

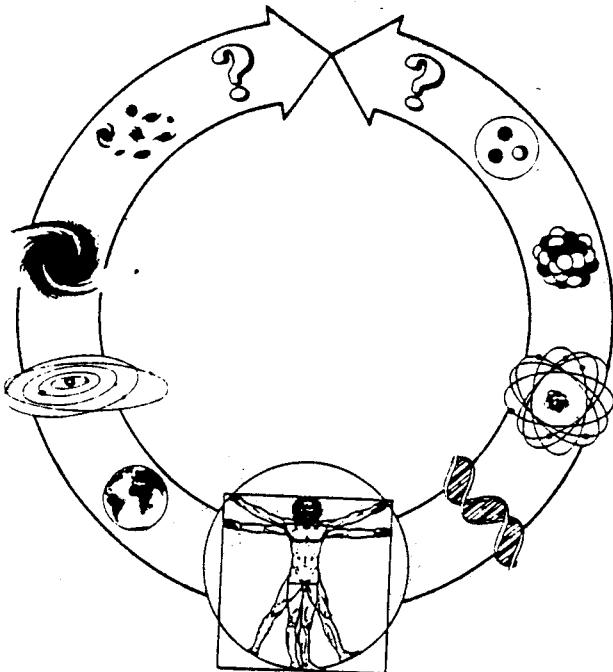
D- 283

Природно-математички факултет
Радна листа за виједнички послова

Датум: 3.6.1991.

Орг. јединица	Фронт	Логотип	Логотип
03	10/35		

PRIRODNO MATEMATIČKI FAKULTET
NOVI SAD
INSTITUT ZA FIZIKU



Tema rada: STANDARDNI MODELI FIZIKE ĆESTICA I KOSMOLOGIJE

Mentor: Prof. dr Milan Nikolic

Kandidat: Svetlana Grujic

NOVI SAD, SEPTEMBER 1991.

1. UVOD

Ideja veze između fundamentalne fizike čestica i kosmologije ima dugu istoriju. U prvoj polovini ovog veka tu vezu su ispitivali Edington, Dirac i drugi. Nažalost bilo je i suviše malo podataka, posmatranja, eksperimenata i to je vodilo ka apstraktnim teorijama koje su možda estetski zadovoljavale, ali koje su bile i suviše proizvoljne.

Ali poslednjih godina je postala jasna duboka veza izmedju fizike čestica sa jedne strane i kosmologije sa druge. Još pre nekoliko godina astronomi bi se smeškali razmatranjima šta se desilo 10^{-35} sekunde posle velikog praska. Danas astronomi shvataju da fizički procesi koji su se dešavali u najranijoj epohi određuju osobine Svemira koji danas posmatramo.

Fizičari čestica shvataju da je rani Svemir fantastična laboratorijska jedina postojeća laboratorijska za elementarne procese koji su se dešavali na ekstremno visokim energijama, oni i dalje prihvataju da kosmološki argumenti zasnovani na tim procesima mogu da proveravaju njihove teorije.

Kosmologija studira materiju na vrlo velikoj skali gde sila gravitacije ima dominaciju u odnosu na druge interakcije, dok fenomene na maloj skali u kojoj su elektroslaba i jaka nuklearna sila dominantne, a gravitacija se može zanemariti, izučava fizika čestica. One imaju mnoge veze, specijalno je interesantan primer mase fotona koja po kvantnoj elektrodinamici (gauge teoriji) mora biti nula, ali je važno imati i eksperimentalne provere te teorije. Merenje magnetnih polja u interplanetarnom prostoru dalo je granicu 3×10^{-27} eV za masu fotona.

1868 godine astronom J.N. Lockyer je otkrio novi element Helijum u solarnoj fotosferi, koji je tek davnije (25 godina) otkriven na Zemlji. Čitav niz mezona i bariona otkriveno je izučavanjem kosmičkog zračenja kada velikih akceleratora nije bilo.

Danas se kosmologija i fizika čestica, dve naučne discipline koje su izgledale najudaljenije, stapaju u jednu. Njihovi instrumenti,

čak i ciljevi, su razliciti, ali one koriste iste pojmove i iste prirodne zakone prostor-vremena, materije i sila. Danas ostvarujemo jedinstvo znanja slično onom jonskih filozofa pre 2500 godina.

Sam Big Bang se može smatrati konačnim akceleratorom koji i fizičari čestica i kosmolozzi moraju razmatrati da bi opisali veliki eksperiment koji se desio na početku stvaranja Svemira.

2. POSMATRANI SVEMIR

2.1. UVOD

Naše sadašnje razumevanje evolucije Svemira zasnovano je na Friedman-Robertson-Walker (FRW) kosmološkom modelu ili modelu toplog velikog praska. Model je zbog svoje uspešnosti poznat kao standardna kosmologija.

*U prvom paragrafu biće prikazana eksperimentalna osnova standardne kosmologije. Dokazi njene tačnosti-važenja idu unazad do epohe primordijalne nekleosinteze do 10^{-2} s od velikog praska. Danas postoje teorije koje ekstrapolišu standardnu kosmologiju ka kraćim vremenima od ovoga. FRW-kosmologija je tako solidna da su moguće razumne spekulacije o Svemiru do 10^{-43} s posle praska. Naravno ove spekulacije su nužno zasnovane na teorijama fundamentalnih interakcija na vrlo visokim energijama, energijama koje se približavaju Plancovoj skali (10^{19} GeV-a). Danas postoji standardni model fizike čestica $SU(3)_C * SU(2)_L * U(1)_Y$, Gauge teorija jake i elektroslabe interakcije, to je fundamentalna teorija kvarkova i leptona i ona je eksperimentalno potvrđena do energija koje se približavaju 1000 GeV-a. Pored toga u poslednjoj deceniji razvijene su interesantne i važne spekulacije o fizici čestica na vrlo kratkim rastojanjima, na primer teorija velike unifikacije (GUT), supersimetrija (SUSY), superstring teorije (TOE) itd. Ove fundamentalne teorije na ultravisokim energijama nam omogućavaju spekulacije o najranijem Svemiru (pre 10^{-2} s do 10^{-43} s, a ne dalje od toga - jer ne postoji teorija kvantne gravitacije).*

Astronomskim posmatranjem su utvrđene činjenice na kojima se bazira standardna kosmologija sa posmatranim "fosilima" koji dopiru do 10^{-2} s od vremena velikog praska.

Danas kosmološka posmatranja uključuju:

- Širenje Svemira

- Hubbleovu konstantu H_0 , (H_0 odgovara sadašnjoj brzini ekspanzije Svemira)
- Parametar usporenja širenja (q_0 - on meri brzinu usporavanja ekspanzije)
- Starost Svemira t_0
- Sadašnju gustinu mase ρ_0 *
i sastav Svemira ρ_i ; (i - barioni, foton i itd.)
- Kosmičko mikrotalasno pozadinsko zračenje (CMBR) uključujući njegov spektar i prostornu strukturu
- druge kosmološke background radijacije
(infracrvene, ultraljubičaste, gama-zraci ...)
- obilnost lakih elemenata (specijalno D, He^3 , He^4 , Li⁷)
- entropija Svemira (odnos broja bariona i fotona)
- raspodelu galaksija i većih struktura
(skupovi galaksija, superskupovi galaksija i ogromni prazni prostori - voids)

$$\hbar = c = K_b = 1$$

* često se koristi veličina $\Omega \equiv \rho_0 / \rho_c$ gde je ρ_0 sadašnja gustina Svemira i ρ_c kritična gustina Svemira

$$\rho_c = 3H_0^2 / 8\pi G = 1.88 \cdot 10^{-29} h^2 \text{g cm}^{-3}$$

2.2. EKSPANZIJA SVEMIRA

Najvažnija posmatrana standardne kosmologije je širenje Svemira (otkrio Hubble 1929g). Osim nekoliko bliskih galaksija do 1989. g. je merenjem utvrđen crveni pomak za preko 28000 galaksija što pokazuje univerzalnost ekspanzije. Mnogi kvazari sa većim crvenim pomeranjem od 3 su posmatrani i posmatrano je crveno pomeranje veće od 4,7. Mnoge radio galaksije su posmatrane sa većim pomeranjem od 2, a jedna čak sa pomeranjem 3,8. Najudaljeniji klaster galaksija

koji je posmatran imao je pomeranje 0,94. Svetlost koju mi danas vidimo od najudaljenijih objekata emitovana je kada je Svemir imao samo nekoliko miliardi godina. Tako nam galaksije i kvazari omogućavaju da upoznamo Svemir svega nekoliko miliardi godina posle velikog praska.

Relacija i među luminoznog rastojanja

$$d_L \equiv (\mathcal{L} / 4\pi F)^{1/2}$$

(gde je \mathcal{L} - luminozitet objekta, a F - mereni fluks) i crvenog pomeranja z može se razviti u red:

$$H_0 d_L = z + 1/2 \times (1-q_0) z^2 + \dots$$

$$\text{ili } z = H_0 d_L + 1/2 \times (q_0^{-1}) (H_0 d_L)^2 + \dots$$

gde je: H_0 je sadašnja brzina ekspanzije $H_0 \equiv \dot{R}(t_0)/R(t_0)$, q_0 parametar usporenja koji meri brzinu usporenja ekspanzije: $q_0 = -\ddot{R}(t_0)/R(t_0)H_0^2$

i $R(t_0)$ - FRW - kosmoloski faktor skale.
0 - označava sadašnju veličinu.

Merenja
 $\sqrt[t]{Crvena}$ pomeranja su relativno jednostavna merenja, ali zahtevaju dosta vremena. Određivanje rastojanja galaksija zahteva dobro ustanovljena standardna "kandila" (objekti poznatog luminoziteta). Usled teškoća u kalibraciji lestvice kosmičkih rastojanja, kosmička skala rastojanja je i na skromnim kosmičkim razdaljinama nesigurna za faktor dva, staviše za najudaljenije objekte u Svemиру (čije je crveno pomeranje reda veličine 1 ili veće) moramo da se brinemo o efektu evolucije: da li luminozitet standarnih kandila evoluira sa vremenom? U svakom slučaju izvesna evolucija je morala biti, posto je pre 20 miliardi godina luminozitet bio

jednak nuli. Ne ulazeci u komplikovane rasprave o Hubbleovoj konstanti, cije se vrednosti danas navode u domenu od 40 do 100 $\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$, mi cemo sumirati naše današnje poznavanje:

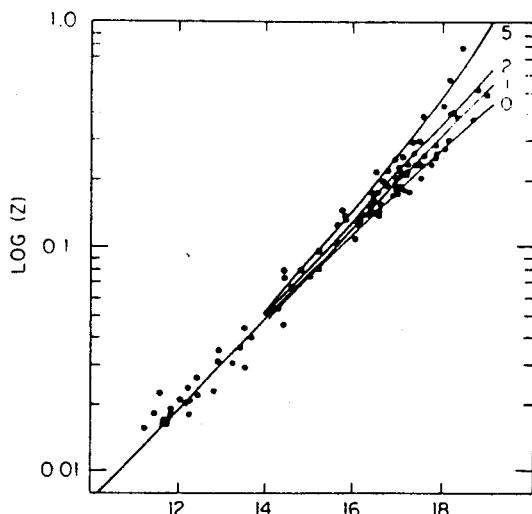
$$H_0 = 100 \times h \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$$

a nepoznavanje H_0 izraziti kroz h :

$$0,4 \leq h \leq 1,0$$

iz toga sledi da Hubbleovo vreme ili H^{-1} je

$$H_0^{-1} = 9,78 h^{-1} \times 10^9 \text{ GODINA}, \text{ ŠTO ODGOVARA DANAŠNJOJ HUBBLEOVOM ZAPREMINI ČIJA JE VELIČINA } \left\{ \begin{array}{l} 3000 h^{-1} \text{ MPC} = \\ 9,25 \times 10^{27} h^{-1} \text{ cm.} \end{array} \right.$$



Korigovana prividna vizuelna veličina

S1.1. To je optički Hubbleov dijagram. Korigovana vizuelna veličina je proporcionalna logaritmu CRVENOG POMERANJA. Krive se odnose za $q = 0, 1, 2, 5$. Korekcija za galaktičku evoluciju nije uračunata.

Hubbleov interplanetarni teleskop, cije lansiranje nije bilo uspešno, trebao je da znatno poboljša vrednost H_0 . U principu parametar usporenja q_0 mogao bi da se meri bez poznavanja H_0 , kao

odstupanje od linearne zavisnosti crveno pomeranje - rastojanje. U praksi međutim ponovo je problem skala rastojanja, posto su nam potrebna tačna poznavanja rastojanja

Pošto takvo crveno pomeranje vremenski gleda unazad, kada su posmatrani objekti bili znatno mlađi, mora se brinuti i o evoluciji tih objekata. Nepoznavanje efekata galaktičke evolucije na luminoznost galaksija sprečava određivanje q_0 .

Može se pokazati: $q_0 = \Omega_0 (1+3w)/2$

w - današnji odnos pritiska i gustine zračenja (za nerelativističku materiju $w=0$)

Današnje posmatranje ograničava Ω u intervalu od 0 do 1.

Moguci kinematicki test standardne kosmologije može biti korišćen pri određivanju q_0 (Ω_0), to je brojanje galaksija u odnosu na crveno pomeranje.

2.3. HOMOGENOST I IZOTROPNOST SVEMIRA NA VELIKOJ SKALI

Temelj FRW modela je visok stepen simetrije FRW metrike*. Jednostavnost metrike koja zavisi samo od jedne dinamičke promenljive - kosmičkog faktora skale $R(t)$ omogućava teorijsku analizu. Pretpostavke o izotropiji Svemira izveo je Einstein ne na bazi posmatranja nego da pojednostavi matematičku analizu.

* Pod metrikom se podrazumeva određeni, unapred zadani zakon po kome se tačkama (x^1, \dots, x^n) i $(x^1 + dx^1, \dots, x^n + dx^n)$ pridružuje jedan skalar ds koji definiše rastojanje između njih. Metrika Robertson-Walkera ima oblik:

$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2(t) (dr^2/(1-kr^2) + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin\theta d\gamma^2)$, gde su r, θ, γ sferne koordinate,

k indeks krivine koji može imati vrednosti +1, -1 i 0 i $R(t)$ faktor srazmere i predstavlja dimenzije (poluprečnik) Svemira u funkciji kosmičkog vremena.

