

Sisältö

Artikkelit

Kvanttikenttäteoria	1
Vuorovaikutus	1
Sähkömagneettinen vuorovaikutus	2
Kenttä (fysiikka)	4
Kvanttisähködynamiikka	12
Sähkövaraus	13
Hiukkasfysiikan standardimalli	18
Mittabosoni	21
Vahva vuorovaikutus	22
Kvarkki	24
Gluoni	28
Kvanttiväridynamiikka	31
Hadroni	32
Heikko vuorovaikutus	33
Fotoni	35
Mesoni	37
Baryoni	38

Viitteet

Artikkelin lähteet ja muokkaajat	40
Kuvien lähteet, lisenssit ja muokkaajat	41

Artikkelilisenssit

Lisenssi	42
----------	----

Kvanttikenttäteoria

Kvanttikenttäteoria (Quantum field theory eli QFT) on kenttiä käsittelevä kvanttiteoria. Sitä käytetään laajalti hiukkasfysiikassa ja se on keskeinen hiukkasfysiikan standardimallin työkalu.

Ei-relativistisia kvanttikenttäteorioita käytetään esimerkiksi tiiviin aineen fysiikassa suprajohtavuuden BCS-teoriassa. Relativistisia kvanttikenttäteorioita taas käytetään hiukkasfysiikan standardimallissa.

Kvanttimekaniikassa klassisen mekaniikan suureet (kuten paikkakoordinaatit ja liikemäärät) muutetaan operaattoreiksi. Varsinainen aine kuvataan hiukkasina ja vuorovaikutukset klassisina kenttinä (kuten sähkökenttä). Kvanttikenttäteoriassa kvanttimekaniikan aaltoyhtälöiden (kuten Diracin yhtälö) ja klassisten kenttäyhtälöiden (kuten sähkömagnetismia kuvaavat Maxwellin yhtälöt) ratkaisut muutetaan operaattoreiksi. Kenttäoperaattorit esitetään luomis- ja hävittämisoperaattoreiden avulla. Luomisoperaattori luo tilaan yhden hiukkasen lisää ja hävittämisoperaattori vähentää siitä yhden hiukkasen.

Kvanttikenttäteorioiden rakentamisessa on kaksi yleisesti käytettyä tapaa. Niin sanottu *kanoninen formalismi* pohjautuu Hamiltonin mekaniikkaan. Hamiltonin formalismia mukaillen kullekin kentälle määritellään kanonisesti konjugoitu impulssi(kenttä). Kvanttimekaniikan kommutaattorisääntöjen oletetaan sitten olevan voimassa myös kenttäoperaattoreille. *Polkuintegraaliformalismissa* lähdetään puolestaan Lagrangen mekaniikan pohjalta. Alkutilan ja lopputilan välinen todennäköisyysamplitudi esitetään kompleksisena polkuintegraalina. Kunkin polun painoarvo (kompleksiluvun pituus) on sama, mutta vaiheen (argumentin) määrää polun klassinen vaikutus (Lagrangen funktion aikaintegraali).

Oikea tapa muodostaa jonkin teorian kvanttikenttäteoreettinen vastine ei ole yleensä etukäteen selvää, vaan saadun teorian tuloksia tulee verrata kokeisiin. Toistaiseksi on löydetty toimivat teoriat sähkömagnetismille, heikoille ja vahvoille vuorovaikutuksille. Gravitaatiolle toimivaa kvanttikenttäteoriaa ei ole löydetty.

Vuorovaikutus

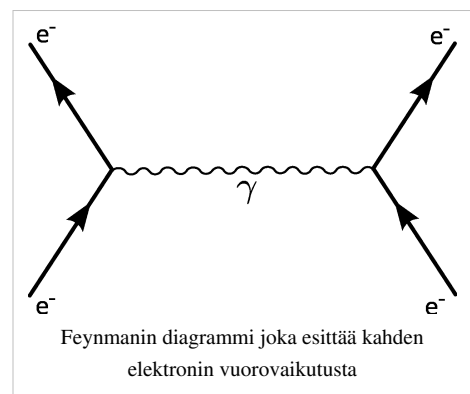
Vuorovaikutus on kahden tai useamman objektin tai tapahtuman välinen vaikutussuhde, jossa kumpikin osapuoli vaikuttaa toiseen. Tietyissä mielessä kyseessä on yksisuuntaisen kausaalisuhteen vastakohta. Suomen kielen sana vuorovaikutus kuvaa myös hyvin kahden tai useamman ihmisen välistä vastavuoroista kommunikaatiota, dialogia. Tietyissä mielessä kyseessä on monologin, tai useamman rinnakkaisen toisiinsa vaikuttamattomien monologiin vastakohta.

Vuorovaikutukset fysiikassa

Fysiikassa eri kappaleiden väliset vuorovaikutukset ilmenevät niiden välillä vaikuttavina voimina. Nykyisen käsityksen mukaan kaikki hiukkasten välillä esiintyvät vuorovaikutukset perustuvat viime kädessä johonkin neljästä perusvuorovaikutuksesta, jotka ovat:

- gravitaatio
- sähkömagneettinen vuorovaikutus
- vahva vuorovaikutus
- heikko vuorovaikutus

Näistä kahdella viimeksimainitulla on niin lyhyt kantama, että ne ilmenevät vain ydin- ja hiukkasfysiikan ilmiöissä. Kvarkkien välillä vaikuttavaa vuorovaikutusta kutsutaan vahvaksi vuorovaikutukseksi. Se sitoo protonien ja neutronien rakenneosat, kvarkit, ja samalla koko ytimen rakenneosat yhteen.



Vuorovaikutukset yhteiskuntatieteissä

Yhteiskuntatieteissä vuorovaikutuksella tarkoitetaan ihmisten sosiaalista kanssakäymistä sekä tapaa, jolla he vaikuttavat ja vastaavat toistensa toimintaan. Ihmisten keskinäistä vuorovaikutusta tarkastellaan muun muassa vuorovaikutteisen viestinnän kuten puheviestinnän tieteenalalla.

Vuorovaikutukset biologiassa

Pääartikkeli: Symbioosi

Kaikkein laajimmin ymmärrettynä symbioosilla voidaan viitata kaikkiin lajien välisiin vuorovaikutussuhteisiin, joista on haittaa enintään toiselle osapuolelle. Nämä suhteet luokitellaan tarkemmin neljään luokkaan:

- Mutualismi: molemmat osapuolet hyötyvät toisistaan (+,+ -suhde; vastaa yllä esitettyä suppeampaa symbioosin määritelmää) esim. herkkutatti ja mänty.
- Kommensalismi: toinen osapuoli hyötyy toisesta tuottamatta tälle kuitenkaan haittaa (+,0 -suhde) esim. jäkälä ja mänty.
- Amensalismi: toinen osapuoli aiheuttaa toiselle haittaa hyötymättä tästä kuitenkaan itse (0,- -suhde).
- Loisinta: loinen saa isännästään yksipuolista hyötyä (+,- -suhde) esim. kääpä ja koivu.

Viitteet

Sähkömagneettinen vuorovaikutus

Sähkömagneettinen vuorovaikutus (sähkövoima) on yksi standardimallin neljästä perusvuorovaikutuksesta. Se saa aikaan sähköiset ja magneettiset ilmiöt. Sen välittäjähiukkasia ovat fotonit.

Sähkömagneettisen vuorovaikutuksen tuntevat kaikki varatut hiukkaset. Jos niiden varaukset ovat keskenään samanmerkkiset, ne hylkivät toisiaan, mutta jos ne ovat erimerkkiset, hiukkaset vetävät toisiaan puoleensa. Jos sähköisesti varatut hiukkaset ovat liikkeessä toisiinsa nähden, niiden välillä vaikuttavat myös magneettiset voimat.

Vaikutuksia

Aineen perushiukkasista protonilla on positiivinen, elektronilla negatiivinen varaus. Niiden välinen sähköinen vetovoima pitää atomia koossa. Sähkömagneettinen vuorovaikutus saa eri tavoin aikaan myös kaikki atomien välillä vallitsevat kemialliset sidosvoimat, ja ne pitävät koossa myös molekyyliä ja kaikkia tunnettuja aineita.

Protonin ja elektronin välinen sähkömagneettinen vuorovaikutus on noin 10^{39} kertaa voimakkaampi kuin niiden välinen gravitaatiovuorovaikutus.^[1] Mutta makroskooppisissa kappaleissa ei yleensä ole nettosähkövarausta tai se on hyvin pieni. Sen vuoksi suurilla etäisyyksillä kappaleiden väliset sähköiset veto- ja poistovoimat kumoavat toisensa, ja esimerkiksi taivaankappaleiden liikkeisiin vaikuttaakin käytännössä yksinomaan gravitaatio. Kaksi muuta perusvuorovaikutusta, vahva ja heikko vuorovaikutus taas vaikuttavat vain hyvin lyhyillä etäisyyksillä, käytännössä vain atomiytimen sisällä.

Maxwellin yhtälöt

Klassisessa fysiikassa sähkömagneettiset ilmiöt kuvataan Maxwellin yhtälöiden avulla. Ne kuvaavat varausten ja sähkövirtojen aikaansaamia sähkö- ja magneettikenttiä ja sitä, miten ne liittyvät toisiinsa. Niistä seuraa myös sähkömagneettisten aaltojen mahdollisuus. On osoittautunut, että valokin muodostuu sähkömagneettisia aalloista, joiden aallonpituus on tietyllä välillä.

Kvanttikenttäteoria

Sähkömagneettisia vuorovaikutuksia kuvaava kvanttikenttäteoria on nimeltään kvanttielektrodynamiikka eli QED. Se on tarkin tunnettu fysikaalinen teoria. Sen ennuste elektronin magneettiselle momentille pitää paikkansa kymmenen numeron tarkkuudella. Klassisessa fysiikassa sähkömagneettiset ilmiöt kuvataan Maxwellin yhtälöiden avulla.

Kvanttielektrodynamiikka on muodoltaan kenttäteoria, joka on esikuvana monille muille kenttäteorioille, kuten kvanttiväridynamiikalle. QED:n suurin ansio on erään sen kehittäjän, Richard Feynmanin, mukaan nimetyt Feynmanin graafit. Ne antavat uuden tavan kuvata fysiikan ilmiöitä, nimittäin piirtämällä tutkittava reaktio saadaan sen vaikutusmatriisi muodostettua. Feynmanin graafit muodostuvat vertekseistä ja propagaattoreista, joihin jokaiseen liittyy tietty termi, ja seuraamalla kuvaajaa voidaan termejä asetella perättäin ja laskea vaikutusala eri reaktioille.

Toisen tai korkeamman kertaluvun graafien vaikutusala on suoraan laskettuna ääretön. Tämä ongelma on ratkaistu renormalisaatiolla. Renormalisaatiossa tulee laskea yhteen kaikki samaa kertalukua olevat graafit. Lisäksi teoreettisiin (paljaisiin) massoihin ja varauksiin täytyy lisätä korjaustermit, joilla säteilykorjauksia sisältävät fysikaaliset massat ja varaukset saavat mitatut arvonsa.

