

PRIRODNA RADIOAKTIVNOST I NUKLEARNA FIZIKA

(povodom stogodišnjice otkrića radioaktivnosti)

Ivan Aničin
*Institut za Nuklearne Nauke "Vinča", Vinča, i
Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu*



1896 Pariz je bio uzavreli centar jedne od najvećih kolonijalnih sila u koji se slivao ogroman kapital sa svih strana sveta. Raskalašno se živeo "fin de siecle" i "belle epoque" se primicala vrhuncu. Pored svih vrsta umetnosti, i nauka i tehnika su bile u punom zamahu. Duh Žila Verna još je raspaljivao maštu a Ajfelova kula, izgrađena za svetsku izložbu 1889, bila je inspirativan dokaz velikih mogućnosti modernih vremena.

1. UVOD

Godine 1896., na kraju stoleća u kome je ekspanzionistička zapadna civilizacija svojim izvanrednim intelektualnim i materijalnim postignućima konačno počela da otplaćuje dug ostatku sveta za sve ono što je od njega vekovima uzimala i na čemu je uspešno kapitalizirala, igrom naizgled slučajnog a ipak zakonomernog sticaja okolnosti, otkrivena je i jedna do tada potpuno nepoznata prirodna pojava čije je objašnjavanje dovelo do potpune promene većine dotadašnjih koncepcija o ustrojstvu prirode kao i do uspostavljanja do tada nezamislive tehničke i tehnološke kontrole nad tokovima evolucije nežive materije. Pojava o kojoj je reč je pojava prirodne radioaktivnosti a ono do čega je njeno proučavanje dovelo danas zovemo nuklearnom fizikom, tehnikom i tehnologijom.



Da bi naše praćenje geneze nuklearne fizike iz prirodne radioaktivnosti bilo onoliko poučno koliko to svaka istorija treba da bude, ekspliciraćemo odmah na početku tri teze koje ćemo potom, koliko to bude bilo moguće, relativno dosledno zastupati.

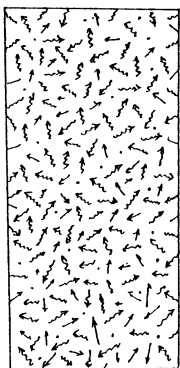
Kao prvo, utvrdićemo da se nuklearna fizika zaista razvila iz studija prirodne radioaktivnosti (iako to uopšte nije moralo da bude tako) i da je iz drugih izvora ostvarila veoma malo suštinskih prodora.

Zatim ćemo utvrditi da većina bitnih otkrića iz oblasti radioaktivnosti i nuklearne fizike ne samo da nije bila teorijski predviđena i planirana već da je, šta više, dobrim delom bila rezultat pogrešnog predviđanja i planiranja.

Konačno, pokušaćemo da ekspliciramo da je razvoj fizike, a pritom naročito nuklearne fizike, počev od te, 1896. godine, bio prosto čudnovato i zaprepasavajuće spontano samousaglašen.

Sve ove tri teze, koje možemo nazvati i unapred izvedenim zaključcima, imaju jedan te isti cilj koji ih objedinjuje; one treba da pokažu da verovatno nikakva osmišljena organizacija istraživanja (u današnjem smislu) ne bi mogla da u ovoj oblasti znanja proizvede sličan učinak onome koga je, u svoj svojoj neuhvatljivoj kompleksnosti, postigao život sâm.

Naše će izlaganje nužno biti kratko, ilustrovano samo ključnim momentima u razvoju odnosa prirodne radioaktivnosti i nuklearne fizike. Mnoge opšte poznate epizode ćemo izostaviti a pomenućemo uglavnom one koje govore u prilog



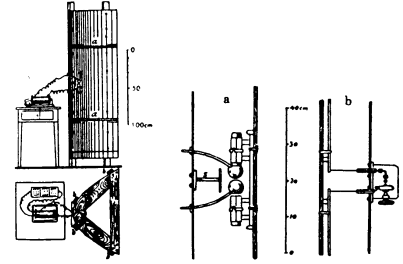
U proseku otprilike ovoliko čestica zračenja poreklom iz prirodne radioaktivnosti u jednoj sekundi prođe kroz svaku ovoliku površinu na Zemlji (ne računajući neutrina). Energije ovih gama, beta i alfa čestica kreću se do nekoliko MeV. Čestica kosmičkog zračenja (prvenstveno miona) ima oko sto puta manje, ali su mnogo viših energija. Sve to zajedno čini prirodni fon na Zemlji koga je, bez specijalnih detektora, praktično nemoguće opaziti. Prirodna radioaktivnost je zato tako kasno otkrivena.

naših teza. Više detalja može se naći u knjigama M.Mladenovića o istoriji nuklearne fizike (1 i 2), niz zanimljivosti o radioaktivnosti i oko nje u knjigama I.Draganića (3) i Draganića i Adlofa (4), a ceo predmet se, jasno, u potpunosti može upoznati samo ponovnim proživljavanjem stogodišta koje je za nama.

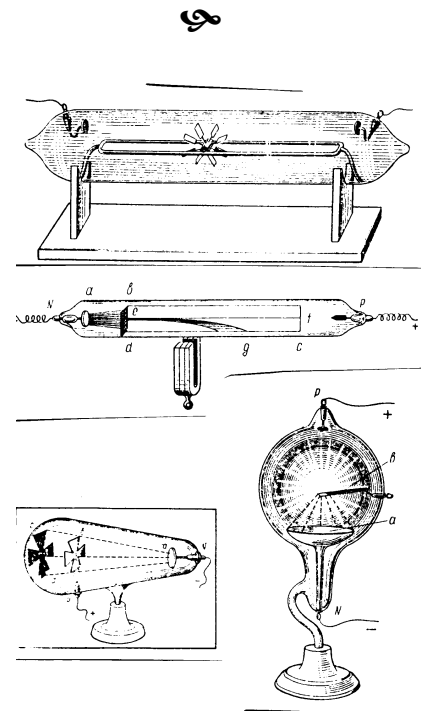
2. PREDISTORIJA

XIX vek se nesumnjivo sa pravom, između ostalog, zove i vekom elektriciteta. Maksvelova elektrodinamika je (oko 1865) predstavljala trijumf teorijske sinteze velikog empirijskog poznavanja električnih i magnetnih pojava. Elektromagnetne sile su, pored gravitacije, vladale prirodom. Izgledalo je da je sve što poznajemo posledica njihovog delovanja. Kada je Maksvel (1873) dodatno sugerirao da je svetlost, pa i infracrveno (otkriveno 1800) i ultraljubičasto zračenje (1801), elektromagnetnog porekla, i time i optiku sveo na elektromagnetizam, ovo uverenje je bilo praktično zapečaćeno. Maksvel nije doživeo da se realizuje njegovo predviđanje postojanja elektromagnetnih talasa većih talasnih dužina koje bi proizvodila naelektrisanja u kontrolisanom kretanju u makroskopskim sistemima. Klimaks razvoja elektrodinamike svakako je predstavljala demonstracija postojanja takvih talasa (Herc, 1888).

U takvim uslovima je, dakle, u najkraćim crtama, došlo do otkrića pojave prirodne radioaktivnosti. No, za razumevanje toka događaja presudno je da se samo par meseci pre ovog desilo uzbudljivo Rentgenovo otkriće X-zraka (kraj 1895). Geneza tog otkrića, važna za našu priču, je sa svoje strane bila otprilike sledeća.



Hercov uređaj za generaciju i detekciju elektromagnetnih talasa iz 1888. To postignuće se može smatrati kulminacijom klasične fizike.



Razni tipovi Kruksovih cevi za ispitivanje osobina katodnih zraka. Pomoću njih je otkriveno X-zračenje, prva elementarna čestica - elektron i inicirano otkriće prirodne radioaktivnosti.



Rentgenov snimak ljudske šake. Dogodovština Vinstona Čerčila iz 1897. godine, nepune dve godine posle otkrića X-zraka, daje dobru sliku o vremenu u kome je otkrivena i prirodna radioaktivnost. Mladi Čerčil bio je ratni dopisnik u Britanskoj kaznenoj ekspediciji protiv pobunjenih plemena na Indijsko-Avganistanskoj granici. Izvesni potpukovnik dobio je metak u nogu i da bi se ovaj lokalizovao i izvadio iz baze je potražen pokretni rentgenski aparat! Na nesreću, za vreme transporta aparat se ošteti i nije mogao biti upotrebljen. Postojanje aparata u to vreme, u takvoj prilici i u toj nedodžiji nije se smatralo naročito iznenađujućim.

Sastavni, i kako se kasnije ispostavilo, bitan deo proučavanja električnih pojava, sastojao se u proučavanju pojava koje proticanje elektriciteta (sa do tada nedefinisanim nosiocima) izaziva u različitim sredinama; čvrstim, tečnim i gasovitim. Proticanje struje kroz gasove ispitivano je u najrazličitijim vidovima staklenih cevi, sa različitim oblicima elektroda, punjenih svim mogućim gasovima pod najraznovrsnijim pritiscima. U vakuumskim (tzv. Kruksovim, ili Gajslеровим) cevima ustanovljeno je postojanje dva tipa "zraka" koji su i činili struju u cevima; katodnih zraka, koji su tekli od katode ka anodi, i kanalskih zraka, koji su tekli u obrnutom smeru. Pored velikog broja značajnih pritom otkrivenih efekata ispostavilo se da je inače sporedna pojava fosforesciranja stakla cevi iza anode, koga su pogađali katodni zraci kada je napon na cevi bio dovoljno visok, više posredno nego neposredno, dovela do izuzetnih otkrića.

Rentgen je ispitivao (u mraku) razne materijale koji fosforesciraju kada se izlože dejstvu katodnih zraka i svoju cev za ekscitaciju je u fazi pripreme ogleda držao zamotan u debeo crni papir. Jednom je slučajno primetio da je materijal svetlucao i pre no što je odmotao cev. Znajući još iz Kruksovih ogleda da katodni zraci ne mogu da prođu kroz tako debeo zaklon odmah mu je bilo jasno da nešto drugo izaziva fosforescenciju. Te nevidljive zrake, prodornije od ma čega drugog do tada poznatog, Rentgen je ispitao veoma iscrpno i sa velikim umećem ali nije uspeo da im odredi pravu prirodu (otud im i ime).

3. OTKRIĆE PRIRODNE RADIOAKTIVNOSTI

Vest o otkriću X-zraka predstavljala je među svim fizičarima, i ne samo među njima, glavnu temu razgovora. Iako je Rentgen svoj rad objavio tek 23. januara 1896. dnevna štampa je dve nedelje pre toga ne samo pisala o otkriću nego i objavila prve fotografije izazvane X-zracima. I na redovnom sastanku Francuske Akademije Nauka od 20. januara Poenkare je već prezentirao senzacionalne Rentgenove fotografije unutrašnjosti živog ljudskog tela. Anri Bekerel ga je pritom upitao na kom mestu u cevi nastaju ti zraci a Poenkare je odgovorio da po svoj prilici nastaju na delu cevi koji luminescira pod dejstvom katodnih zraka. Ovo već samo po sebi nije bilo potpuno tačno budući da je anoda intenzivniji izvor zračenja ali je Bekerel dodatno pogrešno interpretirao Poenkareov odgovor dovodeći u vezu fosforescenciju stakla sa proizvodnjom X-zračenja (5). Budući da je po porodičnoj tradiciji bio veliki poznavalac fosforescencije Bekerel je ubrzo stvorio pretpostavku (opet pogrešno) da bi sve fosforescentne supstance trebalo da, po osvet-ljavanju, emituju ne samo svetlost već i X-zračenje. Od svih fosforescentnih supstanci on je, još jednim srećnim sticajem okolnosti, za testiranje svoje hipoteze izabrao dvostruki sulfat urana i kalijuma, koji inače vrlo intenzivno fosforescira. Po izlaganju sunčevoj svetlosti postavljao je uzorak na fotoploču dobro zamotan u crni papir. Slab lik koji je pritom dobijao na ploči smatrao je u početku potvrdom svoje hipoteze i pripisivao ga je dejstvu "fosforescentnog X-zračenja". Eksperimentišući dalje došao je u situaciju da primeti da je neekscitirani uzorak koji je dugo stajao na zamotanoj ploči proizveo mnogo intenzivniji lik



Henri Becquerel
(1852-1908)

Muzej prirodne istorije u Parizu otvoren je za publiku 1640. godine a u njemu je katedra za fiziku ustoličena 1838. Četiri generacije Bekerela su je držali za redom. Svi su bili istaknuti fizičari i "besmrtnici", članovi Akademije nauka. Prvi u nizu Bekerela fizičara rođen je 1788. a poslednji je umro 1953. Anri je bio treći po redu. Osim otkrića "Bekerelovog zračenja", odredio mu je i prirodu i utvrdio jonizacione sposobnosti.

