

Nuklearna astrofizika

Matko Milin

Fizički odsjek

Prirodoslovno-matematički fakultet

Sveučilišta u Zagrebu

20. listopada 2013.

2

Astrofizika: kratki uvod

2.1 Zvijezde

Definirati pojam “zvijezda” nije posve jednostavno. Približno je točno reći da su zvijezde vruće svijetleće kugle plina koje nastaju u nebulama (“maglicama”) i u kojima se energija oslobađa nuklearnim reakcijama. Svojstva zvijezda variraju unutar vrlo širokog opsega: polumjer im može biti i ≈ 500 puta manji od Sunčevog, ali i ≈ 1000 puta veći. Masa im je između $1/20$ i 150 masa Sunca, a površinska temperatura od 3000 do 50000°C . Vruće zvijezde su plave, a hladne crvene. Naše je Sunce između tih ekstrema i čini se žutim.

Postoje objekti koji odstupaju od gornjeg opisa, a ipak se nazivaju zvijezdama. Npr. “neutronske zvijezde” nisu plinovite, “smeđi patuljci” nemaju vlastiti izvor energije itd. Dakle, pojam zvijezde određuje vrlo različite objekte, no baš ta raznolikost omogućuje izradu boljih modela i potpunije razumijevanje svih procesa u i oko zvijezda.

Energija koju zvijezde zrače stvara se u njihovom središtu nuklearnim reakcijama. Evolucija svake zvijezde ponajprije ovisi o tim reakcijama i načinu i brzini trošenja nuklearnog goriva. Drugi važni (ne nužno nezavisni) parametri su masa i polumjer zvijezde, te njihova temperatura i intenzitet zračenja. Dobar zvjezdani model, krećući od nuklearnih reakcija u jezgri zvijezde i prijenosa energije od jezgre do njene površine, mora kao izlaz dobiti veličine koje su zabilježene astronomskim promatranjem. Također, model mora opisati promjenu zvijezda u vremenu, od njenog nastajanja do smrti. Baš je taj posljednji stupanj razvoja većine zvijezda, to jest njihova eksplozivna smrt, posebno važan jer se njime u međuzvjezdani prostor oslobađaju velike količine “prerađenog” materijala. Riječ je o tzv. **supernovama** koje nastaju u trenutku kada masivna zvijezda (najmanje ≈ 6 puta teže od Sunca) više nije u stanju gravitacijsku silu sažimanja držati u ravnoteži nuklearnim reakcijama. Nedavno (u “galaktičkim” razmjerima) uočena supernova SN1987A vrlo je važna za razvoj astrofizike. Precizno su izmjerene razne značajne veličine, a uz svjetlost i ostalo elektromagnetsko zračenje, detektirane su čak i neke čestice proizvedene pri toj eksploziji.

2.1.1 Svojstva zvijezda i način njihovog određivanja

Iako za promatrača sa Zemlje sve zvijezde izgledaju manje-više jednako, njihova svojstva nisu ni najmanje podjednaka i svi bitni parametri za njihov opis (masa, polumjer, temperatura, energija zračenja itd.) variraju unutar vrlo širokog područja.

Pojedine veličine nisu nezavisne od drugih. Npr. empirički je nađeno da za većinu zvijezda vrijedi pravilo da im luminozitet raste s četvrtom potencijom mase (tzv. “relacija mase i luminoziteta”). Ovu i slične pravilnosti shematski ćemo objasniti u šetom poglavlju.

Mase zvijezda

Najmanja poznata zvijezda za koju se zna da se u njoj odigrava fuzija je AB Doradus C, mase otprilike 93 puta veće od Jupitera; pretpostavlja se da su moguće još nešto manje zvijezde - sve

do 75 masa Jupitera (Jupiter je otprilike 1000 puta lakši od Sunca). Tijela manja od nje poznata su kao smeđi patuljci. Nedavno je pronađen objekt ("CHXR 73 B") s masom od svega 12 masa Jupitera; za sada nije postignut konsenzus radi li se o planetu ili o smeđem patuljku.

Najteže poznate zvijezde (Eta Carinae, Pistol Star) imaju masu otprilike 150 puta veću od mase Sunca (M_{\odot}); poznato je još svega nekoliko zvijezda (LBV 1806-20, VV Cephei, S Doradus) čija masa je veća od 100 Sunčevih.

Zvijezde na "glavnom nizu" (vidi potpoglavlje 2.1.2) imaju mase od ≈ 0.4 do 40 Sunčevih.

Polumjeri zvijezda

Najveći poznati polumjeri zvijezda su: VV Cephei (1900 Sunčevih polumjera, koje ćemo označavati s R_{\odot}), KY Cygni (1500 R_{\odot}), KW Sagitarii (1400 R_{\odot}), V354 Cephei (1300 R_{\odot}) itd. Neke poznatije zvijezde imaju sljedeće polumjere: Betelgeuse (820 R_{\odot}), Mira A (700 R_{\odot}), Antares (530 R_{\odot}), Aldebaran (350 R_{\odot}), Deneb (145 R_{\odot}) itd. Najmanje poznate polumjere imaju neutronske zvijezde (i isti su bitno manji od polumjera Zemlje).

Zvijezde na "glavnom nizu" (vidi potpoglavlje 2.1.2) imaju polumjere od ≈ 0.8 do 15 Sunčevih.

Temperature zvijezda

Površinske temperature zvijezda variraju od 3 do 100 tisuća Kelvina, o njima će više biti riječi pri diskusiji spektralnih tipova i HR-dijagrama. Temperature u unutrašnjosti zvijezda variraju od 10^6 K do 10^{10} K - ova fizička veličina je ključna za odigravanje termonuklearnih reakcija.

Zvijezde na "glavnom nizu" (vidi potpoglavlje 2.1.2) imaju površinske temperature od 3500 do 40000 K.

Sjaj zvijezda

Luminozitet zvijezde L definira se kao energija koju neka zvijezda zrači u jedinici vremena. Luminozitet Sunca je $3.85 \cdot 10^{26}$ W. Tok zračenja F (energija koja u jediničnom vremenu prođe kroz jediničnu površinu okomitu na smjer širenja zračenja) na udaljenosti r od zvijezde luminoziteta L računa se iz $F=L/(4\pi r^2)$.

Prividan sjaj ili prividna zvjezdana veličina neke zvijezde (m) je logaritamska skala za sjaj zvijezde preuzeta od starih Grka, kojoj bi u modernoj verziji odgovarao izraz:

$$m = -2.5 \cdot \log_{10} F + K$$

gdje je K neka konstanta (naštimana tako da se sjaj slaže s tablicama iz povijesti). Izrazimo li tok zračenja preko luminoziteta zvijezde L , dobivamo puno korisniji izraz:

$$m = -2.5 \cdot \log_{10} \left(\frac{L}{d^2} \right) - 2.72 \quad ,$$

gdje je d udaljenost zvijezde izražena u parsecima (1 parsek = 3.26 svjetlosnih godina = $3.086 \cdot 10^{16}$ m).

Dakle, zvijezda je to sjajnija na nebu što joj je m manji - najsjajnije zvijezde imaju čak negativne vrijednosti sjaja. Sunce je zbog njegove blizine najsjajniji objekt na nebu s $m = -26.7$, Sirius (najsajjnija zvijezda poslije Sunca) ima $m = -1.5$, Vega $m = 0$ itd. Razlika prividnog sjaja $\Delta m = 5$ odgovara omjeru luminoziteta od 100.

