

NUKLEARNE REAKCIJE U ZVIJEZDAMA I RANOM SVEMIRU

Matko Milin¹

Institut “Ruđer Bošković”, Zagreb

1 Uvod

Nuklearna astrofizika, tj. fizika nuklearnih procesa u svemiru, dio je znanosti u kojem se uspješno spajaju dva naizgled suprotna ekstrema svemira: njegovi ponajmanji objekti (atomske jezgre) s najvećima (zvijezdama, galaksijama i svemirom u cjelini). Nastala je već u ranim danima nuklearne fizike kada je uočeno da jedino nuklearne reakcije mogu objasniti golemu energiju koja se oslobađa na Suncu i u drugim zvijezdama (Bethe, 1938.). Danas je, unatoč dugogodišnjem intenzivnom razvoju, ona najživlji dio nuklearne fizike, još uvijek prepun iznenađenja i novih otkrića.

Glavni cilj nuklearne astrofizike jest razumjeti način na koji nastaju (i nestaju) izotopi i energija u zvijezdama i općenito u svemiru. Osnovni principi većine procesa odavno su poznati. No, velik broj bitnih detalja izmiče shvaćanju već jako dugo i stoga se ulažu velika sredstva za njihovo eksperimentalno proučavanje. Eksperimentalna nuklearna astrofizika uključuje laboratorijska mjerenja reakcija od astrofizičkog značaja. Zadnje desetljeće donijelo je velike pomake na mnogim područjima. Ogroman tehnički napredak (i u promatranjima i u eksperimentima) i sofisticiranije računske metode dovele su do mnogih važnih otkrića.

Za nuklearnog i čestičnog fizičara svemir predstavlja i najveći mogući ubrzivač čestica i kao takav pruža mogućnost indirektnog proučavanja procesa koji se nikad neće moći izazvati pomoću zemaljskih ubrzivača. Veza između nuklearne fizike i astrofizike je stoga dvosmjerna; ta se dva područja intenzivno isprepleću i potpuno razumijevanje jednoga od njih nemoguće je bez značajnog doprinosa drugoga...

1.1 Nuklearna astrofizika: astrofizički unos

Astrofizika je specifičan dio fizike jer je najveći dio spoznaja unutar nje dobiven jednostavnim *promatranjem*. Najveći dio svemira posve nam je nedostupan za bilo kakav drugi način istraživanja, a dakako, s astrofizičkim objektima (galaksijama, zvijezdama, planetima, ...) nemoguće je obavljati eksperimente. Posao je astrofizičara zato da iz podataka koji se dobivaju promatranjem rekonstruira procese koji se u pojedinim dijelovima i fazama svemira odigravaju. Dakako, najvažniji unos u svaki astrofizički model jesu dobri rezultati opažanja i njihova elementarna interpretacija.

1.1.1 Zvijezde i njihova svojstva

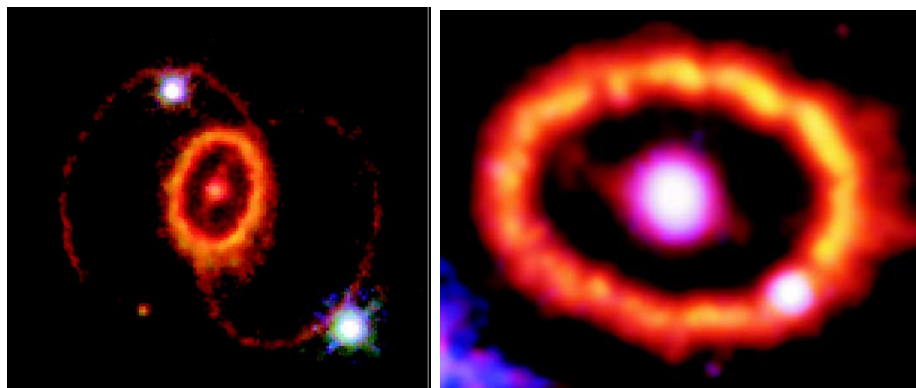
Definirati pojam “zvijezda” nije posve jednostavno. Približno je točno reći da su zvijezde vruće svijetleće kugle plina koje nastaju u nebulama (“maglicama”) i u kojima se

¹mmilin@lnr.irb.hr

energija oslobađa nuklearnim reakcijama. Svojstva zvijezda variraju unutar vrlo širokog opsega: polumjer im može biti i ≈ 500 puta manji od Sunčeva, ali i ≈ 1000 puta veći. Masa im je između $1/20$ i 50 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 spomenutog 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 zvijezdama i oko njih.

