

NUKLEARNE REAKCIJE SA TEŠKIM JONIMA
RENEZANSNA NUKLEARNE FIZIKE
(povodom 70. godišnjice nuklearne fizike)

I.V. Aničin

Institut "Boris Kidrič", Vinča, Beograd

Godine 1911. u časopisu The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 6th series, Vol.21, str 669, Ernest Rutherford je objavio članak pod naslovom "The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom" u kome je na osnovu osobina prolaska α čestica kroz veoma tanke folije zaključeno da raspored mase i naelektrisanja unutar atoma mora biti veoma neuniforman. Tako je po prvi put stvorena predstava o postojanju jezgra atoma i istovremeno ustoličena praktično jedina moguća metodologija za proučavanje osobina i strukture ove centralne koncentracije mase i pozitivnog naelektrisanja unutar svakog atoma. Rodjena je nuklearna fizika.

Priča o razvoju nuklearne fizike počev od tih pionirskih pa sve do današnjih dana najčešće se svodi na priču o burnom razvoju, na priču o do tada nevidjenim ulaganjima ljudskih i materijalnih potencijala u jednu oblast nauke, priču o velikim uspesima i svima dobro poznatim spektakularnim rezultatima. O toj senzacionalističkoj strani nuklearne fizike mnogo je toga rečeno i napisano i mi se njome nećemo ovde detaljnije baviti. No, kao i svaka druga priča, i priča nuklearne fizike ima i drugu stranu medalje. Na toj drugoj, manje poznatoj i manje blještavoj strani medalje nuklearne fizike nalazi se lik duha kvalitativnog i semi-kvantitativnog opisivanja pojava; koji ni u jednoj drugoj oblasti fizike nije uspeo da zauzme tako istaknuto mesto. Njegovo prisustvo predstavlja stalni izvor odredjenog blagog nezadovoljstva unutar same nuklearne fizike i ima odredjene posledice na razvoj cele oblasti.

Ovo kratko izlaganje je i posvećeno uzrocima i posledicama takvog stanja u nuklearnoj fizici. U tom kontekstu biće ukratko izložena i problematika nuklearne fizike teških jona - osnovne discipline današnje nuklearne fizike.

Jasno je da ovakvo stanje u nuklearnoj fizici ima korene u specifičnostima predmeta njenog proučavanja. Ono je na prvom mestu razumljiva posledica činjenice da je atomsko jezgro višestruki sistem čiji konstituenti interaguju silama koje još uvek ne poznajemo u potpunosti, da je to sistem koji poseduje ogroman broj jednočestičnih i kolektivnih stepeni slobode, te da je shodno tome teorijsko opisivanje njegovog ponašanja izuzetno složeno. Fenomenološko i modelsko opisivanje, zasnovano na analogijama sa drugim mnogó bolje poznatim sistemima, u nuklearnoj je fizici stoga razvijeno do najvišeg mogućeg stepena, dok je opisivanje zasnovano na prvim principima rezervisano praktično samo za sticanje kvalitativnih predstava o datom procesu ili strukturnoj osobini. Čak i u slučajevima gde se rezultati inače ingenioznih modela mogu podešavanjem vrednosti slobodnih parametara dovoljno dobro podudariti sa eksperimentom pokazuje se nedostatak opštosti rezultata. Već za sledeće jezgro ili čak za prelaz na višu ekscitacionu energiju ili zahteva sasvim druge vrednosti parametara, koje se unapred nikako ne mogu predvideti, ili se pokazuje kao potpuno besmislen. U tome se i sastoji jedna od bitnih specifičnosti nuklearne fizike - ekstrapolacije na nepoznate slučajeve veoma su nepouzdana.

