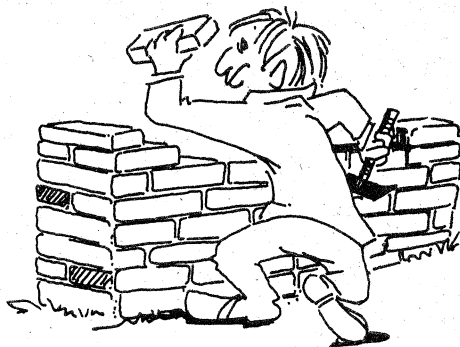


Što se zbiva u atomskoj jezgri (II)

Dr VLADIMIR PAAR, Samobor

Kvantnomehanički sustav elementarnih pobuđenja može se jednostavno opisivati pomoću tzv. Feynmanovih dijagrama. Feynmanovi dijagrami intuitivno se lako razumiju, a na jednostavan način povezuju se s matematičkim operacijama koje treba provesti, da bi se izračunalo određeno svojstvo fizikalnog sustava. Treba istaći da Feynmanovi dijagrami nisu samo mnemotehničko sredstvo za pamćenje formula (kako ih fizičari ponekad shvaćaju), nego zaista pokazuju što se stvarno zbiva u kvantnomehaničkom sustavu. Historijski, Feynmanovi su dijagrami prvo bili primijenjeni u elektrodinamici za opis procesa između elektrona i elektromagnetskog zračenja. Mi ćemo ih ilustrirati na primjeru atomske jezgre.

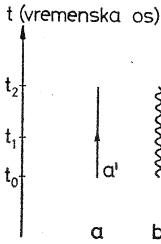


Feynmanov dijagram prikazuje vremensko odvijanje procesa u kvantnomehaničkom sustavu. Vremenska os usmjerena je obično prema gore, tj. vrijeme je najranije na donjem dijelu slike i raste prema gore (Sl. 1).

Jednočestično stanje (j.č.s.) prikazat ćemo ravnom, a fonon valovitom linijom. Slobodno (tj. bez interakcija) jednočestično stanje ilustrirano je na Sl. 1a, a slobodni fonon na Sl. 1b. Pritom je tok vremena prema gore, i svedjedno je da li je linija j.č.s. i fonona nacrtana vertikalno ili ukoso.

Jezgra bi bila prikazana s A linija, koje predstavljaju nukleone u najnižim raspoloživim j.č.s. (Sl. 1c). Najviši popunjeni energetska nivo naziva se *Fermijev nivo*. Zbog velikog broja nukleona već ta početna slika bila bi nepraktična; s druge strane, u procesima u jezgri važnu eksplicitnu ulogu obično igra samo nekoliko nukleona. U takvoj situaciji, u fizici se prelazi na tzv. *redefinirano referentno stanje*. Dosad smo kao referentno stanje tj. stanje koje je reprezentirano odsustvom bilo

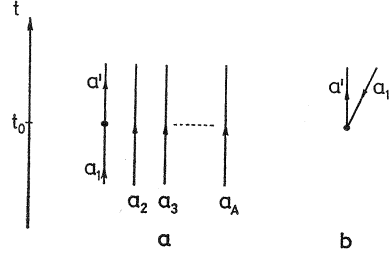
kakvih linija na Sl. 1d uzimali vakuum (stanje bez čestica), pa je trebalo predočiti sve postojeće nukleone u jezgri (Sl. 1c). Novo, redefinirano referentno stanje je stanje sustava A nukleona, smještenih u energetski najniža raspoloživa stanja. Takvo referentno stanje prikazat ćemo prazninom (Sl. 1d).



Sl. 1. Osnovni elementi grafičkog prikaza fizikalnih procesa.