Lähteet

[1] Lukion fysiikka, s. 21

Kenttä (fysiikka)

Kenttä on fysikaalinen suure, jolla on arvo jokaisessa avaruuden pisteessä jokaisena ajan kohtana. Esimerkiksi sääennusteessa tuulen nopeutta jonakin päivänä jossakin maassa kuvataan vektorilla, joka saa arvonsa jokaisessa pisteessä. Jokainen vektori kuvaa ilman virtaussuuntaa kyseisessä pisteessä. Päivän kuluessa suunta, johon vektori missäkin kohdassa osoittaa, muuttuu tuulen suunnan muuttuessa.

Kentät voidaan ryhmitellä skalaarikenttiin, vektorikenttiin, spinorikenttiin ja tensorikenttiin riippuen siitä, onko kentän arvo kussakin pisteessä skalaari, vektori, spinori (esimerkiksi Diracin elektroni) tai yleisemmässä tapauksessa tensori. Esimerkiksi Newtonin fysiikan mukainen painovoimakenttä on vektorikenttä: sen arvon määrittäminen annetussa pisteessä tietynä aikana edellyttää kolmea lukua, jotka tarkoittavat gravitaation kenttävektorin komponentteja tässä muodossa. Lisäksi sekä skalaari-, vektori- ja tensorikentät voivat olla joko *klassisia kenttiä* tai *kvanttikenttiä* riippuen siitä, onko kentän arvona luku vai kvanttiteoreettinen operaattori.

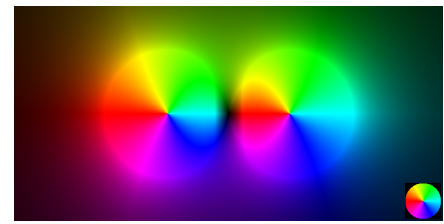
Kentän voidaan ajatella ulottuvan kaikkialle avaruuteen. Käytännössä jokaisen tunnetun kentän voimakkuus kuitenkin pienenee etäisyyden kasvaessa, kunnes sitä ei voida enää havaita. Esimerkiksi Newtonin gravitaatiolain mukaan gravitaatiokentän voimakkuus on kääntäen verrannollinen etäisyyteen sen aiheuttavasta kappaleesta. Tämän vuoksi Maan gravitaatiokenttä on kosmisessa skaalassa jo melko lähellä niin pieni, ettei sitä voida havaita.

Vaikka kentät määritellään lukuina avaruudessa, kaikki fysiikassa käytetyt kentät ovat jotakin fysikaalisesti todellista. "Se varaa tietyn tilan. Se sisältää energiaa. Sen läsnäolo eliminoi todellisen tyhjiyden.". Kenttä saa aikaan "olotilan avaruudessa", niin että kun sinne asetetaan jokin hiukkanen, siihen kohdistuu voima.

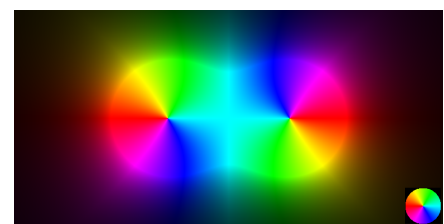
Jos sähkövaraus liikkuu, sen vaikutukset toiseen varaukseen eivät ilmene välittömästi. Jos ensimmäiseen varaukseen kohdistuu vastusvoima, joka vähentää sen liikemäärää, tämä muutos ei vaikuta toiseen varaukseen mitenkään, ennen kuin kentän muutos, joka etenee valonnopeudella, saavuttaa sen ja luovuttaa vastaavan liikemäärän sille. Missä liikemäärä on, ennen kuin toinen varaus saa sen? Liikemäärän säilymlain mukaan sen on oltava jossakin. Fysikot ovat havainneet "voimia analysoitaessa hyvin käyttökelpoiseksi" olettaa, että tänä väliaikana liikemäärä on kentällä.

Tämä kenttien käyttökelpoisuus saa fyysikot olettamaan, että sähkömagneettisia kenttiä on todella olemassa, mikä on tehnyt kentän käsitteestä koko modernin fysiikan perustavan paradigman. Tosin John Wheeler ja Richard Feynman ovat kehittäneet fysikaalisia malleja myös Newtonin kaukovaikutuksen käsitteen pohjalta, joka on peräisin ajalta, jolloin kenttiä ei vielä tunnettu, mutta he ovat itse jättäneet nämä teoriat taka-alalle, koska kentän käsite on yleisessä suhteellisuusteoriassa ja kvanttielektrodymanikassa edelleen käyttökelpoinen.

"Se seikka, että sähkömagneettisella kentällä voi olla liikemäärää ja energiaa, tekee siitä hyvin todellisen... Hiukkanen luo kentän ja kenttä vaikuttaa toiseen hiukkaseen, ja kentällä on sellaisia tuttuja ominaisuuksia kuin energiasisältö ja liikemäärä, aivan samoin kuin hiukkasillakin."



Sähkökentän suuruus ja suunta kahden samanmerkkisen, toisiaan hylkivän hiukkasen ympärille. Kirkkkaus kuvaa kentän voimakkuutta ja väri sen suuntaa.



Sähkökenttä kahden vastakkaismerkkisen, toisiaan puoleensa vetävän varauksen välillä.

Historia

Ensimmäinen fysiikassa käyttöön tullut kenttä oli painovoima- eli gravitaatiokenttä. Isaac Newtonille hänen yleinen vetovoimalakinsa ilmaisi yksinkertaisesti gravitaatiovoiman, joka vaikutti minkä tahansa kahden massallisen hiukkasen välillä. Myöhemmin 1700-luvulla otettiin käyttöön uusi käsite kaikkien näiden gravitaatiovoimien käsittelemiseksi. Tämä käsite, painovoimakenttä, osoitti avaruuden jokaisessa pisteessä kaikkien gravitaatiovoimien resultantin, joka vaikuttaa tähän pisteeseen sijoitettuun kappaleeseen. Tämä ei muuttanut fysiikkaa mitenkään: ei ole merkitystä sillä, lasketaanko ensin kaikki tiettyyn kappaleeseen kohdistuvat gravitaatiovoimat, jotka sitten lasketaan yhteen, vai lasketaanko muiden kappaleiden aiheuttamat gravitaatiovaikutukset ensin kenttinä yhteen ja vasta sitten sen vaikutus kyseisessä pisteessä olevaan kappaleeseen.

Kentän kehitys itsenäisenä käsitteenä alkoi toden teolla 1800-luvulla sähkömagnetismin teorian kehittyessä. Alkuvaiheessa André-Marie Ampère ja Charles Augustin de Coulomb tulivat toimeen Newtonin tyyllisillä laeilla, jotka osoittivat sähkövarausten ja sähkövirtojen väliset voimat. Pian tuli kuitenkin luonnollisemmaksi omaksua kenttiin perustuvaa lähestymistapa ja muotoilla nämä lait sähkö- ja magneettikenttien avulla: vuonna 1849 Michael Faraday otti ensimmäisenä käyttöön termin "kenttä" (engl. *field*).

Kentän itsenäinen luonne tuli ilmeisemmäksi, kun James Clerk Maxwell osoitti, että sähkömagneettinen kenttä voi muodostaa aaltoja, jotka etenevät äärellisellä nopeudella. Näin ollen varauksiin ja virtoihin vaikuttavat voimat eivät riipu ainoastaan toisten varausten ja virtojen sijainnista ja nopeudesta samalla hetkellä vaan myös niiden aikaisemmista sijainneista ja nopeuksista.

Aluksi Maxwell ei kuitenkaan omaksunut nykyaikaista käsitystä kentästä perustavana oliona, joka voi olla itsenäisesti olemassa. Sen sijaan hän esitti, että sähkömagneettinen kenttä on ilmaus jonkin kannattavan väliaineen, valoeetterin muodonmuutoksesta, joka on verrattavissa kumikalvon muodonmuutokseen siihen kohdistuvan jännityksen vaikutuksesta. Suora seuraus tästä hypoteesista oli, että sähkömagneettisten aaltojen havaitun nopeuden pitäisi riippua havaitsijan nopeudesta eetterin suhteen. Monista yrityksistä huolimatta tätä ei voitu osoittaa kokeellisesti, minkä lopulta selitti Albert Einsteinin erityinen suhteellisuusteoria vuonna 1905. Tämä teoria muutti käsitystä siitä, miten liikkuvien havaitsijoiden näkökulmat suhtautuvat toisiinsa, sillä tavoitiin että Maxwellin teorian mukaisten sähkömagneettisten aaltojen nopeus on sama kaikille havaitsijoille. Kun taustalla olevaa väliainetta ei enää tarvinnut olettaa, tämä kehitys teki fyysikoille mahdolliseksi käsitellä kentät todella itsenäisiksi olioiksi.

1920-luvun lopulla kehitettyjä kvanttimekaniikan lakeja sovellettiin ensimmäiseksi sähkömagneettisiin kenttiin. Vuonna 1927 Paul Dirac selitti kvanttikenttien avulla menestyksellisesti, miten atomin siirtyminen alempaan kvanttitilaan saa aikaan, että se emittoi spontaanisti sähkömagneettisen kentän kvantin eli fotonin. Pascual Jordanin, Eugene Wignerin, Werner Heisenbergin ja Wolfgang Paulin töiden ansiosta tämä johti pian oivallukseen, että kaikki hiukkaset, myös elektronit ja protonit, voidaan käsittää jonkin kvanttikentän kvanteiksi, mikä nosti kentät fysiikan perustavien olioiden asemaan.

Klassiset kentät

Klassiset kenttäteoriat ovat edelleen käyttökelpoisia tilanteissa, joissa kvantti-ilmiöt ovat merkityksettömiä, ja niitä tutkitaan edelleen. Materiaalien elastisuus, hydro- ja aerodynamiikka sekä Maxwellin yhtälöt ovat tästä esimerkkejä.

Eräitä yksinkertaisimpia kenttiä ovat voimia kuvaavat vektorikentät. Historiallisesti kentät tulivat ensimmäisen kerran vakavasti käyttöön, kun Faraday kuvasi sähkökenttiä voimaviivojen avulla. Myöhemmin myös gravitaatiokenttää kuvattiin samaan tapaan.

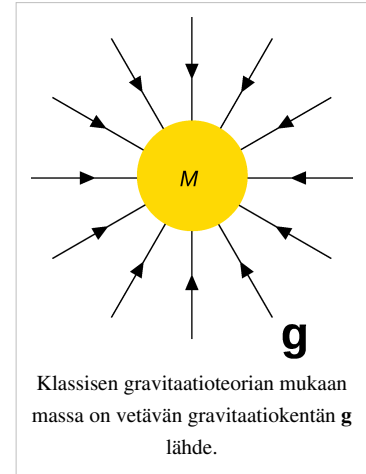
Gravitaatiokenttä

Painovoimaa kuvaava klassinen kenttäteoria on Newtonin gravitaatioteoria, joka kuvaa gravitaatiota kahden massan välisenä vuorovaikutuksena.

