

Елементарне честице и стандардни модел

1.1 Класично доба елементарних честица

1.1.1 Електрон

Откриће електрона и елементарног наелектрисања од стране Томпсона 1897. године се са правом сматра зачетком физике елементарних честица. До открића је дошао на основу проучавања понашања катодних зрака у електричном и магнетном пољу при чему је утврдио да се ради о честицама негативног наелектрисања и да је однос наелектрисања и масе честице већи од свих дотад забележених. Томпсон је правилно претпоставио да су корпускуле¹, како их је тада именовао, основни делови материје и да су један од конституената атома. Пошто су последњи без наелектрисања, претпоставио је да су корпускуле суспендоване у позитивном матриксу, "баш као шљиве у пудингу"². Овакав модел су оповргли чувени Ратерфордови експерименти у којима је показано да је позитивно наелектрисање сконцентрисано у централном делу и да је ограничено на запремину око 10^5 пута мању од запремине атома. Овај научник је и по први пут употребио назив протон (грч. *πρῶτος* - први) именујући њиме језгро водониковог атома. Резултати Ратерфордових експеримената су потакли Нилса Бора да 1914. године постулира теорију структуре водониковог атома по којој се електрони крећу око протона по стационарним орбитама, при чему не емитују зрачење. По аналогији следећи елемент у низу - атом хелијума је требао да буде изграђен од два протона и два електрона, што се није слагало са резултатима експеримената који су указивали да хелијум има двоструко већу масу од превиђене моделом. Дилему је 1932. решио Чедвик открићем неутрона, за који је утврдио да има масу веома блиску маси протона и да улази у састав језгра атома.

1.1.2 Фотон

Појам кванта електромагнетног зрачења је први пут уведен 1900. године при теоријском разматрању феномена зрачења апсолутно црног тела од стране Макса Планка. Овај феномен је дуго збуњивао научнике, јер је класична физика предвиђала да би такав објекат могао да емитује енергију бесконачно³, док су експериментални подаци указивали на дру-

¹Појам "електрона" као најмањег наелектрисања је у својим разматрањима први пут увео Џорџ Стуоуни (George Johnstone Stoney) и временом је он заменио термин корпускуле.

²На основу чега је име добио један од првих модела атома тзв. модел пудинга од шљива (енг. *plum pudding model*)

³Што је у супротности са законом одржања енергије.

гачије понашање. Планк је у извођењу израза за густину зрачења апсолутно црног тела у јединичном интервалу фреквенције претпоставио да апсолутно црно тело емитује енергију у виду пакета које је назвао квантима чија је енергија

$$E = h\nu \quad (1.1)$$

где је h константа (данас позната као Планкова константа) чију је вредност израчунао и која износи

$$h = 6,626 \cdot 10^{-24} \text{ J} \cdot \text{s} \quad (1.2)$$

Добијена једначина је у потпуности објаснила експерименталне резултате. Није се даље бавио разматрањем феномена кваната и сматрао је да је њихова емисија карактеристика зрачења апсолутно црног тела. Константа је добила име по Планку и представља једну од фундаменталних физичких константи.

Ајнштајн је 1905. године⁴ изнео тезу да је квантизација емисије енергије особина самог магнетног поља и да није у вези са механизмом емисије. Он је адаптирао Планкову идеју и као такву искористио је у објашњењу феномена фотоелектричног ефекта⁵ и објаснио зашто енергија емитованих електрона E_e не зависи од интензитета упадне светлости већ само од њене фреквенције и енергије везивања електрона у металу A_i

$$E_e \leq h\nu - A_i \quad (1.3)$$

Идеја да се је електромагнетно зрачење по својој природи квантизирано наишло је на велики отпор у научној заједници; Миликен је чак тврдио да теорија, иако успешно даје енергију електрона емитованог у фотоелектричном ефекту, у суштини погрешна. Борба за "светлосни квант је трајала читавих осамнаест година-све до 1923 када је Комптон у својој анализи расејања светлости на честици у стању мировања није непобитно утврдио повећање таласне дужине расејане светлости у односу на упадну које је дато изразом

$$\lambda - \lambda_0 = \frac{h}{mc} (1 - \cos\theta) \quad (1.4)$$

где су λ и λ_0 таласне дужине расејане и упадне светлости, m маса мировања електрона, c брзина светлости у вакууму и θ угао између упадне и расејане светлости. Управо овакав резултат се проблем третира применом закона одржања енергије и импулса и ако се светлост састављена од честица нулте масе. Дуалну природу светлости и честица је 1924. године потврдио Луј де Брољ.

Светлосни квант је 1926. године је од стране хемичара Џилберта Луиса именован фотоном; симбол фотона је γ (потиче од ознаке за гама зрачење).

Ајнштајнова теорија о квантизацији електромагнетног поља је касније проширена на сва физичка поља, тако да свако од њих има свој квант који је уједно и носилац интеракције у датом пољу. О носиоцима интеракције биће речи у наредним одељцима.

Открићем неутрона завршено је класично доба елементарних честица у којем је утврђен састав језгра и структура атома помоћу којих се могу објаснити скоро све појаве у физици и хемији. Међутим, оно што је остало нерешено је питање силе која делује између нуклеона и држи их на окупу на веома малом међусобном растојању.

