



DALELIŲ FIZIKA MOKYKLOMS

Vytautas Dūdėnas
vytautas.dudenas@tfai.vu.lt

Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas,
Branduolių ir elementariųjų dalelių centras

Vilnius 2024

Santrauka

Pristatau mokykloms tinkantį dalelių fizikos konspektą. Jame paaiškinu bendrus dalelių fizikos principus, idėjas, Standartinio modelio struktūrą ir sąveikas. Tikiuosi, konspektas bus naudingas mokytojams bei mokiniams. Konspekte taip pat yra papildomos medžiagos, kuri išeina už mokyklinio kurso ribų. Ją idėjau tikėdamasis, kad ji padės lengviau suprasti logiką, kuria vadovaujasi dalelių fizikai kurdami modelius. Rekomenduoju, kad specialioji reliatyvumo teorija būtų išdėstyta prieš pradedant susipažinti su dalelių fizika.

Padėka

Ačiū Marijui Ambrozui, Simonui Draukšui ir Vėjūnei Dūdėnienei už teksto perskaitymą, komentarus bei pataisymus.

1 Simetrija ir fizika

Į fiziką galima žvelgti kaip į tvarkos arba struktūros paieškas gamtoje, t. y. siekį atrasti kažką nekintamo vis kintančioje, tokioje aplinkoje. Kalba, kurią fizikas(-ė) naudoja aprašyti gamtai yra matematika, o tas matematinis aprašas vadinamas modeliu. Kaip taikliai modelis aprašo realybę galime pasakyti darydami eksperimentus. Mokslinis metodas apjungia šiuos du polius: eksperimentai ir jų duomenų analizė iškelia klausimus, kuriuos stengiamasi atsakyti modeliavimu, o modeliavimas daro prognozes kitiems eksperimentams, kurių analizė iškelia naujų klausimų ir t. t.

Jau nuo antikos laikų gamtos modeliavime būdavo pasitelktas estetikos kriterijus, t. y. tikima, kad pamatinė matematinė gamtos struktūra turi pasireikšti ypatingomis geometrinėmis savybėmis. Pvz., Platono „Faidre“ pagrindiniai elementai buvo mitiškai konstruojami¹ iš taisyklingų geometrinių figūrų. Galima sakyti, kad šis intuityvus potraukis prie estetiškų modelių nedingo, tačiau dabar ši estetika yra aiškiau apibrėžta matematiškai ir vadinama **simetrija**.

Simetriją paprasčiausia paaiškinti per pavyzdžius. Turbūt sutarsime, kad:

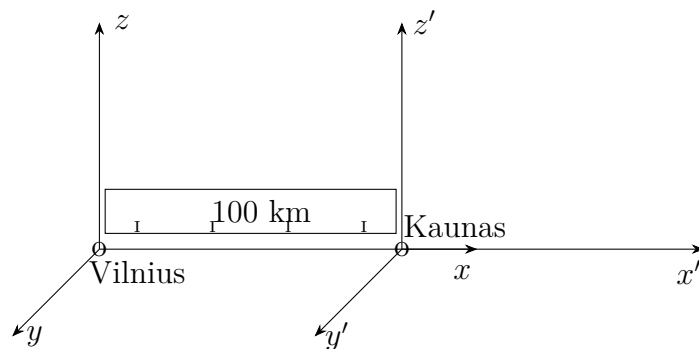
- dėsniai Vilniuje = dėsniai Kaune;
- dėsniai pasisukus į dešinę = dėsniai pasisukus į kairę;
- dėsniai šiandien = dėsniai rytoj.

Mes ką tik aprašėme tris simetrijas! Kad būtų dar aiškiau, galime nusipiešti koordinačių sistemą, ir joje pažymėti Vilnių ir Kauną, taip kaip 1 pav. Pirmasis teiginys reiškia, kad paslinkus koordinačių sistemą iš Vilniaus į Kauną, fizika nepasikeistų. Tai yra **poslinkio** simetrija. Koordinačių paslinkimas matematiškai yra pakeitimas senų koordinačių į naujas koordinates tokiu būdu:

$$(x, y, z) \rightarrow (x' = x + 100 \text{ km}, y' = y, z' = z) . \quad (1)$$

Vadinasi, apibendrintai galime sakyti, kad simetrija yra kažkokia matematinė operacija, po kurios sistema (tarkime, modelio matematinės išraiškos) atrodo taip pat, t. y. tiek koordinatėse (x, y, z) , tiek (x', y', z') . Analogiškai antrasis ir trečiasis teiginiai nusako **posūkio** ir **laiko poslinkio** simetrijas. Visos šios trys simetrijos apibrėžia Galilėjaus reliatyvumą. Jį galime nusakyti paprasčiau. Tarkime, turime liniuotę, kurios vienas galas yra Vilniuje, o kitas Kaune.

¹Antikos mąstytojams trukdė tuo metu gajus visiškasis eksperimento kaip pažinimo formos ignoravimas. Tik po Aristotelio mokslinio metodo įvedimo, eksperimentas filosofiniame mąstyme įgavo daugiau svorio.



1 pav.: Koordinatinių sistema ir joje nupiešta liniuotė tarp Vilniaus ir Kauno. Kaip ir atstumas tarp Vilniaus ir Kauno, liniuotės ilgis nepasikeis, jeigu mes ją pasuksime, pastumsime, arba pažiūrėsime į ją rytoj. Ji visada bus gaunama iš (2) lygties. Pavaizduota koordinatinių transformacija iš Vilniaus į Kauną, kuri yra aprašoma (1) lygtimi, fizikos nepakeičia.

Jeigu Vilniaus koordinatės yra (x_A, y_A, z_A) , Kauno koordinatės (x_B, y_B, z_B) , tada jos ilgis yra apskaičiuojamas pagal Pitagoro teoremą tokiu būdu:

$$\ell^2 = (x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2. \quad (2)$$

Jeigu sukiosime (poslinkio simetrija) ar slankiosime (postūmio simetrija) šią liniuotę, jos ilgis (ir lygtis gauti ilgį) nepasikeis nei šiandien, nei rytoj (laiko poslinkio simetrija).

Pasirodo, kad iš šių simetrijų galima matematiškai išvesti tvermės dėsnius! Kad taip yra 1915 metais įrodė matematikė Emmy Noether. Dabar tai yra žinoma kaip Noether teorema. Taigi, eksperimentuose modelio simetrijos pasireiškia kaip tvarūs dydžiai, kuriuos galime išmatuoti. Mūsų aptartos simetrijos lemia tris tvarių dydžių:

- poslinkio simetrija $\leftrightarrow$ judesio kiekio, $\vec{p}$, tvermė;
- posūkio simetrija $\leftrightarrow$ judesio kiekio momento, $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$, tvermė;²
- laiko poslinkio simetrija $\leftrightarrow$ energijos, E , tvermė.

Nors matematinis Noether teoremos taikymas išsina iš mokyklinio kurso ribų, šias sąsajas įmanoma intuityviai suvokti ir be universitetinio išsilavinimo. Judesio kiekio tvermę naudojame tiesiaiegiams judėjimams nusakyti (pvz., prieš ir po dviejų dalelių susidūrimo), o poslinkis reiškia koordinatinių pastūmimus tiesiomis linijomis. Iš to galime spėti, kad poslinkio simetrija turi būti susijusi su judesio kiekiu. Judesio kiekio momentą naudojame sukamiesiems judėjimams aprašyti, o tai nurodo sąsają su posūkio simetrija. Nesvarbu, koks bebūtų procesas, jo vyksmas šiandien atrodys visiškai taip pat kaip to paties proceso vyksmas rytoj. Tai reiškia, kad visiems procesams be išimties galioja laiko poslinkio simetrija. Taip pat žinome, kad visiems procesams galioja energijos tvermė. Vadinasi, energijos tvermė yra nulemta laiko poslinkio simetrijos.

Šie tvermės dėsniai išsilaiko ir specialiojoje reliatyvumo teorijoje, nes visos minėtos simetrijos galioja ir specialiosios reliatyvumo teorijos **erdvėlaikiui**. Per specialiosios reliatyvumo teorijos pamokas jūs susipažinote su Lorencio transformacijomis ir jų išvedimu, kuriame pirmiausia yra postuluoama, kad šviesos greitis yra pastovus. Egzistuoja ir kitoks, geometriškesnis Lorencio transformacijų išvedimas. Jame pirmiausia postuluoama, kad mes gyvename

²Įtariu, kad šio dydžio mokykloje nematėte, todėl trumpai jį paaiškinsiu. Jūs turbūt žinote jėgos momentą, kuris lygus jėgai padaugintai iš „peties“, t. y. $\vec{F} \times \vec{r}$, kur $\vec{r}$ yra atstumas iki atramos ašies. Šį dydį naudojame, kai norime surasti, pvz., pusiausvyrą padėti svertui. Į judesio kiekio momentą galite žiūrėti analogiškai, tik vietoje jėgos, sudaugintos su „petimi“, reikia sudauginti judesio kiekį su „petimi“, kur „petys“ yra atstumas iki sukimosi ašies. Jeigu noliečiame besisukančio kūno ir jo neveikia jokios jėgos, judesio kiekio momentas yra tvarus dydis.

keturių dimensijų **erdvėlaikyje**, kuris susideda iš vienos laiko ir trijų erdvės dimensijų. Tokia-
me erdvėlaikyje erdviškasis-laikiškasis „ilgis“ yra matuojamas šiek tiek pamodifikuota Pitagoro
teorema:

$$\ell^2 = c^2 (t_B - t_A)^2 - (x_B - x_A)^2 - (y_B - y_A)^2 - (z_B - z_A)^2, \quad (3)$$

kur t_A ir t_B žymi laiką, kuriuo įvyko įvykiai A ir B atitinkamai, o c yra įvesta konstanta, kuri
suvienodina sudėtų dydžių matavimo vienetus. Atkreipkite dėmesį, kad šioje „Pitagoro“ teo-
remos išraiškoje kiekviena erdvės komponentė turi minuso ženklą, o laiko komponentė – pliuso.
Ieškant koordinatų transformacijų, kurios nepažeidžia šios lygybės, automatiškai gauname Lo-
renco transformacijas. Turint omenyje analogiją tarp simetrijų ir tvarių dydžių (laiko postūmio
 $\leftrightarrow$ energijos, erdvės postūmio $\leftrightarrow$ judesio kiekio), galime suprasti, kad įmanoma pereiti nuo
erdvėlaikio prie abstraktesnės erdvės, sudarytos iš energijos ir judesio kiekių. Tokios erdvės
„ilgi“ pažymėkime $m^2 c^2$. Jis turės būti matuojamas analogiškai (3) lygčiai, bet laiką ir erdvę
pakeis energija ir judesio kiekiai. Jos išraiška yra tokia:

$$m^2 c^2 = \frac{E^2}{c^2} - p_x^2 - p_y^2 - p_z^2, \quad (4)$$

kur p_x, p_y, p_z yra judesio kiekio dedamosios ir E yra energija. Palyginkite šią lygtį su (3). Iš
(4) lygties galime suprasti, kad mūsų įvesta konstanta m yra dalelės masė, o kai $m = 0$, tai
dalelė turi sklisti greičiu c . Taigi, gauname, kad konstanta c yra šviesos greitis. Šiame išvedime,
kur pirma postuluojuama erdvėlaikio savybė ir naudojamosi Noether teorema, pastovus šviesos
greitis tampa ne postulatu, o rezultatu!

Energijos ir judesio kiekio tvermės dėsniai galioja ir specialiojoje reliatyvumo teorijoje. Tar-
kime, jeigu turime kažkokį procesą, tai bendra energija ir bendras judesio kiekis prieš ir po
reakcijos turi sutapti:

$$E_{\text{prieš}} = E_{\text{po}}, \quad \vec{p}_{\text{prieš}} = \vec{p}_{\text{po}}. \quad (5)$$

Noether teorema simetrijas padarė ypač galingu įrankiu teorinėje fizikoje. Galvojimas,
ieškojimas arba tiesiog spėjimas tam tikrų galimų simetrijų ar struktūrų yra pirminis atspirties
taškas kuriant kokį nors modelį, aprašantį dalelių fizikos reiškinius. Toliau panagrinėsime kaip
šį principą galime pritaikyti, kad gautume kitus tvermės dėsnius ir suprastume elementariųjų
dalelių Standartinį modelį.

Pagiriamasis žodis matematikai

Matematika užima ypač svarbų vaidmenį teorinėje fizikoje ir kartais suprasti, kur baigiasi
matematika ir kur prasideda fizika nėra taip paprasta. Šiame konspekte stengiuosi įvaizdžiais
pristatyti bendras idėjas ir rezultatus, už kurių slypi griežti matematiniai sprendimai ir išve-
dimai. Tikrasis fizikos grožis atsiskleidžia būtent juose. Matematiniai išvedimai parodo, kaip
mes iš paprastų idėjų ir postulatų sugebame išvesti tai, kas užaina už mūsų proto suvokimo
ribos, o vėliau tai patvirtinti eksperimentais. Deja, mokykliniame kurse šis kelias vis tiek lieka
nematomas, tad ir mokslas gali atrodyti kiek mažiau patrauklus, negu yra iš tikrųjų. Todėl ska-
tinu susidomėjusius mokinius būti kantriems ir palaukti bent iki teorinės fizikos magistratūros
studijų, kada šie matematiniai išvedimai galės būti suprasti.

Vienetai dalelių fizikoje

Dalelių fizikoje yra daug patogiau naudoti ne SI vienetų sistemą, o **natūralią vienetų**
sistemą. Natūralioje vienetų sistemoje šviesos greitis, Bolcmano konstanta bei Planko kons-
tanta padalinta iš 2π (kuri yra vadinama redukuotoji Planko konstanta ir žymima raide $\hbar$) yra
prisilyginamos vienetui:

$$c = k = \hbar = \frac{h}{2\pi} = 1. \quad (6)$$



Prilyginus šias konstantas vienetui, viską galima išreikšti vienintelio mato laipsniais ir konstantų lygtyse neberašyti. Nors tas vienintelis atskaitos matas, kuriuo matuosime įvairius dydžius iš principo gali būti pasirinktas laisvai, istoriškai nusistovėjęs pasirinkimas yra viską matuoti energijos vienetais. Pvz., koordinatės ir laikas yra matuojami atvirkštinės energijos vienetais, o judesio kiekis ir masė yra matuojami energijos vienetais. Dydziai, kuriuos prilyginome vienetui, yra pastovūs daugikliai, taigi, naudojantis jų vertėmis, galime nesunkiai sugrįžti iš natūralių vienetų į SI vienetus. Dabar parodysiu keletą pavyzdžių, kaip tai atlikti.

