



Nuklearni procesi u evoluciji supernove

Nils Paar¹

Uvod

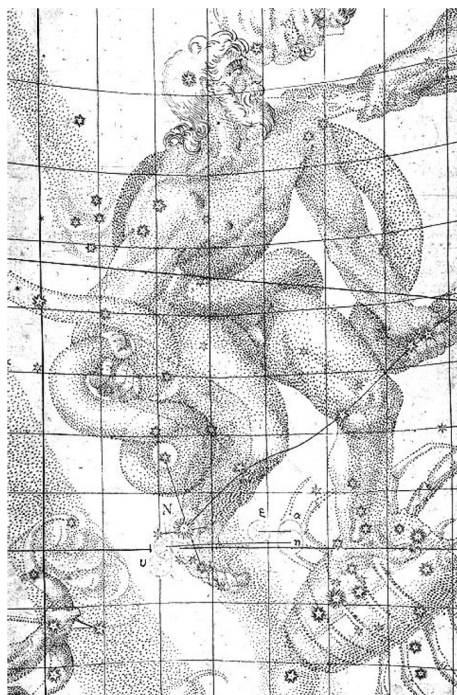
Još iz davnih vremena prvih razvijenih civilizacija zvijezde na nebu privlače pažnju istraživača. Najznačajnije zvijezde, vidljive okom, astronomi su grupirali u sazviježđa i sastavljene su detaljne mape zvijezda sa svojim imenima. Međutim, tek razvoj moderne fizike u prošlom stoljeću omogućio je napredak u razumijevanju prirode zvijezda, odnosno procesa koji se na njima odvijaju. Zemlji najbliža zvijezda je Sunce, koje svojim zračenjem svjetlosti i topline ostvaruje uvjete za život čovjeka i svih bioloških organizama.

Pogledom na noćno nebo uočavamo gotovo statičnu sliku međusobno pravilno raspoređenih zvijezda bez značajnijih promjena intenziteta. Međutim, u većim vremenskim razdobljima, koja se mogu mjeriti i u milijardama godina, zvijezde prolaze kroz složen razvojni ciklus, čija posljedica su moguća iznenađenja za promatrača noćnog neba. Jedno takvo iznenađenje, eksploziju supernove u galaksiji M101, imamo priliku doživjeti upravo ovih dana pogledom u smjeru sazviježđa Velikog medvjeda. Prije nekoliko dana, svjetski mediji objavili su vijest da je 24. kolovoza 2011. godine na Palomar opservatoriju u San Diegu, u suradnji s National Energy Research Scientific Computing Center (NERSC) na Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), otkrivena eksplozija supernove (SN 2011fe) tipa Ia u galaksiji M101, udaljena 21 milijun svjetlosnih godina od Zemlje (1 svjetlosna godina je put koji svjetlost prijeđe u godinu dana, $\sim 10^{16}$ m). Vrsta ove supernove slična je onoj koju je imao prilike vidjeti još davne 1572. godine Tycho Brahe, jedan od najznačajnijih astronoma u povijesti koji je uveo precizna mjerenja položaja zvijezda. U sazviježđu Kasiopeje uočio je pojavu zvijezde snažnog intenziteta, koju je ucrtao u svoju mapu pod imenom "Nova Stella" (nova zvijezda), ne znajući da se ustvari radi o eksplozivnom kraju života jedne nepoznate zvijezde. "Nova Stella" je s vremenom počela gubiti intenzitet, a kasnije je i potpuno nestala sa zvijezdanog neba. Zbog značajnog doprinosa njezinom otkriću, objavljenom u nekoliko radova, "nova zvijezda" iz 1572. godine je poznata pod imenom Bracheova supernova.

Godine 1604. pojavila se i druga supernova, ovog puta u sazviježđu Zmijonosca, koja je u svojem maksimumu bila svjetlija od bilo koje druge zvijezde (i planeta osim Venere) noćnog neba. Nova zvijezda, koja je tri tjedna bila vidljiva i tijekom dana, ubrzo je privukla pažnju njemačkog matematičara i astronoma Johannes Keplera, koji je 17 mjeseci provodio promatranja sve dok zvijezda nije u potpunosti nestala. Rezultate promatranja Kepler je 1606. godine objavio [1], zajedno sa slikom koja pokazuje položaj

