

Što se zbiva u atomskoj jezgri (I)

Paar, Vladimir

Source / Izvornik: **Matematičko fizički list, 1973, XXIV, 49 - 52**

Journal article, Published version

Rad u časopisu, Objavljeni verzija rada (izdavačev PDF)

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:123781>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-20**



Repository / Repozitorij:

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



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

Što se zbiva u atomskoj jezgri (I)

Dr VLADIMIR PAAR, Samobor

Jezgra atoma kemijskog elementa atomskog broja A i rednog broja Z sastoji se od A nukleona: Z protona i A - Z neutrona. Istraživanje i razumijevanje takvog sistema elementarnih čestica predstavlja izvanredno težak i komplikiran problem i za teoriju i za eksperiment. To je predmet brojnih suvremenih naučnih radova. Naučni pristup problemu zahtijeva dobro poznavanje kvantne mehanike i znatnog matematičkog aparata, pa je uvid u njega moguć samo za uski krug specijalista. Međutim, intuitivno razumijevanje nuklearne strukture djelomično je moguće i bez poznavanja odgovarajuće fizičke i matematičke zgrade. U ovom članku, na krajnje pojednostavljen način, pokušat ćemo se osvrnuti na neke probleme suvremene teorije nuklearne strukture.

Kako se dobiju eksperimentalne informacije o atomsкоj jezgri? Jezgra je vrlo mali objekt, polumjera reda veličine 10^{-13} cm, pa se informacije o njoj mogu dobiti samo indirektno: eksperimentalni uredaji mijere razna svojstva produkata koji dolaze iz jezgre. Jedan tip takvih procesa su spontani, tj. jezgra emitira čestice ili zračenje bez vanjskog utjecaja: elektromagnetsko zračenje (γ -raspad), elektrone (β -raspad), jezgre ${}^3\text{He}$ (α -raspad), laganje jezgre (spontana fisija) itd. Drugi tip su umjetno proizvedeni procesi, nastali bombardiranjem jezgre pomoću čestica (npr. proton, neutron, elektron, ${}^2\text{H}$ (deuterij), ${}^3\text{H}$ (tricij), ${}^4\text{He}$ (α -čestica), ${}^{16}\text{O}$ itd.), pri čemu projektil može da se elastično ili neelastično sudari sa jezgrom (tzv. raspršenje), da jezgri preda ili od nje oduzme jedan ili više nukleona (tzv. transfer reakcije) ili da stvari kompleksnija stanja.

S druge strane intenzivno se razvijaju metode, pomoću kojih se iz podataka o svojstvima konačnih produkata dobivaju svojstva same atomske jezgre. Neke osnovne informacije do kojih se dolazi na taj način su slijedeće: Jezgra se može nalaziti samo u određenim diskretnim stanjima (tzv. nivoima). Svako stanje karakterizirano je određenim *kvantnim brojem momenta vrtnje, paritetom i energijom*. Kvantni broj određenog momenta vrtnje j odgovara stanju sa momentom vrtnje $\sqrt{j(j+1)}\hbar$ (\hbar = Planckova konstanta). Stanja parnih jezgri karakterizirana su cijelobrojnim, a neparnih polucijskim j . Moment vrtnje može se naivno povezati s pojmom momenta vrtnje krutog tijela (npr. zvрka) u klasičnoj mehanici. Međutim, za kvantni sistem, a jezgra jest kvantni sistem, moment vrtnje može poprimiti samo odredene, diskretne vrijednosti (cijele ili polucijske).

Paritet je veličina koja izražava svojstvo stanja kvantnog sistema pri zrcaljenju (tj. kad se komponente x , y , z zamijene u $-x$, $-y$, $-z$, + ili - opisuju dva moguća ponašanja pri zrcaljenju. Vidi članak Mr Petra Colića, god. XXI 547). U klasičnoj mehanici nema analogona paritetu, pa je to bitno novi, kvantnomehanički pojam.