U kvantnoj mehanici dijagramatska metoda je ključna za razumijevanje fizikalnih procesa, međutim ona se može jednostavno uvesti i u klasičnu fiziku. Zamislimo jedan zid i proglasimo ga referentnim stanjem, tj. slikovito ćemo ga reprezentirati prazninom (Sl. 1d) a u dijagramima ćemo prikazivati samo promjene na tom zidu. U trenutku t_0 neka se na vrhu zida nalazi još jedna dodatna cigla. U trenutku t_0 u vremenskom dijagramu reprezentirajmo tu ciglu jednom točkom. Ona tamo stoji i u kasnijem trenutku t_1 i u još kasnijem trenutku t_2 , i u svakom je reprezentirana točkom. Spajanjem svih tih točaka između trenutaka t_0 i t_2 dobivamo usmjerenu liniju na Sl. 1a, koja reprezentira ciglu s određenim karakteristikama a' , gdje a' označava položaj u zidu, veličinu, masu, sastav cigle itd. (dok je kvantni objekt opisan određenim kvantnim brojevima, npr. proton u j.č.s. energijom, momentom vrtnje i paritetom). Od trena t_0 do t_1 prema Sl. 1a očito ništa se s ciglom nije dogodilo, tj. ona nije imala neke interakcije s okolinom. Zamislimo sada da u trenutku t_0 u zidu nedostaje jedna cigla, i zid tako stoji do trenutka t_2 . Zid smo prikazali prazninom (Sl. 1d), kako sad prikazati da od trenutka t_0 do t_2 nedostaje jedna cigla u zidu? Očito, situaciju možemo opisati tako da kažemo da u trenutku t_0 u zidu postoji jedna šupljina na mjestu gdje je u originalnom zidu stajala cigla, i da šupljina tamo stoji sve do vremena t_2 . Kako uklanjanje cigle odgovara stvaranju šupljine, a dodavanje cigle poništenju šupljine, vremenski smjer za opis šupljine suprotan je od onog za opis cigli, tj. postojanje šupljine u zidu od vremena t_0 do t_2 reprezentirano je kao na Sl. 1e. Pretpostavimo da dođe do popotresa i zid titra od vremena t_0 do t_2 . To je »kolektivno« gibanje u kojem sudjeluju sve cigle, i možemo ga reprezentirati valovitom linijom kao na Sl. 1b. Bitna je razlika između klasičnog slučaja zida i kvantnog slučaja jezgre u tome što zid može titrati bilo kojim intenzitetom, a kvantni sustav samo u određenim porcijama energije — fotonima.

U dijagramima ćemo odsad prikazivati samo odstupanja od tog redefiniranog referentnog stanja. Naprimjer, ako se jedna čestica pobudi iz nivoa, u kojem se nalazi u referentnom stanju, i skoči u neko j.č.s. više energije, razlika od referentnog stanja očito je u prisustvu jedne nove čestice iznad i jedne šupljine ispod Fermijevega nivoa. Šupljinu ćemo reprezentirati linijom usmjerenom prema dolje (u negativnom smjeru vremena) (Sl. 1e). Treba istaći da je promjena smjera vremena kod linije šupljine posljedica redefinicije referentnog stanja. To ćemo ilustrirati na Sl. 2a i 2b. Na Sl. 2a prikazana je situacija, s vakuumom kao referentnim stanjem, kada jedan nukleon iz određenog j.č.s. a_1 ispod Fermijeve plohe skoči u vrijeme t_0 u jedno više, slobodno j.č.s. a' (a_1 i a' simboliziraju kvantne brojeve



Sl. 2. Ilustracija redefinicije referentnog stanja.

