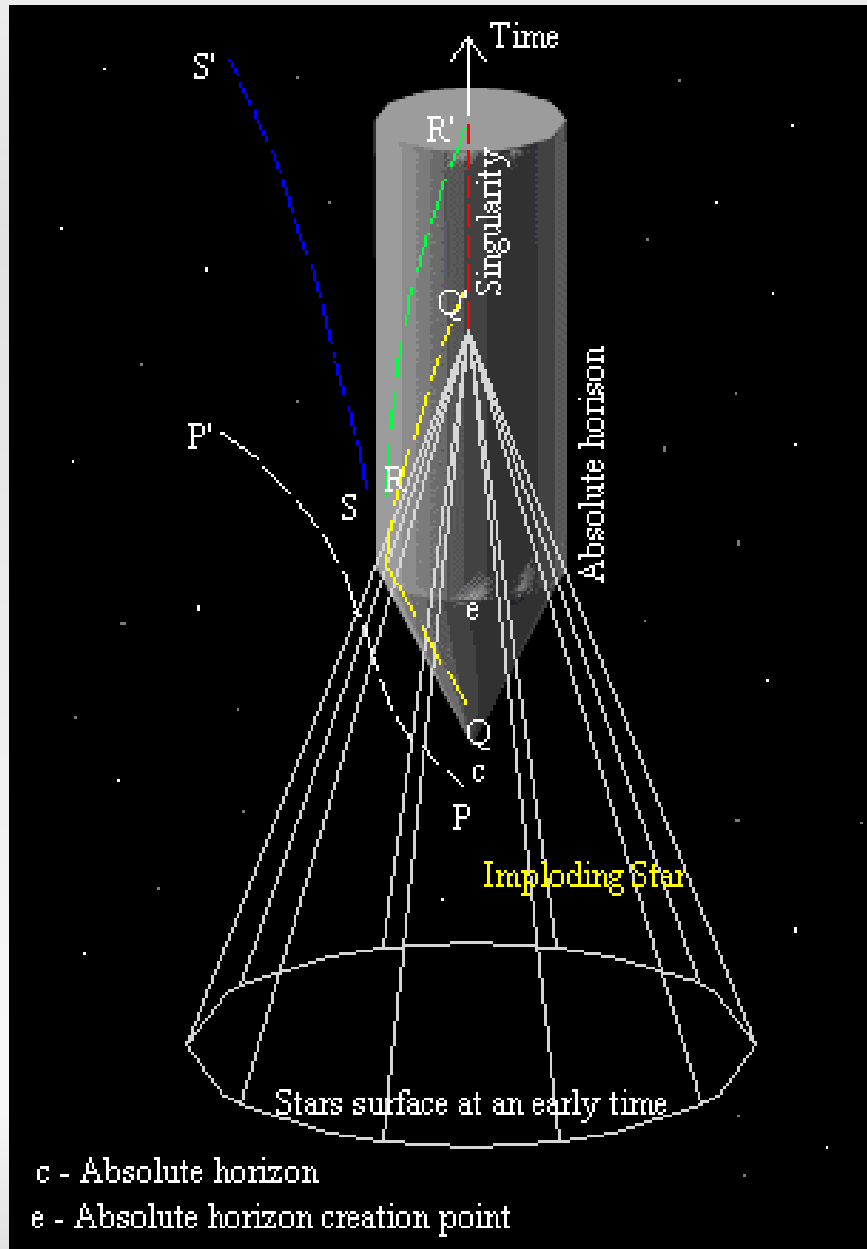


Juodųjų skylių entropija

opit@hardcore.lt

Kas yra juodoji skylė?



- Galutinė masyvių žvaigždžių evoliucijos stadija: degeneracinis neutronų slėgis nebegali palaikyti pusiausvyros su gravitacija
- Erdvėlaikis yra taip iškreivintas, kad niekas nebegali pabėgti iš juodosios skylės

Kas yra juodoji skylė?