Jokainen massallinen kappale M muodostaa ympärilleen gravitaatiokentän \mathbf{g} , joka kuvaa sen vaikutusta muihin massallisiin kappaleisiin. Kappaleen M aikaansaama gravitaatiokenttä M avaruuden pisteessä \mathbf{r} saadaan määrittämällä voima \mathbf{F} , jolla kappale M vaikuttaa pisteeseen r sijoitettuun pieneen testimassaan m , ja jakamalla tämä voima m :llä:

$$\mathbf{g}(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{F}(\mathbf{r})}{m}.$$

Oletus, että m on paljon pienempi kuin M , merkitsee, että massan m vaikutus kappaleen M käyttäytymiseen on merkityksettömän pieni.



Newtonin gravitaatiolain mukaan voima \mathbf{F} määräytyy sijainnin \mathbf{r} funktiona seuraavasti:

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = -\frac{GMm}{r^2}\hat{\mathbf{r}},$$

missä $\hat{\mathbf{r}}$ on massan m sijaintipaikasta kohti massan M sijaintipaikkaa suuntautuva yksikkövektori. Sen vuoksi M :n aiheuttama gravitaatiokenttä on

$$\mathbf{g}(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{F}(\mathbf{r})}{m} = -\frac{GM}{r^2}\hat{\mathbf{r}}.$$

Kokeellisesti on osoitettu, että jokaisen kappaleen *hidas massa* ja *painava massa* ovat äärimmäisen suurella tarkkuudella yhtä suuret. Tämän vuoksi gravitaatiokentän voimakkuus voidaan samastaa sen kiihtyvyyden kanssa, jonka gravitaatiokenttä tietyssä pisteessä aiheuttaa mille tahansa kappaleelle. Tähän perustuu ekvivalenssiperiaate, joka johti yleiseen suhteellisuusteoriaan.

Koska gravitatiovoima \mathbf{F} on konservatiivinen, gravitaatiokenttä \mathbf{g} voidaan vaihtoehtoisesti muotoilla myös gravitaatiopotentiaalin $\Phi(\mathbf{r})$ gradientin avulla:

$$\mathbf{g}(\mathbf{r}) = -\nabla\Phi(\mathbf{r}).$$

Sähkömagnetismi

Pääartikkeli: Sähkömagnetismi

Michael Faraday havaitsi ensimmäisenä kentät fysikaalisesti tärkeiksi käsitteiksi tutkiessaan magnetismia. Hän havaitsi, että sähkö- ja magneettikentät eivät ole ainoastaan voimakenttiä, jotka ohjaavat hiukkasten liikettä, vaan ne ovat itsenäisiä fysikaalisia entiteettejä, joihin sisältyy energiaa.

Näiden ajatusten pohjalta James Clerk Maxwell loi myöhemmin fysiikan ensimmäisen yhdistetyn kenttäteorian muodostamalla sähkömagneettista kenttää kuvaavat yhtälöt, jotka nykyään tunnetaan Maxwellin yhtälöinä.

Sähköstatiikka

Pääartikkeli: Sähköstatiikka

Hiukkaseen, jolla on sähkövaraus q , kohdistuu voima \mathbf{F} , joka riippuu ainoastaan hiukkasen varauksesta. Samaan tapaan kuin edellä gravitaatiokentän tapauksessa, voidaan sähkökenttä \mathbf{E} määritellä siten, että $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$. Tämä yhdessä Coulombin lain kanssa osoittaa, että yhden varatun hiukkasen ympärilleen muodostama kenttä on

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{\mathbf{r}}.$$

Myös sähkökenttä on konservatiivinen, ja näin ollen se voidaan esittää myös skalaarisen potentiaalin $V(\mathbf{r})$ avulla:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -\nabla V(\mathbf{r}).$$

Sähkökentän kahden pisteen potentiaalien erotusta sanotaan näiden pisteiden väliseksi jännitteeksi.

Magnetostatiikka

Muuttumaton sähkövirta I , joka kulkee reittiä ℓ pitkin, kohdistaa lähellä oleviin varattuihin hiukkasiin voimia, jotka suuruudeltaan poikkeavat edellä kuvatuista sähkökentän aiheuttamista voimista. Voima, jonka virta I kohdistaa lähellä olevaan varaukseen q , joka liikkuu nopeudella \mathbf{v} ,

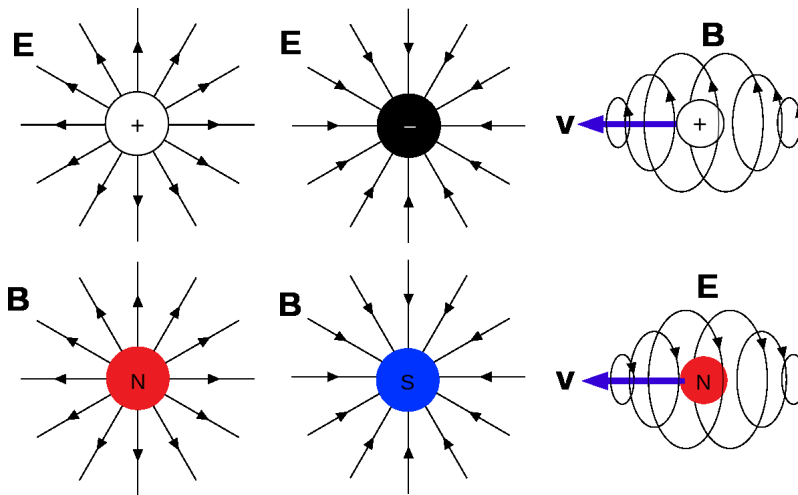
$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}(\mathbf{r}),$$

missä $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ on magneettikenttään liittyvä magneettivuon tiheys, joka Biot'n ja Savartin lain mukaan on

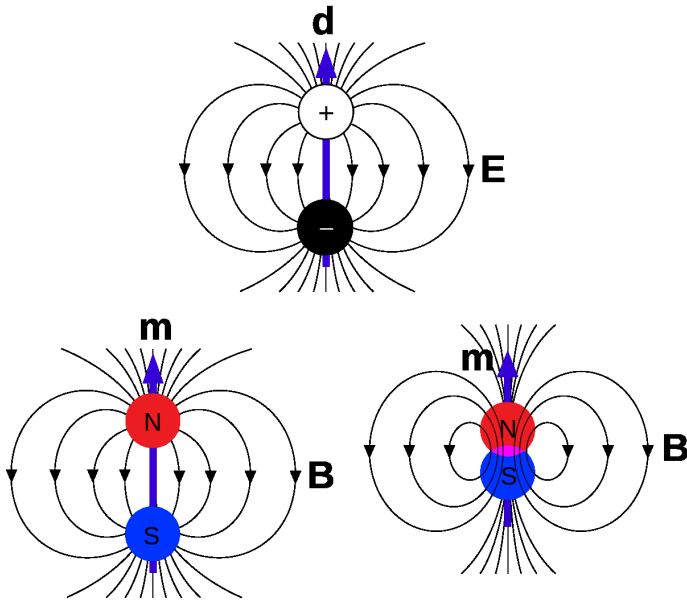
$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\boldsymbol{\ell} \times d\hat{\mathbf{r}}}{r^2}.$$

Magneettikenttä ei yleensä ole konservatiivinen, eikä sitä näin ollen tavallisesti voida kirjoittaa skalaaripotentialin avulla. Kuitenkin se voidaan kirjoittaa magneettisen vektoripotentialin $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ avulla seuraavasti:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \nabla \times \mathbf{A}(\mathbf{r})$$



Stationaarisen varauksen sähkökenttä ja stationaarisen magneettinavan magneettikenttä. Liikkuessaan (nopeudella \mathbf{v}) sähkövaraus muodostaa ympärilleen myös magneettikentän, kun taas magneettinapa muodostaa liikkuessaan ympärilleen myös sähkökentän.



Ylhäällä: Sähköisen dipolimomentin d sähkökenttä. **Alhaalla vasemmalla:** Matemaattisen magneettisen dipolin m kenttä olettamalla, että se muodostuisi kahdesta magneettisesta monopolista. **Alhaalla oikealla:** Todellisen magneetin magneettikenttä tavallisesta aineesta tehdyn magneetin ympärillä, missä monopoleja ei ole.

Sähkövarausten (musta/valkoinen) ja magneettinapojen aikaansaama sähkökenttä (E) ja magneettikenttä (B).

Elektrodynamiikka

Pääartikkeli: Elektrodynamiikka

Yleisesti siellä, missä esiintyy sekä varaustiheyttä $\rho(\mathbf{r}, t)$ että virrantiheyttä ja $\mathbf{J}(\mathbf{r}, t)$, on sekä sähkö- että magneettikenttä, ja molemmat muuttuvat ajan kuluessa. Niitä kuvaavat Maxwellin yhtälöt, ryhmä differentiaaliyhtälöitä, jotka osoittavat, miten kentät E ja B riippuvat varaus- ja virrantiheyksistä ρ ja \mathbf{J} .

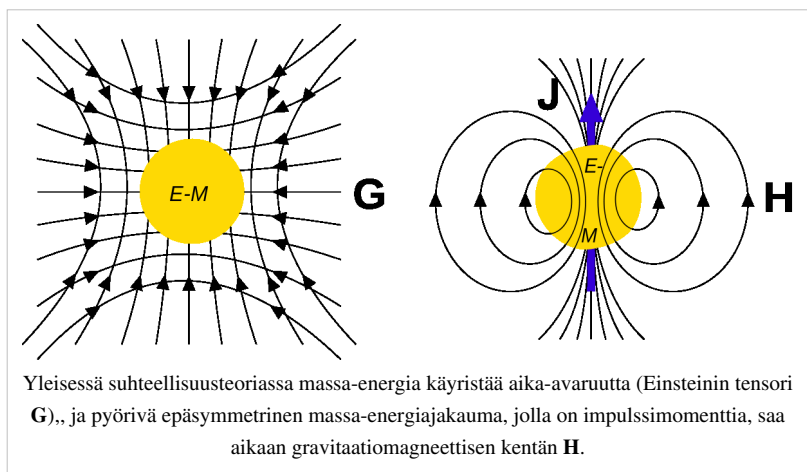
1800-luvun lopulla sähkömagneettisen kentän katsottiin muodostuvan kahdesta vektorikentästä avaruudessa. Nykyisin niitä pidetään yhtenä antisymmetrisenä toisen kertaluvun tensorikenttänä aika-avaruudessa (katso myös sähkömagnetismi suhteellisuusteoriassa).

