



Narušene simetrije Nobelova nagrada za fiziku 2008. g.

Ivica Picek¹, Zagreb

Polovica Nobelove nagrade iz fizike za 2008. godinu dodijeljena je *Yoichiro Nambu-u* s Čikaškog sveučilišta u SAD “za otkriće mehanizma spontanog narušenja simetrije u subatomskoj fizici”, a drugu polovicu dijele *Makoto Kobayashi* iz Središta za visokoenergijska akceleratora istraživanja (KEK, Tsukuba) i *Toshihide Maskawa* iz Yukawinog instituta za teorijsku fiziku (Sveučilište u Kyotu) “za otkriće porijekla narušene simetrije koja predviđa postojanje barem triju obitelji kvarkova u prirodi”.



Slika 1.

Simetrija, kao nešto vezano uz harmoniju i ljepotu, utkana je u sve civilizacije. Počevši od simetrije ljudskog tijela koja pojednostavnjuje odijevanje (krojenje odjeće), preko opažanja simetrija u svijetu koji nas okružuje (slika 1), simetrija je prožela sve ljudske aktivnosti. Na početku lanca tih aktivnosti naći ćemo umjetnost, a na početku fizikalne znanosti geometriju. Simetrija koju opažamo kod geometrijskih tijela s vremenom je poopćena na **simetriju fizikalnih sustava**, a kao sljedeća apstrakcija uvedeno je poopćenje na **simetriju fizikalnih zakona** koji upravljaju tim sustavima. Dogodilo se da su za rad na simetrijama dodijeljene i ovogodišnja Nobelova nagrada iz fizike [1] i njen matematički ekvivalent, Abelova nagrada za 2008. g. [2].

Simetrija fizikalnog sustava označena je neopažanjem promjene pri nekom zahvatu na tom sustavu (primjerice, zrcalimo ga ili ga zakrenemo za neki kut). Takve zahvate nazivamo simetričnim transformacijama, s pridruženim “neopservablama”. Isto se odnosi i na simetrije fizikalnih zakona. Primjerice, uočena je simetrija zakona Newtonove gravitacije i Maxwellovog elektromagnetizma na promjenu predznaka prostornih koordinata kao diskretnu transformaciju *prostornog pariteta* (P), kao i na *vremenski obrat* (T) kod kojega se promijeni smjer strelice vremena.

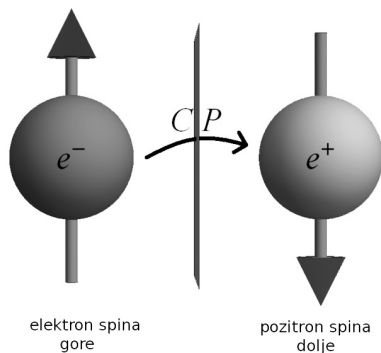
Ipak, do punog sagledavanja uloge simetrija doveo je tek Einsteinov obrat: umjesto pukog uočavanja simetrije danog fizikalnog zakona, on simetrije uzdiže do načela (**principa simetrije**) pomoću kojeg izvodi zakone prirode! Prvi primjer takvog pristupa simetrijama je Einsteinova konstrukcija specijalne teorije relativnosti iz zahtjeva da se fizikalni zakoni ne mijenjaju pri prijelazima iz jednog u drugi inercijalni sustav. Neki ugledni Einsteinovi suvremenici su se pobunili da Einstein jednostavno postulira ono što oni pokušavaju dokazati! Same simetrije Einstein svrstava u “kreativni princip” koji ćemo naći u matematici, kao ono što odražava sposobnost čistog uma da obuhvati

¹ Autor je redoviti profesor na Fizičkom odsjeku PMF-a u Zagrebu

realnost. Nedvojbeno, primjena principa simetrije kod kvantnomehaničkih procesa na subatomske domeni otvorila je vrata otkrićima novih zakona prirode koji su obilježili dvadeseto stoljeće.

Svojedobno novoootkrivena jaka nuklearna sila se po svojim svojstvima simetrije pridružila već poznatim silama gravitacije i elektromagnetizma: pokazala se simetričnom i na prostorno zrcaljenje i na vremenski obrat. Stoga je 1957. godine senzacionalno odjeknula vijest da simetrija prostornog pariteta ne vrijedi u β -procesima prirodne radioaktivnosti. Time je potvrđeno predviđanje na koje su, za procese s elementarnim česticama koji se odvijaju pod utjecajem slabe sile, godinu dana ranije ukazali T. D. Lee i C. N. Yang (dobitnici Nobelove nagrade za 1957. god.).

