Sinteza elemenata u nastavi fizike

Marijačić, Dominik

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:626822

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

zir.nsk.hr

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Dominik Marijačić

SINTEZA ELEMENATA U NASTAVI FIZIKE

Diplomski rad

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

SMJER: NASTAVNIČKI SMJER FIZIKE I INFORMATIKE

Dominik Marijačić

Diplomski rad

Sinteza elemenata u nastavi fizike

Voditelj diplomskog rada: dr. sc. Matko Milin

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2018.

Sažetak

Ovaj diplomski rad će pokušati odgovoriti na bitna pitanja poput: Kako su elementi nastali? Zašto su neki elementi više puta zastupljeniji od drugih?

Pri tome će se opisivati mehanizmi stvaranja elemenata, kako tijekom početka evolucije Svemira, tako i tijekom kasnijih perioda pa sve do danas. U radu će biti predstavljeni neki od najbitnijih procesa i reakcija odgovornih za današnji sastav tvari i elemenata. Opisivat će se više različitih mehanizama odgovornih za sintezu nekih od elemenata. Pokušat će se objasniti procesi u zvijezdama na način da to razumiju ne samo znanstvenici i fizičari, nego i srednjoškolci. Diplomski rad će pokušati sažeto objasniti nastanak svakog od bitnih elemenata, kako onih lakših, tako i onih težih.

Konačno, analizirat će se gradivo nuklearne fizike u srednjoj školi preko udžbenika i uspoređivati sa obrazovnim ishodima iz kurikuluma za fiziku u srednjoj školi. Na kraju će se pokušati dati okviran način uklapanja teme nukleosinteze u školski program.

Nucleosynthesis in the physics class

Abstract

This thesis will try to answer important questions such as: How did elements come into existence? Why are some elements more abundant than others? In addition to that, we'll describe the mechanism of element creation, during the beginning stages of Universe's evolution, as well as during later periods up until today. In the work we'll also present some of the most important processes and reactions responsible for the current composition of substances and elements. Descriptions will include various mechanisms responsible for the synthesis of some of the elements. We'll try to explain the processes in the stars in a way that is understandable not only to scientists and physicists, but also to highschoolers. Furthermore, this thesis is an attempt to succintly explain the creation of every important element, lighter as well as heavier ones. Finally, the analysis will cover the material on nuclear physics that is studied in high school through textbooks and compare with the educational results from the curiculum for physics in high school. In the end, the attempt will be made to provide a broader way to include the subjects of nucleosynthesis in the school/educational program.

Sadržaj

1 Uvod 1

2 Nukleosinteza elemenata do željeza 2

2.1 Vodik ... 3

2.2 Helij ... 5

2.3 Litij ... 15

2.4 Berilij ... 16

2.5 Bor ... 17

2.6 Ugljik ... 17

2.7 Dušik ... 19

2.8 Kisik ... 19

2.9 Fluor ... 21

2.10 Neon ... 21

2.11 Natrij ... 23

2.12 Magnezij ... 24

2.13 Sicilij ... 25

2.14 Sumpor ... 25

3 Nukleosinteza elemenata težih od željeza 27

3.1 s-procesi ... 27

3.2 r-procesi ... 29

3.3 p-procesi ... 30

4 Nuklearna fizika u srednjoj školi 33

4.1 Teme koje se obrađuju i obrazovni ishodi ... 33

4.2 Nukleosinteza u školskom programu ... 38

5 Zaključak ... 42

1 Uvod

Pod pojmom nukleosinteze podrazumijevamo stvaranje kemijskih elemenata putem nuklearnih reakcija. Svaki element ima svoje podrijetlo. Na sljedećim stranicama ćemo opisivati nastanke svakog od elemenata, počevši od najlakšeg – vodika. Nukleosinteza prvih par elemenata, poput vodika i helija, dogodila se u početnim trenutcima života svemira. Takvu nukleosintezu zovemo *prvobitnom nukleosintezom*. Nakon određenog vremena, formiranjem zvijezda, započinju nuklearni procesi kojima se u jezgri zvijezda stvaraju teži elementi, poput ugljika, kisika, dušika i tako sve do željeza. Svi teži elementi nastaju posebnim nizovima procesa uhvata neutrona; takvu nukleosintezu zovemo *neutronskom nukleosintezom*. Pojedini elementi mogu nastati i tzv. rasprskavanjem kozmičkih zraka po jezgri nekog elementa. Kroz opis nastanka pojedinih elemenata ćemo se pobliže upoznati sa svakim od tih procesa.

Na početku trebamo biti upoznati s nekim osnovnim pojmovima i izrazima:

1) **Nuklearne reakcije** – reakcije u kojima dolazi do transformacija atomskih jezgara potaknutih interakcijama jezgara s drugim jezgrama ili nukleonima.

2) **Q – vrijednost reakcije**

   $Q = c^2 \, (\sum_{prije} m \, - \, \sum_{poslije} m)$

   Q – vrijednost je razlika ukupnih kinetičkih energija (ili razlika energija masa mirovanja) prije i poslije reakcije.

   Egzoenergijske reakcije su one u kojima je Q – vrijednost pozitivna; dakle u tim reakcijama se energija oslobađa.

   Endoenergijske reakcije su one u kojima je Q – vrijednost negativna; dakle one reakcije u kojima se energija absorbira.

3) **Udarni presjek**

   U nuklearnoj fizici udarni presjek se koristi pri određivanju vjerojatnosti sudara između neke dvije čestice, ili čestice i jezgre.

4) **Kvarkovi –** subatomske čestice koje su temeljni konstituenti materije. Čestice sastavljene od kvarkova se zovu **hadroni** koji se opet dijele za **barione** (sastoje se od tri kvarka) i **mezone** (sastoje se od dva kvarka; kvarka i antikvarka). Najpoznatiji primjeri bariona su protoni i neutroni.

5) **Foton –** elementarna bezmasena čestica bez naboja koja se giba brzinom svjetlosti *c*.

6) **Gamovljev prozor –** interval energija pri kojima se događa glavnina reakcija nuklearne fuzije za određene čestice u ulaznom kanalu reakcije.

2 Nukleosinteza elemenata do željeza

2.1 Vodik

Vodik je najjednostavniji element u prirodi, njegovu jezgru čini samo jedan proton. Kao takav, to je prvi element koji se sintetizirao u svemiru preko prvobitne nukleosinteze i danas čini oko tri četvrtine mase vidljive materije svemira.

Na početku prvobitne nukleosinteze svemir je bio toliko vruć (temperature su bile oko 10^{32} K) da se najjednostavniji konstituenti materije, kvarkovi, nisu mogli međusobno spojiti zbog prevelike energije okoline. Nakon mikrosekunde, temperatura je drastično pala što je omogućilo spajanje kvarkova u nukleone, protone i neutrone. Tako je sintetiziran osnovni element, vodik.

Neutroni i protoni održavaju svoju količinsku ravnotežu reakcijama:

$$p + e^- \leftrightarrow n + v \tag{2.1}$$

$$n + e^+ \leftrightarrow p + \bar{v} \tag{2.2}$$

U ravnoteži je manje neutrona zbog toga što je težina neutrona malo veća od težine protona. Kako temperatura pada, tako i omjer broja neutrona i protona opada na otprilike 1:6. Tu dolazimo do stvaranja jezgre teškog-vodika, deuterona.

Reakcija kojom se proton i neutron spajaju u jezgru deuterona je iznimno bitna za nastavak nukleosinteze. Naime, vrijeme života neutrona je oko 10 minuta i nakon sekunde proteklog vremena od početka nukleosinteze značajan dio neutrona počinje se vezati u deuterone. Reakcijom:

$$n + p \rightarrow d + \gamma \tag{2.3}$$

se neutroni čuvaju od nestajanja. Da nema te reakcije, svi neutroni bi se raspali i svemir bi se sastojao samo od vodika, čime bi nukeosinteza prestala.

U početnim trenutcima te reakcije, glavnina novostvorenog deuterona se fotodisocirala fotonima kojih je bilo u izobilju. Tome doprinosi i činjenica da je energija vezanja deuterona

niska, iznosi oko 2,2 MeV. Kad se temperatura svemira dodatno smanjila, dostatne količine deuterona su postale stabilne što je stvorilo preduvjete za daljnji nastavak nukleosinteze.

Zadnji izotop vodika čija se jezgra sastoji od protona i dva neutrona zove se super-teški vodik, triton.

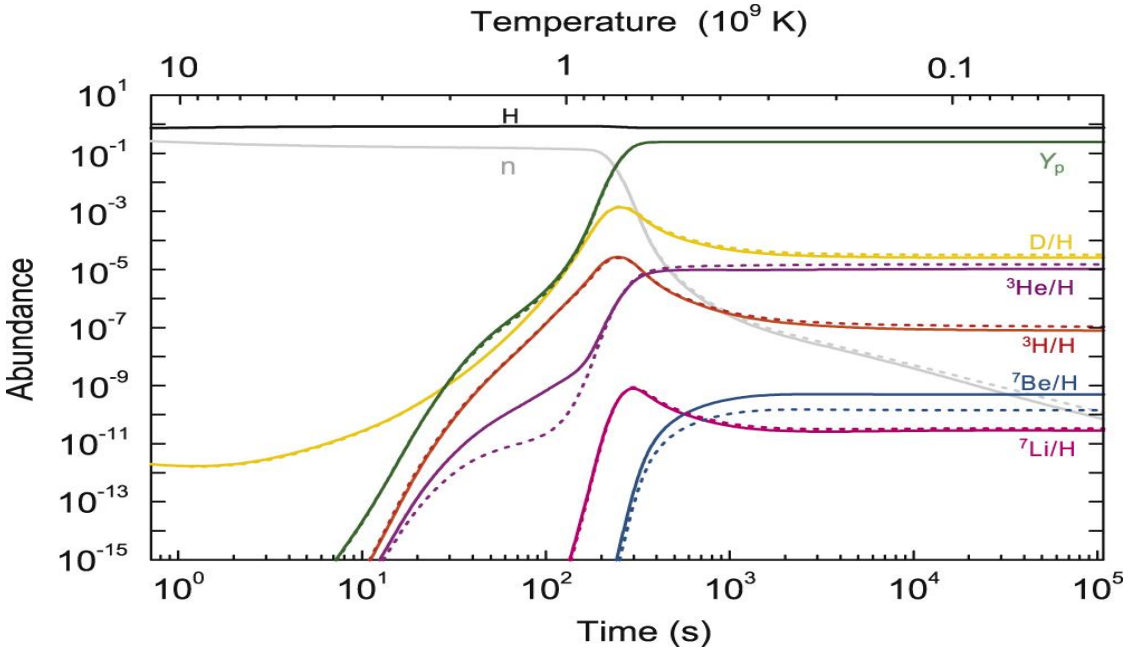
Triton nastaje može nastati putem više reakcija prvobitne nukleosinteze:

$$d + p \rightarrow {}^{3}H + \gamma \tag{2.4}$$

$$d + d \rightarrow {}^{3}H + p \tag{2.5}$$

$$n + {}^{3}He \rightarrow {}^{3}H + p \tag{2.6}$$

Sljedeći graf prikazuje napredovanje nukleosinteze, tj. količinu određenih elemenata nastalih prvobitnom nukleosintezom u ovisnosti o vremenu i temperaturi.



Slika 2.1. Ovisnost količina pojedinih elemenata o temperaturi i vremenu tijekom prvobitne nukleosinteze.

Vodik se, kao najjednostavniji element, prvi proizveo tijekom prvobitne nukleosinteze, a uništava se gorenjem u zvijezdama.

2.2 Helij

Helij je drugi najčešći element i čini skoro jednu četvrtinu mase vidljive materije svemira.

Nastao je tijekom prvobitne nukleosinteze, no dio nastaje i gorenjem vodika u zvijezdama.

Prvobitna nukleosinteza

Nakon što se temperatura svemira ohladila dovoljno da se nezanemariva količina deuterona ne fotodisocira, stvoreni su uvjeti za sintezu težih jezgara. Prvi sljedeći element je helij.

Helij-3

Primordijalnom nukleosintezom prvo je nastao ^{3}He, gorenjem deuterona:

$$\mathrm{d} + \mathrm{p} \rightarrow {}^3\mathrm{He} + \gamma \quad (Q = 5.49\ \mathrm{MeV}) \tag{2.7}$$

$$\mathrm{d} + \mathrm{d} \rightarrow {}^3\mathrm{He} + \mathrm{n} \quad (Q = 3.27\ \mathrm{Mev}) \tag{2.8}$$

Helij-3 može nastati i beta raspadom jezgre super-teškog vodika, tritona:

$${}^3\mathrm{H} \rightarrow {}^3\mathrm{He} + e^- + \nu_e \tag{2.9}$$

Omjer količine ovog izotopa u usporedbi s količinama prirodnog helija-4 je jako malen. Često je i u svemiru teško odrediti količine helija-3 zbog čega što ga je teško odvojiti od helija-4.

Helij-4

Nakon prije navedenih reakcija, moguće je i stvaranje helija-4:

$$\mathrm{d} + {}^3\mathrm{H} \rightarrow {}^4\mathrm{He} + \gamma \tag{2.10}$$

$$\mathrm{d} + {}^3\mathrm{He} \rightarrow {}^4\mathrm{He} + \mathrm{p} \tag{2.11}$$

$$\mathrm{p} + {}^7\mathrm{Li} \rightarrow 2{}^4\mathrm{He} \tag{2.12}$$

Helij-4 je stabilan element i zbog jake energije vezanja se može uništiti samo daljnjom fuzijom u teže elemente.