Gravitaatio yleisessä suhteellisuusteoriassa

Einsteinin gravitaatioteoria eli yleinen suhteellisuusteoria on toinen esimerkki kenttäteoriasta. Siinä tärkein kenttä on metrinen tensori, joka on symmetrinen toisen kertaluvun tensorikenttä aika-avaruudessa. Tämä korvaa Newtonin yleisen gravitaatiolain.

Aallot kenttinä

Aaltoja voidaan käsitellä fysikaalisina kenttinä, koska niillä on yleensä äärellinen etenemisnopeus ja kausaalinen luonne. Niitä koskee myös käänteisen neliön laki.

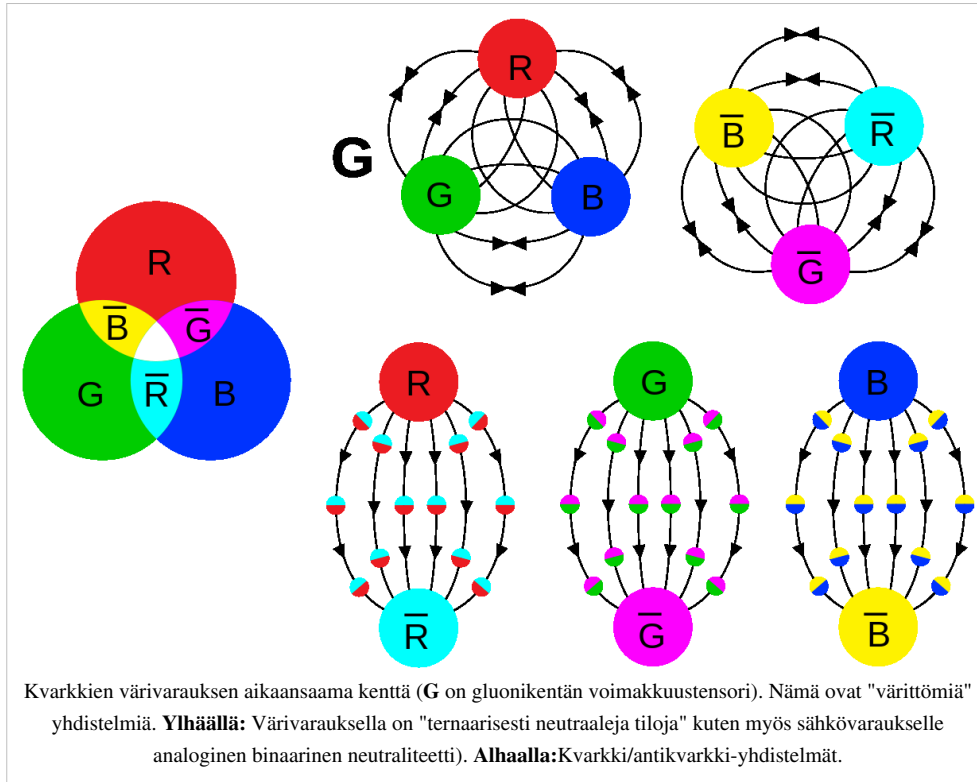


Yleisessä suhteellisuusteoriassa massa-energia käyristää aika-avaruutta (Einsteinin tensori G), ja pyörivä epäsymmetrinen massa-energiajakauma, jolla on impulssimomenttia, saa aikaan gravitaatiomagneettisen kentän H .

Kvanttikentät

Pääartikkeli: Kvanttikenttäteoria

Nykyisin uskotaan, että kvanttimekaniikka on kaikkien fysikaalisten ilmiöiden taustalla siten, että klassisen kenttäteorian pitäisi ainakin periaatteessa olla ilmaistavissa myös kvanttimekaniikan termein: tämä johtaa kutakin kenttää koskevaan kvanttikenttäteoriaan. Esimerkiksi klassisen elektrodynamiikan kvanttittaminen johtaa kvanttielektrodynamiikkaan. Kvanttielektrodynamiikkaa voidaan hyvin perustein pitää kaikkein menestyksellisimpänä tieteellisenä teoriaana: havainnot osoittavat sen ennusteet oikeiksi suuremmalla (useamman merkitsevän numeron) tarkkuudella kuin minkään muun teorian. Kaksi muuta perustavaa kvanttikenttäteoriaa ovat kvanttikromodynamiikka ja sähköheikon vuorovaikutuksen teoria.



Kvanttikromodymaniikassa värikentän kenttäviivoja kytkevät lyhyellä etäisyydellä toisiinsa gluonit, jotka kenttä polaroi. Tämä ilmiö voimistuu lyhyillä etäisyydellä, noin yhden femtometrin päässä kvarkista, mikä saa värivoiman lyhyellä etäisyydellä voimistumaan ja saa aikaan kvarkkien vankeuden hadronien sisällä. Koska gluonit vetävät kenttäviivat tiukasti yhteen, ne eivät kaarru ulospäin niin paljon kuin sähkövarausten välinen sähkökenttä.

Kaikki kolme kvanttikenttäteoriaa voidaan johtaa erikoistapauksena hiukkasfysiikan niin sanotusta standardimallista. Gravitaation kenttäteoriaa eli Einsteinin yleistä suhteellisuusteoriaa ei vielä ole onnistuneesti kvantitettu. Kuitenkin sille on olemassa laajennus, lämpökenttäteoria, joka sopii yhteen kvanttikenttäteorian kanssa *äärellisissä lämpötiloissa*, mitä kvanttikenttäteoriassa harvoin on otettu huomioon.

Kuten klassisia kenttäteorioita, voidaan kvanttikenttäteorioitakin samaan tapaan käsitellä puhtaasti matemaattisesti. Riippuen siitä, mitä kenttäyhtälöitä käytetään, voidaan puhua Yangin-Millsin, Diracin, Kleinin-Gordonin ja Schrödingerin kentistä. Vaikeuksia aiheuttaa, että yhtälöissä saattaa esiintyä monimutkaisia matemaattisia objekteja, joilla on erikoisia algebrallisia ominaisuuksia: esimerkiksi spinorit eivät ole tensoreita, joten niitä on käsiteltävä spinorikenttinä, mutta periaatteessa niitä voidaan sopivilla matemaattisilla yleistyksillä käsitellä analyttisin menetelmin.

Kenttäteoria

Kenttäteoriat ovat fysikaalisia teorioita, jotka kuvaavat, miten yksi tai useampi fysikaalinen kenttä vuorovaikuttaa aineen kanssa.

Yleensä kenttäteorioissa käytetään kentälle dynaamista mallia, joka osoittaa, miten kenttä muuttuu ajan kuluessa tai miten se riippuu muista fysikaalisista muuttujista. Tämä tehdään tavallisesti Lagrangen tai Hamiltonin funktion avulla ja soveltamalla klassista tai kvanttimekaniikkaa systeemin, jolla on äärettömän monta vapausastetta. Tuloksena saatavia kenttäteorioita sanotaan klassisiksi tai kvanttikenttäteorioiksi.

Klassisen kentän dynamiikan määrittää tavallisesti kentän komponenttien Lagrangen tiheys, jolloin dynamiikka saadaan soveltamalla vaikutusperiaatetta.

Yksinkertaisia kenttiä voidaan konstruoida tarvitsematta tuntea fysiikkaa ennalta, käyttämällä ainoastaan useamman muuttujan analyysia, potentiaaliteoriaa ja osittaisdifferentiaaliyhtälöistä. Skalaarikentissä esiintyviä suureita voivat olla esimerkiksi aaltofunktion amplitudi-, tiheys- ja painekentät virtausdynamiikassa taikka lämpötila- ja konsentraatiokentät lämpöopissa. Varsinaisen fysiikan ulkopuolella, kuten radiometriassa ja tietokonegrafiikassa, esiintyy myös valokenttiä.

Kaikki edellä mainitut ovat skalaarikenttiä. Vastaavalla tavalla vektorikenttiä voivat olla siirtymä-, nopeus- ja pyörteisyydentä sovelletussa matemaattisessa virtausdynamiikassa, mutta lisäksi voidaan tarvita vektorianalyysia. Yleisemmässä tapauksessa jatkuvan aineen mekaniikassa voidaan soveltaa esimerkiksi elastisuustensorikenttiä (joista on peräisin termi *tensori*, joka johtuu latinan *vääntymistä* tarkoittavasta sanasta), kompleksisiin virtauksiin tai anisotrooppiseen diffuusion, mikä yleensä edellyttää matriisilaskennan soveltamista. Modernissa fysiikassa useimmiten tutkitut kentät ovat ne, joilla mallinnetaan neljää perusvuorovaikutusta, mikä saattaa aikanaan johtaa yhtenäiseen kenttäteoriaan.

Kvanttikenttäteoriassa jokaista hiukkaslajia vastaa avaruuteen jakautunut kenttä. Mitä suurempi kentän amplitudi (arvo) on, sitä todennäköisempää on kyseisen hiukkasen muodostuminen tai tuhoutuminen. Kullekin hiukkasreaktiolle voidaan laskea todennäköisyys Feynmanin sääntöjen mukaan.

Jos kvanttikenttäteoriaan lisätään jokin mittasymmetria, voidaan ennustaa, millaisia vuorovaikutuksia systeemillä on. Sähkömagneettinen, heikko ja vahva vuorovaikutus osataan johtaa tällaisista kenttäteorioista.

Kenttien symmetria

Sekä klassisia että kvanttikenttiä voidaan luokitella symmetriaominaisuuksiensa mukaan. Symmetria voi merkitä ajallista ja avaruudellista symmetriaa taikka sisäistä symmetriaa.

Avaruudelliset ja ajalliset symmetriat

Kenttiä luokitellaan usein sen mukaan, miten ne käyttäytyvät aika-avaruuden muunnoksissa. Eri luokkia ovat:

- skalaarikentät (esimerkiksi lämpötila), joiden arvon ilmaisee yksi luku avaruuden kussakin pisteessä. Tämä arvo ei muutu avaruuden muunnoksissa.
- vektorikentät (esimerkiksi voiman suuruus ja suunta magneettikentän kussakin pisteessä), joiden arvon ilmaisee vektori avaruuden kussakin pisteessä. Vektorin komponentit muuntuvat tavanomaiseen tapaan avaruuden rotaatioissa.
- tensorikentät (esimerkiksi kiteen jännitys), joiden arvon ilmaisee tensori avaruuden kussakin pisteessä. Tensorin komponentit muuntuvat tavanomaiseen tapaan avaruuden rotaatioissa.
- spinorikenttiä käytetään kvanttikenttäteoriassa.