Danas imamo dokaze za homogenost i izotropnost u delu Svemira koji možemo da posmatramo, u našoj današnjoj Hubbleovoj zapremini ("metagalaksija") čija je veličina karakterisana sa:

$$H_0^{-1} = 3000 \text{ } h^{-1} \text{ Mpc} \approx 9,25 \times 10^{27} \text{ } h^{-1} \text{ cm.}$$

Najbolji dokaz izotropije posmatranog Svemira je uniformnost temperature CMBR-a. Osim posmatrane dipolne anizotropije, razlika temperature između dve antene razdvojene od deset lučnih sekund do 180 stepeni je manje od 1/10000. Najprostije tumačenje dipolne anizotropije je da je ona rezultat našeg relativnog kretanja prema kosmičkom referentnom sistemu. Ako ekspanzija Svemira ne bi bila izotropna, anizotropija širenja bi dovodila do anizotropije temperature u CMBR zračenju. Ta uniformnost ukazuje da je u epohi poslednjeg rasejanja CMBR (oko 200000 godina posle velikog praska) Svemir bio homogen i izotropan. Nehomogenosti gustine u tom periodu vodile bi ka tempereturnoj anizotropiji.

Postoje dopunski dokazi za izotropiju Svemira kao što je izotropija background X-zračenja i raspodela slabih radio izvora i radio galaksija.

Direktna evidencija za homogenost raspodele galaksija je komplikovanija, staviše, posto sve mase nisu svetleće, mi registrujemo raspodelu zračenja, a ne masa. Dokazi za homogenost dobijaju se iz "polja svojstvenih (pekulijarnih) brzina Svemira". Svojstvena brzina se odnosi na kretanje objekta, na primer galaksije u odnosu na kosmički referentni sistem (definisan kao referentni sistem CMBR-a), praktično to odgovara brzini galaksije posle oduzimanja brzine širenja Svemira. Nehomogenost raspodele masa dovodi do gravitaciono izazvanih svojstvenih brzina. One nam daju direktnе informacije o raspodelama masa, a ne izvora svetlosti.

2.4. STAROST SVEMIRA

Starost Svemira može biti merena na razne načine: korišćenjem brzine ekspanzije za izračunavanje vremena unazad do Velikog praska, određivanjem starosti najranijih zvezda u globularnim klasterima, datiranjem pomoću radioaktivnih elemenata, određivanjem vremena hlađenja gasa u klasterima, itd. Danas svi oni daju rezultate u domenu 10 do 20 milijadi godina. Međutim nijedna od ovih tehnika ne može da daje jedno preciznije određenje.

2.5. CMBR-KOSMIČKO MIKROTALASNO POZADINSKO ZRAČENJE

Znamo da je postojao period kada je Svemir bio veoma topao i gust i kada još nisu postojali ni atomi ni atomska jezgra i kada su sva postojeća materija i zračenje bili u termalnoj ravnoteži. Zatim je došlo do širenja Svemira i hlađenja pa su se formirala atomska jezgra i atomi. Taj nestanak slobodnih elektrona je omogućio zračenju - fotonima da se nesmetano prostiru - Svemir je postao providan.

CMBR nam daje potvrdu da je Svemir počeo iz toplog velikog praska. Površina poslednje interakcije je bila kada je $z=1100$ i kada je starost bila

$$180000 \times (\Omega_0 h^2)^{-\frac{1}{2}} \text{ godina.}$$

Merenja fluksa CMBR zračenja u domenu talasnih dužina od 70cm do 0,1cm su u saglasnosti sa temperaturom crnog tela od $2,75 \pm 0,015$ K, ta temperatura odgovara današnjoj gustini fotona od 422 cm^{-3} .

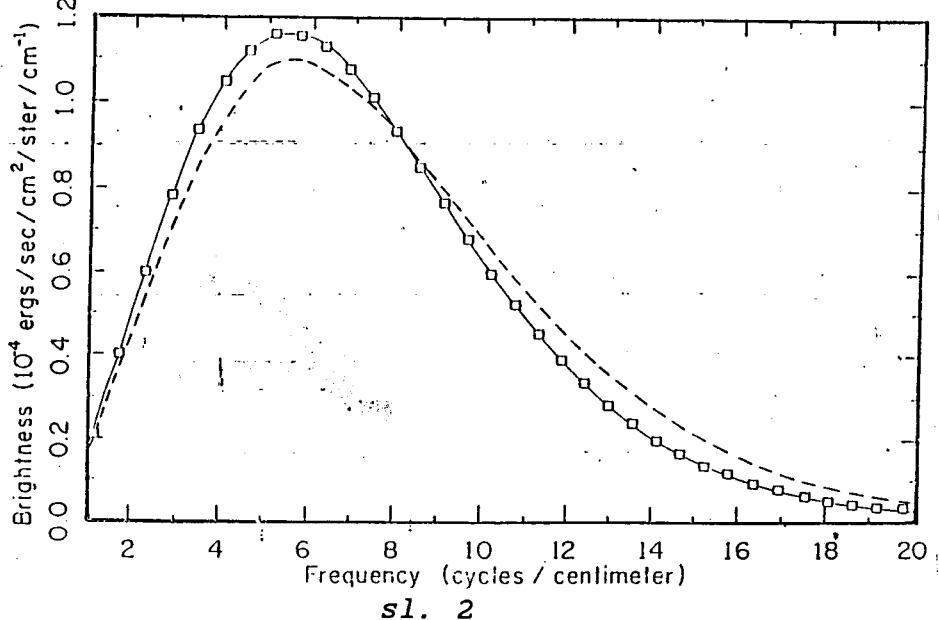
Energija zračenja pri uslovima termalne ravnoteže je data Plancovim zakonom:

$$B(\nu) = \frac{2 \frac{h_p}{C^2} \nu^3}{c} \times \left(\exp\left(\frac{h_p \nu}{k_B T}\right) - 1 \right)^{-1} \quad (=) \quad \frac{\text{erg}}{\text{s cm}^2 \text{ Hz Str}}$$

Temperatura je bila 3000K, a tipična talasna dužina fotona je bila oko 1 mikron (10000\AA), dok je srednje rastojanje među fotonima bilo jednako toj talasnoj dužini.

U daljem toku vremena fotonima se povećava talasna dužina proporcionalno dimenzijama Svetlosti. I kao i kod zračenja crnog tela foton su ostajali na međusobnom rastojanju jednakom njihovoj talasnoj dužini. Temperatura zračenja crnog tela je obrnuto proporcionalna tipičnoj talasnoj dužini pa je opadala kako se Svetlost širio. Što bi značilo da se Svetlost proširio za faktor 1000 ako je početna temperatura bila 3000K, a temperatura CMBR-a sada je 3K.

Izvršena su merenja gustine energije po jedinici talasne dužine u funkciji talasne dužine i dobijene su zadovoljavajuća podudaranja sa Plancovom raspodelom. Za male vrednosti talasne dužine merenje nije moguće izvršiti na Zemlji, jer atmosfera apsorbuje taj deo zračenja pa su merenja vršena na satelitima.



sl. 2

Na slici 2 je prikazano izotropno pozadinsko zračenje detektovano na talasnoj dužini 500 mikrona do 30cm. Kvadratići na slici pokazuju merenja COBE-satelita, a puna linija je najbolji prikaz termalnog Plancovog spektra. Kvadratići pretstavljaju statistički nezavisna merenja. Raketna merenja samo par nedelja posle leta

COBE-a dala su vrlo slične rezultate. Merenja bazirana na Zemlji na većim talasnim dužinama pokazuju da je CMBR - spektar veoma blizu termalnoj Plancovoj funkciji.

Pomenut visok stepen izotropije ne samo da je dokaz homogenosti i izotropnosti Svemira naše Hubbleovske zapremine nego je i test uslova u Svemиру pri crvenom pomeranju od $z=1100$. Prvobitne nehomogenosti gustine potrebne za stvaranje struktura u Svemиру su povezane sa temperaturskim fluktuacijama CMBR-a i tako je anizotropija CMBR-a vrlo važan test teorija formiranja struktura.

Granice anizotropije su danas za faktor 3-10 bliske najatraktavnijim scenarijima formiranja struktura: Inflaciono proizvedenih adijabatskih perturbacija gustine sa toplom ili hladnom tamnom materijom ili kosmičkim stringom izazvane perturbacije gustina sa toplom ili hladnom tamnom materijom.

2.6. OBILNOST LAKIH ELEMENATA

Primordialna nukleosinteza je najraniji test standardnog modela. Nuklearne reakcije koje se dešavaju u vremenu približno od 0,01 do 100 sekundi na kinetičkoj energiji $T = 0,1 \text{ MeV} - 10 \text{ MeV}$ stvaraju zнатне kolicine

Deuterijuma D ($D/H \approx 0$) 10^{-5});

Helijuma ^3He ($\text{He}/H = 0$) 10);

Helijuma ^4He (odnos masa $^4\text{He}/H = Y \approx 0,25$);

Litijuma ^7Li ($^7\text{Li}/H = (1-2) 10^{-10}$).

D i ^4He su od specijalne važnosti pošto danas ne poznajemo druge astrofizičke procese koji bi mogli da objasne njihovu posmatranu obilnost. Mada obične zvezde proizvode ^4He čak i u oblastima gde se on značajno proizvodi, zvezdani doprinos je tek $\Delta Y_{\text{zvezdano}} = 0,05$. Iako je posmatrana obilnost D vrlo mala, čak i tu malu kolicinu je vrlo teško, praktično nemoguce, objasniti,

pošto svi astrofizički procesi razbijaju slabo povezan D koji sagoreva pri vrlo niskim temperaturama od $0,5 \times 10^6$ K. Poredenje predviđenih i posmatranih obilnosti je vrlo jak test standardne kosmologije. Danas postoji saglasnost između posmatranih i predviđenih obilnosti između ovih izotopa ukoliko je odnos između bariona i fotona $\eta = 4 - 7 \times 10^{-10}$, što odgovara vrednosti:

$$0,015 \leq \Omega_B h^2 \leq 0,026$$

ili uzimajući

$$0,04 \leq h \leq 1,0,$$

što daje vrednost

$$0,014 < \Omega_B < 0,16.$$

Primordialna nukleosinteza nam daje najpreciznije određivanje gustine bariona u Svetomiru. I ono pokazuje da kritična gustina u barionima mora biti manja od 1. Za $\Omega_B \approx 1$ bilo bi mnogo manje D , a mnogo više ^7Li i ^4He . Ukoliko je $\Omega=1$, što zahteva inflatorni kosmoloski model, tada primordialna nukleosinteza kaže da je najveći deo gustine mase u Svetomiru nebarionskog porekla.

2.7. GUSTINA MATERIJE, TAMNA MATERIJA U SVEMIRU

I BUDUĆNOST SVEMIRA

(Tamna materija - skrivena materija, nevidljiva materija.)

Postoje i dinamičke metode određivanja Ω_0 . Određivanje gustine mase Svetomira nije jednostavno! U principu srednja gustina Svetomira ($\langle \rho \rangle$) može biti merena određivanjem brojne gustine galaksija (n_{GAL}) i srednje mase po galaksiji ($\langle M_{\text{GAL}} \rangle$).

$$\langle \rho \rangle = n_{\text{GAL}} \langle M_{\text{GAL}} \rangle$$

Kada je $\langle \rho \rangle$ nađeno, $\Omega_0 = \langle \rho \rangle / \rho_c$ se lako dobija.

Merenje mase galaksije dinamičkim metodama zasniva se na gravitacionim efektima masa u galaksiji. Najprostija metoda je koriscenje III Keplerovog zakona $GM(r) = v^2 r$

v - orbitalna brzina na rastojanju r od centra

$M(r)$ - unutrašnja masa u odnosu na r , pretpostavlja se sferna simetrija.

Primena te tehnike na spiralne galaksije (uzimajući merenu rotacionu brzinu da je jednaka orbitalnoj i uzimajući da je r radijus koji uključuje najveći deo svetlosnih izvora galaksije) daje za kritičnu gustinu direktno povezanu sa emisijom svetlosti.

$$\Omega_{LUM} \approx 0,01 \text{ ili manje.}$$

Znači masa povezana sa svetlošću je manja od 1% od kritične gustine. Kada ovu tehniku proširimo na tačke gde efektivno prestaje svetlost galaksija (na primer posmatranjem usamljene zvezde ili posmatranjem linija od 21 cm emitovanih neutralnim vodonikom ili HI gasnim oblakom) nalazimo da $M(r)$ nastavlja da se povećava. Ako bi celokupna masa bila povezana sa svetlošću, v bi opadalo kao $r^{-\frac{1}{2}}$ i za tačke gde prestaju mase i svetlost. Nalazi se da je v konstantno što u stvari odgovara činjenici da je $M(r) \propto r$. Po definiciji dopunska masa je tamna, ne postoji zračenje koje se može njoj pridružiti. Čak ni do sada nema dokaza da rotaciona kriva prelazi u režim $v \propto r^{-\frac{1}{2}}$, ukazujući da ukupna masa spiralnih galaksija tek treba da bude pronadena. Merenja rotacionih krivih ukazuju da sve spiralne galaksije imaju "HALO" tamne difuzne materije koja je najmanje 3-10 puta veća od vidljive materije.

$$\Omega_{HALO} > 0,1 \approx 10 \Omega_{LUM}$$

Poredenjem donje granice gustine bariona zasnovane na primordialnoj nukleosintezi $\Omega_B = 0,015$ i Ω_{LUM} vec sugerisu da postoji tamna barionska materija. To nije veliko iznenadenje posto postoji mnoge "neluminozne forme barionske materije", planete

slične Jupiteru, beli patuljci, neutronske zvezde, crne rupe itd.

Srednja masa galaksija u klasteru može takođe biti dinamički određena, pretpostavljajući da je klaster gravitaciono vezan i dobro relaksirajući sistem može se primeniti teorema virijala (virijalna teorema važi za sisteme u ravnoteži i glasi: dvostruka kinetička energija jednaka je potencijalnoj energiji):

$$GM = \frac{2\langle v^2 \rangle}{\langle r^{-1} \rangle}$$

M - masa skupa galaksija

$\langle v^2 \rangle^{1/2}$ - kvadratni koren srednje kvadratne brzine galaksije

$\langle r^{-1} \rangle$ - srednje inverzno rastojanje između galaksija

Ω_0 određeno na ovaj način je između 0,1 i 0,3.

Ove dinamičke metode određivanja Ω_0 se odnose na materiju koja je gravitaciono vezana u sjajnim galaksijama dok kinematicke tehnike određuju srednju kosmičku gustinu (u domenu od 1000Mpc). Kinematicke metode ne daju još za sada pouzdane rezultate dok dinamičke metode ukazuju da masa koja je grupisana u skupove sa sjajnim galaksijama u domenu od 10 do 30 MPC iznosi:

$$\Omega_{\leq 10-30} = 0,2 \pm 0,1$$

(Ovde oznaka \pm ne pretstavlja grešku nego raspon dobijen u raznim metodama)

Inflacioni kosmoloski model predviđa $\Omega_0=1$ što, ako su gornja dinamička merenja tačna, dovodi do zaključka da mora da postoji značajna manje gravitaciono povezana (ili nepovezana) komponenta gustine Svetlosti koja iznosi:

$$\Omega_{\text{SMOTH}} = 0,8 \pm 0,1$$

koja je manje-više ravnomerno raspoređena u dimenzijsama manjim od 10 do 30Mpc. To je " Ω - problem".