⁴Исте године Ајнштајн је публиковао радове који се односе на анализу дифузионог кретања и теорију релативности, тако да се она сматра знатном годином физике уопште

⁵Фотоелектрични ефекат је процес у коме долази до емисије електрона из метала изложеног ултраљубичастој или видљивој светлости

1.2 Честице из средње земље

На основу димензија језгра лако је закључити да та нуклеарна сила мора бити довољно јака да би надвладала електростатичко одбијање протона. Међутим остало је питање из чега произилази таква интеракција. Јукава (Hideki Yukawa) је 1934. претпоставио да протони и неутрони интерагују преко неке врсте поља, као што нпр. небеска тела интерагују подсредством гравитационог поља. Као и свако физичко поље и поље нуклеарних сила мора бити квантирано. Јукава је успео да предвиди масу носиоца интеракције у овом пољу - требао би да буде скоро триста пута тежи електрона и шест пута лакши од протона⁶. Ипак, пошто таква честица није била откривена, Јукава је сматрао да је његова теорија погрешна. До напретка у физици честица "средњих маса" дошло је након експеримената са космичким зрачењем које су извели Нидермејер (Seth H. Neddermeyer) и Андерсон (Carl D. Anderson), а затим и Стрит (J. C. Street) и Стивенсон (E.C. Stevenson) 1937. године. Први су у експерименту изведеном у магленој комори, у којој је била постављена плоча од платине, поред честица које су се јављале у групама (тзв. слапови или тушеви честица) и које карактерише значајан губитак енергије про проласка кроз плочу, детектовали и појединачне честице код које је тај губитак био веома мали; за последње су претпоставили да имају масу већу од електрона и значајно мању од протона. Стрит и Стивенсон су користећи "телескопом честица" успели да приближно одреде масу честице (130 пута тежа од електрона) и њено наелектрисање (негативно). Иако се сматрало да су ови експерименти потврда постојања Јукавиног мезона, накнадни експерименти дали су варијабилне резултате у погледу његове масе и времена живота. Дилему је решила Пауел-ова (Cecil F. Powell) група из Вилисове лабораторије (Бристол, Уједињено краљевство) након што је у експериментима са траговима честица из космичког зрачења открила постојање два мезона, при чему се тежи мезон (који је именован пионом (или π мезоном) распадао до лакшег (миона или μ мезона)⁷. Тежа честица је по карактеристикама одговарала Јукавиној честици и заједно са протоном и неутроном сврстана је у **хадроне** (тешке честице), док је мион са електроном чинио групу лептона (лакших честица). (слика X.1).

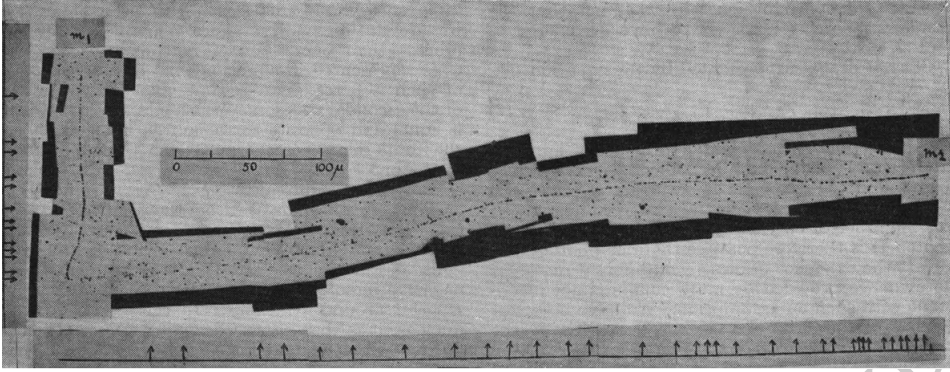
1.3 Античестице

Диракова једначина (о којој је већ раније било речи у одељку о радиоактивним распадима) савршено предвиђа релативистичку енергију електрона, али њено решење оставља могућност да ова честица има и негативну енергију. Решење проблема су 1940. године предложили Фејнман (Richard Feynman) и Штуклберг (Ernst Stueckelberg) предлажући да стања "негативне енергије" одговарају честици која има исту масу, али (исто) наелектрисање супротног знака. Честица је добила име позитрон и ознаку e^+ , коју је, као што ће се испоставити, 1932. године у космичком зрачењу већ открио Андерсон.

Диракова једначина има шире последице и указује да свака честица има своју античестицу. Антипротон $\bar{p}$ је пронађен 1955. године на Беватрон акцелераторском постројењу у Берклију, а исте године је у истој институцији пронађен и антинеутрон $\bar{n}$. Чињеница да неутрон као честица без наелектрисања има античестицу, последица је његове унутрашње структуре, о чему ће бити речи нешто касније. Принципи означавања античестице са цртом изнад симбола је генерално прихваћен са изузетком електрона и позитрона који су задржали првобитне нотације. Једина честица која нема своју античестицу, односно античестица је самој себи, је фотон ($\bar{\gamma} \equiv \gamma$).

⁶ред величине масе носиоца интеракције могуће је предвидети помоћу Хајзенбергове релације неодређености.

⁷Они су заправо регистровали паспад негативног миона μ^- до негативног пиона π^- . Поред тога извели су и нуклеарне реакције између мезона и различитих језгара.