Energija koju zvijezde zrače stvara se u njihovu središtu nuklearnim reakcijama. Evolucija svake zvijezde ponajprije ovisi o tim reakcijama te načinu i brzini trošenja nuklearnoga 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 njezine površine, mora kao izlaz dobiti veličine koje su zabilježene astronomskim promatranjem. Također, model mora opisati promjenu zvijezde u vremenu, od njezina 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 teža od Sunca) više nije u stanju nuklearnim reakcijama držati u ravnoteži gravitacijsku silu sažimanja. 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.



Slika 1: Supernova SN1987A slikana Hubbleovim teleskopom 1994. i 1998. godine.

1.1.2 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 prihvaćenoj teoriji 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.

Za shvaćanje procesa u svemiru iznimno je važno i točno poznavanje udjela ostalih elemenata u njegovu kemijskom sastavu. Npr., na temelju izmjerene količine deuterona (deuteron je izotop vodika koji uz proton sadržava neutron) i izotopa litija stvorenih u ranom svemiru, moguće je relativno precizno odrediti niz parametara bitnih za standardni kozmološki model. Nadalje, količina težih elemenata u nekom dijelu svemira direktno je povezana s brojem i vrstom supernova u tom području od početka svemira do danas. Tako se za naš lokalni dio svemira procjenjuje da je prošao kroz jednu zvjezdanu evoluciju od zvjezdane prašine do supernove. Štoviše, vjeruje se da je supernova u našem bliskom susjedstvu inicirala nastanak Sunčeva sustava prije ≈ 5 milijardi godina i proizvela sve elemente teže od helija bez kojih ne bi bilo života na Zemlji...

1.1.3 Kozmičke zrake

Kozmičko zračenje čine visokoenergijske nabijene čestice koje na Zemlju stižu s raznih svemirskih objekata (npr. Sunca, aktivnih galaktičkih jezgara ili supernova). Ono uključuje elektrone, protone, helijeve jezgre, 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 kozmičkog zračenja s atmosferom njegov se sastav bitno mijenja i na površini Zemlje se detektiraju i čestice koje ne postoje u primarnom zračenju (npr. mioni). Proučavanjem kozmičkih zraka moguće je indirektno dobiti informacije i o međuzvjezdanom i međugalaktičkom materijalu koji na njih utječe na putu od izvora do Zemlje.

1.2 Nuklearna astrofizika: unos nuklearne fizike

Da bi se u potpunosti razumjeli nuklearni procesi u svemiru, potrebno je, praktički, sve znanje iz nuklearne fizike. Dakako, neki su procesi i jezgre više bitni, a neki manje i zbog toga se o pojedinim dijelovima nuklearne fizike govori kao o “astrofizičkim”. Istraživanja tih dijelova nuklearne fizike posebno su se intenzivirala u zadnjih desetak godina.

1.2.1 Svojstva jezgara

Atomi se sastoje od jezgre i elektronskog omotača. Same jezgre su pozitivno nabijene i sastoje se od protona i neutrona povezanih jakom nuklearnom silom, najjačom od 4 osnovne sile (a to su: slaba i jaka nuklearna, te gravitacijska i elektromagnetska sila). Vrlo bitno svojstvo nuklearne sile je njezin vrlo kratak doseg: ona djeluje samo među protonima i neutronima (zajedničkim imenom: “nukleonima”) koji su udaljene manje od nekoliko femtometara ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$). To direktno utječe na veličinu i oblik atomskih jezgara: velika većina jezgara zbog toga je kuglasta oblika, a najteže stabilne jezgre

imaju tek nešto više od ukupno 200 nukleona. Uz jaku, stabilnost jezgre određuje i slaba nuklearna sila (ona uzrokuje tzv. β -raspade koji su općenito sporiji od čestičnih).