¹ Autor je izvanredni profesor u Zavodu za teorijsku fiziku, Fizičkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu; e-pošta: npaar@phy.hr, <http://www.phy.hr/~npaar>.

supernove 1604 u sazviježđu Zmijonosca (slika 1). Supernova 1604 danas je poznata kao Keplerova supernova. Prema nekim izvorima, pojavu supernove uočio je još godine 125. prije nove ere grčki astronom Hiparh [2]. Tijekom povijesti, zabilježene su pojave nekoliko značajnijih supernova, među prvima one kineskih astronoma iz 185., 1006. i 1054. godine, od kojih su zadnje dvije potvrđene i iz drugih izvora. Bracheova i Keplerova supernova predstavljaju jedina dva poznata slučaja supernove do danas za koje se bez dvojbi može tvrditi da pripadaju našoj galaksiji Mliječni put. Dok su supernove u našoj galaksiji relativno rijetke u odnosu na životni vijek čovjeka, današnji napredni teleskopi omogućuju uvid u značajan broj ovih pojava u udaljenim galaksijama u Svemiru.



Slika 1. Ilustracija dijela zvjezdanog neba s ucrtanim položajem Supernove 1604 na peti Zmijonosca, označeno sa "N" (slika preuzeta iz [1]).

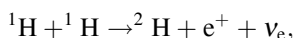
Pojava supernove smatra se jednim od najznačajnijih otkrića u povijesti astronomije koje je potaknulo reviziju dotadašnjeg razumijevanja zvjezdanog neba, potrebu za stvaranjem što boljih mapa i kataloga zvijezda, kao i razvoj preciznijih instrumenata za opažanje zvijezda. S druge strane, supernova je izazov fizičarima i astrofizičarima koji pokušavaju razumijeti kako ustvari zvijezde funkcioniraju. Rijetko je koja astrofizička pojava toliko složena kao kraj života masivne zvijezde u gravitacijskom sažimanju i posljedično u eksploziji supernove. Istodobno uključuje sve četiri temeljne sile u prirodi (gravitacijska, elektromagnetska, jaka i slaba) u uvjetima ekstremne temperature i gustoće. U perspektivi današnje moderne znanosti, supernova predstavlja velik izazov čitavom nizu područja istraživanja, uključujući kvantnu mehaniku, nuklearnu fiziku, astrofiziku, fiziku plazme, računalne znanosti, itd. i zahtijeva multidisciplinarni pristup rješavanju problema.

Termonuklearna fuzija u evoluciji zvijezda

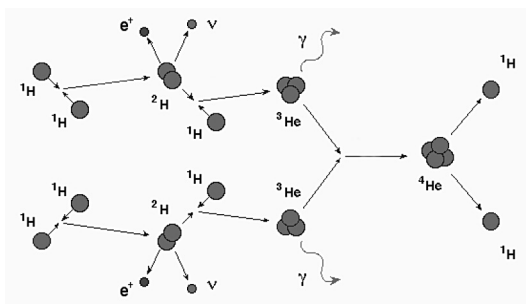
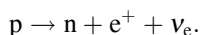
Za razumijevanje pojave supernove potrebno je poznavanje nuklearnih procesa u životnom ciklusu zvijezda. Stvaranje zvijezda započinje u gustim nakupinama prašine i plinova u svemiru, u čijem sastavu dominiraju vodik (70%) i helij (~ 30%), a udio ostalih elemenata je malen. Ukoliko je ova nakupina atoma i molekula dovoljno masivna da je potencijalna energija gravitacijskog privlačenja jača od kinetičke energije plina, dolazi do gravitacijskog sažimanja i formiranja agregata koji su ponekad dovoljno veliki da postanu zvijezde. Pritom se postižu velike gustoće i temperature koje ostvaruju uvjete za početak nuklearnih reakcija fuzije vodika u helij, a dalje i u teže atomske jezgre. Na visokim temperaturama u zvijezdama atomi su ionizirani, pa se proces fuzije vodika svodi na fuziju dva protona. Da bi reakcija bila uspješna, dva protona se trebaju približiti toliko da budu unutar dosega jake nuklearne sile, što je reda veličine 1 femtometar = 10^{-15} m.

