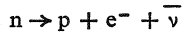


## Ujedinjene teorije prirodnih sila

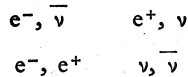
dr DUBRAVKO TADIĆ, Zagreb

Pri kraju ovog našeg stoljeća izgleda da se znanost našla opet pred ujedinjenjem naoko povezanih prirodnih pojava. Takvo ujedinjenje zbilo se i krajem prošlog stoljeća kada je 1864. godine *James Clark Maxwell* otkrio svoju teoriju *elektromagnetskog polja*. U njoj je kao povezane prirodne pojave ujedinio teoriju magnetizma, teoriju elektriciteta i teoriju svjetlosti te sličnih zračenja (sl. 1). Danas se to veliko Maxwellovo dostignuće nastoji proširiti na taj način da se u jednom teoretskom opisu uz elektromagnetske pojave skupe i tako zvane slabe sile ili slaba međudjelovanja, koja dovode do radioaktivnih raspada atomskih jezgara i elementarnih čestica. Začetnici i vođe u tom nastojanju su američki učenjak *Steven Weinberg* i Pakistanac koji radi u Europi (Trst i London) *Abdus Salam*. Kako već i jeste u znanosti, uz njih radi čitava vojska od tisuća i tisuća učenjaka. Mnogi pokusi, koji su izvršeni zadnjih godina, a osobito ove godine, sve sigurnije ukazuju da će znanstvena sinteza uspjeti. U to još ne možemo biti sasvim sigurni. No to nastojanje je već sada uzbudljiva i zanimljiva priča u povijesti znanosti. Količina našeg znanja o prirodnim silama se neprestano proširivala i povezivala. Simbolički se to može prikazati krugovima kao na sl. 1. Svrha je ovog zapisa prvenstveno da se bavi sa zadnjim proširenjem naših znanstvenih spoznaja. No njegovo značenje se može ispravno shvatiti samo onda ako se znađe i njegov relativni položaj u cjelokupnoj zgradi znanosti. Oko 1900. bilo je već poznato da se radioaktivno zračenje može podijeliti na  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  zrake.  $\beta$ -zračenje se sastoji od *elektrona* i čestica bez mase, *neutrina*. Simbolički se  $\beta$  raspad *neutrona* (n) u *proton* (p) može pisati kao

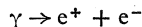


Kasnije su nađeni i raspadi u kojima su se umjesto *elektrona* ( $e^-$ ) i *anti-neutrina* ( $\bar{\nu}$ ) izlučivali pozitivno nabijeni *pozitron* ( $e^+$ ) i *neutrino* ( $\nu$ ). Proučavanja umjetno izazvane radioaktivnosti (što je omogućeno razvojem sve većih akceleratora) pokazala su da se u nekim procesima javljaju i nove čestice — pozitivno ili negativno nabijeni *mion* ( $\mu^+$  ili  $\mu^-$ ) koji ima oko 200 puta veću masu od elektrona. *I mion ima svoj neutrino* ( $\nu(\mu)$ ,  $\bar{\nu}(\mu)$ ) za kojeg pokusi pokazuju da je različit od elektroskog neutrina.

Prvi korak pri proučavanju novih tek otkrivenih pojava, kao što su npr. nove čestice, je traženje nekih sličnosti i simetričnosti. Pokazalo se tako da se elektron i njegov neutron ( $e$  i  $\nu(e)$ ) odnosno mion i njegov neutrino ( $\mu$  i  $\nu(\mu)$ ) ponašaju kao neko dvojtvo. Pri raspadima se uvijek izbacivala jedna nabijena čestica (ili antičestica) i jedna neutralna čestica (ili antičestica). Postoji li tu neka simetrija, što znači da su parovi čestica međusobno »zamjenljivi«, očekivali bismo da se  $e$  i  $\nu(e)$  (ili  $\mu$  i  $\nu(\mu)$ ) pojavljuju u kombinacijama (antičestica elektrona je pozitivno nabijeni elektron ili pozitron):



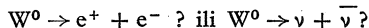
No samo kombinacije u gornjem retku opažene su pri slabim radioaktivnim raspadima u prirodi. Ti procesi su nazvani »slabim« jer se odvijaju oko 1000 puta sporije od elektromagnetskih procesa. Kombinacija ( $e^+$ ,  $e^-$ ) (ili elektron-pozitron) javlja se pri tvorbi parova čestica — antičestica pod utjecajem elektromagnetskog zračenja. Pri tome se kvant elektromagnetskog polja (foton), koji se obično označava sa  $\gamma$ , pretvara u par



Nametala se pretpostavka da postoje pozitivno i negativno nabijene čestice, obično ih se označava sa  $W^+$  odnosno  $W^-$ , koje su odgovorne za stvaranje nabijenih leptonskih parova (elektrone, mione i njihove neutrone naziva se obično *leptonima*), na primjer