Слика 1.1: Фотографски запис распада пиона до миона. Пион улази са горње стране плоче и након краћег пређеног растојања региструје се други траг честице који је нормалан на први. Очигледно је да се не ради о расејању пиона јер није могуће расејање честице под правим углом, већ се ради о његовом распаду (данас знамо да у распаду настаје и неутрино који не оставља траг). Масе честица су одређене на основу дебљине трагова и малих флукуација у њиховој оријентацији. Преузето из Lattes et al., Nature vol. 160, p. 694-697, 1947.

1.4 Неутрини и симетрија прелаза

За наредна разматрања везана за утврђивање постојање неутрина, неопходно је на кратко да се осврнемо на један од основних правила у нуклеарној физици које се назива правило симетрије прелаза које гласи: *Ако нека честица пређе са леве на десну страну једначине (која описује нуклеарну реакцију), она постаје античестица или представљено једначином*

$$A + B = C + D \quad \blacktriangleright \quad A = \bar{B} + C + D \quad (1.5)$$

или ако све врсте промене страну

$$\bar{C} + \bar{D} = \bar{A} + \bar{B} \quad (1.6)$$

Ово правило нам заправо сугерише да су реакције дате у релацији 1.5 само манифестације једног те истог процеса. Ово треба узети са опрезом, јер да би ови процеси могли да постоје морају бити задовољени енергетски услови. Такође, код процеса код којих учествује фотон треба водити рачуна, јер принцип указује да су Комптонов ефекат

$$\gamma + e^- = \gamma + e^- \quad (1.7)$$

и процес анихилације позитрона и електрона

$$e^+ + e^- = \gamma + \gamma \quad (1.8)$$

манифестације истог процеса што заправо није тачно.

Принцип симетрије прелаза је искоришћен у експерименту Ринса и Коувена (који је описан у поглављу XX) у коме је потврђено постојање антинеутрина. Наиме, ако β^+ распад представимо као

$${}_1^1\text{p} \longrightarrow {}_0^1\text{n} + e^+ + \nu \quad (1.9)$$

онда је могућа и реакција

$$\bar{\nu} + {}_1^1\text{p} \longrightarrow {}_0^1\text{n} + e^+ \quad (1.10)$$

што је успешно и потврђено на основу детекције производа ове реакције.

Међутим, остало је нерешено питање да ли се у електронском и позитронском распаду емитије иста честица-неутрино. Одговор на то питање су дали експерименти Дејвиса (Raymond Davis, Jr.) и Хармера (Don S. Harmer). Наиме по аналогiji са реакцијом 1.9 могућа је реакција

$$\nu + {}^1_0\text{n} \longrightarrow {}^1_1\text{p} + e^+. \quad (1.11)$$

Уколико се у оба процеса емитију исте честице, онда би била могућа и реакција

$$\bar{\nu} + {}^1_0\text{n} \longrightarrow {}^1_1\text{p} + e^+. \quad (1.12)$$

Пошто ниједан случај ове реакције није забележен у експериментима, закључено је да се у β^- распаду емитије антинеутрино, док је у β^+ распаду производ неутрино.

Немогућност одигравања реакције 1.12 произилази из закона одржања лептонског броја L који су 1952. године изнели Конопински (Emil J. Konopinski) и Махмуд (H. M. Mahmoud). Они су електрону, неутрину и миону придружили лептонски број $L = 1$, док су одговарајућим античестицама приписали $L = -1$. По овом закону реакција 1.11 је могућа јер је са обе стране лептонски број идентичан. Код наредне реакције сума лептонских бројева са леве и десне стране није иста, па је овај процес забрањен.

1.5 Електронски и мионски неутрини

Већ је наведено да се у распаду негативног пиона добија негативни мион и антинеутрино, што је ускладу са законом одржања лептонског броја (пион је хадрон и лептонски број му је 0)

$$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}. \quad (1.13)$$

Аналогно за распад позитивног пиона (античестица "регуларном" пиону)

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu. \quad (1.14)$$

Пауелова група је након открића овог процеса, 1957. године регистровала распад миона до електрона и два неутрина

$$\mu^- \longrightarrow e^- + \nu + \bar{\nu} \quad (1.15)$$

и аналогно

$$\mu^+ \longrightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}. \quad (1.16)$$

Сада се поставља питање како знамо да се у распаду миона емитију три честице. Одговор је заправо врло једноставан-ако у узастопним мерењима варира маскимална енергија електрона онда се мион распада на три честице; у случају да настају две честице ова енергија би била константна. Поред овог проблема, разматрано је зашто нису забележени случајеви реакције, иако задовољава закон одржања лептонског броја

$$\mu^- \longrightarrow e^- + \gamma. \quad (1.17)$$

Њена немогућност је сугерисала постојање још једног правила-закона очувања мионског броја. На тај начин су од закона очувања лептонског броја настала два: закон очувања електронског броја (јединица за електрон и електронски неутрино) и мионског броја (мион и мионски неутрино). Због то реакције распада пиона и миона пишемо (што је и њихов крајњи облик) као

$$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad \pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.18)$$

и

$$\mu^- \longrightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e \quad \mu^+ \longrightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e \quad (1.19)$$

Постојање два типа неутрина експериментално је потврђено у Брукхејвену 1962. када су мионским антинеутринима насталим у распаду пиона бомбардовани протони при чему су регистровани догађаји

$$\bar{\nu}_\mu + {}^1_1\text{p} \longrightarrow \mu^+ + {}^1_0\text{n} \quad (1.20)$$

али не и

$$\bar{\nu}_\mu + {}^1_1\text{p} \longrightarrow e^+ + {}^1_0\text{n}. \quad (1.21)$$

Као и електронски, мионски неутрини имају веома малу масу и прелази велика растојања без интеракције са материјом. Крајем шездесетих година прошлог века регистровано је да на тим "путовањима" може да дође до интерконверзије неутрина--односно тзв. *неутринских осцилација*.

