

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

Природно-математички факултет
Радна заједница заједничких послова
НОВИ САД

Прима:	- 2. II. 1983
Од:	Би. I

03 10/4



ДИПЛОМСКИ РАД

- КОСМОЛОГИЈА И ФИЗИКА
ELEMENTARNIH ČESTICA -

Novi Sad, 1983.

Lavička Ildiko

Zahvaljujem se profesoru Milanu dr Nikoliću na sugestiji
jema datim u toku izrade ovog diplomskog rada.

S A D R Ģ A J

1. U V O D.....	1
2. STANDARDNI KOSMOLOŠKI MODEL.....	4
2.1. Uvod.....	4
2.2. Standardni kosmološki model.....	5
2.3. Širenje vaspone.....	9
2.4. Kosmički mikrotalagni šum.....	14
3. RANA VASIONA.....	17
3.1. Uvod - skraćna otkrića.....	17
3.2. Evolucija rane vaspone.....	18
3.3. Bariosintesa i poreklo materije.....	22
3.4. Nukleosintesa i nastanak laktih elemenata.....	27
4. NEUTRINI U FIZIČKI ČESTICA.....	32
4.1. Astrofizičko i kosmološko određivanje neutrina.....	33
5. EGZOTični ostaci velike eksplozije.....	37
5.1. Magnetni monopolii.....	37
5.2. Reliktni kvarkovi.....	40
6. INVARIJANTNOST FIZIČKIH ZAKONA.....	42
6.1. Posmatranja dalekih objekata.....	43
6.2. Zenaljska merenja.....	44
6.3. Konstanta gravitacije.....	45
7. Z A K L J U Č A K.....	46
L I T E R A T U R A.....	48

I. U V O D

Ne postoji ni jedan objekat u fizici, koji je veći od vasiona. Ni jedan nije misteriosniji, a ni usredljiviji. Preuđenje vasiona je oduvek angažovalo najveće umove i izazivalo velika interesovanja. Djordano Bruno je spaljen 1600-te godine zbog svojih ideja o beskonačnoj vasioni, dok u novije vreme sliku Ajnštajnovog sveta je morala prihvatići i bučna religijska opozicija. Izušavanje vasiona je postalo normalni deo fizike i astrofizike, a kao rezultat naučne revolucije danas znamo kako je vasiona nastala i kako ona danas izgleda.

Ovo je vreme puno usbjudjenja. Napredak koji nas je doveo do ujedinjavanja slike i elektromagnetne sile daje nam obrubrenje za potpuno ujedinjavanje, koje uključuje jednu silu i moćnu uskoro gravitaciju. Ova dostignuća u fizici čestica su predočena sa velikim interesovanjem astrofizičara koji su u svom radu dobrim delom oslonjeni na fiziku. Simbiosa između fizike čestica i astrofizike, danas postaje sve veća. Astronomi se služe novim idejama fizike čestica a, astrofizički uslovi omogućavaju njihovu preveru. U stvari, vasiona je, pored postojećih akceleratora, laboratoriјa gde nove teorije mogu biti testirane i često, zbog specifičnih uslova, ona je i jedino mesto gde se to može uraditi.

Dok su najviše energije, koje možemo dobiti u našim akceleratorima 10^5 GeV (energija čestice u laboratoriјi), u vrlo ranoj vasioni odgovarajuće energije čestica su reda 10^{19} GeV. Da citiramo Zeldovicsch-a (1970): "Naša vasiona je laboratoriјa za fizičare čestica".

Povezivanje fizike čestica i kosmologije je najveće u ranom stadijumu vasiione kada su temperatura i gustina bile vrlo visoke a sudari između čestica su bili vrlo česti. Različite vrste čestica su bile proisvedene vrlo rano i preko brzih interakcija, došle su u ravnotežu jedna sa drugom.

Kako se vasiiona širila i hladila, brzina reakcija je pala ispod brzine ekspanzije; različite čestice su izlazile iz ravnoteže ostavljajući tako "ostatke" iz rane epohе. Koliko ih je preživelo i kako su uticale na evoluciju zavisi od njihove mase, vremena života i jačine interakcije. Ako neki takvi "trgovi" postoje, tada kosmologija nam može dati potrebnu proveru fizike čestica. Samo stabilne ili dugo živeće ($\tau \geq 10^{10}$ god.) čestice su mogle preživeti iz rane vasiione i one postoje i danas. Za fotonе iz tog perioda koji su u oblasti γ K mikrotalasnog zrašenja, imamo jake potvrde dok istraživanja neutrina, slobodnih kvarkova i magnetskih monopola tek treba da dokazuju njihovo postojanje. Pošto sve čestice interaguju gravitaciono, oni će doprinositi današnjoj kosmičkoj masenoj gustini i tako, možda, dati potrebnu, sada nedostajuću masu da vasiона буде zatvorena.

Prvobitna nuklearna sinteza daje nam drugu veoma važnu proveru. Količina ${}^4\text{He}$ nastalog u tom periodu zavisi od odnosa između brzine slabe interakcije i brzine ekspanzije. Brzina ekspanzije zavisi od broja vrsta lakih čestica koje su bile prisutne na $T \gtrsim 1\text{MeV}$. Ova zavisnost daje nam stroge granice broju vrsta lakih čestica ($N \lesssim 1\text{MeV}$) koje slabe interaguju; kao što su neutrini.

Poreklo celokupne materije u vacioni kao i odgovor na pitanje zašto postoji asimetrija između materije i antimaterije, možemo naći u periodu velike unifikacije četiri fundamentalnih sila na veoma visokim energijama u vrlo ranom stadiumu vacione. Teorije velike unifikacije takođe predviđaju vreme života protona dajući tako melanholičnu viziju nestanka celokupne materije u vacioni.

2. STANDARDNI KOSMOLOŠKI MODEL

2.1. Uvod:

Proučavanje ciklusa života vasiione počećemo modelom vasiione. Vasiiona se Širi sada i Širila se dugo vremena pre. Svaka hipotetična istorija vasiione mora računati sa ovim Širenjem, kao i sa posmatračkom Šinjenicom da vasiiona generalno izgleda ista u svim pravcima. Ako ovo Širenje sledimo unazad kroz vreme, videćemo da je vasiiona u prošlosti morala biti manja. Sledеći ga još dalje unazad, ustanovićemo da je postojalo vreme kada je sva materija u vasiioni bila tesno zbijena. Eksplosija ove guste materije je usrok Širenja vasiione koja danas možemo videti. Izmedju "velike eksplozije" i našeg doba zibili su se neki zanimljivi dogadjaji, a to što se dešavalo ima opažljive posledice koje nam omogućavaju da potvrdimo naš model.

Godine 1917., dve godine nakon pojave opšte teorije relativnosti, Albert Ajnštajn i holandski fizičar Vilém de Sitter, nezavisno jedan od drugog primenili su novu teoriju na vasiioni kao celini. Njihovo istraživanje pokazalo je da vasiiona, koja se pokorava Ajnštajnovoj teoriji gravitacije, mora ili da se Širi ili da se skuplja; ona ne može da ostane statična. Stvarna evolucija vasiione otkrivena je kasnije, u toku dvadesetih godina, kada je E. P. Hubble (Habli) pronašao da se sve galaksije, osim nekolicine, brže udaljavaju od zemlje.

Sve do posmatranja izvršenih šezdesetih godina, slika evolucije vasiione nije bila zadovoljavajuća. Bio je to samo model, a postojali su i drugi načini da se objasni Širenje vasiione. Uvodjenje podataka dobijenih posmatranjima koji su se odno-

sili na rane faze evolucije vasmine, učinilo je kosmologiju naukom. Otkrivena su dva ostatka "velike eksplozije": prerada jedne četvrtine vasmine u helijum i zračenje preostalo posle ove prvobitne eksplozije.

U toku poslednje decenije, jedna teorija o ranoj vasmine je toliko opšteprihvaćena da je često nazivaju "standardnim modelom". Ona se manje-više poklapa sa onim što se ponekad naziva "teorijom velikog praska" (big bang model), ali je mnogo određenija kada je reč o sastavu vasmine.

Da bismo bliže proučili dogadjaje u ranoj vasmine počećemo sa pregledom njenog razvoja, onako kako ga danas daje standardni model, a kasnije ćemo izneti razloge za prihvatanje takvog modela.

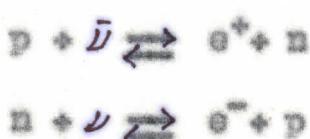
2.2. Standardni kosmološki model

Isgleda da je sve počelo pre 10-20 milijardi godina sa velikom eksplozijom u uslovima koji su isvan našeg današnjeg razumevanja. Otprilike u prvoj stotinki sekunde, najranijem vremenskom trenutku o kojem možemo govoriti sa bilo kakvom sigurnošću, temperatura vasmine je iznosila oko 10^{11} °K. Materija koja se rasletala posle eksplozije sastojala se od različitih vrsta elementarnih čestica: piona, hiperona, mesona, miona, neutrina, protona, elektrona, neutrona i fotona. U početku, sve ove čestice su bile u ravnoteži, dok su se neprekidno transformisale kroz različite reakcije. Miliardima puta u sekundi, elektroni su se sudarali sa positronima iščezavajući u bljesku gama zraka prema relaciji:

$$e^- + e^+ \rightarrow 2 \gamma$$

Obrnuto, gama zraci su se sudarali i proizvodili parove elektron-
-positron.

Pored ovih reakcija takođe su česti sudari protona i
neutrona sa mnogobrojnim elektronima i neutrinima koji dovode do
brzih prelaza protona u neutrone i obrnuto:



Svaka reakcija je uravnotežena obrnutom reakcijom.

Kako se eksplozija nastavljala, vasporna se širila i
hlađila, dostigavši temperaturu od 10^{10} °K posle otprilike jed-
ne sekunde. Tada je postalo dovoljno "hlađno" da su se elektro-
ni i pozitroni anihilirali brže nego što su mogli ponovo nasta-
ti iz gama zraka i neutrina. Otprilike u to isto vreme, zbog
smanjenja gustine i temperature, srednje slobodne vreme neutrini-
na i antineutrina se povećale u toj meri da sve čestice počinju
da se ponašaju kao slobodne čestice; one više nisu u topotnoj
ravnoteži sa elektronima, pozitronima ili fotonima. Od sada pa
nadalje neutrino i antineutrino prestaju da igraju aktivnu ulo-
gu; samo daju svoj energetski doprinos izvoru gravitacionog po-
lja vaspone.