Apsolutni sjaj ili apsolutna zvjezdana veličina M definira se kao prividna zvjezdana veličina koju bi neki objekt imao na udaljenosti od 10 parseka. Veza između prividne i apsolutne zvjezdane veličine je stoga:

$$m - M = 5 \cdot \log_{10} d - 5 \quad .$$

Za dva objekta vrijedi:

$$M_1 - M_2 = -2.5 \cdot \log_{10} \left(\frac{L_1}{L_2} \right) \quad .$$

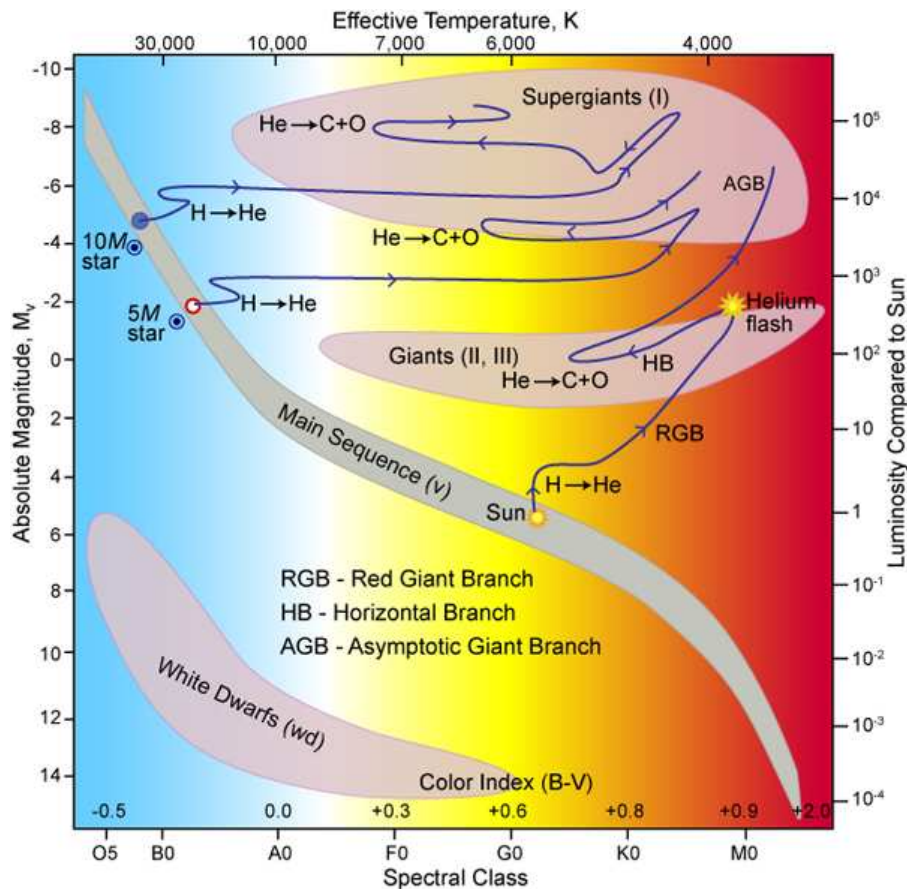
Sunce ima $M = 4.83$ (dakle, nije pretjerano sjajno), Sirius $M = 1.42$, Vega $M = 0.58$ itd. Od poznatih zvijezda na nebu, među apsolutno najsjajnije spadaju Rigel ($M = -8.1$), Betelgeuse ($M = -7.2$) i Deneb ($M = -7.2$).

Ostala svojstva zvijezda

Kemijski sastav zvijezda direktno ovisi o stupnju evolucije u kojem se nalazi. Poznata je i činjenica da se na zvijezdama pojavljuju i vrlo jaka *magnetska polja* (na "mirnim" dijelovima Sunca polje je reda mT), koja se mogu povezati i s pojavom zvjezdanih pjega (Sunčeve pjege imaju polje ≈ 0.1 T) i objašnjavaju se raznim magneto-hidrodinamičkim modelima. S pojavom zvjezdanih pjega vezana je i *rotacija zvijezda*, za koju se zna da u raznim oblicima postoji kod većine zvijezda. Drastičan primjer rotacije nalazimo kod *pulsara*, neutronske zvijezde koje se oko osi okrenu i do tisuću puta u sekundi!

2.1.2 Hertzsprung-Russelov dijagram

Dijagram u kojem je za svaku zvijezdu unesen njezin luminozitet u ovisnosti o površinskoj temperaturi (ili boji tj. spektralnom tipu) naziva se Hertzsprung-Russelov ili skraćeno HR-dijagram. Odmah uočljiva činjenica u HR-dijagramu nama bliskih zvijezda je ta da se 95% zvijezda grupira duž dijagonale koja se zbog toga naziva "Glavni niz" (*engl. main sequence*). Ta se dijagonala pruža od gornjeg lijevog kuta (dakle, zvijezda visoke temperature i luminoziteta) do donjeg desnog kuta (zvijezda niske temperature i luminoziteta).



Slika 2.1: Hertzsprung-Russelov dijagram. Preuzeto iz M. Wiescher, Physics 2 (2009) 69.

Za zvijezde na glavnom nizu vrijedi jednostavna relacija između njihove mase i luminoziteta:

$$L \sim M^4, \quad (2.1)$$

što ima za posljedicu činjenicu da se masivnije zvijezde puno brže troše (npr. za naše Sunce procjenjuje se da će trajati oko 10^{10} godina, dok bi 10 puta masivnija zvijezda živjela samo 10^7 godina). Relacija mase i luminoziteta posljedica je činjenice da brzina odvijanja nuklearnih reakcija jako ovisi o temperaturi u središtu zvijezde, koja pak jako ovisi o njezinoj masi. Potencija na masi varira između 3 i 4, ovisno o načinu prijenosa energije u zvijezdi.

I druga se grupiranja mogu uočiti u HR-dijagramu. Npr. uočavaju se grupe koje odgovaraju crvenim divovima, superdivovima, te bijelim patuljcima. Svakoj od tih grupa odgovara i jedna faza u evoluciji zvijezda. Činjenica da se najveći broj zvijezda (95%) nalazi duž glavne linije pokazuje da njoj odgovara najdulji dio života svake zvijezde.

Važna klasa zvijezda za razmatranje nukleosinteze su tzv. **AGB-zvijezde** (od *engl.* Asymptotic Giant Branch). Riječ je o zvijezdama male ili srednje mase ($0.6-10 M_{\odot}$) koje su potrošile vodik i helij u jezgri. Jezgre tih zvijezda su se najprije potrošnjom vodika sažele i temperatura im je porasla, dok su im se vanjski slojevi ohladili i značajno raširili (npr. Sunce će u ovoj fazi dostići stotinjak puta veći polumjer od trenutačnog). Luminozitet tih zvijezda je značajno narastao u odnosu na zvijezde na glavnom nizu - one postaju crveni divovi. U HR-dijagramu ove zvijezde se nalaze duž linije koja spaja glavni niz i desni gornji kut dijagrama ("linija crvenih divova", *engl.* Red Giant Branch, **RGB**). "Paljenjem" helija (na $\approx 3 \times 10^8$ K), hlađenje vanjskih slojeva i porast luminoziteta prestaju, i u HR-dijagramu se takve zvijezde "vraćaju" na lijevu stranu (tzv. vodoravna grana, *engl.* Horizontal Branch, **HB**). Do prestanka hlađenja dolazi jer se pri paljenju helija sama sredica zvijezde značajno zagrije i raširi, što dovodi i do širenja i hlađenja ljusaka u kojima je do tog časa još uvijek gorio vodik. Gašenjem gorenja helija, zvijezda se opet pomiče gore desno, paralelno liniji crvenih divova - ova se linija sad naziva "asimptotska linija divova" i zvijezde na njoj se nazivaju AGB-zvijezde. U ovakvim se zvijezdama u jednom času opet "pali" gorenje vodika u tankoj vanjskoj ljusci zvijezde, koje onda aktivira i gorenje helija u susjednoj ljusci - predviđa se da se paralelno odvija i tzv. *s*-proces, o kojem će više biti riječi u poglavlju 7.1. Ovi procesi traju samo par tisuća godina (a ponekad se i periodički ponavljaju - tada se govori o termalnom pulsiranju odnosno o TP-AGB zvijezdama) i dovode do značajnog miješanja materijala iz unutrašnjosti i vanjskih slojeva. Ove zvijezde su općenito vrlo nestabilne i često pokazuju pravilne promjene sjaja. Zvijezde u ovoj fazi evolucije također kroz zvjezdani vjetar gube ogromne količine materijala (i do 50%!), a česta je i pojava tzv. planetarnih maglica - riječ je o odbačenim vanjskim slojevima zvijezda koji se onda šire Svemirom i izgledom podsjećaju na ogroman planet (od tuda su i dobili možda zbunjujuće ime).