По чему се међусобно разликују неутрино и антинеутрино? Наравно, по вредности лептонског броја, али и по својству које називамо хелицитет. Овај појам је повезан са смером линеарног момента и спина ових честица: код неутрина су они супротно усмерени, те се они називају левим (енг. *left handed*) и имају хелицитет -1, док се антинеутрини називају десним (енг. *right handed*) и имају хелицитет +1.

1.6 "Стране ствари"

Нови обрт у новој области физике честица, настао је када су 1947. године Рочестер и Баглер анализирајући трагове космичког зрачења у магленој комори, открили необичан запис који се састојао од трагова две супротно наелектрисане честице који су формирали обрнуто латинично слово В и исходили из једне тачке (слика X.2). После детаљне анализе трагова закључили су да трагови потичу од распада честице без наелектрисања коју су назвали V-честицом. Честица, која је касније названа каоном (K^0), се распада на два пиона

$$K^0 \longrightarrow \pi^+ + \pi^- \quad (1.22)$$

Две године касније Браунова група је регистровала позитивни каон који се распада на три пиона

$$K^+ \longrightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^- \quad (1.23)$$

Показало се да се каони понашају као тешки пиони, па су сврстани у групу мезона.

Наредне године група Андерсонова група је регистровала нову неутралну V^0 честицу, значајно тежу од протона, која се овог пута распадала до протона и негативног пиона

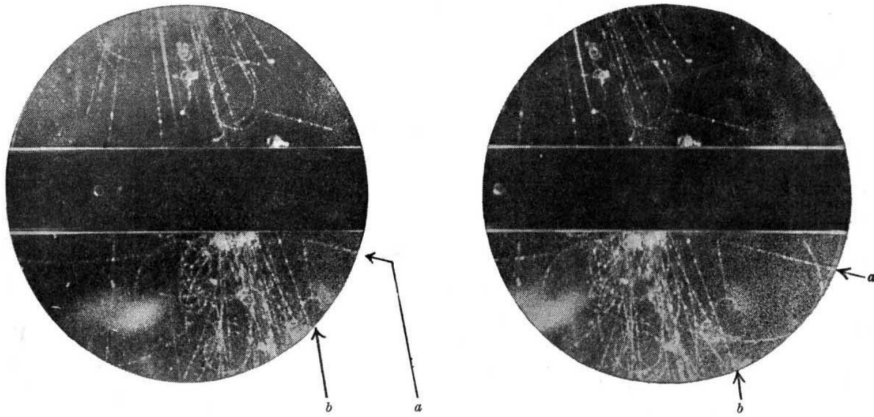
$$\Lambda^0 \longrightarrow p^+ + \pi^-. \quad (1.24)$$

Ова честица је сврстана у групу *бариона* односно тешких хадрона којој између осталих честица припадају протон и неутрон⁸.

Питање стабилности протона је привлачило пажњу научника од краја тридесетих година прошлог века. Знало се да је слободни неутрон нестабилан и да се распада до протона, али да нису (ни до данас) запажени догађаји типа

$$p^+ \longrightarrow e^+ + \gamma \quad (1.25)$$

⁸У групу хадрона спадају честице које су састављене од кваркова, о чему ће бити речи нешто касније.



Слика 1.2: Фотографски записи распада неутралног каона. У центру маглене коморе налази се оловна плоча, док је магнетно поље оријентисано нормално на раван слике, тако да позитивно наелектрисане честице скрећу удесно. Са словима а и b означени су трагови честица које настају. Преузето из Rochester et al., Nature vol. 160, p. 855-857, 1947.

или било која варијанта распада ове честице. Штуклберг је 1938. године, по аналогији са законом одржања лептонског броја, предложио да је то последица закона одржања барионског броја који је једнак јединици за све барионе (у то време се знало само за два - протон и неутрон). На основу овог закона Λ честица припада барионима.