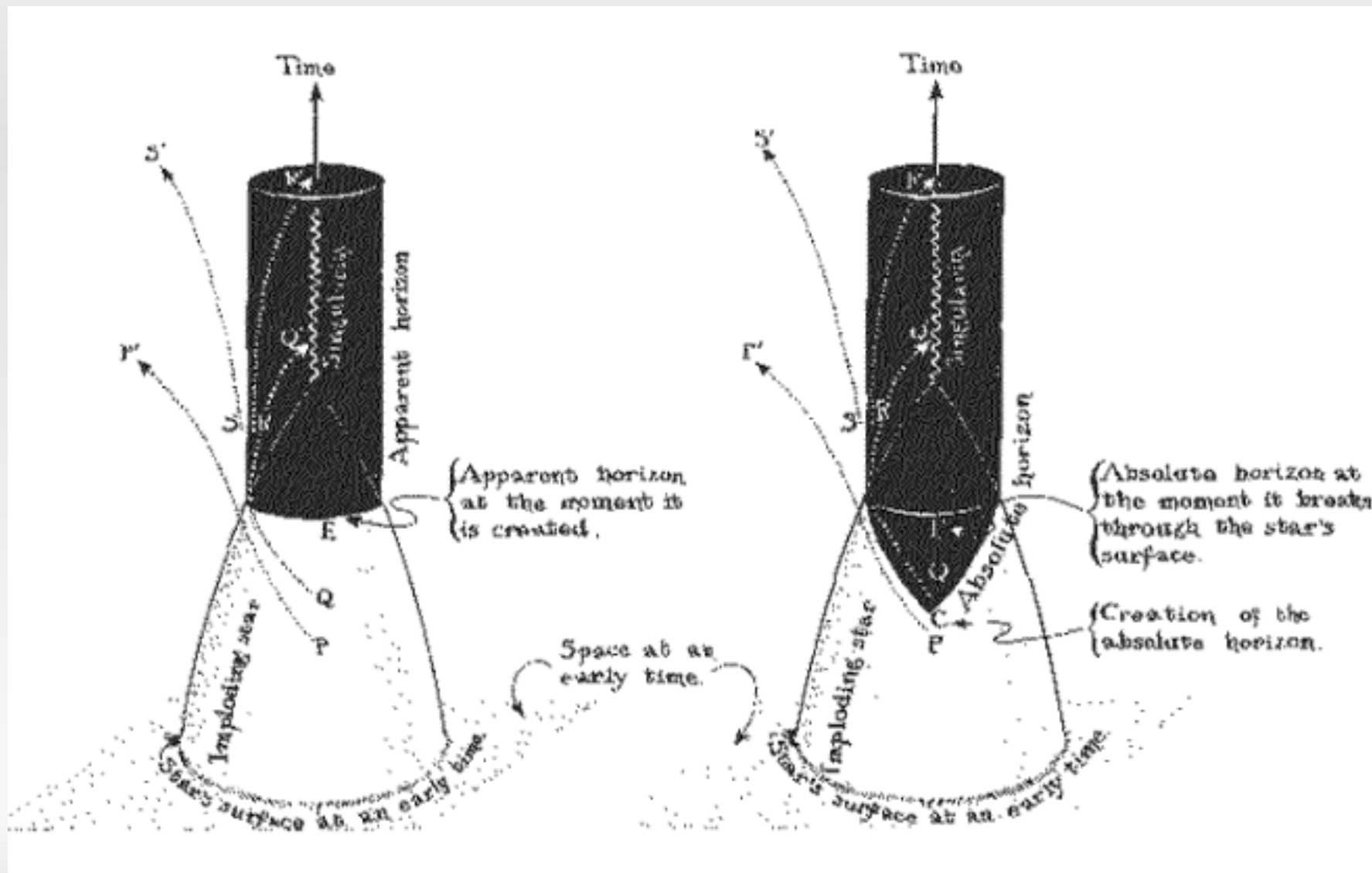
- Nematome singularumo, esančio viduje, priežastiniais ryšiais nesusiję erdvės regionai
- 4 tikslūs GRT sprendiniai (Schwarzschild, Kerr, Reissner-Nordström, Kerr-Newman)
- "juodosios skylės neturi plaukų" – jas charakterizuoja tik masė, krūvis ir kampinis momentas.

Absoliutus ir regimasis įvykių horizontas

- Klasikinis (Penrose ir kt.) apibrėžimas: įvykių horizontas – tai išorinė riba, ties kuria fotonai nebegali ištrūkti iš erdvės regiono.
- Jis nelabai korektiškas: priklauso nuo atskaitos sistemos, keičia vietą, kai į juodąją skylę įkrenta medžiaga
- Hawkingo apibrėžimas: tai riba tarp erdvėlaikio regionų, kurie gali keistis signalais su išore, ir tų, kurie negali (priežastinis ryšys).



Absolutus ir regimasis įvykių horizontas



Iš K. Thorne – *Black Holes and Time Warps*

Kaip suprasti jų entropiją?

