Драган Костић[*]
Филозофски факултет Пале
Универзитет у Источном Сарајеву

УДК 537.6/.8
DOI 10.7251/PM1701027
Прегледни рад

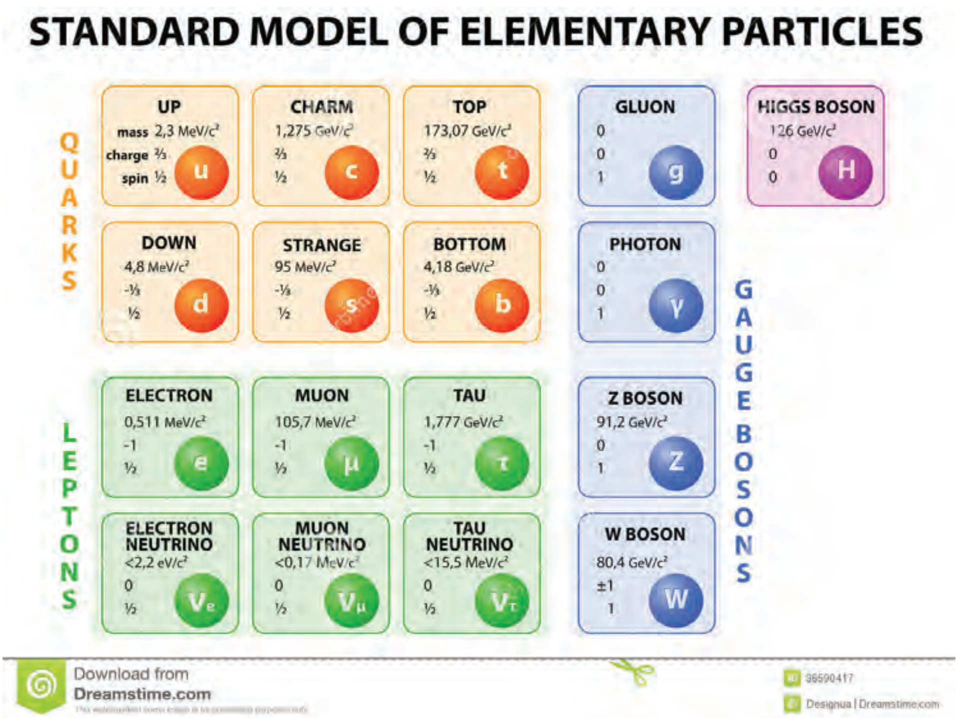
Интеракције и симетрије: група симетрије Стандардног модела

Апстракт: *Три интеракције које су обухваћене данас важећим Стандардним моделом, електромагнетна, слаба нуклеарна и јака нуклеарна, имају своје групе симетрије: U(1), SU(2) и SU(3) респективно. Композитна група симетрије је њихов директни производ U(1)×SU(2)×SU(3), а покушаји унификације ових интеракција спроводе се коришћењем разних виших група симетрије – од минималне SU(5) па надаље. Још неостварени циљ теоријске физике – унификација свих интеракција (сем гравитације са чијом квантизацијом не иде лако, а која се може посматрати и као геометрија, односно метрика простор-времена) – требало би да на јединствен начин третира све три интеракције, сводећи их на једну. Као посебну вредност разматрања симетрија треба нагласити предвиђање још неоткривених елементарних честица, о чијем постојању и особинама можемо да наслутимо управо из разматрања група симетрија – аналогно својевременом предвиђању о постојању још непронађених хемијских елемената на празним местима Мендељејевог система.*

Стандардни модел

Најкраће речено, стандардни модел у савременој теоријској физици обухвата сва наша сазнања о елементима структуре материје и механизмима интеракција међу њима. Према овом моделу, материја се састоји од фермиона – честица полуцелог спина, а интеракције преносе бозони – честице целог спина. Постоје две врсте фермиона: лептони (лаке честице) и кваркови. Од „традиционалних“ елементарних честица, које смо некада сматрали недељивим (електрон, протон, неутрон) само је електрон задржао тај статус, док су протон и неутрон, према данашњим схватањима, састављени од по три кварка. Међу њима јављају се три интеракције: електромагнетна, слаба и јака (некад: слаба нуклеарна и јака нуклеарна интеракција.)