Budući da su protoni nabijene čestice, između njih djeluje odbojno kulonsko međudjelovanje, koje otežava približavanje dva protona i ostvarivanje fuzije. Međutim, čim je temperatura u zvijezdi dovoljno visoka ($T \sim 10^7$ K), odnosno kinetička energija protona ($E = kT = 0.002$ MeV) tolika da se može savladati elektrostatsko odbijanje, fuzija može započeti. Nuklearne reakcije fuzije predstavljaju glavni izvor energije zvijezde.

Sagorijevanje vodika u zvijezdama odvija se u tzv. pp reakcijama u nekoliko koraka, kao što je prikazano na slici 2. Proces započinje sudarom dva protona i stvaranja deuterona (${}^2\text{H}$), tj. vezanog sustava protona i neutrona,



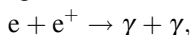
a istodobno je stvoren i jedan pozitron (e^+) i elektronski neutrino (ν_e). Za vezanje protona i neutrona odgovorna je jaka nuklearna sila. Međutim, ovom vezanju prethodio je i proces slabog međudjelovanja, β raspad kojim se proton pretvorio u neutron, uz emisiju gore navedenih pozitrona i neutrina, tj.



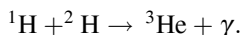
Slika 2. Proces sagorijevanja vodika (${}^1\text{H}$) u helij (${}^4\text{He}$), uz oslobađanje pozitrona (e^+), neutrina (ν), γ -zračenja i novih jezgri vodika.

Pozitron vrlo brzo naleti na slobodni elektron unutar zvijezde i pritom se anihilira. Prilikom anihilacije elektrona i pozitrona, odnosno čestice i antičestice, sudionici procesa

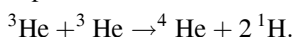
nestaju i pritom se oslobađaju dvije gama zrake,



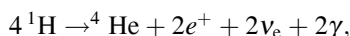
čija energija odgovara masi elektrona i pozitrona, tj. $2 \cdot 0.51 \text{ MeV} = 1.02 \text{ MeV}$. Proces fuzije vodika iznimno je rijetka pojava, deuterom se stvara tek jednom u 10^{26} proton-proton sudara, dok se u većini slučajeva protoni elastično odbiju jedan od drugog. Upravo je sporo odvijanje proton-proton fuzije tzv. "usko grlo" koje regulira dinamiku proizvodnje energije u zvijezdama, čime se osigurava da zvijezda ne eksplodira brzo. Unatoč sporosti ovog procesa, ogroman broj protona u uvjetima velike gustoće u središtu zvijezde omogućuje dovoljnu proizvodnju deuterona. U sljedećem koraku deuterom se sudara s drugim protonom i stvara jezgru helija, ${}^3\text{He}$ i oslobađa foton gama zračenja.



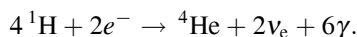
Konačno, dvije jezgre ${}^3\text{He}$ mogu naletjeti jedna na drugu (očekivano vrijeme je unutar 10^5 godina) i stvoriti ${}^4\text{He}$ i dva protona,



Sva tri prethodna koraka procesa termonuklearne fuzije vodika mogu se zapisati u kompaktnom obliku kao reakcija

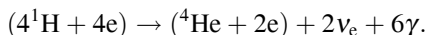


odnosno nakon dodavanja dva elektrona i anihilacije s pozitronima,



Zadatak. Izračunajte energiju Q oslobođenu u proizvodnji ${}^4\text{He}$ termonuklearnom fuzijom vodika.

Polazeći od kompaktnog zapisa fuzije vodika, dodajmo dva elektrona s obje strane reakcije,



Sada veličine koje imamo unutar zagrada odgovaraju atomima vodika i helija koji se sastoje od jezgre i odgovarajućeg broja elektrona. Mase atoma očitavamo iz baza podataka dobivenih mjerenjima [3],

$$m(\text{atom } {}^1\text{H}) = 1.007825u$$

$$m(\text{atom } {}^4\text{He}) = 4.002603u$$

gdje u odgovara atomskoj jedinici mase ($1/12$ mase atoma ugljika ${}^{12}\text{C}$), odnosno $1.6605402 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Koristeći Einsteinovu relaciju koja povezuje energiju stanja mirovanja i masu, $E = mc^2$, oslobođenu energiju računamo iz razlike masa sudionika u reakciji,

$$Q = -\Delta mc^2$$

$$Q = (4 \cdot (1.007825u) - 4.002603u)c^2 = 0.028697uc^2,$$

odakle koristeći pretvorbu jedinica $1u = 931.494061 \text{ MeV}/c^2$ dobivamo oslobođenu energiju

$$Q = 26.73 \text{ MeV}.$$

Prilikom izračuna u obzir nisu uzeti neutrini jer imaju zanemarivo malu masu, dok fotoni gama zračenja nemaju masu.

