

Природно-математички факултет  
Радна заједница заједничких послова  
НОВИ САД

Примљено: 31. марта 1994

Орг. јед.	Број	Прилог	Вредност
0603	9/29		

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ  
ИНСТИТУТ ЗА ФИЗИКУ

VLADIMIR PAVLOV

ODРЕДИВАЊЕ STAROSTI SVEMIRA NA OSNOVU  
RADIOAKTIVNOG DATIRANJA

- дипломски рад -

Novi Sad, 1994.

Zahvaljujem se mentoru dr Miroslavu Veskoviću i svim članovima laboratorije za nuklearnu fiziku na korisnim sugestijama koje sam dobijao tokom izrade ovog diplomskog rada.

B. Tabuš

## PREDGOVOR

Potreba da se nečemu ili nekome utvrdi starost, jedna je od onih koje su prisutne u duhovnom životu čoveka od drevnih civilizacija sve do savremenog doba. Verovatno je ta potreba nastajala uporedo sa razvojem čovekove sposobnosti da broji.

Subjektivni doživljaj prolaznosti vremena pre svega je zasnovan na našoj mogućnosti da shvatimo da su se događaji dogodili i ostali iza nas, čime se kreira naše poimanje prošlosti na vremenskoj osi. Da bismo te utiske nekako mogli urediti bilo je nužno da se utvrdi vremenska jedinica čiji će umnošci davati informaciju o tome koliko se jedan događaj desio pre drugog ali isto tako i da omogući određivanje te distance i u suprotnom smeru, za događaje čije dešavanje predviđamo u budućnosti.

Inspiraciju za uspostavljanje osnovne vremenske jedinice ljudi su kroz istoriju bez mnogo lutanja crpli iz prirode, zapravo iz onih prirodnih pojava koje imaju osobinu da se periodično ponavljaju u pravilnim intervalima pa su stoga pogodni za prebrojavanje. Neke od tih periodičnih pojava, kao Zemljina rotacija (obrtanje oko svoje ose), revolucija(okretanje oko Sunca) i obrtanje Meseca oko Zemlje služe kao osnov za utvrđivanje jedinica za vreme od pamтивекa. Na osnovu njih su utvrđeni pojmovi dan, godina i mesec.

Sa razvojem duha i znanja smenjivale su se civilizacije i epohe, ali je zahtev za što preciznijim merenjem vremena kroz istoriju zadržavao uvek isti trend: potreba za što boljom skalom vremenskih jedinica uvek je rasla, a sa njom i pokušaji da se vreme meri od nezamislivo kratkog do nezamislivo dugog.

- Danas, mi smo u stanju da merimo tako kratke vremenske intervale kao što je trajanje neke hemijske reakcije ali i da dodjemo do informacije o starosti čitavog svemira.

Određivanje starosti opservabilnog svemira, pored ostalog, jedan je od ciljeva ovog diplomskog rada.

## SADRŽAJ

	Strana
1. Određivanje starosti svemira metodama nuklearne astrofizike	3
1.1 Nastanak elemenata	3
2. Osnovni elementi nukleosinteze iza gvožđa	4
2.1 S-proces	6
2.2 R-procesna nukleosinteza	7
3. Nuklearna kosmohronologija	9
3.1 Teorijski galaktički modeli	15
3.2 Model iznenadne sinteze	16
3.3 Model uniformne nukleosinteze	17
3.4 Traganje za realističnim modelom	18
3.5 Model eksponencijalne sinteze	19
3.6 Ostali modeli galaktičke nukleosinteze	20
3.7 Važniji rezultati poređenje sa drugim metodama	22
4. Eksperimentalno određivanje odnosa obilnosti	23
4.1 Princip detekcije i spektroskopije gama zračenja	24
5. Merenja i rezultati	25
5.1 Određivanje odnosa obilnosti metodom gama spektroskopije	25
5.2 Određivanje početka nukleosinteze i starosti svemira	26
5.3 Vreme početka nukleosinteze i starost svemira na osnovu iznenadnog modela	27
5.4 Vreme početka nukleosinteze i procena starosti svemira po modelu uniformne sinteze	29
5.5 Određivanje početka nukleosinteze i starosti svemira prema eksponencijalnom modelu	30
6. Zaključak	32
7. Literatura	33

## 1. ODREĐIVANJE STAROSTI SVEMIRA METODAMA NUKLEARNE ASTROFIZIKE

Izučavanje daleke prošlosti ima veoma dugu istoriju. Datiranje specifičnih dogadjaja, poput formiranja planete Zemlje i Sunca, kretao se iz domena religijskih otkrića do kvantitativnih naučnih zaklučaka zasnovanih uglavnom na fizičkim merenjima.

Posto su većina hemijskih elemenata i njihovih izotopa koji su nadjeni na Zemlji i prema onome sto je moguće izmeriti, stabilni, moglo bi se pomisliti da oni postoje večno. Međutim nekoliko nestabilnih jezgara još uvek postoje u Sunčevom sistemu u merljivim količinama zahvaljujući njihovim dugim životima. Njihovo postojanje se jasno suprotstavlja pretpostavci da postoje večno pa se nameće zaključak da elementi imaju konačnu istoriju.

Iz ovoga proističu ključna pitanja u vezi sa naukom o nukleosintezi:

-Kako i kada su ti elementi nastali, i koja vrsta kataklizmičkih dogadjaja u dalekoj prošlosti je bila potrebna za stvaranje ovih nestabilnih elemenata kao uzgrednog efekta?

-Na koji način i do koje mere je moguće koristiti podatke o obilnostima radioaktivnih jezgara i njihovih potomaka koji su postojali u vreme nastanka Sunčevog sistema da bi se saznalo nesto o prethodnoj istoriji nukleosinteze?

Odgovori na ova pitanja biće ponudjeni u narednim poglavljima.

### 1.1 NASTANAK ELEMENATA

Prema savremenim stanovištima astrofizike, svemir je u svom prapočetku bio u stanju beskonačne gustine. Big-bang ili veliki prasak je referentni dogadjaj i standardni model od koga se računa evolucija svemira.

Po tom modelu, u trenutku velikog praska, sva materija se razletela u svim pravcima i svoj zaista sloboden let uniformno nastavila zauvek. Po neki deo te materije je se uz put kondenzovao u magline, galaksije i zvezde.

Prva jezgra koja su ikada nastala, bila su laka jezgra vodonika H. U mehanizam njihovog nastajanja se neću upuštati u ovom radu. Sinteza ostalih elemenata se odvijala u nuklearnim procesima u zvezdama. Termonuklearne reakcije imaju ključnu ulogu za razumevanje stvaranja energije i nukleosinteze elemenata zvezdama.

Zvezde su nastale kada se interstelarni gas (najvećim delom H i He) kondenzovao i zagrejao usled konverzije gravitacione u termalnu energiju. Kada su temperatura i gustina dostigle potrebnu vrednost, nuklearne reakcije u zvezdama su započele, najpre fuzijom vodonika u helijum. Kada je vodonik kao fuziono gorivo bivao potrošen, zvezda je doživela kontrakciju. I dalje se gravitaciona energija konvertovala u termalnu a temperatura i gustina su rasle do vrednosti potrebnih za pokretanje drugih mehanizama.

Sledeća etapa sinteze jezgara su reakcije na osnovu kojih je preostali helijum u zvezdama pod povoljnim uslovima (povećana temperatura) stvarao nova jezgra: ugljenik C, kiseonik O i malu količinu neona Ne.

U ovoj fazi evolucionog procesa reakcije izmedju prostijih atoma rezultuju stvaranjem složenijih. Na višim temperaturama C i O i sami ulaze u reakcije kreirajući Na, Mg, Al, Si, S i Ca. Gorenjem O i C, dolazilo je do fotodezintegracije neon-a Ne.

Na još višim temperaturama pojavljuju se poznati metali Fe, Ni, Cr, Mn i Co.

Ovo su glavni procesi na osnovu kojih su nastajali elementi sa najvećim obilnostima u svemiru. Ostali elementi su nastali takodje u zvezdama posredstvom manjih sekundarnih reakcija.

Dakle, najvažniji procesi nukleosinteze su:

- 1)Gorenje vodonika(pretvaranje H u He)
- 2)Gorenje helijuma(pretvaranje He u C, O... )
- 3)Gorenje C, O i Ne (stvaranje elemenata  $16 < A < 28$  )
- 4)Gorenje Si (stvaranje  $28 < A < 60$  )
- 5)s, r i p proces (stvaranje  $A > 60$  )
- 6)I-proces (stvaranje reaktivnih lakih elemenata D, Li, Be i B)

Od posebnog značaja za ovaj rad je uvid u nastanak elemenata koji se u periodnom sistemu elemenata nalaze iza gvožđa pošto se u toj grupi elemenata nalaze oni sa najdužim periodom poluraspada.

## 2. OSNOVNI MEHANIZMI NUKLEOSINTEZE IZA GVOŽĐA

Kao rezultat svake reakcije neutroskog zahvata ( $n, \gamma$ ) jezgro ( $Z, A$ ) se transformiše u teži izotop ( $Z, A+1$ ). Ako je izotop stabilan, dodatni neutronski zahvat dovešće do stvaranja izotopa ( $Z, A+2$ ) i tako dalje. Znači, reakcije neutronskog zahvata povećavaju maseni broj za jedan i tako obezbeđuju mehanizam za sintezu elemenata iza gvožđa.

Ako je u lancu ovih reakcija zahvata neutrona poslednji nastali izotop nestabilan, naredni proces će zavisiti od intenziteta fluksa neutrona koji dolaze na jezgro i od osetljivosti nestabilnog jezgra u odnosu na beta raspad.

Za neštabilna jezgra za koja je vreme izmedju dva uzastopna  $\beta$ -raspada

$$\tau_{n,\gamma} \gg \tau_\beta$$

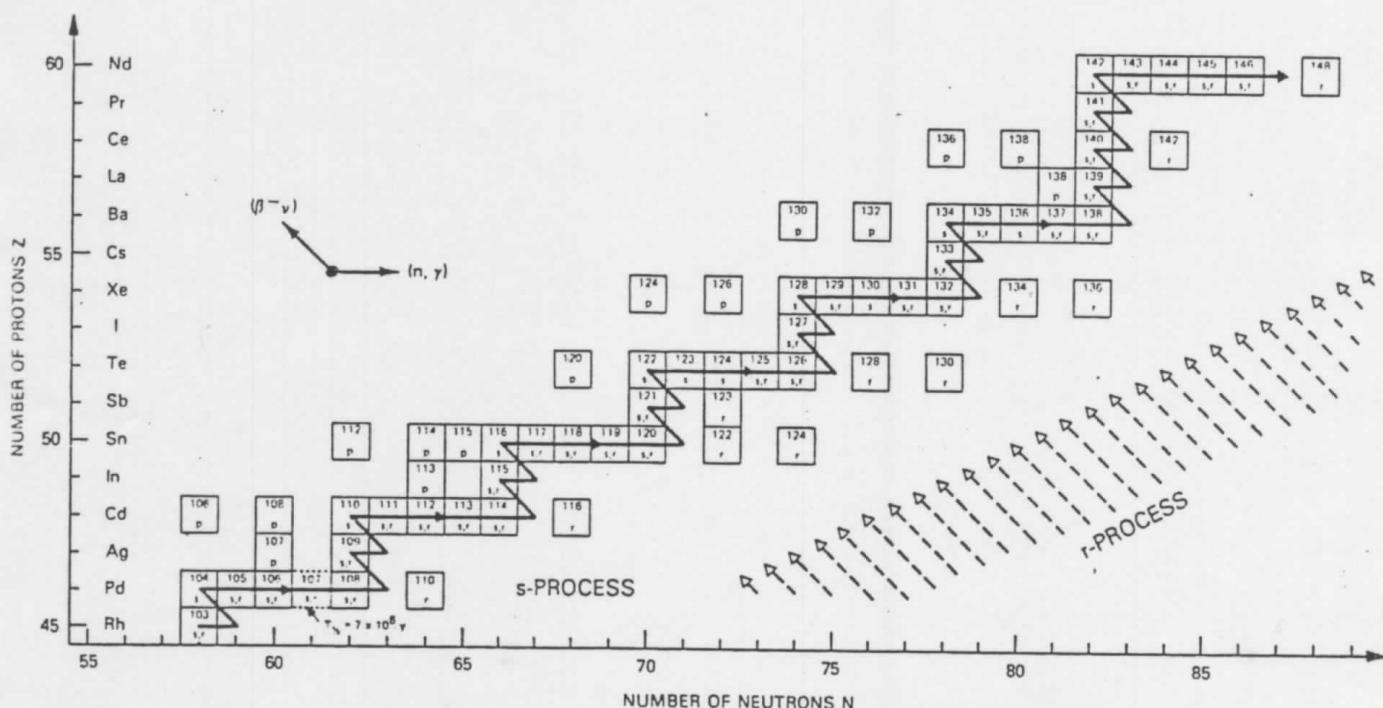
kažemo da se nalaze u mreži s-procesa ( s-proces = skrać. za SLOW proces).  
Ako je pak

$$\tau_{n,\gamma} \ll \tau_\beta$$

onda su jezgra u lancu r-procesa (r-proces = skrać. za RAPID proces).