Nuklearni nivoi i njihova specifikacija za određenu jezgru obično se jednim imenom nazivaju *spektar*. Za ilustraciju, na Sl. 1 dan je niskoležeći dio poznatih eksperimentalnih spektara ${}^{197}_{79}\text{Au}_{118}$ ($A = 197$, $Z = 79$, $N = 118$) i ${}^{198}_{80}\text{Hg}_{118}$. Energije pobuđenih stanja izražene su relativno prema energiji osnovnog stanja (tj. stanja najniže energije). Jedinica energije u nuklearnoj fizici obično je $1 \text{ MeV} = 1.60 \times 10^{-6}$ erg. Treba istaći da se u jezgri očito radi o velikim energijama, jer energije koje se javljaju u uobičajenim atomskim procesima, tj. u kemijskim reakcijama, reda su veličine $1 \text{ eV} = 10^{-6} \text{ MeV}$.

Jezgra prelazi iz viših stanja u niža ili obratno, putem emisije ili apsorpcije elektromagnetskog zračenja. Elektromagnetsko zračenje također je kvantizirano (*fotoni*) i karakterizirano određenim momentom vrtnje, paritetom i energijom. Pritom vrijede slijedeći zakoni sačuvanja:

$$E_i = E_f \pm E_\omega, \quad \pi_i = \pi_f \cdot \pi_\omega, \quad |j_f - j_\omega| \leq j_i \leq j_f + j_\omega.$$

Ovdje su j , π i E moment vrtnje, paritet i energija, a indeksi ω , i , f odnose se na zračenje, početno i konačno stanje jezgre. Na taj način E_i označava energiju početnog stanja, π_i paritet početnog stanja, γ^ω angулarni moment fotona itd.

Intenziteti γ -prijelaza odražavaju svojstva stanja atomske jezgre. Poznavanje stanja jezgre znači dakle i mogućnost predviđanja i objašnjenja, koji su γ -prijelazi jaki, a koji slabici. Treba istaći da γ -prijelazi reflektiraju globalna svojstva jezgri, tj. kompletну strukturu stanja, a ne samo njihov parcijalni dio.

Pri jednočestičnoj transfer reakciji iz jezgre se izbija, ili joj se dodaje jedan nukleon, i iz analize tog procesa može se zaključiti u kakvom stanju se taj nukleon nalazi u jezgri. Pri dvočestičnom transferu, izbijanjem ili dodavanjem dvaju nukleona, dobivaju se informacije u kakvim stanjima se istovremeno nalaze dva nukleona. Dakle, transfer reakcije više reflektiraju lokalna svojstva jezgre.

Pred teorijsku nuklearnu fiziku postavlja se pitanje, kako razumjeti svojstva atomske jezgre, objasniti poznate i predvidjeti nove fenomene.

U najjednostavnijoj slici klasične mehanike jezgra bi se sastojala od A loptica koje se međusobno privlače. Mjerene fizikalne veličine tada bi poprimalle kontinuirane vrijednosti. Opažena diskretnost mogućih energija i momenata vrtnje očito ukazuju na nerealističnost klasične slike atomske jezgre.

Diskretnost mogućih vrijednosti fizikalnih veličina jedna je od prirodnih konsekvenci kvantnomehaničkog opisa. Jednostavan je primjer primjena kvantne mehanike na vodikov atom, za koji je moguće izračunati tzv. valnu funkciju, koja pruža kvantnomehanički opis fizikalnog sistema i svih njegovih svojstava.

Za atomsku jezgru nije moguće egzaktno kvantnomehaničko rješenje. Razlozi su slijedeći:

1) Sile koje djeluju između dva nukleona fantastično su komplikirane, pa i pored velikog napretka u njihovom poznavanju nije točno poznat njihov oblik, a vjerojatno se niti nedaju izraziti pomoću konačne formule (tj. analitičkog izraza).

2) Kvantnomehanički problem mnogo tijela daleko prelazi numeričke mogućnosti današnjih, a vjerojatno i budućih elektronskih računskih strojeva. S druge strane, postavlja se i egzistencije i jednoznačnosti takog rješenja.

principijelno pitanje matematičke egzistencije i jednoznačnosti takog rješenja.