– Jei entropiją interpretuojame kaip *netvarką*, kaip galime kalbėti apie juodųjų skylių entropiją? Joje nėra nieko, kas galėtų būti netvarku, visos savybės apibūdinamos 3 skaičiais. Jos nieko neišspinduliuoja ir sugeria viską – paviršiaus temperatūra turi būti lygi 0 K. Niekas negali iš jų ištrūkti, nesvarbu, kokio tipo medžiaga ten pakliūna.

– Vadinasi, galime mažinti Visatos entropiją tiesiog įmesdami didelės entropijos medžiagą į juodąsias skyles (Beckensteinas).

Juodųjų skylių mechanikos dėsniai

- B. Carter, S. Hawking, J. Bardeen – dėsniai suformuluoti stacionarioms juodosioms skylėms, tačiau įmanoma apibūdinti ir bendresnius atvejus

Nulinis juodųjų skylių mechanikos dėsnis

- Stacionarios (nusistovėjusios) juodosios skylės paviršiaus gravitacija κ yra pastovi:

- $\kappa = 1/4 M$

- κ apibrėžiama kaip gravitacinis pagreitis, jaučiamas nejudančio stebėtojo, esančio virš horizonto

Pirmasis juodųjų skylių mechanikos dėsnis

$$dM = \frac{\kappa}{8\pi} dA + \Omega dJ + \Phi dQ,$$

čia dA – ploto pokytis, Ω – kampinis greitis, J – kampinis momentas, Φ – elektrostatinis potencialas, Q – krūvis, dM – masės/energijos pokytis.

- Fizikinė prasmė: analogiškas energijos tvermės dėsniai.

Hawkingo prielaida

Juodosios skylės absoliutaus įvykių horizonto paviršiaus plotas, laikui bėgant, gali tik didėti arba likti toks pats:

$$dA/dt \geq 0$$

– II termodinamikos dėsnis:

$$dS/dt \geq 0$$

Apibendrintas II dėsnis

– Beckensteinas: juodosios skylės turi entropiją S_{BH} , kuri proporcinga absoliutaus horizonto paviršiaus plotui:

$$S_{\text{BH}} = \frac{kA}{4\ell_{\text{P}}^2}$$

– Apibendrintoji entropija gali tik didėti:

$$S' \equiv S + S_{\text{bh}}$$

$$\Delta S' \geq 0.$$

Apibendrintas II dėsnis II

- Įmetus medžiagą į juodąją skylę, atrodo, kad "paprasta" Visatos entropija sumažėja
- II juodųjų skylių mechanikos dėsnis regimai yra pažeidžiamas Hawkingo spinduliavimo metu, kai atsižvelgiama į kvantinius efektus
- GSL nepažeidžiamas, bendra Visatos entropija gali tik didėti arba nekisti: juodojoje skylėje dingusią įmestos medžiagos entropiją su kaupu kompensuoja Hawkingo spinduliavimo entropija.

Trečiasis juodųjų skylių mechanikos dėsnis

Ekstremalios – itin mažos – juodosios skylės turi nykstantai mažą paviršiaus gravitaciją.

Trečiasis dėsnis teigia, kad **neįmanoma baigtiniu žingsnių skaičiumi sukurti juodosios skylės, kurios $\kappa = 0$.**

Analogiškas III termodinamikos dėsniai

Termodinamikos dėsniai – apibendrinimas

Dėsnis	Termodinamika	Nesisukanti juodoji skylė
0	Termodinaminėje pusiausvyroje $T = \text{const}$	$\kappa = \text{const}$, kai juodoji skylė stacionari
1	$dU = \delta Q - \delta W$	$d(mc^2) = \frac{\kappa c^2}{8\pi G} dA + \Omega dJ - \phi dq$
2	$dS \geq 0$	$dA \geq 0$
3	Negalime pasiekti $T = 0$	Negalime pasiekti $\kappa = 0$

Hawkingo spinduliuotė

- Dėsniai būtų analogiškai klasikiniam termodinamikos dėsniams (A ekvivalentiškas S , $\kappa - T$), tačiau neaišku, kaip apibrėžti juodųjų skylių temperatūrą:
- Jei pripažįstame termodinamikos dėsnių ekvivalentiškumą, T būtų nelygi 0 K, o tai reikštų, kad juodosios skylės turi spinduliuoti.
- Hawkingo temperatūra: ($G = c = \hbar = k = 1$)