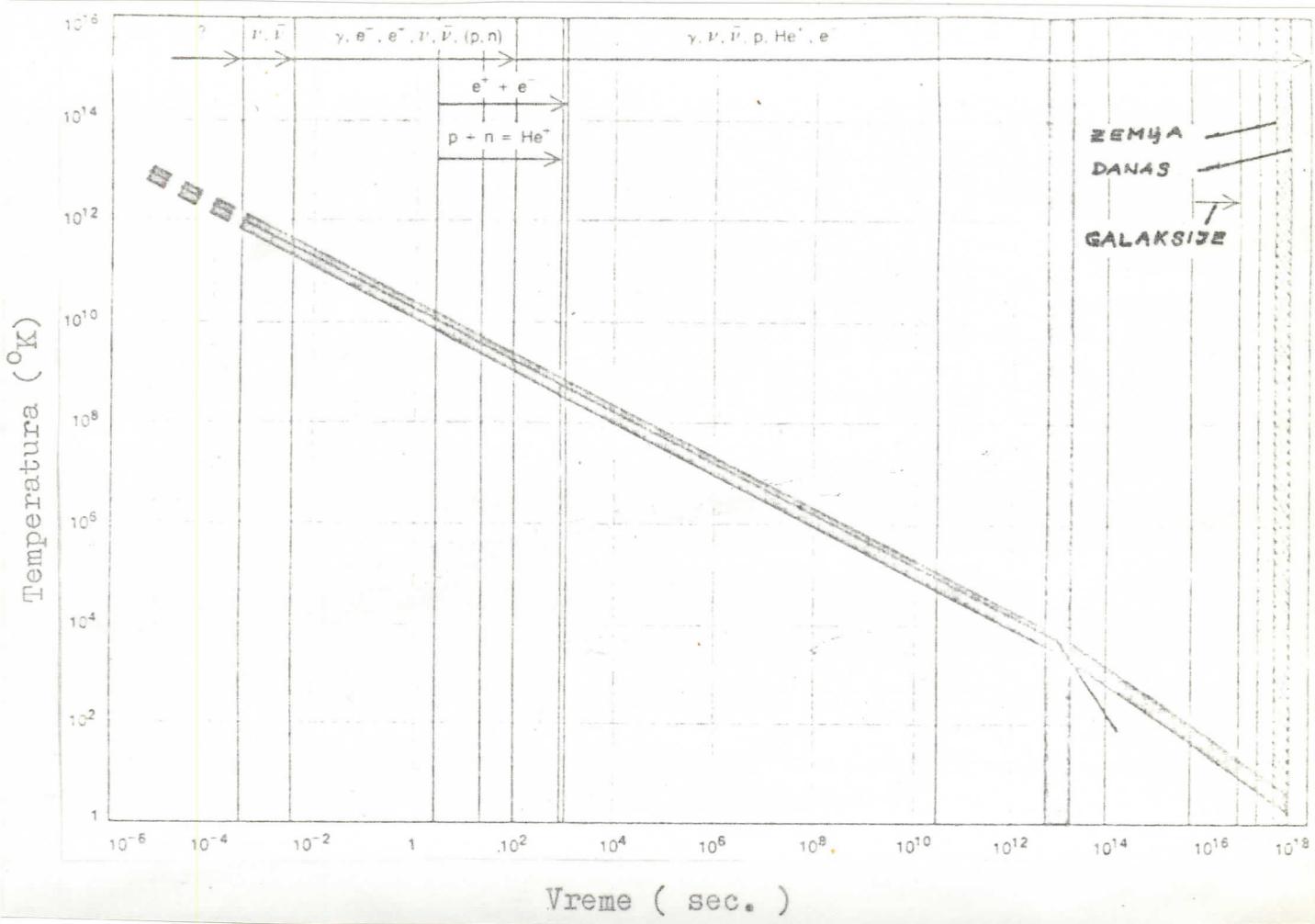
Da bismo odredili količinu hemijskih elemenata koje će
se kasnije formirati, potrebno je da znamo relativni odnos bro-
ja protona i neutrona tokom evolucija. Kako je temperatura opa-
dala, postalo je lakše da teži neutroni predaju u lakše protone,
nego obratno. Kao posledica toga ravnoteža nuklearnih čestica
je posmerena i na temperaturi od 10^{10} °K ona iznosi: 24% neutrona
prema 76% protona.

Posle 13,82 sekundi od eksplosije temperatura vacione je iznosila 3×10^9 °K. Ova temperatura je ispod temperature praga^x za elektrone i pozitrone, tako da oni počinju brzo da nastaju sa spiskom glavnih sastojaka vacione. Energija oslobođena njihovom anihilacijom usporava stepen hladjenja vacione.

Tako je sada dovoljno hladno da bi se formirala različita stabilna jesgra, ipak do toga ne dolazi, jer je potrebno podstaći nastanak deuterijuma koji je slabo vezano. Na temperaturi od 3×10^9 °K jesgra deuterijuma se raspadaju odmah po svom formiranju, pa teža jesgra, u stvari, i nemaju šanse da nastanu. Nešto kasnije ($T \sim 10^9$) će se formirati prva jesgra stabilnih elemenata (D, He...). Tek posle 700 eoo godina, jesgra ovih elemenata kombinovanje se sa elektronima i formirati stabilne atome. Nedostatak slobodnih elektrona učiniće sadržaj vacione proširnim za zračenje, a razdvajanje materije i zračenja omogućiće materiji da započne proces formiranja zvezda i galaksija. Na slici br. 1. je prikazano poreklo mikrotalasnog zračenja zajedno sa važnjim dogadjajima u evoluciji vacione.

Standardni model koji je ovde iznet nije jedini model. Teorija koja je nekada bila prisnata, a danas je odbačena, je teorija "večnog stanja". Prema ovoj teoriji koja je predložena četrdesetih godina vaciona je eduvezek bila ista kao što je i danas.

^xTemperatura praga - temperatura isnad koje će čestice datog tipa biti proizvedene u velikom broju iz zračenja crnog tepla. Jednaka je proizvodu mase čestice i kvadrata brzine svetlosti podeljeno sa Boltzmanovom konstantom ($T_p = n c^2/k$)



Sl. 1. Važniji dogadjaji u vacioni.

Pri ovoj teoriji pri širenju vacione neprekidno se stvara nova količina materije i popunjava prostor između galaksija. Dok se standardni model suočava sa problemom odakle najpre Kosmičko jeće - gusta grudva materije koja je eksplodirala, teorija većnog stanja isbegava ovo osetljivo pitanje postanka. Ipak, standardni model ima jaču eksperimentalnu potporu.

U sledeća dva poglavља biće opisana dva velika otkrića koja su rezultat astronomskih posmatranja i koja su nas dovela do standardnog modela - otkriće da se galaksije udaljavaju jedna od druge i otkriće slabog radio zračenja koje u vidu šuma ispunjava vacionu.

2.3. Širenje vasiono¹

Naloženje o širenju vasiono počiva na činjenici da astronomi mogu da odrede kretanje nekog svetlećeg tela duž linije vida mnogo preciznije, nego što mogu da odrede kretanje istog tela pod pravim uglom. Ovde se koristi jedna poznata osobina bilo kog oblika talasnog kretanja, poznata pod imenom "Doplerov efekat", odnosno da elektromagnetski talas koji do nas stiže iz izvora koji se od nas udaljava ima veću talasnu dužinu nego talas koji stiže iz nepokretnog izvora. Ovaj efekat nam omogućava da veoma precizno odredimo brzinu udaljavanja zvezda i drugih svetlosnih objekata. Proučavanjem spektara udaljenih zvezda videlo se da su svi oni pomereni ka većim talasnim dužinama (crvenom delu spektra). Ovo pomeranje spektara se naziva "crveni pomak". Odin nekoliko bliskih suseda, kao što je maglina Andromeda, ostatak galaksija se udaljava od naše, što ne znači da naša ima centralni položaj, već da se vasiona nalazi u stanju ekspanzije u kome se galaksije međusobno udaljavaju.

Godine 1929. Habi je objavio svoje otkriće da se crveni pomaci galaksija povećavaju u сразмерi sa njihovom udaljenosti. Ovo je formulisano u Hablovo zakonu: brzina udaljavanja (v) van galaktičkog objekta jednak je umnošku Hablove konstante (H_0) i udaljenosti objekta (d)

$$v = H_0 \cdot d$$

Hablova konstanta ima vrednost između 15 i 25 km/se. nov. god. što zavisi od merenja udaljenosti dalekih objekata. Značaj ovog zakona je u tome što on potvrđuje ono što bi i trebalo predvideti prema najjednostavnijoj mogućoj slici o kretanju materije u vasionu koja se širi.

Intuitivno bismo očekivali da bi, u bilo kom datom vremenskom tresutku, vasična trebalo da izgleda ista za posmatrače u svim tipičnim galaksijama². Ova hipoteza je toliko prirodna da ju je engleski astrofizičar Edward Artur Miln nazvao Kosmološkim principom.

Primenjen na galaksije, Kosmološki princip kaže da posmatrač, bez obzira na to u kojoj se tipičnoj galaksiji nalazi, vidi sve ostale galaksije kako se kreću prema istom zakonu brzina. Direktna matematička posledica ovog principa jeste da relativna brzina bilo koje dve galaksije mora da bude proporcionalna njihovom međusobnom rastojanju, baš kao što je i Habi utvrdio.

Pored Doplerovog posaka, Kosmološki princip ima i drugu eksperimentalnu potvrdu.

Kada pogledamo oko nas, vasična izgleda potpuno isotropna tj. izgleda ista u svim pravcima. Ako je ona isotropna oko nas, onda bi trebalo da bude isotropna i oko svake tipične galaksije. Nodjutim, bilo koja tačka u vasični može da se prevede u bilo koju drugu tačku pomoću niza rotacija oko fiksiranih centara, što znači da ako je vasična isotropsa oko svake tačke u vasični, onda je ona neminovno homogena.

Kosmološki princip vali samo kada vasičnu posmatramo u razmeru bar kao što su rastojanja između jata galaksija ili u razmeru negde oko 100 miliona svetlosnih godina.

Pošto se galaksije udaljavaju jedna od druge, onda su one jednom morale biti bliže jedna drugoj. Ako usmeno da je vrednost Hubbleove konstante $15 \text{ km/sec.} \cdot \text{H sv. god.}$, vreme od kada su galaksije počele da se udaljavaju jedna od druge bilo bi

²Tipične galaksije – galaksije koje ne poseduju neku sopstvenu brzinu, već se kreću usled opštog kretanja materije pri širenju vasične.

10^6 sv. god./15 km/sec. = 20×10^9 god. Ovo je karakteristično vreme ekspansijske, ali starost vasiione je nešto manja, jer se galaksije ne kreću konstantnom brzinom, već se kretanje usporava pod uticajem gravitacije. Veličina koja izražava koliko se vasiiona usporava je parameter usporenja ϱ_0 i zavisi od Hablove konstante i sadašnje gustine vasiione (ρ)., G je konstanta gravitacije:

$$\varrho_0 = \frac{4\pi G}{3 H_0^2}$$

Ovaj parametar je veoma kritičan, jer ga ne možemo direktno meriti.

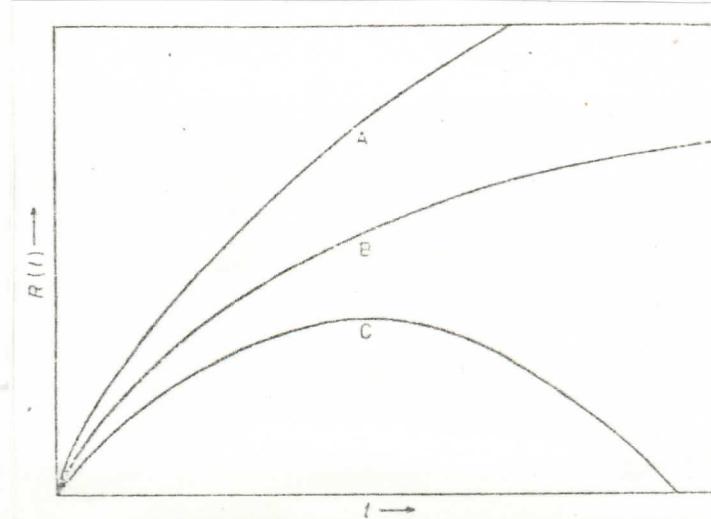
Još pre donošenja Hablovog zakona, 1922.g. ruski matematičar Aleksandar Fridman pronašao je opšte homogene i isotropne rešenje prvobitnih Ajnštajnovih jednačina. Fridmanov model je pružio matematičku osnovu za najveći broj savremenih kosmoloških teorija.

Ovaj model daje dve mogućnosti. Ako je srednja gustoća materije u vasiioni manje ili jednaka izvesnoj kritičnoj gustoći, onda vasiiona mora da bude prostorno beskonačna. U tom slučaju, sadašnje širenje vasiione će ne nastaviti savek. S druge strane, ako je gustoća vasiione veća od ove kritične vrednosti, onda gravitaciono polje koje materija stvara zakrivljuje vasiunu, ona je konična iako neograničena kao površina sfere. Tada, gravitaciono polje će biti dovoljno snažno da nejzad zaustavi širenje vasiione, tako da će ona na kraju sabiti nazad, do beskonačne velike gustoće. Ova kritična gustoća zavisi samo od Hablove konstante i iznosi:

$$\rho_k = \frac{3 H_0^2}{8\pi G} = 2 \times 10^{-29} \text{ gr/cm}^3$$

Današnja gustina materije je neizvesna. Prema vidljivoj materiji u galaksijama ona je 10^{-32} g/cm³, a izračunate iz galaktičke dinamike je 2×10^{-31} g/cm³. Međutim, ovu vrednost za sada ne možemo tačno odrediti, jer izgleda da galaksije i njihova jata sadrže nevidljivu "tamnu" materiju kao primenu onoj vidljivoj. Postojanje takve materije može se opaziti pomoću indirektnih gravitacionih efekata, a može da bude u raznim oblicima kao što su: crne jame, planete veličine Jupitera, oblaci prasine, neutrini ili, možda, magnetni monopolii.

