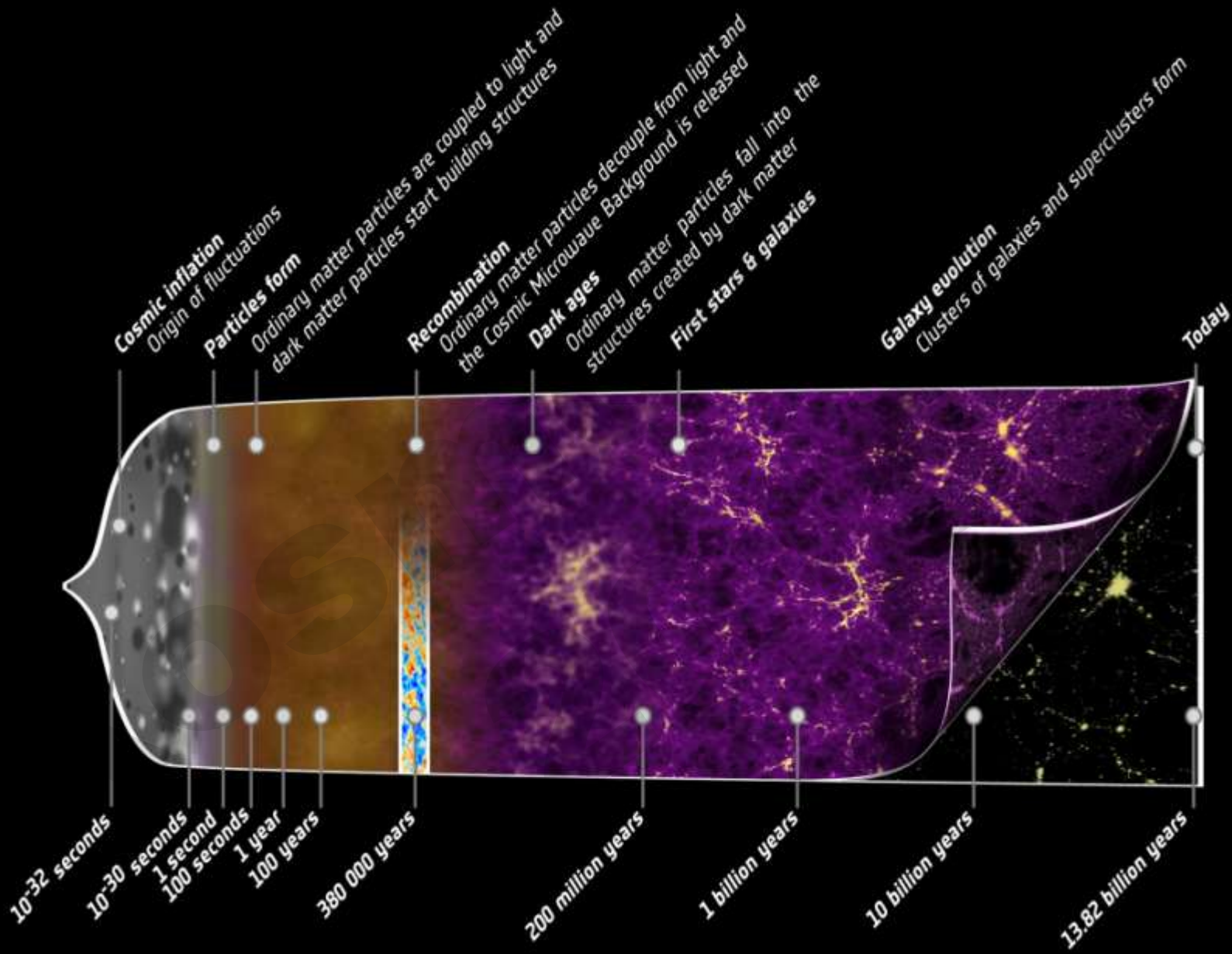


26.06.2015.

RELIKTI RANOG SVEMIRA 1: BARIONI



RELIKTI ranog svemira

- barioni
- CDM čestice
- laka jezgra (D, ^3He , ^4He , ^7Li)
- CMB fotoni / anizotropije
- primordijalni gravitacioni talasi (?)
- neutrinska pozadina (?)
- primordijalne crne rupe (??)
- tragovi rejonizacije
 - Gan-Pitersonov efekat (H)
 - Gan-Pitersonov efekat (He^+)
 - $\text{Ly}\alpha$ šuma

Ključne relacije skaliranja

- temperatura \leftrightarrow energija čestica \leftrightarrow crveni pomak \leftrightarrow faktor skaliranja \leftrightarrow vreme
- (kvazi)ravnotežna temperatura odgovara stvaranju i nastajanju čestica sa maom m za

$$E = m_{XYZ} c^2 = \frac{g_{XYZ}}{2} kT$$

- Još neke bitne relacije:

$$1 \text{ eV} \leftrightarrow 11600 \text{ K}$$

$$m_e c^2 = 511 \text{ keV}$$

$$1 \text{ g} = 5,618 \times 10^{28} \text{ MeV}$$

$$T(z) = 2,7(1+z) \text{ K}$$

Počnimo sa barionima!

- ⦿ Zašto uopšte postoji barionski svet koji vidimo oko nas?
- ⦿ Bez obzira koliko tačno ima bariona ($\Omega_b \approx 0.05$), postavlja se pitanje iz kojih procesa i koje epohe potiču?
- ⦿ Za $T \rightarrow \infty$ nijedan vezani sistem, pa ni 3 kvarka u barionima ne može opstati...
- ⦿ ...plus što imamo problem gde su antibarioni???

Dirakov epohalni rad iz 1928.