[*] dragankostich@gmail.com



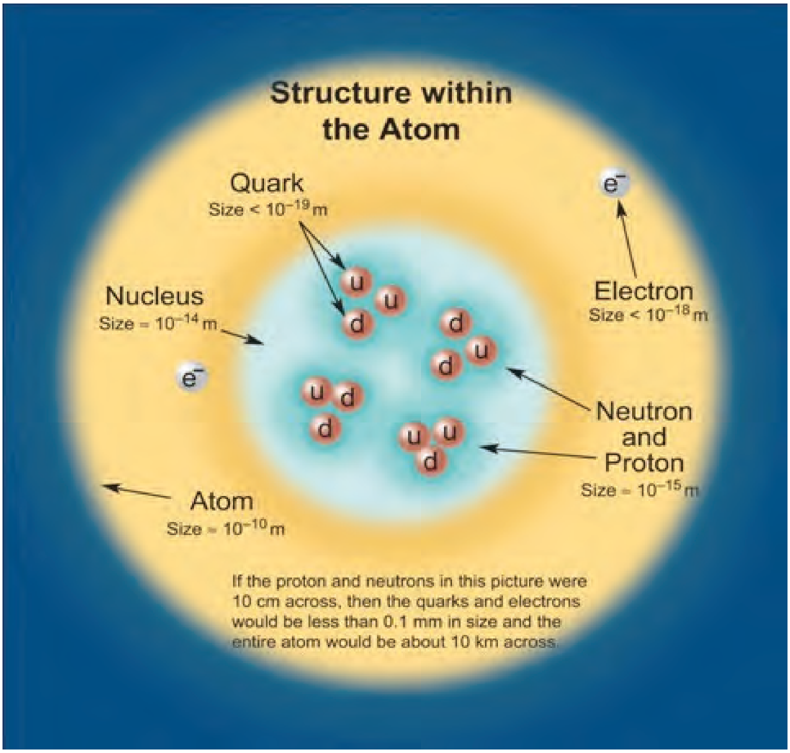
На слици десно приказани су, на систематичан начин, сви елементи стандардног модела: три генерације фермионске материје (три прве колоне) – лептони (доле) и кваркови (горе), а десно од њих су преносиоци познатих интеракција.

Сама реч „кварк" смишљена је шездесетих година (Гел-Ман и Мареј, инспирисани једним примером из књижевности (Џемс Џојс, „Финеганово бдење".) Иначе су физичари морали да смишљају многа имена ових новоуведених честица, па су кваркове, рецимо, именовали редом следећим енглеским речима: up, down, charm, strange, top, bottom. Ови термини се чак и не преводе. Такође, за лептоне – поред већ познатог електрона – уведени су мион и тау-честица. Оригинално, мион је сматран мезоном, па се среће и стари израз: ми-мезон, али мезони су по садашњим схватањима састављени од по два кварка (кварка и антикварка), док је ова честица недељива, слична електрону, али са много већом масом. Иначе, кваркови се јављају само у саставу већих честица – мезона и бариона (заједничким именом: хадрона) и никад до сада није уочен слободни кварк.

Постоје три генерације фермиона и практично је сва материја састављена од фермиона прве генерације – то је прва колона на горњој слици: up и down кварк, електрон и електронски неутрино. Остале колоне – генерације фермиона – комплетирају модел, тачније, оне постоје али су маргинално заступљене у грађи материјалног света каквог данас познајемо.

Спин свих наведених честица из прве три колоне је, као што је речено, 1/2 (зато: фермиони, честице које задовољавају Ферми-Диракову статистику, која је, опет, последица Паулијевог принципа забране – да не могу постојати два фермиона у истом квантном стању, то јест са истим скупом вредности свих квантних бројева), а наелектрисање је разломљено и износи 2/3**e* или -1/3**e* (*e* елементарно наелектрисање.) Тако, рецимо, два up-кварка (укупног наелектрисања 4/3 *e*) и један down-кварк (наелектрисања -1/3 *e*) дају протон (наелектрисања + *e*) док један up-кварк и два down-кварка дају неутрон (наелектрисања 0.)

