

РЕНОРМАЛИЗАБИЛНОСТ СТАНДАРДНОГ МОДЕЛА Нобелова награда из физике за 1999. годину

Александар Богојевић

*Институт за физику
Прегревица 118, Земун 11080*

Увод

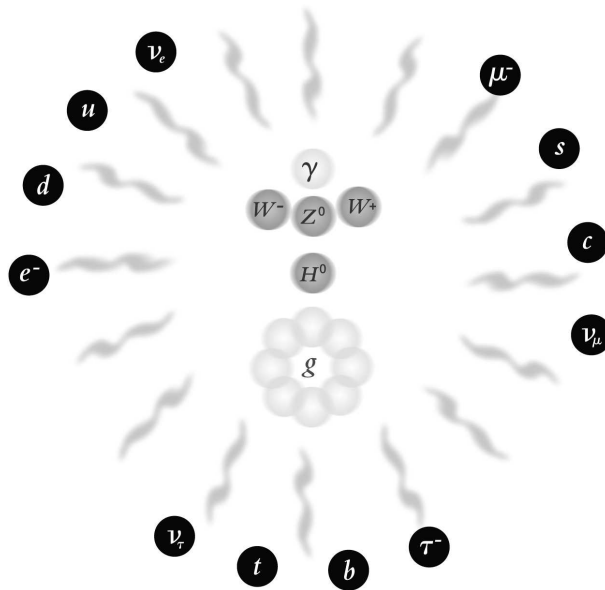
Свакодневни објекти који нас окружују су састављени од атома, а ови су даље саздани од електрона и атомских језгара. Језгра су изграђена од протона и неутрона који су са своје стране сачињени од кваркова. За испитивање материје на нивоу оваквих детаља потребни су велики микроскопи—модерни акцелератори честица. Прве такве машине су направљене пре пола века и означиле су почетак истраживања у физици елементарних честица.

Средином педесетих година је дошло и до стварања првих верзија модерне теорије која описује ове феномене. После више деценија рада изграђен је тзв. стандардни модел теорије елементарних честица. У овом моделу су све елементарне честице груписане у три породице кваркова и лептона, које интерагују кроз размену честица преносиоца јаке и електрослабе интеракције (Слика 1). Математички опис како материје тако и њених интеракција је дат преко квантних теорија поља.

Теоријска основа за стандардни модел је у почетку била математички неконзистентна. Дуго је било нејасно дали се теорија може користити за детаљно рачунање физичких величина. Г. Тофт (Gerardus 't Hooft) и М. Велтман (Martinus Veltman) су поделили Нобелову награду из физике за 1999. годину која им је уручена као признање за њихов рад у току седамдесетих година којим су теорију елементарних честица поставили на здраве математичке основе. Као плод тог рада, истраживачи су добили моћно теоријско оруђе за откривање својстава нових честица. Експерименти на акцелераторима у Европи и САД изведени у последњих пар деценија су потврдили многа од тих теоријских предвиђања. Званично саопштење Нобелове академије је да се награда Тофту и Велтману уручује због “профињења разумевања квантне структуре електрослабих интеракција у физици.”

Ново име за стару теорију

Квантне теорије поља које се користе у оквиру стандардног модела елементарних честица су све примери гејџ теорија. Термин гејџ долази од централне особине ових теорија, њихове гејџ инваријантности, односно непроменљивости одговарајућих закона динамике на локалне трансформације