Na primjeru našeg zida Sl. 2a i 2b mogli bismo to interpretirati ovako: umjesto da naš originalni zid prikazemo prazninom (Sl. 1d), u vremenskom dijagramu prikazimo svih A cigli zida (Sl. 1c). U početnom trenutku (dno slike) koji odsad nećemo posebno označavati, tih A cigli stoji u zidu, i ništa se ne događa do trenutka t_0 ; situacija je prikazana s A usmjerenih linija (Sl. 2a). U trenutku t_0 izvadimo jednu ciglu iz njenog mjesta u zidu (koje označimo s a_1) i stavimo je negdje na vrh zida na mjesto koje označimo a' . U trenutku t_0 dakle, cigla a_1 (tj. cigla na mjestu a_1) prestala je postojati, a pojavila se cigla na mjestu a' (treba uočiti da ciglu identificirajmo ne samo njena svojstva, nego i njen položaj u zidu; no kako su svojstva svih cigli identična, cigla je u biti karakterizirana svojim položajem u zidu). Ta situacija prikazana je na Sl. 2a. Međutim, vratimo se sad na referentno stanje 1d, prikazimo naš zid prazninom, tj. ne crtajmo više pojedine cigle u zidu kao na Sl. 1c. Sada je do trenutka t_1 situacija prikazana prazninom. U vrijeme t_0 uklonjena je cigla a_1 (tj. cigla na mjestu a_1 na kojem je ranije postojala) i stavljena na mjesto a' na vrhu zida, gdje ranije nije bilo cigle). Razlika prema originalnom zidu na početku je dakle u prisutnosti jedne cigle na mjestu a' i odsutnosti jedne cigle, tj. prisutnosti šupljine na mjestu a_1 , što je prikazano na Sl. 2b. Dakle, Sl. 2a i 2b prikazuju isti fizikalni proces, samo obzirom na razna referentna stanja (1c i 1d). Analogija kvantnomehaničke Fermijeve plohe u ovom našem klasičnom primjeru bio bi najviši red cigli u zidovima. Ispod njega nema mjesta da bi se u zid ugradila koja cigla (ako je zid bez šupljina) a na njega se može nastaviti zidanje, tj. dodavanje cigli iznad »Fermijeve plohe«.

koji karakteriziraju jednočestično stanje), dok ostali nukleoni ostanu nepromijenjeni. Nacrtajmo sad isti proces za redefinirano referentno stanje. Tada linije a_2, \dots, a_A ne crtamo, liniju a_1 ne crtamo do trenutka t_0 . Međutim, nakon trenutka t_0 imamo novu čestičnu liniju a' , i pored toga nepopunjeno j.č.s. a_1 , tj. u novom referentnom stanju imamo šupljinu u j.č.s. a_1 . Tako smo došli do dijagrama 2b, koji uz redefinirano referentno stanje, reprezentira proces prikazan na Sl. 2a. Kao što vidimo, pojam šupljine bitno je vezan uz definiciju referentnog stanja.

Koje interakcije se dešavaju u nuklearnom sustavu elementarnih pobuđenja? Dva su osnovna tipa: interakcija jednočestičnih stanja s fononima i interakcija jednočestičnih stanja među sobom. Najjednostavniji procesi interakcije s fononima prikazani su na Sl. 3 (zbog jednostavnosti, vremenska se os obično ne naznačuje na slici, a tok vremena podrazumijeva se prema gore). Na Sl. 3a j.č.s. apsorbira fonon, na Sl. 3b j.č.s. emitira fonon, a na Sl. 3c jednošupljinsko stanje (j.š.s.) apsorbira fonon i na Sl. 3d j.š.s. emitira fonon. Na Sl. 3e poništava se fonon uz tvorbu para j.č.s.—j.š.s., na Sl. 3f poništava se par j.č.s.—j.š.s. uz stvaranje fonona, i na Sl. 3g (odn. 3h) stvara se (odn. poništava) par j.č.s.—j.š.s. i fonon. Na Sl. 4 prikazan je najjednostavniji proces interakcije dvaju j.č.s., koja su prije interakcije karakterizirana kvantnim brojevima a' i a'' a poslije s b' i b'' . Interakcija između čestica (šupljina) prikazuje se crtkanom horizontalnom linijom.

Kombinacijama jednostavnih procesa sa Sl. 3 i 4 dobiju se razni procesi koji se zbivaju u atomskoj jezgri.

U svakom stanju nuklearne jezgre (npr. stanja nacrtana na Sl. 1, nalazi se određen broj j.č.s. (ili j.š.s.) i fonona.

Kako interakcije tipa kao na Sl. 3 i Sl. 4 daju energiju određenog fizikalnog stanja?