Sisäiset symmetriat

Aika-avaruudellisten symmetrioiden lisäksi kentillä voi olla sisäisiä symmetrioita. Esimerkiksi monissa tilanteissa tarvitaan kenttiä, jotka ovat ajassa ja avaruudessa vaihtelevien skalaarisuureiden luetteloja: $(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N)$. Esimerkiksi säänennustuksessa tällaisia voivat olla lämpötila, ilmanpaine, kosteus jne. Hiukkasfysiikassa kvarkkien välisen vuorovaikutuksen symmetrisyys värivaruksen suhteen on esimerkki vahvan vuorovaikutuksen sisäisestä symmetriasta. Vastaavia sisäisiä symmetrioita on isospinillä ja kvarkkien mauilla.

Jos johonkin probleemiin liittyy symmetria, jonka mukaisesti nämä komponentit voidaan muuntaa toisikseen ja joka ei koske aikaa ja avaruutta, tällaista symmetrioiden joukkoa sanotaan *sisäiseksi symmetriaksi*. Myös kenttien varaukset voidaan luokitella sisäisten symmetrioiden mukaan.

Statistinen kenttäteoria

Statistisessa kenttäteoriassa yritetään laajentaa kenttäteoreettista paradigmaa monen kappaleen systeemeihin ja statistiseen mekaniikkaan. Kuten edellä, voidaan käyttää tavanomaista äärettömän moneen vapausasteeseen perustuvaa lähestymistapaa.

Samoin kuin statistinen mekaniikka on osittain päällekkäin klassisen ja kvanttimekaniikan kanssa, myös statistisella kenttäteorialla on yhtymäkohtia sekä kvantti- että klassiseen kenttäteoriaan, joista varsinkin edellisen kanssa sillä on monia yhteisiä metodeja. Muuan huomattava esimerkki tästä on keskikenttäteoria

Jatkuvat satunnaiskentät

Edellä kuvatun kaltaiset klassiset kentät kuten sähkömagneettinen kenttä ovat tavallisesti äärettömän monta kertaa derivoituvia funktioita ja lähes kaikissa tapauksissa ainakin kaksi kertaa derivoituvia. Sitä vastoin yleistetyt funktiot eivät ole jatkuvia. Kun klassisia kenttiä tutkitaan tarpeeksi tarkasti äärellisessä lämpötilassa, käytetään jatkuvien satunnaiskenttien matemaattisia metodeja, koska termiset fluktuatiot eivät ole missään derivoituvia. *Satunnaiskentät* ovat satunnaismuuttujien indeksoituja joukkoja; jatkuva satunnaiskenttä on satunnaiskenttä, jonka indeksijoukon muodostavat funktiot.

Jatkuva satunnaiskenttä voidaan hyvin karkeasti käsittää tavalliseksi funktioksi, jonka arvo on $\pm\infty$ melkein kaikkialla, mutta siten, että jokaisessa äärellisessä alueessa sille voidaan määrittää painotettu keskiarvo, joka on äärellinen. Äärettömyydet eivät ole hyvin määriteltyjä, mutta äärelliset arvot voidaan yhdistää funktioihin, joita käytetään painokertoimina äärellisten arvojen saamiseksi, ja ne voivat olla hyvin määriteltyjä. Jatkuva satunnaiskenttä voidaan käytännössä määritellä myös lineaarikuvauksena funktioavaruudesta reaalityökalujen joukkoon.

Lähteet

Kvanttisähködynamikka

Kvanttisähködynamikka (QED) on sähkömagnetismin relativistinen kvanttikenttäteoria. QED kuvaa sähköisesti varattujen hiukkasten vuorovaikutustapahtumat, jotka tapahtuvat fotonien välityksellä. Sitä sanotaan usein "fysiikan helmeksi", koska se kuvaa äärimmäisen tarkasti elektronin anomaalisen magneettimomentin arvon ja vedyn energiatasojen Lambin siirtymän.

Teoriaa QED:stä olivat kehittäneet Richard Feynman, Julian Schwinger ja Shin'ichirō Tomonaga.

Matematiikka

Matemaattisesti kvanttielektrodynamiikan rakenne on abelinen mittakenttäteoria, jonka symmetriaryhmänä toimii $U(1)$ mittaryhmä. Mittakenttä, joka kuljettaa varattujen spin-1/2-kenttien välisen vuorovaikutuksen on sähkömagneettinen kenttä. QED:n Lagrangen tiheys elektronin ja positronin väliselle fotonien kuljettamalle vuorovaikutukselle on muotoa

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}.$$

missä

γ_μ ovat Diracin matriiseja.

ψ ja sen Diracin adjointti $\bar{\psi}$ ovat kenttiä, jotka esittävät sähköisesti varattuja hiukkasia, erityisesti elektronin ja positronin kentät esitetään Diracin spinoreina.

$D_\mu = \partial_\mu + ieA_\mu$ on mittakovariantti derivaatta, missä e on kytkennän voimakkuus (sama kuin alkeisvaraus),

A_μ on sähkömagneettisen kentän kovariantti nelipotentiali ja

$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$ on sähkömagneettisen kentän tensori.

Eulerin-Lagrangen yhtälöt

Laita D Lagrangen tiheyteen nähdäksesi, että L on

$$\mathcal{L} = i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi - e\bar{\psi}\gamma_\mu A^\mu\psi - m\bar{\psi}\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}. \quad (1)$$

Tämä Lagrangen tiheys voidaan laittaa Eulerin-Lagrangen yhtälöön

$$\partial_\mu \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial(\partial_\mu \psi)} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \psi} = 0. \quad (2)$$

jotta löydetään QED:n kenttäyhtälöt.

Nämä kenttäyhtälöt ovat

$$\begin{aligned} \partial_\mu \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial(\partial_\mu \psi)} \right) &= \partial_\mu (i\bar{\psi}\gamma^\mu) \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \psi} &= -e\bar{\psi}\gamma_\mu A^\mu - m\bar{\psi} \end{aligned}$$

Laittamalla nämä kaksi takaisin Eulerin-Lagrangen yhtälöön (2), jolloin saadaan

$$i\partial_\mu \bar{\psi}\gamma^\mu + e\bar{\psi}\gamma_\mu A^\mu + m\bar{\psi} = 0$$

ja kompleksikonjugaatti

$$i\gamma^\mu\partial_\mu\psi - e\gamma_\mu A^\mu\psi - m\psi = 0.$$

Jos keskimäinen termi laitetaan oikealle puolelle, saadaan:

$$i\gamma^\mu \partial_\mu \psi - m\psi = e\gamma_\mu A^\mu \psi$$

Vasemmanpuoleinen on kuten alkuperäinen Diracin yhtälö ja oikeanpuoleinen on vuorovaikutus sähkömagneettisen kentän kanssa.

Yksi tärkeä yhtälö saadaan laittamalla Lagrangen tiheys Eulerin-Lagrangen yhtälöön, tällä kertaa kentälle A^μ :

$$\partial_\nu \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\nu A_\mu)} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial A_\mu} = 0. \quad (3)$$

Tällä kertaa kaksi termiä ovat

$$\begin{aligned} \partial_\nu \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\nu A_\mu)} \right) &= \partial_\nu (\partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu) \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial A_\mu} &= -e\bar{\psi}\gamma^\mu\psi \end{aligned}$$

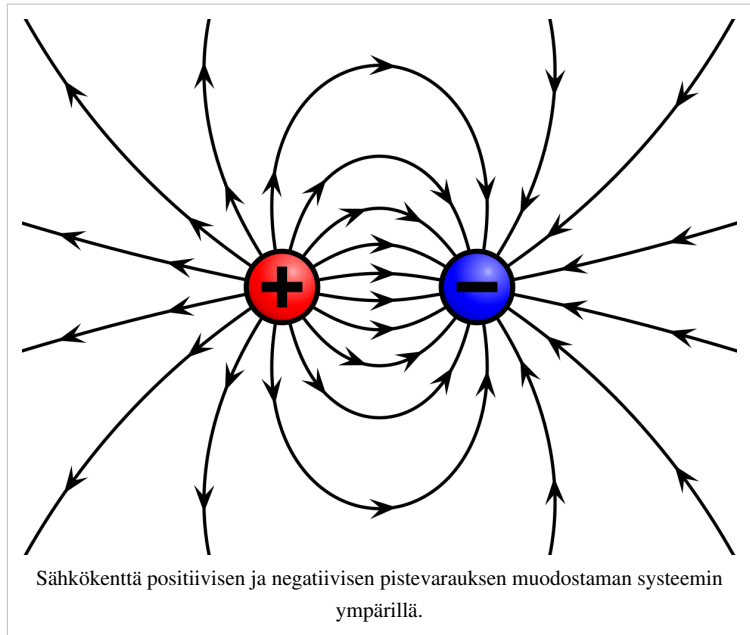
Nämä termit laittamalla takaisin yhtälöön (3) saadaan

$$\partial_\nu F^{\nu\mu} = e\bar{\psi}\gamma^\mu\psi$$

Lähteet

Sähkövaraus

Sähkövaraus eli **sähkömäärä** (tunnus Q) on aineen tai hiukkasen ominaisuus, joka ilmenee siten, että se vaikuttaa voimalla toisiin lähellä oleviin sähkövarauksellisiin kappaleisiin. On olemassa kahdenlaista sähkövarausta, joita sanotaan positiiviseksi ja negatiiviseksi sähköksi. Positiivisesti varautuneita kappaleet työntävät luotaan toisia positiivisesti varautuneita kappaleita, mutta vetävät puoleensa negatiivisesti varautuneita kappaleita; negatiivisesti varautuneet kappaleet taas vetävät puoleensa positiivisesti varautuneita ja työntävät luotaan toisia negatiivisesti varautuneita kappaleita.



Sähkövarauksen yksikkö SI-järjestelmässä

on coulombi (C). Fysiikan kaavoissa varauksen tunnuksena käytetään yleensä kirjainta Q .

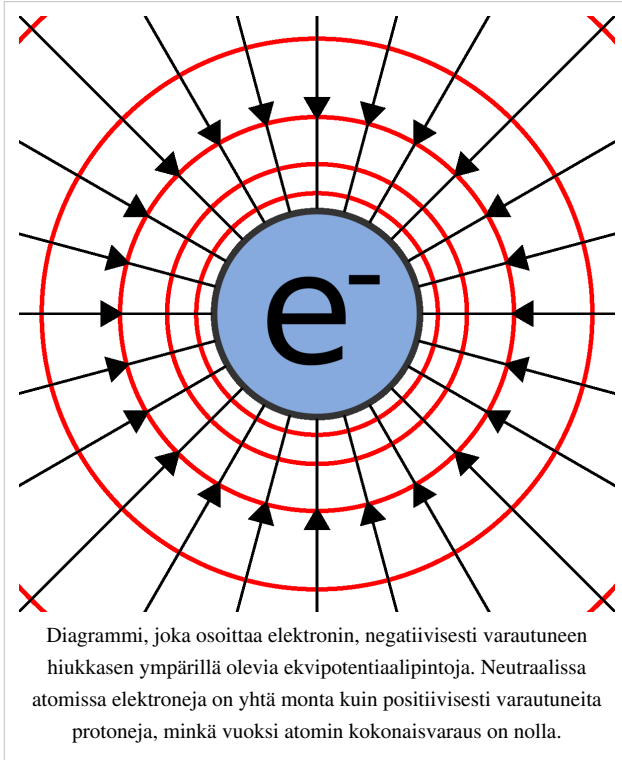
Klassinen elektrodynamiikka tutkii sitä, miten sähköisesti varautuneet kappaleet vuorovaikuttavat keskenään. Se pätee tilanteissa, joissa kvanttimekaanisia ilmiöitä ei tarvitse ottaa huomioon. Alkeishiukkasten välisiä sähkömagneettisia vuorovaikutuksia, joita välittävät fotonit, tutkii kvanttielektrodynamiikka.