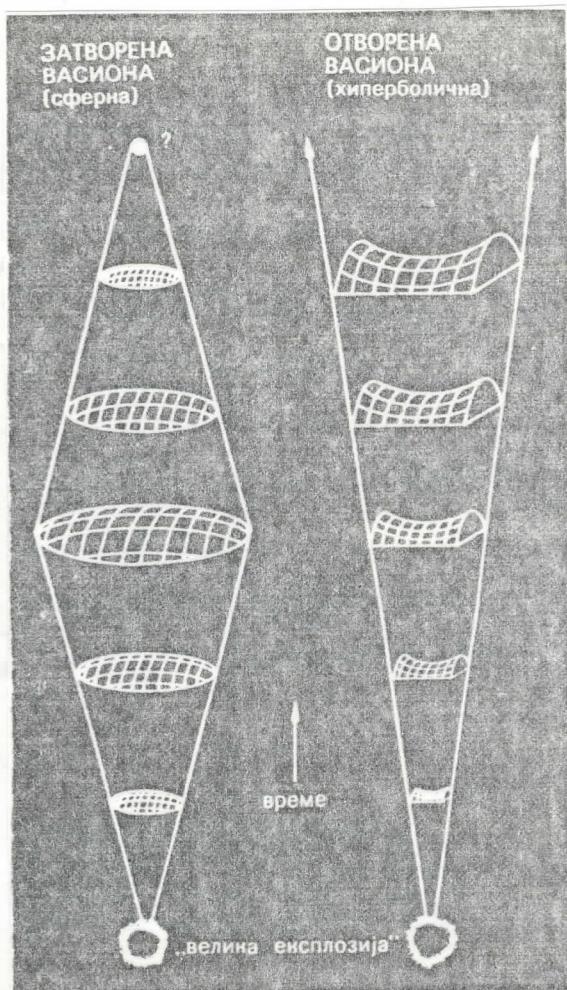
⁴Robertson i Walker su pokazali da globalne osobine kosmosa mogu biti objašnjene pomoću besdimenzionog parametra R(t) - rastojanja jedne tipične galaksije od neke proizvoljno izabrane centralne galaksije npr. naše sopstvene. Postoje modeli gde R i dR/dt ostaju pozitivni kada t → ∞ (otvorena vasića - A), i u kome dostižu maksimum i nestaju posle određenog vremena (zatvorena vasića - C). Postoji još jedna mogućnost gde R raste bez ograničenja a dR/dt → 0 kada t → ∞ (slučaj B). Ovi rezultati su prikazani na slici br. 2.



Sli. 2 A - otvorena vasića, B - $dR/dt \rightarrow 0$ $t \rightarrow \infty$, C - zatvorena vasića.

Danas se veruje da je $dR/dt > 0$ što bi značilo da je vasiона otvorena. Međutim, ovo nije sigurna potvrda, jer moramo usetiti u obzir srednju gustinu materije u vasiони која je drugačija ako se usmu u obzir mase neutrina.

²Oblik vasiione je teško shvatiti. Na slici br. 3 su data dva moguća oblika vasiione.



Sl. 3 otvorena i затворena vasiона.

Zatvorena vasiona je hiperaferna vasiona; zatvorena zakrivljena površ, jer idući oko nje vratićemo se na ono mesto odakle smo krenuli. Otvorena vasiona je još čudnija i oblikovana je kao sedlo ili hiperboloid; to je otvorena zakrivljena površ. Iako različiti oblici, mogu u principu rezultirati opažljivim uticajima, vasiona je tako velika da je nemoguće otkriti ove efekte pomoću sadašnjih tehnika.

2.4. Kognitivi mikrotalasni šum¹

Počeo 1965. god. izostirani su mnogi komunikacioni sateliti. A. Penzias i R. Wilson su imali zadatak da otkriju izvore atmosferskih snetnji u antenama za vezu sa satelitima. Posle eliminacije svih poznatih izvora šuma, preostalo je šum koji nisu znali da objasne. Ono što su jedino znali jeste intenzitet opaženog radio šuma. Ovaj intenzitet na datoј temperaturi može biti opisan pomoću ekvivalentne temperature – temperature crnog tела u kojoj bi taj radio šum imao opaženi intenzitet. Penzias i Wilson su našli da ekvivalentna temperatura radio šuma koji primaju iznosi oko 3°K .

Ova dva naučnika nisu znala za rad grupe naučnika neđu kojima je bio P. J. E. Peebles, koji su već bili podigli interesnu opremu za traganje za radio šumom iz rane vasione. Vrlo brzo su dve grupe došle u vezu i uskoro je počelo da se razjašnjava značenje ovog tajanstvenog šuma.

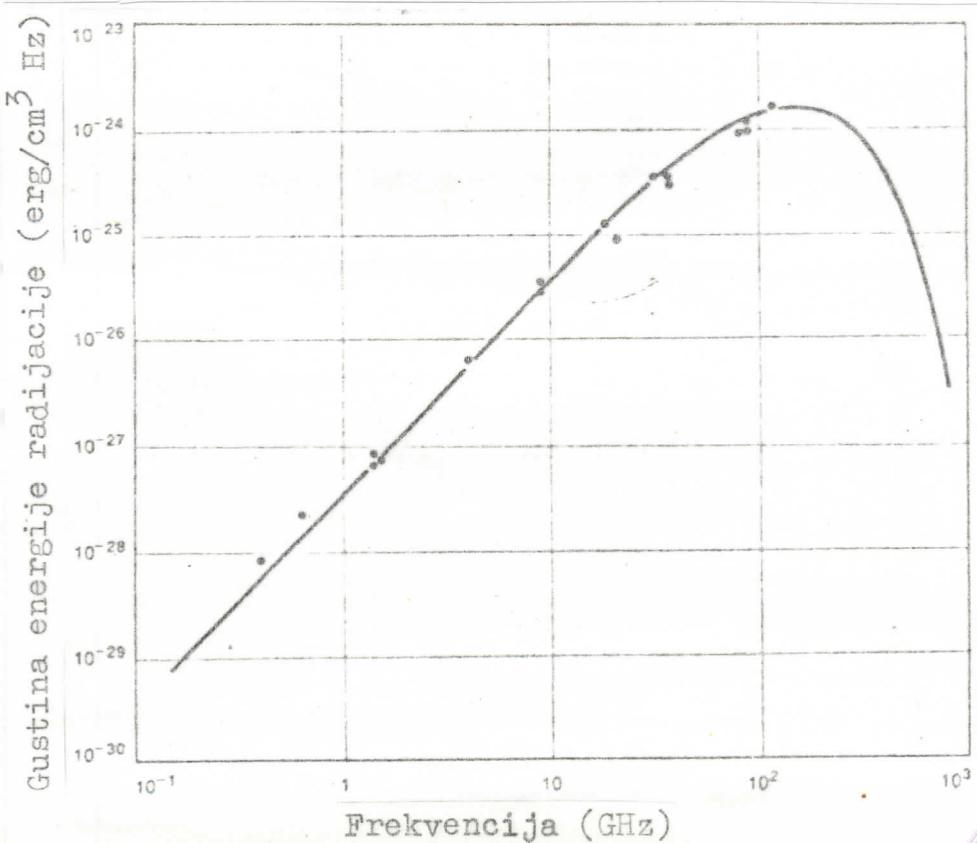
Da li je ovo mikrotalasno zračenje zaista zaostalo iz perioda nastanka vasione? Kada su se materija i zračenje razdvojile, energija u polju zračenja pri različitim talasnim dužinama bila je određena uslovima topotne ravnoteže i stoga data Planckovom formulom zračenja crnog tела na temperaturi jednakoj tem-

peraturi materije, odnosno oko 3000°K . Usled širenja vasiione talasna dužina ovih fotona se povećala сразмерно veličini vasiione. Pošto je temperatura zračenja crnog tela obrnuto proporcionalna talasnoj dužini ona je, kako se vasiiona Širila, opadala, i to obrnuto proporcionalno veličini vasiione.

Na primer, mikrotalasni šum sa intenzitetom od 3°K je baš ono što se može očekivati u slučaju da se vasiiona povećala za faktor 1000 od vremena kada je temperatura bila 3000°K .

Ako je ovaj šum ostatak velike eksplozije trebalo bi da ima Plankovu raspodelu. Tako, merenje spektara zračenja obuhvata merenje intenziteta na različitim talasnim dužinama.

Ubrzo pošto je posadinsko zračenje bilo otkriveno, nekoliko radio astronoma izmerili su intenzitet na različitim talasnim dužinama. Slika 4 prikazuje slaganje rezultata tih merenja sa Plankovom raspodelom na većim talasnim dužinama.



Sl.4 slaganje mikrotalasnog zračenja sa Plankovom raspodelom.



Merenja su u skladu sa krivuljom crnog tela. Ipak, najbolji dokaz bi bila merenja na talasnim dužinama manjim od 0,1 cm. Tekva merenja se ne mogu izvršiti sa tla, zato što Zemljina atmosfera apsorbuje zračenje ispod 0,3 cm. U rešavanju ovog problema postavljenoj su prijemnici infracrvenih talasa iznad Zemljine atmosfere pomoću balona i raketa. Godine 1976., jedna grupa iz Berklija, koja je radila sa balonima, potvrdila je da gustina energije nastavlja da opada pri kratkim talasnim dužinama (u opsegu 0,25 - 0,06 cm.) na način koji se očekuje za temperaturu zračenja u opsegu $\pm 0,1^{\circ}\text{K}$.

Poстоји još jedan način da se proveri poreklo mikro-talasnog zračenja. Ako ona doista potiče od "velike eksplozije" treba da je isotropno. Dosad, sva merenja su dala da je intenzitet pozadinskog zračenja potpuno uniforman.

Dotečnija i dokaz ovog zračenja jedno je od najznačajnijih otkrića kosmologije XX veka. Ona nam omogućuje da gledamo vasionu unosni približno 700 000 god. posle "velike eksplozije" i predstavlja smašen dokaz da su se zračenje i materija nalazile u stanju toplotne ravnoteže.

3. RANA VASIONA

3.1. Uvod – skorašnja otkrića?

U fizici elementarnih čestica poslednjih pedeset godina se razvila sledeće slika strukture materije. Svi hadroni (barioni i mezoni), čestice koje učestvuju u jakoj interakciji, sastoje se od još manjih sastojaka – kvarkova koji imaju spin $1/2$. Za sada znamo za pet vrsta aromata kvarkova i odgovarajućih anti-kvarkova, a verujemo u postojanju šestog kvarka. Kvarkovi nisu nikad vidjeni izolovani, nego samo unutar hadrona.

Leptoni (elektroni, mioni, neutrini) su čestice koje ne podležu jakoj interakciji i imaju spin $1/2$. Leptone možemo direktno opaziti kao izolovane čestice, koji ne pokazuju nikakve znake složene strukture.