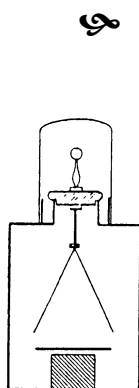


*Henri Becquerel, 1896. "Sur la radioactivité".
Paris, Ann. Chim. Phys. (5) 17, 128-136.
Reproduit avec l'autorisation de la Commission de l'histoire de la physique.*



Bekerelova fotografija koja predstavlja i otkriće prirodne radioaktivnosti. Vide se konture dva

kristala dvostrukog sulfata urana i kalijuma (za koga je već 1907 nađeno da je takođe radioaktivan!) čije je zračenje kroz crni papir i krst od tankog bakra (na donjem liku) izazvalo ploču. Komplet je bio izložen difuznoj dnevnoj svetlosti 26. februara 1896, vrlo slabom suncu 27. februara, zatim ostavljen u fijoku i razvijen 1. marta.



Šema prve Bekerelove demonstracije sposobnosti uranovih soli da razelektrisavaju naelektrisana tela. To je preteča svih kasnijih jonizacionih detektora zračenja.

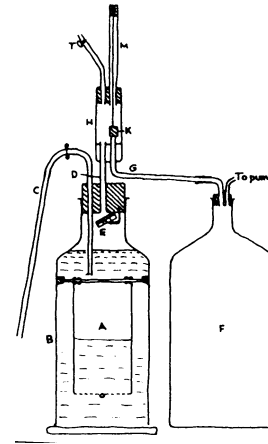
od onog koga je proizveo eksponirani uzorak koji je držan na ploči samo dok je fosforescirao. Ubrzo je shvatio da mu je početna hipoteza bila sasvim pogrešna, da fosforescencija i emisija zračenja koje izaziva fotoemulziju uopšte nisu korelirane, i da je emisija tog zračenja, za razliku od emisije X-zračenja iz cevi koje je prestajalo čim bi se cev ugasila, stalna i potpuno nezavisna od prethodnog izlaganja svetlosti. Pojava prirodne radioaktivnosti bila je otkrivena. Za razliku od X-zračenja, ovo zračenje koje nije bilo potrebno eksitirati i koje se nikako nije moglo ugasiti, u početku je nazivano Bekerelovim zračenjem.

Jedna poučna opaska ovde je verovatno na mestu. Uran i njegova jedinjenja su kao neidentifikovana supstanca vekovima bili korišćeni za bojenje stakla a kao hemijski element ga je otkrio Martin Klaprot u godini Francuske revolucije (1789), kao 15. element otkriven posle onih poznatih od davnina (ili kao 26. element poznat uopšte); dakle nešto više od sto godina pre no što je Bekerel uočio njegove neverovatne osobine. Fotografiska emulzija je u rudimentarnom obliku bila u opticaju počev od oko 1815. a u obliku bliskom savremenom počev od oko 1850. Te dve komponente Bekerelovog otkrića, izvor zračenja i prvi detektor tog zračenja, postojale su, dakle, zajedno dovoljno dugo i postojala je određena verovatnoća da će neko i negde dovesti u kontakt ta dva inače dispartna entiteta. I zaista, vredni istoričari pronašli su da je izvesni N. de Sen-Viktor još 1867. godine primetio da uran izaziva fotoploču. U to vreme ovaj nalaz nije pobudio naročitu pažnju iz bar dva razloga; prvo, zato što nije nastao u krugovima u kojima je mogao da naiđe na pravo razumevanje, a drugo, što ni ti profesionalni krugovi još nisu bili u

punoj meri spremni da prihvate i iskoriste tu čisto empirijsku činjenicu u okviru postojećeg sistema znanja. Bekerelovo otkriće je, međutim, u svakom pogledu došlo u pravom trenutku, i ceo opisani tok događaja koji su do njega doveli opravdava napomenu koju smo učinili na početku teksta; da je do otkrića došlo "igrom naizgled slučajnog a ipak zakonomernog sticaja okolnosti". Oksimoron "*zakonomerna slučajnost*" otud je verovatno najbolji kvalifikator mnogobrojnih otkrića ovog tipa. Takođe, generalna logička teza da nikakvo planiranje istraživanja ne može da dovede do otkrića nečega autentično nepoznatog i u ovoj istorijskoj epizodi ima ubedljiv primer.

Ovde je zgodno priseliti se da je ispitujući ponašanje katodnih zraka u istoj Kruksovoj cevi Tomson samo godinu dana kasnije (1897) uspeo da pokaže da su ovi zraci čestične prirode i da im izmeri specifično naelektrisanje. Time je definisan elektron, atom elektriciteta, prvi komad materije mase manje od mase najlakšeg atoma, atoma vodonika, i prva elementarna čestica uopšte. To se može smatrati i prvim u nizu budućih koincidentnih otkrića (ali opet svakako ne potpuno slučajnih) bez kojih bi bilo apsolutno nemoguće razjasniti suštinu pojave prirodne radioaktivnosti. Dovoljno je primetiti da su i Bekerelovi zraci takođe elektroni (što je on sam demonstrirao već 1900 godine)!

Kada smo već kod elektrona, zanimljivo je da je cela, inače potpuno ispravna teorija elektromagnetizma, bila prethodno razvijena a da se u njoj nigde nije pojavljivalo kvantovanje naelektrisanja (iako je iz Faradejevih studija prolaska naelektrisanja kroz tečnosti sledilo da datoj količini izdvojene materije uvek odgovara



Prva Wilsonova maglena komora (1912). To je bio prvi u kasnijem nizu detektora tragova koji su direktnom vizualizacijom tragova čestica zračenja omogućili kinematičku analizu događaja, što je odigralo veliku ulogu u razvoju nuklearne i čestične fizike. Ovi su detektori apstraktan svet mikroprocesa prebacili u svet naših čulnih percepcija i time naš odnos prema ovoj oblasti učinili znatno emotivnijim ("daleko od očiju, daleko od srca!").





Ernest Rutherford
(1871-1937)

Pravi viktorijansko-edvardijanski pripadnik ogromne Britanske Imperije u "kojoj sunce nikad ne zalazi"; Škotskog porekla, rođen na Novom Zelandu, rad je počeo u Kanadi a završio u Engleskoj. Nesumnjivo je najviše doprineo prerastanju studija prirodne radioaktivnosti u nuklearnu fiziku te se sa pravom smatra ocem ove poslednje. Između ostalih, saradnici i učenici su mu bili Sodi, Han, Gajger, Marsden, Mozli, Bor, Čedvik, Kokroft, Volton.



ista količina elektriciteta, koju je Helmholtc definisao, Stouni iz odnosa Faradejeve konstante i Avogadrovog broja 1881. vrlo dobro procenio a 1891. je nazvao elektronom). Čvrst dokaz o postojanju elektrona željno je dočekao na prvom mestu Lorenc koji je još znatno ranije počeo da razvija svoju teoriju elektrona smatrajući da Maksvelova teorija, budući da ne vodi računa o strukturi materije, mora da se dopuni. Videćemo da je u toku nastanka nuklearne fizike bilo mnogo sličnih situacija, situacija u kojima su ispravni parcijalni rezultati, kao što je to bila cela elektrodinamika, dobijani na osnovu delimično, ili čak potpuno, pogrešnih premisa.

4. INTERLUDIJUM

U periodu između otkrića prirodne radioaktivnosti i otkrića postojanja atomskog jezgra kao izvora emitovanih zračenja, a time i rođenja nuklearne fizike, moralo se prvo odgovoriti na čitav niz tada otvorenih pitanja. Nekoliko stvari je već na prvi pogled u pojavi prirodne radioaktivnosti bilo potpuno nenalik na bilo šta već poznato i to je ono što je i odredilo tri osnovna pravca daljih istraživanja:

- A.- Prvo je postavljeno pitanje prirode samog Bekerelovog zračenja,
- B.- zatim supstance koja ga emituje,
- C.- i konačno procesa iz koga se ono emituje.

Osnovni rezultati koji su postignuti u okviru ta tri pravca istraživanja bili su:

A.- Zapanjujuće brzo dešifrovanje prirode Bekerelovog zračenja, što je bilo omogućeno nizom zaista izvanrednih koincidencija. O utvrđivanju identičnosti beta zračenja otkrivenog 1896. i elektrona otkrivenog 1897. već smo govorili; identifikacija čestica alfa zračenja, uočenog 1898 (Raderford), sa jonima helijuma bila je omogućena otkrićem helijuma kao elementa na Zemlji 1895. godine (što se ubrzo svelo na saznanje da sav helijum na Zemlji i nije ništa drugo do bivše alfa-čestice!), a identifikacija gama zračenja, uočenog 1900 (Vilar), sa kvantima elektromagnetnog polja omogućena je zaista neshvatljivom podudarnošću sa formulacijom Plankove hipoteze iz te iste godine, koja je nastala iz analize spektra zračenja zagrejanih tela; potpuno dispartne pojave, u kojoj direktno opažanje pojedinačnih fotona verovatno nikad neće ni biti moguće! Diferencijacija radioaktivnih zračenja na α , β i γ , i njihova identifikacija, bitno su uticali na druga dva pravca istraživanja - radioaktivne supstance podeljene su na α , β i γ emitere a procesi iz kojih se zračenja emituju su na isti način izdiferencirani na α , β i γ raspade. - umesto jedne pojave sada ih je bilo bar tri. Trebalo je razdvajati šta im je zajedničko a šta različito. Nekoliko decenija kasnije ispostavilo se da se u ovim procesima emituju i neutrina, što se može smatrati jednim od bitnih doprinosa izučavanja prirodne radioaktivnosti fizici jezgra i čestica. Proučavanje neutrina ne samo da još uvek traje već i dobija na intenzitetu. Zanimljivo je da prirodna radioaktivnost u nizovima ne sadrži nijedan pozitronski raspad; kao zračenje, pozitroni su bili predodređeni da obznane otkriće veštačke radioaktivnosti!

B.- Pitanje supstanci koje poseduju osobinu prirodne radioaktivnosti bio je više hemijski nego



Pierre Curie
(1859-1906)
Marie Skłodowska-Curie
(1867-1934)

Direktni Bekerelovi sledbenici, najzaslužniji za brz razvoj studija prirodne radioaktivnosti, sa nizom presudnih doprinosa. Termin "radioaktivnost" potiče od Marije. Za vreme trudnoće sa ćerkom Irenom otkriva polonijum, čije će alfa zračenje 36 godina kasnije Irena sa mužem Frederikom iskoristiti za otkriće veštačke radioaktivnosti. Marija je, kao i mnogi istraživači radioaktivnosti, umrla od leukemije, a Pjera je od iste sudbine, verovatno, spasla rana smrt u saobraćajnoj nesreći.