U takvoj situaciji uvodi se jedna od osnovnih ideja u opisivanju sistema mnogo tijela: pojam *elementarnih pobudjenja*. Svaki kvantomehanički sistem mnogo tijela (npr. atomska jezgra, atom, molekula, plazma, metal, kristal itd.) ima dva osnovna tipa elementarnih pobudjenja:

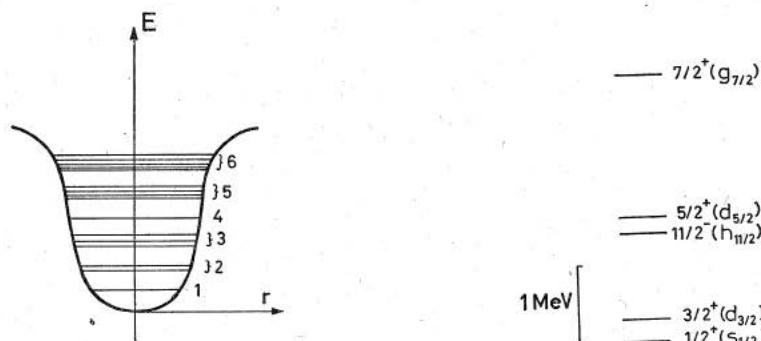
i) Elementarna pobuđenja čestičnog (ili tzv. kvazičestičnog) tipa u biti su lokalnog karaktera. Jedna čestica (npr. nukleon u jezgri) u svojoj okolini izaziva promjene, kao što npr. kola na prašnjavoj cesti podižu oblak prašine. Fizikalni objekt tada nije više »golac čestica«, nego čestica zajedno s »oblakom« koji je stvorila u okolini, tj. »obućena« čestica.

ii) Elementarna pobuđenja kolektivnog tipa u biti su globalnog karaktera. Opisuju gibanja sistema kao cjeline, u kojima sudjeluju sve njegove sastavne čestice.

Svaki fizikalni sistem karakteriziran je prisutnošću određenih konkretnih elementarnih pobudjenja tipova (i) i (ii), i njihovom medusobnom interakcijom.

Koja su osnovna elementarna pobuđenja u atomskoj jezgri?

Osnovna su pobuđenja čestičnog tipa (i) tzv. jednočestična pobuđenja *ljuskastog modela*. U biti tog pojma leži pretpostavka da nukleoni u jezgri stvaraju srednju centralnu silu, tako da se pojedini nukleon približno ponaša kao da se giba u jednoj potencijalnoj jami. Na taj način nastaje situacija slična kao kod atoma, gdje pozitivno nabijena jezgra privlači negativno nabijene elektrone, pa kažemo da se elektroni gibaju u potencijalnoj jami jezgre. Na taj način, pojam jednočestičnog stanja (u daljem tekstu j.č.s.) jezgre odgovara pojmu elektronske putanje u atomu. Treba naglasiti bitnu razliku u njihovom porijeklu: elektroni se gibaju u električnom polju jezgre, a pojedini nukleoni u komplikiranom srednjem polju, nastalom međudjelovanjem svih nukleona u jezgri. Pojam srednjeg polja i j.č.s. (tzv. ljuskasti model) čini se intuitivno prihvatljiv, no on ima danas i čvrstu teoretsku i eksperimentalnu osnovu. No treba naglasiti, da a priori nije vidljivo da vrlo jake interakcije između elementarnih čestica vode na jedno srednje polje u jezgri, u kojem se pojedini nukleoni gibaju približno nezavisno. Ljuskasti model predstavlja jedan od temeljaca suvremene nuklearne fizike.



Sl. 2. Ilustracija potencijalne jame srednjeg centralnosimetričnog polja u jezgri. U klasičnoj fizici čestica bi se mogla nalaziti u stanju bilo koje energija unutar »slanca«, dok u kvantnoj mehanici može poprimiti samo određene, diskretne energije, koje se grupiraju u skupine (tzv. ljuske) naznačene na slici. Primer jednostavne kvantnomehaničke potencijalne jame je Coulombovo polje jezgre u vodikovu atomu (oblik jame dan je s $1/r$). Primer klasične potencijalne jame je gravitaciono polje Sunca (opet je jama dana s $1/r$). Interesantno je načrtati tu jamu i ucertati stanja (tj. putanje) planeta. No tijelo se može gibati u stanju svake moguće energije unutar

Sl. 3. Eksperimentalno određena protonska jednočupljinska stanja u petoj ljusci. Ako u petoj ljusci nedostaje jedan proton, on može nedostajati u $s_{1/2}$ ljusci (tada je to odgovarajuće stanje najviše energije) ili $d_{3/2}$ ili $h_{11/2}$ itd. Takva stanja realizirana su u izotopima talija, koji ima 81 proton (petna ljudska je zatvorena sa 82 protona).

jame, npr. raketom se može ubaciti satelit na bilo koju putanju oko Sunca. Naravno, prisutnost drugih nebeskih tijela s vlastitim gravitacionim poljima vode do komplikiranja ove jednostavne potencijalne jame.