Izamo četiri vrste sila, odnosno interakcija, koje utiču na ponašanje materije. To su: jaka, elektromagnetna, slaba i gravitaciona. Teorije koje opisuju ove interakcije su kalibracione (gauge) teorije, koje koriste teoriju grupe kao jedan od svojih matematičkih aparata. Tako na primer najjednostavnija gauge teorija, kvantna elektrodinamika, je postavljena kao $U(1)$ grupa, a teorija jakih interakcija kao $SU(3)$ grupa. Neke teorije osnovnih interakcija od skoro ulaze u sklop veće Žene. Najveći uspeh ima elektroslaba teorija (Glashow – Salam – Weinberg model) koja je opisana $SU(2) \times U(1)$ gauge teorijom. Prvobitna $SU(3)$ grupa, Gellmana i Cveiga, koja se odnosila na tri dosta poznata aromata kvarka u , d , a morala je biti modifikovana zbog dodavanja "boja" kvarkova, kao novih kvantnih brojeva. Danas $SU(3)$ grupa se odnosi na teoriju obojenih kvarkova i gluona (kvanti jake nuklearne sile i ima ih 8). Rezultirajuća teorija "kvantna

"Bronodinamika" - QCD je uspešna u opisivanju jakih interakcija. Ohrabreni uspomina SU (2) \times U (1) teorije i SU (3) - obojene grupe, Howard Georgi i Sheldon Glashow kao i drugi teoretičari su predložili veliku unificirajuću teoriju (GUT - grand unification theory) koja bi ujedinila jaku, slabu i elektromagnetnu interakciju, i koja predviđa između ostalog nestabilnost protona. Teorija supersimetrije (SUSY - super symmetry) koja želi da ujedini sve interakcije uključujući i gravitacionu, treba da reši problem nošenja fermiona (čestice sa spinom 1/2 ili 3/2) i bosona (čestice sa spinom 0 ili 1). Ove teorije su veoma pogodne za ujedinjavanje. Elektro-polišući pronosljive parametre QCD i elektroslabe teorije, nalazi se da se one polako približuju i postaju jednake pri veoma velikim energijama reda 10^{15} GeV, dok se uključenje gravitacije očekuje sa energijom "svoga" 10^4 ita, oko 10^{19} GeV. Zasluge ovih teorija su da ukazuju na mogućnost opisivanja svih osnovnih interakcija, preko samo jednog parametra sprega. Druga zasluga je što u tako ujedinjenim teorijama neka od polja koja prenose interakciju bi trebalo da imaju kvante - veoma teške čestice, sa osobinsma raspada koje su nemotno asimetrične za raspad u antiprotona i u protone. Ovo bi moglo dati objašnjenje viška materije u odnosu na antimateriju u vacionu.

3.2. Evolucija rane vacione⁸

Evoluciju vacione možemo prikazati u deset faza (slika) prema važnijim dogadjajima u tom periodu.

Dogadjaj	Tipična energija	Temperatura
1. Big-bang	$T > 10^{19}$ GeV	10^{32} K
2. Era stišavanja	$10^{15} < T < 10^{19}$ GeV	$10^{28} - 10^{32}$
3. Bariosinteza	$T \sim 10^{15}$ GeV	10^{28} K
4. Nezanimljiv period	$10^3 < T < 10^{14}$ GeV	$10^{16} - 10^{27}$ K
5. Era elektroslobave interakcije	$1 < T < 10^3$ GeV	$10^{13} - 10^{16}$ K
6. Era jake interakcije	$T \sim 1$ GeV	10^{15} K
7. Nukleosinteza	$T \sim 1$ MeV	10^{10} K
8. Razdvajanje materije i radijacije	$T \sim 1$ eV	10^4 K
9. Galaktičke formacije	$10^{-2} < T < 1$ eV	$10^2 - 10^4$ K
10. Teški elementi	$10^{-4} < T < 10^{-2}$ eV	$1 - 10^2$ K

Slika 1: Veliki prasak - big-bang $T > M_{\text{Plank}} \sim 10^{19}$ GeV

Na super visokim temperaturama, energije čestica koje se nalaze u topločnoj ravnoteži mogu da postanu toliko velike da gravitacione sile između njih postaju isto toliko snažne kao i bilo koje druge sile. Možemo da izračunamo da je ovakvo stanje bilo ostvareno na temperaturi od 10^{32} K (ova temperatura odgovara Plankovoj masi: $M_{\text{Plank}} = (hc/G)^{1/2} \sim 10^{19}$ GeV).

Na toj temperaturi mogle su da se dogadjaju i najneobičnije stvari. Ne samo da su gravitacione sile mogle da budu veoma jake, a proizvodnja čestica u gravitacionom polju znatna - već i sam pojam "čestice" nije imao nikakvog smisla. "Horizont", rastojanje isha koga je bilo nemoguće da se prestre bilo kakav signal, mogao je u tom trenutku da bude manji od talasne dužine neke tipične čestice u topločnoj ravnoteži. Slobodno govoreći, svaka

čestica je tada mogla da bude velika otprilike koliko i sama vasi-
ona!

Nedjutim, čak i kada bismo mogli dovoljno pozetno da
razmišljamo o vasioni pre ovog vremena ne znamo dovoljno o kvant-
noj prirodi gravitacije. Noženo grubo da procenimo da je tempera-
tura od 10^{32} °K bila dostignuta nekih 10^{-43} sekundi posle početka
(to je Plankovo vreme $t_p = (Gh/c^5)^{1/2} \sim 10^{-43}$ sec.), ali nije si-
gurnao da ova procena ima bilo kakvo značenje. Zbog toga, bez obzi-
ra na to koliko smo velova skinuli sa istorije vasione, postoji
još jedan, na temperaturi od 10^{32} °K, koji nam još uvek onemogu-
ćava da bacimo pogled u najranija vremena.¹ Zato ćemo opis vasi-
one početi na temperaturi nišoj od Plankove temperature.

Slika 2: Era stišavanja (10^{15} GeV $< T < 10^{19}$ GeV).

Sada pretpostavljamo da imamo jednu šireću beli-vasionu
sa materijom i radijacijom u ravnoteži i da su fizički zakoni koji
su nam poznati ovde primenljivi. U ovoj eri, velike unificirajuće
interakcije, igraju veoma važnu ulogu; one su izgладile stvari.

Velike unificirajuće interakcije su u ravnotežu došle
i kroz njihovo narušavanje barionskog broja² one brišu svaki veći
lokalni ili globalni broj bariona. Ovde još nema asimetrije bari-
ona. U isto vreme ove interakcije pomažu u stvaranju homogene i
izotropne vasione iz možda nehomogene i neizotropne. Izgleda da
posle snažne eksplosije i nekoliko drastično jačih gravitacionih
efekata, vasioni je trebalo neko vreme da se smiri i ujednači.

Slika 3: Dekonsintesa ($T \sim 10^{15}$ GeV (?)).

U ovoj eri pojavila se neka mala asimetrija bariona.

Oko $T = 10^{15}$ GeV, što odgovara nasi supertežkog gnuge
bosona kojeg predviđa GUT, pojavila se jedna vrata faznog prela-
za. Polazimo od faze gde grupa G, koja unificira sve interakcije,

²Barionski broj - je ukupan broj bariona u jednom sistemu minus
broj odgovarajućih antibariona.

nije narušena, do faze gde G-grupa je narušena do $SU(3) \times SU(2) \times SU(1)$ – dobro poznate grupe koja opisuje interakcije jake i elektroslabe sile.

U ovom periodu leži poreklo malenog viška bariona koji je odgovoran za to što je vasiona sastavljena uglavnom od materije, a ne i od antimaterije. Na ovaj period ćemo se kasnije vratiti.

Slika 4: Nesanimljiv period (?) ($10^3 \text{ GeV} < T < 10^{14} \text{ GeV}$)

Za vreme ovog perioda nije se ništa bitno dogodilo ili se, možda, pojavljuju neke "oase" interakcija koje neke teorije dopuštaju. Uglavnom, vasiona se i dalje širila i hlađila.

Slika 5: Era elektroslabe interakcije ($1 \text{ GeV} < T < 10^3 \text{ GeV}$)

Najdramatičniji efekat u ovoj eri je drugi fazi prelaz, koji se dešava izmedju faza gde elektroslaba grupa $SU(2) \times U(1)$ je narušena do $U(1)$ elektromagnetne grupe. Ispod ove temperature slabe interakcije su slabe i kratkog dometa, dok iznad ove kritične temperature one su bile iste jačine, kao i elektromagnetne interakcije.

Slika 6: Era jake interakcije ($T \sim 1 \text{ GeV}$)

Oko energije $T \sim 1 \text{ GeV}$ jake interakcije, odgovaraju jakim interakcijama nuklearne fizike koja se bavi hadronima, koji se sastoje od udruženih kvarkova.

Slika 7: Nukleosinteza ($T \sim 1 \text{ MeV}$)

U ovoj eri sintetizuju se deuterijum i helijum i još neki laski isotopi. Kasnije ćemo se duže zadržati na ovoj eri.

Slika 8: Razdvajanje materije i radijacije $T \sim 1 \text{ eV}$.

Iz ovog perioda potiče prethodno opisano 3 ok mikrotalasno zračenje. Kada je temperatura vasiona pala na 3 000 $^{\circ}\text{K}$ elektroni su se kombinovali sa jezgrima laskih elemenata koji su nastali u periodu nukleosinteze, formirajući tako atome vodonika,

helijuma i litijuma. Nestanak elektrona je omogućio fotonima da se neometano kreću vacionom.

Slika 9: Galaktičke formacije¹ (10^{-2} eV $< T < 1$ eV).

Da bi delovanje gravitacije izazvalo grupisanje materije u izolovane fragmente, kao što je Njutn predviđao, potrebno je da ona savlada pritisak materije i njoj pridruženog zračenja. Postoji neka minimalna masa koja je osetljiva na delovanje gravitacije u cilju grupisanja materije; ova masa se naziva Džinsova masa. Pokazalo se da je Džinsova masa proporcionalna $3/2$ stepenu pritiska. Kada je pritisak zračenja prestao da deluje, pritisak same materije je bio suviše slab da bi mogao da se odupre daljem grupisanju materije u galaksije.

Te ne znači da mi zaista razumemo kako su galaksije nastale. Teorija formiranja galaksija jedan je od velikih problema savremene astrofizike.

Slika 10: Teški elementi... DNK-RNK/proteini... homo sapiens.

$$(10^{-4} \text{ eV} < T < 10^{-2} \text{ eV})$$

Priča odavde pa nadalje je dobro poznata. Teški elementi su se stvorili u eksplozijama supernova i tako se širili u svoju okolinu. Kasnije su se prvi molekuli počeli stvarati, a posle toga smo bili prepušteni Watsonu i Cricku. I SADA SMO TU!

3.3. Bariomintesa i poreklo materije⁵

Ovde ćemo videti kako velike unificirajuće teorije interakcija čestica mogu odgovoriti na pitanje velike kosmološke zagonetke o poreklu materije. Problem koji je ostao je poreklo neutrona i protona i pitanje zašto u našem jatu galaksija možemo naći samo materiju a ne i antimateriju.

Pošto znamo da su hadroni sastavljeni od kvarkova, problem današnje dominacije materije nad antimaterijom tada postaje problem razumevanja zašto gustina kvarkova u prvobitnoj "čorbi" je bila veća od gustine antikvarkova. Teorija nam kaže da su se svi antikvarkovi kombinovali sa kvarkovima onda kada je temperatura pala na 10^{15} °K stvarajući mesone, koji su posle bili brojni kao i fotoni. Ako je postojao prvobitni višeak kvarkova, oko 10^{-9} od ukupnog broja kvarkova i antikvarkova, tada sličen deo kvarkova bi ostao posle nastanka mesona (kao devojka koju niko neće za ples). Ovi kvarkovi će se grupisati u barione (protone i neutrone) i preživeće do danas kao vidljiva materija gustine $N_B \sim 10^{-9}$ od broja fotona.

Kako smo dobili asimetriju kvarkova od 10^{-9} ?

Da bi odgovorili na ovo pitanje, potrebno je da razmotrimo interakcije koje menjaju barionski broj. Mada nijedna takva interakcija nije nikada vidjena, nema razloga predvideti njeno postojanje. Prihvaćeno je da barionski broj nije održan u polju jakе gravitacije koje imaju crne Jame i vrlo rana vasi-

Najjednostavniji primer takve reakcije je anihilacija dva kvarka dajući jedan antikvark i jedan antilepton:



U ovoj reakciji ukupan kvarkni broj se menja za -3 , a barionski broj je redukovani za 1. Takve interakcije bi mogle materati protone i neutrone da se raspadaju na sledeći način:



Do danas eksperimenti nisu dali takav raspad. Očekivani srednji život ovih raspada zavisi od teških čestica, X bosona, koji posreduju u reakciji hiperslabe interakcije koji menja barionski broj:



Donja granica srednjeg života nukleona daje nam donju granicu mase X čestice, reda $10^{14} - 10^{15}$ GeV. Ovo nam može izgledati neverovatno veliko u poređenju sa masama drugih elementarnih čestica ali je još uvek mnogo manje nego tзв. Plankova masa reda 10^{19} GeV u kojoj kvantni efekti su udruženo sa gravitacijom i postaju jaki. Unifikacija fundamentalnih interakcija se dešava na energetskoj skali od 10^{15} GeV. Razmena čestica koje imaju magu ovog reda će proizvesti raspad protona za 10^{31-32} godina.