Frederick Soddy
(1877-1956)

Glavni Raderfordov saradnik u njegovom kanadskom periodu. Otkriće izotopa mu je verovatno najvažniji doprinos. Jedan od mnogih hemičara u istoriji radioaktivnosti i nuklearne fizike. Mnogo Nobelovih nagrada iz oblasti radioaktivnosti dodeljeno je za hemiju a ne za fiziku jer nuklearne transformacije najčešće znače i transmutaciju elementa. Takođe, elementi koji imaju samo radioaktivne izotope a nalaze se u količinama u kojima su nedetektibilni klasičnim hemijskim metodama najlakše se otkrivaju upravo po njihovoj radioaktivnosti



fizički problem; Bekerel je pokazao da je u ispitivanim jedinjenjima uran taj koji je radioaktivan a dve godine kasnije to je za torijum pokazala Marija Kiri. Dešifrovanje složenog niza potomaka koji se u prirodi uglavnom nalaze u sekularnoj ravnoteži sa uranom i sa torijumom dovelo je do otkrića svih aktinida, većine vrlo brzo po Bekerelovom otkriću a onih vrlo kratkoživećih, kojih u prirodnim uzorcima ima u vrlo maloj količini, nešto, ili čak i znatno kasnije (francijum, recimo, tek 1939). Glavna dobrobit za nuklearnu fiziku iz razrešenja ove grupe problema bila je otkriće izotopa (Sodi, 1913.), koji su otkriveni, za čudo, ne preko utvrđivanja postojanja više stabilnih oblika nekog elementa, već preko opservacije da neki elementi mogu pored stabilnog imati i prirodno radioaktivne varijetete (recimo olovo). Shvatanje da u procesima radioaktivnosti ustvari dolazi do transmutacije jednog elementa u drugi, i formulacija takozvanih "zakona pomeranja", bili su neophodni koraci ka izgradnji pravilne slike o suštini radioaktivnih pojava. Drugo važno umeće koje je odavde sledilo bila je veština koncentrisanja pojedinih aktivnosti iz uzoraka iz prirode; na taj način su mogli da se proizvode izvori zračenja velikog intenziteta, doduše ograničenih tipova i energija, ali, kao što će se videti, dovoljnih da se pomoću njih učine praktično sva otkrića suštinski važna za nuklearnu fiziku. Da je nuklearna fizika već od samih svojih početaka bila skupa nauka i privilegija najbogatijih vidi se i po tome što je gram radijuma (čija je aktivnost po definiciji jednaka 1 Ci) 1904. godine mogao da se kupi po ceni od ondašnjih 150000\$, što je ekvivalentno nekoliko sadašnjih miliona dolara (do tih izvora fizičari su tada dolazili uglavnom preko primena u medicini). To što se nuklearna fizika razvila korišćenjem zračenja iz

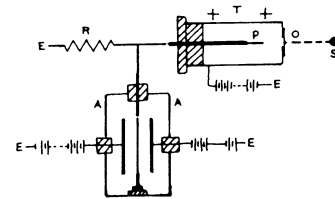
prirodno radioaktivnih izvora a ne iz veštačkih izvora (akceleratora) potiče prvenstveno otud što je to bilo dostupno a zatim verovatno i zato što su veštački izvori, koji su već u Kruksovoj i Rentgenovoj cevi *de facto* imali sasvim dobar prototip i bazu za brz razvoj, sami za sebe ipak predstavljali samo tehnički izazov, dok su prirodni izvori predstavljali i autentičnu zagonetku koju je trebalo ne samo koristiti već i razumeti.

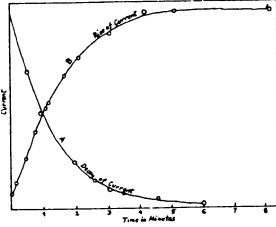
C.- Ispostavilo se da je odgonetanje suštine procesa u kome se zračenje emituje predstavljalo najteži problem. Osnovnu zagonetku predstavljala je, kako je to u početku izgledalo, večitost pojave. Prirodna radioaktivnost je dominantno primordijalna i time ekstra dugoživeća, niske specifične aktivnosti, koja jedva primetno narušava iluziju o opštoj stabilnosti materije. Aktivnost uzoraka iz prirode, u kojima se i kratkoživeći potomci nalaze u ravnoteži sa dugoživećim rodonačelnicima, zaista i jeste konstantna. Ova stalnost aktivnosti, kombinovana sa apsolutnom nemogućnošću da se ma kakvim spoljnim dejstvima primetno utiče na intenzitet pojave, proizvodila je totalni stupor u prvom susretu sa njom. Fizičarski um bio je navikao na kauzalnost - ako hoćeš da se nešto negde desi prethodno moraš nešto da mu uradiš - kvantitativno, to uverenje bilo je izraženo kao zakon održanja energije. Svi do tada poznati sistemi odgovarali su na uticaje od spolja praktično odmah i zakon održanja energije nikad nije izgledao narušen. Ovde je uzrok bio sakriven u dalekoj i apsolutno nepoznatoj prošlosti, a sistem je bio na do tada neviđen način izolovan od ostatka sveta. Izgledalo je da se ima posla sa autentičnim perpetuum mobileom. Jedna od radnih hipoteza koje su pokušavale da objasne pojavu, izlaz je tražila u pretpostavljenoj stalnoj interakciji



Hans Geiger
(1882-1945)

Nemac, jedan od Raderfordovih najproduktivnijih saradnika. Pored mnogih važnih doprinosa, široj javnosti najpoznatiji je po popularnom kuckajućem Gajger-Milerovom (GM) brojaču koji je u razvoju nuklearne fizike odigrao nezamenljivu ulogu (na slici dole je jedna od varijanti iz 1912). Kada je početak Prvog svetskog rata Čedvika zatekao u Nemačkoj i kada je bio interniran, Gajger mu je omogućio da se za to vreme bavi fizikom.





Raderfordove krive "raspada i rasta struje emanacije" iz 1900. godine koje su poslužile kao osnov za formulaciju zakona radioaktivnog raspada 1903.



Egon von Schweidler
(1873-1948)

Bečki "privatdozent" bolcmanovske tradicije koji je pokazao da eksponencijalni zakon raspada za ansambl identičnih mikrosistema,

radioaktivnih supstanci sa nevidljivim, tada još uvek aktuelnim, opšteprožimajućim etrom, koja bi bila uzročnik emisije Bekerelovog zračenja (Kirijevi). Otkriće da su mnogi potomci u nizu ustvari kratkoživeći, što se naročito odnosilo na radioaktivne emanacije, dovelo je Raderforda i Sodija (1903) do konačne formulacije zakona radioaktivnog raspada i do interpretacije konstante raspada kao one (stalne) frakcije atoma koja u jedinici vremena doživljava radioaktivni raspad (za razliku od, recimo, Kirijevih koji su smatrali da zakon raspada opisuje stupanj intenziteta aktivnosti svakog atoma u svakom trenutku). Potpuno novo saznanje da mikrosistemi mogu veoma dugo vremena da provode u stacionarnim a nestabilnim stanjima razrešilo je problem perpetuum mobilea i već u tom ranom periodu otvorilo po prirodnu istoriju nemerljivo značajne primene u geohronologiji. Utvrđeno je da zakon radioaktivnog raspada važi za sve tipove raspada (što se po otkriću izomera ispostavilo i za γ raspad) i da je to ustvari opšti prirodni zakon koji je ranije, u kontinuiranoj neprobabilističkoj varijanti, bio upoznat recimo u fosforescenciji.

U vezi sa ovim, drugi problem u utvrđivanju suštine procesa prirodne radioaktivnosti je očigledno poticao iz do tada praktično nepoznate, a ovde drastično ispoljene stohastičnosti pojave. Prve instrumentalne tehnike opažanja aktivnosti bile su ograničene na fotografsku emulziju i na integraciona jonizaciona merila i one nisu otkrivale diskretni a time i statistički karakter raspada, ali već razvoj Kruksovog spintariskopa (1903), i Gajgerovog brojača (1908), otkrio je distinktno kvantni i trostruko probabilistički karakter svih radioaktivnih pojava: postojanje distribucija gustine verovatnoće za nalaženje

čestica zračenja u vremenu, u prostoru, i u energetskom spektru. Potpuno objašnjenje ovoga nađeno je, jasno, u okviru Bornovske interpretacije kvantne mehanike ali je u njenom formulisanju učešće prethodnih razmatranja stohastičkih osobina radioaktivnih pojava imalo velikog udela. Tu na prvo mesto dolazi statističko izvođenje zakona radioaktivnog raspada Egona fon Švajdlera (1905) i predviđanje korenog intenziteta fluktuacija broja događaja, a zatim i Ajnštajnova interpretacija kvadrata amplitude električnog polja kao verovatnoće za nalaženje fotona na datom mestu, unutar predložene dualističke prirode elektromag-netnog polja (1909). Švajdlerova interpretacija konstante raspada kao svojstva svakog pojedinačnog atoma i uvođenje pojma srednjeg života postali su model za sve probabilističke interpretacije svih pojava u mikrosvetu. Pritom je najteže bilo prihvatiti da je i radioaktivni atom ustvari potpuno stabilan sve do trenutka u kome pretrpi transformaciju, a koji se može definisati *isključivo* probabilistički; deterministički (sa definisanim fluktuacijama) se ponaša samo ansambl identičnih sistema. Tu se po prvi put osetila potreba za skrivenim varijablama, koja se tek u današnje vreme polako smiruje.

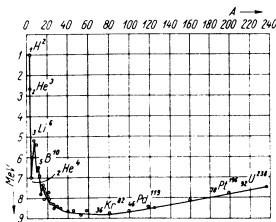
Treći veliki problem, pod osnovnom pretpostavkom da se energija održava, sastojao se u nalaženju izvora energije koju su odnosila zračenja emitovana u radioaktivnim procesima. Kalorimetrijska merenja Pjera Kirija pokazala su da 1 gram radijuma oslobađa oko 140 cal/h, što je oko 100 000 puta više od snage gorenja vodonika. Sledećom srećnom koincidencijom, koja kao da je bila diktirana odnekud "odozgo", Ajnštajново $E=mc^2$ (1906) pružilo je prvo kvalitativan pa kasnije i kvantitativan odgovor na ovo naizgled

zajedno sa prisutnim fluktuacijama, sledi iz probabilističkih argumenata pod uslovom da sistemi ne interaguju i da svaki sistem ima stalnu verovatnoću za raspad. To je bio prvi veliki doprinos prirodne radioaktivnosti fundamentima fizičke teorije. Kvantna teorija ovo sadrži kao jedan od svojih bitnih rezultata. Uopšte uzevši kvantna teorija mogla se, bar pojmovno, mnogo prirodnije razviti iz studija radioaktivnih pojava, koje su mnogo "kvantnije" od atomskih. Što se to nije u potpunosti tako desilo još jedan je dokaz koliko je teško predvideti svaki autentični razvoj. Deo objašnjenja inače verovatno leži u tome što je atom izgrađen analitički poznatim elektromagnetnim interakcijama te mu funkcije stanja mogu biti egzaktno poznate dok su funkcije stanja jezgara i dan danas samo modelske.





Cvetna leja u bašti nuklearnog reaktora Tehničkog Univerziteta u Budimpešti koja slavi relaciju koja čini osnov nuklearne fizike i koja se po jednostavnosti, značaju i dubini eventualno može meriti još samo sa $F=ma$ i $E=hv$.



Zavisnost energije veze po nukleonu od broja nukleona u jezgru koju je Aston prvi proizveo (u nešto drugačijem obliku) 1927. godine uglavnom na osnovu sopstvenih precizionih merenja atomskih masa. Ona je osnov za razumevanje energetike svih nuklearnih procesa.

potpuno nerešivo pitanje. Otud su Astonova sistematska visokopreciziona merenja atomskih masa bila od presudnog značaja za nuklearnu fiziku (Lanževen je 1913. uveo pojam defekta mase a sa dovoljnom tačnošću kvantitativno je potvrđeno je da je gubitak mase izvor (ili posledica) emisije energije u nuklearnim reakcijama tek 1932. godine, kada je već i anihilacija pozitrona to uradila na najdrastičniji način). U svemu tome naročito nas zadovoljava činjenica da je teorija relativnosti bila koncipirana tokom analize pojava koje sa radioaktivnošću nisu imale i nemaju nikakve veze a da svoju najdrastičniju primenu ona i dan danas nalazi upravo tu.

Sledeći, tokom tog prvog perioda stalno prisutan problem, bio je problem detalja strukture atoma, jer je bilo dovoljno jasno da radioaktivnost može biti samo atomski proces. Kakva, dakle, mora biti struktura tog atoma koji može, između ostalog, da realizuje i radioaktivne procese? Model atoma, počev od otkrića prirodne radioaktivnosti pa na dalje, morao je da zadovolji mnogo širi i složeniji univerzum podataka no što je to do tada izgledalo. U prvim godinama od otkrića radioaktivnosti o strukturi atoma se praktično ništa nije ni znalo; jedina poznata elementarna čestica bio je elektron i Tomsonov model atoma je osim njih sadržao i istu količinu pozitivnog naelektrisanja, ali u potpuno nedefinisanoj formi. Sledeći konkretan rezultat koji je doneo preokret u izgradnji realističnijeg modela atoma a istovremeno označio i rođenje nuklearne fizike bilo je Raderfordovo tumačenje rasejanja alfa čestica na tankim folijama.