Neko se vrijeme vjerovalo da bi simetrija pariteta mogla biti spašena ukoliko se istodobno s prostornim zrcaljenjem učini *nabojna konjugacija* (C), zamjena čestice antičesticom (elektrona pozitronom, protona antiprotonom, itd., slika 2). No već 1964. godine su otkriveni procesi s neutralnim K mezonima (kaonima) koji narušavaju i takvu kombiniranu CP simetriju (otkrivče nagrađeno Nobelovom nagradom za 1980. god. J. W. Croninu i V. L. Fitchu). Da li se CP simetriju može spasiti njenim daljim poopćenjem? Doista, teorijski je pokazano da diskretne simetrije C i P , nadopunjene vremenskim obratom T , rezultiraju takozvanim CPT teoremom: $CPT = I$. Prema njemu, kompozicija svih triju diskretnih transformacija rezultira općom simetrijom fizikalnih zakona. Time je iskazana i ekvivalentnost vremenskog obrata T i CP transformacije, tako da CP nazivamo i transformacijom *vremenskog mikroobrata*.



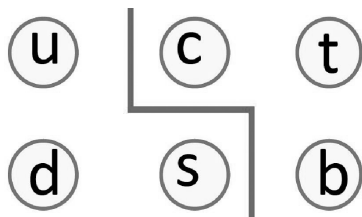
Slika 2.

Nobelova nagrada za mehanizam vremenskog mikroobrata

Makoto Kobayashi i Toshihide Maskawa su u vrijeme kad se znalo za samo tri kvarka (u , d i s) predložili njihovo podvostručavanje (dodavanjem c , b i t), kako bi standardni zakon fizike uključio CP narušenje. Da bi se provjerila njihova predviđanja, izgrađeni su posebni sudarivači čestica, “asimetrične B-tvornice” BaBar u Kaliforniji i Belle u Japanu, koji su potvrdili predviđeno CP narušenje izvan sustava kaona.

Otkrićem procesa s neutralnim kaonima u kojima je narušena CP simetrija, po prvi put smo došli u posjed mehanizma kojim možemo nedvosmisleno razlikovati svijet materije od svijeta antimaterije. U zemaljskim pokusima se dugoživući neutralni kaon (K_L) raspada češće na negativni pion, pozitron i neutrino ($\pi^- e^+ \nu_e$), nego na CP -konjugirano stanje ($\pi^+ e^- \nu_e$), u kojemu se umjesto pozitrona emitira elektron. Dovoljno je nekoj vanzemaljskoj civilizaciji poručiti da u svojim laboratorijima provjeri da li se njihov učestalije emitiran “elektron” u tom procesu razlikuje od elektrona koji gradi njihove atome. Ako to ne bi bio slučaj, vanzemaljci bi bili građeni od antimaterije i trebalo bi odustati od susreta koji bi rezultirao anihilacijom svjetova. Sama pojava CP -narušenja od početka je misteriozna, bez nekog teorijskog objašnjenja. Ipak, uskoro je spoznata nužnost narušenja tog vremenskog mikroobrata, kao jednog od preduvjeta nastanka

“barionsko asimetričnog” svemira u kakvom se nalazimo. Kao što je Gamow uočio da rani svemir pruža uvjete za nukleosintezu, tako je Saharov 1967. g. izučio uvjete pod kojima svemir, koji u Velikom prasku počinje s jednakom količinom čestica i antičestica, može rezultirati s neizanihilitiranim viškom čestica. Pri tome je ustanovio nužnost sprege (1) narušenja vremenskog mikroobrata (CP) s (2) ireverzibilnošću kakvu pruža sama ekspanzija svemira i (3) neočuvanjem barionskog broja (zakoni prirode moraju dopustiti raspad protona). Poruka je Saharovljevih uvjeta da su za pojavnost našeg svijeta, od navedenih simetrija još važnija njihova narušenja. Na koji način zakoni prirode uključuju CP -narušenje? Pokazalo se da je za to potrebna kompleksnost koja se mora razlikovati od one inherentne kvantnomehaničkom opisu danog sustava pomoću kompleksne valne funkcije.



Slika 3.

Svjetlo u dugogodišnju misteriju CP narušenja unijela su dvojica ovogodišnjih laureata, Makoto Kobayashi i Toshihide Maskawa, koji su pronašli način da već poznati fizikalni zakoni uključe i mehanizam CP narušenja. U vrijeme kad se znalo za samo tri kvarka (u, d i s) oni su uočili da njihovo podvostručavanje (slika 3), dodavanjem c, b i t , uvodi dodatnu kompleksnu fazu nužnu za narušenje vremenske mikroobrativosti.