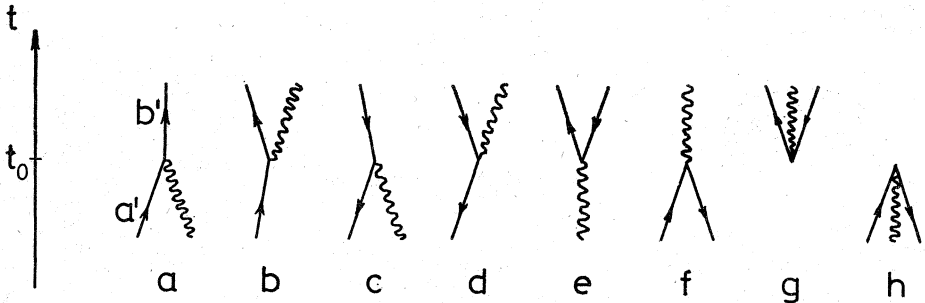
Razmotrimo primjer jezgre atoma zlata. U tom slučaju tri protonske šupljine igraju značajnu ulogu (jer zlatu nedostaju tri protona da se popuni protonska ljuska $Z = 82$). Stanja jezgre ^{197}Au dana su određenim kombinacijama triju šupljina u j.š.s. na Sl. 3 (I dio) i fonona. Najniža stanja slijedećeg su tipa:

$$3/2_1^+ = [(s_{1/2})^2 O, d_{3/2}] 3/2, \quad 1/2_1^+ = [(d_{3/2})^2 O, s_{1/2}] 1/2,$$

$$3/2_2^+ = [(d_{3/2})^2 2, s_{1/2}] 3/2, \quad 5/2_1^+ = [(d_{3/2})^2 O, s_{1/2}] 5/2,$$

$$11/2_1^- = [(s_{1/2})^2 O, h_{11/2}] 11/2, \quad 5/2_2^+ = \{[(s_{1/2})^2 O, d_{3/2}] 3/2^{\#}; 1 2\} 5/2,$$

$$7/2_1^+ \{[(s_{1/2})^2 O, d_{3/2}] 3/2 ; 1 2\} 7/2 \quad \text{itd.}$$



Sl. 3. Međudjelovanja j.č.s. i j.š.s. s fononima

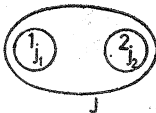
Na Sl. 3a j.č.s. apsorbira jedan fonon i prelazi u j.č.s. s drugim kvantnim brojevima, ili ostaje u istom stanju. Fonon je zapravo kvant titranja i j.č.s. apsorbira jedan kvant (najmanju porciju). U našoj klasičnoj slici zida nemamo potpuni analogon te situacije (energije titranja nisu kvantizirane), međutim možemo je naivno predočiti. Dodajmo na vrh zida jednu ciglu. Neka dođe do potresa i zid će zatitirati. U određenom trenutku t_0 neka se sva energija koncentrira na našu dodatnu ciglu a' . Neka se ta energija utroši na to da ta cigla odskoči na neko drugo mjesto na vrhu zida b' . Tako smo dobili originalni mirni zid i dodatnu ciglu na mjestu b' . Sl. 3b mogli bismo interpretirati tako, da je u određenom trenutku cigla izbačena iz zida uvis i pala natrag na vrh zida. Pritom je nastalo i titranje čitavog zida. Istaknimo ponovo, da su ove klasične interpretacije na Sl. 3. samo približne ilustracije, jer klasični zid može titrati bilo kojim intenzitetom (kontinuirane energije) dok je kvantno titranje kvantizirano (moguće samo u određenim porcijama — fononima).

