

# ELEKTRON I ATOMSKO JEZGRO

Ivan Aničin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Institut za Nuklearne Nauke "Vinča", Vinča, Beograd*

<sup>2</sup>*Fizički Fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd*

**Sažetak:** U radu se diskutuju odnosi između jezgra atoma i elektrona. Dat je kratak pregled razvoja predstava o strukturi atoma i jezgra koji je kulminirao u savremenoj slici o strukturi atoma. Zatim su analizirane pojave u kojima se, po rastućim energijama, manifestuje interakcija između jezgara i elektrona, kako onih atomskih tako i eksternih. Naglasak je na onim pojavama u kojima su jezgra izvori i ponori elektrona.

\*

**Abstract:** The relationships between the atomic nucleus and the electron are discussed. The development of the contemporary model of the atom is briefly reviewed. The phenomena in which the interactions between the nuclei and electrons play major role are analysed, in the order of the increasing interaction energy. Emphasis is on the processes in which nuclei act as sources and sinks of electrons.

## 1. UVOD

### "Elektron neiščrpaem"

V.I.Lenin, 1909

Jezgro je najsloženiji mikrosistem u kome konstituentne čestice interaguju svim poznatim vrstama interakcija i u njemu elektron, kao najlakši lepton, ne postoji kao čestica prepoznatljivih individualnih osobina. Ovo je gledište danas dobro zasnovano prvenstveno zato što je nedvojbeno utvrđeno da elektron ne interaguje dovoljno jakim silom koja može tako laku česticu da konfinira na dimenzije tako malog jezgra. Pritom nikakvu smetnju ne predstavlja činjenica da se ni individualni nukleoni u jezgru takođe direktno ne mogu opservirati i "prebrojati" već se njihov broj, maseni broj  $A$ , indirektno definiše kao najbliži ceo broj količniku mase jezgra i atomske jedinice mase. Samo u izvesnom broju niskoenergijskih pojava jezgro se može smatrati sastavljenim od nukleona sa osobinama slobodnih čestica, kada se spinovi, magnetni momenti i ekscitacioni spektri mogu po poreklu trasirati do stanja pojedinačnih nukleona u jezgru. U većini nuklearnih pojava konstituentni nukleoni su ustvari kompleksne kvazi-čestice datih efektivnih osobina koje se onda mogu smatrati međusobno slabointeragujućim u efektivnom nuklearnom potencijalu.

Da bi se do ovakve slike jezgra bez elektrona došlo, međutim, bilo je potrebno ne samo otkriti postojanje protona i neutrona već i uskladiti interpretacije velikog broja raznovrsnih pojava i procesa u kojima učestvuju i jezgra i elektroni i to je onaj deo istorijata koga ćemo na početku u kratkim crtama izložiti. Glavni rezultat eliminacije elektrona iz jezgra bio je otkriće, odnosno pojava potrebe za uvođenjem dve nove sile u prirodi - jake, koja bi omogućila da se samo pozitivna naelektrisanja drže u jezgru, i slabe, koja bi obezbedila kreaciju elektrona u procesima beta raspada. Posle ovoga napravićemo informativni pregled osnovnih fenomena u kojima učestvuju jezgra i elektroni. Osnovni nauku iz upoznavanja ovih nuklearnih pojava u kojima učestvuju elektroni, koga ćemo ukratko prokomentarisati, je otkriće da broj elektrona u vazduhu nije konstantan. Da se glavna nit ovog osnovnog dela izlaganja ne bi kidala

izvesni značajni detalji ove inače vrlo heterogene oblasti smešteni su u relativno obimne Dodatke.

## 2. KRATAK ISTORIJAT ODNOSA JEZGRO-ELEKTRON

Istorija, nastanak i razvoj nuklearne fizike, velikim i važnim delom između ostalog je i istorija odnosa elektron-jezgro, tj mesta i uloge elektrona u gradnji atoma kao celine, i jezgra kao njegovog dela. Mi ćemo ovde ovaj uzajamni odnos i pokušati da prikažemo kroz samo onaj deo istorijskog razvoja nuklearne fizike koji je relevantan za ulogu elektrona u jezgri, i jezgra za elektron. Ovaj će istorijat samo biti skiciran u grubim crtama a detalji se mogu naći, recimo, u knjigama Mladenovića [1] i [2].

Potreban uslov za razrešenje detalja atomske strukture, odnosno složenih uzajamnih odnosa jezgra atoma i elektronskog omotača ostvaren je neverovatnom koincidencijom da su se u tri godine za redom (1895, 1896, 1897) otkrila tri ključna i naizgled potpuno nekorelirana fenomena: X-zraci, radioaktivnost i elektron - sve to praktično iz, ili zahvaljujući, studijama katodnih zraka. Pored toga, kao neophodni za razumevanje odnosa jezgro-elektron javljaju se u kratkom roku, opet iz razmišljanja sasvim nevezanih za ovaj problem, još i kvantna hipoteza tj. shvatanje da je kvantovano - diskretizovano - i polje zračenja (iz argumenata potpuno nezavisnih od linijskih spektara i od pitanja strukture) (1900 i 1905) i teorija relativnosti (1905) sa  $E=mc^2$ , koja je takođe formulisana na osnovu za ovo pitanje sasvim irelevantnih razmatranja, a bez koje se već ni bazična energijska fenomenologija nuklearnih procesa ne bi mogla interpretirati.

U XIX veku se smatralo da je atom samo jedinica *mase* elementa, odnosno jedinica gravitacionog i inercijalnog naboja, i po Prautu (Prout) (1814) da je svaki atom umnožak mase atoma vodonika - masa je prva shvaćena kao kvantovana veličina sa atomom vodonika kao kvantom (i antička kategorija atoma implicitno se intuitivno morala odnositi na diskretnost mase). Cela, inače perfektno ispravna, maksvelovska elektrodinamika je, međutim, naelektrisanje, tj. drugi naboj koga smo upoznali, shvatala kao kontinuum. Tomsonov (Thomson) elektron (ponikao iz njegovog dokaza da su katodni zraci čestice) je prva

diskretizacija naelektrisanja, "atom naelektrisanja" (znatno pre Milikena (Millikan)) i njegov model atoma (1898) uvodi naelektrisanje kao bitnu odrednicu atoma; elektroni su raspoređeni kao "suvo grožđe (ili šljive) u pudingu pozitivnog naelektrisanja". Električna neutralnost supstancije zahtevala je da ovako diskretizovano negativno naelektrisanje bude kompenzovano istim tolikim pozitivnim naelektrisanjem unutar atoma ali nosilac tog pozitivnog naelektrisanja je bio nespecificiran, kao uostalom i ukupno naelektrisanje, odnosno broj elektrona u atomu - jedni su smatrali da ih ima mnogo a drugi malo. Sam Tomson je smatrao da u atomu ima oko 1000 elektrona, koji mu i daju masu. Pored toga činjenica da se masa te prvootkrivene elementarne čestice pokazala mnogo manjom od mase atoma vodonika, što je u početku bilo primljeno sa velikom skepsom, i proglasila ga je za "subatomska" česticu. Tomson (1899) u Vilsonovoj (Wilson) kondenzacionoj komori dokazuje da katodni zraci nose isto naelektrisanje kao joni vodonika u elektrolizi i shvata da se naelektrisanje (u tada poznatim pojavama) ne stvara već da je jonizacija samo razdvajanje naelektrisanja, odnosno cepanje atoma. Takođe shvata da je čestica izbačena u fotoefektu opet elektron. A 1900. Bekerel (Bequerel) utvrđuje da su i beta zraci iz radioaktivnosti identični sa Tomsonovim elektronima! Izlazi da su sve elektroni i da su elektroni svuda! Iz svega toga se naslućuje da je i pozitivno naelektrisanje diskretizovano kao i da se i električni naboj, kao i masa (po Lavoazijeu (Lavoisier)), konzervira.

Raderford i Sodi (Rutherford, Soddy) uzrok i prirodu radioaktivnosti vide u dezintegraciji atoma; opet tamo nekog apstraktnog i *de facto* još uvek potpuno pogrešnog (1902). Nagaoka hipotetiše Saturnoliki model atoma sa hiljadama elektrona koji orbitiraju oko pozitivnog jezgra (1904). Barkla (1906) otkriva da svaki element ima karakteristične X zrake - to će Mozlija (Moseley) dovesti do koncepta rednog broja. Han i Majtner (Hahn, Meitner) 1906. počinju da mere beta spektre. Tomson, konačno, 1906. demonstrira da vodonikov atom ima samo jedan elektron.

Oslanjajući se na eksperimente Gajgera i Marsdena (Geiger, Marsden) Raderford konačno 1911. postulira planetarni atom sa malim i teškim jezgrom koje je u stanju da, za razliku od "mekog" Tomsonovog atoma male gustine, rikošetira alfa česticu, tj. postulira da je praktično sva masa atoma i svo pozitivno naelektrisanje u jezgri, koje ima dimenzije reda 30 fm (onoliko koliko jezgri može da priđe alfa čestica energije od

oko 5 MeV) ali ni on još uvek ne zna koliko elektrona orbitira oko tog jezgra; ceni da ih u atomu zlata (od čega sa najlakše može napraviti tanka folija) ima oko 100! Već samim ustoličenjem pojma jezgra javlja se i pitanje: šta je ustvari u njemu? Raderford ni o tome još ništa ne može da kaže.

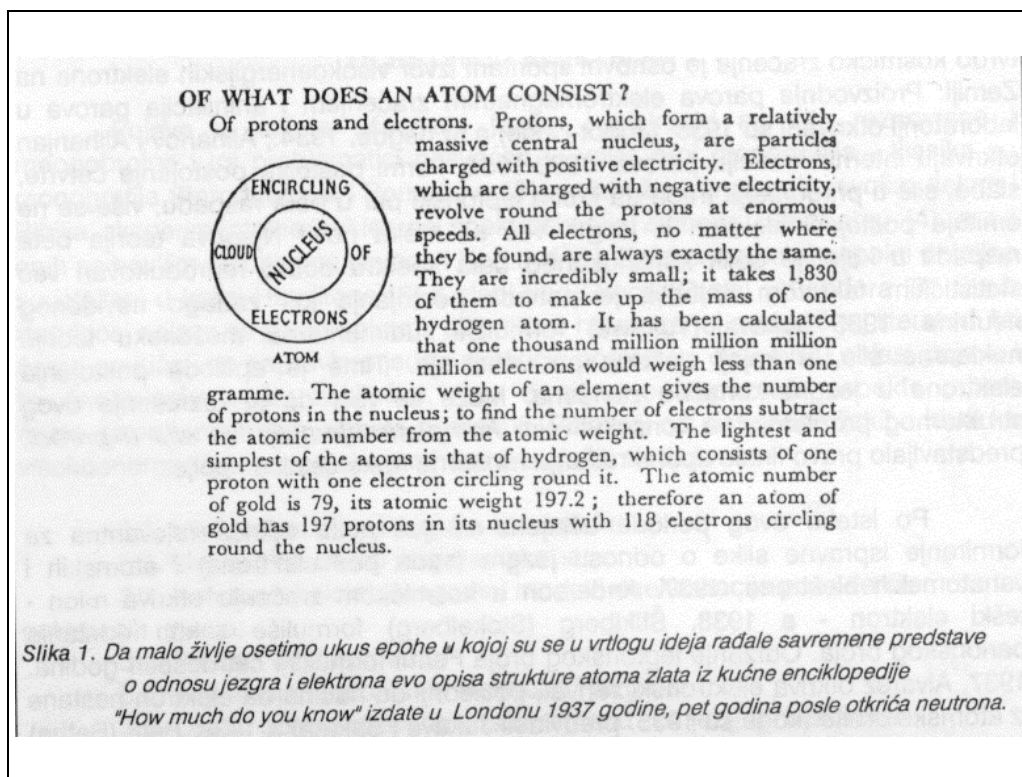
Van den Brek (van den Broek) primećuje da broj elektrona u atomu i njegova masa nisu direktno zavisni i naslućuje da je broj elementarnih pozitivnih naelektrisanja u jezgru jednak rednom broju elementa. Sledi Borova (Bohr) teorija Raderfordovskog atoma - *a priori* postulirana kvantizacija orbitnog momenta impulsa i energije elektrona u Kulonovom polju koji može da orbitira oko jezgra u nekom od beskonačnog niza diskretnih stacionarnih stanja. To je preteča kvantne mehanike. Mozli iz sistematike X-spektara utvrđuje da je broj elektrona u atomu zaista jednak rednom broju elementa u periodnom sistemu a Gajger i Marsden iz rasejanja alfa-čestica da je naelektrisanje jezgra zlata jednako njegovom rednom broju. Sodi, Fajans i Rasl (Fajans, Russel) primećuju da emisijom beta elektrona iz atoma redni broj atoma raste za jedan, a Bor predlaže da je beta raspad nuklearni proces (elektroni, u formi beta zraka, kao da isparavaju toplotnim spektrom iz jezgra). Sve ovo događa se 1913.

Sada se neizbežno formira predstava o postojanju elektrona i u jezgru. Ako u omotaču atoma ima  $Z$  elektrona onda i jezgro ima neto  $Z$  pozitivnih naelektrisanja (još se ne zna ko ih nosi!), ali, ako je potrebno zbog bilansa masa, može da ih ima i više, koji bi onda bili neutralisani istim brojem takozvanih nuklearnih elektrona. Postavlja se i pitanje šta drži taj višak nuklearnih pozitivnih naelektrisanja na okupu kao i zašto su neki elektroni u jezgru a neki van njega? Nagoveštava se postojanje još neke sile koja bi ovo trebalo da obezbeđuje.

U nizu eksperimenata sa alfa česticama Raderford u toku od 1914. do 1919. otkriva i imenuje proton, drugu po redu elementarnu česticu ikad definisanu - jezgro vodonika - i pokazuje da su protoni oni sastojci jezgara koji su pozitivno naelektrisani i koji mu daju masu. Ništa se drugo praktično ne događa - Prvi svetski rat je u toku! Aston 1920. otkriva da su sve atomske mase, kada se u obzir uzmu izotopi, zaista praktično jednake celobrojnim umnošcima buduće atomske jedinice mase [u] (to je pravi povratak Prautu koji je inače otkrićem jako necelobrojnih atomskih težina

nekim elementima bio doveden pod ozbiljnu sumnju!). Tako je ustoličeno PROTONSKO-ELEKTRONSKO JEZGRO po kome u jezgru mase  $A$  [u] i rednog broja  $Z$  ima  $A$  protona i  $A-Z$  (nuklearnih) elektrona. Ova slika sa elektronom u jezgru važiće sve do otkrića neutrona 1932. a u opštoj literaturi to će se povlačiti još relativno dugo (Sl.1.). Mnogi, međutim, uključujući i Raderforda, već tada pred ovakvim modelom, zbog ranije iznešenih razloga, osećaju nelagodnost i smatraju da bi bilo jako dobro ako bi kao sastojak jezgra postojao i neutralni proton - čvrsta asocijacija protona i elektrona, i ako elektron sa svojim individualnim karakteristikama ne bi morao da se nalazi i u jezgru.

