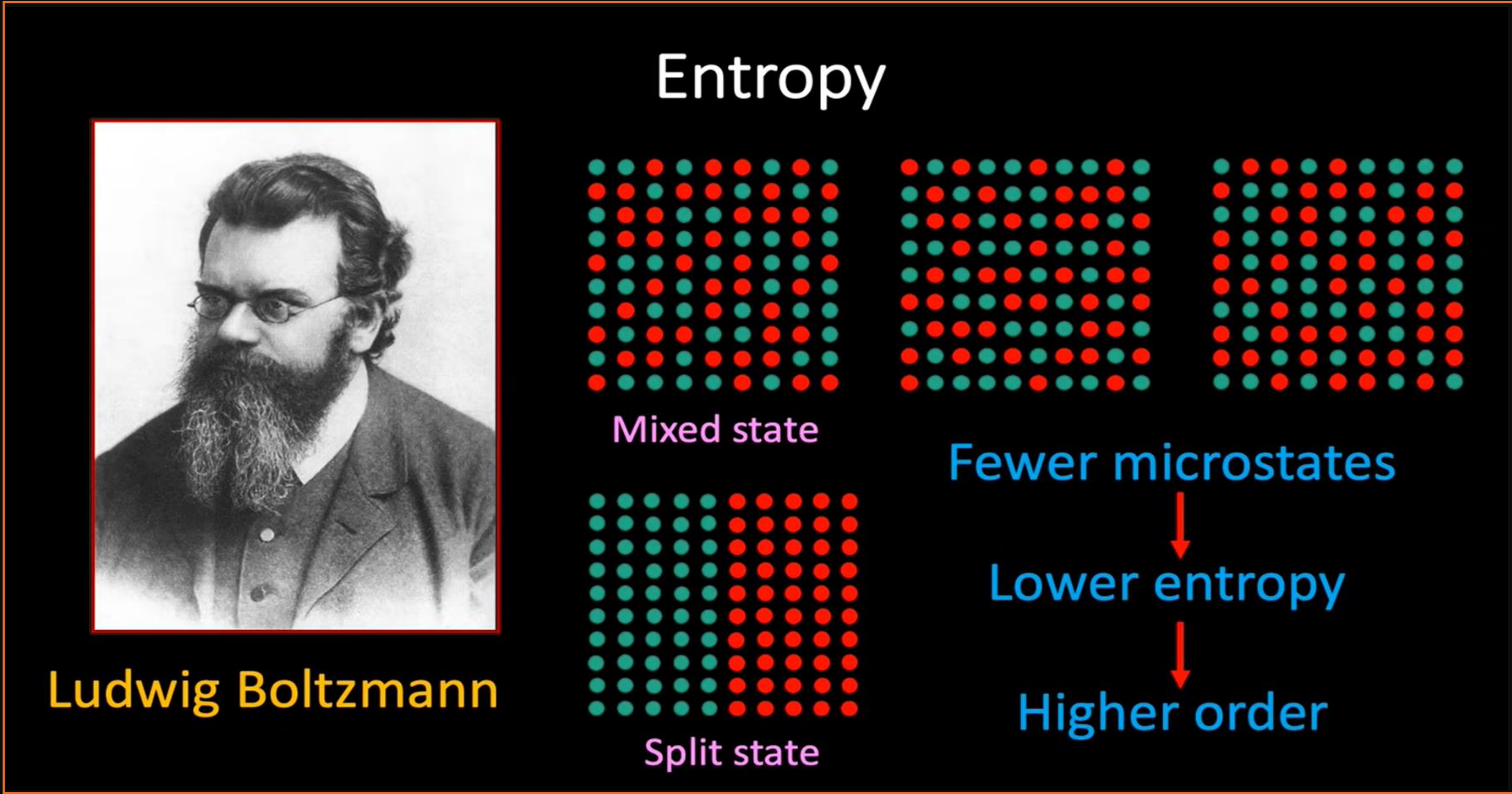
$$\boxed{A = \frac{16\pi G^2M^2}{c^4}}$$

მნიშვნელოვანი დაკვირვება:

- კლასიკური მექანიკის თანახმად დროის გასვლასთან ერთად შავი ხვრელის მასა და შესაბამისად ფართობი მხოლოდ და მხოლოდ შეიძლება გაიზარდოს

- ნებისმიერი სისტემის ენტროპია იზრდება ან უცვლელი რჩება

გამოვიყენოთ თერმოდინამიკული მეთოდები:



$$S = k_B \ln(W)$$

$$S \propto A \longrightarrow S = \eta A$$

How do we determine η?