Оно што је било чудно у вези са откривеним честицама је да увек настају у паровима за веома кратко време посредством јаке (нуклеарне) силе и да се распадају много спорије (као и остали бариони сем протона) под дејством слабе силе. Ово је имплицирало да "нове" честице поседују нову особину којом се може објаснити њихово "чудно" понашање. Гел-Ман (Murray Gell-Mann) и Нишиџима (Kazuhiko Nishijima) су 1953. године предложили увођење особине коју је назвао *страношћу* и доделио квантни број страности свим до тада познатим барионима и мезонима. Тако је нпр. за протоне, неутроне и пионе као "обичајене" честице овај број нула, док је за Λ честице он -1, при чему је предзнак квантног броја страности арбитарно изабран⁹. Квантни број страности је у потпуности очуван у јаким нуклеарним интеракцијама у којима стране честице настају нпр.

$$\pi^- + p^+ \longrightarrow K^+ + \Sigma^- \quad (1.26)$$

али није при њиховом распаду

$$\Sigma^+ \longrightarrow p^+ + \pi^0. \quad (1.27)$$

Развој и употреба моћних акцелераторски постројења довео је учесталог проналажења нових страних честица¹⁰, па се ускоро јавила потреба за одређеним видом систематике нових честица или увођењем неке врсте периодног система честица. Од 1964. године излази прво издање "Података о елементарним честицама и резонантним стањима" на свега 27 страница, које је касније прерасло у годишњу "књижицу" физике честица чије издање за 2022. годину (Particle physics booklet, Lawrence-Berkley Laboratory, USA) десетоструко веће.

⁹Принцип додељивања квантног броја страности ће бити описан у наредном одељку.

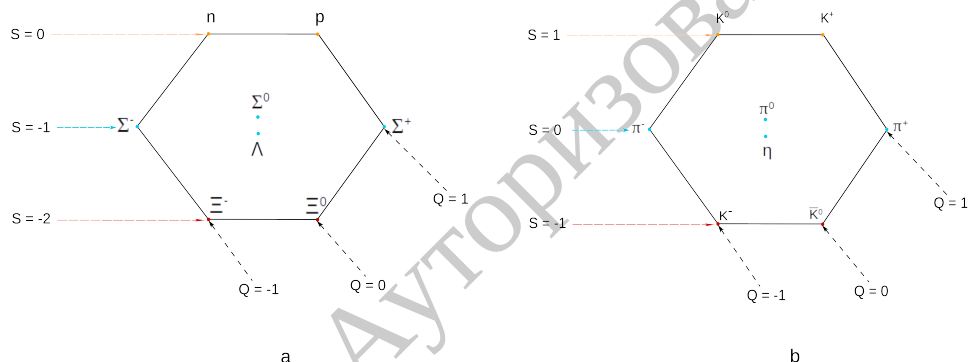
¹⁰Да парафразирамо Алису у земљи чуда: Све чуднојих и чуднојих

1.6.1 Изоспин

Пре детаљнијег разматрања класификације честица, кратко ћемо се осврнути на појам *изоспина*. Појам је крајем тридесетих година увео Шредингер и односи се на честице које су инваријантне у односу на јаку нуклеарну силу - односно код којих замена честице не доводи до промене у јачини нуклеарне силе. Поред тога оне имају све вредности кватних бројева исте, али им је наелектрисање различито. Тако неутрон и протон чине изоспински дублет (барионски број 1, спин 1/2), а пиони чине изоспински триплет (π^+ , π^0 , π^-).

1.7 "Ансамбли" честица

Гел-Ман је 1961. године предложио организационе шеме за класификовање бариона и мезона (и одговарајућих античестица). Барионе је сместио у октет (види слику 1.3а) при чему су они класификовани према вредности квантног броја страности и наелектрисању¹¹. Мезони такође имају свој октет, с тим што он садржи и одговарајуће античестице (види слику 1.3б). Код бариона античестице имају посебан октет.



Слика 1.3: Барионски (а) и мезонски (б) октети. Мезонски октет садржи и антимезоне.

Међутим, октети нису једине дозвољене шеме, тако да постоје и декуплети (слика 1.4) али и остали мултиплети.

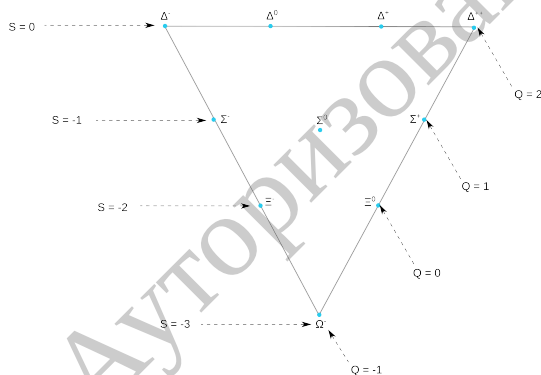
1.8 Три кварка за ...

Убрзо након увођења осмоструког начина класификације честица поставило се питање шта узрокује такву организацију и зашто неке честице (као π честице) долазе у виду изоспинских мултиплета, а неке постоје само у једној варијанти (нпр. Λ честица). Гел-Ман је изнео претпоставку да је то последица постојања унутрашње структуре, т.ј. чињенице да су све честице изграђене од комбинације три или два конституента које је он назвао *кварковима*¹². Бариони су тако састављени од комбинације *три кварка*, а мезони од комбинације

¹¹Овакву класификацију је Гел-Ман назвао осмоструким начином (енг. *eightfold way* као вид алузије на будистички принцип осмоструког начина (ил осам правих путева) ослобађања од циклуса реинкарнација и достизања нирване.

¹²Име кварк је Гел-Ман преузео из шаливе песмице у роману "Финеганово бдење" Џејмса Џојса.