Značenje oznaka je slijedeće: $3/2^+$ označava stanje najniže energije momenta vrtnje $3/2$ i pariteta $+$, $3/2^+$ označava slijedeće više stanje momenta vrtnje $3/2$ i pariteta $+$. $[(s_{1/2})^2 O, d_{3/2}] 3/2$ znači da su dva j.š.s. $s_{1/2}$ vezana u stanje momenta vrtnje O , i s trećim j.š.s. $d_{3/2}$ vezana u stanje ukupnog momenta vrtnje $3/2$. U stanjima $5/2^+$ i $7/2^+$ vezana su tri j.š.s. $[(s_{1/2})^2 O, d_{3/2}] 3/2$ s jednim fononom (označavamo ga $1, 2$, gdje je 1 broj fonona a 2 moment vrtnje fonona). Ovdje se pojavio pojam vezanja momenta vrtnje: Imamo dva fizikalna sustava 1 i 2 (npr. dvije čestice), svaki sa određenim momentom vrtnje, j_1 i j_2 . Tretirajmo sad ukupan sustav (Sl. 5) s podsustavima 1 i 2 kao jedan fizikalni objekt, i u eksperimentu mjerimo moment vrtnje J , ukupnog sustava. Općenito vrijedi slijedeće jednostavno pravilo vezanja kvantno-mehaničkih momenata vrtnje: momenti vrtnje j_1 i j_2 mogu se vezati u stanja ukupnog momenta vrtnje $|j_1 - j_2|$, $|j_1 - j_2| + 1$, $|j_1 - j_2| + 2, \dots$, $j_1 + j_2 - 1$, $j_1 + j_2$. Ako se vežu momenti vrtnje dvaju jednakih j.š.s. ili j.š.s., ili dvaju jednakih fonona, moguća su samo vezana stanja parnog momenta vrtnje.



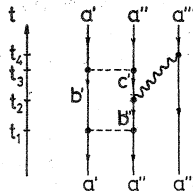
Sl. 4. Interakcija između dvaju j.š.s.

Zamislimo da cigla na jednoj svojoj plohi ima napevu oprugu. Stavimo dvije takve cigle na vrh zida na mjesta a' i a'' . U određenom trenutku opruga opusti, one se odgurnu i eventualno promijene svoj položaj, tj. dođu u nova stanja b' i b'' . Takva situacija prikazana je na Sl. 4. Djelovanje opruge u određenom trenutku prikazano je crtkanom horizontalnom linijom.



Sl. 5. Ilustracija vezanja momenata vrtnje dvaju sustava u moment ukupnog sustava. Takav pojam poznat je iz klasične fizike (samo što su kvantni mo-

menti vrtnje kvantizirani). Zamislimo jednu okruglu ploču (sustav 1) koja rotira oko jedne osi, a na njoj zvrk (sustav 2) koji se vrti. I ploča i zvrk imaju svaki svoj moment vrtnje j_1 odnosno j_2 . No ako gledamo sustav kao cjelinu, on ima svoj ukupni moment vrtnje J . U klasičnoj fizici jednostavna je veza između j_1 , j_2 i J , koja se svodi na analogon paralelogramu sila (tj. zbrajanje vektora). U kvantnoj mehanici zbrajanje momenata vrtnje vezano je uz prilično komplikiran matematički aparat (teorija grupa).



Sl. 6. Jedan od procesa koji se odigrava u sustavu triju j.š.s.

Na početku imamo šupljine u stanjima a' , a'' i a''' . U vremenu t_1 direktno interagiraju prve dvije šupljine i prelaze u stanja b'

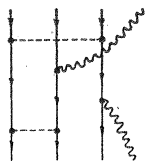
i b'' . U trenutku t_2 druga šupljina emitira jedan fonon, i pritom iz stanja b'' prelazi u stanje c' . Dakle, od vremena t_2 do t_3 u sustavu imamo tri šupljine u stanjima b' , c' i a''' i jedan fonon. U trenutku t_3 šupljine u stanjima b' i c' međusobno interagiraju i prelaze u stanja a' i a'' . (Pritom se ništa nije dogodilo sa prisutnim fononom). Konačno, u trenutku t_4 šupljina u stanju a'' apsorbirala je fonon i ostala us tanju a'' . Treba istaći, da energiji složenog stanja doprinose svi mogući procesi sa jednakim početnim (početno stanje je stanje sustava u vrijeme $t < t_1$) i konačnim (konačno stanje je stanje sustava u vrijeme $t > t_4$) stanjem. U međustanjima tj. u stanjima sustava

$$t_1 < t < t_2, \quad t_2 < t < t_3$$

i $t_3 < t < t_4$ u kvantnoj mehanici ne vrijedi zakon sačuvanja energije. To međutim nije u suprotnosti s empirijskim zakonom sačuvanja energije, jer se u eksperimentu mjeri samo početno i konačno stanje, a ne međustanja. (To je uostalom definicija međustanja u kvantnoj fizici.) Za čitaoca će biti korisno da interpretira Sl. 6. pomoću cigli u zidu (koristeći opise Sl. 1—4), kao i da razvija imaginaciju izmišljajući razne dijagrame.