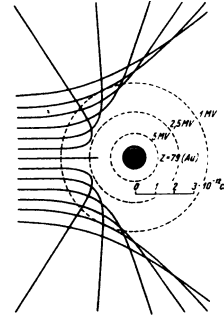
5. RAĐANJE NUKLEARNE FIZIKE

Dalji tok ispitivanja prirodne radioaktivnosti sastojao se prvenstveno u detaljnom ispitivanju emitovanih zračenja, koje se sa svoje strane granalo u dva osnovna pravca:

- a. Ispitivanje interakcija α , β i γ zračenja sa materijom i,
- b. Ispitivanje spektara emitovanih α , β i γ zračenja.

Sa gledišta osnovnih konceptualnih doprinosa nuklearnoj fizici ispitivanje interakcije zračenja sa materijom dovelo je do rađanja samog pojma jezgra, do otkrića prvo protona pa zatim i neutrona a time i do ispravne slike o sastavu jezgara, a zatim i do otkrića jakih interakcija, dok je spektroskopija zračenja emitovanih iz prirodne radioaktivnosti dovela, između ostalog, do pojma stanja jezgra opisanog diskretnim kvantnim brojevima i do razvoja šema raspada jezgara, pa zatim do otkrića slabih interakcija.

Najkorisnijim se za nuklearnu fiziku pri ispitivanju interakcije sa materijom, kao što ćemo se još uveriti, pokazalo α -zračenje, sa polonijumom kao najčešće korišćenim izvorom (polonijum je skoro čist α -emiter, relativno visoke energije, dovoljno dugog života da se isplati a dovoljno kratkog za visoku specifičnu aktivnost). Ispitujući, po predlogu Raderforda i Gajgera, prolaz čestica α -zračenja kroz jako tanke slojeve materije (zlatnu foliju, za početak) Marsden je (1908) utvrdio da se, protivno svim očekivanjima, čestice reflektuju čak i unazad od folije, mada u proseku svega jedna od 10000 upadnih. Da bi



Šema raderfordovskog rasejanja alfa-čestica pomoću koga je 1911. godine shvaćeno da u atomu mora da postoji teško jezgro. Krugovi oko jezgra pokazuju obvojnici trajektorija čestica date energije, ako ove na jezgro dolaze izotropno sa svih strana, i određuju veličinu kojom se jezgro u ovakvom eksperimentu prikazuje svetu.





Henry Moseley
(1887-1915)

Mladić koji je dešifrovao strukturni smisao rednog broja elementa u periodnom sistemu i time i hemiju pretvorio u fiziku. Poginuo je u uniformi, u jednoj od klanica Prvog svetskog rata. Većina fizičara je preživela rat radeći za to vreme na problemima od direktnog interesa za ratnu industriju.



čestica mase α -čestice mogla od nečega da rikošetira unazad to nešto mora imati masu veću od nje same, i to takvu koja se pritom neće raspasti na neke sastavne delove. Budući da se znalo da unutar atoma mora da ima naelektrisanih čestica Raderford je pretpostavio da se α -čestica rasejava na električnom polju istovrsnog naelektrisanja a da je nosilac tog polja velike i nerazrušive mase. Pod pretpostavkom da je ta masa jednaka masi celog atoma odredio je najmanje rastojanje na koje α -čestica date brzine može takvoj masi da priđe i našao da radijus te mase mora biti manji od oko 10^{-12} cm a da joj naelektrisanje (u atomu zlata) treba da iznosi negde oko 100 elementarnih naelektrisanja. Oko takvog tela unutar atoma trebalo bi da se u okviru poznatih dimenzija atoma od oko 10^{-8} cm kreće onih neophodnih stotinak elektrona. Tako je te 1911. godine rođen takozvani planetarni model atoma i uveden pojam atomskog jezgra.

Raderfordovo rasejanje na Kulonovom potencijalu i merenje diferencijalnog preseka postalo je prototip svih budućih nuklearnih eksperimenata sa snopovima čestica. Tu je po prvi put upoznat pojam ugaone raspodele realizovane u čestičnoj, odnosno probabilističkoj, varijanti i pripremljen teren za kvalifikaciju "statistike" u nuklearnom eksperimentu.

Elektronski omotač Raderfordovog atoma vrlo brzo je u vidu Borovog modela (1913) dobio svoju prvu kvantnu teoriju ali je jezgro i u njemu ostalo definisano samo onoliko koliko je to Raderford uradio. Redni broj atoma još nije bio sa izvesnošću izjednačen ni sa brojem elektrona u omotaču (to je imalo da sačeka Mozlija), a

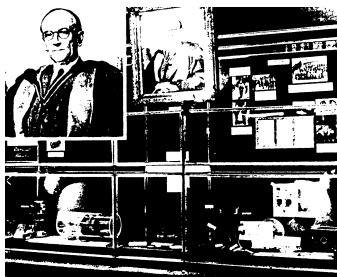
pogotovo ne sa nekim detaljnim osobinama jezgra. Već tada je, međutim, Raderford (u periodu do 1913.) jezgro atoma vodonika nazvao protonom i, oslanjajući se praktično na Prautovu hipotezu (iz 1813, po kojoj su sve atomske mase celobrojni umnošci mase atoma vodonika) prilagođenu na saznanje o postojanju izotopa, *de facto* ga podigao na status elementarne čestice, druge po redu posle elektrona. Time je stvoren osnov za formiranje i prvog modela jezgara atoma elemenata težih od vodonika; za takozvanu hipotezu o protonsko-elektronskoj strukturi jezgara (Van den Bruk, 1913). Kada je, posle završetka Prvog svetskog rata, 1919. Raderford, opet propuštajući snopove prirodnih α -čestica kroz razne sredine, ovaj put kroz lake elemente (koji, kako je kasnije postalo jasno, imaju dovoljno nisku Kulonovu barijeru) izazvao na azotu prvu ikada opaženu nuklearnu reakciju i ostvario prvu veštačku transmutaciju elemenata, u kojoj je iz jezgra bio izbačen proton, i time direktno demonstrirao da u jezgrima oni zaista postoje, protonsko-elektronski model jezgra je bio gotova stvar. Njega je 1921. godine Liza Majtner i zvanično formulisala. Električne sile trebalo je da izgrađuju ne samo atom već i jezgro. Po toj hipotezi u jezgru ima onoliko protona koliko je potrebno da daju njegovu opserviranu masu (po današnjoj terminologiji maseni broj A), u omotaču ima onoliko elektrona koliki je redni broj atoma (Z), a A-Z elektrona se nalazi u jezgru i obezbeđuje električnu neutralnost atoma. I tako je, kroz te ("lude") dvadesete godine ovog veka, cela kvantna mehanika i kvantna elektrodinamika bila formulisana na potpuno pogrešnoj slici o strukturi atoma, što, za divno čudo, nije u tom smislu predstavljalo nikakvu smetnju. Ovaj period video je i veliki napredak u razjašnjavanju detalja svih prirodnih radioaktivnosti, između ostalog i



Uloga crnaca u razvoju nuklearne fizike

Crnaca u istoriji fizike nema. U svetu velikih ljudskih prava, kakav je naš, ovu činjenicu svako ima pravo da tumači kako mu najbolje odgovara. U vreme burnog razvoja kvantne teorije, u ludim dvadesetim, crnci su ušli u modu i postali cenjeni muzikanti i zabavljači. U sportu, pored boksa, tada prodiru i u atletiku.





Vitrina koja komemorira
Čedvikovo otkriće
neutrons 1932. godine.

Tu se nalaze sve
aparature iz tog vremena
na kojima su urađene
studije relevantne za
otkriće neutrons.

Dimenzije i složenost
ovog instrumentarijuma
nikako ne odgovaraju
izvanrednom značaju
otkrića učinjenom
pomoću njega.



Gamovljevu praktično do danas nepromenjenju teoriju alfa raspada, koja je razmatrala emisiju pogrešno strukturirane alfa čestice iz pogrešno strukturiranog jezgra! Kontinuirani spektri beta zračenja bili su već detaljno upoznati i razni modeli emisije nuklearnih elektrona pokušavali su, bezuspešno, da izađu na kraj sa ovim, još jednim prividnim narušenjem svih zakona održanja. No, kako je vreme proticalo, argumenti protiv postojanja elektrona u jezgru su se množili; prvo kvantnomehantički, pa spinski, zatim magnetni, pa je onda Pauli (1930) postulirao emisiju neutrons u beta raspadu, što bi značilo da bi se i on morao nalaziti u jezgru pre emisije.

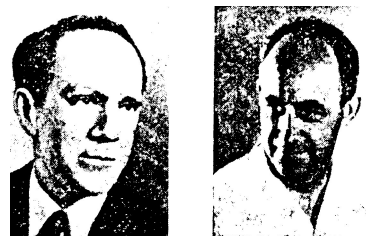
I još jednom je Raderford bio implicitni inicijator sledećeg i ustvari odlučujućeg koraka ka razrešenju svih problema nuklearne strukture, realizovanog opet korišćenjem zračenja iz prirodne radioaktivnosti. Još oko 1920. Raderford se nelagodno osećao na pomisao o postojanju elektrona u jezgru i govorio je kako bi dobro bilo kada bi postojao "nulti element", ili neutron, prethodnik vodonika u periodnom sistemu, čvrsta asocijacija protona i elektrona, koja bi bila dobar kandidat za gradbenu česticu jezgra umesto razdvojenih elektrona i protona. Ta misao se Čedviku, po sopstvenim rečima, zauvek urezala u pamćenje i on otada nije prestao da traži takvu česticu. I kada je početkom tridesetih godina, tokom ozračavanja nekih lakih elemenata, prvenstveno berilijuma i bora, alfa česticama, uočeno vrlo prodorno sekundarno zračenje, koje je bilo nazivano berilijumskim zračenjem (i koje je većina smatrala vrlo visokoenergetskim gama zračenjem), on je, posle mnogih pokušaja, uspeo da dokaže da je ono sastavljeno upravo od Raderfordovih neutrons. Oni su u odgovarajućoj

nuklearnoj reakciji (po današnjoj terminologiji (alfa,n)) morali biti izbacivani iz jezgara gde su se prema tome pre toga morali nalaziti. Ovo se desilo 1932. godine i ona se sa pravom može smatrati godinom rođenja autentične nuklearne fizike. Jezgro se od tada, po originalnoj hipotezi Ivanenka i Hajzenberga iz te iste godine, smatra sastavljenim od protona i neutrona koji u njemu dobrim delom zadržavaju svoje individualne osobine.

Ovo ni izbliza nije bila trivijalna pretpostavka. Zamena elektrona neutronom u jezgru automatski je u prvi plan izbacila dva fundamentalna problema:

1. Nije se više moglo smatrati da se beta elektron (u pojavama prirodne radioaktivnosti, koja je još uvek bila jedina poznata), zajedno sa tada već prihvaćenim Paulijevim neutrinom, u trenutku beta raspada jednostavno izbacuje iz jezgra, jer ga tamo ni nema, već je tada tamo morao biti *stvoren*. Ovo nije ličilo ninašta dotada poznato i problem je rešio Fermi (1934) tako što je pretpostavio postojanje izvesne sile koja bi radila baš ono što treba; transformaciju neutrona u proton, uz emisiju elektrona i neutrina. Tako je u interpretiranje nuklearnih pojava uvedena druga sila po redu osim električne (ili treća uopšte), slaba interakcija. Formulacija teorije omogućena je, opet zgodno koincidentnom, formulacijom kvantne elektrodinamike.

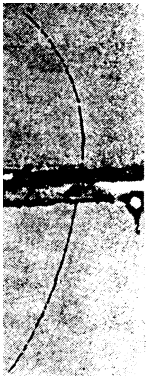
2. Više se nije moglo smatrati da se sastavni delovi jezgra na okupu drže električnim silama; one su, naprotiv, bile samo smetnja. To je već 1932. Hajzenberga dovelo do uvođenja treće sile u jezgro (ili četvrte uopšte, i kako sada



Werner Heisenberg
(1901-1976)
Enrico Fermi
(1901-1954)

Otkriće da procesima prirodne radioaktivnosti upravljaju dve do tada potpuno nepoznate sile - kasnije nazvane jakom i slabom interakcijom - sigurno predstavlja najveći doprinos prirodne radioaktivnosti opštoj slici o ustrojstvu prirode. Hajzenberg i Fermi bili su prvi koji su konceptualno uobličili osnovne osobine ovih dvaju sila.