Takvo stanje ima vrlo ozbiljne posledice na karakter eksperimenata u ovoj oblasti - od eksperimenta se, naime, najčešće ne zahteva izuzetno visoka tačnost. Ovome pogoduju i osnovne osobine nuklearnih procesa; eksperimentalna nuklearna fizika suočena je sa neizbežnom stohastičnošću događaja i sa činjenicom da se taj veliki broj stepeni slobode jezgra, u poređenju sa ostalim fizičkim sistemima, izuzetno teško pobudjuje. Osim toga, svi nuklearni procesi su, usled vrlo velikih rastojanja izmedju jezgara,

merenih u jedinicama karakterističnih talasnih tužina, apsolutno nekoherentni. Postizanje visoke eksperimentalne tačnosti se u velikoj većini eksperimentalnih situacija može postići samo trivijalno, produženjem vremena trajanja eksperimenta, odnosno njegovim ponavljanjem. Ovo, međjutim, kako je već rečeno, sadašnje opšte stanje nuklearne fizike ne zahteva izričito, a sa druge strane stil rada savremene fizike ne dopušta ("publish or perish!")^{*}). Nemajući u svojoj teorijskoj bazi dovoljno jaku podršku da zahteva izuzeće od danas usvojenog brzog tempa rada eksperimentalna nuklearna fizika našla se u izvesnoj vrsti ćorsokaka. Pre oko desetak godina ovo se desilo sa dvema do tada osnovnim disciplinama nuklearne fizike - nuklearnom spektroskopijom "van snopova", odnosno nuklearnom fizikom relativno dugoživećih nuklearnih vrsta i stanja nedaleko od linije stabilnosti i na relativno niskim ekscitacijama, i sa niskoenergetskim nuklearnim reakcijama indukovanim lakim jonima. Najveći deo procesa i osobina prvog reda bio je otkriven i bar kvalitativno objašnjen - vreme relativno jednostavnih i brzih spektakularnih otkrića je prošlo, nastupao je period dugotrajnih traganja za manje verovatnim procesima, za finim detaljima strukture, za efektima višeg reda, čije je postojanje više moglo da predoseti dugogodišnje iskustvo i razvijena intuicija no što ih je de facto nepostojeća egzaktna teorija mogla da predvidi.

U društvu, naviknutom da značajne rezultate dobija u brzom vremenskom sledu i naviknutom da ne mala ulaganja budu unapred opravdana jakim teorijskom argumentacijom, počelo je ozbiljno

^{*}) Za one kojima je tačnost od, recimo, 1% nešto uobičajeno i normalno napomenimo da kod inače tipičnih i neizbežnih koincidentnih merenja nuklearne fizike ova tačnost može da se postigne često samo vremenom trajanja eksperimenta od godine pa i više dana!

da se razmišlja o drastičnom smanjenju ulaganja u nuklearnu fiziku. Unutar same nuklearne fizike osećalo se da će biti veoma teško izboriti neophodnu promenu statusa koju je zahtevala novonastala situacija. Osećelo se da specifična obaveza eksperimenta u nuklearnoj fizici, detaljna pretraga područja u potrazi za neslućenim efektima, neće moći da bude zadovoljna u potpunosti. Moralo se zadovoljiti nevelikom postignutom tačnošću eksperimentalnih rezultata. Nelagodnost i frustracija usled svesti o nezavršenom poslu i o nemogućnosti da se stanje promeni "osećali su se u vazduhu" sve više i više.

Jasno je da se do ovakve situacije dolazilo postepeno i da je "opasnost" bila na vreme uočena. Nešto spontano a nešto kao rezultat smišljene akcije upravo u najkritičnije vreme pojavili su se prvi snopovi teških jona energija dovoljnih za savladjivanje Kulonove barijere između dva teška jezgra. Neugodna osećanja zbog prevremenog napuštanja rada u "starim" oblastima potisnuta su u drugi plan pred pravom poplavom novih mogućnosti. Renesansa nuklearne fizike bila je na pomolu. Pregrupisavanje snaga izvršeno je brzo i nuklearna fizika teških jona danas se smatra praktično jedinom aktuelnom i perspektivnom oblašću cele nuklearne fizike. Ekstrapolirajući dosadašnja iskustva, međutim, može se predvideti da će se po otkrivanju svih glavnih efekata i nuklearna fizika teških jona naći u situaciji ekvivalentnoj onoj u kojoj se danas našla "stara" nuklearna fizika. Tada, uz pomoć novih metodologija, treba očekivati povratak na rad na osnovnoj problematici nuklearne fizike - na formiranje opšte i zadovoljavajuće teorije svih nuklearnih pojava i upoznavanje i najfinijih osobina atomskih jezgara.