Sähkövaraus on eräiden alkeishiukkasten perusominaisuus, joka kuvaa sitä, millä tavoin hiukkaset osallistuvat sähkömagneettiseen vuorovaikutukseen. Sähkövarausta koskee yleinen säilymislaki.

Robert Millikan osoitti vuonna 1909 lopullisesti, että sähkövaraus on kvantittunut suure, toisin sanoen on olemassa tietty pienin mahdollinen sähkövaraus, jota sanotaan alkeisvaraukseksi (e), suuruudeltaan noin $1,602 \cdot 10^{-19}$ C, ja

jonka monikertoja kaikki havaitut sähkövaraukset aina ovat.^[1] Esimerkiksi protonin varaus on $+e$, elektronin $-e$. Myöhemmin on kuitenkin ilmennyt, että kvarkkien varaus on alkeisvarauksen kolmasosia, mutta kvarkit eivät koskaan esiinny irrallisina.

Yleistä



Varaus on sellaisten aineen muotojen perusominaisuus, joiden välillä ilmenee sähköstaattisia voimia.

Sähkövaraus on monille alkeishiukkasille tyypillinen ominaisuus. Kaikkien vapaina esiintyvien hiukkasten varaus on alkeisvarauksen e monikerta. Michael Faraday päätyi jo 1800-luvulla elektrolyysia koskevien tutkimustensa perusteella siihen, että sähkövaraus esiintyy vain erään perusyksikön monikertoina. Robert Millikan vahvisti tämän vuonna 1913 öljypisaralla suorittamallaan kokeilla ja samalla myös mittasi alkeisvarauksen suuruuden. Esimerkiksi protonin varaus on $+1 e$ ja elektronin $-1 e$. Kvarkkien varaus on kuitenkin $+2/3 e$ tai $-1/3 e$, mutta vapaita kvarkkeja ei ole koskaan havaittu, minkä ilmiön teoreettinen selitys on asymptoottinen vapaus.

Sopimuksen mukaan protonin varausta sanotaan positiiviseksi ($+1 e$) ja elektronin varausta negatiiviseksi ($-1 e$). Varaukselliset hiukkaset, joiden varaus on samanmerkkinen, työntävät toisiaan luotaan,

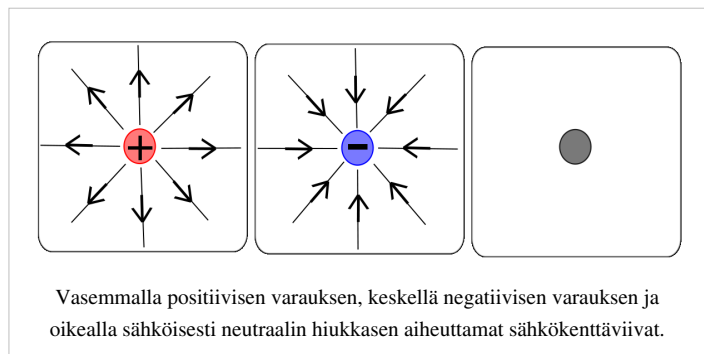
kun taas hiukkaset, joiden varaus on vastakkaismerkkinen, vetävät toisiaan puoleensa. Coulombin lain mukaan tämä voima on suoraan verrannollinen varausten tuloon ja kääntäen verrannollinen niiden välimatkan neliöön. Tämän vuorovaikutuksen välittäjänä on sähkövarausta ympäröivä sähkökenttä.

Makroskooppisen kappaleen varaus on yhtä suuri kuin siinä olevien hiukkasten varausten summa. Se on yleensä pieni, koska aine on muodostunut atomeista, joissa elektroneja on yleensä yhtä monta kuin protoneja, minkä vuoksi niiden varaukset kumoavat toisensa ja atomin kokonaisvaraus on nolla.

Ioni on atomi tai atomiryhmä, joka on luovuttanut elektroneja, jolloin se on positiivisesti varautunut kationi taikka vastaanottanut lisää elektroneja, jolloin se on negatiivisesti varautunut anioni. Yksiatomiset ionit ovat muodostuneet vain yhdestä atomista, moniatomiset eli kompleksi-ionit sen sijaan useammasta atomista, kuitenkin siten, että ionissa on yhteensä eri määrä elektroneja kuin sinä olevien atomien ytimissä on protoneja.

Kun atomit tai ionit sitoutuvat toisiinsa muodostaen makroskooppisia kappaleita, ne pyrkivät muodostamaan sähköisesti neutraaleja rakenteita. Tämän vuoksi makroskooppisten kappaleiden sähkövaraus on yleensä pieni, mutta harvoin tarkalleen nolla.

Joissakin makroskooppisissa kappaleissa on kaikkialla ioneja sillä tavoin, että koko kappaleella on positiivinen tai negatiivinen



nettovaraus. Sähköä johtavat aineet voivat myös melko helposti luovuttaa tai vastaanottaa elektroneja ja saada tällä tavoin positiivisen tai negatiivisen varauksen. Kun kappaleen sähkövaraus on nolasta poikkeava ja liikkumaton, siinä sanotaan olevan staattista sähköä.

Staattista sähköä saadaan helposti aikaan hankaamalla kahta eri ainetta vastakkain, esimerkiksi meripihkaa turkisnahalla tai lasia silkillä. Tällä tavoin sähköä johtamattomiin aineisiin voidaan saada merkittävä sähkövaraus. Ellei varaus kummastakaan kappaleesta pääse virtaamaan pois, kumpaankin muodostuu yhtä suuri, mutta vastakkaismerkkinen varaus, sillä varauksen säilymlaki pätee kaikissa ilmiöissä.

Metallit eivät tule hankaamalla sähköisiksi. Mutta niihinkin voidaan saada sähkövaraus esimerkiksi kytkemällä ne jännitelähteen napoihin. Kun kondensaattori kytketään jännitelähteeseen, sen toiseen levyyn tulee positiivinen, toiseen yhtä suuri negatiivinen varaus. Tämän varauksen suuruus saadaan jakamalla jännite kondensaattorin kapasitanssilla.

Vaikka kappaleen kokonaisvaraus olisi nolla, varaus voi kappaleen sisällä olla jakautunut epätasaisesti, esimerkiksi ulkoisen sähkökentän tai polaaristen molekyylien vuoksi. Tällaisissa tapauksissa kappaleen sanotaan olevan polaroitunut. Polarisoitumisesta johtuvaa varausta sanotaan *sidotuksi varaukseksi*, kun taas varausta, joka johtuu siitä, että kappale on luovuttanut tai vastaanottanut elektroneja, sanotaan *vapaaksi varaukseksi*.

Kun varaus on liikkeessä, sen ympärille muodostuu sähkökentän lisäksi myös magneettikenttä. Magneettikentästä aiheutuvat voimat vaikuttavat liikkuviin, mutta eivät paikallaan oleviin varauksiin.^[2] Sähkö- ja magneettikenttä yhdessä muodostavat sähkömagneettisen kentän; miten se jakautuu sähkö- ja magneettikentäksi, riippuu kuitenkin havaitsijan liiketilasta ja käytetystä koordinaatistosta.^[3]

Yksiköt

SI-järjestelmässä sähkövarauksen yksikkö on coulombi (C), joka on noin $6,242 \cdot 10^{18}$ kertaa alkeisvarauksen suuruinen. Täten elektronin varaus on noin $1,602 \cdot 10^{-19}$ coulombia. Coulombi määritellään varaukseksi, joka kulkee sähköjohtimessa poikkipinnan läpi yhdessä sekunnissa, kun siinä kulkee yhden ampeerin sähkövirta. Sähkövaraukselle käytetään yleisesti tunnusta Q . Sähkövaraus voidaan suoraan mitata elektrometrilla, epäsuorasti myös galvanometrilla.

Kun oli todettu, että sähkövaraus esiintyy vain tietyn pienimmän varauksen monikertoina, George Stoney ehdotti vuonna 1891 tälle varauksen perusyksikölle nimeä *elektroni*. Sana tuli myöhemmin käyttöön J. J. Thomsonin löytämän hiukkasen nimenä, jolla on tämän suuruinen negatiivinen varaus. Varsinkin kemiassa elektronin varauksen itseisarvoa eli alkeisvarausta käytetään usein varauksen yksikkönä.

Eräillä sähköteknisillä aloilla kuten akkujen kapasiteetin mittaauksessa varauksen yksikkönä käytetään ampeerituntia (Ah). Yksi ampeeritunti on 3600 coulombia.

Staattinen sähkö ja sähkövirta

Staattinen sähkö ja sähkövirta ovat kaksi eri ilmiötä, joista kumpaankin sähkövaraus liittyy, mutta ne voivat samaan aikaan esiintyä samassakin kappaleessa. Kun kappaleessa on staattista sähköä, vallitsee epätasapaino, joka pyrkii purkautumaan sähköpurkauksena. Sähköpurkauksessa molempien kappaleiden varaus muuttuu. Sähkövirta sen sijaan on sähkövarauksen liikettä kappaleen läpi, eikä se muuta sen kappaleen sähkövarausta, jonka läpi se kulkee.

Yleisimpiä varauksellisia hiukkasia ovat positiivisesti varaukselliset protonit ja negatiivisesti varaukselliset elektronit. Varauksellisten hiukkasten liike on sähkövirtaa. Monissa tilanteissa ei ole merkitystä sillä, oletetaanko positiivisten varausten liikkuvan tiettyyn suuntaan vai negatiivisten varausten liikkuvan päinvastaiseen suuntaan. Tämä makroskooppinen näkökanta yksinkertaistaa monia sähkömagnetismin liittyviä käsitteitä ja laskuja.

Mikroskooppiselta kannalta on monia tapoja, joilla sähkövirta voi muodostua. Metalleissa se on elektronien liikettä. Mutta esimerkiksi eräissä puolijohteissa voi olla elektronin vajauksia eli "aukkoja", jotka käyttäytyvät monessa suhteessa ikään kuin ne olisivat positiivisesti varautuneita hiukkasia, jolloin sähkövirta on niiden liikettä.

Elektrolyytissä ja plasmassa sähkövirta on positiivisten ja negatiivisten ionien liikettä.