2.1.3 Klasifikacije zvjezdanih spektara

A) Po standardnoj klasifikaciji, zvjezdani spektri su grupirani u 10 razreda. Svaki razred se sastoji od 10 podrazreda (0-9) s tim da razred O počinje s O5. Razredi su:

- Razred O:** svijetlomodne zvijezde s efektivnom temperaturom višom od 30000 K; u spektru su prisutne jake apsorpcijske linije HeI, ali ima i linija HeII (+ NIII, SiIV); moguća pojava vodikovih linija u emisiji (Oe) [primjer: Mintaka].
- Razred B (Orionov ili helijev):** modre zvijezde (divovi) s temperaturom od 10000 K do 30000 K; u spektru su uočljive jake apsorpcijske linije HeI (+ OII, MgII, SiIII), ali pri nižim temperaturama unutar razreda postaju slabije od apsorpcijskih linija vodika [primjeri: Spika, Rigel, Regulus].
- Razred A (vodikov ili Sirijusov):** bjeličaste zvijezde s temperaturom od 7500 K do 10000 K; u spektru su uočljive široke apsorpcijske linije vodika, a pojavljuju se i H i K linije ioniziranog kalcija (+ MgII, SiII, FeII, TiII) [primjeri: Sirius, Vega, Altair, Deneb].

4. **Razred F (kalcijev):** žućkastobijele zvijezde s temperaturom od 6000 K do 7500 K; u spektru izrazite linije ioniziranog kalcija, javljaju se i linije drugih iona (CrII, FeII); linije vodika slabe [primjeri: Procion, Kanopus, Sjevernjača].
5. **Razred G (Sunčev):** žućkaste zvijezde s temperaturom od 4500 K do 6000 K; u spektru su izrazite linije ioniziranog kalcija, javljaju se i linije drugih neutralnih metala (npr. FeI), a i CH vrpce; linije vodika slabe [primjeri: Sunce (G2), Kapela, Toliman].
6. **Razred K (metalni):** narančaste zvijezde s temperaturom od 3500 K do 4500 K; u spektru su izrazite linije neutralnih metala, prisutne i CH vrpce; sniženjem temperature pojavljuju se molekularne vrpce (npr. TiO), linije vodika jedva primjetljive [primjeri: Arktur, Aldebaran].
7. **Razred M:** crvenkaste zvijezde s temperaturom ispod 3500 K; u spektru prevladavaju molekularne vrpce u apsorpciji (TiO) i linije neutralnih metala; javljaju se i linije u emisiji (Me) [primjeri: Antares, Betelgeuze].
8. **Razred C:** ista svojstva kao i M razred samo što nema TiO linija, a pojavljuju se CN, CH i C₂ vrpce; prije se dijelio na R i N razred
9. **Razred S:** pokazuje jake vrpce ZrO, YO i LaO; ostalo kao u M razredu.
10. **Razred W:** tzv. *Wolf-Rayetove zvijezde* temperature od 35000 K do 100000 K; kontinuirani spektar s emisijskim linijama helija, vodika i drugih elemenata; spektri su ili obogaćeni ugljikom (WC) ili dušikom (WN); u našoj galaksiji poznato ih je oko 150 (primjer: Gamma Velorum).

B) Druga opće prihvaćena klasifikacija je po njihovom položaju u Hertzsprung-Russelovom dijagramu ili tzv. **MKK KLASIFIKACIJA** (Morgan, Keenan, Kellman; 1943.):

Ia **Sjajni superdivovi:** uske i oštre spektralne linije [Betelgeuse, Deneb, Rigel]

Ib **Superdivovi** [Kanopus, Antares]

II **Sjajni divovi** [Hadar]

III **Normalni divovi** [Arktur, Kapela, Aldebaran, Poluks]

IV **Subdivovi** [Procion, Ahernar, Altair]

V **Patuljci:** zvijezde glavnog niza [Sirius, Vega, Spika, Sunce]

VI **Subpatuljci**

VII **Bijeli patuljci:** vrlo široke spektralne linije [Sirius B, Procion B]

C) Standardno se još koriste ne posve striktni nazivi za razne zvijezde s obzirom na njihovu veličinu i sjaj:

1. **Smeđi patuljak:** protozvijezda; sjaj potječe u potpunosti iz gravitacijskog izvora energije; i nakon pet milijardi godina stezanja površinska temperatura nije im viša od 800 K, pa se opažaju samo u infracrvenom.
2. **Modri div:** ima veoma snažan izvor energije (proizvodnja raste s temperaturom); efektivan CNO ciklus; prijenos energije miješanjem (i u jezgri); površinska temperatura veća od 12000 K [primjer: Deneb].
3. **Crveni patuljak:** efektivan *pp*-ciklus; prijenos energije radijativan u jezgri, u plaštu konvektivan; plašt je to deblji što je zvijezda manje mase [primjer: Barnardova zvijezda].
4. **Crveni div:** stara zvijezda površinske temperature od 2000 K do 3000 K i promjera 10 do 100 puta većeg od Sunčevog; izotermna jezgra je vrlo malena, u stanju je degeneriranog plina (koji ne mijenja tlak u ovisnosti o temperaturi što vodi do 'helijeva bljeska'); plašt zvijezde je do velikih dubina konvektivan i uzburkan [primjeri: Aldebaran, Betelgeuse].
5. **Tamni patuljak:** masa manja od $0.1M_{\odot}$; ne mogu postići trajan termonuklearni izvor energije; degenerirano središte.
6. **Bijeli patuljak:** polumjer od 3500 km do 14000 km; masa uglavnom od 0.8 do 0.9 M_{\odot} , nikad veća od 1.4 M_{\odot} ; luminozitet 10 do 10000 puta manji od Sunčevog; gustoća u prosjeku od 10^8 do 10^9 kg/m³; u najvećem dijelu sastavljeni od degeneriranog elektronskog plina [primjer: Sirius B].
7. **Neutronska zvijezda:** gustoća od 10^{11} do 10^{17} kg/m³; masa od 1.4 do 1.8 M_{\odot} ; uglavnom pulsari; magnetska indukcija od 10^6 T do 10^8 T; periodi od 0.53 s do 6 s; radijusi od 10 km do 5000 km; njihov broj u našoj galaksiji se procjenjuje na pola milijuna.