U prirodi se može naći ≈ 250 stabilnih (ili vrlo dugo živućih) izotopa. Još je par tisuća izotopa β -nestabilno s vremenom poluživota dovoljno dugim da odigraju važnu ulogu u brznoj, eksplozivnoj nukleosintezi. Čak su i neke jezgre (^8Be) čije je vrijeme poluživota svega $\approx 10^{-16}$ s važne u astrofizičkim procesima! Dakle, za opis astrofizičkih procesa potrebno je uistinu veliko poznavanje nuklearne fizike.

1.2.2 Svojstva nuklearnih reakcija

Nuklearna reakcija je proces u kojem se dvije jezgre dovoljno približe da među njima djeluje nuklearna sila. Svaka se od jezgara u tom procesu može, ali i ne mora promijeniti, ovisno o mehanizmima same reakcije koji znaju biti vrlo različiti. Na neki se način u reakcijama postiže efekt za kojim su težili srednjovjekovni alkemičari: jedni elementi se pretvaraju u druge. Alkemičari su samo imali krivo što se tiče temperature: umjesto temperatura od 200 do 300 °C koje su oni koristili u pećima, potrebne su temperature od ≈ 15 milijuna °C, kao npr. u središtu Sunca.

Nuklearna fuzija je vrsta reakcije kod koje se dvije jezgre spajaju i tvore treću, težu. Principi nuklearne fuzije već su desetljećima dobro poznati i ona se među raznim jezgrama danas standardno izaziva i proučava u stotinama laboratorija diljem svijeta, i to zbog temeljnih istraživanja u nuklearnoj fizici, istraživanja povezanih s astrofizikom, a već se neko vrijeme ispituje i mogućnost ostvarivanja komercijalno isplative fuzije.

Sve jezgre su električno pozitivno nabijene pa se prije nuklearne reakcije odbijaju relativno jakom kulonskom silom. Da bi se jezgre uopće našle na dovoljno malenoj udaljenosti na kojoj nuklearna reakcija postaje moguća, moraju imati dovoljno veliku kinetičku energiju kojom će svladati tu “kulonsku barijeru”. To se u zvijezdama događa zahvaljujući visokim temperaturama; zbog toga se govori o “termonuklearnoj fuziji” (u pitanju su temperature od stotine milijuna °C).

Ako je ukupna masa jezgara prije reakcije veća nego nakon nje, u tom se procesu oslobađa energija koja se može izračunati prema čuvenoj Einsteinovoj formuli: $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$. Npr., reakcijom $^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + n$ oslobađa se i energija od 17.59 MeV (**MeV** je standardna jedinica za energiju u nuklearnoj fizici, a jednaka je 1.6×10^{-13} J). Oslobodena energija pomaže u održavanju visokih temperatura nužnih za reakcije.

2 Odabrani nuklearni procesi u svemiru

Kombinirajući spomenuta znanja o astronomskim fenomenima s rezultatima nuklearne fizike, moguće je rekonstruirati tijek mnogih astrofizičkih procesa. Oni se zbivaju u raznim dijelovima svemira, i u zvijezdama i izvan njih, a ovdje će biti izdvojeni samo neki, najzanimljiviji procesi.

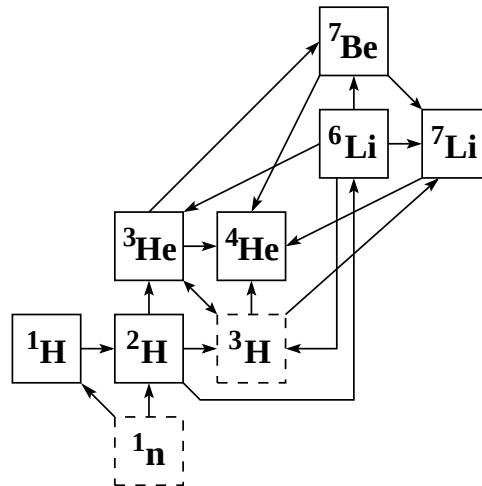
2.1 Nuklearne reakcije u ranom svemiru

U vrlo ranoj fazi (do trenutka $t = 0.01$ s poslije velikog praska, što odgovara temperaturi od oko $T = 10^{11}$ °C) svemirom dominira zračenje. Hlađenjem, zbog širenja svemira, slabe nuklearne interakcije postaju zanemarive, pa protoni i neutroni ispadaju

iz statističke ravnoteže ($t=1$ s, $T \approx 10^{10}$ °C), i broj se neutrona (zbog njihova β -raspada) od tog časa smanjuje u odnosu na broj protona. Temperature su još uvijek previsoke da bi postojale nezanemarive količine bilo koje jezgre teže od protona, odnosno neutrona. Nukleosinteza počinje reakcijom:



(s n je označen neutron, s p proton, s d deuteron, a s γ foton). Na dovoljno visokim temperaturama, deuteron nastao ovom reakcijom praktički se momentalno razbija fotonima. Tome pogoduje i mala energija vezanja deuteronu (2.225 MeV) i velik broj fotona (na svaki nukleon otpada $\approx 10^9$ fotona). Opstanak deuteronu postaje moguć na temperaturi $T \approx 10^8$ °C što odgovara starosti svemira od $t=200$ s. Jednom kada je stvoren deuteron, moguće je i stvaranje težih jezgara (koje imaju veću energiju vezanja) reakcijama shematski prikazanim na slici 2. Praktički svi neutroni na kraju prvobitne nukleosinteze završavaju zarobljeni u jezgrama helija. Nepostojanje stabilnih izotopa s brojem nukleona $A=5$ i $A=8$, kao i sve veći utjecaj kulonske barijere i smanjivanje gustoće nukleona, sprječava nastanak bitnijih količina izotopa težih od $A=4$. Takve jezgre nastaju kasnije u zvijezdama.



Slika 2: Reakcije bitne za standardni model prvobitne nukleosinteze. Jezgre nestabilne na β -raspad označene su iscrtkanim kvadratićima.

2.2 Nuklearne reakcije u zvijezdama

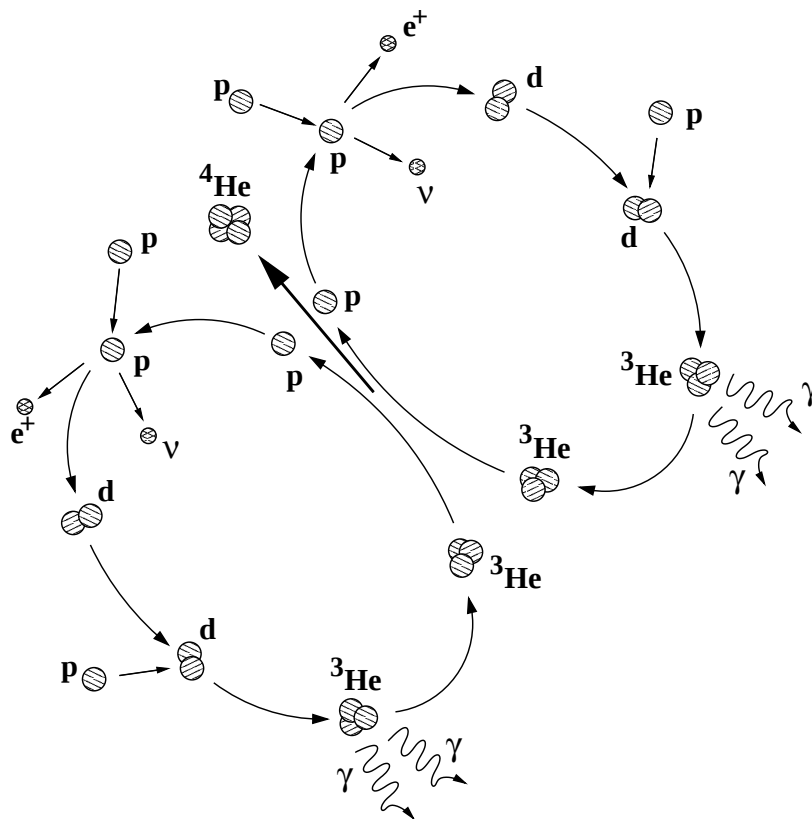
Nakon prvobitne tvorbe elemenata svemir se (što se tiče “normalne”, vidljive materije) sastojao od $\approx 75\%$ (maseni udio) vodika, 25% helija i vrlo malenih, ali mjerljivih količina izotopa litija ${}^7\text{Li}$. Iz te su materije stvorene prve galaksije i zvijezde. Gorenjem u zvijezdama te kasnijim zvjezdanim eksplozijama i drugim procesima materijal u svemiru prerađen je u današnji. Modeliranje evolucije zvijezda puno je teže od modeliranja ranog svemira; ne samo da je za to potrebno veće znanje iz nuklearne fizike, nego su tu važni i hidromehanički i termomehanički procesi, čiji je opis bitno kompliciraniji.