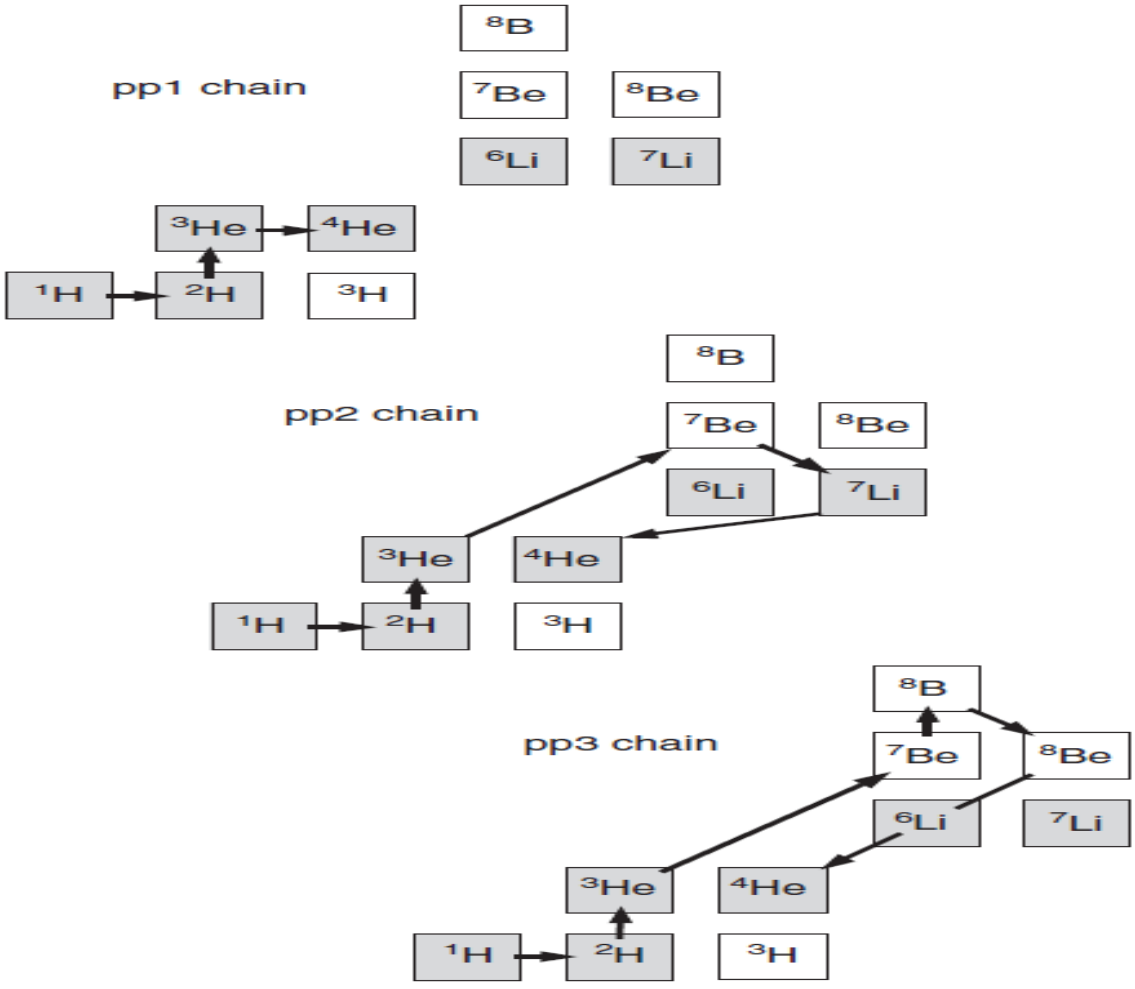
Sinteza helija u zvijezdama

U zvijezdama se helij stvara gorenjem vodika. Dva glavna mehanizma pretvorbe vodika u helij su tzv. proton-proton ciklusi i CNO ciklusi. Prvo ćemo proći kroz proton-proton cikluse.

PP - ciklusi

Postoje tri različita niza nuklearnih reakcija koja zovemo proton-proton (ili pp) ciklusi; sva tri niza (ili ciklusa) završavaju stvaranjem helija (^{4}He).

Slika 2. na pojednostavljen način prikazuje načine konverzije jezgre vodika do jezgre helija na tri različita načina (tri pp ciklusa).



Slika 2.2. pp ciklusi

Kao što ćemo vidjeti, prve dvije reakcije svakog od triju ciklusa su iste. Prva, fuzija dva protona u deuteron, i druga, uništavanje deuterona u 3-helij.

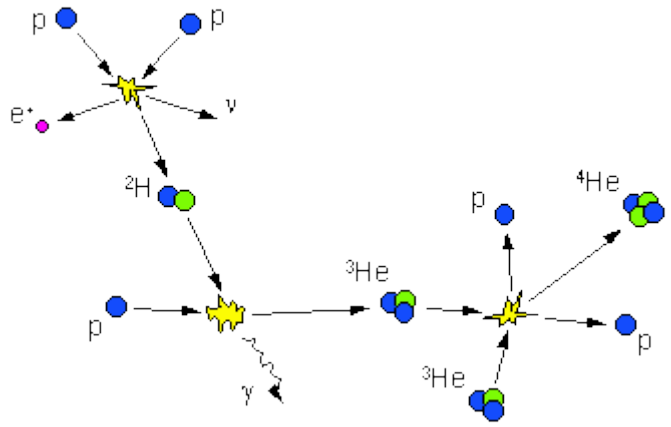
Krenimo sa pp-1 ciklusom.

PP-1 ciklus:

Reakcija:
$p(p,e+\nu)d$
$d(p,\gamma)^3He$
$^3He\ (^3He,2p)\ ^4He$

Tablica 2.1. Reakcije pp-1 ciklusa

U tablici 1. Vidljive su tri nuklearne reakcije svojstvene pp-I ciklusu.



Slika 2.3. Ilustrirani prikaz pp-1 ciklusa

Promotrimo prvu reakciju: $p(p,e+\nu)d$

$$p + p \rightarrow {}^2H + e^+ + \nu \qquad (2.13)$$

Prva reakcija nam je zanimljiva iz više razloga. Za početak, vidimo da se proton ovdje pretvara u neutron, što nas podsjeća na beta raspad. Zaista, jedan od protona u ulaznom kanalu reakcije se mora podvrgnuti beta raspadu i pretvoriti u neutron. Beta raspad je vođen slabom nuklearnom silom i zbog toga je jako mala vjerojatnost da se dogodi. Osim što se ponavlja na početku svakog pp niza, reakcija fuzije dvaju protona u deuteron je reakcija u kojoj ne djeluju isključivo jaka nuklearna sila i kulonska sila, kao što je slučaj sa većinom drugih nuklearnih reakcija u zvijezdama. Na odvijanje ove reakcije djeluje i slaba nuklearna sila.

Q-vrijednost reakcije iznosi 1442 keV i tu energiju dijele produkti reakcije (deuteron, pozitron i neutrino). Jedan od njih, neutrino, vrlo lako može pobjeći iz zvijezde što uzrokuje to da se ukupna energija dostupna za pretvorbu u toplinu smanjuje za prosječnu energiju neutrina dobivenu iz njegovog observiranog energetskog spektra; ona iznosi 265 kEv, što znači da 1177 kEv energije ostaje dostupno za konverziju u toplinu.

Postoji i alternativna nuklearna reakcija koja bi mogla zamijeniti prvu reakciju pp ciklusa, tzv. *pep reakcija*;

$$\mathrm{p} + \mathrm{p} + \mathrm{e}^{-} \rightarrow {}^{2}\mathrm{H} + \nu \tag{2.14}$$

Iako se i u ovom slučaju radi o fuziji dva protona u deuteron, pokazalo se da ova reakcija može uzeti maha samo u zvijezdama čija je gustoća iznad 10^4 g/cm^3.

Reakcija $d(p,\gamma)^3He$:

$$\mathrm{d} + \mathrm{p} \rightarrow {}^{3}\mathrm{He} + \gamma \tag{2.15}$$

Druge reakcije u kojima sudjeluje novostvoreni deuteron, poput $d + d \rightarrow p + t$ *(t je oznaka za triton)* ili $d + d \rightarrow n + {}^3He$ se, unatoč većim udarnim presjecima, ne događaju često iz razloga što je broj protona dostupnih za reakciju puno veći od broja deuterona, pa će samim time reakcija $d(p,\gamma)^3He$ biti češća.

Q vrijednost reakcije iznosi 5.493 Mev. Reakcija ovisi samo o elektromagnetskoj i jakoj nuklearnoj sili. Zbog niske kulonske barijere i jake nuklearne sile koja djeluje, ova reakcija se odvija jako brzo, za razliku od spore prve reakcije fuzije dvaju protona.

Treća reakcija, ^3He $(^3He,2p)$ ^4He se odvija sporije od prethodne zbog visoke kulonske barijere koje stvaraju čestice u ulaznom kanalu reakcije.

PP-2 ciklus:

Reakcija:
$p(p, e^+, \nu)d$
$d(p,\gamma)^3He$
$^3He(^4He,\gamma)\ ^7Be$
$^7Be(e^-,\nu)\ ^7Li$
$^7Li(p,^4He)\ ^4He$

Tablica 2.2. Reakcije pp-2 ciklusa

Kao što vidimo u tablici 2, početak pp-2 ciklusa je isti kao i početak pp-1 ciklusa, no uništavanje ^3He ne mora biti samo u reakciji sa samim sobom, kao u pp-1 ciklusu; reakcija sa ^4He i stvaranje ^7Be postaje dominantna ako su dostupne velike količine ^4He i ako su temperature velike. To nije neočekivano ako znamo da je ^4He nastao i tijekom primordijalne nukleosinteze, tj. uvijek je prisutan. Raspad ^7Be u ^7Li stvara uvjete za raspad ^7Li na dvije alfa čestice. Time se završava pp-2 ciklus.

PP-3 ciklus:

Reakcija:
$p(p, e^+, \nu)d$
$d(p,\gamma)^3He$
$^3He(^4He,\gamma)\ ^7Be$
$^7Be(p,\gamma)\ ^8B$
$^8B(\beta^+,\nu\ )\ ^8Be$
$^8Be(^4He)\ ^4He$

Tablica 2.3. Reakcije pp-3 ciklusa.

PP-3 ciklus uzima maha kada temperature postanu još više. Tada se ^{7}Be uhvatom protona raspada u ^{8}B koji β^{+} raspadom prelazi u nestabilni ^{8}Be koji se na koncu raspada u dvije alfa čestice. Krajnji rezultati pp-2 i pp-3 ciklusa su isti – dvije alfa čestice, no ukupan efekt ciklusa je zapravo jedna alfa čestica, pošto je i za pp-2 i za pp-3 ciklus potrebna jedna alfa čestica u ulaznom kanalu reakcija. Sva tri ciklusa tako daju rezultat od jedne alfa čestice nastale fuzijom protona. Svakim od triju lanaca se oslobađa ista količina energije (26,73 Mev), no oslobođeni neutrini u svakom ciklusu oduzimaju ukupnu energiju oslobođenu pojedinim ciklusom. Tako ispada da je za pp-1 ciklus energija neutrina 2% ukupne energije, tj. 2% oslobođene energije je izgubljeno. Za pp-2 ciklus energija je 4% posto ukupne, dok je za pp-3 ciklus energija neutrina čak 26 % ukupne oslobođene energije.

Sva tri proton-proton ciklusa se mogu odvijati istodobno ako zvijezda sadrži dovoljne količine ^{4}He.

CNO ciklusi

Nakon što smo sažeto obradili prvi mehanizam obrade vodika u helij putem proton-proton lanaca, osvrnut ćemo se i na drugi mehanizam; stvaranje helija preko tzv. CNO ciklusa.

CNO ciklusi postaju glavni mehanizam stvaranja helija, i samim time generiranja dobrog dijela energije u zvijezdama onda kada zvijezde u sebi sadrže velike količine težih jezgara, poput jezgara ugljika, dušika, kisika; odatle dolazi i naziv “CNO”. Smatra se da su to zvijezde koje su u prosjeku 1.3 puta teže od Sunca i koje imaju temperaturu $15\text{-}17 * 10^{6}$ K, ispod koje se i ne mogu odvijati takvi procesi.

Ti teži elementi u ovim ciklusima imaju ulogu katalizatora, tj. nakon ciklusa pretvaranja četiri protona u helij njihova količina u zvijezdama ostaje nepromijenjena, iako se individualna količina elemenata mijenja sa svakim ciklusom, kao što ćemo ubrzo i vidjeti.

Procesi se dijele na hladne i vruće jer se odvijaju na različitim temperaturama.

Hladni CNO ciklusi:

Sljedeća slika prikazuje reakcije za četiri hladna CNO ciklusa.