Fotografija traga čestice u Wilsonovoj komori u magnetnom polju normalnom na sliku. Čestica je u komoru ušla odozdo. Na njoj je Anderson 1932. prepoznao da je ta čestica elektron naelektrisanja suprotne vrste od uobičajenog. Taj događaj otvorio nam je vrata antisveta a Žolio-Kirijevima omogućio prioritet u otkriću veštačke radioaktivnosti.



izgleda poslednje), nuklearne sile ili jake interakcije. 1935. Jukava razvija znatno realističniji model ovih sila a Vajczer važan model tečne kapi. (Takozvano anomalno, nekulonovsko, rasejanje alfa čestica na lakim jezgrima kao i uspešnost Gamovljeve teorije alfa raspada iz 1928. u kojoj je uvedena potencijalna jama (i barijera) za alfa čestice, već su sugerirali postojanje ovakvih sila).

Iste godine kada i neutron, 1932., Anderson je, opet u prirodnom zračenju, odnosno zračenju vanzemaljskog, kosmičkog, porekla koje je Hes otkrio još 1912., otkrio pozitivni elektron, prvu Dirakovsku antičesticu. To je predstavljalo prvi događaj sledećeg niza izvanrednih ko incidencija. 1933. Žolio-Kiri u interakcijama gama zračenja prirodne radioaktivnosti otkriva proces stvaranja parova a zatim i anihilaciju elektrona i pozitrona, i time stiće veliko iskustvo koje će mu biti potrebno za sledeće presudno otkriće. Izlažući, po ko zna koji put, aluminijum snopu alfa zračenja emitovanog od strane prirodno radioaktivnog izotopa, Žolio-Kirijevi 1934. primećuju da aluminijum (ustvari u (alfa,n) reakciji proizvedeni fosfor-30) i po uklanjanju izvora zračenja ostaje radioaktivan, emitujući pozitrone sa životom od oko 2.5 minuta. Osim pozitronskog raspada oni ovim otkrivaju i pojavu veštačke radioaktivnosti. To je bilo neprocenjivo značajno otkriće; postepeno je postajalo jasno da svi elementi, a ne samo oni prirodno radioaktivni, imaju i radioaktivne izotope i da je radioaktivnost, pre no stabilnost, pravilo u prirodi. U ranim fazama evolucije materije kada su, dakle, morali biti prisutni svi izotopi, prirodna radioaktivnost bila je nešto sasvim drugo no što je to danas. Razlika između prirodne i veštačke radioaktivnosti samo je

pitanje epohe u kojoj se priroda u datom lokalitetu nalazi.

U ovoj kratkoj istoriji otkrića veštačke radioaktivnosti nismo slučajno naglasili da je i to otkriće učinjeno pomoću zračenja iz prirodne radioaktivnosti. U to vreme je, naime, već znatno više od godinu dana u punom pogonu bio Lorensov ciklotron koji je sve to vreme proizvodio, u odnosu na Žolio-Kirijev eksperiment, ogromne količine (neprimećene) veštačke radioaktivnosti. To što ni veštačka radioaktivnost nije otkrivena pomoću veštačkih snopova čestica još jedan je čudan sticaj okolnosti do koga je došlo prvenstveno zato što uz ciklotron u to vreme nije postojao adekvatan detekcioni arsenal.

Nekoliko meseci posle ovoga Fermi je, u skladu sa svojim predviđanjima, otkrio da i neutroni mogu, i to mnogo efikasnije od alfa-čestica, da aktiviraju inače neaktivne supstance. U to vreme i neutroni su proizvođeni isključivo iz prirodne radioaktivnosti, u dvostepenim izvorima u (alfa,n) reakcijama, pa i ovo kao i sledeća sudbonosna otkrića u nuklearnoj fizici, na taj način potpadaju pod našu temu. Glavna komponenta Fermijevog otkrića bila je činjenica da neutroni, za razliku od naelektrisanih čestica, tim intenzivnije aktiviraju supstance što su nižih energija, ili, kako se za neutrone kaže, što su sporiji. U standardnim uslovima neutroni se ne mogu usporiti ispod brzina koje odgovaraju energijama toplotnog kretanja na sobnoj temperaturi i takvi, termalni neutroni, odigrali su odlučujuću ulogu u dramatičnim događajima koji su dolazili (usporavanje neutrona, je najefikasnije u sredinama niskog rednog broja, i Fermi je u bazenu sa zlatnim ribicama u bašti vile svog



Frederique Jolliot-Curie
(1900-1958)
Irene Jolliot-Curie
(1897-1956)

Skladan bračni par, koji među mnogim važnim doprinosima ima i otkriće veštačke radioaktivnosti. Frederik je bio jedan od osnivača Pokreta otpora, predsednik Nacionalnog fronta, a posle rata predsednik Atomske komisije i realizator prvog francuskog reaktora. Bio je član Komunističke partije Francuske. Zbog svojih naprednih stavova Irena, Nobelovac iz hemije, 1954. nije bila primljena u članstvo Američkog hemijskog društva. Čerka Žolio-Kirijevih je udata za sina Pola Lanževana.





Lise Meitner
(1878-1968)
Otto-Robert Frisch
(1904-1979)

Pripadnici tima koji je otkrio fisiju. Bili su rođaci, jevrejskog porekla. Napustili su Nemačku na vreme. Emigracija fizičara iz Evrope pred ponovo narastajućom nemačkom arogancijom koja je dovela do Drugog svetskog rata uglavnom je završila u Americi koja tada i u fizici preuzima, i više ne ispušta, vodeću ulogu. Bez Ajnštajna, koji je svojim autoritetom pokrenuo proces, bez Fermija, Vignera, Beta, Fon Nojmana, Bloha, Telera, Silarda, Friša, Fuksa, i ogromnog broja ostalih evropljana, amerikanci ne bi tako brzo došli ni do reaktora ni do bombe.

venčanog kuma po prvi put proverio da spori neutroni zaista jače aktiviraju srebro).

6. DALJI, SUDBONOSNI, ODNOSI PRIRODNE RADIOAKTIVNOSTI I NUKLEARNE FIZIKE

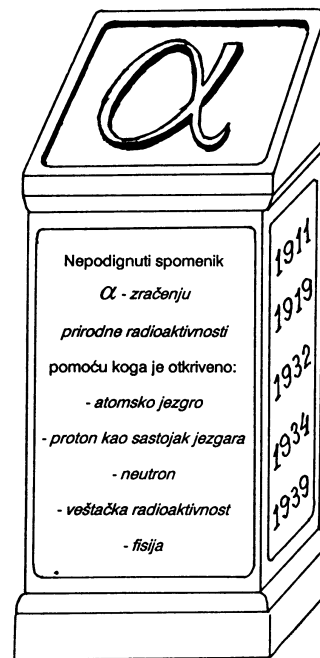
Aktivacija stabilnih elemenata izlaganjem neutronima po Fermijevom receptu dovela je do naglog porasta količine podataka o jezgrima; i akceleratori su počeli brzo da se razvijaju pa se i količina podataka iz ostalih nuklearnih reakcija sve više uvećavala. Ali novih suštinskih prodora jedno vreme nije bilo. Jedan od pravaca istraživanja sa potencijalno važnim predvidivim rezultatom bila je potraga za transuranima, elementima težih od urana kojih u prirodi nema, a za koje je Fermi, kako se kasnije pokazalo ipak ispravno, pretpostavljao da se mogu dobiti zahvatom neutrona od strane urana. Počev od 1934. Fermi je vrlo dosledno pokušavao da ovo i ostvari. Identifikacija rezultata ozračivanja je međutim ispala složenija no što je iko pretpostavljao. Po ko zna koji put se desilo da se tražila jedna stvar a da se našla druga, koju niko nije očekivao (iako je tu, istini za volju, bilo prisutno i ono što se izvorno tražilo, a i ono što se nije tražilo moglo je da bude očekivano jer je, kako se kasnije ispostavilo, Ida Nodak naslućivala nešto slično - zagonetni su putevi Gospodnji!). O istoriji otkrića fisije toliko je pisano da ovde nećemo to još jednom prepričavati; pomenućemo samo ono što se uklapa u opštu liniju naše priče.

Sledeći važan element budućih događaja bila je egzaktna identifikacija uranovih izotopa koju je Dempster izvršio tek 1935. Zahvaljujući

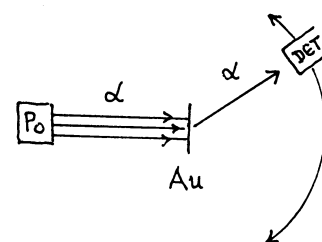


tome unapred se moglo očekivati da će se dva glavna izotopa različito ponašati. I još jednom su hemičari imali težak zadatak jer se proizvod ozračivanja urana neutronima praktično drugačije nije mogao identifikovati. Posle mnogih nedoumica u toj identifikaciji, u kojoj su pored Fermijeve grupe tragični akteri bili i Irena Kiri i Pavle Savić, Han i Štrasman su konačno, 1939., uspešno obavili hemičarski deo posla nedvosmisleno identifikujući barijum kao najzastupljeniji proizvod ozračivanja. Oni sami, ne razumevajući odakle on tu ali sigurni u svoje rezultate, poreklo barijuma nisu komentarisali. U zbrkanim događajima koji su nagoveštavali početak novog svetskog rata to su uradili Liza Majtner, u Stokholmu, i Oto Friš, u Kopenhagenu, koji su se već bili pridružili reci ljudi koji su uspeali da na vreme napuste Nemačku. Liza Majtner je izračunala da cepanje jezgra urana izazvano zahvatom termalnog neutrona, što je ona nazvala fisijom, oslobađa ogromnu, do tada neviđenu energiju, uglavnom u vidu kinetičke energije novih jezgara atoma iz okoline sredine periodnog sistema, a Oto Friš je to eksperimentalno proverio. Proces je, dakle, izvanredno efikasan: izazvan je neutronima obične temperature, prosečne energije 1/40 eV, a energija fisionih fragmenata iznosi oko 170 MeV, što odgovara temperaturi reda desetina milijardi stepeni. Potpuna fisija kilograma urana oslobađa dovoljnu energiju da sferu vazduha prečnika jedan kilometar zagreje na temperaturu ključanja vode. Neviđeno uzbuđenje koje je objavljivanje otkrića fisije izazvalo u svetu već otud je sasvim razumljivo.

Sledeći važan događaj bilo je objavljivanje dovoljno jasne činjenice da se u fisiji pored

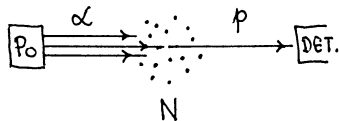


Šematski prikaz eksperimenata u kojima su pomoću α -zračenja iz prirodne radioaktivnosti učinjena otkrića od najvećeg značaja za nuklearnu fiziku:

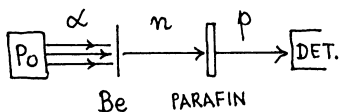


OTKRIĆE ATOMSKOG JEZGRA
(Raderford 1911)

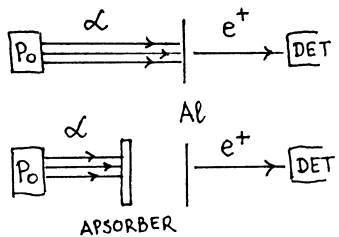




OTKRIĆE PROTONA
 KAO SASTOJKA
 JEZGARA
 (Raderford 1919)
 i
 OTKRIĆE
 NUKLEARNIH
 REAKCIJA
 (Raderford 1919)



OTKRIĆE NEUTRONA
 (Čedvik 1932)



OTKRIĆE VEŠTAČKE
 RADIOAKTIVNOSTI
 (Žolio-Kirijevi 1934)



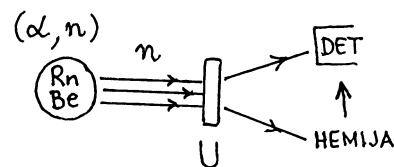
fisionih fragmenata oslobađa i nekoliko (više od jednog) neutrona (već pogled na kartu izotopa govori da dva fisiona fragmenta imaju veliki višak neutrona u odnosu na svoje stabilne izotope). Ovo otkriće grupe Žolio-Kirija koje je učinjeno pred sam početak rata bilo je otprilike i poslednji podatak koji je u vezi sa fisijom javno objavljen (druge grupe koje su došle do sličnih rezultata morale su da se uzdrže od objavljivanja). Zatim su Bor (koji se tada zadesio u Americi) i Uiler, analizom modela tečne kapi, pokazali da je fisiji, pri zahvatu termalnih neutrona podložan samo U-235, dok U-238 može da pretrpi fisiju zahvatom samo brzog neutrona i da u prirodnoj smeši ovaj teži izotop koga ima 99.3% predstavlja u ovom smislu samo štetni apsorber sporih neutrona. Svi ovi elementi uzeti zajedno govorili su o mogućnosti odvijanja lančane reakcije u uranu-235 (Silard, Žolio-Kiri) i samim tim je već postalo apsolutno neizbežno da do realizacije procesa i kontrolisane i nekontrolisane lančane reakcije kad tad i dođe. To što je se to desilo onako brzo kako se desilo ima da se zahvali ratnim uslovima koji su ovaj razvoj samo ubrzali.