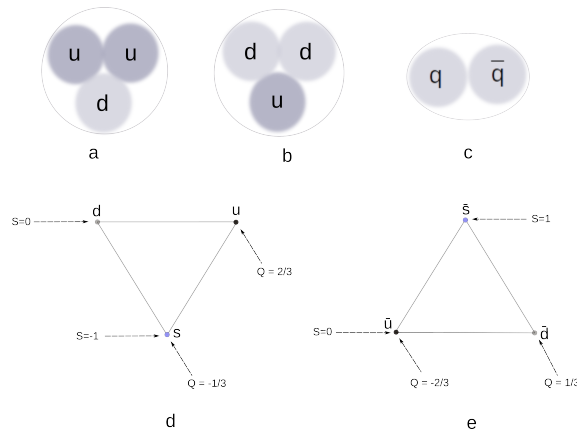
кварка и антикварка. Даље, кваркови имају фракционо наелектрисање: $Q(u) = +\frac{2}{3}e$ и $Q(d) = -\frac{1}{3}e$. Честице са страном једнаком нули су састављене од комбинације u ("up") и d ("down") кваркова, док стране честице поред ових кваркова садрже један или више "s" (страних) кваркова; одговарајуће античестице су састављене од антикваркова. Тако је протон састављен од два u и једног d кварка, док је неутрон састављен од два d и једног u кварка (слика 1.5). Пошто је неутрон тежи од протона и да се распада до њега у процесу радиоактивног распада, следи да је d кварк тежи од u кварка и да се поменути процес своди на трансформацију $u \rightarrow d$ и емисију одговарајућих честица. Такође s кварк је тежи од d кварка и носи наелектрисање $-\frac{1}{3}e$. Број страних кваркова у датој честици одговара квантном броју (негативном) квантном броју страности; код честица које садрже антистраних кваркове он одговара позитивном квантном броју страности).



Слика 1.4: Барионски декуплет.

Од доступна три кварка могуће је направити десет различитих бариона и 9 различитих мезона чије су кварковске структуре дате у табелама 1a и 1b.

Ако погледамо структуру бариона у табели 1a уочићемо да Δ^{++} , Δ^- и Ω^- садрже по три идентична кварка, што је у супротности са Паулијевим принципом. Решење овог проблема је (опет) дао Гел-Ман приписујући кварковима својство обојености (које наравно није у вези са стварним појмом боја, већ се ради о специфичном физичком својству које се у физици честица зове *наелектрисање боје* (енг. *colour charge*)), при чему су *све честице присутне у природи безбојне*, односно начине су од комбинације *плавог, зеленог и црвеног* кварка (бариони) или од комбинације обојеног и анти-обојеног кварка (мезони).



Слика 1.5: Кварковска структура протона (a), неутрона (b), мезона (c) и триплети кваркова (d) и антикваркова (e)

Табела 1a. Кварковска структура бариона

Табела 1b. Кварковска структура мезона

qqq	Q	S	Барион
uuu	2	0	Δ^{++}
uud	1	0	Δ^+
udd	0	0	Δ^0
ddd	-1	0	Δ^-
uus	1	-1	Σ^+
uds	0	-1	Σ^0
dds	-1	-1	Σ^-
uss	0	-2	Ξ^0
dss	-1	-2	Ξ^-
sss	0	-2	Ω^-

$q\bar{q}$	Q	S	Мезон
$u\bar{u}$	0	0	π^0
$u\bar{d}$	1	0	π^+
$d\bar{u}$	-1	0	π^-
$d\bar{d}$	0	0	η
$u\bar{s}$	1	1	K^+
$d\bar{s}$	0	1	K^0
$s\bar{u}$	-1	-1	K^-
$s\bar{d}$	0	-1	$\bar{K}^0$
$s\bar{s}$	0	0	η

Кварковски модел структуре материје је релативно дуго наилазио на отпор научника, првенствено због тога што (ни до данас) није откривено присуство изолованих кваркова (већ је њихова егзистенција сведена на границе бариона/мезона). Друго, увођење "обојених" кваркова је као врста вештачке подршке ("поштапалице") овом моделу. Резултати добијени из експеримената расејања високоенергетских електрона (300-550 MeV) на протонима на Стенфордском линеарном акцелератору SLAC (експеримент аналоган Ратерфордском у коме је доказано постојање атомског језгра) показали су да унутар протона постоје три тачке нагомилавања наелектисања (и масе) чије су димензије око 0,7 fm. Међутим оно што је учврстило кварк модел био је проналазак новог неутралног тешког мезона, троструко тежег од протона, у Брукхејвен националној лабораторији (Brookhaven National Laboratory, NY, USA) у новембру 1974 од стране групе професора Тинга¹³.

Честица је именована ψ -мезоном и њена маса је била три пута већа од масе протона. Оно што је било чудно је време живота те честице које је било око 10^{-20} s, будући да је средње време живота до тад детектованих мезона сличне масе било "свега" 10^{-23} s. На основу особина ове честице закључено је да је она састављена од комбинације новог типа кварка и његовог антикварка; кварк је именован *шармантним* (енг. *charm*). Постојање новог кварка

¹³Ово откриће у литератури се назива новембарском револуцијом

могло се претпоставити и на основу претпоставке о симетрији броја лептона и кваркова коју је раније изнео Глашоу (Sheldon L. Glashow): наине у то време су била позната четири лептона (e, ν_e, μ, ν_μ), а само три кварка (u, d, s) па је недостајала честица која бити употпунила симетрију.