У четвртој колони наведени су преносиоци интеракција, навешћемо их по времену открића: безмасени фотон преносилац електромагнетне интеракције, масивни неутрални Z^0 и два масивна наелектрисана $W^{\pm}$ - бозона су преносиоци слабе интеракције, а глуони (којих има 8 врста, такође масе 0, као и фотони) су преносиоци јаке интеракције. Сви преносиоци интеракције имају спин једнак 1.



Све горе наведене честице имају своје античестице (кваркови имају антикваркове, античестица електрону је позитрон, а ту су и антинеутрини све три врсте. Неке од честица су саме себи античестице – фотон, на пример. У принципу, античестице граде антиматерију, које у нашем Свемиру има врло мало. Једна од нерешених тајни савремене физике је и та несиметрија, односно питање: зашто материје има толико више него антиматерије).

Нови квантни бројеви који се уводе при описивању слабе и јаке интеракције јесу: изоспин (по аналогији са „класичним" спином) и боја (енг. color, квантно својство без аналогије са класичним величинама – користи се израз „боја" због сличности са сабирањем класичних боја.) Боја има три: red, green, blue а постоје и антибоје: antired, antigreen и antiblue. Комбинација r-g-b даје „бело" или „колор-неутрално" стање, а исто дају и комбинације боја-антибоја.

Интеракције и њихове симетрије

У принципу, свака симетрија у физици има за последицу неки закон одржања. Разликујемо просторно-временске симетрије и унутрашње симетрије конкретне теорије. Опет, постоје глобалне и локалне симетрије (пример глобалне симетрије простор-времена јесу Лоренцове трансформације на којима се заснива Специјална теорија релативности, а као пример локалне симетрије наводимо Општу теорију релативности.) Овде ћемо говорити само о унутрашњим симетријама ових трију интеракција: електромагнетне, слабе и јаке.

Унутрашња симетрија електромагнетне интеракције је група U(1) – једнодимензиона група комплексних бројева норме 1. У општем случају група симетрије сваке од три интеракције је SU(n) – група унитарних (зато U) матрица реда nxn са „специјалним" (отуда S) својством да им је детерминанта једнака јединици. У случају U(1) се не може реализоват тај захтев (det=1) те се група не зове SU(1) него U(1). Димензионалност n унитарних матрица се креће од 1 за електромагнетну, преко 2 за слабу, до 3 за јаку интеракцију. Иначе, сама димензионалност групе симетрије није унапред задата неком очигледном особином конкретне интеракције, већ је резултат анализе експерименталних чињеница и „уклапања" читаве слике – мноштва разноврсних честица откривених у акцелераторима – у неку компактну и конзистентну шему.

Ако је закључено да је група симетрије неке интеракције SU(n), то значи да постоји унутрашње својство које има n могућих вредности. То унутрашње својство – односно нови квантни број – у случају слабе интеракције назива се слаби изоспин, по аналогији са правим спином, јер су у питању матрице 2x2. За јаку интеракцију ред матрица је 3, а одговарајуће унутрашње својство је „боја“ (color) кваркова, који једини трпе (и генеришу) јаку интеракцију. А из димензионалности групе симетрије закључујемо и о броју различитих преносиоца интеракције – тзв. „гејџ“-бозона – тако што тај број идентификујемо са бројем линеарно независних матрица (искључујући јединичну) које „разапињу“ простор унитарних матрица групе симетрије. Како је тај број n^2-1, то у случају слабе силе имамо 2^2-1=3 преносиоца - $W^{\pm}$ и Z^0 - а у случају јаке силе чак 3^2-1=8 глуона.

Укупна група симетрије стандардног модела је, дакле, U(1)xSU(2) xSU(3). У оваквој шеми, свака интеракција делује у свом простору, укупни простор стања је директни производ векторских простора, а оператори су директни производи матрица које делују у овим независним просторима.