Spomenimo neke kandidate za ovu komponentu gustine materije:

1. Visoko energetske čestice takve kao lake fosilne neutrine ili druge neotkrivene relativističke čestice koje zbog svojih velikih brzina nisu gravitaciono vezane u sistemima vecim od 10 do 30Mpc.
2. Fosilni kosmoloski term (kosmoloska konstanta ili energija vakuma) koja je po definiciji konstanta u prostoru.
3. Još neotkivene tamne galaksije koje su manje grupisane nego one sjajne.

Možemo da zaključimo da:

1. Luminozna materija doprinosi samo malo kritičnoj gustini, manje od 1%
2. Tamna materija daje minimum 10 puta veći doprinos nego luminozna
3. Količina materije koja se grapiše u skupove galaksija u domenima 10 do 30Mpc doprinosi $0,2 \pm 0,1$ od kritične gustine
4. Dinamičke metode ne isključuju postojanje ravnomerno raspoređenih komponenti koje mogu da doprinose gustini do $0,8 \pm 0,1$.

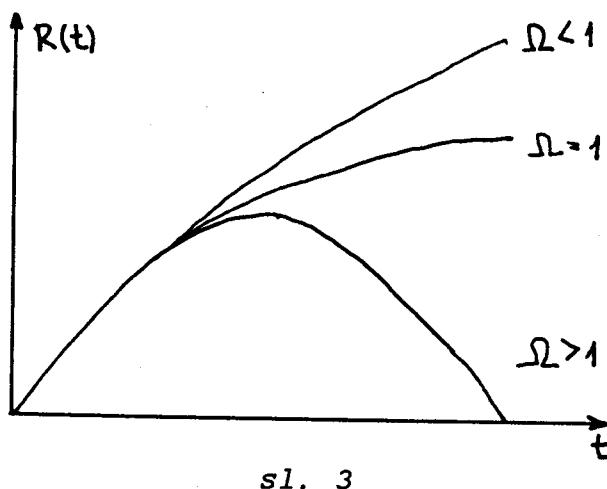
Uzimajući sve ove informacije zajedno sa vrednošću Ω_8 , dobijenu iz primordijalne nukleosinteze ($0,15 < \Omega_8 < 0,16$), možemo zaključiti da izvesna tamna materija mora biti barionska. S druge strane ako je $\Omega_8 > 0,16$ tada tamna materija mora biti nebarionska, na primer fosili, stabilne slabo interagujuće čestice sa masom (WIMP) koje su preostale iz najranijeg perioda Svetogira.

Jedno od veoma značajnih pitanja koje se postavlja jeste: Kakva je konačna sudska Vasion? Ta sudska zavisi od gustine materije u njoj, kao što je prikazano na sl. 3.

Kada bi gustina materije Svemira ρ bila jednaka kritičnoj gustini ρ_c naš Svemir bi bio ravan to jest geometrija Svemira bila bi Euklidova.

Ako je $\rho < \rho_c$ Svemir je "otvoren" tj. širio bi se večno i njegova geometrija bila bi hiperbolična.

Ako je $\rho > \rho_c$ Svemir je "zatvoren", a njegova geometrija sferna. Ovakav Svemir bi se u jednom trenutku počeo skupljati dok se ne bi sažeо u geometrijsku tačku u kojoj bi gustina materije bila ogromna (kao u početnom trenutku velikog praska). Model koji opisuje ovakav Svemir naziva se oscilatornim.



sl. 3

Za slučaj ravne euklidske geometrije $\Omega = 1$. Ali za takav slučaj nam nedostaje veoma mnogo materije jer do sada nađena materija u Svemiru je jedva 10% od pretpostavljene materije potrebne za $\Omega = 1$. Preostalih 90% je tamna materija.

Kosmološki model za $\Omega = 1$ je najjednostavniji (sa nultom zakrivljenosti) i pretpostavlja se da on odgovara stvarnosti. Inflacioni model zahteva vrednost $\Omega = 1$. Kao posledica ovoga se javlja da je najveći deo materije nebarionskog porekla.

Ovu nebarionsku tamnu materiju možemo podeliti u dve grupe:
1. Topla tamna materija, koju bi sачinjavale čestice koje se kreću brzinom svetlosti ili veoma blisko njoj. Osnovni kandidat je neutrino koji može imati masu, o čemu će biti reči kasnije.

2. Hladna tamna materija, čije čestice bi se od epohe velikog praska kretale veoma sporo. Bile bi sposobne da stvaraju velike objekte poput galaksije. Ove čestice bi sa materijom veoma slabo interagovale, možda samo gravitacijom. To mogu biti veoma masivne čestice predviđene supersimetrijom, ili veoma laki aksioni.

Glavni kandidati za tamnu materiju u fizici čestica (Gonzales-Mestres and Perret-Gallix, 1987)

čestice	masa	prisustvo u okolini Zemlje	obilnost	interakcija sa materijom	predložene tehnike detektovanja
laki neutrini	$m < 30 \text{ eV}$ kosmologija $m < 18-32 \text{ eV}$ fizika čestica (supernova ?)	kosmičko galaktičko	$\Omega \sim 1$ ako $5 \text{ eV} < m_\nu < 30 \text{ eV}$	koherentno rasejanje ukoliko je masa Diracova	??
axion*	$m > 10^{-5} \text{ eV}$ (kosmologija)	galaktičko	$\Omega \sim 1$ ako $m_a \sim 10^{-5} \text{ eV}$?	a-to-konverzija u em. polje	nisko temperaturski em. rezonatori
	$m < 10^{-2} \text{ eV}$ (zvezde)	solarno	fluks na Zemlji: $10^5 - 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	a-to-konverzija u atomu	nisko temperaturski detektori sa silikonskim diodama
teški neutrini	$m > 3 \text{ GeV}$	galaktičko	eventualno, $\Omega \sim 1$	slaba (koherentna ako je masa Diracova)	jonizacioni detektori za teške čestice
LSP (najlakše supersimetrične čestice)	U zavisnosti od modela (1-100GeV?)	galaktičko	eventualno, $\Omega \sim 1$	supersimetrična (spin zavisna u mnogim modelima)	nisko temperaturski detektori za merenje depozita energije ispod 1keV (kalorimetri): bolometri, SSG, STJ.
kosmioni	$4 \text{ GeV} < m < 10 \text{ GeV}$	solarno i galaktičko	$\Omega \sim 1$ moguć	$\sigma \sim 10^{-2} \text{ fm}^2$	bolometri, SSG, STJ.
monopoli	$m \sim 10^{16} \text{ GeV}$ GUTS	galaktičko zarobljeni oko sunca	parkerovo ograničenje efekta Rubakov	elektro magnetna	konvencionalni superprovodnici
kvark grumenje	teška (nepoznata)	galaktičko	možda, $\Omega \sim 1$	atomske sudari	zavisi od mase

tablica 1

* AKSIONI

Aksion je hipotetična čestica koja se javlja u grupi teorija koje objašnjavaju zašto jaka interakcija očuvava (P) i (CP). U ovim teorijama očuvanje (P) i (CP) je posledica relaksacije novog polja ka minimumu potencijala. Aksion je jedna oscilacija ovog polja oko minimuma. S obzirom da su zvezde veliki nuklearni reaktori oni mogu isto tako emitovati aksione. Da aksion ne odnosi toliko veliku energiju da bi se modeli stelarne evolucije rušili on mora biti lakši od 0,01 eV. Iako aksion mora biti lak on se stvara u daleko većem broju nego što bi se moglo jednostavno pretpostaviti na osnovu postavki o termičkoj ravnoteži i otud još uvek ima bitne kosmoloske implikacije.

2.8. STRUKTURA SVEMIRA U VELIKOJ SKALI

Do sada smo uglavnom opisivali Svemir kao fluid približno konstantne gustine. Takav opis je vrlo dobra aproksimacija za rani Svemir koji je bio smeša čestica sa vrlo kratkom srednjom slobodnom putanjom ili za današnji Svemir kada ga posmatramo na velikoj skali, većoj od 100Mpc. Međutim na manjim skalama imamo planete, zvezde, galaksije, skupove galaksija, super skupove, velike praznine (VOID) itd. Postojanje ovih struktura je važna karakteristika Svemira i ona će verovatno da da ključ razumevanju njegove evolucije. Razumevanje evolucije zvezda i planeta nije stvar kosmologije, ali poreklo i evolucija galaksija i većih struktura jeste.

Idealno za razumevanje strukture Svemira trebalo bi da znamo raspored masa i izvora zračenja za zapremine stvarno kosmoloskih dimenzija reda veličine $1000 \times h^{-1}$ MPC. Međutim jedino vidimo galaksije i to one najsvetlijе, a videli smo da zračenje ne odražava raspodele masa. Realistični ambiciozni program obuhvatao bi istraživanje veće zapremine Svemira uključujući položaje brzine i rastojanja nekoliko miliona galaksija. Najveći katalog galaksija, APM pregled galaksija, obuhvata oko 5000000 galaksija

i ima efektivno dubinu od oko $600 h^{-1} \text{Mpc}$. Jedino za 28000 galaksija je izmereno z koje je najjednostavniji metod za dobijanje rastojanja. Tu je i najveći problem, jedno određivanje crvenog pomaka zahteva pola sata vremena teleskopa koji godišnje može da radi uspešno oko 3600 sati.

Mi tek sada počinjemo da dobijamo sliku raspodele galaksija u Svemiru. Sjajne galaksije u prvoj aproksimaciji su uniformno raspoređene u našoj Hubbleovoj zapremini, međutim one pokazuju tendenciju ka grupisanju u skupove. Oko 10% galaksija su u skupovima galaksija gravitaciono vezanih sa važećom virijalnom teoremom, koji obuhvataju od 10 do 1000 galaksija. Virgo i Coma skupovi su nam najbliži skupovi.

Postoje još veće strukture, super skupovi gravitaciono slabo vezani, za koje ne važi virijalna teorema, koji sadrže od nekoliko do mnogo bogatih skupova. Nama najbliži su naš Lokalni superskup (čiji je centar Virgo skup), Hidra, Centaurus i Pisces-Cetus. Oko 20 takvih struktura su do sada identifikovane. Otkrivene su takođe velike praznine u raspodeli sjajnih galaksija, više njih reda veličine $20 h^{-1} \text{Mpc}$ u dijametru, a čak i do $50 h^{-1} \text{Mpc}$. Jasno je da je poznavanje rasporeda sadašnjih masa u Svemiru bitno za razumevanje strukture i za proveravanje različitih scenarija formiranja struktura koje daju teorije ranog Svemira.

Mi danas imamo jednu nepotpunu, ali svakim danom sve bolju sliku velike skale Svemira. Sve veći broj merenja crvenog pomaka omogućiće nam određivanje topologije rasporeda galaksija i skupova galaksija i odgovoriti na pitanja koja je najveća koherentna struktura koja postoji u Svemiru, kako su se formirali galaksije i skupovi galaksija i kakva je bila njihova evolucija.

3. SCENARIO STANDARDNOG KOSMOLOŠKOG MODELA PRE UVODENJA INFLACIJE

Scenario standardnog modela pre uvođenja inflacije sadržavao je sledeće faze razvoja ranog Svemira:

1. <i>BIG BENG</i>	$T > 10^{19} \text{ GeV}$	10^{32} K
2. <i>ERA STIŠAVANJA</i>	$10^{15} < T < 10^{19} \text{ GeV}$	$10^{28}-10^{32} \text{ K}$
3. <i>BARIOSINTEZA</i>	$T \sim 10^{15} \text{ GeV}$	10^{28} K
4. <i>NEZANIMLJIV PERIOD</i>	$10^3 < T < 10^{14} \text{ GeV}$	$10^{16}-10^{27} \text{ K}$
5. <i>ERA ELEKTROSLABE INTERAKCIJE</i>	$1 < T < 10^{14} \text{ GeV}$	$10^{14}-10^{16} \text{ K}$
6. <i>ERA JAKE INTERAKCIJE</i>	$T \sim 1 \text{ GeV}$	10^{13} K
7. <i>NUKLEOSINTEZA</i>	$T \sim 1 \text{ MeV}$	10^{10} K
8. <i>RAZDVAJANJE MATERIJE I RADIJACIJE</i>	$T \sim 1 \text{ eV}$	10^4 K
9. <i>GALAKTIČKE FORMACIJE</i>	$10^{-2} < T < 1 \text{ eV}$	10^2-10^4 K
10. <i>TEŠKI ELEMENTI</i>	$10^{-4} < T < 10^{-2} \text{ eV}$	$1-10^2 \text{ K}$

U standardnom modelu se zaobilazi problem kada je vreme bilo manje od 0,01s. Razmatra se samo šta je bilo posle tog vremena i to se sa sigurnošću zna.

I kadar: U $T=10^{11} \text{ K}$ i $t=0,01\text{s}$ Svemir se nalazi u stanju skoro idealne termalne ravnoteže. Važe zakoni očuvanja naielktrisanja, barionskog i leptonskih brojeva vrednosti su im veoma male ili 0. Čestice koje su tada prisutne su elektroni, pozitroni, fotoni, neutrini i antineutrini. Čestice su u termalnoj ravnoteži i stalno prelaze iz jedne u drugu.

Postoji mali broj protona i neutrona. Oko jedan proton ili neutron na svakih 1000 miliona fotona ili elektrona ili neutrina. I za njih se stalno dešavaju relacije:



U ovoj fazi razvoja Svemir se veoma brzo siri.

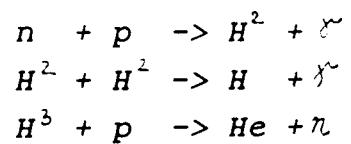
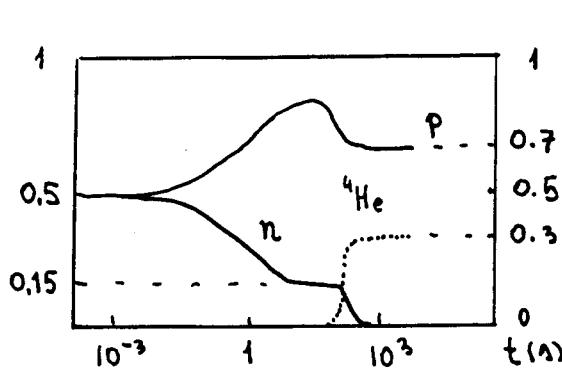
II Kadar: $T=3 \times 10^{10}$ K i $t=0,11s$. Ništa se kvalitativno nije promenilo, Svemirom još uvek dominiraju elektroni, pozitroni i fotoni, svi su u stanju termalne ravnoteže i daleko iznad kritične temperature praga. Nuklearne čestice protoni i neutroni nisu više u ravnoteži jer se teži neutroni raspadaju na protone i zadržava se u odnosu 38% n i 62% p. Brzina širenja se smanjila.