2.1.4 Promjenljive zvijezde

Oko 1% svih zvijezda je promjenljivo. Imenuju se slovima R,S,T,...,Z (a zatim RR,RS,...) i genitivom imena zvijezda

1. **δ -cefeide:** klasične cefeide; pulsirajuće promjenljive; veoma sjajne i divovske zvijezde perioda između 2 i 50 dana; zvijezde populacije I smještene unutar 1 kpc od galaktičke ravnine; spektralnih razreda F do G; temperatura im je najveća u trenutku najvećeg sjaja; maksimum sjaja javlja se onda kada površina ekspandira s najvećom brzinom; pulsiranje zvijezda uvjetovano je spremanjem i oslobađanjem energije iz sloja ispod površine zvijezde gdje helij iz jednostruke ionizacije prelazi u dvostruku; period i srednja gustoća zvijezde povezani su s $P\rho^{1/2} = \sqrt{3\pi/G} = 3.74 \times 10^5 \text{ kg}^{1/2} \text{ m}^{-3/2} \text{ s}$; u pulsaciji promijene promjer za $\approx 10\%$; relacija sjaja i perioda: $\bar{M} = A + b \log P$.
2. **W Virginis:** cefeide populacije II; pulsirajuće promjenljive; veoma sjajne i divovske zvijezde; nalaze se u kuglastim skupovima; vrijedi relacija sjaja i perioda; u pulsaciji promjene promjer za $\approx 50\%$; za dati period otprilike su dva puta manje sjajne od klasičnih cefeida; utvrđivanje prirode cefeide vrši se mjerenjem količine metala iz spektra zvijezde.
3. **RR Lirae:** pulsirajuće promjenljive; nalaze se uglavnom u kuglastim skupovima; veoma sjajne i divovske zvijezde; sve istog sjaja ($M \approx 0.5$); spektralnih razreda A do F; periodi uglavnom od 0.3 do 0.9 dana, a promjene sjaja oko 1^m .
4. **β -cefeide:** ili zvijezde tipa β -CMa imaju vrlo kratke periode (nekoliko sati); sjaj je najveći onda kada je volumen najmanji; kolebanje sjaja maleno.
5. **RV Tauri:** superdivovi spektralnog tipa F, G ili K; dužinom perioda nastavljaju se na cefeide; promjena sjaja iznosi 1-2 zvjezdane veličine (do 4); period promjene (30 do 150 dana) je to kraći što je zvijezda sjajnija; gube masu jakim zvjezdanim vjetrom; imaju karakteristike starih, razvijenih zvijezda, a ponekad se pojavljuju u kuglastim skupovima.
6. **Miride:** najdulji periodi (uglavnom oko godinu dana); periodičnost nije sasvim pravilna; crveni superdivovi; amplituda sjaja mijenja se od 3 do 7 veličina u vidljivoj svjetlosti; najbrojnije promjenljive zvijezde u Galaksiji; pripadaju objema populacijama [primjer: Mira Ceti].

2.1.5 Katakliksičke zvijezde

Pod katakliksičkim zvijezdama podrazumijevaju se one zvijezde kod kojih se dešavaju eksplozivni nuklearni procesi (a koji nisu sam kraj života zvijezde). U našoj se galaksiji javljaju prosječno 25 puta godišnje; ukupno prerađena masa u vrijeme trajanja Galaksije iznosi 10^6 do $10^8 M_{\odot}$

1. **Tipične nove:** godišnje se opaze u prosjeku dvije; prosječna promjena veličine: $\Delta m = 11$; promjena se zbiva u toku nekoliko dana; zračenje u maksimumu od 10^{31} W do 10^{32} W; ukupno se oslobađa 10^{38} J; po brzini pada sjaja dijele se na brze (tjedni, $\bar{M}_m = -8.3$) i spore (godine, $\bar{M}_m = -6.2$); mehanizam objašnjen putem bliskih dvojnih zvijezda poluodijeljena oblika, jedna od zvijezda je bijeli patuljak; zvijezda koja ispunjava Rocheovu šupljinu gubi materijal koji potom pada na bijelog patuljka i izaziva eksplozivne nuklearne reakcije.
2. **Povratne nove:** jasna pravilnost: duže vrijeme među eksplozijama uvjetuje veću svjetlosnu amplitudu [primjer: P Cygni].
3. **Patuljaste nove:** brzo i prilično nepravilno ponavljanje (razmak od 10 do 100 dana) slabih eksplozija; $\Delta m = 2$ do 6; još se zovu U-Geminorum-zvijezde i imaju više podgrupa: SU-Ursa Majoris-zvijezde, SS-Cygni-zvijezde i Z-Camelopardalis-zvijezde.
4. **Tranzietne rendgenske promjenljive:** nastaje ako se na mjestu bijelog patuljka nađe neutronska zvijezda ili crna jama; zračenje je isprekidano i intenzivno; zbog visokih temperatura najintenzivnije u rendgenskom području.
5. **Simbiotske zvijezde:** par zvijezda je u simbiozi s međuzvjezdanom tvari.

2.1.6 Supernove

Supernove su relativno rijetke pojave ekstremenog porasta sjaja neke zvijezde. U našoj galaksiji u posljednjih tisuću godina zabilježeno ih je 4: 1054. Rakovica u Biku ($m=-5$), 1572. (Brahe) u Kasiopeji, 1604. (Kepler) u Zmijonoscu, 1667. u Kasiopeji (najsajjniji radio-izvor poslije Sunca). Supernove u drugim galaksijama svojim sjajem znaju zasjeniti cijelu galaksiju! Osim izračene vidljive energije, još desetak puta toliko kinetičke energije odnosi materijal otpuhan u eksploziji, a stotinjak puta toliko odnose neutrini.

Po mehanizmu nastanka, razlikuju se dvije vrste supernova:

1. **SN Ia:** u stvari snažnije nove zvijezde (samo što su obje zvijezde dvojnog sustava bijeli patuljci); energija nastaje u deflagraciji (neeksplozivnom izgaranju) ugljika; starije zvijezde nevelike mase; pripadaju populaciji II (vidi potpoglavlje 2.2.1); brže dostižu maksimum ($M=-18$ do -21); $\Delta m=19$ do 20 ; ukupno izrači 10^{42} J do 10^{44} J; spektar u maksimumu nalikuje spektru superdiva na temperaturi 10000 K; ekspanzija brzinom od 5000 km/s do 20000 km/s; u atmosferi uopće nema vodika; u središtu eksplozije nije uočen nikakav ostatak. Poznati primjeri ovog tipa supernova su Tychova i Keplerova supernova. Ovisno o jakosti jedne silicijeve apsorpcijske linije u spektru, iz spektra možemo reći je li riječ o tipu Ia (linija postoji) ili Ib (ta linija ne postoji) supernove. Supernove tipa Ib i Ic imaju drukčiji način nastanka, bliži supernovama tipa II.

2. **SN II:** ova vrsta supernova su prirodna posljedica razvoja zvijezda velike mase ($6-8 M_{\odot}$). Pri kraju života zvijezde gorenjem željezna jezgra postaje sve veće mase te dostiže granicu Chandrasekhara što vodi na njen kolaps (slobodni pad unutar 1 sekunde!). Dolazi do raspada željeznih jezgara i naglog porasta gustoće, te neutronizacije tvari. Pri tome se razvija udarni val (po završetku stezanja) jer padajuća tvar "odskaka" od jezgre brzinom i do 30000 km/s. Ova vrsta supernove javlja se pretežno u spiralnim galaksijama jer je riječ uglavnom o mladim zvijezdama veoma velike mase vezane uz spiralne krakove (odnosno, oblake u kojima se formiraju zvijezde). U odnosu na tip I, SNII su češće, zrače manje (u maksimumu $M=-17$) a spektar im pokazuje široke emisijske i apsorpcijske linije (atmosfera im je puna vodika). U središtu eksplozije nastaje pulsar, a zračenje stvorene maglice je sinhrotronsko i stotinjak puta jače od tipa I. U vidu energije oslobađa se i do 50% početne mase zvijezde. Poznati primjeri ovog tipa supernova su Rakovica (Crab nebula), SN1987A (Sanduleak).

