

Primordijalna nukleosinteza

Marko Mićić

10. Maj 2014.

1 Sažetak

Primordijalna nukleosinteza (naziva se i Big Bang nukleosinteza) je jedan od tri dokaza za model velikog praska, zajedno sa širenjem svemira i kosmičkim pozadinskim zračenjem. Primordijalna nukleosinteza predstavlja sintezu lakih jezgara, ^2H , ^4He i ^7Li kao i radioaktivnih izotopa ^3H i ^7Be . Svi ostali elementi teži od litijuma nastali su dosta kasnije u jezgrima zvezda.

2 Uvod

Naime, zastupljenost pomenutih elemenata predstavlja jak dokaz da je svemir bio dosta topliji i gušći nego što je danas, dakle da su postojali uslovi za odigravanje nuklearnih reakcija. Međutim pedesetih i šezdesetih godina dominantna teorija koja se ticala proizvodnje hemijskih elemenata bila je rad naučnika G. Burbidge, M. Burbidge, Fowler i Hoyle. BBFH teorija predviđa da su svi elementi stvoreni ili u unutrašnjosti zvezda ili u eksplozijama supernovih. Teorija je imala relativan uspeh ali i niz nedostataka. Teorija je predviđala da je zastupljenost helijuma mala ako su zvezdane nuklearne reakcije njihov jedini izvor ali posmatranja su pokazivala da je 25% helijuma, mnogo više nego što je teorija predviđala. Drugi problem je sa deuterijumom jer se on ne može stvoriti u unutrašnjostima zvezda, sasvim suprotno, on se tamo uništava. Važno je pomena da je dugo primordijalna nukleosinteza bila od velike važnosti za određivanje barionske gustine svemira. Danas se ovaj parametar izvodi iz anizotropnosti kosmičkog mikrotalasnog pozadinskog zračenja. Obično se uvodi broj fotona po barionu, η , koja je konstanta tokom širenja i važi sledeća relacija $\Omega_B * h^2 = 3.65 * 10^{-7} \eta$ (Coc, 2003.), gde je h Hablova konstanta a Ω_B količnik barionske i kritične gustine. Kritična gustina je data kao $\rho_{0,c} = \frac{3h^2}{8\pi G}$. U standardnoj primordijalnoj nukleosintezi postoji slaganje teorije i posmatranja za sve elemente, osim kod litijuma se javlja neobjašnjeno veliko odstupanje. Pored već pomenutih elemenata pronađeni su i tragovi ^6Li , ^9Be i ^{11}B kao produkata primordijalne nukleosinteze. Standardna teorija predviđa zastupljenosti H, D, ^3He , ^4He i ^7Be kao funkciju jednog kosmološkog parametra a to je barion foton odnos, η (Tytler, 2000.).

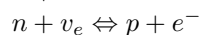
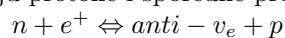
3 Karakteristike primordijalne nukleosinteze

Postoje dve važne karakteristike ove teorije, a to su da je proces započeo pri temperaturi od 116 gigakelvina a završio se pri temperaturi oko 1,16 gigakelvina,

i da je ovaj proces obuhvatio čitav univerzum (Doglov, 2002.). Kao što je već rečeno ključni parametar za računanje efekata primordijalne nukleosinteze je broj fotona po barionu. Ovaj parametar nam omogućava da odredimo uslove pri kojima se odigrala primordijalna nukleosinteza. Zastupljenost elemenata prema masi je 75% H, 25% ^4He , 0,01% D i tragovi litijuma i berilijuma reda veličine 10^{-10} . Pronađeni su i tragovi bora u nekim starim zvezdama pa se postavlja pitanje da li je nešto bora stvoreno ovim procesom iako teorija to ne predviđa (The New York Times, 1992.).