III Kadar: $T=10^{10}$ K a $t=1,09s$. Smanjenje temperature i gustine je povećala srednje slobodno vreme neutrina i antineutrina toliko da se oni počinju ponašati kao slobodne čestice koje nisu više u termalnoj ravnoteži sa elektronima, pozitronima i fotonima. Neutrini se dalje slobodno šire kroz Svemir s tim što im se talasna dužina povećava proporcionalno dimenzijama Svemira. Dalje se nastavlja prelaz n u protone do odnosa 24% n i 76% p.

IV Kadar: $T=3 \times 10^9$ K i $t=13,82s$. Temperatura je ispod praga stvaranja elektrona i pozitrona, oni nestaju u anihilacijama $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$, koje nekoliko povećavaju temperaturu. Temperatura je dovoljno niska da se mogu početi formirati lakša jezgra H^2 itd. Sadržaj n:p=17%:83%.

V Kadar: $T=10^9$ K i $t=3\text{min}$ i 2 sekunde. Glavni sastojci Svemira su sada foton, neutrini i antineutrini s tim što je usled anihilacije elektrona i pozitrona temperatura fotona za 35% viša od temperature neutrina. I dalje se stvaraju tricijum (H^3) i He ali sporo jer se deuterijum (H^2) lako raspada. Sadržaj n:p=14%:86%.

Nesto kasnije kada temperatura opadne do tačke pri kojoj se može stvarati deuterijum (H^2), gotovo svi preostali neutroni se trenutno ugrađuju u jezgro helijuma. Nakon nukleosinteze težinski procenat helijuma jednak je procentu svih nuklearnih čestica vezanih u jezgro helijuma. Polovina ugradenih čestica su neutroni, a pošto su svi neutroni u Svemiru vezani u jezgro He, procenat He je dva puta veći od procenta neutrona ili oko 26%. Neutronski raspad je promenio n:p=13%:87%.



Formiranje jezgra helijuma.

sl. 4

Slika 4 predstavlja promene broja protona i neutrona.

VI Kadar: $T=3 \times 10^8 \text{ K}$ $t=34 \text{ min } 40 \text{ sekundi}$. Elektroni i pozitroni su skoro svi nestali sem malog broja elektrona koji je tu radi balansiranja nanelektrisanja sa protonima.

Nuklearni procesi su prestali i nuklearne čestice su ili vezane u He (22%-28%) ili u obliku slobodnih protona. Ne postoji stabilni atomi, samo jezgra.

U daljih 700000 godina Svemir se i dalje hlađi i širi, ali se ništa značajno neće desiti u tom periodu. Kada bude dovoljno hladno formirace se atomi, a nedostatak slobodnih elektrona će omogućiti da Svemir postane providan za zračenje i razdvajanje materije i zračenja će omogućiti da se materija grupiše u galaksije i zvezde.

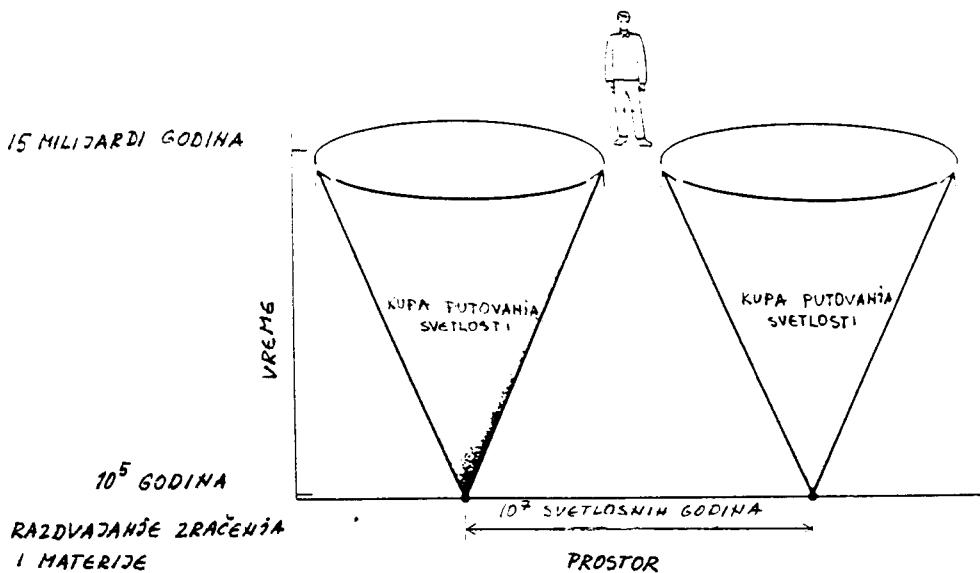
Tek nakon 10000 miliona godina mi ćemo se pitati kako je sve ovo bilo i da li je bilo na ovakav način.

4. PROBLEMI KOJE STANDARDNI MODEL NE REŠAVA

4.1. PROBLEM HORIZONTA

Kao što je već rečeno mikrotalasno pozadinsko zračenje je uniformno, dolazi istog intenziteta iz svih pravaca. Kada se koriguje za Zemljino kretanje kroz zračenje, merenja u svim pravcima sa Zemlje daju istu temperaturu zračenja do tačnosti $1/10000$. Zračenje je ujednačeno izotropno i homogeno i na rastojanjima toliko velikim, da svetlost između tih suprotno udaljenih tačaka nije mogla putovati u okviru starosti Svemira. Na primer: ako pogledamo u jednom pravcu do moguće granice posmatranja, a zatim u suprotnom pravcu, videćemo CMBR na istoj temperaturi od 3K. Po iskustvu znamo da tela koja su u kontaktu teže da izjednače svoje temperature što nas, u ovom slučaju, dovodi do zbunjenosti, jer radijacija koja dolazi iz jednog pravca putovala je 15 biliona godina koliko je putovala i radijacija iz suprotnog pravca. Prema tome dve tačke koje emituju radijaciju, udaljene su jedna od druge približno 30 milijardi svetlosnih godina, a Svet mir je star svega oko 15×10^9 godina. (Detaljnije analize pokazuju da u trenutku kada je svetlost stvarno emitovana, ti su regioni bili udaljeni skoro sto puta više od onog rastojanja koje je svetlost mogla da pređe). Kako te tačke mogu imati tako skladne temperature i gustine, kad ne postoji mogućnost da je signal mogao da dospe od jedne do druge tačke? Univerzum je dakle izuzetno ujednačen na skalama i za kojih komunikacija nije moguća.

Klasična Big-Bang kosmologija jednostavno podrazumeva da je univerzum homogen i izotropan, ali kako on uspeva da bude takav? Odakle potiču osnovni uslovi koji doprinose njegovoj homogenosti i izotropnosti? Bice lepo da se stvori model koji ovo neće tek samo podrazumevati.



sl. 5

Na slici 5 konusi predstavljaju površine do kojih je radijacija stigla u odgovarajućem vremenu. Danas posmatrač prima mikrotalasne signale iz izvora koji su bili udaljeni 10^5 godina u vreme emisije. U to vreme Svemir je star svega 10^5 hiljada godina, što odgovara stotom delu vremena potrebnog za putovanje svetlosti između dva izvora: znači izvori nisu mogli doći u kontakt.

4.2. PROBLEM STRUKTURA (LUMPINES-UGRUDVANOST)

Nasuprot prethodnom problemu horizonta, gde je rečeno da je Svemir u velikim razmerama izuzetno homogen, znamo da je na našoj skali Svemir grupisan u zvezde, galaksije, skupove galaksija. Pitanje je kako se iz tako homogene prošlosti Svemir grupiše i postaje nehomogen na manjim skalamama? Pretpostavlja se da su domeni koji su imali samo malo veću gustinu nego njihova okolina mogli gravitacijom da se sažmu u galaksije u kojima su se kondenzovale zvezde i planete. Odakle dolaze te početne fluktuacije gustine? Do skora se pretpostavljalo da su upravo one bile način na koji je počeo da se razvija Svemir. Mada je Svemir bio skoro potpuno homogen i izotropan mora da su postojale izvesne vrlo male fluktuacije gustine koje su dovele do stvaranja galaksija.

4.3. PROBLEM STAROSTI

Starost univerzuma se procenjuje na 10-20 milijadi godina. Ako je $\Omega > 1$ univerzum ima dovoljnu masu - gravitaciju da zaustavi ekspanziju i započne sabijanje, što znači da imamo zatvoren Svemir. U tom slučaju Ω bi raslo vrlo brzo sa povećanjem gustine i veliko zgušnjavanje doveo bi do kolapsa Svemira (Big crush). Ako je $\Omega < 1$ onda bi Ω opadalo težeći nuli, pa se ekspanzija nastavlja do buduće potpune hladnoće. Samo u slučaju da je $\Omega = 1$ nastavlja se sporo asymptotsko sirenje. Posle 15×10^9 godina mi još ne poznajemo odgovor na ovo pitanje. Ako je Ω bliska jedinici, onda je ona morala biti bliska jedinici i u prvim trenucima Svemira. Može se pokazati da je brzina promene Ω aproksimativno jednaka starosti Svemira. Ako je $\Omega \neq 1$ (0,5 ili 0,2) trebalo bi nekoliko puta 15 milijadi godina da Ω postane nula ili beskonačno, ali kada je Svemir imao svega 10^{-43} s trebalo bi isto tako samo nekoliko puta 10^{-43} s da Ω postane 0 ili beskonačno.

Mi danas možemo naše zakone fizike da ekstrapolišemo jedino do 10^{-43} s, dalje ne možemo jer nemamo kvantu teoriju gravitacije, to je najudaljeniji trenutak o kome možemo da govorimo koristeći fiziku koju poznajemo. Da je Ω bilo različito od 1 starost Svemira bi bila mnogo kraća nego što je to nama poznato.

Proteklo je u svakom slučaju 10^{60} intervala od 10^{-43} s znači da se Ω razlikovala na 60-toj decimali od jedinice danas bi se udaljavala od 1. Iz današnjih posmatranja galaksija i njihove dinamike mi ne znamo tačnu vrednost Ω (0,1 ili 2). No sve te vrednosti na kosmičkoj skali su vrlo bliske 1. Mi znamo da je morala da bude ekstremno bliska 1 u vremenu oko 10^{-43} s. Znači da je Svemir podesio početnu vrednost Svemira na $\Omega = 1$ sa tačnošću na šezdesetoj decimali (to je problem finog podešavanja).

Ovaj se problem može posmatrati i na sledeći način: sila ekspanzije teži da Ω približi nuli, a sila gravitacije (sažimanja) da vrednost Ω približi beskonačnosti. Da bi univerzum bio konačan i stabilan, kakvog ga mi znamo, ove sile treba da su fantastično tačno ujednačene. Problem da je Svemir živeo 15 milijadi godina

a da Λ nije postalo ni nula ni beskonačno ponekad se zove problem ravnosti (flatness). Posto $\Lambda=1$ opisuje geometrijski ravan prostor umesto zakrivljenog prostora vremena. Tako da je problem da razumemo zašto je Λ u početku Svemira bilo vrlo blisko 1, a ne da tražimo proizvoljne početne uslove.

4.4. PROBLEM ROTACIJE

Problem rotacije se odnosi na pitanje zašto Svemir ne rotira. U sústini za rotaciju je potreban centar rotacije. Ali relativno uniformna Hubbleova ekspanzija nas dovodi do zaključka da Svemir nema centra, sve tačke su ekvivalentne. Kako je on prešao u takvo stanje, sa tačkama koje su sve ekvivalentne bez ose rotacije?

4.5. PROBLEM MAGNETNOG MONOPOLA

Još jedna zagonetka koja se činila nerešiva. GUT dobro objašnjava višak kvarkova, ali on predviđa postojanje magnetnih monopola. Monopol je čestica čistog magnetnog naboja samo sa jednim polom. Kod magnetizma nikada ne vidimo magnet koji ima samo jedan pol već uvek ima oba. Sve GUT teorije u kontekstu standardnog BIG-Bang modela predviđaju toliko mnogo monopola kao što ima protona ili neutrona.

Ideja da mogu postojati slobodni magnetni monopoli potiče od Diraca, koji nije imao solidnog osnova da se oni pojave, ali GUT pretpostavlja da oni postoje.

Monopoli se stvaraju u ranom kosmosu kada se GUT simetrija narušava na oko 10^{15} GeV-a, masa monopola je veća od ovoga. Monopoli imaju mase od 10^{17} GeV-a i imaju magnetni naboje. Klasični modeli pretpostavljaju veliku gustinu monopola koji bi, da je to stvarno tako, danas dominirali kosmosom. Rešenje za smanjenje broja monopola je dovelo do inflacije koja je rešila i druge probleme standardnog modela.

Očigledan i mnogo proučavani efekat monopola u astrofizici je njihova sposobnost da emituju magnetno polje. Granicu lokalnog f-

luksa monopolia je procenio Parker, i to počev od jednostavne pretpostavke da naša galaksija ima konačno magnetno polje.

Kabrera je tvrdio da je u svom eksperimentu direktno registrovao monopol prolaskom kroz superprovodnički prsten. Međutim kratko vreme eksperimenta (svega šest meseci) podrazumeva ili fluks monopolia koji je daleko izvan Parkerove granice ili izuzetnu srećnu okolnost. Kasniji eksperimenti nisu registrovali više ni jedan monopol.

Nastali su u visoko energetskom periodu ranog Svetogira i trebalo bi da ih još uvek ima. Još nisu detektovani u eksperimentima pa ako ih ima jednako koliko i protona zašto nisu? Pitamo se šta to ne valja sa GUT?.