Veliki broj eksperimenata za protonski raspad su u toku. U indijsko - japanskoj saradnji eksperimenti koji su proučavali stabilnost protona sa oko 140 tona gvoždja smeštenog ispod zemljine površine u Kolar Gold Fields su dali šest mogućih kandidata beta raspada za dve godine. Jula 1982. g. u eksperimentu ispod Mont Blanca detektovan je jedan takav dogadjaj. Trebaće višegodišnja provjera da bi se sa sigurnošću potvrdili ovi rezultati.

Vratimo se na interakcije koje narušavaju barionski broj. One su se dogadjale na energijama 10^{15} GeV kada je temperatura bila 10^{28} K. U standardnom modelu ove odgovara vremenu 10^{-35} sec. posle velike eksplozije. Uzimajući u obzir ove interakcije moguće je da je vasiona, čak i ako je počela sa ukupnim barionskim brojem 0, mogla proizvesti neki barionski broj različit od nule. Da bi se ovo desilo potrebno je da ove interakcije

ispunjavaju tri zahteva:

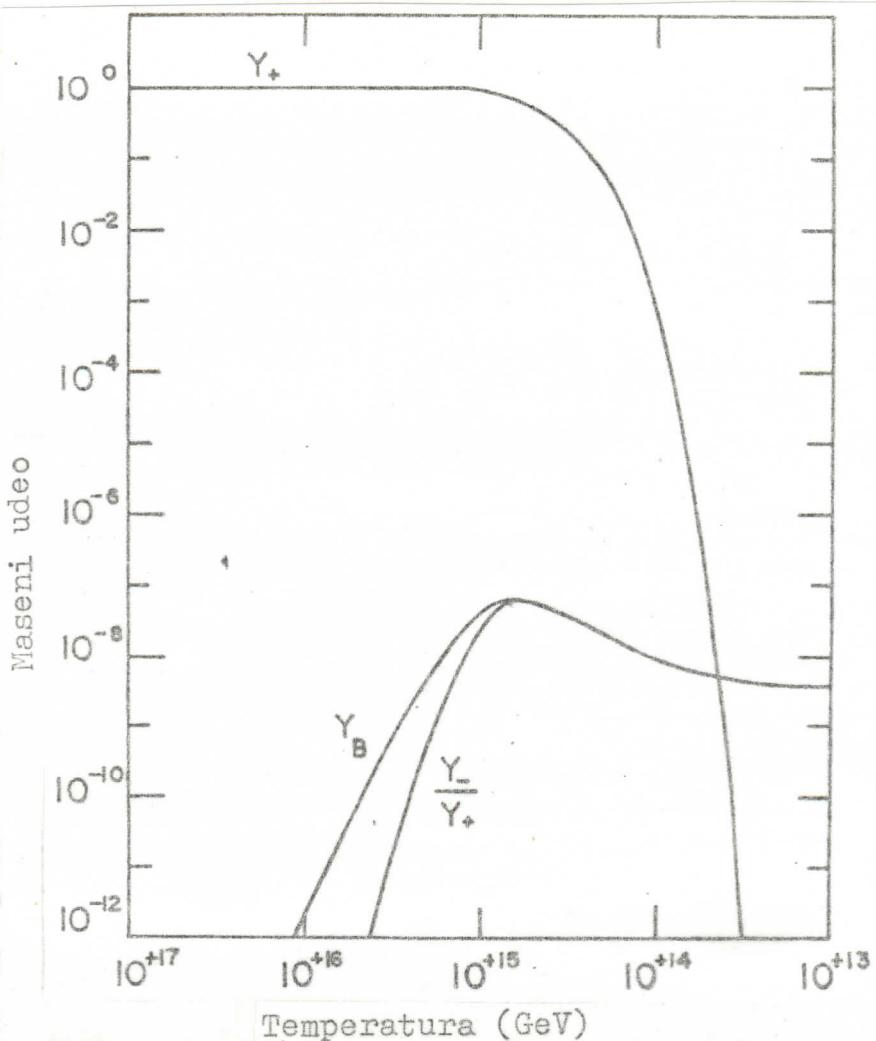
1) da narušavaju simetriju čestice - antičestice, poznatu kao konjugaciju naboja C. Inače, one bi počevši od početnog stanja sa istim brojem kvarkova i antikvarkova uvek generisale isti broj kvarkova i antikvarkova.

2) da narušavaju simetriju poznatu kao CP (promena čestice u antičesticu C i ogledalska refleksija P). Ova transformacija će promeniti česticu koje se kreće u jednom smeru u antičesticu koja se kreće u drugom smeru. Da je ovde bio neki efekat simetrije, vasporna bi uvek sadržala isti broj kvarkova i antikvarkova.

3) evolucija rane vaspone je morala imati "strelicu" vremena. Da to nije imala, opšta simetrija CPT bi ostavila stanje vaspone nepromenjenim i garantovalo bi isti broj kvarkova i antikvarkova.

Znamo da slabe sile nisu simetrične ni u C, ni u CP operacijama i imamo teoretski razlog da očekujemo isto za sile koje menjaju kvarkni i barionski broj.

Da sumirajmo, u vrlo ranoj vaspioni kada je temperatura bila visoka, bilo je mnogo superteških čestica X i njihovih antičestica \bar{X} . Ove X čestice su se mogle raspasti ili u jedan par kvarkova, ili u jedan antikvark i jedan antilepton. obrnuto, njihove antičestice \bar{X} su se mogle raspasti ili u jedan par antikvarkova ili u jedan kvark i jedan lepton. U odsustvu simetrije CP ne postoji razlog zašto bi udeo X čestica koje su se raspale u parove kvarkova bio isti kao udeo njihovih antičestica, koje su se raspale u parove antikvarkova. Pod ovim uslovima početno stanje sa istim brojem čestica i antičestica može preći u stanje sa nejednakom gustinom kvarkova i antikvarkova (slika 5).



Sl. 5 Pronena broja X čestica u najranijej vasični i asimetrija kvarkova i antikvarkova. Y_+ je suma gustina X i \bar{X} čestica, Y_- je njihova razlika. Y_B je ukupna kvark - antikvark asimetrija.

Ovakav mehanizam za postizanje razlike izmedju gustina kvarkova i antikvarkova, biće veliki napredak u našem shvatanju o prirodi materije, ukoliko se njegova punovažnost može dokazati.

3.4. Nukleosinteza i nastanak laskih elemenata¹²

Jedna od većih zasluga teorije velike eksplozije je objašnjenje velike količine helijuma 4 koje vidimo danas. Ovaj helijum je bio proizведен, zajedno sa nekoliko drugih laskih elemenata, u periodu nukleosinteze koja je započela oko 3 minuta posle singularnosti^M.

Na temperaturi od 10^{11} °K čestice koje su bile prisutne bile su: n, p, e^- , e^+ , ν_e , $\bar{\nu}_e$, $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$, γ i druge. Ovi sastojci su bili u termodinamičkoj ravnoteži pomoću slabe i elektromagnetne interakcije. Činjenica da je vasiona bila u termodinamičkoj ravnoteži na temperaturi od 10^{11} °K znači da njena buduća evolucija neće zavisiti od njenog prethodnog stanja.

Kako se vasiona širila ona se i hladila i postala je redja; sudari – prema tome i reakcije između čestica postale su redje. Na nekoj kritičnoj temperaturi brzina reakcije za pojedine čestice je postajala manja nego što je bilo potrebno da bi se održala u ravnoteži.

Slabe reakcije koje su održavale ravnotežni odnos neutrona i protona bile su:



Na temperaturi od 10^{10} °K reakcije (a) i (b) nisu bile više toliko efektivne i odnos neutrona i protona se "zamrzao" na vrednosti koja odgovara toj temperaturi prema relaciji:

^MSingularnost – tačka koja sadrži svu masu vasiona. Ona ima multzapreninu, a gustina materije je beskonačna.

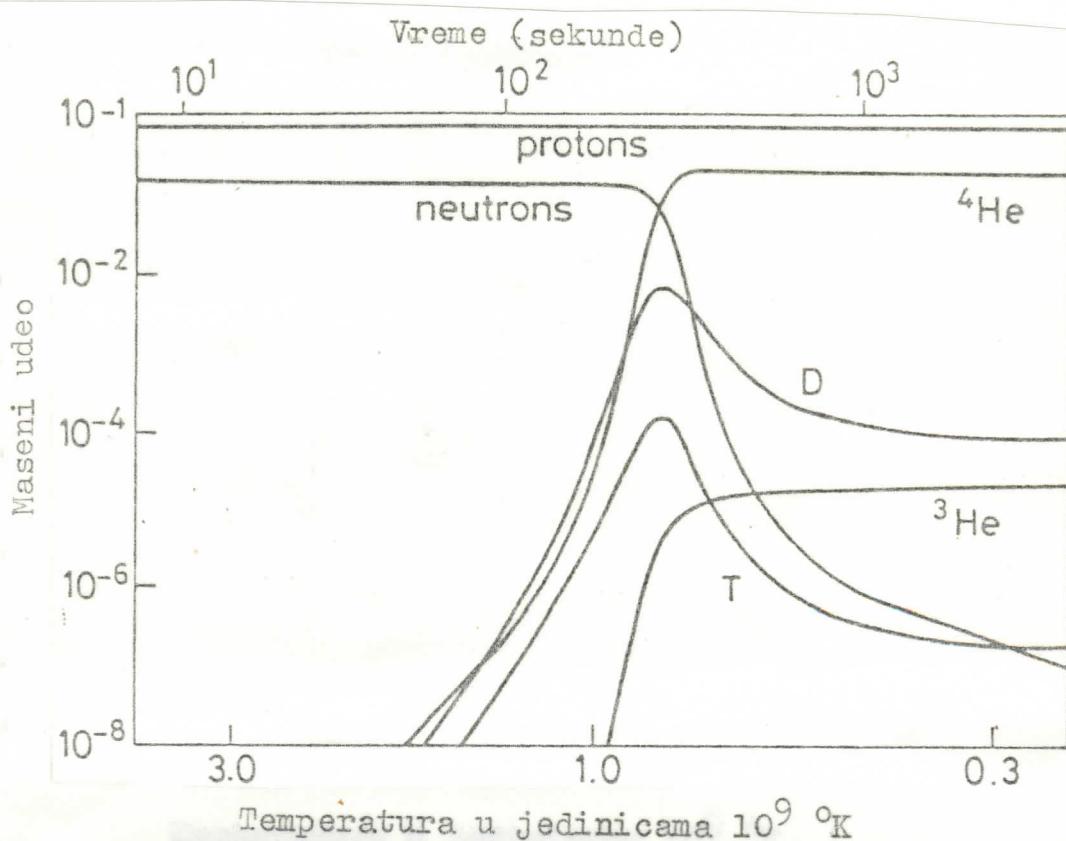
$$\frac{n}{p} = \exp \left[(n_p - n_n) \cdot e^2 / kT_s \right]$$

čija je vrednost tada bila oko 1/6. Ovaj odnos je zatim opadao zbog neutronskog raspada koji se nastavio sve do nukleosinteze kada je $n/p \approx 1/7$.

Kada je temperatura pala na približno 10^9 °K, nukleosinteza je počela vrlo brzo da se odvija, zato što na ovoj temperaturi radijacija je dovoljno hladna da se jesgra deuterijuma mogu formirati bez da se odmah raspadnu, a dovoljne topla da dva jesgra deuterijuma mogu prevazići Kulonovu barijeru i formiraju ^4He .