Ogromno bogatstvo procesa u reakcijama sa teškim jonima, međutim, svakako obezbeđuje veoma dug period vladavine ove oblasti. Ovakva tvrdnja zasniva se i na činjenici da se među mnogobrojnim očekivanim rezultatima značajnim za samu nuklearnu fiziku u ovoj oblasti ponovo nalaze i spektakularna otkrića; dovoljno spektakularna i značajna da društvo pokazuje želju da znatnim ula-

ganjima doprineše što bržem razvoju ove oblasti. To se uglavnom odnosi na mogućnost formiranja potpuno novih i nepoznatih stabilnih nuklearnih vrsta - prvenstveno superteških jezgara, pa zatim i izomera gustine. Rani zahtevi za snopovima teških jona su i bili motivisani mogućnostima sinteze superteških elemenata. Ove su mogućnosti, pak, bile zasnovane na teorijskim analizama uticaja zatvorenih ljusaka u transfermijumskim jezgrima na stabilnost ovih jezgara u odnosu na spontanu fisiju. I ovde se opet manifestovala pomenuta neizvesnost ekstrapolacija u nuklearnoj fizici. Procene za broj neutrona u zatvorenoj ljusci superteškog jezgra, na takozvanom "ostrvu stabilnosti", davale su $N=184$ a za broj protona u zatvorenoj ljusci taj broj se kretao u širokim granicama od $Z=110$ do $Z=126$. Procene za poluživot ovih jezgara u odnosu na spontanu fisiju kretale su se u ogromnom opsegu od 10^{+10} ! Uzimajući u obzir da se u sudaru dva jezgra urana može dobiti i do 6000 različitih izotopa (u odnosu na danas poznatih 1500!), kao i širinu procenjene oblasti u kojoj bi se takva jezgra mogla naći, bilo je očigledno da će potraga za njima biti jedan od najvećih poduhvata eksperimentalne fizike. Već i sama činjenica da se uprkos takvih perspektiva na mnogim mestima počeo da razvija izuzetno složeni istraživački program u tom smeru govori o značaju koji se ovome pridavao.

Medjutim, kako se rad sa teškim snopovima razvijao, otkrivan je sve veći broj pojava relevantnih za samu nuklearnu fiziku i ubrzo je front cele oblasti skrenuo na detaljno proučavanje ovih novootkrivenih pojava. Na prvom mestu shvatilo se da najveća frakcija preseka za interakciju dva teška jona potiče od do tada potpuno nepoznatog procesa, takozvanog duboko neelastičnog rasejanja (ili disipativnih sudara) koji se po prirodi nalazi između dobro poznatih direktnih reakcija i reakcija koje se odvijaju preko složenog jezgra. U ovakvom procesu jezgra se za kratko vreme spajaju, razmenjuju energiju i delimično masu, naelektrisanje i impuls, i ponovo se razilaze, ponekad i bitno promenjenih stanja

i strukturo. Osnovne osobine ovih procesa su već ispitane i modelski opisane i odatle se došlo do zaključka relevantnog i za formiranje superteških jezgara. Zaključeno je da za sintezu jezgara iz ove oblasti upravo ovakav proces pruža najviše šansi a ne proces klasične fuzije, kako se ranije mislilo. To je omogućilo da se u proračun preseka uračunaju i glavni strukturni efekti i nadje, po ovom modelu, optimalna reakcija za sintezu ovih elemenata. Tokom ove godine ta reakcija je i probana ($^{238}\text{U} - ^{248}\text{Cm}$, na 7 MeV/n). Spontano fisibilna superteška jezgra u opsegu poluživota od nekoliko sati pa do oko godine dana nisu nadjena. U datim uslovima eksperimenta ovo samo znači da je presek za njihovo formiranje u ovoj reakciji manji od 10^{-32} do 10^{-34} cm^2 (GSI Nachrichten, oktobar 1981). Jasno je, medjutim, da ovaj rezultat ne govori mnogo - hiljade i hiljade drugih kombinacija imaju izgleda na uspeh, pa čak i one već probane, uz povećanje osetljivosti detekcije. Ako se pokaže da ovakva stabilna jezgra uopšte postoje, makar i da je presek za njihovo formiranje manji od svake razumne vrednosti, izvesno je da će mnogi snopovi teških jona godinama raditi samo da bi proizveli makroskopske količine ovog našem svetu potpuno stranog materijala.