Kroz godine traganja za transuranima Fermi je postao najpotpuniji i najautoritativniji poznavalac svih osobina interakcije neutrona sa materijom i sigurno je bio najpozvaniji i da isprojektuje i da realizuje prvi nuklearni reaktor. To što je ovaj proradio već 1942. bilo je zaista fantastično postignuće. Gorivo je u prvom reaktoru bilo prirodni uran (sa grafitnim moderatorom) i on je u potpunosti bio mašina prirodne radioaktivnosti. (Predviđanje da reaktori stvarno mogu da postoje i u prirodi potvrđeno je 1972. kada su u rudniku urana Oklo u Gabonu pronađeni izotopski ostaci lančane reakcije koja je spontano

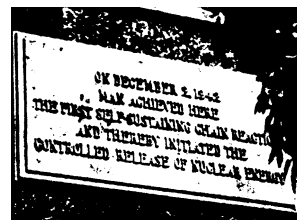
tekla na tom lokalitetu pre dve milijarde godina. Obična voda je pritom mogla da bude moderator jer je urana-235 tada u prirodnoj smeši bilo negde oko (neophodnih) 3%. Da fisija i direktno spada u prirodnu radioaktivnost pokazali su 1940. Fljorov i Petržak otkrivši spontanu fisiju urana.)

Na ovom smo mestu ostali dužni nastavak istorije o transuranima kojom je priča o otkriću fisije i počela. Zauzvrat otkriću veštačke radioaktivnosti koje je učinjeno pomoću prirodne radioaktivnosti a ne na akceleratoru, otkriće transurana je učinjeno na akceleratoru a ne na način kojim su se kasnije masovno proizvodili, na reaktoru, ili neutronskom izvoru. Fermiju, koji je otkrio ozračavanje neutronima, su na taj način izmakla otkrića i transurana i fisije, iako su se oba svakako masovno nalazila u proizvodima ozračavanja urana koje je on dobijao. Prvi transuran, neptunijum, otkrili su (po zvanično priznatoj verziji) Makmilan i Abelson 1940 a otkriće drugog, plutonijuma, već je bilo klasifikovano - dugoživeći plutonijum-239 imao je neparan broj neutrona i bio je, već po Boru i Uileru, fisilan termalnim neutronima. Vrlo rano se primetilo da se lako može dobijati zahvatom neutrona na uranu-238 i kada je prvi Fermijev reaktor proradio bilo je rešeno da se konstruišu reaktori specijalno za njegovu proizvodnju.

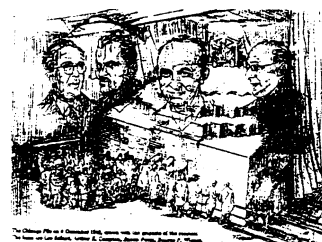
Tako smo se konačno približili klimaksu razvoja nuklearne fizike i njene relacije sa fenomenom prirodne radioaktivnosti. Ako separaciju izotopa jednog elementa ne smatramo ozbiljnijom intervencijom nad prirodnim stanjem stvari tada se i ostvarenje nekontrolisane lančane reakcije u verziji atomske bombe od U-235 može podvesti pod formu prirodne radioaktivnosti, pa na

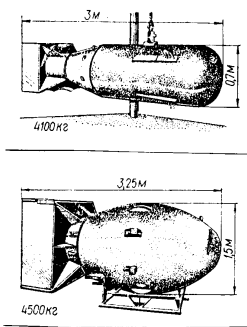


OTKRIĆE FISIJE
(Han i Štrasman 1939)



Spomen ploča na zgradi u krugu Univerziteta u Čikagu (usred multimilionskog grada!) u kojoj je Fermi 1942. godine većim rasporedom prirodno radioaktivnih i stabilnih materijala oformio do tada nepoznat i potencijalno najmoćniji izvor energije. Na slici dole, nacrtanoj grafitom iz tog reaktora, likovi su Silarda, Komptona, Fermija i Vignera.





Prva bomba od visoko obogaćenog urana, "Little boy", bačena na Hirošimu, i druga plutonijumska bomba "Fat man" bačena na Nagasaki. Iako su ove dve naprave svojom namerno izazvanom nadkritičnošću, pomoću takozvana "tri efekta": udarnog, toplotnog i radijacionog, ubile čitavih 200000 civila to su, sa cenom od oko 100000 današnjih dolara po glavi (imajući u vidu koštanje razvoja bombe), bila daleko najskuplja (masovna) ubistva u istoriji ljudskog roda. Bomba se zato morala dodatno eksploatisati, što se, za sada samo na političkom planu, vrlo uspešno još uvek i radi.



taj način i istorija bombe spada u našu priču. Politički deo te istorije ćemo izostaviti potpuno a o onom naučnom i stručnom reći ćemo samo najosnovnije. Gotovo od samog početka rada na bombi projektovane su dve bombe; ona od urana jako obogaćenog izotopom U-235 i ona od plutonijuma-239. Stoga su paralelno vođena dva programa do tada neviđenih razmera; jedan za izotopsko obogaćivanje urana i drugi za proizvodnju plutonijuma. Postrojenja za izotopsko obogaćivanje urana gasnom difuzijom izgrađena su u Ouk Ridžu a konvertorski reaktori i izdvajanje plutonijuma iz uranskih gorivnih elemenata u Henfordu. Tim koji je od tih materijala trebalo da izgradi bombu bio je u Los Alamosu. Da osetimo veličinu tog poduhvata prisetimo se da je za jednu plutonijumsku bombu potrebno oko 10 kilograma plutonijuma, materijala od koga na Zemlji praktično ne postoji ni jedan jedini atom - svaki atom bukvalno je morao biti napravljen; da bi se to uradilo, samo u Henfordu je na tim poslovima sa visoko radioaktivnim materijalima tokom tih ratnih godina radilo 40000 ljudi. Da bi se cilj ostvario što pre tu je za kratko vreme podignuto devet reaktora (koji su, uzgred budi rečeno, radili i kasnije, kroz ceo period hladnog rata, i proizveli tone i tone plutonijuma za hiljade bombi a pritom i najveće radioaktivno đubre na kugli Zemaljskoj). Postrojenja za obogaćivanje urana nisu bila ništa manje impresivna i složena.

Razvoj bombe je, po nekim procenama, koštao oko 2 milijarde ondašnjih dolara (preko 20 milijardi današnjih) i jasno je da uopšte i nije dolazilo u obzir da ona ne bude bačena. Od tada, kako se to obično kaže, svet više nije bio onaj isti. Ni nuklearna fizika više nije bila ista; i ona je sledila model rada koji se ovde pokazao tako

plodotvornim; rođen je "big science" i sve skuplja istraživanja počela su da se rade sa sve čvršće unapred definisanim konkretnim ciljevima. Time je i lepota apsolutno neizvesnog puta u apsolutno nepoznato iz perioda nastanka nuklearne fizike iz studija prirodne radioaktivnosti, koju smo ovde pokušali da dočaramo, nepovratno nestala. Da li zato, ili zato što je sve bitno o jezgru praktično već bilo naučeno, tek, u periodu od rata naovamo o jezgrima je uprkos ogromnog truda otkriveno relativno malo toga suštinski novog i uzbudljivog. Kao najkraći rezime tog perioda u kome su uglavnom korišćeni akceleratori snopovi, u kontekstu naše teme, može se reći da su sva ta složena istraživanja ponašanja jezgara u najraznovrsnijim situacijama pokazala da su jezgra, ako im se pruži prilika, sposobna za iznenađujuće bogat unutrašnji život sa mnogobrojnim načinima ekscitacije i deekscitacije i uzajamnih transformacija, i da je prirodna radioaktivnost samo slabi dugoživeći eho mnogih inače violentnih i brzih nuklearnih procesa.

Zbog izvanredno naraslih cena fundamentalnih istraživanja, ona su u oblasti studija ne samo nuklearne fizike već i prirodne radioaktivnosti, u skladu sa od ranih dana prisutnim duhom potpune otvorenosti i svesti o tome da su osnovna znanja opšte dobro, postajala sve više internacionalna, i to je danas njihova glavna odrednica (uprkos povremenih tendencija da se nauka deli na, recimo, jevrejsku i arijevsku, i tome slično, studije prirodne radioaktivnosti, a delimično i potonji razvoj nuklearne fizike, demonstrirali su iznova da je jednoznačno poznavanje prirode anacionalno opšteljudsko pregnuće, što je neoborivo argumentovao Čehov lucidnom opaskom da "ne postoje nacionalne

O LOKALNOM RATU

(Anonim)

Hodi dušo, ne plači mi
ptiče,

Slušaj svoga tatu;
To je samo atomsko
bombiče

U lokalnom ratu.

To je samo čikin
raketuljak

Što žuri polako -
Pa će da nas šibne k'o
smotuljak

U lokalni pak'o.

U prepevu

Dragoslava Andrića



Još su Bekerel i Pjer Kiri utvrdili da jonizaciona zračenja izazivaju fiziološke efekte. Tokom vremena odnos prema tim efektima se menjao. Još tridesetih godina ovog veka samo vrlo bogati ljudi mogli su sebi da priušte dugotrajne terapije "lečenja" svojih reumatičnih oboljenja visokoaktivnim radijumskim jastučićima.

Robert Openhajmer i general Grouvz se na gornjoj slici u svojoj svakodnevnoj odeći dive ostacima trideset metara visokog gvozdеног tornja koji je ispario od eksplozije прве atomske bombe koja se još до nedavno nalazila на njegovom врху. Pitanje fiziološkog dejstva malih doza i danas je kontroverzno (slika dole). Odnos prema tom problemu kreće se od radiofobije široke javnosti до indolencije profesionalaca.

**Нуклеарци
дуже живе**

Следећа вест ће многе затећи у чуду: британски радници у нуклеарној индустрији живе дуже од националног просека осталих запослених, са мањом смртношћу изазваном различитим узрочницима (укључујући рак)!

Ово је најважније откриће проучавања здравственог стања 75 хиљада људи и жена који су у нуклеарној индустрији радили од 1946. до 1988. године. Истраживачки тим предводио је др Луис Карпентер, са Универзитета у Оксфорду, а учествовали су научници са Лондонског факултета за хигијену и тропску медицину и из Епидемиолошке јединице Краљевског истраживачког центра за рад.

Поменуто новост саопштио је часопис „Радијешни ресерч“.

ПОЛИТИКА

понедељак 3. октобар 1994.

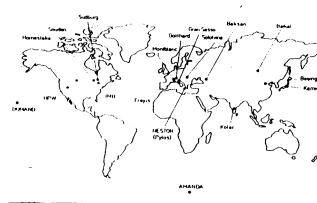
tablice množenja"). U primenjenim nuklearnim istraživanjima, ne samo onim vojnim, već i svima sa iole komercijalnim prizvukom, a među njima naročito energetskim, o tome nema ni govora - uprkos na velika звона оглашаваних интеграционих кретања то су остала строго затворена предузећа од najужег националног интереса која štiti институција poslovne ali i државне тајне. U ширим размерама слободно ширење nuklearne tehnike i tehnologije sprečava међународна контрола диктирана од стране monopolističkih sila.