Na Sl. 6 ilustriran je jedan od procesa koji doprinose energiji stanja što sadrže samo tri j.š.s. Na Sl. 7 ilustriran je jedan od procesa koji doprinose energiji stanja koja sadrže 3 j.š.s. i jedan fonon, npr. $5/2^+$ i $7/2^+$. Na taj način možemo vizualizirati procese u jezgri, a postoje razvijene matematičke metode, kako da se izračuna odgovarajući numerički doprinos pojedinog procesa. U okviru ovog pristupa na taj način zaista razumijemo što se zbiva u određenom energetskom stanju zlata, i kako se dobiju odgovarajuća energija, moment vrtnje i paritet.

Kako se odvija proces γ -zračenja? Emisiju ili apsorpciju γ -zračenja, tj. interakciju s elektromagnetskim poljem, grafički ćemo prikazati crtkanom horizontalnom linijom, s križićem na kraju i slovom E. Na Sl. 8a j.č.s. emitira elektromagnetsko zračenje a na Sl. 8b odn. 8c pri emisiji elektromagnetskog zračenja stvara se odn. poništava fonon.



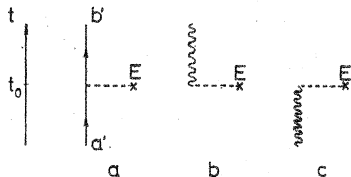
Sl. 7. Jedan od procesa koji se odigrava u sustavu triju j.č.s. i fonona.

U početnom i konačnom stanju sada je prisutan i jedan fonon. Citaoci mogu označiti vremena i interpretirati fizikalno značenje tog dijagrama slično kao uz Sl. 6.

Sl. 8. Dominantni procesi interakcije elektromagnetskog zračenja, j.č.s. (Sl. 8a) i fonona (stvaranje fonona — Sl. 8b i poništenje fonona — Sl. 8c).

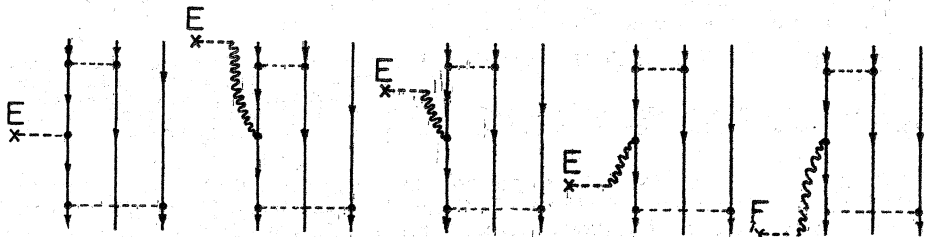
Interakcija s vanjskim elektromagnetskim poljem predočena je crtkanom horizontalnom linijom s križićem na kraju i slovom E. U

našem klasičnom primjeru umjesto elektromagnetskog polja zamislimo čovjeka s čekićem. Stavimo jednu ciglu na zid na mjesto a' . U trenutku t_0 čovjek udari tu ciglu čekićem i ona odskoči na mjesto b' . To je prikazano na Sl. 1a. U trenutku t_1 čovjek udari čekićem o pod od čega se potresu zidovi, tj. stvori se



određeno stanje titranja (Sl. 1b). Na Sl. 1d prikazan je slučaj kada se udarcem o pod poništava postojeće titranje zidova, tj. čekić primi svu energiju titranja zida. Klasično to je zaista vrlo malo vjerojatan proces, za razliku od kvantnog slučaja gdje se radi samo o jednoj porciji energije.