5. STANDARDNI MODEL FIZIKE ČESTICA

Razvitak fizike čestica omogućio je jedan novi pogled na mikrokosmos: standardni model fundamentalnih interakcija. Do pre 20 godina postojala je samo jedna koherentna teorija, kvantna elektrodinamika koja je opisivala uproščen svet fotona i elektrona. Njena glavna vrlina je bila renormalizabilnost povezana sa masom fotona koja je jednaka nuli. Standardni model fizike čestica koji uključuje elektromagnetnu, slabu i jaku nuklearnu silu zasnovan je na teoriji relativiteta i kvantnoj mehanici. On u sebe uključuje veliki broj eksperimentalnih otkrića i teorijskih koncepata. Da spomenemo samo neke od njih:

- Diracova jednačina, 1927. godine
- Pojam neutrina (Pauli, 1930. godine)
- Otkrivanje neutrona (Chadwick, 1932. godine)
- Pojam izospina (Heisenberg, 1932. godine, iste godine se Landau inspirisan otkrićem neutrona bavio neutronskim zvezdama)
- Fermijeva teorija slabih interakcija 1934. godine
- Jukavina ideja da su čestice sa masom kvanti polja, 1935. godine
- Otkriće miona (Anderson, 1936. godine)
- Otkriće piona (Pawell, 1947. godine)
- Yang-Millsova teorija lokalne simetrije izospina, 1952. godine
- Narušavanje parnosti (Lee-Yang, 1956. godine)
- Otkriće mionskog neutrina (Lederman, Schwart, Stenberg, 1962. g)
- Narušavanje (CP), 1964 godine
- Hipoteza kvarkova (Gell Mann, 1964. godine)
- Weinberg-Salam model, 1967. godine
- Otkriće "boja" kvarkova (Gell Mann, 1971. godine)
- Otkriće neutralnih struja, 1973. godine
- Otkriće $\frac{1}{4}$ rezonance
(sarm-antišarm vezano stanje, Richter, Ting, 1974. g)
- Otkriće τ leptona (Perl, 1976. g)
- Otkriće Y-čestice (Botton-antibotton vezano stanje, Lederman, 1978. g)

- Dokazi u prilog gluona, 1978. godine
- Otkrice intermedijalnih vektorskih bozona w^\pm i Z^0 ,
(Rubbia, 1983. godine).

Standardni model nosi ime Glashowa Weinberga Salama (GWS model), poslednjih autora u nizu koji su doprineli u njegovom formulisanju. Standardni model ima formu $SU(3)_c \times SU(2)_l \times U(1)_Y$ i u standardnom modelu postoji tri sektora. Gauge sektor koji uključuje kvante polja. Fermionski sektor uključuje kvarkove i leptone. Ako bi postojala samo ta dva sektora svi fermioni i svi gauge bozoni bi bili bez mase. Higgsov sektor je uveden da reši taj problem mase. Teorija nije u stanju da predviđa mase, ali ukazuje na to da bi Higgsove čestice trebalo da budu otkrivene sa već postojećim akceleratorima ili sa akceleratorima čija je izgradnja u toku.

5.1. ČETIRI SILE SVETA

Postoje četiri vrste sila, odnosno interakcija koje utiču na ponašanje materije: jaka interakcija, elektromagnetna interakcija, slaba interakcija i gravitaciona interakcija.

1) Gravitaciona interakcija, opisana je Ajnštajnovom teorijom relativnosti, prenosilac polja je graviton koji još nije detektovan. Domet ove sile je beskonačan i ona deluje na sve čestice. Bitno je reći da je ona uvek privlačna, ne postoji antigravitacija. Problem se javlja zato što kvantna teorija gravitacije ne postoji. Sila je obrnuto proporcionalna kvadratu rastojanja i nezavisna od brzine.

2) Elektromagnetna interakcija, u makro svetu je opisana Maksvelovom teorijom, dok je u mikro svetu opisana kvantnom elektrodinamikom. Elektromagnetne interakcije prenose fotoni. Interakcija je beskonačnog dometa i deluje samo izmedju čestica koje imaju električni naboj. Naelektrisanje je kvantovano, pozitivno ili negativno. Elektromagnetna interakcija je odgovorna za atomsko i molekulsko vezivanje, pa prema tome za većinu "sila"

svakodnevnog sveta. Ona zavisi od brzine i menja formu od elektrostaticke u elektromagnetnu u zavisnosti od relativne brzine izvora i posmatrača. Sila može biti privlačna ili odbojna.

3) Slaba interakcija, otkrivena je 1899 godine od strane Bekerela u beta raspadu. Interakcije su veoma kratkog dometa 10^{-16} metara, prenosioci interakcije su $W(m=83,5 \text{ GeV}/c)$ i $Z(m=93,0 \text{ GeV}/c)$ bozoni veoma teški (mase W i Z su iz eksperimenta UA1 i UA2 u CERN-u).

4) Jaka interakcija, odgovorna je za vezivanje kvarkova. Jaku interakciju prenose gluoni. Sila je kratkodometna i nezavisna je od nanelektrisanja.

Tabela 2 daje prikaz interakcija u nama poznatim uslovima, interesantno je što se dešava na veoma visokim energijama u uslovima kada je nastao Svet mir.

FUNDAMENTALNE INTERAKCIJE	GRAVITACIONE INTERAKCIJE	ELEKTROMAGNETNE INTERAKCIJE	JAKE INTERAKCIJE	SLABE INTERAKCIJE
INTENZITET (U STANDARDNIM USLOVIMA)	$\sim 10^{-39}$	1/137	~ 1	$\sim 10^{-5}$
DELUJU NA CES- TICE:	SVE	NAELEKTRISANE	KVARKOVE	KVARKOVE I LEPTONE
PRENOSE IH:	GRAVITONI?	FOTONI (bez mase)	GLUONI (bez mase)	$W^\pm Z^0$ (sa masom)
DOMET	∞	∞	$\sim 10^{-15} \text{ m}$	$<< 10^{-16} \text{ m}$

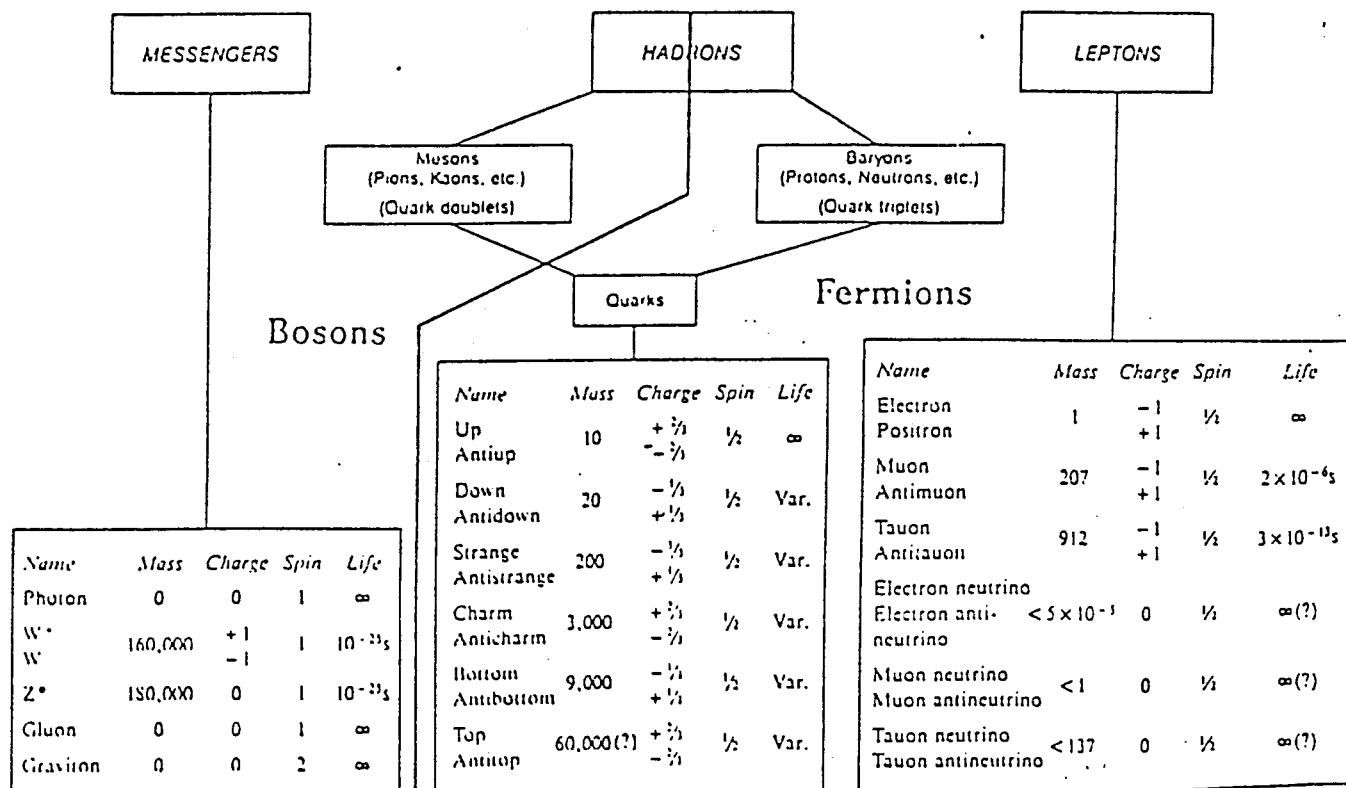
tabela 2

Mehanizam proizvodnje svih sila je isti. Sastojci materije razmenjuju drugu vrstu čestica, gauge bozone, koji prenose i proizvode silu. Sile se razlikuju pošto su razlike čestice koje interaguju i vezuju. Zapravo od mase i osobina bozona zavise osobine sila koje oni prenose. Usled istog mehanizma delovanja došlo se na ideju da se sve sile mogu opisati jednom teorijom i

da su ove četiri sile samo manifestacija jedne jedinstvene. Kao što je već rečeno standardni model je uspeo da ujedini tri sile bez gravitacije.

5.2. PORODIČNO STABLO POZNATIH I POSTULIRANIH ČESTICA

Svi subatomski entiteti su klasifikovani prema spinu u bozone ili fermione. U bozone spadaju: kvanti polja nosioci koji prenose četiri poznate sile, a u fermione fundamentalne čestice kvarkovi i leptoni koji sačinjavaju ono što nazivamo materijom. Pretpostavlja se postojanje šest letona i šest kvarkova, ali t-kvark i $\tilde{\tau}$ -neutrino nisu još detektovani. U tablici 3 mase su date relativno u odnosu na masu elektrona ($9,109 \times 10^{-31}$ kg ili 511 keV) i za kvarkove su poznate samo približno.



tablica 3 : fundamentalne čestice

Leptoni nemaju unutrašnju strukturu i smatraju se tačkastim objektima (dimenzije sigurno manje od 10^{-18} m). Do sada je otkriveno pet letona (τ, ν_τ), (e, ν_e) i (μ, ν_μ). ν_τ se pretpostavlja da postoji,

odnosno standardni model fizike čestica to zahteva. Leptoni učestvuju u gravitacionim interakcijama, oni koji imaju električni naboј učestvuju u elektromagnetnim interakcijama, a u slabim interakcijama učestvuju svi. Letponi nisu podložni jekoj nuklearnoj sili. Pored električnog naboja ustanovljeno je da postoji još tri konzervirana naboja. Kvantni brojevi ovih naboja su: leptonski elektronski (L_e), leptonski mionski (L_μ) i leptonski tau (L_τ) broj. U tablici 4 su date osobine leptona i vrednosti tih kvantnih brojeva.

LEPTONI	SPIN	Q	MASA	L_e	L_μ	L_τ	POLUŽIVOT
ν_e	1/2	0	<60 eV	1	0	0	∞
e^-	1/2	-1	511 keV	1	0	0	∞
ν_μ	1/2	0	<650 keV	0	1	0	∞
μ^-	1/2	-1	106 MeV	0	1	0	2×10^6
ν_τ	1/2	0	<250 MeV	0	0	1	?
τ^-	1/2	-1	1782 MeV	0	0	1	$< 2 \times 10^4$

tablica 4 : osobine leptona

Kvarkovi se pojavljuju zajedno kao gradivni delovi, bez strukture, u složenijim objektima nazvanim hadroni. Ime su dobili prema kovanici "Tri kvarka za mister Marka" iz J. Joyceove priče. Kvarkovi su fermioni sa polucelim spinom, karakteriše ih još nekoliko kvantnih brojeva datih u tablici 5 gde su Q - nanelektrisanje, Bb - barionski broj, I - izospin, I_3 - treća komponenta izospina, S - stranost, C - šarm, B - lepota i T - istinitost.

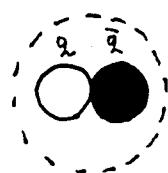
Kvarkovi trpe jaku silu boje. Ovu silu prenose gluoni, kojih

ima osam, njihov spin je 1, a masa jednaka 0. Prilikom pokušaja razdvajanja kvarkova iz hadrona nastaje novi par čestica kvark-antikvark, a ne izolovan slobodni kvark. To je osobina kvarkova da se ne mogu izolovati po svojoj prirodi, zarobljeni su. Kvarkovi poseduju asimptotsku slobodu, ponašaju se na visokim energijama kao relativno slobodne čestice unutar odredene granice. Teorija kvarkova i obojenih gluona naziva se kvantna hromodinamika.

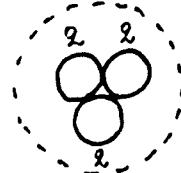
KVARKOVI	SPIN	Q	Bb	I	I	C	S	B	T
u	1/2	2/3	1/3	1/2	1/2	0	0	0	0
d	1/2	-1/3	1/3	1/2	-1/2	0	0	0	0
c	1/2	2/3	1/3	0	0	1	0	0	0
s	1/2	-1/3	1/3	0	0	0	-1	0	0
t?	1/2	2/3	1/3	0	0	0	0	1	0
b	1/2	-1/3	1/3	0	0	0	0	0	-1

tablica 5 : osobine kvarkova

Hadroni su čestice koje interaguju jakom silom. Oni se sastoje iz elementarnih konstituenata, kvarkova. U zavisnosti da li se kombinuju kvark i antikvark ili tri kvarka hadroni se dele na mezone i barione.



mezon



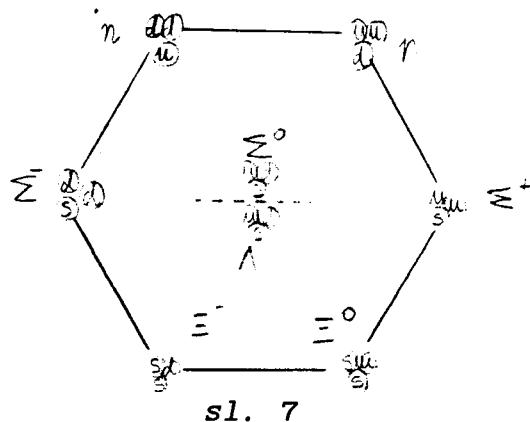
barion

sl. 6

Kao što je prikazano na sl. 6 mezoni, čestice sa celobrojnom

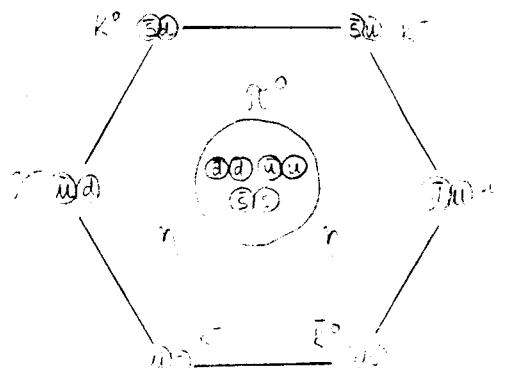
vrednošcu spina, se sastoje iz kvarka i antikvarka, a barioni, čestice sa polucelim spinom, iz tri kvarka. Hadroni moraju biti neutralni u boji, a u mezonima su kvark i antikvark kombinovani tako da čine singlet u boji (boja i antiboja), dok su barioni sačinjeni iz tri kvarka različitih boja što je takođe neutralno u boji.