3.1 Odnos neutrona i protona

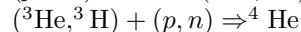
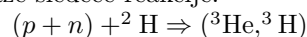
Neutroni mogu da reaguju sa pozitronima i elektronskim neutrinima da formiraju protone i sporedne produkte na sledeće načine:



Ove reakcije se dešavaju dok temperatura ne dostigne vrednost od 8,12 gigakelvina i to je "freeze out" temperatura (Steigman, 2007.). U tom trenutku odnos neutrona i protona je 1/7 i skoro svi neutroni koji postoje nakon "freeze out-a" završavaju tako što formiraju ^4He jer je on izuzetno stabilan. Prema tome masa ^4He je oko 25% što je u skladu sa posmatranjima.

3.2 Odnos fotona i bariona

Važe sledeće reakcije:



Očigledno da je krajnji produkt ^4He . Prisustvo deuterijuma povezano sa stvaranjem ^4He (Steigman, 2007.).

4 Proces primordijalne nukleosinteze

Primordijalna nukleosinteza je započela neposredno nakon velikog praska kada se svemir dovoljno ohladio dozvoljavajući deuterijumu da preživi udare visokoenergetskih fotona. Na početku procesa odnos protona i neutrona je bio 7:1. Slobodni neutroni i protoni su manje stabilni od helijuma pa zato imaju tendenciju da ga formiraju ali formiranje helijuma zahteva međukorak, a to je formiranje deuterijuma. Problem u vezi sa deuterijumom je taj što dok je temperatura dovoljno visoka mnogi fotoni imaju energiju koja je veća od energije veze deuterijuma pa tako sav deuterijum biva uništen. Dakle formiranje helijuma je odloženo do trenutka kada svemir dostigne temperaturu od 1,16 gigakelvina kada dolazi do ekspanzije stvaranja elemenata ali ni to ne traje dugo jer ubrzo nakon toga svemir se ohladio toliko da nijedna nuklearna fuzija nije mogla da se odigra. U tom trenutku zastupljenosti elemenata su bile skoro fiksirane a jedine promene odnosile su se na radioaktivni raspad nekih produkata primordijalne nukleosinteze. Šema ovih procesa prikazana je na slici 1.

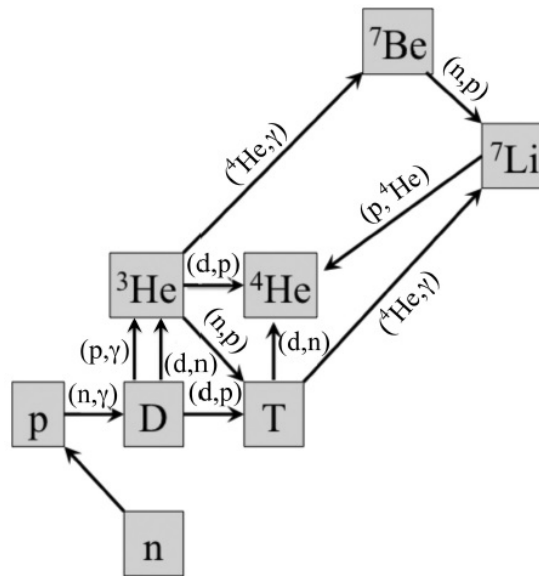


Figure 1: Nuklearne reakcije, Bertulani, C. (2013.)

Dakle deuterijum je odigrao ključnu ulogu u ostvarivanju primordijalne nukleosinteze. Ako je previše deuterijuma stvoreno onda usled manjka slobodnih neutrona ne dolazi do daljeg stvaranja težih elemenata, a ako je malo deuterijuma stvoreno onda nedostaje važan faktor u daljoj fuziji. Veoma važan faktor u teoriji je to što nema stabilnih elemenata sa masenim brojem $A=5$ i $A=8$ pa je zbog toga očekivano smanjenje u intenzitetu ovog procesa kod $A=4$ i $A=7$. Takođe može se zaključiti i da količina deuterijuma prvo raste pa se onda smanjuje zbog toga što se koristi u stvaranju helijuma. Helijum, koji je stabilan, će biti prisutan u velikim količinama zbog toga što svi prethodni elementi vode ka njegovom formiranju, a malo je verovatno da helijum stupa u reakciju sa neutronima i protonima (Coc, 2013.). Prisustvo litijuma i berilijuma će biti izuzetno malo u odnosu na ostale elemente.