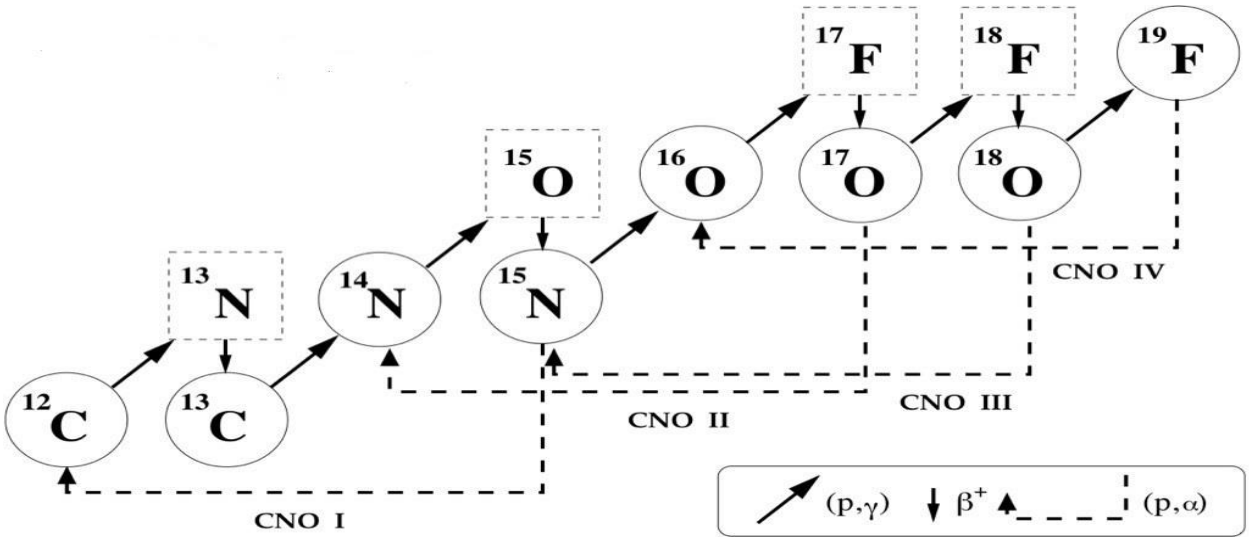
CNO1	CNO2	CNO3	CNO4
$^{12}C(p,\gamma)^{13}N$	$^{14}N(p,\gamma)^{15}O$	$^{15}N(p,\gamma)^{16}O$	$^{16}O(p,\gamma)^{17}F$
$^{13}N(\beta^{+}\nu)^{13}C$	$^{15}O(\beta^{+}\nu)^{15}N$	$^{16}O(p,\gamma)^{17}F$	$^{17}F(\beta^{+}\nu)^{17}O$
$^{13}C(p,\gamma)^{14}N$	$^{15}N(p,\gamma)^{16}O$	$^{17}F(\beta^{+}\nu)^{17}O$	$^{17}O(p,\gamma)^{18}F$
$^{14}N(p,\gamma)^{15}O$	$^{16}O(p,\gamma)^{17}F$	$^{17}O(p,\gamma)^{18}F$	$^{18}F(\beta^{+}\nu)^{18}O$
$^{15}O(\beta^{+}\nu)^{15}N$	$^{17}F(\beta^{+}\nu)^{17}O$	$^{18}F(\beta^{+}\nu)^{18}O$	$^{18}O(p,\gamma)^{19}F$
$^{15}N(p,\alpha)^{12}C$	$^{17}O(p,\alpha)^{14}N$	$^{18}O(p,\alpha)^{15}N$	$^{19}F(p,\alpha)^{16}O$

2.4. Reakcije za četiri hladna CNO ciklusa. Preuzeto iz Iliadis, C. Nuclear Physics of Stars

Ukupna energija oslobođena svakim ciklusom iznosi 26,73 Mev no naravno, moramo oduzeti od toga energiju neutrina koji u ovim ciklusima u prosjeku imaju puno manju energiju u usporedbi s proton-proton ciklusima; ona iznosi oko 1,7 Mev.

Svi procesi su slični, razlika je u tome što svaki sljedeći ciklus "nastavlja" prethodni sa par dodatnih reakcija uhvata protona i zatim raspada.

Slika 2.5. slikovito prikazuje cikluse u svrhu lakšeg shvaćanja.



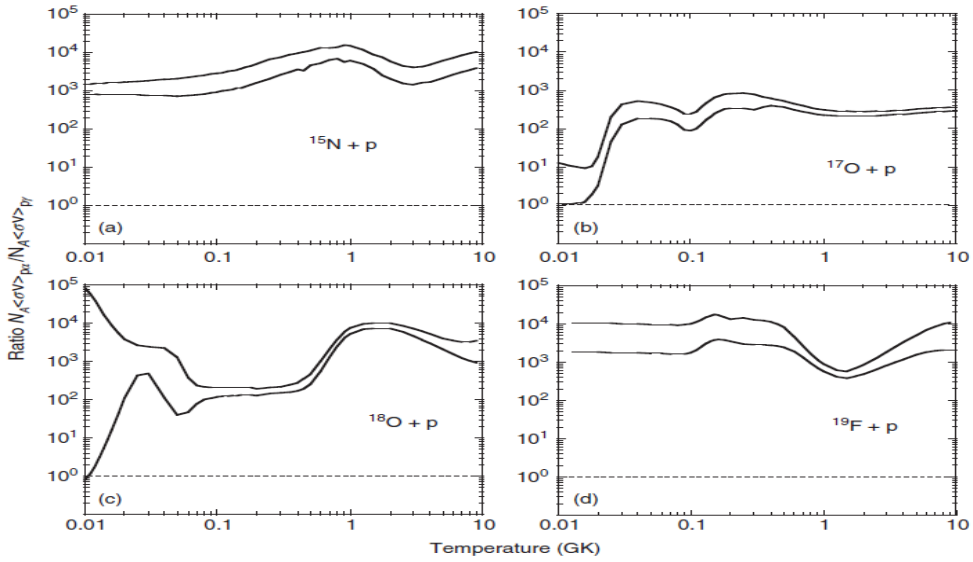
Slika 2.5. Ilustrirani prikaz CNO ciklusa

CNO III i CNO IV ciklusi su značajni samo u masivnim zvijezdama.

Koji će se od ovih ciklusa odvijati, tj. kako će se promijeniti individualne količine izotopa tih težih elemenata, ovisi o produktima reakcije u zadnjem koraku. Kao što vidimo, u ciklusima su bitne dvije reakcije koje imaju veze s uhvatom protona, a to su *(p, γ) i (p,α).*

O brzini odvijanja tih reakcija ovisi koliko će se kojeg izotopa stvoriti u ciklusu. Slika 5 prikazuje omjer brzina *(p,α) i (p, γ)* reakcija. Možemo primijetiti kako na slici nisu prikazani omjeri za osnovne izotope elemenata: ^{12}C, ^{13}C, ^{14}N i ^{16}O. To je zato što bi reakcija *(p,α)* s takvim izotopima rezultirala negativnom Q-vrijednošću reakcije, pa su stoga te reakcije na takvim elementima nemoguće. Prvo što možemo iz slike uočiti je to da je reakcija *(p,α)* puno brža od reakcije *(p, γ)*, od 1000 pa do čak 100 000 puta. Nadalje, kako znamo da količina određenog izotopa prije i poslije CNO ciklusa ovisi o udarnom presjeku reakcija kojim se neki izotop uništava, jasno je da će količina nekog izotopa biti obrnuto proporcionalna udarnom presjeku reakcije kojim se taj izotop uništava. Dakle, u CNO ciklusu trebamo tražiti najsporiju reakciju; ta reakcija je ^{14}N(p, γ) ^{15}O, što bi značilo da je ^{14}N najobilniji izotop dostupan u CNO ciklusima.

To možemo isčitati sa slike 2.6.



Slika 2.6. Količina izotopa u ovisnosti o temperaturi. Preuzeto iz Illiadis, C. [1]

Vrući CNO ciklusi:

Pri još većim temperaturama, nizovi reakcija u hladnim CNO ciklusima se počinju ponešto mijenjati. Primijetimo sa slike 2.5. reakcije beta raspada (^{13}N ili ^{15}O). Te spore reakcije se pri višim temperaturama mogu zaobići alternativnim nizom reakcija. Govorimo o tzv. vrućim CNO ciklusima. Možemo zaključiti kako na ove cikluse utječu beta-raspadi.

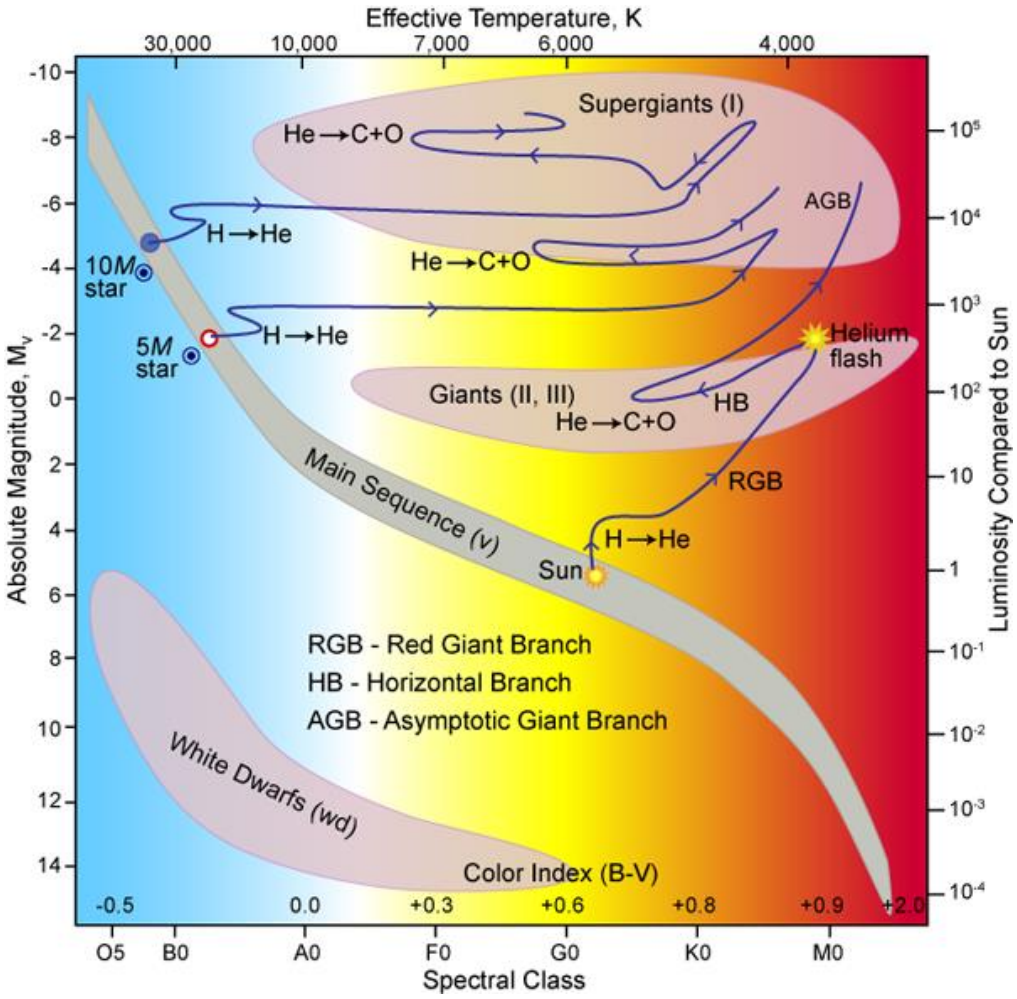
Isto tako, brzina odvijanja reakcija CNO ciklusima je s porastom temperature puno veća od brzine odvijanja reakcija pp-procesima. Svi ovi ciklusi prestaju onda kada se potroši sav vodik. Tada se stvaraju uvjeti za gorenje helija. Ovakvi procesi traju milijunima godina u zvijezdama, a kasnije ćemo vidjeti da se izgaranje sve težih elemenata odvija u sve kraćem vremenu.

Zaključak

Helij je drugi najzastupljeniji element u svemiru i kao što je opisano, nastao je uglavnom u prvobitnoj nukleosintezi. Kako je vodik najzastupljeniji element, tako ne treba zanemariti i sintezu helija preko gorenja vodika u zvijezdama, što je i opisano na prethodnim stranicama. Helij nestaje daljnjim izgaranjem u zvijezdama i ima ulogu goriva za stvaranje ugljika ili kisika. Slika 2.7. pokazuje dijagram ovisnosti sjaja zvijezda o njihovoj temperature. Iz njega možemo vidjeti da se u glavnoj dijagonali, tj. području, nalazi većina zvijezda. Iz toga možemo zaključiti kako većina zvijezda završava svoj životni vijek izgaranjem vodika, tj. sintezom helija.

Važno je razmotriti i tzv. AGB-zvijezde (engl. Asymptotic Giant Branch). Zvijezde koje su potrošile vodik se sažimaju i temperatura im raste, dok im se vanjski slojevi hlade i šire. Sjaj takvih zvijezda tada značajno naraste u odnosu na zvijezde koje se nalaze na glavnom nizu dijagrama i one postaju tzv. crveni divovi (na dijagramu RGB, engl. *red giant branch*). Gorenjem helija prestaje hlađenje i porast sjaja te se takve zvijezde vraćaju lijevo na HB (engl. *horizontal branch*). Gašenjem gorenja helija zvijezda se u dijagramu pomiče gore desno po liniji koji nazivamo *asimptotska linija divova* i zvijezde na njoj se nazivaju AGB-zvijezde. U takvim zvijezdama opet započinje gorenje vodika u vanjskoj ljusci zvijezde što

uzrokuje i gorenje helija u susjednoj ljusci, a smatra se da se paralelno odvija i s-proces, o kojemu ćemo detaljnjije u poglavlju sinteze elemenata težih od željeza. Takvi simultani procesi traju par tisuća godina i uzrokuju značajno miješanje materijala među unutrašnjim i vanjskim slojevima. To se ogleda u nestabilnosti zvijezda koje tada često mijenjaju sjaj.



Slika 2.7. Hertzsprung-Russelov dijagram. Prikazuje ovisnost sjaja zvijezda o njihovoj površinskoj temperaturi. Main Sequence, tj. glavni niz, prikazuje područje gdje se nalazi većina zvijezda, među njima i naše Sunce.

2.3 Litij

Sljedeći element je litij. Postoje dva stabilna izotopa litija, ^{7}Li i ^{6}Li.