Dalelių fizikoje patogiausias energijos vienetas yra elektronvoltas, t. y. energija, kurią įgauna elektronas, pagreitintas vieno volto potenciale. Pagal elektrinio krūvio atlikto darbo lygtį, galime surasti, kiek vienas elektronvoltas atitinka džaulių:

$$A = q \cdot U \Rightarrow 1\text{eV} \approx 1.602 \cdot 10^{-19}\text{C} \cdot 1\text{V} = 1.602 \cdot 10^{-19}\text{J}. \quad (7)$$

Atsiminkime, kad džaulis yra išvestinis dydis, $[\text{J}] = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$, taigi, jeigu mus domina 1eV masė, išversta į SI sistemos vienetus, kilogramus, mums reikia tiesiog suprastinti $\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$, kad iš džaulių liktų tik kilogramai. Tai galime padaryti su šviesos greičio konstanta padalinę elektronvoltą, išreikštą džauliais, iš šviesos greičio kvadrato $c^2 = (3 \cdot 10^8)^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$:

$$1\text{eV} \approx \frac{1.602 \cdot 10^{-19} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}}{(3 \cdot 10^8)^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} \approx 1.78 \cdot 10^{-36} \text{kg}. \quad (8)$$

Jeigu norime sužinoti, kiek sekundžių yra 1eV^{-1} , reikia pasitelkti kitą konstantą, kuri gali išprastinti kilogramus ir metrus. Redukuota Planko konstanta yra matuojama:

$$[\hbar] = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}}. \quad (9)$$

Jeigu energijos vienetais atstumas yra

$$1\text{eV}^{-1} = \frac{1}{1.60 \cdot 10^{-19} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}}, \quad (10)$$

padauginę iš $\hbar$ suprastintume kilogramus ir metrus ir gautume sekundes:

$$1\text{eV}^{-1} = \frac{1.054 \cdot 10^{-34} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}}}{1.60 \cdot 10^{-19} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}} = \frac{1.054 \cdot 10^{-34}}{1.602 \cdot 10^{-19}} \text{s} = 6.58 \cdot 10^{-16} \text{s}. \quad (11)$$

Atstumas taip pat bus išreikštas atvirkštiniais elektronvoltais. Norint jį išreikšti metrais, padauginame prieš tai buvusį rezultatą iš šviesos greičio:

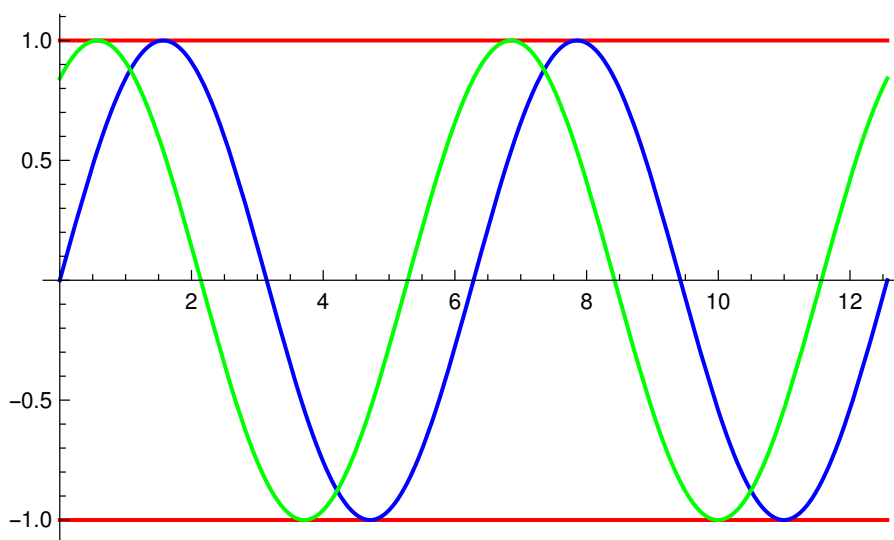
$$1\text{eV}^{-1} \approx 1.97 \cdot 10^{-7} \text{m}. \quad (12)$$

Jeigu norėsime susieti temperatūrą su energija, naudosime Bolcmano konstantą ir t. t. Panašiai galime gauti visus norimus dydžius.

Šiais laikais dalelių greitintuvai pasiekia energijas, siekiančias apie 10^{13}eV energijas. Natūralioje vienetų sistemoje atvirkštiniai elektronvoltai reiškia atstumus, vadinasi, greitintuvuose pasiekiami 10^{-13}eV^{-1} atstumai. Norint paversti šį atstumą į metrus, naudojame (12) lygtį, iš ko gauname, kad greitintuvuose galime suprasti, kas vyksta apie $10^{-7} \cdot 10^{-13} = 10^{-20}\text{m}$ dydžiuose.

Išreikšti visatos temperatūrą elektronvoltais yra ypač patogų dalelių kosmologijoje. Tokiu būdu lengva susieti visatos temperatūrą su dalelių masėmis. Tarkime, kad visatos temperatūra yra 1GeV (GeV yra gigaelektronvoltas). Temperatūra yra maždaug tas pats, kas ir vidutinė





2 pav.: Dvi skirtingų fazių bangos. Atstumas tarp dviejų raudonų linijų yra dviguba amplitudė, kuri yra matuojama. Tačiau amplitudė nepakinta bangai pasistūmus į kairę ar į dešinę. Taigi, abi šios bangos duoda tą patį fizikinį rezultatą. Tada sakome, kad turime fazės poslinkio simetriją.

dalelių kinetinė energija, kuri taip pat matuojama elektronvoltais. Iš (4) lygties galime matyti, kad pilnoji energija susideda iš kinetinės energijos ir masės. Vadinasi, dalelės, kurios yra sunkesnės negu 1 GeV, juda lėtai, nes nepakanka visatos temperatūros, kad jų kinetinė energija būtų didesnė negu jų masė. Tada jos mažai sąveikautų su kitomis energingomis dalelėmis. Kita vertus, jeigu visatos temperatūra būtų didesnė, pvz., 100 GeV, tos pačios dalelės kinetinė energija būtų žymiai didesnė negu jos masė, kas leistų jai įsiliesti į tokių didelės energijos dalelių sąveikas. Šia prasme galime sakyti, kad sunkesnių dalelių ieškojimas yra karštesnės (ankstyvesnės) visatos sudedamųjų dalių tyrinėjimas.

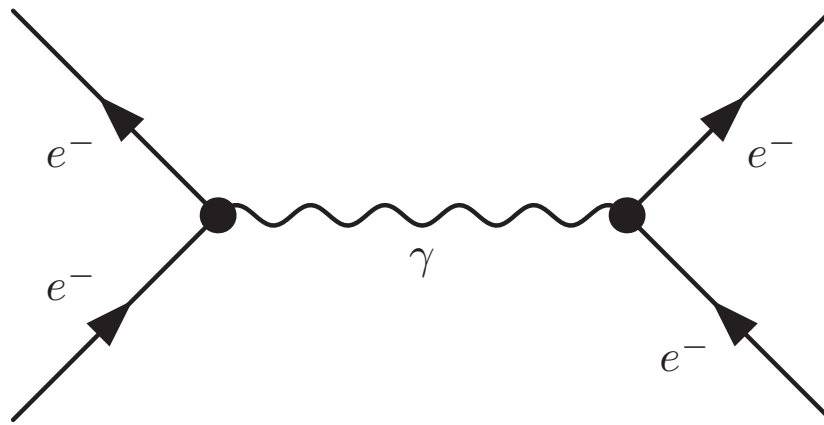
2 Kvantinė elektrodinamika

Mes jau žinome, kad eksperimente turime krūvio tvermės dėsni, vadinasi, šis tvermės dėsnis turi atitikti kažkokią simetriją. Blieka pagalvoti, kokia tai galėtų būti simetrija. Čia reikėtų pasitelkti kvantinės fizikos bangos ir dalelės dualumą. Jeigu kiekviena dalelė yra banga, tai krūvį turinčią dalelę galime išvaizduoti kaip bangą. Kvantinėje mechanikoje sakome, kad dalelė yra atvaizduojama **bangine funkcija**. Kad būtų paprasčiau, išvaizduokite, kad jūsų elektronas yra apibūdinamas sinusoide:

$$\psi(x) = A \sin(x + \varphi), \quad (13)$$

kur A yra vadinama amplitude, o φ yra fazė. Tikimybė dalelei būti kažkurioje vietoje yra tos banginės funkcijos amplitudės kvadratas, t. y. A^2 . Tai reiškia, kad darydami daug matavimų galime surinkti daug duomenų, kuriuos statistškai apdorojus galėtume gauti informacijos apie bangos amplitudės dydį. Tačiau banga susideda ne tik iš amplitudės, bet ir iš fazės φ , taigi, dalis banginės funkcijos informacijos yra neišmatuojama (žr. 2 pav.). Tai ir yra simetrija: jeigu pakeičiame bangos fazę, fizika nepasikeičia. Sakome, kad turime **fazės simetriją**. Pritaikius Noether teoremą, ši fazės simetrija lemia krūvio tvermės dėsni.

Dalelės banginė funkcija yra išplitusi erdvėje, o ne viename taške. Tarkime, kad mes turime banginę funkciją, kuri yra išsidėsčiusi nuo Žemės iki kitos galaktikos. Jeigu mes pastumiame fazę kažkur Žemėje, fazė negali *tu pačiu metu* pakisti kitoje galaktikoje, nes tai pažeistų reliatyvumo principą. Niekas, net tokia abstrakti informacija apie banginės funkcijos fazės



3 pav.: Feinmano diagrama, vaizduojanti elektronų (e^-) arba pozitronų (e^+) sąveiką per fotoną (γ). Rodyklės žymi neigiamo krūvio judėjimo kryptį. Ši diagrama, priklausomai nuo laiko tėkmės pasirinkimo, gali žymėti tris sklaidas: $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$, jeigu laikysime, kad laikas eina iš apačios į viršų; $e^+e^+ \rightarrow e^+e^+$, jeigu iš viršaus į apačią ir $e^-e^+ \rightarrow e^-e^+$, jeigu iš kairės į dešinę (arba atvirkščiai).

poslinkį, negali sklisti greičiau negu šviesa. Jeigu ši simetrija yra fundamentali ir tenkina reliatyvumo principus, fazės pokytis turi būti **lokalus**. Šiuos pokyčius nuo vieno iki kito taško perneša dalelės vadinamos fotonais. Fotonai yra jums puikiai pažįstamos šviesos (arba bet kokio dažnio elektromagnetinės bangos) dalelės, pernešančios elektromagnetinę sąveiką.

Pvz., turbūt girdėjote apie Kulono jėgą, veikiančią tarp krūvius turinčių dalelių, kurios stiprumas yra atvirkščiai proporcingas atstumo kvadratumui, t. y. $F_e \propto \frac{1}{r^2}$. Jėga atsiranda iš sąveikos potencinės energijos, kurią jėga „nori“ sumažinti. Kulono jėgos sukuriama potencinė energija (žymima U), taip pat vadinama **potencialu**, yra atvirkščiai proporcinga atstumui:

$$U \propto \frac{1}{r}. \quad (14)$$

Matome, kad potencialas veikia atstumu r , o ne tame pačiame taške, vadinasi, taip aprašyta sąveika nėra lokali! Kaip jau minėjome, fundamentinė sąveika turi būti lokali, kad tenkintų reliatyvumo principą, o tai reiškia, kad kuloninė sąveika yra tik supaprastintas (arba efektinis) detalesnio proceso aprašymas. Dabar panagrinėsime šią sąveiką detaliau.

Tarkime, kad turime du elektronus, kurie yra atstumu r . Vietoje to, kad sakytume, kad sąveika veikia atstumu r per potencialą (14), mes sakome, kad elektronas išspinduliuoja fotoną kažkokiam viename taške (t. y. **lokaliai**) $x = 0$ ir tada nusklinda iki kito taško $x = r$. Šiame taške nusklidęs fotonas yra sugeriamas kito elektrono, taigi, taip pat **lokaliai**. Tokiu būdu fotono sklaidimas sukuria efektinį potencialą (14), kuris aprašo efektinę nelokaliją sąveiką. Šį procesą galime pavaizduoti grafiškai **Feinmano diagrama** (3 pav.). Kaip matome, Feinmano diagramas galime interpretuoti kaip dalelių kelią erdvėje ir sąveikas tarp jų. Šiuo atveju interpretuodami Feinmano diagramą pasirinkime, kad laikas eina iš apačios į viršų ir du elektronai, sąveikaujantys vienas su kitu per fotoną, apsikeičia savo judesio kiekiu $\vec{p}$ ir energija E . Taigi, įvyksta **sklaida**, $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$. Elektronų linijos turi rodykles, kurios nurodo neigiamo krūvio tėkmę.

Feinmano diagrama nėra tik proceso piešinys. Ji pavaizduoja pamatinę sąveikų tarp dalelių „struktūrą“, kurią nulemia dalelių fizikos modelis ir jame apibrėžtos simetrijos. Interpretuojant šią struktūrą kaip procesą, pasirenkame laiko kryptį, t. y. kokios dalelės būna pradžioje, o kokios gale. Šią laiko kryptį mes galime pasirinkti laisvai, t. y. interpretuodami 3 pav. mes galėjome pasirinkti, kad laikas teka ne iš apačios į viršų, bet atvirkščiai – iš viršaus žemyn. Tokiu atveju matysime, kad teigiamo krūvio dalelė išspinduliuoja fotoną, fotonas sugeriamas

kitos teigiamo krūvio dalelės ir įvyksta dviejų teigiamo krūvio dalelių sklaida. Tokios dalelės vadinamos **antidalelėmis** ir šiuo atveju ji yra elektrono antidalelė, vadinama **pozitronu**. Sklaidos procesą žymime analogiškai $e^+e^+ \rightarrow e^+e^+$.

Antidalelė visomis savybėmis identiška savo „veidrodinei“ partnerei, bet turi visus priešingus krūvius (dar susipažinsime, kad dalelės gali turėti ne tik elektrinius krūvius). Dažniausiai antidalelę žymime ta pačia raide arba nurodę jos elektrinį krūvį, arba uždėdami brūkšnį. Pvz., tiek e^+ , tiek $\bar{e}$ yra galimi pozitrono žymėjimai.