2.1.7 Ostale neobične zvijezde i kombinacije zvijezda

Pulsari

Pulsar je rotirajuća neutronska zvijezda koja snažno periodički zrači, prvenstveno u radio-području elektromagnetskog spektra. Periodičnost (od $\approx 10^{-3}$ - 0.001 sekunde!) je povezana s rotacijom pulsara i posljedica je tzv. efekta svjetionika (vidi se samo ako je "svjetlost" pulsara usmjerena prema Zemlji). Prvi pulsar su otkrili 1967. godine J.B. Burnell i A. Hewish (Hewish je za ovo otkriće dobio Nobelovu nagradu 1974. godine i tako postao prvi astronom koji ju je dobio); do danas ih je sa sigurnošću identificirano oko 2000. Među njima su i binarni pulsari (preko kojih je potvrđena opća teorija relativnosti i postojanje gravitacijskih valova), milisekundni pulsari, pulsari koji zrače X-zrake ili čak gama-zrake (Vela-pulsar), pulsari oko kojih kruže planeti itd.

Hipernove

Hipernova je ne posve prihvaćen izraz za ekstreman tip supernove kod koje jezgra kolapsirajuće zvijezde direktno postaje crna rupa; pri tome se emitiraju dva vrlo energetska mlaza plazme brzinom bliskom brzini svjetlosti. Iz tih mlazeva emitiraju se vrlo intenzivne gama-zrake kojima se možda mogu objasniti provale gama-zraka koje se redovito uočavaju na nebu, a za sada nisu konzistentno objašnjene (vidi poglavlje 8.4). Takvih zvijezda ogromne mase vrlo je malo, pa su i hipernove

rijetke (dese se svakih nekoliko stotina milijuna godina unutar galaksije). Pretpostavlja se da je Eta Carinae dobar kandidat za hipernovu unutar sljedećih desetak milijuna godina.

Magnetari

Magnetar je neutronska zvijezda ekstremno jakog magnetskog polja ($\approx 10^{11}$ T). Njihovo je postojanje, iako predloženo tek devedesetih godina prošlog stoljeća, danas općeprihvaćeno i identificirano s opaženim objektima poput “mekanih gama-ponavljača” (*engl.* soft gamma repeaters) ili anomalnih pulsera X-zraka.

Ekstremno magnetsko polje koje karakterizira magnetare nastaje pri kolapsu supernove u neutronske zvijezde. Potresi do kojih dolazi u vanjskim slojevima magnetara dovode do provale X- i gama-zraka. Procjenjuje se da 1 od 10 eksplozija supernova rezultira nastankom magnetara, dok kod ostalih nastaje “standardna” neutronska zvijezda. Njihovom nastanku pogoduje ako zvijezda prije eksplozije već ima relativno jako magnetsko polje, a i ako brzo rotira. Magnetar relativno kratko živi kao “mekani gama-ponavljač” (desetak tisuća godina), a također i kao anomalni pulser X-zraka (daljnjih desetak tisuća godina); nakon toga magnetar postaje relativno tih. 2006. godine je otkriveno da neki magnetari jako zrače i u radio-području; to je povezano s pomicanjem magnetskog polja.

Kolapsari

Kolapsar je (za sada hipotetička) masivna ($> 30 M_{\odot}$) brzo-rotirajuća Wolf-Rayetova zvijezda koja se urušava u veliku crnu jamu uvlačući pri tome okolni zvjezdani materijal relativističkim brzinama. Vjeruje se da su kolapsari izvori dugih ($> 2s$) gama-provala. Mogući primjer ove vrste zvijezda je Sn1998bw koja je povezana s gama-provalom GRB980425. Ova supernova je klasificirana kao tip Ic jer je imala vrlo neobičan radio-spektar koje je možda potpis postojanja relativistički brze materije.

Strane zvijezde

Strana, čudna ili kvarkovska zvijezda je hipotetička vrsta zvijezda izgrađenih ne od nuklearne (tj. protonske i neutronske), već direktno od kvarkovske materije. Riječ je o ultra-gustoj fazi materije za koju se teoretizira da postoji unutar posebnih vrlo masivnih zvijezda; očekuje se da bi takve zvijezde bile građene od u -, d - i s -kvarkova. Po masi i gustoći, strane zvijezde nalaze se između neutronske zvijezde i crne jama. Iako se raspravljalo o više mogućih kandidata za ovu vrstu zvijezda, opće prihvaćena identifikacija s opaženim objektima još ne postoji.

2.2 Grupiranje zvijezda

2.2.1 Zvezdane populacije

Standardno je prihvaćena podjela zvijezda s obzirom na njihov položaj u galaksiji, starost i druga svojstva (Baade; 1944.):

1. **Ekstremna populacija I:** mlade zvijezde, uz galaktičku ravninu; sjajne zvijezde spektralnih razreda O i B, otvoreni skupovi, δ -cefeide, oblaci neutralnog i ioniziranog vodika, međuzvezdani prah i spiralni rukavi.
2. **Starija populacija I:** zvijezde spektralnih razreda A do F, obični divovi, zvijezde atmosfere kojih pokazuju jake spektralne linije metala.
3. **Međupopulacija:** sjajni crveni divovi, nove zvijezde, planetarne maglice, bijeli patuljci i dugoperiodne promjenljive zvijezde.
4. **Populacija II:** stare zvijezde, halo (i korona) galaksije; zvijezde kuglastih skupova, RR Lire, sjajni crveni divovi i subpatuljci; vrlo brze zvijezde; atmosfere tih zvijezda sadrže 10 do 100 puta manje metala nego zvijezde populacije I; uglavnom stare crvene zvijezde glavnog niza (malenog

sjaja) ili stari crveni divovi.

5. **Populacija III:** za sada hipotetičke zvijezde još starije od zvijezda populacije II; to bi trebale biti zvijezde nultog metaliciteta, ekstremnih veličina (masa i do tisuću puta većih od Sunčeve); njihov je život bio svega par milijuna godina i pri eksploziji oslobađale su ogromne količine željeza i samo malo ugljika.

2.2.2 Skupovi zvijezda

1. **Otvoreni (galaktički) skupovi:** rastresit izgled; 10 do 1000 zvijezda; u blizini galaktičke ravnine (uz spiralne rukave i galaktički disk); veličine od 5 gs do 50 gs; koncentracije od 0.25 do 80 zvijezda po pc^3 ; primjeri su Plejade i Hijade.

2. **Kuglasti (globularni) skupovi:** sferni oblik; zvijezde jako koncentrirane prema središtu (50 zvijezda po pc^3); ukupno 10^4 do 10^6 zvijezda; veličine od 50 gs do 600 gs; pripadaju halou galaksije; nema međuzvjezdane materijale; nedostaju modri divovi, a i grana crvenih divova je ograničena i ne nastavlja se u području crvenih superdivova; posebnost je i horizontalna grana u HR dijagramu; velik broj subpatuljaka; najsjajniji kuglasti skup na nebu je ω Centauri star 12 milijardi godina.

2.2.3 Zvezdane asocijacije

Zvezdane asocijacije su velike grupe zvijezda koje su netom nastale u spiralnim krakovima Galaksije; odgovaraju vrlo velikom otvorenom skupu zvijezda.

a) **OB asocijacije:** zvjezdane asocijacije koje se sastoje uglavnom od vrućih, sjajnih i masivnih zvijezda spektralnih tipova O i B.

b) **T asocijacije:** asocijacije koje se sastoje od mnogo T Tauri zvijezda male mase.

2.2.4 H-područja

HI-područja su maglice koje se sastoje od hladnog (100 K) vodika i emitiraju samo radiovalove; problem detekcije hladnog međuzvjezdane vodika je riješen uviđanjem da isti emitira i apsorbira svjetlost valne duljine 21cm (koja odgovara prijelazu između paralelnog i antiparalelnog stanja sistema elektron-proton).

