

# Proizvodnja zlata u eksplozijama supernove i sudarima neutronskih zvijezda

---

**Paulik, Anamarija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:582492>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-20**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

Anamarija Paulik

PROIZVODNJA ZLATA U EKSPLOZIJAMA  
SUPERNOVE I SUDARIMA NEUTRONSKIH  
ZVIJEZDA

Diplomski rad

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ  
FIZIKE I KEMIJE; SMJER: NASTAVNIČKI

**Anamarija Paulik**

Diplomski rad

**Proizvodnja zlata u eksplozijama  
supernove i sudarima neutronske  
zvijezde**

Voditelj diplomskog rada: prof. dr. sc. Nils Paar

Ocjena diplomskog rada: \_\_\_\_\_

Povjerenstvo: 1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

4. \_\_\_\_\_

Datum polaganja: \_\_\_\_\_

Zagreb, 2019.

Veliku zahvalnost, u prvom redu, dugujem svom mentoru i voditelju diplomskog rada prof. dr. sc. Nilsu Paaru koji mi je strpljivo i velikodušno pomagao svojim savjetima i znanjem pri izradi ovog diplomskog rada prošlih mjeseci.

Također, zahvaljujem se svim profesorima i asistentima koji su bili dio mog studiranja i školovanja bez kojih ne bih izabrala i sa zadovoljstvom studirala nastavnički smjer fizike i kemije, te svojim prijateljima i kolegama koji su uvijek bili uz mene i ohrabivali me tijekom studija.

Posebnu zahvalnost iskazujem svojoj obitelji koja me bodrila kroz život i bez kojih moja postignuća ne bi bila moguća.

## Sažetak

Tijekom posljednjih nekoliko desetljeća znanstvenici istražuju kojim nuklearnim procesima nastaju teži elementi, što uključuje i zlato, a još veći interes predstavlja razumijevanje okruženja na kojima bi se ti procesi mogli izvesti. Većina zlata koje se nalazi u prirodi je izotop zlata  $^{197}\text{Au}$  čija je jezgra bogata neutronima i čini ga teškim metalom. Zlato ne nastaje na Zemlji, ali ne nastaje niti fuzijom u zvijezdama. Kako bi nastali elementi teži od željeza  $^{56}\text{Fe}$ , koje je finalni produkt fuzije u zvijezdama, potrebna je druga vrsta procesa. Posebice, uočeno je da je proces brzog uhvata neutrona (*r*-proces) koji se odvija u visokoentropijskom području bogatom neutronima jedna moguća varijanta procesa koji stvaraju teške elemente. Takva okruženja u svemiru moguća su u eksplozijama supernove tipa II i u sudarima neutronske zvijezde. Budući da je nastanak zlata popraćen eksplozivnim događajima, oni će atomizirano zlato raspršiti kroz svemir, čak i do Zemlje. Pri evoluciji supernove tipa II područja koja su bogata neutronima su “vrući mjehurić”, koji nastaje neposredno prije nego što zvijezda eksplodira, i neutrinski vjetar koji potpomaže eksploziji zvijezde i izbacuje materiju bogatu barionima što omogućava odvijanje *r*-procesa. Pri sudarima neutronske zvijezde također postoji neutrinski vjetar, ali se nukleosinteza također odvija i u dinamički izbačenoj materiji koja je direktna posljedica sudara. U radu će se opisati i usporediti nukleosinteza teških elemenata, uključujući i zlato, *r*-procesom koji se odvija u dva navedena okruženja u svemiru.

Ključne riječi: zlato, nukleosinteza, uhvat neutrona, *r*-proces, supernova, neutrinski vjetar, neutronske zvijezde, sudar neutronske zvijezde

# The synthesis of gold in supernovae explosions and neutron star mergers

## Abstract

In the last few decades scientists were investigating nuclear processes of relevance for the synthesis of heavy elements, including gold, and possible environments in the universe where these processes could occur. Most of the gold found in nature is a stable isotope  $^{197}\text{Au}$  and its nucleus is rich in neutrons which makes the metal heavy. It is known that gold does not originate from the Earth, but it also does not originate from the fusion in the stars. In order to create elements heavier than  $^{56}\text{Fe}$ , iron being the final product of the fusion in the stars, the process of neutron capture is required. Moreover, it is perceived that the process of rapid neutron capture (*r*-process) that takes place in a high-entropy neutron-rich region represents the process responsible for the creation of heavy elements. Locations in the universe that match required conditions are found within the environment of explosions of stars such as type II supernovae and neutron stars mergers. Due to explosive events accompanying the synthesis of gold, newly formed atomized gold is distributed throughout the universe, and it can even reach the Earth. During the evolution of a type II supernova, relevant environment for the nucleosynthesis include neutron-rich area known as “hot bubble”, which arises just before the star explodes, and the neutrino wind that adds up to the star's explosion and releases the material rich in baryons which enables the *r*-process to take place. In the neutron star mergers neutrino driven wind is also observed, but as a direct consequence of the collision nucleosynthesis also occurs in dynamically ejected matter. This work describes and compares the nucleosynthesis of heavy elements, as well as gold, via the *r*-process that takes place within before mentioned environments in the universe.

Keywords: gold, nucleosynthesis, neutron capture, *r*-process, supernova, neutrino driven wind, neutron star, neutron star merger

## Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Element: zlato .....	3
2.1. Fizikalna i kemijska svojstva zlata .....	3
2.2. Legure zlata i njihova primjena.....	7
2.3. Zlato kao ruda i rafiniranje zlata .....	9
3. Nukleosinteza zlata u svemiru .....	13
3.1. Stvaranje jezgara do stabilne jezgre željeza $^{56}\text{Fe}$ .....	14
3.2. Uхват neutrona – sinteza jezgara težih od željeza.....	22
3.2.1. r–proces .....	25
3.3. Supernove.....	35
3.3.1. Nukleosinteza u eksplozijama supernove.....	40
3.4. Neutronske zvijezde.....	44
3.4.1. Nukleosinteza pri sudarima neutronskih zvijezda .....	50
4. Zaključak .....	53
5. Metodički dio diplomskog rada .....	56
5.1. Interaktivna istraživački usmjerena nastava.....	56
5.2. Nuklearna fisija i fuzija.....	57
5.3. Fisija i fuzija u nastavi .....	60
5.4. Nastavna priprema – tijekom nastavnog sata.....	62
Literatura .....	73

## 1. UVOD

Zlato je od davnih vremena fasciniralo ljudski rod. Od starih Egipćana i Grka, potrage za zlatnim gradom El Doradom i alkemičara pa sve do današnjih vremena gdje je zlato iskaz luksuza, ali i jako lijep nakit. Fascinacija zlatom potječe od prekrasne žute boje i sjaja zlata, vrijednosti koju su ljudi pripisali zlatu jer je rijedak metal, te u novije vrijeme od raznolikih uporaba tog inertnog *plemenitog* metala u medicini, elektrotehnici i sličnome. No nažalost, zlato je rijetko na zemlji. Točnije, svo zlato koje postoji na Zemlji nije nastalo na Zemlji, već u svemiru.

Razlog malih količina zlata su specifični procesi i uvjeti potrebni da ono nastane. Ti uvjeti podrazumijevaju velike količine energije i već proizvedene količine lakših elemenata koji bi služili kao sirovine za daljnji nastanak drugih težih elemenata, a takve uvjete pronalazimo samo u zvijezdama. U svojem središnjem dijelu zvijezde egzotermnim nuklearnim reakcijama fuzije proizvode teže jezgre iz lakših nizom procesa koji doprinose nukleosintezi. Tipovi jezgara koji se mogu proizvesti u sredici zvijezde ovise o karakteristikama zvijezde, njenoj masi i temperaturi. Zvijezde koje imaju dovoljno veliku masu posljedično imaju i jake gravitacijske sile koje omogućuju fuziju težih elemenata pritom održavajući sredicu u hidrostatičkoj ravnoteži. Jake gravitacijske sile su zaslužne za fuziju, odnosno združivanje većeg broja nukleona unatoč odbojnoj elektromagnetskoj sili. Porastom temperature u središnjem dijelu zvijezde raste i energija što povećava mogućnost nastanka težih jezgara. Proces stvaranja težih jezgara zaustavlja se na proizvodnji stabilnog izotopa željeza  $^{56}\text{Fe}$ . Njegova je stabilnost posljedica opaženog maksimuma energije vezanja po nukleonu za  $A = 56$ . Kako zlato kao kemijski element ima veći broj nukleona od željeza, mora postojati barem još jedan proces koji bi omogućavao sintezu težih elemenata, pa tako i zlata. Opažena su dva procesa koja se uklapaju u sliku sinteze težih elemenata, a to su uhvat neutrona i beta raspad ( $\beta$ -raspad). Uхват neutrona podrazumijeva dodatak jednog slobodnog neutrona u već neutronima bogatu jezgru što dovodi do povećanja broja nukleona u jezgri dok se  $\beta$ -raspadom broj nukleona ne smanjuje, ali se mijenja omjer broja protona i neutrona  $Z/N$  unutar jezgre pretvarajući neutrone u protone, pritom emitirajući elektrone i elektronske antineutrinoe, čineći jezgru stabilnijom. Budući da  $\beta^-$ -raspad povećava broj protona u jezgri, on je direktno odgovoran za sintezu teških elemenata. Prateći brzine uhvata neutrona i  $\beta^-$ -raspada možemo raspoznati dva procesa nukleosinteze – spori  $s$ -proces (*slow process*) koji je karakteriziran  $\beta^-$ -raspadom između uzastopnih uhvata neutrona te stvara kemijske



elemente poput stroncija, barija i olova, i brzi  $r$ -proces (*rapid process*) karakteriziran nizom brzih uhvata neutrona što onemogućuje  $\beta^-$ -raspad između uzastopnih uhvata neutrona pa se tako stvaraju kemijski elementi poput zlata i urana. Kako bi se  $r$ -proces odvio prvo treba zadovoljiti par uvjeta – potreban je izvor snažnog toka neutrona, teška začetna jezgra (poput jezgre atoma željeza) koja bi primila te neutrone, vruća i gusta okolina koja bi združila začetnu jezgru i neutrone, te eksplozivnan događaj koji bi novonastale kemijske elemente izbacio u svemir. U zvijezdama su zadovoljeni gotovo svi uvjeti, osim eksplozivnog događaja koji izbacuje novonastale elemente u svemir. Takva eksplozija događa se kada zvijezda potroši svo svoje nuklearno gorivo, postane nestabilna i uruši se sama u sebe pritom emitirajući velike količine energije i materije. Taj događaj naziva se supernova. Prateći procese koji se odvijaju u eksplozijama supernove, znanstvenici su došli do zaključka da se u supernovama može odviti  $r$ -proces, no kemijski elementi koji nastaju u modelima  $r$ -processa ne pokazuju u potpunosti poklapanje s detektiranim količinama teških elemenata. Stoga je trebalo pronaći još neko drugo okruženje u svemiru pogodno za odvijanje  $r$ -processa i kao kandidat je predložen sudar dviju neutronske zvijezde. Dvije neutronske zvijezde međusobno se privlače gravitacijskim silama, sve do njihovog sudara koji ima dva ishoda – nastat će ili nova veća neutronska zvijezda ili crna rupa. Sudar dviju zvijezda izbacuje izrazito velike količine materije u svemir uključujući i teške elemente poput zlata. Supernove i sudari neutronske zvijezde su povoljna okruženja za stvaranje elemenata  $r$ -processa, no razlika je u količini stvorenih elemenata, gdje sudari neutronske zvijezde stvaraju mnogo veće količine zlata od supernova, te u učestalosti tih događaja, gdje su sudari neutronske zvijezde vrlo rijetki (otprilike se dogodi 1 sudar neutronske zvijezde na 1000 eksplozija supernova [1]).

Ovaj rad osvrnut će se na nuklearne procese koji su odgovorni za sintezu zlata, te posebice  $r$ -proces koji se odvija u eksplozijama supernova i sudarima neutronske zvijezde. Budući da teške jezgre koje nastaju pri  $r$ -procesu imaju maseni broj  $A > 56$  dok je maseni broj stabilnog izotopa zlata 197, u radu će se sagledati kako nastaju jezgre oko vrha  $A = 195$  opaženog pri analizi zastupljenosti elemenata u Sunčevom sustavu te će se usporediti procesi nukleosinteze i njeni produkti nastali u spomenutim okruženjima u svemiru.

## 2. ELEMENT: ZLATO

Naziv za zlato potječe od karakterističnog izgleda samog metala, njegove boje. Izvori upućuju na stari sanskrtski glagol *jval* čije je značenje "sjati". Dolaskom u Europu taj se izraz prilagodio u staro norveški naziv *gull* i gotički *gulth* iz čega je prepoznatljiv današnji engleski naziv *gold*. Kemijski simbol za zlato Au također potječe od latinskog značenja "sjati", *aurum* [2].

U prirodi je zlato poprilično rasprostranjeno, ali u jako malim koncentracijama. Prisustvo zlata može se pronaći u mnogim prirodnim supstancama poput granita (oko 0,37 ppm), gline, vapnenca (oko 0,007 ppm), različitim kamenim solima pa čak i u morskoj vodi (oko 0,0005 ppm) [3]. Ta oskudnost čini zlato rijetkim metalom. U prirodi se javlja u dva oblika – kao čisto zlato i u mineralima.

Zlato ima svoje mjesto u periodnom sustavu elemenata i nalazi se u 6. periodi i 11. skupini i to je mjesto zauzelo jer ima 79 protona unutar svoje jezgre. Elektronska konfiguracija zlata je  $[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^{10} 6s^1$ , i budući da ima popunjenu d ljusku zlato je kemijski element prijelaznih metala d bloka. Relativna atomska masa zlata je 196,967. Ovako dobro određena vrijednost ukazuje na činjenicu da je većina zlata kojeg nalazimo u prirodi (gotovo 100%) izotop zlata  $^{197}\text{Au}$ . Naravno da postoji još izotopa zlata, no jedino je izotop  $^{197}\text{Au}$  stabilan, dok su ostali nestabilni (radioaktivni) [2,4].

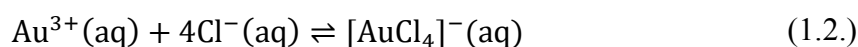
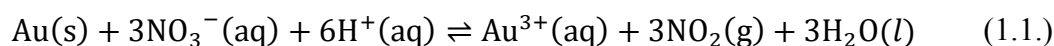
### 2.1. Fizikalna i kemijska svojstva zlata

U elementarnom stanju zlato je plemenit metal žute boje i visokog sjaja. Kao metal, zlato je vrlo mekano i kovno. Dobro provodi struju i toplinu, no naspram trijade u kojoj se nalazi (Cu, Au, Ag), ne provodi tako dobro toplinu niti električnu struju kao bakar i srebro [3]. Zbog svoje se gustoće od  $19,3 \text{ g cm}^{-3}$  može opisati kao težak metal, što je bitno kod rudarenja zlata. U tablici 1 prikazana su neka fizikalna i kemijska svojstva zlata.

Simbol	Au
Atomski broj	79
Relativna atomska masa	196,966569
Stabilni izotopi	<sup>197</sup> Au
Glavni nestabilni izotopi (i vrste raspada kojima izotopi podliježu)	<sup>195</sup> Au (uhvat elektrona) <sup>196</sup> Au ( $\beta^+$ i $\beta^-$ ) <sup>198</sup> Au ( $\beta^-$ ) <sup>199</sup> Au ( $\beta^-$ )
Agregacijsko stanje pri sobnoj temperaturi	kruto
Kristalni sustav	kubični; plošno centrirani (FCC)
Talište / °C	1064,2
Vrelište / °C	2836,0
Gustoća / g cm <sup>-3</sup>	19,3
Tvrdoća (Mohrova skala od 1-10)	2,5; mekan metal
Youngov modul elastičnosti / GPa	79
Molarni toplinski kapacitet / J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	25,42
Toplinska vodljivost / W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	318
Električna otpornost (20 °C) / nΩ m	22,14
Najzastupljenija oksidacijska stanja	+1, +3
Ostala oksidacijska stanja	-1, 2, 5
Prva energija ionizacije / eV	9,22
Druga energija ionizacije / eV	20,52
Elektronski afinitet / Kj mol <sup>-1</sup>	222,75
Elektronegativnost (Paulingova skala)	2,4
Standardni redoks-potencijal Au <sup>+</sup> /Au / V	+1,83
Standardni redoks-potencijal Au <sup>3+</sup> /Au / V	+1,52
Magnetičnost	dijamagnetičnost
Atomski radijus nevezanog atoma / pm	144
Ionski radijus Au <sup>+</sup> / pm	137
Van der Waalsov radijus / pm	217

Tablica 1. Fizikalna i kemijska svojstva zlata [2,3,4,5,6].

Poznato je da je topljivost zlata specifična i da je otopina u kojoj je zlato jako dobro topljivo zlatotopka, po čemu je i dobila ime. Zlatotopka ili carska voda (lat. i engl. *aqua regia*) je otopina spravljena miješanjem koncentrirane dušične kiseline i klorovodične kiseline u molarnom omjeru 1:3, žuto-narančaste je boje i zbog prisustva klorovodične kiseline se dimi. Budući da je mješavina dviju kiselina, svaka od kiselina ima svoju ulogu u procesu otapanja zlata. Dušična kiselina je jako dobar oksidirajući agens i ona je razlog otapanja zlata tvoreći tako Au<sup>3+</sup> ione. Klorovodična kiselina je u zlatotopki izvor kloridnih iona koji okružuju metalni kation stvarajući kompleksni anion tetrakloroaurat(III) [AuCl<sub>4</sub>]<sup>-</sup>.

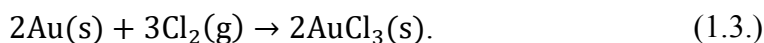


Stvaranjem kompleksnog spoja ravnoteža reakcije opisane jednadžbom 1.1. pomiče se na stranu produkata, omogućujući daljnju oksidaciju zlata [7]. Zlatotopka se najčešće

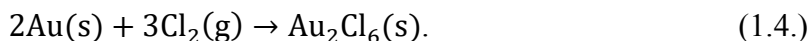
koristi u svrhu spravljanja aurokloridne kiseline koja se koristi kao elektrolit u Wohlwillovom procesu rafiniranja zlata najviše kvalitete (99.99%) [8].

Same kiseline halogena ne otapaju zlato, no u prisustvu oksidirajućeg agensa zlato je vrlo topljivo i čini kompleks halogenaaurat(III). Zlato je također dobro topljivo u otopinama u kojima se mogu generirati halogeni klor, brom ili jod, i u jakoj sumpornoj kiselini (pogotovo ako se u otopine doda mala količina dušične kiseline to jest nitratnih iona koji su oksidirajući agens) [3]. Kiseline koje same po sebi otapaju zlato, točnije reagiraju sa zlatom, su selenska kiselina (ali čak i ona zahtjeva visoku temperaturu od 225 °C kako bi reagirala sa zlatom), i dušična kiselina (pogotovo ako je vruća i koncentrirana, tada će moći malo nagrasti zlato i to u granicama od par miligrama po litri) [2]. Može se reći da je zlato gotovo netopljivo ukoliko nema prisustva oksidirajućeg agensa.

Zlato je pretežito inertno. Kada je izloženo zraku ono neće spontano reagirati sa zrakom niti s kisikom, te su mu zbog tih karakteristika stari kemičari dodijelili ime plemeniti metal [3]. Jako dobro reagira s halogenim elementima. Čak i kada se u elementarnom obliku izloži plinovitim halogenima, ono će reagirati prema primjeru jednadžbe:



Točnije, zlato(III) klorid postoji samo kao dimer pa reakcija glasi:



Iako je na zraku inertno, ipak tvori velik broj spojeva iz kojih ga je relativno jednostavno kemijskim postupcima dobiti u elementarnom obliku. Najpoznatiji su spojevi oksidacijskog broja +1 i +3, ali poznati su i spojevi oksidacijskih brojeva -1, +2, +5.

Spojevi oksidacijskog broja +1 i +3 termički su relativno nestabilni i zagrijavanjem se lako raspadaju stvarajući čisto zlato. Oni također u otopinama rade komplekse u kojima su najčešći koordinacijski brojevi 2, za oksidacijski broj +1, i 4, za oksidacijski broj +3. Neki ligandi koje možemo naći u kompleksima sa zlatom su amonijak, halogeni, cijanidi, sulfiti i tiosulfati [5].

Stupanj oksidacije kod +1 može postojati u vodenim otopinama samo ako nastaju spojevi netopljive soli (npr. AuI) ili se ioni  $\text{Au}^+$  nalaze vezani u kompleksnim ionima (npr.  $[\text{AuX}_2]^-$ ) [4]. Sami po sebi ioni zlata stupnja oksidacije +1 nestabilni su u vodi i u vodenim otopinama čine  $\text{Au}^{3+}$  ione i elementarno zlato. Poznati su i sivo-ljubičasto zlato(I) oksid i tamno ljubičast zlato(I) hidroksid koji se talože iz otopina zlatnih soli i teško se raspoznaju jedan od drugoga [5]. Osim neraspoznatljivosti, relativno su novi spojevi čije se izdvajanje iz otopina, stabilnost i reaktivnost još istražuje.

Zlato oksidacijskog broja +1 pokazuje dobru reaktivnost s halogenidima i poznati halogenidi zlata(I) su klorid, bromid i jodid koji nastaju zagrijavanjem zlato(III) halogenida. Sva tri poznata halogenida zlata(I) su krute tvari, no zlato(I) jodid je netopljiv u vodi za razliku od klorida i bromida. U vodi zlato(I) bromid i zlato(I) klorid disproporcioniraju na elementarno zlato i na kompleksni spoj zlato(III) halogenida  $[\text{AuX}_3\text{OH}]^-$  [4]. Primjer reakcije zlato(I) klorida s vodom opisan je kemijskom jednažbom:



Stupanj oksidacije +3 sačinjavaju halogenidi koji postoje kao  $\text{AuX}_3$ , gdje je X = F, Cl, Br ili I. Iako je kloridima i bromidima kemijska formula  $\text{AuX}_3$ , njihova prava struktura je dimerizirana i bolje je prikazana formulom je  $\text{Au}_2\text{X}_6$ . Zlato(III) klorid, igličasta sol crvenkaste boje, i zlato(III) bromid otapaju se u vodi (za razliku od zlato(III) jodida) i nastaju kompleksni spojevi zlato(III) halogenida  $[\text{AuX}_3\text{OH}]^-$  [4]. Primjer otapanja opisan je jednažbom:



Dodavanjem kloridne ili bromidne kiseline, koje su izvor kloridnih i bromidnih iona, nastaloj otopini s kompleksima  $[\text{AuX}_3\text{OH}]^-$  nastaju kompleksni ioni tetrahalogenaaurata  $[\text{AuX}_4]^-$ . U reakciji zlata(III) klorida s klorovodičnom kiselinom također se dobivaju kompleksni ioni tetrahalogenaaurata  $[\text{AuCl}_4]^-$  koji se u kombinaciji s protonima nazivaju auratna ili tetraklorauratna kiselina  $\text{H}[\text{AuCl}_4]$  [5].



Reakcija analogna reakciji 1.7. se odvija sa zlato(III) bromidom i bromovodičnom kiselinom gdje nastaje bromoauratna kiselina. Stupnju oksidacije +3 nisu strani ni oksidi ni hidroksidi. Teško topljivi žuti hidroksid  $\text{Au}(\text{OH})_3$  taloži dodatkom  $\text{OH}^-$  iona u otopinu s prisutnim kompleksom tetrahalogenaauratom. Sušenjem zlato(III) hidroksida dobiva se metahidroksid  $\text{AuO}(\text{OH})$  koji se termički raspada na vodu i smeđe-crnu, teško topljiv zlato(III) oksid  $\text{Au}_2\text{O}_3$  [4]. I zlato(III) oksid i zlato(III) hidroksid dobro su topljivi u klorovodičnoj kiselini te u koncentriranoj dušičnoj kiselini, čineći u otopinama kiseline  $\text{H}[\text{AuCl}_4]$  i  $\text{H}[\text{Au}(\text{NO}_3)_4]$ . Također se otapaju u otopinama alkalnih hidroksida poput KOH gdje čine komplekse aurata(III)  $[\text{AuO}_2]^-$ . U reakciji s amonijakom, zlato(III) oksid i zlato(III) hidroksid neće se otopiti, već će se stvoriti eksplozivni spoj engleskog naziva *fulminating gold*, čiji je opisni prijevod „agresivno zlato“ [5].

Aurokloridna kiselina može se dobiti i otapanjem zlata u zlatotopci, i uparivanjem otopine s kloridnom kiselinom. Iz otopine se može iskristalizirati u hidratiziranom obliku

žutih iglica  $\text{H}[\text{AuCl}_4] \times 4\text{H}_2\text{O}$ , koje se lako otapaju u vodi i alkoholu. Kod rukovanja s aurokloridnom kiselinom mora se paziti jer u hidratiziranom obliku na koži može izazvati plikove. Usprkos tome, ona se komercijalno proizvodi i upotrebljava se u medicini, fotografiji i u galvanotehnici (za pozlaćivanje) [9].

U oksidacijskom stanju +5 postoji samo u spoju s fluorom, gdje čini pentafluorid  $\text{AuF}_5$ , dok se stanja -1 i +2 nalaze se samo u kompleksima [10].

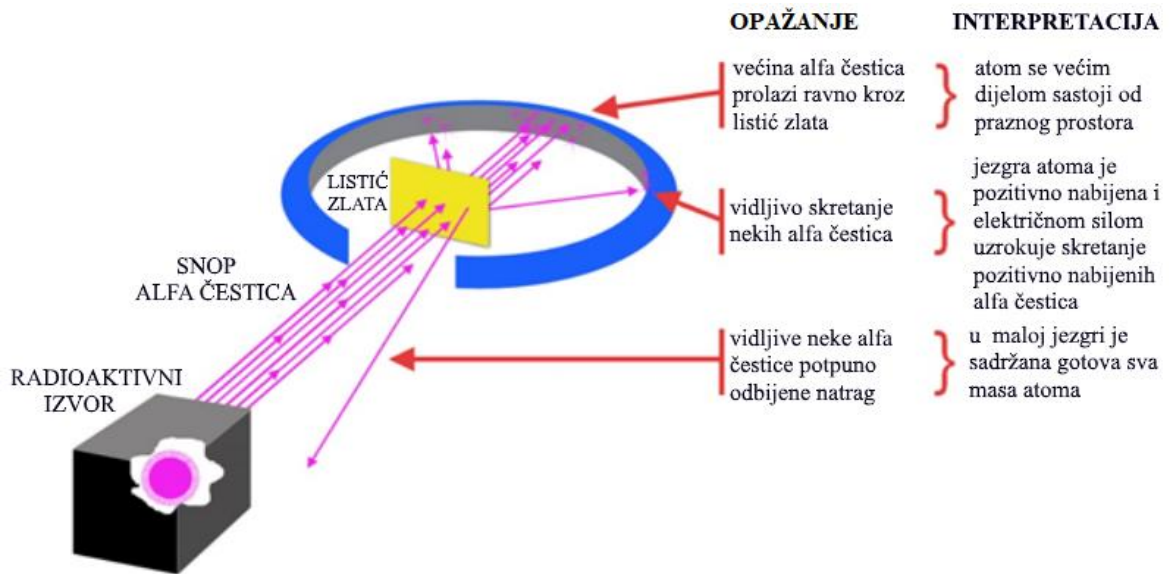
## ***2.2. Legure zlata i njihova primjena***

Kroz povijest, pa čak i danas legurama zlata teško je bilo odoljeti, što zbog njihovih primjena u tvorbi nakita, što zbog primjena u kovanicama. Količina zlata u legurama se najčešće mjeri u karatima (oznaka kt). Jedan karat se definira kao jedna dvadesetčetvrtina mase uzorka. Čisto zlato je 24-karatno zlato, što znači da je udio mase zlata 100% tj. omjer mase zlata unutar mase uzorka je  $\frac{24}{24} = 1$  [3]. Standardna legura zlata za nakit sadrži bakar i srebro čija je boja karakteristično žuta, no razvojem zlatarstva u modu su ušle i druge legure (tablica 2) koje zlatu daju potpuno novu boju, ali i čvrstoću. Legure se primjenjuju u životu u raznim strukama, kako medicinskim (kao zubarsko zlato za plombe, krune i mostove ili kao lijek za lagofthalmus, nemogućnost zatvaranja oka u obliku otopine), tako i elektrotehničkim zahvaljujući svojoj dobroj vodljivosti malih struja. Tako svi koji koriste mobitele mogu se pohvaliti da u njima imaju zlato u vrijednosti od oko 50 centi tj. oko 3,5 kn. Niti svemirska istraživanja ne bi bila jednostavna bez zlata. Zlato se koristi u mnogim svemirskim stanicama u obliku pozlaćene poliesterske navlake kojom se oblaže letjelica kako bi se infracrvene zrake reflektirale s te poliesterske navlake i time se stabilizirala temperatura letjelice [11]. Elektroplatanje zlatom se koristi u urarstvu gdje inertno zlato prekriva zupčanike satova, u medicini gdje prekriva sitne mehanizme u umjetnim zglobovima i u elektrotehnici gdje se bakar oblaže zlatom kako bi se spriječila korozija [6].

Boja zlatne legure i karat	Sastav legure	Svojstva i dodatne uporabe
Žuto zlato (22 kt)	Zlato 91,67% Srebro 5% Bakar 2% Cink 1,33%	
Crveno zlato (18 kt)	Zlato 75% Bakar 25%	Povećana vodljivost.
Blago zeleno zlato (18 kt)	Zlato 75% Srebro 25%	Čest je slučaj da se zlato u prirodi nalazi u kombinaciji sa srebrom te se prirodno zlato nalaznicima može činiti zelenkasto.
Bijelo zlato (18 kt)	Zlato 75% Platina ili paladij 25%	Povišenje vrelišta, čvrstoće i elastičnosti. Koristi se u zubarstvu za izradu kruna.
Plavo zlato (18 kt)	Zlato 75% Željezo 25%	Povećanje tvrdoće, ali i krhkosti i tendencije mrljanja vanjskih dijelova legure.
Ljubičasto zlato	Zlato 80% Aluminij 20%	Povećanje čvrstoće i intenziteta boje.

Tablica 2. Prikazane su neke legure koje se koriste primarno u svrhu nakita, ali imaju i neke druge primjene, te neka svojstva koja legura dobiva kada se zlato udruži s drugim metalima u leguri [12].