7. ODNOSI PRIRODNE RADIOAKTIVNOSTI I NUKLEARNE FIZIKE DANAS

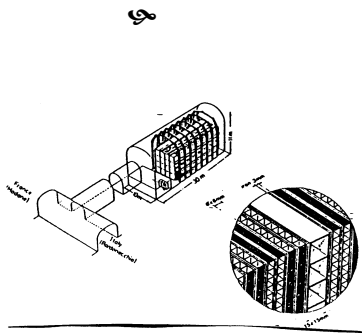
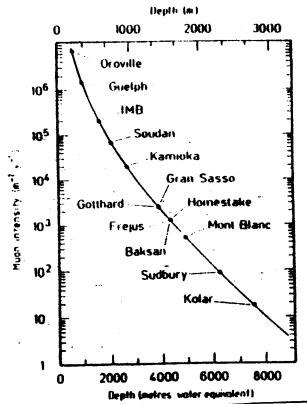
Istraživanje prirodne radioaktivnosti i после читавих сто година, u kontekstu današnje nuklearne fizike, zauzima vrlo posebno mesto. Interes se pritom pomerio prvenstveno на maloverovatne prirodne procese iz kojih rezultuju ekstremno niske aktivnosti. Tu spadaju ili potrage за fundamentalnim procesima koji mogu да се одвијају само под uslovom да narušavaju neke од zakona održanja па су им konstante raspada izuzetno male, или potrage за retkim radioaktivnim vrstama u prirodi koje су formirane u egzotičnim maloverovatnim procesima. Opažanje takvih procesa i merenje odgovarajućih konstanti raspada zahteva ekstremno niskofonske uslove, velike izvore, ogromne detektore visokih efikasnosti, i duga vremena merenja. Laboratorije u kojima се истражују ovakvi procesi najčešće су smeštene i до неколико kilometara duboko под zemljom. U većini takvih potraga rezultati су još uvek negativni; određuju се samo granice postojanja, odnosno nepostojanja, datih pojava па су та истраživanja stalna, са težnjom ka neprekidnom

povećanju osetljivosti merenja. Tek u ovoj oblasti ne samo da u punoj meri postaje jasno koliko je važno utvrditi da li se neka pretpostavljena pojava odigrava ili ne, već još jasnije postaje da je u principu nemoguće utvrditi da se data pojava apsolutno ne događa. Od niza takvih istraživanja mi ćemo ukratko pomenuti tri najinteresantnija: raspad protona, bezneutrinski dvostruki beta raspad, i potragu za superteškim elementima u prirodi.

Proton je najlakša čestica koja pripada porodici čestica koje zovemo barionima. Po današnjem gledištu barioni su komponovani od kvarkova i imaju polucele spinove. Zajedno sa mezonima, koji su takođe komponovani od kvarkova ali imaju celobrojne spinove, oni čine grupu jako interagujućih čestica; hadrona. Slabo interagujući fermioni koji su bez strukture čine nezavisnu grupu leptona. Svim barionima je pripisan određen takozvani barionski broj, koji se u svim opaženim procesima u kojima barioni učestvuju, održava. Pošto je proton najlakši barion to nema bariona u koji se on može raspasti; ta se jednostavna činjenica formuliše tako da se kaže da mu je raspad zabranjen zakonom održanja barionskog broja. Problem sa barionskim brojem je što on, za razliku od ostalih kvantnih brojeva koji se konzerviraju, nije povezan sa nekom fundamentalnom simetrijom hamiltonijana neke od interakcija, već je čisto empirijska veličina. U istoj kategoriji još se nalaze i takozvani leptonski brojevi koji se održavaju u svim opaženim procesima u kojima učestvuju leptoni. Ako se barionski broj (ali i leptonski) ne održava egzaktno tada bi sa nekom malom verovatnoćom proton mogao da se raspada, recimo kao $p \rightarrow e^+ + \gamma$. Sličnih kanala raspada, koji ne bi narušavali



Lokacije najvećih i najdubljih podzemnih (i podvodnih) laboratorija u kojima se vrše merenja malih aktivnosti i retkih događaja najveće osetljivosti; između ostalih i merenja najegzotičnijih ali i danas najinteresantnijih prirodnih radioaktivnosti. Konkurentni i nerazličivi fonski događaji indukovani tvrdom komponentom kosmičkog zračenja, čije prisustvo smanjuje osetljivost merenja, u tim laboratorijama su više redova veličine manje prisutni no u onim na površini (slika dole). Fon koga izazivaju neutrina, naročito ona proizvedena u atmosferi, međutim, ne može se eliminisati ni odlaskom pod zemlju. On definiše ultimativnu osetljivost u potragama za raspadom protona, odnosno za sveopštom prirodnom radioaktivnošću. Na Mesecu ove komponente fona nema.

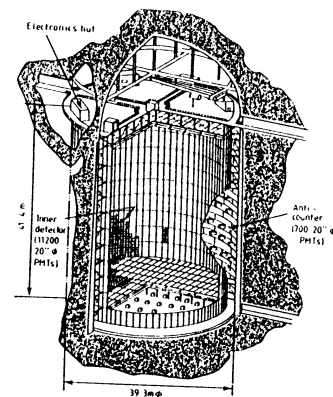


Dva od desetak velikih podzemnih detektora namenjenih između ostalog i traganju za signaturom raspada protona. Detektor u tunelu Frežis na dubini ekvivalentnoj skoro 5000 m vode (na slici gore) zove se trag kalorimetar. Čine ga naizmenični tanki slojevi gvožđa u kome raspad treba da se odigrava i scintilatora koji treba da registruje tragove čestica iz

nijedan od egzaktnih zakona održanja koji potiču od fundamentalnih simetrija interakcija, ima čitav niz. Današnje teorije takozvanog Velikog ujedinjenja svih interakcija ("GUT") predviđaju da na jako velikim energijama razlike između jačine interakcija nestaju i da transformacije kvarkova u leptone i obrnuto postaju moguće. Nevolja je što se ovo sa značajnim verovatnoćama treba da počne da događa na energijama koje su daleko iznad onoga što će ikada biti ostvarivo u uslovima na Zemlji. Kao jedna od retkih mogućnosti da se ova predviđanja provere ostaje upravo provera stabilnosti protona. Na energijama raspada protona, naime, ovakvi procesi transformacije kvarkova u leptone mogli bi da se odvijaju samo sa izvanredno malim verovatnoćama, ali činjenica da možemo posmatrati jako veliki broj protona tokom jako dugog vremena ipak daje nadu da se i tako maloverovatan proces može opaziti. Nekonzervaciju barionskog broja takođe očekuju i teorije koje pokušavaju da objasne poreklo vladavine materije nad antimaterijom u vasioni. Ovde nije zgoreg reći da bi se, u duhu ranih istraživanja prirodne radioaktivnosti, traganju za raspadom protona trebalo pristupiti čak i kada za to ne bi bilo nikakvih teorijskih argumenata. Dovoljna motivacija trebalo bi da bude već to što taj proces može da postoji a da ne protivureči nijednom fundamentalnom principu. Današnja logika finansiranja fizike, kombinovana sa prohibitivnom cenom ovih istraživanja, međutim, ovo ne dozvoljava; da bi se eksperimenti finansirali potrebna je toliko dobra prethodna teorijska argumentacija da mogućnost da se ne otkrije ono što se očekuje bude minimalna, ili, da i u slučaju da se ne nađe očekivano, teorijske implikacije ne budu manje značajne.

Pošto se proton nalazi u svim jezgrima i pošto mu kvarkovska struktura pritom nije bitno poremećena to je on, ako uopšte jeste, uvek na sličan način podložan raspadu. Pitanje stabilnosti protona otud je ekvivalentno pitanju stabilnosti sveukupne materije. Njegova nestabilnost bi rezultirala u sveopštoj prirodnoj radioaktivnosti koja bi time postala osnovna odrednica materije. No kako se takva sveopšta radioaktivnost ne opaža jasno je da poluživot protona mora biti ogroman. Donja granica tog poluživota već se može grubo proceniti bez ikakvih merenja iz same činjenice da živi svet uopšte postoji. Lako se vidi da bi doza od zračenja iz raspada protona u telu čoveka bila smrtonosna ako bi poluživot protona bio manji od oko 10^{16} godina (setimo se da je život vasiona, po teorijama koje podržavaju ideju Velike eksplozije, svega reda 10^{10} godina!). To što se zračenje iz takvog pretpostavljenog raspada ne opaža običnom instrumentacijom kao fonsko zračenje već diže ovu procenu na preko 10^{20} godina! Eksperimenti specijalno projektovani za detekciju raspada protona teku već poslednjih četrdesetak godina. Ogromni detektori zračenja iz pretpostavljenog raspada istovremeno su i izvori tog istog zračenja, jer protona ima svuda. Da bi se fon minimizirao detektori se smeštaju u duboke podzemne lokacije a merenja traju godinama. Raspad protona do sada nije opažen sa nedvosmislenom signaturom i zbirni rezultat svih ovih eksperimenata do sada se svodi na to da je parcijalni poluživot protona, za recimo mod raspada na pozitron i neutralni pion, veći od neverovatnih 10^{33} godina! Ovako veliki poluživot već je eliminisao neke varijante teorija velikog ujedinjenja ali se dalji pomak ovog rezultata više ne očekuje jer se fon u ovim eksperimentima na Zemlji, zbog prisustva atmosferskih neutrina,

raspada. Na slici dole je Čerenkovljev detektor "Superkamiokande" koji sadrži 22000 tona vode koju posmatra 11200 fotomultiplikatora sa katodama prečnika pola metra. Sve to nalazi se u rudniku Kamioka na dubini od 2400 metara vodenog ekvivalenta. Ceo detektor visok je kao zgrada od 15 spratova. Počeo je da radi 1996. godine. Ni jedan ni drugi, kao ni ostali detektori, do sada nisu statistički signifikantno utvrdili raspad protona. To na život protona postavlja donju granicu od oko 10^{32} godina, što znači praktičnu stabilnost materije. Za potrebe utvrđivanja ispravnosti pojedinih varijanti teorija velikog ujedinjenja svih interakcija, međutim, čak ni ova fantastična osetljivost nije dovoljna.



9



Uloga žena u razvoju
nuklearne fizike

Za razliku od drugih oblasti fizike, žene su u nuklearnoj fizici učinile znatan broj suštinskih doprinosa. Razlog za to možda leži u velikom učešću hemije u ovim istraživanjima. Pored Marije i Irene Kiri, Lize Majtner, Cin Sjan Vu, Marija Goeppert-Mayer (1906-1972) (na slici) je, osim razvoja šel-modela, još 1935., na sugestiju Vignera, razmatrala postojanje retke prirodne radioaktivnosti - dvostrukog beta raspada, čije je istraživanje i danas aktuelno. Trideset godina je u Americi čekala da dobije stalno univerzitetsko mesto.

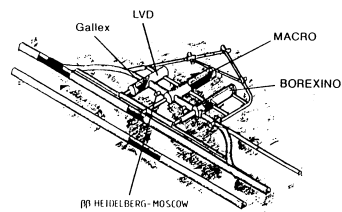


praktično više ne može smanjivati ispod već dostignutih vrednosti. Da bi se aktivnost nečega što se (eventualno) tako beznadežno sporo raspada mogla sa izvesnošću da primeti, tj. da bi se osetljivost podigla za sledeći red veličine, biće potrebno merenja nastaviti u laboratoriji izgrađenoj duboko ispod površine Mesečevog tla, gde nema atmosfere, pa nema ni atmosferskih neutrina; drugim rečima, radioaktivnost celokupne materije, ako je uopšte ima, lakše se može opaziti na Mesecu nego na Zemlji! (dosetka Abdusa Salama iz 1991.). Ne treba ni sumnjati da će se takva merenja i izvesti, čim to bude bilo moguće!