HII-područja su vrlo sjajni i vrući (10000 K) oblaci ioniziranog plina (uglavnom vodika) koji su sjajniji u vidljivom području od najsjajnijih zvijezda pa mogu biti viđena i u vrlo udaljenim galaksijama (i to ne kao točkasti izvori); ionizacija je uzrokovana intenzivnim UV zračenjem mladih O i B zvijezda unutar oblaka [primjer: Orionova maglica].

2.3 Galaksije

Galaksija je veliki, gravitacijski vezan sistem zvijezda, međuzvjezdane plina i prašine, te po svemu sudeći tamne materije. Tipično galaksije sadrže 10^7 do 10^{12} zvijezda koje mogu biti grupirane u manje podsisteme. Veličina galaksije varira od nekoliko tisuća do nekoliko stotina tisuća svjetlosnih godina; udaljenost među galaksijama tipično se mjeri u milijunima svjetlosnih godina. Snaga vidljivog zračenja većih galaksija je oko 10^{37} W, dok u radio-području tipično zrače 10^{31} W (osim aktivnih galaksija, vidi nastavak teksta).

2.3.1 Klasifikacija galaksija

Galaksije se standardno klasificiraju na način koji su predložili E. Hubble, G. de Vaucouleurs, W.W. Morgan i S. van den Bergh. U nastavku su postoci dani za uzorak bližeg svemira (do $z=13$) ne računajući patuljaste galaksije.

1. **Eliptičke galaksije:** 14% galaksija; vrlo sjajne (do $M=-21.5$); oblika spljoštenog sferoida; numeracija (E0-E7) s $n=10(a-b)/a$; nema nehomogenosti; nema vidljive međuzvjezdane tvari (pa nema mladih zvijezda); ne pokazuju zamjetljivu vrtnju; u spektru se ističu G i K razred; boja je

crvenkasta, a spektar pokazuje manjak metala; svojstvene su joj stare zvijezde, crveni divovi, koji pripadaju populaciji II; supernove su tipa I; najveći omjer između mase i sjaja; najveće gustoće i najveće mase (vidljiva oko $10^{13} M_{\odot}$); vrlo velike (oznaka: D) imaju radijus 20 kpc, a patuljaste 1 do 2 kpc i masu od $10^6 M_{\odot}$; nisu u stanju kontrakcije, već su to stabilne tvorevine; danas se u eliptičkim galaksijama može formirati toliko zvijezda koliko materijala njihove stare zvijezde izbace; neke eliptičke galaksije su troaksijalne. Primjeri takvih galaksija su NGC221 (M32) i NGC204 (pratioci Andromede).

2. **Spiralne galaksije:** 62% galaksija; petina su poluzne ili barirane; najčešće dva kraka; neke imaju prsten (oznaka: "r"), neke ne ("s"); daljnje oznake: "a"- najveća ispupčenja i najzavijeniji krakovi, "b"- manje, "c"-najmanje vidljivo središte i slabo navijeni krakovi; brzo rotiraju; količina međuzvezdane tvari je 1% do 15%; bogate mladim, modrim i sjajnim zvijezdama (koncentriranim u krakovima) spektra F i G razreda; radijus 20 kpc; sjaj do $M=-21$; masa od 10^{10} do $10^{12} M_{\odot}$. Primjeri takvih galaksija su Andromeda (M31) i naša Galaksija (Mliječni put).

3. **Lentikularne galaksije:** ili lećaste; oznaka: S0; 9% galaksija; imaju debeli zvjezdani disk, no bez međuzvezdanog plina; katkada se u njih opaža prsten; po obliku su slične eliptičnim, a po rasporedu sjaja spiralnim galaksijama.

4. **Neppravilne galaksije:** 3% galaksija; nemaju ni središnjeg zgušnjavanja, ni simetrije; mase od 10^8 do $10^{10} M_{\odot}$; sjaj slab; veliki sadržaj međuzvezdane tvari (30% do 50% vidljive materije); na boju utječu mlade, sjajne i modre zvijezde pa je spektar od A do F razreda; dijele se na tip I (pravilnosti u rasporedu mase, ali ne i sjaja) i tip II (nema pravilnosti ni u rasporedu mase). Primjeri takvih galaksija su Veliki i Mali Mageljanov oblak (obje tip I).

5. **Patuljaste galaksije:** dijelom eliptičke (dE), dijelom nepravilne (dIr); sjaj im je manji od $M=-16$; oblikom su nalik na otvorene skupove zvijezda (samo imaju veće dimenzije, a manji sjaj).

2.3.2 Aktivne galaksije

Aktivno je 1% do 5% galaksija. Znaci aktivnosti su: istjecanje plina iz galaktičke jezgre, mlazovi tvari i eksplozije, a spektar elektromagnetskog zračenja nije spektar crnog tijela (zračenje je uglavnom sinhrotronsko).

1. **Seyfertove galaksije:** poznato ih je oko 200 (1% obližnjih galaksija); veoma sjajno, modrikasto i gusto središte; slaba spiralna građa; izbačaji plina iz središta brzinom 5000 km/s do 8000 km/s; emisijske linije jake i široke; višak zračenja u ultraljubičastom i infracrvenom.

2. **Radio-galaksije:** energija izračena u području radio valova nadmašuje onu u vidljivom dijelu spektra; jezgra je modrikasta, a magličasti ovoj crvenkast; optički sjaj do $M=-24$; spektar s vrlo jakim emisijskim linijama; jezgre su na višoj temperaturi, većih dimenzija i gustoće nego jezgre Seyfertovih galaksija; radio-izvor (ionizirani plin koji zrači sinhrotronskim mehanizmom) je simetričan s obzirom na optički izvor; energija radio zračenja dostiže 10^{54} J; najsnažniji radio izvori su neobične divovske eliptičke galaksije. Primjeri takvih galaksija su Djevica-A (M87), Labud-A, Kentaur-A.

3. **N-galaksije:** veoma izražena jezgra; jaki izvori radio valova; jezgra je modrikasta, a magličasti ovoj crvenkast; optički sjaj do $M=-24$.

4. **Modre kompaktne galaksije:** vrlo modre galaksije; nešto slabiji izvori radio-valova od N-galaksija.

5. **Lacertide:** zrače najvećom snagom; linije u spektru slabe; sastoje se od veoma svijetle jezgre i veoma slabog ovoja; svojstva im kontinuirano prelaze u svojstva kvazara. Primjer ovakve galaksije je BL Gušterice. Zadnjih par desetljeća se za ovakve i slične galaksije upotrebljava izraz **blazar**.

6. **Kvazari:** kvazi-stelarni objekti (QSO); imaju točkaste jezgre iz kojih se širi jedan ili više mlazeva na koje se nadovezuju pobočni radio-izvori (90% ukupnog zračenja); primjećuju se zgušnjavanja koja se šire superluminalnim brzinama; intenzitet radio-zračenja im je 10^{38} W; prosječni kvazar ima $M=-26$, a u trenutku pojačanog sjaja i do $M=-31$; spektar je modričast; kontinuiran s linijama MgII,

CIV; velika širina linija ukazuje na velike brzine gibanja plina (do 10000 km/s); gomilaju se na udaljenostima $z=0.4$ do $z=2.5$ (najdalji poznati je na $z=6.4$); objekti su uglavnom osamljeni; energetska izdašnost odgovara pojavi 100 supernova godišnje; samo manji broj kvazara zrači radio-valove.

2.3.3 Mliječni put

Mliječni put je spiralna galaksija koja sadrži Sunčev sustav (koji se nalazi unutar galaktičke ravnine, u jednom od spiralnih krakova). Ime joj je doslovan prijevod s latinskog "Via Lactea", što je pak izvedeno od grčkog "Galaxias". Centar galaksije je u smjeru Strijelca.