Napomena. 1 eV je jedinica energije koja se često koristi, posebice u atomskoj fizici eV , nuklearnoj fizici $\text{MeV} = 10^6 \text{ eV}$, i fizici visokih energija $\text{GeV} = 10^9 \text{ eV}$.

$1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, što odgovara kinetičkoj energiji $E = qU$ koju postigne elektron naboja $q = e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ prilikom ubrzavanja u električnom polju kod razlike potencijala $U = 1 \text{ V}$.

Energija oslobođena u procesima fuzije u zvijezdama dobrim dijelom ostaje pohranjena u središnjem dijelu zvijezde kao toplinska energija, koja se zatim postupno prenosi prema površini zvijezde, odakle dio bude izračen elektromagnetskim valovima, uključujući i vidljivu svjetlost koju možemo uočiti. Drugi, nešto manji dio energije neutrini odmah nakon stvaranja iznose iz zvijezde van. Budući da neutrini na svojem putu prema površini zvijezde međudjeluju s jezgrama u okolini slabom interakcijom, u tim uvjetima oni dobrim dijelom neometano napuštaju zvijezdu i omogućuju izravan uvid u procese koji se odvijaju duboko u unutrašnjosti zvijezda.

Sagorijevanje vodika traje toliko dugo dok se gorivo u središtu ne potroši, a vrijeme održavanja procesa ovisi o masi zvijezde. U slučaju Sunca, izračuni pokazuju da ima dovoljno goriva za održavanje fuzije vodika još sljedećih 5 milijardi godina. Nakon što je veći dio vodika potrošen, u središnjem dijelu zvijezde nalazi se uglavnom helij, prestaju reakcije fuzije i stoga se zvijezda počinje hladiti. Budući da više nema tlaka koji su stvarali produkti fuzije, zvijezda se počinje urušavati pod utjecajem vlastitog gravitacijskog privlačenja. Time temperatura u središnjem dijelu ponovno započinje rasti, a vanjski slojevi zvijezde se šire, što u slučaju Sunca odgovara stvaranju crvenog diva. Ukoliko temperatura u središtu poraste do $T \sim 10^8 \text{ K}$, ponovno se uspostavljaju uvjeti za ostvarenje fuzije, ali ovog puta sagorijevanje helija u ugljik. Procesi izgaranja, hlađenja, gravitacijskog sažimanja i ponovne uspostave fuzije ciklički se ponavljaju. Kako zvijezda dalje evoluirala, postiže sve više temperature i veće gustoće, te ostvaruje uvjete za fuziju sve težih jezgara. Međutim, ponavljanje ovih procesa moguće je samo dok se ne proizvede željezo. Razlog tome je što energija vezanja atomskih jezgara po nukleonu pada nakon jezgara masenog broja $A \sim 56$ (gdje je A suma broja protona i neutrona u jezgri), zbog čega proces fuzije težih jezgara više ne bi oslobađao energiju. Dakle, proizvodnja svih kemijskih elemenata s $A > 56$ očito se mora odvijati u nekom drugom astrofizičkom scenariju. Razumijevanje novih nuklearnih procesa i okruženja u svemiru u kojima je proizvedena većina poznatih elemenata, danas predstavlja jedno od najvećih otvorenih pitanja u znanosti [4].

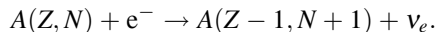
Osim u agregatima prašine i plinova koji su nastali milijardu godina nakon velikog praska, stvaranje zvijezda moguće je u raznim drugim astrofizičkim scenarijima što trenutno predstavlja aktivno područje istraživanja. Nedavno je pomoću NASA-inih teleskopa Hubble i Spitzer pokazano da intenzivno stvaranje novih zvijezda mogu potaknuti i sudari galaksija [5].