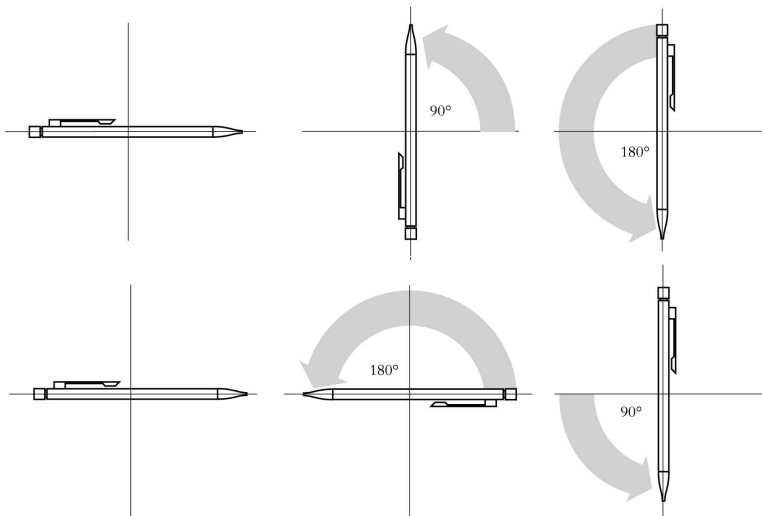


Слика 1: Сву материју чине фермиони, и то шест лептона и шест кваркова. Ове честице и њихове међусобне интеракције се у стандардном моделу описују квантним теоријама поља, и то неабеловим гејџ теоријама. Интеракције се успостављају разменом честица медијатора (гејџ бозона). Електрослабу интеракцију преносе четири таква бозона—безмасени фотон γ и масени медијатори W^+ , W^- и Z^0 . Јаку интеракцију преносе осам безмасених глюона g . Поред наведених честица, централно место у стандардном моделу игра и масивна Хигс честица H^0 . Спонтано нарушење симетрије Хигс поља генерише масе гејџ бозона.

поља (трансформације које се независно одвијају у свакој тачки просторвремена понаособ). Гејџ симетрија је централна особина модерног описа фундаменталних интеракција. Основна улога јој је да брани квантне теорије поља од обиља бесконачности које би их иначе чиниле математички неконзистентним. Мада изразито математички елегантан, формализам гејџ теорија је у исто време и прилично апстрактан и технички захтеван. Срећом, прва и најједноставнија гејџ теорија је свима добро позната Максвелова теорија електромагнетизма настала давне 1860. године. Максвелова теорија је у оквиру јединственог формализма објединила до тада разнородне феномене као што су електрицитет и магнетизам а предвидела, изеђу осталог, постојање радио таласа.

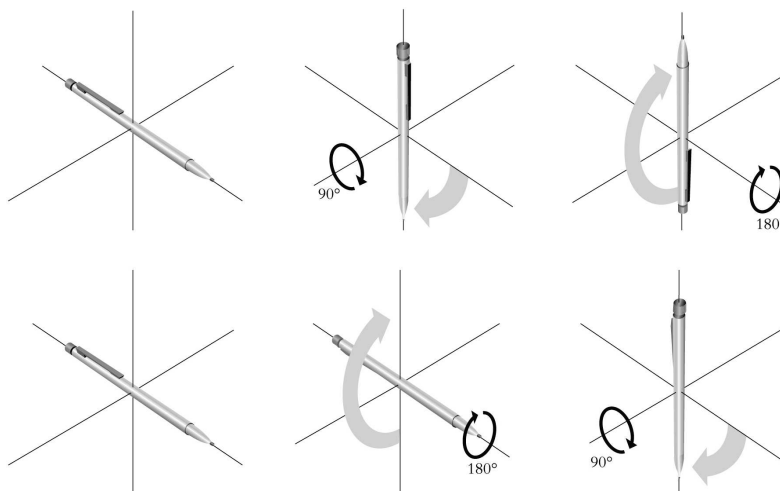
Електродинамику је погодно формулисати преко потенцијала, а не преко физички директно мерљивих електричних и магнетних поља. Гејџ трансформације су сада све могуће трансформације потенцијала које доводе до истих електричних односно магнетних поља. Гејџ симетрија је најшира могућа генерализација добро познате чињенице да је физички мерљива само разлика потенцијала, а не и сам потенцијал. У модерном језику за електромагнетизам кажемо да је абелова гејџ теорија, пошто промена потенцијала после две гејџ

трансформације не зависи од редоследа извођења тих трансформација. Једноставни пример абелових трансформација су ротације у равни (Слика 2).