Glavni disk Mliječnog puta ima promjer od $80-100 \times 10^3$ godina svjetlosti i debel je oko 1000 godina svjetlosti. Sastoji se od 200 do 400 milijardi zvijezda. Halo galaksije proteže se na $250-400 \times 10^3$ godina svjetlosti.

Lokalna grupa galaksija kojoj pripada i Mliječni put sadrži nekakvih 35 bliskih galaksija.

2.4 Skupovi galaksija

Razlikujemo tvorene (nepravilne) i sferne (pravilne) skupove galaksije. Nadalje, po broju galaksija koje sadrže, razlikujemo sljedeće skupove galaksije:

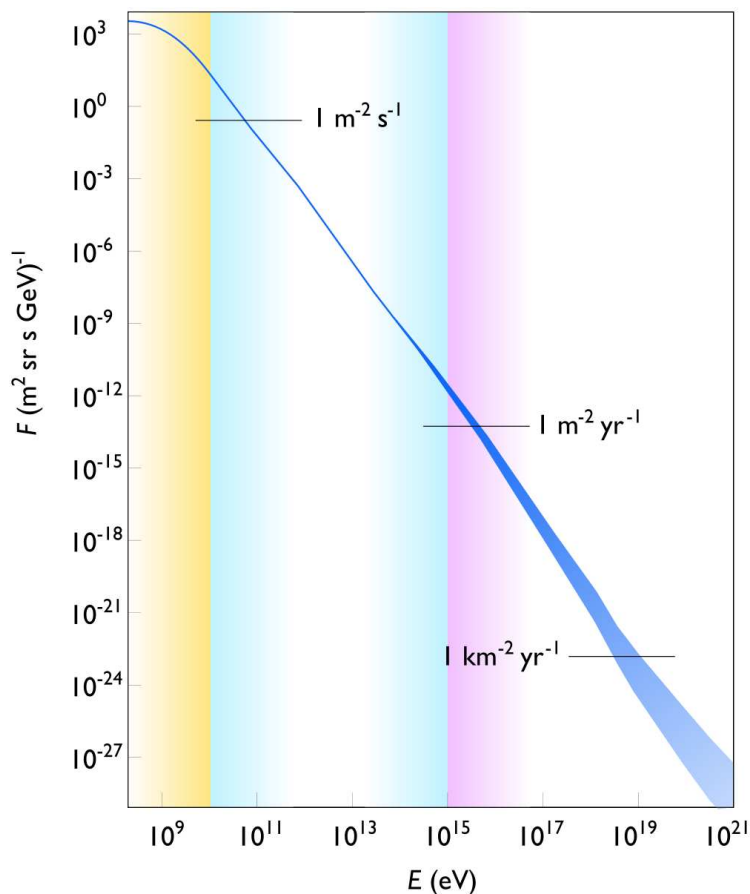
1. **Parovi**
2. **Tripleti**
3. **Grupe s manje od deset članova**
4. **Siromašni skupovi:** 10 do 100 članova
5. **Bogati skupovi:** tisuće članova
6. **Superskupovi:** desetak i više skupova, od toga jedan do dva bogata skupa te nekoliko tuceta manjih skupova; tipična veličina je 30 do 90 Mpc

2.5 Kozmičke zrake

Kozmičko zračenje čine visokoenergijske nabijene čestice (brzine bliske brzini svjetlosti) koje na Zemlju stižu s raznih svemirskih objekata (npr. Sunca, aktivnih galaktičkih jezgara ili supernova) iz svih smjerova. *Primarno* kozmičko zračenje uključuje elektrone ($< 1\%$), protone ($\approx 90\%$), helijeve jezgre ($\approx 10\%$), jezgre ugljika, kisika i praktički svih ostalih stabilnih izotopa. Zastupljenost pojedinih čestica u kozmičkom zračenju, kao i njihova energijska ovisnost, korisni su izvori informacija o njihovom izvoru. Interakcijom primarnog kozmičkog zračenja s atmosferom stvara se pljusak sekundarnih čestica (elektrona, miona, piona, hiperona), tzv. *sekundarno* kozmičko zračenje. Na površini Zemlje mogu se stoga detektirati i čestice koje ne postoje u primarnom zračenju (npr. mioni). Prosječan tok sekundarnih nabijenih čestica na površini Zemlje je $\approx 180 \text{ s}^{-1}\text{m}^{-2}$. Proučavanjem kozmičkih zraka moguće je indirektno dobiti informacije i o međuzvezdanom i međugalaktičkom materijalu koji na njih utječe na putu od izvora do Zemlje.

2.5.1 Povijest istraživanja kozmičkih zraka

Kozmičke zrake otkrivene su 1912. godine; otkrio ih je V. Hess balonom na visini od 4 km (Hess je za to otkriće dobio Nobelovu nagradu 1936. godine). 1932. godine je među česticama u kozmičkom zračenju otkriven pozitron (Anderson, Nobelova nagrada 1936. godine). 1937. godine otkriven je mion, a 1947. godine pion (Powell, Nobelova nagrada 1950. godine). Pljuske čestica u atmosferi izazvane upadom kozmičkih zraka otkrio je 1938. godine Auger; početak pljuska je u srednjim slojevima atmosfere, prosječno na visini 15 do 20 km.



Slika 2.2: Energijski spektar kozmičkih zraka.

2.5.2 Svojstva kozmičkih zraka

Energija čestica u kozmičkom zračenju kreće se od par GeV-a do 10^{20} eV (10 Joula!!). Ovisnost broja čestica o energiji je logaritamska: $\Phi \sim E^{-2.7}$. Zbog toga je jedini način za opažanje primarnih kozmičkih zraka najviših energija detektiranje atmosferskog pljuska kojeg one proizvode (npr. satelitu s detekcijskom površinom od 1 m^2 trebalo bi godinu dana za detekciju čestice od 10^{16} eV, odnosno milion godina za detekciju čestice od 10^{19} eV). Osim sekundarnih nabijenih čestica koje dolaze do površine Zemlje (energija >10 TeV koje se tipično detektiraju u nizovima scintilatora), može se detektirati i Čerenkovljeva svjetlost (tipičnih energija 100 GeV do 10 TeV) ili fluorescentna svjetlost. Primjer modernog opservatorija visokoenergetskih kozmičkih zraka je detektor Pierre Auger u Argentini (vidi str. 9).

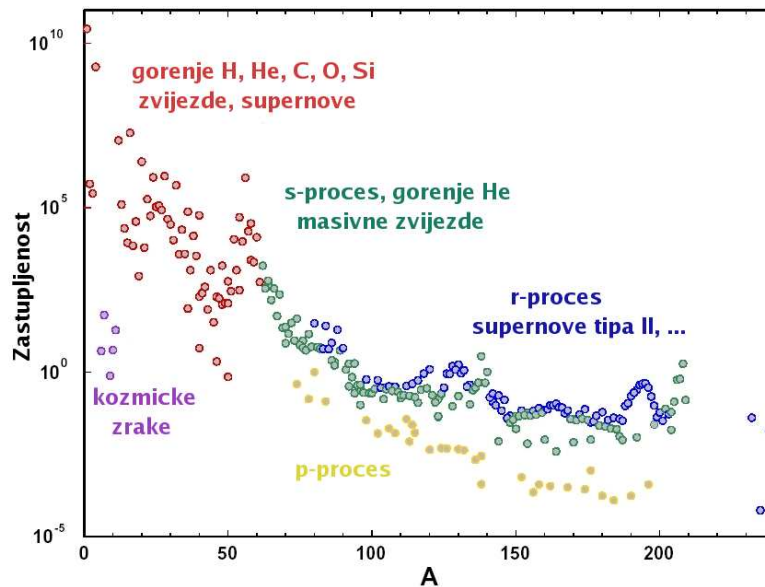
Donedavno se smatralo da su izvori zračenja u Svemiru uglavnom termalni; kozmičko zračenje je najočitija manifestacija netermalnih, ekstremnih procesa neke nove vrste. Kozmički protoni i elektroni s energijama od keV-a do MeV-a, a koji dolaze sa Sunca, zbog niske energije bivaju skrenuti zemaljskim magnetskim poljem.