Iskustvo stečeno kod proučavanja elementarnih čestica govori da se uz čestice tipa  $W^+$  ili  $W^-$  uvijek pojavljuje i treća neutralna čestica. Znači li to da može postojati i neutralni proces kao



Kako se u tu sliku uklapa elektromagnetska tvorba parova? I što je sa *nesačuvanjem pariteta*, tim nedvojbenim potpisom slabih međudjelovanja? Priča o nesačuvanju pariteta je predugačka da bi ju ovdje ispričali. Slikovito rečeno, elektron (ili neutrino ili druge čestice) se pri slabim međudjelo-

vanjima ne mogu zamisliti kao kuglice, nego kao puščani meci. Može im se razlikovati prednji i stražnji dio, pa više nije svejedno kako su orijentirani u prostoru. Npr., paritet je sačuvan kod elektromagnetske tvorbe para (tj. elektron bi se tu mogao slikovito prikazati kao kuglica).

*Salam* i *Weinberg* su pokazali da se na sva slična pitanja može sustavno i jednoznačno odgovoriti. Odgovor su formulirali opisujući gibanje elementarnih čestica kvantnom teorijom polja. Otkriće kvantnih fenomena je pokazalo da se rojevi čestica (npr. elektronski snopovi) katkada ponašaju slično kao valovi svjetlosti (1925), a da se svjetlost katkada ponaša kao da je sastavljena od struje čestica (1905).

Danas se događaji u kojima učestvuju elementarne čestice opisuju kvantnom teorijom polja. U njoj su svi elementarni djelići materije (kvanti svjetlosti — fotoni, elektroni, protoni, neutroni, kvarkovi itd.) opisani na jednak način. Istovremeno mogu imati i korpuskularna i valna svojstva, mogu se stvarati i nestajati te prelaziti jedn u druge baš kao što to i vidimo u prirodi. To se naravno ne da ispricati bez složenih i zamršenih matematičkih formula. Zbog toga ćemo moći samo govoriti o nekim posljedicama *Weinbergovih* i *Salamovih* ideja, koje su eksperimentalno i utvrđene. Teoretski je najteže bilo objasniti zašto su *W* čestice vrlo masivne dok čestice svjetlosti nemaju uopće mase.

Obično čestice koje se slično ponašaju imaju otprilike jednaku masu. No to sigurno ne vrijedi za trojku

$$W^0, \gamma, W^-$$

Izbacimo li foton iz igre i pokušamo li samo trojkom

$$W^+, W^0, W^-$$

pokazuje se da se tako ne može sagraditi ispravna teorija. *Salam* i *Weinberg* su stoga započeli sa četiri čestice

$$W^+, W^0, W^- \text{ i } B^0$$

gdje je  $B^0$  neka dodatna neutralna čestica. *Salam* i *Weinberg* su svoje četiri čestice uveli u teoriju ne dajući im nikakvu masu. Međudjelovanje s ostalim česticama, a to su skalarne čestice, elektroni (mioni), neutrini itd. može dovesti do toga da one dobiju masu. No kako se one u teoriji pojavljuju simetrično, očekivali bismo da će im mase biti jednake, što ne bi odgovaralo onome što se opaža u prirodi. Proučavanje prirodnih pojava pokazalo je međutim da i simetrične sile mogu proizvesti u svojim međudjelovanjima nesimetrične rezultate. Školski primjer za to je magnet. Elektromagnetska međudjelovanja među česticama su potpuno simetrična obzirom na sve smjere u prostoru. Magnet, koji je izgrađen od mnoštva atoma koji međudjeluju elektromagnetskim silama očito ima određenu prostornu orijentaciju. Takvi rezultati djelovanja prirodnih sila nazivaju se spontanom lomljenjem simetrije.

*Salam* i *Weinberg* su zaključili da se sličnim spontanom lomljenjem simetrije slabog i elektromagnetskog međudjelovanja mogu razlikovati dvije neutralne kombinacije

$$\cos \Theta_w B^0 - \sin \Theta_w W^0 = \gamma$$

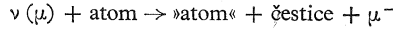
$$\sin \Theta_w B^0 + \cos \Theta_w W^0 = Z^0$$

Kombinacija  $\gamma$  ima masu nula kao što i treba za kvant svjetlosti, dok je kombinacija  $Z^0$  vrlo teška. Kut  $\Theta_w$ , koji miješa primarne čestice  $B^0$  i  $W^0$ , poznat je u znanosti kao *Weinbergov kut*. Mnogobrojni pokusi su pokazali da je njegova veličina oko  $30^\circ$ . Činjenica da je *Weinberg—Salamova* teorija predvidjela nove eksperimentalne rezultate glavni je razlog što se ona danas smatra toliko važnom. Dobra teorija ne opisuje samo postojeće prirodne fenomene. Time što ona objašnjava kako se oni odvijaju, ona izgrađuje matematičku strukturu iz koje se mogu proračunati nove, još nevidene ili nepoznate pojave. Danas, na primjer, znamo da se u *Maxwellovim* jednadžbama krila i specijalna teorija relativnosti, što on osobno nije čak nikada ni spoznao, umrijevši prerano.