## 2.1 S-PROCES

Kao što je ranije pomenuto, ako je kod nestabilnog jezgra vreme između dva suksesivna neutronska zahvata veće nego vreme beta raspada, jezgro će se naći u lancu nukleosinteze nazvanom s-proces.



Slika 1. Staza s-procesa

Sa slike se jasno vidi da s-proces prati stazu koja se proteže duž doline  $\beta$ -stabilnosti, tj. ostaje blizu okolnim izotopima date atomske težine. Ako pogledamo npr. I-127, vidimo da će on zahvatom neutrona postajti I-128 koji  $\beta$ -raspadom ( $T_{1/2} = 25 \text{ min}$ ) prelazi u stabilni izotop Xe-128.

Uzastopnim neutronskim zahvatima Xe-128 se transformise do nestabilnog Xe-133 koji se  $\beta$ -raspadom pretvara u stabilni Cs-133 itd.

Tipični životi jezgra u odnosu na  $\beta$ -raspad kreću se u intervalu od sekunde do godine. Stoga se prema uslovu za događanje s-procesne nukleosinteze

$$\tau_{n,\gamma} \gg \tau_\beta$$

traži da vremena između dva uzastopna neutronska zahvata budu veća od ovih vrednosti. Ako je neki srednji presek za neutronski zahvat  $\sigma = 0.1$  barn na 30 keV (brzina neutrona  $V_t = 3 \times 10^6 \frac{m}{s}$ ), onda je brzina reakcije za par čestica

$$\langle \sigma \times V_t \rangle = 3 \times 10^{-11} \frac{m^3}{s}.$$

Proizvod srednjeg života za neutronski zahvat  $\tau_{n,\gamma}$  i neutronske gustine  $N_n$  je

$$\tau_{n,\gamma} \times N_n = 1 / \langle \sigma \times V_t \rangle = 3 \times 10^{22} \frac{s \times \text{neutron}}{m^3}.$$

Za  $\tau_{n,\gamma} = 10$  god., potrebna neutronska gustina za s-proces je onda oko

$$\text{vrednosti } N_n = 10^{14} \frac{\text{neutron}}{m^3}.$$

Uočljivo je sa grafika s-procesa (slika 1.) da ni jedno stabilno jezgro ne postoji na neutronskom broju  $N = 61$ . Slično se dogadja i sa  $N = 35, 39, 45, 89, 115$  i  $123$ . Uzrok ovome je grananje staze s-procesa. Ono se objašnjava pojavom da je nekoliko izlaganja neutronima sa različitim fluksevima uticalo na sintezu s-procesnih elemenata.

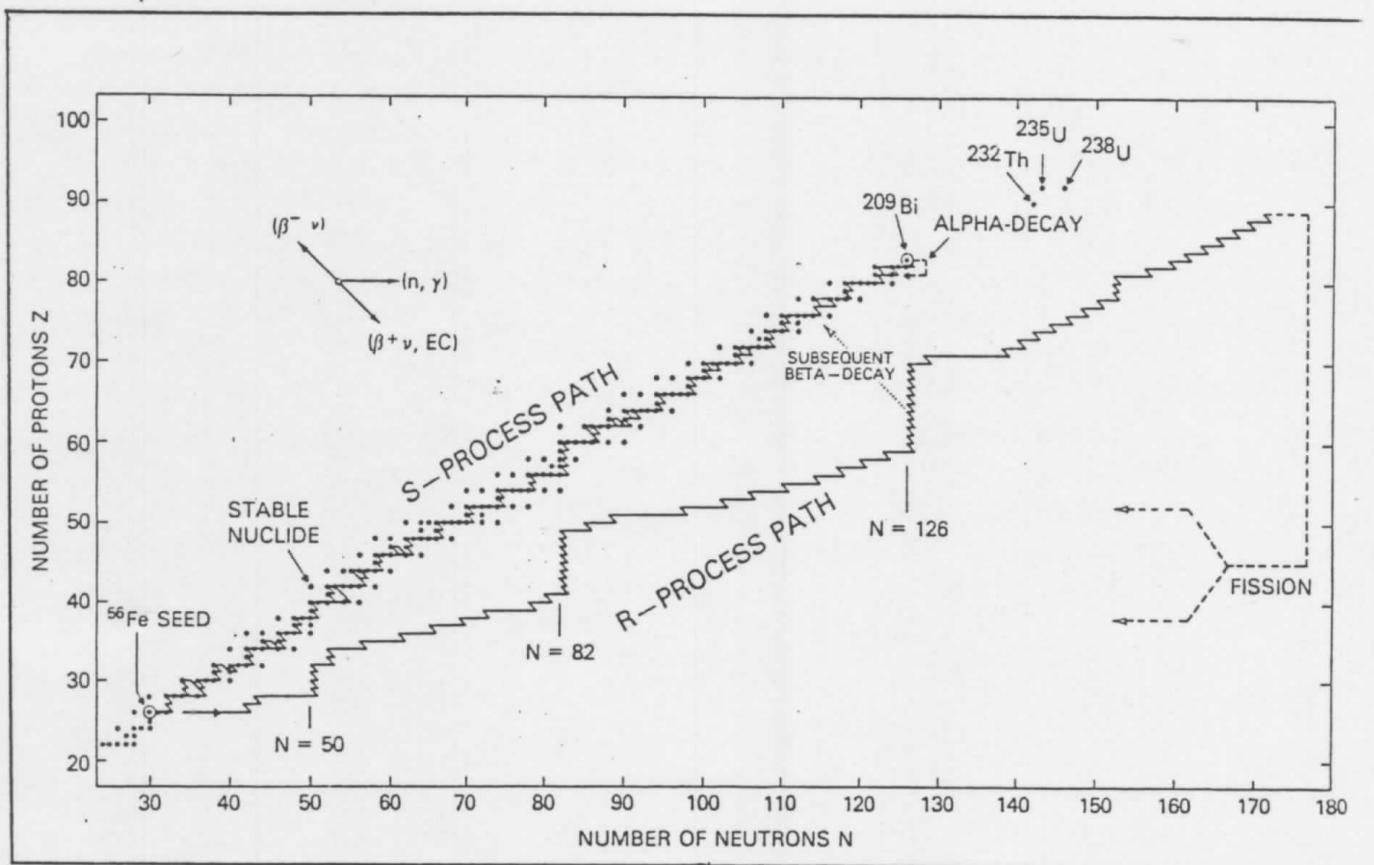
## 2.2 R-PROCESNA NUKLEOSINTEZA

Ako je vreme između sukcesivnih neutronske zahvata manje od vremena između dva uzastopna  $\beta$ -raspada, tada se radi o nukleosintezi koja je zbog načina nastajanja nazvana r-procesna. Kao i kod s-procesa, r-procesna nukleosinteza se odvija dodavanjem neutrona jezgrima.

Jezgro-klica od kojeg proces može da kreće je pre svega Fe-56. Pošto je vreme izmedju neutronske zahvata mnogo manje od vremena dva uzastopna  $\beta$ -raspada

$$\tau_{n,\gamma} \ll \tau_\beta$$

u ovom slučaju proces neće pratiti liniju beta stabilnosti već će ići uz liniju dodavanja neutrona.



Slika 2. Staze neutronskog zahvata za s-proces i r-proces [9]

$\beta$ -raspad postaje konkurentan neutronskom zahvatu tek kada se formiraju jezgra veoma bogata neutronima tj. kada se energija vezivanja neutrona približi nuli. Tada je i moguće da se beta raspad dogodi i poveća nanelektrisanje jezgra za jedinicu. Naizmeničnim događanjem neutronskih zahvata i  $\beta$ -raspada stvaraju se sve teža i teža jezgra čija nanelektrisanja rastu.

Za razliku od s-procesa koji se kretao stazom beta stabilnosti, r-proces sledi stazu sa strane povećanja neutronskog broja. U trenucima kada fluks neutrona opadne, materija koja se obogatila neutronima brzo putem nekoliko  $\beta$ -

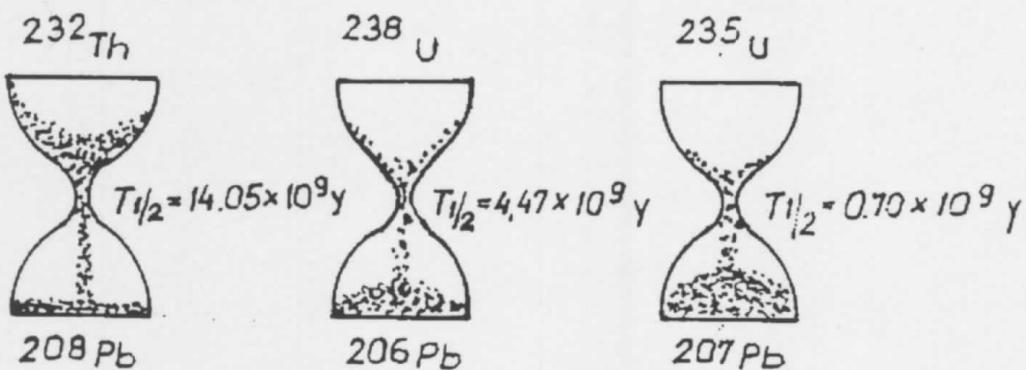
raspada evoluira u oblast stabilnosti (očuvajući masu, tj. br A). Tako se u r-procesnoj nukleosintezi stvaraju neutronima bogati izotopi koji s-procesom nisu zahvaćeni.

### 3. NUKLEARNA KOSMOHRONOLOGIJA

Teški elementi, nađeni na Suncu i njegovim planetama, sintetizovani su na nekom drugom mestu. Evo odakle tvrdnja:

Nuklearni procesi koji sa sada odvijaju u Suncu svode se, u najgrubljem, na transformaciju vodonika u helijum. Stoga, teški elementi koji su nađeni u Sunčevom sistemu moraju biti stariji od 4.6 milijardi godina koliko se smatra da je Sunčev sistem star [1]. Korišćenjem pogodnih osobina radioaktivnih jezgara moguće je steći uvid u istoriju elemenata. To je vrlo slično C-14 postupku koji je široko primenjivan za određivanje starosti npr. arheoloških uzoraka.

Nauka koja se bavi obradom eksperimentalnih ili računski izvedenih relativnih obilnosti radioaktivnih jezgara, da bi odredila vremensku skalu njihovog nastajanja , naziva se **NUKLEOKOSMOHRONOLOGIJA**. Iz tih vremenskih skala moguće je odrediti trajanja nukleosinteze svih elemenata, starost naše Galaksije kao i starost samog svemira. Pošto istorija nukleosinteze operiše vremenima većim od 4.6 milijardi godina, radioaktivna jezgra sa periodima poluraspada tog reda veličine (Th-232, U-238, U-235) pogodna su da posluže kao hronološki instrumenti, tj. neka vrsta časovnika.