Gravitacijskim sažimanjem materijala u galaksijama nastaju u nebulama pogodni uvjeti za zbivanje nuklearnih reakcija. Kritični parametri su temperatura i gustoća. U

središtu Sunca je npr. temperatura ≈ 15 milijuna $^{\circ}\text{C}$, a i gustoća je ekstremno visoka (≈ 10 puta veća od gustoće zlata). U takvim se uvjetima počinju zbivati nuklearne reakcije. Prvi je korak fuzija vodika u helij.

2.2.1 Nuklearno gorenje vodika

Vodika u zvjezdanom materijalu ima u izobilju i njegovo nuklearno gorenje u zvijezdama počinje tzv. ciklusom “proton-proton” (shematski prikazanim na slici 3). Prvi korak tog ciklusa je i najsporiji: reakcijom između dva protona nastaju deuteron, čestica zvana neutrino i pozitron. Sporost tog procesa posljedica je toga što je za njega odgovorna slaba nuklearna sila, za razliku od svih ostalih koraka ciklusa koji se zbivaju pod utjecajem jake nuklearne sile. Daljnjim dodavanjem protona dobiva se jezgra ^3He , a dvije takve jezgre putem reakcije $^3\text{He} + ^3\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + 2p$ zatvaraju ciklus. Netto-efekt čijelog ciklusa je pretvaranje četiri protona u jezgru ^4He , uz stvaranje pozitrona i neutrona (pozitron se anihilira s elektronom u plazmi, a neutrino napušta Sunce bez ikakve interakcije). Zbroj masa 4 protona veći je za 0.7% od mase helijeve jezgre; masa koja nedostaje pretvorila se u energiju (≈ 26 MeV).



Slika 3: Gorenje vodika u zvijezdama putem ciklusa “proton-proton”.

Povećavanjem temperature središta zvijezde, gorenje vodika sve se više počinje zbivati modificiranim proton-proton ciklusima koji uključuju i teže jezgre. Konačno, na temperaturama $\approx 2 \cdot 10^8$ $^{\circ}\text{C}$ važan postaje i tzv. CNO-ciklus:



Valja uočiti da je netto-efekt ovog procesa više-manje jednak pp -ciklusu: četiri protona su pretvorena u jezgru ${}^4\text{He}$ (uz emisiju fotona i “lakih” čestica). Naše Sunce za sada $\approx 99\%$ energije proizvodi pp -ciklusom, a samo $\approx 1\%$ putem CNO-ciklusa.

2.2.2 Nuklearno gorenje helija i težih elemenata

Trošenjem vodika kao nuklearnoga goriva, dolazi do ponovnog sažimanja zvijezde (gravitacijska sila više nije uravnotežena tlakom nastalim zbog oslobađanja energije nuklearnim reakcijama). U središtu zvijezde sada se nalaze velike količine helija i njegova temperatura raste sve dok ne dostigne temperaturu potrebnu za “paljenje” helija.

Za gorenje helija vrlo je važna sljedeća činjenica: ne postoje čestično stabilne jezgre s 5 ili 8 nukleona. Dakle, najjednostavnijim reakcijama (dodavanjem nukleona ili još jedne jezgre helija) proizvode se jezgre koje se odmah brzo raspadaju i time se sinteza težih elemenata bitno usporava. Proizvodnja teških elemenata zato se dalje zbiva putem reakcije s tri (!) čestice u ulaznom kanalu: ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma$; zbivanje te reakcije dijelom je ubrzano zbog prisutnosti čestično nestabilnog međustanja jezgre ${}^8\text{Be}$. Dodavanjem još jedne jezgre helija dobiva se jezgra ${}^{16}\text{O}$, a daljnjim reakcijama ${}^{28}\text{Si}$ i tako dalje sve do najjače vezane jezgre: ${}^{56}\text{Fe}$.