Наведимо неке од могућих базиса – међусобно ортогоналних матрица из којих је могуће генерисати све унитарне трансформације:

-за SU(2) симетрију погодан је базис Паулијевих спинских матрица:

$$\sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

(детерминанта ових матрица је -1, траг је једнак 0; од њих се, једноставним множењем са i, лако долази до унитарних „специјалних“ матрица детерминанте једнаке +1.)

У циљу систематизације експерименталних резултата и открића већег броја тешких честица – хадрона (мезона и бариона) – од којих је већина врло нестабилних, развијени су теоријски модели који су коначно резултирали увођењем кваркова као основних градивних елемената тешких честица (па и нуклеона – протона и неутрона) и тзв. јаке силе (алтернативно: јака нуклеарна интеракција) као механизма који одржава на окупу пре свега нуклеоне, а онда и њихове ансамбле – атомска језгра. Као унутрашња симетрија ове интеракције претпостављена је група симетрије SU(3) коју чине специјалне (детерминанта им је једнака 1) унитарне матрице реда 3x3.

Група SU(3) има 8 независних генератора, хермитских матрица чији је траг једнак нули, и које се по конвенцији означавају са $\lambda_\alpha/2$ (α= 1,...,8) где су:

$$\lambda_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\lambda_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix}, \tag{1}$$

$$\lambda_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda_7 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda_8 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}$$

тзв. Гел-Манове λ-матрице. Приметимо велику сличност Паулијевих 2x2 σ-матрица и 3x3 λ-матрица. Очигледно је да су λ-матрице генерализација σ-матрица при преласку са дводимензионалне SU(2) на тродимензионалну SU(3) групу симетрије. Мало „компликованија“ форма последње од њих (λ_8) последица је захтева да њен траг буде нула, као и да буде линеарно независна од дијагоналне λ_3 и јединичне 3x3 матрице.

Уз помоћ ових матрица конструишемо унитарне 3x3 матрице $U = e^{i\varphi_\alpha \lambda_\alpha /2}$ које потпуно „разапињу простор“ SU(3) матрица, то јест свака унитарна 3x3 матрица чија је детерминанта једнака један може се развити преко ових генератора.

Релације ортогоналности 3x3 λ-матрица исте су као код 2x2 σ-матрица: $Tr(\lambda_\alpha \lambda_\beta) = 2\delta_{\alpha\beta}$.

Унификација

До сада је успешно спроведена само унификација електромагнетне и слабе интеракције, те се често користи заједнички термин: електрослаба интеракција. Група симетрије ове унуфициране теорије је такође U(1)xSU(2), с тим што су у унификованој теорији „измешани“ параметри засебних теорија. Тако је уведена величина – нови квантни број – „слаби изоспин“, а и „слаби хипернабој“ уместо класичног наелектрисања. Таквим третманом добијају се 4 бозона – преносиоца интеракције: W_1, W_2, W_3, које приписујемо слабом изоспину, и B бозон који приписујемо слабом хипернабоју.

Спонтано нарушење симетрије

Четири бозона W_1, W_2, W_3 и B су сви безмасени, све док важи симетрија SU(2) x U(1). Спонтаним нарушењем симетрије – што је општи механизам свођења више симетрије на нижу – од ова четири бозона добијају се сасвим различити масивни бозони $W^\pm$ и Z^0, и фотон γ који нема масу. Овде треба напоменути да, иако се исто означавају, групе симетрије SU(2) x U(1) пре и после нарушења симетрије нису исте: пре нарушења у питању је група SU(2) x $U(1)_Y$, где је Y слаби хипернабој, а после нарушења у питању је група SU(2) x $U(1)_{em}$ која је група симетрије електромагнетизма.

Литература:

1. H. Fritzsch, Elementary Particles, Building Blocks of Matter, World Scientific, Singapore, 2005.
2. M. Gell-Mann, D. Sharp, W.G. Wagner, Phys. Rev. Lett. 8, 261 (1962).
3. R.P. Feynman, M. Kislinger, and F. Ravndal, Phys. Rev. D 3 , 2706 (1971).