Deuterijum, koji je nastao od jednog protona i jednog neutrona može da se sudari sa još jednim protonom ili neutronom i formira jesgro ili helijuma 3 ili jesgro tricijuma. ^3He može da se sudari sa još jednim neutronom, a tricijum sa protonom, da juđi ^4He u oba slučaja. U ovo vreme se takođe sintetizovala mala količina litijuma 7. Međutim, jesgra teža od ^4He se, ipak ne formiraju u većem broju, jer stabilna jesgra sa 5 ili 8 nuklearnih čestica ne postoji zbog slabe energije veze.

Za vreme nukleosinteze skoro svi neutroni su se uključili u jesgra deuterijuma, a skoro sav deuterijum se uključio u jesgra ^4He . Količina ^4He je jednaka dvostrukom udalu neutrona u odnosu na protone. Neposredno pre nukleosinteze bilo je 15% neutrona i 87% protona što znači da je težinski udio helijuma posle nukleosinteze bio 26%. Maseni udio neutrona, protona i lakih jegrara kao što su ^3He , ^4He , D, ^3H na vreme nukleosinteze prikazan je na slici 6.



Sl. 6 Maseni udeo n, p, ^3He , ^4He , D, ^3H sa vreme nukleosintese.

U standardnom modelu primarne nukleosintese maseni udeo proizvedenog helijuma zavisi od tri parametra:

1. $\tau_{1/2}$ - poluživot neutrona
2. η - odnos bariona prema fotonima
3. N_ν - broj vrsta dvokomponentnih neutrina

1. Poluživot neutrona određuje brzinu reakcija kao što su (a) i (b). Ako je $\tau_{1/2}$ veće, tada se brzina ovih reakcija smanjuje. Neutron - protonski odnos "mrzne" na višim temperaturama tako da će više helijuma biti proizvedeno. Ekperimenti iz nuklearne fizike su pokazali da je poluživot neutrona $10, 13 \leq \tau_{1/2} \leq 10, 82$ minuta.

2. Barion - fotonski odnos utiče na probijanje uskog grla deuterijuma. Veća vrednost za η omogućava probijanje tog uskog grla ranije, na većoj vrednosti n/p, a rezultat toga je veća količina helijuma.

Zavisnost količine helijuma od η je dosta slaba. Broj bariona je ostao konstantan posle nukleosinteze (barionski broj je konzervisan na ovim niskim energijama $< 10 \text{ MeV}$) dok broj fotona se uvećao, zbog e+e- anihilacije na temperaturi $\sim 3 \times 10^9 \text{ K}$.

3. Broj vrsta neutrina N određuje gustinu energije vacione, a samim tim i brzinu ekspanzije ($t^{-1} \sim \rho^{1/2}$). Gustina energije ρ zavisi od broja relativističkih čestica. Povećanjem N , ρ i brzina ekspanzije postaju veći (za datu temperaturu). Pošto brzina slabih interakcija (a) i (b) postaje jednaka sa brzinom ekspanzije na višim temperaturama, odnos n/p se mazne na većoj vrednosti i više helijuma se sintetizuje.

Znači, količina helijuma raste sa porastom vrednosti $\tau_{1/2}$, η , i N . Posnavanjem bilo koja tri od ova četiri parametra (χ_p , $\tau_{1/2}$, η , i N) određuje onaj četvrti. Tako prvo-bitna nukleosinteza može biti iskorišćena za određivanje važnih kosmoloških i fizičkih veličina. U toku su radovi za procenu ovih veličina.

Današnja količina helijuma se procenjuje da je oko 30%, jer se helijum posle nukleosinteze nastavio stvarati u zvezdama.

Kada je u vacioni nastajao helijum, deuterijum je bio prvi korak na tom putu. Mali deo deuterijuma je mogao da preživi epohu nukleosinteze. Deo koji je ostao predstavlja funkciju relacije temperature i gustine. Ova relacija može biti prevadena u relaciju između današnje gustine vacione i temperature zaostale radijacije. Tako, znajući temperaturu mikrotalasnog zraženja i količinu deuterijuma u vacioni, možemo da odredimo današnju gustinu vacione.

Do 1972.g. nije postojao ni jedan dokaz prisustva deuterijuma u vacioni, osim na zemlji. Poslednjih godina javlja se sve više otkrića deuterijuma. Prinстonski astronomi su uz pomoć satelita "Copernik" našli obilnost deuterijuma od $1,5 \times 10^{-3}\%$. Ipak, ne znamo da li potiče ovaj deuterijum. Možda je mogao nastati i posle nuklearsinteze¹¹.

4. NEUTRINI U FIZICI ČESTICA

Neutrini su vrlo lage, električno neutralne čestice, koje podležu slaboj interakciji. Javljuju se najmanje u tri varijante od kojih je svaka udružena sa različitim naselektrisanim leptonom kao:

$$\left(\begin{array}{c} \nu_e \\ e^- \end{array} \right), \left(\begin{array}{c} \nu_\mu \\ \mu^- \end{array} \right), \left(\begin{array}{c} \nu_\tau \\ \tau^- \end{array} \right) \dots ?$$

Ne postoje nikakvi fundamentalni razlozi zašto bi masa neutrina trebalo da bude jednaka nuli, i danas smo pre skloni da verujemo da njihova masa nije jednaka nuli.

Laboratorijski eksperimenti su postavili gornje granice njihovim massama. Iz raspada:



znamo da je $m_{\nu_e} < 35$ eV, tj. oko 10^{-4} od mase elektrona. Iz raspada:



znamo da je $m_{\nu_\mu} < 600$ KeV ili oko 10^{-2} od mase miona, a iz raspada:



dobili smo da je $m_{\nu_\tau} < 200$ MeV ili oko 10^{-1} od mase τ^- leptona.

Druga neizvesnost u vezi sa neutrinima je pitanje ukupnog broja vrsta familija. Imamo direktnе pokazatelje za dva neutrina ν_e i ν_μ , a indirektnе za treći neutrina ν_τ . Bile koji drugi neutrini, bili bi sigurno udruženi sa leptonima težim od tau leptona koje još nismo mogli detektovati u našim laboratorijskim. Kvantna hromodinamika dopušta postojanju 16 tipova neutrina, a astrofizika ograničava taj broj na 4.

4.1. Astrofizičko i kosmološko određivanje neutrina

Verujemo da naše Sunce sija zbog nuklearnih reakcija u njegovoј unutrašnjosti koji emituju veliki broj ν_e . Za sada je sunčeve neutrine detektovac Davis pomocu sledeće reakcije:



Količina sunčevih neutrina koji su nadjeni je ($2,2 \pm 0,5$) sunčevih neutrino jedinica (SNU), gde jeden SNU odgovara 10^{-36} proizvedenih atoma Ar u sekundi po atomu Cl. Ova količina neutrina je dosta ispod očekivane koja je oko $5 - 9$ SNU. Postoje različita objašnjenja za nedostajuće neutrine. Jedna frivilna idea usina za pretpostavku da je Sunce prestalo da sija. Dok elektromagnetskom zračenju, koje mi vidimo treba oko 10^6 godina da se profiltira iz unutrašnjosti Sunca (zbog šestih sudara), dotle neutrini (zbog slabe interakcije) dolaze do nas na 8,5 minute, pa je moguće da su zaista nuklearne reakcije u jesgru Sunca prestale i da živimo na račun vremenskog zakasnjenja.

Knogo osbiljnije mogućnosti su: da računi konvencionalne fizike nisu bili dobri ili da mali visoko energetski deo raspodele neutrina sa Sunca nije dobro protumačen. Ako pretpostavimo da su ova merenja, kao i zvezdani model, ispravni - Šta može onda biti objašnjenje za nagonetku solarnih neutrina? Jedna od mogućnosti je da neutrini imaju mase. Pretpostavimo da ν_e proisvedeni u Suncu su linearne kombinacije $\alpha_1 \nu_1 + \alpha_2 \nu_2 + \alpha_3 \nu_3 + \dots$ stanja ν_i sa različitim massama. Kako one prolaze kroz prostor, stanja ν_i koja su proizvedena sa istom energijom će se kretati sa različitim brzinama zbog njihovih različitih masa. To znači da naš početni talas neutrina $\alpha_1 \nu_1 + \alpha_2 \nu_2 + \alpha_3 \nu_3 + \dots$ će stići na Zemlju kao različita linearne kombinacije, $\beta_1 \nu_1 + \beta_2 \nu_2 + \beta_3 \nu_3 + \dots$ koja će

uopštene odgovarati kombinaciji $a_e \nu_e + a_\mu \nu_\mu + a_\tau \nu_\tau + \dots$ neutrina koji nisu samo ν_e . U ovom slučaju broj ν_e koji stižu na Zemlju biće reducirao sa faktorom $/a_e/^2$. Uzimajući u obzir oву činjenicu ista redukcija će biti u broju merenih SNU:

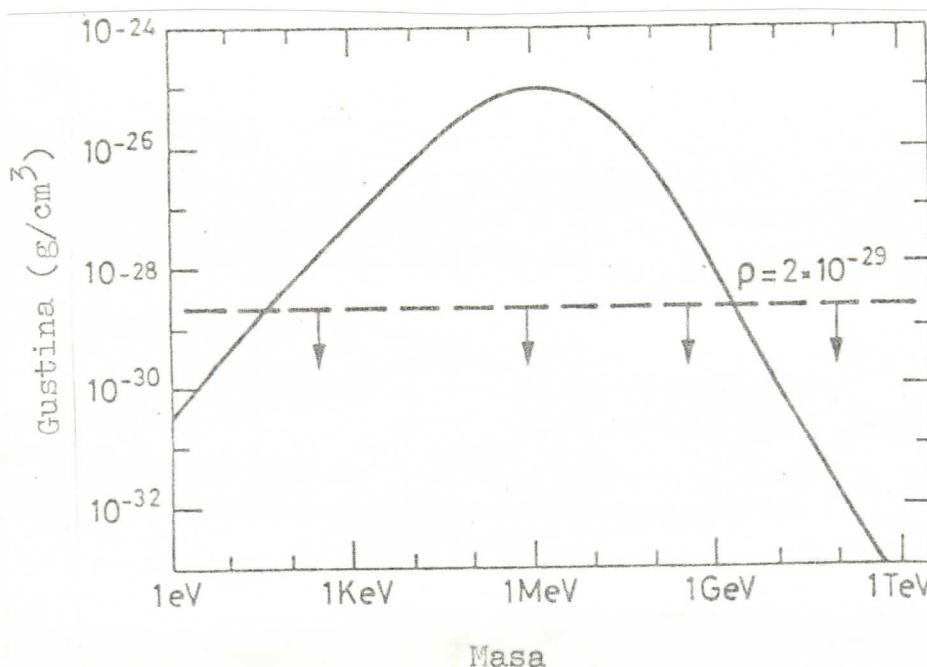
$$\frac{\text{SNU (mereno)}}{\text{SNU (očekivano)}} = /a_e/^2 < 1$$

Da bi važilo ovo objašnjenje smanjenja broja merenih SNU, važno je da razlika u masama različitih neutrina ν_i ne bude jako mala, u stvari treba da bude veća od 10^{-5} ev. Kako bilo, ova razlika između merenih i očekivanih SNU nije sigurna. Mnoga druga objašnjenja su moguća čak i u slučaju da neutrini imaju mase.

Ako zaista imaju mase, tada postoji još jedan interesantan astrofizički metod da se one izmere. Kada supernova kolapsira i umire veliki broj neutrina se emituje. Neutrini različitih masa će se kretati prema nizu različitim brzinama. Moguće je da ako se takav kolaps dogodi više svetlosnih godina od nas, tada će postojati merljiva razlika u vremenu između stisanja različitih vrsta neutrina. Neki eksperimenti su pripremljeni da bi se mogli detektovati neutrini sa jedne takve udaljene umiruće supernove.