Slika 3. Radioaktivni eonski časovnici

Zgodno je, stoga, uočiti analogiju izmedju radioaktivnih jezgara i njihovih potomaka sa jedne strane , i običnog pesčanog časovnika sa druge.

Zamislimo da je radioaktivni predak ( $^{232}Th$ ,  $^{238}U$  ili  $^{235}U$ ) pesak u gornjoj komori peščanog sata, a potomak ( $^{208}Pb$ ,  $^{206}Pb$  i  $^{207}Pb$ ), inače produkt radioaktivnog raspada pesak koji je iscurio u donju komoru zamišljenog časovnika.

Kod peščanog sata treba poznavati brzinu padanja peska i njegovu količinu na početku merenja vremena.

Kod radioaktivnih časovnika "pesak" u donjoj komori je neki stabilni produkt raspada (Pb, He, A, Sr, ...) jednog od radioaktivnih nuklida dugog života (U, Th, K, Rb, ...) čija konstanta raspada lambda je merilo brzine padanja. Nepromenljivost konstante raspada tokom vremena je upravo ona hipoteza na kojoj je metoda zasnovana.

Ako npr. posmatramo neki uranonosni mineral koji u trenutku svog stvaranja nije sadržavao obično olovo kao ni torijum, onda možemo postupiti ovako:

Neka je  $N_0$  broj atoma U-238 u jednom gramu uzorka u trenutku  $t=0$ , a  $N_t$  broj atoma U-238 u trenutku  $t$ . Ako je vreme  $t$  dovoljno dugo da se uspostavi stalna radioaktivna ravnoteza, po zakonu radioaktivnih transformacija

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda \times N \quad (1)$$

dobija se  $N_0 - N_t$  atoma U-238 koji su se raspali tj. toliko stvorenih atoma Pb-206.

$$N_0 - N_t = N_{206} = N_0(1 - e^{-\lambda_{238}t}) \quad (2)$$

Odavde sledi

$$\frac{N_{238}}{N_{206}} = \frac{N_0 e^{-\lambda_{238}t}}{N_0(1 - e^{-\lambda_{238}t})} \quad (3)$$

Uz prepostavku da nam je poznato stablo raspada U-238 do Pb-206, iz njega vidimo da transmutacija jednog atoma-238 u Pb-206 biva praćena stvaranjem osam atoma helijuma kao posledica osam alfa raspada. Odavde možemo pronaći formule koje omogućavaju određivanje starosti prema nagomilanom helijumu.

Za određivanje starosti bilo kog objekta pa čak i svemira, dovoljno je da nadjemo jezgra sa veoma dugim životima i naš časovnik "naštelujemo" po njima.

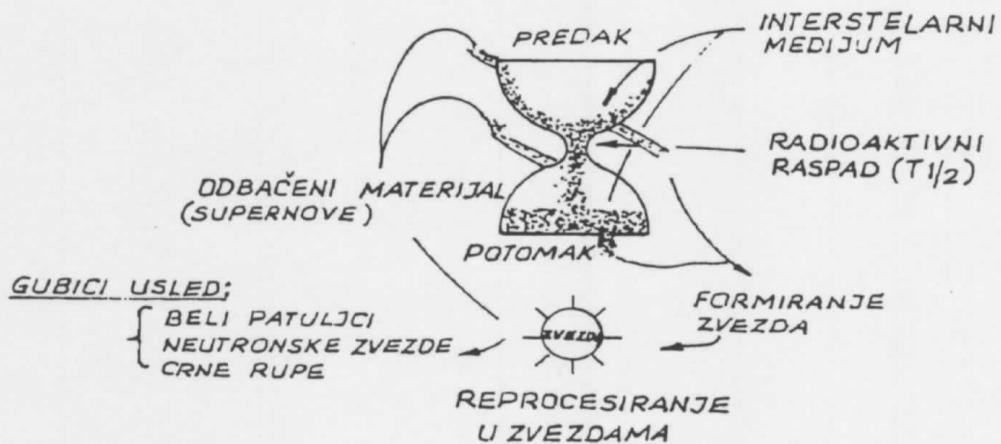
Na tabeli 1 su pobrojani izotopi ili elementi koji bi mogli poslužiti kao "svemirski časovnici" zahvaljujući širokom intervalu perioda poluraspada.

Izotop	Period poluraspada [ $10^9$ god.]
Re-187	50
Rb-87	47
Th-232	14.05
U-238	4.47
U-235	0.704
Pu-244	0.0826
I-129	0.0157
Pd-107	0.0065
Al-26	0.000716

Tabela 1.

Ovi, i po dugom periodu poluraspada njima slični elementi, nazivaju se *eonski*, časovnici. (eon=milijarda godina)

Kao kod peščanog sata, količina "peska" u gornjoj i donjoj komori eonskog časovnika, uz poznavanje brzine raspada, nam omogućava da odredimo starost pretka. Na žalost, prilikom rada sa nuklearnim hronometrima ima mnogo više komplikacija nego kod rada sa prostim peščanim satom.



Slika 4. Komplikacije u nukleokosmohronologiji

Moguće komplikacije su:

- promene u odnosu predak-potomak čiji uzrok ne leži u radioaktivnom raspadu već npr. u hemijskim ili fizičkim procesima koji će taj odnos narušiti. Pošto posle radioaktivnog raspada potomak više nije isti hemijski element kao predak, to će oni (predak i potomak) i njihova jedinjenja imati različite fizičko-hemijske osobine. Ovo razdvajanje se može dogoditi u bilo koje vreme i resetovati naš eonski časovnik.

- sledeća komplikacija nastaje ako eonski časovnik nije "hermetički zatvoren" tj. ako su mu komore propustljive prema okruženju.

Ono što će nas u razmatranju ovih pitanja prvo zanimati je istorija galaktičkog interstelarnog medijuma koji se sastoji od gasa i praštine. Posebno će biti zanimljivo pratiti tok povećanja obilnosti teških elemenata od nulte koncentracije u vreme formiranja Galaksije pa do obilnosti koja je postojala u vreme nastanka Sunčevog sistema.

Kada se Sunčev sistem kondenzovao iz interstelarnog medijuma pre 4.6 milijardi godina, sadržavao je izvesnu količinu teških elemenata, uključujući i radioaktivne pretke i radioaktivne potomke. Oni su korisna karakteristika interstelarnog medijuma u vreme i na mestu nastajanja Sunčevog sistema u našoj Galaksiji. Nakon kondenzacije iz interstelarnog gasa, galaktička nukleosinteza više nije imala nikakav uticaj na Sunčev sistem koji je od tada zatvoren hemijski i fizički sistem bez promena količine elemenata i izotopa, osim onih promena koje su posledica radioaktivnog raspada.

Nije neophodno pretpostaviti da je Galaksija bila potpuno izmešana i homogena, već je dovoljna pretpostavka da je čitava Galaksija nastala u približno isto vreme tako da obilnosti teških elemenata u uzorku koji ispitujemo mogu da nam daju informaciju o starosti koja je karakteristika Galaksije kao celine.

Glavni gubici "peska" na našem eonskom časovniku su posledica formiranja zvezda i eventualnog gubitka materijala kod belih patuljaka, neutronske zvezde i crnih rupa. U međuvremenu ostale zvezde su vraćale materijal u interstelarni medijum putem više mehanizama poput zvezdanih vetrova, gubitka mase tokom faze crvenog džina, formiranja planetarne magline i najspektakularnije - eksplozijom supernove.

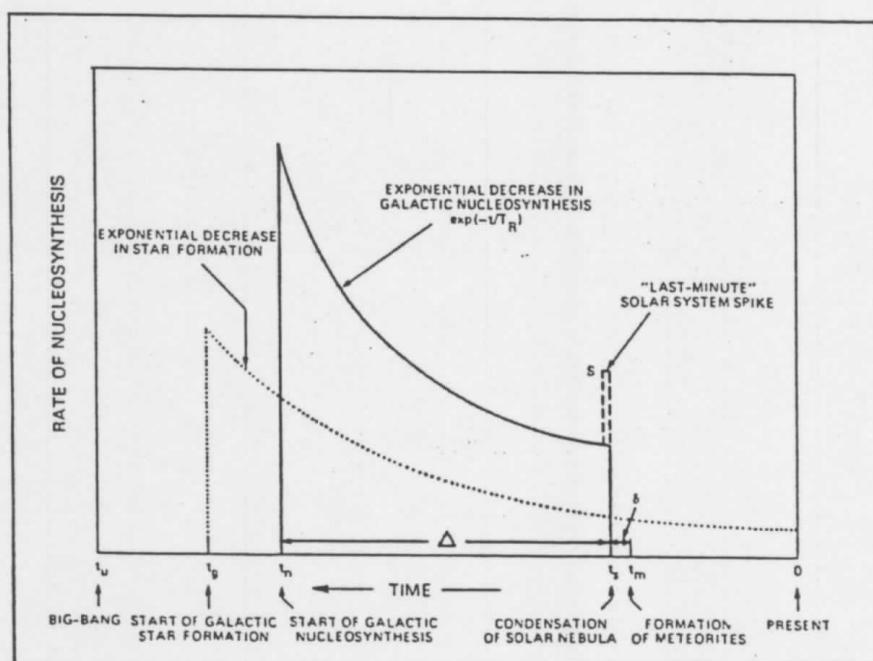
Standardno stanovište u ovoj vremenskoj igri je da su se ubrzo posle *big bang*-a (istorijsko vreme  $t_U$ ) stvorile naša i druge galaksije sa prvom generacijom zvezda (vreme  $t_g$ ). Zvezde su evoluirale sagorevajući svoje nuklearno gorivo i u nekom trenutku ( $t_n$ ) počele da stvaraju teže elemente iza H i He, koji su bili jedine velike nuklearne vrste proizašle iz *ruševina big bang*-a. Teži elementi, nastali u zvezdama uključuju i radioaktivne elemente koji služe kao nuklearni hronometri tj. eonski časovnici.

Pošto je običaj da se smer porasta vremena određuje na desno od sadašnjeg ( $t=0$ ) nalazimo da je  $t_U > t_g > t_n$  što znači da se prvo desio *big bang*, zatim su nastale galaksije i tek potom započelo stvaranje težih jezgara u zvezdanim procesima.