- Osnovna dinamička jednačina kvantne teorije polja:

$$i\hbar \gamma^\mu \partial_\mu \psi - mc\psi = 0$$

- gde su γ^μ Paulijeve matrice, a talasna funkcija ψ data u **spinorskom obliku**
- **Ovoga** je rešenje:

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

- što je nezgodno, jer u sistemu mirovanja daje

$$E = \pm mc^2$$

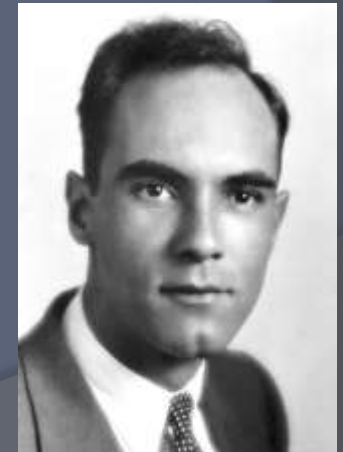
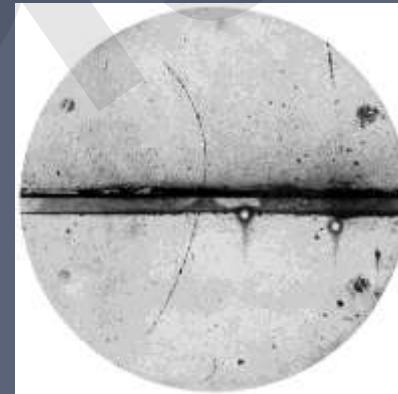
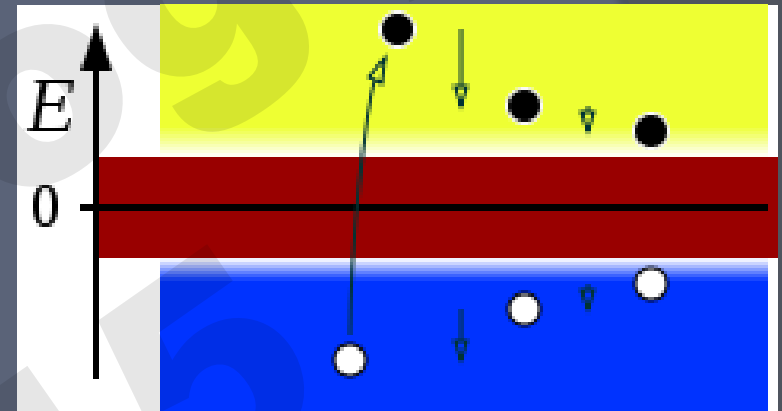
$$\begin{pmatrix} \psi_\uparrow \\ \psi_\downarrow \end{pmatrix}$$

„Večni“ problem

Ako dozvolimo čestice sa negativnom energijom, zašto one ne prelaze u sve niža i niža energetska stanja, sve do $-\infty$?

Teorija rupa

- kokosovi orasi, zvečeće pilule...
- Teorija rupa: sva negativna stanja elektrona su **već popunjena!**
- „Dirakovo more“
- Stoga, Paulijev princip sprečava da se elektroni spuštaju u stanja sa sve negativnijom energijom.
- Prelaz elektrona iz mora u „normalno“ stanje sa pozitivnom energijom praćen je pojavom rupe u Dirakovom moru.
- Rupa je nova vrsta čestice, ista kao elektron, samo suprotnog naelektrisanja!
- 1932, na Kaltehu, Karl Anderson otkriva novu česticu – **pozitron!**

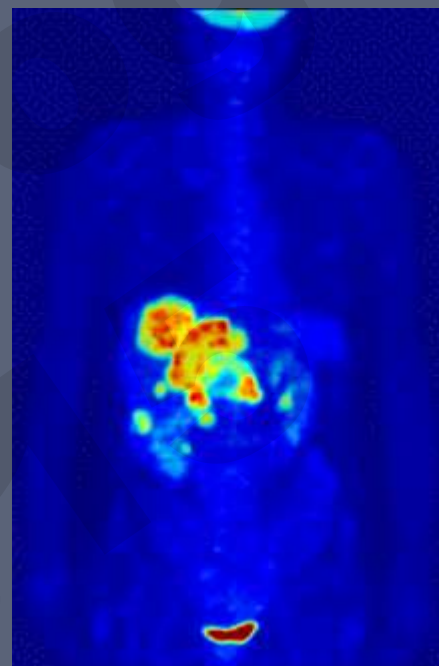
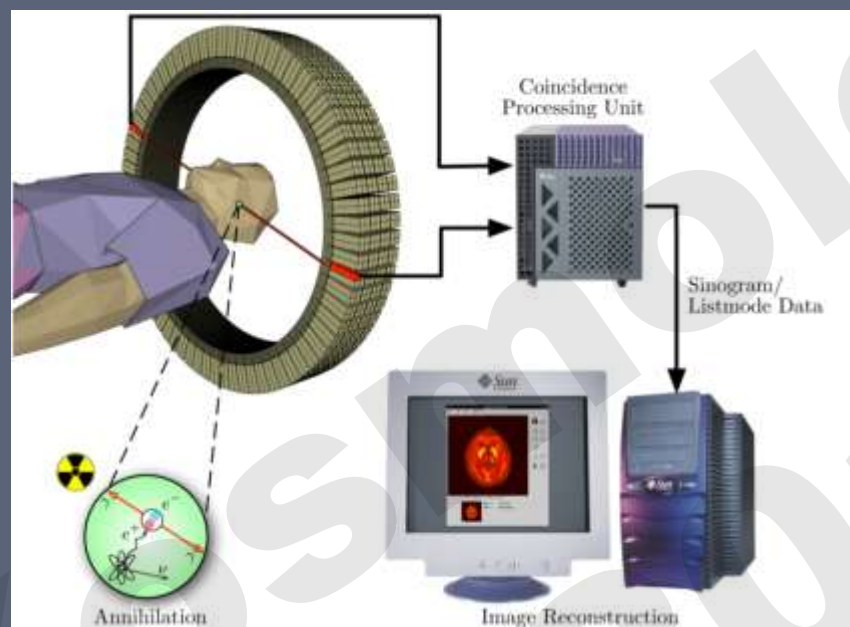


C-simetrija: svaka čestica ima svoju antičesticu!

Uz gred, antimaterija je jako korisna!



PET (pozitronska emisijska tomografija)



- Koristimo zakone održanja i osobine same anihilacije!
- Mnogo izotopa sa β^+ raspadom (^{11}C , ^{13}N , ^{15}O)
- Visoka vremenska rezolucija γ -detektora (<0.5 ns).