U međuvremenu se formira kvantna mehanika (1924-1928) i postepeno postaje sve teže i teže prihvatiti elektron u jezgru. Osnovni argumenti koji su se u ovom periodu posle otkrića kvantne mehanike a do otkrića neutrona javili protiv postojanja elektrona u jezgru su:



- Poznajući sve interakcione osobine elektrona (ili bar misleći da su poznate!) postoji problem sila potrebnih da se  $A$  pozitivnih i  $Z$  negativnih naelektrisanja drži na okupu na tako malom prostoru. Rasejanja alfa čestica na lakim jezgrima svojom "anomalnošću"

upućuju na postojanje takvih sila u jezgrima;

- Bilo je nemoguće dobiti celobrojne spinove pojedinih jezgara:  $^{14}\text{N}$ , deuteron, itd.
- Energije tako jako konfiniranih elektrona bi po relacijama neodređenosti morale biti mnogo veće od onih koje se opažaju u spektrima beta zračenja a električno privlačenje sa protonom ne može da obezbedi tolike vezivne energije,
- Magnetizam jezgara po redu veličine odgovara nuklearnom a ne Bohrovom magnetonu.

Događaji koji su u tom, krucijalnim otkrićima izuzetno bogatom periodu, najznačajniji za našu priču su sledeći. Još pre otkrića spina Pauli (1924) sugerira da se hiperfina struktura optičkih spektara javlja zbog interakcije magnetnih momenata elektrona i jezgra a iste godine Han i Majtner otkrivaju internu konverziju. 1927. Elis i Vuster (Ellis, Wooster) demonstriraju da se energija (prividno) ne konzervira u beta raspadu. 1929 Dirak (Dirac) pogrešno predviđa da je šupljina u moru elektrona negativne energije, koja sledi kao mogućnost iz njegove nove relativističke kvantne teorije, proton. Kasnije ovo koriguje i predviđa postojanje antimaterije. 1929. Hajtler i Hercberg (Heitler, Herzberg) pokazuju da bi azot, sa 14 protona i 7 elektrona u jezgru, morao da ima poluceli spin, a ima ga celobrojni (tzv. "azotna katastrofa"). Ovo je eksplicitno tražilo da elektrona nema u jezgru i da postoji neutron! U to vreme završava se formulacija i kvantne elektrodinamike. Pauli (1930) postulira postojanje neutrina da bi spasao zakone održanja energije, impulsa i momenta impulsa. Ispostaviće se da je neutrino bitan parnjak elektrona i u konzervaciji leptonskog broja.

Konačno 1932. Čedvik (Chadwick) otkriva neutron i otada elektron definitivno više ne postoji u jezgru! No to znači da pored nove, treće po redu, nuklearne sile (za čiju je početnu formulaciju najzaslužniji verovatno Hajzenberg (Heisenberg)), koja će držati nukleone na okupu, mora postojati još neka koja će kreirati beta elektron [i neutrino (ono "anti" je došlo kasnije)] u trenutku emisije. Anderson 1932. otkriva pozitivni elektron u kosmičkim zracima (najverovatnije iz elektromagnetne lavine) a 1934. Žolio-Kiri (Joliot-Curie) pozitronski raspad u kome se pozitron emituje iz jezgra (uzgred, to je i prva veštačka radioaktivnost!). Elektromagnetne lavine iz kosmičkog zračenja i uopšte sekundarno meko

ali i tvrdo kosmičko zračenje je osnovni spontani izvor visokoenergijskih elektrona na Zemlji. Proizvodnja parova elektromagnetnim zračenjem i anihilacija parova u laboratoriji otkriveni su 1933. (Joliot-Curie) a tu negde, 1934., Alihanov i Alihanjan otkrivaju internu kreaciju parova. 1933-1934. Fermi postulira postojanje četvrte, slabe, sile u prirodi koja treba da kreira leptonski par u beta raspadu; više se ne emituje postojeći elektron iz jezgra već se kreira novi! Njegova teorija beta raspada u kojoj je oblik kontinuiranog beta spektra dobro reprodukovano već statističkim faktorom najbolja je potvrda postojanja još zadugo neviđenog neutrina. 1935 Jukava (Yukawa) formuliše rudimentarnu mezonsku teoriju nuklearne sile, u kojoj elektron ne učestvuje. Time je epizoda postojanja elektrona u jezgru konačno završena. Može se reći da je razrešenje ovog strukturnog problema, sa konsekvatnim *kompletiranjem tipova sila u prirodi*, predstavljalo pravo finale epohe rađanja moderne fizike čestica i polja.

Po isteku ovog perioda učinjena su još neka otkrića relevantna za formiranje ispravne slike o odnosu jezgra (sada bez elektrona) i atomskih i vanatomskih elektrona. 1937. Anderson u kosmičkom zračenju otkriva mion - teški elektron - a 1938. Štiklberg (Stückelberg) formuliše zakon održanja barionskog broja. Održanje leptonskog broja Fermi formuliše četrdesetih godina. 1937. Alvarez otkriva elektronski zahvat, poslednji od načina da elektron nestane iz atomske orbite (koga su 1935. predvideli Jukava i Sakata) a 1938. Bete (Bethe) i Kričfild (Critchfield) postuliraju osnovnu reakciju stelarnog p-p ciklusa. Tako je konačno zaokruženo shvatanje da iako elektrona u jezgru nema ono može da ih proizvodi (u beta minus raspadu) i da ih uništava (u beta plus raspadu, gde to radi proizvođači pozitrona, kao i u elektronskom zahvatu, gde ih uništava direktno) - što se može formulisati tako da su *jezgra izvori i ponori elektrona*. Pitanje je, prema tome, koji su od tih suprotnih procesa zastupljeniji u prirodi, sa osnovnim zaključkom da broj elektrona u vasioni, čak iako se leptonski i barionski brojevi egzaktno konzerviraju, svakako nije stalan i da evolucija tog broja zavisi od detalja nuklearne evolucije materije. U sledećem poglavlju napustićemo dosadašnji istorijski pristup i, pored pregleda glavnih do dana današnjeg upoznatih procesa u kojima učestvuju jezgra i elektroni, pokušaćemo da damo odgovor i na ovo pitanje.



### 3. PREGLED OSNOVNIH ATOMSKIH PROCESA U KOJIMA UČESTVUJU JEZGRA I NUKLEARNIH U KOJIMA UČESTVUJU ELEKTRONI

Pojave u kojima učestvuju jezgra i elektroni su vrlo raznovrsne i mnogobrojne i toj problematici posvećen je veliki broj monografija - klasika su monografija Starodubceva i Romanova [3] i neizbežno, značajnim svojim delom i Biblija eksperimentalne nuklearne spektroskopije Zigbana (Siegbahn) [4], a od onih sa novijim rezultatima Levona i Nemeca [5]. Elektromagnetni aspekti detaljno su izloženi u knjizi Hamiltona [6] a slabi kod Groca (Grotz) i Klapdora [7]. Sveži doprinosi nalaze se u vrlo obimnoj ali prilično heterogenoj periodičnoj literaturi. Mi ćemo pokušati da napravimo jedan sintetički pogled na ovu veliku oblast pojava i izvučemo neke opšte zaključke. One dovoljno opštepoznate aspekte pritom ćemo samo u najkraćim crtama pomenuti. Polazeći od niskoenergijskih i idući ka visokoenergijskim u ove pojave mi ćemo uključiti sledeće:

- A. Međusobni uticaji jezgara i molekula;
- B. Međusobni uticaji jezgara i atoma;
- C. Nefotonski elektromagnetni modovi deekscitacije pobuđenih nuklearnih stanja;
- D. Procesi beta raspada;
- E. Interakcije neatomskih elektrona i jezgara; i
- F. Ostale pojave relevantne istovremeno i za jezgra i elektrone (reorganizacija vakuuma u teškojonskim sudarima, raspad nukleona, raspad elektrona, itd.)

Osnovna polazna postavka za ispravno razumevanje svih međuodnosa jezgro-elektroni jeste shvatanje da je atom jedinstveni vezani sistem koji se samo u boljoj ili lošijoj aproksimaciji, koja se inače bez dovoljno upozorenja uobičajeno podrazumeva, može smatrati sastavljenim od dva neinteragujuća podsistema - jezgra i atomskih elektrona. U ovim aproksimacijama jezgro se smatra sistemom zatvorenim jakim nuklearnim silama u kome je električno odbijanje nukleona samo mala perturbacija, a atomski sistem se izgrađuje u tom električnom polju tačkastog i nepokretnog jezgra. Ustvari, svaka promena koja se odigra u nekom od ovih podsistema odslikava se na stanje celine a time i na stanje onog

drugog podsistema ili, rečeno drugačije, nijedna pojava nije ni čisto atomska ni čisto nuklearna. Zbog slabosti sprege među podsistemima i velike razlike u skali energija i masa ove promene u nekim situacijama mogu biti male i teško opservabilne ali u drugim mogu biti ne samo velike već mogu činiti i dominantnu manifestaciju pojave.

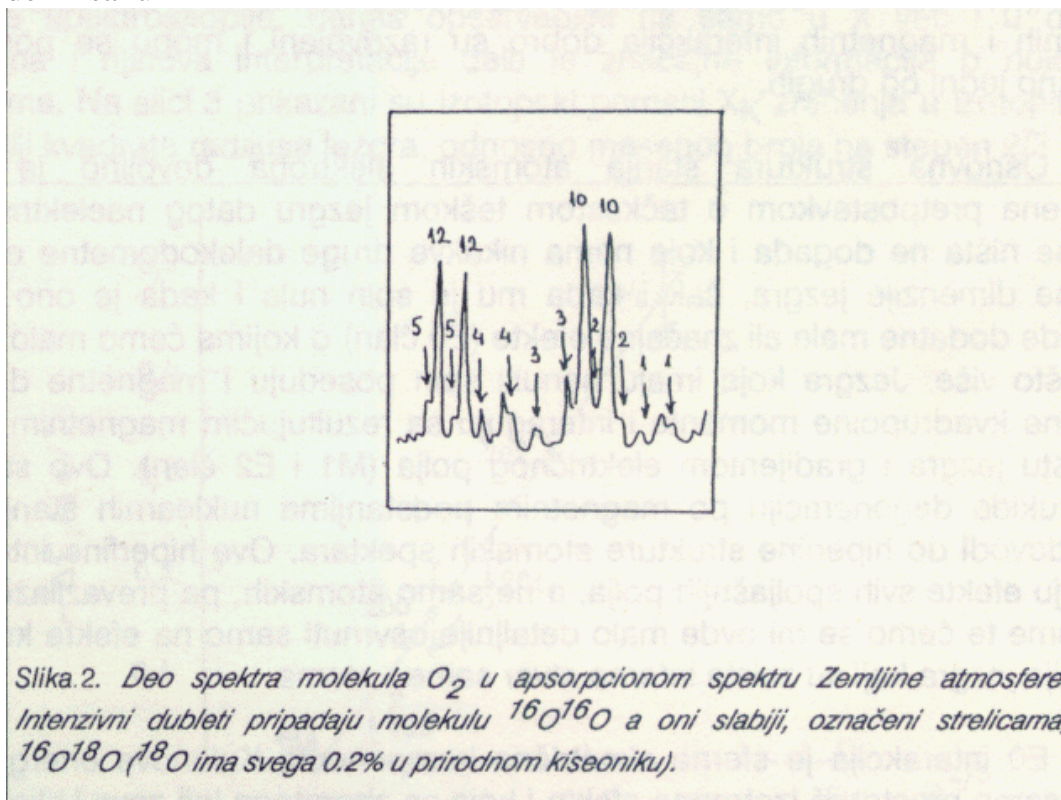
## A. MEĐUSOBNI UTICAJI JEZGARA I MOLEKULA

Međusobne uticaje nadmolekulskog okruženja (u šta se danas ne uračunava samo interagujući kolektivitet atoma i molekula već i uticaj mogućih eksternih polja) i jezgara, što inače čini osnovu velike oblasti primene nuklearnih metoda u fizici kondenzovanog stanja, teško možemo podvesti pod našu temu odnosa elektrona i jezgra i ovde je nećemo diskutovati već ćemo pregled početi od odnosa molekula i njegovih jezgara kao efekata najnižih energija u lestvici odnosa elektron-jezgro.

Prva grupa posledica odnosa molekul-jezgro čini oblast hiperfinskih interakcija, koje su u principu iste kao one u atomskom slučaju i u slučaju kondenzovanih sredina te ćemo ih ovde samo ukratko pomenuti. Kadgod molekul poseduje jezgro sa spinom većim ili jednakim 1 verovatno je da će njegov mikrotalasni spektar imati uočljivu hiperfinu strukturu. Ova je pojava prvi put detektovana još u ranim danima mikrotalasne spektroskopije (1946). Iz detaljnog interpretiranja ove strukture određeni su mnogi nuklearni spinovi i kvadrupolni momenti. Magnetna hiperfina struktura zavisi od tipa molekula znatno više od kvadrupolne i zato je teža za kvantitativnu interpretaciju. Sa svoje starne jezgra ovo doživljavaju kao ukidanje degeneracije po magnetnim podstanjima, što se opaža u nuklearnoj magnetnoj rezonansi, u Mesbauerovim (Mössbauer) spektrima, po perturbacijama ugaonih distribucija i korelacija nuklearnih zračenja što, osećajući položaj jezgra u molekulu, predstavlja osnov za primene ovih metoda u hemiji.

