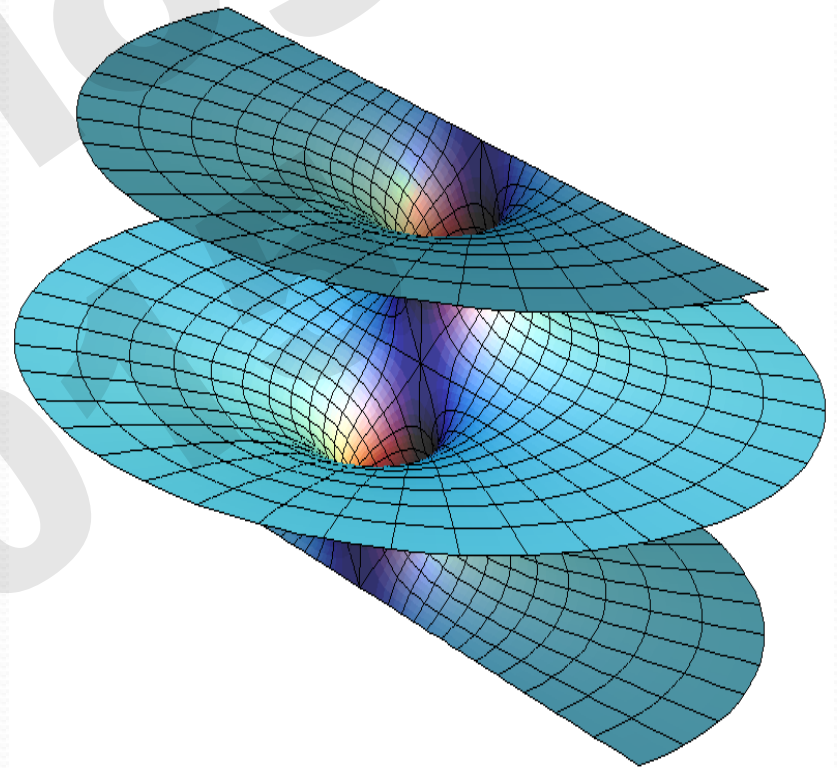


Singularnosti, horizonti

12. 06. 2015.

Motivacija?

- Prostorvremenska 4-D mnogostrukost ima (u opštem slučaju) **granice!**
- Sa kojim delom mnogostrukosti smo u kauzalnom kontaktu?
- Šta nam klasična kosmologija može reći o samom Velikom prasku?
- Koliki deo svemira je empirijski dostupan?



Singularnosti

- **lokalne**

- unutar crnih rupa („prihvaćeno“)
- bele rupe? (kontroverzno)
- gole singularnosti? (izuzetno kontroverzno!)

- **globalne**

- Veliki prasak („prihvaćeno“)
- *Big Crunch? Big Rip?* (kontroverzno)

Prisetimo se crnih rupa...

- Masa M u koordinatnom početku generiše Švarcšildovu metriku:

$$ds^2 = -c^2 \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} + r^2 (d\vartheta^2 + \sin^2 \vartheta d\varphi^2)$$