Simetrija barioni-antibarioni

- U pojedinačnim mikroskopskim reakcijama, barionski broj je očuvan; formalno:

$$[\hat{B}, \hat{H}] = 0$$

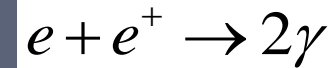
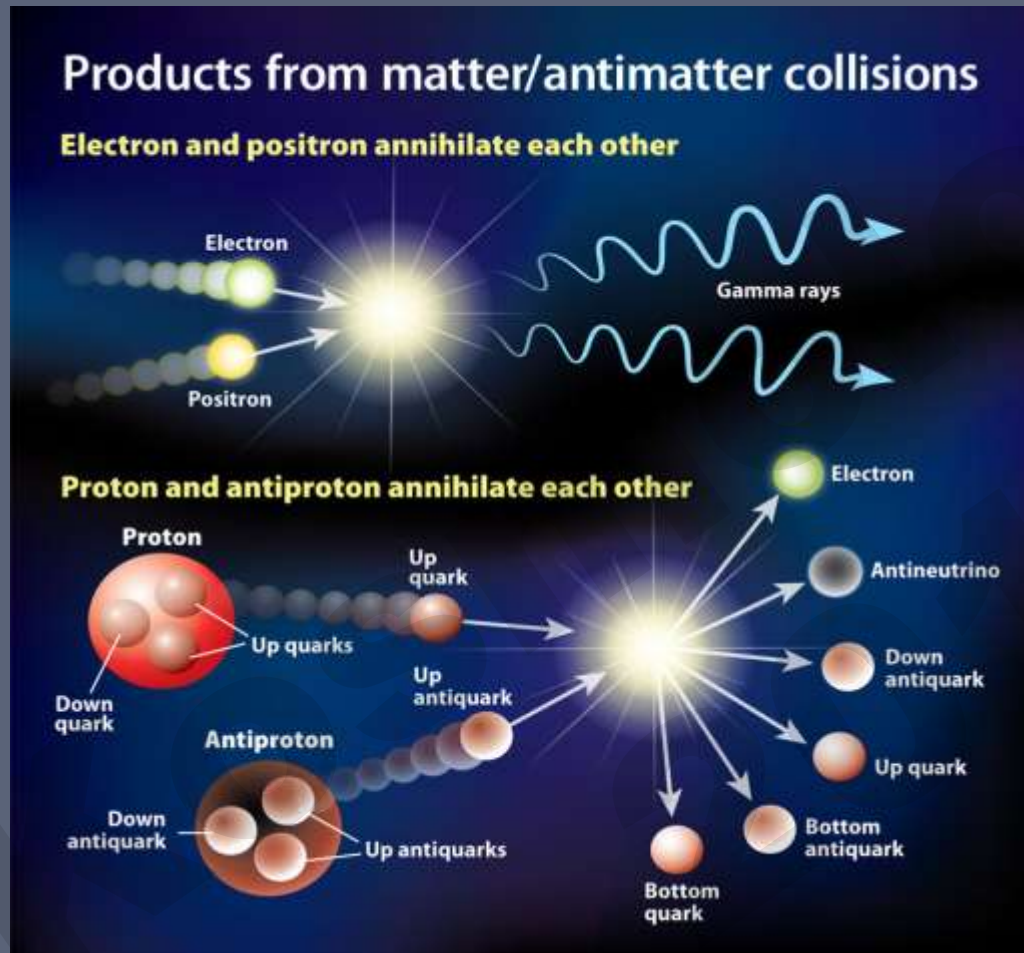
- \Rightarrow kumulativni barionski broj

$$B(t) \propto \int_{t_0}^t [\hat{B}, \hat{H}] dt' = 0$$

- (analogno sa naelektrisanjem, gde je za čitav svemir $Q(t_0) \approx 0$)

- Međutim, u stvarnosti je unutar horizonta $B(t_0) \approx 10^{80}$

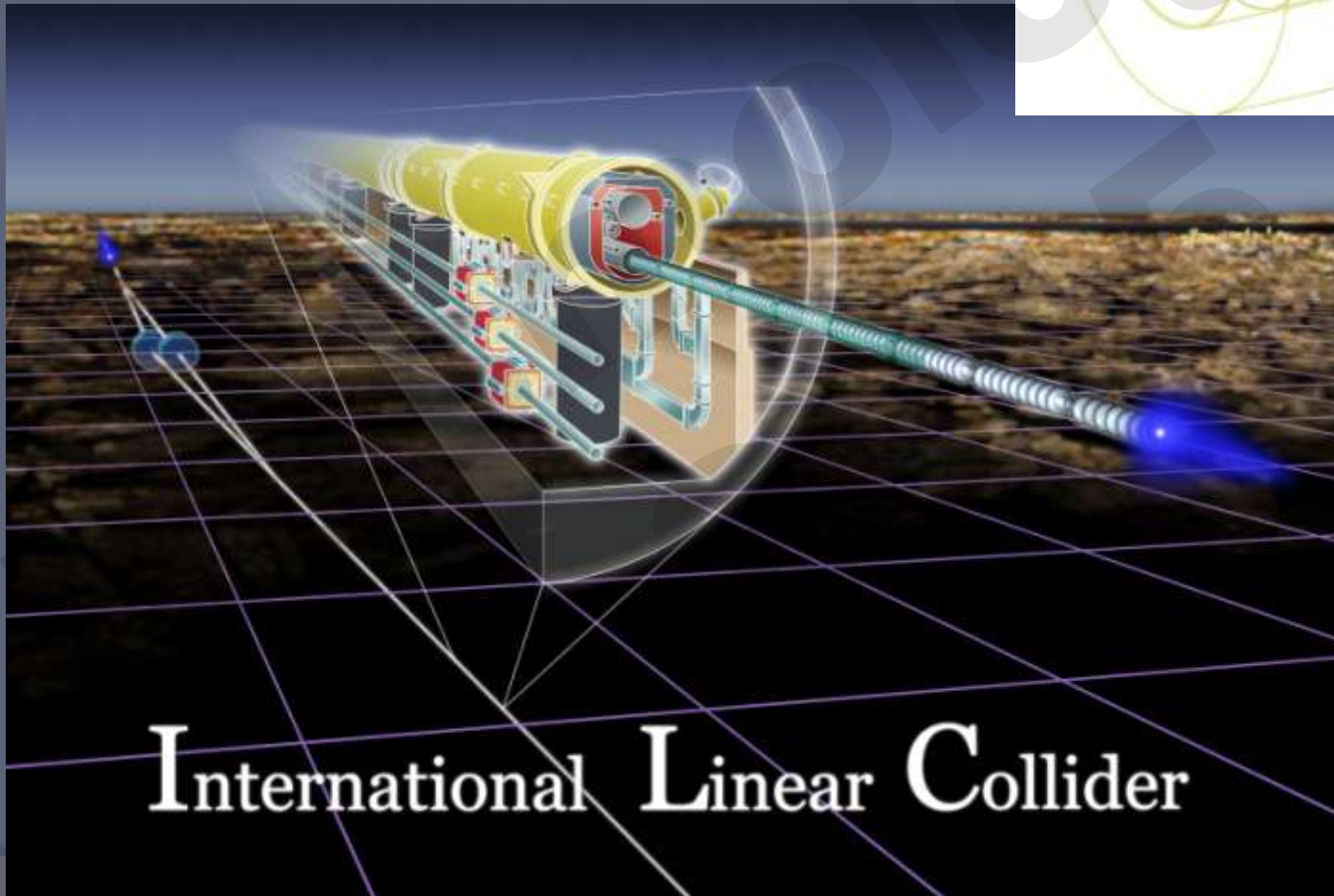
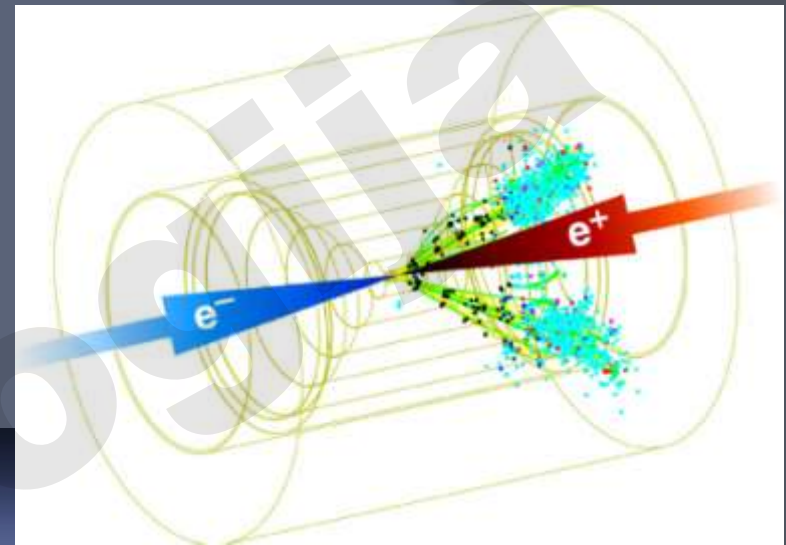
Anihilacija elektrona i pozitrona je jednostavna...