Sovitun määritelmän mukaan sähkövirran suunnaksi katsotaan se suunta, johon positiivisen varauksen voidaan ajatella liikkuvan. Tämä voi kuitenkin aiheuttaa sekaannusta, sillä käytännössä tärkeimmässä tapauksessa eli metallijohtimissa sähkövirta on negatiivisesti varauksellisten elektronien liikettä, ja niiden liikesuunta on päinvastainen kuin virran suunta.

Hankaussähkö

Hankaussähköä voidaan tutkia esimerkiksi seuraavilla kokeilla.

Hangataan toisiaan vasten lasikappaletta ja pihkakappaletta, joista kummassakaan ei ilmene sähköisiä ominaisuuksia, ja jätetään ne hankaamisen jälkeen toisiinsa kiinni. Edelleenkin niissä ei ilmene sähköisiä ominaisuuksia. Mutta jos ne otetaan irti toisistaan, ne vetävät toisiaan puoleensa.

Jos toista lasikappaletta hangataan toisella pihkakappaleella, otetaan sen jälkeen kappaleita toisistaan irti ja viedään ne lähelle ensin hangattuja kappaleita, voidaan todeta:

1. molemmat lasikappaleet työntävät toisiaan luotaan
2. kumpikin pihkakappale vetää puoleensa kumpaakin lasinpalaa
3. molemmat pihkakappale työntävät toisiaan luotaan.

Näitä veto- ja työntövoimia kutsutaan sähköisiksi ilmiöiksi, ja kappaleita, joissa ne ilmenevät, sanotaan sähköisiksi tai sähkövarauksellisiksi.

Molempien lasikappaleiden sähköiset ominaisuudet ovat samanlaisia, mutta päinvastaiset kuin pihkakappaleiden ominaisuudet: lasi vetää puoleensa sitä, mitä pihka työntää luotaan ja päinvastoin.

Jos millä tavalla tahansa sähköiseksi tehty kappale toimii samoin kuin lasikappale, siis työntää luotaan lasia ja vetää puoleensa pihkaa, siinä voidaan sanoa olevan *lasisähköä*. Päinvastaisessa tapauksessa on kyseessä *hartsisähkö*. Kaikki sähkövaraukselliset kappaleet ovat joko lasi- tai hartsisähköisiä.

Lasisähköä sanotaan vakiintuneen käytännön mukaisesti positiiviseksi, hartsisähköä negatiiviseksi sähköksi. Näiden sähköisten tilojen täysin vastakkaiset ominaisuudet ovat antaneet aiheen antaa niille vastakkaiset etumerkit, mutta se, että positiivinen etumerkki on annettu lasisähkölle, perustuu sinänsä täysin mielivaltaiseen sopimukseen.

Sähkövarauksellisen ja varauksettoman kappaleen välillä ei vallitse vetäviä eikä työntäviä voimia.^[4]

Sähkövaraus suhteellisuusteoriassa

Suhteellisuusteorian mukaan sähkövaraus on invariantti, eli se ei riipu havaitsijan liiketilasta eikä käytetystä koordinaatistosta. Tämä merkitsee, että hiukkasella on aina sama sähkövaraus, liikuipa se millä nopeudella tahansa.^[5]

Varauksen säilymlaki

Eristetyn systeemin sähkövaraus pysyy vakiona riippumatta siitä, mitä muutoksia sen sisällä tapahtuu. Tämä laki pätee kaikissa fysiikan tuntemissa ilmiöissä, ja se voidaan teoreettisesti johtaa fysikaalisten suureiden invarianssista kvanttielektrodynaamisessa mittamuunnoksessa.

Muissa ilmiöissä kuin ydin- ja hiukkasreaktiossa varauksen säilyminen seuraa jo siitä, että sekä protonin että elektronin varaus on vakio, eikä kumpikaan synny eikä häviä, vaan ne vain siirtyvät paikasta toiseen. Mutta esimerkiksi beetahajoamisessa neutroni hajoaa protoniksi, elektroniksi ja antineutriinoksi. Silti tässäkin ilmiössä kokonaisvaraus säilyy, sillä neutronin samoin kuin antineutriinon varaus on nolla, protonin +1 ja elektronin -1 alkeisvarausyksikköä. Yleensäkin varauksen säilymlaki pätee myös kaikissa tunnetuissa hiukkasreaktioissa.

Sähkövarauksen säilyminen seuraa myös varauksen ja virran välisestä jatkuvuusyhtälöstä. Yleisemmin tietyn tilavuuden V yli integroidun varaustiheyden muutos on yhtä suuri kuin virrantiheyden J integraali saman alueen

rajapinnan S yli, ja kumpikin integraali on yhtä suuri kuin pinnan läpi kulkeva nettomääräinen sähkövirta I :

$$-\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = \oint_{\partial V} \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = \int J dS \cos \theta = I.$$

Täten sähkövarauksen säilyminen voidaan ilmaista myös jatkuvuusyhtälöllä seuraavasti:

$$I = \frac{dQ}{dt}.$$

Tietyssä ajassa paikasta toiseen kulkenut sähkövirta hetkien t_i ja t_f välisenä aikana saadaan integroimalla molemmat puolet:

$$Q = \int_{t_i}^{t_f} I dt$$

missä I on suljetun pinnan läpi kulkeva nettomääräinen sähkövirta ja Q pinnan rajoittamalla alueella oleva sähkövaraus.

Osittaisvaraus

Molekyylissä olevalla atomilla sanotaan olevan *osittaisvarausta*, kun atomin ympärillä on eri suuruinen elektronitiheys kuin samalla neutraalilla atomilla olisi yksinään. Esimerkiksi hiilidioksidin (CO_2) hiiliatomi vetää yhteisiä sidoselektroneja puoleensa heikommin kuin happiatomit, joten sen osittaisvaraus on positiivinen (merkitään $+\delta$). Happiatomien osittaisvaraukset ovat hiilidioksidissa negatiiviset ($-\delta$). Toisaalta esimerkiksi happimolekyylissä (O_2) elektronit jakautuvat atomien kesken tasan, joten siinä ei esiinny osittaisvarauksia.

Ulkoisessa sähkökentässä dielektrinen aine polarisoituu eli sen molekyyliden varaukset siirtyvät sähkökentän vaikutuksesta niin, että ulkoinen kenttä heikkenee materiaalin sisällä. Sähköjohteissa taas elektronit asettuvat ulkoisen sähkökentän vaikutuksesta metallin pinnalle siten että metallin sisällä sähkökenttä häviää.

Viitteet

- [1] Kaarle Kurki-Suonio: Vuorovaikutuksesta kenttiin, Sähkömagnetismin perusteet, Limes 1993, ISBN 951-745-155-5
- [2] Leena Lahti, s. 80
- [3] Leena Lahti, s. 177-178
- [4] James Clerk Maxwell *A Treatise on Electricity and Magnetism*, pp. 32-33, Dover Publications Inc., 1954 ASIN: B000HFDK0K, 3rd ed. of 1891
- [5] Leena Lahti, s. 176

Hiukkasfysiikan standardimalli

Hiukkasfysiikan standardimalli on hiukkasfysiikan teoria, joka kuvaa heikon, vahvan ja sähkömagneettisen vuorovaikutuksen sekä alkeishiukkaset, joista aine pohjimmiltaan koostuu. Vuosina 1970–1973 kehitetty standardimalli on kvanttikenttäteoria, ja sopusoinnussa kvanttimekaniikan sekä suppean suhteellisuusteorian kanssa. Toistaiseksi neutriino-oskillaatiota lukuun ottamatta ei ole löydetty kokeellisia tuloksia, jotka olisivat ristiriidassa standardimallin ennusteiden kanssa. Standardimalli ei kuitenkaan ole kaiken teoria, sillä siihen ei toistaiseksi ole onnistuttu yhdistämään neljättä perusvuorovaikutusta, gravitaatiota.

Standardimalli

Standardimalli sisältää alkeishiukkasista sekä fermionit että bosonit. Fermionit ovat hiukkasia joiden spin on puoliluku ($1/2$, $3/2$ jne...) ja siksi tottelevat Paulin kieltoääntöä, jonka mukaan kaksi fermionia ei voi olla samassa kvanttitallassa. Bosonien spin on kokonaisluku eivätkä ne noudata Paulin kieltoääntöä. Yksinkertaistetusti sanottuna fermionit ovat ainehiukkasia ja bosonit välittäjähiukkasia.

Standardimallissa yhdistetään sähkömagneettisen ja heikon vuorovaikutuksen kuvaava teoria sähköheikosta vuorovaikutuksesta ja vahvan vuorovaikutuksen kuvaava kvanttikenttäteoria, kvanttikromodynamiikka. Nämä teoriat ovat mittateorioita, eli ne kuvaavat fermionien välillä vaikuttavia voimia voiman välittävän bosonin (mittabosonin) avulla. Standardimallin bosonit ovat:

- ftoni, sähkömagneettisen vuorovaikutuksen välittäjä,
- W-bosonit ja Z-bosoni, heikon vuorovaikutuksen välittäjät,
- kahdeksan erityyppistä gluonia eli vahvan vuorovaikutuksen välittäjää sekä
- Higgsin bosonit, jotka aiheuttavat muiden hiukkasten massan.

Osoittautuu, että mittabosonien mittamuunnokset voidaan kuvata täsmällisesti *mittaryhmäksi* kutsutun unitaarisen ryhmän avulla. Vahvan vuorovaikutuksen mittaryhmä on SU(3) ja sähköheikon vuorovaikutuksen SU(2)×U(1). Siten standardimalli pohjautuu yhdistettyyn sisäiseen symmetriaan SU(3)×SU(2)×U(1), joista ensimmäinen kuvaa värivoimaa ja kaksi viimeistä yhdessä heikkoja ja sähkömagneettisia vuorovaikutuksia. Sähköheikko symmetria on rikkoutunut siten, että sähkömagneettiseen vuorovaikutukseen liittyvä symmetria jää tarkaksi jäännössymmetriaksi ja täten sähkömagneettista vuorovaikutusta välittävä ftoni on massaton. Heikkoa vuorovaikutusta välittävät hiukkaset puolestaan saavat massan symmetriarikossa, josta on vastuussa Higgsin bosoni, teorian ainoa bosoni joka ei ole mittabosoni. Higgsin hiukasta ei ole toistaiseksi havaittu kokeellisesti, ja sen löytäminen on kokeellisen fysiikan suurimpia tavoitteita. Heinäkuussa 2012 CERNin tutkijat ilmoittivat löytäneensä uuden bosonin, jonka ominaisuudet sopivat hyvin yhteen standardimallin ennustaman Higgsin bosonin kanssa.