Litij-7

Male količine litija-7 su nastale reakcijama tijekom prvobitne nukleosinteze:

$$\alpha + {}^{3}\mathrm{H} \rightarrow {}^{7}\mathrm{Li} + \gamma \tag{2.16}$$

$$\mathrm{n} + {}^{7}\mathrm{Be} \rightarrow {}^{7}\mathrm{Li} + \mathrm{p} \tag{2.17}$$

Zanimljiva je tu druga reakcija u kojoj se litij stvarao i naknadno; raspadom berilija, elementa koji je kasnije stvoren.

Navedene reakcije nisu se događale u tolikom obimu da bi objasnile pretpostavljene količine litija u svemiru, kojeg prema procjenama ima više tisuća puta više nego što ga je proizvedeno tijekom prvobitne nukleosinteze. Isto tako, reakcija litija s protonom je zbog niske kulonske barijere reakcija velikog udarnog presjeka, što znači da se litij lako uništava u zvijezdama tijekom gorenja vodika. Količine litija se mogu objasniti jedino reakcijama kozmičkih zraka s elementima u zvijezdama, poglavito ugljikom, dušikom i kisikom.

Kozmičke zrake sastoje se uglavnom od visokoenergetskih protona, s nešto malo alfa čestica i još manje elektrona. Proces spalacije, tj. rasprskavanja kozmičkih zraka podrazumijeva reakciju visokoenergetske čestice s nekim od elemenata što uzrokuje raspad tog elementa na jedan veći element i čestice. Smatra se da je ovaj mehanizam sinteze odgovoran za glavninu produkcije litija-7.

Pretpostavlja se da bi za produkciju nezanemarivih količina litija-7 mogli biti odgovorni i procesi vođeni neutrinskom nuklesintezom, tj. reakcijama neutrina sa jezgrama prilikom sagorijevanja zvijezde. No, to je sve što se može reći o tome zbog činjenice da su mehanizmi sinteze elemenata putem neutrina u ulaznom kanalu reakcija još neistraženi i nepoznati.

Litij-6

Možemo primijetiti da u prije navedenim reakcijama odgovornim za nastanak malih količina litija tijekom prvobitne nukleosinteze nema izotopa litija, ^{6}Li. Teško je odrediti količine ovog izotopa koje su nastale tijekom prvobitne nukleosinteze, no zna se da je otprilike 20 puta manje zastupljen od litija-7. Pretpostavlja se da se ovaj izotop proizvodi spalacijom kozmičkih zraka. Litij-6 se može očitati u spektrima zvijezda veće mase, jer jedino u takvim okolnostima litij-6 se ne miješa, tj. ne uništava u tolikoj mjeri da se ne može naći u spektru. Iako, zbog bliskosti svojstava sa litijem-7, jako je složeno odvojiti spektralne linije dvaju izotopa iz zračenja zvijezde pa ne postoji konsenzualno mjerenje koje bi dalo konkretnije informacije za ovaj element.

2.4 Berilij

Male količine berilija su, kao što je slučaj i s litijem, stvorene prvobitnom nukleosintezom. Reakcijom fuzije dvaju prethodno stvorenih izotopa helija stvarao se berilij:

$$^{3}\mathrm{He} + {}^{4}\mathrm{He} \rightarrow {}^{7}\mathrm{Be} + \gamma \qquad (2.18)$$

Berilij je najteži element stvoren prvobitnom nukleosintezom. Postoje čak 12 izotopa berilija, no samo je ^{9}Be stabilan. Vjeruje se da je nastao rasprskavanjem kozmičkih zraka.

^{10}Be je nestabilni izotop berilija. Glavnina produkcije ovog izotopa nastaje istim mehanizmom kao i berilij-9, rasprskavanjem kozmičkih zraka. Nastaje rasprskavanjem neutrona na jezgrama kisika ili dušika.

2.5 Bor

Bor je element čija jezgra sadrži pet protona. Postoje dva stabilna izotopa bora, ^{10}B i ^{11}B. Kao element je iznimno rijedak u svemiru i nastaje gotovo isključivo rasprskavanjem kozmičkih zraka.

Postoji sumnja da male količine ^{11}B nastaju i procesima započetim neutrinskom nukleosintezom, no to još uvijek nije dokazano.

2.6 Ugljik

Ugljik je element koji u jezgri sadrži 6 protona. Ovisno o broju neutrona koji su s protonima u jezgri, razlikujemo tri izotopa ugljika koje nalazimo u svemiru; ^{12}C, ^{13}C i ^{14}C.

Najmnoštveniji od njih, ^{12}C, nastaje izgaranjem helija u zvijezdama kao jedan od produkata gorenja, uz kisik.

Proces s 3 alfa čestice

Nastajanje ^{12}C se pokušalo objasniti tzv. procesom s 3 alfa čestice u kojem dolazi do spajanja 3 alfa čestice u ^{12}C. No, vjerojatnost da se 3 alfa čestice nađu međusobno dovoljno blizu da budu u dometu jake nuklearne sile je iznimno mala. Uostalom, i u laboratorijskim uvjetima je nemoguće rekreirati takvu reakciju.

No, pokušajmo podijeliti tu reakciju na dva dijela, tj. na dvije reakcije. Prva reakcija bi bila spajanje dvije alfa čestice:

$$\alpha + \alpha \rightarrow {}^{8}\mathrm{Be} \tag{2.19}$$

Kao što vidimo, dvije alfa čestice se spajaju u ^{8}Be, međutim jezgra ovog elementa je jako nestabilna i kao takva se vrlo brzo raspada na prvotne dvije alfa čestice. Tijekom vremena stvara se dovoljna količina ovog elementa i naposljetku se stopa raspadanja i stopa stvaranja ^{8}Be izjednače. Energije dvaju ulaznih alfa čestica i energija osnovnog stanja ^{8}Be su jako slične, razlikuju se za samo 92 kEv.

U drugom koraku, $^{8}\mathrm{Be}$ djeluje sa trećom alfa česticom i zajedno stvaraju $^{12}\mathrm{C}$.

$$\alpha + {}^{8}\mathrm{Be} \rightarrow {}^{12}\mathrm{C} \tag{2.20}$$

Kao što smo već napomenuli, proces spajanja 3 alfa čestice je jako malo vjerojatan. Astronom Fred Hoyle je postavio tezu da bi vjerojatnost spajanja ^{8}Be s alfa česticom i stvaranja ^{12}C bila dovoljno velika ako bi postojalo neko pobuđeno stanje ugljika. Takvo stanje bi imalo energiju koja bi bila jednaka energiji alfa čestice i ^{8}Be. Kasnije se otkrilo postojanje tog stanja koje je nazvano Hoyleovo stanje.

Usprkos tome, ni to nije dovoljno dobro objašnjenje izmjerenih količina ugljika u svemiru. Glavni problemi shvaćanja ove reakcije leže u činjenici da je nemoguće laboratorijski stvoriti uvjete za odvijanje reakcija. Isto tako i obrnutim putem, raspad ^{12}C na alfa česticu i ^{8}Be nije moguć zbog toga što nije moguće fotonom pobuditi osnovno stanje ugljika u Hoyleovo stanje. Danas se zna i da reakcija s 3 alfa čestice ekstremno ovisi o temperaturi.

Zbog svega toga, ovo područje je još uvijek predmet daljnjih istraživanja.

$^{13}\mathrm{C}$ je izotop koji je puno rjeđi od $^{12}\mathrm{C}$ i inače čini oko 1 posto ugljika kojeg nalazimo na Zemlji gdje ostatak čini $^{12}\mathrm{C}$. Sa slike 3. i 4. Možemo uočiti da je $^{13}\mathrm{C}$ produkt u nizu jednog od CNO ciklusa kojima se proizvodi helij. Nastaje beta raspadom $^{13}\mathrm{N}$.

$^{14}\mathrm{C}$ je nestabilni izotop ugljika kojeg nalazimo samo u tragovima u atmosferi. Nastaje interakcijom kozmičkog zračenja s dušikom. Visoko energetski neutron djeluje sa $^{14}\mathrm{N}$.

$$\mathrm{n} + {}^{14}\mathrm{N} \rightarrow {}^{14}\mathrm{C} + \mathrm{p} \tag{2.21}$$

Ugljik se uništava daljnjim reakcijama sa alfa česticama ili reakcijama sa samim sobom.

2.7 Dušik

Dušik je element čija jezgra sadrži sedam protona. Postoje dva stabilna izotopa dušika, ^{14}N i ^{15}N. Oni nastaju uglavnom kao produkti u nizu CNO ciklusa kojima sagorijeva vodik; uglavnom reakcijama uhvata protona od strane izotopa ugljika ili beta raspadom kisika (^{15}N). ^{14}N čini većinski udio prirodnog dušika, oko 99,6 %.

^{15}N može nastati i prilikom procesa započetih neutrinskom nukleosintezom kada velika količina neutrina prilikom sagorijevanja zvijezde i pojave supernove reagira s elementima u zvijezdi i tako pokreće niz procesa pri kojima je jedan od produkata i ^{15}N.

2.8 Kisik

Kisik je element koji u jezgri sadrži 8 protona. Postoje tri prirodna izotopa kisika; ^{16}O, ^{17}O i ^{18}O

^{16}O, najmnoštveniji izotop, nastaje primarno gorenjem helija.

Reakcija:

$$^{12}\mathrm{C}(\alpha,\gamma)\ ^{16}\mathrm{O} \tag{2.22}$$

Reakcija ugljika s alfa česticom stvara kisik.

No, poznavanje ove reakcije je najslabije od svih reakcija bitnih za nukleosintezu elemenata do željeza. Naime, vjerojatnost da ulazne čestice nuklearno reagiraju i nadjačaju svoju kulonsku barijeru postaje dovoljno visoka na određenim temperaturama i energijama. Govorimo o tzv. Gamovljevom prozoru, intervalu energija na kojima se događa glavnina fuzija dvaju ulaznih čestica koji za ovu reakciju iznosi energiji oko 325 kEv pri temperaturi od oko 0.2 GK. Problem leži u tome što bi , kad bi postojala rezonancija u Gamovljevom prozoru, reakcija bila prebrza i ugljik bi se potrošio, što naravno ne odgovara količinama ugljika u današnjem svemiru. Isto tako, kada ne bi postojala rezonancija, reakcija bi bila prespora, što bi dovelo do toga da se stvara premalo kisika, što opet ne odgovara količinama kisika u svemiru.

Proučavanjem inverzne reakcije, raspadom kisika na ugljik i alfa česticu, uočeno je da postoje dva stanja kisika koji donekle upadaju u Gamovljev prozor; takav scenarij pomalo ubrzava reakciju. Govori se o tzv. *rezonancama ispod praga*.

Zbog svega navedenog vidljivo je da je vrlo teško objasniti mehanizam ove reakcije, pa je i poznavanje reakcije najslabije u usporedbi s ostalim reakcijama.

Dio ovog izotopa kisika nastaje i fotodisentigracijom neona.

Fotodisentigracija je proces prilikom kojeg neka jezgra primi visoko energetsku gama zraku koja uzrokuje raspad pri kojem se emitiraju neke subatomske čestice, poput protona, neutrona ili alfa čestice. Pošto je energija potrebna za emitiranje alfa čestice kod jezgre neona dovoljno mala; taj proces postaje vjerojatan.

Fotodisentigracija neona opisana je reakcijom:

$$^{20}\mathrm{Ne}(\gamma,\alpha)\ ^{16}\mathrm{O} \tag{2.24}$$

Izotop $^{17}\mathrm{O}$ se sintetizira tijekom prethodno opisanih CNO ciklusa kojima se izgaranjem vodika stvara helij beta raspadom fluora.

$^{18}\mathrm{O}$ nastaje nizom reakcija koji počinje kada $^{14}\mathrm{N}$ reagira sa alfa česticom. To se događa pri kraju gorenja vodika, tj. pri kraju CNO ciklusa kada ostane nezanemariva količina $^{14}\mathrm{N}$. Zahvaljujući tome nastaju određene količine $^{18}\mathrm{O}$.

Možemo primijetiti kako za produkciju $^{17}\mathrm{O}$, tijekom CNO ciklusa, nije potrebno gorenje helija kao što je slučaj s ostala dva izotopa kisika za čiji je nastanak potreban helij. Zbog toga je moguće pronaći veće količine tog izotopa u zvijezdama manje mase koje su bogate vodikom.

Kisik nestaje daljnjim izgaranjem u zvijezdama, u reakcijama sa alfa česticama ili sa samim sobom.

2.9 Fluor

Fluor je element koji sadrži devet protona u jezgri. Njegove količine u svemiru su jako male, što je neobično za element njegove mase. Postoji jedan stabilni izotop fluora, a to je ^{19}F. On se proizvodi na više načina.

Prilikom sagorijevanja helija u zvijezdama, postoji niz reakcija kojima se stvara ovaj izotop.

Taj niz je:

$$^{18}O(p,\alpha)\ ^{15}N\ (\alpha,\gamma)\ ^{19}F \tag{2.25}$$

Drugi, zanimljiviji način, je stvaranje fluora preko prije spomenute neutrinske nukleosinteze, niza reakcija koji se pokreću reakcijom neutrina sa ^{20}Ne. Precizne količine stvorenoga fluora se još uvijek ne mogu dovoljno dobro izmjeriti zbog nepoznavanja udarnih presjeka za reakcije neutrinske nukleosinteze.

2.10 Neon

Neon je element koji sadrži deset protona u jezgri. Razlikujemo prirodne izotope; ^{20}Ne, ^{21}Ne i ^{22}Ne.

Prva dva navedena se stvaraju gorenjem ugljika.