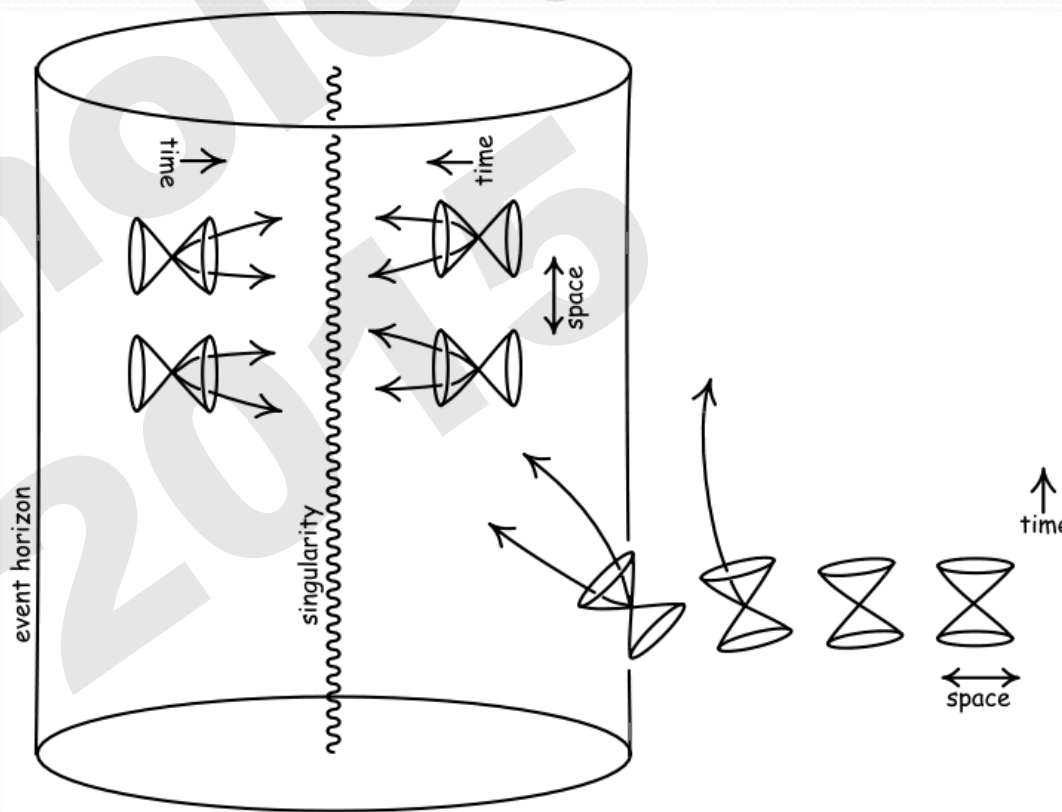
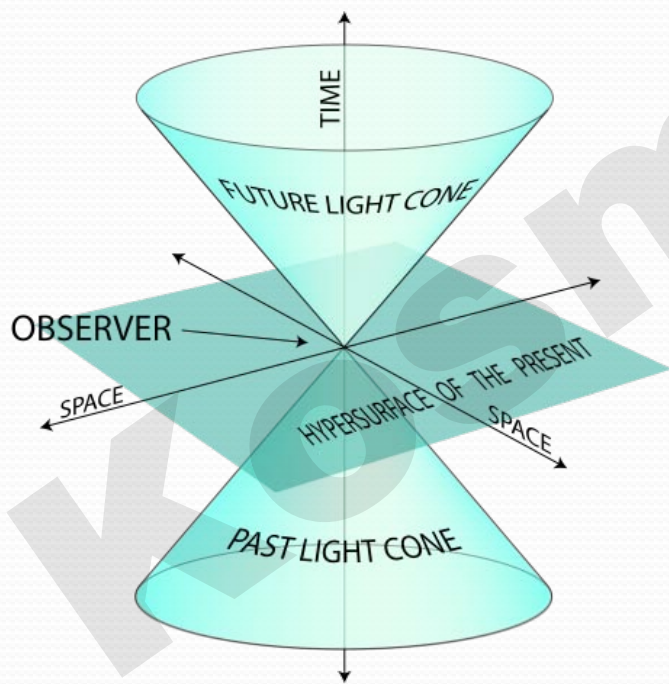
- što nije definisano za

$$r = 0 \quad \text{i} \quad r = r_g \equiv \frac{2GM}{c^2}$$

singularnost

horizont
događaja

U terminima svetlosnih konusa



Komplikovanije crne rupe

	Nerotirajuće ($J = 0$)	Rotirajuće ($J \neq 0$)
Nenaelektrisane ($Q = 0$)	Schwarzschild	Kerr
Naelektrisane ($Q \neq 0$)	Reissner–Nordström	Kerr–Newman