Relativno egzotičan uticaj osobina jezgra specifično na molekul ispoljava se kroz dejstvo Paulijeovog principa, čija implementacija najbolje demonstrira zatvorenost i celovitost molekula kao sistema interagujućih podsistema. Ovakvi zaključci vezani su za činjenicu da su sva jezgra sa parnim A bozoni a ona sa neparnim A fermioni. Za, naprimer, dvoatomni molekul istih atoma i jezgara (homonuklearni diatomni molekuli) čija su jezgra parna i nultog spina (recimo  $^{16}\text{O}_2$ ) spinski deo nuklearne funkcije stanja je uvek simetričan pa je i prostorni deo takođe uvek simetričan. Ovo, budući da je zamena mesta dva bozona ekvivalentna operaciji parnosti te da simetrična funkcija stanja istovremeno mora biti i parna, znači da sva

stanja ovakvog molekula, pošto elektronsko i vibraciono stanje imaju definisanu



parnost, moraju imati samo jednu parnost, odnosno određenu parnost orbitnog momenta impulsa. U rotacionim trakastim spektrima ovo se manifestuje postojanjem samo naizmeničnih linija pri čemu one sa jednom parnosti  $l$  nedostaju. Ako se ova nuklearna simetrija ukine zamenom jednog jezgra  $^{16}O$  sa  $^{17}O$  ili  $^{18}O$  nedostajuće linije će se pojaviti jer će obe parnosti momenta impulsa biti dozvoljene (Sl.2). Slično drastični izotopski efekti u rotacionim spektrima javljaju se i ako jezgra imaju nenulte spinove. Tada nema ograničenja od statistike ali se javlja alternacija u intenzitetima nivoa jer orto i paramodifikacije (čiji se termovi međusobno ne kombinuju) nemaju istu statističku težinu. Ako je nuklearni spin  $I$  ovaj odnos intenziteta naiz-meničnih linija iznosi  $I/(I+1)$  i odatle su određene vrednosti nekih nuklearnih spinova.

Osim ovih u vibracionim spektrima postoje trivijalni ali ne manje drastični izotopski efekti koji su posledica samo različitih izotopskih masa. Istorijski, ovi izotopski efekti u molekulskim spektrima učinili su nuklearnoj fizici veliku uslugu jer su doveli do otkrića retkih prirodnih izotopa lakih elemenata: vodonika, ugljenika, azota i kiseonika;  $^2H$  (deuterijum),  $^{13}C$ ,

$^{15}\text{N}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ . Takođe, merenja ovih efekata omogućila su izuzetno tačna određivanja relativnih izotopskih masa mnogih nuklida.

Kao izvestan kuriozitet napomenimo na kraju da je pojava izotopskog efekta u molekulskim spektrima pružila i direktan eksperimentalni dokaz postojanja nenultog osnovnog vibracionog kvanta, odnosno potvrdila važnost izraza  $(v+1/2)h\omega$  za energiju oscilatora umesto  $vh\omega$  iz prvobitne kvantne teorije.

## B. MEĐUSOBNI UTICAJI JEZGRA I ATOMA

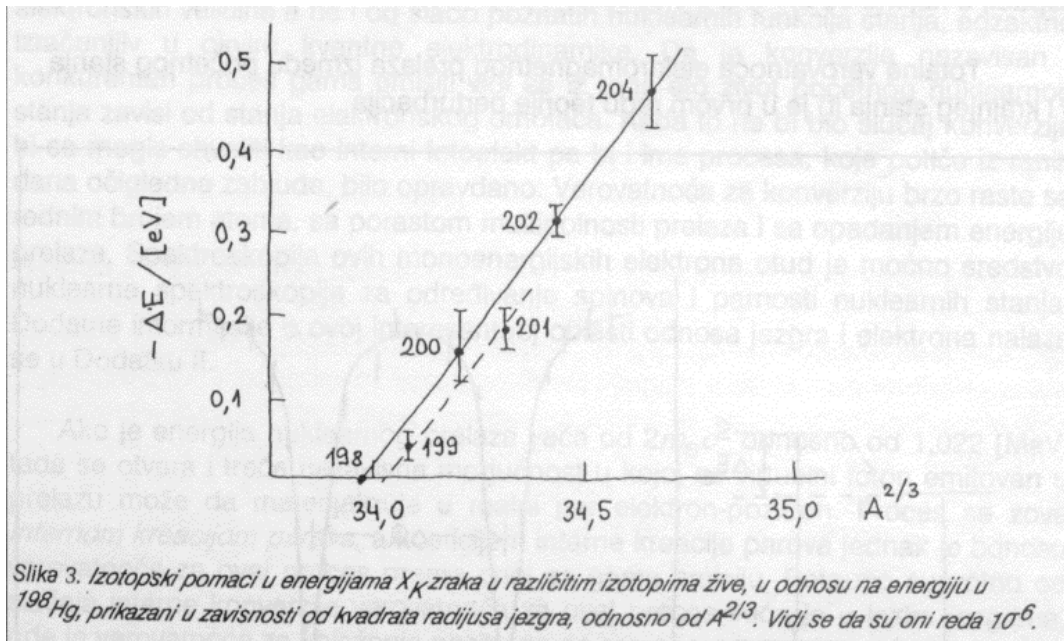
Odnos jezgro - atomski elektroni određen je prvenstveno karakterom elektromagnetne interakcije između ova dva podsistema jednog atoma. Hamiltonijan ove interakcije razlaže se u multipolni red koji zbog konzervacije parnosti u jakim i elektromagnetnim interakcijama i zbog malosti viših članova sadrži praktično samo električni monopolni (E0) i kvadrupolni (E2) i magnetni dipolni (M1) član. I sa teorijskog i sa eksperimentalnog stanovišta efekti električnih i magnetnih interakcija dobro su razdvojeni i mogu se posmatrati nezavisno jedni od drugih.

Osnovna struktura stanja atomskih elektrona dovoljno je dobro objašnjena pretpostavkom o tačkastom teškom jezgru datog naelektrisanja u kome se ništa ne događa i koje nema nikakve druge dalekometne osobine. Konačne dimenzije jezgra, čak i kada mu je spin nula i kada je ono sferno, proizvode dodatne male ali značajne efekte (E0 član) o kojima ćemo malo kasnije reći nešto više. Jezgra koja imaju nenulti spin poseduju i magnetne dipolne i električne kvadrupolne momente i interaguju sa rezultujućim magnetnim poljem na mestu jezgra i gradijentom električnog polja (M1 i E2 član). Ovo sa jedne strane ukida degeneraciju po magnetnim podstanjima nuklearnih stanja a sa druge dovodi do hiperfine strukture atomskih spektara. Ove hiperfine interakcije uključuju efekte svih spoljašnjih polja, a ne samo atomskih, pa prevazilaze okvire naše teme te ćemo se mi ovde malo detaljnije osvrnuti samo na efekte konačnih dimenzija jezgra koji su zaista interna stvar samog atoma.

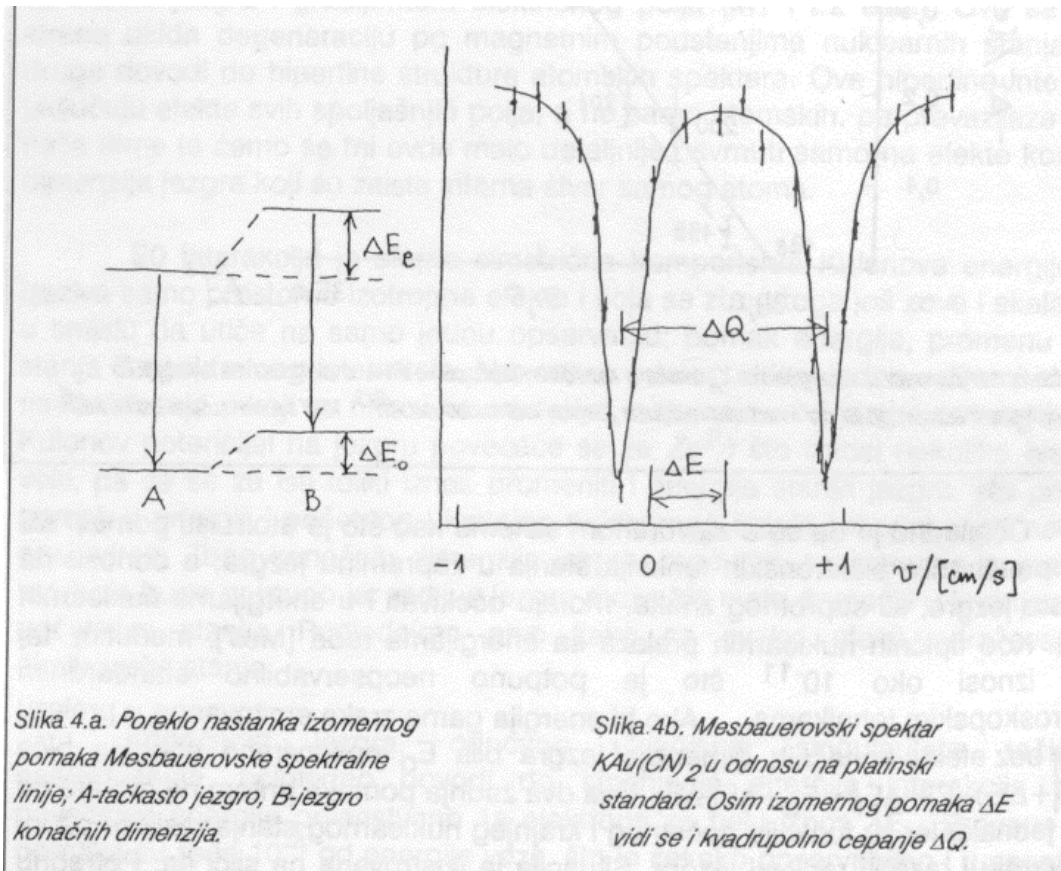
E0 interakcija je sferno simetrična komponenta Kulonove energije koja izaziva samo prostorno izotropne efekte i koja se zbog toga još zove i

skalarnom, u smislu da utiče na samo jednu opservablu; pomak energije, promenu života stanja ili spektralnog intenziteta. Ako se, naprimer, ukloni jedan valentni elektron naelektrisanja  $e$  koji se nalazi na srednjem rastojanju  $r$  od jezgra rednog broja  $Z$  Kulonov potencijal na jezgru povećaće se za  $Ze^2/r$  što iznosi nekoliko elektron-volti, pa će se za isti toliki iznos promeniti i energija stanja jezgra. No pošto je pomak u energiji i početnog i krajnjeg nuklearnog stanja isti ovaj efekt neće biti opserviran. Zbog konačnih dimenzija jezgra, međutim, to potiranje pomaka ne mora da bude potpuno jer radijus jezgra može biti malo drugačiji u krajnjem no u početnom stanju. Pogledajmo prvo kako se ovakvi efekti odražavaju na elektronska stanja.

Konačnost jezgra, odnosno uklanjanje singulariteta tačkastog naelektrisanja, očigledno dovodi do smanjenja energije interakcije tj. do povećanja energije prvenstveno 1s elektrona za neki iznos  $\Delta E$ . Procene ovog pomaka su reda  $10^{-4}$  od energije veze, što je itekako opservabilno i u apsolutnim merenjima energija atomskih zračenja ali poznavanje elektronskih funkcija stanja nije dovoljno dobro da bi se efekt pouzdano interpretirao. Zato se pribegava relativnim merenjima. Ako se, recimo, mere energije  $X_K$  zračenja (koje odgovaraju  $2p \rightarrow 1s$  prelazima) u dva susedna izotopa masenih brojeva  $A$  i  $A'$  i ako su te energije  $E(A)$  i  $E(A')$  njihova razlika biće jednaka  $E_{2p}(A) - E_{1s}(A) - E_{2p}(A') + E_{1s}(A') \approx E_{1s}(A') - E_{1s}(A) = \Delta E(A') - \Delta E(A)$ , jer, prvo, 2p elektroni slabo osećaju efekte konačnih dimenzija jezgra i drugo, jer su energije veze za tačkasto jezgro iste za oba izotopa. Razlika energija  $X_K$  zračenja u dva izotopa je tako jednaka razlici efekata konačnih dimenzija jezgra u tim atomima i ta se razlika zove *izotopskim pomakom*. Izotopski pomaci su, zahvaljujući tehnikama laserske spektroskopije, danas opservabilni ne samo u X već i u optičkim spektrima i njihova interpretacija dala je značajne informacije o nuklearnim radijusima. Na slici 3 prikazani su izotopski pomaci  $X_K$  zračenja u izotopima žive u funkciji kvadrata radijusa jezgra, odnosno masenog broja na stepen  $2/3$  [8].



Očigledno je da se u zatvorenom sistemu kao što je atom isti pomaci  $\Delta E$  usled penetracije elektronskih funkcija stanja u zapreminu jezgra, u odnosu na tačkasto jezgro, ali suprotnog znaka, moraju očekivati i u energijama nuklearnih stanja. Kod tipičnih nuklearnih prelaza sa energijama reda MeV, međutim, taj efekt iznosi oko  $10^{-11}$  što je potpuno neopservabilno standardnim spektroskopskim tehnikama. Ako bi energija gama zraka emitovanog u prelazu  $E_i \rightarrow E_f$  bez efekta konačnih dimenzija jezgra bila  $E_0$  opservirana energija biće  $E = (E_i + \Delta E_i) - (E_f + \Delta E_f) = E_0 + \Delta E_i - \Delta E_f$ . Ova dva zadnja pomaka pritom ne moraju da budu jednaka jer su funkcije početnog i krajnjeg nuklearnog stanja različite pa im odgovaraju i različiti radijusi jezgra. Situacija je ilustrovana na slici 4a. Potrebnu osetljivost da bi se ovaj efekt video poseduje samo Mesbauerovska spektroskopija, ali se ni tu on ne može opaziti ako su pomaci isti u izvoru i u apsorberu. Ako su pomaci različiti, što će biti slučaj ako su u izvoru i apsorberu Mesbauerovska jezgra u različitim hemijskim stanjima, onda će se opaziti pomak u odnosu na situaciju kada su oni u istim stanjima. Ovaj se efekt naziva *izomernim pomakom*. Jedan lep primer izomernog pomaka prikazan je na slici 4.b. Neki dodatni aspekti međudnosa jezgro-atom diskutovani su u Dodatku I.



### C. NEFOTONSKI ELEKTROMAGNETNI MODOVI DEEKSCITACIJE POBUĐENIH NUKLEARNIH STANJA

Pobuđena stanja jezgara deekscitiraju se konkurentno elektromagnetnim, slabim i jakim interakcijama, odnosno procesima gama, beta i čestičnih raspada respektivno, ako je to dozvoljeno svim egzaktnim zakonima održanja. Za našu temu od značaja su neki vidovi gama raspada, o kojima će ovde i biti reči, i beta raspadi, o kojima će biti reči u sledećem odeljku.

Totalna verovatnoća elektromagnetnog prelaza između početnog stanja  $|i\rangle$  i krajnjeg stanja  $|f\rangle$  je u prvom redu teorije perturbacija proporcionalna nekoherentnom zbiru kvadrata matričnih elemenata onih multipolnih operatora koji su dozvoljeni izbornim pravilima po momentu impulsa i parnosti, između ovih stanja. U nuklearnom slučaju moguće su razne konfiguracije početnih i krajnjih stanja. Radijacionoj deekscitaciji



(emisiji gama zračenja) odgovaraju čista nuklearna stanja i u inicijalnom i u finalnom stanju.