Laiko tėkmę diagramoje, pavaizduotoje 3 pav., taip pat galime pasirinkti iš kairės į dešinę (arba atvirkščiai, tik šiuo atveju nebus jokio skirtumo). Matome, kad procesas yra dar kitoks. Dalelė sutinka antidalelę, jos abi išnyksta, o vietoje jų atsiranda fotonas. Kitame taške tas fotonas išnyksta ir vietoje jo vėl atsiranda dalelė ir antidalelė. Taigi, įvyksta procesas $e^-e^+ \rightarrow e^-e^+$.

Nepaisant to, kad išnagrinėjome $e^-e^+ \rightarrow e^-e^+$ sklaidą labai detalai, eksperimente matuojamos dalelės yra tik tos, kurios atskrenda iki detektoriaus. Šiuo atveju jos yra e^+ ir e^- , nes jos yra pavaizduotos diagramos galuose ir vadinamos **galinėmis būsenomis**. Šio proceso metu susidaręs fotonas nėra matuojamas taigi, jis vadinamas „**virtualiu**“. Dabar galime paklausti, ar įmanomas toks procesas, kuriame fotonas nebeskiltų į pozitrono-elektrono porą, o pataikytų į detektorius, t. y. įvyktų $e^+e^- \rightarrow \gamma$? Kad patikrintume, ar toks procesas yra įmanomas, reikia paskaičiuoti, ar yra tenkinama energijos ir judesio kiekio tvermė. Tai rekomenduoju atlikti kaip užduotį. Pasirodo, kad arba judesio kiekio tvermė, arba energijos tvermė tokiam procese yra pažeidžiama ir šis procesas negali vykti vakuume. Tačiau energijos tvermę gali tenkinti procesas $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$, kuris pavaizduotas pav. 4. Taigi, elektronai visgi gali išnykti į fotonus! Procesas, kai dalelė susidūrusi su savo antidalele virsta fotonais vadinamas **anihiliacija**.

Invariantinė masė. Kai skyla kažkokia dalelė $X \rightarrow AB$ arba sklaidosi $XY \rightarrow AB$, detektoriuje užfiksuotos dalelės A ir B turi bendrą energiją, kuri vadinama invariantine mase. Jos kvadratas apskaičiuojama pagal formulę:

$$m_{\text{inv}}^2 = \frac{1}{c^4} (E_A + E_B)^2 - \frac{1}{c^2} (\vec{p}_A + \vec{p}_B)^2. \quad (15)$$

Ji vadinama invariantine, nes nepriklauso nuo koordinatinių sistemos ir yra tokia pati tiek prieš, tiek po proceso. Procesams $X \rightarrow AB$ arba $XY \rightarrow AB$ ji bus:

$$m_{\text{inv}}^2 = m_X^2, \quad X \rightarrow AB, \quad (16)$$

$$m_{\text{inv}}^2 = \frac{1}{c^4} (E_X + E_Y)^2 - \frac{1}{c^2} (\vec{p}_X + \vec{p}_Y)^2, \quad XY \rightarrow AB. \quad (17)$$

Kad pamatytumėte šio dydžio naudą, paimkime $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ pavyzdį ir paskaičiuokime invariantinę masę. Kad būtų paprasčiau, tarkime, kad pozitronas ir elektronas nejudėjo ($\vec{p}_{e^+} = \vec{p}_{e^-} = 0$, $E_{e^+} = E_{e^-} = m_e c^2$), tada jų invariantinė masė bus jų masių suma, t. y. $m_{\text{inv}}^2 = 4m_e^2$. Po proceso dviejų fotonų invariantinė masė irgi turi būti $2m_e^2$. Iš (4) lygties, prisilyginę $m_\gamma = 0$ gauname, kad fotono energija yra $E_\gamma = |\vec{p}_\gamma| c$. Dviejų fotonų invariantinė masė:

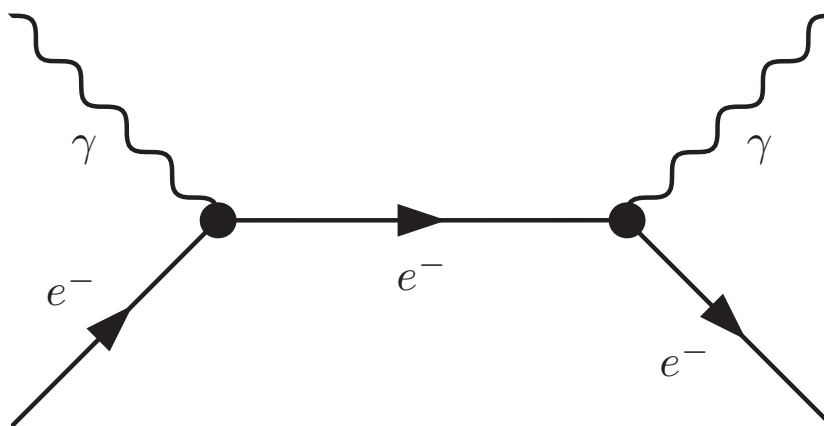
$$m_{\text{inv}}^2 = \frac{1}{c^4} (|\vec{p}_\gamma| c + |\vec{p}_\gamma| c)^2 - \frac{1}{c^2} (\vec{p}_{\gamma 1} + \vec{p}_{\gamma 2})^2. \quad (18)$$

Mes galime pasirinkti tokią koordinatinių sistemą, kurioje $\vec{p}_\gamma = \vec{p}_{\gamma 1} = -\vec{p}_{\gamma 2}$. Joje gauname:

$$m_{\text{inv}}^2 = \frac{4|\vec{p}_\gamma|^2}{c^2} = 4m_e^2 \Rightarrow |\vec{p}_\gamma| = m_e c. \quad (19)$$

Dabar tarkime, kad mes nežinome, kas įvyko, bet pamatuojuome dviejų atvykusių fotonų energijas (arba judesio kiekius). Tada galime gauti m_{inv}^2 . Jeigu gauname, kad ji yra $m_{\text{inv}}^2 = 4m_e^2$,





4 pav.: Feinmano diagrama, vaizduojanti dviejų elektronų anihiliaciją į du fotonus (laikas eina iš apačios į viršų). Atkreipkite dėmesį, kad taškuose susijungia linijos tokiu pačiu būdu kaip ir 3 pav. T. y. į kiekvieną sąveikos tašką įeina po vieną elektrono liniją su rodykle nukreipta į tašką, po vieną elektrono liniją su rodykle nukreipta iš taško ir po vieną fotono liniją be rodyklės. Tai reiškia, kad elektromagnetizmo veikimo principas lokaliai yra toks pats, kaip ir 3 pav., tik skiriasi tarpinė (arba virtuali) dalelė, kuri šiuo atveju yra elektronas.

galime įtarti, kad anihiliavo elektronas su pozitronu, nejudantys vienas kito atžvilgiu. Tačiau jeigu m_{inv}^2 vertė yra kažkokia kitokia, galbūt galėjo skilti kokia nežinoma dalelė su mase lygia m_{inv} ? Dėl šios priežasties invariantinė masė yra pagrindinis parametras, naudojamas naujų, trumpai gyvujančių, nestabilių ir sunkių dalelių paieškai.

Uždavinys

Turėdami omenyje Einšteino sąryšį kiekvienai dalelei atskirai ($E^2 = m^2c^4 + |\vec{p}|^2 c^2$) ir energijos bei judesio kiekio tvermės (4) dėsnius parodykite:

- kad $e^+e^- \rightarrow \gamma$ kinematiškai yra neįmanomas (pažeistų bent vieną iš minėtų sąryšių);
- raskite proceso $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ sąryšius tarp pradinių ir galinių energijų, judesio kiekių ir masių.

Atminkime, kad Feinmano diagramą, pavaizduotą 4 pav., galime apversti ir žiūrėti kaip į procesą $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$, nors ir kinematiškai sunkiau įgyvendinamą. Šiuo atveju du fotonai išnyksta į elektrono-pozitrono porą, taigi, fotonas yra savo paties antidalelė. Dar vienas uždavinys: analogiškai išspręstam uždaviniui raskite fotonų energijas, prie kurių procesas $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ tampa kinematiškai įmanomas. Išverskite šias energijas į SI vienetus ir, pritaikę Einšteino sąryšį, $E = hf$, raskite šios elektromagnetinės bangos dažnį.

Žiūrint į Feinmano diagramas, atrodo, kad nėra jokio skirtumo tarp dalelių ir antidalelių, išskyrus jų krūvį. Tačiau mes matome, kad visata yra sudaryta praktiškai vien tik iš dalelių, o ne antidalelių ir nėra anihiliavusi į fotonus (mes, vis dėlto, gyvi ir sveiki). Pritaikant dabartinį Standartinį dalelių fizikos modelį, iš žinomų dėsnių galime modeliuoti visatos vystymąsi ir tokiu būdu atkurti jos istoriją. Pasirodo, kad visata išsivystytų į tokia, kokią matome dabar (kurioje dominuoja dalelės, bet ne antidalelės), reikėtų labai tiksliai suderinti pradinius visatos parametrus. Kitas paaiškinimas galėtų būti, kad parametrai nėra taip tiksliai suderinti (dar sakome, ne tokie „jautrūs“ mažiems nukrypimams), tačiau visatos vystymosi eigoje įvyko mums dar nežinomi skilimų procesai, kurie sudarė materijos-antimaterijos disbalansą. Dauguma mokslininkų linkę manyti, kad antrasis variantas yra labiau tikėtinas, tačiau šį disbalansą lemiantys

procesai dar nėra atrasti. Taigi, materijos–antimaterijos disbalansas visatoje iki šiol yra mįslė.

Elementariosios dalelės

Jau sužinojome, kad dalelių fizikos lygmenyje sąveikos yra lokalias, t. y. veikia tik taškuose, o ne per atstumą. Turime paklausti, ar daleles laikysime taškais. Taškais laikome daleles, kurias vadiname **elementariosiomis**. Dalelės gali būti **elementariosios** ir **sudėtinės**. Sudėtinės dalelės gali turėti dydį ir vidinę struktūrą, pvz., atomo branduolį galime laikyti sudėtine dalele, kurios spindulys yra apie $r \approx 10^{-15} - 10^{-16}$ m. Elementarioji dalelė pagal apibrėžimą yra be matmenų, t. y. jos $r = 0$, ir ji neturi vidinės struktūros. Kitaip tariant, nesudaryta iš jokių kitų dalelių. Pvz., nors elektronas ir gali išspinduliuoti fotoną, tai nereiškia, kad fotonas yra elektrono „viduje“. Šiuo atveju fotonas yra sukuriamas tik tame sąveikos taške, kur jis yra išspinduliuojamas. Taigi, elementariosios dalelės yra taškai, nieko neturintys savyje, o sąveikos taškuose jos gali susikurti, išnykti ar pavirsti kitomis dalelėmis.

2.1 Sukinys

Kaip jau minėjome, elementarioji dalelė gali turėti krūvį, judesio kiekį $\vec{p}$ ir energiją E . Kadangi ji yra taškinė, t. y. $r = 0$, pagal klasikinę (ne kvantinę) fiziką ji negali turėti judesio kiekio momento iš sukimosi aplink savo ašį, nes $\vec{L} = \vec{p} \times \vec{r} = \vec{p} \times 0 = 0$. Iš elektromagnetizmo žinome, kad besisukantis krūvis sukuria magnetinį lauką (pvz., per susuktą laidą ritę paleista elektros srovė indukuoja magnetinį lauką). Taigi, nejudanti taškinė dalelė, net jeigu ir turi krūvį, negali sukurti magnetinio lauko, sklindančio tiesiai iš to taško, nes taškas neturi matmenų ($\vec{r} = 0$), taigi, negali suktis. Pasirodo, šis, regis, logiškas samprotavimas netinka elektronui. Jis spinduliuoja magnetinį lauką, nors ir yra elementarioji dalelė! Kaip tai paaiškinti?

Šioje vietoje klasikinės fizikos įvaizdžiai mus klaidina, nes čia prasideda kvantiniai efektai. Pagal kvantinę mechaniką kiekviena elementarioji dalelė, nors ir fiziškai nesisuka, turi kvantinę savybę, tarsi simuliuojančią sukimąsi. Ši savybė vadinama **sukiniu**. Elementarioji dalelė gali turėti tik sveikas arba pusines sukinio vertes, t. y.:

$$s = 0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, 2, \dots$$

„susimuliuotas“ arba „vidinis“ judesio kiekio momento modulis S iš sukinio s yra gaunamas tokia lygtimi:

$$S = \frac{h}{2\pi} \sqrt{s(s+1)}.$$

Vadinasi, jeigu $s \neq 0$ ir dalelė turi krūvį, tai ji taip pat indukuos ir magnetinį lauką, panašiai kaip ritė, per kurią eina elektros srovė. Elektronas turi krūvį ir sukinį $s = \frac{1}{2}$, taigi, jis aplink save kuria ir magnetinį lauką, kuris yra užfiksuojamas eksperimentuose.

Dar viena keistenybė, ateinanti iš kvantinės mechanikos, yra ta, kad sukinio dedamoji pasirinktoje ašyje (pvz., dažniausiai pasirinkama z koordinatės dedamoji) visada gali įgyti tik tokias vertes:

$$s_z = -s, -s + 1, \dots, s - 1, s$$

Pvz., elektrono sukinys yra $s = \frac{1}{2}$, taigi, jo z dedamoji gali būti tik $s_z = \pm \frac{1}{2}$. Sukurtas judesio kiekio momentas į pasirinktą ašį yra:

$$S_z = \frac{h}{(2\pi)} s_z$$

Įdomu, kad išmatavus judesio kiekio momento projekciją į bet kokią kitą ašį, rezultatai vis tiek gali įgauti tik šias fiksuotas vertes. Todėl dažnai sakoma, kad elektrono sukinys yra į viršų, kai



$s_z = +\frac{1}{2}$, arba žemyn, kai $s_z = -\frac{1}{2}$. Šių keistų sąryšių įsivaizduoti mums įprastais, klasikinės fizikos įvaizdžiais paprasčiausiai neįmanoma. Matematika lieka vienintelis langas į kvantinį pasaulį. Nereikėtų dėl to labai jaudintis ir stebėtis, nes juk mums įprastame pasaulyje mes nematome jokių kvantinių reiškinių, taigi, ir neturime jokios intuicijos jiems suvokti.