Kako se helij troši u zvijezdama i izgara, zvijezda se nastavlja sažimati što dovodi do povećanja temperature. Kad su temperature u zvijezdi dovoljno visoke, stvoreni su uvjeti za gorenje sljedećih težih elemenata, a to su upravo glavni produkti gorenja helija - ^{12}C i ^{16}O.

U kombinacijama reakcija; $^{12}\mathrm{C} + {}^{12}\mathrm{C}$, $^{12}\mathrm{C} + {}^{16}\mathrm{O}$, $^{16}\mathrm{O} + {}^{16}\mathrm{O}$ – ova prva ima najmanju kulonsku barijeru i kao takva prva označava početak gorenja ugljika.

Postoje tri glavne reakcije:

$$^{12}C(^{12}C,p)\ ^{23}Na \quad \text{Q = 2,24 MeV} \tag{2.26}$$

$$^{12}C(^{12}C,\alpha)\ ^{20}Ne \quad \text{Q = 4,61 MeV} \tag{2.27}$$

$$^{12}C(^{12}C,n)\ ^{23}Mg \quad \text{Q = - 2,6 MeV} \tag{2.28}$$

Možemo uočiti da je produkt druge reakcije ^{20}Ne.

Nastajanje ^{22}Ne uzrokuje jedna od reakcija koja se događa prilikom gorenja helija:

$$^{12}\mathrm{C}(\alpha,\gamma)\ ^{16}\mathrm{O} \tag{2.29}$$

Tom reakcijom nastaje glavni izotop kisika koji kasnije postaje element u ulaznom kanalu reakcije koja stvara neon.

Prema procjeni, omjer količina ugljika i količina kisika u svemiru iznosi oko 0.4 do 0.6. Iz toga se može zaključiti da postoje nezanemarive količine ugljika koje nisu uništene ovom reakcijom što znači da bi navedena reakcija trebala biti spora, jer bi se inače cijeli ugljik potrošio. Dakle, brzina reakcije očito jako utječe na količine ugljika i kisika u svemiru. Nakon što se stvore količine kisika prethodnom reakcijom, reakcija kisika s alfa česticom stvara neon.

$$^{16}\mathrm{O}(\alpha,\gamma)\ ^{20}\mathrm{Ne} \tag{2.30}$$

No, ova reakcija ima jako mali udarni presjek i kao takva se odvija vrlo sporo, tako da većina prethodno stvorenog kisika ostane neprerađena. Razlog tome je činjenica da ne postoji rezonancija u Gamovljevom prozoru za ovu reakciju, isto tako i rastuća kulonska barijera porastom atomskog broja elemenata igra ulogu. Porastom temperature u zvijezdi ova reakcija postaje nešto vjerojatnija.

2.11 Natrij

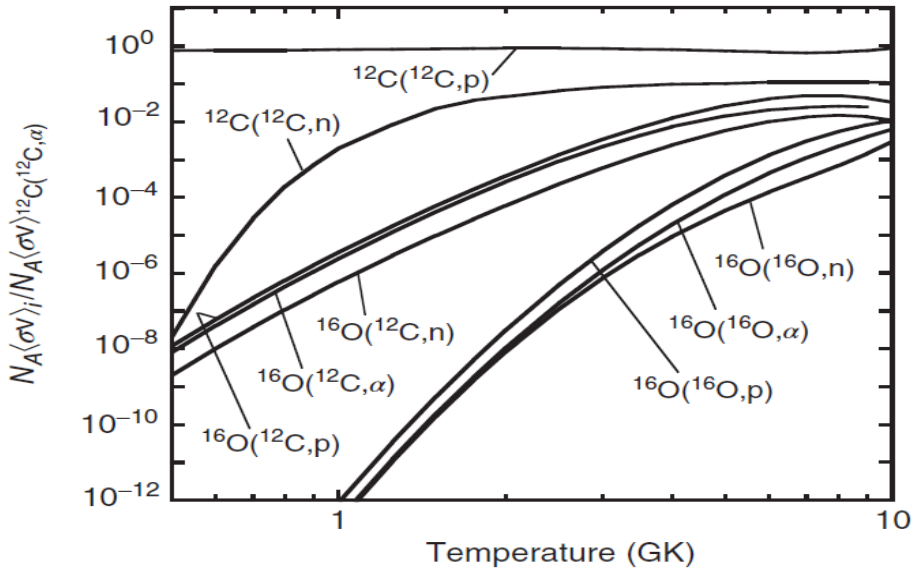
Natrij je element čija jezgra sadrži jedanaest protona. Jedini stabilni izotop natrija je ^{23}Na.

Nastaje prilikom gorenja ugljika u zvijezdama. U prethodno opisanim procesima nastanka neona možemo uočiti prvu reakciju:

$$^{12}\mathrm{C}(^{12}\mathrm{C},\mathrm{p})\ ^{23}\mathrm{Na} \qquad \mathrm{Q} = 2{,}24\ \mathrm{MeV} \tag{2.31}$$

Fuzijom dvaju elemenata ugljika nastaje stabilni izotop natrija.

Na slici 2.8. možemo vidjeti usporedbu brzine reakcija koje se događaju prilikom gorenja ugljika u kisika u zvijezdama u odnosu na reakciju fuzije ugljika s ugljikom u kojoj se stvara neon. Iz slike možemo uočiti da je reakcija nastanka natrija otprilike jednako brza kao i reakcija kojom nastaje neon, te time stvaranje natrija sa stvaranjem neona čini najbržu reakciju gorenja ugljika i kisika u zvijezdama. Drugi, nestabilni, izotopi natrija poput ^{22}Na i ^{24}Na nastaju rasprskavanjem kozmičkih zraka u atmosferi, ali oni imaju jako kratko vrijeme života pa se praktički momentalno raspadaju čim nastanu.



Slika 2.8. Odnos brzina reakcija gorenja ugljika s reakcijom $^{12}C(^{12}C,\alpha)\ ^{20}Ne$. Preuzeto iz Illiadis, C. [1]

2.12 Magnezij

Magnezij je element koji sadrži 12 protona u svojoj jezgri. Postoje tri stabilna izotopa magnezija u prirodi, to su: ^{24}Mg, ^{25}Mg i ^{26}Mg . Magnezij može nastati gorenjem ugljika u zvijezdama, i pri tome nam je najzanimljivija reakcija:

$$^{12}\mathrm{C}(^{12}\mathrm{C},\mathrm{n})\ ^{23}\mathrm{Mg} \quad Q = -2{,}6\ \mathrm{MeV} \tag{2.32}$$

Kao što možemo primijetiti, Q vrijednost reakcije je negativna, što znači da je reakcija endotermna i može započeti samo iznad praga energije od 2,6 MeV. Pri dovoljno velikim temperaturama u zvijezdama, ova reakcija može uzeti maha. Kao što vidimo, produkt je nestabilan izotop magnezij-23 što znači da se ubrzo raspada; raspada se u natrij-23.

Fuzijom kisika s kisikom može nastati produkt magnezij-24.

$$^{16}\mathrm{O}(^{16}\mathrm{O},2\alpha)\ ^{24}\mathrm{Mg} \tag{2.33}$$

Isti taj izotop nastaje i fotodisentigracijom neona-20 čime se stvaraju alfa čestice od kojih dio reagira sa istim izotopom preko reakcije:

$$^{20}\mathrm{Ne}(\alpha,\gamma)\ ^{24}\mathrm{Mg} \tag{2.34}$$

Magnezij-26 nastaje reakcijom alfa čestice i neona-23.

$$^{23}\mathrm{Ne}(\alpha,\mathrm{p})\ ^{26}\mathrm{Mg} \tag{2.35}$$

2.13 Silicij

Silicij je element sa 14 protona u svojoj jezgri. Postoje tri stabilna izotopa silicija u prirodu, to su:

^{28}Si, ^{29}Si i ^{30}Si.

Silicij može nastati pri gorenju kisika u zvijezdama preko najčešćih reakcija fuzije dvaju elemenata kisika:

$$^{16}\mathrm{O}(^{16}\mathrm{O}, 2\mathrm{p})\ ^{30}\mathrm{Si} \tag{2.36}$$

$$^{16}\mathrm{O}(^{16}\mathrm{O}, \alpha)\ ^{28}\mathrm{Si} \tag{2.37}$$

Fotodisentigracija neona je još jedan način na koji nastaje silicij. Neon koji je pobuđen visokoenergetskim fotonom se raspada na kisik i alfa česticu. Dio alfa čestica nastalih ovom reakcijom će reagirati s neonom što pokreće niz reakcija koje stvaraju silicij:

$$^{23}\mathrm{Ne}(\alpha, \gamma)\ ^{24}\mathrm{Mg}\ (\alpha, \gamma)^{28}\mathrm{Si} \tag{2.38}$$

$$^{23}\mathrm{Na}(\alpha, \mathrm{p})\ ^{26}\mathrm{Mg}\ (\alpha, \mathrm{n})^{29}\mathrm{Si} \tag{2.39}$$

2.14 Sumpor

Sumpor je element čija jezgra sadrži šesnaest protona. U prirodi nalazimo četiri stabilna izotopa ovog elementa, to su: ^{32}S, ^{33}S, ^{34}S i ^{36}S.

Postoji više mehanizama kojima se stvara sumpor. Najčešći izotop, ^{32}S, stvara se pri gorenju kisika u zvijezdama.

Gorenje kisika se događa kada u zvijezdama izgori sav neon, i počinje pri temperaturama

T = 1.5 – 2.7 GK. Jezgra zvijezde tada se sastoji najviše od kisika, magnezija i silicija. Najčešća reakcija tada postaje reakcije fuzije dvaju jezgara kisika što u izlaznom kanalu daje različite produkte.

Zanima nas reakcija:

$$^{16}\mathrm{O}(^{16}\mathrm{O},\alpha)\ ^{28}\mathrm{Si} \tag{2.40}$$

Reakcijom se stvara silicij-28 koji kasnije može reagirati sa alfa česticom i stvarati ^{32}S, i on je uz silicij jedan od najčešćih produkata gorenja ugljika. Izotopi ^{33}S i ^{34}S isto mogu nastati prilikom gorenja kisika, naravno u puno manjim količinama.

3 Nukleosinteza elemenata težih od željeza

Observirane količine težih elemenata, pritom mislimo na one s atomskim brojem $A \geq 60$, se ne mogu objasniti dosadašnjim mehanizmima u kojima se teži elementi stvaraju spajanjem dvaju elemenata u uvjetima dovoljno visokih temperatura koje omogućavaju nadvladavanje kulonske barijere. Udarni presjek reakcija težih elemenata u ulaznom kanalu je premalen, pa se pretpostavlja da su u procesima stvaranja teških elemenata sudjelovali neutroni; na njih ne djeluje električna sila odbijanja.

Isto tako, vidjet ćemo da u nukleosintezi težih elemenata sudjeluju nestabilne jezgre sklone β-raspadima.

Procesi uhvata neutrona se dijele na spore (s-procese) i brze (r-procese). Opisat ćemo svaki od njih.

3.1 s - procesi

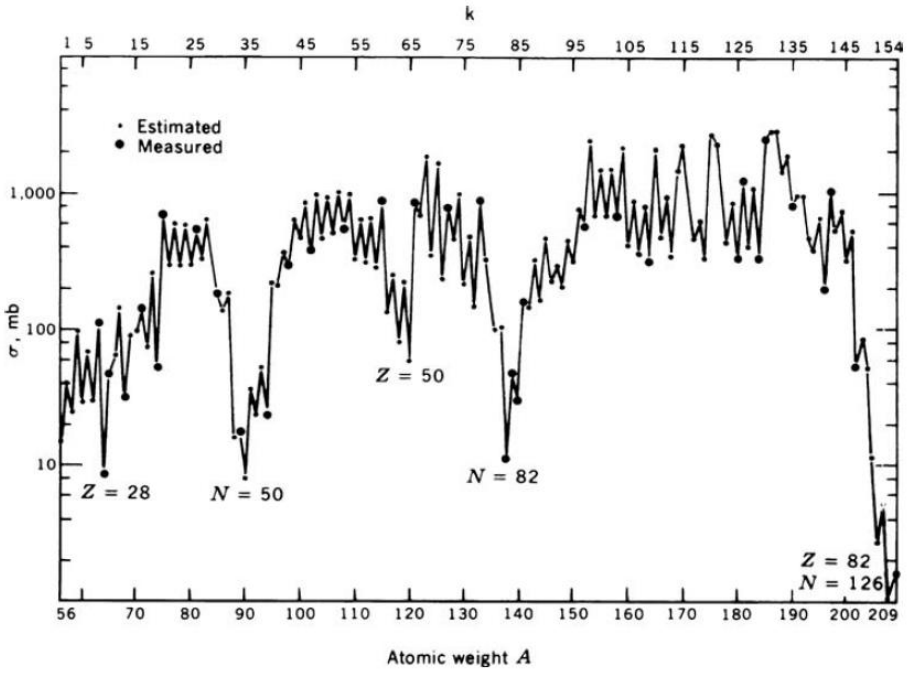
S-proces *ili slow-neutron-capture process* predstavlja niz reakcija koje su odgovorne za stvaranje oko polovice elemenata težih od željeza. Ovdje govorimo o sporim reakcijama uhvata neutrona. Ako je element nestabilan, dogodit će se beta raspad kojim će se stvoriti novi, teži, element. Ovakvi procesi su spori zato što je srednje vrijeme za uhvat neutrona puno veće od srednjeg vremena beta-raspada, što znači da će se jezgra nakon uhvata neutrona raspasti prije nego što se dogodi još jedan uhvat neutrona. Kod brzih r-procesa stvar je obrnuta. Srednje vrijeme za uhvat neutrona je puno manje od vremena beta-raspada što znači da element može uhvatiti više neutrona prije nego se raspadne. Time se objašnjavaju prisutnosti određenih elemenata od kojih neki pojedinačno mogu nastati samo s-procesima, a neki samo r-procesima. S-procesi traju i do tisuće godina, za razliku od brzih r-procesa koji se događaju u sekundama.