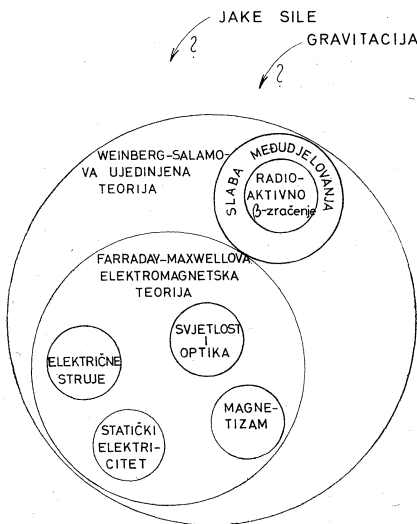
Znanstvenici neprestano traže nove posljedice koje proizlaze iz postavljene teorije. Tako se, naravno, proučavajući fundamentalne osobine prirode i građu tvari nalazi put do novih tehničkih ostvarenja. Poučan je primjer *Heinricha Hertza*. On je 1887. godine zaključio da ako je *Maxwellova* teorija točna onda mora biti moguće stvoriti umjetno, u laboratoriju, elektromagnetsko zračenje slično svjetlosti. Tako su otkriveni, ili bolje rečeno stvoreni radio-valovi i time je započeta velika tehnička revolucija.

Tipično zračenje za slabe interakcije su neutrinski valovi, ili strujanje snopova čestica, neutrina. Sa stanovišta suvremene teorije ta dva naziva ravnopravno opisuju isti prirodni fenomen. Neutrinsko zračenje, ili neutrinske snopove, znatno je teže proizvesti no radio-valove. Veliki američki akcelerator u Fermijevom narodnom laboratoriju (Fermilab) kod Chicaga ima promjer od oko

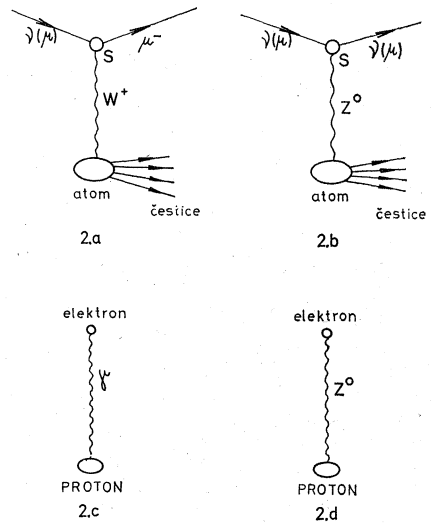
2 km. U njemu se proizvode protoni silne energije kojima se bombardira tvar (npr. tekući vodik) i tako stvaraju intenzivni snopovi nestabilnih nabijenih čestica piona. Ti se pioni izvode u željenom smjeru pomoću električnih i magnetskih polja. U lijetu se raspadaju na mione (ili elektrone) i njihove neutrine. Na put snopa koji čine različite čestice stavljaju se debele zapreke od betona i željeza. Nakon lijeta od oko 1800 m kroz te zapreke će proći samo najprirodnije zračenje što ga u prirodi poznajemo a to su neutrini. (Planiraju se čak i eksperimenti pri kojima bi neutrini prodirali i 60 km i dalje kroz Zemljinu koru!). Prema teoriji slabih interakcija neutroni koji pogode neku tvar proizvest će pljusak raznih čestica među kojima će se uvijek naći i mion ili elektron, po formuli



Takvi se procesi proučavaju već oko deset godina i rezultati se slažu sa teorijom slabih interakcija. Oni su izvedeni preko elementarne interakcije u kojoj se s atomom izmijeni jedan kvant slabih interakcija  $W^+$  ili  $W^-$ , kao što je prikazano na sl. 2 a. Silna energija koju je neutrino donio dovodi do stvaranja čitavog pljuska čestica, do transmutacije atoma (konačni atom ne mora biti isti kao početni, stoga smo ga i označili navodnicima).

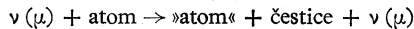


Sl. 1.



Sl. 2.