Gamtoje užfiksuotos elementariosios dalelės turi tik tris sukinio variantus:

$$s = 0, \frac{1}{2}, 1$$

Vienintelė dalelė, turinti nulinį sukinį yra tik 2012 metais užfiksuotas Higso bozonas. Dalelės su sukiniu lygiu $\frac{1}{2}$ sudaro visą mūsų medžiagą, tai atomuose esantys elektronai ir kvarkai (apie juos pakalbėsime vėliau). Dalelės su sukiniu lygiu 1 yra sąveikų nešėjos, tokios kaip fotonas. Manoma, kad gravitonas turi turėti sukinį lygų 2, tačiau jis kaip dalelė dar niekada nebuvo užfiksuotas.³

2.2 Fermionai ir bozonai

Pasirodo, kad elementariosios dalelės, turinčios pusinę sukinio vertę ($\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$) esmingai skiriasi nuo dalelių, kurių sukinys yra sveikas skaičius (0, 1, 2...). Pusinį sukinį turinčios dalelės yra vadinamos **fermionais**, o pilną sukinį turinčios dalelės **bozonais**. Esminis skirtumas yra tas, kad identiški fermionai negali būti toje pačioje vietoje su tais pačiais parametrais (pvz., tokiais kaip sukinys). Moksliskiau sakome, kad fermionai negali būti toje pačioje **būsenoje**, kurią gali nusakyti vieta, energija, sukinys ir t. t. Pvz., tarkime, atomas turi keletą elektronų. Žemiausią energiją turintys elektronai gali būti tiksliai du, vienas su sukiniu $s_z = +\frac{1}{2}$, kitas su sukiniu $s_z = -\frac{1}{2}$. Kadangi žemiausioje energijoje abi galimos sukinio vertės yra užimtos, trečias elektronas ten „nebetelpa“, taigi, jis privalo turėti aukštesnę energiją. Tokiu būdu elektronų orbitalės tarsi susisluoksniuoja ir visi elektronai „nesukrenta“ į žemiausią energiją. Ši fermionų savybė vadinama **Pauli draudimo principu**.

Elementariesiems bozonams šis draudimo principas negalioja. Toje pačioje būsenoje gali būti bet koks bozonų skaičius. Bozono pavyzdys yra fotonas. Pasirodo, visa mūsų medžiaga (atomai, branduoliai ir t. t.) yra sudėtinės dalelės sudarytos iš elementariųjų fermionų, o sąveikos tarp jų yra pernešamos bozonų. Kad lengviau įsimintume, galima įsivaizduoti, kad Pauli draudimo principas tarsi uždraudžia materijai sugriūti į vieną tašką, taigi, viską aplink turi sudaryti fermionai, o sąveikas pernešti bozonai.

Sudėtinės dalelės iš fermionų gali susidėti į sudėtinius fermionus (turėti pusinį sukinį) arba bozonus (turėti pilną sukinį). Tačiau, kai sudėtiniai bozonai pakankamai priartėja vienas prie kito, jiems vis tiek pasireiškia Pauli draudimo principas, nes jų sudėtinės dalys yra elementarieji fermionai. Sudėtinių dalelių sukiniai apskaičiuojami arba sudedant, arba atimant jų sudedamųjų dalių sukinius. Pvz., trys elementarieji fermionai būtinai sukurs sudėtinį fermioną su sukiniu $s = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$ arba $s = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = \frac{3}{2}$. Kita vertus, du fermionai gali sudaryti sudėtinį bozoną su sukiniu $s = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$ arba $s = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$.

2.3 Ką mes sužinojome

Šiame skyriuje giliau pažvelgėme į elektromagnetizmą, t. y. į kvantinę elektromagnetizmo prigimtį. Tuo pačiu susipažinome su keletu naujų sąvokų. Aptarėme, kaip Einšteino reliatyvumo teorija reikalauja, kad sąveikos būtų **lokalios**, t. y. veiktų viename taške, ir būtų pernešamos sąveikos nešėjo **fotono**. Susipažinome su **Feinmano diagramomis** ir kaip jos pavaizduoja procesus bei su pirmąja atrasta **antidalele** – **pozitronu**. Sužinojome, kas yra

³Jo užfiksuoti dalelių greitintuvuose nėra įmanoma jo dėl itin silpnos sąveikos.

Elementarioji dalelė ir kad kiekviena elementarioji dalelė turi **sukinį**. Išgirdome, kad dalelės yra skirstomos į **fermionus** ir **bozonus** ir kad fermionams yra taikomas **Pauli draudimo principas**, o bozonams – ne. Sužinojome, kaip galima sukurti antidaleles (bent jau teoriškai).

Elektromagnetizmas yra antroji atrasta sąveika iš keturių šiuo metu žinomų fundamentalių sąveikų (pirmoji buvo gravitacija). Ji paaiškina, kaip tie patys krūviai stumia vienas kitą, o skirtingi traukia. Elektromagnetinė sąveika yra atsakinga už visą chemijos pasaulį, nes būtent elektromagnetizmo pagalba teigiamo krūvio branduoliai laiko neigiamo krūvio elektronus atomuose. Pauli draudimo principas sukuria papildomą įvairovę tarp elektronų orbitalių, neleidamos visiems elektronams sukristi į žemiausią energiją. Ši atomų įvairovė yra užrašyta periodinėje cheminių elementų lentelėje.

Tokiai elementų įvairovei sukurti vien elektromagnetizmo neužtenka – tam reikia branduolinių procesų. Nuėję giliau į atomo vidų žinome, kad jie sudaryti iš **nukleonų: protonų ir neutronų** (nukleono pavadinimas kilęs iš angliško žodžio branduolys, *nucleus, nucleon*. Tiesioginis vertimas būtų „branduoleonas“, bet kiek gremėzdiškai skambėtų). Turbūt jau girdėjote apie radioaktyviuosius β skilimus $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ arba $p \rightarrow n + e^+ + \nu$.⁴ Šiuos skilimus gali paaiškinti **silpnoji sąveika**.

3 Silpnoji sąveika

Įsivaizduokime, kad mes bandome surasti būdą, kaip suprasti šiuos du procesus: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ ir $p \rightarrow n + e^+ + \nu$. Minėjome, kad elektromagnetizmą galima suprasti kaip bangos fazės poslinkio simetriją, kurią iš vieno erdvėlaikio taško į kitą perneša fotonas. Pagal tą pačią analogiją taip pat turėtume galėti priskirti kažkokią simetriją, pasireiškiančią branduoliniuose procesuose, kurios išlaikymui reikalinga nauja sąveika ir sąveikos dalelė.

Ieškodami struktūros šiame procese, pirmiausia atkreipkime dėmesį į dalelių mases:⁵

$$\begin{aligned} m_p &\approx 938 \text{ MeV}, \\ m_n &\approx 940 \text{ MeV}, \\ m_e &\approx 0.5 \text{ MeV}, \\ m_{\nu_e} &< 0.8 \cdot 10^{-6} \text{ MeV}. \end{aligned}$$

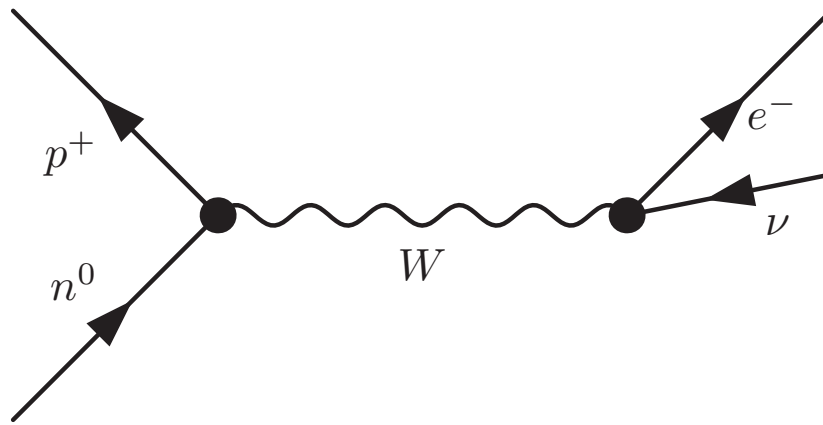
Pirmiausia, atkreipiame dėmesį, kad protonas ir neutronas yra beveik 200 kartų sunkesni negu elektronas. Jeigu suapvalintume grubiau, tarkime, iki dešimčių MeV, tai galėtume sakyti, kad protono ir neutrono masės yra apytiksliai $m_p \approx m_n \approx 940 \text{ MeV}$, o $m_e \approx m_{\nu_e} \approx 0$. Tokiu atveju mes galime sugrupuoti daleles po dvi. Protoną ir neutroną pavadinkime **barionais**, o elektroną ir neutrino **leptonais**. Kadangi masės kiekvienoje grupėje yra lygios, galime įsivaizduoti, kad protonas ir neutronas yra atskiros to paties bariono būsenos, o elektronas ir neutrinas, atitinkamai, dvi leptono būsenos. Užrašykime taip:

$$B = \begin{pmatrix} p^+ \\ n^0 \end{pmatrix}, \quad \ell = \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}.$$

Panašiai kaip kiekvieno fermiono sukinytis gali būti „į viršų“ arba „į apačią“, čia barionas ir leptonas gali būti viršutinėse būsenose (p^+ ir ν_e) arba apatinėse būsenose (e^- ir n^0). Taigi,

⁴Kadangi protonas yra lengvesnis už neutroną, antrasis procesas vakuume (kai nėra papildomų sąveikų) iš tikrųjų yra neįmanomas. Kita vertus, branduolyje toks procesas vyksta, nes į bendrą branduolio masę įeina ir branduolyje esančios sąveikos. Taigi, svarbu, kad prieš ir po reakcijos bendra branduolio masė pamažėtų.

⁵Standartiniame elementariųjų dalelių modelyje neutrino masė yra griežtai 0. Visgi realybė yra eksperimento išmatuoti dydžiai, dėl to čia pateikiama eksperimentinė neutrino masės viršutinė riba. Kaip vėliau sužinosite, yra trys skirtingos kartos neutrino. Pasirodo, bent du iš trijų neutrino turi masę, taigi, ir čia matome, kad Standartinis modelis vis dar nėra išpildyta teorija ir yra ką daugiau atrasti.



5 pav.: Radioaktyvusis beta skilimas $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$. Tarpinė dalelė yra silpnosios sąveikos nešėja, $W^\pm$ bozonas.

radome kažkokią simetriją, dabar reikia, kad ją kažkas perneštų. Tokioje simetrijoje yra trys galimybės, ką gali padaryti sąveika:

- apatinę būseną paversti viršutine;
- viršutinę būseną paversti apatine;
- palikti tą pačią būseną.

Sąveikos dalelę nešėja, kuri sukeičia būsenas į vieną arba į kitą pusę, pavadinkime $W^\pm$ bozonu, o tą, kuri nieko nepakeičia, Z . Analogiškai elektromagnetizmui galime pavaizduoti šių būsenų susijungimą Feinmano diagrama: W bozonas turėtų sujungti dvi bariono būsenas iš vienos pusės ir dvi leptono būsenas iš kitos, taip kaip pavaizduota 5 pav. Jeigu laikysime, kad šioje Feinmano diagramoje laikas eina iš apačios į viršų, tai galėsime interpretuoti, kad neutronas išspinduliuoja W^- ir virsta protonu, tada W^- skyla į elektroną ir antineutrą, nes neutrino rodyklėlė rodo į kitą pusę negu proceso eiga. Taigi, įvyksta procesas $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$, kuris pernešamas W^- . Jeigu nubrėšime laiką iš viršaus žemyn, tada gausime skilimą $p \rightarrow n + e^+ + \nu$, pernešamą W^+ . Atkreipiame dėmesį, kad krūvio tvermė turi išsilaikyti kiekviename taške (Feinmano diagramose krūvio tvermė išsilaiko panašiai kaip ir elektrinių grandinių schemose).

Dabar atsakysime į klausimą, kodėl ši sąveika veikia tik branduoliuose. Tokia potencialo forma kaip (14) išraiškoje gaunama visoms sąveikoms, kurių dalelės nešėjos yra bemosės kaip fotonas. Kadangi elektromagnetizmo potencialas gana lėtai gęsta, didėjant atstumui, sakome, kad elektromagnetinė sąveika yra toliveikė. Kita vertus, jeigu dalelė sąveikos nešėja turi masę, jos potencialas yra:

$$U \propto \frac{1}{r} e^{-mr}. \quad (20)$$

Eksponentė gęsta daug greičiau, negu $1/r$ dalis. Matome, kad eksponentės funkcija pamažina sąveikos stiprumą e kartų, kai $r_0 = 1/m$. Silpnosios sąveikos nešėja, $W^\pm$ bozonas, turi masę, kuri yra $m_W = 91 \text{ GeV}$. Taigi:

$$r_0 = \frac{1}{m_W} = \frac{1}{91} \text{ GeV} \approx 2 \cdot 10^{-18} \text{ m}. \quad (21)$$

Prie maždaug 10^{-18} m atstumo silpnoji sąveika dar yra panašaus stiprumo kaip ir elektromagnetinė sąveika, bet, atstumui dar didėjant, sparčiai gęsta. Palyginimui, atomų branduolių

dydžiai yra tarp $10^{-15} - 10^{-16}$ m. Vadinasi, silpnoji sąveika yra panašiai stipri kaip ir elektromagnetinė sąveika tik esant šimtus kartų mažesniems atstumams negu atomų branduoliai. Esant maždaug 10^{-17} m atstumams, stiprumas sumažėja dar

$$\frac{U(r = 10^{-18}m)}{U(r = 10^{-17}m)} = \frac{10^{-17}}{10^{-18}} e^{\frac{9}{2}} \approx 10^4 \quad (22)$$

karto. Taigi, atstumai, kuriuose veikia silpnoji sąveika neišsina už branduolio ribos.

Silpnosios sąveikos veikimo nuotolis yra toks trumpas, kad jos neužtenka paaiškinti, kodėl protonai branduolyje neišsisklaido. Ją visiškai nurungia elektromagnetinė sąveika, kuri to pačio krūvio protonus stumia. Kodėl tada protonai ir neutronai yra taip sulipę vienas su kitu? Tas sulipimas reiškia, kad turi būti sąveika, kuri veikia visame branduolio tūryje, t. y. iki 10^{-15} m atstumų. Iš (21) lygties galime matyti, kad, jeigu tos sąveikos dalelė nešėja būtų apie 1000 kartų lengvesnė negu m_W , tai efektyvusis jos veikimo nuotolis ir būtų apie 10^{-15} m. Tokia sąveika galėtų išlaikyti protonus ir neutronus branduolyje, nurungdama atstumiančią elektromagnetinę jėgą. Tokią sąveiką pavadinsime stipriąja. Konkreti jos struktūra yra kiek kitokia negu silpnosios sąveikos.