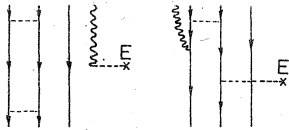
Na Sl. 9 prikazani su neki od dominantnih procesa koji doprinose γ -zračenju pri prijelazu jezgre iz prvog pobuđenog stanja $1/2_1^+$ u osnovno stanje $3/2_1^+$. Početno je stanje $[(d_{3/2})^2O, s_{1/2}] 1/2$, a konačno $[(s_{1/2})^2O, d_{3/2}] 3/2$. U međustanjima j.č.s. mogu se nalaziti u raznim raspoloživim nivoima sa Sl. 3 (I dio), pa u računu treba zbrojiti rezultate za sve moguće kombinacije. Sad se javlja vrlo značajni fizikalni efekt, efekt interferencije. Ako doprinosi svih dominantnih procesa imaju isti predznak (tj. koherentni su) ukupan doprinos je velik i γ -zračenje je intenzivno. Naprotiv, ako se pojave doprinosi različitih predznaka (nekoherencija), ukupni doprinos bit će manji i γ -zračenje slabijeg intenziteta. Specijalno, u nekim slučajevima pojedini doprinosi mogu se skoro potpuno poništiti, pa se dobije vrlo mali intenzitet γ -zračenja i eksperimentalno ga je teško detektirati. Takve γ -prijelaze zovemo zabranjenim. Prijelaz $1/2_1^+ \rightarrow 3/2_1^+$ primjer je koherentnog prijelaza, gdje su doprinosi pojedinih dominantnih procesa (Sl. 9 sa $1/2_1^+$ kao početnim, a $3/2_1^+$ kao konačnim stanjem) u fazi, pa je γ -prijelaz jak, u skladu s eksperimentom. S druge strane, za prijelaz $5/2_2^+ \rightarrow 3/2_1^+$ doprinosi dominantnih procesa (Sl. 9 sa $5/2_2^+$ kao početnim a $3/2_1^+$ kao konačnim stanjem, u protufazi su, i taj je prijelaz znatno oslabljen, tj. intenzitet γ -zračenja, pri kojem jezgra iz pobuđenog stanja $5/2_2^+$ skoči u osnovno stanje $3/2_1^+$, je malen.



Sl. 9. Neki načini odvijanja sljedećeg procesa:

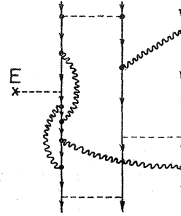
tri šupljine interagiraju s elektromagnetskim poljem i prelaze u isto ili različito stanje triju šupljina. To odgovara tzv. statičkom momentu jezgre ili prijelazu jezgre iz jednog stanja u drugo uz emisiju kvanta γ -zračenja.

Na taj način može se provesti analiza γ -zračenja. Izložena metoda pruža kvalitativno i približno kvantitativno razumijevanje γ -zračenja u jezgri Au. U kvantitativnom računu uzimaju se u obzir i procesi viših redova, s emisijama i apsorpcijama fonona u međustanjima. Jedan takav proces ilustriran je na Sl. 11. Međutim takvi su procesi viših redova manje važni, tj. njihov je doprinos znatno manji od doprinosa dominantnih procesa ilustriranih na Sl. 6.



Sl. 10. Neki načini odvijanja slijedećeg procesa:

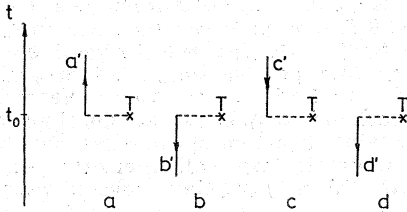
sustav triju šupljina interagira s elektromagnetskim poljem i prelazi u stanje triju šupljina i jednog fonona, tj. jezgra prelazi iz jednog stanja u drugo emitirajući kvant γ -zračenja.



Sl. 11. Jedan od kompliciranijih procesa koji doprinose istom fizikalnom procesu kao dijagram na Sl. 9.