Пошто ψ -честица садржи само шарматни кварк (и његов антикварк) за потврду његовог постојања било је потребно пронаћи честице које садрже шармантни кварк у комбинацији са другим кварковима. Таква честица састава (udc) је откривена у Фермилабу 1975. године и добила ознаку Λ_c^+ , а затим је уследило откриће других "делимично шармантних" бариона, али и мезона као што је D^0 мезон састава ($c\bar{u}$).

Исте године је откривен τ -лептон око 3000 пута тежи од електрона и њему пратећи тау неутрино ν_τ . Нарушена симетрија између броја лептона и кваркова, делимично је поправљена открићем честице која садржи дно¹⁴ (енг. *bottom*) b кварк и честица које га садрже у комбинацији са другим кварковима.

На откриће недостајућег кварка, који је (унапред) добио име врх (енг. *top*) и чија је предвиђена маса 40 пута већа од масе b -кварка, чекало се пуних двадесет година првенствено због немогућности достизања довољне енергије у сударима антипротона и протона у истраживачким акцелераторским постројењима. Коначно је 1995, на TEVATRON акцелератору који ради у склопу Fermilab-a (Чикаго, САД) регистрован је мезон који је комбинација t и $\bar{t}$ кварка.

1.9 Носиоци интеракција (медијатори)

1.9.1 Виртуелни фотони

Према квантној теорији поља носилац интеракције у физичком пољу је квант тог поља. Тако наелектрисане елементарне честице у међусобно интерагују континуалном разменом такзованих "виртуелних фотона", односно између њих постоји непрекидан ток последњих. Прецизније, виртуелни фотон представља *поремећај у електромагнетном пољу* узрокован присуством наелектрисаних честица и преноси "информације" о њиховом спину и импулсу до друге наелектрисане честице и доводе до промене њеног кретања; поларитет ових медијатора преноси информације о наелектрисању честица. Између две наелектрисане честице постоји стални ток виртуелних фотона, што делом објашњава чињеницу да их не можемо регистровати као индивидуалне¹⁵.

1.9.2 Електрослаба интеракција

Резултати експеримената који су се одвијали крајем педесетих и средином шездесетих година прошлог века, довели су до формирања теорије електрослабе интеракције коју су изнели Глашоу, Салам (Abdus Salam) и Вајнберг (Steven Weinberg)¹⁶ која електромагнетну силу (медијатор фотон) и слабу нуклеарну силу разматра као различите апсепте једне те исте силе. Ова теорија предвиђа постојање три масивна медијатора слабе нуклеарне интеракције - бозона W^+ , W^- и Z^0 (маса $W^\pm = 81 \text{ GeV}$; за Z^0 92 GeV ¹⁷) и чији је домен дејства ограничен на димензије кваркова. За разлику од јаке нуклеарне силе која само делује између кваркова, слаба нуклеарна сила делује на кваркове, лептоне и фотоне и не може да доведе

¹⁴ Алернативно име је лепи кварк (енг. *beauty*)

¹⁵ За разумевање карактеристика "виртуелних фотона" неопходно је познавања квантне теорије поља и теорије релативности, што није предмет овог курса

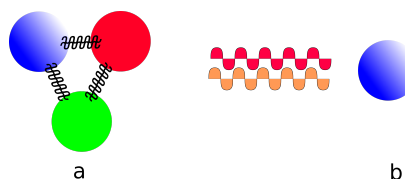
¹⁶ За шта су 1979. године добили Нобелову награду за физику

¹⁷ У физици честица се уместо маса користе њихови енергијски еквиваленти

до промене боје кваркова. Вредности маса медијатора су потврђене у експериментима који су изведени у CERN-у 1983. године.

1.9.3 Глуони

У експериментима у којима је потврђено постојање унутрашње структуре протона, утврђено је да на кваркове отпада свега половина укупног импулса кварка из чега је следило да остатак импулса отпада на неутралне честице. Те честице су назване *глуонима* који су такође бозони и носиоци су интеракције између кваркове унутар бариона и мезона. Глуони су носиоци боје, садрже боју и антибоју и у интеракцији са кварком доводе до промене његове боје; у овим интеракцијама наелектрисање боје мора бити очувано. Тако нпр. црвено антиплави глуон мења боју плавог кварка у црвени (види слику 1.6b). Поред тога глуони могу међусобно интераговати при чему долази до промене комбинације боја коју садрже.



Слика 1.6: а. Структура бариона, б. Интеракција глуона и кварка. Наранџастом бојом (комплементарна боја плавој) је означен антиплави кварк.