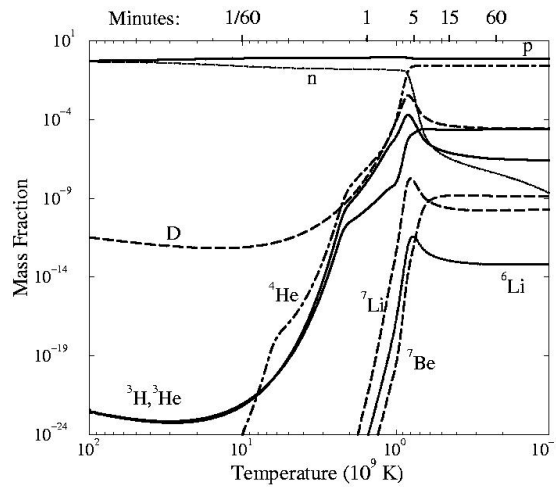


Figure 2: Zastupljenost elemenata kao funkcija temperature za $\eta = 5,1 * 10^{-10}$, Burles (1999.)

5 Elementi

5.1 ^4He

Velika količina helijuma omogućava njegovo precizno merenje na raznim lokacijama, ali helijum se proizvodi i u zvezdama pa su za precizno merenje pogodne lokacije sa malo zvezda (Tytler, 2000.). Teorija predviđa 25% He po masi. Helijum je veoma stabilan jer niti se raspada niti se kombinuje u cilju stvaranja težih jezgara. Za stvaranje helijuma je potrebno 2 protona i 2 neutrona. Proton-neutron odnos je 7:1, što znači da će biti potrebne dve ovakve "porcije" nukleona da bi se formirao helijum. Dakle, od dve "porcije" nukleona, 14 protona i 2 neutrona, po 2 protona i neutrona će formirati helijum. To znači da na 1 helijum preostaje 12 vodonika što rezultira udelom mase helijuma od 25% a 8% prema broju atoma.

5.2 ^3He

Primordijalna zastupljenost ^3He nije izmerena. Pretpostavka je da bi zvezde male mase trebalo da proizvode dosta ^3He , a kasnije je merenjima i potvrđeno povećano prisustvo ^3He u planetarnim maglinama. Predloženo je da nejasnoće u vezi sa količinom uništenog D mogu zaobići koristeći sumu $D + ^3\text{He}$ zato što uništeni D postaje ^3He . Stoga, primordijalna suma $D + ^3\text{He}$ bi trebala biti manja od današnje jer je dodatna količina ^3He proizvedena u zvezdama. Problem sa ovim scenarijom je taj što bi količina ^3He trebala da se povećava vremenom što nije slučaj, što implicira da neke zvezde uništavaju ^3He . Balsaer je 1999. godine objavio rad o četrnaestogodišnjem merenju ^3He u galaktičkim H II regionima. Koristeći model strukture gustine gasa našao je da je odnos $^3\text{He}/\text{H} = 1.6 * 10^{-5}$. (Tytler, 2000.)

5.3 D

Deuterijum je u neku ruku suprotnost helijumu, jer je helijum stabilan, a deuterijum se lako uništava. Primordijalna nukleosinteza nije pretvorila kompletan deuterijum u helijum. Količina deuterijuma je osetljiva na početne uslove. Nisu poznati procesi nakon primordijalne nukleosinteze koji su mogli da proizvedu značajne količine deuterijuma (Tytler, 2000.). Veoma je teško "pronaći" proces koji može da stvara deuterijum pored nuklearne fuzije jer bi takav proces zahtevao temperaturu dovoljnu da se stvori deuterijum ali ne dovoljno visoku da nastane helijum i nakon nekoliko minuta bi morao da se ohladi do temperatura na kojima se ne dešavaju nuklearne reakcije. Takođe i mogućnost proizvodnje deuterijuma fisijom nije realna (Audouze et al. 1973.).