Druga mogućnost je emisija atomskog elektrona umesto gama zraka, kada je početno stanje jednako proizvodu između nuklearnog i vezanog elektronskog a finalno proizvodu između odgovarajućeg nuklearnog i slobodnog elektronskog stanja. Proces se zove *internom konverzijom* i karakteriše se takozvanim konverzionim koeficijentom. On je definisan kao količnik verovatnoće za deekscitaciju emisijom atomskog elektrona i verovatnoće za emisiju gama zračenja. U aproksimaciji tačkastog jezgra u izrazu za konverzioni koeficijent nuklearni matrični elementi se krata te je on, budući da zavisi samo od elektronskih veličina a ne i od slabo poznatih nuklearnih funkcija stanja, egzaktno izračunljiv u okviru kvantne elektrodinamike. Da je konverzija nezavisan i konkurentan proces gama emisiji vidi se iz toga što život početnog nuklearnog stanja zavisi od stanja elektronskog omotača. Kada to ne bi bio slučaj konverzija bi se mogla shvatiti kao interni fotoefekt pa bi i ime procesa, koje potiče iz ranih dana očigledne zablude, bilo opravdano. Verovatnoća za konverziju brzo raste sa rednim brojem atoma, sa porastom multipolnosti prelaza i sa opadanjem energije prelaza. Spektroskopija ovih monoenergijskih elektrona otud je moćno sredstvo nuklearne spektroskopije za određivanje spinova i parnosti nuklearnih stanja. Dodatne informacije o ovoj interesantnoj oblasti odnosa jezgra i elektrona nalaze se u Dodatku II.

Ako je energija nuklearnog prelaza veća od  $2m_e c^2$  odnosno od 1,022 MeV tada se otvara i treća nezavisna mogućnost u kojoj se virtuelni foton emitovan u prelazu može da materijalizuje u realni par elektron-pozitron. Proces se zove *internom kreacijom parova*, a koeficijent interne kreacije parova jednak je odnosu verovatnoće za ovaj proces prema onoj za gama emisiju. Potpuno suprotno od slučaja interne konverzije verovatnoća za ovaj proces veća je u lakim jezgrima, gde je verovatnoća za nalaženje pozitrona na mestu jezgra veća, veća je na višim energijama i na nižim multipolnostima prelaza. Više o ovom fundamentalnom modu deekscitacije može se naći u Dodatku III.

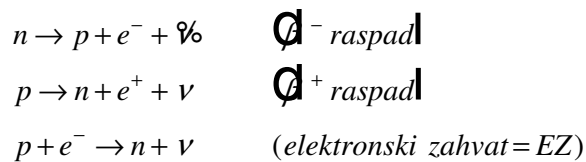
Poseban slučaj u ovom kontekstu čine E0 prelazi, prelazi u kojima se ne menja ni parnost ni spin jezgra i koji zbog toga ne mogu da se ostvare emisijom realnog fotona ali mogu internom konverzijom ili, ako

energija dozvoljava, kreacijom para. Iako je u tom slučaju polje van nuklearne zapremine isto u oba stanja ono, zbog moguće razlike nuklearnih radijusa u tim stanjima, ipak može u njima biti različito. Svaki E0 prelaz, bio čist ili samo multipolna komponenta u nenultom ekvispinski prelazu, otud je čisti penetracioni efekt koji ne bi bio moguć da jezgro nema konačne dimenzije.

Na kraju ovog kratkog pregleda osnovnih načina na koje elektromagnetne promene u jezgru mogu da utiču na elektronska stanja van njega treba spomenuti i uticaje u obratnom smeru. Dovoljno je očigledno, kao što smo već napomenuli, da promena u distribuciji elektronskih gustina treba da utiče na verovatnoću prenosa energije ekscitacije sa jezgra na elektrone. U tom je kontekstu interesantno i naše otkriće da i boravak izvora u jakom polju zračenja sasvim merljivo utiče na život metastabilnog stanja koje se depopuliše prelazom sa velikim konverzionim koeficijentom [9].

#### D. PROCESI BETA RASPADA

U procesima beta raspada odigravaju se spontane (egzoenergijske) promene stanja jezgara pod dejstvom slabih interakcija te one uvek, u bilo kojoj varijanti, uključuju i elektrone. Osnovni vidovi beta raspada zasnovani su na sledećim fundamentalnim procesima:



(Po današnjem gledištu ovde se umesto neutrona ustvari nalazi d-kvark a umesto protona u-kvark, ali je za fenomenologiju ovih procesa to sasvim nebitno.). U  $\beta^-$  raspadima se, dakle, neto kreira jedan elektron a u  $\beta^+$  i EZ se uništava. Protoni i neutroni pritom su vezani u jezgra i to takva da su  $\beta^-$  raspadu podložna jezgra koja su neutron-suficijentna u odnosu na stabilna, a  $\beta^+$  i EZ ona koja su neutron-deficijentna. Dakle, kao što smo napomenuli u uvodu, jezgra su izvori i ponori elektrona. Pitanje koje je ovde od opšteg interesa za filozofiju prirode, jer od njega zavisi kakva je sudbina elektrona u vasioni, je, prema tome, koji od ovih procesa preovlađuju u tokovima

nuklearne evolucije materije. Tom netrivialnom pitanju ćemo posvetiti poslednje poglavlje našeg izlaganja.

Osim ove eksplicitne i sudbonosne veze između fizike jezgra i fizike elektrona postoji i jedna tananija koja se odnosi na energetiku ovih procesa. Energije koje se oslobađaju u ovim, kao uostalom i u svim nuklearnim transformacijama, određene su bilansom atomskih a ne nuklearnih ili nukleonskih masa u početnom i krajnjem stanju. Ovo na najbolji način govori o atomu kao o jedinstvenom vezanom sistemu od  $A+Z$  čestica koje istovremeno interaguju svim poznatim (a verovatno i nepoznatim) statičkim (virtuelnim) interakcijama, opravdava posmatranje svih nuklearnih raspada kao atomskih procesa i ima izvesne suptilne posledice na procese beta raspada, o kojima ćemo sada reći nešto više.

Masa neutralnog atoma datog  $A$  i  $Z$ ,  $M(A,Z)$ , jednaka je:

$$M(A,Z) = Zm_p + Nm_n - B(A,Z) + Zm_e - B(Z)$$

gde je  $B(A,Z)$  ukupna energija veze (jake minus Kulonove) svih nukleona u jezgru i  $B(Z)$  ukupna energija veze (Kulonove) svih elektrona (sada i nadalje  $c=1$ ). Budući da ni u najtežim atomima ne prelazi 1 MeV ova poslednja energija se u uobičajenim energijskim razmatranjima sasvim opravdano zanemaruje. Postoje, međutim, situacije u kojima upravo ove male energije veze elektrona u omotaču dramatično utiču na mogućnost odvijanja nuklearnih procesa u jezgru tog istog atoma demonstrirajući tako apsolutnu neodvojivost atomskih i nuklearnih procesa. Zavisnost  $B(Z)$ , koju je inače za izvesne fine potrebe nemoguće izračunati dovoljno tačno, prikazana je na slici 5. Vidi se da u nuklearnom procesu u kome  $Z$  raste, raste i atomska energija veze, a u kome  $Z$  opada, i ona opada. Za  $\beta^-$  raspad, naprimer, energijski bilans (do na energiju uzmarka) glasi:

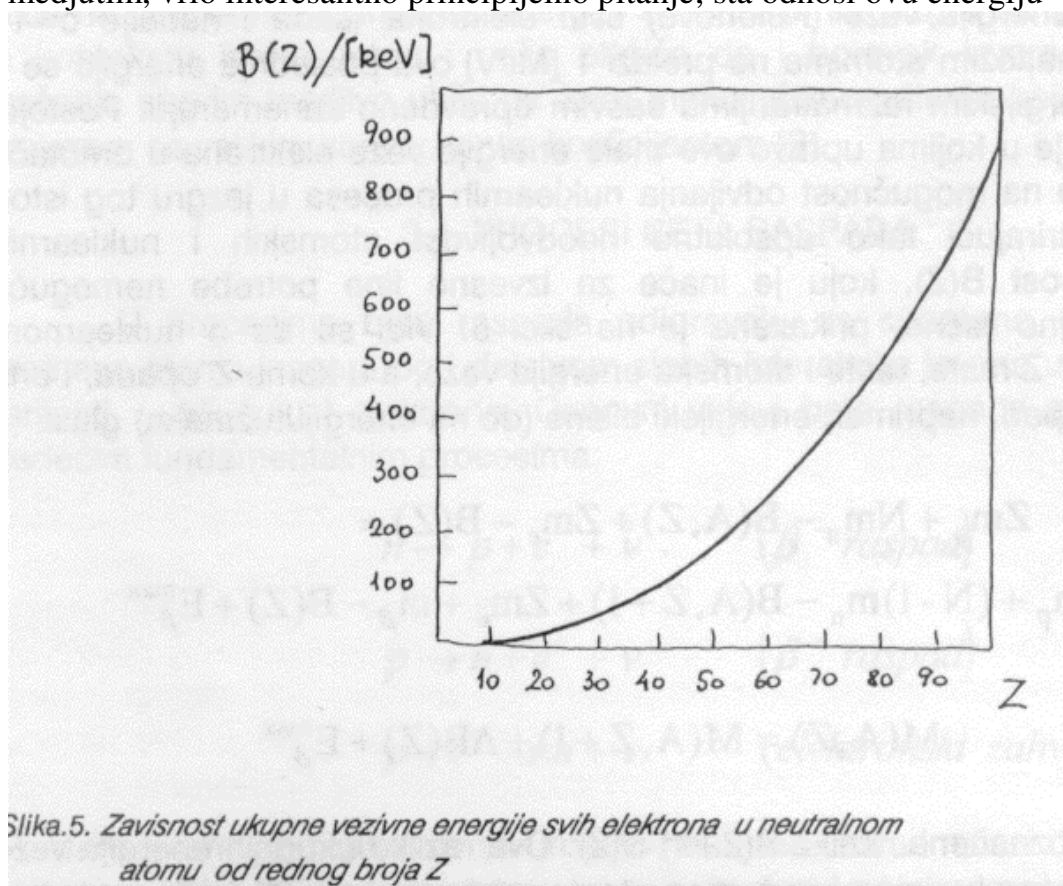
$$\begin{aligned} & Zm_p + Nm_n - B(A,Z) + Zm_e - B(Z) = \\ & (Z+1)m_p + (N-1)m_n - B(A,Z+1) + Zm_e + m_\beta - B(Z) + E_\beta^{\max} \end{aligned}$$

ili

$$M(A,Z) = M(A,Z+1) + \Delta B(Z) + E_\beta^{\max}$$

gde je sa  $\Delta B(Z)$  označena razlika  $B(Z+1) - B(Z)$ . Ova razlika ukupnih energija veze elektrona neutralnog krajnjeg i početnog atoma kreće se od

+65 eV u raspadu tricijuma do +19 keV u slučaju raspada  $^{241}\text{Pu}$  i u većini konkretnih situacija predstavlja nemerljivi iznos energije. Postavlja se, međutim, vrlo interesantno principijelno pitanje; šta odnosi ovu energiju –



Slika.5. Zavisnost ukupne vezivne energije svih elektrona u neutralnom atomu od rednog broja  $Z$

da li uzmačni atom ili leptonski par? Po ovom, naizgled jednostavnom pitanju mišljenja su začuđujuće dugo bila podeljena i tek pedesetih godina je odgovor ustaljen [10]. Dugo se, naime, pretpostavljalo da se atom u procesu nuklearnog raspada pobuđuje adijabatski, odnosno toliko sporo da on ne može da primi razliku vezivnih energija u raspadu i da nju mora da odnosi leptonski par. To je, sa druge strane, značilo da elektron uopšte ne bi mogao da ima energiju manju od  $\Delta B$ , odnosno da bi beta spektar počinjao od te energije. Ovo je, naravno, u većini slučajeva praktično nemoguće izmeriti, a jedan od retkih izuzetaka je već pomenuti raspad  $^{241}\text{Pu}$  sa maksimalnom energijom beta spektra od 20,5 keV i razlikom energija veze od +19 keV, gde bi ovaj efekt bio dovoljno očigledan uprkos nemogućnosti merenja samog početka spektra. Merenja iz 1952. [11] dovoljno su jasno pokazala da elektronski spektar počinje od nule a time i da energiju  $\Delta B$  mora da odnosi uzmačni atom kao energiju izvesne ekscitacije. Ovo je definitivno potvrdilo da je u nuklearnim procesima podela energije na atomsku i nuklearnu neopravdana i da su nuklearni i

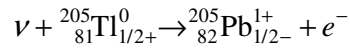
odgovarajući atomski prelazi jedinstven proces. U slučaju beta raspada on uključuje prelaz nukleona iz jednog stanja u drugo, emisiju leptonskog para i uzmak rezidualnog atoma već u pobuđenom stanju  $\Delta B$ , sve to realizovano simultano (bolje reći atemporalno), kao jedinstven proces koji mora da zadovolji sve zakone održanja.

Izvesni beta raspadi u stanja diskretnog spektra su primeri nuklearnih procesa koji se u potpunosti odvijaju "na račun" atomske energije i time na najbolji način potvrđuju gornje zaključke. Rane procene verovatnoće ovakvih procesa [12], u kojima bi finalno stanje  $\beta$  elektrona bilo neko vezano atomsko stanje, sugerirale su da bi se efekt možda mogao opservirati po zavisnosti života za beta raspad od hemijskog stanja atoma. Do danas, međutim, ovo nije nedvosmisleno opaženo. No zato je, doduše tek nedavno, opažen jedan specijalan vid beta raspada u vezano stanje koji upravo spada u gore pomenutu kategoriju.