Ovde opisani aspekt nuklearne fizike teških jona samo je jedan u širokom spektru onih koji se otvaraju mogućnošću formiranja nekoliko hiljada novih nuklearnih sistema. Složeni sistemi formirani interakcijom dva teška jezgra imaju masu, naelektrisanje i broj čestica veći od bilo kog do sada poznatog vezanog mikrosistema. Tako se mogu ispitivati načini strukturizacije, koegzistencije i ekscitacije sistema od 500 nukleona umesto sadašnjih 250 a savremene eksperimentalne tehnike omogućavaju proučavanje ovih sistema ako ovi žive ne manje od 10^{-20} s. Mogućnosti koje se otvaraju korišćenjem snopova teških jona sa energijama iznad Kulonove barijere mogu se podvesti pod nekoliko osnovnih pravaca:

1. Korišćenje jakih nuklearnih električnih polja za indukovanje promena u atomima i drugim jezgrima
2. Saopštavanje vrlo velikih momenata impulsa jezgrima, tj. dovodjenje u stanja izuzetno brze rotacije (stanja visokog spina)
3. Prebacivanje (transfer) velikog broja nukleona sa jezgra na jezgro, što dovodi do formiranja vrlo velikog broja do sada nepoznatih jezgara
4. Nalaženje granica stabilnosti nuklearnih konfiguracija, kako
 - a. po broju sastavnih nukleona, tako i
 - b. po mogućnostima pobudjivanja date konfiguracije
5. Korišćenje potpuno novih metoda za izučavanje mehanizama nuklearnih reakcija i osobina pobudjenih stanja jezgara
6. Izučavanje "egzotičnih" procesa i nuklearnih sistema - udarni talasi, kolektivni efekti, izometrija gustine, pionska kondenzacija, fizika jakih polja, superteška jezgra.

Gledajući danas na budućnost nuklearne fizike čini nam se da, zahvaljujući razvoju nuklearne fizike teških jona, možemo očekivati budućnost koja bar neće biti manje uzbudljiva od slavne prošlosti. Ernest Rutherford bi verovatno bio zadovoljan.

.....

Nuklearni fizičari Beograda već nekoliko godina rade na razvoju projekta složene akceleratorne instalacije za ubrzanje teških jona koja treba da bude izgrađena u Institutu Boris Kidrič u Vinči. Parametri instalacije prilagodjeni su uslovima u kojima naša nuklearna fizika živi i radi. Instalacija će obezbeđivati intenzivne snopove teških i lakih jona za nuklearnu, atomsku i fiziku čvrstog stanja; protonske snopove za rutinsku proizvodnju radioizotopa i medicinsku neutronske terapiju; niskoenergetski snop višestruko naelektrisanih teških jona omogućiće rad u odgovarajućim oblastima atomske fizike. Sve savremene primene

snopova biće dostupne.

LITERATURA:

1. D.K. Scott: "The Current Experimental Situation in Heavy-Ion Reactions" u "Theoretical Methods in Medium-Energy and Heavy-Ion Physics", Plenum Press, New York 1978.
2. P.E. Hodgson: "Nuclear Heavy-Ion Reactions", Oxford Univ. Press, Oxford 1978.
3. W. Nörenberg and H.A. Weidenmüller: "Introduction to the Theory of Heavy-Ion Collisions", Springer, Berlin 1980.
4. R. Bass: "Nuclear Reactions with Heavy-Ions", Springer, Berlin 1980.
5. V.L. Miheev: "Eksperimentaljne metodi Fiziki tjaželih ionov", EČAJA, 10, (1979) 269.
6. A.A. Sliv: "Rubeži jadernoj fiziki", UFN 133 (1981) 337
7. R.B. Džolos, R. Šmidt: "Vzaimodejstvie tjaželih ionov pri energijah okolo 10 MeV/nukleon", EČAJA, 12 (1981) 324.
8. W. von Oertzen, Ed. "Deep Inelastic and Fusion Reactions with Heavy-Ions", Springer, Berlin 1980.
9. L.G. Moretto and R.P. Schmitt, Rep.Prog.Phys. 44, 533 (1981).
10. U. Mosel, Comments Nucl.Part.Phys. 9, 213 (1981).
11. CERN Courier, 1980-1981
12. GSI Jahresbericht 1979/80, Darmstadt 1981.