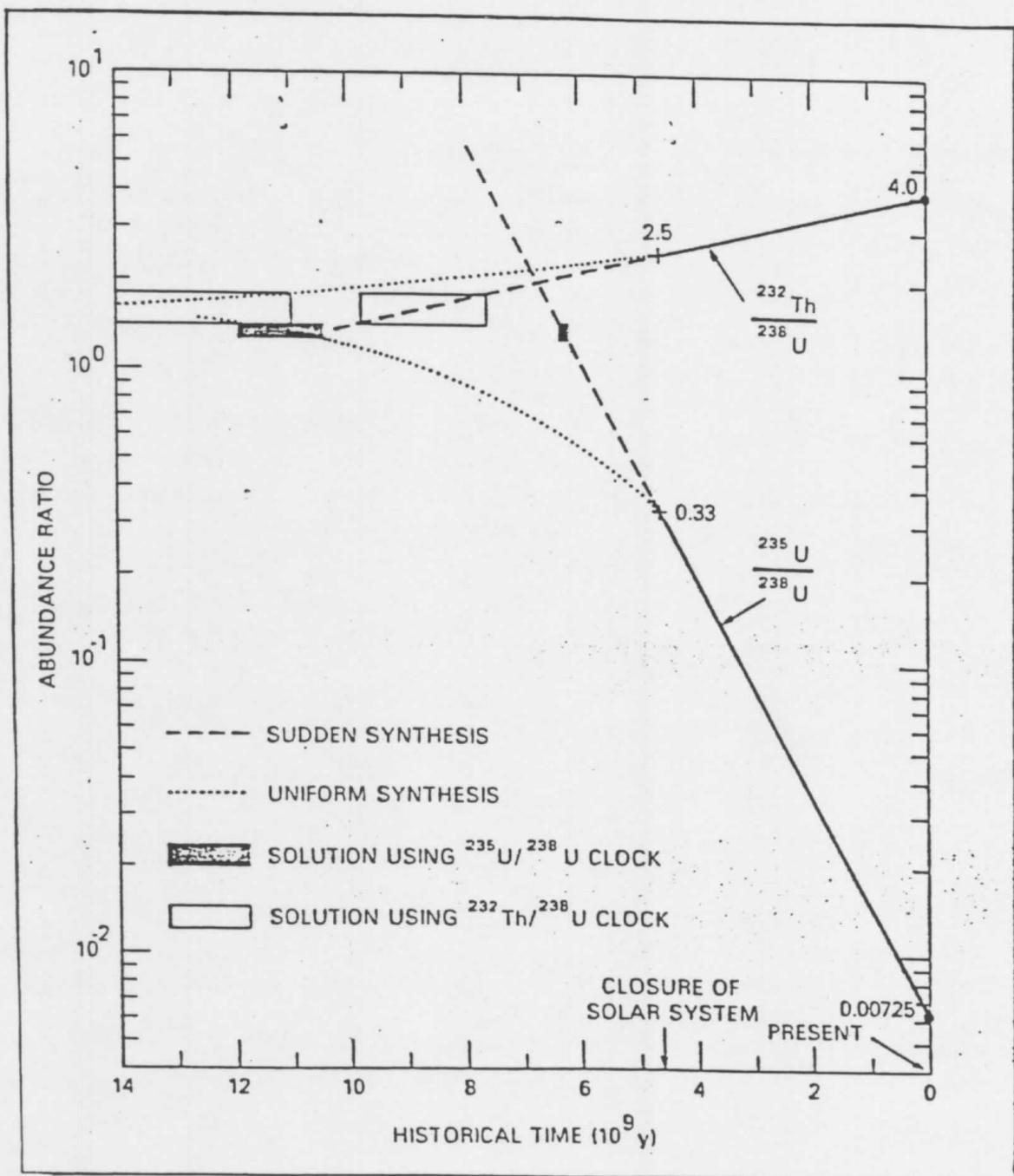
Trans-bizmutski radioaktivni rodonačelnici poput Th-232, U-238 i U-235 su nastali r-procešom. Poznavanje apsolutnih obilnosti pretka i potomka za svaki od ovih hronometara moglo bi nam otkriti njihovu istoriju. Međutim, apsolutne obilnosti još uvek ne možemo dovoljno precizno da merimo ili računamo. Srećom, odnosi ovih hronometara poput U-235/U-238 i Th-232/U-238, mogu biti precizno određeni i upotrebljeni za datiranje budući da su ta jezgra nastala putem istog zvezdanog procesa.

Sada smo došli do idejnog delokruga gde ćemo na osnovu izmerenih vrednosti odnosa U-235/U-238 moći da se upustimo u određivanje starosti. Posto se radi o dva izotopa istog elementa, na ovaj odnos neće uticati greške merenja ili promene uzrokovane hemijskim razdvajanjem. Korišćenjem njihovih poznatih perioda poluraspada, odnos je računat unatrag do vremena zatvaranja Sunčevog sistema ( $t_s = 4.6$  mld. god.) kada je bio veći nego danas ( $(U-235/U=238)_0=0.00725$  i iznosio  $(U-235/U-238)_s = 0.33$  (slika 7.), zahvaljujući kraćem periodu poluraspada U-235.

Iza ovog vremena ( $t_s$ ), nastanak elemenata r-procesom, kao i radioaktivno raspadanje tokom perioda galaktičke nukleosinteze uticali su na ovaj odnos. Zato ekstrapolacija do ove epohe zahteva hronološki (galaktički) model.



Slika 5. Hronološki model nukleosinteze u galaksiji [12]



Slika 6. Odnosi obilnosti  $\text{U}-235/\text{U}-238$  i  $\text{Th}-232/\text{U}-238$  kao funkcija vremena prema različitim modelima nukleosinteze [11]

Pošto su oba jezgra nastala u istom zvezdanom okruženju, odnos njihovih konstanti stvaranja ne zavisi od njihovog mesta kao ni vremena njihove zvezdane sinteze. Znajući prvobitni odnos konstanti stvaranja  $\lambda_{235}/\lambda_{238}$  za ova jezgra kao i dati galaktički model, možemo izračunati odnos obilnosti u vreme nastanka sunčevog sistema i uporediti ga sa izmerenim rezultatima. Ova procedura, iako zavisna od izbora galaktičkog modela, omogućava određivanje trajanja r-procesa nukleosinteze od njenog početka u prvim zvezdama koje su u svemiru stvorene pa do poslednjih događaja pre formiranja Sunčevog sistema.

### 3.1. TEORIJSKI GALAKTIČKI MODELI

Kao što je ranije spomenuto, zgodna analogija sa peščanim satom se ne održava u stvarnosti jer "pesak" u našem eonskom satu biva oduziman i dodavan i iz gornje i iz donje komore časovnika (oduziman nukleosintezom-stvaranjem elemenata u zvezdama i astracijom-destrukcijom u zvezdama). Pogledati sliku 4.

Ova mana se može kompenzovati valjano postavljenim i izraženim diferencijalnim jednačinama [11]. Merenjem vremena unazad u odnosu na sadašnji trenutak, količina N dugoživećih radioaktivnih jezgara čiji su preci u mehanizmu sinteze svi relativno kratkoživeći, data je rešenjem sledeće diferencijalne jednačine:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\frac{N(t)}{\tau} + f(t, t_n, \lambda, T_r) \quad (4)$$

za vremenski interval  $t_s < t < t_n$ .

Prvi član sa desne strane znaka jednakosti opisuje normalni radioaktivni raspad vrste N, a drugi daje njen stvaranje putem galaktičke nukleosinteze. Taj drugi član može da bude komplikovana funkcija parametara kao što je vreme t, početak nukleosinteze  $t_n$ , prvobitna konstanta raspada(stvaranja)  $\lambda$  po jedinici vremena za posmatrano jezgro i  $T_r$  -karakteristično vreme za sintezu jezgra. Dakle, funkcija f opisuje fizičku i hemijsku evoluciju Galaksije.

### 3.2 MODEL IZNENADNE SINTEZE

U trenutku kondenzovanja solarne magline  $t_S$ , materijal Sunčevog sistema je bio zatvoren sistem sa  $f(t, t_n, \lambda, T_r) = 0$  za  $0 < t < t_S$  i stoga se data vrsta jezgra N menjala normalnim (slobodnim) radioaktivnim raspadom:

$$N(t) = N(0) e^{\frac{t}{\tau}} \quad (5)$$

gde  $N(0)$  predstavlja broj radioaktivnih jezgara (roditelja) observiranih danas, a  $\tau$  je njihov srednji život ( $\tau = T_{1/2} / \ln 2$ ).

U ovom vremenskom intervalu odnos uranijumovih obilnosti je dat relacijom:

$$\frac{U_{235}}{U_{238}}(t) = \frac{U_{235}}{U_{238}}(0) \frac{e^{t/\tau_{235}}}{e^{t/\tau_{238}}} \quad (6)$$

Ova jednačina je iskorišćena za izračunavanje odnosa obilnosti u vreme nastanka Sunčevog sistema  $t_S = 4.6$  mld. godina i za taj odnos je dobijena vrednost  $(U_{235}/U_{238})_S = 0.33$ . Ako prepostavimo da je r-proces bio jedini događaj odgovoran za prvo bitni odnos konstanti stvaranja  $\lambda_{235}/\lambda_{238} = 1.24 - 1.42$ , onda funkciju f možemo predstaviti preko Dirac-ove delta funkcije. Jednačina (4) tada dobija oblik:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\frac{N(t)}{\tau} + \lambda \delta(t_n - t) \quad (7)$$

a njeno rešenje uz granični uslov  $N(t_n) = \lambda$  biće:

$$\frac{\lambda_{235}}{\lambda_{238}} = \frac{U_{235}}{U_{238}}(t_s) \frac{e^{\Delta/\tau_{235}}}{e^{\Delta/\tau_{238}}} \quad (8)$$

pri čemu je  $t = t_S + \Delta$ .

Prema očekivanju, vremenska zavisnost odnosa obilnosti je identična sa vremenskom zavisnošću normalnog radioaktivnog raspada tokom ovog vremenskog intervala (4.6 mlrd. god.) što je na slici 6 prikazano isprekidanom linijom. Iz preseka isprekidane linije sa računski dobijenim vrednostima za odnos konstanti stvaranja (crni kvadratić na slici 6) nalazi se da se pretpostavljeni r-proces dogodio pre oko 6.2 mlrd. god.

Ovaj tip samostalnog događaja naziva se IZNENADNA SINTEZA a model kojim smo je opisali predstavlja samo jedan ekstrem mnogo opštije produkcione funkcije  $f(t, t_n, \lambda, T_r)$ .

### 3.3 MODEL UNIFORMNE NUKLEOSINTEZE

Moguće je pretpostaviti da se osim ovog jednog, moglo dogoditi još mnoštvo takvih procesa koji su dali svoj doprinos pri stvaranju materijala tokom dugog perioda pre kondenzacije Solarne magline. Zato, ako pretpostavimo, kao drugi ekstremni slučaj, da je stvaranje elemenata teklo uniformno tokom intervala  $t_s < t < t_n = t_s + \Delta$  diferencijalna jednačina (4) će imati oblik :

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\frac{N(t)}{\tau} + \lambda \quad (9)$$

a njeno rešenje uz poštovanje graničnog uslova  $N(t_n) = 0$ , biće

$$\lambda = \frac{N_s}{\tau} \frac{1}{1 - e^{-\Delta/\tau}} \quad (10)$$

dok je odnos obilnosti uraniјuma opisan izrazom:

$$\frac{\lambda_{235}}{\lambda_{238}} = \frac{U_{235}}{U_{238}}(t_s) \times \frac{\tau_{238}}{\tau_{235}} \times \frac{(1 - e^{\Delta/\tau_{238}})}{(1 - e^{\Delta/\tau_{235}})} \quad (11)$$

Izračunati odnos U-235/U-238 prikazan je istačkanom linijom na sl. 6. Pošto se stvaranje kao i raspad elemenata koji služe kao hronometri događaju tokom čitavog perioda galaktičke nukleosinteze, odnosi njihovih obilnosti više nisu prikazani pravim linijama. Kriva preseca prvobitni odnos obilnosti u vreme  $t_n = (10.4 - 11.8)$  mlrd. godina (crni kvadaratić na sl.6). Na osnovu ovog modela, nazvanog UNIFORMNA SINTEZA, dobijeno je da je r-proces započeo pre 10-12 milijardi godina.

### 3.4 TRAGANJE ZA REALISTIČNIM MODELOM

Pošto su iznenadna i uniformna sinteza ekstremni modeli, može se očekivati da bi primenom nekog realističnijeg modela dobili starost koja je negde između gore navedenih vrednosti. To bi baš mogla biti starost solarnog r-procesa, izmedju 6 i 12 milijardi godina.

Dodatne informacije mogu se dobiti iz drugog dugoživećeg hronometarskog para, Th-232/U-238. Ponovo, na početku datiranja, nužno je imati kao ulazne parametre njihove sadašnje odnose obilnosti određene eksperimentalno iz uzorka dobijenog iz meteorita ( $\text{Th-232}/\text{U-238} = 4.0 \pm 0.2$ ) kao i računske vrednosti odnosa obilnosti za primarni r-proces ( $\lambda_{232}/\lambda_{238} = 1.39 - 1.80$ ) [7].