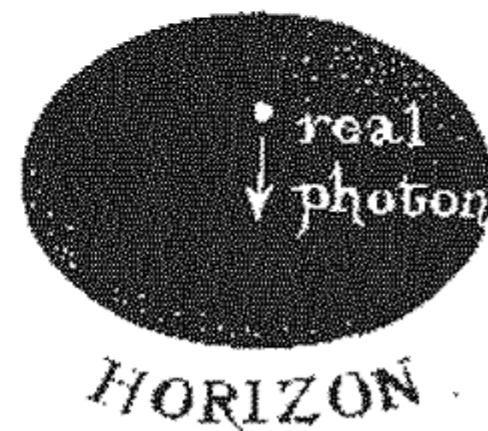
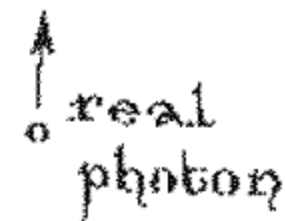
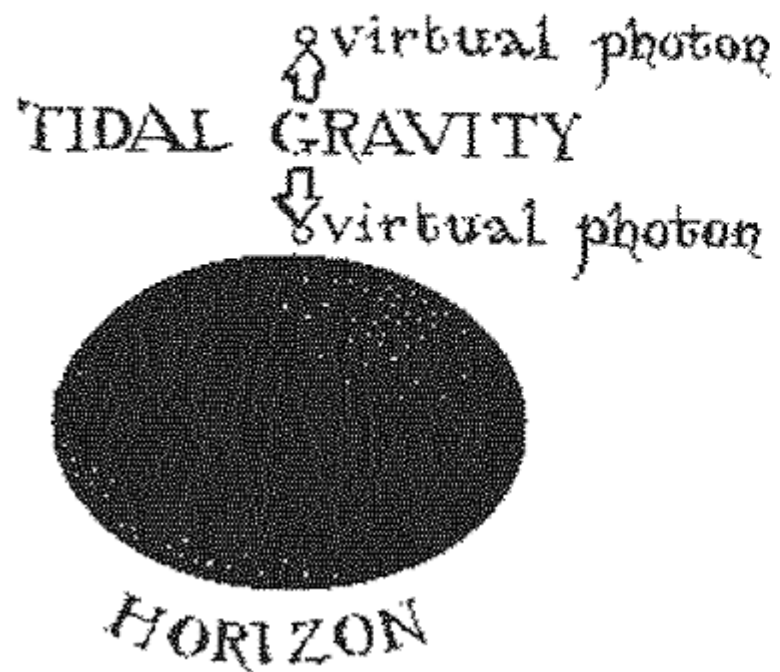
$$T_H = \frac{\kappa}{2\pi}$$

Entropija turi fizikinę reikšmę ir yra proporcinga paviršiaus plotui.

Hawkingo spinduliuotės mechanizmas

- Pusiau kvantmechaninis aprašymas – kvantinis laukas iškreivintame erdvėlaikyje
- Dalelių skaičius nutolusiuose erdvės regionuose atitinka tobulo juodo kūno spinduliavimą, $T = T_H$
- 30 Saulės masių juodosios skylės temperatūra
 $T = 2 \times 10^9 \text{ K}$

Hawkingo spinduliuotė II



Kas yra juodųjų skylių entropija?

$$S_{\text{BH}} = \frac{kA}{4\ell_{\text{P}}^2}$$

$$S = 10^{79} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$$

Ką tai nusako? Kas gali būti paskirstyta juodosios skylės viduje? Ar ji – logaritmas visų būdų ir būsenų, kuriomis medžiaga pateko į juodąją skylę?

– Informacinė entropija: negalime sužinoti, iš ko juodoji skylė buvo sudaryta

Kas yra juodųjų skylių entropija?

- "Susiejimo entropija" – kvantiniai laukai juodosios skylės viduje bei išorėje yra susiję (koreliuoti)
- Thorne ir kt: tai paprasta karštos ir plonos juodosios skylės atmosferos entropija, dalelės gali tuneliuoti iš anapus horizonto, tačiau jų energija labai sumažėja dėl raudonojo gravitacinio poslinkio.

Literatūros sąrašas

- Claus Kiefer – Towards a Full Quantum Theory of Black Holes, 1998
- Adam D. Helfer – Do black holes radiate?, 2003
- Robert M. Wald – The Thermodynamics of Black Holes, 2000
- Ted Jacobson – Introductory lectures on black hole thermodynamics
- Kip Thorne – Black Holes and Time Warps, 1994