Zlatom se lako rukuje zbog njegove mekoće te se može sprešati u jako tanke listiće, čak do debljine  $1,016 \times 10^{-6}$  cm, koji se mogu koristiti u umjetnosti, u arhitekturi pa čak i u kuhinji u obliku prestižnog jestivog ukrasa [3]. A govoreći o listićima zlata, mora se spomenuti slavni Rutherfordov pokus tj. Geiger – Marsden pokus raspršenja snopa  $\alpha$ -jezgara na listićima zlata (slika 1). Pri izvođenju pokusa željelo se koristiti materijal koji je mekan i može se lako obrađivati kako bi mogao napraviti tanke listiće debljine par stotina atoma, što je moguće baš sa zlatom. Ti su tanki listići zlata bombardirani  $\alpha$  česticama kako bi se saznala struktura atoma. Da je materijal bio deblji, vjerojatnost odstupanja rezultata bi se povećala jer bi čestica međudjelovala sa sve više atoma te bi se izgubila slika interakcije s jednim atomom. Zlato je bilo dobar izbor za izvođenje pokusa i zbog veličine svoje jezgre. Kada bi se lagana  $\alpha$  čestica sudarila sa teškom jezgrom zlata efekt sudara vidio bi se samo na laganoj jezgri kao skretanje s njene putanje. Na temelju opažanja pokusa ustanovljeno je značajno otkriće o postojanju pozitivno nabijene jezgre u atomu u kojoj je sadržana gotova sva masa.



Slika 1. Skica postava Rutherfordova pokusa sa zlatnim listićima izvedenog na početku 20. stoljeća pomoću kojeg se izgradio novi model atoma u kojem se po prvi puta spominje postojanje pozitivno nabijene jezgre u središtu atoma oko koje su elektroni. Na slici su prikazane opservacije pokusa i glavni zaključci pokusa [13].

### 2.3. Zlato kao ruda i rafiniranje zlata

Iako je zlato jedan od rijetkih metala koje se može pronaći u nativnom (prirodnom) obliku samog elementa, čisto se zlato često nalazi u primjesama sa srebrom, te zastupljenost srebra (maseni udio  $w$ ) u čistom prirodnom zlatu može biti od 0,1% pa sve do 50% i više. Zlato je toliko često u primjesi sa srebrom da je takva ruda dobila svoj vlastiti naziv *doré*. Također čisto zlato se može pronaći u primjesama s željezovim oksidom, koje se tada prema boji kolokvijalno naziva „hrđavo zlato“, i s primjesama s telurijevim(IV) oksidom [2,3,5].

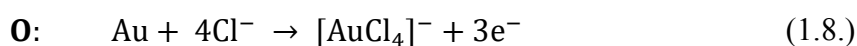
Budući da se zlato u rudama najčešće nalazi u primjesama sa srebrom i treba se izdvojiti od srebra metodama odijeljivanja tzv. „*parting*“ metodama. Odijeljivanje se može izvesti [5]:

- tretiranjem rude antimonovim sulfidom (srebro se izdvoji u obliku sulfida, a zlato načini leguru s antimonom te se iz legure izdvoji oksidiranjem),
- tretiranjem klorom na visokim temperaturama (srebro čini stabilne kloride, dok na višim temperaturama kloridi zlata nisu stabilni te zlato preostaje u svom elementarnom obliku),
- tretiranjem s dušičnom kiselinom (ruda se usitnjava i izlaže dušičnoj kiselini u kojoj se srebro otapa čineći nitrata a zlato ne reagira te izlazi iz procesa kao čisto zlato),
- elektrolizom ili Wohlwillovim postupkom.

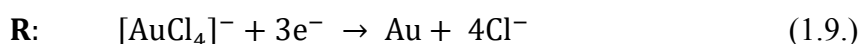


U procesu elektrolize nečisto zlato je topljiva anoda, katoda je rafinirano čisto zlato, a elektrolit je zlato(III) klorid u klorovodičnoj kiselini; klorovodična kiselina je ključna u procesu jer osigurava stalni višak kloridnih aniona koji s otopljenim zlatom anode čine tetrakloroauratni(III) ion  $[\text{AuCl}_4]^-$  i time sprječavaju oksidaciju klora na anodi u plinoviti klor. Reakcije koje opisuju elektrolizu su:

- na anodi:



- na katodi:



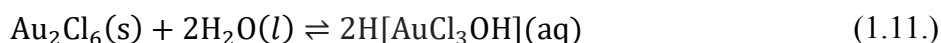
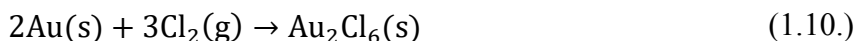
Potencijal između dvije elektrode je oko 2 V. Srebro se otapa u elektrolit i taloži u obliku srebrova klorida i periodično se izdvaja iz posude za elektrolizu, pazeći da pritom u proces moramo dodati još kloridnih iona u obliku zlato(III) klorida otopljenog u klorovodičnoj kiselini. Procesom elektrolize može se postići od 99,95%-tnog zlata do 99,98%-tno zlato [5].

Kako bi se moglo nativno zlato odijeliti od srebra, prvo se zlatna ruda mora prikupiti iz prirode. Iz povijesti, a i zbog vestern filmova, kada se priča o zlatu slika koja mnogima pada napamet je "Zlatna groznica" 1848. godine i kako mnogi pokušavaju iz rijeke sitom pronaći grumenje zlata ili rudari koji sa srećom uzvikuju da su pronašli zlatnu žilu. Točno u ta dva oblika je najlakše pronaći čisto zlato. Grebensko zlato ili zlatna žila je čisto zlato koje se javlja u naslagama čvrstih stijena te je ono sasvim sitno i potpuno prožeto kamenim materijalom koje ga okružuje, dok je aluvijalno zlato čisto zlato koje se nalazi u pjeskovitim ili šljunkovitim naslagama poput kršnika (breča) ili riječnih korita te je distribuirano kroz okolnu masu u obliku zrnaca različitih veličina. Do aluvijalnog ili riječnog zlata dolazi djelovanjem rijeka, čije tekuće vode korodiraju kamenje i ispiru lakši šljunak, dok se teže zlato nakuplja u udubinama korita i drugim mjestima povoljnim za akumulaciju šljunka i zrnaca zlata. Poznata metoda izdvajanja aluvijalnog zlata dobila je ime po alatu potrebnom za izdvajanje zlata, posudi nalik tavi (engl. *pan*) i poznata je kao „*panning*“. Koristeći posudu, uzorak riječnog nanosa stavlja se u vodu (rijeku) i kružnim se pokretima ispiru nečistoće, dok zlato koje ima veću gustoću od nečistoća preostaje na dnu posude. Ova metoda se koristi samo u riječnim nanosima gdje je poznato da je koncentracija zlata poprilično visoka. Metode ispiranja zlata su postupno izbacivale ljudsku ulogu iz procesa te su razvijene metode poput korištenja naboranog žlijeba koji igra ulogu sita u rijeci (šljunak bogat zlatom stavljaaju na početak žlijeba, kako voda teče, ona ispire lakši pijesak i šljunak,

dok teže zlato zaostaje u utorima u žlijebu), hidrauličkog rudarenja (stijene se usitnjavaju snažnim vodenim topovima, te se taj materijal tada stavlja na velike žlijebove i ispire se rijekom) [5].

U mineralnom obliku zlato se javlja u paru s telurijem npr. kalaverit  $\text{AuTe}_2$  ili silvanit  $(\text{Au, Ag})\text{Te}_2$ . Minerali zlata i telurija u prirodi se često pronalaze u žilama kvarcnih ili karbonatnih stijena, a njihova učestalost je manja čak i od učestalosti čistog zlata. Kada se takve mineralne stijene izlože vremenskim prilikama, one oksidiraju i zlato se oslobađa u čistom elementarnom obliku [2,5].

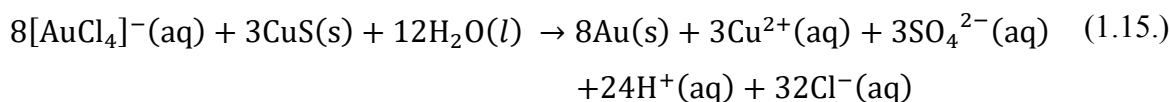
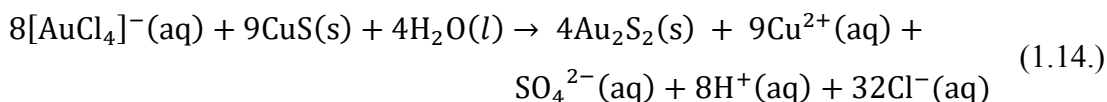
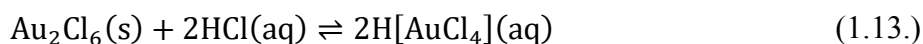
Zlato se može izdvojiti i kemijskim metodama poput otapanja. Proces koji svojstvo da se zlato otapa u živi je amalgamiranje. Sitno smrvljeni uzorci se izlože živi, zlato se otopi čineći amalgam koji se izdvaja i destilira kako bi se odstranila živa. Iako ovaj proces izgleda jednostavno, u praksi nije učinkovit jer zahtjeva rad strojeva s kompliciranim principom rada, a daje male količine zlata jer u prirodi zlato može oksidirati ili činiti minerale s željezovim oksidom, a takvo zlato ne amalgamira s živom. Druge metode uključuju djelovanje plinovitog klora ili broma na zlato jer je ono vrlo podložno stvaranju klorida  $\text{AuCl}_3$  i bromida  $\text{AuBr}_3$  koji su dobro topljivi u vodi. Reakcije kloriranja su opisane jednadžbama 1.10.–1.15. i analogne su procesu bromiranja [5]:



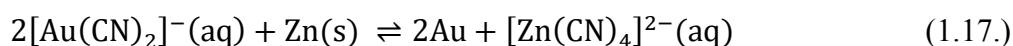
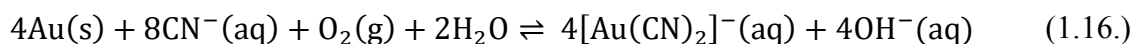
Budući da je i voda izložena plinovitom kloru koji se otapa u vodi i čini kiselinu  $\text{HCl}(aq)$  dolazi do reakcije vodikova hidroksotrikloroaurata(III) (kod bromiranja ovo je korak gdje se brom istiskuje klorom) [5]:



te možemo reakciju ukratko napisati i u obliku:



Iako se za taloženje koristi bakar(II) sulfid, on nije jako dobar agens za precipitaciju tj. taloženje jer on može onečistiti uzorke zlata. Kao djelotvoran kandidat za precipitaciju kod kloriranja javlja se i ugljen, no i ta se metoda ubrzo zamijenila metodom koja daje još veće iskorištenje reakcije nastanka elementarnog zlata i koja se najčešće koristi, a to je reakcija s cijanidom. Zlatna ruda se tretira razrijeđenom otopinom natrijeva cijanida u kojoj se zlato otapa, novonastala otopina separira se od nečistoća rude te se zlato taloži u reakciji s cinkom ili aluminijem. Metoda je kemijski najjednostavnije opisana jednadžbama [2,5]:

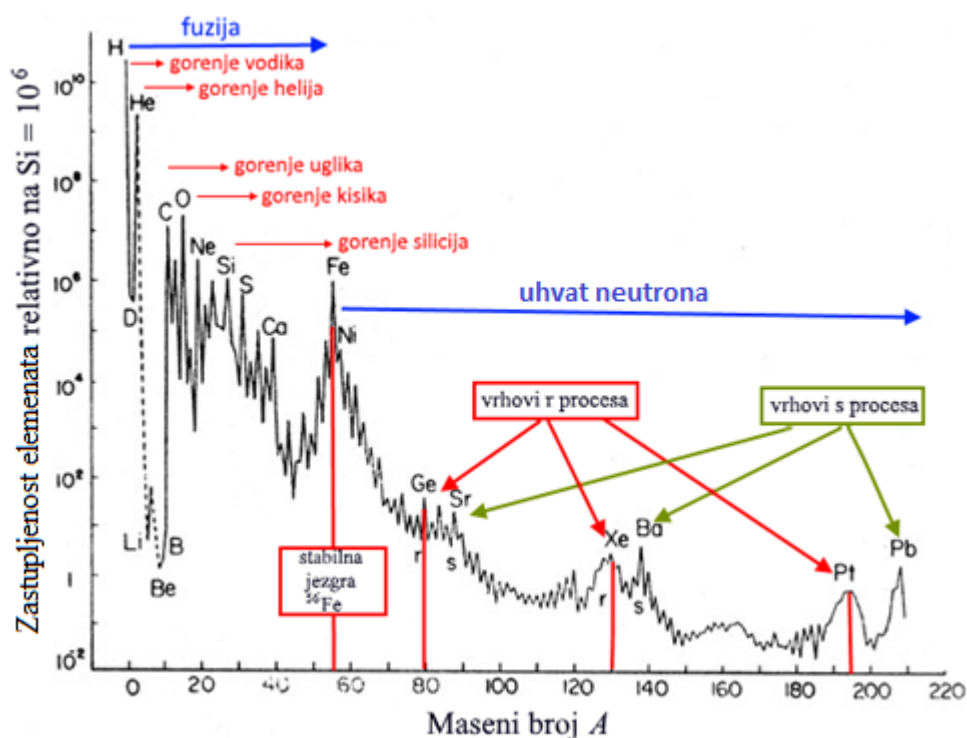


Tretiranje cijanidom je zasada najbolja metoda izlučivanja elementarnog zlata iz ruda, no postupci i mehanizam ove metode nisu nimalo jednostavni. Kompleksnost se javlja već u reakciji opisanoj jednadžbom 1.16. gdje se reakcija bazira na elektrokemijskim potencijalima u kojima zlato oksidira zbog prisustva kisika, nadalje u cijanidnim otopinama koje stoje na zraku javlja se vodikov peroksid koji tada također sudjeluje u reakcijama, ovisno o vrsti rude prisutni su drugi metalni ioni koje treba tretirati prije no što se taloži zlato što također utječe na mehanizam reakcije, zatim se reakcija opisana jednadžbom 1.17. odvija u više koraka. Detalji o metodi tretiranja cijanidom nalaze se u knjizi *A Comprehensive treatise on inorganic and theoretical chemistry, Volume III* autora J.W. Mellora, navedenoj u literaturi (referenca [2]).

### 3. NUKLEOSINTEZA ZLATA U SVEMIRU

Zlato koje postoji na Zemlji nije nastalo na Zemlji, već u svemiru. Točnije u vrućem i visokoenergetskom okruženju umirućih zvijezda i sudara neutronske zvijezde. Kada zvijezda ima masu puno veću od mase sunca  $M_{\odot}$ , točnije  $M \gtrsim 10M_{\odot}$ , i potroši svoje gorivo za nuklearnu fuziju, ona više nije u mogućnosti održavati hidrostatičku ravnotežu i stoga se urušava sama u sebe stvarajući u središtu zvijezde materiju iznimno velike gustoće. Materija koja se dalje sažima prema središtu biva odbijena od te materije visoke gustoće i slijedi eksplozija supernove. Astronomima supernove nisu strane, no i dalje se istražuju te one same ne proizvode velike količine zlata. Za proizvodnju veće količine zlata odgovorni su rijetki sudari neutronske zvijezde. Nuklearni proces koji prati proizvodnju zlata na putu iz lakših jezgara prema težim u ovim burnim događajima naziva se nukleosinteza.

Kako bi nastala jezgra zlata odvija se mnogo nuklearnih procesa. Prvi nuklearni proces koji se dogodio u početku svemira još pri Velikom prasku ostavio je svemir bogat vodikom. Tom se vodikom pri nastanku zvijezda, zbog njihovih vlastitih gravitacijskih sila, predaje dovoljno energije da se u središtu novonastale zvijezde pokrene termonuklearna reakcija fuzije. Ako je zvijezda dovoljno masivna moći će se odviti fuzija sve do sinteze izotopa željeza  $^{56}\text{Fe}$  koji ima najveću energiju vezanja po nukleonu što ga čini stabilnim. Daljnje stvaranje težih jezgara fuzijom postaje energetski nepovoljno i mora se pronaći neki drugi proces kojim bi nastali kemijski elementi teži od željeza  $^{56}\text{Fe}$ . Jedan takav proces je uhvat neutrona. Za taj proces potrebna je početna jezgra i za njega ne treba puno uložene energije jer su neutroni neutralni i ne moraju prevladati elektrostatske sile prilikom približavanja jezgri kojoj se uhvatima povećava masa. Jezgra ipak ne može prihvaćati neutrone do u nedogled, već postoji trenutak kada je uhvat neutrona nepovoljan i na snagu stupa  $\beta^{-}$ -raspad koji neutrone pretvara u protone. Prema natjecanju u hvata neutrona i  $\beta^{-}$ -raspada moguća su dva procesa nastajanja težih jezgara – spori  $s$ -proces (engl. *slow process*) i brzi  $r$ -proces (engl. *rapid process*). Prema grafu raspodjele zastupljenosti elemenata u ovisnosti o masenom broju  $A$  (slika 2) vidljivo je da zlato, čiji je maseni broj stabilnog izotopa  $A = 197$ , nastaje u hvatima neutrona, odnosno  $r$ -procesom jer je vidljiv maksimum  $r$ -procesu pri  $A = 195$ , naznačen kao i treći vrh. U daljnjim poglavljima detaljnije će se sagledati nukleosinteza do trećeg vrha  $r$ -procesu i sam  $r$ -proces te okruženja u svemiru u kojima se mogu ostvariti uvjeti potrebni za stvaranje teških elemenata trećeg vrha, a time i zlata.



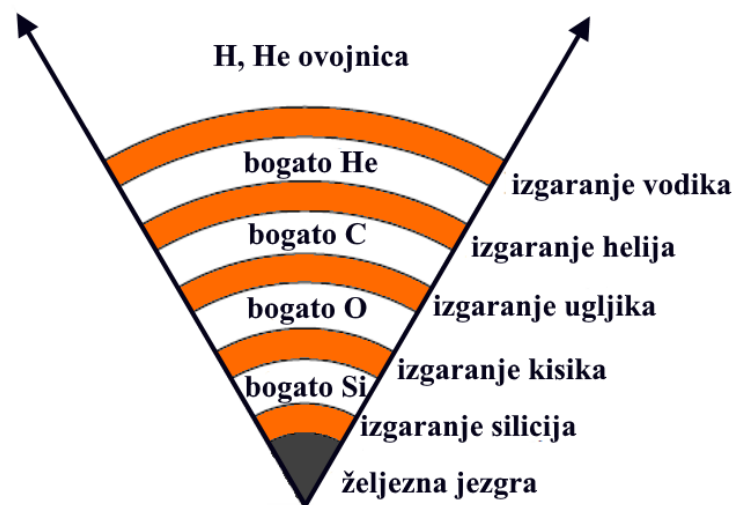
Slika 2. Graf lokalne galaktičke zastupljenosti elemenata relativno prema  $10^6$  atoma  $^{28}\text{Si}$  u ovisnosti o masenom broju  $A$  [14].

Zlato koje nastaje nukleosintezom je atomizirano zlato i ono je velikom eksplozijom raspršeno kroz međuzvjezdani medij. Kako bi se formirala ruda kakvu imamo na Zemlji, to atomizirano zlato mora na svom putu naletjeti na nakupinu međuzvjezdane prašine, bolje poznate pod nazivom maglica, gdje se može agregirati i pod utjecajem gravitacijskih sila udružiti u rudu. Hoće li ta ruda biti na nekom meteoru ili planetu ovisi o međuzvjezdanoj maglici koja će pomoću gravitacije postati jedno od mnogih svemirskih tijela.

### 3.1. Stvaranje jezgara do stabilne jezgre željeza $^{56}\text{Fe}$

Nukleosinteza do stabilnog izotopa željeza  $^{56}\text{Fe}$  odvija se u unutrašnjosti masivnih zvijezda poput Sunca i zvijezda mase  $M \gtrsim 8M_{\odot}$ , točnije u njihovim središćama. Tijekom životnog vijeka zvijezde prati se ravnoteža u zvijezdi koja se održava gravitacijskom silom i tlakom koji stvaraju nuklearne reakcije u sredici. U evoluciji zvijezde iz protozvijezde, koja nastaje sažimanjem međuzvjezdane prašine i oblaka koji su sastavljeni od raznih atoma i molekula, ona svojim gravitacijskim silama zagrije srediцу na dovoljno visoku temperaturu i već ima svoje početno gorivo za fuziju kojim se opskrblila iz svemira – vodik. Vodik tada u sredici počinje izgarati fuzijom do helija nuklearnim reakcijama poznatijim pod nazivom

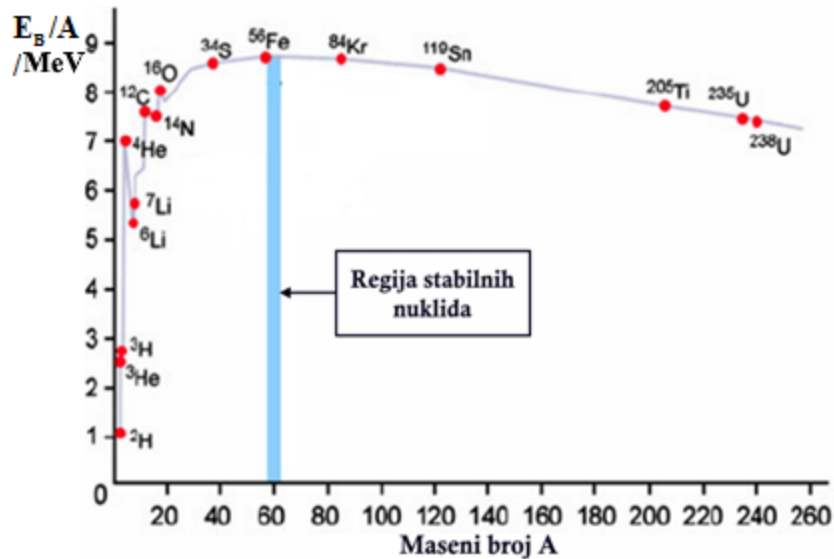
proton-proton (PP) lanac, a u masivnijim zvijezdama temperatura je čak dovoljno velika da se vodik počinje združivati s većim atomima poput ugljika u reakcijama nazvanim ugljik-dušik-kisik ciklus, tj. CNO ciklus [15]. Kako PP lanac napreduje i stvara helij, u središtu zvijezde stvara se područje bogato helijem (koji još ne izgara zbog preniske temperature) i masa sredice se povećava. Kako bi se održala hidrostatička ravnoteža u zvijezdi ona se sažima i time se gravitacijska potencijalna energija dijelom oslobađa zračenjem, a dijelom služi za zagrijavanje plinovitih slojeva zvijezde. Posljedica povećanja temperature plina jest povećanje dijela zvijezde u kojem se na toj temperaturi mogu odvijati nuklearne reakcije te zvijezda raste [16]. U slučaju fuzije vodika povećava se ovojnica u kojoj izgara vodik. Ukoliko je zvijezda dovoljno masivna, gravitacijska sila će i u sredici prouzročiti povećanje temperature što će omogućiti daljnje reakcije fuzije - izgaranje helija. Kada se potroši helij kod masivnih zvijezda, ponavlja se ciklus sažimanja sredice pod utjecajem gravitacijske sile i posljedično ponovno povećanje temperature u sredici, sada bogatoj produktima izgaranja helija, što omogućuje izgaranje ugljika te se pokreće lanac daljnjih izgaranja i fuzije sve težih elemenata pri čemu zvijezda nastavlja rasti i stvara se slojevita struktura zvijezde (slika 3) [15,16].



Slika 3. Shematska ilustracija građe masivne zvijezde u čijim se slojevima odvijaju nuklearne reakcije izgaranja spojeva koje održavaju temperaturu i stabilnost zvijezde [16].

Nuklearna fuzija u zvijezdama zaustavlja se nakon stvaranja željeza. Pogleda li se graf energije vezanja po nukleonu  $E_B/A$  (izražena negativnim vrijednostima) kao funkcija masenog broja (slika 4) vidi se da se kod željeza postiže maksimum energije vezanja (zbog konvencije predznaka minus „-“ ustvari ta energija odgovara minimumu) što ga čini stabilnim [15]. U okolini željeza javlja se područje stabilnih nuklida ili nuklidi željeznog vrha (engl. *peak*). Prave vrijednosti tih energija su zapravo negativne jer se sagledava

energija koja je potrebna za združivanje nukleona pri čemu se ta energija koristi za prevladavanje Coulombove barijere. Vidljivo je da je izgaranje vodika povoljna reakcija jer je razlika u energijama produkta helija i reaktanata vodika negativna što reakciju čini egzotermnom. Energija koja se oslobađa koristi se za daljnje nuklearne reakcije.



Slika 4. Graf energije vezanja po nukleonu u ovisnosti o masenom broju  $A$ . Maksimum energije vezanja postiže se pri masenom broju  $A = 56$  što čini izotop željeza  $^{56}\text{Fe}$  vrlo stabilnim. Usko područje oko  $A = 60$  naziva se područje stabilnih nuklida i karakterizirana je velikom energijom vezanja [17].

U nuklearnoj fizici, energija koja se oslobađa u reakciji, isto kao i energija potrebna za reakciju, može se izračunati iz razlike masa reaktanata i produkata, tj. razlike u kinetičkim energijama prije i poslije reakcije preko relacija:

$$Q = (m_{\text{početak}} - m_{\text{kraj}})c^2 \quad (2.1.)$$

$$Q = T_{\text{kraj}} - T_{\text{početak}} \quad (2.2.)$$

gdje  $Q$  označava energiju koja se oslobađa ili je potrebna za reakciju,  $m$  mase reaktanata na početku reakcije i produkata na kraju reakcije,  $c$  brzinu svjetlosti (kvadriranu zbog relacije koja povezuje energiju i masu  $\Delta E = \Delta mc^2$ ) i  $T$  označava kinetičku energiju. U slučaju kada je  $Q$  vrijednost u relacijama 2.1. i 2.2. veća od nule,  $Q > 0$  (što podrazumijeva  $m_{\text{početak}} > m_{\text{kraj}}$  i  $T_{\text{kraj}} > T_{\text{početak}}$ ), energija vezanja jezgre oslobađa se u obliku kinetičke energije produkata te je reakcija egzotermna. Reakcija je endotermna ako je  $Q$  vrijednost manja od nule,  $Q < 0$  (što podrazumijeva  $m_{\text{početak}} < m_{\text{kraj}}$  i  $T_{\text{kraj}} < T_{\text{početak}}$ ), kinetička energija reaktanata se pretvara u masu jezgre ili energiju vezanja [18].

Općenito, u zvijezdama prevladavaju egzotermne reakcije. Kada bi izgaralo željezo, produkti izgaranja bi prema krivulji prikazanoj na slici 4 imali manju energiju vezanja od željeza, što bi njihove vrijednosti činile pozitivnijima, a reakciju činilo endotermnom.

Izgaranje željeza bi zahtijevalo još veći unos energije da se dogodi, što u zvijezdama nije moguće budući da su svoje gorivo potrošile. Ono što ostaje je željezna jezgra u središtu zvijezde, dok se u slojevima koji grade zvijezdu još uvijek događaju termonuklearne reakcije izgaranja helija, ugljika, kisika i silicija.

Temeljne nuklearne reakcije koje se odvijaju u sredici zvijezde su:

### 1. Gorenje vodika pri čemu nastaje helij

Načini na koje vodik u zvijezdama može izgarati su proton-proton lanac (PP lanac) i CNO ciklus.

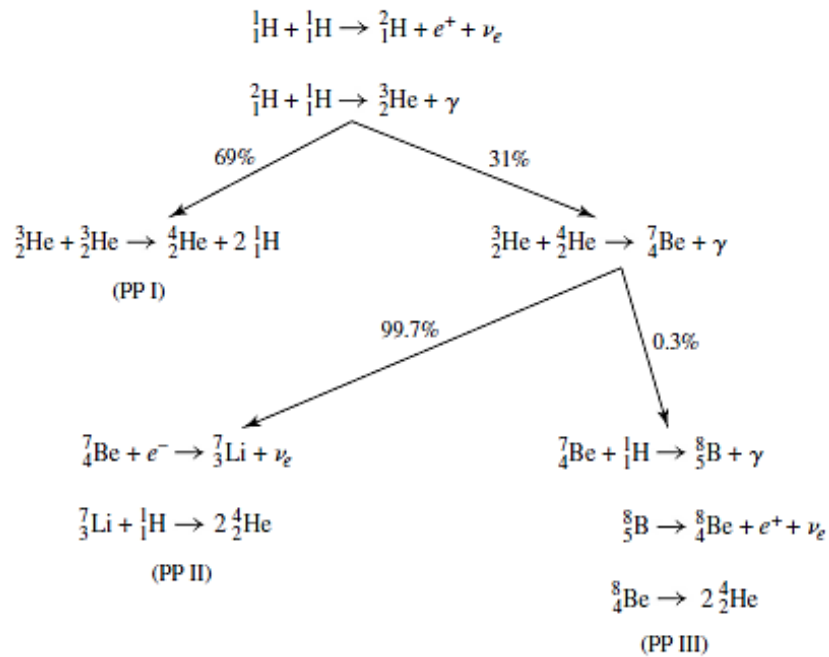
#### (a) PP lanac

Nuklearne reakcije koje započinju PP lanac su [19]:



Reakcija 2.1. je spora jer u sebi sakriva pretvorbu protona u neutron  $\beta^+$ -raspadom što se vidi prema emitiranom pozitronu i elektronskom neutrinu. Prethodno napisane reakcije nisu jedine koje se mogu dogoditi pri stvaranju jezgre helija i zato se napisane jednadžbe tj. napisani PP lanac označava s PP I lanac. Postoje još PP II i PP III lanci koji se istovremeno mogu odvijati pri sintezi helija zbog vjerojatnosti sudara jezgara helija,  ${}^3_2\text{He}$  i  ${}^4_2\text{He}$ . Shema reakcija svih PP lanaca, zajedno s vjerojatnostima odvijanja reakcija, prikazana je na slici 5. Sve tri grane PP lanaca su egzotermne, a najveća količina energije se oslobađa u PPI lancu i iznosi 26,20 MeV za proizvodnju jedne jezgre  ${}^4_2\text{He}$ . Sukladno s tim iznos oslobođenje energije u PPII lancu je 25,66 MeV, a u PPIII lancu je 19,76 MeV. Sa slike se može vidjeti da je PPI lanac glavna grana proizvodnje i jezgara helija i energije, dok PPII i PPIII lanci dolaze do izražaja s povišenjem temperature [14,19].