Zahvaljući dužem životu Th-232 u odnosu na U-238, odnos obilnosti u vreme zatvaranja solarne magline pada na vrednost  $(\text{Th-232}/\text{U-238})_S = 2.50$ . Ovaj odnos nastavlja da opada i posle vremena  $t_S$ , a nagib te krive zavisi od tipa izabranog modela: iznenadne ili uniformne sinteze. Preseci ovih krivih sa linijom prvobitnog odnosa obilnosti (istačkani kvadratič na sl. 7.) daju nam za vreme početka nukleosinteze vrednost  $t_H = 7.5 - 9.7$  mlrd. godina za iznenadnu sintezu i  $t_H \geq 10.9$  milijardi godina za uniformnu sintezu.

Budući da su jezgra oba hronometarska para nastala u istom procesu, trebalo da se dobiju saglasni rezultati. (Ovo se proširuje i na sve ostale hronometre).

Jasno, model iznenadne sinteze ne obezbeđuje usklađene vrednosti za dva hronometarska para, dok se rezultat dobijen na osnovu modela uniformne sinteze poklapa samo za vreme  $t_H = 11 - 12$  milijardi godina. Očekuje se, stoga, od oba hronometarska para da za neki realističan model daju zadovoljavajuće usaglašen rezultat u oblasti izmedju  $t_H = 7 - 12$  milijardi godina. U svakom slučaju, jasno je da su zvezdana aktivnost i nukleosinteza postojali u našoj Galaksiji mnogo pre nastanka Sunčevog sistema.

Poznato je da Sunčev sistem nema centralno mesto u svemiru, a vidimo da nije ni jedinstven u vremenu. Takođe može se ozbiljno verovati da su rane zvezde imale dovoljno vremena da evoluiraju i proizvedu teške elemente prisutne pre kondenzacije našeg Sunčevog sistema.

Tako su prirodno radioaktivna jezgra najdirektnija evidencija o postojanju nukleosinteze, baš kao što je postojanje interstelarnog gasa i prašine najubedljivije ukazivalo na mogućnost da to dvoje na neki način kolabiraju u zvezdu.

Primordialna materija (uglavnom H i He) kondenzovala se u galaksije, a unutar svake galaksije poput našeg Mlečnog puta, formirale su se zvezde u vreme  $t_g$ .(slika 6.). Posle relativno kratkog vremena zvezdane evolucije, unutrašnjosti zvezda su bile dovoljno vrele da bi započela nukleosinteza

hemijskih elemenata, uključujući i jezgra nastala r-procesom poput onih za koje smo rekli da služe kao eonski časovnici - Th i U. Zvezde sijaju tokom intervala vremena čija je dužina određena prevashodno njihovom masom i na kraju ili izgore ili eksplodiraju kao supernove. Najteže zvezde daju najveće koncentracije gasa i prašine. Pošto od "izgorele zvezde" obično ostaje količina usijanog sjajećeg zvezdanog pepela (oko  $1.5 M$  sunca) posle eksplozije, količina gasa i prašine koji će biti na raspolaganju za formiranje neke nove zvezde biće progresivno manja u poređenju sa onim što je bilo na raspolaganju zvezdama koje su se formirale ranije. Znači, uslovi za eksplozije supernova a time i uslovi za r-nukleosintezu (veliki neutronski fluksevi) bili su bolji što je prošlost dalja.

Formiranje zvezda u galaksiji proporcionalno je količini interstelarnog gase [12] gde je pokazano da je vremenska varijacija mase interstelarnog gase eksponencijalna ako se zanemari gas koji zvezde tokom evolucije vraća u interstelarni prostor. Međutim, kada je i to uzeto u proračun, ponovo je dobijena grubo eksponencijalna vremenska varijacija tokom ranog stadijuma, dok totalna masa gase nije opala na 10% od njene početne vrednosti. Stoga za realističniji galaktički model sledi da se, pošto su i nastanak zvezda i njihova evolucija opadali eksponencijalno, i galaktička nukleosinteza eksponencijalno menjala sa vremenom, što je prikazano na slici 5.

Znači, zvezdana nukleosinteza je započela u nekom trenutku  $t_N$  koji je svakako došao posle formiranja Galaksije i zvezda u njoj, a potom je opadala eksponencijalno sa vremenskom konstantom  $T_r$  ( karakteristično vreme r-nukleosinteze). Teški elementi uključujući i naše eonske hronometre nastale u r-procesu, nastajali su u supernovama i mešani u interstelarni materijal. Uključivanje ovoga materijala u Sunčev sistem prestalo je kontrakcijom solarnog materijala u trenutku  $t_S$ . Odavde zaključujemo da se sinteza materijala od kojeg je sačinjen Sunčev sistem dogodila u okviru intervala vremena  $\Delta = t_N - t_S$  (sl 6.) tj. između početka prve nukleosinteze i kondenzacije sunčevog sistema.

Mada je najveći deo materijala od kojeg se sastoji Sunčev sistem rezultat pomenutog opštег procesa nastanka teških elemenata u svemiru, posmatranje malih izotopskih anomalija (5% i manje) uzrokovanih istrošenim radioaktivnim precima pokazalo je da Sunčev sistem ima takođe i jedinstvenu sopstvenu istoriju.

### 3.5 MODEL EKSPONENCIJALNE SINTEZE

Ako funkcija  $f$  koja opisuje galaktičku nukleosintezu u jednačini (1) opada eksponencijalno sa vremenom, onda je diferencijalna jednačina koja je opštija data ovako:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\frac{N(t)}{\tau} + \lambda e^{\frac{t-t_n}{T_r}} \quad (12)$$

za granični uslov da je broj jezgara u trenutku  $t_n$   $N(t_n)=0$ , analitičko rešenje je:

$$\lambda = N_s \frac{T_r - \tau}{T_r \tau (e^{-\frac{\Delta}{T_r}} - e^{-\frac{\Delta}{\tau}})} \quad (13)$$

i ono može biti upotrebljeno za izračunavanje odnosa obilnosti kao funkcije parametara  $\Delta$  i  $T_r$ . Za granične vrednosti kada  $T_r \rightarrow 0$  i  $T_r \rightarrow \infty$ , model se svodi na jedan od ekstremnih modela, iznenadni, odnosno uniformni.

U ovom modelu eksponencijalne sinteze sa dva slobodna parametra za rešenje su potrebna najmanje dva hronometarska para. (a često i modifikacija gornje jednačine kada dolazi do gubitka materije iz interstelarnog gasa u bele patuljke, neutronske zvezde ili crne rupe. )

### 3.6 OSTALI MODELI GALAKTIČKE NUKLEOSINTEZE

Aktuelno opisivanje galaktičke nukleosinteze može se predstaviti različitim kombinacijama iznenadnog, uniformnog i eksponencijalnog modela. U Fowlerovom modelu (1977), superpozicija eksponencijalne i iznenadne sinteze je ispitivana sa četiri slobodna parametra:

$T_r$  - karakteristično vreme trajanja r-procesne nukleosinteze,  $\Delta = t_n - t_s$  vremenski interval od početka nukleosinteze do zatvaranja sunčevog sistema,  $S$  - korekcija na doprinos eksplozije supernove prilikom zatvaranja sunčevog sistema i  $\delta$  koje predstavlja vreme između kraja galaktičke nukleosinteze za materijal od koga je nastao Sunčev sistem i časa kada su tela od kojih su nastali meteoriti postali zatvoren sistem.

Korišćenjem četiri hronometarska para U-235/U-238, Th-232/U-238, U-234/U-238 i I-129/I-127, saglasni rezultati su postignuti za približne vrednosti slobodnih parametara:

$$\begin{aligned} T_r &= 8.9 \text{ mldr. godina}, \\ \Delta &= 6.0 \text{ mldr. godina} \\ S &= 2.7\% \\ \delta &= 0.16 \text{ mldr. godina} \end{aligned}$$

Po ovom modelu starost elemenata nastalih r-procesom ( $t_n = 4.0$  mldr. god. +  $\delta+\Delta$ ) i na taj način starost svih hemijskih elemenata u našoj galaksiji iznosi oko 11 miliona godina. To je donja granica za starost same Galaksije [7].

U cilju poboljšanja nukleokosmohronoloških rezultata dobijenih korišćenjem hronometarskih jezgara iz porodice aktinida, bitno je na minimum svesti sve nepreciznosti u odnosima obilnosti dobijenih iz meteorita kao i onih koje smo dobili računskim putem. Na te odnose aktinidskih hronometara utiče i sama fizika r-procesa preko karakteristika nuklearne mase, visine fisione barijere itd., i ako se sve to uzme u obzir, dobili bismo komplikovaniji računski problem zbog mnogo više slobodnih parametara, ali i bolje rezultate.

Eksperimentalne vrednosti odnosa obilnosti važnijih hronometarskih parova dobijene su iz meteorita i navedene u tabeli 2.

hronometarski par	odnos obilnosti	referenca
Th-232/U-238	2.50±2	Symbalisty & Schramm (1981)
	2.32	Anders & Ebihara (1982)
U-235/U-238	0. 313±0. 026	Symbalisty & Schramm (1981)
		Begemann (1980)
Pu-244/U-238	0. 005±0. 001	Marti et al. (1977)
		Hudson et al. (1982)
I-129/I-127	0. 00008...0. 00023	Jordan et al. (1980)

Tabela 2.

Važniji rezultati u čijoj su proceduri dobijanja uzeti u obzir efekti beta zakasnele fisije i beta zakasnele neutronske emisije prikazani su u tabeli 3.

Th-232/U-238	U-235/U-238	Pu-244/U-238	referenca
1. 65	1. 65		Fowler&Hoyle(1960)
1. 90	1. 89	0. 96	Seeger&Schramm(1970)
1. 65	1. 42	0. 90	Fowler(1978)
1. 70	0. 89	0. 53	Wene&Johannson(1976)
1. 50	1. 10	0. 40	Krumlinde et al.(1981)
1. 90±0. 3	1. 50±0. 55	0. 9±0. 15	Symbalisty&Schramm(1981)
1. 39	1. 24	0. 12	Thielemann et al.(1983)

Tabela 3.

### 3.7 VAŽNIJI REZULTATI I POREĐENJE SA DRUGIM METODAMA

U ovom radu akcenat je stavljen na eonske časovnike iz porodice aktinida nastale r-procesom. To je učinjeno zbog pogodnosti koje proističu iz njihovog dugog perioda poluraspada. Međutim, osim sa ovim hronometrima pokušalo se doći do rezultata i sa nekim drugim, poput kratkoživećih parova Al-26/Al-27, Pd-107/Pd-110 i Pb-205/Tl-205. Njihovom upotreboru došlo se do "finijih" saznanja o ubrizgavanju jezgara sa A<110 u maglinu sunčevog sistema tih pre njegove kondenzacije. Time su dobijeni dragoceni podaci o nastanku Sunčevog sistema.

Osim ovoga, značajna merenja su vršena i sa parom Re-187/Os-187 koji takođe spada u r-procesne hronometre. Zbog izvanredno dugog perioda poluraspada, Re-187 se smatra jednim od najboljih izvora informacije o dužini trajanja r-procesne nukleosinteze i vremenu njenog početka.

Važno je spomenuti, iako to ovde nije obrađeno, da postoje i hronometri za s-proces. Među njima se kao najpogodniji izdvaja hronometarski par Lu-176/Hf-176 koji može da obezbedi saznanje o dužini trajanja s-procesa u našoj galaksiji.

Svi ovi kosmohronometri, a posebno dugoživeći radiogeni parovi Re-187/Os-187 i Lu-176/Hf-176 skopčani su sa problemima koji proizlaze iz nepoznavanja nekih njihovih nuklearno fizičkih parametara : presek za neutronski zahvat za osnovna i termalno naseljena pobuđena stanja, zavisnost poluperioda raspada od temperature i gustine zvezdanog okruženja, galaktičke gustine i, konačno, preciznosti merenja poluperioda raspada na Zemlji.

Kosmohronološki rezultati, kao uostalom i svi drugi rezultati u fizici, podložni su revizijama i proverama. Razvojem teorije i eksperimentalne tehnike dobijaće se sve bolji i pouzdaniji podaci iz oblasti datiranja.