No, ako vrijedi *Weinberg-Salamova* ujedinjena teorija, onda neutrino može atomom izmijeniti i neutralni kvant  $Z^0$ , kao što je simbolički pokazano na slici 2. b. No, kako u slabom vrhu, koji je na slikama označen sa S, naboj mora biti sačuvan, proces mora sada biti



Pred više godina počelo je intenzivno traganje za slabim reakcijama u kojima se ne opažaju nabijeni leptoni: elektroni ili mioni. Danas je već nedvojbeno ustanovljeno da se takvi procesi zbivaju, i to točno onakvim intenzitetom koji i predviđa ujedinjena teorija. No, to nije jedina posljedica ujedinjene teorije. Prema njoj ni elektron više nije ono što se nekada smatralo da je. Prema našoj staroj slici atoma, zasnovanoj na kvantnoj teoriji i *Maxwellovim* jednadžbama, elektron i proton međudjeluju elektromagnetskim silama. Slikovito se to može u simbolici sl. 2.c prikazati kao da oni izmjenjuju fotone ( $\gamma$ ). U novoj teoriji se čestica  $Z^0$  javlja potpuno ravnopravno sa fotonom, pa će i nju elektron izmjenjivati s atomom kako je to shematski prikazano na slici 2.d. Posljedice toga su višestruke. Spektri atoma moraju pokazivati dodatne linije, nastale cijepanjem, koje nije predviđeno *Bohrovim* i drugim modelima atoma. Kako slaba međudjelovanja, koja prenosi  $Z^0$  ne čuvaju paritet, elektroni koji se raspršuju na protonima moraju se bar donekle ponašati ne kao kuglice nego kao puščani meci. Takav eksperiment dovršen je ove godine u Americi poslije dvogodišnjih napora. Odjeknuo je kao takva svjetska senzacija da su o njemu pisale novine i tjednici. Za ubrzanje elektrona upotrebljen je veliki, 3,5 km dugački akcelerator u Stanfordu u Kaliforniji. Elektroni su raspršivani na meti sastavljenoj od deuteronu (tj. «teškog» vodika). Pomoću laserskog

uređaja bilo je postignuto da svi elektroni budu jednako orijentirani u prostoru. Želimo li si to predočiti jednostavnom slikom (koja je i previše gruba i naivna), najlakše je zamisliti elektron kao tijelo koje se vrti oko vlastite osi. Raspršenje elektrona zbivalo se baš kako i što traži *Weinberg-Salamova* teorija. S teškim vodikom elektroni međudjeluju ne samo slabom silom, posredstvom izmjene  $Z^0$  čestice nego i znatno jače, elektromagnetski. Elektromagnetsko međudjelovanje ne zavisi o smjeru u kojem je orijentirana os vlastite vrtnje elektrona, odnosno spina. (*Spin* engleski znači vrtnja.) No mjerenja su izvanredno teška jer se detektiraju istodobno dva međudjelovanja, od kojih je jedno znatno jače, pa ih treba razlučiti i detektirati vrlo male učinke.

Zbog toga utjecaja slabih sila na atomska stanja odnosno na cijepanje spektralnih linija, još uvijek nije konačno i dokazan. Slaba međudjelovanja dovela bi do zakretanja polarizacije laserskog snopa kod prolaza kroz pare nekog usijanog elementa. Nije moguće ukratko opisati kako se to naveduje na pomake u atomskim energijama, jer se za to traži ponešto zamršeni računski postupak kvantne mehanike. Vrlo je teško izmjeriti malo ( $10^{-7}$ ) zakretanje polarizacije laserskog snopa. Engleski istraživači iz Oxforda i američki istraživači iz Seatlea isprva nisu to uopće mogli otkriti. Ove godine su svjetski istraživači iz Novosibirsk objavili pozitivni rezultat, koji se i po veličini slaže sa *Weinberg-Salamovom* teorijom. Najnoviji američki rezultati također pokazuju rotaciju, iako je ona još premalena. Ako ta istraživanja budu potvrđena i u drugim laboratorijama, *Salam-Weinbergova* teorija se može smatrati dokazanom. To bi bio važan korak prema stvaranju jedinstvene teorije svih prirodnih sila, kojem cilju je još svojedobno stremio i veliki *Einstein*. Preostala dva međudjelovanja, jako i gravitaciono, sada se pokušavaju opisivati na sličan način kao i elektromagnetsko odnosno slabo polje. Idući tim putem fizika je otkrila već i jedno nov svojstvo stvari, grubo govoreći slično električnom naboju. Nazvano je engleskom riječi *charm*. (Naš šarm ne prenosi svo značenje engleske riječi koja uz zavodljivo značenje može značiti i čarobnost odnosno začaranost.) Vrlo je vjerojatno da će takva otkrića novih i neočekivanih prirodnih pojava dovesti do dubljeg i potpunijeg shvaćanja prirodnih sila. A to će omogućiti tehničke izume o kojima još uopće i ne sanjamo.