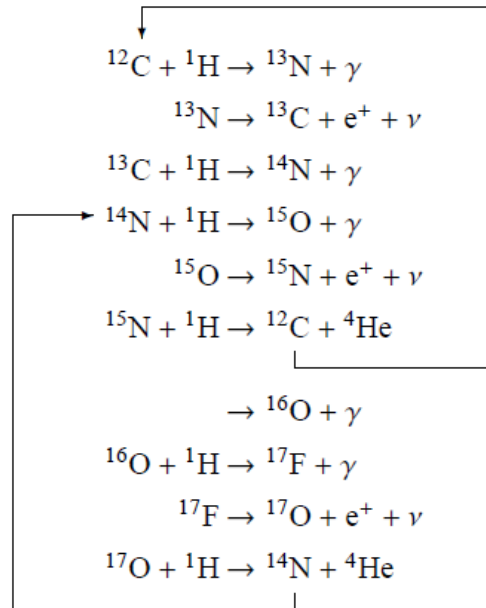




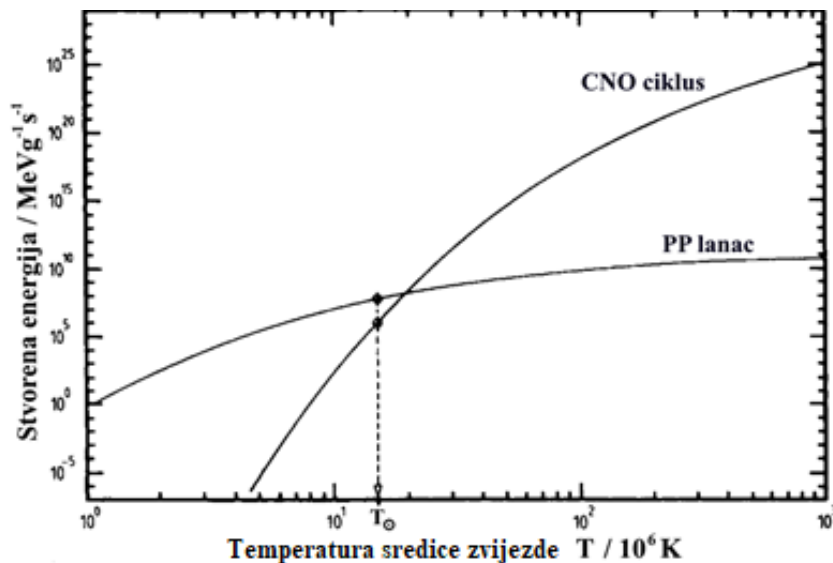
Slika 5. Shematski prikaz PP lanca i njegovih grana. Na strelicama su naznačene vjerojatnosti odvijanja procesa u granama koje su prilagođene prema procesima u sredici Sunca [16].

#### (b) CNO ciklus

Ako u zvijezdi već postoje jezgre ugljika, dušika i kisika i temperatura je dovoljno visoka ( $T > 1,5 \cdot 10^7 \text{ K}$ ) fuzija vodika do helija može se odvijati ciklusom nuklearnih reakcija koje započinju kada jezgra  ${}^{12}_6\text{C}$  uhvati jedan proton [19]. Shema reakcija CNO ciklusa prikazana je na slici 6 i može se primijetiti da jezgre ugljika i dušika ulaze, ali i izlaze iz reakcija te se mogu sagledati kao nuklearni katalizatori za sintezu jezgara helija. CNO ciklus je također egzoterman oslobađajući približno 24,97 MeV energije po ciklusu. Doprinosa CNO ciklusa postaje značajna na visokim temperaturama (slika 7). Naša zvijezda Sunce u svojoj sredici nema dovoljno visoku temperaturu ( $\approx 15 \cdot 10^6 \text{ K}$ ) kako bi stvarala helij CNO ciklusom, već se u Suncu dominantno odvijaju procesi PP lanca.



Slika 6. Shematski prikaz nuklearnih reakcija CNO ciklusa u kojima nastaje helij. Ciklus započinje uхватom protona na jezgri  ${}^{12}\text{C}$  koja se kasnije u ciklusu reciklira. Prvih šest jednažbi na slici predstavlja CN ciklus. Vjerojatnost nastanka jezgre kisika u CN ciklusu vrlo je mala, no kisik se može naći u zvijezdi. Posljednje tri reakcije CNO ciklusa započinju uхватom protona na jezgri kisika  ${}^{16}\text{O}$  koji već postoji u zvijezdi i te reakcije proizvode dušik potreban za CN ciklus [19].



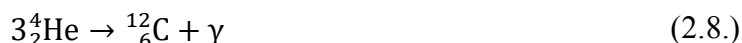
Slika 7. Graf ovisnosti proizvodnje energije o temperaturi u sredici zvijezde za PP lanac i CNO ciklus prema detektiranoj solarnoj zastupljenosti elemenata. Graf oformljen prema Ibenu (1965), Rolfsu i Rodneyu (1988) te autorska prava drži Sveučilište u Chicagu (Claus Rolfs) [14].

## 2. Gorenje helija u zvijezdama

Helij u zvijezdama izgara fuzijom u ugljik i kisik pri temperaturama  $T \gtrsim 10^8\text{K}$  te se odvija u više koraka.



Suma te dvije reakcije daje oblik trostruke- $\alpha$  reakcije (engl. *triple- $\alpha$* ) koja je egzotermna i pri kojoj se oslobađa 7,257 MeV energije [19].



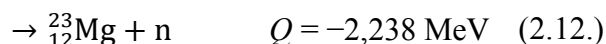
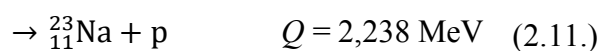
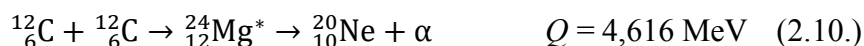
Stvaranjem određene količine  $^{12}_6\text{C}$  reakcijom 2.8. može doći do daljnjeg stvaranja novog kemijskog elementa. Ako jezgra ugljika reagira s jezgrom helija, slijedi egzotermna reakcija stvaranja kisika pri kojoj se oslobađa 7,162 MeV energije.



Kada se helij potroši, sredica zvijezde se sažima što vodi ka povećanju temperature sve dok ne započne novi proces sagorijevanja ugljika.

### 3. Gorenje ugljika

U trenutku kada temperature postignu vrijednosti  $T \gtrsim 5 \times 10^8$  K, Coulombova barijera za fuziju dviju jezgara ugljika  $^{12}_6\text{C}$  može se savladati i stvara se nova jezgra magnezija u pobuđenom stanju koja se odmah raspada. Neke primarne reakcije fuzije su [18,19]:



Reakcije 2.8. i 2.9. imaju otprilike jednaku vjerojatnost da se dogode i egzotermne su. Oslobođeni protoni i  $\alpha$  čestice su vrlo reaktivni i reagiraju s drugim jezgrama tvoreći nove elemente. Neki primjeri mogućih reakcija su  $^{23}\text{Na}(p, \alpha)^{20}\text{Ne}$ ,  $^{20}\text{Ne}(\alpha, \gamma)^{24}\text{Mg}$  i lanac reakcija poput  $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}(e^+, \nu_e)^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ .

### 4. Gorenje neona

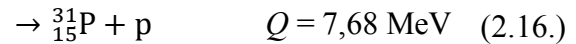
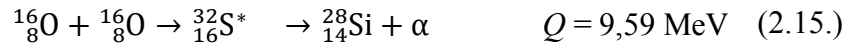
Na temperaturi  $T = 5 \times 10^9$  K događaju se dvije nuklearne reakcije. Fotoni nastali u prethodnim reakcijama zbog visoke temperature imaju dovoljno energije da mogu razoriti jezgru  $^{20}_{10}\text{Ne}$  i odvija se izgaranje neona potaknuto fotodezintegracijom. No u isto vrijeme, reakciju fotodezintegracije slijedi reakcija uhvata  $\alpha$  čestice [19].



Fotodezintegracija neona je endotermna reakcija, no potrošnja energije za reakciju fotodezintegracije nadoknađuje se nastankom jezgre magnezija. Proces izgaranja neona je egzoterman.

## 5. Gorenje kisika

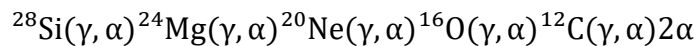
Kako bi se dogodila fuzija dviju jezgara kisika temperatura zvijezde mora postići vrijednosti  $T \approx 2 \times 10^9$  K. Reakcije fuzije su [18,19]:



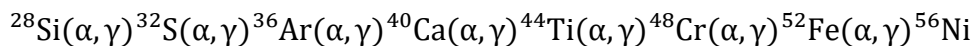
Obje reakcije su egzotermne i imaju sličnu vjerojatnost događanja. Oslobođeni protoni i  $\alpha$  čestice su vrlo reaktivni i reagiraju s drugim jezgrama čineći nove elemente.

## 6. Gorenje silicija

Iako bi logičan slijed fuzija kod gorenja bila reakcija dviju jezgara silicija, taj se scenarij neće odigrati jer je Coulombova barijera za tu reakciju prevelika. Reakcije koje se zapravo događaju su nizovi fotodezintegracija silicija i uhvata jezgara helija. Fotodezintegracija radi na štetu svim reakcijama koje su dovele do jezgre silicija i razara dio jezgara silicija na magnezij, neon, kisik i ugljik i  $\alpha$  čestice u lančanoj reakciji [20]:



No oslobođene  $\alpha$  čestice nisu slobodne. Nastanak težih elemenata odvija se uхватom tih jezgara helija, gdje novonastale jezgre također mogu stupiti u reakciju s helijem.



U ovom stadiju gorenja postoji natjecanje stvaranja i trošenja  $\alpha$  čestica. Prijelazne jezgre u sredinama lanaca fotodezintegracije i stvaranja težih jezgara jednako brzo troše i stvaraju  $\alpha$  čestice, tako da gustoća  $\alpha$  čestica postiže kvazi-statično ravnotežno stanje. Na temperaturama  $T = 4 \times 10^9$  K događa se nakupljanje najstabilnije jezgre  ${}^{56}\text{Ni}$ . Reakcija koja brzo slijedi je dezintegracija nekih jezgara nikla,  ${}^{56}\text{Ni}(\gamma, \text{p}){}^{55}\text{Co}$ , te dezintegracija nastalih jezgara kobalta,  ${}^{55}\text{Co}(\gamma, \text{p}){}^{54}\text{Fe}$ . Novonastale jezgre željeza prevladat će jezgre nikla ako temperatura malo padne na  $T \approx 3 \times 10^9$  K i uхватom neutrona prelazi u jezgru  ${}^{56}\text{Fe}$ . Na temperaturama  $T < 3 \times 10^9$  K, pretvorba od silicija do željeza postaje jako spora i omogućava  $\beta$ -raspade i uhvate elektrona što za posljedicu ima povećanje koncentracije jezgara željeza  ${}^{56}\text{Fe}$  [18,20].



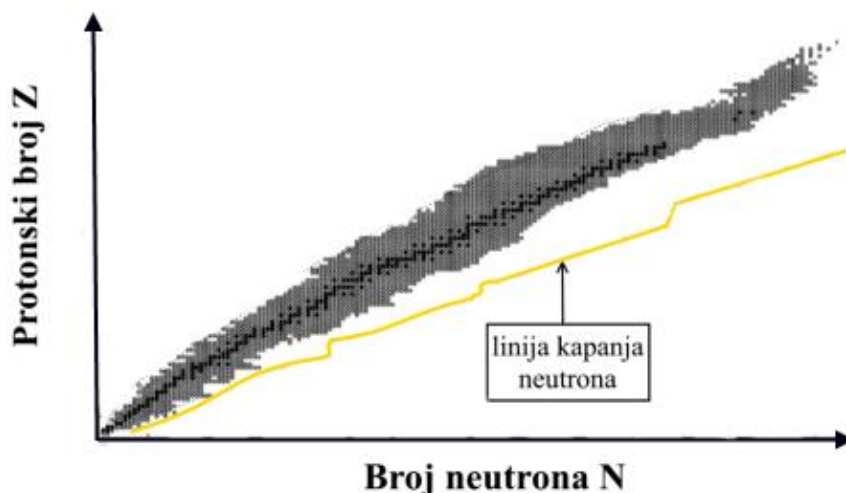
Jezgra kobalta se tada može raspasti na jezgru željeza  ${}^{56}\text{Fe}$  uхватom elektrona ( $\approx 80\%$  vjerojatnost raspada) ili  $\beta^-$ -raspadom ( $\approx 20\%$  vjerojatnost raspada) [20].



Nakon stvaranja željeza, nastanak novih težih jezgara postaje energetski nepovoljan jer jezgra željeza ima maksimum energije vezanja i nastanak težih jezgara bio bi endoterman [20]. Sredica zvijezde sada se većinom sastoji od jezgara željeza i ako je dovoljno velike mase može uslijediti eksplozivna supernova.

### 3.2. Uхват neutrona – sinteza jezgara težih od željeza

Potreba za procese koji slijede nakon nastajanja željeza ne mora se puno tražiti. Pogleda li se planet na kojem živimo, uočiti će se minerali, soli i uzorci tvari elemenata težih od željeza koji nisu nastali reakcijama fuzije u zvijezdama. Proces koji rezultiraju teškim jezgrama  $A > 70$  zahtijevaju puno uložene energije kako bi se savladala Coulombova barijera uhvata protona. No postoje čestice koje ne vide Coulombovu barijeru jer nisu nabijene, a to su neutroni. Ako bi jezgru stavili u tok neutrona, ona bi mogla uhvatiti te neutrone i tako sebi povećati nukleonski broj. Neutron pri uhvatu u jezgru unosi svu svoju energiju, energiju veze i kinetičku energiju, što pobuđuje jezgru. Pobuđenje jezgre se može identificirati detekcijom gama ( $\gamma$ ) zraka zbog čega se reakcije uhvata neutrona mogu pisati kao  $(n, \gamma)$  reakcije. Naravno uхват neutrona neće se nastaviti zauvijek. Granica koja sprječava daljnji uхват neutrona pri određenim protonskim brojevima zove se linija kapanja neutrona (engl. *neutron drip line*). Kada jezgra dođe do granice kapanja ona više ne može primiti neutrone i raspada se pritom emitirajući neutron (neutron „kapa“ van jezgre) i predstavlja onaj omjer protona i neutrona nakon kojeg stabilna jezgra više ne može postojati. Granica kapanja neutrona najbolje se vidi u proton-neutron grafu stabilnosti jezgara ili Segréovom grafu prikazanom na slici 8. Na grafu su crnom bojom označeni najstabilniji izotopi različitih elemenata i ta se linija naziva dolina stabilnosti. Osjenčano područje predstavlja pojaseve nestabilnosti i u njemu su poznate nestabilne jezgre koje nekim nuklearnim procesom (npr.  $\alpha$ - ili  $\beta$ -raspadom) mogu doći do stabilnijih jezgara.



Slika 8. Mapa stabilnih nuklida ili Segréov graf prikazuje individualne izotope elemenata kao točke na grafu ovisnosti protoskog broja  $Z$  o broju neutrona  $N$ . Na grafu su istaknute stabilne jezgre (crno), područja nestabilnosti (sivo) i linija kapanja neutrona [14,21,22].

Ako u nekom procesu postoji izvor velikih količina neutrona omogućit će se mehanizam stvaranja sve težih jezgara uzastopnim uхватima neutrona.



Pri tim se procesima naravno mora paziti na činjenicu da slobodni neutroni nisu stabilna vrsta čestica te da je vrijeme njihovog poluživota  $\tau_{1/2} = 614$  s [18]. No, jezgre stvorene uхватima neutrona pomiču se od doline stabilnosti i nastale teže jezgre tako mogu biti stabilne ili nestabilne. Ako su stabilne, uхвати neutrona će se nastaviti sve dok jezgra ne dosegne granicu svoje stabilnosti, granicu kapanja, gdje se  $\beta^-$ -raspadom stvaraju nove stabilnije jezgre na kojima se opet može odviti lanac uhvata neutrona. Nestabilne jezgre raspast će se  $\beta^-$ -raspadom stvarajući pritom novi kemijski element.



Budući da je radioaktivni raspad jezgara statistički proces koji daje podatke o radioaktivnim jezgrama uzorka koje se u nekom vremenu raspadaju, potrebno je uvesti relaciju kojom bi se opisala evolucija broja radioaktivnih jezgara  $N$  u vremenu  $t$  [16,18]:

$$\left(\frac{dN}{dt}\right) = -\lambda N \quad (2.22.)$$

gdje predznak minus „-“ označava smanjenje broja jezgara u vremenu, a veličina  $\lambda$  vjerojatnost raspada jedne jezgre u vremenu, koja je konstantna za neki nuklid pri određenim uvjetima (npr. temperaturi, gustoći), te se naziva konstanta radioaktivnog raspada [16]. Integriranjem jednadžbe 2.20. dobiva se izraz kojim se opisuje broj jezgara koje preostaju nakon vremena  $t$  u kojem se odvija raspad i naziva se zakon radioaktivnog raspada [16,18]:

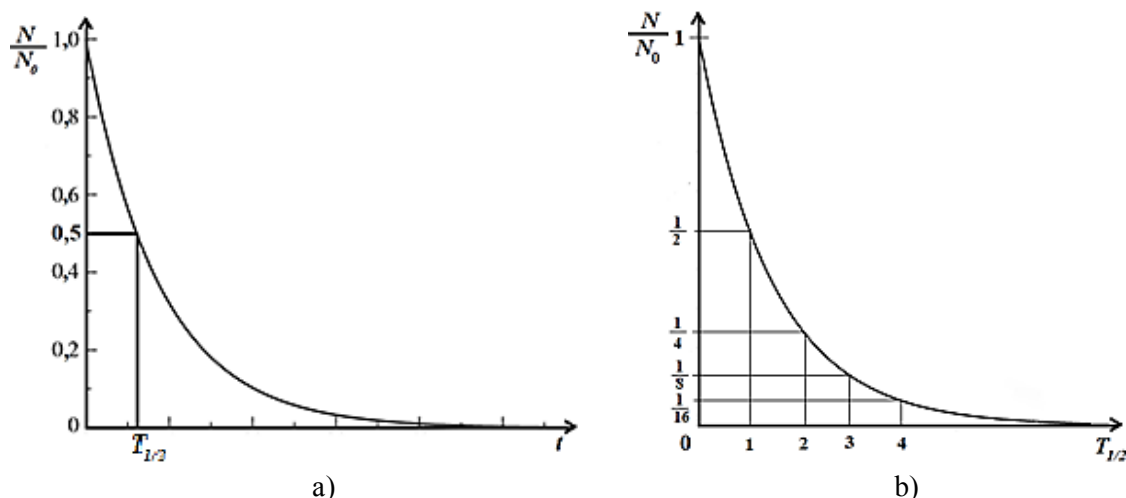
$$N = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (2.23.)$$

Broj jezgara  $N_0$  predstavlja početni broj radioaktivnih jezgara u trenutku  $t = 0$ . Nakon nekog određenog vremena broj početnih jezgara smanjit će se na polovicu ( $\frac{N_0}{2}$ ) i to se vrijeme naziva vrijeme poluživota  $\tau_{1/2}$  (ili  $T_{1/2}$ ) [16,18].

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda \tau_{1/2}} \quad (2.24.)$$

$$\tau_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (2.25.)$$

Ovisnost broja jezgara o vremenu može se prikazati grafom (slika 9.a i 9.b)

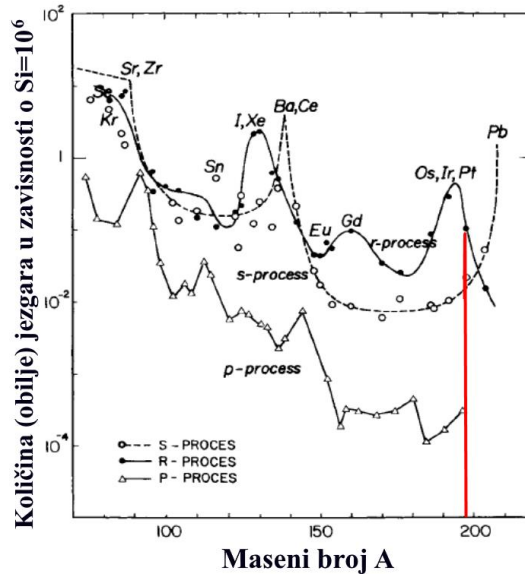


Slika 9. Graf ovisnosti udjela aktivnih jezgara o (a) vremenu i (b) vremenu poluraspada [16].

Uzimajući u obzir vrijeme odvijanja  $\beta^-$  raspada (vrijeme poluživota jezgre  $\tau_\beta$ ) i vrijeme uhvata neutrona ( $\tau_n$ ) razlikuju se dva procesa. Ako je vrijeme poluraspada pri  $\beta^-$  raspadu kratko u odnosu na vrijeme uhvata neutrona i raspad se stigne dogoditi, uхват neutrona se događa sporo te se taj proces naziva spori proces (engl. *slow neutron capture process*) ili *s*-proces. Ako je vrijeme raspada jezgre dulje naspram vremena uhvata neutrona i raspad se ne stigne dogoditi, uхват neutrona se odvio brzo i proces se naziva brzi proces (engl. *rapid neutron capture process*) ili *r*-proces.

Pogleda li se graf zastupljenosti elemenata i jezgara u sunčevu sustavu (slika 2 i 10), vidi se da se izotopi masenog broja  $A = 197$ , koji odgovara masenom broju stabilnog izotopa zlata, mogu dobiti i *s*- i *r*-procesima, ali i *p*-procesom koji odgovara uhvatu protona. Budući da je također prikazano da *r*-proces ima vrhove kod brojeva  $A = 80, 130, 195$ , koji su prouzročeni nakupljanjem elemenata blizu magičnih brojeva zatvorenih ljusaka jezgre ( $N = 50, 82, 126$ ), te da se ovaj rad bavi burnom nukleosintezom kod eksplozije supernova i sudara neutronske zvijezde, događaje za koje je uočen potencijal da predstavljaju okruženja za

odvijanje  $r$ -procesu, u sljedećem potpoglavlju će se razmatrati nukleosinteza zlata  $r$ -procesom.



Slika 10. Prikaz krivulja zastupljenosti elemenata proizvedenih u  $s$ -procesu (iscrtkana linija),  $r$ - i  $p$ -procesu (čvrste linije) prilagođene detekcijama u Sunčevom sustavu [14].

### 3.2.1. $r$ -proces

Nukleosinteza brzim uhvatima neutrona ili  $r$ -procesom odgovorna je za stvaranje gotovo polovice teških elemenata koji slijede nakon željeza. Specifičnost  $r$ -procesu je kratko vrijeme u kojem se odvija uhvat neutrona tako da se  $\beta^-$ -raspad ne stigne dogoditi ( $\tau_n \ll \tau_\beta$ ). Karakteristika brzog uhlata neutrona jest mogućnost uhlata oko 200 neutrona na željeznu jezgru u vremenu  $t = 10 - 100$  s, iako je samo 38 neutrona potrebno kako bi se uspostavilo jednoliko napredovanje  $r$ -procesu. Takav scenarij može se odigrati samo ako je gustoća neutrona jako velika  $n_n > 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  [18,23]. Velika gustoća sa sobom nosi i visoke temperature  $T \geq 10^9$  K na kojima se u isto vrijeme događa i uhvat neutrona ( $n, \gamma$ ) i fotodezintegracija ( $\gamma, n$ ). Kako bi se izračunala količina novonastalih jezgara koristi se Sahina jednadžba koja prikazuje ravnotežu gustoće početnih jezgara  $n(A, Z)$  i gustoće jezgara nastalih uhlatom neutrona  $n(A + 1, Z)$  [14]:

$$\frac{n(A + 1, Z)}{n(A, Z)} \cong 10^{-34} n_n T_9^{-3/2} e^{Q/kT} \quad (2.26.)$$

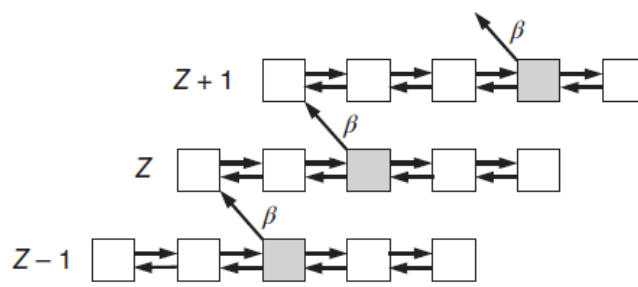
gdje je  $Q$  energija vezanja jezgre po neutronu. Kako bi uhvat neutrona bio učinkovit omjer gustoća početnih jezgara i jezgara nastalih uhlatom neutrona mora biti veći od jedan,  $n(A + 1, Z)/n(A, Z) \gg 1$ . Da se održi takav omjer (pri uvjetima  $T \sim 10^9$  i  $n_n \sim 10^{24} \text{ cm}^{-3}$ )



tipične vrijednosti energije vezanja po neutronu su 2-3 MeV (općenito  $Q \geq 2$  MeV gdje na najnižoj granici od 2 MeV prestaju uhvati i započinje  $\beta^-$ -raspad) [23,24].

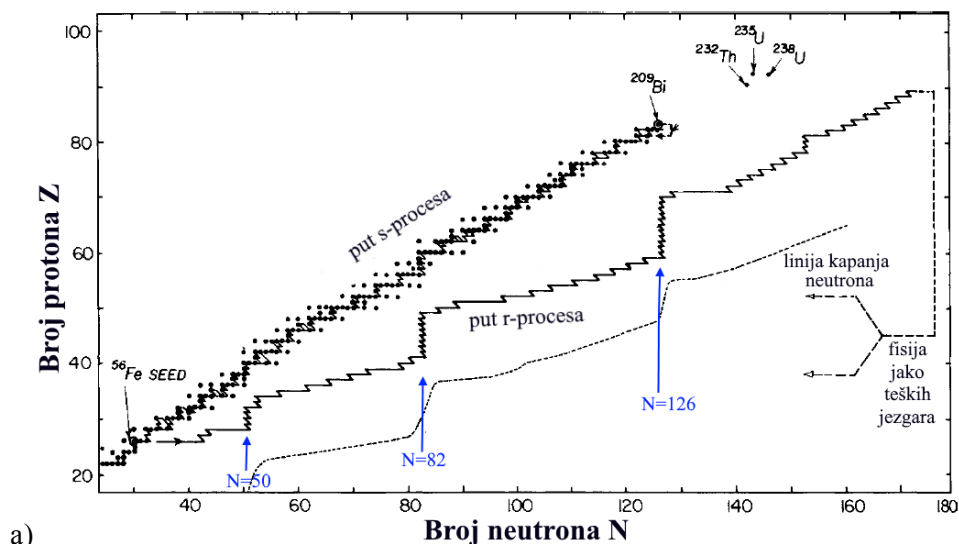
Za svaki broj protona  $Z$  u jezgri se mogu dodavati neutroni, pomičući tu jezgri od doline stabilnosti prema liniji kapanja. Energija vezanja svakog uzastopno dodanog neutrona postaje sve slabija što je više neutrona dodano, sve dok konačno energija vezanja ne padne na nulu. Za neku zadanu vrijednost  $Q$ ,  $T_9$  i  $Z$  distribucija jezgara zadana omjerom  $n(A+1, Z)/n(A, Z)$  imaće maksimum u točki gdje je  $n(A+1, Z) = n(A, Z)$  i činiće vrh. Širina vrha oko tog maksimuma bit će oko jedne do tri jedinice masenog broja  $A$  [23]. Povećavajući gustoću neutrona  $n_n$  u jednadžbi 2.20., pomiče se vrh u kojem su gustoće jednake (tako je jednaka i brojnost jezgara  $N(A+1, Z) = N(A, Z)$ ) prema nižim vrijednostima  $Q$ , sve do granice kapanja neutrona gdje je  $Q = 0$  [14]. Na granici kapanja neutrona neće se doseći jer se u jednom trenutku brzine reakcija uhvata neutrona ( $n, \gamma$ ) i fotodezintegracije ( $\gamma, n$ ) izjednače i bit će u ravnoteži, što na putu  $r$ -procesa označava točku mirovanja. U toj točki vrijeme poluživota  $\beta^-$ -raspada postaje mjerljivo vremenu odvijanja uhvata neutrona  $\tau_\beta \approx \tau_n$ , energija vezanja po neutronu dostiže vrijednosti  $Q = 2$  MeV i brzi  $r$ -proces usporava. Nuklid za koji vrijedi  $\tau_\beta \approx \tau_n$  zove se točka čekanja (engl. *waiting point*) i najčešće su to stabilni nuklidi sa zatvorenim ljuskama magičnih brojeva  $N = 50, 82, 126, 184$  [21,23]. Bitno je primijetiti da svaka točka čekanja ima paran broj neutrona u jezgri. Tu se sakriva činjenica da je energija vezanja po neutronu u jezgri manja za slučajeve kada se u jezgri nalazi paran broj neutrona nego kada se u jezgri nalazi neparan broj neutrona. No kako se onda u jezgrama s parnim brojem neutrona (koje nisu točke čekanja) mogu odvitih uhvati neutrona? Ako se neutronske parnoj jezgri može dodati neutron, tada će zasigurno uslijediti još jedan uhvat neutrona jer je energija potrebna za vezanje tog dodatnog neutrona još uvijek dostupna (2 MeV) i opet se stvara neutronske parna jezgra. U slučaju jezgara s neparnim brojem neutrona, nakon uhvata prvog neutrona energija koja je potrebna za vezanje još jednog neutrona nije dostatna i taj se neutron neće vezati (učinak jako izražen kod velikih  $N$ ). Tako će uglavnom dodavanje neutrona u jezgri stati pri parnim  $N$  i time omogućiti  $\beta^-$ -raspad [23].

Kada se u točki čekanja dogodi  $\beta^-$ -raspad, protonski broj se povećava za 1, a povećava se i  $Q$ , što vodi k daljnjim uhvatima neutrona sve dok se ne dostigne nova točka čekanja i smanji vrijednost  $Q$ . Prateći tako jezgre može se ilustrirati put evolucije  $r$ -procesa (slika 11).

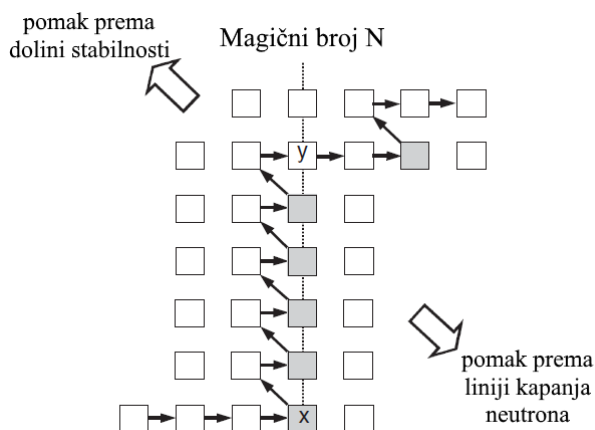


Slika 11. Shema izotopskih lanaca u kojima osjenčani kvadrati predstavljaju najvjerojatniji produkt uhvata neutrona tj. točku čekanja. U točki čekanja odvija se prijenos iz jednog u drugi izotopni lanac  $\beta^-$ -raspadom čime se formira put  $r$ -procesa [18].