Osim nukleokosmohronološkim postupkom, starost svemira i Galaksije je moguće odrediti i drugim metodama među kojima su najvažnije:

- a) određivanje starosti najstarijih zvezda u globularnim jatima
- b) ekstrapolacija vremena *big-bang-a* iz Hubble-ove konstante

Rezultati datiranja svemira dobijeni primenom različitih metoda mogu biti uporedjeni u tabeli 4 [1].

METODA	AUTORI	VREME NUKLEOSINTEZE [milijarde godina]	STAROST SVEMIRA [milijarde godina]
aktinidski hronometri	Fowler (1972)	6. 9±2	12. 6±2
	Fowler (1978)	6. 1±2. 3	11. 8±2.
	Fowler & Meisl (1985)		
Re/Os hronometri	Thielemann, Metzinger & Klapdor	14. 6±3. 5	20. 3±3. 5
	Winters et al. (1980)	10. 4	16. 1
Lu/Hf hronometri	Winters & Macklin(1982)	8. 9	14. 6
	Beer & Klapdor (1980)	9. 5	15. 25
globularna jata	Iben(1968., 1974)	/	14 ±3
	Sandage (1982)	/	18 ±2
	Nissen (1982)	/	16 - 25
	Tammann (1986)	/	18±3
Hubble-ovo vreme	Buonanno, Corsi Fusi Pecci(1989)	/	19±3
	Sandage & Cacciari (1990)	/	oko 18±?
Hubble-ovo vreme	Sandage & Tammann (1990)	/	19. 5±3

Tabela 4.

#### 4. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE ODNOSA OBILNOSTI

Za određivanje koncentracije urana ili torijuma, mogu se koristiti dve klase laboratorijskih metoda analize:

- klasična hemijska analiza
- analiza zasnovana na merenju zračenja

U ovom radu primenjena je druga klasa, koja se može razdeliti po kriterijumu tipa zračenja na: alfa, beta i gama metode.

#### 4.1 PRINCIP DETEKCIJE I SPEKTROSKOPIJE GAMA ZRAČENJA

Detekcija gama fotona zasniva se na analizi energetskog spektra elektrona nastalih u procesu interakcije gama zraka sa materijalom kroz koji prolaze, dakle u procesu fotoefekta, Comptonovog efekta i stvaranja para elektron-pozitron. Slobodni elektroni nastali u ovim efektima mogu da vrše jonizaciju i ekscitaciju atoma pogodne sredine-detektora, te se na osnovu toga vrši detekcija i određivanje energije upadnih fotona.

Za detekciju gama zračenja najpogodniji su poluprovodnički detektori u kojima dobijeni elektroni troše svoju energiju na stvaranje parova elektron šupljina u osetljivoj zapremini detektora. Tako formirani slobodni nosioci nanelektrisanja skupljaju se elektrostatičkim poljem a odgovarajući električni impuls registruje se radiotehničkom aparaturoom. Spektroskopija gama zračenja omogućena je pojavom da je visina tog impulsa srazmerna broju slobodnih nosilaca nanelektrisanja, a ovaj opet srazmeran energiji gama fotona.

## 5. MERENJA I REZULTATI

### 5.1 ODREĐIVANJE ODNOSA OBILNOSTI METODOM GAMA SPEKTROSKOPIJE

U prethodnim poglavljima ovog rada je pokazano kako se na osnovu poznavanja odnosa obilnosti U-235/U-238 i Th-232/U-238 i njihovog uvršćavanja u teorijske modele nukleosinteze može dobiti procena starosti starosti hemijskih elemenata.

Hronometarski par U-235/U-238 , tj odnos obilnosti ova dva izotopa može biti dosta dobro odredjen iz uzorka sa naše planete. Hronometarski par Th-232/U-238 zahteva uzorak koji je meteoritskog porekla pa stoga merenja za ovaj hronometarski par u ovom radu nisu vršena ,već je vrednost preuzeta iz relevantnih merenja vršenih u svetu.

Uzorak koji je podvrgnut spektroskopiji radi utvrđivanja odnosa obilnosti dva uranijumova izotopa , U-235 i U-238 , zapravo je uzorak zemljišta iz Kalne. Nakon uobičajene pripremne procedure , snimljen je gama spektar u energetskom opsegu od 40 keV do 1800 keV i potom su dobijeni rezultati merenja obrađeni pomoću kompjuterskog programa SAMPO. Iz mnoštva snimljenih linija izdvojene su one koje potiču od uranijuma.

Njihovom obradom pomoću pomenutog programa dobijen je detektovani odnos aktivnosti za ova dva uranijumova izotopa  $A_{235}/A_{238} = 0.0036(16)$

Aktivnost A nekog nuklida data je proizvodom broja jezgara N i konstante radioaktivnog raspada  $\lambda$  :

$$A = \lambda N \quad (14)$$

Pošto je odnos aktivnosti veličina koju smo dobili merenjem i koja nam je poznata, napisaćemo izraze za aktivnost U-235 i U-238

$$\begin{aligned} A_{235} &= \lambda_{235} N_{235} \\ A_{238} &= \lambda_{238} N_{238} \end{aligned} \quad (15)$$

Ako ova dva izraza podelimo , lako se uočava da je traženi odnos obilnosti za dva uranijuma izotopa :

$$U-235/U-238 = N_{235}/N_{238} = (\lambda_{238} A_{235}) / (\lambda_{235} A_{238}) \quad (16)$$

Pošto je  $\lambda = 1/T$  gde je T period poluraspađa za dato jezgro, onda izraz za odnos obilnosti može biti napisan ovako:

$$U-235/U-238 = (T_{235} A_{235}) / (T_{238} A_{238})$$

(17)

Kako su izmereni odnos aktivnosti  $A_{235}/A_{238} = 0.036 <16>$  periodi poluraspada za uranijumove izotope  $T_{235}=0.7037 <11>^*$  i  $T_{238}=4.468 <5>$  milijardi godina za vrednost odnosa obilnosti se dobija posle unošenja ovih podataka u prethodni izraz  $U-235/U-238=0.00567$

Iz ulaznih podataka je jasno da će interval eksperimentalne greške za ova rezultat biti prilično velik pošto je odnos aktivnosti koji u izrazu figuriše izmeren sa greškom od 44%. To se zbog performansi mernog uredjaja za snimanje gama spektra koji mi je za ovo merenje bio dostupan nije moglo uraditi tačnije.

Moduo srednje kvadratne greške za odnos obilnosti  $U-235/U-238$  iznosi  $|\delta|=0.0025$

## 5.2 ODREĐIVANJE POČETKA NUKLEOSINTEZE I STAROSTI SVEMIRA

Kako se u prethodnim poglavljima( v. slika 5) moglo videti , u nukleokosmohronologiji ima nekoliko privilegovanih tačaka na vremenskoj osi. To su one tačke koje korespondiraju značajnim dogadjajima u istoriji svemira.Krenemo li unazad računajući sadašnjost za polaznu tačku ,onda se mogu uočiti sledeći važni događaji koji su izdelili istoriju svemira na etape:

- $t_m$  - vreme formiranja meteorita
- $t_s$  - vreme kondenzacije(zatvaranja) sunčevog sistema
- $t_n$  - vreme početka nukleosinteze
- $t_g$  - vreme formiranja zvezda u Galaksiji
- $t_u$  - big-bang

Na osnovu odnosa obilnosti  $U-235/U-238$  izmerenog danas bilo je moguće izračunuti koliki je taj odnos bio u vreme kada je Sunčev sistem postao zatvoren , tj. do trenutka završetka nukleosinteze,pošto se od tada do danas taj odnos umanjivao samo zahvaljujući običnom radioaktivnom raspodu .

Za vrednost odnosa obilnosti u vreme kondenzacije Sunčevog sistema na osnovu merenja izvedenog u ovom diplomskom radu dobijena je vrednost  $U-235/U-238(t_s)=0.2579$ .

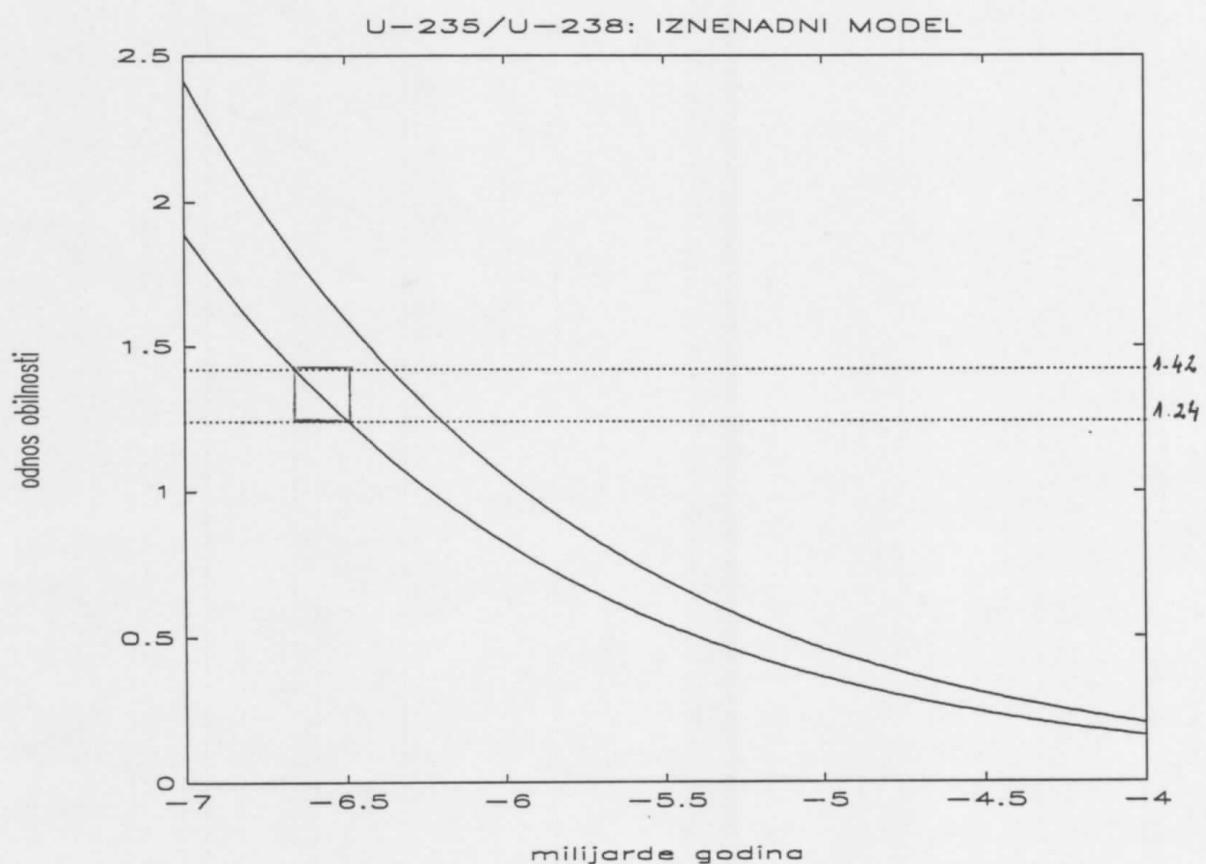
---

\* U srednjim zagradama data je vrednost greške merenja

### 5.3 VREME POČETKA NUKLEOSINTEZE I STAROST SVEMIRA NA OSNOVU IZNENADNOG MODELA

Iz teorije r-procesa je poznato da je prvočitni odnos konstanti stvaranja za hronometarski par U-235/U-238 na samom početku nukleosinteze bio  $\lambda_{235}/\lambda_{238}=1.24 - 1.42$  [7].

Vrednost odnosa obilnosti u vreme zatvaranja Sunčevog sistema uvrštena je u izraz za uniformnu sintezu i dobijena je zavisnost koja je grafički prikazana na slici 8.