Tri kvarka u , d i s čine oktet prikazan na sl. 7. To su osam najlakših bariona iz uds kvarkova.



sl. 7

Način na koji se mezoni kombinuju od uds kvarkova i uds antikvarkova vidi se na sledećoj slici.



sl. 8 : devet mezona π, K, η, η' . Neutralni mezoni sa "čudnošću" 0 su superpozicije kvarkovskih kombinacija $u\bar{u}, d\bar{d}$ i $s\bar{s}$; to je simbolički prikazano velikom kružnicom koja obuhvata odgovarajuće kvarkovske kombinacije.

Postoje još i mnogi drugi hadroni koji ovde nisu spomenuti, a-

li još je najveći broj hadrona sačinjen od uds kvarkova malo ih je sa ostala dva kvarka otkriveno, ali to se pripisuje niskim energijama postojećih akceleratora.

5.3. NARUŠAVANJE SIMETRIJE - HIGGSOVE ČESTICE

Pojam interakcije je zasnovan na konceptu da se sile manifestuju kvantnom razmenom bozona. Reći da postoji interakcija sila između dva fermiona znači da oni razmenjuju bozone. Ključ modernih ideja ujedinjenja je razumevanje kako neki od bozona dobijaju masu. Za elektro slabu unifikaciju pitanje je kako W^\pm i Z^0 bozoni stiču masu oko 100 puta veću od mase protona, a foton ostaje bez mase. Mi kažemo da je simetrija između slabe i elektromagnetske interakcije narušena masom intermedijalnih bozona.

Gauge simetrija se prvo u fizici pojavila kao simetrija povezana sa očuvanjem električnog naboja, međutim ona je mnogo dublja i ona je osnovni ključ razumevanja svih interakcija u Svetomiru. Gauge simetrija zahteva da su nosioci sile tj. svi gauge bozoni bez mase, taj zahtev ispunjen u slučaju fotona, ali ne i u slučaju W^\pm i Z^0 bozona koji prenose slabu silu koja se takođe pokorava gauge simetriji. Salam-Weinberg su otkrili mehanizam narušavanja simetrije koji omogućava ovim intermedijalnim vektorskim bozonima da steknu masu.

Taj mehanizam u drugom kontekstu već je bio razvijen u fizici. Ideja je bila postuliranje novih polja koja su danas poznata kao Higgsova polja. Za razliku od gauge bozona ova polja nemaju pravac ili spin udružen sa njima i stoga pripadaju klasi polja koje zovemo skalarna polja (koja još nismo eksperimentalno otkrili, ne postoji ni jedna skalarna čestica). Higgsova polja su različita od drugih polja. Na niskih temperaturama prostor će biti ispunjen sa Higgsovim česticama, danas mi živimo u moru Higgsovinih čestic. Posto za razliku od fotona, W^\pm i Z^0 bozoni interaguju sa Higgsovim poljima oni se kreću kroz Higgsovo polje kao kroz neku viskoznu sredinu. Ne kreću se zbog toga brzinom svetlosti i to može biti opisano kao sticanje efektivne mase. Na višim temperaturama i energijama Higgsova interakcija je takva da više nema te vis-

koznosti, W^\pm i Z^0 bozoni gube svoju masu i simetrija izmedju njih i fotona se manifestuje. (U slučaju ujedinjene elektromagnetne i slabe interakcije niske i visoke energije se odnose na skalu od 100 GeV-a to je skala slabih interakcija.) Higgsova polja su bila postulirana u elektroslaboj teoriji radi očuvanja simetrije na visokim energijama i njenog kršenja na niskim. Higgsova polja takođe daju masu kvarkovima i leptonima tj. odnose se na jedan od najdubljih problema čestica - prirodu mase. Zašto mion koji je u svemu drugom identičan sa elektronom ima od njega znatno veću masu. Sa otkrićem kvarkova ovaj problem mase postao je još značajniji. Mada Higgsov fenomen još nije rešio taj problem on daje mehanizam koji omogućava dalje istraživanje.

Čestice dobijaju masu usled Higgsova polja, no zašto svaka čestica stiče drugu masu? Na ovo još nema odgovora, tj. radi se o jačini afiniteta različitih čestica u odnosu na Higgsovo polje.

Kritičan eksperiment za standardni model fizike čestica je da dodjemo do dovoljno visokih energija da možemo da posmatramo fizičko Higgsovo polje odnosno njegov kvantni ekvivalent Higgsove čestice. Njihovo otkriće potvrđice naš koncept unifikacije i omogućiti da ga proširimo na jake interakcije i gravitaciju. Pošto Higgsovo polje ispunjava prostor i u kome nema čestica ono je slično etru za koji se smatralo da je neophodan za rasprostiranje elektromagnetskih talasa. Kao i u slučaju etra ne otkrivanje Higgsova čestica značice revoluciju u fizici.

Kosmolozzi su takođe bili naterani da uvedu polja vrlo slična Higgsovim da učvrste teoriju Big Banga. Zbog toga će u sledećoj dekadi najvažnije pitanje biti otkrivanje Higgsova čestica.

5.4. GRANICE STANDARDNOG MODELA FIZIKE ČESTICA

Uprkos svom uspehu standardni model ne odgovara na sva pitanja, prvo nedostaju još eksperimentalni dokazi za nekoliko esencijalnih delova modela, nije još direktno posmatran neutrino treće generacije ν_τ , još uvek se traga za top-kvarkom, dosadašnja istraživanja su utvrdila da mu je masa veća od 80 GeV-a. Potrebno

je otkriti Higgsove čestice čija masa je potpuno nepredvidljiva. Drugo, još opštija pitanja se postavljaju pred standardni model:

1) Zašto, kao što je pokazao LEP, postoje tri familije fermiona $(u, d), (c, s), (b, t)$?

2) Ima i suviše mnogo slobodnih parametara (to su mase fermiona, konstante vezivanja, uglovi mešanja ...) minimum 18 od kojih 15 potiču iz Higgsovog sektora. Teorija sa tolikim brojem parametara ne može da bude konačna teorija.

3) On uopšte ne uključuje gravitaciju.

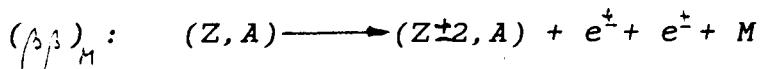
Razvijene su mnoge teorije koje idu iza standardnog modela i uklanjuju njegove nedostatke (SUSY - supersimetrija npr.). Standardni model objašnjava sve postojeće eksperimente, ali znamo da na višim energijama od onih koje dostižemo gde dolazi do daljeg ujedinjavanja sila, on ne može da funkcioniše. Mora da se pojavi "Nova fizika" za koju danas na postojećim raspoloživim energijama nema eksperimentalnih indikacija. Novi veliki kolajderi u izgradnji treba da nam nju pokažu.

Nova fizika ili proširenje standardnog modela možda će se pojaviti sa problemom neutrina. Početkom 70 - tih je bio velik interes za verovatnoću neutrina sa masom, i doprinos masivnih neutrina gustini kosmosa. Neutrini nisu nove čestice, ali to da imaju masu jeste nova ideja. Masivni neutrini bi doprinisili sadašnjoj gustini Svemira, a to vodi ka ograničenjima dozvoljene mase. Ipak ako jedan od neutrina ima masu od oko 15 eV-a to je dovoljno da obezbedi kritičnu gustinu.

Pitanje da li elektronski neutrino ima masu pokušava se utvrditi eksperimentima β -raspada.

Oscilacije neutrina - oscilacije u vakuumu i oscilacije u materiji (misli se na oscilacije u Suncu), su jedino moguće ako neutrino ima masu. Oscilacije neutrina su slične oscilacijama K-mezona. Ne postoji ni jedan fizički princip koji zahteva da neutrino nema masu.

Dvostruki β -raspad može da dovede do nove čestice MAJORANA NEUTRINA



$\tilde{\chi}_1 > 10^{22}$ godine
to je proširenje standardnog modela.

Dvostruki β -raspad: β -raspad atomskog jezgra pri kome se njegovo nanelektrisanje menja za dve jedinice sa emisijom dva elektrona (ili dva pozitrona). U principu moguća su dva tipa β -raspada: dvoneutrinski $2\beta(2\nu)$ i bezneutrinski $2\beta(0\nu)$, sa sigurnošću, do sada, nijedan tip nije detektovan.

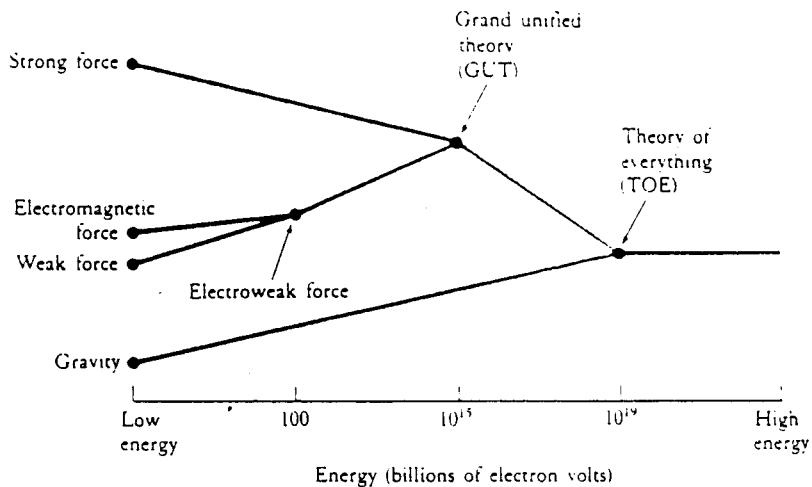
Majorana neutrino. Istinski neutralni neutrino, neutralna čestica sa spinom $1/2$ koja prelazi u samu sebe pri konjugaciji naboja. Predložio ga je Majoran. Ukoliko je masa neutrina ravna nuli, a u slabim interakcijama oni su longitudinalno polarizovani, tada se Majoranovi neutrini ne razlikuju od običnih dvokomponentnih, takozvanih Vailovih neutrina kod kojih je neutrino levo, a antineutrini desno polarizovan. Teorija Majoranovih neutrina predskazuje pored ostalih i dvostruki β -raspad.

6. KONVERGENCIJA KOSMOLOGIJE I FIZIKE ČESTICA

6.1. GUT

Temeljna matematička osobina koja karakteriše svaku fundamentalnu silu je specijalna simetrija - gauge simetrija, ona je povezana sa zakonima održanja. Ako sila pokreće česticu mase 0, onda je u principu može odneti na bilo koju distancu, zato nema ograničenog dometa, tako da čestica bez mase (kakva je foton) može večito putovati. Zato čestica koju pokreće sila odredjena gauge simetrijom mora imati masu 0. One se zovu gauge čestice ili gauge bozoni. W^\pm i Z^0 čestice, kvanti slabe sile nisu bez težine oni na niskim energijama imaju masu oko 100 GeV. Zato kažemo da je njihova gauge simetrija narušena na niskim, a obnovljena na visokim energijama gde Z^0 postaje kao običan foton. Objašnjenje gauge transformacija je omogućilo Weinbergu i Salamu da ujedine slabu nuklearnu interakciju i elektromagnetnu. Weinberg i Salam su zamislili situaciju gde prosečna energija čestice u nekim oblastima prostora (kao na primer u zonama sudara kolajdera) dostiže takve ekstreme da ove dve interakcije imaju jednake intenzitete.

Isti princip je primenljiv kod objedinjenja jake nuklearne interakcije i elektroslabe sile - elektronuklearne sile. Ove ujedinjene teorije su poznate kao GUT (GRAND UNIFICATION THEORIES). Ovo ujedinjenje iziskivalo bi 10^{15} puta intenzivnije energetske uslove od onih potrebnih za proizvodnju protona. Krajnje ujedinjenje svih sila (i gravitacija) u teoriji svega (TOE) zahtevalo bi energije reda 10^{19} GeV-a. Izgraditi ovako snažne akceleratore od 10^{15} GeV-a sa sadašnjom tehnologijom zahtevalo bi dimenzijske koje bi dosezale do obližnjih zvezda.



sl. 9

Sl. 9 Ogromne energije su potrebne da bi se ujedinile četiri sile prirode. Postoji misao da su četiri sile bile jednom ujedinjene na visokim energijama karakterističnim za period ubrzo posle Big-Banga, i zaista teorija koja ujedinjuje slabu i elektromagnetnu silu je već verifikovana za energije od nekoliko stotina GeV-a.

Ono što znamo iz teorije Big Banga je da su takvi uslovi postojali negde na početku stvaranja ovog našeg Svetog. Način da se provere ove teorije ujedinjenja je da se vidi da li one imaju značaja za kosmologiju. Kako bilo smanjujući broj sila povećavamo broj čestica. Kako se energija povećava broj sila se smanjuje, zapravo one se ujedinjuju, međutim smanjujući broj sila povećava se broj čestica. Takva situacija je podstakla neke teoretičare, kao što je Abdus Salam, da predlože još jedan nivo čestica ispod kvarkova. On ih je nazvao preoni i objasnio da se svaki kvark sastoji od dva preona, jednog koji definiše boju i drugog koji definiše aromat. Salam je u sliku uveo leptone i pridružio im četvrtu boju. Po ovoj slici svi leptoni i kvarkovi mogu biti izgradjeni od samo 10 preona.

Ideja vodilja savremene fizike je pitanje: "Da li postoji samo jedna sila koja proizvodi sve čestice i njihove interakcije?" Kada se pokuša objediniti i gravitacija pojavljuje se novi problem. Iako postoji dobar odnos izmedju kvarkova i leptona, šest aromata kvarkova i šest letona, takve veze nema izmedju fermiona - tvoraca

materije i nosilaca sile - bozona, a gravitacija je u podjednakoj interakciji sa oboma. Mora se naci način da se fermioni menjaju u bozone i obrnuto. U pomoc se poziva supersimetrija (SUSY). SUSY pretpostavlja da postoji sasvim novi oblik materije koji stvara simetriju izmedju fermiona i bozona. Svaki od do sada poznatih fermiona ima partnera bozona i svaki bozon partnera fermiona, to najmanje udvostručuje broj čestica. Nijedna od novih čestica ovog tipa još nije registrovana u akceleratorima. Smatra se da one imaju masu nešto veću od w^{\pm} i Z^0 bozona, pa možda i neće biti potrebna baš tako visoka energija kao što je 10^{19} GeV-a da bi videli neke tragove potpunog ujedinjenja.