Svi predloženi kvarkovi su u međuvremenu otkriveni, a novi kvarkovi vode na nove procese s CP narušenjem izvan kaonskog sustava. Za njihove testove uočena je pogodnost sustava B mezona (građenih od “lijepih”, b kvarkova), tako da se u SAD i Japanu prišlo konstruiranju pogodnih sudarivača elementarnih čestica. Time su stvoreni preduvjeti da se komunikacija Kobayashi-Maskawinog tipa među kvarkovima i predviđeno CP narušenje potvrdi u najnovijim akceleratorским pokusima BaBar i Tevatron u Americi te Belle u Japanu.

Nobelova nagrada za uvođenje spontanog narušenja simetrije u fiziku elementarnih čestica

Yoichiro Nambu je u pozadini BCS teorije supravodljivosti prepoznao spontano narušenje simetrije i taj koncept je iz fizike kondenzirane tvari odlučio prenijeti u fiziku elementarnih čestica. Razrada Nambuovih zamisli u konačnici je dovela do Higgsovog mehanizma i sugestije postojanja higgasa, “božje čestice” za kojom se traga na današnjim sudarivačima najviših energija (Tevatron kod Chicaga i LHC na CERN-u).

Objasnimo ideju spontanog narušenja simetrije na primjeru iz svakodnevnog života. Salate servirane oko okruglog stola predstavljaju simetričnu situaciju u kojoj se svatko pita da li mu pripada ona s lijeve ili desne strane. Kad prvi gost odabere svoju salatu, simetrija je “spontano narušena” – njegov odabir se prenosi i na ostale. Poznati primjer spontanog narušenja simetrije u fizici je spontana magnetizacija feromagnetika. Ona se događa hlađenjem uzorka feromagnetičnog materijala ispod određene kritične temperature. Prvotno neuređeni spinovi u feromagnetiku se tada spontano poredaju u nekom smjeru i oforme magnetsko polje. Ova je situacija ponukala fizičare da postavbe pitanje podudaranja simetrije fizikalnih sustava sa simetrijama fizikalnih zakona. Izvođenje odgovora na to pitanje oslanja se na zahtjevno poznavanje kvantne teorije polja, ali se sami odgovori mogu prikazati kao jednostavna opažanja.

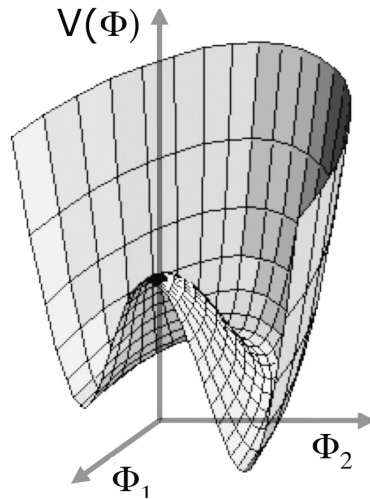
Prvo važno opažanje, da **fizikalni sustav** (tipa feromagnetika) **nema sve simetrije kao zakoni kojima je podređen**, je ujedno preciznija definicija spontanog narušenja simetrije.

U navedenom primjeru, zakoni koji općenito upravljaju atomima, pa tako i onima u magnetu, simetrični su na grupu trodimenzionalnih rotacija, dok u magnetiziranom materijalu ostaje samo podgrupa dvodimenzionalnih rotacija oko smjera magnetizacije. *Drugo je važno opažanje* da se umjesto izgubljene simetrije opaža nešto drugo. U navedenom primjeru feromagnetika to je (gotovo) bezmaseno (Nambu-Goldstoneovo) pobuđenje, tzv. spinski val čiji se kvanti nazivaju magnonima.

Još poučniji primjer spontanog narušenja simetrije koji nas vodi na dodatne spoznaje je pojava supravodljivosti. Njome je Yoichiro Nambu bio impresioniran u toj mjeri da je vjerovao da analogna pojava mora postojati u fizici elementarnih čestica. U slučaju supravodljivosti spontano je narušena simetrija kompleksne kvantnomehaničke valne funkcije elektrona ψ : od početne simetrije na dvodimenzionalne rotacije (realnog i imaginarnog dijela, $\text{Re}\psi$ i $\text{Im}\psi$) preostaje samo simetrija na rotacije za 180° , $\psi \rightarrow -\psi$. Pri tome kut rotacije slomljene grupe simetrije može varirati s položajem u supravodiču (kažemo da je takav kut *lokalna*, “baždarna” veličina, u usporedbi s prije promatranim *globalnim*, prostorno neovisnim rotacijama). Na objašnjavanju supravodljivosti proslavila se BCS (Bardeen, Cooper, Schrieffer) teorija, čija su polazna točka bili kondenzati parova elektrona (“Cooperovi parovi”). Oni su pak ukazivali da supravodljivi medij gubi lokalnu (baždarnu) simetriju.