Neutrino (ν) je električki neutralna čestica koja međudjeluje uglavnom slabom silom, čiji doseg je znatno manji od dosega bilo koje druge temeljne sile (elektromagnetske, jake, gravitacijske). Masa neutrina je iznimno mala i još uvijek nije precizno određena. U svakom trenutku milijarde neutrina proizvedenih u nuklearnim reakcijama na Suncu neometano prolaze kroz naše tijelo. Prema standardnom modelu elementarnih čestica postoje tri vrste neutrina različite mase: elektronski (ν_e), mionski (ν_μ), i tau (ν_τ) neutrino. Elektronski neutrino nastaje β raspadom protona u neutron. Iako neutrini slabo međudjeluju s materijom, neutrini nastali reakcijama fuzije na Suncu detektirani su na Zemlji, prvi puta u Homestake eksperimentu (SAD). Prvo detektiranje neutrina nastalih eksplozijom supernove ostvareno je 1987. godine na detektorima Kamiokande (Japan) i IMB (SAD). Za doprinos u detektiranju kozmičkih neutrina, 2002. godine Raymond Davis Jr. i Masatoshi Koshiba primili su Nobelovu nagradu.

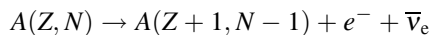
Procesi slabe interakcije i eksplozija supernove

Nakon što zvijezda potroši sve gorivo za održivu fuziju, započinje naglo gravitacijsko urušavanje. Kao posljedica niza procesa i nuklearnih reakcija, u središnjem dijelu se nakupljaju neutroni i pod utjecajem gravitacijskog urušavanja dostižu se ekstremno velike gustoće koje su usporedive s gustoćom u atomskoj jezgri. U takvim uvjetima je zbog jake nuklearne sile i kvantnomehaničkog učinka koji stvara tlak, tzv. degeneriranog neutronske plina, daljnje urušavanje zaustavljeno. Dolazi do odbijanja materije od kompaktnog središnjeg dijela zvijezde, stvaranja šok vala prema van, koji u konačnici rezultira izbacivanjem vanjskih slojeva zvijezde u Svemir, odnosno eksplozijom supernove.

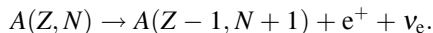
Osim što doprinose izgaranju nuklearnog goriva u zvijezdama, procesi slabe interakcije imaju značajnu ulogu i u završnoj fazi života zvijezde, kao i tijekom same eksplozije supernove. Primjeri značajnijih procesa slabe interakcije u evoluciji zvijezda su uхват elektrona, β raspad i neutrino-jezgra međudjelovanje. Prilikom uhwata elektrona u jezgri koju označavamo s $A(Z, N)$, gdje je Z broj protona, N broj neutrona i maseni broj $A = N + Z$, jedan proton se pretvori u neutron, a pritom se emitira elektronski neutrino,



Što se tiče nuklearnog β raspada, postoje dvije varijante: β raspad u kojem se jedan neutron pretvori u proton, elektron (e^-) i antineutrino ($\bar{\nu}_e$ – antičestica neutrina),

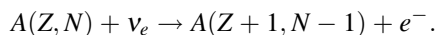


i obrnuti, β^+ raspad koji mijenja proton u neutron, pozitron (e^+ – antičestica elektrona) i neutrino elektronski (ν_e).



Budući da je masa neutrona veća od mase protona, β^+ raspad protona u neutron moguć je jedino kada je na raspolaganju dodatna energija, koja može biti preuzeta iz atomske jezgre. Modeliranje β raspada i uhwata elektrona od velikog je značaja za razumijevanje evolucije supernove. Naime, u fazi koja prethodi snažnom gravitacijskom kolapsu zvijezde, središnji dio je privremeno stabiliziran zbog kvantnomehaničkog učinka degeneriranog elektronskog plina koji sprječava daljnji kolaps zvijezde. Međutim, upravo procesi slabe interakcije, uхват elektrona i β raspad, izravno utječu na broj elektrona u zvijezdi, a zbog toga i na održavanje privremene ravnoteže. Promjena broja elektrona izravno utječe na mehanizam eksplozije i dinamiku supernove, pa je stoga potrebno provesti pouzdano modeliranje uhwata elektrona [6]. U uvjetima visokih temperatura, uхват elektrona na jezgrama postaje značajan proces koji smanjuje broj elektrona i narušava održavanje ravnoteže zvijezde.