Neka druga kosmološka rascmatranja takođe daju ograničenja mase i broja neutrina. Oni polaze od nukleosinteze u standardnom modelu. Kada je temperatura vaspone bila oko 10^9 °K neutrini su se izdvojili, a najbrojniji su bili oni sa masama mnogo manjim od 1 MeV. Analogno fotonima koji su se izdvojili kasnije i koji su danas eksperimentalno merljivi, sada smo okruženi nevidljivom radijacijom crnog tela koji se drži 10^3 neutrina/cm³ sa temperaturom od 2 °K. Svi, osim vrlo lakih neutrina, doprinosiće sadašnjoj gustini materije u vaspioni, proporcionalno sumi njihovih mase. Današnja gornja granica gustine vaspone daje gor-

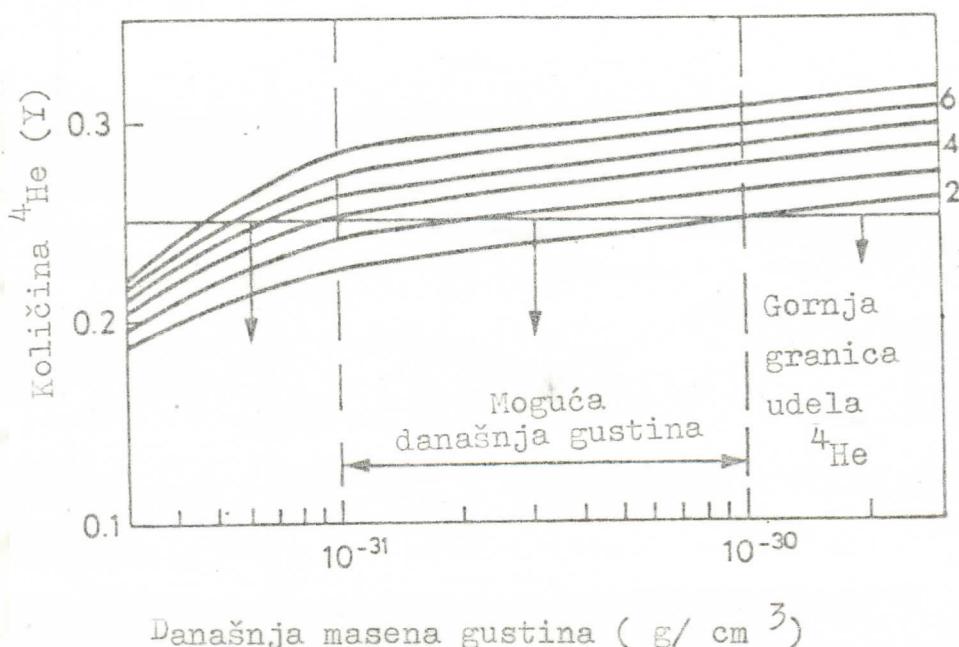
nju granicu od 100 eV sa gornjim massama svih neutrina lakših od 1 MeV. Od kada znamo da su ν_e i ν_μ lakši od 1 MeV, ova kosmološka graniča se primenjuje direktno na njih. Na slici 7 vidimo da masena gustina leptona će usrokovati gravitacioni kolaps vaseone ako su im masse izmedju 100 eV i nekoliko GeV.



Sl. 7 Kosmološko ograničavanje masa neutrina. Ako postoji takvi neutrini sa masama izmedju 100 eV i nekoliko GeV njihova masena gustina biće veća nego kritična gustina i vaseona će eventualno kolapsirati pod dejstvom sopstvenog gravitacionog privlačenja.

Druge veoma važne ograničenje koje daje kosmologija je ograničenje ukupnog broja vrsta neutrina. Rekli smo da za vreme nukleosinteze je postojao veliki broj neutrina sa massama manjim od 1 MeV. Oni su učestvovali u ukupnoj gustini energije i pritisku koji je vladao izmedju elementarnih čestica, i tako su uticali na brzinu ekspanzije vaseone. Od brzine ekspanzije je zavisio mazeni udio neutrona a od ovoga je zavisio udio helijuma.

Tako, u krajnjoj liniji udeo helijuma (χ) ograničava ukupan broj vrsta neutrina. Količina helijuma nastalog u periodu nukleosinteze (25%) ograničava broj različitih familija neutrina na 3 do 4 vrsta, kao što se vidi na slici 8.



Sl. 8 Zavisnost broja vrsta neutrina sa masom manjim od 1 MeV od postojeće količine helijuma. Gornja granica od 25% helijuma nastalog u nukleosinteti daje nam mogućnost postojanja 3 ili 4 lakih neutrina i njihovih antineutrina.

5. EGZOTIČNI OSTACI VELIKE EKSPLOZIJE

Kako su energije dobijene sa našim akceleratorima (10^3 GeV) suviše skromne u odnosu na energetsku skalu GUT - a ($> 10^{14}$ GeV), rana vasiona je jedina laboratorija gde fizika takvih energija može biti proučena. Pošto ovi akceleratori nisu radili pre ~ 10 000 milijardi godina naučnici moraju da traguju za fosilima iz tog vremena, mada su energije do 10^{19} GeV možda bile ostvarene u ranom stadijumu velike eksplozije. Dva istraživanja takvih ostataka su privukla posebno pažnju: traganje za super masivnim magnetnim monopolima i slobodnim kvarkovima.

5.1. Magnetni monopolii

Počevši od zahteva za potpunu simetriju električnih i magnetnih pojava, Dirak je 1931. godine uveo hipotezu o postojanju magnetnih monopolia, tj. dipola čiji je drugi pol negde u beskonačnosti.

Esetetika nije bila jedini Dirakov motiv za uvođenje monopolia. On nije bio zadovoljan ni time što fizika prihvata činjenicu da postoji kvant nanelektrisanja, a da za to nema nikakve teorijske podloge. Dirak je uviđeo da uvođenje magnetnog monopolia dovodi do kvantizacije električnog polja, sa elementarnim nanelektrisanjem kao osnovnom jedinicom. Iz takve pretpostavke sledi:

$$eg = hc/2$$

gde je g elementarni magnetni naboј, a e elementarno nanelektrisanje. Pošto je elementarno nanelektrisanje veoma malo, iz ove relacije proizilazi da je elementarni naboј veoma velik.

Džerald t'Noft i Aleksandar Poljakov su 1974. godine

dokazali da je magnetni monopol neisbežna posledica velike unificirajuće teorije, koja može da pretkraće masu monopola 10^{16} GeV. Dirakov monopol je zaista monstrum od čestice - njegova masa je oko 10^{16} puta veća od mase protona. Ta masa je, u stvari, poredljiva sa masom bakterije, ali je koncentrisana u zapreminu manju od zapremine protona.

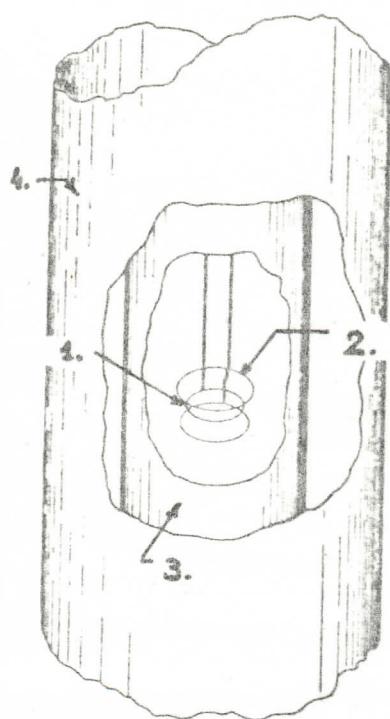
Ako monopoli postoje, oni bi mogli biti proizvedeni u vrlo ranoj vasioni, oko 10^{-35} sec. posle velikog praska, u vreme kada su unificirajuće interakcije prešle u jaku, slabu i elektromagnetnu. Paralelno sa monopolima su se mogli stvarati antimonomopoli, koji su se sa njima anihilirali. Zbog asimetrije u vremenskoj osi (strelice vremena), jedan deo monopola je mogao da preživi i danas da luta vasionom. Možda se nedostajuća masa vasiona krije upravo u obliku monopolata.

Istraglijanja sa magnetnim monopolima u prošlosti su se obično sastojala od traganja za ionizacijom izazvane prolaskom monopolata kroz materiju. Pošto se danas veruje da su monopolii teški i spori, ovi eksperimenti nisu mogli uroditи plodom. Danas se za monopolima traga preko njihovog jakog magnetnog polja. Dovoljno je da proleti kroz navojak da bi se u ovome indukovala struja.

Američki fizičar Elias Cabrera je 1982 g. pripremio eksperiment za detekciju magnetnog monopolata (slika 9).

On je od žice superprovodnika niobijuma načinio nekoliko navojaka koje je stavio u kriostat da bi ih održao na temperaturi tečnog helijuma. Navojak je opkolio komorom od olovnog lima tako da se unutar nje ne oseća zemljino magnetsko polje, niti neko drugo. Prolazak magnetnog monopolata kroz navojak indukuje u ovome struju. Ova struja se detektuje pomoću specijalnog detektora nazvanog SQID. Posle pet meseci čekanja, pisač detektora je pokazao nagli skok sa

koji nije bilo drugog objašnjenja, nego da je izazvano magnetnim monopolom.



Sl. 9 Aparatura za detektovanje monopolja.

1. navojak kice superprovodnog niobiijuma
2. kalibracioni kalem
3. superprovodni plasti
4. metalni plasti

One što fizičare najviše zbujuje u vezi sa kabrerovim rezultetom to je da je on u roku od pet meseci uspeo da detektuje monopol sa navojkom svega 5 cm u prečniku. To bi značilo da galaksijom vrve monopolji u mnogo većem broju nego što smo mislili.

Jedan izlaz iz te teškoće neki nalaze u pretpostavci da Sunce posebno privlači monopolje, te da ih na Zemlji ima mnogo više nego što iznosi njihov prosek za galaksiju. Po nekim teorijama mo-

nopolji obrazuju oblak oko Sunca. Procenjuje se da Zemljinom orbitom kruži oko 10^{24} monopola. Ali, ti monopolji nemaju stabilnu orbitu. Neki od njih napuštaju solarni sistem, a drugi padaju na Sunce. Prema tome, morao bi postojati stalni izvor monopolija, koji održava pomenuti oblak. Ako je Sunce taj izvor, onda u njegovom središtu mora da se odigravaju dosad nepoznati procesi. Neki fizičari veruju da se tu možda krije zagonetka nedostajućih neutrina sa Sunca.

Postojanje monopolija imao bi još većih posledica u kosmologiji i teoriji elementarnih čestica. Callan, Rubakov i Wilczek su tvrdili da monopoliji mogu izazvati protonski raspod, na primer, preko relacije:



Ellis je isveo interesantnu posledicu iz ovoga: protoni izloženi fluktu Kabrerojih monopolija ($10^{-9} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$) bi se rasplali za vreme od 10^{28} godina.

Ako bi se ispostavilo da na svakih 10^{16} nukleona postoji jedan monopol, to bi značilo da je dominantna masa vacione, masa monopolija. Ta masa bi bila dovoljna da "zatvori" vacionu.

5.2. Reliktni kvarkovi

Kao što su monopolji fosilni ostaci rane vacione, slobodni kvarkovi su mogli saostati iz perioda kada su se hadroni formirali iz kvarknog gasa.

Eksperimentalna grupa sa Stanforda koju je vodio Fairbank je tvrdila da je dobila frakcioni naboј. Očigledno objašnjenje ovog eksperimenta je postojanje slobodnih kvarkova sa frakcionim naboјem. Kako bilo, veruje se da u SU (3) obojenoj gauge teoriji kvarkova i gluona, obojeni objekti (na primer kvarkovi)

moraju uvek biti vezani u bezbojna stanja koja imaju integralni naboje. Zbog ovoga stanfordski eksperiment je brinuo teoretičare fizike čestica. Jedna mogućnost je da SU (3) je takođe spontano narušena ali na vrlo maloj energetskoj skali, $\sim 10 - 50$ MeV. Ovo dozvoljava postojanje slobodnih obojenih objekata, kao što su kvarkovi. Postoji druga mogućnost: grupa sa Stanforda je nešta detektovala leptone (koje nisu obojeni) sa ne integralnim nabojem, ili su videli vezana stanja kvarkova i drugih obojenih objekata sa integralnim nabojem, što bi rezultiralo kao bezbojni objekat sa frakcionim nabojem. Naravno, pošto fizičari čestica ne mogu dati jedinstven model za objašnjenje stanja sa frakcionim nabojem, kosmolosi ne mogu dati jedinstven odgovor za postojanju količinu produkata iz rane vaspione.