5.4 Li

Litijum je posmatran u solarnom sistemu, atmosferama raznih zvezda, kao i u međuzvezdanoj materiji. Tokom nukleosinteze litijum je formiran u obliku ${}^7\text{Li}$ i ${}^6\text{Li}$. Starije zvezde imaju manje litijuma nego što bi trebale, a neke mlađe imaju više. Manjak litijuma kod starih zvezda se objašnjava tako što se u unutrašnjosti on uništava. U mlađim zvezdama se litijum proizvodi ali se pri sudaru sa protonom na temperaturama većim od 2,4 miliona stepeni razlaže na dva helijuma. Veliki izazov teorije primordijalne nukleosinteze predstavlja neslaganje u predviđanju količine ${}^7\text{Li}$. Teorija predviđa tri puta veću količinu ${}^7\text{Li}$ od one koja je posmatrana u atmosferama starih zvezda. U cilju spasavanja teorije neki teoretičari su predložili da postoji mehanizam koji transportuje litijum u unutrašnjost gde nije dostupan posmatranju. ${}^6\text{Li}$ takođe predstavlja problem pošto teorija predviđa da je ${}^6\text{Li}$ proizveden u zanemarljivim količinama ali on je prisutan u količinama koje je moguće detektovati (Fields, 2011.).

5.5 Be

Standardna teorija primordijalne nukleosinteze predviđa zastupljenost berilijuma od ${}^9\text{Be}/H < 10^{-17}$ što je nekoliko redova veličina manje od količine koju je moguće posmatrati (Tytler, 2000.).

6 Istorijat teorije

Četrdesetih godina fizičar Gamow i njegov student Alpher su se bavili termodinamikom ranog univerzuma. Oni su shvatili da se nukleosinteza mogla odigrati u tom periodu ali oni su smatrali da je tada došlo do stvaranja svih elemenata, ne samo lakih. Autori rada, prvobitno su trebali da budu Alpher i Gamow, ali je Gamow dopisao i Betheovo ime (Bethe je bio iznenađen kada je čuo da je pomenut kao autor) pa su autori rada onda bili Alpher, Bethe i Gamow što podseća na početna slova grčkog alfabeta. Zahvaljujući pionirskom radu Gamowa i njegovih saradnika danas postoji zadovoljavajuća teorija formiranja elemenata. Sedamdesetih godina XX veka teorija je bila na velikom iskušenju jer je gustina bariona predviđena teorijom bila znatno manja od posmatrane mase što je kasnije objašnjeno prisustvom tamne materije.

7 Zaključak

Teorija primordijalne nukleosinteze je postigla veliki uspeh jer postoje slaganja sa posmatranjima. Teorija predviđa količine helijuma, litijuma i deuterijuma u zavisnosti od jednog slobodnog parametra η . Zastupljenost ovih elemenata je merena u gasu koji nije pod uticajem zvezdanih procesa i brojevi su skoro podudarni sa teorijom.

8 Literatura

- [1] Audouze, J. et al.:On the origin of light elements (1973.) Astrophysical Journal, Vol. 179
- [2] Bertulani,C.:Nuclei in the Cosmos,(2013.)
- [3] Burles et al.:Sharpening the Predictions of Big-Bang Nucleosynthesis,(1999.) Physical Review Letters, Volume 82
- [4] Coc,A.:Primordial nucleosynthesis,(2013.) Acta Physica Polonica B, vol. 44
- [5]Doglov, A. D.:Big Bang Nucleosynthesis(2002.) Nuclear Physics B Proceedings Supplements, Volume 110
- [6] Fields, B. D.: The Primordial Lithium Problem (2011.) Annual Review of Nuclear and Particle Science, vol. 61
- [7] Steigman, G.: Primordial Nucleosynthesis in the Precision Cosmology Era(2007.) Annual Review of Nuclear and Particle Systems, vol. 57,
- [8] Tytler, D. : Review of Big Bang nucleosynthesis and primordial abundances (2000.) Physica Scripta
- [9]”Hubble Observations Bring Some Surprises”, The New York Times. 14.1.1992.