Posebno su zanimljivi mioni: njihovo vrijeme života je $2.2 \mu\text{s}$ i da nema relativističke dilatacije ne bi smjeli doći do površine Zemlje (jer bi prevalili svega $\approx 600\text{-}700$ m). No, ipak ih detektiramo, što je direktna potvrda da im je zbog Einsteinove teorije relativnosti vrijeme života produženo za faktor 10-20 (visina atmosfere je dvadesetak kilometra).

Zanimljivo je da mioni u sudaru s dušikom stvaraju ^{14}C , koji udišu živa bića i čiji udio se počne smanjivati smrću - to je princip datiranja starosti organskih uzoraka pomoću ^{14}C (vidi poglavlje 9).

2.6 Kemijski sastav materijala u svemiru

Slično kao i zvijezde, međuzvjezdani (i međugalaktički) materijal u raznim dijelovima svemira pokazuje vrlo različita svojstva. Njegov se kemijski sastav određuje na razne načine i njegovo je precizno poznavanje vrlo važno za astrofizičke modele. Npr. jedan od temeljnih argumenata u prilog danas standardno prihvaćene teorije Velikog Praska (*engl.* Big Bang) je “prvobitni” kemijski sastav svemira, tj. njegov sastav prije formiranja prvih zvijezda. Proučavanjem “starih” objekata i dijelova svemira zaključeno je da se nakon prvih par minuta vidljiva materija u svemiru sastojala od $\approx 75\%$ masenog udjela vodika i $\approx 25\%$ helija, a te brojke je nemoguće reproducirati drugim modelima evolucije svemira, a ni kasnijim nuklearnim gorenjem vodika u zvijezdama.



Slika 2.3: Zastupljenost izotopa u Sunčevom sustavu (i oko njega). Različitim bojama označeni su različiti načini nukleosinteze pojedinih izotopa, a navedeno je i mjesto njihovog nastanka.

Za shvaćanje procesa u svemiru iznimno je važno i točno poznavanje udjela ostalih elemenata u njegovom kemijskom sastavu. Npr. na temelju izmjerene količine deuterona (deuteron je izotop vodika koji uz proton sadrži neutron) i izotopa litija stvorenih u ranom svemiru, moguće je relativno precizno odrediti niz parametara bitnih za standardni kozmološki model (vidi poglavlje 5.2). Nadalje, količina težih elemenata u nekom dijelu svemira direktno je povezana s brojem i vrstom supernova u tom području od početka svemira do danas. Vjeruje se da je supernova u našem bliskom susjedstvu inicirala nastanak Sunčevog sustava prije ≈ 5 milijardi godina i proizvela sve elemente teže od helija bez kojih ne bi bilo ni života na Zemlji...

Kemijski sastav unutar Sunčevog sistema određen je kombiniranjem različitih mjerenja (za detalje vidjeti npr. [Arnett 96]), no najvažnija su:

- 1) mjerenja zastupljenosti izotopa u Sunčevoj fotosferi spektralnom analizom;
- 2) proučavanjem sastava kondritičnih meteora bogatih ugljikom (za koje se vjeruje da sadrže materijal kakav je postojao u vrijeme nastanka Sunčevog sistema).

Unutar i u blizini našeg Sunčevog sistema, kemijski je sastav dan kao na slici 2.3. Mogu se uočiti slijedeće zanimljive činjenice (za više detalja vidi [Pagel 97]):

1. Jezgre vodika i helija su daleko najbrojnije i čine 96-99% ukupne mase barionske materije svemira. Vodik i helij su uglavnom nastali u ranom svemiru. Elementi teži od helija (koje

astronomi jednim imenom nazivaju “metali”!) čine najviše 3-4% ukupne mase. Treba uočiti da skala na slici 2.3 pokriva najmanje 12 redova veličine.

2. Izotopi poput ${}^6,7\text{Li}$, ${}^9,10\text{Be}$ i ${}^{10,11}\text{B}$ prisutni su puno manje od ostalih lakih ($A < 20$) stabilnih izotopa (za moderna istraživanja ove još ne posve objašnjene pojave pogledati posljednje poglavlje). Količina litija je određena mjerenjima sastava meteora - u Suncu je njegova zastupljenost još manja zbog laganog razbijanja. S druge strane, relativni udio litija puno je veći u primarnim kozmičkim zrakama (zbog reakcija razbijanja CNO-jezgri protonima i α -česticama). Manja količina ${}^7\text{Li}$ (oko 10%) proizvedena je u ranom svemiru.
3. Iako su i deuteroni vrlo slabo vezani, njih je u današnjem (nama bliskom) svemiru puno više nego litija, berilija ili bora - ima ih usporedivo sa silicijem ili sumporom. Sav deuterij u vidljivom svemiru nastao je još unutar prvih par minuta nakon Velikog praska, a u zvijezdama se samo razbija.
4. Istaknuti vrhovi u spektru zastupljenosti mogu se vidjeti i na tzv. $4N$ -jezgrama, tj. jezgrama s jednakim parnim brojem protona i neutrona: ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{20}\text{Ne}$, ... - ovo je posljedica i povećane stabilnosti tih jezgara, ali prvenstveno načina na koji se odigrava nukleosinteza pri mirnom gorenju u zvijezdama.
5. Istaknuti vrh u spektru zastupljenosti može se vidjeti i u području oko željeza; to je direktna posljedica činjenice da je željezo najjače vezana jezgra.
6. Opći trend zastupljenosti izotopa od lakih elemenata do željeza je eksponencijalni pad; kasnije će biti objašnjeno da se to može povezati s činjenicom da vjerojatnost tuneliranja nabijene čestice kroz kulonsku barijeru isto pada eksponencijalno (dakle, sinteza elemenata do željeza uglavnom se odvija reakcijama među nabijenim česticama). Primjećuje se i utjecaj punih ljusaka.
7. Elementi teži od željeza pokazuju skoro konstantnu zastupljenost (dakle, njihova sinteza nije se odvijala preko reakcija izazvanih nabijenim česticama, već preko reakcija izazvanih neutronima!).
8. Izraženi vrhovi mogu se uočiti i u području elemenata težih od željeza i odgovaraju elementima čiji je broj neutrona (i protona) magičan.

Dakako, odstupanja od takve zastupljenosti elemenata postoje za različita područja svemira, no trend je posvuda više-manje isti. Objekti koji pokazuju bitno drukčiji sastav od prosječnog su ekstremno zanimljivi jer ukazuju na to da je određeni način nukleosinteze prevagnuo nad drugima - proučavanje takvih objekata nudi dragocjene testove postojećih teorija i mogućnost postavljanja boljih. Jedan takav objekt je nedavno otkrivena [Caffau 11] zvijezda u kojoj je količina elemenata težih od helija otprilike 20000 puta manja nego u Suncu! Udio litija u toj zvijezdi je toliko malen da ga se čak ne može ni odrediti (a zasigurno je najmanje 50 puta manji od količine litija stvorene u prvobitnoj nukleosintezi). Zbog danas intenzivnih istraživanja ovakvih zvijezda “ekstremno siromašnih metalima” (*engl.* extremely metal poor, EMP), kao i drugih neobičnih objekata, u bliskoj budućnosti mogu se očekivati bitne nove spoznaje o kemijskom sastavu i evoluciji Svemira.