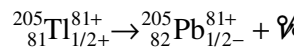
Ispostavlja se, naime, da među svim beta radioaktivnim izotopima postoje tri sa tako malom Q-vrednošću ( $^{163}\text{Ho} \rightarrow ^{163}\text{Dy}$ ,  $^{187}\text{Re} \rightarrow ^{187}\text{Os}$ ,  $^{205}\text{Pb} \rightarrow ^{205}\text{Tl}$ ) da se, ako se posmatraju samo gola njihova jezgra, kao bitno brži, ili čak kao jedini način raspada, javlja beta raspad u vezano stanje. Ovo je postalo moguće detektovati tek sa pojavom akumulirajućeg prstena za teške jone (ESR u GSI Darmstadt) gde je po opadanju struje cirkulišućih potpuno jonizovanih atoma moguće izmeriti život ovakvog procesa. Ovaj gotovo neverovatan eksperiment u kome je izmeren život raspada inače stabilnog disprozijuma  $^{163}\text{Dy}^{66+} \rightarrow ^{163}\text{Ho}^{66+} + \beta^-(1s) + \nu$  nalazi se opisan u ref. [13]. Da bismo bolje ilustrovali o čemu se ovde radi mi ćemo malo detaljnije razmotriti interesantan slučaj  $^{205}\text{Tl}$  koji je jedan od mogućih detektora solarnih neutrina i koji još uvek čeka da bude izmeren.

Na slici 6 prikazan je relevantni deo sheme raspada  $^{205}\text{Pb}$ . Izotop  $^{205}\text{Tl}$  u svom osnovnom stanju ( $1/2^+$ ) je stabilan i zahvatom neutrina najverovatnije prelazi u prvo pobuđeno stanje od 2,3 keV ( $1/2^-$ ) dugoživećeg (15 miliona godina) elektron-zahvatnog izotopa  $^{205}\text{Pb}$  čija akumulacija u mineralu talijuma, shodno tome, potencijalno predstavlja meru integralno primljenog fluksa neutrina sa Sunca tokom vremena postojanja minerala. Presek za ovaj zahvat je, međutim, nedovoljno dobro

poznat jer su modelski nuklearni matrični elementi, kao i obično, nedovoljno pouzdani. Simbolički, ovu reakciju pišemo kao:

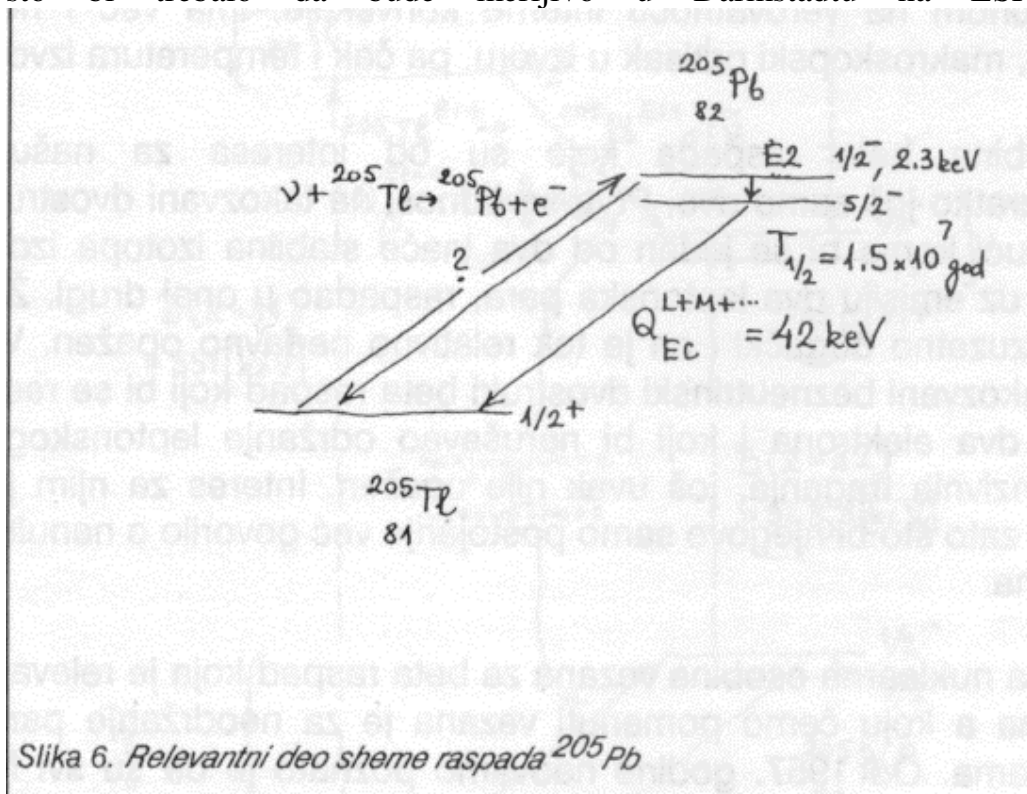


gde gornji desni indeksi označavaju jonizaciona stanja atoma. Kada bi verovatnoća inverznog procesa, elektronskog zahvata (L+M+...) prvog pobuđenog stanja  ${}^{205}\text{Pb}$  u osnovno stanje  ${}^{205}\text{Tl}$ , mogla da se izmeri odatle bi se mogla ekstrahovati i vrednost nuklearnog matričnog elementa tog prelaza koji je isti onaj koji reguliše i verovatnoću interesantnog zahvata. Ovo se, nažalost, iz očiglednih razloga ne može izmeriti. Ispostavlja se da je jedina mogućnost da se dođe do vrednosti matričnog elementa koji spaja ova dva nuklearna stanja merenje verovatnoće za raspad potpuno golog jezgra  ${}^{205}\text{Tl}$  kome se, na račun vezivnih energija elektrona, kao praktično jedini mogući kanal raspada otvara beta raspad u 1s vezano stanje  ${}^{205}\text{Pb}$ , koje će kao jezgro biti u svom prvom pobuđenom stanju a kao atom biti vodonikolik. Ovaj se proces simbolički može pisati kao:

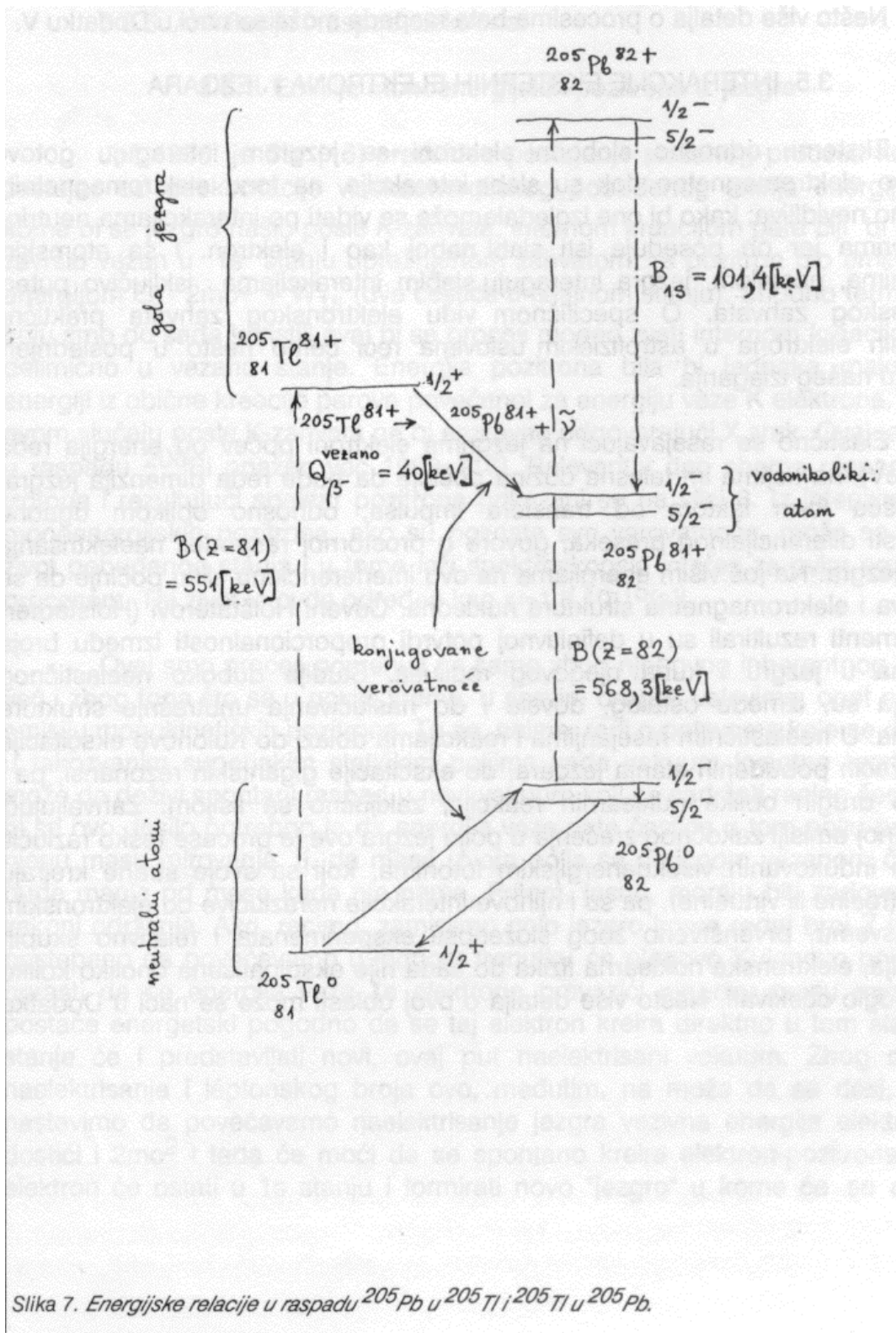


a složeni energijski odnosi u atomu koji dovode dotle da se inače stabilno jezgro raspada trebalo bi da budu jasni sa slike 7. Veoma kompleksna procena [14] je za konstantu ovog raspada dala vrednost od  $4 \cdot 10^{-6} \text{ [h}^{-1}\text{]}$ ,

što bi trebalo da bude merljivo u Darmstadtu na ESR-u.



Slika 6. Relevantni deo sheme raspada  $^{205}\text{Pb}$



Pored sudbonosnog uticaja atomskih elektrona na nuklearni proces u gore opisanom beta raspadu u vezana stanja znatno očigledniji efekt javlja se kod elektronskog zahvata gde odsustvo atomskih elektrona u kompletno



jonizovanom atomu treba da potpuno ukine mogućnost za raspad i da inače radioaktivni izotop učini stabilnim. Poznat slučaj od specijalnog interesa za procese nukleosinteze jeste slučaj lakog  ${}^7\text{Be}$  ( $T_{1/2}=53$  dana) koji je potpuno jonizovan, pa zato i stabilan, već na uobičajenim astrofizičkim temperaturama. Ovo ima posledice koje su vidljive u aktuelnim obilnostima hemijskih elemenata u vasioni. Inače znatno manji, ali ipak opservabilni uticaj na živote zahvatnih izotopa, slično onom na verovatnoću interne konverzije, ima već i hemijsko okruženje atoma, makroskopski pritisak u izvoru, pa čak i temperatura izvora.

Od osobina beta raspada koje su od interesa za našu temu pomenućemo ukratko još samo dve. Prva se odnosi na takozvani dvostruki beta raspad zahvaljujući kome bi se jedan od dva inače stabilna izotopa izobarnog lanca parnog  $A$ , uz emisiju dva leptonska para, raspadao u onaj drugi. Životi za ovaj proces su izuzetno dugački i on je tek relativno nedavno opažen. Varijetet ovog procesa, takozvani bezneutrinski dvostruki beta raspad koji bi se realizovao emisijom samo dva elektrona i koji bi narušavao održanje leptonskog broja, uprkos vrlo intenzivnih traganja, još uvek nije opažen. Interes za njim je veliki između ostalog i zato što bi njegovo samo postojanje već govorilo o nenultoj masi mirovanja neutrina.

Poslednja nuklearna osobina vezana za beta raspad koja je relevantna za osobine elektrona a koju ćemo pomenuti vezana je za neodržanje parnosti u slabim interakcijama. Od 1957. godine naovamo poznato je da su svi fermioni emitovani u beta raspadu (što se tumači  $V-A$  karakterom naelektrisanih slabih struja) levo cirkularno polarisani a antifermioni desno. Iako može izgledati da ovo nema bitnih reperkusija na pojave u prirodi, zahvaljujući tome što zaključno zračenje polarisanih elektrona zadržava njihovu polarizaciju, ova osobina elektrona radiogenog porekla je mogla da ima veliku ulogu u ranim fazama evolucije žive materije. Poznato je naime, još od Pastera (Pasteur), da su aminokiseline koje ulaze u sastav proteina isključivo levi stereoisomeri i da ćelije ne mogu da u procesu biosinteze u proteine ugrađuju desne aminokiseline. Jedna od mogućih pretpostavki (Bonner, 1974) je i da je za ovo narušenje simetrije odgovorna selektivna interakcija levo polarisanog zaključnog zračenja sa racematskom smešom aminokiselina, koja preferentno uništava D-komponentu i pravi izvesnu neravnotežu koja je kasnije biološkom selekcijom dovela do potpune propasti "desnih" sistema. Ovo je moglo da

bude tako u jako ranim fazama evolucije života dok je prirodna radioaktivnost, u kojoj beta minus aktivnosti preovlađuju u odnosu na beta plus aktivnosti, bila na vrlo visokom nivou. Ukoliko je ovo tačno to bi bio verovatno ultimativni primer čvrstog odnosa između visokoenergijskih nuklearnih i niskoenergijskih elektronskih procesa.

Nešto više detalja o procesima beta raspada može se naći u Dodatku IV.

## E. INTERAKCIJE EKSTERNIH ELEKTRONA I JEZGARA

Eksterni, odnosno slobodni elektroni sa jezgrom interaguju gotovo isključivo elektromagnetno dok su slabe interakcije, na fonu elektromagnetnih, praktično nevidljive; kako bi one izgledale može se videti po interakcijama neutrina sa jezgrom jer on poseduje isti slabi naboj kao i elektron. I sa atomskim elektronima, uostalom, jezgra interaguju slabim interakcijama isključivo putem elektronskog zahvata. O specifičnom vidu elektronskog zahvata praktično slobodnih elektrona u astrofizičkim uslovima reći ćemo nešto u poslednjem poglavlju našeg izlaganja.