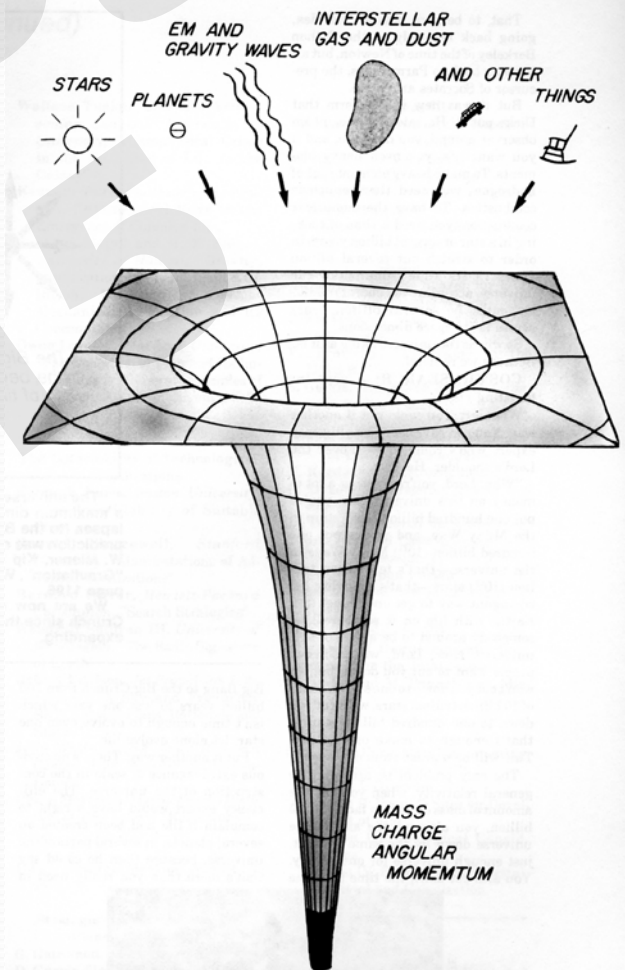
- I to je to!
- **Spoljašnji posmatrač (= van horizonta) vidi najviše tri broja: M , J , Q i ništa više.** – „no hair“ teorema!
- Sva druga informacija („kosa“) nestala je unutar horizonta i zauvek je nedostupna u klasičnoj teoriji (Wheeler, Bekenstein)

Crna rupa je ultimativna jednostavnost (spolja, u klasičnoj teoriji)

- Gubitak informacije o početnim uslovima!
- Entropija crnih rupa (Bekenstein-Hawking):

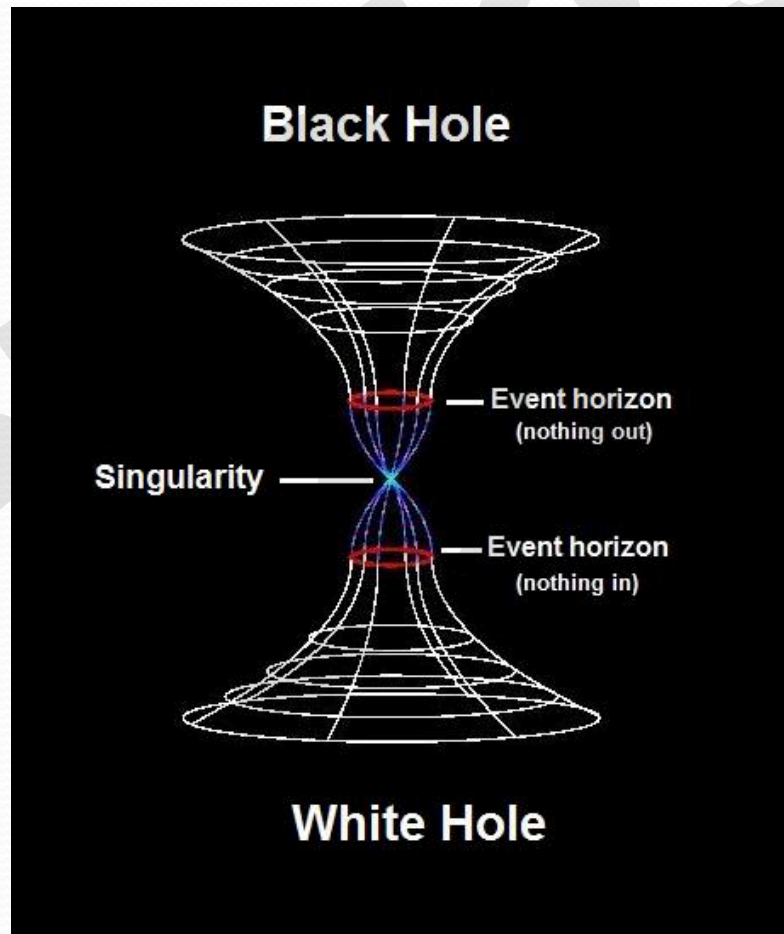
$$S_{BH} = \frac{kc^3}{G\hbar} \frac{A}{4} = \frac{4\pi kG}{c\hbar} M^2$$

- U kvantnoj gravitaciji (👁️) crna rupa može biti „čupava“ (neabelove gauge teorije, skyrmioni)...