Na grafu mape nuklida (slika 12.a) situacija ravnoteže  $(n,\gamma)$  i  $(\gamma,n)$  procesa se očitava u cik-cak uzorku puta  $r$ -procesa, pogotovo kod nuklida magičnih brojeva (slika 12.a i 12.b). Ovdje je svaki uhvat neutrona praćen  $\beta^-$ -raspadom sve dok se ne dostigne jezgra dovoljno blizu doline stabilnosti za koju će opet vrijediti  $\tau_n \ll \tau_\beta$  [14].



a)



b)

Slika 12. Prikaz puta  $r$ -procesa. Slika a) prikazuje put  $r$ -procesa u mapi nuklida na kojem je vidljiv cik-cak uzorak procesa. Na slici su naznačeni magični brojevi kod kojih se susreću točke čekanja u  $r$ -procesu te tu proces ima strm put gdje preskače i do nekoliko izotopskih lanaca [14]. Na slici b) shematski je pobliže prikazan put  $r$ -procesa kod magičnih brojeva neutrona [18].

Opisno rečeno, kada se dostigne navedena ravnoteža između uhvata neutrona i fotodezintegracije jer se  $\beta^-$ -raspadom u jezgrama povećava broj protona koji potječu od neutrona u jezgri, događa se blagi pomak iz ravnoteže  $(n, \gamma) \rightleftharpoons (\gamma, n)$  gdje se jezgre s  $A, Z$  polako pretvaraju u jezgre  $A, Z+1$ , ali ne isključujući pritom procese uhvata i fotodezintegracije [18,23].

Jednadžba kojom bi se opisala vremenska evolucija neke jezgre točnije evolucija gustoće jezgara s određenim  $A, Z$  glasi [23]:

$$\begin{aligned} \frac{dn(A, Z)}{dt} = & +\lambda_n(A-1, Z)n(A-1, Z) - \lambda_n(A, Z)n(A, Z) \\ & + \lambda_\gamma(A+1, Z)n(A+1, Z) - \lambda_\gamma(A, Z)n(A, Z) \\ & + \lambda_\beta(A, Z-1)n(A, Z-1) - \lambda_\beta(A, Z)n(A, Z) \\ & + \text{terminacija fisijom za } A \geq 260 \end{aligned} \quad (2.27.)$$

gdje su  $\lambda_n, \lambda_\gamma$  i  $\lambda_\beta$  vjerojatnosti uhvata neutrona, fotodezintegracije i  $\beta^-$ -raspada, redom. Raspadi naznačeni negativnim predznakom označavaju smanjenje broja jezgara, dok pozitivan predznak označava porast broja jezgara. Za  $r$ -proces vrijedi  $\lambda_n > \lambda_\beta$  budući da je  $\lambda = 1/\tau$  te  $\tau_n \ll \tau_\beta$ . Kada se vjerojatnosti uhvata neutrona i fotodezintegracije izjednače pri  $(n, \gamma) \rightleftharpoons (\gamma, n)$  stvaranje jezgara  $A, Z$  nije moguće i događa se  $\beta^-$ -raspad. Ako bi se pratilo izotopno stvaranje jezgara sa konstantnim  $Z$  u trenutku ravnoteže, jednadžba kojom bi se opisala vremenska evolucija gustoće izotopa elementa sa  $Z$  u kojem se čeka  $\beta^-$ -raspad ( $Q \approx 2$  MeV) glasi [23]:

$$\frac{dn(Z)}{dt} = -\lambda_\beta(Z)n(Z) + \lambda_\beta(Z-1)n(Z-1) \quad (2.28.)$$

i kako bi  $r$ -proces tekao

$$\lambda_\beta(Z)n(Z) = \lambda_\beta(Z-1)n(Z-1) = \text{const} \quad (2.29.)$$

$$n(Z) \propto \frac{1}{\lambda_\beta(Z)} = \tau_\beta(Z) \quad (2.30.)$$

Želi li se dobiti na sličan način evolucija gustoće elemenata sa stalnim masenim brojem  $A$  situacija se malo komplicira. Ako se pretpostavi točka čekanja  $\beta^-$ -raspada u jezgri  $(Z, A)$ , tada je susjedna točka čekanja  $Z+1$  uvjetovana uхватima neutrona na toj jezgri što se naznačuje kao  $A + \Delta A$  gdje je  $\Delta A$  jednak broju uhvata koji su se dogodili na jezgri nakon  $\beta^-$ -raspada jezgre  $Z, A$ . Budući da se ovakva situacija događa pri svakoj točki čekanja primjećuje se raspršenje masenih brojeva pri svakom  $Z$ . Tek sada se može zapisati gustoća elemenata sa stalnim masenim brojem  $A$  kao [23]:

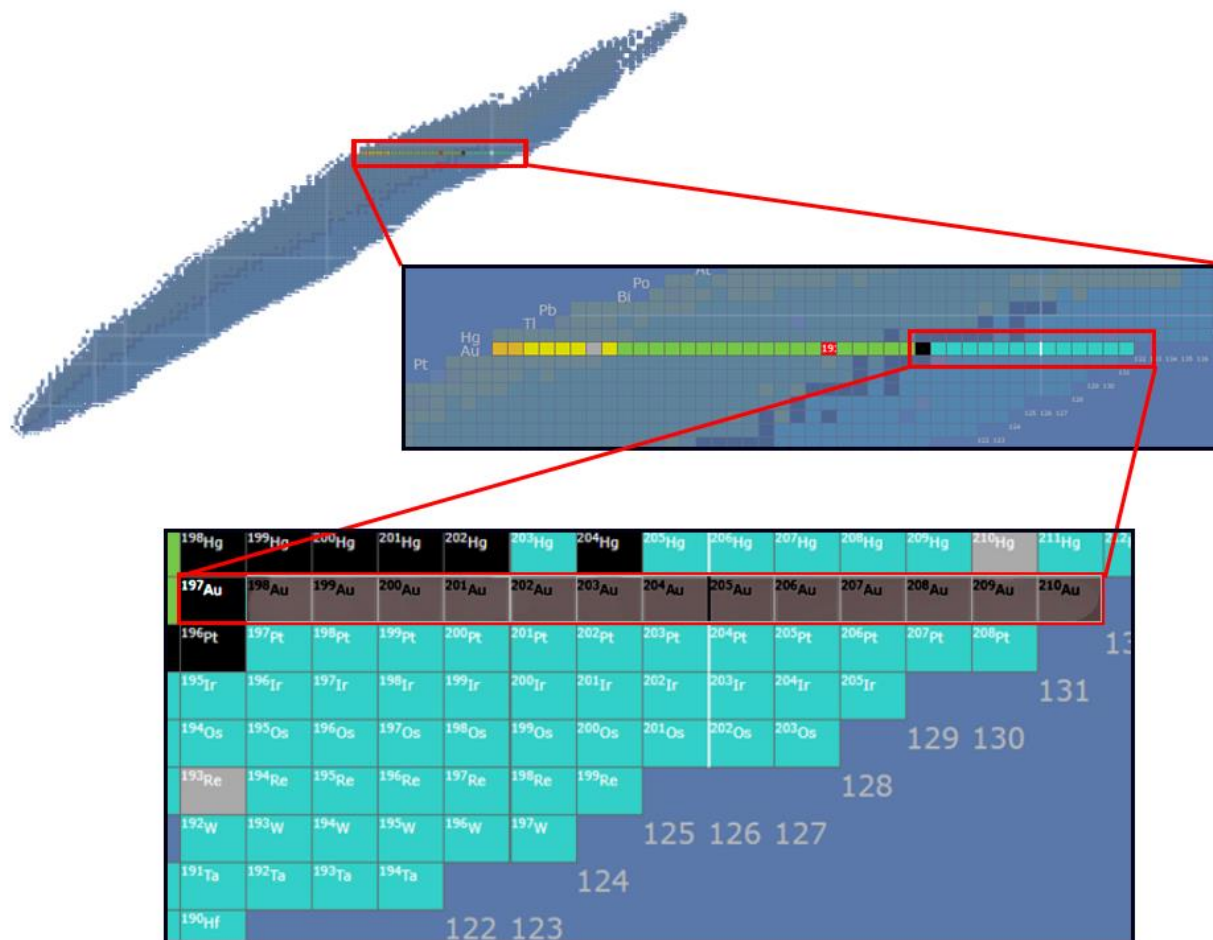
$$n(A) = \frac{n(Z)}{\Delta A} \quad (2.31.)$$

gdje  $\Delta A$  označava za koliko se jedinica pomakne  $A$  pri jednom pomaku  $Z$ . Količine elemenata su se tako raspršile preko intervala  $\Delta A$  koji se javljaju između točaka čekanja. Prema jednadžbi 2.24. može se zapisati da je količina nastalih jezgara s masenim brojem  $A$  pri vremenu poluživota  $\beta^-$ -raspada jezgre točke čekanja  $(A,Z)$  izražena preko gustoće [23]

$$n(A) \propto \frac{\tau_\beta(Z)}{\Delta A} = \frac{\tau_\beta(A,Z)}{\Delta A} \quad (2.32.)$$

Nukleosinteza se nastavlja sve do područja u kojem je  $A \approx 270$  točnije području aktinida. Na tom području više neće prevladavati  $r$ -proces već će biti povoljnije reakcije fisije i materija se reciklira oko točaka  $A \approx 108$  i  $A \approx 146$  [21,23]. Kada se prekine dovod neutrona ili kada tok neutrona padne na neku određenu vrijednost da se  $r$ -proces više ne može odviti, proces staje. Završetak procesa poznat je i pod engleskim nazivom „freeze-out“. Nastale teške jezgre često su nestabilne i podliježu lančanim  $\beta^-$ -raspadima duž izobarnih lanaca karakteriziranim s  $A = \text{konstanta}$ , koji prestaju na stabilnim neutronima bogatim jezgrama (jezgrama u dolini stabilnosti) [18]. Može se dogoditi i fisija usporena  $\beta$ -raspadima (engl.  *$\beta$ -delayed fission*) ako je produkt  $\beta$ -raspada jezgra s  $A \geq 256$  [14].

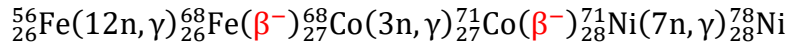
Na mapi nuklida ili Segréovom grafu stabilnosti jezgara stabilni izotop zlata se zbog svoje teške jezgre smjestio visoko (slika 13). Kako bi se došlo do stabilnog izotopa zlata  $^{197}\text{Au}$  mora se pratiti jedan od mnogih puteva  $r$ -procesa koji bi mogli rezultirati tom jezgrom.



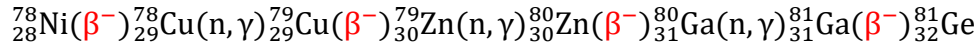
Slika 13. Prikaz položaja stabilnog izotopa zlata u mapi nuklida. Istaknut je stabilan izotop zlata  $^{197}\text{Au}$ , te izotopi zlata koji mogu nastati  $r$ -procesom i podliježu  $\beta^-$ -raspadu [47].

Predstavit će se shema jednog od mogućih puteva nukleosinteze  $r$ -procesom do stabilnog izotopa  $^{197}\text{Au}$ . Shema opisuje kretanje po Segréovom grafu na web stranici <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html> [22] i parametri uzeti u obzir su vrijeme poluživota tipično za  $r$ -proces  $\tau_\beta \approx 0,01 - 0,05$  s, produljeno vrijeme poluživota u točkama čekanja i najčešći kemijski elementi koji su točke čekanja te energija vezanja u jezgri po neutronu  $Q \approx 3$  MeV [18,23]. Zapisane jezgre koje su povoljne za uhvat neutrona imaju vrijeme poluživota  $\tau_\beta \leq 0,05$  s, pri čemu se pazilo na put  $r$ -procesa u točkama u kojima nastupa  $\beta^-$ -raspad. Naime, već spomenut efekt parnog broja neutrona u jezgrama utjecao je na izbor jezgara na kojima se odvija  $\beta^-$ -raspad. Budući da se pratio graf stabilnosti opaženih nuklida, predstavljeni ponuđeni put nije ušao u područje nuklida s neodređenim vremenom poluživota ili nuklida koji nisu opaženi, tako da je za neke elemente poput kositra Sn sagledano čak i vrijeme poluraspada  $\tau_\beta \approx 0,1$ . Na ostatku ponuđenog puta  $r$ -procesa gdje god se moglo prema podacima na grafu, uvjet  $\tau_\beta < 0,05$  s je održan. Predstavljena shema se bazira na prethodno definiranim parametrima, dakle ona predstavlja

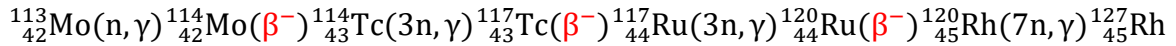
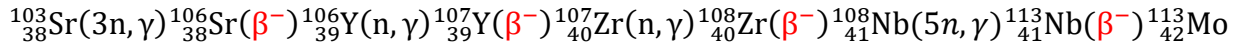
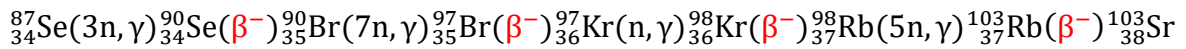
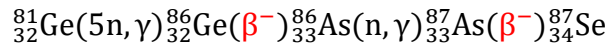
samo jedan od mnogo mogućih puteva koje se može slijediti kako bi se došlo do zlata (shema ilustrirana na slici 14).



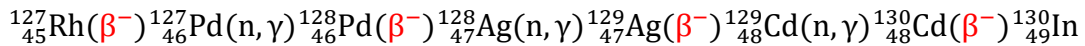
Točke čekanja za  $N = 50$ :



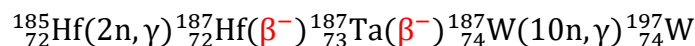
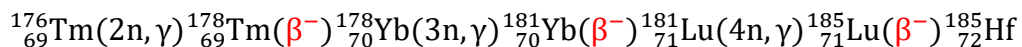
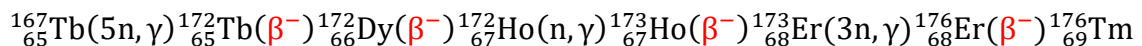
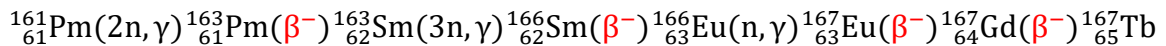
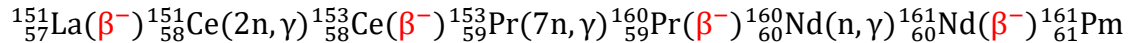
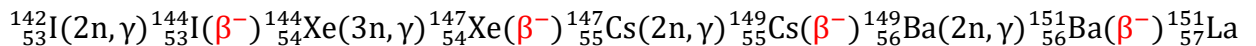
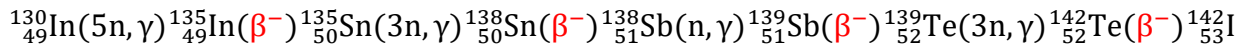
Nastavak uhvata neutrona:



Točke čekanja za  $N = 82$ :



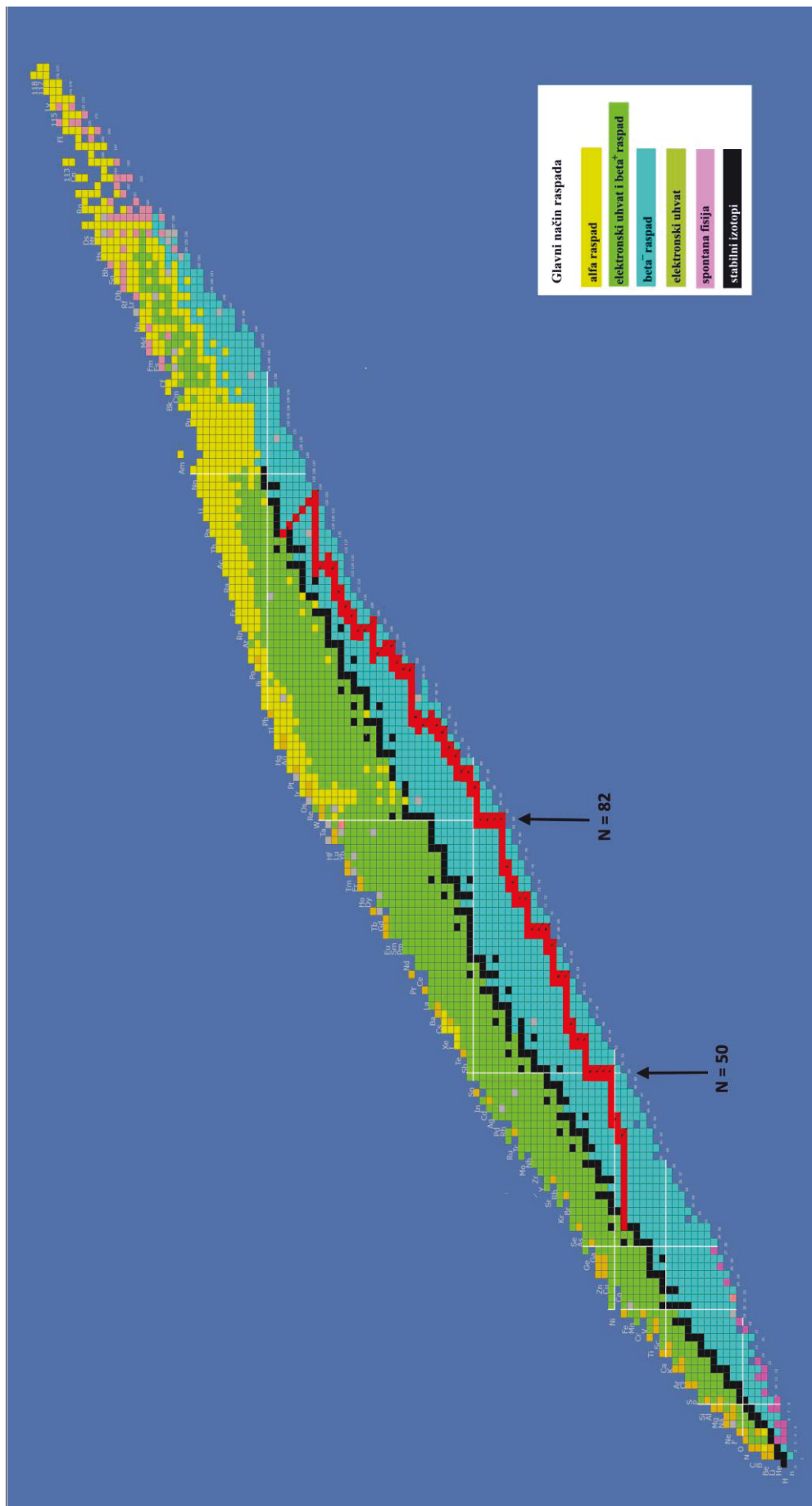
Nastavak uhvata neutrona:



Nakon stvaranja jezgre s  $A = 197$  mogu uslijediti uzastopni  $\beta^-$ -raspadi do stabilne jezgre zlata  $^{197}\text{Au}$  što je vrlo moguće u slučaju prekida toka neutrona u tom trenutku, tj. ako prestanu  $r$ -proces i nastupe  $\beta^-$ -raspadi duž izobarnih lanaca.



Prikazana shema predstavlja samo jedan od mogućih puteva  $r$ -procesa koji vode do stvaranja teških elemenata, točnije zlata. Ovakav slijed nuklearnih reakcija događa se u kratkom vremenu (od 10-100 s) u okruženjima koja imaju povoljne uvjete za odvijanje ovakvog procesa poput predloženih - eksplozija supernove i sudara neutronske zvijezde.



Slika 14. Ilustracija mape nuklida sa predstavljenom shemom puta  $r$ -processa do stabilnog izotopa zlata  $^{197}\text{Au}$  (crveno) gdje strelice prikazuju  $\beta^-$ -raspade pri kojima se neutron pretvara u proton čineći nove elemente. U legendi su naznačeni glavni načini raspada izotopa elementata u Segréovom grafu i razvrstana su po bojama.



*R*-proces se aktivno istražuju u modernim laboratorijskim središtima u svijetu. Dva postrojenja sljedeće generacije koja će ubrzivačima pokušati simulirati uvjete slične onima pri eksploziji supernove i sudara neutronske zvijezde i koja će proučavati *r*-proces su postrojenje za istraživanja antiprotonima i ionima FAIR (*Facility for Antiproton and Ion Research*) u Darmstadtu i postrojenje za snopove rijetkih izotopa FRIB (*The Facility for Rare Isotope Beams*) u Michiganu.

FAIR je dio GSI Helmholtz centra za istraživanje teških iona i omogućava znanstvenicima stvaranje uvjeta u laboratoriju koji su slični uvjetima potrebnim za nukleosintezu u svemiru (visoke temperature, tlakovi i gustoće). Kako bi to učinili, česticama se bombardiraju mali uzroci tvari pri čemu će se nakratko stvoriti materija, odnosno jezgre koje su postojale u svemiru tijekom nukleosinteze. Istraživanja nuklearne strukture u astrofizici i *r*-procesa na FAIR-u odvijat će se pomoću spektroskopije zraka visoke rezolucije i spektroskopije raspada HISPEC/DESPEC (*High-Resolution In-flight SPECTroscopy/DEcay SPECTroscopy*). Za *r*-proces od velike su važnosti DESPEC eksperimenti u kojima se radioaktivni ioni usporavaju do mirovanja pomoću detektora raspada na bazi silicija. Ovaj sustav će biti okružen različitim visokorazlučivim detektorima među kojima je i detektor neutrona. Tu će se moći proučavati raspadi jezgara na granici kapanja neutrona pogotovo onih ključnih pri *r*-procesu [25].

FRIB je dio sveučilišta u Michiganu i eksperimentima koji se u njemu provode želi se izmjeriti brzina reakcija i kvalitativno opisati nuklearna svojstva jezgara (do  $A=195$ ) koje daju uvid u nukleosintezu u svemiru. U FRIB-u će se proizvoditi zrake rijetkih izotopa energija od 200 MeV po jedinici atomske mase za uran i intenziteta do 400 kW koje se koriste za laboratorijsko sintetiziranje teških elemenata. Takvi pokusi mogu pružiti uvid u sam doseg postojanja jezgara na Segréovom grafu te bi se mogla bolje definirati granica kapanja neutrona do  $A = 100$ . Mogućnost proizvodnje jezgara uključenih u *r*-proces u laboratoriju, po prvi put pružit će potrebne informacije za stvaranje kvantitativnog modela *r*-procesa. Također moći će se utvrditi okruženja u svemiru na kojima se odvija *r*-proces i interpretirati astronomska opažanja kemijske povijesti galaksije. Trenutačno, podaci koje pružaju modeli *r*-procesa ne mogu biti uspoređeni s opaženim podacima zbog nedostatka u razumijevanju fizike neutronima bogatih jezgara. Mjerenja na FRIB-u mogu popraviti tu sliku određivanjem mase i svojstava  $\beta$ -raspada jezgara s masenim brojem  $A \geq 195$  i jezgara ključnih točaka čekanja kod  $N = 82, 126$  te će se za njih moći odrediti energije vezanja jezgre po neutronu [26].

Problematika  $r$ -procesa i astrofizičkih okruženja gdje se mogao odviti vrlo je živa i interes znanstvenika za razumijevanje metoda sinteze teških elemenata, uključujući i zlato, raste. Jedino preostaje pitanje metoda i pristupa proučavanja tih procesa. Novim pristupima problematici  $r$ -procesa bilo bi moguće pobliže ga opisati i dati odgovor na pitanje gdje se u svemiru on može odvijati. Kao potencijalno rješenje u posljednjim godinama javljaju se okruženja visokoenergetske supernove i sudara neutronske zvijezde. Pokazalo se da su ta okruženja uistinu pogodna za odvijanje  $r$ -procesa te se pokazalo da kemijski elementi stvoreni u tim okruženjima i njihove količine odgovaraju detektiranim količinama teških elemenata u svemiru, točnije Sunčevom sustavu. No i dalje su mnogi znanstvenici podijeljeni u toj ideji jer dosadašnji modeli nastanka teških jezgara u sebi sakrivaju mnoge probleme (količina nastalog zlata u eksploziji supernove, učestalost sudara neutronske zvijezde i sami modeli sudara, modeli nukleosinteze  $r$ -procesom blizu linije kapanja neutrona i drugi) koji bi se u bliskoj budućnosti mogli riješiti.

### 3.3. *Supernove*

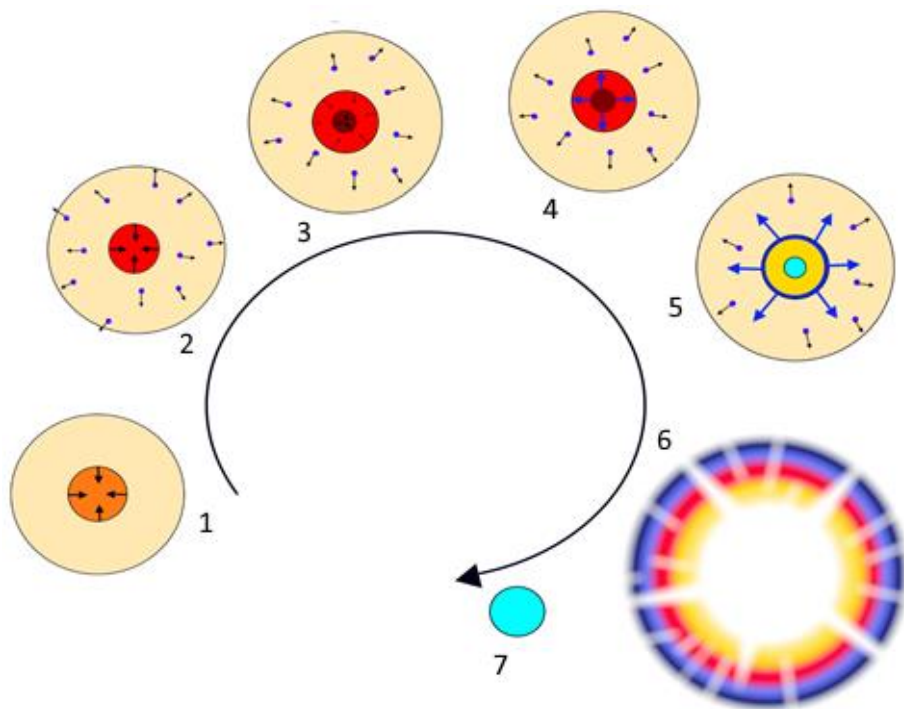
Priča li se o supernovama, najčešće se spominju eksplozivna urušavanja masivnih zvijezda  $M \gtrsim 10M_{\odot}$ . Gorivo u obliku energije u posljednjim fazama života zvijezde u velikim količinama se gubi u obliku energetskih neutrina koji prate niz reakcija nastajanja sve težih elemenata. Tlak termonuklearnih reakcija koji je djelovao nasuprot gravitaciji više ne može održavati ravnotežu i zvijezda se urušava pod utjecajem gravitacijske sile. Kako se zvijezda urušava, procesu sažimanja sredice protivi se tlak degeneriranih elektrona u ioniziranoj materiji zvijezde. Chandrasekhar je pokazao da je ovakav proces stabiliziran masom danom s

$$M_{Ch} = 1,44(2Y_e)^2[1 + F(T)]M_{\odot} \quad (2.33.)$$

i predstavlja Chandrasekharovu masenu granicu gdje je  $Y_e$  udio (frakcija) elektrona tj. broj elektrona po barionu, a  $F(T)$  korekcija za završnu temperaturu (0,2-0,3 za masivne zvijezde) [19]. Temperatura u unutrašnjosti zvijezde raste zajedno s gustoćom i tlakom i postiže visoke vrijednosti na kojima se odvijaju dva značajna procesa. Istovremeno dolazi do fotodezintegracije nekih jezgara željeza gdje se one raspadaju zbog utjecaja visokoenergetskih fotona (prateći  ${}^{56}_{26}\text{Fe} + \gamma \rightarrow 13{}^4_2\text{He} + 4n$ ), dok druge jezgre pod snažnim utjecajem gravitacije uhvatom elektrona ( $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$ ) čine neutronima bogate izotope. Uхват elektrona smanjuje udio elektrona u odnosu prema barionima  $Y_e$ , a time i Chandrasekharovu granicu te stvara velik broj neutrina koji napuštaju sredicu zvijezde [24].