Sledeća zanimljiva i takođe još neotkrivena prirodna radioaktivnost je takozvani bezneutrinski dvostruki beta raspad. U dvostrukom beta raspadu, generalno, simultano se transformišu dva neutrona u protone, ili obratno, uz emisiju dva elektrona, ili pozitrona (ili elektronska zahvata). Raspad u kome se pritom emituju i dva neutrina, koji se označava kao $2\nu\beta\beta$, predstavlja sasvim legalan proces višeg reda kome je još 1935. Marija Goeppert-Mayer život procenila na 10^{17} godina. Dvostrukim beta raspadima podložna su sva jezgra koja poseduju potencijalne potomke odgovarajuće mase ali se tako maloverovatan proces ne može videti u kompeticiji sa procesima prvog reda pa je potraga za njim vršena ili na jezgrima koja su inače stabilna u odnosu na sve ostale vidove raspada ili na ekstra dugoživećim vrstama. $2\nu\beta\beta$ raspad opažen je kod nekolicine jezgara sa izvesnošću tek nedavno, sa parcijalnim životima reda 10^{21} godina, koji se dobro slažu sa teorijskim očekivanjima (između ostalog i kod U-238).

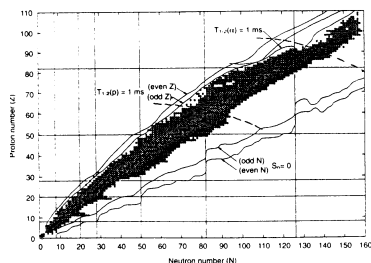
Mnogo interesantnija varijanta je bezneutrinski dvostruki beta raspad, koga je Fjuri

razmatrao još 1939, u kome se neutrino uopšte ne emituju. U današnjoj simbolici on se označava kao $0\nu\beta\beta$ raspad. Signature $2\nu\beta\beta$ i $0\nu\beta\beta$ procesa bitno su različite; u slučaju recimo $\beta^-\beta^-$ raspada, u 2ν raspadu zbir energija elektrona čini kontinuum a u 0ν raspadu je uvek isti i jednak energiji raspada, te su dva procesa lako različiva. U $0\nu\beta\beta$ raspadu, umesto da emituju po jedan realan elektron i neutrino, nukleoni koji se transformišu trebalo bi da emituju po jedan elektron i da izmenjuju jedan virtuelni neutrino. Pritom bi se narušavao zakon održanja leptonskog broja, što takozvani Standardni model čestica i njihovih interakcija ne dozvoljava. Da bi se to, zbog osobine slabih interakcija da ne održavaju parnost, uopšte moglo da desi, potrebno je da neutrino ima nenultu masu mirovanja ($m_\nu \neq 0$) i da neutrino i antineutrino budu identične čestice ($\nu = \bar{\nu}$), ili, kako se to još kaže, da neutrino bude masivna Majoranina a ne Dirakova čestica, što je takođe protivno Standardnom modelu. Da li je neutrino ovakva ili onakva čestica, što treba da odluči između Standardnog modela ili neke od teorija Velikog ujedinjenja, ni dan danas nije jasno, te već samo utvrđivanje činjenice da li $0\nu\beta\beta$ prirodna radioaktivnost uopšte postoji ili ne ima ogroman značaj. Uprkos mnogih složenih i dugotrajnih eksperimentalnih potraga za ovim vidom prirodne radioaktivnosti ona do sada nije konkluzivno opažena. Rezultat najosetljivijeg od svih merenja, onog na izotopu Ge-76, je da je poluživot za ovaj mod raspada, na nivou poverenja od 90%, veći od 5×10^{24} godina. Pod pretpostavkom da je neutrino Majorana čestica odatle sledi da mu je masa manja od $0.8 \text{ eV}/c^2$, što je najniža od svih dosadašnjih procena. Među eksperimentima za merenje dvostrukog bezneutrinog elektronskog zahvata najveću osetljivost ima naše domaće

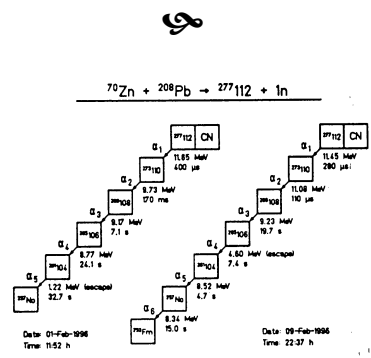


Do sada najosetljivija potraga za dvostrukim bezneutrinim raspadom je Hajdlerberg - Moskva eksperiment postavljen u najraznovrsnijoj podzemnoj laboratoriji koja se nalazi u tunelu Gran Sasso na dubini od 4000 metara vodenog ekvivalenta. Detektor čine pet detektora napravljenih od ukupno 11.5 kg germanijuma obogaćenog do 86% izotopom Ge-76 u kome treba da se traženi raspad i odigrava (Ge-76 u prirodnom Ge inače ima svega 7.8% !). 15 tona ultračistog olova i bakra štite detektor od zračenja iz okoline. Posle merenja od 10 kilogram x godina linija koju bi ova prirodna radioaktivnost trebalo da da nije opažena. Odatle sledi da je parcijalni život za ovaj raspad veći od 5×10^{24} godina, a odatle da je, pod određenim uslovima, masa neutrina manja od $0.8 \text{ eV}/c^2$.





Opšti izgled karte izotopa koji jasno pokazuje da najteži poznati transurani napuštaju opšti tok linije stabilnosti i da se kreću ka oblasti sa odnosom Z/N većim no kod β-stabilnih izotopa. To ne znači da linija stabilnosti u toj oblasti menja narav već da se ta jezgra proizvode na način koji im ne obezbeđuje dovoljno neutrona da bi se našli na liniji stabilnosti.



Dva lanca raspada opservirana za vreme ozračavanja mete od Pb-208 snopom Zn-70 energije 4.9 MeV/u (GSI, 1996.). Sintetisani izotop, sa početka

merenje na gvožđu-54 (u Novom Sadu) koje za poluživot ovog izotopa daje vrednost veću od 3×10^{20} godina.

Potruga za superteškim elementima u prirodi poslednji je primer prisustva prirodne radioaktivnosti u današnjoj nuklearnoj fizici koga ćemo ukratko prikazati. Superteškim elementima danas se uglavnom nazivaju daleki transurani koji treba da se nalaze na "ostrvu stabilnosti", tj. za koje savremene teorije nuklearne strukture predviđaju da bi trebalo da budu stabilniji od svojih lakših prethodnika. Nezadovoljavajuća prediktivna moć nuklearnih teorija ovde se ispoljava kada je u pitanju egzaktan položaj tog ostrva stabilnosti u karti izotopa ali i stepen stabilnosti koji se na njemu može očekivati. Najčešće pominjani "magični brojevi", koji bi trebalo da budu stabilniji od svojih suseda, su $Z=114$ i 126 i $N=162$ i 184 . Procene stabilnosti ovih jezgara u odnosu na spontanu fisiju i alfa raspad kreću se u gotovo neupotrebljivo širokim granicama; od delova sekunde do desetina milijardi godina (što je jasna posledica brze zavisnosti verovatnoća ovih penetracionih procesa od energije raspada, ali i od strukturnih efekata). Eksperimentalni problemi u pokušajima da se do ovih elemenata dođe nisu ništa manji. Višestruko sukcesivni neutronske zahvati (realizovani u reaktorima ali i u nuklearnim eksplozijama) pokazali su se neefikasnim za redne brojeve preko približno 100 i svi izotopi elemenata težih od ovog sintetizovani su u fuziji teškojonskih snopova sa teškim metama (element 106 danas u količinama koje su i hemijski prepoznatljive). Ova fuzija se mora izvoditi na energijama vrlo blizu Kulonove barijere jer se inače formirano jezgro odmah i pocepa. Veoma je važno da su i redni i

maseni broj formiranog jezgra tada praktično jednaki tačnom zbiru odgovarajućih brojeva jezgara koja se fuzionišu. Naime, budući da fisija transurana (i spontana i indukovana) daje fisione fragmente sa izrazitim viškom neutrona u odnosu na njihove stabilne izotope, i još par neutrona (što je posledica oblika linije stabilnosti u N-Z ravni), očigledno je da se isti takav transuran može dobiti egzaktnom fuzijom samo istih takvih fragmenata, tj. vrlo nestabilnih jezgara, i što je još gore, uz dodatak i onih par emitovanih neutrona. Otud fuzija jezgara sa linije stabilnosti (kakvi su snopovi i mete još uvek najčešći) ili blago neutron-suficijentnih (kakvi se snopovi i mete mogu očekivati u budućnosti) može da proizvede samo transurane sa različitim stepenom nedostatka neutrona u odnosu na izotope tog transurana sa linije stabilnosti (pod plauzibilnom pretpostavkom da se jednačina linije stabilnosti u oblasti dalekih transurana ne menja bitno). Veštačka sinteza superteških elemenata zato nužno može da proizvede samo njihove izotope daleko iznad linije stabilnosti i dostizanje ostrva stabilnosti, ukoliko ono uopšte postoji, na ovaj način ne izgleda moguće. U prirodi, međutim, u burnim procesima nukleosinteze i uslovi koji su potrebni za sintezu ovih jezgara, ma koliko maloverovatni bili, nekad i negde biće ispunjeni; za to su potrebna neutron-suficijentna lakša jezgra u dovoljno bogatom neutronsom kupatilu, što ne izgleda nemoguće. Sa mesta sinteze ta jezgra će, u skladu sa (svakako bednom) količinom u kojoj su proizvedena, biti rasejana u prostor i možemo ravnopravno očekivati da su zajedno sa svim ostalim jezgrima učestvovala u formiranju i naše Zemlje. Na njoj će danas, pod uslovom da su im poluživoti reda bar milijardu godina, činiti komponentu prirodne radioaktivnosti, koju do dana

tog lanca raspada, je $Z=112$, $N=165$. Ova dva atoma najteža su koje je čovek do sada identifikovao. Po jednostavnoj ekstrapolaciji linije stabilnosti, međutim, najstabilniji izotop elementa 112 trebalo bi da ima oko 180 neutrona, što znači da ovom opserviranom izotopu nedostaje možda i čitavih 15 neutrona do moguće maksimalne stabilnosti. Ovakav način sinteze ne može da obezbedi toliki broj neutrona i jedina šansa da taj izotop ikada vidimo, pod uslovom da je dovoljno dugoživuć, je da ga nađemo u prirodi, ili kao prirodnu radioaktivnost, ili identifikacijom atoma pre raspada. Potraga za prirodno radioaktivnim dugoživećim izotopom sledećeg elementa, $Z=113$, detekcijom produkata njegove pretpostavljene spontane fisije, rađena je kod nas (u Zemunu), merenjem aktivnosti retkog minerala talijuma, sa kojim element 113 treba da bude hemijski sličan. Ta aktivnost nije opažena. Pod pretpostavkom da je život tog izotopa duži od milijardu godina to je značilo da mu je koncentracija u merenim uzorcima manja od 7×10^{-11} g/g.

današnjeg, uprkos ogromnih napora, nismo uspjeli da opserviramo. Za to može biti odgovorno svako od mnogih "možda" koje smo spomenuli i ukazivanje na glavnog krivca biće glavni cilj budućih istraživanja u ovoj oblasti. Veću osetljivost za detekciju malog broja atoma, od merenja njihove eventualne aktivnosti, imaju savremene analitičke metode raznih akceleratorskih masenih spektrometrija i rezonantnih spektro-skopija, i ti metodi pretrage će još možda i uroditi plodom.

Ovim završavamo naš kratak pregled odnosa prirodne radioaktivnosti i nuklearne fizike kome je glavni cilj bio da pokaže da bi bez otkrića fenomena prirodne radioaktivnosti razvoj nuklearne fizike svakako izgledao nepredvidivo drugačije od onoga kako je izgledao, i da takav razvoj kakvog ga je imala nikad i niko ne bi uspeo racionalno da isplanira.

LITERATURA:

1. M. Mladenović: *"History of Early Nuclear Physics (1896-1931)"*, World Scientific, Singapore 1992
2. M. Mladenović: *"History of Nuclear Physics (1932-1960)"*, Institute of Physics, Bristol (u štampi)
3. I. Draganić: *"Kroz svet radijacija i radioaktivnosti"*, Muzej Nauke i Tehnike, Beograd 1996
4. I. Draganić, Z. Draganić, Ž.P. Adlof: *"Radijacije i radioaktivnost na Zemlji i u Vasioni"*, Dečije Novine, Gornji Milanovac 1991
5. M.C. O'Riordan, Ed.: *"Becquerel's Legacy: A Century of Radioactivity"*, Proceedings of a Conference, London, 1996
6. M. Kovačević, urednik: *"Jonizujuća zračenja iz prirode"*, Jugoslovensko društvo za zaštitu od zračenja, Beograd 1995