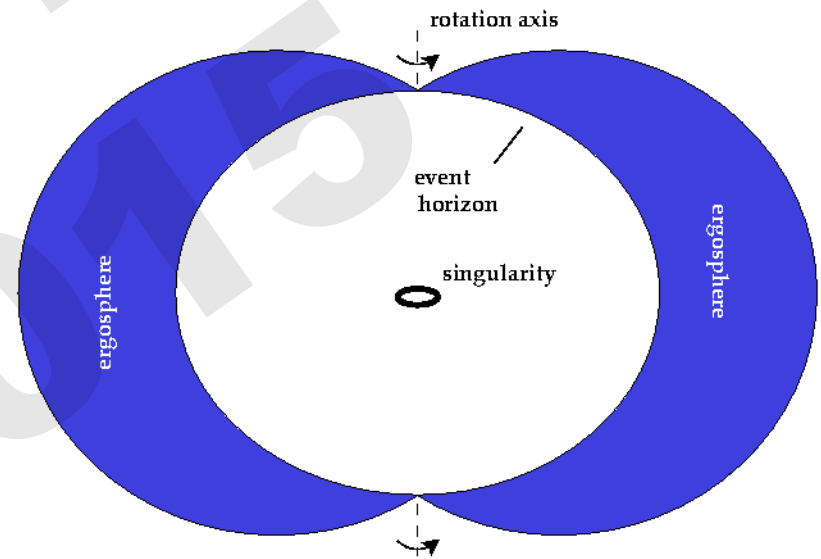
Diagrammatic representation of a black hole

Simetrija smera vremena...

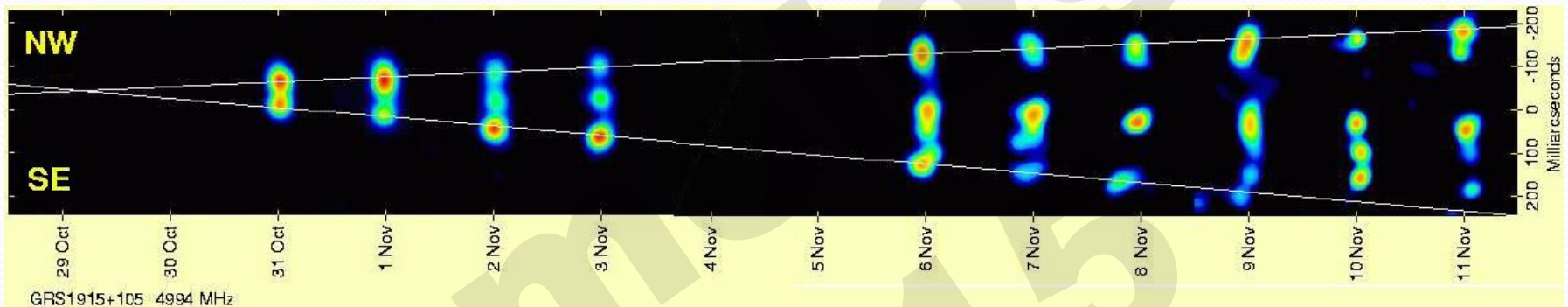


Kerrove crne rupe - najrealističnije

- **Ergosfera** – oblast u kojoj se ne može mirovati!
- Statički limit – spoljna granica ergosfere
- Lense-Thirringova precesija dominantna u ergosferi
- Iz Kerrove crne rupe može se izvući korisna energija (Penrose-Christodolou procesom) – do 29% mc^2 !