Budući da procesi uhvata i fotodezintegracije zahtijevaju energiju i remete ravnotežu, oni samo ubrzavaju kolaps sredice jer energija izlazi iz zvijezde u obliku novostvorenih visokoenergetskih neutrina. Kako se sredica sažima, temperatura raste i fotoni imaju dovoljno energije da razore čak i jezgre helija sve do protona  ${}^4_2\text{He} + \gamma \rightarrow 2\text{p} + 2\text{n}$  [19]. Unutarnji i vanjski dijelovi sredice pod utjecajem reakcija uhvata i fotodezintegracije imaju različite brzine kolapsa. Unutarnji dio sredice se brzo urušava, dok se vanjski urušava sporije [27]. U unutrašnjem dijelu sredice stvara se materija bogata neutronima kojoj doprinosi i uхват elektrona na protone, stvarajući neutronska sredicu zvijezde. Kada gravitacija u potpunosti zavlada u sredici ona pritišće nukleone, pogotovo one u središtu i tamo se gustoća povećava do gustoće atomske jezgre ( $\sim 10^{17} \text{kg m}^{-3}$ ) [19]. Nuklearna sila protivi se daljnjem tlaku gravitacijskog sažimanja (zbog Paulijeva principa za neutrone koji su fermioni) i kolaps naglo prestaje što posljedično stvara poremećaj u samoj sredici zvijezde u obliku udarnog vala materije koji će se nastaviti širiti od njene unutrašnjosti prema van pri čemu na svom putu nalijeće na vanjski sloj sredice i slojeve zvijezde koji ju okružuju. Ako vanjski sloj zvijezde nije jako širok energični udarni val samo će proći kroz njega rezultirajući eksplozijom, no ako je vanjski sloj zvijezde širok, energija udarnog vala moći će se rasuti na reakcije fotodezintegracije željeznih jezgara u tom sloju [27]. Tada energija udarnog vala nije dovoljna za eksploziju zvijezde i on nakratko zastaje. Budući da se u sredici još uvijek odvijaju termonuklearne reakcije koje ju ostavljaju punu neutronska nastala protoneutronska zvijezda se smanjuje. Razlog smanjenja protoneutronske sredice je emisija visokoenergetskih neutrina svih okusa koji nalijeću na barijeru gustoće zaustavljenog udarnog vala koji je pun protona i neutrona od dezintegracije željeznih jezgri [15]. Područje između početnog udarnog vala i nastale protoneutronske zvijezde ima relativno malu gustoću, jer su se neutroni skupili u središtu sredice zvijezde, vruće je i entropija je u njemu jako velika, no čak se i ono može podijeliti na područje bliže i dalje od protoneutronske zvijezde. U području bliže protoneutronske zvijezdi odvijaju se uhvati elektrona na protonima i neutronima koji hlade sredicu emisijom neutrina, dok se u daljnjem području odvija suprotan proces uhvata neutrona koji prenose energiju u to područje [18]. Ovo područje dodatno se zagrijava neutrinima koji na svom putu od protoneutronske zvijezde prema van nisu uspjeli probiti barijeru zakočenog udarnog vala [28]. U tom zagrijanom dijelu pohranjena je velika energija i mjesto je iznimno visoke entropije, poznatije i pod nazivom „vrući mjehurić“ (engl. *hot bubble*). U vrućem mjehuriću neutrinu stalno nalijeću na barijeru gustoće udarnog vala i svojim mu naletom povećavaju energiju [27]. Udarni val ojačan energijom neutrina širi se slojevima zvijezde zajedno sa neutronima i protonima

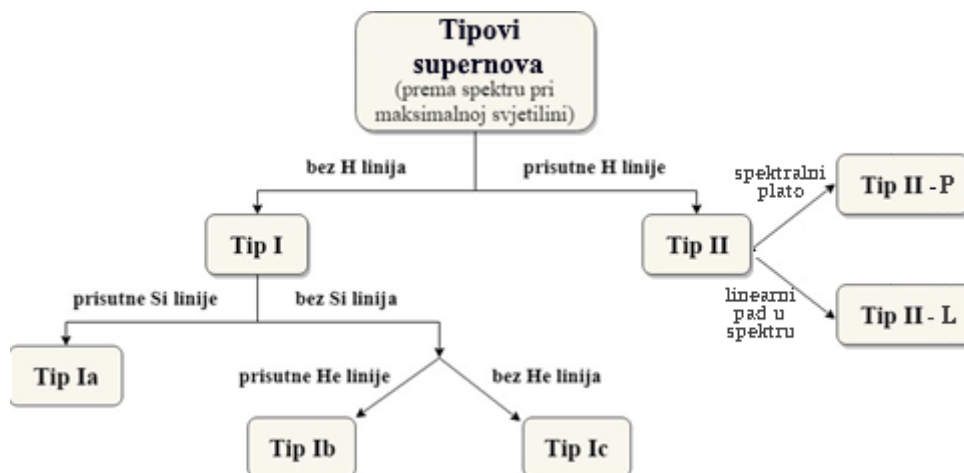
bogatom materijom „nošenom“ neutrinima iz područja protoneutronske zvijezde, poznatijom pod imenom neutrinski vjetar [28]. Kada udarni val dođe do površine zvijezde razara ju u spektakularnom događaju zvanom supernova te razbacuje materijal zvijezde (atome različitih elemenata, neutrone, neutrine i fotone) iz vanjskih slojeva sredice i zvijezde u svemir [15]. Taj se materijal brzo širi i hladi, ali predstavlja i područje visoke entropije u kojem se mogu sintetizirati elementi teži od željeza [28]. Izbačena materija se raspoređuje lokalno oko eksplozije u područje do kojih su došli valovi eksplozije [1]. Ono što preostaje iza eksplozije jest unutrašnja neutronska sredica, sada već i neutronska protozvjzda. Sudbina te protozvjzde ovisi o masi početne umiruće zvijezde. Ako masa početne zvijezde nije bila jako velika (oko  $M < 25M_{\odot}$ ), ta će se neutronska sredica (protoneutronska zvijezda) stabilizirati i postati gusta rotirajuća neutronska zvijezda. U slučaju kada je masa početne zvijezde prevelika gravitacijske sile će još jednom prevladati u protozvjzdi i nastat će kataklizmička crna rupa [16]. Na slici 15 prikazan je shematski prikaz evolucije zvijezde do eksplozije supernove.



Slika 15. Shematski prikaz evolucije zvijezde od kolapsa sredice zvijezde do supernove. (1) Željezna sredica se počinje sažimati pod utjecajem gravitacijske sile i temperatura u njoj se povećava. (2) U sredici nastupaju procesi fotodezintegracije i uhvata elektrona čija je posljedica emisija neutrina iz sredice i njen kolaps. (3) Unutrašnji dio sredice brže se sažima od njenog vanjskog dijela te dolazi do granice sažimanja kada je gustoća neutronska jednaka gustoći atomske jezgre. (4) Zbog Paulijeveog principa za neutrone kolaps unutarnje sredice se zaustavlja i stvara se udarni val koji se širi zvijezdom. (5) Unutar sredice stvara se središte bogato neutronima tj. protoneutronska zvijezda, a oko nje visokoentropijski „vrući mjehurić“ i područje bogato neutrinima koji u obliku neutrinskog vjetra daju energiju udarnom valu da se proširi zvijezdom. (6) Udarni val se širi zvijezdom i ona eksplodira u supernovu. (7) Ono što preostaje nakon supernove jest neutronska zvijezda [15].

Supernove koje nastaju kolapsom sredice masivnih zvijezda prema spektrima koji su opaženi pri njihovom maksimalnom luminozitetu prilikom eksplozije dijele se na tipove Ib (odsutne spektralne linije vodika i prisutne spektralne linije helija), Ic (odsutne spektralne linije vodika i odsutne spektralne linije helija) i tip II (prisutne jake spektralne linije vodika). Navedene vrste supernova poznatije su i pod nazivom supernove sa urušenjem sredice (engl. *core colapsing supernovae*) [16]. Svim supernovama se može pratiti ovisnost luminoziteta o vremenu. Supernove tipa II u takvom grafu mogu pokazivati linearan pad luminoziteta u spektru (tip II-L) ili se može javiti stagnacija luminoziteta koja je u spektru definirana platoom (tip II-P).

No što s manje masivnim zvijezdama, mogu li one eksplodirati u novu ili supernovu? Zvijezde mase  $M \lesssim 8M_{\odot}$ , tijekom svog životnog vijeka nemaju dovoljnu masu da stvore i sagore gorivo poslije helija i njihov put završava u klasi bijelih patuljaka. Takve zvijezde mogu eksplodirati kao supernova kada se izbace iz ravnoteže gravitacijske sile i tlaka termonuklearne fuzije, točnije kada dosegnu svoju Chandrasekharovu granicu. Zvijezda tada eksplodira u supernovu tipa Ia (prisutne spektralne linije ioniziranog silicija Si) [16]. Razlika u nukleosintezi zvijezda malih i velikih masa je u tome što zvijezde malih masa u svojim reakcijama fuzije mogu stvoriti elemente do ugljika i kisika, dok zvijezde velikih masa mogu fuzijom stvoriti elemente do željeza.

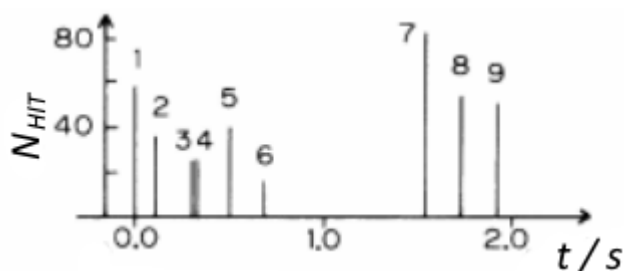


Slika 16. Shema klasifikacije supernova prema opaženim spektrima pri maksimalnom luminozitetu prilikom eksplozije.

Tijekom eksplozije supernove, pogotovo tipa II, oslobađa se velik broj slobodnih neutrona koji se uhvatom integriraju u već postojeće jezgre i raspadaju na protone stvarajući tako sve teže i teže elemente. Supernova tipa II nakratko može svijetliti svjetlošću 100 milijardi Sunaca, a kada se gleda samo izbačeni materijal priča se o kinetičkim energijama

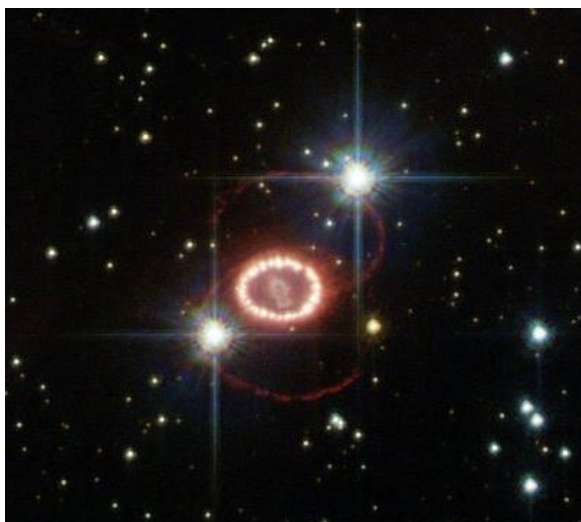
od  $10^{47}$  J. No čak su i ti dijelovi energije tek mali dio ukupne energije koju supernova emitira. Ostatak energije zrači u obliku neutrina [15].

Neutrini se mogu detektirati preko reakcija s tvari u detektoru koje induciraju zračenje. Primjerice, 23.-24. veljače 1987. godine u Japanu detektor Kamiokande II po prvi put detektirao je 12 događaja povezanih s neutrinima eksplozije supernove SN1987A registrirajući Čerenkovljevo zračenje u velikom spremniku vode, i to čak 18 sati prije detekcije same supernove. Neutrini, točnije antineutrini su međudjelovali s protonima u molekulama vode ( $\bar{\nu}_e + p \rightleftharpoons n + e^+$ ) i stvorili pozitrone koji su detektirani [29]. Kada nabijeni leptoni putuju medijem stvara se vidljivo (VIS) zračenje koje se detektira i umnaža fotomultiplikatorima te se bilježi broj nastalih elektrona koji dođu do anode ( $N_{hit}$ ) i puls električne struje. Budući da je jedini svemirski izvor neutrina u tom razdoblju bila supernova SN1987A, opaženi signali (slika 17) bili su pripisani neutrinima te supernove. Na temelju podataka dobivenih u istraživanju neutrina supernove SN1987A moglo se procijeniti da je količina energije supernove koja je nošena neutrinima  $\sim 10^{58}$  MeV [29].



Slika 17. Prikaz 9 od 12 događaja detektiranih u vremenskom intervalu od dvije sekunde koji su sigurno povezani s emisijom neutrina iz SN1987A detektiranih 23. veljače 1987. godine 18 sati prije detekcije eksplozije supernove. Visina svake linije koja predstavlja događaj povezana je s relativnom energijom tog događaja [29].

Supernove s urušenjem sredice odgovorne su za stvaranje velike količine kisika, dok su supernove tipa Ia odgovorne za stvaranje većine željeza opaženog u svemiru. Velike količine izbačenog materijala i neutrona omogućavaju uhvate neutrona koji stvaraju sve teže jezgre.



Slika 18. Supernova 1987A tipa II slikana *Hubble* teleskopom u prosincu 2006. godine, a prvi put je opažena 23. veljače 1987. godine i nalazi se u susjednoj galaksiji Magellanovom oblaku. Na slici su najsajjniji objekti prsten koji okružuje umiruću zvijezdu i dvije zvijezde u pozadini. Ono što još nije vidljivo, a treba se opaziti nakon smanjenja sjaja guste prašine i materije u središtu koja je grijana nuklearnim raspadima je nastala neutronska zvijezda kao produkt ove supernove. Preuzeto s internet stranice *Hubble space telescope* koja operira pod suradnjom Europske svemirske agencije (*European Space Agency*) i *Hubble* teleskopa koji je zajednički projekt ESA-e i NASA-e. Zasluga: ESA/Hubble & NASA; objavljeno 17.10.2011. [30].

### 3.3.1. Nukleosinteza u eksplozijama supernove

Dugo se razmatralo može li se nukleosinteza elemenata koji imaju  $A > 70$  uopće odviti pri eksploziji supernove putem  $r$ -procesa. Razmatranje samo eksplozivnog gorenja pri širenju razornog udarnog vala koji putuje vanjskim slojevima zvijezde ukazivalo je na potpuno izgaranje elemenata iz ljusaka zvijezde. Ako udarni val dođe do sloja zvijezde u kojem je gorio silicij, on ga pritišće do maksimalne gustoće i zagrijava do maksimalne temperature ( $T \sim 5 \times 10^9$  K) na kojoj silicij u potpunosti eksplozivno izgara do jezgara u području željeza,  ${}^{56}_{26}\text{Ni}$ . Budući da je dio energije udarnog vala bio iskorišten za potpuno izgaranje silicija, kada val dođe do vrha zone izgaranja silicija, ne može više podići temperaturu dovoljno visoko te se odvija nepotpuno izgaranje silicija. Ovdje se medij obogaćuje različitim vrstama kao produkt djelomičnog izgaranja kao što su nikal (s najvećim udjelom), silicij, željezo. Val dalje nastavlja kroz preostale slojeve zvijezde i potiče eksplozivna gorenja kisika (medij se obogati silicijem, sumporom, argonom), neona i ugljika (medij se obogati pretežito kisikom (70%) i silicijem), dok se vanjski slojevi izgaranja helija i vodika pod naletom vala samo rasprsnu. Jezgre koje nastaju eksplozivnim gorenjem nude rješenje stvaranje jezgara do  ${}^{56}_{26}\text{Ni}$ , ali ne nude rješenje za sintezu teških elemenata. Međutim

ni njihova uloga nije beznačajna. Dapače, ti elementi će služiti kao početne točke daljnje nukleosinteze [18].

Potreba za neutrinskim vjetrom, kao izvorom energije za razorni udarni šokval, u procesu nukleosinteze nije jedina. Moguće rješenje problema nukleosinteze teških elemenata javilo se baš kao neutrinski vjetar i to već u području vrućeg mjehurića. Budući da je vrući mjehurić područje iznad protoneutronske zvijezde, bogato je neutronima ( $\rho_n \gtrsim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ), vruće je ( $T \sim 10^{10} \text{ K}$ ), ima visoke razine entropije (entropija po barionu  $s \gtrsim 200$ ; pogoduje fotodezintegraciji jezgara željeza što okolinu čini bogatom neutronima) i brzo se širi ( $t < 1 \text{ s}$ ). Sve nabrojano je iznimno povoljno odvijanju  $r$ -procesa. Budući da  $r$ -proces može svojim putem doći sve do aktinida, također je potrebno mnoštvo neutrona po jezgri koja se koristi za nukleosintezu, točnije potreban je minimalan omjer neutrona i protona  $n/p \approx 7-8$  [31]. Sada se može uočiti uloga elemenata nastalih eksplozivnom nukleosintezom. Oni će služiti kao početne točke tj. začetne jezgre za daljnje stvaranje elemenata.

Vrući mjehurić u blizini protoneutronske zvijezde sastoji se većinom od slobodnih protona i neutrona u nuklearnoj ravnoteži i velikog broja neutrina koji se emitiraju s površine neutronske zvijezde.



Ono što će biti kritično za odvijanje nuklearnog  $r$ -procesa će biti frakcija (udio) elektrona u odnosu prema barionima  $Y_e$ . Frakcija elektrona jednaka je frakciji protona  $Y_p = Y_e$ , i što je njen iznos veći, to je manja frakcija neutrona tj. količina slobodnih neutrona. Frakcija elektrona tako regulira omjer neutrona i jezgri na kojima se odvija nukleosinteza i određuje okruženje na kojem se mogu odviti različiti procesi nukleosinteze. Ona direktno utječe i na količinu nastalih elemenata. Što je frakcija elektrona veća, manja je mogućnost nastajanja teških elemenata te bi se pri tim nuklearnim reakcijama vrhovi zastupljenosti elemenata pomaknuli na niže masene brojeve. Analogno tome, što je frakcija elektrona manja, to je veća vjerojatnost nastajanja teških jezgara i vrhovi se pomiču k većim masenim brojevima [32]. Za odvijanje  $r$ -procesa potrebne su niske frakcije elektrona.

Veliki tok neutrina emitiranih s površine protoneutronske zvijezde omogućava interakciju neutrina s neutronima u zvijezdi i u području vrućeg mjehurića (jednadžba 2.34.). Neutroni tada prelaze u protone i smanjuje se količina neutrona, što utječe na uhvate neutrona, stvaranje težih jezgara i razvoj trećeg vrha  $r$ -procesa (kod  $A = 195$ ). No i taj problem se može premostiti ako se dogodi eksplozija jako visoke entropije u kratkom



vremenskom periodu ekspanzije, pri čemu je tada elektronska frakcija  $Y_e$  niska [27]. U području vrućeg mjehurića u blizini neutronske zvijezde elektronska frakcija  $Y_e$  može biti dovoljno niska jer se sredica hladi uhvatom elektrona i pozitrona (jednadžbe 2.34. i 2.35.).

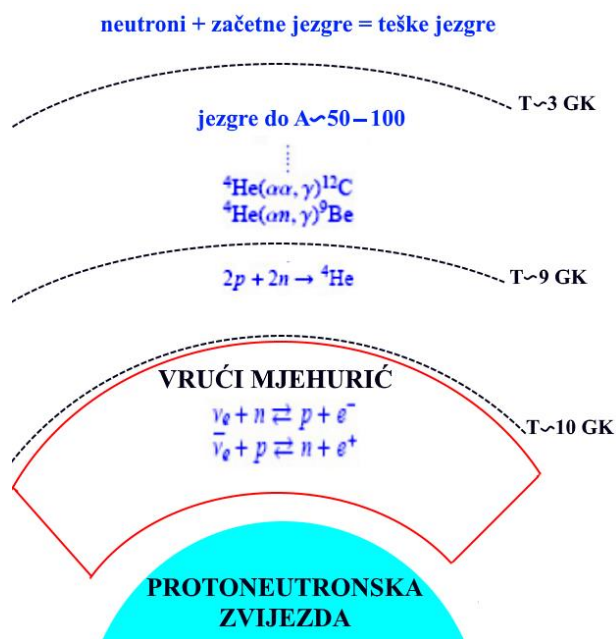
Kako se neutrinski vjetar širi i hladi, temperatura postaje dostatna da se u vrućem mjehuriću omogući združivanje neutrona i protona u  $\alpha$  čestice. To se događa kada brzina uspostavljanja ravnoteže  $p \rightleftharpoons n$  bude manja od brzine širenja materijala i tada slabe interakcije prestaju [33]. Neutrinski vjetar se sada sastoji od mnoštva  $\alpha$  čestica (koje su konzumirale gotovo sve protone) i slobodnih neutrona. Alfa čestice ne mogu uhvatiti neutrone, ali mogu činiti teže jezgre fuzijom. Širenjem vjetar postiže temperaturu na kojoj se mogu odvijati  $\alpha$ -procesu u kojima se stvaraju jezgre koje će biti začetne jezgre za daljnje nuklearne procese [18]. Početni korak  $\alpha$ -procesu je



i nastavlja se sve do stvaranja jezgara s  $A \approx 50 - 100$ . Na temperaturama  $T \sim 3$  GK,  $\alpha$ -proces staje i ako je još uvijek održan velik broj slobodnih neutrona  $r$ -proces može započeti. Za uspješni  $r$ -proces bitno je da  $\alpha$ -proces ne stvori preteške začetne jezgre. Ako bi se to dogodilo ne bi bilo dovoljno slobodnih neutrona za odvijanje  $r$ -procesu, no i taj problem se premostio visokom entropijom i kratkim vremenom širenja vjetra koja usporava prvi korak  $\alpha$ -procesu  ${}^4\text{He}(\alpha, \gamma){}^9\text{Be}$  ili poprilično visokom frakcijom elektrona  $Y_e \gtrsim 0.484$  [18,33]. Visoka frakcija elektrona održava se velikim tokom neutrina pri neutrinskom vjetru i  $\alpha$ -procesom. Alfa proces povećava  $Y_e$  jer iscrpi protone, ostavljajući neutrone u neutrinskom vjetru koji uhvatom neutrina prelaze u protone i elektrone [33]. Neutrinski vjetar tako rasipa masu materijala koji je u početku (>83%) bogat protonima, dok je masa u kojoj je  $Y_e \lesssim 0.48$  otprilike  $M \lesssim 10^{-4} M_\odot$ . Frakciju elektrona u daljnjem širenju vjetra diktirat će uhvati neutrina na protone i smanjivat će  $Y_e$  na vrijednosti manje od 0,5, koje su karakteristične za neutrinski vjetar, što za vruću i visokoentropijsku pozadinu supernove nije problem jer se tako razvija područje bogato neutronima. U protonima bogatoj početnoj ispuštenoj masi mogu se uhvatima protona stvarati teške jezgre, no opaženo je da se stvaraju samo jezgre do  $A \approx 64$  dok stvaranje još težih jezgara nije povoljno. Ispuštena masa bogata neutronima odgovorna je za stvaranje jezgara s  $A \approx 60$  i više [34].

Budući da su se u neutrinskom vjetru  $\alpha$ -procesom razvile jezgre  $A \approx 50 - 100$  i da je širenjem temperatura neutrinskog vjetra pala (na 3 GK), okolina postaje povoljna za uhvate neutrona na postojećim jezgrama i  $r$ -proces će se odvijati brže nego klasični jer je

izbjegao točke čekanja kod  $N = 50$  [18]. Shema procesa koji prate širenje neutrinog vjetra prikazana je na slici 19.



Slika 19. Shema reakcija koje se odvijaju pri neutrinom vjetru. Od vrućeg mjehurića i njegove okoline koja je bogata neutronima, do materije bogate težim jezgrama nastalima  $\alpha$ -procesom na kojoj se mogu odvijati brzi uhvati neutrona.

Izbjegavanje točke čekanja u grafu zastupljenosti elemenata znači smanjeni vrh kod magičnog broja 50, dok kod drugih magičnih brojeva  $N = 82, 126$  koji su još uvijek točke čekanja, ovakav visokoentropijski scenarij omogućava vrhove na grafu zastupljenosti elemenata kod  $A = 130$  i  $195$  (slika 2) [31].

Uspoređujući zastupljenost elemenata teških jezgara  $130 < A < 195$  nastalih u supernovama sa podacima izmjerenim u Sunčevom sustavu, pretpostavljajući da one nastaju samo pri eksplozijama supernova, dolazi do neusklađenosti podataka. Supernove uistinu mogu stvoriti tako teške jezgre, no njihova količina je mala. Što se više istražuje je li eksplozija supernove uistinu povoljno okruženje za  $r$ -proces to više dolazi do neusklađenosti s bivšim teorijama. Iako je okruženje povoljno, pri eksplozijama masivnih zvijezda najčešće se proizvode lakše jezgre i jezgre  $A \geq 110$  [35]. Čak ni učestalost supernova u kojima bi došlo do produkcije zlata, točnije teških jezgara, ne može proizvesti količine koje su detektirane i prikazane na grafu zastupljenosti elemenata. Da se upotpuni ova slika supernovama se mora pridružiti još jedno astrofizičko okruženje u kojem se sintetiziraju teške jezgre: sudari neutronske zvijezde.

### 3.4. Neutronske zvijezde

Neutronske zvijezde su potomci supernova. U supernovama nastaju protoneutronske zvijezde koje se mogu stabilizirati hlađenjem neutronske sredice zvijezde ili pak ako je masa sredice zvijezde prevelika, mogu se urušiti u crnu rupu.

Neutronske zvijezde sastoje se većinom od neutrona ( $N \sim 10^{57}$ ), ali u njima ima i protona, elektrona i teških jezgara i najčešće su mase  $M \approx 1,5 M_{\odot}$  te radijusa 10-15 km. Ovakve zvijezde su iznimno guste ( $\rho_{ns}$ ), gušće čak i od tipične gustoće atomske jezgre ( $\rho_{nuc}$ ) [16],

$$\rho_{ns} > \rho_{nuc} \approx 2,3 \times 10^{17} \text{ kg m}^{-3}. \quad (2.37.)$$

Zahvaljujući svojoj masi i gustoći, gravitacijske sile neutronske zvijezde su jako velike ( $g \approx 1,86 \times 10^{12} \text{ m s}^{-1}$  za zvijezdu mase  $M = 1,4 M_{\odot}$  i radijusa  $r = 10 \text{ km}$ ) [16]. Velikoj gravitacijskoj sili odupire se tlak degeneriranih neutrona. Neutronska degeneracija je posljedica Paulijeva principa prema kojem dva neutrona (fermiona) ne mogu u isto vrijeme okupirati isto stanje. Zvijezda mase  $M \approx 1,5 M_{\odot}$  ima dovoljno energije iz gravitacijskog sažimanja kako bi elektrone i protone združila u neutrone te kako se zvijezda dalje sažima popunjava najniža energetska stanja za neutrone. Neutroni su prisiljeni zauzimati sve viša energetska stanja. Budući da ih gravitacija tjera da popune najniže nivoe koji su već popunjeni, neutroni se opiru daljnjem sažimanju stvarajući tlak [36]. Iako su u neutronske zvijezde temperature jako visoke, one ne utječu na degeneraciju neutrona niti na tlak neutrona. Jedino što utječe na tlak degeneriranih neutrona jest gustoća koja je u neutronske zvijezde jako velika [18,37].

Neutronske zvijezde, poput običnih zvijezda, imaju svoju unutrašnjost (sredicu), koja čini 99% njene mase, i vanjske slojeve. Građa neutronske zvijezde može se opisati u pet područja (slika 20):

1. Atmosfera

Na atmosferu otpada mali dio mase neutronske zvijezde, ali formira izgled spektra kojeg ta zvijezda emitira [37].

2. Ovojnica

Ovojnica, poput atmosfere, ima mali udio mase neutronske zvijezde i njena uloga je kontrola transporta i oslobađanja termalne energije zvijezde [37].

3. Kora

Sastoji se od nuklida s masenim brojem  $A \approx 56 - 200$ . Dominantna vrsta nuklida ovisi o gustoći. Ako gustoća u kori dosegne vrijednosti  $4 \times 10^{14} \text{ kg m}^{-3}$  doći će do pojave

slobodnih neutrona van nuklida. Opisno, takav proces može se nazvati kapanje neutrona. Na najvećim gustoćama u kori, više materije se nalazi u obliku neutrona, koji čine takozvanu neutronska tekućinu, nego u jezgrama. Neutronska tekućina je zanimljiva jer ne pokazuje svojstvo viskoznosti. To je zato jer se pod uvjetima koji su nastali neutroni (fermioni) mogu spontano spariti i činiti bozone, za koje Paulijev princip ne vrijedi i oni se mogu svi naći u najnižem mogućem energetska stanju. Takav fluid može teći bez otpora i činiti superfluid (bilo kakav vrtlog nastaviti će se vrtjeti zauvijek). Kora ima vanjski dio manje gustoće, dalje od sredice i unutrašnji dio veće gustoće bliže sredici. Na granici unutrašnje kore i sredice vrijedi da je gustoća  $\rho \approx \rho_{nuc}$  [16,37].

#### 4. Vanjska sredica

Sastoji se od nukleona, elektrona i miona. U sredici je gustoća toliko velika da se više ne mogu raspoznati neutroni koji su van nuklida ili u nuklidima, te se mogu razabrati samo neutroni i protoni. Kao i u gustoj kori neutroni se mogu spariti i činiti fluid, no sada se i protoni mogu također spariti i činiti fluid za koji se vjeruje da je supravodljiv. U sredici tako postoji izmiješani fluid neutrona, protona i elektrona koji se regulira tlakom degeneriranih neutrona [16].

#### 5. Unutarnja sredica

U unutrašnjosti sredice prevladava gustoća  $\rho > \rho_{nuc}$  i pretpostavlja se da je to područje mora slobodnih neutrona koji međusobno međudjeluju jakom silom u prisutnosti protona i elektrona. U ovom području mogu nastati egzotične čestice kao što su hiperoni i/ili Boseov kondenzat (pioni i kaoni koji nastaju raspadom neutrona). Što se točno događa u unutrašnjoj sredici i kakva je njena građa još se uvijek istražuje [16,37].



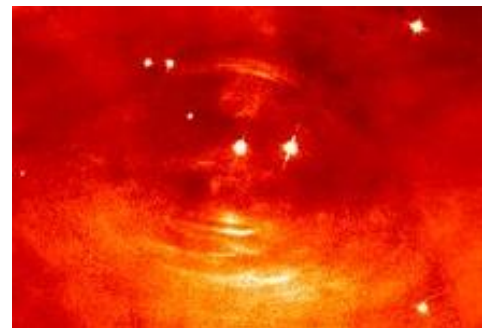
Slika 20. Građa neutronske zvijezde.

Budući da neutronske zvijezde nastaju kolapsom zvijezda, ako se sredica zvijezde imalo rotirala dok se sažima do neutronske zvijezde morat će očuvati svoju kutnu količinu

gibanja. Nastala neutronska zvijezda će se također rotirati i to periodom puno manjim od perioda sredice zvijezde od koje je nastala,  $T_{ns} \sim 3.8 \times 10^{-6} T_{sredice}$ . Najmanji opaženi period rotacije neutronske zvijezde je 1 ms [38]. Sredica koja se toliko brzo vrti stvarat će brze bljeskove zračenja u pravilnim vremenskim intervalima ili pulseve i naziva se pulsarom. Većina pulsara ima period između 0,25 s i 2 s. Neke neutronske zvijezde mogu se rotirati toliko brzo da se njihovi pulsevi očitavaju u periodu  $T < 10$  ms i nazivaju se milisekundnim pulsarima [16]. Pulsevi su posljedica iznimno jakog magnetskog polja neutronske zvijezde ( $B \sim 10^8$  T) koje se stvara oko magnetske osi. Duž magnetske osi emitira se snop zračenja koja se može detektirati. Magnetska os ne mora se pružati duž osi rotacije i može postojati otklon tih dviju osi. Ako otklon postoji, zračenje će moći detektirati dva puta po rotaciji u obliku pulseva. Najčešća vrsta zračenja koja se emitira s pulsara su radiovalovi, ali ima pulsara koji emitiraju i rendgensko zračenje [38]. Energija koja se emitira uzrokuje usporenje rotacije.



a)

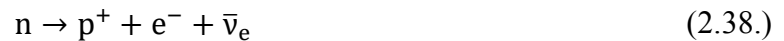


b)

Slika 21. Slika a) Rakova maglica (Messier 1, M1) koja se nalazi u zvijezdu Bika otkrivena 1721. godine (rezultat eksplozije supernove opažene 4. lipnja 1054. g.) u čijem je središtu Rakov pulsar (PSR B0531+21) s periodom  $T = 33$  ms, okružen mješavinom materijala izbačenog pri evoluciji zvijezde i eksploziji supernove. Prikazana je kombinacija detektiranih podataka koji obuhvaćaju gotovo cijeli elektromagnetski spektar: spektar radiovalova - opservatorij *Karl G. Jansky Very Large Array (VLA)* (obojeno crveno), infracrveni dio spektra - *NASA-in Spitzer* svemirski teleskop (žuto), vidljivi dio spektra - *NASA/ESA Hubble* svemirski teleskop (zeleno), ultraljubičasti dio spektra - *ESA-in XMM-Newton* (plavo), i rendgensko zračenje - *NASA-in opservatorij Chandra X-ray* (ljubičasto). Izvor: NASA, ESA, G. Dubner (IAFE, CONICET-University of Buenos Aires) et al.; A. Loll et al.; T. Temim et al.; F. Seward et al.; VLA/NRAO/AUI/NSF; Chandra/CXC; Spitzer/JPL-Caltech; XMM-Newton/ESA; and Hubble/STScI [39,40].

b) Unutrašnjost Rakove maglice snimljenu *Hubble* svemirskim teleskopom. Na slici je Rakov pulsar lijeva sjajna točka. Izvor: Jeff Hester i Paul Scowen (Arizona State University), i NASA/ESA [41]. Preuzeto s internet stranice *Hubble space telescope* održavane u suradnji Europske svemirske agencije (*European Space Agency*) i *Hubble* teleskopa koji je zajednički projekt ESA-e i NASA-e.