Kvantnomehaničko gibanje čestice u srednjem polju moguće je samo u stanjima određene diskretne energije. Na primjer, elektron se u vodikovom atomu može gibati samo u određenim ljuskama. Potencijalna jama srednjeg polja u jezgri (koja opisuje privlačnu centralnu силу) i moguće jednočestične energije za protone ili neutrone, ilustrirani su na Sl. 2. Horizontalne linije predstavljaju energije mogućih stanja, a svako je karakterizirano još i momentom vrtnje i paritetom, koji nisu naznačeni na slici zbog jednostavnosti. U kvantnoj mehanici u stanje određenog momenta vrtnje j može se smjestiti najviše $2j+1$ čestica, tj. protona ili neutrона u jezgri, i elektrona u atomu. Raspoloživa jednočestična stanja grupirana su u skupine, tzv. ljuske.

Ljuske su ovisne o obliku potencijalne jame pa su različite za jezgru i atom. Na Sl. 2 naznačen je i redni broj ljuske u jezgri. Tako npr., prva ljuska ima samo jedan energetski nivo ($j^\pi = 1/2^+$) i u nju se mogu smjestiti samo dvije čestice, a

šesta ljeska ima pet j.č.s. ($j^\pi = 7/2^+, 5/2^+, 11/2^-, 3/2^+, 1/2^+$) i u nju se mogu smjestiti 32 protona odn. neutrona. Protonske i neutronske ljeske pune se nezavisno, ali su međusobno slične.

Atomi koji imaju potpuno popunjene određene ljeske, a one iznad njih prazne, pokazuju osobitu stabilnost, tj. nerado stupaju u kemijske reakcije. Naime, potrebna je relativno velika energija da se iz popunjene ljeske otkine elektron. U nuklearnoj fizici postoji analogan pojam popunjениh ljesaka. Tako je npr kod $^{200}_{82}\text{Pb}_{118}$ popunjena protonska ljeska ($Z = 82$). Ako se razmatraju susjedne jezgre sa jednim ($^{201}_{83}\text{Bi}_{118}$), dva ($^{202}_{84}\text{Po}_{118}$) ili tri ($^{203}_{85}\text{At}_{118}$) protona u slijedećoj protonskoj ljesci, prema ljkastom modelu očekujemo da će se ti dodatni protoni nalaziti u najnižim stanjima slijedeće protonske ljeske. Analogno, kod susjednih jezgri kojima nedostaje jedan ($^{199}_{81}\text{Tl}_{118}$), dva ($^{198}_{82}\text{Hg}_{118}$) ili tri ($^{197}_{79}\text{Au}_{118}$) protona da bi imali popunjenu $Z = 82$ protonsku ljesku, prema ljkastom modelu nedostajat će jedan, dva ili tri protona u jednočestičnim stanjima šeste protonske ljeske. Odgovarajuća j.č.s. ilustrirana su na Sl. 3. Svako stanje karakterizirano je određenim momentom vrtnje i paritetom, a u zagradama su dane odgovarajuće uobičajene oznake koje se koriste za j.č.s.

Istaknuto *kolektivno pobuđenje (ii)* kod atomskih jezgri je koherentno (tj. konstruktivno interferentno) pobuđivanje nukleona iz nižih stanja u viša, i odgovara klasičnom analogonu titranja površine. Takva elementarna pobuđenja moguća su samo u određenim porcijama — kvantima određene energije, momenta vrtnje i pariteta, koji se zovu *fononi*. (Slično kao što se i svjetlost, tj. elektromagnetsko zračenje, emitira samo u određenim kvantima — fotonima). Za razliku od jednočestičnih stanja nukleona, broj fonona nije sačuvan u procesima: fononi se u procesima u jezgri mogu stvarati i poništavati. (Slično kao što se foton svjetlosti mogu emitirati i apsorbirati.)