Neutrini igraju posebno značajnu ulogu u evoluciji zvijezde. Osim što je mogu gotovo neometano napustiti i time nam donijeti na Zemlju vrijedne informacije o reakcijama koje se odvijaju u unutrašnjosti zvijezde, u uvjetima supernove imaju važnu ulogu u iznošenju energije, hlađenju supernove i u procesima nukleosinteze kojima nastaju potpuno nove jezgre od onih koje su postojale prije reakcije. Prilikom uhwata elektronskog neutrina (ν_e) u jezgri $A(Z, N)$, jedan neutron se pretvori u proton i pritom je emitiran elektron (e^-),



Za razumijevanje procesa nukleosinteze inducirane neutrinima u uvjetima eksplozije supernove, potrebno je teorijski opisati gore navedene reakcije za velik broj jezgara.

Reakcije inducirane neutrinima su jako osjetljive na detalje nuklearne strukture. Stoga je za njihov opis potrebno razviti napredni model za opis atomske jezgre, što uključuje svojstva osnovnog stanja i pobuđena stanja u kojima se jezgra može naći nakon međudjelovanja s upadnim neutrinom. Jedan takav model, zasnovan na relativističkom energijskom funkcionalu gustoće, nedavno je razvijen na Fizičkom odsjeku PMF-a u Zagrebu, i uspješno je primijenjen u opisu niza egzotičnih nuklearnih pobuđenja i neutrino-jezgra međudjelovanja [7].

Kada neutroni proizvedeni u nizu procesa unutar supernove na putu prema van prolaze kroz slojeve koji sadrže različite atomske jezgre, zbog snažnog toka neutrina i velikih gustoća zvijezde u gravitacijskom urušavanju dolazi do neutrino-jezgra međudjelovanja koje doprinosi stvaranju težih jezgara, odnosno do tzv. neutrinске nukleosinteze. Velik dio elemenata težih od $A > 56$ stvoren je upravo u eksplozijama supernova. Osim neutrinске nukleosinteze, postoji niz drugih procesa kojima se proizvode nove jezgre. Elementi raspršeni eksplozijom supernove ispunjavaju prostor između zvijezda i kasnije, pod utjecajem gravitacijskog privlačenja, mogu ponovno sudjelovati u stvaranju novih zvijezda i planeta. Zastupljenost elemenata na zemlji težih od vodika i helija upućuju na to da je naš Sunčev sustav nastao kondenzacijom međuzvjezdanog materijala koji je preostao nakon eksplozija supernova. Procjena je da se na Zemlji nalaze ostatci nekoliko tisuća supernova.

Samo masivne zvijezde koje imaju dovoljno gravitacijske energije završavaju svoj život kao supernove. Tipični primjeri ovakvih zvijezda imaju 10–30 puta veću masu od Sunca. Manje zvijezde koje ne mogu ostvariti uvjete za supernovu mogu završiti život kao bijeli patuljci, zvijezde malih dimenzija koje polako zrače toplinsku energiju preostalu nakon zaustavljanja fuzije. S druge strane, budući da eksplozija supernove izbacuje u svemir dio vanjskih slojeva zvijezde, ostatak supernove može završiti kao nova vrsta objekta u svemiru, primjerice kao neutronska zvijezda ili crna jama, čije razumijevanje i danas predstavlja veliki izazov znanstvenicima.

Literatura

- [1] JOHANNES KEPLER, *De Stella Nova in Pede Serpentarii – Nova zvijezda na nozi Zmijonosca*, (1606).
- [2] L. MOTZ, J. H. WEAVER, *The Story of Astronomy*, Basic Books, pp. 76, (2001)
- [3] <http://atom.kaeri.re.kr>
- [4] *Connecting Quarks with the Cosmos: Eleven Science Questions for the New Century*, National Research Council of the National Academies, Washington D.C., National Academy Press (2003).
- [5] H. INAMI, L. ARMUS, ET AL., *Astronomical Journal* 140, 63 (2010).
- [6] Y. F. NIU, N. PAAR, D. VRETNAR, J. MENG, *Stellar electron-capture rates calculated with the finite-temperature relativistic random-phase approximation*, Phys. Rev. C 83, 045807 (2011), <http://nucl-th/arXiv:1104.1683>
- [7] N. PAAR, D. VRETNAR, E. KHAN, G. COLO, *Exotic modes of excitation in atomic nuclei far from stability*, Rep. Prog. Phys. 70, 691 (2007), <http://nucl-th/arXiv:0701081>