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

$$[S] = \frac{[E]}{[T]} = ML^2T^{-2}\theta^{-1}$$

$$\eta = \frac{S}{A} \longrightarrow [\eta] = \frac{[S]}{[A]} = MT^{-2}\theta^{-1}$$

η მუდმივია, ე.ი. სხვა მუდმივებით უნდა წარმოჩინდეს

Gravity $\longrightarrow G$

Light $\longrightarrow c$

Heat $\longrightarrow k_B$

Quantum $\longrightarrow \hbar$

$$\eta \sim G^{\alpha}\hbar^{\beta}c^{\gamma}k_B^{\delta}$$

$$[\eta] = \frac{[S]}{[A]} = MT^{-2}\theta^{-1} = [G]^{\alpha}[\hbar]^{\beta}[c]^{\gamma}[k_B]^{\delta}$$

$$MT^{-2}\theta^{-1} = \left(\frac{L^3}{MT^2}\right)^{\alpha}\left(\frac{ML^2}{T}\right)^{\beta}\left(\frac{L}{T}\right)^{\gamma}\left(\frac{ML^2}{\theta T^2}\right)^{\delta}$$

$$MT^{-2}\theta^{-1} = M^{-\alpha+\beta+\delta}L^{3\alpha+2\beta+\gamma+2\delta}T^{-2\alpha-\beta-\gamma-2\delta}\,\theta^{-\delta}$$

$$\alpha = -1$$
$$\beta = -1$$
$$\gamma = 3$$
$$\delta = 1$$

შედეგად:

$$S = \eta A \sim G^{-1}\hbar^{-1}c^{3}k_B^{1}A \sim \left(\frac{k_B c^3}{\hbar G}\right)A$$

ჰოკინგმა აჩვენა რომ:

$$\boxed{S = \left(\frac{k_B c^3}{4\hbar G}\right)A}$$

თერმოდინამიკის პირველი კანონიდან:

$$dE = dQ + dW$$

$$dW = 0$$

$$dS = dQ/T$$

$$dE = TdS$$

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

$$E = Mc^2$$

$$T = \mathrm{c}^2 \left(\frac{dM}{dS}\right) = \mathrm{c}^2 \left(\frac{dS}{dM}\right)^{-1}$$

$$\boxed{S = \left(\frac{k_B c^3}{4\hbar G}\right) A}$$

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

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

ჰოკინგის ტემპერატურა:

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

$$T = c^2 \left(\frac{dS}{dM}\right)^{-1}$$

$$\frac{dS}{dM} = \frac{8\pi k_B G M}{\hbar c}$$

$$\boxed{T = \frac{\hbar c^3}{8\pi k_B G M}}$$

ტემპერატურის შეფასება საზოგადოდ:

$$M \sim 3M_{\odot} \qquad T = 2\times10^{-8}K \qquad \ll 2.7K$$

$$\sim 6 \times 10^{30}kg$$

$$\boxed{T \sim \frac{1.227\times10^{23}}{M}} \longleftarrow \boxed{T = \frac{\hbar c^3}{8\pi k_B G M}}$$