6.2. POREKLO MATERIJE I TRAGANJE ZA ANTIMATERIJOM

Prvi izvori naših informacija o strukturi Svemira potiču od energije zračenja kojim je Svemir obasut. Teorija Big-Bang nukleosinteze nastoji da objasni obilnost izotopa vodonika, helijuma i litijuma, ustanovljavajući granice gustine obične (regularne) materije Svemira. Još jedan metod je merenje brzine objekata koji emituju svetlosti, atoma i zvezda, čije orbite potpuno okružuju galaksije. Ova rotaciona brzina, u skladu sa Keplerovim trećim zakonom, zavisi od ukupne mase sadržane u orbiti, tako da masa galaksije može biti izračunata. Ono što bi posmatrača moglo vrlo iznenaditi - iznos mase nastavlja da pokazuje porast čak i za zvezde i atome koji kruže daleko izvan osvetljenih delova galaksije. Neka nesvetleća ili tamna materija gura te atome.

Korisna veličina u našoj diskusiji o poreklu materije je odnos materije i zračenja. Za svaki proton ili neutron u Svemiru ide oko 10 milijardi fotona. Kako je univerzum postigao da ima takav odnos materije i zračenja? Do kasnih 70-ih jedini moguć odgovor na to pitanje bio je: u početku je bio jedan proton proizveden na 10 milijardi fotona! Sada vođeni GUT-om imamo dobre ideje kako taj odnos može biti proizведен. U suštini, iako materija i energija međusobno mogu biti zamjenjivi na dovoljno visokoj temperaturi, kako se Svemir hlađi, sada niža energija fotona ne može više da

se promeni u barione.

Kada god u laboratoriji proizvedemo česticu iz ciste energije, takođe proizvedemo i njenu antičesticu. Kao rezultat toga, neki fizičari misle da je Svemir podjednako podeljen na materijalan i antimaterijalan. Naš lokalni sistem je baziran na materiji. Pitanje koje muči astronome je: gde je antimaterija?

Kasnih 60-ih Gary Steigman i Yakov Zel'dovich su pokazali da u svakom univerzumu gde postoji simetrija u materiji i antimateriji protoni i antiprotoni nastavljaju da se uzajamno poništavaju, dok ne ostane jedan proton ili antiproton na svakih 10 milijadi milijadi fotona. Tada se postojeći odnos od jednog protona na 10 milijadi fotona suprotstavlja ovom modelu simetrije.

Dalje, mi možemo tragati za antimaterijom direktno u kosmičkim zracima, koji dolaze iz dubokog Svemira. Činjenica je da većina energetskih čestica putuje takvom brzinom da nisu ograničene na galaksije. Posmatranja balonima i raketama u gornjim slojevima atmosfere ustanovila su odnos između antiprotona i protona u kosmičkim zracima oko 1:10000, a to je iznos antimaterije koji očekujemo da bude proizведен u sudaru protona sa materijom galaksije posmatrajuci u odnosu na sudar u akceleratoru. To dakle izgleda kao da nema ekstra antiprotona u okolini naše galaksije.

Još jedna istraživačka tehnika koristi činjenicu da bi poništavanje materije i antimaterije proizvelo gama zrake sa izvesnim karakteristikama energije. Kako bi ograničenost regiona materije i antimaterije proizvela ogromne iznose energije poništavanja, mogli bismo naci takvu granicu, ako postoji, tražeći te karakteristične gama zrake. Potrage detektorima gama zraka, u satelitima, nisu zabeležile izvor, pa za sada možemo reći da je naša oblast izgrađena od materije. Tako da smo suočeni sa problemom: ako postoji simetrija antimaterije i materije, zašto je Svemir tako asimetričan.

6.3. NEOČUVANJE BARIONA

Sve GUT teorije predviđaju da pri dovoljno visokoj temperaturi broj kvarkova, a samim tim i broj neutrona i protona, nije

konstantan, takodje da se barionski broj ne održava. Normalno jaka, slaba i elektromagnetna sila ne menja ukupan broj kvarkova, ali kada su one konbinovane u ujedinjenu silu, teorija govori da to više nije tačno. Ujedinjena sila može da promeni kvarkove u leptone i obrnuto, izmenom X i Y bozona (mase od 10^{15} GeV-a).

U postojećim akceleratorima energije (stotine GeV-a) procesi neodržanja kvarkova su skoro zanemarljivi, (skoro ali ne i u potpunosti, posto GUT predviđa raspad protona sa srednjim životom od 10^{32} godine). Ove GUT energije 10^{15} GeV postojale su u veoma ranim fazama univerzuma kada je $T = 10^{28}$ K što je u standardnom modelu Big Benga vreme oko 10^{-35} s posle stvaranja Svemira.

Pošto su interakcije sa neočuvanjem kvarkova u ovoj ranoj fazi razvoja Svemira bile veoma jake, moguće je da je Svemir, koji je u početku bio simetričan u odnosu materije i antimaterije (ukupan broj kvarkova minus ukupan broj antikvarkova jedna nuli), mogao da evoluira u današnji Svemir u kome postoji višak kvarkova nad antikvarkovima.

Da bi se to desilo potrebna su još dva dopunska uslova: prvo je asimetrija čestica-antičestica tj. narušavanje simetrije konjugacije naboja (C), a drugo je narušavanje (CP) simetrije.

Eksperimenti su pokazali da postoji asimetrija pri raspadima koji se dešavaju pod slabom interakcijom, kao što je pionski, mionski i kaonski raspad.

(CP) narušavanje dopušta raspad X-bozona u kvarkove ili u antikvarkove sa raznim verovatnoćama raspada. To dovodi do viška materije nad antimaterijom.

Drugi potreban uslov da bi se ova nesimetrija održala, jer na visokim temperaturama opet će se uspostaviti ravnoteža (produkti raspada X-bozona bi se spojili ponovo u X-bozone), je napuštanje termalne ravnoteže što se naravno prirodno dešava posto se Svemir hlađi sa širenjem.

Sada se reakcije i dalje mogu odvijati samo u jednom smeru (X-bozoni se raspadaju, ali se ne rekombinuju). I X ranije stvoreni se raspadaju u lakše kvarkove pa je krajnji rezultat mali višak kvarkova prema antikvarkovima (1:10 milijardi).

U tom trenutku 10^{-35} s posle radjanja Svemira broj kvarkova je približno jednak broju protona. Mala asimetrija u odnosu materije i antimaterije se nastavlja sve dok se kvarkovi ne počnu spajati u barione, a antikvarkovi u antibarione. Ove čestice (barioni i antibarioni) anihiliraju i proizvode fotone koji se zbog hladjenja ne mogu regenerisati u barione. Mali višak stvoren na 10^{28} K ostavlja oko jedan nukleon na oko 10 milijadi fotona. Veoma mali višak kvarkova nad antikvarkovima odgovara svim kvarkovima našeg Svemira.

6.4. INFLACIJA

Svi prethodno pomenuti problemi koje standardni model kosmologije ne rešava: problem horizonta, problem struktura, problem starosti, problem rotacije i problem monopolija - se odnose na početne uslove iz kojih se naš Svemir pojavio. Do rešenja putem "inflacije", koju je 1980 godine predložio Alan Guth, sve teorije su zahtevale vrlo proizvoljne pretpostavke o tim početnim uslovima. Inflacija se odnosi na fazu u evoluciji Svemira za vreme GUT epohe kada je njegova ekspanzija bila ekstremno brza, tako da se Svemir dvostruko uvećavao u svakom intervalu od 10^{-34} s. Inflacija nije alternativa Big B nego već nam ona omogućava da ogromno mnoštvo proizvoljnih početnih uslova konvergira ka specijalnom početnom uslovu koji mi posmatramo u današnjem Svemiru. Prvo će biti opisan fenomen inflacije, a kasnije kako ona rešava većinu pomenutih problema.

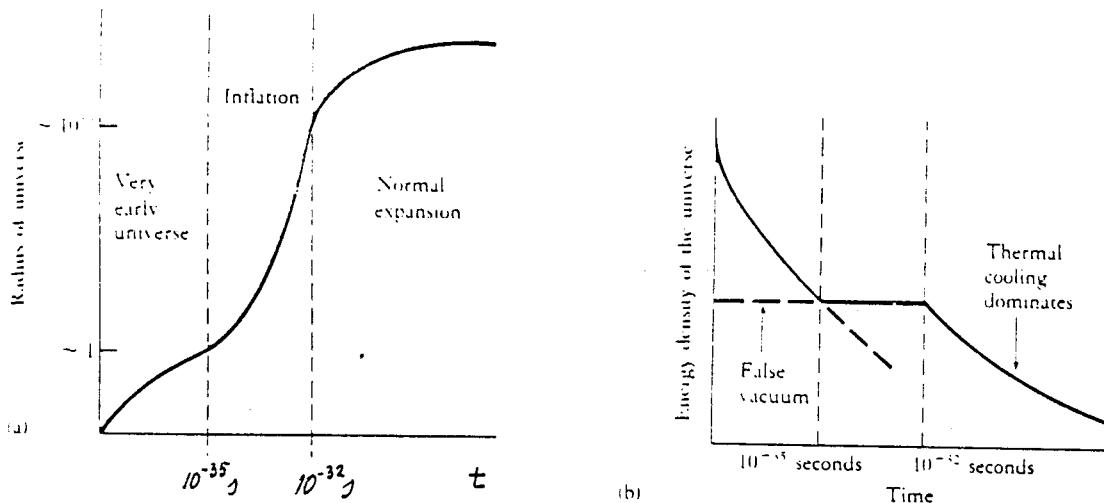
Iz Einsteinove opšte teorije relativnosti sledi: što je veća gustina materije i zračenja, to je brzina ekspanzije veća, i obrnuto. Pošto su masa i energija ekvivalentni onda ekspanzija zavisi od gustine energije.

U standardnom modelu kosmoloske ekspanzije, kako vreme teče, gustina opada pa samim tim i brzina ekspanzije opada. Gustina energije opada jer se povećava prostor pa masa i energija zauzimaju sve veći prostor. Svemir bi mogao da se širi konstantnom brzinom ako se gustina održava konstantnom, tako da i ako dimenzije Svemira rastu gustina energije (energija po jedinici zapremine) ostaje i

sta. To je moguće jedino ako prostor koji se dodaje sadrži neku konačnu vrednost gustine materije i radijacije. Ako je gustina energije suma materije (materija - ono što ima masu) i zračenja proširenje zapremine bez dodavanja materije i zračenja smanjice gustinu energije. Međutim, šta bi se desilo ako bi prostor koji dodajemo sadržao ogromnu kolicinu gustine energije tj. ako prostor koji dodajemo ima konačnu gustinu mase i energije, a ne vrednost 0. Rezultat je da dodavanjem prostora dodajemo i energiju. Higgsovo polje je uvedeno kao prirodni mehanizam narušavanja gauge simetrije i davanja mase izvesnim nosiocima sila-gauge česticama. Svemir je počeo u stanju bez Higgsova polja. Hladjenjem pao je ispod kritične temperature i Higgsova polja su se pojavila. U blizini ovog prelaza Higgsove čestice su dale energije vakuumu, to je upravo ono što je neophodno kosmičkoj inflaciji. Kosmolozzi tu vrstu vakuuma nazivaju "lažni vakuum". On je u svemu drugom sličan vakuumu, ali za razliku od njega ima gustinu energije. Higgsovo polje nam je bilo potrebno za elektroslabu silu. Velika unifikacija zahteva takodje, Higgsov mehanizam i sada vidimo da je on neophodan za kosmičku inflaciju.

Brzina ekspanzije Svemira ima nekoliko faza u zavisnosti koliko je sa dodatim prostorom uneto energije. U najranijoj fazi temperatura je najviša (vreme je krace od 10^{-35} s), a gustina energije je toliko velika da svaki dodan vakuum ima mali uticaj, pa se u toj ranoj fazi širenje odvija normalno, kao Big Bang bez inflacije.

Na nešto hladnijem GUT nivou hlađenje Svemira pada ispod kritične temperature, a energija vakuuma postaje značajna u poređenju sa gustinom zračenja, i tada nastupa inflaciona faza. Inflacija se završava kada polje slično Higgsovom postane različito od 0 i naruši simetriju, tj. razdvoji se jaka sila od elektroslabe. Fazna promena koja završava inflaciju menja lažni vakuum u pravi vakuum u kome prostor nema gustinu energije i ekspanzija se vraća na klasičan Big-B ng model.



sl. 10

- a) Ekspanzija je veoma brza za vreme inflacije,
- b) gustina Svemira stalno opada izuzev perioda inflacije kada dominira lažni vakuum. Konstantna gustina je uzrok inflacije.

Ogromna energija sadržana u lažnom vakuumu sada stvara čestice. Formira se gusta smeša elementarnih čestica ona se širi i hlađi, i standardni model Big Bang teorije počinje.

Kako inflaciona faza rešava probleme "Početnog uslova". Ekspanzija koja se dešava u inflatornom periodu uvećava prvobitni Svemir za faktor od preko 10^{50} puta. Period inflacije traje od 10^{-35} s do 10^{-32} s i svakih 10^{-35} s se zapremina udvostručuje. Ovako velika ekspanzija može dobro da reši problem horizonta jer u početnom trenutku u 10^{-35} s Svemir je bio dimenzija $R = 10^{-35}$ svetlosnih sekundi, što je veoma malo i u tom regionu je sve medjusobno povezano. Znači, kako su svi regioni sada poznatog univerzuma u to davno vreme bili uzajamno povezani jasno nam je zašto su danas temperature jednake. Sva materija današnjeg Svemira potiče iz tog malog domena koji je za vreme inflacije bio toliko uvećan.

Problem starosti je zadovoljen jer inflacija čini stvari tako velikim da bilo koji konačni domen koji je prvobitno bio zakrivljen

izgleda ravan, a ravan univerzum ima $\Omega = 1$. Slična je situacija sa čovekom kome se Zemlja, kada je na njoj, čini ravnom.

Problem rotacije je isto zadovoljen jer su članovi jednačine rotacije oko neke ose proporcionalni krivinama i nestaju kada lokalne krivine teže nuli (0).