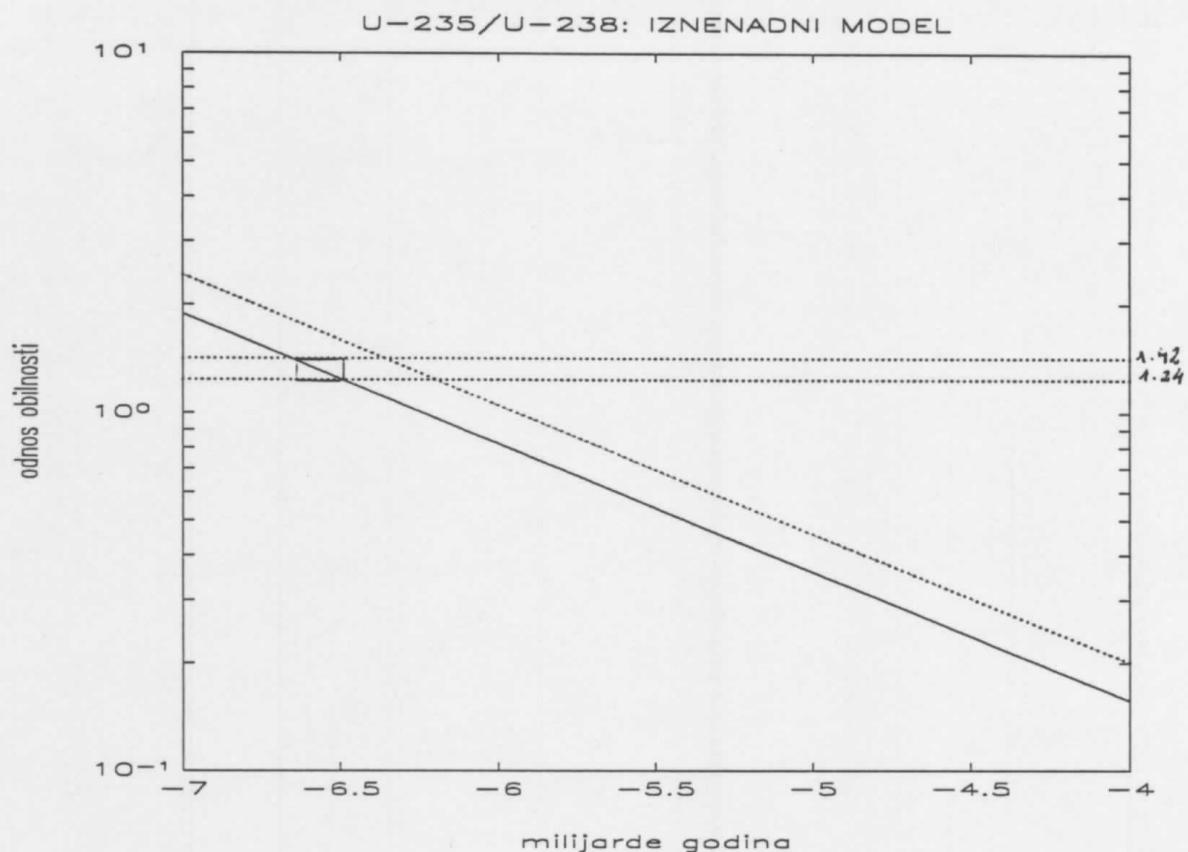


Slika 8. Vremenska zavisnost odnosa obilnosti U-235/U-238 po modelu iznenadne sinteze

Na slici je lako uočiti da je odnos obilnosti U-235/U-238 bio u intervalu 1.24 - 1.42 pre 6.4920 - 6.6553 milijardi godina \*. To je oblast koju je na grafiku označena pravougaonikom čije bočne strane odgovaraju intervalu odnosa

\* Donja kriva predstavlja zavisnost odnosa obilnosti dobijenu u ovom radu, a gornja kriva predstavlja zavisnost za odnos obilnosti koji je dobio W. Fowler.

obilnosti, a baza intervalu vremena u kojem se prema ovom modelu dogodio početak nukleosinteze. Ista zavisnost prikazana je još jednom, ovog puta u semilogaritamskoj razmeri na slici broj 8.



Slika 9. Vremenska zavisnost odnosa obilnosti U-235/U-238 po modelu iznenadne sinteze u semilogaritamskoj razmeri

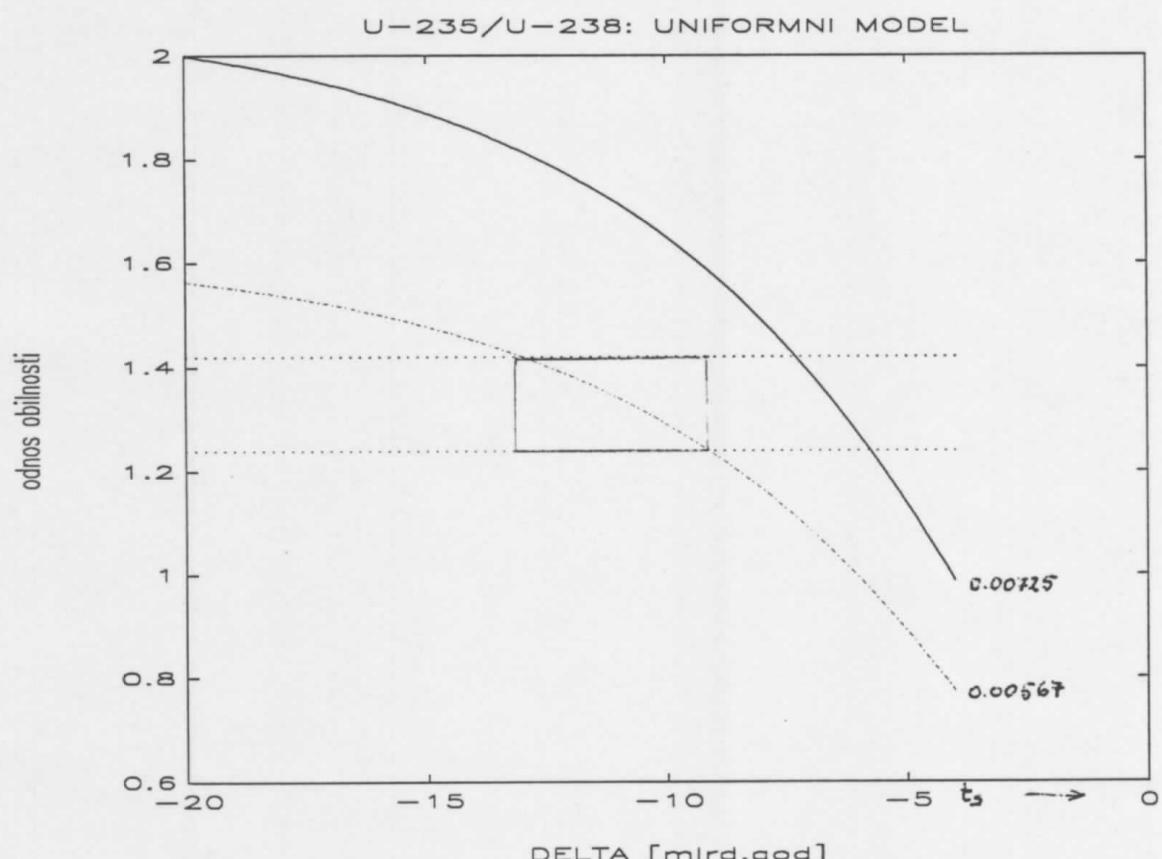
Dakle, po modelu iznenadne nukleosinteze (8) dobijeno je da je stvaranje elemenata počelo u intervalu vremena  $t_n=6.4920 - 6.6553$  milijardi godina. Ovaj rezultat je dobijen sa greškom (+0.4401, -0.7007 milijardi godina)

Smatra se da je od big-bang-a  $t_U$  do formiranjia Galaksije  $t_g$  proteklo oko milijardu godina, i još do starta r-procesa  $t_n$  oko 0.1 milijarde godina. Stoga se starost svemira vrlo grubo može dobiti ako se na vreme početka nukleosinteze doda 1.1 milijarda godina.

Na osnovu ovog modela, iznenadne sinteze,  $t_U=1.1 + t_n=7.59 - 7.75$  milijardi godina i to je procena starosti svemira.

#### 5.4 VРЕМЕ ПОЧЕТКА НУКЛЕОСИНТЕЗЕ И ПРОЦЕНА СТАРОСТИ СВЕМИРА ПО МОДЕЛУ УНИФОРМНЕ СИНТЕЗЕ

Kada se vrednost odnosa obilnosti u vreme zatvaranja Sunčevog stema uvrsti u uniformni model (jed. 11), dobije se zavisnost odnosa obilnosti od vremena  $\Delta$  koje predstavlja interval od početka nukleosinteze pa do kondenzacije Sunčevog sistema:  $\Delta = t_{\eta} - t_s$ . Znak minus pored brojeva ispod apscise stoji samo da bi bilo naglašeno da se radi o događajima koji su se dogodili u prošlosti. Za izmereni odnos obilnosti  $U-235/U-238(t_s) = 0.2579$  dobio sam da je nukleosinteza trajala  $\Delta = 9.1235 - 13.0130$  milijardi godina. Ovo je prikazano na sledećoj slici:



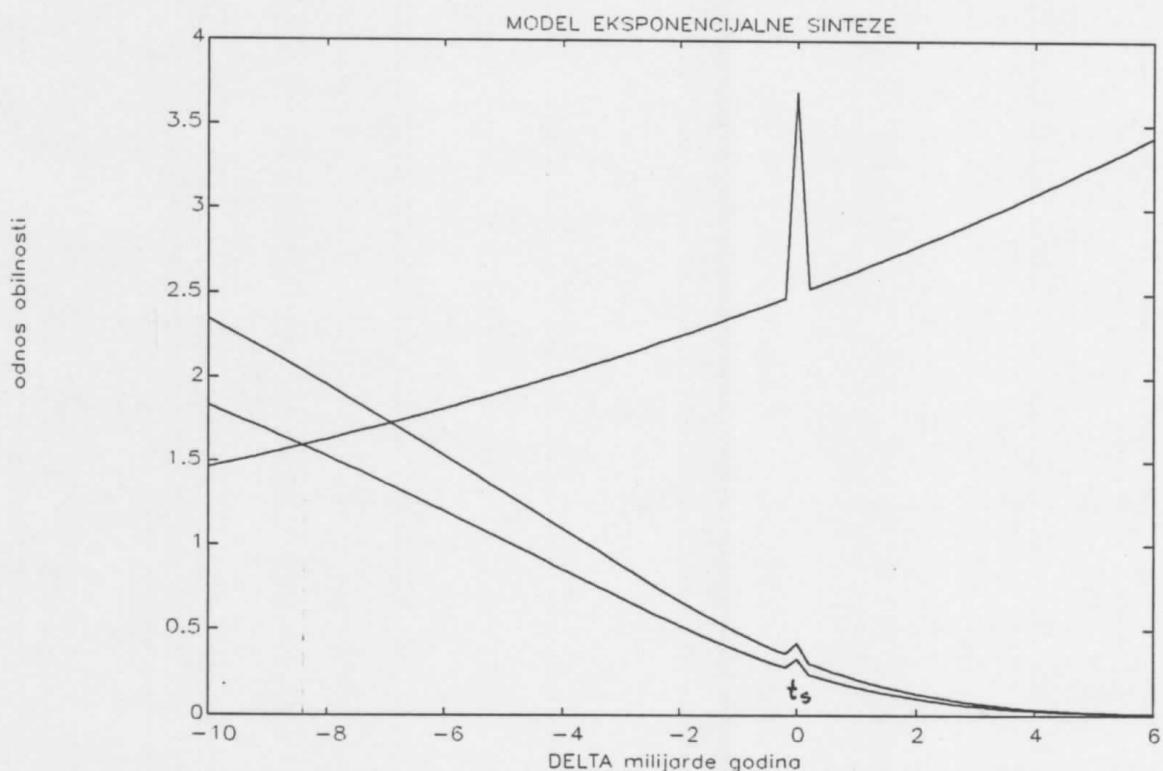
Slika 10. Vremenska zavisnost odnosa obilnosti U-235/U-238 po modelu uniformne sinteze

Isprekidanom linijom prikazana je kriva dobijena na osnovu rezultata u ovom radu, dok je gornja, koja je iscrtana punom linijom, dobijena na osnovu najčešće navođenih podataka u literaturi.