Dinamika ovih procesa ovisi i o količini slobodnih neutrona u zvijezdi. Izmjerene količine teških elemenata u pojedinim zvijezdama se mogu objasniti samo prisustvom velikog broja slobodnih neutrona, što bi značilo da moraju postojati reakcije odgovorne za proizvodnju neutrona.

Smatra se da su moguće reakcije $^{22}Ne(\alpha,n)\,^{25}Mg$ i $^{13}C(\alpha,n)\,^{16}O$ izvori neutrona. Preko vrijednosti udarnog presjeka i mjerenja količina elemenata nastalih u ovim reakcijama, dolazi se do zaključka da je druga reakcija glavna za proizvodnju neutrona. Iako se u takvim zvijezdama stvaraju teški elementi, postoje ljuske zvijezde bogate ugljikom i neprerađenim vodikom. Slobodni protoni se miješaju s ugljikom čime se stvara natrij koji se beta raspada u izotop ugljika koji se potom alfa raspada te pri tome emitira neutron.

S-procesi počinju sa željezom i završavaju sa elementom bismuta koji se onda alfa raspada.

Zatupljenosti određenih izotopa nastali s-procesima se mogu objasniti udarnim presjecima za uhvat neutrona. Sljedeća slika prikazuje vrijednosti udarnog presjeka u ovisnosti o broju neutrona izotopa na energiji oko 25 keV.

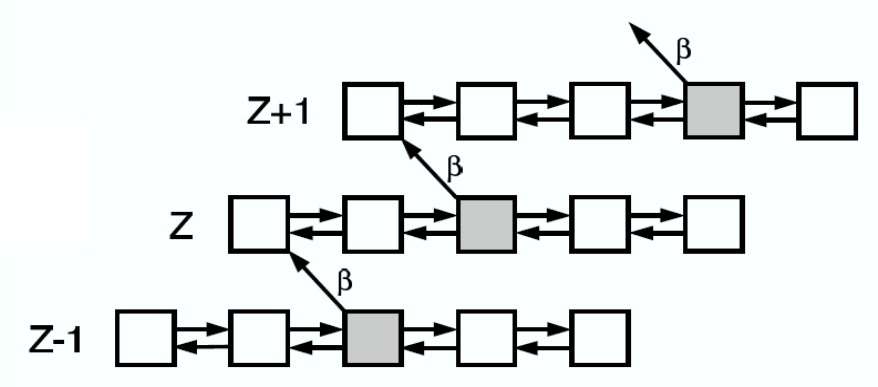


Slika 3.1. Vrijednosti udarnog presjeka u ovisnosti o broju izotopa na energiji 25 keV. Preuzeto iz Pagel, B. [2]

Količina nekog izotopa je obrnuto proporcionalna udarnom presjeku za uhvat neutrona. Vidimo izražene točke minimuma kod jezgara s magičnim brojevima (28,50,82), što znači da su to jezgre s najvećom energijom vezivanja, tj. najstabilnije jezgre.

3.2 r - procesi

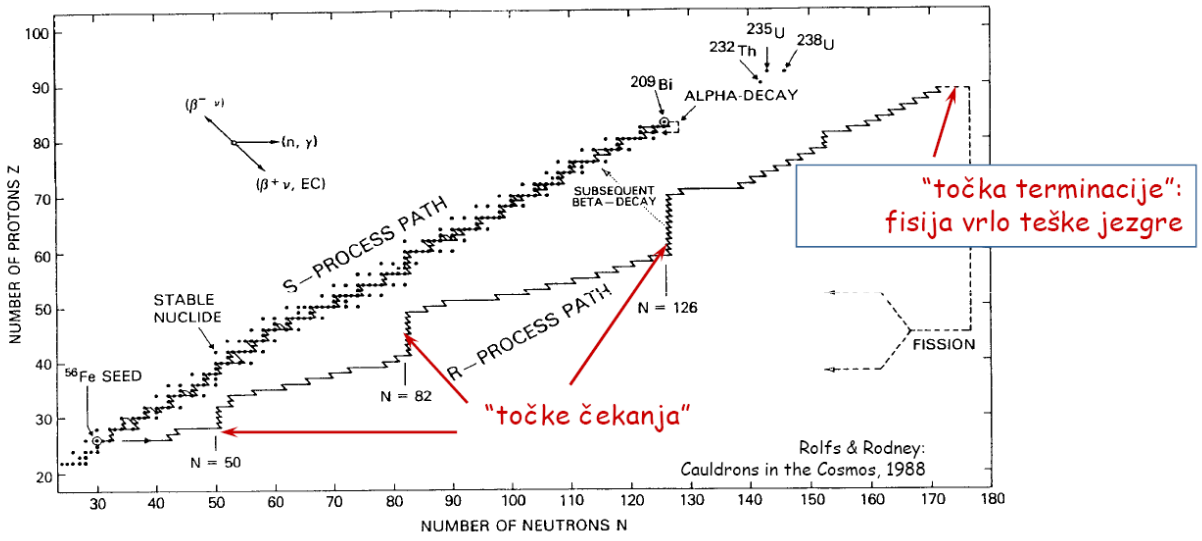
R-procesi ili brzi procesi uhvata neutrona na jezgri predstavljaju procese u kojima je srednje vrijeme uhvata neutrona puno manje od srednjeg vremena beta raspada. Takvi procesi traju po nekoliko sekundi. Smatra se da postoji određen broj elemenata do ^{210}Bi koji mogu nastati samo r-procesima. Isto tako, zna se i da u svemiru postoje količine elemenata poput ^{235}U, ^{238}U i ^{232}Th koje su alfa-radioaktivne, tj. pri raspadanju emitiraju alfa česticu pa je to još jedan dokaz u prilog tome da mora postojati još neki drukčiji mehanizam sinteze elemenata uz s-procese. Pri uzastopnom uhvatu neutrona, Q-vrijednost za tu reakciju postaje sve manja i manja, sve dok ne dođe do vrijednosti usporedive sa reakcijom raspada ili fotodisentigracije. Tada reakcije raspada postanu dovoljno intezivne da se mogu uspoređivati sa intezitetom reakcija uhvata neutrona. Svaki element dakle ima neku "točku čekanja", tj. jedan izotop za kojeg su reakcije njegovog nastajanja i nestajanja uravnotežene. To je ilustrirano na sljedećoj slici. Točke čekanja su označene sivom bojom.



Slika 3.2. Točke čekanja. Preuzeto iz Illiadis, C. [1]

Kada r-proces naiđe na jezgru s magičnim brojem neutrona, tada je Q-vrijednost za reakciju uhvata neutrona manja nego za reakcije s okolnim jezgrama što znači da je za niz susjednih elemenata točka čekanja izotop s tim magičnim brojem neutrona.

To se može vidjeti u sljedećoj slici koja prikazuje stazu r-procesa i s-procesa za elemente od željeza pa na dalje. Primijetimo vertikalne linije za svaki magični broj.



Slika 3.3 Staze r-procesa i s-procesa

3.3 p - procesi

p-procesi nisu procesi uhvata protona, kao što bi se moglo pomisliti iz imena. To se i mislilo sve dok se nije otkrio pravi mehanizam stvaranja pojedinih elemenata na ovaj način, od tuda se zadržalo i ime, p-proces.

Radi se zapravo o elementima s velikim brojem protona u području gdje je atomski broj oko 100. Naime, vjeruje se da se takvi elementi stvaraju fotodisentigracijom elemenata, točnije raspadom pri kojem se izbacuje neutron ili alfa čestica. Tada je produkt raspada element sa velikim brojem protona.

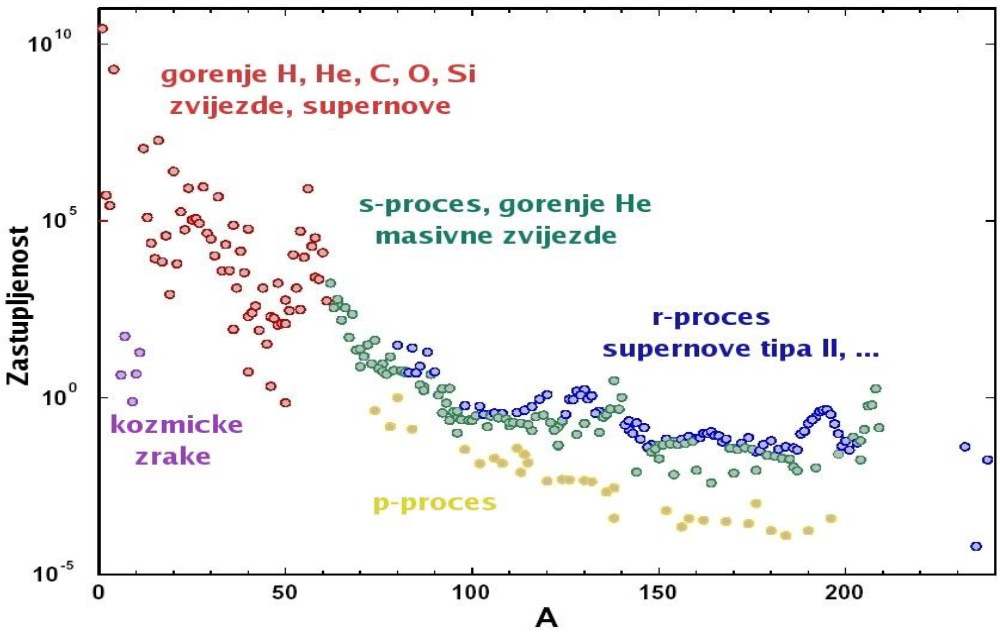
Ovakvim procesima mogu nastati elementi koji inače nastaju i putem s ili r procesa, no oni čine samo mali dio, oko 1 %, doprinosa količini tih elemenata.

No, postoje i pojedini elementi koji mogu nastati samo na taj način. Sljedeća slika prikazuje 33 elementa koja nastaju p-procesima.

Nuclide	Z	N	Abundance[a]	Contribution[b] (%)
^{74}Se	34	40	0.60	0.89
^{78}Kr	36	42	0.20	0.362
^{84}Sr	38	46	0.13	0.5580
^{92}Mo	42	50	0.370	14.525
^{94}Mo	42	52	0.233	9.151
^{96}Ru	44	52	0.099	5.542
^{98}Ru	44	54	0.033	1.869
^{102}Pd	46	56	0.0139	1.02
^{106}Cd	48	58	0.020	1.25
^{108}Cd	48	60	0.014	0.89
^{113}In	49	64	0.008	4.288
^{112}Sn	50	62	0.035	0.971
^{114}Sn	50	64	0.024	0.659
^{115}Sn	50	65	0.012	0.339
^{120}Te	52	68	0.005	0.096
^{124}Xe	54	70	0.007	0.129
^{126}Xe	54	72	0.006	0.112
^{130}Ba	56	74	0.005	0.106
^{132}Ba	56	76	0.005	0.101
^{138}La	57	81	0.0004	0.091
^{136}Ce	58	78	0.002	0.186
^{138}Ce	58	80	0.003	0.250
^{144}Sm	62	82	0.008	3.073
^{156}Dy	66	90	0.0002	0.056
^{158}Dy	66	92	0.0004	0.095
^{162}Er	68	94	0.0004	0.139
^{168}Yb	70	98	0.0003	0.12
^{174}Hf	72	102	0.0003	0.162
^{180}Ta	73	107	0.0000026	0.0123
^{180}W	74	106	0.0002	0.120
^{184}Os	76	108	0.0001	0.020
^{190}Pt	78	112	0.0002	0.014
^{196}Hg	80	116	0.001	0.15

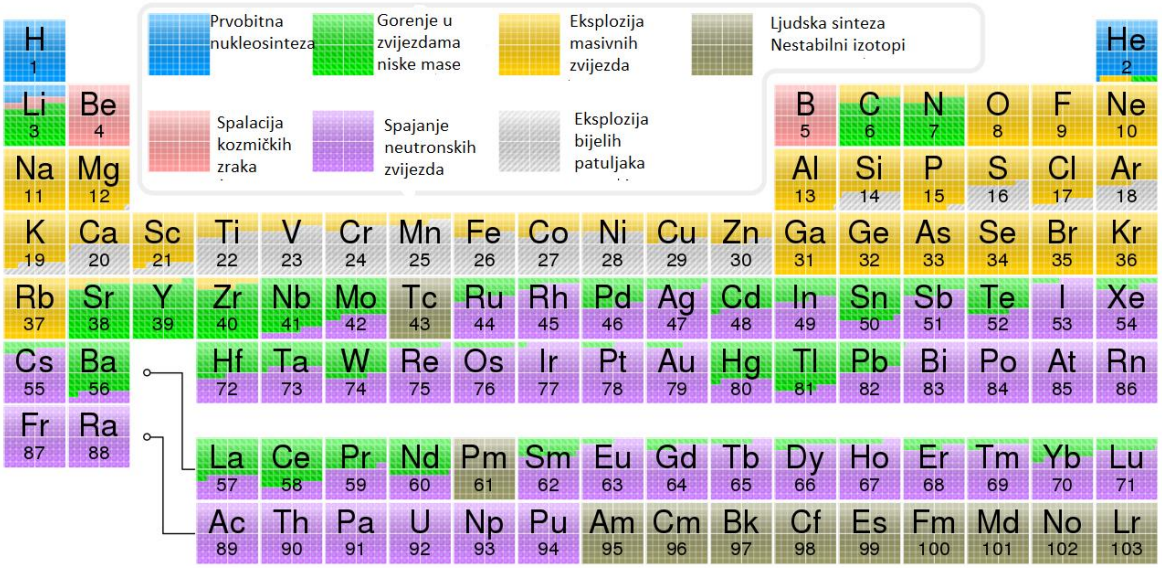
Tablica 3.1. Popis elemenata koji nastaju isključivo p-procesima.Preuzeto iz Illiadis, C. [1]

Sljedeća slika prikazuje ovisnost zastupljenosti elemenata o njihovom atomskom broju, uz napisane glavne načine nukleosinteze grupirane za više sličnih elemenata. Vidimo da lagani elementi najzastupljeniji i da nastaju uglavnom gorenjem u zvijezdama. Najteži elementi su puno manje zastupljeni i nastaju preko prethodno opisanih s, r ili p-procesa.