Слика 2: Ротације у две димензије су пример абелових трансформација. Крајњи положај оловке је исти независно од тога дали смо је прво окренули за 90° , па затим за 180° (горња слика) или смо исте ротације урадили обрнутим редоследом (доња слика).

Са друге стране, ротације у три димензије могу да послуже као илустрација неабелових трансформација (Слика 3). Структура неабелових трансформација је знатно богатија од абелових, али је и тим рад са њима тежи. Ово је посебно изражено код процеса квантизације гејџ теорија.



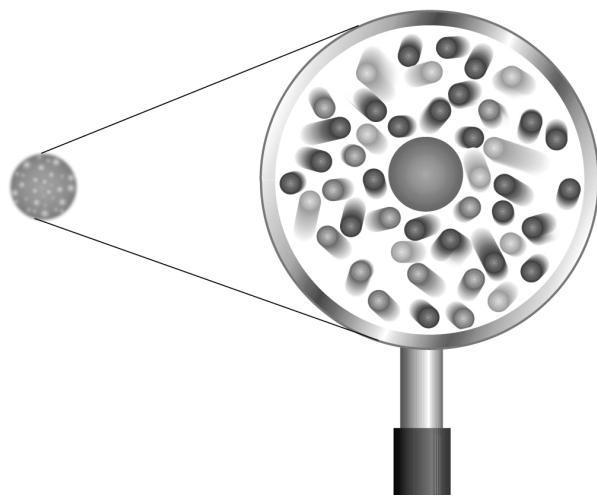
Слика 3: Ротације у три димензије дају илустрацију неабелових трансформација. Крајњи положај оловке сада зависи од редоследа ротација.

Проблеми бесконачности

Први покушаји за уједињење квантне механике и електромагнетизма су учињени 1925. године. Одмах су се јавили проблеми. Мада су и релативистичка теорија и квантна механика у великој мери довеле до корених промена у нашем разумевању тако базичних појмова као што су просторвреме и детерминистичност, физичари су за релативно кратко време овладали новим формализмима. Праве концептуалне и практичне промене у нашем гледању на свет су дошле тек са првим покушајима уније ове две теорије.

Срж сваке релативистичке теорије, па и електромагнетизма, је Ајнштајнова релација $E = mc^2$. Брзина светлости c је просто нека универзална курсна листа којом једну ‘монету’ (енергију) мењамо за другу (масу). Да би заиста успели да одрадимо ову размену монета потребна нам је одговарајућа банка или каква друга мењачница, а ове су строго забрањене у оквиру класичне динамике—забрана се зове закон одржања енергије. Ова забрана је оно што чини да две тако различите теорије као што су класична и релативистичка ипак личе једна на другу. Преласком на квантну теорију губимо и одржање енергије. Као и све друго, оно сада важи само у средњем. Суштински карактер квантне теорије је дат Хајзенберговом релацијом неодређености $\Delta E \Delta t \gtrsim \hbar$, где је \hbar Планкова константа. Уместо забране куповине и продаје девиза, сада имамо посла са једном сасвим другом економијом. Кредити су постали не само могући, већ и неминовни. То је право значење Планкове константе \hbar . Можете нешто купити чак и ако немате пара. У квантној економији су правила за одложено плаћање сасвим једноставна—што више позајмите, то пре морате да вратите (као и у правој економији, ништа вас не спречава да паре вратите раније, отуд знак веће или једнако у Хајзенберговим релацијама).