4 Stiprioji sąveika ir kvarkų modelis

Stipriosios sąveikos tyrinėjimo pradžioje ją buvo bandyta aprašyti panašiu būdu kaip ir silpnąją sąveiką. Būtent taip, kaip minėjome praeito skyrelio pabaigoje. Buvo spėjama, kad ji veikia panašiai kaip ir silpnoji sąveika, bet sąveikos nešėjai yra apie 1000 kartų mažesnės masės negu $W^\pm$ ar Z bozonai. Tokios dalelės iš tiesų egzistuoja ir jos yra vadinamos **pionais**. Jų masės yra $m_{\pi^0} \approx 135$ MeV ir $\pi^\pm \approx 140$ MeV. Tačiau, kai padaugėjo eksperimentinių duomenų, tapo aišku, kad tai yra tik efektinis sąveikos aprašymas, nes tiek pionai, tiek protonai ir neutronai turi vidinę struktūrą. Vadinasi, jos nėra elementariosios, bet sudėtinės dalelės. Tokiu atveju reikia paaiškinti ne tik sąveiką tarp nukleonų (kuri veikia per pionus), bet ir sąveiką tarp juos sudarančių dalelių. Sąveika nukleono viduje turi būti dar stipresnė negu sąveika jo išorėje. Taip pat reikia turėti omenyje, kad nukleonus sudarančios dalelės turi sąveikauti ne tik stipriąja, bet ir silpnąją sąveiką, nes ja sąveikauja nukleonai.

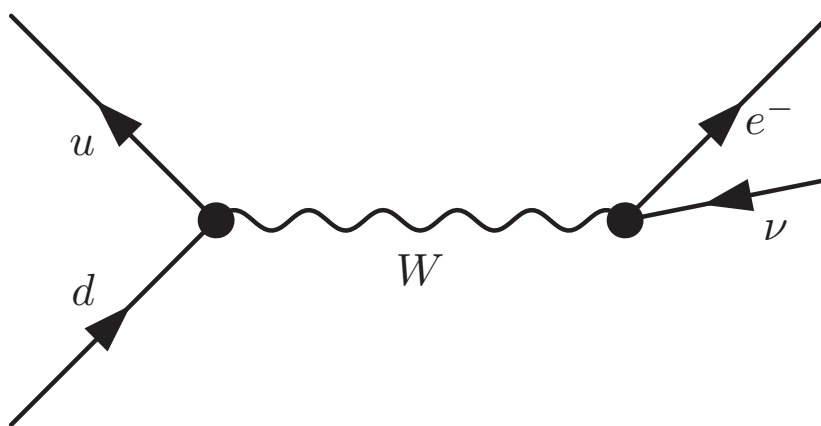
Ši iš pažiūros gana sudėtinga dėlionė yra vėl sudėliojama simetrijos pagalba. Tiek protonas, tiek neutronas yra sudaryti iš trijų **kvarkų**.⁶ Nukleonai yra neutralūs pagal stipriąją sąveiką, vadinasi, trijų kvarkų stipriosios sąveikos krūviai turi susidėti į vieną neutralų stipriosios sąveikos krūvį. Kaip patogiai pavadinti tokius kvarkų krūvius, kurie turi šią savybę? Prisiminkime, kad sudėjus trijų spalvų šviesą, žalios, raudonos ir mėlynos, mes gauname baltą šviesą. Jei-gu pavadinsime atskirus kvarkų krūvius „raudonu“, „mėlynu“ ir „žaliu“, tada juos tris sudėję gausime neutralų, „baltą“, krūvį. Kitaip tariant, kvarkas turi 3 būsenas:

$$q = \begin{pmatrix} q_r \\ q_m \\ q_z \end{pmatrix},$$

kur raidė žymi krūvio spalvos pirmąją raidę. Atminkite, kad kvarko „spalva“ yra tik sugalvotas stipriosios sąveikos krūvio pavadinimas, bet ne konkretus elektromagnetinės bangos dažnis, ką įprastai laikome spalva.

Kaip sakėme, kvarkai turi dalyvauti ir silpnojoje sąveikoje. Tai reiškia, kad kiekvienas kvarkas pagal silpnąją sąveiką yra arba viršutinio tipo arba apatinio tipo. Kitaip tariant,

⁶Kvarkas, angliškai *quark*, anglų kalboje skamba panašiai kaip ančiuko garsas „kva“, angl. *quack*. Galime atsiminti, kad, kai ančiukas pasako tris kartus „kva, kva, kva“, išeina pagal stipriąją sąveiką neutralus nukleonas.



6 pav.: Radioaktyvusis beta skilimas, $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$, bet pavaizduotas kvarkų lygmenyje kaip procesas tarp kvarkų: $u^{+\frac{2}{3}} \rightarrow d^{-\frac{1}{3}} + e^- + \bar{\nu}_e$. Tarpinė dalelė yra silpnosios sąveikos nešėjas, $W^\pm$ bozonas.

kvarkas, pilnai sugrupuotas pagal silpnąją ir stipriąją sąveikas, yra užrašomas:

$$q = \begin{pmatrix} u = \begin{pmatrix} u_r \\ u_m \\ u_z \end{pmatrix} \\ d = \begin{pmatrix} d_r \\ d_m \\ d_z \end{pmatrix} \end{pmatrix}.$$

Jų pavadinimai, u ir d , ateina iš angliskų terminų *up* ir *down*. Šių kvarkų lietuviški vertiniai atitinkamai yra „kylantysis“ ir „krintantysis“ kvarkai. Silpnoji sąveika su kylančiuoju ir krintančiuoju kvarku veikia analogiškai kaip ir su protonu ir neutronu, t. y. kaip pavaizduota 6 pav.

Išsiaiškinome, kokius silpnosios ir stipriosios sąveikos krūvius turi kvarkai. O kokie yra jų elektriniai krūviai? Pirmiausia, iš 6 pav. matome, kad u krūvis turi būti vienetu didesnis negu d krūvis, nes beta skilimo metu išspinduliuojamas vienas negiamas krūvis. Vadinasi, viršutiniojo kvarko krūvis Q_u surištas su krintančiojo kvarko krūviu Q_d :

$$Q_u = Q_d + 1.$$

Atkreipkite dėmesį, kad Feinmano diagrama, pavaizduota 6 pav., turi atspindėti vidinį procesą 5 pav. esančioje Feinmano diagramoje. Tai reiškia, kad protonas p turi turėti vienu u kvarku daugiau. Vadinasi, protonai ir neutronai iš kvarkų yra sudedami taip:

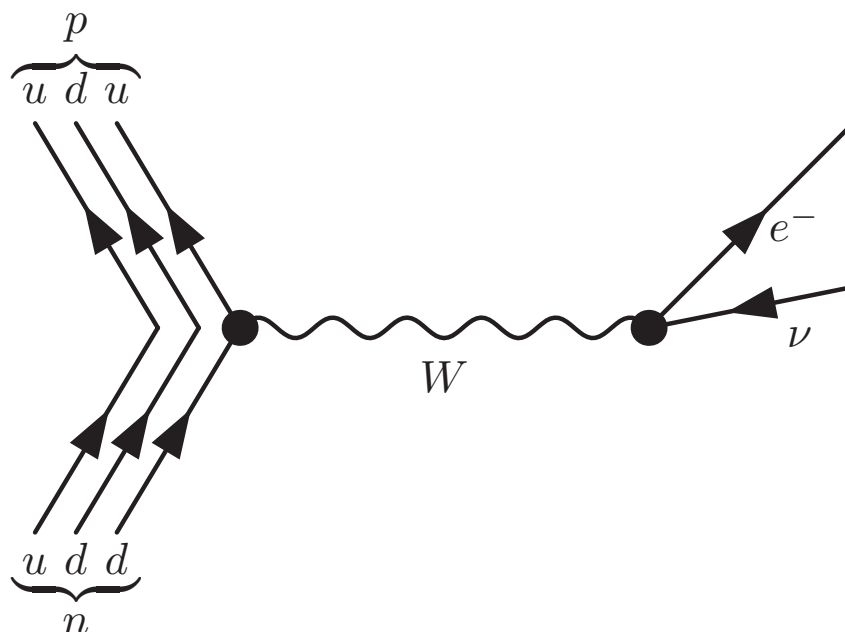
$$\begin{aligned} p &= uud \\ n &= udd \end{aligned}.$$

Iš to, kad protonas turi elektrinį krūvį, lygų $+1$, o neutronas -0 , galime suskaičiuoti, kad

$$Q_u = +\frac{2}{3}, \quad Q_d = -\frac{1}{3}.$$

Taigi, įskaitant vidinę protonų ir neutronų struktūrą, β skilimas piešiamas taip, kaip pavaizduota 7 pav., kuris apjungia 5 ir 6 pav. į bendrą paveikslą.

Stipriąją sąveiką perneša **gliuonai** (iš angliško žodžio *glue* arba klijai, išvertus į lietuvių kalbą). Jie neturi nei elektrinio krūvio, nei sąveikauja silpnąja sąveika. Gliuonai gali pakeisti



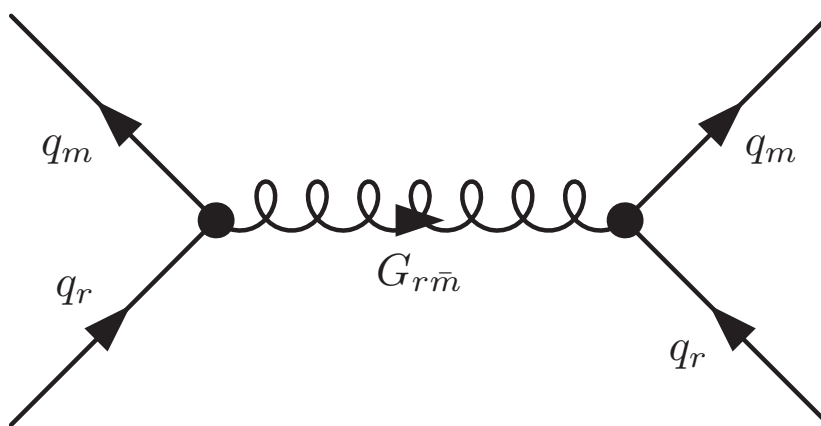
7 pav.: Radioaktyvusis beta skilimas, $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$, su parodyta vidine protono ir neutrono struktūra ir procesu tarp kvarkų $u^{+\frac{2}{3}} \rightarrow d^{-\frac{1}{3}} + e^- + \bar{\nu}_e$. Sąveikos nešėja $W^\pm$.

kvarko spalvą, pvz., raudoną pakeisti į mėlyną, taip, kaip parodyta 8 pav. Tam, kad gliuonas iš raudono virstų mėlynu, reikia, kad gliuonas išneštų raudoną spalvą ir įneštų mėlyną. Mėlynos spalvos įnešimas yra tas pats, kas antimėlynos išnešimas. Taigi, jeigu pažymėsime gliuono keliavimo kryptį į dešinę, kaip pavaizduota 8 pav., tada gliuonas bus sudarytas iš raudonos ir antimėlynos spalvų (pažymėjome $G_{r\bar{m}}$). Jeigu gliuonas keliautų į priešingą pusę, tai būtų antiraudonas ir mėlynas. Vadinasi, gliuonas visada neša spalvą ir antispalvą. Nors iš viso yra $3 \cdot 3 = 9$ spalvų ir antispalvų kombinacijų, iš tikrųjų, viena iš devynių kombinacijų gali būti išreikšta per kitas. Taigi, nepriklausomų kombinacijų yra tik aštuonios. Tai reiškia, kad iš viso gliuonų yra aštuonios rūšys.⁷

Stipriosios sąveikos ypatybė yra ta, kad ją galime užfiksuoti kaip fundamentalią sąveiką tarp kvarkų tik esant ypatingai mažiems atstumams (arba, analogiškai, didelėms energijoms). Gliuono masė lygi nuliui, tai šiuo parametru jis yra panašus į fotoną, ir, atrodytų, užsirašytų panašiu potencialu kaip (14). Tačiau stiprioji sąveika skiriasi žymiai didesniu daugikliu, kuris padaugina potencialą (14) ir padaro sąveiką stipresnę. Pasirodo, kad tas daugiklis irgi priklauso nuo atstumo (arba energijos), ir prie mažesnės negu 200 MeV energijos (arba prie didesnių negu $\sim 10^{-15}$ m atstumų) daugiklis tampa toks didelis, kad kvarkai negali būti atskiri. Esant didesnėms energijoms, daugiklis pamažėja ir atsiranda galimybė kvarkams atsilaivinti, taigi, ir mums taip netiesiogiai pamatyti protonų ir neutronų vidinę struktūrą dalelių greitintuvuose.

Dabar grįškime prie klausimo, kaip nukleonai išsilaiko branduolyje. Kaip jau sakėme, už tai yra atsakingi pionai, kurie taip pat yra sudaryti iš kvarkų. Pionai taip pat turi būti neutralūs (arba „balti“) pagal stipriąją sąveiką. Baltą spalvą galima gauti ne tik sudedant tris skirtingas

⁷Ką reiškia „nepriklausomų“? Pilnas paaiškinimas yra gana sudėtingas. Kad būtų paprasčiau suprasti, galime surasti analogiją su dviračio žvaigždutėmis ir dviračio bėgiais. Jeigu dviratis turi tris priekines ir septynias galines žvaigždutes, tai bus nurodyta, kad dviratis turi $3 \times 7 = 21$ bėgį. Tačiau iš tiesų svarbus tik santykis tarp priekinės ir galinės žvaigždutės. Dažniausiai tą patį santykį tarp žvaigždučių galima išgauti ne vienu būdu. Pvz., tą patį santykį gausime uždėję grandinę ant didžiausios priekinės ir didžiausios galinės žvaigždučių stipriai skersuojant grandinę. Arba uždėję ant vidurinės priekinės ir arčiau vidurio esančios galinės žvaigždučių. Tada „tikrų bėgių“ yra mažiau, nes tą patį efektą galime gauti ne vienu būdu. Panašiai ir su gliuonais – viena iš kombinacijų yra išvestinė iš kitų.



