

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 kompliciran 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 atomskoj jezgri? Jezgra je vrlo mali objekt, polumjera reda veličine 10^{-13} cm, pa se informacije o njoj mogu dobiti samo indirektno: eksperimentalni uređaji mjere 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 ${}^4\text{He}$ (α -raspad), laganije 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 odzume jedan ili više nukleona (tzv. transfer reakcije) ili da stvori 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 cjelobrojnim, a neparnih polucijelim j . Moment vrtnje može se naivno povezati s pojmom momenta vrtnje krutog tijela (npr. zvrka) u klasičnoj mehanici. Međutim, za kvantni sistem, a jezgra jest kvantni sistem, moment vrtnje može poprimiti samo određene, diskretne vrijednosti (cijele ili polucijele).

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 ${}_{79}^{197}\text{Au}_{118}$ ($A = 197, Z = 79, N = 118$) i ${}_{80}^{198}\text{Hg}_{118}$. 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 angularni 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 slabi. Treba istaći da γ -prijelazi reflektiraju globalna svojstva jezgri, tj. kompletnu 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 poprimale 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 kvantnomehantičkog opisa. Jednostavan je primjer primjena kvantne mehanike na vodikov atom, za koji je moguće izračunati tzv. valnu funkciju, koja pruža kvantnomehantički opis fizikalnog sistema i svih njegovih svojstava.

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

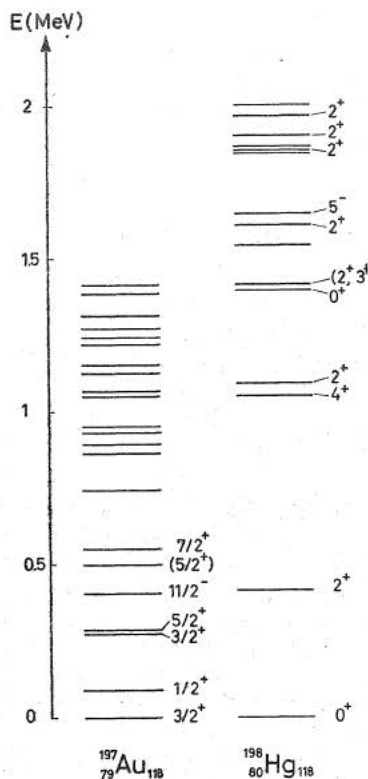
1) Sile koje djeluju između dva nukleona fantastično su komplicirane, pa i pored velikog napretka u njihovom poznavanju nije točno poznat njihov oblik, a vjerojatno se niti ne daju izraziti pomoću konačne formule (tj. analitičkog izraza).

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

principijelno pitanje matematičke egzistencije i jednoznačnosti takog rješenja.

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

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 »gola« čestica, nego čestica zajedno s »oblakom« koji je stvorila u okolini, tj. »obučena« čestica.



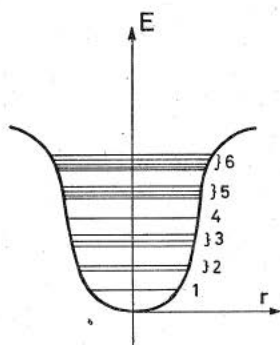
Sl. 1. Eksperimentalno poznata stanja jezgri ^{197}Au i ^{198}Hg . Svako stanje karakterizirano je energijom, momentom vrtnje i paritetom. Za neka viša stanja na slici poznate su samo energije, a momenti vrtnje i pariteti ili su nesigurni ili ih nije moguće odrediti postojećom eksperimentalnom tehnikom. Što je energija pobuđenih stanja viša, teže je provesti eksperimentalnu analizu za određivanje momenta vrtnje i pariteta.

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

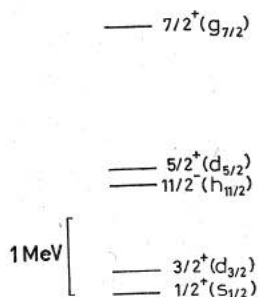
Svaki fizikalni sistem karakteriziran je prisutnošću određenih konkretnih elementarnih pobuđenja tipova (i) i (ii), i njihovom međusobnom interakcijom.

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 kompliciranom 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 »lanca«, dok u kvantnoj mehanici može poprimiti samo određene, diskretne energije, koje se grupiraju u skupine (tzv. ljuske) naznačene na slici. Primjer jednostavne kvantnomehaničke potencijalne jame je Coulombovo polje jezgre u vodikovu atomu (oblik jame dan je s $1/r$). Primjer klasične potencijalne jame je gravitaciono polje Sunca (opet je jama dana s $1/r$). Interesantno je nacrtati tu jamu i ucrtati stanja (tj. putanje) planeta. No tijelo se može gibati u stanju svake moguće energije unutar



Sl. 3. Eksperimentalno određena protonska jednošupljinska stanja u petoj ljusci. Ako u petoj ljusci nedostaje jedan proton, on može nedostajati u $S_{1/2}$ ljusci (tada je to odgovarajuće stanje najniže energije) ili $d_{3/2}$ ili $h_{11/2}$ itd. Takva stanja realizirana su u izotopima talija, koji ima 81 proton (peta ljuska 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 kompliciranja 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 silu) 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 neutrona 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 ljuska 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 ljuske pune se nezavisno, ali su međusobno slične.

Atomi koji imaju potpuno popunjene određene ljuske, a one iznad njih prazne, pokazuju osobitu stabilnost, tj. nerado stupaju u kemijske reakcije. Naime, potrebna je relativno velika energija da se iz popunjene ljuske otkine elektron. U nuklearnoj fizici postoji analogan pojam popunjenih ljusaka. Tako je npr kod $^{200}_{82}\text{Pb}_{118}$ popunjena protonska ljuska ($Z = 82$). 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 ljusci, prema ljuskastom modelu očekujemo da će se ti dodatni protoni nalaziti u najnižim stanjima slijedeće protonske ljuske. 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 ljusku, prema ljuskastom modelu nedostajat će jedan, dva ili tri protona u jednočestičnim stanjima šeste protonske ljuske. 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 fotoni svjetlosti mogu emitirati i apsorbirati.)