Спој специјалне релативности и квантне механике доводи до огромних новина. Једна од првих последица је постојање античестица. Као резултат овога вакуум у квантној теорији поља постаје изразито интересантан. То више није пуко ‘ништа’, нема позорница на којој се одвија драма, већ узаврела супа бесконачног броја виртуелних честица. Шта су виртуелне честице? То су честице-дужници који су узели неку количину енергије на кредит, а да још нису паре вратили. Виртуелне честице стално настају и нестају, а та њихова сулуда игра је оно што зовемо вакуум. Ми већином нисмо свесни вакуума који нас окружује, као што и рибе нису свесне воде, и то из истог разлога. Док год је то што је око нас хомогено ми га не можемо мерити. Но пређимо сада на физички интересантнији проблем—ставимо једну праву честицу (честицу која је отплатила све своје дугове), рецимо електрон, у тај вакуум. Електромагнетно поље у близини овог електрона различито утиче на позитивно и негативно наелектрисане виртуелне честице које чине вакуум. Као резултат тога долази до поларизације вакуума. Као неки диелектрик, вакуум у близини праве честице није више хомоген, а тиме постаје и мерљив. Почели смо са једном једином честицом, а сад смо открили да се она оденула читавим облаком виртуелних честица (Слика 4).



Слика 4: У квантној теорији поља свака честица бива заоденута бесконачним ројем краткоживућих виртуелних честица. Но то није све, и виртуелне честице нису голе већ око себе носе друге ројеве, и тако у недоглед.

Већ на овом једном примеру видимо колико је квантна теорија поља чудна. Проблем је што бесконачни бројеви виртуелних честица скоро увек чине да директно мерљиве величине, као што су маса и наелектрисање честица, постану бесконачни. Изгледало је као да све квантне теорије поља пате од ове болести, дакле да није могуће формулисати ни једну теорију која би истовремено била и квантна и релативистичка.

Први велики продор су четрдесетих година учинили Томонага, Швингер и Фајнман. Они су независно развили метод који се зове ренормализација и применили га на квантну електродинамику. Добијена је прва здрава квантна теорија поља, а за свој рад су 1965. године поделили тадашњу Нобелову награду. Процес ренормализације нам омогућује да голу честицу и облак који је окружује третирамо као једну ‘обучену’ честицу. Наелектрисање, маса и све остале особине обучене честице су коначни. Наиме, долази до краћења бесконачних доприноса саме голе честице и виртуелног облака који је окружује. У случају електродинимике ренормализација је доводила до краћења свих бесконачности. Примена на све остале квантне теорије поља је била неуспешна—увек су остајале бар неке бесконачности које се не би пократиле.

Током година теоријска предвиђања квантне електродинимике су доживела низ ванредно прецизних експерименталних потврда, тако да се ова теорија данас сматра најбоље потврђеним моделом у целој физици. Демелт је 1989. године добио Нобелову награду из физике због својих мерења магнетног поља електрона у јонској замци. Мерења су се слагала са теориским прорачуном до десет децимала.

Електродинамика је до средине педесетих година била једина ренормализабилна теорија. Временом се испоставило да је за магично краћење бесконачности у квантној електродинамички директно одговорна гејџ симетрија те те-

орије. Следећи велики продор су учинили Јанг и Милс створивши класу неабелових гејџ теорија, директних генерализација електродинимике. Мада знатно сложеније од електродинимике, показало се да су и Јанг-Милс теорије ренормализабилне.

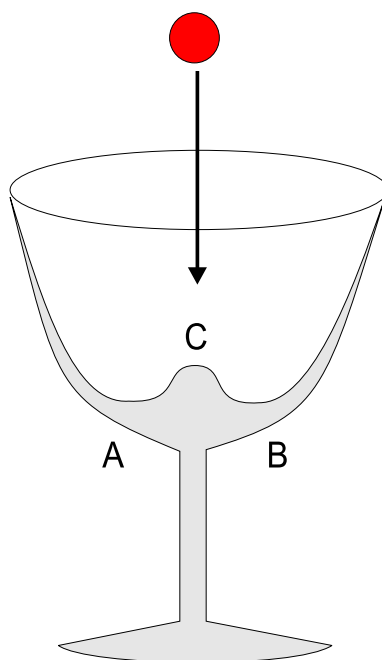
Нове теорије су у почетку наишле на прилично млак пријем. Наиме преносиоци интеракција у свим овим моделима су били безмасени векторски бозони. Ово није била случајност, већ наизглед нужна последица гејџ инваријантности, но одговарајућих безмасених честица просто није било у природи. Са друге стране, већину истраживача је интересовао опис слабе и јаке интеракције. Обе ове интеракције су изузетно кратког домета (реда величине атомског језгра). Из Хајзенбергових релација неодређености се лако види да се дугодометне интеракције преносе разменом безмасених честица, док медијатори кратко дометних интеракција нужно морају бити масене честице. Карактеристични домет честице масе m је \hbar/mc , тј. одговарајућа Комптонова таласна дужина. Да би слаба интеракција имала домет од 10^{-15} метара, њени преносиоци су морали имати масу реда величине 100 GeV , дакле морали су бити веома тешки. И у моделима слабе интеракције је фигурисалала размена векторских бозона, али не безмасених, већ изразито масивних.