2.3 Supernove

Daljnja nukleosinteza zbiva se u eksplozivnim procesima, ponajprije u supernovama. Pojednostavljeno rečeno, ti su procesi toliko brzi i intenzivni da su, s astrofizičkog stanovišta, moguće praktički sve nuklearne reakcije. Koji će se procesi uistinu zbivati, ovisi ponajprije o nuklearnoj fizici i to je predmet intenzivnog istraživanja posljednjih godina. Treba reći da uspješan model supernove još ne postoji!

3 Eksperimentalna nuklearna astrofizika

Velik dio nuklearnih reakcija važnih za astrofiziku ostao je do danas nedovoljno istražen ponajprije zbog eksperimentalnih ograničenja. Prvo i najveće takvo ograničenje jest nemogućnost mjerenja na pravim energijama. Naime, koliko god temperature u središtu zvijezda izgledale visokima, njima još uvijek odgovaraju energije gibanja koje su bitno manje od energija na kojima se nuklearne reakcije mogu mjeriti u laboratoriju. Mjerenje na vrlo niskim energijama teško je prije svega zbog malenih vjerojatnosti da se reakcije dogode. Te su vjerojatnosti toliko malene da bilo kakvi neželjeni događaji u detektorima (npr. prije spomenuto kozmičko zračenje) postaju neprihvatljivi. Rješenja tog problema su dvojaka: ili eliminirati sve potencijalne izvore šuma (nedavno je zbog toga jedan malen akcelerator instaliran u tunelu Gran Sasso u Italiji, 1400 metara ispod površine Zemlje) ili koristiti neku od indirektnih metoda. Npr. parametri koji opisuju jednu reakciju mogu se odrediti mjerenjem neke druge reakcije pod točno određenim eksperimentalnim uvjetima i uz razumne teorijske pretpostavke. Jedna se takva metoda (tzv. metoda trojanskog konja), u suradnji s grupom iz Catanije već godinama koristi i na ubrzivaču Tandem Van de Graaf na Institutu “Ruđer Bošković” u Zagrebu. Detalji se mogu naći na web-adresi Laboratorija za nuklearne reakcije Instituta “Ruđer Bošković”:

<http://www.irb.hr/hr/str/zef/z3labs/lmr/>

Drugi, također vrlo bitan ograničavajući faktor mjerenja jest činjenica da je znatan dio jezgara koje sudjeluju u zanimljivim reakcijama β -nestabilan. Njihov poluživot varira od milisekunda pa sve do godina, no čak ni s ovim posljednjim direktno mjerenje sve donedavno nije bilo moguće. Tek prije desetak godina počela su se intenzivno razvijati postrojenja na kojima se ubrzavaju radioaktivni snopovi. Ovaj je dio eksperimentalne nuklearne astrofizike vrlo živ i u idućih desetak godina očekuje se mjerenje velikog broja bitnih reakcija. Grupa s Instituta “Ruđer Bošković” aktivno je uključena i u mjerenja s radioaktivnim snopovima; detalji se mogu naći na spomenutoj web-adresi.

Na kraju treba spomenuti i nedavno pokrenut projekt **ITER** (kratica od engl. *International Thermonuclear Experimental Reactor*). U pitanju je ponovni pokušaj postizanja komercijalno isplative fuzije kao novog izvora energije. ITER je kolaboracija više desetaka znanstvenih timova iz zemalja Europske unije, Japana, Rusije, SAD-a, Kine i eventualno Kanade. Uz Međunarodnu svemirsku stanicu, riječ je o najskupljem znanstvenom projektu svih vremena (proračun mu je procijenjen na čak ≈ 20 milijardi dolara). Ideja i cilj projekta vrlo su jednostavni: u laboratoriju proizvesti nuklearnu fuziju vodika, ali tako da se u proces uloži manje energije nego što se iz njega izvuče. Time bi se otvorio put za izgradnju fuzijskih nuklearnih elektrana, koje bi, za razliku od danas standardnih fisijskih elektrana, koristile jeftino gorivo te proizvodile kudikamo manje radioaktivnog otpada. Način na koji se energija proizvodi u zvijezdama kopirao bi se na Zemlji...