1.9.4 Хигсов бозон

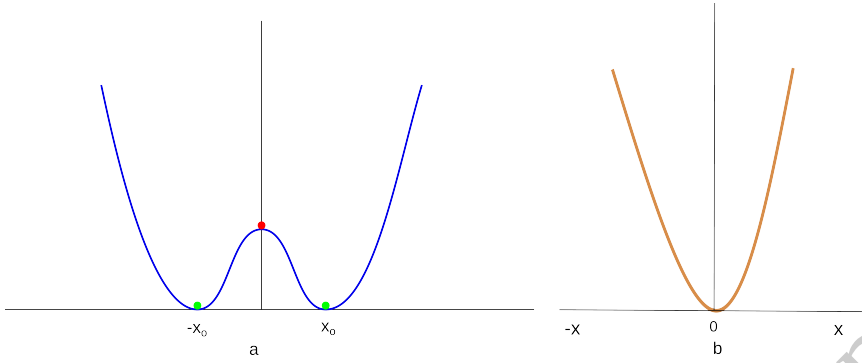
Уколико се накратко задржимо на особинама гореописаних носилаца интеракција, уочићемо да за разлику од виртуелних фотона и глуона, носиоци слабе интеракције имају (велике) масе. Постојање њихових маса је *последица интеракције* са још једним пољем - Хигсовим пољем¹⁸ чије је постојање 1964 предвидео теоријски физичар Питер Хигс (Peter Ware Higgs); штавише, масе свих елементарних честица потичу од интеракције са Хигсовим пољем. За разлику од осталих поља која су векторска и у простор-времену имају средњу вредност 0, Хигсово поље је скаларно и има не-нула вредност у свакој тачки простора. Његов потенцијал је дат кривом приказаном на слици 1.7а у којој честица може заузети три равнотежна положаја или осциловати између њих, док код "уобичајених" поља честица осцилује око једног равнотежног положаја (слика 1.7b).

Хигсов бозон је носилац интеракције у истоименом пољу и, слично као и код осталих поља, представља поремећај узрокован проласком честица кроз ово поље.

На експериментална потврду постојања Хигсовог бозона се, због ограничених могућности акцелераторске технике чекало до 2012. када је на Великом хадронском сударању (LHC) уочен његов распад и одређена његова маса. Потрага се сводила на детектовање производа распада, што су у случају *најлакше*¹⁹ Хигсовог бозона два фотона. Проблем у детекцији овог догађаја је то што и остали производи судара протонских снопова могу аниhilацијом дати два фотона и што је број тих догађаја огроман. Стога се експеримент свео на тражење статистички значајног одступања од расподеле броја фотона по енергијама на одређеној енергији, што је захтевало трагање у ширем опсегу енергија који се редуковао на основу

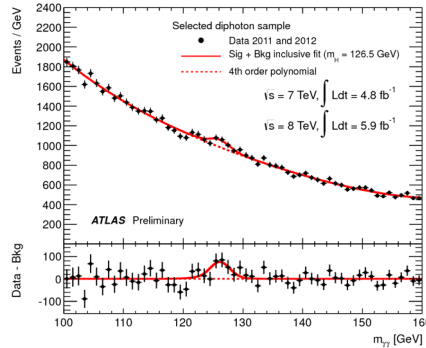
¹⁸ Ова интеракција се назива и Хигсовим механизмом.

¹⁹ Хигсови бозони имају читав дијапазон маса и могу се распадати до различитих производа.



Слика 1.7: а. Потенцијал Хигсовог поља, б. Потенцијал у електростатичком пољу.

результата дуготрајних узастопних експеримената. Коначно, 4. јула 2012. године потврђено је присуство траженог догађаја при енергији од 126,8 GeV (слика 1.8).



Слика 1.8: Експериментална потврда постојања Хигсовог бозона. Преузето са <https://home.cern/science/physics/higgs-boson/how>

1.9.5 Стандардни модел елементарних честица и интеракција

Стандардни модел је теорија која обухвата све познате фундаменталне силе (изузев гравитационе) и класификује познате елементарне честице. Математички запис стандардног модела у краћем облику је:

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi}D\psi + h.c. \\ & + \bar{\psi}_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c. \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

Први члан $F^{\mu\nu}$ обухвата електромагнетизам и обе нуклеарне силе уз очување мерних симетрија, док други члан описује кретање елементарних честица. Трећи члан је тзв. Јука-

вино спрезање и описује разлог зашто кваркови и електрони имају масе. Последњи члан се назива Хигсовим сектором и описује спонтано нарушавање симетрије.

У већем броју публикација стандардни модел се представља у облику табеларне класификације елементарних честица и интеракција, која је дата на слици 1.9.

Стандардни модел елементарних честица

три генерације елементарних честица (елементарни фермиони)			три генерације елементарних античестица (елементарни антифермиони)			интеракције/ носиоци сила (елементарни бозони)		
I	II	III	I	II	III			
маса наел. спин	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	0 0 1	
КВАРКОВИ	 горе	 шарм	 врх	 антигоре	 антишарм	 антиврх	 глуон	 Хигс
	 доле	 страни	 дно	 антидоле	 антистрани	 антидно	 фотон	ВЕКТОРСКИ БОЗОНИ
	 електрон	 мион	 тау	 позитрон	 антимион	 антитау	 Z ⁰ бозон	
 електронски неутрино	 мионски неутрино	 тау неутрино	 електронски антинутрино	 мионски антинутрино	 тау антинутрино	 W ⁺ бозон	 W ⁻ бозон	
ЛЕПТОНИ	$\approx 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$\approx 80.360 \text{ GeV}/c^2$ 1 1	$\approx 80.360 \text{ GeV}/c^2$ -1 1
	електронски неутрино	мионски неутрино	тау неутрино	електронски антинутрино	мионски антинутрино	тау антинутрино	W ⁺ бозон	W ⁻ бозон
							СКАЛАРНИ БОЗОНИ	

Слика 1.9: Стандардни модел елементарних честица и интеракција. Адаптирано са <https://commons.wikimedia.org>