8 pav.: Stipriosios sąveikos veikimo pavyzdys: kvarkai apsikeičia spalvomis per sąveikos nešėją gliuoną.

spalvas, bet ir sudedant spalvą su antispalva. Taigi, pionai yra sudaryti iš bendros kvarko-antikvarko būsenos. Kadangi branduolyje yra tik u ir d kvarkai, tai neutralus pionas π^0 yra sudarytas arba iš $u\bar{u}$, arba iš $d\bar{d}$, o $\pi^\pm$, atitinkamai, iš $u\bar{d}$ ir $\bar{u}d$ (patikrinkite, kaip susideda jų elektriniai krūviai). Šie pionai yra sugeneruojami stipriosios sąveikos pagalba per gliuonus. Tada protonai su neutronais sąveikauja taip, kaip pavaizduota 9 pav. Šiuo atveju protone esantis mėlynas u kvarkas tampa raudonu ir išspinduliuoja mėlyną-antiraudoną gliuoną, kuris sugeriamas tame pačiame branduolyje esančio raudono d kvarko, ir paverčia šį kvarką mėlynu. Kitas protono žalias u kvarkas pakeičia spalvą į mėlyną ir išspinduliuoja žalią-antimėlyną gliuoną, kuris skyla į mėlyną antikvarką $\bar{d}$ ir žalią kvarką d . Iš pirmos reakcijos ateinantis d ir antros reakcijos ateinantis $\bar{d}$ sudaro $d\bar{d}$ porą, kuri sudaro sudėtinę dalelę pioną π^0 . Ši pora analogiškais procesais per kvarkus nueina į neutroną, taip sudarydama stiprų ryšį tarp protono ir neutrono.

5 Standartinio elementariųjų dalelių modelio link

5.1 Mūsų materija ir keturios sąveikos

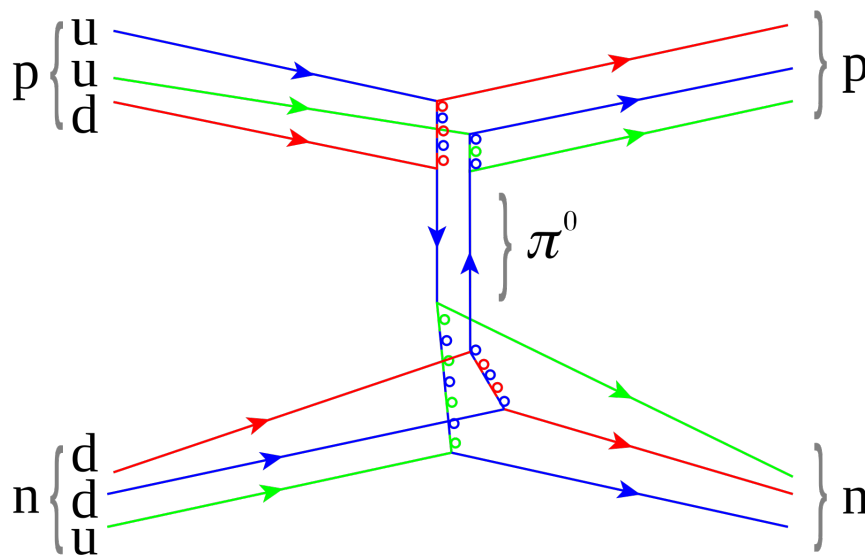
Kol kas mes sužinojome, kad visi atomai ir jų branduoliai yra sudaryti iš šių **fermionų**:

- Kvarkai: $q = \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$
- Leptonai $\ell = \begin{pmatrix} \nu \\ e^- \end{pmatrix}$

Sąveikos tarp jų nusakomos **bozonais**:

- Elektromagnetinė sąveika – fotonas, γ .
- Silpnoji sąveika – $W^\pm$ ir Z bozonai
- Stiprioji sąveika – aštuoni gliuonai, G
- Gravitacinė – gravitonas(?)

Paskutinė sąveika yra silpniausia ir dalelių fizikai dar nėra atradę šią sąveiką pernešančios dalelės. Kad įsivaizduotumėte, kodėl taip yra, palyginkime gravitacinės sąveikos stiprumą su elektromagnetinė sąveikos stiprumu. Gravitacinė konstanta natūraliuose vienetuose (natūralių



9 pav.: Efektinė sąveika tarp protono ir neutrono per pioną. Protone esantis mėlynas u kvarkas tampa raudonu ir išspinduliuoja mėlyną-antiraudoną gliuoną, kuris sugeriamas tame pačiame branduolyje esančio raudono d kvarko ir paverčia d kvarką mėlynu. Kitas protono žalias u kvarkas pakeičia spalvą į mėlyną ir išspinduliuoja žalią-antimėlyną gliuoną, kuris skyla į mėlyną antikvarką $\bar{d}$ ir žalią kvarką d . Iš pirmos reakcijos ateinantis d ir antros reakcijos ateinantis $\bar{d}$ sudaro $d\bar{d}$ porą, kuri sudaro sudėtinę dalelę pioną π^0 . Iš piono ateinantis d kvarkas prisijungia prie neutrono, kartu pakeisdamas savo spalvą ir išspinduliuodamas gliuoną, kuris neutrone pakeičia kito kvarko spalvą, o $\bar{d}$ kvarkas anihiliuoja su vienu iš neutrono d kvarku ir išspinduliuoja gliuoną, kuris pakeičia kito d kvarko spalvą. Paveikslėlis paimtas iš <https://en.wikipedia.org/wiki/Pion>

vienetų sistemoje visi dydžiai yra matuojami elektronvoltais) yra išreiškiama $G = \frac{1}{M_{pl}^2}$, kur $M_p \approx 10^{19} \text{ GeV}$ yra Planko masė. Gravitacinė sąveika yra proporcinga gravitacinei konstantai sudaugintai su mase, tai dviems elektronams ji bus $F_G = G \frac{m_e^2}{r^2} = \frac{m_e^2}{M_{pl}^2}$. Elektromagnetinė sąveikos jėga yra $F_e = \frac{Q_e^2}{4\pi r^2}$, kur Q_e yra elektrono krūvis. Natūraliuose vienetuose priekyje esantis daugiklis yra žymimas α o jo vertė yra $\alpha = \frac{e^2}{4\pi} \approx \frac{1}{137}$. Turint tai omenyje, mes galime įvertinti, kad elektromagnetinė sąveika bus maždaug

$$\frac{F_e}{F_G} = \frac{\alpha}{\frac{m_e^2}{M_{pl}^2}} = \alpha \frac{M_{pl}^2}{m_e^2} \approx \frac{1}{137} \frac{(10^{19})^2 \text{ GeV}^2}{5^2 \cdot (10^{-4})^2 \text{ GeV}^2} \approx 4 \cdot 10^{42}$$

karto stipresnė už gravitacinę. Dalelių fizikoje procesai yra tikimybiniai ir stipresnės sąveikos procesai įvyksta dažniau negu silpnės. Vadinas, elektromagnetiniai procesai dalelių greitintuvuose vyksta maždaug $\sim 10^{42}$ kartų dažniau už gravitacinius. Matome, kad tikėtis aptikti gravitonus dalelių greitintuvuose yra beviltiška.

Kita vertus, jeigu objektai yra dideli ir neutralūs, galime ignoruoti tarp jų veikiančią elektromagnetinę sąveiką ir, jeigu susiduriančių kūnų masės yra labai didelės, pvz., kai susiduria dvi didžiulės juodosios skylės kažkur visatos platybėse, tada įmanoma aptikti iš šio įvykio ateinančias gravitacines bangas didelių veidrodžių ir šviesos pagalba. Tokie procesai jau yra matuojami eksperimentuose, tačiau matuojamos gravitacinės bangos yra klasikinės (kvantiniai efektai nepasireiškia, nes tokie matavimai galimi tik dideliuose atstumuose) ir kvantinė gravitacijos prigimtis vis tiek lieka paslaptimi.

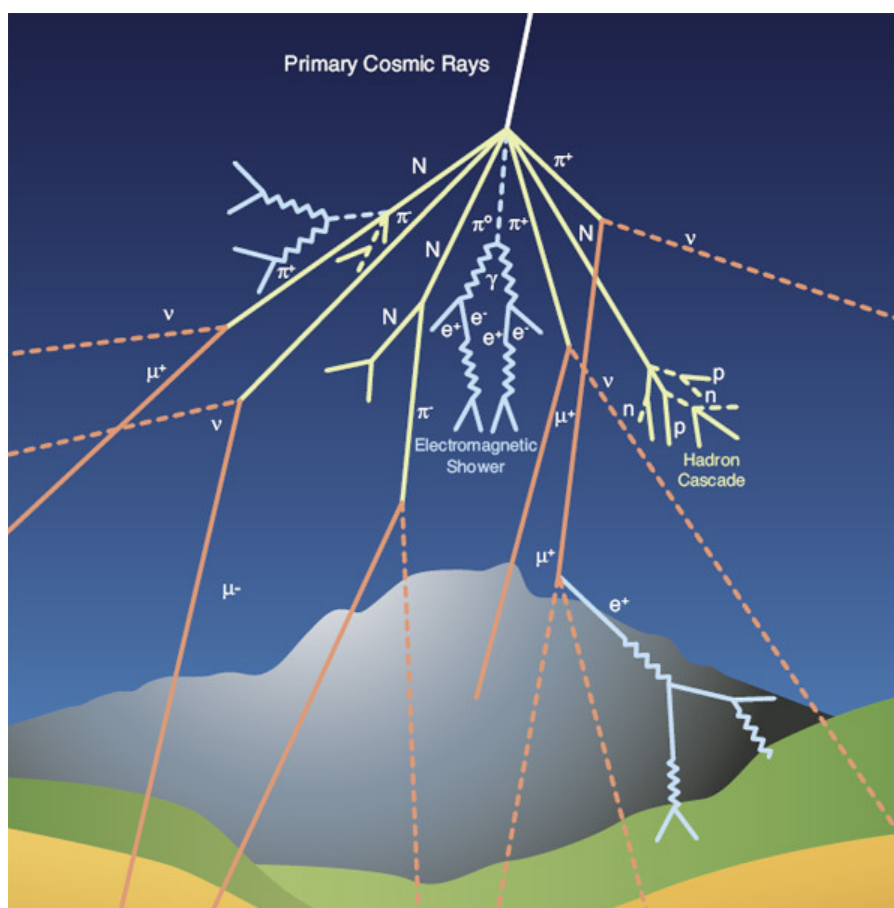
5.2 Dalelių „zoologijos sodas“ ir Standartinis modelis

Nepaisant gravitono nepagaunamumo, šis dalelių fizikos modelis yra pakankamai sėkmingas. Jis gali paaiškinti daugybę klausimų: elektromagnetinės sąveikos prigimtį, periodinę cheminių elementų lentelę, branduolių susidėliojimą iš protonų ir neutronų, branduolinius procesus ir t. t. T. y. iš esmės viską, kas susiję su mus supančia medžiaga. Jis taip pat yra gana elegantiškas: reikia tik dviejų tipų kvarkų ir dviejų tipų leptonų bei keturių sąveikų paaiškinti visą aplink esančią gamtą! Tačiau 1936 metais fizikos pasaulį sukrėtė netikėtas atradimas. Tiriant kosmoso spinduliuotę buvo aptikta dalelė, kuri visomis savybėmis yra tokia pati kaip elektronas, tik jos masė yra 200 kartų didesnė. Ši dalelė netilpo į jokių tuo metu žinomus modelius ir jos aptikti niekas nesitikėjo. Atrodo, buvo užfiksuota tiesiog elektrono masyvesnė kopija. Ši dalelė buvo pavadinta miuonu.

Kad suprastume, kodėl miuonas buvo atrastas daug vėliau negu elektronas ir kodėl atomuose yra elektronai, bet ne miuonai, reikėtų vėl pakalbėti apie dalelių kinematiką. Pirmiausia, kuo dalelė masyvesnė, tuo ji greičiau skyla, nes masyvios dalelės „nori“ atlaisvinti savo energiją, skildamos į mažiau masyvias daleles. Taigi, masyvios dalelės yra mažiau **stabilios** arba iš viso nestabilios (skirtis tarp stabilių ir nestabilių dalelių iš principo yra dirbtinė ir priklauso nuo to, kokią dalelių gyvavimo trukmę mes pasirinksim šiai skirčiai nubrėžti).

Anksčiau tyrinėdami elektromagnetinę sąveiką pamatėme vieną svarbų elementą – susiduriant didelių energijų dalelėms gali susikurti kitokios, sunkesnės dalelės. 1936 metais atrastas miuonas buvo susidaręs atmosferoje dėl **kosminės spinduliuotės**. Kosminė spinduliuotė – tai didelės energijos dalelės, atskrendančios iš kosmoso. Jų kilmė gali būti įvairi: gali būti susidariusios Saulėje, kur nors toli sprogusioje žvaigždėje arba dar bet koku būdu kažkur kosmose susidariusi dalelė. Šie spinduliai didele energija trenkiasi į atmosferoje esančias daleleles ir taip gali sudaryti įvairių nestabilių ir didesnės masės dalelių, kurių šiaip aplinkoje nepamatysime (žr. 10 pav.).