Elastično se rasejavajući na jezgrom elektroni počev od energija reda 100 MeV, na kojima im talasna dužina počinje da bude reda dimenzija jezgra, zavisnošću form faktora od transfera impulsa, odnosno oblikom ugaone zavisnosti diferencijalnog preseka, govore o prostornoj raspodeli naelektrisanja unutar jezgra. Na još višim energijama na ovu interferencionu sliku počinje da se odražava i elektromagnetna struktura nukleona. Čuveni Hofštaterovi (Hofstadter) eksperimenti rezultirali su u definitivnoj potvrdi proporcionalnosti između broja nukleona u jezgrom i kuba njegovog radijusa. Studije duboko neelastičnog rasejanja su, između ostalog, dovele i do naslućivanja unutrašnje strukture nukleona. U neelastičnim rasejanjima i reakcijama dolazi do Kulonove ekscitacije niskoležećih pobuđenih stanja jezgara, do ekscitacije gigantskih rezonansi, pa i do svih drugih oblika nuklearnih reakcija, zaključno sa fisijom. Zahvaljujući prethodnoj emisiji zakočnog zračenja u polju jezgra ove je procese teško razlučiti od onih indukovanih visokoenergijskim fotonima, koji sa svoje strane kreiraju parove (realne ili virtuelne), pa su i njihove interakcije nerazlučive od elektronskih. Sve u svemu, prvenstveno zbog složenosti eksperimenata i relativno skupih instalacija, elektronska

nuklearna fizika do sada nije eksploatisana onoliko koliko se to moglo očekivati. Nešto više detalja o ovoj oblasti može se naći u Dodatku V.

## F. OSTALE POJAVE RELEVANTNE ISTOVREMENO I ZA JEZGRA I ZA ELEKTRONE

- U ovom odeljku pomenućemo još nekoliko relativno nepovezanih pojava koje ističu još neke interesantne aspekte odnosa jezgara i elektrona. To su:

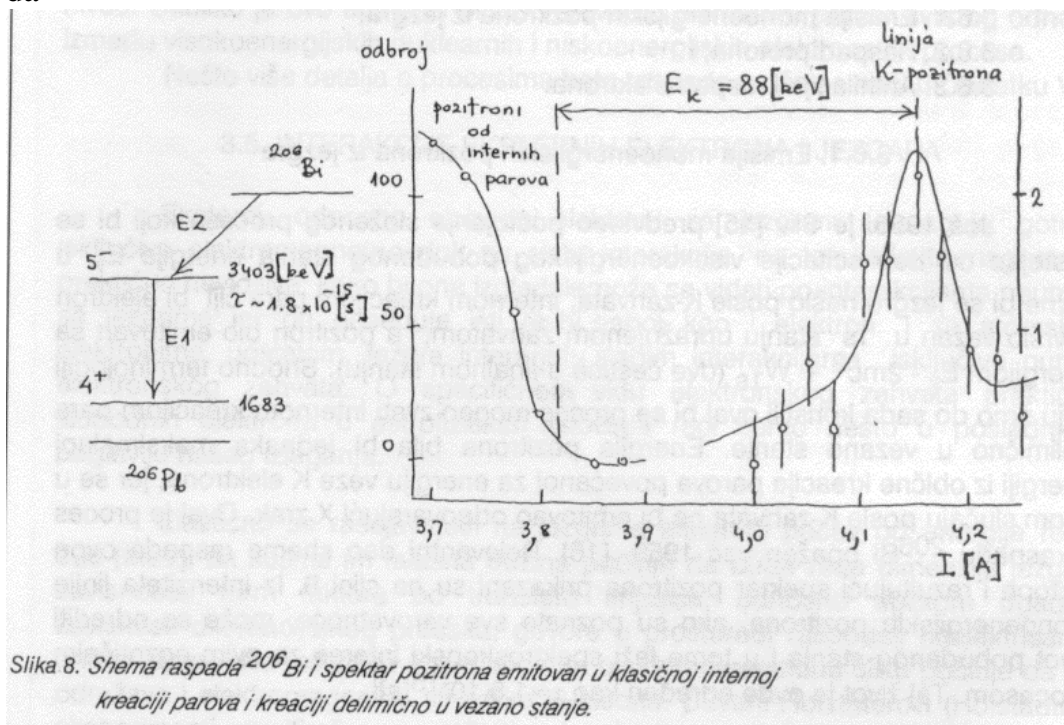
- a. Emisija monoenergijskih pozitrona iz jezgra;
- b. Raspad protona; i
- c. Anihilacija i raspad elektrona.

### a. Emisija monoenergijskih pozitrona iz jezgra

Još 1955. je Sliv [15] predvideo postojanje složenog procesa koji bi se sastojao od deekscitacije visokoenergijskog pobuđenog stanja energije  $E_\gamma$ , u kome bi se jezgro našlo posle K-zahvata, internom kreacijom para čiji bi elektron završio vezan u  $1s$  stanju upražnjenom zahvatom, a pozitron bio emitovan sa energijom  $E_\gamma - 2mc^2 + W_{1s}$  (dve čestice u finalnom stanju). Shodno terminologiji koju smo do sada koristili ovaj bi se proces mogao zvati internom kreacijom para delimično u vezano stanje. Energija pozitrona bila bi jednaka maksimalnoj energiji iz obične kreacije parova povećanoj za energiju veze K elektrona, jer se u ovom slučaju posle K-zahvata ne bi emitovao odgovarajući X zrak. Ovaj je proces u raspadu  $^{206}\text{Bi}$  opažen već 1959. [16]. Relevantni deo sheme raspada ovog izotopa i rezultujući spektar pozitrona prikazani su na slici 8. Iz intenziteta linije monoenergijskih pozitrona, ako su poznate sve verovatnoće, može se odrediti život pobuđenog stanja i u tome leži spektroskopski interes za ovim egzotičnim procesom. Taj život je ovde određen kao  $\tau=1,8 \cdot 10^{-15}\text{s}$ !

Ovaj smo proces pomenuli ne samo zbog njegovog inherentnog interesa već i zbog toga što se u novije vreme, u sasvim drugim uslovima, opet naišlo na emisiju monokinetičkih pozitrona. Tu se, naime, radi o pojavama koje se dešavaju u takozvanim superjakim statičkim poljima kada vakuum kvantne teorije polja može da doživi spontani prelaz u novi vakuum koji će sadržati realne čestice. Da bi se ovo desilo potrebno je da energija veze date čestice u tom polju prevaziđe njenu masu mirovanja, tj. da masa izvora polja sa dotičnom vezanom česticom bude manja od mase

kada nje nema. Pritom, jasno, moraju biti zadovoljeni svi zakoni održanja. Ako, recimo, zamislimo golo jezgro kome redni broj  $Z$  možemo postepeno da

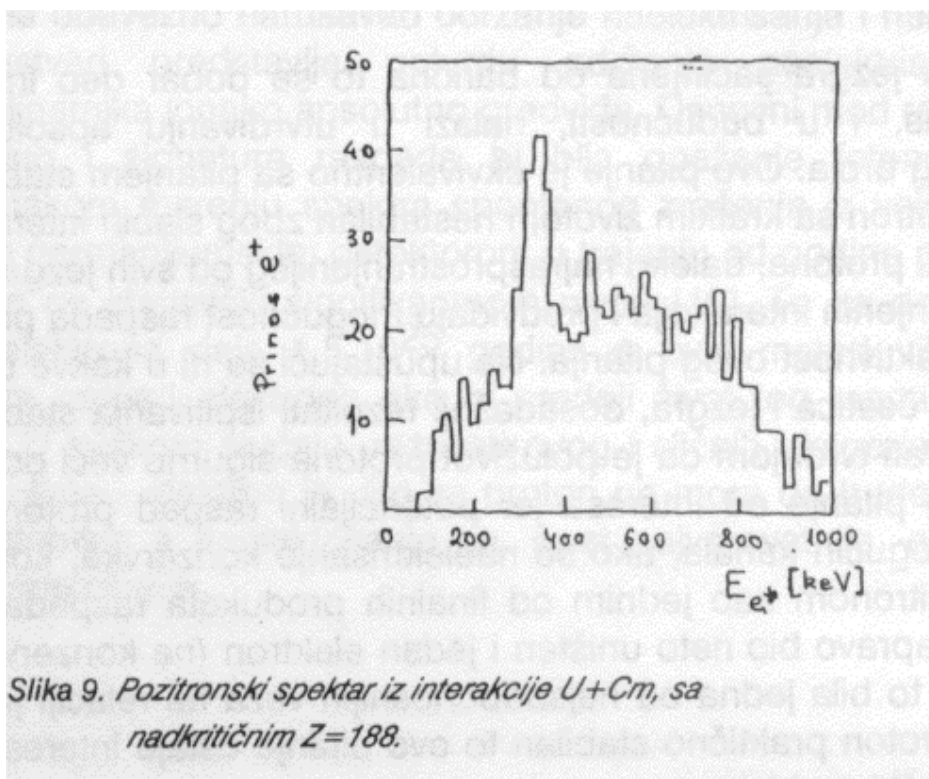


Slika 8. Shema raspada  $^{206}\text{Bi}$  i spektar pozitrona emitovan u klasičnoj internoj kreaciji parova i kreaciji delimično u vezano stanje.

povećavamo u jednom trenutku će njegovo Kulonovo polje toliko porasti da će energija veze  $1s$  elektrona prevazići njegovu masu mirovanja i postaće energetski pogodno da se taj elektron kreira direktno u tom stanju. To stanje će i predstavljati novi, ovaj put naelektrisani vakuum. Zbog održanja naelektrisanja i leptonskog broja ovo, međutim, ne može da se desi, ali ako nastavimo da povećavamo naelektrisanje jezgra vezivna energija elektrona će dostići i  $2mc^2$  i tada će moći da se spontano kreira elektron-pozitronski par - elektron će ostati u  $1s$  stanju i formirati novo "jezgro" u kome će se *de facto* nalaziti i elektron (konačno, eto ga ipak opet i u jezgru!) a pozitron će se emitovati sa definisanom energijom. Polje jezgra će se redukovati i proces će se zaustaviti. Ako se jezgro smatra tačkastim izvorom polja relativistički kvantni račun daje da će za  $Z=1/\alpha=137$  totalna energija  $1s$  elektrona postati nula a vezivna dostići  $mc^2$ , što je šezdesetih godina bilo poznato kao "Z=137 katastrofa". Smatralo se, međutim da efekti konačnih dimenzija jezgra otklanjaju u potpunosti ovaj singularitet. Tek je 1969. egzaktnije uračunavanje konačnih dimenzija jezgra [17] pokazalo da ova pojava ne nestaje već da se samo odlaže; da se ovo neće desiti za  $Z=137$  već za  $Z=145$  a da će energija veze postati  $2mc^2$  za takozvanu kritičnu vrednost naelektrisanja

$Z_{kr} \approx 173$ . Polja koja nastaju na naelektrisanjima većem od ovog zovu se superkritičnim.

Međutim, kao što je dobro poznato, jezgra tolikog rednog broja postaju ekstremno kulonovski nestabilna i konfiguracija koja bi formirala novi vakuum ne može da se ostvari u iole stacionarnom stanju. Kao jedina mogućnost da se ova fundamentalna pojava ispita ostaju niskoenergijske interakcije teških jona u kojima se, makar i za najkraće vreme, može da formira njihov superteški kvazi-vezani sistem zbirnog rednog broja. Ove studije izvođene su u GSI u Darmstadtu počev od pre skoro dvadeset godina i danas su, mereći veliki broj parametara koji karakterišu produkte ovih interakcija, dostigle visok nivo složenosti. No, uprkos tome, situacija sa emisijom monoenergijskih pozitrona iz vakuumske faznog prelaza još uvek nije rasčišćena.



Još u ranim rezultatima ispostavilo se da se u slučajevima kada se formiraju kompozitni sistemi rednog broja  $Z=Z_1+Z_2 > Z_{kr}$ , recimo nuklearni sistem  $U+Pb$  sa  $Z=174$ , pozitroni zaista proizvode i to dosta obilno. Jedan karakterističan spektar pozitrona prikazan je na slici 9. Primećuje se struktura karakteristična za sve ispitivane kompozitne sisteme; širok kontinuum i relativno uska linija na energiji od oko 350

keV, koja se dobija samo za uzan interval energija interagujućih jezgara na kojima se ona praktično samo dodirnu, bez žestoke nuklearne interakcije. Kontinuum potiče od takozvanih dinamičkih procesa kojima doprinose različiti procesi, a najviše direktna proizvodnja parova u interakciji dva jaka Kulonova polja, za koju verovatnoća zavisi kao  $(Z_1+Z_2)^n$ , sa neverovatnih  $n=20$ .

Kao moguće poreklo uske linije monoenergetskih pozitrona, na osnovu odsustva odgovarajućeg gama zračenja, prvo je eliminisana ranije opisana interna kreacija parova delimično u vezano stanje iz nekog od jezgara učesnika i u početku je izgledalo da ona zaista potiče od očekivanog prestrukturiranja vakuuma. U kasnijim, složenijim eksperimentima, međutim, opažene su dodatne karakteristike ove emisije koje više nisu mogle u potpunosti dosledno da se objasne na ovaj način. U najkraćim crtama eksperiment i teorija se u ovoj uzbudljivoj oblasti danas nalaze u sledećoj situaciji:

- Opservirane su linije i u podkritičnim i u nadkritičnim sistemima.
- Postoji nekoliko linija na približno istim energijama u svim slučajevima.
- Širina linija odgovara ostrim linijama Doplerovski proširenim zbog kretanja centra mase sistema.
- Javljaju se i monoenergijski elektroni, korelirani sa monoenergijskim pozitronima.

Svi ovi podaci delimično su se mogli interpretirati kao reorganizacija vakuuma, delimično kao raspad sporo krećućeg česticolikog objekta nazvanog  $X_0$ , mase oko 1,8 MeV, na par elektron-pozitron, a delimično se nisu mogli interpretirati nijednim od ponuđenih scenarija. Interpretacija ove pojave i dan danas je nepotpuna.

## b. Raspad protona

Obzirom da su jezgra sačinjena od bariona to se dobar deo interesa nuklearne fizike danas, i u budućnosti, nalazi u utvrđivanju apsolutnosti konzervacije barionskog broja. Ovo pitanje je ekvivalentno sa pitanjem stabilnosti nukleona, a kako je neutron sa kratkim životom nestabilan zbog slabih interakcija, ostaje pitanje stabilnosti protona, daleko

najrasprostranjenijeg od svih jezgara. To što izvesne teorije ujedinjenih interakcija i predviđaju mogućnost raspada protona samo još povećava atraktivnost ovog pitanja. Ne upuštajući se ni u kakve detalje ove velike oblasti fizike čestica i jezgra, dosadašnji rezultati ispitivanja stabilnosti protona mogu se sumirati tvrdnjom da je poluživot protona sigurno veći od  $10^{32}$  godina. Za nas je ovo pitanje od interesa jer potencijalni raspad protona, po svakom od mnoštva mogućih kanala, ako se naelektrisanje konzervira, konačno mora da završi sa pozitronom kao jednim od finalnih produkata raspada. Ovo opet znači da bi time zapravo bio neto uništen i jedan elektron (ne konzervira se ni leptonski broj), te bi to bila jedna od najsudbonosnijih veza na relaciji jezgro-elektron. No, kako je proton praktično stabilan to ovo pitanje ostaje interesantno uglavnom kao gnoseološki problem.