Kao što je Wagoner rekao: "Relikti koji proizlaze iz različitih modela su u granicama od neprikladno velikih do nevidljivo malih objekata".

6. INVARIJANTNOST FIZIČKIH ZAKONA

U preuđavanju vaspone polazi se od jedne osnovne pretpostavke da fizički zakoni koji su formulirani u našim uslovima važe na svim mestima i u svim vremenima. Ovo je samo pretpostavka, koja možda i nije tačna, ali nemamo ni jedan dokaz koji bi se tome protivio. Kada kažemo da isti fizički zakoni važe svuda u vaspioni, moramo praviti razliku između dva značenja ove tvrdnje. Blaži oblik bi bio: da će se isti rezultati dobiti u uslovima koji su slični našim, koje možemo direktno meriti, dok je strožiji oblik te tvrdnje da teorije koje važe u našim uslovima važe i u ekstremnim. Uslovi u vaspioni se, kao što smo videli, veoma razlikuju od onih za koje se ne možemo ni nadati da ćemo ikada dobiti u našim laboratorijama. Tako, u mnogim slučajevima nemamo zakone koje možemo primeniti. Mi imamo teorije koje objašnjavaju poznate procese i koje nemaju kaznu: Šta će se desiti u vanrednim fizičkim uslovima. Videli smo da postoje i neki fizički zakoni koji su lokalno dobro definisani, kao što je održanje barionskog broja, a ne važe u ekstremnim (uslovima) kao što crne jame i rana vaspiona.

Zato moramo da proverimo važenje naših zakona u svemiru. To moramo učiniti na dva načina. Možemo se pitati: Da li se naši zakoni fizike menjaju u našim uslovima u današnje vreme, kao jedno i kao drugo jesu li fizički zakoni bili isti bili gde u ranijoj epohi vaspione? Do danas nemamo sigurne znake da se veličine kao što su G , \hbar , e , m_e ili njihov bezdimenzionalni odnos, kao što je konstanta fine strukture menja u našim uslovima ili da se razlikuje idući od mesta do mesta u vaspioni.

Prirodne konstante su zanimale i Diraka koji je sastu-

pao mišljenje da postoji aproksimativna jednakost između nekih velikih besdimenzionalih brojeva, koji karakterišu osobine vaspone. Ovo važi za odnos električnih i gravitacionih sila između elektrona i protona, kao i na odnos vremena koje je potrebno da svetlost prodje kroz vidljivu vaspunu i pored elementarnih čestica. Oba odnosa su oko 10^{40} . Dirak je predložio da bi ove dve veličine morale biti konstantne i da to može biti dobijeno ako se G menja obrnuto sa vremenom. Gamow je kasnije dao mogućnost da e^2 raste sa t , dajući istu vrednost velikih brojeva.

Ideju da fizičke konstante ne moraju biti saista konstante, dao je i Machi predpostavljajući da su fizički zakoni određeni sa-držajem vaspone. Ako je to tako, oni bi zavisili od npr. srednje gustine vaspone.

6.1. Posmatranja dalekih objekata

Prvo ćemo tražiti vrednosti fizičkih konstanti u prošlosti dobijenih proučavanjem dalekih objekata. Kada je postalo moguće ispitivanje dalekih galaksija, primećeno je da relativni raspored različitih linija crvenog pomaka mogu dati korisne informacije. Tako, Savedoff (1956 g.) je proučavao optički i radio spektar galaksije Cygnus A. Zabeležio je da raspored hiperfinih linija omogućava poredjenje odnosa $g_p m_e \alpha^2/m_p$ u Cygnusu A i lokalno; gde je g_p protonski magnetni faktor, α je konstanta fine strukture. Savedoff je pronašao da $g_p m_e/m_p$ i α^2 su bili isti u dve različite galaksije, dajući 10^{-11} delova sa godinu kao veličinu promene.

Merenja su vršena i na većim razdaljinama i bila su stimulisana pronaškom kvazara. Skorašnja merenja su dala mnogo strožije granice ovim vrednostima. Ovo je bilo omogućeno otkrićem dalekih objekata za koje crveni pomak može da se nadje bilo op-

tičkim linijama, ili 21 cm. zračenjem atomskog vodonika. Wolfe je proučavao slaganje ova dva crvena pomaka i našao je za promenu $\alpha^2 \frac{n_e}{n_p}$ da je 4×10^{-14} .

Drugi tip merenja se sastoji od poređenja osobina fotona emitovanih sa dalekih objekata u prošlosti i fotona proizvedenih u našim laboratorijsima. Veza između talasnih dužina i energije fotona date frekvencije uključuje produkt hc. Uporedjivanjem "stalog" fotona i "mladog" možemo dobiti vrednost promene hc. Pomoću crvenog pomaka u spektru jednog kvasara je pronađeno da je $d(\ln(hc))/dt < 10^{-10}$ godine⁻¹.

Pagel je dao restrikciju promene n_e/n_p . Ovaj odnos se bolje pokazuje u spektru vodonika, nego u spektrima teških jona. To znači, ako se n_e/n_p menja sa kosmičkom epochom, linije vodonika bi pokazale dodatni crveni pomak, koji nije prisutan kod teških jona. Tako:

$$z_{H^+} = \Delta z = (1 + z) (\mu - \mu_0) (1 + \mu_0)^{-1}$$

gde je $\mu = n_e/n_p$, a μ_0 je njegova sadašnja vrednost. Ova merenja su dala vrednost promene odnosa n_e sa n_p od 5×10^{-11} delova za godinu.

Uzimajući u obzir sve što je ovde izneto, ne postoji nikakvi sigurni znaci, dobijeni posmatranjima udaljenih objekata, koji bi ukazali da se fizičke konstante menjaju.

6.2. Zemljска merenja

Sada ćemo razmatrati informacije koje možemo dobiti ovde kod nas, na Zemlji. Wilkinson (1958 g.) je naznačio da konstante radioaktivnog raspada (λ) eksponencijalno zavise od vrednosti e, h i c. On je ustanovio da se one menjaju sporije nego 10^{-12} delova za godinu.

Kasnije, 1968. godine R. Gold je proučavajući konstantu fisionog raspada ^{238}U u mineralima starih izmedju 10^7 i 2×10^9 godina, te je našao da konstanta raspada ne pokazuje nikakvu promenu.

Još jednom su dobijeni rezultati bili protiv promene osnovnih konstanti.

6.3. Konstanta gravitacije

Postoje mnogo više diskusija o mogućoj promeni konstante G, ne samo zbog toga što je to bio Dirakov originalni predlog, nego i zbog toga što promenu ove konstante je mnogo teže izmeriti nego druge. U poslednje vreme, za ovu promenu nadjene je 10^{-10} god. $^{-1}$, što je dovoljno male da se G smatra konstantnim.

Moguće su dve tehnikе za proveru promenljivosti veličine G. Prva uključuje radarsko posmatranje rastojanja planetarnih orbita, a druga koja je starija, se zasniva na merenju kretanja Meseца na dve vremenske skale (atomskom i efemernom). Obe metode su dale promenu od 10^{-11} god. $^{-1}$, što ne narušava konstantu G.

Da sumiramo, izgleda nema razloga verovanju da je G promenljivo, ali mnogo bolja ograničenja ćemo dobiti možda u sledećoj dekadi.

7. ZAKLJUČAK

Kosmologija i fizika čestica su mlade nauke koje se vremenom sve više razvijaju. Simbetska veza između ovih disciplina je veza gde informacije teku u oba smera. Dok fizičari čestica traju za sve većim energijama, kosmologi traže od fizičara čestica da im odgovore na pitanja: imaju li neutrini masu mirovanja i da li je proton nestabilan. Ako neutrini imaju mase oni bi mogli odrediti dinamiku na velikoj skali vaspone; a ako su protoni nestabilni, reakcije narušavanja barionskog broja bi mogle objasniti zašto je u vaspioni dominantna materija a ne antimaterija. Obrnuto, fizičari čestica traže od kosmologa uslove sudara egzotičnih čestica koje ili ne mogu biti proizvedene u akceleratorima ili se ne mogu detektovati.

Veruje se da teorije fizike čestica, posebno GUT, mogu pomoći u rešavanju vašnih fundamentalnih problema klasične kosmologije.

Najveći naučni doprinos velike unifikacije je barion-sinteza. Mada smo još daleko da sa GUT-om, tačno odredimo veličinu ili, čak, značaj barionske asimetrije, za početak smo želeli da saznamo zašto postoji barionska asimetrija kada zakoni fizike na nivou mikroskopije su skoro simetrični.

Dok je izgledalo da je uvođenje GUT-a, u kosmologiju rešilo jedan problem, drugi se pojavio: problem monopola. GUT u opisivanju rane vaspone predviđa takve relikte, superteške monopole ($M > 10^{16}$ GeV) koji bi danas davali dovoljnu masu gustinu da se vaspiona zatvori. Detekcija reliktnih monopola i određivanje njihove količine u vaspioni biće od velikog značaja i za fiziku čestica i za kosmologiju.

Najveći zadatak koji je stavljen pred astrofizičare i fizičare elementarnih čestica je da odrede da li je vasična otvorena ili zatvorena odnosno, da li će se većno širiti ili će posle određenog vremena početi da se sašima. Buduća istraživanja u ove discipline trebaće da odgovore na ovo i druga pitanja kao što su: pojam beskonačne gustine u singularnosti (možda je gustina velika ali konačna), reakcije koje narušavaju barionski broj, reliktni neutrini, magnetni monopolii, slobodni kvarkevi itd.

Moja želja je bila da prikažem saradnju fizike elementarnih čestica i kosmologije i rezultate njihove saradnje. Biće mi veliko zadovoljstvo ako ovaj rad stvori želju kod čitacca za dalje interesovanje u ovoj oblasti.

L I T E R A T U R A:

1. Steven Weinberg - Prva tri minuta (prev. sa engl) - New York, 1977.godine
2. Harry L. Shipman - Crne jame, kvasari i vasiona (prev. sa engl.) 1976. godine
3. Gary Steigman - Cosmology Confronts Particle Phisics - Annual Reviews Nucl. Part. Sci. 29:313-37, 1979.g.
4. R. J. Tayler - Cosmology astrophysics and elementary particle physics, - Rep. Prog. Phys., Vol. 43, 1980.g.
5. John Ellis - The very large and the very small - Oxford, 1980.g.
6. E. W. Kolb and M. S. Turner - The early Universe - Nature Vol. 294, 1981.g.
7. M. S. Turner and D. N. Schramm - Cosmology and elementary particle physics, - Physics today, 1979. god.
8. D. V. Nanopoulos - A GUT-ed tour trough the early Universe, Geneva
9. J. Ellis - Grand unified theories in cosmology Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1982. god.
10. Adrian Webster - the Cosmic Bachground Radiation
11. A. A. Penzias - The Riddle of Cosmic Deuterium - American Scientist. Volume 66, 1978.godina.
12. Keith A. Olive, David N. Schramm, Gary Steigman, Michael S. Turner and Yongmann Yang - Big-Bang nucleosynthesis as a probe of cosmology and particle physics, - The Astrophysical Journal, Vol. 246, No. 3, Part 1, 1981.godina.
13. G. Steigman - Cosmology and heutrino physics
14. D.N. Schramm and G. Steigman - A neutrina dominated Universe - 1980. godine.
15. D.N. Schramm and G. Stegman - Relic neutrinos and the density of the Universe- The Astroph. Jornal 245:1-7, 1981.godina.
16. Physics today - Cabrera counts flux quanta to find a Dirac monopole, 1982.godine
17. J.D. Barrow and M.S. Turner - The inflationary Universe - birth, death and transfiguration.