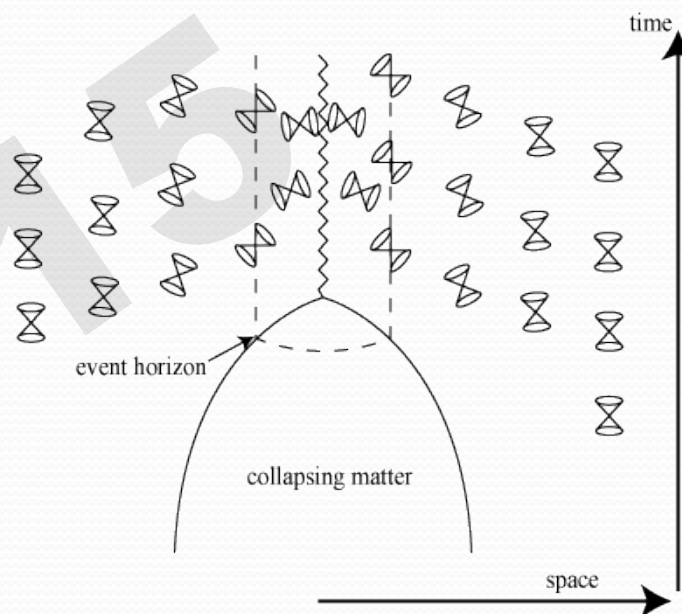
Primer: V1487 Aquilae



- Mikrokvazar 11 kpc daleko, otkriven 1994 (GRS 1915+105).
- Tamni pratilac ima 18 Sunčevih masa (\Rightarrow mora biti crna rupa)!
- Manifestuje superluminalne mlazeve – najbolji model Kerrove metrike sa $T = 8.69 \times 10^{-4}$ s (!!!)
- Objekat sa najvećim (specifičnim) ugaonim momentom u svemiru...

Ali kako da znamo da je unutar horizonta događaja **zaista** singularnost?

- Moraju li singularnosti **zaista** da postoje?
- Da li bi nešto moglo da spreči kolaps (npr. jednačina stanja, asimetrija)?
- Penrose-Hawkingove teoreme o singularnostima (cca. 1973): **NE!**
- Mnogo verzija, sve sa 3 sastojka:
 - energetski uslov;
 - globalna hiperboličnost („pozadina“); i
 - gravitacija u posmatranoj oblasti dovoljno snažna (*trapped surface*).



Sve ovo važi i za globalnu singularnost!

$$a(t) \xrightarrow{t \rightarrow 0} 0$$

- Singularnost svih Fridmanovih modela se ne može izbeći nikakvim trikom (asimetrija, jednačina stanja, itd.)
- + kosmološka verzija no-hair teoreme!



Košnica 15. godina

Hipoteza kosmičke cenzure

- Gola singularnost = veliki problem, zbog narušenja kauzalnosti (slično kao i CTC)
- Penrose (1969):

Hipoteza kosmičke cenzure: Sve singularnosti u prostor vremenu moraju biti sakrivene unutar horizonta događaja.