(svaki sa po najmanje $E = 511$ KeV)

...sve dok vodimo računa o zakonima održanja!

Na velikim energijama,
ovo je osnova linearnih
kolajdera...



International Linear Collider

Kako detektovati proizvode anihilacije?

- Barion-antibarionska anihilacija mnogo kompleksnija: najpre pioni i drugi mezoni, a ultimativno:
 - neutrini raznih ukusa (~50% energije)
 - γ -zraci (~34% energije)
 - visokoenergetski elektroni i pozitroni (~16% energije)
- Energije produkata su tipično ~100 MeV.
- Jedini praktični smisao ima potraga za γ -zracima!

Najbolji rezultati

⦿ *Compton GRO*

(1991-2000):

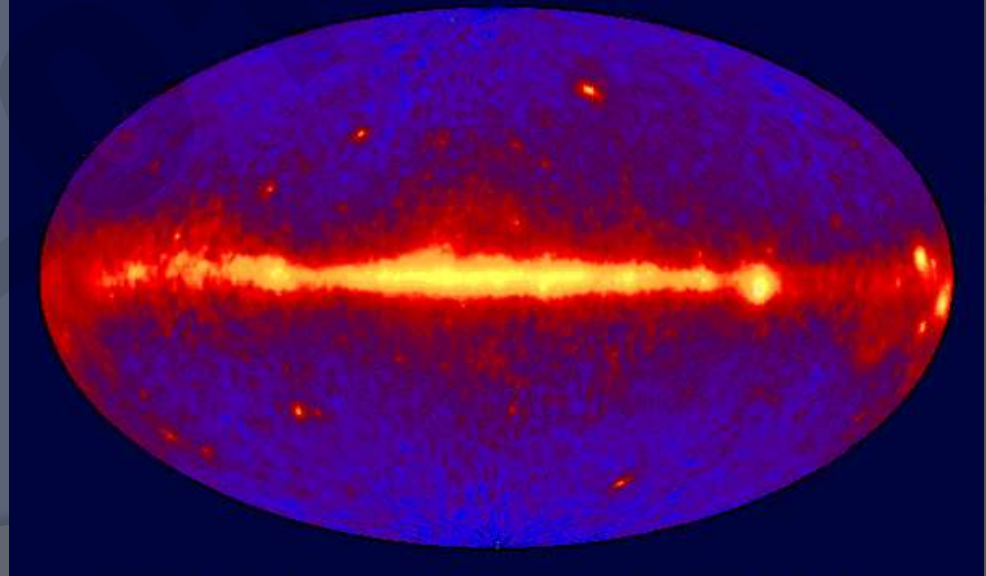
- GRB 990123 ($z = 1,6$)
- meki γ -izvori koji se ponavljaju
- zemaljski γ -izvori

⦿ EGRET eksperiment: energije 30 MeV-30 GeV.

⦿ Nigde karakterističnih linija iz anihilacije!



EGRET All-Sky Map Above 100 MeV



Kako bi se antisvet mogao sakriti?