Neutronska zvijezda se tijekom svojeg života hladi. Kada je nastala u supernovi temperatura joj je bila oko  $T \sim 10^{11}$  K, a nadalje se hladila emisijom neutrina i uhvatima elektrona, ulančanim procesima koji se međusobno izmjenjuju poznatim i pod nazivom Urca procesi [16,18]. Urca proces može biti direktan ili biti potpomognut dodatnim nukleonom (modificirani Urca proces). Direktni Urca proces stvara razne okuse neutrina i većinom se odvija u sredici neutronske zvijezde gdje je gustoća najveća, a energija se najviše gubi na procese [16].

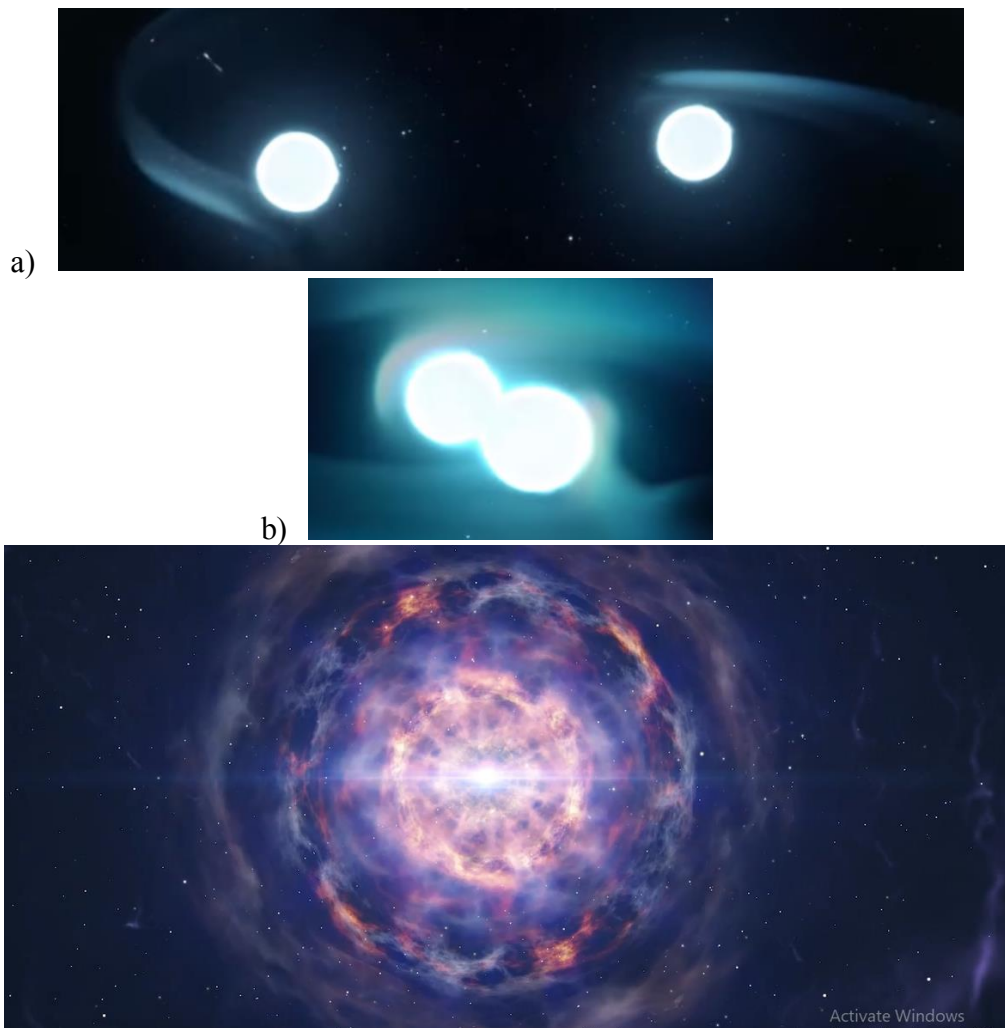


Modificirani Urca procesi mogu se odvijati na nešto manjim gustoćama naspram onih u sredici, ali zato su potpomognuti još jednim nukleonom (N, može biti proton ili neutron) koji igra ulogu katalizatora.



U oba slučaja, direktnog ili modificiranog Urca procesa, stvaraju se parovi neutrina i antineutrina koji iz zvijezde odvođe energiju i hlade ju. Ako se zvijezda hladi direktnim Urca procesom vrijeme hlađenja zvijezde bit će znatno manje nego da se zvijezda hladi modificiranim Urca procesom [37]. Ovaj proces će se nastaviti sve dok nukleoni ne postanu degenerirani, otprilike do jedan dan nakon stvaranja neutronske zvijezde. Hlađenje zvijezde nastavlja se tijekom njenog dugog života (10 000 godina i više) [16,18].

No, jesu li uistinu neutronske zvijezde dobra okruženja za odvijanje procesa koji stvaraju teške jezgre? U neutronske zvijezdama postoji mnoštvo neutrona, čak i višak, što znači da će oni moći kapati van i da je ta gustoća iznad granice kapanja neutrona. Treba postojati neki događaj koji će tu gustoću razbiti, tj. koji će ekspanirati neutroniziranu tvar zvijezde dok se ujedno čuva broj neutrona. Primjer takvog procesa je sudar neutronske zvijezde. Ako se neutronske zvijezde nađu u binarnom sustavu, dogodit će se sudar koji se registrira teleskopom kao bljesak svjetla, točnije registrira se kilonova koju prati signal gama zraka i gravitacijskih valova (nepravilnosti koje se šire prostor-vremenom). Sudarom neutronske zvijezde većina materijala koji se urušava prvo formira hipermasivnu neutronske zvijezde koja se zatim urušava u crnu rupu [42]. Dio materije se uvuče u crnu rupu što uzrokuje prasak gama zračenja, dok je dio materije bogat neutronima izbačen u svemir i ima toliku energiju da se može raspršiti po cijeloj galaksiji [1].



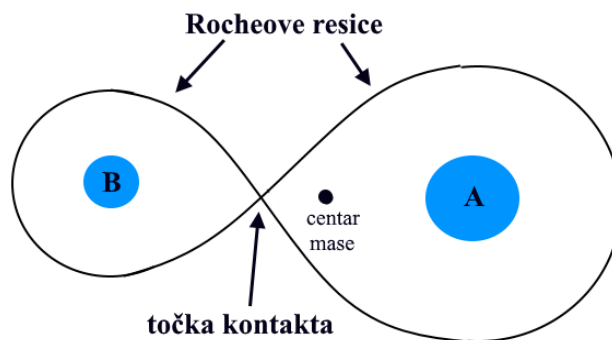
Slika 22. Animacija sudara dviju neutronske zvijezde (a i b) i njihove eksplozije kao kilonova (c) pri čemu se emitira energija i gravitacijski valovi; autora Luisa Calcade za Europsku organizaciju za astronomska istraživanja u južnoj hemisferi (ESO, *European Organisation for Astronomical Research in the Southern Hemisphere*) [43].

Sudar neutronske zvijezde možda i nije najbolji izraz kojim bi se opisao takav događaj. Bolji izraz bio bi stapanje binarnog sustava neutronske zvijezde. Binarni sustav čine dvije zvijezde koje kruže oko zajedničkog centra mase. Svjetlija zvijezda označava se kao primarna zvijezda (pripisuje joj se oznaka A), dok je manje svijetla zvijezda sekundarna (pripisuje joj se oznaka B). Kako će se par zvijezda razvijati ovisi o njihovoj udaljenosti. Posljedica velike udaljenosti binarnog sustava zvijezda je da zvijezde imaju vrlo mali utjecaj jedna na drugu pa se njihova evolucija može promatrati kao evolucija samostalnih zvijezda. Ako su zvijezde u binarnim sustavima blizu to će utjecati na njihovu evoluciju jer će veća zvijezda svojom gravitacijskim silama moći privući vanjske slojeve manje, pri čemu se masa s manje zvijezde prenosi na drugu, a možda i cijelu masu zvijezde koja će se tada pripojiti i dodati nastaloj centralnoj zvijezdi [44]. Trenutak kada se masa počinje prenositi je određen prostorom oko binarnog sustava u kojem je materija vezana za zvijezdu gravitacijom i oblika

je kapljice (ili znaka beskonačnosti  $\infty$ ) nazvanog Rocheova resica (engl. *Roche lobe*) (slika 23). Rocheova resica ima dva dijela koji okružuju zvijezde i točku susretanja/kontakta u kojoj se gravitacija dviju zvijezda međusobno poništava. Ako materija prijeđe Rocheovu resicu jedne zvijezde pri svojoj evoluciji, materija će prijeći na drugu zvijezdu kroz točku susretanja resica i oko nje činiti akrecijski disk (najčešći slučaj) ili može činiti omotač, a u nekim se slučajevima čak može i raspršiti [14,45].

Pri sudaru neutronske zvijezde, prije no što se stvori crna rupa i usiše većinu materije, mogu se prepoznati tri područja [32]:

1. Područje centralne masivne brzorotirajuće zvijezde mase  $M_{central} \approx 2,5 - 3M_{\odot}$
2. Akrecijski disk bogat materijom mase  $M_{disk} \approx 0,1M_{\odot}$
3. Područje male gustoće



Slika 23. Prikaz Rocheovih resica oko neutronske zvijezde

Binarni sustav koji zvijezde mogu činiti jest simetričan ili asimetričan. Simetričan binarni sustav podrazumijeva sustav dviju neutronske zvijezde jednake mase koje pri sudaru dijele velike sudarne površine pri čemu se izbacuje velika količina materije u svemir. U svemiru je teško pronaći dvije neutronske zvijezde koje orbitiraju jedna oko druge, a kamoli simetrični binarni sustav. Kada se neutronske zvijezde različite mase pronađu jedna blizu druge, gravitacijske sile veće zvijezde će privući manju i rastegnuti je u oblik stošca čiji će vrh pri sudaru „zaderati“ po površini veće zvijezde oslobađajući tako materiju i neutronske vjetar [46].

Materija koja je izbačena u svemir bogata je neutronima, dobro je mjesto za odvijanje  $r$ -procesa i učinkovita je u stvaranju velikih količina atoma teških elemenata, uključujući i atome zlata. No, gdje onda nastaje problem? Da nastaje količina zlata kao kod sudara neutronske zvijezde te da se takvi sudari događaju jednako učestalo kao i supernove, došlo bi do preprodukcije teških elemenata, pa i zlata što bi najvjerojatnije značilo pad u njegovoj vrijednosti. Pretpostavlja se da se otprilike na jedan sudar neutronske zvijezde dogodi 1000 supernova [1].



### 3.4.1. Nukleosinteza pri sudarima neutronske zvijezde

Pri sudarima neutronske zvijezde velika se količina materije izbacuje u svemir. Veliku ulogu u omogućavanju  $r$ -procesa ima stvaranje hipermasivne neutronske zvijezde pri samom sudaru iz koje se materija bogata neutronima i nutrinima dalje širi. Ta materija koja se izbacuje može se podijeliti na dinamički izbačenu materiju pri dekompresiji kore, neutrinski vjetar i viskozni vjetar raspadanja diska.

Nukleosinteza u neutrinjskim vjetrovima slična je onoj kod kolapsa zvijezde u supernovu, a događa se u binarnim sustavima kada je jedna neutronska zvijezda masivnija od druge. U tom slučaju gravitacija masivnije centralne zvijezde može povući manju sve bliže sebi dok se ne počne događati prijenos mase manje zvijezde na veću uzrokujući stvaranje akrecijskog diska materije oko centralne masivnije zvijezde koja se polako razvija u hipermasivnu neutronska zvijezdu. To je područje puno neutrona i neutrina te se dio materije oslobađa u svemir putem neutrinjskog vjetra ( $M_{\text{oslobodene materije}} \approx 10^{-3} M_{\odot}$ ). Neutrinski vjetar sličan je onome koji nastaje pri eksplozijama supernove i imat će nisku frakciju elektrona u odnosu na barione  $Y_e \sim 0,33$ , brzo će se širiti i imati dovoljno energije da se u njemu pokrenu procesi nukleosinteze. Većinom će nastajati jezgre s  $A < 130$ , dok je doprinos neutrinjskog vjetra teškim jezgrama iznad drugog vrha  $r$ -procesa gotovo zanemariv [35,47]. Budući da se u radu sagledava sinteza zlata, iz nedostatka trećeg vrha u  $r$ -procesima oko  $A = 195$  morati će se razmotriti drugo okruženje u kojem bi taj vrh nastao poput dinamično izbačenog materijala pri kompresiji kore.

Pogleda li se binarni simetrični sustav dviju neutronske zvijezde jednake mase (promatrani slučaj  $M = 1,35 M_{\odot}$ ) prije samog sudara može se primijetiti da su to okruženja gdje je frakcija elektrona jako mala. Pri njihovom sudaru na mjestu kontakta dolazi do povećanja gustoće i mase zvijezda što uzrokuje stvaranje hipermasivne neutronske zvijezde te nastaje crna rupa u koju se uvlači veći dio mase izbačene materije, dok nevučen dio materije ima masu oko  $10^{-2} - 10^{-3} M_{\odot}$  [35,48]. Tu materiju čine čestice koje potječu uglavnom iz unutarnje kore iz slojeva u kojim je gustoća  $0,3 \rho_{\text{nuc}}$ . Jako mali dio materije čine čestice iz slojeva iznad kore u kojima je gustoća još manja, jer one su raspršene samim gravitacijskim plimnim silama prije samog sudara zvijezda, i čestice iz nižih gušćih slojeva koje su izbačene sudarom. Nakon sudara, materija se nakratko zadržava oko združenih neutronske zvijezda, tj. crne rupe u obliku spiralnih krakova, zagrijava se na temperaturu  $\sim 11$  GK, a zatim se počinje širiti (jednoliko brzinom  $v \approx 0,31c$ ) i hladiti. Kada se materija

ohladi do  $T \sim 10$  GK mogu započeti procesi koji će nastaviti grijati izbačen materijal, poput  $\alpha$ - i  $\beta$ -raspada te fisije, i procesi koji će ga hladiti, poput fotodezintegracije i uhvata neutrona [46,48]. Zagrijavanje materije  $\alpha$ - i  $\beta$ -raspadima i fisijom zaslužno je za kilonovu koja prati sudare neutronske zvijezde pogotovo u trenucima nakon zaustavljanja  $r$ -procesu [35].

Izbačena materija u početku ima jako nisku frakciju elektrona  $Y_e \approx 0,015 - 0,050$ , tj. vrlo visoke količine neutrona,  $\rho_n \approx 10^{33} - 10^{35} \text{ cm}^{-3}$  [48]. Zbog velike gustoće započinju brzi uhvati neutrona te se u prvim milisekundama sudara stvara put nuklida koji prate granicu kapanja neutrona ( $Z = 31 - 37, A = 92 - 112$ ). Kod eksplozije supernove izbačeni materijal trebao je imati dovoljno energije tj. biti dovoljno vruć kako bi se odvila uhvati neutrona, no pri sudarima neutronske zvijezde pokazalo se da temperatura izbačenog materijala ne utječe na nukleosintezu jer je materijal toliko bogat neutronima da se jezgre na granici kapanja neutrona formiraju brže no što se razaraju  $\beta^-$ -raspadom i materijal se započne zagrijavati [32]. Kada se stvore jezgre sa  $Z \geq 103$  započinje fisijsko recikliranje jezgara koje stvara lakše jezgre spremne za uhvat neutrona i ono se odvija dva do tri puta prije nego što su neutroni potpuno iscrpljeni. Nakon vremena  $t > 100$  ms, gustoća neutrona naglo pada jer su se iscrpili uhvatima neutrona i to je period stvaranja jezgara s  $N = 126$ . Kada neutronska gustoća dosegne vrijednosti  $\rho_n \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , uhvati neutrona na jezgrama  $N = 126$  postaju sve dulji i  $\beta^-$ -raspad dovodi novonastale jezgre prema stabilnijim oblicima. Tijekom dekompresije kore temperatura pada i doseže prilično nisku srednju vrijednost 0,3-0,5 GK. Na tim temperaturama reakcije fotona (npr. fotodezintegracija) više nemaju značajan utjecaj [48].

Sagledan je simetrični binarni sustav, no ostaje otvoreno pitanje koje su razlike ako se sagledava asimetričan slučaj. Kod asimetričnog sustava dviju neutronske zvijezde mase  $1,2M_\odot - 1,5M_\odot$  pokazalo se da je masa koja je izbačena ovim procesom dva puta veća od mase izbačene sudarom simetričnih neutronske zvijezde, no još uvijek reda veličine  $10^{-2} - 10^{-3}M_\odot$ , te da je brzina širenja izbačenog materijala manja ( $v \sim 0,23c$ ), ali da su energije po nukleonu koje se nose sudarnim valovima približno jednake. Pri asimetričnom sudaru stvara se područje niske elektronske frakcije i može se odviti nukleosinteza u neutrinskom vjetru [46].

Materija u kori uglavnom je sastavljena od jezgara s  $A > 130$ , s izraženim vrhom na grafu zastupljenosti elemenata kod  $A = 140$  i  $195$ . Vrh kod  $A = 195$  posljedica je stvaranja stabilnih jezgara s  $N = 126$ , dok je vrh kod  $A = 140$  posljedica simetrijskog fisijskog recikliranja koje stupa u trenutku kada se iscrpe neutroni a stvorile su se jezgre s  $A \approx 290$

[48]. Kada se kora dekomprimira i puca, ona na svom putu naliće na vanjsku koru, ovojnicu i atmosferu. Otprilike 75% izbačene materije čini materijal iz unutarnje kore, dok tek oko 25% čini materijal iz vanjskih dijelova [46]. Prije dekompresije sredice neutronske zvijezde, u vanjskom sloju kore nalazile su se jezgre bogate neutronima koje su tijekom dekompresije mogle uhvatiti slobodne neutrone i činiti jezgre s  $80 < A < 140$ . Kada se sagleda cijela nukleosinteza u kori, ona  $r$ -procesima tvori jezgre  $A > 80$ , a ako se uvrsti i nukleosinteza kod neutrinjskih vjetrova pri sudaru dobiva se krivulja zastupljenosti elemenata vrlo slična onoj detektiranoj u Sunčevom sustavu (slika 2) [48].

#### 4. ZAKLJUČAK

Za nukleosintezu elemenata težih od željeza, pa tako i teških elemenata poput zlata odgovorni su brzi uhvati neutrona, poznati kao  $r$ -proces. Uvjeti koje je potrebno ostvariti kako bi se odvio  $r$ -proces su velika gustoća neutrona ( $n_n > 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ), niska frakcija elektrona  $Y_e$ , i visoke temperature ( $T \sim 10^9 \text{ K}$ ) pri kojima se natječu procesi uhvata neutrona ( $n, \gamma$ ) i fotodezintegracije ( $\gamma, n$ ). Sve dok navedene reakcije nisu u ravnoteži događat će se lančane reakcije uhvata neutrona. U trenutku kada se brzine tih dviju reakcija izjednače one će biti u ravnoteži. Na putu  $r$ -procesa izjednačenje brzina označava točku čekanja u kojoj vrijeme poluživota  $\beta^-$ -raspada postaje usporedivo s vremenom odvijanja uhvata neutrona ( $\tau_\beta \approx \tau_n$ ) što uzrokuje usporavanje brzog  $r$ -procesa i povećavanje broja protona ( $Z$ ) u jezgrama nastalim uхватima neutrona. Točke čekanja za  $r$ -proces nalaze se pri zatvorenim ljuskama jezgara  $N = 50, 82, 126$ . Tijekom godina tragalo se za okruženjima u svemiru koja bi bila povoljna za odvijanje  $r$ -procesa i uvidjelo se da su obećavajuća okruženja eksplozije supernove tipa II i sudari neutronske zvijezde.

Supernovi prethode procesi fuzije u masivnoj zvijezdi koji se odvijaju u njenim različitim slojevima, međutim fuzijom se proizvode kemijski elementi do masenog područja željeza. Za sintezu elemenata težih od željeza potrebni su drugi procesi i okruženja u svemiru. Trenutno je najperspektivniji proces brzi uhvat neutrona, tzv.  $r$ -proces. Pri evoluciji supernove stvaraju se dva okruženja na kojima je moguće ostvarenje uvjeta za  $r$ -proces. To su "vrući mjehurić" koji nastaje netom prije eksplozije i neutrinski vjetar koji prati evoluciju supernove od nastanka protoneutronske zvijezde sve do raspršenja materije u svemir. Područje iznad protoneutronske zvijezde bogato je neutronima ( $\rho_n \gtrsim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , minimalan omjer  $n/p \approx 7$  do 8), vruće je ( $T \sim 10^{10} \text{ K}$ ), ima visoke razine entropije (entropija po barionu  $s \gtrsim 200$ ) te brzo ekspandira ( $t < 1 \text{ s}$ ) što su uvjeti povoljni za  $r$ -proces. U području mjehurića u blizini neutronske zvijezde elektronska frakcija  $Y_e$  može biti dovoljno niska jer se sredica hladi uхватom elektrona i pozitrona, dok je u slučaju neutrinjskih vjetrova materija početno bogata protonima (visoka frakcija elektrona), ali kako se vjetar širi i hladi moći će stupiti na snagu procesi uhvata neutrina na protone koji će smanjiti iznos frakcije elektrona na vrijednosti manje od 0,5. Osim toga, prilikom hlađenja neutrinjskog vjetra omogućuje se proces stvaranja  $\alpha$  čestica iz protona i neutrona čijim se združivanjem (samim sa sobom ili s drugim elementima) stvaraju jezgre s masenim brojem  $A \approx 50 - 100$ . Daljnjim širenjem vjetra temperatura pada ( $T \sim 10^9 \text{ K}$ ) i okolina postaje povoljna za uhvate neutrona na

postojećim jezgrama (izbjegava se točka čekanja kod  $N = 50$ ) koje mogu doseći vrijednosti vrha od interesa na grafu zastupljenosti elemenata kod  $A = 195$ .

Tijekom sudara neutronske zvijezde  $r$ -proces se mogu odviti u dinamički izbačenoj materiji i neutrinjskim vjetrovima. Neutrinjski vjetar koji nastaje ima nisku frakciju elektrona ( $Y_e \sim 0,33$ ), brzo se širi i ima dovoljno energije da se u njemu pokrenu reakcije nukleosinteze pri kojoj većinom nastaju jezgre s  $A < 130$ . Dinamički izbačenu materiju mase  $10^{-2} - 10^{-3} M_{\odot}$  čini materija kore neutronske zvijezde koja u početku ima jako nisku frakciju elektrona  $Y_e \sim 0,015 - 0,050$ , tj. vrlo visoke količine neutrona ( $\rho_n = 10^{33} - 10^{35} \text{ cm}^{-3}$ ) što pogoduje  $r$ -procesu. U kori sredice neutronske zvijezde materija koja se izbacuje  $r$ -procesima stvara nuklide s  $A > 130$ , s izraženim vrhom od interesa na grafu zastupljenosti elemenata kod  $A = 140$  i  $195$  gdje je vrh kod  $A = 195$  posljedica stvaranja stabilnih jezgara s  $N = 126$ . Materija se izbacuje u svemir prilikom dekompresije kore prilikom koje nastaju i jezgre s  $80 < A < 140$ .

U prošlom je poglavlju bila sagledana nukleosinteza do trećeg vrha  $r$ -procesu na grafu zastupljenosti elemenata u ovisnosti o masenom broju. Uvjeti potrebni za stvaranje zlata i vrha od interesa  $A = 195$  mogu se ostvariti u svemirskim okruženjima eksplozije supernove i sudara neutronske zvijezde. Pokazalo se da su oba okruženja povoljna za stvaranje teških jezgara  $r$ -procesom, no postoje i razlike između modela nukleosinteze u njima. Prva razlika je učestalost. Pretpostavlja se da se otprilike na jedan sudar neutronske zvijezde dogodi 1000 supernova. Druga je razlika u mehanizmu potrebnom za provođenje  $r$ -procesu. Pri eksplozijama supernova izbačen materijal trebao bi imati dovoljno energije ( $T \sim 10^9 \text{ K}$ ) kako bi se odvila uhvati neutrona, dok se pokazalo da je pri sudaru neutronske zvijezde materijal toliko bogat neutronima da se nove teže jezgre stvaraju brže no što se razaraju  $\beta^-$ -raspadima. Treća je razlika količina i sastav izbačene materije. Sudarima neutronske zvijezde većinom se izbacuje materija bogata teškim jezgrama  $A > 130$  (mali dio čine jezgre  $80 < A < 130$ ), za što je zaslužno fizijsko recikliranje jezgara, čija je masa  $M \approx 10^{-2} - 10^{-3} M_{\odot}$ , dok se u eksplozijama supernova većinom proizvode srednje teški elementi ( $A \leq 130$ ) te je masa izbačene materije  $M \approx 10^{-4} M_{\odot}$ . Također, modeli se razlikuju po propagaciji izbačene materije kroz svemir. U eksplozijama supernove izbačena materija se raspoređuje lokalno oko eksplozije u područja do kojih su došli valovi eksplozije. Kod sudara neutronske zvijezde materija koja ne „upadne“ u crnu rupu ima toliku energiju da se može rasipati po cijeloj galaksiji. Dodatan problem koji se javlja pri izvođenju  $r$ -

procesa je anizotropnost izbacivanja materija pri eksploziji supernove i sudara neutronske zvijezde što direktno utječe na stvaranje teških elemenata.

Problematika *r*-procesa, točnije nastanka teških elemenata i njihove zastupljenosti predstavlja jedan od najvećih izazova moderne znanosti. Sagledavanjem procesa nastanka teških jezgara moći će se dobiti uvid u evoluciju svemira, naše galaksije te života i smrti zvijezde. Sama okruženja i mehanizam *r*-procesa još se istražuju, a napretkom tehnologije i novih eksperimentalnih postrojenja razvijaju se novi modeli koji sve bolje opisuju same procese, odnosno astrofizička okruženja gdje se ti procesi odvijaju.

## 5. METODIČKI DIO DIPLOMSKOG RADA

U ovom dijelu rada sagledat će se pojmovi fisije i fuzije te ću predstaviti svoju ideju nastavne pripreme za interaktivan istraživački usmjeren nastavni sat na kojem se obrađuje zadana tema.

### 5.1. *Interaktivna istraživački usmjerena nastava*

Interaktivna istraživački usmjerena nastava nastala je kao način poučavanja kroz dugi razvoj metodike fizike i raznih istraživanja u kojim se sagledava usvojenost i razumijevanje gradiva prirodnih znanosti od strane učenika. Pokušajima da učenici sudjeluju na nastavi pri čemu se održava kognitivna aktivnost i interes za znanost došlo se do zaključka da se ovim oblikom nastave na kreativan način ostvaruju učenički odgojno-obrazovni ishodi.

U središtu ovog načina poučavanja jest da učenici iskuse istraživački proces koji mogu efikasno prakticirati i mogu usvajati procese istraživanja i otkrivanja u znanosti. Pritom se kod učenika razvija kreativnost (pri osmišljavanju, izvođenju i rješavanju fizikalnih pokusa i problema), interes za znanost, informativna i aplikativna domena znanosti i znanstvenih procesa [49]. Također, naglašava se i uloga interakcije. U nastavi komunikacija često teče u jednom smjeru, a to je od nastavnika prema učenicima. Ovakav predavački oblik nastave prakticirao se često u prošlosti, a nažalost ni danas nije stran učenicima pogotovo u srednjim školama gdje je opus gradiva opsežan. Naime, da nastava bude konstruktivna potiče se dvosmjerna interakcija nastavnika s učenicima i učenika međusobno pri kojoj je cilj dobiti povratnu informaciju. Glavni sudionici rasprave trebaju biti učenici te se tako može središnja uloga nastavnog procesa prebaciti s nastavnika na učenike. Učenici više neće biti pasivni promatrači već aktivni sudionici nastave.

Strukturu nastavnog sata kod interaktivne istraživački usmjerene nastave može se podijeliti na tri glavna dijela:

- Uvodni dio

U ovom dijelu sata nastavnik želi otvoriti novi problem kojim se želi učenicima približiti ideja novih pojava te su zato najčešće povezani sa svakodnevnim iskustvom učenika. Na temelju učeničkog pristupa problemu i nastavnik dobiva uvid u razmišljanje učenika te se pritom učenike potiče na razmišljanje o pojavi koja će se dalje razmatrati. Potrebno je i demonstrirati pojavu opservacijskim pokusom prilikom kojeg učenici opažaju novu pojavu ako je pokus moguće pokazati na

nastavi. Ako nije mogu se koristiti snimljeni pokusi ili računalne simulacije/animacije.

- Središnji dio

Vođeni nastavnikom učenici istražuju novu pojavu nakon čega se gradi novi fizikalni model i daje matematički opis pojave.

- Završni dio

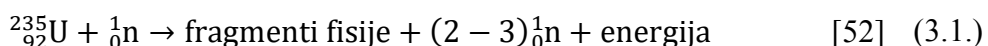
U završnom dijelu sata učenici primjenjuju novostečeno znanje kroz zaključnu raspravu, izvođenje aplikacijskih pokusa i rješavanje novih problema povezanih s ranije opisanom pojavom i izgrađenim modelom.

Cilj nastave ne smije biti samo deklarativno znanje u kojem učenici samo prepričavaju naučeno, već i proceduralno znanje koje im pomaže pri rješavanju novih problema [49].