Problem monopolia je rešen jer je samo jedan proizveden po zapremini horizonta upravo pre inflacije. Zapremina horizonta je zapremina univerzuma koja je kauzalno povezana, njen radius je rastojanje koje pređe svetlost za raspoloživo vreme. Pre inflacije zapremina horizonta je sfera radiusa 10^{-35} svetlosnih sekundi. Ako se pomnoži zapremina horizonta sa gustinom, u tom momentu, dobija se da zapremina horizonta sadrži 10^{-80} materije od današnje zapremine horizonta. Zato u standardnom modelu treba sabrati mnoge od tih zapremina horizonta (približno 10^{80}) da bi dobili sadašnju epohu. To znači da bi dobili 10^{80} monopolia, što je približno jednak broju protona. No prema inflatornom modelu ceo univerzum se stvara od samo jedne zapremine horizonta, što znači da postoji samo jedan monopol. Ne možemo očekivati da ga registrujemo. Moguće je da se stvari još neki monopol u nekim reakcijama odmah posle inflacije, ali bi ih i tada bilo jako malo.

Može se pitati zašto su monopolii "oduvani", a zašto ne barioni koji su proizvedeni isto u GUT epohi. Barioni su proizvedeni u doba kraja te epohi kada su sile koje narušavaju barionski broj prestale da budu u ravnoteži. Važno je istaći da bez našeg poznavanja proizvodnje bariona inflatorni model bi bio nemoguć, posto bi predviđao prazan prostor. Inflacija je mnogo učinila da Svemir bude objasnjen preko zakona prirode, a ne pomoći čudesnih početnih uslova. Ali međutim, ostaje još nekoliko problema, kao što je zgrudvanost.

Ako je sve bilo ujednačeno tako da nema više preostalih grudvica da čine galaksije, javlja se problem. Drugi problem je kako se inflacija zaustavlja kada vec jednom krene tj. kako kada se tako brzo dešava, uspe da prodje kroz fazni prelaz. U simetričnoj fazi svemira sve su sile ekvivalentne, u fazi narušene simetrije sile su različite. Prelaz od simetrije ka narušenoj simetriji je fazni

prelaz. Kako mi prelazimo iz jednog u drugo stanje ? Mi znamo da se hladjenjem Svemira simetrija narušava. Da bi fazni prelaz isao do kraja, tj. bio potpun, svaki domen prostora gde je narušena simetrija mora se ujediniti sa drugim isto takvim regionima. Međutim, u inflatornom periodu elementi koji su već presli u drugu fazu "Mehuri" se veoma brzo udaljavaju jedan od drugoga. Da bi fazni prelaz postao potpun, mehuri nove faze moraju svi zajedno da se udruže. Gde god da u našem prostoru postoji fazni prelaz, mehuri nove faze treba da se udruže. Kosmičkom inflacijom, to se ne može dogoditi jer bi se mehuri nove faze udaljavali jedni od drugih brže nego što bi rasli, tako ne bi nikad GUT fazni prelaz bio potpun. Ako bi se desio potpuni fazni prelaz, to bi omogućilo razumevanje porekla nehomogenosti Svemira, a to su galaksije. One bi poticale od spajanja različitih mehura. Međutim, u originalnom inflatornom modelu, mehurovi nove faze narušene simetrije krecu se odvojeno jedni od drugih, brže nego jedni prema drugima. Prelaz nikad ne ide do kraja i nema nesavršenosti nehomogenosti do koje bi došlo spajanjem mehura.

Rešenje ove teškoće dao je Andrej Linde svojim modelom haotične inflacije, zasnovanoj na sporoj promeni faze, određenog izborom parametara GUT-a, ravnomerni fazni prelaz omogućava da je ceo sadašnji Svemir potekao iz jednog mehura, koji je bio homogen i izotopan i u kome energija gustine nije bila skoncentrisana na zidovima mehura kao u brzom faznom prelazu. Ovakav lagani fazni prelaz omogućava takođe da dovoljni višak kvarkova bude proizveden u mehuru u saglasnosti sa onim što postoji u sadašnjem Svemiru.

Pojam Svemira kao jednog mehura, ima ogromne posledice - mogu da postoje mnogi drugi Svemiri tj. potpuno nepovezani sa našim. Prostor izmedju tih mehrova - Svemira nije normalni fizički prostor, nego prostor u kome su sve sile ujedinjene u kome se protoni trenutno raspadaju, kvarkovi i leptoni se razmenjuju i normalna materija ne postoji - postoji samo energija, koja nema memoriju tj, to su sva stanja materije odjednom.

Taj novi inflatorni mehur ne rešava problem zgrudvanosti, ako je celokupan Svemir jedan mehur tada taj mehur treba da stvori s-

ve te grudve. Ne možemo te grudve da stvorimo sudarom mehurova i posto je to samo jedan mehur, ne možemo da uzmemo u obzir bilo kakvu grudvu proizvedenu ranije, recimo u periodu kada je gravitacija bila ujedinjenja sa ostalim silama u TOE. Ni jedna grudva ne bi prezivela inflaciju. Perturbacije koje su dovele do stvaranja galaksija su morale da se odigraju u jednom jedinom mehuru. Linde, Hawking i ostali su našli da u jednom mehuru postoje varijacije u gustini energije prouzrokovane slučajnim kvantnim fluktuacijama u GUT epohi kada je današnja materija Svemira bila zgusnuta u domenu prečnika manjeg od teniske lopte, domenu tako malom na skali galaksija i skupova galaksija da su kvantni efekti i neodredenosti bili važni.

Kvantna zgrudvanost će se pojaviti spontano, a Zel'dovich je vec ranije predviđao prvobitni spektar masa te zgrudvanosti koji aproksimativno odgovara današnjem rasporedu masa galaksije. I tu postoji problem. Mada ta kvantna zgrudvanost daje dobar spektar masa, ona takodje proizvodi tako velike fluktuacije da grudve odmah stvaraju crne rupe umesto spor razvoj galaksija.

Danas ne postoji zadovoljavajuća teorija formiranja galaksija iz te zgrudvanosti na kraju inflacije. Ima teorija da je umesto te zgrudvanosti GUT proizveo koncentraciju energije u konfiguracijama sličnim dugim žicama - COSMIC STRING. Ti trodimenzionalni stringovi su fosili GUT faznog prelaza. To su tanke cevi visokoenergetskog vakuma, koji su po izvesnim teorijama mogli da prežive do današnje epohe. String je uronjen u normalni vakuum nulte energije. Omče formirane ovim cevima gravitiraju i postaju klice formiranja galaksija i skupova galaksija. Jasno je da će nam astronomsko posmatranje skupova galaksija i galaksija na velikoj skali pomoći rešavanju problema zgrudvanosti, što pomaže i rešavanju problema faznih prelaza ranog Svemira. Druga je mogućnost da neki docniji fazni prelaz stvara strukturu materije. Izucavanje velikih struktura Svemira omogućice izucavanja porekla nehomogenosti i faznog prelaza ranog Svemira.

6.4.1. SUPERSIMETRIJE

Fizičari čestica i kosmolozzi nisu bili zaustavljeni problemom nesaglasnosti inflacije sa posmatranim strukturama. Oni su tražili modele GUT-a koji bi bili u saglasnosti sa jednometričnim Svetim i inflacijom i koji ne bi proizvodili crne rupe. Ti zahtevi omogućavaju selekciju između ranih modela GUT-a. Današnji najbolji model je model supersimetrije (SUSY), velike unificirajuće teorije GUT-a tj. SUSY-GUT model, kao što su pokazali Ellis, Olive, i drugi. Taj model održava amplitudu kvantnih fluktuacija malim, zadržavajući sve ostale dobre osobine.

Supersimetrični GUT model je bio još ranije predložen kao mogući put ujedinjenja svih interakcija. U SUSY modelu imamo simetriju fermiona i bozona. To zahteva dupliranje fermiona i bozona, znači predviđa postojanje mnogih novih čestica. Supersimetrični partneri fermiona su skvarkovi i sleptoni, a fermionski partneri bozona su gravitino, fotino, vino, zino ... Takodje Higgs čestica mora imati i Higgs-ino. Od ovih novih čestica jedna je najlakša i apsolutno stabilna. Najpopularniji kandidati za najlakši superino su gravitino i fotino.

Mnoga od ograničenja koja se primenjuju na masivne neutrine mogu se sa podjednakom važnošću primeniti i na superine. Bitna razlika je da se superini, s obzirom da slabije interaguju, razdvajaju iz tog para pre nego neutrini i njihov relativni broj se smanjuje zbog stvaranja entropije usled poništavanja čestica niže mase. Pored toga, tamo gde se masa neutrina često tretira na ad hoc način, fenomenološki supersimetrični modeli obično predviđaju u granicama osobine novih čestica i zbog toga kosmoloski argumenti mogu u znatnoj meri uticati na gradjenje modela. Ovaj model predlaže takođe nove kandidate za tamnu materiju. Model inflacije predviđa da je Ω eksaktno ravno jedinici (1), predviđa eksaktну vrednost sto ni jedan

drugi model ne može da učini. Ako je inflacija tačna, tada je najveći deo materije nebarionski možda sastavljen od SUSY čestica.

6.4.2. TEORIJA SVEGA MOGUĆEG - TOE

Na dovoljno visokim temperaturama gravitacija se ujedinjuje sa drugim silama, u toj epohi Svemir ima subatomske dimenziјe. To je bilo na temperaturi od 10^{19} GeV; (10^{32} K); gustina je 10^{92} g/cm³. Na tim ogromnim gulinama svaka tačka Svemira trenutno će postati crna rupa, koja će tada isparavati. Brzina isparavanja bice ista kao starost Svemira koja u tom trenutku iznosi 10^{-43} s, period vremena koji nazivamo Plancovim vremenom. Ceo Svemir je neprekidno u stanju diskontinualno prostorno vremenskog sundjera u kome se formiraju i eksplodiraju crne rupe. Različiti delovi prostora vremena postaju međusobno povezani i razdvajaju se jedan od drugog spontano. Prostor i vreme postaju kvantizirani i nisu više homogeni.

Danas ne poznajemo zakone fizike tog perioda, i ne poznajemo kvantu gravitaciju, i ne možemo da extrapolisemo vreme dalje od toga ka nuli (0), vreme koje poznajemo možda nije ni postojalo pre toga. Verovatno je bio izvestan fazni prelaz u trenutku kada je Svemir prelazio u to doba, koji je vodio iz simetrije svih sila do narušene simetrije kada se gravitacija izdvojila.

Medutim, naše nepoznavanje tog perioda ne utiče na razumevanje dognije evolucije. Ako su interakcije na nižim temperaturama bile u ravnoteži, mi smo izgubili svaki trag bilo kakvih početnih uslova tako da je jedino važno da možemo da se vratimo do vremena te ravnoteže da bismo razumeli šta je kasnije nastajalo. Kao što neutron i proton dostižu ravnotežu na 10^{10} K, slično za poreklo materije sve što treba da znamo kada je bila ravnoteža interakcija koje proizvode kvarkove. To je bilo na 10^{14} GeV-a, (10^{27} K) još daleko od Plancovih neodređenosti na 10^{19} GeV-a (10^{32} K).

6.4.3. STRING I SUPERSTRING

Jedna od najprivlačnijih teorija kvantne gravitacije se zasniva na pojmovima da fundamentalni entiteti prostora vremena nisu tačke nego male omče "strune" (string), tj. jednodimenzionalni objekti umesto bezdimenzionalne tačke. Supersimetrične teorije su jedino matematički konzistentne (bez kontardikcija), ako su fundamentalni entiteti ¹⁰⁻bezdimenzionalne superstrune umesto bezdimenzionalnih tačaka koje se kreću u četvrtoj dimenziji - vremenu. Trvrdi se čak da takva teorija jeste jedino moguća kompletna superunificirajuća teorija, konačna teorija svega postojecog TOE. Naravno i superstringovi imaju probleme, kao na primer, kako iz desetodimenzionalnog superstring prostora doći do naše četiri dimenzije.

LITERATURA:

- WEISSKOPF, V.F. "THE ORIGIN OF THE UNIVERSE", AMERICAN SCIENTIST, SEPTEMBER-OCTOBER 1983, PAGES 473-480.
- L. VAN HOVE, "PARTICLE PHYSICS AND COSMOLOGY-NEW ASPECTS OF AN OLD RELATIONSHIP", NISHINA MEMORIAL LECTURE, TOKYO, APRIL 11. 1990.
- DAVID LINDLEY, EDWARD W. KOLB AND DAVID N. SCHRAMM, "COSMOLOGY AND PARTICLE PHYSICS", RESOURCE LETTER CPP-1, 29. 10. 1987. AM. J. OF PHYSICS.
- "THE CASE FOR THE HOT BIG BANG COSMOLOGY", FERMI NATIONAL ACCELERATOR LABORATORY, FEBRUARY 1991.
- ABDUS SALAM, "ASTROPARTICLE PHYSICS (1988)", ABDUS SALAM INTERNATIONAL CENTRE FOR THEORETICAL PHYSICS, TRIESTE, ITALY AND IMPERIAL COLLEGE LONDON, U.K.
- JOHN ELLIS, "PARTICLE PHYSICS AND COSMOLOGY" CERN-GENEVA, JUNE 25-JULY 1, 1987. UPPSOLA, SWEDEN.
- ANN K. FINKBEINER, "MAPMAKING ON THE COSMICS SCALE", OCTOBER 1985. MOSAIC.
- T. A. HEPENHEIMER, "BRIDGING THE VERY LARGE AND VERY SMALL", NOVEMBER 1990. MOSAIC
- L. LEDERMAN, D. SCHREMM, "FROM QUARKS TO THE COSMOS", 1989. SCIENTIFIC AMERICAN LIBRARY
- E. W. KOLB, M. S. TURNER "THE EARLY UNIVERSE", 1990. ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY,

- HARALD FRITZSCH, "KVARKOVI", ŠKOLSKA KNJIGA, ZAGREB 1988.
- STIVEN WEINBERG, "PRVE TRI MINUTE ILI SVREMENO VIĐENJE PORIJEKLA SVEMIRA", SVIJETLOST, SARAJEVO 1988.
- STIVEN HOKING, "KRATKA POVEST VREMENA", OTOKAR KERŠOVANI, OPATIJA 1988.
- G. J. MJAKIŠEV, "ELEMENTARNE ČESTICE", NOLIT, BEOGRAD, 1983.
- "SAVREMENA ISTRAŽIVANJA U FIZICI", ZBORNIK RADOVA, REDAKTOR B. DRAGOVIĆ, BEOGRAD, 1982.
- TOMISLAV PETKOVIĆ, "MODERNA EKSPERIMENTALNA FIZIKA I SPOZNAJNA TEORIJA", ŠKOLSKA KNJIGA, ZAGREB, 1990.
- DIPLOMSKI RAD DUBRAVKA JANČIĆ, "JEDNOSTAVNI KVANTNOMEHANIČKI MODELI U INFLACIONOM MODELU SVEMIRA", PMF NOVI SAD 1989.
- DIPLOMSKI RAD LAVIČKO ILDIKO, "STANDARDNI KOSMOLOŠKI MODEL", PMF NOVI SAD 1973.