Svijet elementarnih čestica početkom 60-tih godina, u koji je Nambu mogao prenijeti ove koncepte iz fizike kondenzirane tvari, bio je sustav nukleona i piona. Nambuova zamisao je bila da se počne od energijskog procjepa između teških nukleona i lakih piona. Zajedno s Jona-Lasiniom on postavlja model u kojemu je pion vezano stanje nukleona i antinukleona. Usto, kao Nambu-Goldstoneov bozon, pion bi trebao biti bezmaseni, a njegova mala opažena masa bila bi dinamičkog porijekla. U današnjoj reinterpretaciji preko kvarkova, masa piona i nukleona je generirana kromodinamičkim interakcijama kvarkova i gluona (teoriji jake sile, kvantnoj kromodinamici QCD, dodijeljena je Nobelova nagrada za 2004. g. [3]). Pritom se pitanja koja je povukao Nambu odnose na tzv. kiralnu simetriju QCD-a i kromodinamički fazni prijelaz (prijelaz kvarkova u hadrone). No Nambuove analize supravodljivosti su se pokazale dalekosežnim i za elektroslabi sektor standardnog modela (za koji je dodijeljena Nobelova nagrada za 2004. g. [4]). Njemu je pridružen fazni prijelaz kod kojega prvotno bezmaseni prijenosnici slabe sile pribavljaju masu. Pojava uočena kod supravodiča, istiskivanje magnetskog polja (Meissnerov efekt), dobiva objašnjenje koje će biti središnje i za kasnije objašnjavanje porijekla masa u elektroslabom faznom prijelazu. Pojava Meissnerovog efekta je rezultat neočekivanog obrata, da umjesto očekivanog bezmasenog pobuđenja, foton (kvant elektromagnetskog polja) u supravodiču pribavlja masu koja odgovara dubini prodiranja magnetskog polja u supravodič. Naime, spontano slomljena lokalna simetrija čini izuzetak od Goldstoneovog teorema.

Goldstoneova pobuđenja bivaju apsorbirana u longitudinalne komponente vektorskih polja lokalne simetrije, koja time postaju masivnima. To će omogućiti da se masivnosti prijenosnika temeljne slabe sile pomiri sa spontano slomljenom lokalnom baždarnom simetrijom. Salam i Weinberg su za takvo lomljenje simetrije uveli elementarno skalarno polje (točnije, dublet kompleksnih skalarnih polja, koji sadrži četiri realna skalarna polja). Ona u vakuumu poprimaju neiščezavajuću vrijednost putem potencijala skalarnog polja koji ima čuveni oblik dna vinske boce (slika 4). Time se spontano lomi simetrija standardnog modela, pri čemu tri od četiriju Nambu-Goldstoneovih bozona pribavljaju masu W^+ , W^- i Z bozonu, a neapsorbirano skalarno polje ostaje kao fizikalna čestica, Higgsov bozon. Provjera postojanja higgsa, tzv. “božje čestice”, jedan je od glavnih ciljeva nedavno pokrenutog velikog hadronskog sudarivača (LHC, iscrpno opisanog u prethodnom broju MFLa [5]).



Slika 4.

Naime, higgs kao elementarno skalarno polje, može biti proizveden na LHC-u. Komplikiranija opcija, koja nije isključena, je dinamičko lomljenje elektroslabe simetrije, kao pri supravodljivosti. U takvom scenariju ne bi imali higgsovu česticu, kao što ni Cooperov par elektrona nije čestica. Pri tome scenarij dinamičkog lomljenja elektroslabe simetrije zahtijeva postojanje nove jake sile “tehnikolora”, koja bi djelovala na nove, još nepoznate stupnjeve slobode, koji su različiti od kvarkova. Da bi dobili konačan odgovor, morao se pokrenuti grandiozni poduhvat LHC. Rješenje pitanja higgasa tu se još jednom subinski povezalno sa supravodljivošću, ovaj put tehnologijom supravodljivih magneta LHC-a [5]. Sama izgradnja LHC-a je cijena ulaznice na novi teritorij, čije su nam fizikalni zakoni još nepoznati.

Literatura

- [1] <http://nobelprize.org/>
- [2] JURAJ ŠIFTAR, *Abelova nagrada 2008.* – John G. Thomson i Jacques Tits, Matematičko-fizički list 1(233), 2008/2009, 18–22.
- [3] IVICA PICEK, *Asimptotska sloboda – neobični paramagnetizam vakuuma i Nobelova nagrada za teoriju jake sile*, Matematičko-fizički list 2(218), 2004/5, 91–95.
- [4] IVICA PICEK, *U potrazi za konačnom teorijom – trijumf renormalizacije*, Matematičko-fizički list 2(198), 1999/2000, 74–80.
- [5] TOME ANTIČIĆ I VUKO BRIGLJEVIĆ, *LHC: zašto mu se divimo*, Matematičko-fizički list 2(234), 2008/2009, 86–94.