Kosminė spinduliuotė sudaro natūralias (ir pigias) sąlygas atrasti naujas daleles, tačiau tokie atradimai yra reti, nes reikia laukti labai daug laiko, kol būtų surinkta pakankamai duo-

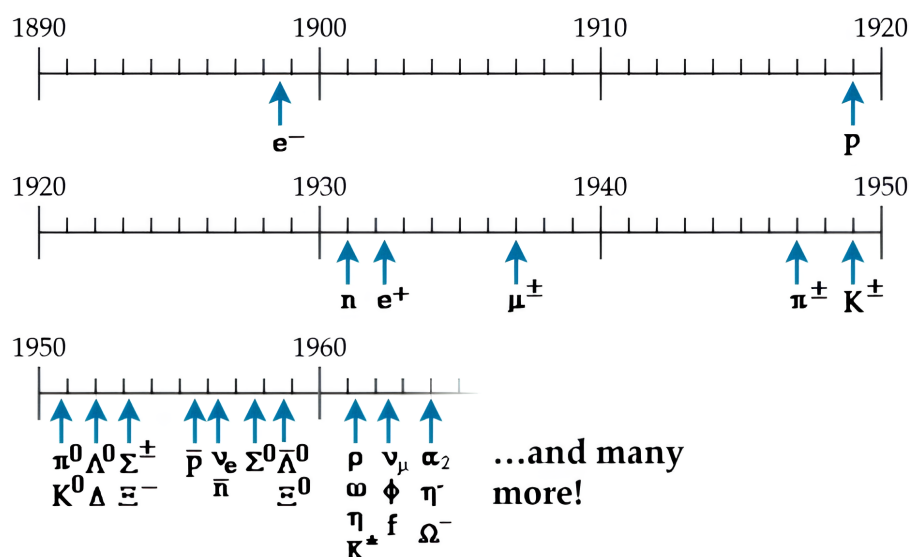


10 pav.: Kosminė spinduliuotė, sukelianti dalelių „kaskadas“ atmosferoje. Atrastasis miuonas pažymėtas μ raidele. Paveikslėlis paimtas iš <https://cds.cern.ch/images/CMS-PHO-GEN-2017-008-1>

menų naujai dalelei identifikuoti. Jeigu norime atradimus padaryti greičiau, reikia greitinti ir daužyti daleles patiems. Tokia ir yra dabartinių eksperimentų, vykdomų dalelių greitintuvuose, pagrindinė idėja: sudaužus daug energingų dalelių galima atrasti ir retesnes, masyvias, silpniau sąveikaujančias daleles, kurių kasdienėje aplinkoje pastebėti neįmanoma. XX amžiuje, kai šie eksperimentai pradėjo veikti, buvo atrastas visas dalelių „zoologijos sodas“, apie kurį niekas prieš tai nenučiuokė (žr. 11 pav.). Tai, žinoma, buvo didžiulis progresas. Tačiau galime įsivaizduoti, kokia sumaištis turėjo kilti tarp tų laikų fizikų, kai į jų „elegantišką“ modelį iš protono, neutrono (apie kvarkus dar niekas nežinojo), elektrono bei neutrino reikėjo priimti vis daugiau dalelių be aiškos ir suprantamos sistemos tarp jų! Šią sumaištį turbūt geriausiai iliustruoja 1955 metais Nobelio premijos laureato Vilio Lembo Nobelio viešosios paskaitos metu pasakytas juokas: „Girdėjau sakant, kad naujos elementariosios dalelės atradėjas būdavo apdovanojamas Nobelio premija, bet dabar toks atradimas turėtų užtraukti 10000 dolerių baudą“.⁸ Tuo metu, beje, buvo galvojama, kad visos atrandamos dalelės yra elementariosios.

Šis dalelių „zoologijos sodas“ buvo pagrindinė motyvacija ieškoti vidinės struktūros dalelėse. Tos paieškos rezultatas buvo kvarkų modelis, pristatytas praeitame skyriuje. Pasirodo, visa ta daugybė dalelių yra tik įvairios kombinacijos iš kvarkų. Dalelių greitintuvuose vykdomi eksperimentai taip pat atskleidė, kad egzistuoja ne tik elektrono sunkesnis „pusbrolis“ miuonas, bet ir dar sunkesnis „giminaitis“ – taonas, nuo elektrono ir miuono besiskiriantis tik mase. Sudėjus visą šią dėlionę, pamatysime, kad iš tiesų gamtos struktūra yra pakankamai paprasta.

⁸Tiksli citata anglų kalboje: „I have heard it said that the finder of a new elementary particle used to be rewarded by a Nobel Prize, but such a discovery now ought to be punished by a \$10,000 fine.“



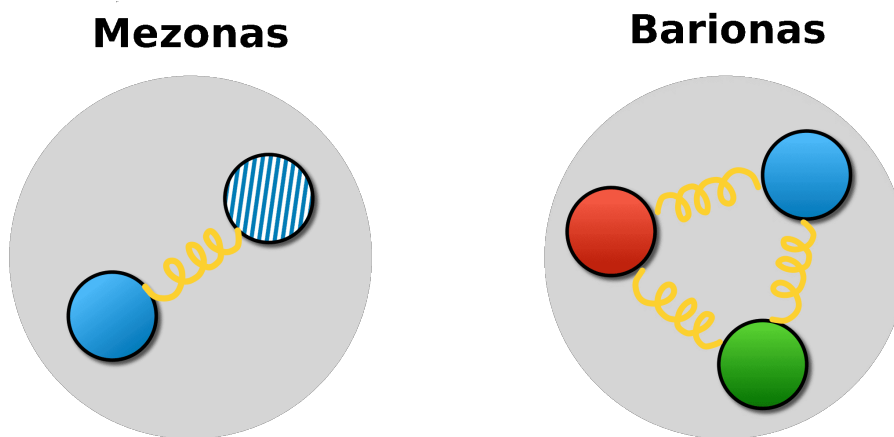
12 pav. vaizduoja visą šiuolaikinį Standartinį dalelių fizikos modelį. Sakome, kad mūsų jau aptarti keturi fermionai – u, d, e ir ν – sudaro lengviausiąją dalelių kartą, pavaizduotą pirmajame 12 pav. stulpelyje. Iš viso gamtoje yra trys tokios kartos dalelių, kurių antroji ir trečioji karta susideda iš identiškų, tik didesnes mases turinčios dalelės. Sunkesnės kartos pažymėtos antrajame ir trečiajame 12 pav. stulpeliuose. Ketvirtajame 12 pav. stulpelyje yra išvardinti stipriosios, silpnosios ir elektromagnetinės sąveikų nešėjai, kuriuos jau aptarėme. Paskutinė dėlionės dalis yra Higso bozonas, apie kurį pakalbėsime truputį vėliau.

Pavyzdys, kaip kvarkų modelis sutvarko dalelių „zoologijos sodą“ į sistemą, parodytas 13 pav. Jame pavaizduota, kokie barionai gali būti sudaryti u , d ir s kvarkų. Kaip jau minėjome, dalelės iš kvarkų gali susidėti įvairiai. Svarbu, kad jų spalvinis krūvis susidėtų į „balta“ krūvį. Taigi, dalelė gali būti sudaryta iš trijų kvarkų, kvarko-antikvarko poros, dviejų kvarkų su dviem antikvarkais, trijų kvarkų su pridėta kvarko-antikvarko pora ir t. t. Žinoma, daugelis jų gyvuoja itin trumpai, bet galite įsivaizduoti, kad turint iš viso šešias kvarkų rūšis, galima daugybė tokių kombinacijų. Visos iš kvarkų sudarytos dalelės yra vadinamos **hadronais**. Taigi, protonas, neutronas, pionas yra hadronai. Dažniausiai aptinkami hadronai susideda iš trijų kvarkų arba kvarko-antikvarko poros. Tokie hadronai yra vadinami atitinkamai **barionais** ir **mezonais**. Taigi, protonas ir neutronas yra barionai, o pionas yra mezonas.

Atkreipsime dėmesį į tai, kad hadronų masės nėra lygios jų kvarkų masių sumai. Pvz., jeigu sudėsite dviejų u ir vieno d mases, gausite apie 9 MeV (žr. 12 pav. surašytas vertes), tačiau protonas, kuris yra sudarytas iš uud , turi 938 MeV dydžio masę, t. y. maždaug 100 kartų didesnę negu jų sudarančių kvarkų masių suma! Taip yra dėl to, kad didžiąją protono masės dalį sudaro stipriosios sąveikos ryšio energija, o elementariųjų kvarkų masės sudaro tik neįžymią protono masės dalį. Taip yra su visais hadronais: vien tik iš elementariųjų dalelių masės negalima pasakyti, kokia bus iš jų sudėtos dalelės masė, jeigu neįtraukiamos sąveikos tarp jų. Teisingai įtraukti šią sąveiką yra gana sudėtingas uždavinys.

5.3 Higso bozonas

Atidus skaitytojas turbūt pastebėjo, kad, kai pristačiau silpnąją sąveiką, apibūdinau ją tik apytikre simetrija tarp protono ir neutrono, elektrono ir neutrino, o, kai įvedžiau kvarkų modelį, stipriosios sąveikos simetrija buvo tiksli. Tai reiškia nėra jokio masės skirtumo tarp žalio ar raudono u kvarko, bet yra masės skirtumas tarp silpnosios sąveikos poros u ir d . Jeigu



14 pav.: Schematiškas dviejų tipų hadronų, mezonų ir barionų atvaizdavimas. Mezonas yra sudarytas iš tos pačios spalvos kvarko ir antikvarko (šiuo atveju mėlyno kvarko ir antimėlyno antikvarko). Barionas yra sudarytas iš trijų skirtingų spalvų kvarkų. Paveikslėlis paimtas iš <https://physicsworld.com/a/quantum-computers-take-on-quarks/> (Amara McCune ir Jacob Marks)

simetrija yra „fundamentali“ gamtos simetrija, natūralu, kad ji turėtų būti tiksli. Kitu atveju teorija lieka tarsi neužbaigta. Standartiniame modelyje šis prieštaravimas yra išsprendžiamas Higso mechanizmu, kurio paaiškinimas išeina už mokyklinio kurso ribų, tačiau čia pasistengsiu pristatyti pagrindines šio sprendimo idėjas.

Ankstyvoje visatoje, kai visata buvo labai karšta, dalelės buvo labai energingos ir neturėjo masės. Kadangi visų dalelių masės buvo lygios 0, tiek stiprioji, tiek silpnoji simetrija buvo tikslios. Vėliau visatai šalant, silpnoji simetrija „sulūžo“. Už šį „sulaužymą“ turi būti atsakingas laukas, kuris sąveikauja su dalelėmis truputį kitaip negu sąveikos laukai. Tas ypatingas laukas vadinamas Higso lauku. Kai visata karšta, jis išlaiko visas Standartinio modelio simetrijas tiksliai, o, kai ši atšąla, Higso laukas sulaužo silpnosios sąveikos simetriją, suteikdamas dalelėms įvairias mases. Dalelės, kurios stipriau sąveikauja su Higso lauku, turi didesnę masę negu tos, kurios sąveikauja su juo silpniau. Tokiu būdu „viršutinį“ ir „apatinį“ silpnosios sąveikos krūvius turinčių dalelių masės vėsesnėje visatoje pradeda skirtis. Nepaisant to, kad simetrijos jau nebeatome, ši sulaužyta simetrija vis tiek turi savo daleles nešėjas, kurios niekur nedingo. Šios dalelės vadinamos $W^\pm$ ir Z bozonais, o dalelė, kuri kyla iš Higso lauko, vadinama Higso bozonu, kuris užbaigia Standartinio modelio dëlionę, pavaizduotą 12 pav. Higso bozonas buvo atrastas 2012 metais CERN didžiajame hadronų greitintuve.

Šis efektas skamba gana sudėtingai, tačiau sulaužytų simetrijų pavyzdžių yra ir arčiau mūsų. Tipinis pavyzdys yra spontaniškoji magnetizacija. Kai kurios medžiagos (feromagnetikai) pakankamai šiltoje temperatūroje neturi magnetinio lauko (nulinis magnetinis laukas yra simetriškas į visas puses), o jas atšaldžius staiga tampa magnetais. Magnetą turi šiaurės ir pietų polius, taigi, yra aiški magnetinio lauko kryptis, kurios neįmanoma numatyti, kai feromagnetą yra aukštoje temperatūroje. Tai ir yra simetrijos sulaužymas, tik ankstyvojoje visatoje toks sulaužymas vyko su Higso lauku ir silpnąja sąveika, o ne magnetiniais laukais.

5.4 Kiti tvarūs dydžiai Standartiniame modelyje

Mes aptarėme tris „fundamentalias“ simetrijas, kurios pasireiškia **lokaliai**. Elektromagnetinė, silpnoji ir stiprioji simetrijos pasireiškia kiekviename taške lokaliai ir visos turi daleles nešėjas, kurios „suriša“ simetrijas tarp skirtingų erdvės taškų, sukurdamos fundamentalias sąveikas. Jeigu būtų pažeistos lokalsios simetrijos, tai reikštų, kad mūsų fundamentalios sąveikos

yra neteisingos, ir visa teorija griūtų. Sąveikos patenkina priežastinį ryšį: du įvykiai, A ir B, yra susiję priežastiniu ryšiu tik tuo atveju, jei šviesa turėjo pakankamai laiko nuskrietį iš įvykio A į B. Taip negalėtų būti, jeigu simetrija būtų **globali**, t. y. veiktų tuo pačiu metu visoje visatoje. Taigi, iš globalios simetrijos negali išplaukti priežastinis ryšys ir sąveikos. Nepaisant to, teorija visgi gali turėti tokias simetrijas atsitiktinai ir jos gali lemti kažkokius tvarius dydžius, kuriuos galime užfiksuoti eksperimentuose. Kadangi nėra fundamentalios sąveikos, kuri užtikrintų „atsitiktinę“ simetriją lokaliai, tie tvarūs dydžiai irgi galimai yra tik apytiksliai. T. y. galbūt pilnesnėje teorijoje ar tikslesniuose matavimuose jie yra pažeisti. Tokie eksperimentai, kurie ieško šių tvarių dydžių pažeidimų, vadinami retų procesų eksperimentais.

Globalios simetrijos mums padeda geriau įžvelgti teorijos struktūrą, įvesdamos papildomus tvarius dydžius įvairiems procesams. Tai yra patogiu, nes Standartiniame modelyje dalelių yra pakankamai daug, taigi, žinoti, kurie procesai tarp jų yra įmanomi, o kurie ne, yra pravartu. Pirmiausia, žinoma, turi galioti energijos ir judesio kiekio tvermės dėsniai, aprašyti (5) išraiškoje. Pvz., jeigu procesas yra dalelės skilimas, tai reiškia, kad dalelė turi skilti į mažesnę bendrą masę turinčias daleles.⁹ Taip pat turi galioti elektrinio krūvio tvermės dėsnis, kuris atsiranda iš elektromagnetinės sąveikos (arba lokalios simetrijos).

Standartiniame modelyje galioja šie, iš globalių simetrijų išsivedantys, tvarūs dydžiai:

- Elektroninio leptono skaičius L_e , kuris yra $+1(-1)$ kiekvienam pirmos kartos leptonui (antileptonui);
- Miuoninio leptono skaičius L_μ , kuris yra $+1(-1)$ kiekvienam antros kartos leptonui (antileptonui);
- Tauoninio leptono skaičius L_τ , kuris yra $+1(-1)$ kiekvienam trečios kartos leptonui (antileptonui);
- Bariono skaičius B , kuris yra $+1/3(-1/3)$ kiekvienam kvarkui (antikvarkui) (trys kvarkai sudaro barioną, taigi, barionas turi $B = +1$, o mezonas turi $B = 0$, nes jis sudarytas iš kvarko-antikvarko poros.).