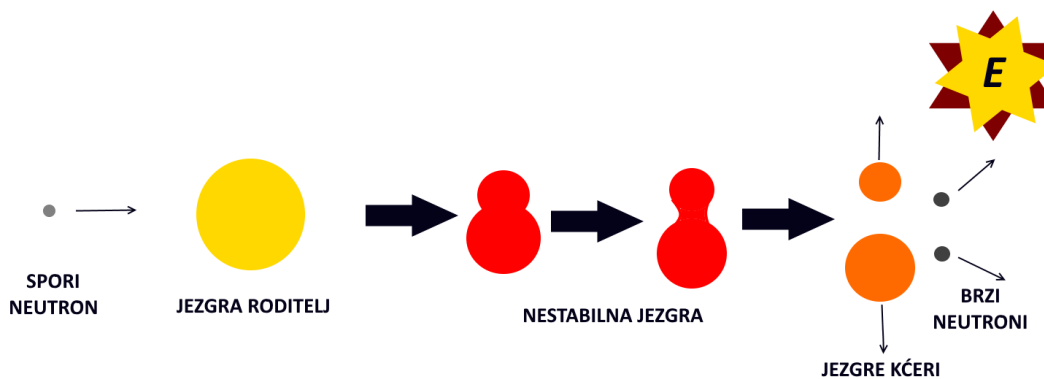
Nastava održana u duhu interakcije i istraživanja omogućava razvoj dubljeg razumijevanja fizikalnih koncepata i procesa, te pozitivnog stava prema znanosti. To je tip nastave u kojem se učenje odvija kroz istraživanje fizikalnih pojava i problema u razredu, a učenici vođeni nastavnikom prolaze kroz uočavanje problema, formiranje pretpostavki, osmišljavanje načina kako provjeriti pretpostavke te provođenje pokusa i zaključivanje o proučavanim konceptima i procesima.

## 5.2. Nuklearna fisija i fuzija

Fisija je nuklearna reakcija u kojoj se teška jezgra (npr.  $^{235}\text{U}$ ) raspada na dvije lakše jezgre pri čemu se oslobađa energija u obliku  $\gamma$ -zračenja i kinetičke energije produkata. Nju može izazvati apsorpcija neutrona od strane teške jezgre – jezgre „roditelja“. Budući da je neutron neutralan, on ne osjeća elektrostatsku odbojnu silu jezgre (Coulombovu iliti kulonovu barijeru) i lako dolazi do predjela u kojem prevladavaju nuklearne sile koje ga vežu za jezgru [50]. Jezgra koja je uhvatila neutron postaje nestabilna i raspada se na dvije jezgre, jezgre kćeri, čija je potencijalna energija po nukleonu puno manja od energije roditeljske jezgre te se oslobađa energija. Često su jezgre kćeri radioaktivne i podliježu raspadu ( $\beta$ -raspad). Svaku reakciju fisije prati emisija 2-3 neutrona [51] (slika 24).







Slika 24. Shema fisije teške jezgre roditelja na dvije lakše jezgre kćeri pri čemu se oslobađa energija.

Energija oslobođena pri reakciji može se kvantitativno dobiti preko relacija razlike masa reaktanata i produkata  $\Delta m = m_{\text{produkata}} - m_{\text{reaktanata}}$ . U slučaju fisije ta razlika masa je negativna. Budući da je masa povezana s energijom preko relacije  $E = mc^2$ , može se izračunati količina energije koja se oslobađa iz reakcije (negativan predznak označava egzotermnu reakciju) [51].

Fisijske reakcije mogu se pratiti na grafu ovisnosti potencijalne energije po nukleonu u jezgri o masenom broju i može se primijetiti da te reakcije prate spuštanje niz desnu stranu nuklearne doline.

Nastali neutroni pri fisiji teške jezgre mogu uzrokovati novi proces fisije i započinje lančana reakcija. Kako bi izazvali lančane reakcije, ti neutroni trebaju biti spori (gibati se kao molekule pri termičkom gibanju), jer ako su prebrzi jezgra teškog atoma će ih apsorbirati bez cijepanja. Neutroni tek nastali fisijom su brzi i treba ih usporiti. Za usporavanje neutrona koriste se moderatori [52]. Kao moderatori koriste se materijali koji sadrže lagane čestice kako bi prijenos energije sudarom bio što efikasniji. Najčešće se koristi deuterij u obliku teške vode i grafit. Također, kako bi se odvila lančana reakcija potreban je materijal koji sadrži teške jezgre koje se mogu cijepati. Minimalna masa takvog materijala naziva se kritična masa i pri toj masi teške jezgre najlakše pripajaju neutrone [50].

Lančane reakcije su kontrolirane u nuklearnim reaktorima, dok su pri eksploziji atomske bombe nekontrolirane. Proces fisije može se kontrolirati tako da u svakoj reakciji fisije otprilike samo jedan neutron ide dalje u reakciju. Ostale neutrone bi tada upijao regulacijski materijal sačinjen od nekih jezgara koje se pritom ne cijepaju (npr. jezgre kadmija [50]).

Nuklearne reakcije fisije teških jezgara poput  $^{235}\text{U}$  koriste se kao izvor energije u nuklearnim elektranama. To vrlo radioaktivno gorivo u elektrani se nalazi u nuklearnom reaktoru. U reaktoru je reaktorska posuda, gdje se nalazi reaktorska jezgra. Jezgra ili gorivo

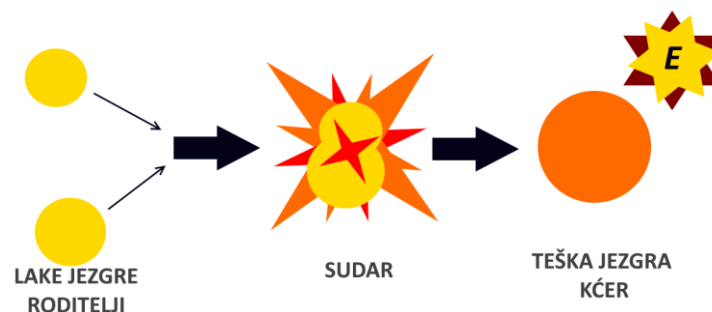
je izvor fisibilnog materijala koji stupa u reakciju. Fisija materijala jezgre se potiče neutronima poslanim iz izvora (mješavina polonija i berilija), dok su brzi neutroni koji nastaju fisijom usporeni moderatorima i apsorbirani regulacijskim šipkama od materijala koji apsorbiraju većinu neutrona. Šipke bi tako po reakciji apsorbirale primjerice 2 od 3 neutrona ograničavajući broj fisija po sekundi i održavale proces fisije konstantnim. Budući da se pri reakcijama oslobađa velika količina energije i radioaktivnog zračenja potrebni su sredstvo za hlađenje i zaštita reaktora u obliku oklopa koji apsorbira zračenje [53].

Jezgra reaktora može stvoriti energiju na nekoliko načina:

- nastala kinetička energija produkata fisije pretvara se u toplinu sudarima jezgara i atoma u blizini,
- apsorpcijom gama zraka,
- radioaktivnim raspadom fisijskih produkata i materijala koji se aktiviraju zbog apsorpcije neutrona.

Energija proizvedena u nuklearnom reaktoru odvodi se u obliku topline u parogenerator gdje se stvara para za pogon turbine koja preko generatora stvara električnu energiju.

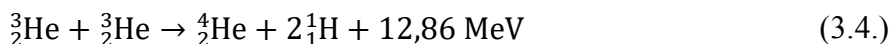
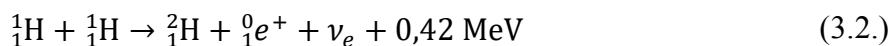
Fuzija je proces u kojem se lake atomske jezgre (jezgre roditelji) spajaju u težu (jezgra kći) pri kojem se oslobađaju energija i čestice. Kako bi se pozitivne jezgre spojile moraju imati dovoljno energije kako bi prevladale Coulombovu silu koja ih razdvaja (kulonska barijera) da dođu na udaljenost na kojoj prevladavaju nuklearne sile koje ih vežu. Iako je za fuziju potrebna znatna količina energije, nastankom nove teže jezgre oslobađa se više energije nego što je potrebno da bi se jezgre spojile.



Slika 25. Shema fuzije lakših jezgara roditelja u težu jezgru kćer pri čemu se oslobađa energija.

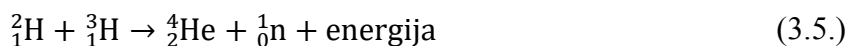
Energiju za savladavanje kulonske barijere čestice mogu dobiti pri visokim temperaturama [54]. Takav proces naziva se termonuklearna fuzija i odvija se u zvijezdama. Nama najbliža zvijezda Sunce stvara energiju, osvjetljava i grije naš planet energijom oslobođenom fuzijom vodika u helij što se vidi iz spektralne analize. Reakcije u Suncu su

povezane i mogu se opisati slijedom reakcija poznatijih pod imenom proton-proton lanac [50].



Prve dvije reakcije moraju se odvitii dva puta kako bi se na kraju dobila jedna jezgra helija. Pri reakciji se dva pozitrona međusobno uništavaju (anihiliraju) s elektronima iz vodika što pridonosi ukupnoj energiji fuzije koja tada po jednom procesu nastanka helija iznosi oko 26 MeV [50]. Kod ove reakcije nastaju nove zanimljive čestice čija je masa gotovo zanemariva te nemaju ni električki naboj, a to su neutriini. Zbog svojih svojstava neutriini mogu prolaziti kroz materiju bez da s njom međudjeluju i to je razlog zašto su ih znanstvenici teško detektirali [51].

Osim u zvijezdama, fuzijske se reakcije mogu dogoditi pri eksploziji supernove, ali i na Zemlji u laboratorijima i elektranama. Reakcija koju je najlakše postići na Zemlji je fuzija deuterija i tricija pri kojoj se oslobađa 17,6 MeV energije.



Na visokim temperaturama koje su potrebne za reakcije fuzije, atomi se nalaze u stanju opisanom kao kaša jezgara i elektrona tj. u stanju plazme. U zemaljskim uvjetima plazma se može postići i očuvati u jakim magnetskim poljima (magnetske boce) i uređaju tokamaku dok se pri eksplozijama nuklearnih bomba visoke temperature i stanje plazme održava fisijom te se može reći da je fisija okidač za fuziju [50].

Budući da se pri fuziji oslobađa energija, ona se može razmatrati kao proces koji bi pokretao nuklearne elektrane. Kao gorivo bi služili deuterij i tricij čiji je produkt helij koji nije ekološki ni zdravstveno štetan, za razliku od produkata fisije koji su radioaktivni. Nadalje, zalihe deuterija su na Zemlji jako velike jer se deuterij nalazi u morskoj vodi te bi se ona kao gorivo u reaktor neprestano ubacivala pri čemu bi se spriječila prevelika koncentracija goriva i smanjila bi se mogućnost incidenata i katastrofe nuklearnih reaktora [51].

### **5.3. Fisija i fuzija u nastavi**

Gradivo fisije i fuzije obrađuje se u četvrtom razredu srednjih škola prirodoslovnih i općih gimnazija te u trećem razredu strukovnih škola. U radu će biti priložen opis pripreme

za nastavnu jedinicu *Fisija i fuzija* u četvrtom razredu gimnazije za koji su predviđena dva (2) nastavna sata (potpoglavlje 5.2.).

Cilj nastavnog sata je poznavati procese fisije i fuzije i prepoznati energetske učinke tih procesa. Do cilja bi se došlo interaktivnom istraživački usmjerenom nastavom u kojoj bi se primijenio frontalni rad i rad u parovima te bi se koristile nastavne metode demonstracije i simulacije pokusa i razredne rasprave. Na kraju sata učenici bi trebali ostvariti sljedeće obrazovne ishode:

- definirati i kvalitativno opisati procese fisije i fuzije
- opisati načela dobivanja energije iz nuklearnih reakcija (fisija i fuzija)
- razlikovati kontroliranu i nekontroliranu fisiju na primjerima
- interpretirati i primijeniti zakone očuvanja u nuklearnim reakcijama
- opisati procese fuzije u Suncu
- opisati ulogu moderatora i kontrolnih šipki u nuklearnom reaktoru
- kvalitetno diskutirati o prednostima i nedostacima dobivanja energije u nuklearnim elektranama
- opisati perspektive za proizvodnju električne energije nuklearnom fuzijom
- razvijati znanstveni i istraživački pristup svakidašnjim problemima
- razvijati sposobnost znanstvenog zaključivanja
- razvijati usmeno i pismeno izražavanje

Nastava se odvija tako da učenici mogu ostvariti i odgojne ishode:

- primjene temeljnih pravila komunikacije
- uvažavanja tuđeg i vlastitog mišljenje
- poticanja motivacije za znanost
- poticanja aktivnog sudjelovanja na nastavi
- izgrađivanja znanstvenog pogleda na svijet

Kako bi se održao sat na kojem će se učenici susresti s fisijom i fuzijom, trebali bi imati usvojeno gradivo nuklearnih reakcija, očuvanja naboja i nukleona po reakciji, trebali bi moći iz grafa ovisnosti potencijalne energije po nukleonu u jezgri i masenog broja prepoznati lakše i teže jezgre i usporediti vrijednosti za potencijalnu energiju po nukleonu te moći primijeniti vezu i energije  $\Delta E = \Delta mc^2$ .

Pojmove i procese fisije i fuzije osim s nastavom fizike, može se povezati i s drugim školskim predmetima. S biologijom bi se mogli povezati preko utjecaja nuklearnih reakcija i reaktora na živi svijet. Učenici bi na nekom od satova fizike ili biologije istražili dobre i loše strane nuklearnih reakcija i nuklearnih elektrana od čistoće energije i zagađenja (toplinsko zagađenje rijeka i jezera, zbrinjavanje nuklearnog otpada), sve do katastrofa koje su se povijesno dogodile s reaktorima, poput one u Černobilu ili Fukushimi. Pokušali bi povezati ekološki povoljne aspekte nuklearnih reaktora i elektrana, pritom sagledavajući i negativan utjecaj istih na floru i faunu točnije na živi svijet oko njih. Nastava bi se mogla održati u obliku debate gdje bi se učenici opredijelili za ili protiv nuklearnih elektrana. Pri nuklearnim procesima nastaje mnogo izotopa (atoma istih protonskih brojeva, a različitih masenih brojeva) i izobara (atoma istih masenih brojeva, a različitih protonskih brojeva) različitih elemenata. Također, pojmovi fisije i fuzije lako se povezuju s nastavom povijesti. Učenici bi mogli u obliku projekta proučiti povijesni razvoj primjene nuklearnih procesa u industriji (elektrane) i ratovanju (razvoj i nastanak vodikove bombe, projekt Manhattan, primjena nuklearnih bombi u II. svjetskom ratu) ili bi pak mogli sagledati brojnost i koncentraciju nuklearnih elektrana u različitim zemljama i diskutirati zašto ih ima ili nema, obrađujući pozornost na ostale resurse u tim zemljama povezujući tako projekt i s geografijom.

Budući da se procesi fisije i fuzije koriste kao pokretači nuklearnih elektrana u sklopu nastave može se organizirati izlet u nuklearnu elektranu Krško za učenike završnih razreda. Izlet se može ostvariti zahvaljujući suradnji Tehničkog muzeja Nikola Tesla i NE Krško (svi detalji o ostvarenju izleta mogu se pogledati na službenoj stranici Tehničkog muzeja) [55]. Izlet se može održati kao nagrada za ostvareni uspjeh učenika na polugodištu (jer su grupe veličine do 30 učenika) ili ako nastavnik u svakom razredu može osloboditi jednu radnu srijedu po razredu mogli bi svi učenici prisustvovati izletu.

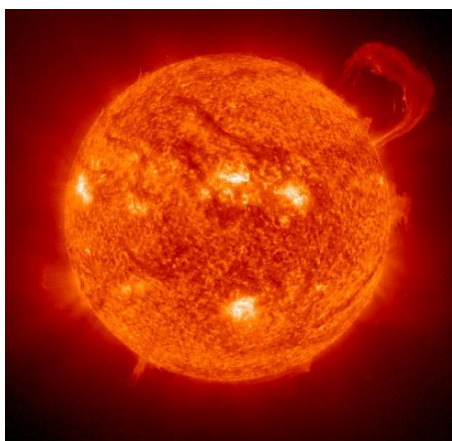
#### ***5.4. Nastavna priprema – tijekom nastavnog sata***

U uvodnom dijelu sata nastavnik želi otvoriti problem i upoznati učenike s pojmovima koji će se proučavati. Budući da su učenici u 4. razredu gimnazije uvodni problem koji bi nastavnik postavio bio bi povezan s gradivom povijesti (istraživanje misterija zvjezdanog neba i stari astronomi, korištenje nuklearnog oružja) i geografije (zvijezde, Sunce). Učenicima bi se pokazala slika Sunca i slike atomske gljive nastale pri

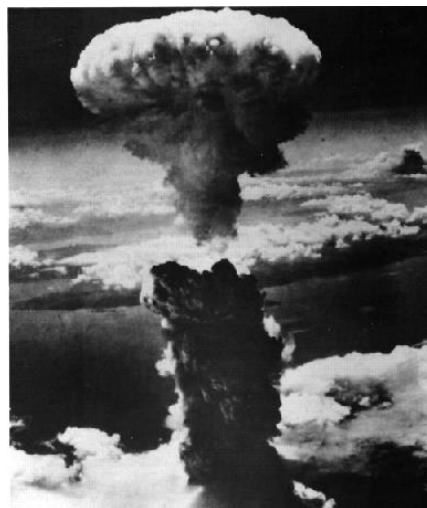
bombardiranju Nagasakija (slika 26.a i 26.b). Pitanje na koje bi se u uvodnom dijelu odgovaralo je:

### **Što je izvor energije Sunca, a što nuklearnog oružja?**

Cilj diskusije vođene potpitanjima je doći do pojma nuklearne energije i navesti učenike da razmisle o procesima koji prethode opaženoj oslobođenoj energiji.



a)



b)

Slika 26. Slika a) prikazuje Sunce, izvor: ESA/NASA [56], dok b) prikazuje nuklearnu gljivu iznad Nagasakija nakon bombardiranja 9. kolovoza 1945. godine snimljena od strane vojnika Charlesa Levyja, izvor: Američki nacionalni arhiv (*U.S. National Archives and Records Administration*) [57].

Tim problemom pokrenulo bi se pitanje oslobađanja energije pri nuklearnim procesima. Pitanja kojim bi se učenike navelo na nuklearne procese koji stoje iza nuklearnog oružja i Sunca bi mogla glasiti:

### **Zašto Sunce svijetli i što mu je izvor energije?**

Kako bi se učenicima približila ideja oslobađanja energije pri sudaru i stapanju dviju jezgara pokazuje se kratka video-animacija fuzije (<https://www.youtube.com/watch?v=l9HXAXXyU0U> [58]) i uvodi se pojam fuzije.

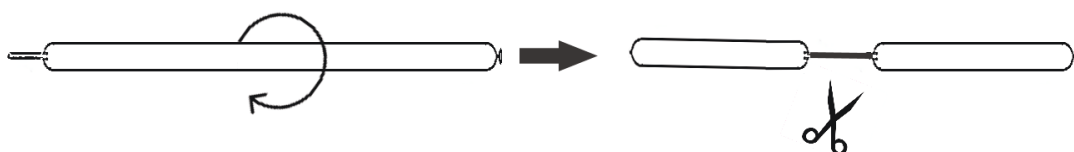
### **Zašto su događaji u Hiroshimi i Nagasakiju bili razorni?**

Ciljan odgovor je da se eksplozijom bombe oslobodila velika količina energije. Postoji mogućnost da učenici prethodnom odgovoru dodaju i posljedice zračenja nakon nuklearnih bomba.

### **Što je izvor energije pri eksploziji nuklearne bombe?**

Kako bi se učenicima približila ideja oslobađanja energije pri cijepanju jezgre pokazuje se kratka video-animacija cijepanja jezgara (animacija Shanea S. *Nuclear Fission Animation for Science* [https://www.youtube.com/watch?v=Zcuynn\\_i4\\_k](https://www.youtube.com/watch?v=Zcuynn_i4_k) [59]) i uvodi se pojam fisije.

U uvodnom dijelu nastave uvela bi se osnovna ideja fisije i fuzije te bi se kroz sat dalje istražilo i zaključilo o njihovim glavnim aspektima. Kako bi se potaknuo interes učenika za „kraj“ uvodnog dijela dva učenika pred razredom bi izvela kratki demonstracijski pokus (slika 27). Dva učenika bi dobila jedan ne prejako napuhan balon koji se može modelirati. Jedan učenik bi tada iskrivio balon na dva podjednaka dijela, dok bi drugi primio savijen balon za među koja ga dijeli na dva manja balona. Zatim prvi učenik reže među balona dok drugi nakratko pridržava dva manja fragmenta, a zatim ih otpušta. Baloni lete po učionici. Nakon završetka pokusa učenici prikupljaju fragmente balona i bacaju ih u koš za smeće [60]. Učenici u razredu će pokus komentirati te ga kratko opisati u svoje bilježnice.



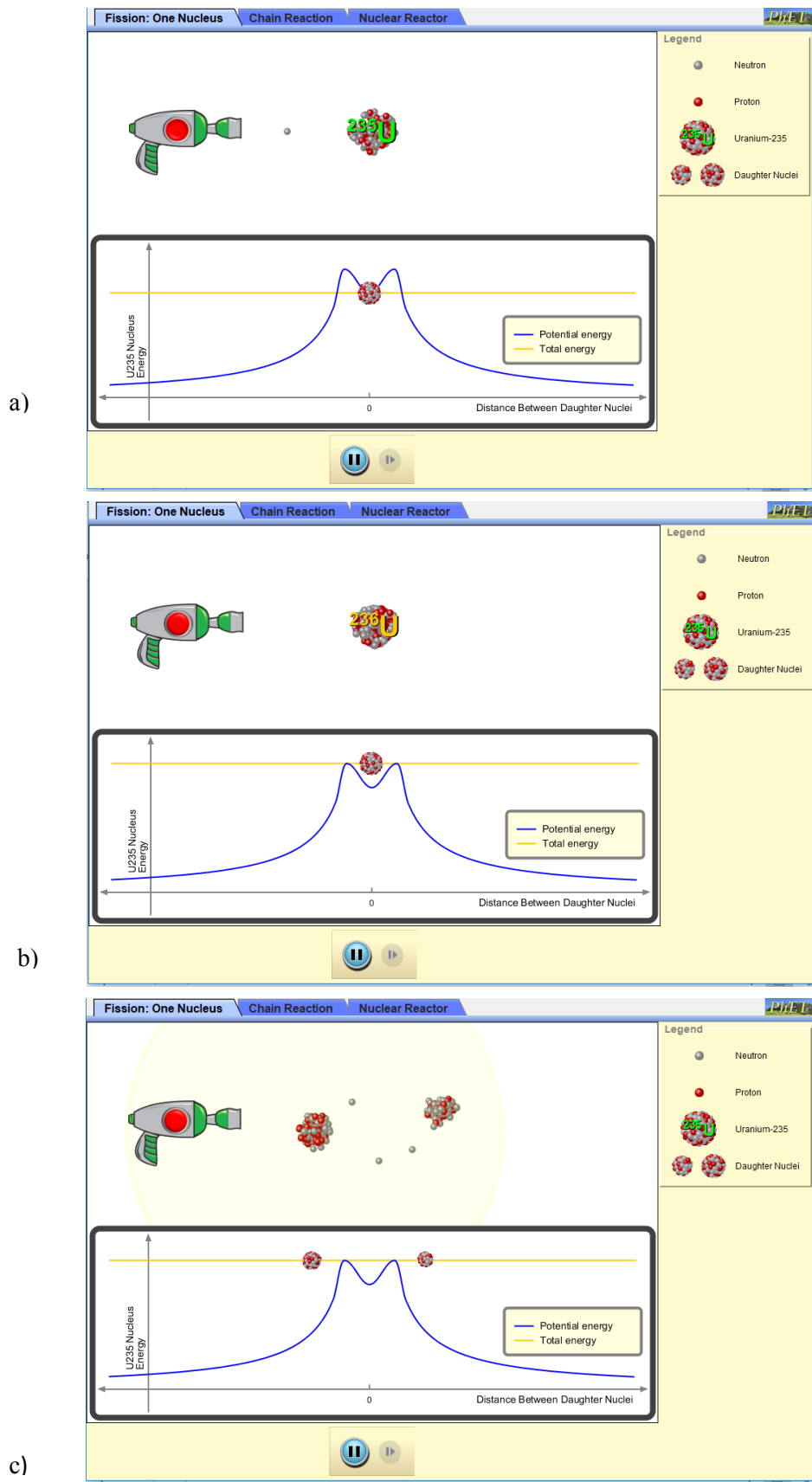
Slika 27. Skica pokusa u kojem se modelira fisija.

U središnjem dijelu konstruirao bi se model fisije i fuzije, a započeo bi istraživačkim pitanjem.

**Istraživačko pitanje 1: Na koji se način u procesu fisije oslobađa energija?**

Učenici bi mogli povezati viđeni pokus sa fisijom i reći da je jedan od oblika oslobađanja energije pri cijepanju jezgre kinetička energija koja je u pokusu viđena letom fragmenata balona po učionici.

Nakon rasprave učenici se podijele u parove i sjedaju za računala na kojima će pokrenuti računalnu *PhET* interaktivnu simulaciju fisije (slika 28) i dobivaju radni listić (slika 29) [61]. Vođeni radnim listićem tijekom simulacije učenici analiziraju elemente prikazane na simulaciji, raspravljaju što će se u simulaciji sagledati i što očekuju da će se dogoditi te dolaze do zaključaka o procesu fisije.



Slika 28. Prikaz različitih stadija pri procesu fisije pomoću *PhET* simulacije u kojoj se teška jezgra urana  $^{235}\text{U}$  raspada na dvije lakše jezgre [61]. Slika (a) prikazuje početni stadij u kojem je projektil neutron koji izaziva fisiju usmjeren prema jezgri roditelju, koja tada (b) postaje nestabilna i (c) raspada se na dvije jezgre kćeri i 3 neutrona.



### Radni listić 1:

Aplikacija na vašim računalima sastoji se od tri kartice. Otvorite karticu pod imenom *Fission: One Nucleus* i proučite elemente simulacije.

#### 1. Što pokazuje graf prikazan na aplikaciji?

Graf na simulaciji prikazuje ukupnu i potencijalnu energiju jezgre urana 235 u ovisnosti o udaljenosti između jezgara kćeri.

#### 2. Koja jezgra se gađa u simulaciji? Koliko protona i neutrona ima jezgra?

Jezgra koja se gađa je uran 235. Uran ima 92 protona i 143 neutrona.

#### 3. Što očekujete da će se dogoditi sa jezgrom u simulaciji?

Jezgra će se rascijepiti.

Pokrenite simulaciju pritiskom crvenog gumba na svemirskom pištolju. Simulacija se može zaustaviti pritiskom na gumb *pauza* te nastaviti pritiskom na *play* (🎮) ili ponovo pokretati pritiskom na *Reset Nucleus*.

#### 4. Čime se gađa jezgra u simulaciji?

Gađa se neutronom.

#### 5. Što se događa s jezgrom kada ju se pogodi?

Ukupna energija jezgre raste i ona postaje nestabilna te se raspada na manje jezgre.

#### 6. Odakle jezgri energija da prijeđe potencijalnu barijeru stabilnosti?

Energiju dobiva od neutrona.

#### 7. Što su produkti ove reakcije? Opiši nastale produkte.

Dvije manje jezgre i 3 neutrona. Nastale jezgre nisu iste. Jedna jezgra je veća, a druga je manja.

#### 8. Kako se nazivaju nastale jezgre, a kako bi nazvali početnu jezgru?

Manje jezgre nastale pri reakciji nazivaju je jezgre kćeri (piše u simulaciji), a početna jezgra bi se tada nazvala jezgra roditelj/majka.

#### 9. Usporedite animaciju sa simulacije s viđenim pokusom na početku sata. Koja je uloga škara u pokusu? Koje su razlike pokusa i simulacije.

Balon koji se može modelirati u pokusu predstavlja početnu tešku jezgru roditelj/majku, dok dva manja balona predstavljaju jezgre kćeri.

Iskrivljavanjem početnog balona pokazuje se nestabilnost jezgre kada ju pogodi neutron.

Škare u pokusu predstavljaju neutrone.

Rezanjem balona simulira se cijepanje veće (teže) jezgre na dvije manje (lakše), dok se letom balona po učionici simulira oslobođena energija u reakciji.

Razlika u pokusu i simulaciji fisije jest da u se u pokusu ne mogu vidjeti neutroni oslobođeni reakcijom.

**11. Skicirajte viđeni proces i naznačite reaktante i produkte.**

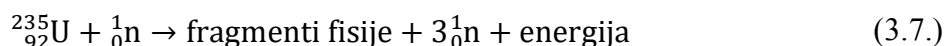
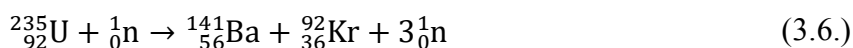
**10. Simulacija prikazuje nuklearnu fisiju jezgre urana  $^{235}\text{U}$ . Jedan od produkata koji nastaje reakcijom je jezgra barija  $^{141}\text{Ba}$ . Napišite jednadžbu reakcije fisije urana. Koristite periodni sustav elemenata kako bi odredili drugi produkt reakcije.**

$$^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{141}_{56}\text{Ba} + ^{92}_{36}\text{Kr} + 3^1_0\text{n}$$

Računalna simulacija koja se koristila slobodna je aplikacija Sveučilišta u Coloradu Boulder te ju možete pogledati i kod kuće na web adresi:  
<https://phet.colorado.edu/en/simulation/nuclear-fission>

Slika 29. Prikaz radnog listića s pitanjima kojima se učenike vodi do zaključivanja o procesu fisije. Na slici su osim pitanja prikazani očekivani odgovori i naputci za rad u *PhET* simulaciji.

Nakon učeničkog rada u parovima diskutira se o procesu fisije, jezgri roditelju i zašto je baš jezgra urana povoljna za fisiju, jezgrama kćerima i njihovoj asimetričnosti, neutronu projektilu i o energiji oslobođenoj pri reakciji. Na ploči se sumiraju zaključci te nastavnik zajedno s učenicima na ploču piše nuklearnu jednadžbu fisije, prvo za proces koji je sagledan u animaciji, a zatim i opći oblik (pri čemu se pazi na očuvanje naboja i masenog broja tj. broja nukleona):



U središnjem dijelu bi se matematički opisalo dobivanje energije u nuklearnim procesima. Pitanje kojim će se započeti diskusija glasi:

**Koliko se energije oslobodi pri fisiji jedne jezgre urana  $^{235}\text{U}$ ?**

Kako bi se došlo do energije oslobođene pri reakciji sagledava se razlika masa.

$$\Delta m = m_{\text{produkata}} - m_{\text{reaktanata}} \quad (3.8.)$$

Potrebni podaci su mase reaktanata i produkata te matematički opis (račun) glasi:

$$m({}^{235}_{92}\text{U}) = 234,9934 \text{ u};$$

$$m(\text{n}) = 1,0087 \text{ u};$$

$$m({}^{141}_{56}\text{Ba}) = 140,8833 \text{ u};$$

$$m({}^{92}_{36}\text{Kr}) = 91,9063 \text{ u}$$

$$m_{\text{reaktanata}} = m({}^{235}_{92}\text{U}) + m(\text{n}) = 236,0021 \text{ u} \quad (3.9.)$$

$$m_{\text{produkata}} = m({}^{141}_{56}\text{Ba}) + m({}^{92}_{36}\text{Kr}) + 3m(\text{n}) = 235,8156 \text{ u} \quad (3.10.)$$

$$\Delta m = -0,1865 \text{ u} \quad (3.11.)$$

U procesu fisije masa se smanjila za 0,1865 u. Sada se preko relacije  $\Delta E = \Delta mc^2$  može izračunati energija koja se oslobađa u reakciji  $\Delta E = -174 \text{ MeV}$ , pri čemu je  $u = 931,5 \text{ MeV}c^{-2}$ <sup>1</sup>.