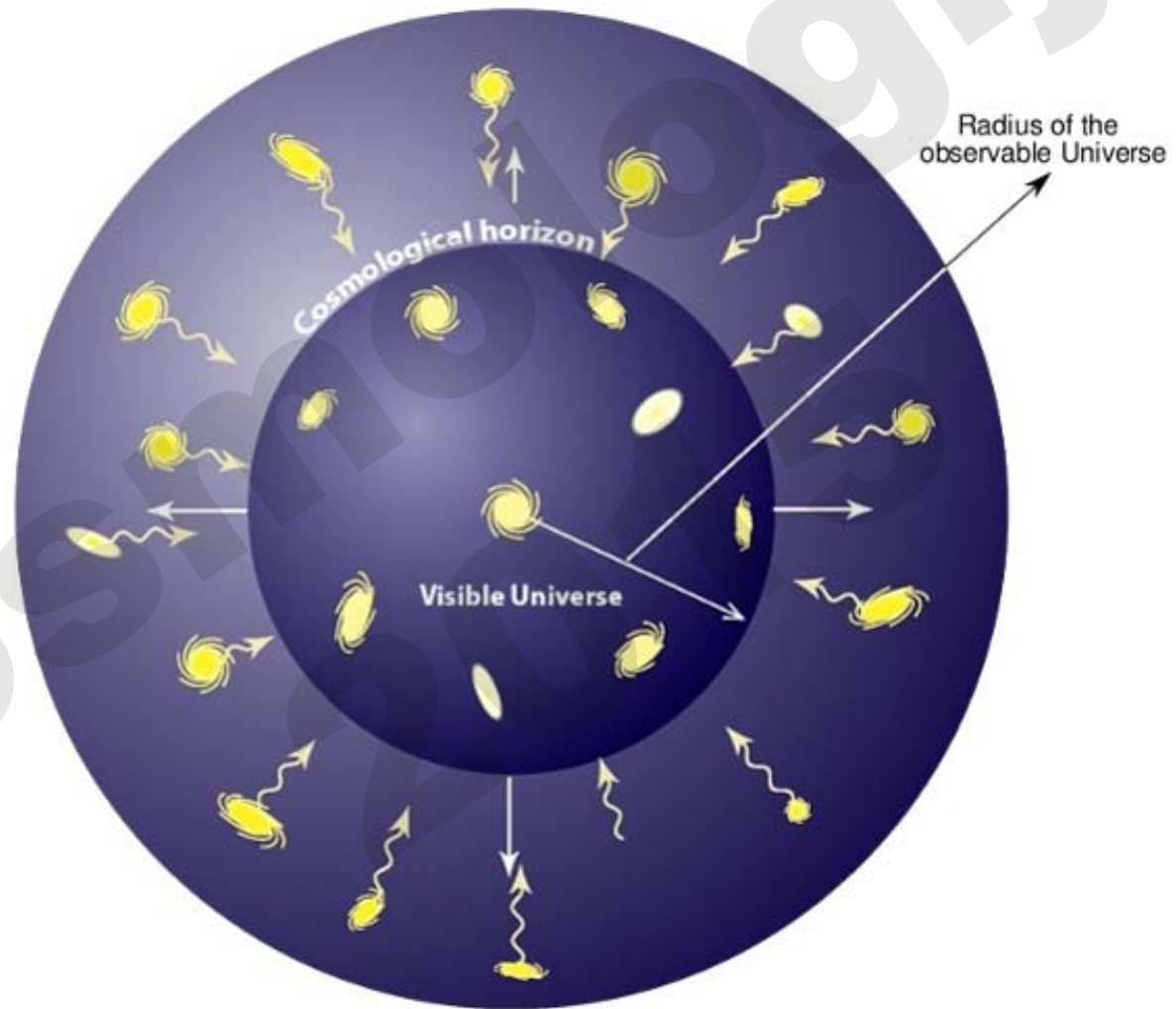
- Šta se dešava između horizonta i singularnosti?

Jaka hipoteza kosmičke cenzure: Klasična trajektorija svih posmatrača je predvidljiva iz početnih uslova.

- Ovo znači da je fizika smisljena i unutar horizonta...

Što je jako dobro, jer...

- ...smo mi okruženi (kosmološkim) horizontom događaja!
- Kosmološki horizont = granica oblasti koja je kauzalno povezana (slično kao horizont na zemlji)
- Vrste kosmoloških horizonata:
 - Koordinatni
 - Čestični
 - Horizont događaja.