Za vreme početka nukleosinteze se na osnovu ovog rezultata dobija  $t_n = t_s + \Delta = 13.7 - 17.6$  milijardi godina. Nije zgoreg još jednom navesti da je  $t_s = 4.6$  milijardi godina. Za starost svemira se prema ovom modelu dobija  $t_u = 14.8 - 18.7$  milijardi godina.

### 5.5 ODREĐIVANJE POČETKA NUKLEOSINTEZE I STAROSTI SVEMIRA PREMA EKSPONENCIJALNOM MODELU

Za eksponencijalni model nukleosinteze potrebna su najmanje dva hronometarska para. Pošto u ovom radu nisam eksperimentalno utvrdjivao odnos Th-232/U-238 (potreban je meteorit) taj podatak sam uzeo iz [10] : Th-232/U-238=2.50 u vreme zatvaranja Sunčevog sistema  $t_s$ , a odnos U-235/U-238 =0.2579 za trenutak  $t_s$  sam dobio na osnovu odnosa koji sam izmerio danas. Vremenska zavisnost ovih odnosa obilnosti na osnovu jednačine (13) prikazana je na sledećoj slici



Slika 11. Vremenska zavisnost odnosa obilnosti za hronometarske parove U-235/U-238 i Th-232/U-238 po modelu eksponencijalne sinteze

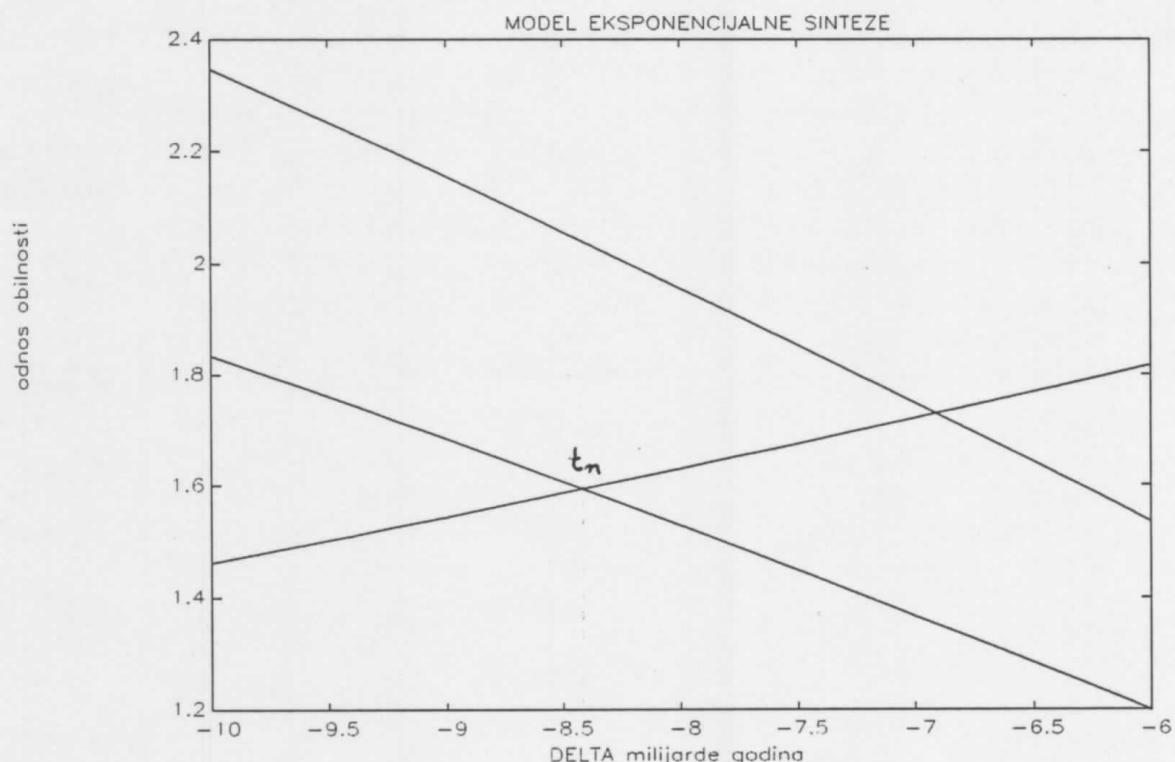
Donja kriva opisuje vremensku zavisnost odnosa obilnosti za hronometarski par U-235/U-238 za izmerene rezultate, srednja za podatke iz literature [7] dok gornja prikazuje tu zavisnost za par Th-232/U-238. Tačka

preseka ove dve krive upravo odgovara početku r-procesne nukleosinteze  $t_n$ . Kriva koja je prikazana istačkanom linijom nacrtana je na osnovu ulaznih podataka iz [7] ( $U-235/U-238=0.33$  za  $t_S$ ) i uneta je zbog upoređenja.

Vrednost 0 na apscisi odgovara trenutku  $t_S$ . Desno od nje su pozitivne vrednosti koje se odnose na period posle kondenzacije sunčevog sistema,dok negativne vrednosti odgovaraju intervalu trajanja nukleosinteze  $\Delta$ .

Na grafiku se primećuje nagli skok i pad odnosa obilnosti oko vrednosti  $t_S$ . Ovo je poremećaj za koji se pretpostavlja da ga je u vreme kondenzacije sunčevog sistema unela eksplozija obližnje supernove.

Na slici koja sledi,prikazane su iste ove zavisnosti u pogodnijoj razmeri kako bi trenutak preseka krivih bilo što lakše uočiti.



Slika 12. Vremenska zavisnost odnosa obilnosti za hronometarske parove U-235/U-238 i Th-232/U-238 po modelu eksponencijalne sinteze

Kako se sa slike 12. može videti, krive odnosa obilnosti su se presekle 8.4159 milijardi godina pre zatvaranja sunčevog sistema. Dakle,  $\Delta=8.4159$  milijardi godina.Lako je izračunati da je prema ovom, eksponencijalnom, modelu nukleosinteza počela pre  $t_n=\Delta + t_S=13.0159$  milijardi godina, dok se za starost svemira dobija vrednost  $t_U=14.1159$  milijardi godina.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu je određivana starost širećeg svemira pomoću teorijskih modela galaktičke nukleosinteze i eksperimentalno određenog odnosa obilnosti U-235/U-238. Taj odnos obilnosti odredili smo metodom gama spektrometrije. Cilj nam je bio da utvrdimo šta se, i koliko dobro, može uraditi na polju radioaktivnog datiranja u našim uslovima primenom metode gama spektrometrije.

Za odnos obilnosti U-235/U-238 dobili smo vrednost 0.00567 sa greškom čiji je moduo 0.0025. Nakon uvrštavanja ovog podatka u izraze za iznenadni, uniformni i eksponencijalni model galaktičke nukleosinteze, za starost svemira smo dobili respektivno 7.59 - 7.75 milijardi godina, 14.8 - 18.7 milijardi godina i 14.12 milijardi godina.

Upoređenje ovih rezultata sa rezulatima koji su za ove modele dobijeni u svetu i najčešće navođeni u literaturi ( $U-235/U-238=0.00725$ , 7.3 milijardi godina, 11.3 - 13.3 milijardi godina i 12.6 milijardi godina) sugerise zaključak da su naši rezultati određivanja starosti svemira dali veće vrednosti. Uzrok ovom prebačaju leži u grešci koja je dobijena prilikom određivanja odnosa obilnosti U-235/U-238 gama spektrometrijom. Ta greška zbog karakteristika primenjene merne tehnike nije mogla da bude manja. Međutim, primena neke druge metode za određivanje odnosa obilnosti (npr. metoda zasnovanih na fluoru <sup>OMETRIJI</sup> ...) mogla bi dati rezultat sa manjom eksperimentalnom greškom.

Možemo na kraju, na osnovu svega što je u ovom radu učinjeno, zaključiti da je određivanje starosti svemira pomoću aktinidskih hronometara moguće uraditi u našim uslovima i da je greška određivanja odnosa obilnosti gama spektrometrijom otklonjiva ili ju je bar moguće znatno umanjiti primenom neke druge metode određivanja odnosa obilnosti uranijumovih izotopa.

## 7. LITERATURA

- 1) Grotz K. & Klapdor H.V., THE WEAK INTERACTION IN NUCLEAR, PARTICLE AND ASTROPHYSICS, Max-Planck Institut fuer Kernphysik, Heilderberg ,1990.
- 2) Fowler W.A. , REVIEWS OF MODERN PHYSICS, vol. 56,number 2, part 1, The American Physical Society,1984.
- 3) Valković Vlado, SPEKTROSKOPIJA KARAKTERISTIČNIH X-ZRAKA, Školska knjiga, Zagreb, 1980.
- 4) Marinkov Lazar, OSNOVI NUKLEARNE FIZIKE, Univerzitet u Novom Sadu,1976.
- 5) Haissinsky M. , NUKLEARNA HEMIJA I NJENE PRIMENE,Naučna knjiga , Beograd 1962.
- 6) Novak Gordana, magistarski rad: ODREĐIVANJE URANIJUMA I TORIJUMA U UZORCIMA IZ PRIRODE, Univerzitet u Novom Sadu, Institut za fiziku, Laboratorija za nuklearnu fiziku, 1993.
- 7) Fowler W.A. , PROC. WELCH FOUNDATION CONFERENCE ON CHEMICAL RESEARCH, Houston University Press,1977.
- 8) Thielemann F.K. , ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS No.123, 1983.
- 9) Burbidge E.,Burbidge G,Fowler W.& Hoyle F., REVIEW OF MODERN PHYSICS, No.29, 1957.
- 10)Anders E. & Ebihara M. , GEOCHIMICA ET COSMOCHIMICA ACTA,1982.
- 11) Schramm D. N., ASTROPHYSICS JOURNAL No. 57, 1970.
- 12) Salpeter, E. E., ASTROPHYSICS JOURNAL No. 129, 1959.

UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj :

RBR

Identifikacioni broj :

IBR

Tip dokumentacije : Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa : Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada : Diplomski rad

VR

Autor : Vladimir Pavlov

AU

Mentor : Docent dr Miroslav Vesković

MN

Naslov rada : Određivanje starosti svemira na osnovu radioaktivnog datiranja

NR

Jezik publikacije : srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda : srpski

JI

Zemlja publikovanja : SR Jugoslavija

ZP

Uže geografsko područje : Vojvodina

UGP

Godina : 1994

GO

Izdavač : Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa : Novi Sad, Visarionova 7

MA

Fizički opis rada :

(Broj poglavlja/broj strana/Lit.citata/Tabela/Slika/Grafika/Priloga)

FO

Naučna oblast : Fizika

NO

Naučna disciplina : Nuklearna fizika/Nuklearna astrofizika

ND

Predmetna odrednica/Ključne reči : Kosmohronologija/starost svemira, odnos obilnosti, hronometarski parovi, nukleosinteza, eksponencijalni model

PO

UDK :

Čuva se:

ČU

Važna napomena : Nema

VN

Izvod : Određivanje starosti svemira izvršeno je na osnovu kosmohronoloških modela za r-procesnu nukleosintezu .Gama spektrometrijom uzorka zemljišta iz Kalne (Srbija) odredjen je odnos obilnosti hronometarskog para U-235/U-238 .Dobijeno je da je r-procesna nukleosinteza počela pre 8.4 milijardi godina.Svemir je star 14.1 milijardi godina.

IZ

Datum prihvatanja teme od strane NN veća : 10.02.1994.

DP

Datum odbrane : 06.04.1994.

DO

Članovi komisije :

(Naučni stepen/Ime i prezime/zvanje/fakultet)

KO

Predsednik : dr/Ištvan Bikit/redovni profesor/PMF

Član : dr/Miroslav Vesković/docent/PMF

Član : dr/Jaroslav Slivka/docent/PMF