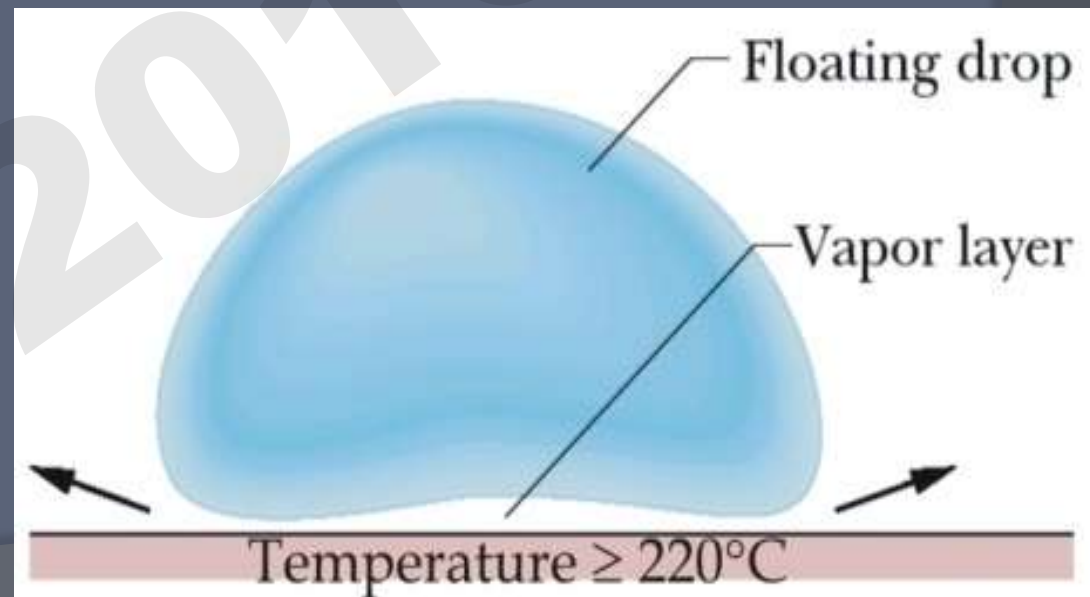
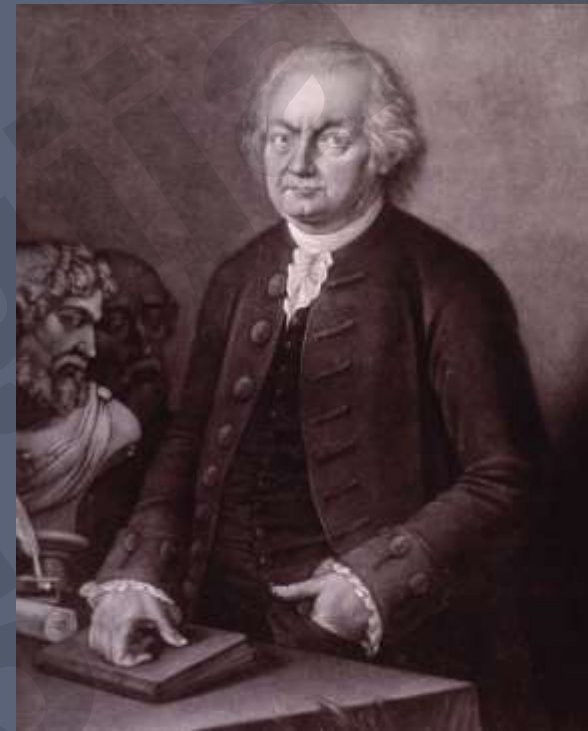
- Iz daljine, antisvet izgleda isto kao i svet! $\gamma \equiv \bar{\gamma}$
- Mesec i druga tela u Sunčevom sistemu **izvesno** nisu od antimaterije 😊

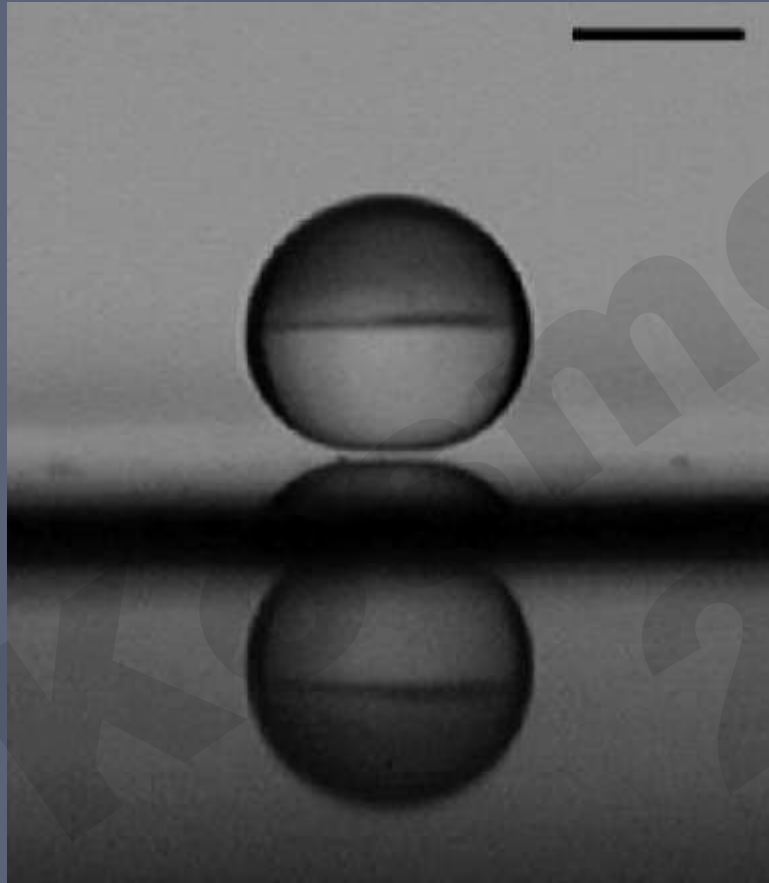


- U Mlečnom putu takođe izvesno nema masovne (*bulk*) antimaterije, jer bismo detektovali
 - γ -zrake iz anihilacije;
 - promenu Faradejeve rotacije udaljenih izvora;
 - antijezgra u kosmičkim zracima.
- (zanemarujemo pojedinačne antičestice u kosmičkim zracima!)
- Za udaljene galaksije teško je biti siguran, jer (na sreću ili na žalost), postoji način da se masivna anihilacija zadrži u umerenim granicama...