Šių skaičių taikymo taisyklė yra paprasta: kiekvienas atskiras skaičius prieš ir po reakcijos turi išlikti nepakitęs. Pvz., paskaičiuokime šiuos dydžius beta skilimui:

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e. \quad (23)$$

Matome, kad proceso pradžioje ir proceso pabaigoje bendras elektrinis krūvis išlieka 0, nes elektronas turi neigiamą krūvį, protonas – teigiamą, o antineutrinas yra neutralus. Vadinasi, elektrinio krūvio tvermė išlaikyta. Proceso pradžioje yra neutronas, kuris yra sudarytas iš trijų kvarkų, taigi, jo barioninis krūvis yra $B = 3 \cdot \frac{1}{3} = +1$. Prieš sąveiką nebuvo jokių leptonų, taigi, $L_e = L_\mu = L_\tau = 0$. Po sąveikos turime protoną, kurio barioninis skaičius yra $B = 1$, tiek pat, kiek ir prieš reakciją. Taip pat po reakcijos turime elektroną, kurio leptoninis skaičius yra $L_e = +1$. Elektroninio antineutrino leptoninis skaičius yra $L_e = -1$. Vadinasi, bendras elektroninio leptono skaičius po reakcijos yra $L_e = +1 - 1 = 0$, o tai yra tiek pat, kiek ir prieš reakciją. Nė vienas tvarus dydis tokioje reakcijoje nepažeidžiamas, todėl reakcija yra galima.

Panagrinėkime kitą atvejį:

$$\mu^- \rightarrow e^- + e^- + e^+. \quad (24)$$

Miuono masė yra didesnė už trijų elektronų masių sumą, taigi, kinematiškai reakcija galima. Reakcija taip pat išlaiko elektrinio krūvio tvermę, nes prieš ir po reakcijos krūvis yra -1 . Čia nėra kvarkų, taigi, barioninis skaičius visada lygus 0. Tačiau prieš reakciją leptoniniai krūviai

⁹Dalelei, kuri nėra laisva, bet ryšyje su kitomis dalelėmis, šis principas skaičiuojamas sudėtingiau, pvz., protono beta skilimui branduolyje į sunkesnę neutroną.

yra $L_e = 0$, $L_\mu = +1$, $L_\tau = 0$, o po reakcijos – $L_e = +1$, $L_\mu = 0$, $L_\tau = 0$. Matome, kad tiek L_e , tiek L_μ tvermė yra pažeista, taigi, Standartiniame modelyje toks procesas yra negalimas. Tokio proceso iš tiesų yra ieškoma eksperimentuose. Jeigu jį pavyktų aptikti, tai būtų ženklas, kad šioje reakcijoje veikia mums dar nežinomi, už Standartinio modelio ribų esantys efektai.

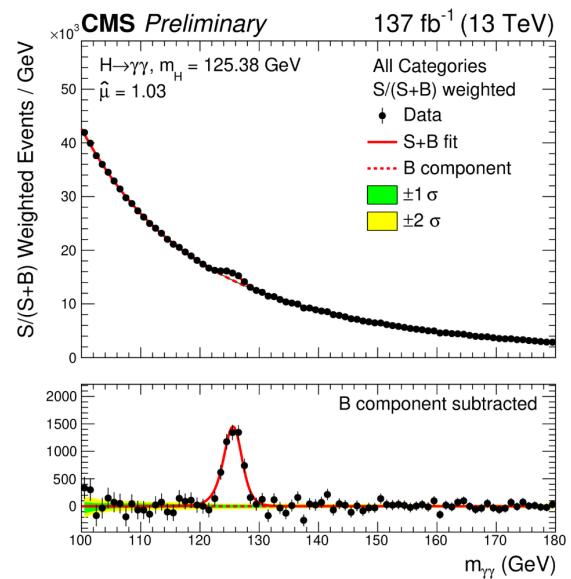
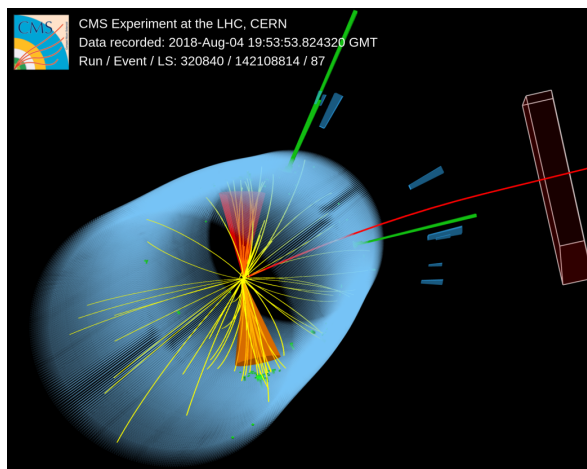
6 Standartinio modelio patikrinimas ir naujos fizikos paieškos

Dalelių fizikos eksperimentus vykdo nemažai institucijų, tokių kaip CERN, SLAC, Fermilab, KEK ir t. t. Kiekviena institucija gali vykdyti po kelis eksperimentus, kurie taip pat turi savo akronimus, pvz., CERN esantys CMS, LHCb ir t. t. eksperimentai, KEK K2K, Belle-II... Kiekvienas jų turi savo specifiką, apie kurią neišsiplėsimė, bet, kad būtų aiškiau, galime pakalbėti apie dalelės atradimo pavyzdį didelių energijų eksperimentuose, esančiuose Didžiajame hadronų greitintuve (angl. *Large Hadron Collider* – LHC). Kaip jau minėjau, tokių eksperimentų esmė yra išgauti kuo didesnes energijas, kad ji virstų į dar nematytas, sunkias arba retai sukuriamas daleles. Kaip šias daleles pamatyti?

Pirmiausia, eksperimentai yra kartojami daug kartų ir vedama statistika. Kam to reikia? Prisiminkime e^+e^- anihiliaciją, pavaizduotą 4 pav., ir tame pačiame skyriuje pristatytą invariantinę masę. Tarkime, mes įtariame, kad kažkokios dalelės masė yra m_X , kuri skyla į du fotonus $m_X \rightarrow \gamma\gamma$. Tada dviejų fotonų invariantinė masė bus m_X . Tačiau tokią pačią invariantinę masę gali duoti ir kiti procesai, kuriuose dalyvauja žinomos dalelės ir sąveikos, pvz., $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$. Galime apskaičiuoti, kiek tikimės dvifotonių įvykių su m_X invariantine mase iš mums gerai pažįstamų procesų. Pamatavę daug dvifotonių procesų matysime, ar tų įvykių užfiksavome tiek pat, kiek apskaičiavome, ar daugiau. Jeigu įvykių išmatavome daugiau negu tikėjomės, vadinasi, procese buvo sukurta dar nežinoma m_X masės dalelė, kuri skilo, taip sukurdamą daugiau išmatuotų įvykių. Tokiu principu atrastas Higso bozonas CERN CMS ir ATLAS eksperimentuose.

Higso bozono įvykio pavyzdys ir surinktos daugelio tokių įvykių statistikos CMS eksperimente grafikas pavaizduotas 15 pav. Kairėje esantis paveikslėlis rodo dviejų protonų susidūrimą, kurio metu iš didelės energijos susidaro daugybė dalelių. Susidariusios dalelės yra pavaizduotos linijomis. Iš visų linijų mums svarbiausios yra dvi žaliai nuspalvintos linijos. Jos ženkliną du fotonus su didele energija. Apskaičiavus jų bendrą energiją, galime pasižymėti, kad pastebėjome dvifotonį įvykį su tam tikra invariantine mase $m_{\gamma\gamma}$. Susisteminę daugybės tokių įvykių informaciją, galime nubrėžti grafiką, vaizduojantį, kaip dažnai pastebėjome skirtingas masės $m_{\gamma\gamma}$ vertes. Taip gauname 15 pav. dešinėje esančio paveikslėlio viršutinį grafiką. Didžioji dalis dvifotonių įvykių ateina ne iš Higso bozonų, o iš įvykių, kuriuos jau žinome. Juos vadiname fonu (angl. *background*) ir, apskaičiavus iš žinomos fizikos jų dažnius, pažymime B. Mus dominančius nežinomos fizikos įvykius vadiname signalu ir žymime S. Iš visų duomenų (S+B) atėmus foną (B) gausime pav. 15 dešinėje esančio paveikslėlio apatinį grafiką, kuriame aiškiai matosi Higso bozono sukeltas „spyglys“ duomenyse ties $m_{\gamma\gamma} = 125$ GeV.

Žinoma, eksperimentuose stebimi ne tik fotonai, bet ir daugybė kitokių detektoriuose užfiksuojamų dalelių. Detektorius taip pat pasiekia elektronai, miunonai ir įvairūs hadronai. Šios dalelės gali atsirasti iš mums dar nematytų procesų ir taip atskleisti fiziką už Standartinio modelio ribų arba kaip tik patvirtinti Standartinio modelio numatomus retesnius, dar neužregistruotus procesus. Faktą, kad egzistuoja dar neištyrinėta, nauja fizika mums patvirtina įvairūs matavimai, kurie derinami tarpusavyje nesutampa. Pvz., iš galaktikų sukimosi bei visatos plėtimosi tyrimų ir dar kitų netiesioginių matavimų žinome, kad tik apie 5% visatos sudaro mums žinoma materija, 24% visatos yra sudaryta iš mums nežinomos medžiagos, kuri labai silpnai sąveikauja su Standartiniu modeliu, o apie 71% sudaro keista, dar nežinoma energijos



15 pav.: 2012 metais atrasto Higso bozono egzistavimo įrodymai. Kairėje esantis paveikslėlis rodo dviejų protonų susidūrimą, kurio metu iš didelės energijos susidaro daugybė dalelių. Iš susidariusių dalelių ilgiausiai gyvuojančios yra užfiksuojamos detektoriuje, esančiame aplinkui susidūrimo tašką. Susidariusios stabilios dalelės yra pavaizduotos linijomis. Iš visų linijų mums įdomiausios yra dvi žalios linijos, kurios ženklina du fotonus su didele energija. Apskaičiavus jų invariantinę masę, jos vertę galime išsaugoti kompiuterio atmintyje ir pažymėti tai kaip vieno dvifotonio įvykio duomenį. Susumuoti tokių dvifotonų įvykių duomenys pavaizduoti dešinėje, kur S pažymėta signalu, o B fonu (žr. aprašą tekste) <https://cms.cern/news/and-the-higgs-boson-said-let-there-be-light>

rūšis. Tiriant iš Saulės ir branduolinių reaktorių išlekiančius neutrinus, buvo pastebėta, kad neutrinų masė, nors ir maža, bet nėra nulinė, kaip Standartiniame modelyje. Jau kalbėjome apie dalelių ir antidalelių disbalansą visatoje, kuris irgi yra neišspręstas fizikos mokslo uždavinys. Taip pat yra dar daug kitų neatsakytų klausimų, apie kuriuos nekalbėjome. Taigi, dalelių fizika toli gražu dar nėra ištirta ir ateityje laukia daug įspūdingų atradimų.

A Uždavinių sprendimai

A.1 Uždavinio apie anihiliaciją sprendimas.

a) Tarkime, kad ieškome proceso $e^+e^- \rightarrow \gamma$ energijų ir judesio kiekių. Kad patikrintume, ar šis procesas kinematiškai įmanomas, mums reikės šio sąryšio

$$E^2 = m^2 c^4 + |\vec{p}|^2 c^2 \quad (25)$$

ir energijos bei judesio kiekių tvermės dėsnių

$$E_{e^+} + E_{e^-} = E_\gamma \quad (26)$$

$$\vec{p}_{e^+} + \vec{p}_{e^-} = \vec{p}_\gamma \quad (27)$$

Kadangi fotonas yra bemasis, jo energija yra

$$E_\gamma^2 = |\vec{p}|^2 c^2 \Rightarrow E_\gamma = |\vec{p}| c \quad (28)$$

Kai e^+ susiduria su e^- , visada galime surasti tokią atskaitos sistemą, kur

$$\vec{p}_{e^+} + \vec{p}_{e^-} = 0 \Rightarrow E_{e^+} + E_{e^-} = 2m_e c^2 \quad (29)$$

Tai vadinama masių centro atskaitos sistema. Iš energijos tvermės dėsnio gauname, kad

$$E_\gamma = \sqrt{m_e^2 c^4 + |\vec{p}_e|^2 c^2} + \sqrt{m_e^2 c^4 + |\vec{p}_e|^2 c^2} = 2\sqrt{m_e^2 c^4 + |\vec{p}_e|^2 c^2} \quad (30)$$

O iš judesio kiekio tvermės gauname

$$E_\gamma = c |\vec{p}_\gamma| = c |\vec{p}_{e^+} + \vec{p}_{e^-}| = 0 \quad (31)$$

Taigi, iš energijos tvermės dėsnio gauname, kad E_γ visada turi būti didesnis už $2m_e c^2$, o iš judesio kiekio tvermės, gauname, kad $E_\gamma = 0$. Mūsų gauti rezultatai prieštarauja vieni kitiems, vadinasi, procesas yra kinematiškai neįmanomas.

b) Dabar pritaikykime tą patį procesui $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$. Taigi, dabar

$$E_{\gamma 1} + E_{\gamma 2} = 2\sqrt{m_e^2 c^4 + |\vec{p}_e|^2 c^2} = |\vec{p}_{\gamma 1}| c + |\vec{p}_{\gamma 2}| c \quad (32)$$

$$\vec{p}_{\gamma 1} + \vec{p}_{\gamma 2} = 0 \Rightarrow \vec{p}_{\gamma 1} = -\vec{p}_{\gamma 2} \quad (33)$$

Įsistatę antrą eilutę į pirmąją gauname galutinį atsakymą

$$|\vec{p}_{\gamma 1}| = 2\sqrt{m_e^2 c^4 + |\vec{p}_e|^2 c^2}, \quad (34)$$

$$\vec{p}_{\gamma 2} = -\vec{p}_{\gamma 1}. \quad (35)$$

Įsistatę m_e ir c vertes galime gauti atsakymo skaitinę reikšmę SI vienetais, arba, prisilyginę $c = 1$, gauti atsakymą natūralioje vienetų sistemoje elektronvoltais.