### c. Anihilacija i raspad elektrona

Osim što se broj elektrona u Vasioni može menjati u procesima pod dejstvom slabih interakcija, o čemu ćemo još govoriti u sledećem odeljku, pa i u gore pomenutom raspadu protona, to se potencijalno može dešavati na bar još dva načina. Jedan od njih je anihilacija sa pozitronom, a drugi je raspad samog elektrona. Obe ove mogućnosti *de facto* nemaju veze sa atomskim jezgrom ali se zračenja koja se dobijaju kao rezultat njihove realizacije detektuju tehnikama nuklearne spektroskopije te smo ih zato ovde i uključili.

Kao prvo, anihilacija bi potencijalno zapečatila konačnu sudbinu elektrona (ali ne samo njega!) ako bi Vasiona bila komponovana od podjednake količine materije i antimaterije. Da li je tako, ili nije, još nema konkluzivnog dokaza. Glavna potvrda bila bi opažanje anihilacionog zračenja od 511 keV (izvorno) iz oblasti u kojima ovi svetovi kontaktno komuniciraju jer sve anihilacije drugih čestica uglavnom ne idu direktno u zračenje. Za sada izgleda da antimaterija, pa i pozitroni, u Vasioni ne postoje. U takvoj situaciji, koja je očigledno realizovana bar u našem lokalitetu, anihilacija se dešava samo sa pozitronima dvojakog porekla; ili onima koji su u elektromagnetnim interakcijama kreirani zajedno sa elektronima pa anihilacija samo restaurira prethodno stanje ne menjajući neto broj elektrona, ili sa onima koji su generisani u slabim interakcijama čija anihilacija onda zaista uništava jedan elektron, ali ipak na račun slabe

interakcije koja je generisala usamljeni pozitron (ali i neutron koji bi, ako bi mu se dozvolio raspad, "vratio" elektron).

Budući da je elektron najlakši lepton njegov raspad je moguć samo u neutrina i fotone. Prisustvo neutrina dozvoljava konzervaciju leptonskog broja u raspadu ali održanje naelektrisanja ne može da se spase. Otud bi raspad elektrona obavezno narušavao održanje naelektrisanja i neuspešnost potrage za njim ustvari predstavlja potvrdu održanja naelektrisanja, koje kvantna elektrodinamika ionako apsolutno predviđa. Osnovni mod raspada bio bi na foton i neutrino i signatura raspada bi bila opažanje fotona od 255.5 keV. U niskofonskom merenju spektra spontanog zračenja iz velike količine neaktivne materije germanijumskim detektorom u trajanju od godine dana ovo zračenje nije opaženo na statistički signifikantnom nivou [18]. To za donju granicu srednjeg života elektrona daje  $1,5 \cdot 10^{25}$  godina a ovaj metod više ne bi mogao da opservira raspad elektrona ako bi srednji život tog raspada bio duži od  $10^{28}$  godina. U svakom slučaju, rezultati ovog i sličnih eksperimenata ne protivureče očekivanjima - elektron je, što za proton ne mora da bude tačno, najverovatnije zaista stabilan a naelektrisanje se, opet najverovatnije, egzaktno konzervira u svim interakcijama.

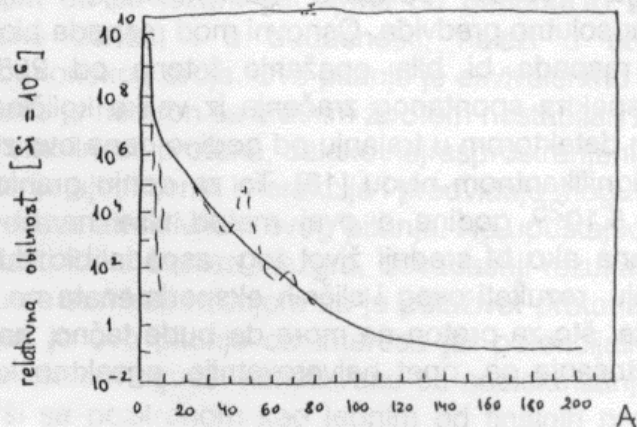
#### **4. ELEKTRON I NUKLEOSINTEZA**

Nukleosinteza je zbirni termin za skup nuklearnih procesa koji u uslovima koji po pretpostavci postoje, ili su postojali, u Vasioni (bez učešća čoveka) dovode do opservirane obilnosti hemijskih elemenata i njihovih izotopa. Kriva obilnosti elemenata u Sunčevom sistemu, čije poreklo treba interpretirati, prikazana je na slici 10a. Osnovni podaci koji u konjukciji sa ovim treba da posluže kao baza za teorije nukleosinteze sistematizovani su u obliku takozvane karte izotopa, ili Segreove karte, u N-Z ravni (slika 10b) i u zavisnosti energije veze po nukleonu od broja nukleona u jezgru datog izotopa (slika 10c).

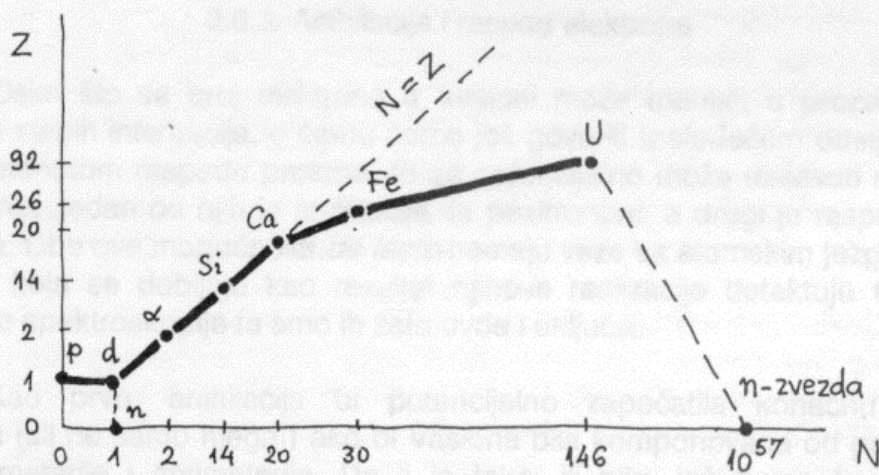
Teorije nukleosinteze, već po suštini problema, obuhvataju maltene sve ono što se o nuklearnim pojavama uopšte zna i mi ćemo pokušati da iz tog velikog materijala ekstrahujemo samo ono što je u krupnim crtama bitno za ulogu elektrona u nukleosintezi (za mnoge važne detalje može se pogledati



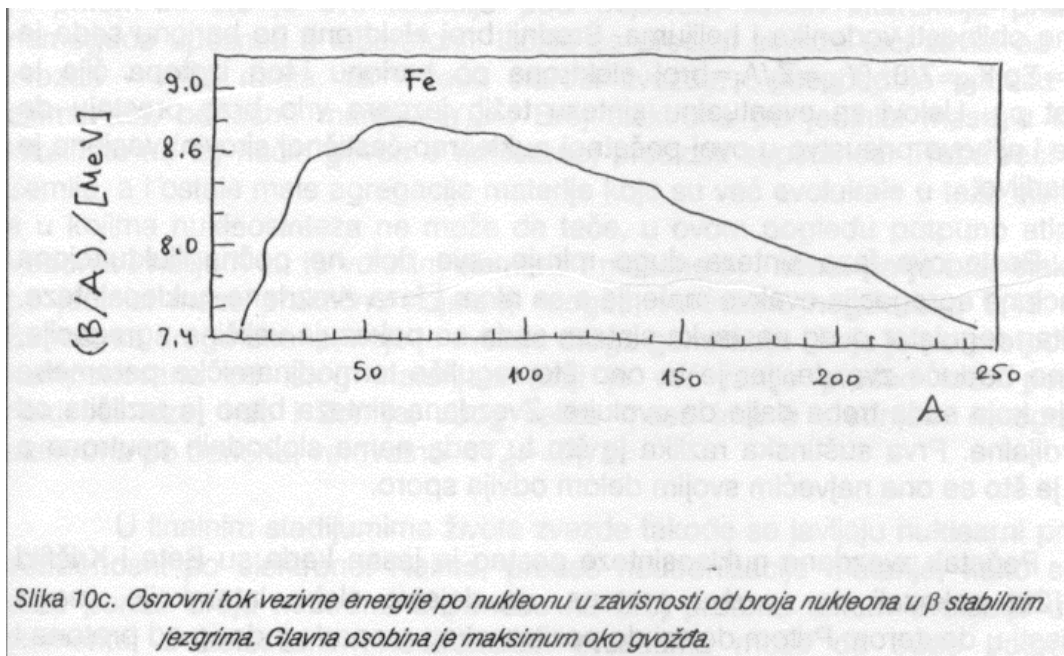
naprimer u ref. [19]).



Slika 10a. Obilnost hemijskih elemenata u Sunčevom sistemu normirana na obilnost Si =  $10^6$ . Prikazan je samo opšti tok.



Slika 10b. Vrlo shematski prikaz karte izotopa. Na liniji  $\beta$  stabilnosti nalazi se oko 270 izotopa. Izotopi iznad linije stabilnosti raspadom uništavaju, a oni ispod linije kreiraju elektrone.



Slika 10c. Osnovni tok vezivne energije po nukleonu u zavisnosti od broja nukleona u  $\beta$  stabilnim jezgrima. Glavna osobina je maksimum oko gvožđa.

Osnovna osobina raspodele obilnosti elemenata je apsolutna predominancija vodonika (oko 75% po masi) i helijuma (oko 25%), pa približno eksponencijalni pad obilnosti do elemenata iz grupe gvožđa i zatim saturacija na niskom nivou obilnosti do kraja, sa tim da zajedno svih težih elemenata od vodonika i helijuma ima samo oko 1% (finu strukturu, koja je inače bitna za detaljnu interpretaciju, potpuno zanemarujemo). Ovo treba objasniti u okvirima tekuće teorije nastanka sveta po kojoj je, preskočimo li metafizički nulti trenutak, stanje koje je dovoljno blizu početnom a relevantno za dalju nuklearnu evoluciju ono u kome je antimetrija već nestala i interakcije se već praktično potpuno razdvojile a broj preostalih protona, neutrona i elektrona međusobno praktično jednak (neutrona, bolcmanovski, ima nešto manje). Veličina koja nas pritom interesuje, jer najbolje odslikava ulogu elektrona u nukleosintezi, je *broj elektrona po barionu*,  $Y_e$ , koji je tu na početku praktično jednak 0,5. Odatle pa nadalje, nukleosinteza ima dve vrlo dobro izdiferencirane faze, primordijalnu i zvezdanu.

Da se od pojedinačnih nukleona i elektrona izgrade jezgra svih elemenata u datoj obilnosti potrebno je proći čitav niz nuklearnih reakcija sinteze. U primordijalnoj sintezi, u kratkom vremenu dok su gustina i temperatura smeše čestica još dovoljne i dok još ima slobodnih neutrona (koji u srednjem žive desetak minuta) osnovne reakcije su one u kojima protoni zahvataju neutrone, tj. u kojima se formiraju deuteroni, pa zatim

fuzija tog deuteronu u helijum. Sve ove reakcije odvijaju se pod dejstvom jakih (i elektromagnetnih) interakcija, koje *ne menjaju*  $Y_e$ , i, ako bi se sav materijal fuzionisao na ovakav način,  $Y_e$  bi ostao 0,5. No paralelno sa ovim teče i raspad neutrona koji, budući da je uzrokovan slabim interakcijama, *menja*  $Y_e$ , koji u ovom slučaju raste. Sve u svemu smatra se da ova faza nuklearne evolucije završava već negde blizu savremene opservirane relativne obilnosti vodonika i helijuma. Srednji broj elektrona po barionu sada je  $\langle Y_e \rangle = \sum p_i Y_{ei} \approx 7/8$  ( $Y_{ei} = Z_i/A_i =$  broj elektrona po barionu  $i$ -tog izotopa čija je obilnost  $p_i$ ). Uslovi za eventualnu sintezu težih jezgara vrlo brzo prestaju da postoje i njihovo prisustvo u ovoj početnoj nuklearno-čestičnoj sirovini Vasiona je zanemarljivo.

Posle ove faze sinteza dugo miruje, sve dok ne počne fluktuaciona gravitaciona agregacija ovakve materije a sa njom i faza zvezdane nukleosinteze. Kao bitan regulator ovog nastavka sinteze sada se pokazuje veličina agregacije, odnosno buduće zvezde, jer je to ono što reguliše termodinamičke parametre materije koja sada treba dalje da evoluiru. Zvezdana sinteza bitno je različita od primordijalne. Prva suštinska razlika je što tu sada nema slobodnih neutrona a druga je što se ona najvećim svojim delom odvija sporo.