Lajdenfrostov efekt

- „kuhinjska fizika“, mađioničari ☺
- Johan Lajdenfrost, 1756: *Traktat o nekim svojstvima obične vode.*
- Lajdenfrostova temperatura: specifično svojstvo para tečnosti-čvrsto telo.
- 2015: reaktivni L. efekt za neisparljiva tela (levitacija celuloze)

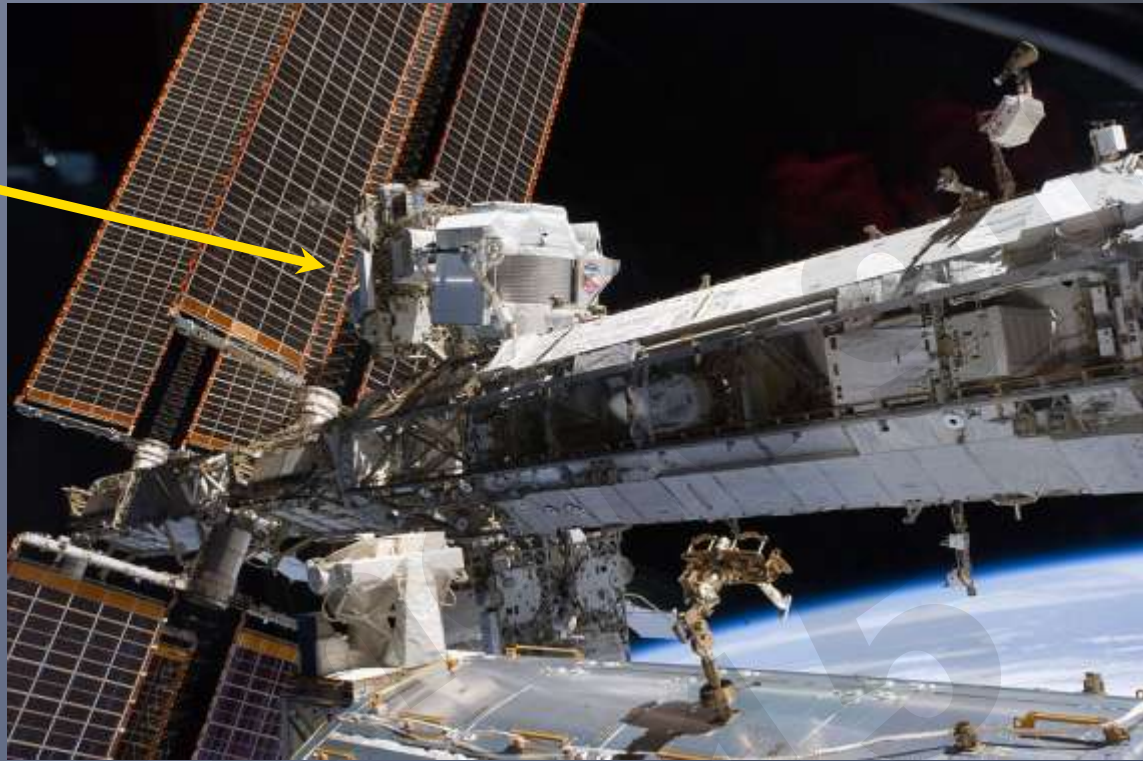




Analogno sa anihilacijom:

- ⦿ Gama-zranci iz anihilacije vrše pritisak usmeren **od interfejsa**.
- ⦿ Što je intenzivnija anihilacija, to je i pritisak veći – u jednom momentu nadmašiće Edingtonovu granicu!
- ⦿ Dve posledice:
 - plazma koja je mešavina bariona i antibariona (**ambiplazma**, cf. Alfven) evoluiraće u niz homogenijih oblasti;
 - masivni (*bulk*) regioni materije i antimaterije će u jednom momentu prestati sa masivnom anihilacijom i ona će se dešavati samo po rubovima.

A(lpha)
M(agnetic)
S(pectrometer)



**Međutim, i dalje nema tragova
čak ni ograničene anihilacije iz
Lajdenfrostove opne!**

Objašnjenje asimetrije leži u procesu

BARIOGENEZE

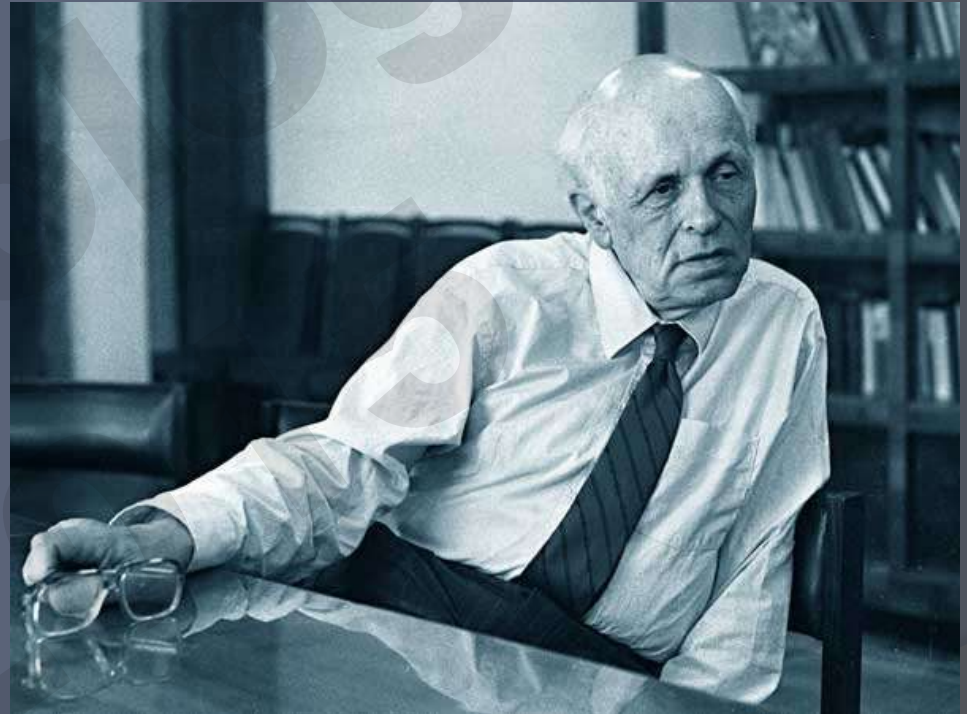
(veoma, veoma rane epohe u istoriji
svemira)

Osnovna ideja: veoma, veoma mala (10^{-10}) asimetrija u dovoljno ranom svemiru



Otac bariogeneze: Saharov

- **Andrej Dmitrijevič Saharov** (1921-1989): astrofizičar, nuklearni inženjer, disident, borac za ljudska prava...
- 1947-1961: nuklearni program („Arzamas-16“)
- 1961: „Car bomba“
- 1963: *Test Ban Treaty*
- 1950: tokamak!
- **1967: „Narušenje CP invarijantnosti, C-asimetrija i barionska asimetrija vasiona“**
- 1974: predvideo pojavu interneta



Najekstremniji uslovi na planeti...