დაშლის დროის შეფასება:

$$P = -\frac{dE}{dt} = \frac{\pi^2}{60}\left(\frac{k_B^4}{\hbar^3 c^2}\right) A T^4 = \left(\frac{\hbar c^6}{15360\pi G^2}\frac{1}{M^2}\right)$$

$$E = Mc^2 \longrightarrow \frac{dM}{dt} = -\left(\frac{\hbar c^4}{15360\pi G^2}\frac{1}{M^2}\right)$$

$$M^2 dM = -\left(\frac{\hbar c^4}{15360\pi G^2}\right) dt$$

$$\int_0^t M^2 dM = -\left(\frac{\hbar c^4}{15360\pi G^2}\right) \int_0^t dt$$

$$\frac{M^3(t)}{3} - \frac{M^3(0)}{3} = -\left(\frac{\hbar c^4}{15360\pi G^2}\right)t$$

$$t = t_{evap} \longrightarrow M(t_{evap}) = 0$$

$$\frac{M^3}{3} = \left(\frac{\hbar c^4}{15360\pi G^2}\right) t_{evap}$$

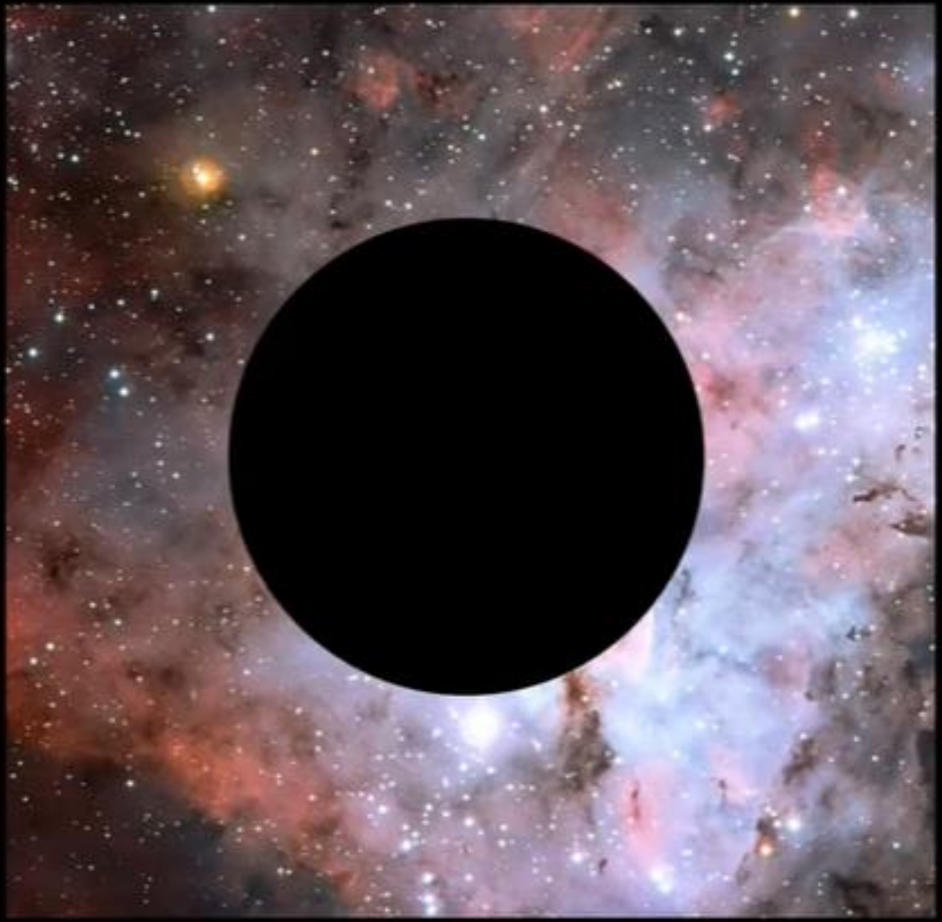
$$t_{evap} = \left(\frac{5120\pi G^2}{\hbar c^4}\right) M^3 \sim 10^{-16} M^3$$

$$M \sim 3M_{\odot} \longrightarrow t_{evap} \sim 10^{76} s \sim 10^{68} \text{ years}$$

The information paradox

What happens to all the information?

Information has been lost



Thermal radiation

Has no memory

გმადლობთ ყურადღებისთვის!!!

- გამოყენებული წყაროები:
- https://www.youtube.com/watch?v=QUdhxX_Oq3A&t=553s&ab_channel=PhysicsExplained
- https://www.youtube.com/watch?v=isezfMo8kWQ&t=622s&ab_channel=ScienceClicEnglish