Kombinirajući dana objašnjenja uz Sl. 6. i 8. čitatelji mogu lako za vježbu opisati procese na slikama 9. — 11.

Kako se odvija stvaranje zlata iz žive transfer reakcijom u kojoj se živi oduzima jedan proton (davni san alkemičara)? To se realizira npr. reakcijom $^{198}\text{Hg}(n, d)^{197}\text{Au}$: Živa se bombardira neutronima. Neutron udari u jedan proton jezgre žive, s njim se veže u deuteron (^2H) i taj deuteron izleti iz jezgre; na taj način živa se pretvorila u zlato.



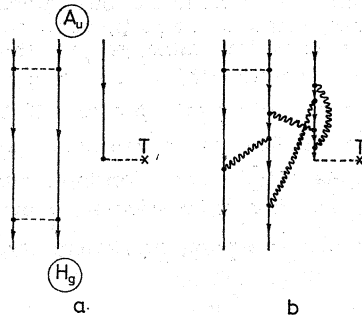
Sl. 12. Vodeći doprinosi transfer reakcijama s dodavanjem ili oduzimanjem jednog nukleona. U klasičnom primjeru Sl. 12a opisivala bi ubacivanje jedne cigle na mjesto a' na vrhu zida u trenutku t_0 , Sl. 12b izbacivanje s vrha zida jedne postojeće cigle b' , Sl. 12c izbacivanje iz zida jedne cigle c' , a Sl. 12d ubacivanje jedne cigle u šupljinu d' u zidu. Pritom, kao i ranije pod ciglom a' podrazumijevamo ciglu koja se nalazi na određenom mjestu a' u zidu. Očito je da u transfer reakcijama broj cigli u zidu nije jednak prije i poslije reakcije, koja se sastoji u dodavanju ili oduzimanju jedne cigle.

Ispravak: smjer strelice b' treba biti prema gore!

Sl. 13. Neki procesi koji doprinose transfer reakciji, kojom se iz žive stvara zlato oduzi-

manjem jednog protona jezgri žive (tj. stvaranjem jedne protonske šupljine).

Kombinirajući dana objašnjenja uz Sl. 6 i 12. čitaoci mogu za vježbu opisati riječima vremenski tok procesa na Sl. 13a i 13b i iskonstruirati neke kompliciranije procese. Očito, u



našem klasičnom primjeru čitav proces sastoji se u izbijanju i odstranjenju jedne cigle iz zida, što može biti kombinirano interakcijama između pojedinih cigli i interakcijama pojedinih cigli s titrajima cijelog zida.

Dijagramatski transfer jednog protona prikazujemo crtkanom horizontalnom linijom, s križićem na kraju i slovom T. Na Sl. 12a ilustrirano je dodavanje jednog protona u stanje iznad Fermijeveg nivoa, a na Sl. 12b oduzimanje jednog protona iz stanja ispod Fermijeveg nivoa. Na Sl. 12c prikazano je oduzimanje jednog nukleona iz j.č.s. ispod Fermijeveg nivoa, tj. stvaranje jedne šupljine, a na Sl. 12d dodavanje jednog nukleona u postojeću šupljinu ispod Fermijeveg nivoa, tj. poništavanje jedne šupljine.

Živa u osnosnom stanju ima dvije šupljine u najnižim raspoloživim energetskim stanjima $s_{1/2}$. Jednostavan proces koji doprinosi stvaranju zlata iz žive transferom jednog protona nacrtan je na Sl. 13a, a primjer procesa višeg reda na Sl. 13b. Procesi nižeg reda, poput onog na Sl. 13a, dominantni su.

Cilj ovog osvrta bio je da pruži intuitivnu sliku o suvremenom pogledu na jedno područje nuklearne fizike. To je jedan od problema teorijske fizike koji se istražuju na Institutu »Ruđer Bošković« u Zagrebu.

Treba istaći da je sama ideja elementarnih pobuđenja karakteristična za svaki kvantnomehanički sustav mnogo tijela, i zato se susreće u raznim granama fizike, za različite fizikalne sustave i interakcije, od elementarnih čestica do unutrašnjosti zvijezda.