...30. 10. 1961. – 210 petadžula
(1,4% L_{\odot})!

Disidentski dani



- Nakon pada Hruščova (oktobar 1964), dramatično pogoršanje stanja ljudskih prava u SSSR-u.
- Od 1965, Saharov se angažuje u brojnim ilegalnim građanskim akcijama.
- 1970: osniva Komitet za ljudska prava, koji odmah biva zabranjen, a članovi denuncirani i stavljeni pod nadzor.
- 1970-1987: hapšen više od 20 puta, 8 godina proveo u „unutrašnjem egzilu“ u Gorkom, 4 puta štrajkovao glađu i bio prisilno hranjen...
- 1975: dobija Nobelovu nagradu za mir (sprečen da je primi).
- 1989: izabran za vođu opozicije u prvoj demokratskoj Dumi, nažalost preminuo par meseci kasnije.

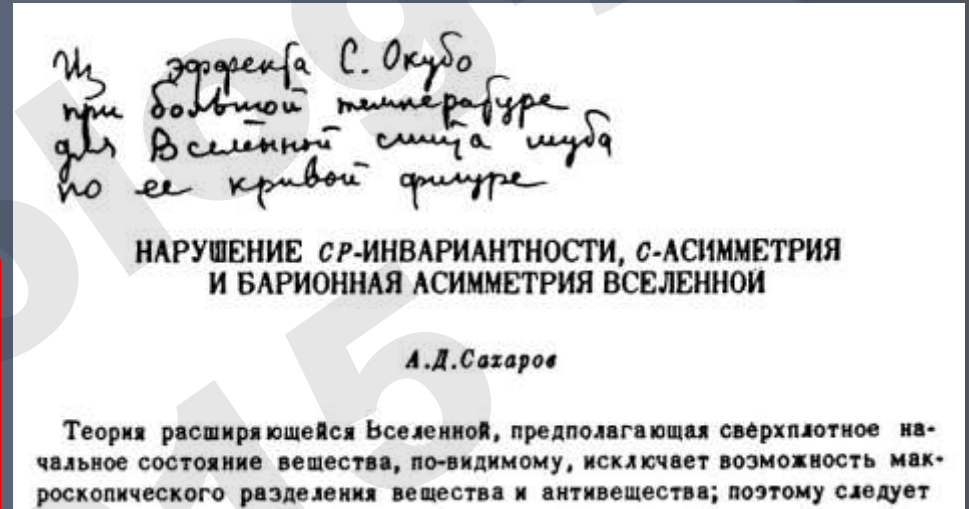
Tri uslova za bilo koju bariogenezu

- „kosmološki disident“
- prvi rad koji spaja fiziku čestica i kosmologiju!

● **Uslovi Saharova:**

1. CP simetrija narušena;
2. barionski broj neočuvan (striktno);
3. odstupanje od termodinamičke ravnoteže u ranom svemiru.

- Osnova **svih** teorija bariogeneze!



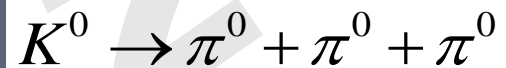
Epohalni značaj shvaćen tek nakon 1979 (Weinberg-Salam-Glashow)!

Narušenje CP-simetrije

- C (konjugacija naelektrisanja): materija → antimaterija.
- P (parnost): čestica → svoj odraz u ogledalu.
- Raspad neutralnog kaona:



- No, jednom u milijardu slučajeva



- Period poluraspada 9×10^{-11} s

Princeton, 1964...

- ⊙ **Cronin & Fitch**: Ako bi CP bila egzaktna simetrija, onda bi se i antikaon morao raspadati **na identičan način**.
- ⊙ Ali, kako su pokazali Gell-Mann & Pais (1956), neutralni kaon je **već** mešavina čestice i antičestice:

$$K^0 \rightarrow \bar{K}^0 \rightarrow K^0 \rightarrow \bar{K}^0 \rightarrow \dots$$

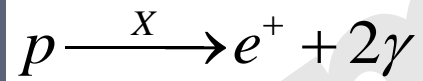
- ⊙ Antikaon ne može da se raspadne na tri (anti)piona!
- ⊙ \Rightarrow veoma malo (1 deo u 10^9) narušenje CP simetrije u raspadu neutralnog kaona.
- ⊙ Opšta Lüders-Paulijeva teorema (1954):

$$CPT = 1$$

- ⊙ \Rightarrow Narušenje kombinovane parnosti (CP = -1) automatski povlači narušenje vremenske simetrije (T = -1)!

Neočuvanje barionskog broja

- I standardni model i sve predložena (GUT) proširenja predviđaju raspad protona:



- sa posrednikom X-bozonom, u vremenu:

$$\tau_p \approx \frac{\hbar m_X^4}{m_p^5 c^2} = 2,87 \times 10^{-32} \left(\frac{m_X}{1 \text{ GeV}} \right)^4 \text{ godina}$$

- Eksperimenti pokazuju: $\tau_p \geq 10^{34} \text{ godina} \Rightarrow m_X \geq 10^{16} \text{ GeV}$



Termodinamička **neravnoteža**



- Kad $T \rightarrow \infty$, na sve čestice deluje samo **Sila** (tm) i sve reakcije se dešavaju jednakom stopom u oba smera.
- Npr. $\gamma + \gamma \rightarrow e + e^+$ podjednako kao i $e + e^+ \rightarrow 2\gamma$
- Kako temperatura opada, čestice izlaze iz ravnoteže sa primordijalnom „kašom“ – što su masivnije, izlaze ranije.
- Najmasivniji je X-bozon! Na $T < 10^{19}$ GeV, on počinje da se raspada sa stopom
$$\Gamma_X \approx \frac{\alpha_X g_{\text{GUT}} m_X c^2}{\hbar^2}$$
- gde je α_X konstanta vezivanja, a g_{GUT} broj stepeni slobode u teoriji (u staroj SU(5) $g_{\text{GUT}} = 160$).