Slika 3.5 Ovisnost zastupljenosti elemenata o atomskom broju

Na kraju, ilustrirani prikaz periodnog sustava elemenata. Za svaki element je označeno njegovo porijeko.



Slika 3.6. Periodni sustav elemenata sa naznačenim porijeklom svakog od njih. Preuzeto s Wikipedije.

4 Nuklearna fizika u srednjoj školi

U ovom poglavlju ćemo pregledati koje se teme iz nuklearne fizike obrađuju u školi i koliko duboko. S tim u vezi proučit ćemo tipične udžbenike iz fizike za četvrti razred srednje škole, konkretno *Fizika 4* autora Vladimira Paara i *Fizika 4* autora Jakova Labora.

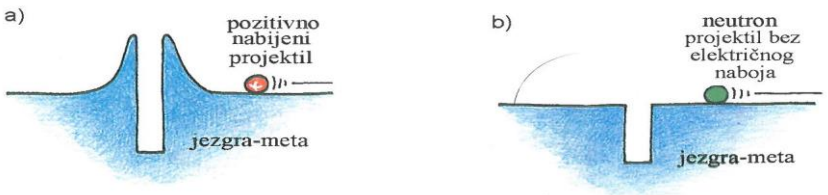
Usporedit ćemo poklapaju li se obrazovni ishodi u predmetnom kurikulumu za fiziku sa sadržajima u udžbenicima. Na kraju ćemo se osvrnuti na temu nukleosinteze i razmisliti kako bi je mogli uklopiti u školski program.

4.1 Teme koje se obrađuju i obrazovni ishodi

Gradivo nuklearne fizike u srednjoj školi se obrađuje pri kraju četvrtog razreda srednje škole. Za primjer ćemo uzeti dva prije navedena udžbenika fizike za četvrti razred srednje škole. Postoji nekoliko tema u području nuklearne fizike koje se obrađuju u srednjoj školi. Svi udžbenici obrađuju uglavnom građu atomske jezgre, nuklearne reakcije fisije i fuzije te radioaktivnost elemenata. Postoje neke razlike u pristupu u različitim udžbenicima.

U udžbeniku Vladimira Paara teme nuklearne fizike počinju jednostavnim definiranjima strukture atoma, nukleona, atomskog i masenog broja elementa te izotopa. Zatim se uvodi pojam jake sile pri čemu se opisuju njena svojstva. Definiraju se nuklearne reakcije, uvode se pojmovi jezgra-projektil i jezgra-meta. Na zanimljiv način se ilustrira mehanička analogija za nalet pozitivnog projektila na jezgru-metu i nalet neutrona na jezgru-metu. To pokazuje sljedeća slika.

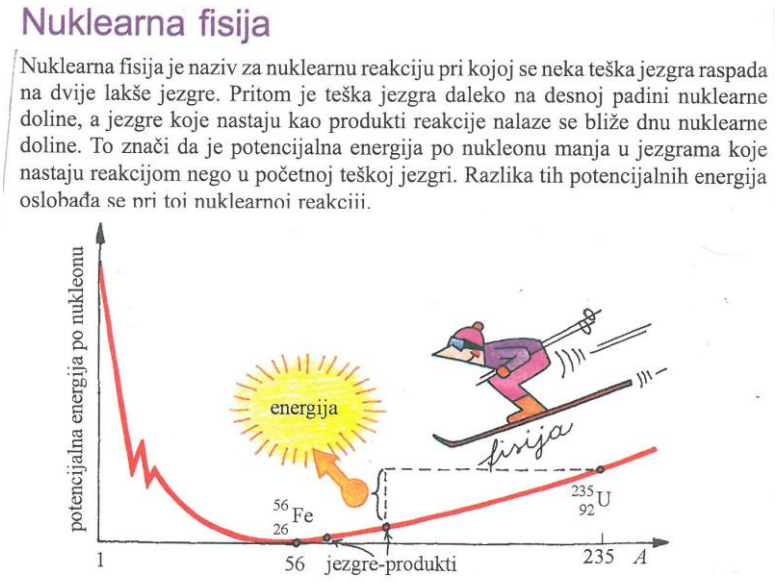
Početna jezgra u nuklearnoj reakciji (ona na koju nalijeće projektil) zove se **jezgra-roditelj**, a jezgre koje nastaju u nuklearnoj reakciji zovu se **jezgre-kćeri**.



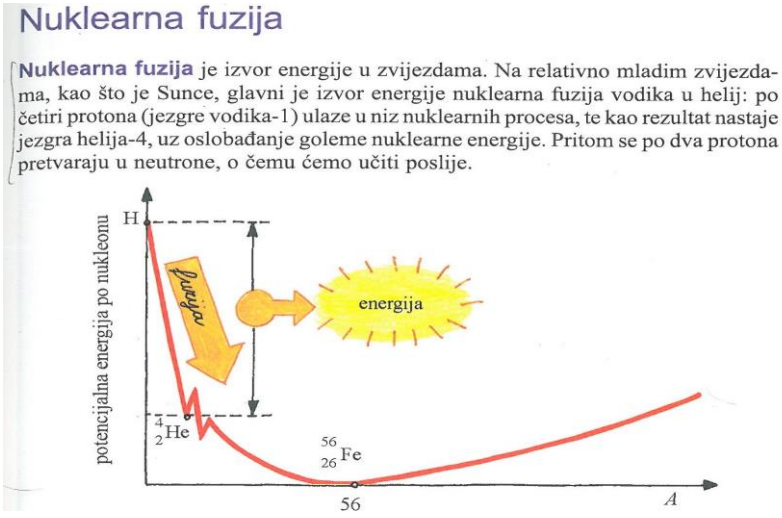
Zorna mehanička analogija za nalet neutrona-projektila na jezgru-metu prikazana je na slici b). Tada nema električnog odbijanja između neutrona-projektila i jezgre-mete pa nema vulkanskog brda oko jame. Zato projektil i sa sasvim malom energijom može doći do ruba jame i pasti u nju.

Slika 4.1 Mehanička analogija naleta neutrona projektila na jezgru metu. Preuzeto iz Paar, V. [4]

Opisuje se nuklearna dolina. Tada se počinje sa objašnjavanjem nuklearne fisije i nuklearne fuzije. S tim u vezi, u posebno odijeljenim proširenim sadržajima u poglavlju daju se poznati primjeri fisije urana i fuzije vodika u Suncu. Definira se defekt mase i energija vezanja atomske jezgre. Na kraju poglavlja stavljeni su zadatci kojima se provjerava stečeno znanje. Tek tada se počinje opisivati radioaktivnost.

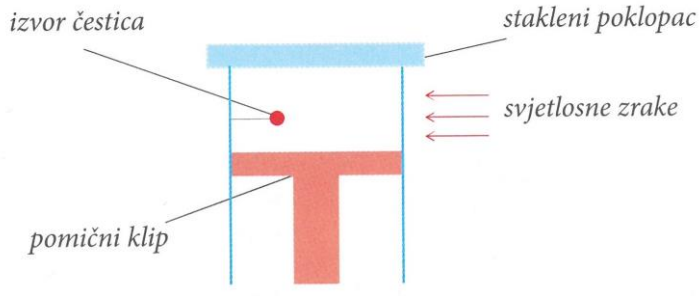


Slika 4.1 Prikaz nuklearne fisije. Preuzeto iz Paar, V. [4]

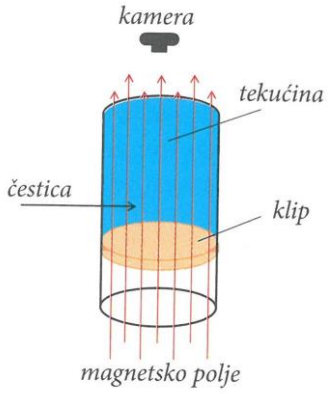


Slika 4.2 Prikaz nuklearne fuzije. Preuzeto iz Paar, V. [4]

S druge strane, udžbenik Jakova Labora uvodi učenike u svijet nuklearne fizike tako da se prvo objašnjavaju načini kojima otkrivamo subatomske čestice i kvante elektromagnetskog zračenja, fotone. Opisuju se načela rada različitih vrsta detektora, popraćeni shemama detektora.



Slika 4.3 Načelo Wilsonove maglene komore. Preuzeto iz Labor, J [6]



Slika 4.4. Shematski prikaz mjehuričaste komore. Preuzeto iz Labor, J. [6]

Nakon toga se opisuje Rutherfordovo otkriće strukture atomske jezgre, zatim otkriće neutrona. Tek onda se počinje s definiranjem ključnih pojmova nuklearne fizike, poput nuklearne sile, izotopa, nukleona i sl. Poslije toga se opisuje radioaktivnost, vrste radioaktivnih raspada, te zakon radioaktivnog raspadanja. Sljedeća poglavlja opisuju nuklearne reakcije, objašnjava se energija vezanja jezgre, zatim nuklearna fisija i nuklearna fuzija s primjerima reakcija u Suncu i sl.

U oba udžbenika se opisuje i primjena radioaktivnosti, npr. u medicinskoj dijagnostici ili u arheologiji.

Udžbenik Jakova Labora ima nešto drukčiji pristup, učeniku se više daje uvid u povijesni proces otkrića građe atoma, nuklearnih reakcija, radioaktivnosti i sl. Pri tome se spominju brojni poznati fizičari koji su sudjelovali u razvoju nuklearne fizike. S druge strane, udžebnik Vladimira Paara kreće od najjednostavnijih prema složenijim pojmovima i procesima u nuklearnoj fizici.

Obrazovni ishodi

U dokumentu *Nastavnog programa za gimnazije* koji je dostupan na stranicama NCVVO-a su dane smjernice na izvođenje nastave fizike u gimnazijama, za četverogodišnji program. U četvrtom razredu gimnazije je u dijelu gradiva *Atomska jezgra* dana napomena kojom se zbog nemogućnosti izvođenja pokusa u dijelu nuklearne fizike preporučuje povijesni pristup s opisom i kritičkim razmatranjem povijesnih pokusa koji su doveli do važnih otkrića poput radioaktivnosti, prve fisijske reakcije, neutrona i sl. Vidimo da udžbenik Jakova Labora koristi takav pristup. Nastavni program za gimnazije općenito, u didaktičkim uputama, preferira povijesni pristup zato što se smatra da se na osnovi povijesnih problema otvaraju problemske situacije u razredu, a njihovim rješavanjem dobiva se uvid u razvoj fizikalnih pojmova i fizike uopće.

S druge strane, u prijedlogu Nacionalnog kurikuluma nastavnog predmeta fizika za četvrti razred srednje škole s četverogodišnjim programom fizike dani su obrazovni ishodi u nastavi fizike. U programu s dva sata nastave fizike tjedno bira se modul A ili B, te se ovisno o tom odabiru ovi ishodi obrađuju više ili manje detaljno. Konkretno, nakon obrade gradiva građe atomske jezgre i nuklearnih reakcija učenik:

Objašnjava model atomske jezgre i nuklearne reakcije *(odgojno obrazovni ishod)*

Razrada ishoda:

- *Opisuje građu atomskih jezgara*
- *Opisuje jaku silu*
- *Objašnajva nuklearne reakcije*
- *Opisuje defekt mase i povezuje ga s energijom*
- *Objašnjava procese nuklearne fisije i fuzije*

Nakon obrade gradiva radioaktivnosti učenik:

Analizira radioaktivne raspade i opisuje učinke ionizirajućeg zračenja na žive organizme *(odgojno obrazovni ishod)*

Razrada ishoda:

- *Opisuje svojstva radioaktivnih zračenja te analizira njihove primjene i učinke na žive organizme*
- *Analizira i primjenjuje zakon radioaktivnog raspada*
- *Opisuje načine detekcije ionizirajućeg zračenja*

Iz navedenih obrazovnih ishoda u prijedlogu kurikuluma možemo zaključiti da su navedeni obrazovni ishodi pokriveni u oba udžbenika.

Istraživački usmjerena nastava u obradi nuklearnih tema

Prijedlog kurikuluma za fiziku navodi da učenici pri učenju fizike trebaju razviti sposobnosti znanstvenog razmišljanja i upoznati načine stjecanja znanja u tom području, što bi značilo da učenici trebaju biti upoznati i sa znanstvenim metodama, a ne samo s rezultatima. Istraživački usmjerena nastava se temelji na istraživačkom pristupu i interaktivnosti. Interaktivnost se postiže primjenom interaktivnih nastavnih metoda poput vođenja razredne rasprave, korištenja kartica za odgovaranje na konceptualna pitanja s ponuđenim odgovorima, rješavanja zadataka u manjim skupinama, demonstracijama pokusa, upotrebi interaktivnih računalnih simulacija itd.