### Istraživačko pitanje 2: Kako dolazi do lančane reakcije?

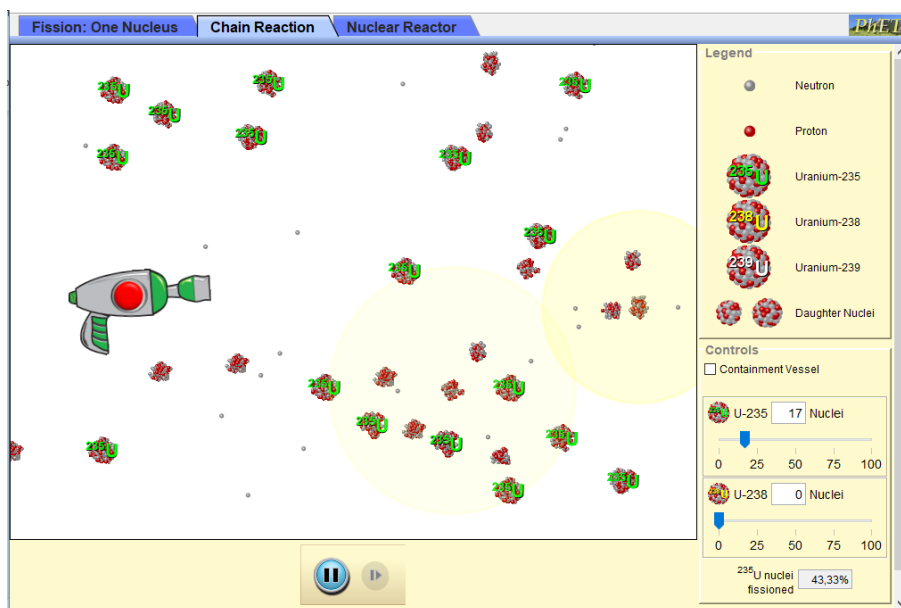
Kako bi naveo učenike da zaključe o postojanju lančanih procesa nastavnik može postaviti pitanja:

**Kako je moguće da se u jednom danu u elektrani Krško proizvede otprilike  $3,6937 \times 10^{26}$  MeV-a energije [62]?**

Pitanjem se želi iskazati potreba za velikim brojem reakcija i uvesti ideja lančanih reakcija. Kako bi se lančane reakcije u fisiji približile učenicima koristi se *PhET* animacija koja simulira lančane reakcije (slika 30) i radni listić (slika 31).

---

<sup>1</sup>  $E = mc^2 = u * c^2 = \frac{u * c^2}{e} = \frac{1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg} * (3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1})^2}{1,6022 \times 10^{-19} \text{ C}} \approx 931,5 \text{ MeV}$  i  $u = \frac{E}{c^2} = 931,5 \text{ MeV}c^{-2}$



Slika 30. Prikaz simulacije lančanih reakcija u *PhET* animaciji.

### Radni listić 2:

Aplikacija na vašim računalima sastoji se od tri kartice. Otvorite karticu pod imenom *Chain Reaction* i proučite elemente simulacije. Simulaciju slobodno pokrenite, mijenjajte varijable i sagledajte što se događa.

**1. Što se događa s neutronima oslobođenim fisijom ako u blizini jezgre koja se cijepa postoji još mnoštvo jezgara  $^{235}\text{U}$ ?**

Neutroni oslobođeni fisijom jedne jezgre  $^{235}\text{U}$  biti će apsorbirani od drugih jezgara  $^{235}\text{U}$  i započeti će nove fisijske reakcije.

**2. Pomoću štoperice izmjerite vrijeme potrebno za proces fisije u simulaciji *Chain Reaction* ako je broj jezgara  $^{235}\text{U}$  (za početni trenutak uzmite trenutak stiskanja crvenog gumba, a za završni pojavu gumba *Reset Nuclei*):**

- 30 ( $t \approx 7,5 \text{ s}^*$ )
- 60 ( $t \approx 7,4 \text{ s}^*$ )
- 90 ( $t \approx 7 \text{ s}^*$ )

\*vrijeme ovisi o konfiguraciji simulacije

**3. Pri kojoj se reakciji u 1 sekundi raspadne najviše jezgara?**

Najviše se jezgara raspada u reakciji s  $N(^{235}\text{U}) = 90$ .

**4. O čemu ovisi brzina reakcije?**

Brzina reakcije ovisi o broju jezgara  $^{235}\text{U}$  (koncentraciji).

**5. Što se događa kada neutron pogodi  $^{235}\text{U}$ , a što kada pogodi  $^{238}\text{U}$ ?**

Kada neutron pogodi jezgru  $^{235}\text{U}$  ona se raspada na 2 jezgre kćeri, a kada pogodi jezgru  $^{238}\text{U}$  ona prima neutron i postaje  $^{239}\text{U}$ .

**6. Što mislite kako prisutnost jezgara  $^{238}\text{U}$  utječe na fisiju jezgara  $^{235}\text{U}$ ?**

Smanjivati će neutrone potrebne za fisiju  $^{235}\text{U}$ .

**7. Pomoću štoperice izmjerite vrijeme potrebno za proces fisije u simulaciji *Chain Reaction* ako je broj jezgara  $^{235}\text{U}$  60, a jezgara  $^{238}\text{U}$  25 (za početni trenutak uzmite trenutak stiskanja crvenog gumba, a za završni pojavu gumba *Reset Nuclei*). Koja je uloga jezgara  $^{238}\text{U}$ ?**

Prisutnost jezgara  $^{238}\text{U}$  usporava fisiju (moderator) i kontrolira ju.

**9. Koja je uloga reaktorske posude (*containment vessel*) u simulaciji?**

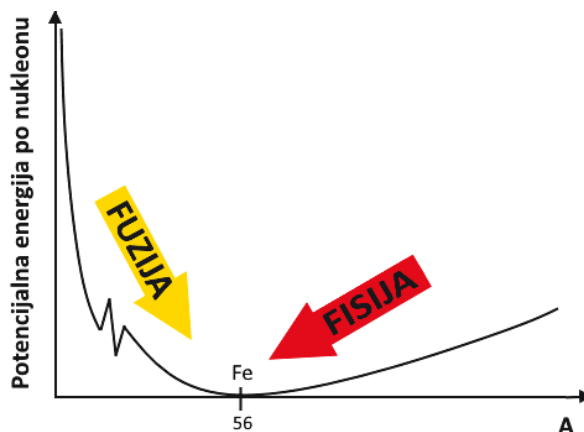
Zadržavanje produkata fisije na jednom mjestu.

**10. Gdje bi se takve posude mogle koristiti?**

U nuklearnim elektranama.

Slika 31. Prikaz radnog listića s pitanjima kojima se učenike vodi do zaključivanja o lančanim reakcijama fisije. Na slici su osim pitanja prikazani očekivani odgovori i naputci za nastavnika.

Pri simulaciji lančane reakcije učenici vođeni nastavnikom zaključuju o kontroliranoj i nekontroliranoj fisiji i ulozi moderatora. Po završetku diskusije o lančanim reakcijama nastavnik usmjerava učenike da pogledaju graf potencijalne energije po nukleonu i masenog broja  $A$  (slika 32) te se kroz raspravu zaključuje o oslobađanju energije u procesu fisije kao kretanju niz desnu padinu nuklearne doline i postojanju mogućnosti stvaranja energije spuštanjem niz lijevu padinu – uvodi se pojam fuzije.



Slika 32. Shematski prikaz reakcija fisije i fuzije na grafu ovisnosti potencijalne energije po nukleonu u jezgri o masenom broju  $A$  spuštanjem niz desnu i lijevu padinu redom na nuklearnom reljefu.

### Istraživačko pitanje 3. Na koji se način u procesu fuzije oslobađa energija?

Kada se sagleda graf ovisnosti potencijalne energije po nukleonu u jezgri o masenom broju  $A$ , spuštanje niz lijevu padinu odgovara fuziji. Na lijevoj padini su lagani kemijski elementi koji pri svom združivanju otpuštaju energiju. Diskusija bi se pokrenula pitanjem:

#### Što mislite koji su uvjeti potrebni da se ostvari fuzija?

Cilj diskusije je doći do zaključka da jezgre koje stupaju u fuziju moraju imati dovoljno energije kako bi prevladale odbojnu Coulombovu silu koja ih razdvaja i da se ta energija može postići pri visokim temperaturama. Uvodi se pojam termonuklearnih reakcija. Kako bi diskusija tekla lakše nastavnik prije diskusije daje vremena učenicima da prouče simulaciju fuzije (slika 33) pri kojoj se dvije jezgre neće sudariti sve dok temperatura ne postane dovoljno visoka.



Slika 33. Prikaz aplikacije koja simulira nalet dva protona kako bi se dogodila fuzija. U aplikaciji se može modificirati temperatura. Na temperaturama  $T < 10$  MK kulonska barijera je energetski previsoka i neće doći do sudara. Tek kada temperatura dođe do  $T \geq 10$  MK će se dogoditi sudar dva protona i doći će do fuzije [63].

### **Gdje bi temperature mogle doseći tako visoke vrijednosti?**

Ciljani odgovor je u zvijezdama /u Suncu.

### **Zašto se u procesu fuzije oslobađa energija?**

Učenike bi se potaknulo da povuku poveznicu s procesom fisije i zaključilo bi se da se pri fuziji energija oslobađa zbog postojanja razlike masa reaktanata i produkata. Nastavnik tada opisuje procese u Suncu i pri eksploziji vodikove bombe te piše nuklearne jednadžbe uz aktivno sudjelovanje učenika (pri primjeni zakona očuvanja nukleonskog broja, naboja i dr.).

U završnom dijelu sata učenici bi primijenili procese fisije i fuzije na proizvodnju električne energije u nuklearnim elektranama, te bi sagledali način rada nuklearnog reaktora pomoću *PhET* animacije (slika 34), njegove dijelove i način proizvodnje energije u elektrani (slika 35). Također osvrnuli bi se na pitanja:

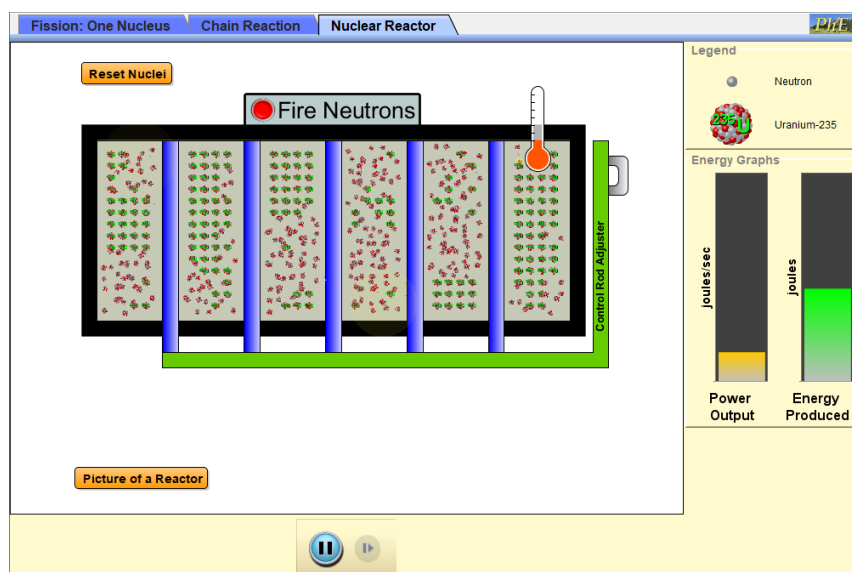
### **Što je radioaktivni otpad?**

Radioaktivni otpad je materijal koji emitira zračenje ili je njime kontaminiran te se ne može preraditi za ponovnu uporabu ili ga nije isplativo preraditi.

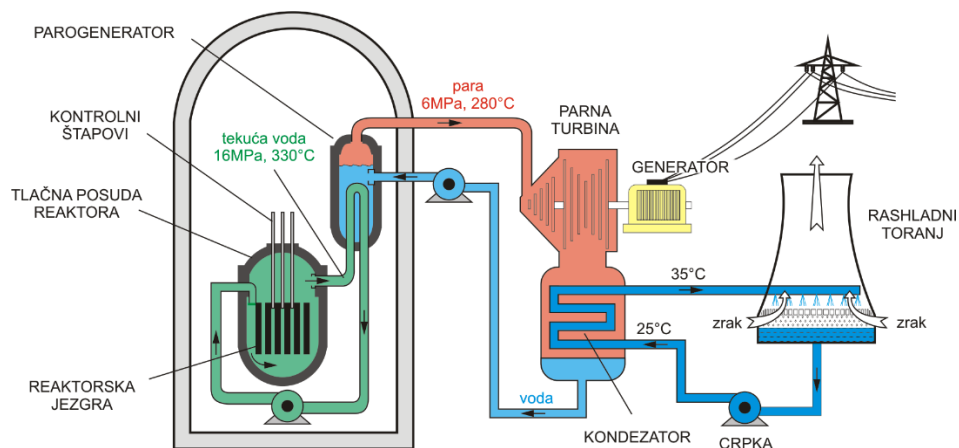
### **Zašto je važno pravilno zbrinuti radioaktivni otpad?**

Budući da radioaktivni otpad zrači (ionizirajuće zračenje), mnogi obični materijali, predmeti točnije, atomi i molekule koji s njima dolaze u dodir ili su u njihovoj blizini mogu postati radioaktivni. Kada takvo zračenje dođe u kontakt s organskom tvari

(organima, biljkama) u njima može izazvati nepravilnosti koje često nisu povoljne za daljnji zdrav razvoj organizma.



Slika 34. Prikaz simulacije lančanih reakcija i proizvodnje energije u *PhET* animaciji. Slika prikazuje nuklearni generator s kontrolnim šipkama i izvorom neutrona potrebnih za početak fisije. Kako se reakcije pokreću toplina u reaktoru se povećava što je prikazano povećanjem temperature u reaktoru (termometar gore desno u reaktoru). S desne strane prikazane su vrste jezgara prisutne u reaktoru ( $^{235}\text{U}$ ) te energija po sekundi (žuti stupac) i ukupna proizvedena energija (zeleni stupac).



Slika 35. Shematski prikaz građe nuklearne elektrane i reaktora [64].

## LITERATURA

- [1] Tsujimoto, T.; Shigeyama, T. The Origins Of Light And Heavy *R*-Process Elements Identified By Chemical Tagging Of Metal-Poor Stars // *The Astrophysical Journal Letters*, 795:L18 (4pp), (2014) <https://arxiv.org/pdf/1410.1891.pdf> (5.11.2018.)
- [2] Mellor, J.W. A Comprehensive treatise on inorganic and theoretical chemistry, [https://archive.org/details/b2980789x\\_0003/page/n9](https://archive.org/details/b2980789x_0003/page/n9) (15.10.2018.)
- [3] Mellor, J.W. Modern inorganic chemistry <https://archive.org/details/cu31924031173382/page/n407> (15.10.2018.)
- [4] Filipović, I.; Lipanović, S.; Opća i anorganska kemija, II. Dio Kemijski elementi i njihovi spojevi, V. dopunjeno izdanje. Zagreb : Školska knjiga, 1985.
- [5] Laist J.W.; Sneed M. C.; Maynard J. L.; Brasted R. C. Comprehensive Inorganic Chemistry Volume II: Copper, silver and gold. New York : D. Van Nostrand Company, Inc. 1954.
- [6] Gold, *Periodic Table*, <http://www.rsc.org/periodic-table/element/79/gold> (15.10.2018.)
- [7] What Is Aqua Regia? How Does It Dissolve Gold?, *Science ABC* , <https://www.scienceabc.com/pure-sciences/aqua-regia-formula-recipe-structure-dissolve-gold-platinum.html> (16.10.2018.)
- [8] Solubility of gold, *991 metallurgist*, <https://www.911metallurgist.com/blog/solubility-of-gold> (19.10.2018.)
- [9] Zlato Au – Općenito o elementu, *Periodni sustav elemenata*, <http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/au/index.html#OPCENITO> (15.10.2018.)
- [10] Zlato Au – Spojevi, dobivanje i uporaba, *Periodni sustav elemenata*, <http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/au/spojevi.html#SPOJEVI> (15.10.2018.)



- [11] The Many Uses of Gold, *Geology.com Geoscience News and Information*  
<https://geology.com/minerals/gold/uses-of-gold.shtml> (19.10.2018.)
- [12] Gold and Gold Alloys, *Total Materia*,  
<https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=230>  
 (17.10.2018.)
- [13] How did Rutherford's gold foil experiment differ from his expectations?, *Socratic*,  
[https://d2jmvrsizmvf4x.cloudfront.net/ZRKfN5N6QwqHxGm6oH5l\\_RutherfordGoiI Foil.jpg](https://d2jmvrsizmvf4x.cloudfront.net/ZRKfN5N6QwqHxGm6oH5l_RutherfordGoiI Foil.jpg) (8.1.2019)
- [14] Pagel, B. Nucleosynthesis and Chemical evolution of galaxies, 2nd edition:  
 Cambridge University Press, 2009, [http://www.gammaexplorer.com/wp-content/uploads/2014/03/Cambridge.Nucleosynthesis.And\\_Chemical.Evolution.Of\\_Galaxies.2nd.Edition.Feb\\_2009.eBook-ELOHiM.pdf](http://www.gammaexplorer.com/wp-content/uploads/2014/03/Cambridge.Nucleosynthesis.And_Chemical.Evolution.Of_Galaxies.2nd.Edition.Feb_2009.eBook-ELOHiM.pdf) (15.7.2018.)
- [15] Hester, J.; Burstein, D.; Blumenthal, G.; Greeley, R.; Smith, B.; Voss, H.G.; 21st  
 Century Astronomy, 2nd edition. New York : W.W. Norton & Company, 2007.
- [16] Carroll, B.W.; Ostlie, D.A. An Introduction to Modern Astrophysics, 2nd edition.  
 Pearson, 2014 <http://pdf.05367.com/037/9781292022932.pdf> (16.4.2018.)
- [17] Binding energy per nucleon  $B(Z, N)/A$  as a function of the mass number  $A$  by A.  
 Lépine-Szily, *Researchgate*, [https://www.researchgate.net/figure/Binding-energy-per-nucleon-B-Z-N-A-as-a-function-of-the-mass-number\\_fig1\\_234065870](https://www.researchgate.net/figure/Binding-energy-per-nucleon-B-Z-N-A-as-a-function-of-the-mass-number_fig1_234065870) (13.12.2018.)
- [18] Iliadis, C. Nuclear Physics of Stars, 2nd, revised and enlarged edition. Weinheim :  
 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2015  
[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1848709/mod\\_resource/content/1/Nuclear%20Physics%20of%20Stars%20by%20Christian%20Iliadis%20%5B2015%5D%20%7BCharm-Quark%7D.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1848709/mod_resource/content/1/Nuclear%20Physics%20of%20Stars%20by%20Christian%20Iliadis%20%5B2015%5D%20%7BCharm-Quark%7D.pdf) (16.4.2018.)

- [19] Pols, O.R. Stellar Structure And Evolution, lecture notes. Astronomical Institute Utrecht, 2011, <http://www.ucoick.org/~woosley/ay112-14/texts/pols11.pdf> (15.7.2018.)
- [20] Bodansky, D.; Clayton, DD; Fowler, W.A. Nucelar Quasi-equilibrium During Silicon Burning// The Astrophysical Journal Supplement Series No.148, Vol. 16 [http://adsbit.harvard.edu/cgi-bin/nph-article\\_query?bibcode=1968ApJS...16..299B&db\\_key=AST&page\\_ind=4&data\\_type=GIF&type=SCREEN\\_VIEW&classic=YES](http://adsbit.harvard.edu/cgi-bin/nph-article_query?bibcode=1968ApJS...16..299B&db_key=AST&page_ind=4&data_type=GIF&type=SCREEN_VIEW&classic=YES) (3.11.2018.)
- [21] Thompson I.J.; Nunes, F.M. Nuclear reactions for astrophysics: Cambridge University Press 2009, [https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc833764/m2/1/high\\_res\\_d/1010402.pdf](https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc833764/m2/1/high_res_d/1010402.pdf) (15.7.2018.)
- [22] Live Chart of Nuclides - nuclear structure and decay data <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html> (28.12.2018.)
- [23] Burbidge, E.M.; Burbidge, G.R.; Fowler, W.A.; Hoyle F. Synthesis of elements in Stars // Reviews of Modern Physics, Volume 29, Number 4. (1957) <https://journals.aps.org/rmp/pdf/10.1103/RevModPhys.29.547> (1.2.2019.)
- [24] Zinner, N. Nuclear Reactions for Nuclear Astrophysics, Weak Interactions and Fission in Stellar Nucleosynthesis; Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy, 2007, [http://phys.au.dk/fileadmin/site\\_files/publikationer/phd/Nikolaj\\_Zinner.pdf](http://phys.au.dk/fileadmin/site_files/publikationer/phd/Nikolaj_Zinner.pdf) (15.7.2018.)
- [25] HISPEC (HIgh-Resolution In-flight SPEctroscopy)/DESPEC (DEcay SPEctroscopy), FAIR Facility for Antiproton and Ion Research, <https://fair-center.eu/en/for-users/experiments/nustar/experiments/hispecdespec.html> (7.2.2019.)
- [26] The science of FRIB, Facility for Rare Isotope Beams at Michigan State University, [https://frib.msu.edu/\\_files/pdfs/frib\\_scientific\\_and\\_technical\\_merit\\_lite\\_0.pdf](https://frib.msu.edu/_files/pdfs/frib_scientific_and_technical_merit_lite_0.pdf) (7.2.2019.)

- [27] Yoshida, T.; Terasawa, M.; Kajino, T.; Sumiyoshi, K. Nucleosynthesis of light elements and heavy r-process elements through the v-process in supernova explosions // *The Astrophysical Journal*, 600: str. 204–213 (2004)  
<http://iopscience.iop.org/article/10.1086/379766/pdf> , (7.12.2018.)
- [28] Arcones, A.; Janka, H.T.; Scheck, L. Nucleosynthesis-relevant conditions in neutrino-driven supernova Outflows I. Spherically symmetric hydrodynamic simulations // *Astronomy & Astrophysics*, manuscript no. 6983text (2018)  
<https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0612582.pdf> (5.2.2019)
- [29] Hirata, K.; Kajita, T.; Koshiba, M.; Nakahata, M.; Oyama, Y.; Sato, N.; Suzuki, A.; Takita, M.; Totsuka, Y.; Kifune, T.; Suda, T.; Takahashi, K.; Tanimori, T.; Miyano, K.; Yamada, M.; Beier, E.W.; Feldscher, L.R.; Kim, S.B.; Mann, A.K.; Newcomer, F.M.; Van Berg, R.; Zhang, W.; Cortez, B.G. Observation of a Neutrino Burst from the Supernova SIV1987A // *Physical Review Letters* Vol. 58, No. 14 (1987)  
<https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.58.1490> (8.2.2019.)
- [30] Hubble revisits an old friend, *Hubble space telescope*,  
<https://www.spacetelescope.org/images/potw1142a/> (2.2.2019.)
- [31] Meyer, B.S.; Mathews, G.J.; Howard, W.M.; Woosley, S.E.; Hoffman, R.D. r-process nucleosynthesis in the high-entropy supernova bubble // *The Astrophysical Journal*, 399: str. 656-664 (1992) <http://adsabs.harvard.edu/full/1992ApJ...399..656M> (20.12.2018.)
- [32] Freiburghaus, C.; Rosswog, S.; Thielemann, F.K. r-process in neutron star mergers // *The Astrophysical Journal*, 525:L121-L124 (1999)  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1086/312343/fulltext/995524.text.html> (29.12.2018.)
- [33] McLaughlin G.C.; Fuller, G.M.; Wilson, J.R. The Influence of Nuclear Composition on the Electron Fraction in the Post-Core-Bounce Supernova Environment // *The Astrophysical Journal*, 472: str 440-451 (1996)  
<http://iopscience.iop.org/article/10.1086/178077/pdf> (20.12.2018.)

- [34] Pruet, J.; Woosley, S.E.; R. Buras, R.; Janka H.T.; Hoffman, R.D. Nucleosynthesis In The Hot Convective Bubble In Core-Collapse Supernovae // *The Astrophysical Journal*, 623: str. 325-336 (2005) <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0409446.pdf> (20.12.2018.)
- [35] Wanajo, S.; Sekiguchi, Y.; Nishimura, N.; Kiuchi, K.; Kyutoku, K.; Shibata, M. Production of all the r-process nuclides in the dynamical ejecta of neutron star mergers // *The Astrophysical Journal Letters*, 789:L39 (6pp) (2014) <https://arxiv.org/pdf/1402.7317.pdf> (7.3.2018.)
- [36] Neutron stars and Pulsars, *HyperPhysics (hosted by Department of Physics and Astronomy, Georgia State University)*, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Astro/pulsar.html#c2> (3.2.2019.)
- [37] Lattimer, J.M.; M. Prakash, M. The Physics of Neutron Stars // *Science*, 304:536-542 (2004) <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0405262.pdf> (4.1.2019.)
- [38] Perkins, D.H. Particle Astrophysics, 2nd edition, New York: Oxford University Press, 2009, [http://alpha.sinp.msu.ru/~panov/LibBooks/CR/423048\\_legalreads.com.pdf](http://alpha.sinp.msu.ru/~panov/LibBooks/CR/423048_legalreads.com.pdf), (15.7.2018.)
- [39] Crab on LCD, *Hubble space telescope*, <https://www.spacetelescope.org/images/potw1720a/> (3.2.2019.)
- [40] This day in geographic history Jul 4, *National Geographic*, 1054 CE: Supernova 1054, <https://www.nationalgeographic.org/thisday/jul4/supernova-1054/#> (2.2.2019)
- [41] The Crab Nebula, Hubble space telescope, <https://www.spacetelescope.org/images/opo9622a1/> (3.2.2019.)
- [42] Redd, N.T. Neutron Stars: Definition & Facts, <https://www.space.com/22180-neutron-stars.html> (4.1.2019.)
- [43] Space Visualisation by Luis alcada: Merging neutron star pair, *Luis Calcada*,

- <https://luisalcada.com/merging-neutron-star-pair> (28.1.2019.)
- [44] Binary Star Systems: Classification and Evolution, *Space.com*,  
<https://www.space.com/22509-binary-stars.html> (3.2.2019.)
- [45] Roche-lobe, *COSMOS - The SAO Encyclopedia of Astronomy*,  
<http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/r/roche-lobe> (5.2.2019.)
- [46] Goriely, S; Bauswein, A.; Janka H.T. *r*-Process Nucleosynthesis In Dynamically Ejected Matter Of Neutron Star Mergers // *The Astrophysical Journal Letters*, 738:L32 (6pp) (2011) <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/2041-8205/738/2/L32/pdf> (5.11.2018.)
- [47] Martin, D.; Perego, A.; Arcones, A.; Thielemann, F.K.; Korobkin, O.; Rosswog, S. Synthesis of Heavy Elements in the Ejecta of Neutron Star Mergers // *Journal of Physics: Conf. Series* 940 (2018)  
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/940/1/012047> (7.12.2018.)
- [48] Goriely, S.; Bauswein, A.; Janka, H.T. R-process nucleosynthesis during the decompression of neutron star crust material // *Journal of Physics: Conference Series* 337 (2012) <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/337/1/012039/pdf> (4.1.2019.)
- [49] Krsnik, R. *Suvremene ideje u metodici nastave fizike, sveučilišni udžbenik*. Zagreb: Školska knjiga, 2008.
- [50] Brković, N. *Fizika 4, udžbenik za 4. razred gimnazije, A inačica programa*. Zagreb: LUK d.o.o., 2001.
- [51] Paar, V. *Fizika 4, udžbenik za 4. razred gimnazije, 3. izdanje*. Zagreb: Školska knjiga, 2006.
- [52] Labor, J. *Fizika 4, udžbenik za četvrti razred gimnazije, 2. izdanje*. Zagreb: ALFA, 2008.

- [53] Marković, B. Fizika za IV razred gimnazije, Optika – Osnove atomske fizike i astrofizike. Zagreb: Školska knjiga 1963.
- [54] Krsnik, R. Fizika 4, udžbenik za 4. razred gimnazije, B inačica programa, 2. izdanje. Zagreb: Školska knjiga, 2005.
- [55] Nuklearna elektrana Krško, *Tehnički muzej Nikola Tesla*, <http://tehnicki-muzej.hr/hr/aktivnosti/nek/> (23.1.2019.)
- [56] How Does Our Sun Compare With Other Stars?, *NASA Space place – NASA Science for kids*, <https://spaceplace.nasa.gov/sun-compare/en/> (7.2.2019.)
- [57] File:Nagasakibomb.jpg, *Wikipedia, the free encyclopedia*, <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Nagasakibomb.jpg#filelinks> (7.2.2019.)
- [58] Nuclear Fusion Animation, *Youtube*, <https://www.youtube.com/watch?v=l9HXAXXyU0U> (7.2.2019.)
- [59] Nuclear Fission Animation for Science, *Youtube*, [https://www.youtube.com/watch?v=Zcuynn\\_i4\\_k](https://www.youtube.com/watch?v=Zcuynn_i4_k) (7.2.2019.)
- [60] ANS, Center for Nuclear Science and Technology information/In the Classroom (Education Resources for Educators) [http://nuclearconnect.org/wp-content/uploads/2014/06/Fission\\_Demonstration.pdf](http://nuclearconnect.org/wp-content/uploads/2014/06/Fission_Demonstration.pdf) (15.1.2019.)
- [61] PhET Interactive Simulation (University of Colorado Boulder)/ Interactive Simulations For Science And Math/ Nuclear Fission <https://phet.colorado.edu/en/simulation/nuclear-fission> , (15.1.2019)
- [62] 2014. Annual Report Krško Nuclear Power Plant, *Nuklearna elektrana Krško*, [https://www.nek.si/\\_files/1434/LETNO\\_ANG\\_net.pdf](https://www.nek.si/_files/1434/LETNO_ANG_net.pdf) (20.1.2019.)

[63] Fusion in Stars, *The King's Centre for Visualization in Science*,  
[http://www.kcvs.ca/martin/astro/au/unit4/92/chp9\\_2.htm](http://www.kcvs.ca/martin/astro/au/unit4/92/chp9_2.htm) (15.1.2019.)

[64] Nuklearni reaktor, *Kemijski rječnik*,  
<https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=nuklearni+reaktor> (23.1.2019.)