Bariogenetski „prozor“

- Ključ:

$$\Gamma_{\text{bariogeneza}} < \Gamma_X < H$$

- a pošto je po Fridmanovoj jednačini

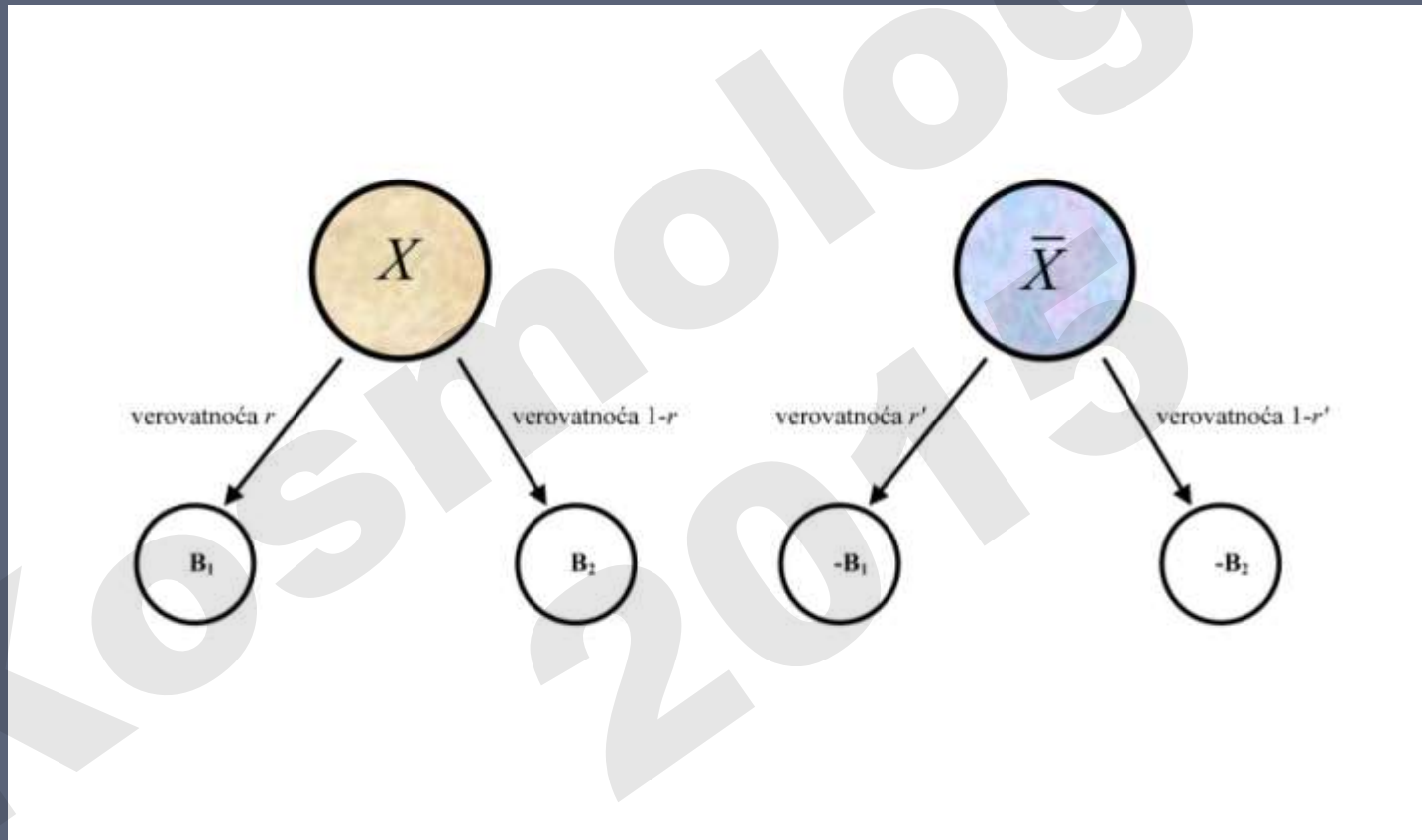
$$H^2 = 8\pi G\rho / 3$$

- i odnos gustine i temperature u tim ranim epohama

$$\rho c^2 = \frac{1}{2} g_{\text{tot}} \sigma T^4$$

- možemo, u načelu utvrditi na kom se intervalu temperature (vremena) odigrala bariogeneza.

„Okubo efekat“: narušenje simetrije za $r \neq r'$



$$\Delta B = (r - r')(B_1 - B_2)$$

Dve glavne alternative

- Bariogeneza tokom GUT epohe: $t = 10^{-43} - 10^{-36}$ s, $E \sim 10^{15}$ GeV.
- pre inflacije!
- problem: ne znamo koja je GUT ispravna!
- Bariogeneza tokom elektroslabog prelaza, $t \sim 10^{-12}$ s, $E \sim 100$ GeV.
- posle inflacije!
- problem: proračuni pokazuju da se stvara nedovoljno bariona...

„klasična“ GUT
bariogeneza

kasna, elektroslaba
bariogeneza

Barionska materija

- Rezervoari: galaksije, međugalaktički prostor, primordijalne crne rupe (?)...
- Na visokom z : Ly α apsorpcioni sistemi.
- Totalna granica iz nukleosinteze:

$$0,019 \leq \Omega_B h^2 \leq 0,024$$

- Ne vidimo ni polovinu ovoga!

Najnoviji razvoj događaja...

- 2012: otkriće Higsovog bozona u LHC-u
- $m_{\text{Higgs}} = 125.09 \pm 0.21$ (statistička) ± 0.11 (sistematska) GeV/c^2
- 2015: Kusenko, Yang & Pearce sugeriraju da kako Higsovo polje relaksira ka ovoj vrednosti, ono obezbeđuje uslove za bariogenezu.
- post-inflatorno (kasno) dešavanje
- samo jedna nova čestica (teški neutrino)

Naše razumevanje bariogeneze...

- ...je i dalje krajnje mršavo, skoro pola veka nakon Saharovljevog rada iz 1967.
- Mnogo prilika za dalji rad 😊
- Uzgred, posledica je da su, za razliku od bariona, **CDM čestice C-simetrične!**
- \Rightarrow anihilacija CDM i anti-CDM čestica način da se detektuje tamna materija...
- ...a u budućnosti i kao izvor energije! 👽

Hvala na pažnji!

Sloboda mišljenja je jedina garancija napretka u razumevanju svemira oko nas.

Andrej D. Saharov