Спонтано нарушење симетрије

Велики продор који је омогућио изградњу стандардног модела је везан за појам спонтаног нарушења симетрије. Симетрија је на трећи начин ушла у област елементарних честица. У првој својој инкарнацији, симетрија нам је омогућила класификацију елементарних честица. У другој инкарнацији, код гејџ симетрије, нам је омогућила скоро једнозначно фиксирање динамике која је сагласна са ренормализабилношћу. Трећа инкарнација је дошла кроз механизам спонтаног нарушења симетрије—кроз чињеницу да вакуум једне теорије не мора имати исту симетрију као и њена динамика. Мада делује изузетно сложено, ово се може илустровати на веома једноставном примеру пада куглице у винску чашу (Слика 5).

Нећемо улазити у то како спонтано нарушење симетрије Хигсовог поља доводи до појаве масе W и Z бозона. Оно сто је битно је да се та маса генерише услед несиметричности Хигсовог вакуума, а не и динамичких једначина. Директним убацивањем масе за ове преносионце у једначине кретања губимо гејџ инваријантност која нам је неопходна да би обезбедили математичку конзистентност. Са друге стране, генерисањем ове масе кроз процес спонтаног нарушења симетрије не нарушавамо гејџ симетрију.

Остало је још само да се директно покаже да спонтано нарушење симетрије не квари ренормализабилност теорије, чињеница да је конструисана гејџ инваријантна теорија са масеним бозонима је била само индикација да смо на правом путу. У грубом, истраживања су кренула у два правца. Једна група истраживача је током шездесетих година кренула у изградњу модела, надајући се да ће се на крају испоставити да су они ренормализабилни. Крај-



Слика 5: Симетрични пад куглице у винску чашу као илустрација спонтаног нарушења симетрије. Закон кретања је симетричан на ротацију чаше око своје осе, међутим, стање најниже енергије (вакуум) нема ову симетрију. Као што видимо, постоји више вакуума, а ротација чаше преводи један вакуум у други. На пример, ротација за 180° преводи A у B . У класичној теорији као резултат (идеализованог) пада дуж осе симетрије куглица не доспева у један од вакуума, већ у тачку C . У овој тачки се куглица налази у стању лабилне равнотеже, тако да је и најмање померање преводи у један од вакуума. У квантној теорији и саме квантне флукуације чине да куглица нужно доспе у један од вакуума. Крајње стање није ротационо инваријантно мада је настало из ротационо инваријантне динамике и почетних услова.

њи ефекат овога је била унификација електромагнетне и слабе интеракције. Основни продори у овој унификацији су дошли у радовима Глешоуа, Салама и Вајнберга, зашто су ова три истраживача награђени Нобеловом наградом за 1979. годину. Модел који су створили је давао прецизне предикције о низу особина нових масивних W и Z бозона. Ове честице су и детектоване у CERN-у 1983. године. Годину дана касније су за то откриће Нобелову награду поделили Рубиа и Вандермир.