Kako bismo nuklearne teme u školi prezentirali na istraživački način? Računski zadatci se i neće baš rješavati u ovom dijelu gradiva, a pokusi nuklearne fizike se ne mogu izvoditi u školskom razredu. Ono što možemo koristiti su računalne simulacije preko kojih bi se učenici pobliže upoznali s pojavama poput radioaktivnog raspada, nuklearne fisije i fuzije i sl. Na taj način uvodi se istraživački element u nastavu koji potiče učeničku intelektualnu aktivnost i radoznalost. Pravila za izvođenje računalnih simulacija u nastavi fizike su ista kao i za izvođenje pravih pokusa:

- *Opisati postav pokusa u simulaciji, kako je što spojeno i postavljeno*
- *Provjeriti znaju li učenici što instrumenti u simulaciji mjere i kako se mjeri, koji se parametri mogu mijenjati*
- *Prije pokretanja simulacije reći što ćemo učiniti (ne i što će se dogoditi)*
- *Pitati učenike što očekuju da će se dogoditi i zašto (ako je pokus opservacijski, ovaj dio se može izostaviti)*
- *Nakon izvođenja simulacije pitati učenike što su opazili*
- *Izvesti pokus više puta da ga učenici dobro promotre*
- *Nakon što se učenici usuglase oko opažanja, prelazi se na interaktivno tumačenje*

Osnovna struktura sata u istraživački usmjerenoj nastavi se sastoji od uvodnog, središnjeg i završnog dijela. Uvodni dio počinje otvaranjem problema pitanjem ili demonstriranjem nove pojave. Učenici upoznavanjem nove pojave dobivaju motivaciju i orijentaciju za daljnje istraživanje. Središnji dio je istraživački i počinje istraživačkim pitanjem, potom se provodi istraživački pokus koji daje odgovor na postavljeno pitanje, a završava konstrukcijom modela i matematičkim opisom nove pojave. U završnom dijelu učenik primjenjuje i evaluira novo stečena znanja i konstruirani model. Koriste se konceptualna pitanja i aplikacijski pokusi kako bi se evaluiralo i produbilo njihovo znanje.

4.2 Nukleosinteza u školskom programu

Nukleosinteza je, kao što je već i opisano kroz cijeli diplomski rad, proces kojim nastaju atomske jezgre od već postojećih jezgara i slobodnih elementarnih čestica.

Kako bismo uklopili temu nukleosinteze u školski program?

Temu nukleosinteze je najbolje obrađivati nakon obrađenih nuklearnih tema, dakle nakon opisa građe atomske jezgre, nuklearnih reakcija i radioaktivnih raspada. Tada učenik ima potrebno predznanje uz pomoć kojega će najbolje shvatiti procese nukleosinteze elemenata u Svemiru. Učenik tada razlikuje elementarne čestice, njihova svojstva i fundamentalne sile u prirodi kojima one međudjeluju jedna na drugu. To mu daje potrebna znanja koja će upotrijebiti pri obradi procesa nukleosinteze.

Nukleosintezu bih u školskom programu podijelio na dijelove. Svaki dio bi predstavljao određenu nukleosintezu. Tako bih najprije obradio prvobitnu nukleosintezu, dakle proces stvaranje jezgara u ranoj evoluciji Svemira. Pri tome bi se opisivala teorija velikog praska. U udžbenicima se obrađuje teorija velikog praska, spominju se tzv. epohe, tj. vremenski dijelovi procesa nakon velikog praska u kojima se opisuje stanje Svemira u određenom trenutku nakon početka.

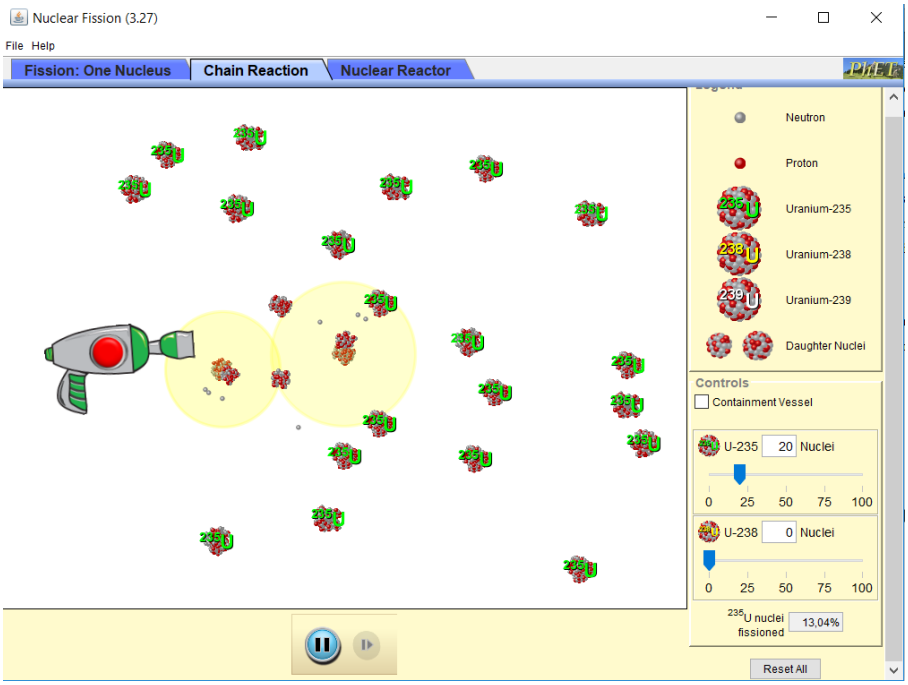
Pri tome se spominju procesi fuzije protona i neutrona pri kojima se stvaraju jezgre deuterija i helija-4. Ti procesi predstavljaju prvobitnu nukleosintezu i učenik ovdje dobiva uvid u reakcije koje su se događale i povezuje to s naučenim definicijama nuklearnih reakcija, u ovom slučaju nuklearne fuzije.

Onda bih obradio razvoj zvijezda. Opisivale bi se nuklearne reakcije u zvijezdama kojima se stvaraju teži elementi. Prvo bi se ukratko objasnio nastanak nebeskog tijela – zvijezde, te bi se opisale sile koje utječu na njeno stezanje i to povezivalo s promjenom temperature u njenoj jezgri. Promjena temperature bi se povezala s povećanjem energije i stvaranjem uvjeta za nuklearnu fuziju. Učenik je već prethodno upoznat s pojmom nuklearne fuzije i uvjetima potrebnim za pokretanje reakcije, a kroz prikaz procesa spajanja vodika u helij učenik bi dobio uvid u procese koji se događaju u zvijezdama.

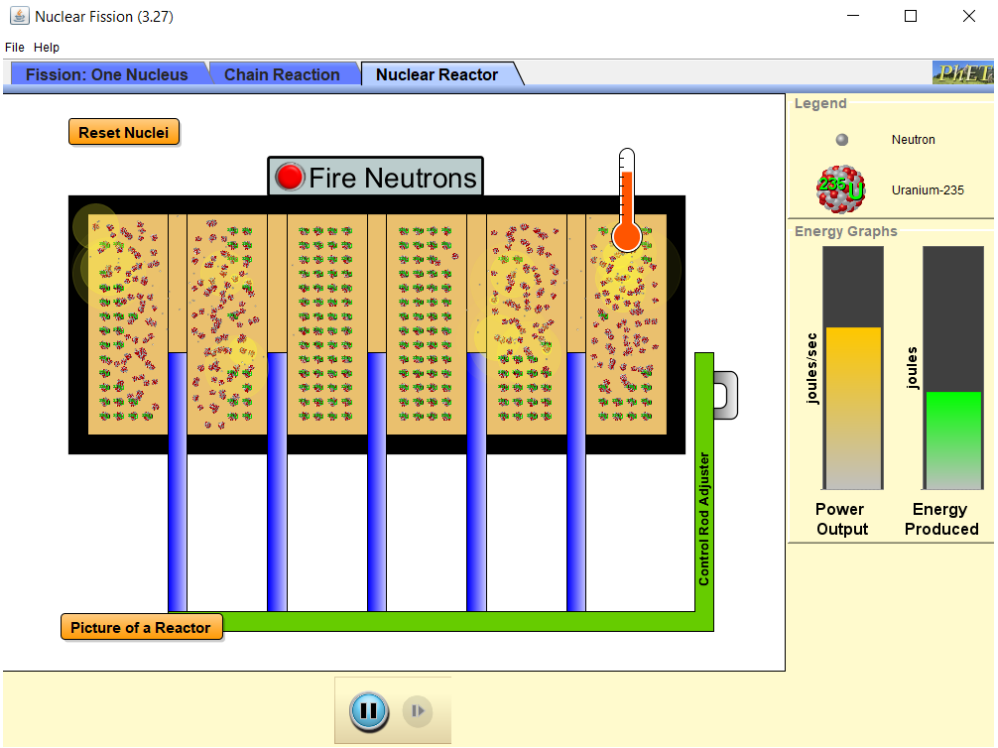
Nakon toga bi se sažeto predstavila sinteza teških elemenata putem s-procesa, r-procesa i p-procesa. U udžbenicima se kratko spominju takvi procesi. Spomenuo bih i procese sinteze elemenata putem djelovanja kozmičkog zračenja, no, tema nuklesinteze bi se prvenstveno bavila procesima prilikom prvobitne nukleosinteze i procesima u zvijezdama.

Primjer računalne simulacije

Postoji više simulacija za različite nuklearne procese koje možemo koristiti u razredu. Sljedeći primjer prikazuje simulaciju raspada jezgre uranija prilikom uhvata neutrona, te simulaciju u okruženju nuklearne elektrane.



Slika 4.5 Simulacija lančanih reakcija raspada uranija-235 uhvatom neutrona.



Slika 4.6. Simulacija nuklearnog reaktora.

U ovoj simulaciji raspada jezgre uranija učenici mogu mijenjati i namještati broj jezgara uranija-235 i uranija-238 na koje će zatim ispaliti jedan neutron. Tada se promatra reakcija uhvata neutrona i lančana reakcija koja slijedi. Sa strane na dnu je prikazan postotak uranija-235 koje su se raspale u vremenu.

U simulaciji nuklearnog reaktora učenici mogu mijenjati kontrolne šipke u reaktoru gore-dolje, te tako vidjeti kako to utječe na odvijanje samih reakcija i energiju koja se pritom stvara. Sa strane je prikazan dijagram oslobođene energije i snage. Ova simulacija bi se mogla upotrijebiti kao aplikacijski pokus u završnom dijelu sata gdje bi učenici primijenili koncept radioaktivnosti u novom kontekstu za objašnjavanje načina rada nuklearnih reaktora.

Nastavnik ove simulacije izvodi po pravilima za izvođenje pokusa, dakle prije početka opiše postav simulacije, postavljanje jezgara uranija itd., a zatim najavi da će ispaliti neutron u jezgru i pita učenike što misle da će se dogoditi nakon toga. Nakon više puta izvedene simulacije s različitim brojem postavljenih jezgara, kroz vođenu raspravu učenici se usuglase oko onoga što su opazili. Ista stvar se može ponoviti na simulaciji nuklearnog reaktora, pri kojoj nastavnik može postavljati pitanja kojima će pokrenuti razrednu raspravu poput: *Što se događa kada spuštamo, a što kada podižemo kontrolnu šipku? Kako to utječe na proizvedenu energiju u reaktoru?* i sl.

5 Zaključak

Glavna zadaća ovog diplomskog rada je bila na jednostavan način opisati i objasniti kako su nastali i kako nastaju pojedini kemijski elementi i na koji način. Sve je to obrađeno na takvom nivou da ovaj rad mogu razumjeti i učenici srednje škole. Ovaj diplomski rad bi trebao biti takav da može poslužiti i kao izvor dodatnih informacija za proširene sadržaje nastave fizike u srednjoj školi i sl.

Možemo primijetiti kako u ovom području moderna znanost još uvijek ima puno neodgovorenih pitanja i izazova pred sobom. Kroz sljedeće godine neka od njih će sigurno biti i odgovorena i razumijevanje procesa nastanka elemenata će biti sve bolje i bolje, no sigurno će proći još dugo vremena dok se ne nađu objašnjenja za neke druge procese.

Sve u svemu, ovo područje je još uvijek velikim dijelom otvoreno za rasprave i istraživanja, i kao takvo se mora i promatrati. Istraživanje Svemira ima tu manu da se razni eksperimenti i hipoteze ne mogu testirati jer je nemoguće rekonstruirati uvjete u Svemiru na Zemlji. Tu je i problem sa još uvijek nedovoljno razvijenom tehnologijom koja bi nam uvelike pomogla u promatranju Svemira i nuklearnih procesa u zvijezdama.

Literatura

[1] Iliadis, C. Nuclear Physics of Stars, 2. izd. Wiley-WCH 2015.

[2] Pagel, B. Nucleosynthesis and Chemical Evolution of Galaxies, 2. izd Cambridge University Press

[3] Milin, M. Nuklearna Astrofizika, Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet, 2017.

[4] Paar, V. Fizika 4, Zagreb: Školska Knjiga, 2005.

[5] Labor, J. Fizika 4, 2. izd. Zagreb: Alfa, 2008.

[6] Ryan S., Norton A. Stellar Evolution and Nucleosynthesis, Cambridge University Press, 2010.

[7] Predmetni kurikulum iz fizike, http://mzos.hr/datoteke/10-Predmetni_kurikulum-Fizika.pdf

[8] Nastavni plan i program za gimnazije, http://dokumenti.ncvvo.hr/Nastavni_plan/gimnazije/obvezni/fizika.pdf