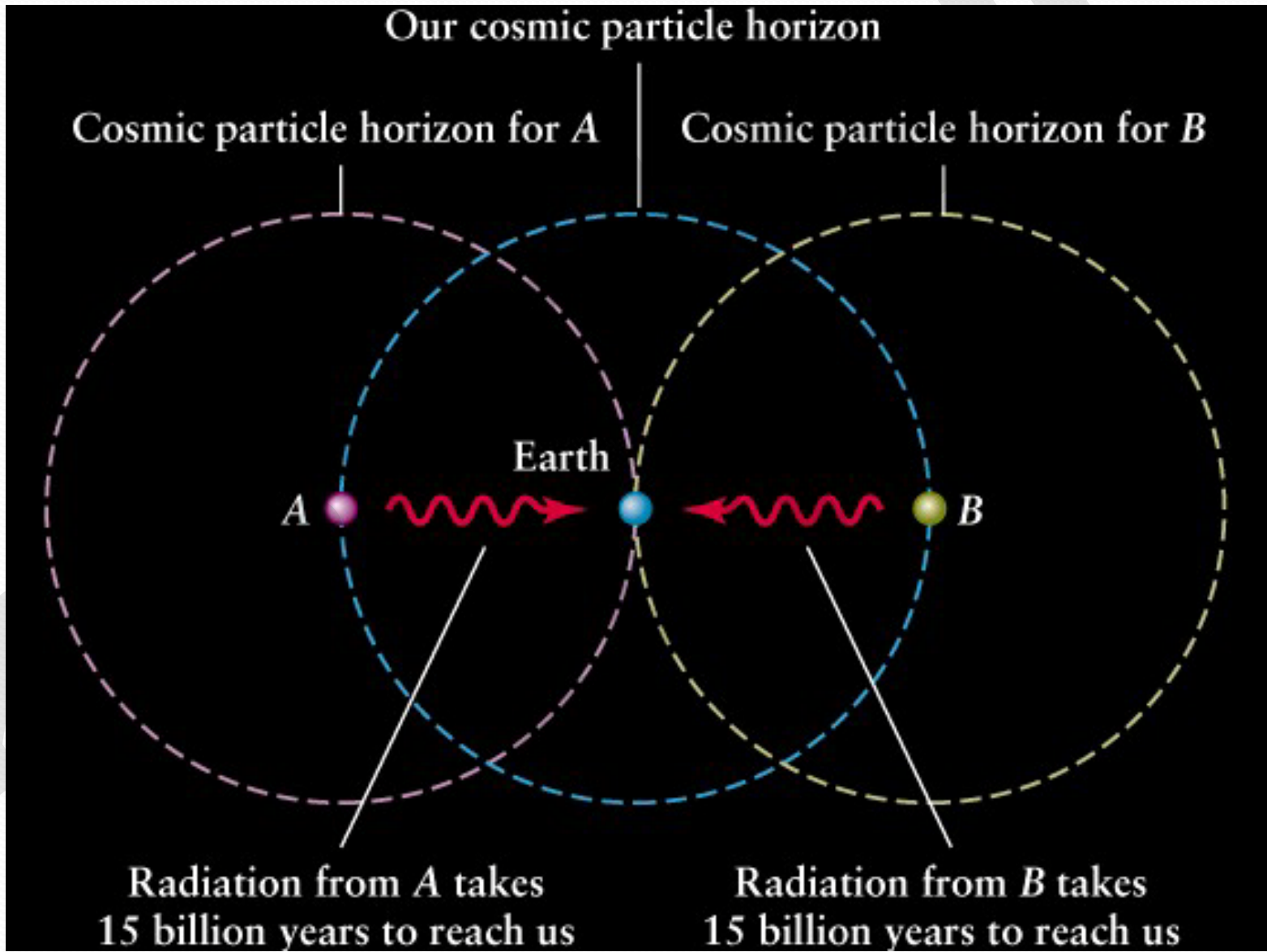


Čestični horizont

- Koliko daleko možemo da vidimo:

$$d_h(t_0) = R(t_0) \int_0^{t_0} \frac{c dx}{R(x)} = \int_0^{t_0} \frac{c dx}{a(x)}$$

- Uvek dobro definisan i konačan!
- Povećava se sa vremenom (očekivano) \Rightarrow izvori **ulaze u horizont**.
- Postoji u **svim** Fridmanovim modelima!



Our cosmic particle horizon

Cosmic particle horizon for A

Cosmic particle horizon for B

Earth

A

B

Radiation from A takes
15 billion years to reach us

Radiation from B takes
15 billion years to reach us

Kosmološka „no-hair“ hipoteza

- Gibbons & Hawking (1977)
- Kosmološka “no-hair” hipoteza: **Svi kosmološki modeli sa horizontom događaja evoluiraju u de Sitterovo prostorvreme, na taj način gubeći informaciju o početnim uslovima.**
- Nije važno kako smo tačno ušli u period dominacije vakuuma...

Kosmološki horizont događaja

- U **nekim** Fridmanovim modelima postoji i kosmološki horizont događaja – maksimalna udaljenost do koje se može videti **ikada**:

$$d_{hd} = R(t_0) \int_{t_0}^{t_{\max}} \frac{c dx}{R(x)} = \int_{t_0}^{t_{\max}} \frac{c dx}{a(x)}$$

- gde je

$$t_{\max} = \begin{cases} \infty, & \text{čno šireći svemir} \\ R(t_{\max}) = 0, & \text{rekolapsirajući svemir} \end{cases}$$

Kako stoje stvari...

- ...naš realistični λ CDM svemir je upravo takve vrste – asimptotski prelazi u de Sitterovu metriku!
- Veličina realističnog horizonta događaja oko 6 Gpc...
- Galaksije odlaze **preko horizonta događaja**, što **izgleda** kao da se horizont smanjuje oko nas (ustvari on ostaje isti!)...
- Ultimativna budućnost: jedino stvari koje su gravitaciono vezane sa nama (Lokalna grupa) će ostati u svemiru, sve ostalo će biti prazno!
- „povratak statičnog svemira“...