Друга група истраживача је себи ставила за циљ да да доказ ренормализабилности опште неабелове гејџ теорије. Већина физичара је у то време била веома песимистича у вези могућег успеха ових истраживања. Један од људи који није изгубио наду је био Мартинус Велтман. Крајем шездесетих година он је био млади новопостављени професор на универзитету у Утрехту. Велтман је кренуо тако што је прво створио компјутерски програм за алгебарско поједностављивање мноштва релевантних Фајнманових дијаграма које је требало разматрати у доказу ренормализабилности. Нови програм је

користио као хеуристичку алатку за проверу својих идеја везаних за ренормализабилност [1].

У пролеће 1969. код Велтмана је дошао двадесетдвогодишњи студент Герардус Тофт и изразио жељу да се бави изучавањем теорије поља. Тофт је званично примљен за постдипломца у јесен исте године. Задатак му је био да помогне Велтману у његовом трагању за методом ренормализовања неабелових гејџ теорија. Тофтов невероватни успех је уследио већ 1971. године када је публикувао два рада који представљају капиталне истраживачке продоре [2].

Уз помоћ Велтмановог компјутерског програма Тофтови парцијални резултати су проверени, а затим је уследио и њихов заједнички дефинитивни рад у коме су презентовали детаљни доказ ренормализабилности [3]. Поред тога, и сами технички детаљи коришћени у њиховом доказу су учинили општи рачун у квантној теорији поља далеко једноставнијим. Као и квантна електродинамика две деценије раније, овим је и теорија електрослабе интеракције постала исправно функционишућа теоријска машина.

После свега је уследила дуга серија комплексних експеримената који су сви до једног потврдили предикције стандардног модела. Последњи велики успех у том правцу је детектовање масе топ кварка. Овај, последњи од шест кваркова је први пут детектован 1995. године у Фермилабу. Успеси стандардног модела су заиста импресивни, чак и мало застрашујући кад се има у виду да је створен теоријски оквир за успешан опис феномена милијарду пута мањих од атома. Природно је да се човек упита дали је још нешто остало да се открије у оквиру стандардног модела. Једино битно парче велике слагалице које још није виђено је сам Хигс, у много чему централна честица модела; честица чија вакуумска очекивана вредност даје W и Z бозонима њихову масу, односно слабој интеракцији њен кратки домет. У CERN-у 2005. године почиње са радом велики хадронски сударац (LHC). Његов основни циљ ће свакако бити да детектује Хигса.

Уместо закључка

Физичари који се баве теоријом елементарних честица, су заиста срећни људи. Њихов посао је да се играју, да учествују у фасцинантној интелектуалној забави откривања базичних закона нашег универзума. Пред њима стоји најсложенија могућа слагалица. Играјући се са парчићима који чине ту слагалицу, са елементарним честицама, они из нашег обичног света прелазе у магичну земљу квантне теорије поља. На први поглед, тај свет делује нестварно, збуњујуће. У њему сазнајемо да се из ничега заиста може добити нешто, и обрнуто, и да се то стално и дешава. Сазнајемо да честице једнако иду унапред у времену, колико и уназад, да светлост не иде правом линијом, и још много тога.

Као и Алиси на њеном путовању, за кратку шетњу кроз чудни свет квантних поља потребан је водич који непрестано жури у непознатом правцу, а

ипак стално касни. Успех водича се мери не по томе колико сте података сазнали о новој земљи, већ колико сте, макар на тренутак, доживели њену тајанственост, осетили њене мирисе. Као што то обично бива, истраживачи који се баве овом облашћу су и сами често једнако чудни као и свет који описују, но то може само учинити путовање још интересантнијим.

Литература

- [1] M. Veltman, *Nucl. Phys.* **B7** (1968) 637.
- [2] G. 't Hooft, *Nucl. Phys.* **B35** (1971) 167.
- [3] G. 't Hooft and M. Veltman, *Nucl. Phys.* **B44** (1972) 189; *ibid.* **50** (1972) 318.
- [4] Martinus J. G. Veltman, "The Higgs boson". *Scientific American*, November 1986.
- [5] Gerardus 't Hooft, "Gauge Theories of the Forces between Elementary Particles". *Scientific American*, June 1980.
- [6] Paul Davies, *The New Physics*. Cambridge University Press 1989.