Početak zvezdane nukleosinteze postao je jasan kada su Bete i Kričfidl 1938 [20] pokazali da se dva protona, uz dejstvo slabe interakcije, mogu fuzionisati u deutron. Pritom dolazi do pozitronskog raspada jednog od protona i do simultanog zahvata rezidualnog neutrona od strane drugog protona u čijem je polju onaj prvi doživeo raspad. Q-vrednost je 1,44 MeV a maksimalna energija neutrina 0,42 MeV. Presek za ovu reakciju na 1 MeV iznosi, po najboljim procenama, oko  $10^{-47} \text{cm}^2$ . U dobrim laboratorijskim uslovima, gde se 1 mA protona može usmeriti na  $10^{23}$  protona/cm<sup>2</sup>, dešavala bi se jedna ovakva interakcija na milion godina! Ova prva reakcija poznatog p-p ciklusa, u kome se četiri protona fuzionišu u jednu  $\alpha$ -česticu, i jeste ona slaba interakcija koja obezbeđuje potrebnu promenu  $Y_e$  dok ostale, pod dejstvom jake interakcije, više ne menjaju broj elektrona. Već pogled na dalji tok linije stabilnosti u N-Z ravni pokazuje da se ona, do recimo kalcijuma, prostire duž simetrale N-Z ravni, te da se jednom kod helijuma postignut  $Y_e$  do daljeg više ne menja i da se shodno tome sinteza elemenata do kalcijuma odvija u reakcijama koje se odvijaju isključivo uz učešće jakih i elektromagnetnih interakcija. Ove reakcije

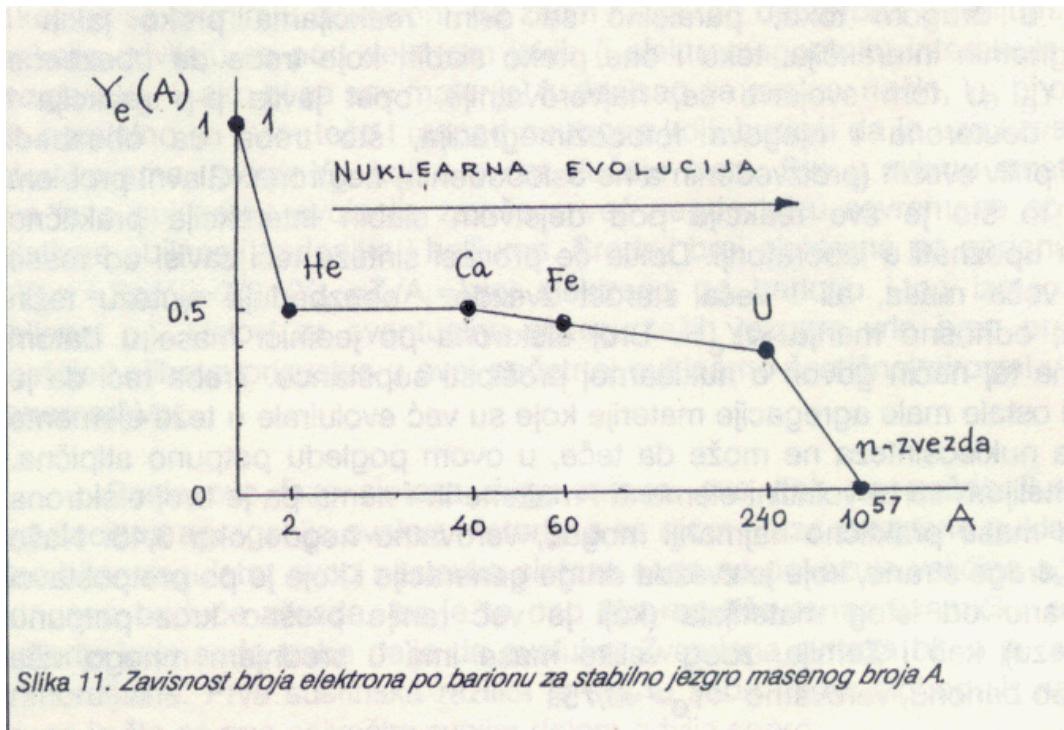
poznate su kao reakcije  $\alpha$ -procesa u kojima dolazi do fuzije većeg broja  $\alpha$ -čestica ili, kako se to još kaže, do gorenja helijuma.

Od kalcijuma pa na dalje, međutim, linija stabilnosti napušta simetralu  $N=Z$  i to sve više što su jezgra teža; na gvožđu  $Y_e=0,465$  a na uranu 0,386. To nam odmah govori da sada u sintezi moraju opet da učestvuju i slabe interakcije. Pogled na zavisnost energije veze po nukleonu kaže da sinteza do gvožđa oslobađa energiju a ona preko njega troši. Zato su mehanizmi sinteze do gvožđa jedni a preko njega drugi. Do gvožđa teče niz fuzija u ravnotežnom stanju (e-procesi) a zatim sledi niz uzastopnih neutronskih zahvata (s- i r-procesi). I u jednom i u drugom toku, paralelno sa ovim reakcijama preko jakih i elektromagnetnih interakcija, teku i one preko slabih koje treba da obezbede promenu  $Y_e$ . U tom svojstvu se, najverovatnije, opet javlja p-p reakcija i formiranje deuteronu i njegova fotodezintegracija, što treba da obezbedi ravnotežni priliv svežih (proizvedenih a ne oslobođenih) neutrona. Glavni problem je pritom to što je sve reakcije pod dejstvom slabih interakcija praktično nemoguće upoznati u laboratoriji. Dokle će procesi sinteze teći zavisi od mase zvezde - veća masa, ali i veća starost zvezde, obezbeđuje sintezu težih elemenata, odnosno manje  $\langle Y_e \rangle$ . Broj elektrona po jedinici mase u datom lokalitetu na taj način govori o nuklearnoj prošlosti supstance. Treba reći da je Zemlja, a i ostale male agregacije materije koje su već evoluirale u teže elemente a u kojima nukleosinteza ne može da teče, u ovom pogledu potpuno atipična. Vodonik i helijum su tu volatilni elementi i maltene ih i nema pa je broj elektrona po jedinici mase praktično najmanji moguć, verovatno negde oko 0,45. Naše Sunce, sa druge strane, koje je zvezda druge generacije i koje je po pretpostavci komponovano od istog materijala (koji je već ranije prošao kroz potpunu nukleosintezu) kao i Zemlja, zbog velike mase ima u srednjem mnogo više elektrona po barionu, verovatno  $\langle Y_e \rangle \approx 0,75$ .

U finalnim stadijumima života zvezde takođe se javljaju nuklearni procesi sudbonosni po elektrone. Naime, proces neutronizacije materije, kako se još zove porast broja neutrona u odnosu na broj protona tokom evolucije u teže elemente, u takozvanim neutronske zvezdama može da bude potpun. U zvezdama odgovarajuće mase, koje su završile nuklearnu evoluciju i preživele eksplozivnu fazu, ostatak zvezde može da se nađe u stanju tako velikog gravitacionog pritiska da praktično svi elektroni budu

zahvaćeni protonima i transformisani u neutrone. U ovakvoj zvezdi  $Y_e \approx 0$  i konačno stabilno stanje održava pritisak degenerisanog neutronskeg gasa. Zbog pretpostavljenog važenja održanja i barionskog i leptonskih brojeva, kao signal o nestanku elektrona, zvezdu napuštaju neutrina.

Radi naglašavanja uloge elektrona u nukleosintezi, kao i sudbonosnosti nukleosinteze po elektron, na slici 11 je konačno prikazan broj elektrona po barionu za električno neutralnu materiju sastavljenu samo od stabilnih jezgara sa brojem bariona  $A$ , u zavisnosti od tog broja, tj.  $Y_e(A)$ . Ovakva zavisnost se uobičajeno posmatra tako da sugerira sve veću neutronizaciju u sintezi težih jezgara a mi, u ovom kontekstu, iz nje možemo zaključiti da udeo procesa pod dejstvom slabih interakcija u kojima elektroni nestaju, a koji učestvuju u nukleosintezi jezgra datog  $A$ , na neki način mora biti proporcionalan nagibu (sa leve strane!) ove zavisnosti u toj tački.



Reference:

1. M.Mladenović; "**The History of Early Nuclear Physics (1896-1931)**", World Scientific, Singapore 1992
2. M.Mladenović; "**The History of Nuclear Physics (1932-1960)**", Institute of Physics, Bristol (u štampi)
3. S.B.Starodubcev i A.M.Romanov; "**Radioaktivniè prevræeniÔ Ôder i atomnaÔ oboločka**", Izd.ANUzbSSR, Taškent 1958
4. K.Siegbahn, Ed.; "**Alpha, Beta and Gamma-Ray Spectroscopy**", North-Holland, Amsterdam 1965
5. A.I.Levon i O.F.Nemec; "**Ôlektromagnitniè momentì vozbuždennih i radioaktivnih Ôder**", Naukova Dumka, Kiev 1989
6. W.D.Hamilton, Ed.; "**Electromagnetic Interaction in Nuclear Spectroscopy**", North-Holland, Amsterdam 1975
7. K.Grotz and H.V.Klapdor; "**The Weak Interaction in Nuclear, Particle and Astrophysics**", Adam Hilger, Bristol 1990
8. P.L.Lee; Phys.Rev. **C17**(1978)1859
9. I.Bikit, I.Aničin, M.Krmar, J.Slivka, M.Vesković and Lj.Čonkić; Journal of Physics **G8**(1992)123
10. H.M.Schwartz; J.Chem.Phys. **21**(1953)45
11. M.S.Freedman, E.Wagner and D.Engelkemeis; Phys.Rev. **88**(1952)1155
12. P.M.Sherk; PhysRev. **75**(1949)789
13. M.Jung, F.Bosch and K.Beckert; Phys.Rev.Lett. **69**(1992)2164
14. M.S.Freedman; Nucl.Instr. and Meth. in Phys.Res. **A271**(1988)267
15. L.A.Sliv; Colloque CNRS, **54**(1955)93
16. W.Brunner; Phys.Rev.Lett. **2**(1959)207
17. W.Greiner Ed.; "**Physics of Strong Fields**", Plenum, New York 1987
18. F.T.Avignone III, R.Brodzinski, W.Hensley, H.Miley and J.Reeves; Phys.Rev. **D34**(1986)97
19. C.E.Rolfs and W.S.Rodney; "**Cauldrons in the Cosmos-Nuclear Astrophysics**", The University of Chicago Press, Chicago 1988
20. H.A.Bethe and C.L.Critchfield; Phys.Rev. **54**(1938)248, 862
21. K.Siegbahn; "**ESCA**", Wiksells Boktryckeri AB, Uppsala 1967
22. C.D.Ellis and W.A.Wooster; Proc.Roy.Soc., **A114**(1927)276.
23. O.v.Baeyer und O.Hahn; Phys. Z. Nr.11(1910)488.
24. O.Hahn und. L.Meitner; Phys. Z. Nr.9(1908)321, Nr.10(1909)948.

25. D.Hahn; "**Otto Hahn, Begründer des Atomzeitalters**", List Verlag, München 1979. 26. M.Mladjenović; "**Development of  $\beta$ -Ray Spectroscopy**", Lecture Notes in Physics 52, Springer 1976. 27. E.Browne and R.B.Firestone; "**Tables of Radioactive Isotopes**", J.Wiley and Sons, 1986.28. H.R.Hulme, N.F.Mott, F.Oppenheimer, and H.M.Taylor; Proc.Roy.Soc. **A155**(1936)315.29. A.Taylor and N.F.Mott; Proc.Roy.Soc., **A142**(1933)215.30. B.Swirles; Proc.Roy.Soc., **A116**(1927)491.
31. P.Jaeger and J.Hulme; Proc.Roy.Soc., **A148**(1935)708.  
32. P.Jaeger and J.Hulme; Proc.Roy.Soc., **A155**(1936)315.  
33. M.Mladenović, M.Župančić and R.Vukanović; ADNDT **22**(1978)109.  
34. H.C.Pauli; Helv.Phys.Acta. **40**(1967)713.  
35. H.C.Pauli and K.Alder, Z.f.Physik, **202**(1967)255.  
36. H.C.Pauli, in "**Radioactivity in Nuclear Spectroscopy**" eds. J.H.Hamilton and J.C.Manthuruthil, Vol.II, p.715, Gordon and Breach 1972.  
37. M.E.Rose, G.H.Goertzel, B.I.Spinrad, J.Harr and P.Strong; Phys.Rev.**83** (1951)79  
M.E.Rose, "**Multipole Fields**", John Wiley and Sons 1955.
38. E.L.Church and J.Weneser; Phys.Rev.**104**(1956)1382.  
39. E.L.Church and J.Weneser; Ann.Rev.Nucl.Sci. **10**(1961)193.  
40. E.L.Church and J.Weneser; Nucl.Phys. **28**(1961)602.  
41. G.Kramers and S.G.Nilsson; Nucl.Phys. **35**(1962)273.  
42. F.Asaro, F.S.Stephens jr., J.M.Hollander and I.Perlman; Phys.Rev.**107**(1960)492.  
43. M.E.Rose, "**Internal Conversion Coefficients**", North Holland Publ. 1958.  
44. L.A.Sliv and I.M.Band, in "**Alpha-Beta, Gamma-Ray Spectroscopy**", K.Siegbahn ed. North Holland Publ. 1965.  
45. R.S.Hager and E.C.Seltzer, Nuclear Data Tables **A4**(1968)1.  
46. H.C.Pauli, "**Tables of ICC and Particle Parameters**", Purdue Univ. (1967), Report COO-1420-137.  
47. V.B.Berestecki; ŽETF, **18**(1948)1070.  
48. M.Rose, L.Biedenharn, and G.Arffen, Phys. Rev. **85**(1952)5.  
49. A.Z.Dolginov, Izv.AN.SSSR, ser.fizič.,**16**(1952)332.  
50. L.A.Sliv, ŽETF, **21**(1951)770.  
51. L.A.Sliv, M.A.Listengarten, ŽETF, **22**(1952)29.  
52. E.Church and M.Rose, Phys.Rev., **109**(1958)1299.  
53. M.Rose, L.Biedenharn and G.Arffen, Rev.Mod.Phys. **25**(1953)729.

54. M.A.Listengarten, L.A.Sliv, E.F.Zganjar and J.H.Hamilton, in **"Internal Conversion Processes"**, ed by J.H.Hamilton, Acad.Press, New York, 1966.
55. H.C.Pauli, **"Tables of Internal Conversion Coefficients and Particle Parameters"**, Dept.of Physics, Purdue univ.Report, 1967,
56. R.S.Hager and E.C.Seltzer, Nuclear Data **A4**(1968)397 and Nuclear Data **A6**(1969)1.
57. A.Z.Dolginov, Uglovie korrelacii pri vnutrennei konversii, **"Gamma luči"**, str.588, Izd.Akademii Nauk SSSR, Moskva 1961.
58. T.Gerholm and L.Holmberg, in **"Angular Correlations in Nuclear Desintegration"**,eds. H.van Krugten and B.van Nooijen, Rotterdam Univ.Press, 1971.
59. L.C.Biedenharn and M.E.Rose, Rev.Mod.Phys., **25**(1953)729, 60. E.L.Church, A.Schwarzschild and J.Weneser, Phys.Rev.**133**(1964)B35
61. I.Bikit, I.Aničin i L.Marinkov; Izv.AN.SSSR, **41**(1977)2152.62. J.R.Oppenheimer and L.Nedelski; Phys.Rev. **44**(1933)948
63. M.E.Rose; Phys.Rev. **76**(1949)211
64. G.K.Horton; Proc.Phys.Soc., **60**(1943)457
65. V.A.Krutov, ŽETF **39**(1960)91
66. G.D.Latyshev; Rev.Mod.Phys., **19**(1947)132
67. K.Siegbahn; Ark.Fys., **4**(1952)223
68. R.Hofstadter; Phys.Rev., **92**(1953)978
69. I.Bikit, I.Aničin, J.Slivka, M.Krmar, J.Puzović and Lj.Čonkić; Phys.Rev., **C52**(1996)54.
70. C.S.Wu, E.Ambler, R.Hayward, D.Hoppes and R.Hudson; Phys.Rev., **105**(1957)1413