Kolme perheen aineen (Fermionit)

	I	II	III	
massa →	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0
varaus →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nimi →	u ylös	c lumo	t huippu	γ fotoni
	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Kvarkit	d aalas	s outo	b pohja	g gluoni
	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e elektronin neutriino	ν_μ myonin neutriino	ν_τ taun neutriino	Z⁰ Z-bosoni
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Leptonit	e elektroni	μ myoni	τ tau	W[±] W-bosoni
				Mittabosonit

Alkeishiukkasten standardimalli

Standardimalliin kuuluu kaksitoista erityyppistä fermionia sekä niiden antihukkaset. Protoni ja neutroni koostuvat molemmat kahdentyyppisistä fermioneista, ylös-kvarkeista ja alas-kvarkeista, joita vahva vuorovaikutus sitoo yhteen. Elektronin sitoo atomin ytimen ympärille sähkömagneettinen vuorovaikutus. Nämä kolme fermionia muodostavat yhdessä valtaosan havaitsemastamme aineesta. Alla olevassa taulukossa on lueteltu standardimallin alkeishiukkas-fermionit ja niiden ominaisuudet.

Taulukko

Standardimallin vasenkätiset fermionit

1. perhe							
Fermioni (vasenkätinen)	Symboli	Sähkövaraus	Heikko varaus	Heikko isospin	Hypervaraus	Värivaraus	Massa
Elektroni	e	-1	2	-1/2	-1/2	1	0,511 MeV
Elektronin neutriino	ν_e	0	2	+1/2	-1/2	1	< 50 eV
Positroni	e^c	+1	1	0	+1	1	0,511 MeV
Elektronin antineutriino	ν_e^c	0	1	0	0	1	< 50 eV
Ylös-kvarkki	u	+2/3	2	+1/2	+1/6	3	1.5...4,5 MeV ¹
Alas-kvarkki	d	-1/3	2	-1/2	+1/6	3	5...8,5 MeV ¹
Ylös-antikvarkki	u^c	-2/3	1	0	-2/3	3̄	1,5...4,5 MeV ¹
Alas-antikvarkki	d^c	+1/3	1	0	+1/3	3̄	5...8,5 MeV ¹
2. perhe							
Fermioni (vasenkätinen)	Symboli	Sähkövaraus	Heikko varaus	Heikko isospin	Hypervaraus	Värivaraus	Massa
Myoni	μ	-1	2	-1/2	-1/2	1	105,6 MeV
Myonin neutriino	ν_μ	0	2	+1/2	-1/2	1	< 0,5 MeV
Antimyoni	μ^c	+1	1	0	+1	1	105,6 MeV
Myonin antineutriino	ν_μ^c	0	1	0	0	1	< 0,5 MeV
Lumo-kvarkki	c	+2/3	2	+1/2	+1/6	3	1 000...1 400 MeV
Outo-kvarkki	s	-1/3	2	-1/2	+1/6	3	80...155 MeV
Lumo-antikvarkki	c^c	-2/3	1	0	-2/3	3̄	1 000...1 400 MeV
Outo-antikvarkki	s^c	+1/3	1	0	+1/3	3̄	80...155 MeV
3. perhe							
Fermioni (vasenkätinen)	Symboli	Sähkövaraus	Heikko varaus	Heikko isospin	Hypervaraus	Värivaraus	Massa
Tau	τ	-1	2	-1/2	-1/2	1	1,784 GeV
Taun neutriino	ν_τ	0	2	+1/2	-1/2	1	< 70 MeV
Antitau	τ^c	+1	1	0	+1	1	1,784 GeV
Taun antineutriino	ν_τ^c	0	1	0	0	1	< 70 MeV
Huippu-kvarkki	t	+2/3	2	+1/2	+1/6	3	178 000 ± 4 300 MeV
Pohja-kvarkki	b	-1/3	2	-1/2	+1/6	3	4 000...4 500 MeV
Huippu-antikvarkki	t^c	-2/3	1	0	-2/3	3̄	178 000 ± 4 300 MeV
Pohja-antikvarkki	b^c	+1/3	1	0	+1/3	3̄	4 000...4 500 MeV

1. Massojen arviot ovat kiistanalaisia. On ehdotettu että u-kvarkki olisi lähes massaton.

Fermionit voidaan järjestää kolmeen perheeseen, joista ensimmäiseen kuuluvat elektroni, ylös- ja alas-kvarkit sekä elektronin neutriino. Tavallinen aine koostuu ensimmäisen perheen hiukkasista, sillä muiden perheiden hiukkaset hajoavat nopeasti ensimmäisen perheen hiukkasiksi; niitä voidaan havaita vain lyhyen aikaa hiukkaskiihdyttimissä. Hiukkasperheiden fermionit muistuttavat toisiaan muuten paitsi massaltaan. Esimerkiksi elektronilla ja myonilla on sama sähkövaraus ja spin, mutta myonin massa on elektroniin verrattuna 200-kertainen.

Elektronia ja elektronin neutriinoa sekä niiden vastinpareja muissa perheissä kutsutaan leptoneiksi. Leptoneilta puuttuu kokonaan kvarkkien väriominaisuus, ja niihin vaikuttaa ainoastaan heikko ja sähkömagneettinen vuorovaikutus, joka heikkenee etäisyyden kasvaessa. Sen sijaan kvarkkien välinen värivoima eli vahva vuorovaikutus voimistuu etäisyyden kasvaessa, ja siksi kvarkkeja tavataan ainoastaan värittömissä yhdistelmissä eikä koskaan yksinään. Tätä kutsutaan kvarkkien vankeudeksi (engl. *quark confinement*). Nämä värittömät yhdistelmät ovat joko fermionisia baryoneja (kuten protonit ja neutronit) tai bosonisia mesoneja (esimerkiksi pionit). Sidosenergian johdosta tällaisten yhdistelmien massa ylittää yksittäisten osasten yhteenlasketun massan.

Standardimallin ongelmia

Standardimallissa ei ole mekanismeja, jolla neutriinoille syntyisi massa. Massattomilla neutriinoilla puolestaan ei esiinny neutriino-oskillaatiota, joka havaittiin kokeellisesti vuonna 1998. Täten standardimalliin on lisättävä joku mekanismi, joka tuottaa neutriinoille massat. Muista kokeista myonin magneettisen momentin teoreettinen ja kokeellinen arvo poikkeavat hieman toisistaan, mutta on toistaiseksi epäselvää, kertooko tämä poikkeama standardimallin ulkopuolisesta fysiikasta vai onko se vain mittausvirheistä tai laskennan epätarkkuuksista johtuva tilastollinen sattuma.

Kosmologiasta tulee myös tarpeita standardimallin laajentamiselle. Hiukkasreaktiot, jossa hiukkasia ja antihiukkasia syntyisi eri määrä, vaativat niin sanotun CP-symmetrian rikkoutumista. Standardimallissa kvarkkien sekoittuminen tuottaa CP-symmetrian rikon, mutta tämä on liian pieni saamaan aikaiseksi niin suuren määrän ainetta kuin mitä maailmankaikkeudessa on. Kosmologiset havainnot edellyttävät myös, että maailmankaikkeudessa on merkittävä määrä muuta kuin näkyvää ainetta, jota kutsutaan pimeäksi aineeksi. Standardimallissa ei ole pimeän aineen ehdokasta.

Teoriaan on tuotava käsin kaikki fermionit, eli kuusi kvarkkia, kolme varattua leptonia ja kolme neutriinoa. Teoria ei myöskään ennusta näiden massoja. Tämän takia hiukkasfyysikot toivovat kehittävänsä kaiken teorian, joka paitsi antaisi suuren osan standardimallin vapaista numeerisista parametreista (massat, varaukset, hiukkasten tyypit), myös sisältäisi gravitaation. Jo nykyisellään standardimalli kuitenkin ennustaa (kun massat, varaukset, hiukkaslajit on annettu) kaikkien tunnettujen hiukkasreaktioiden todennäköisyydet.

Edellä mainittujen ongelmien johdosta hiukkasfyysikot eivät yleisesti usko, että standardimalli olisi lopullinen teoria. Standardimallia voidaan laajentaa monella tavalla. Näistä mielenkiintoisimmat ovat laajempi Higgsin bosoniin liittyvä sektori, supersymmetria ja säieteoriat. Vuodesta 2008 alkaen CERNin uuden Large Hadron Colliderin odotetaan tuovan kokeellista tietoa koskien standardimallin laajennuksia.

Lähteet

Mittabosoni

Mittabosonit ovat hiukkasia, jotka välittävät perusvuorovaikutusta, joka liittyy johonkin jatkuvaan sisäiseen symmetriaan. Gravitaatiota lukuun ottamatta kaikki perusvuorovaikutukset osataan nykyään johtaa tällaisista symmetrioista. Hiukkasfysiikan standardimallin mittabosoneihin kuuluvat sähkömagneettista vuorovaikutusta välittävä fotoni, heikkoa vuorovaikutusta välittävät W- ja Z-bosonit sekä vahvaa vuorovaikutusta välittävä gluoni.

Standardimallin mittabosonit	
Hiukkanen	Vuorovaikutus
fotoni	sähkömagneettinen vuorovaikutus
W- ja Z-bosonit	heikko vuorovaikutus
gluoni	vahva vuorovaikutus

Jos vuorovaikutuksen taustalla oleva symmetria on tarkka, on vastaava mittabosoni massaton. Mikäli symmetria on rikkoutunut, voivat mittabosonit saada massan (ns. Higgsin mekanismi). Fotoni ja gluonit ovat massattomia, kun taas W- ja Z-bosonit ovat massallisia.

Mittabosonien spin on aina kokonaisluku, kuten muillakin bosoneilla. Kaikkien edellä mainittujen bosonien spin on 1. Usein oletetaan, että myös gravitaatiota välittäisi mittabosoni, gravitoni, jonka spin olisi 2. Gravitonit käsittävää kvanttigravitaation teoriaa ei toistaiseksi ole onnistuttu muotoilemaan matemaattisesti mielekkäällä tavalla.

Aiheesta muualla

- Particle Data Group - Gauge and Higgs Bosons ^[1]

Lähteet

[1] <http://pdg.lbl.gov/2008/tables/rpp2008-sum-gauge-higgs-bosons.pdf>

Vahva vuorovaikutus

Vahva vuorovaikutus (värivoima, vahva voima, vahva ydinvoima, joskus myös ydinvoima) on vahvin kolmesta hiukkasfysiikan standardimallin perusvuorovaikutuksesta. Se sitoo kvarkit hadroneiksi. Vahvan vuorovaikutuksen välittäjähiukkanen on mittabosoneihin kuuluva gluoni.

Vahva ja sähköinen vuorovaikutus

Vahvaa vuorovaikutusta kuvaava kenttäteoria on hiukkasfysiikan standardimalliin kuuluva kvanttiväridynamiikka (QCD). Se on analoginen sähkömagneettisen vuorovaikutuksen kvanttikenttäteorian (kvanttisähködynamiikka, QED) kanssa siten, että sähkövarausta vastaa värivaraus ja fonia gluoni. Gluoneilla on kuitenkin itselläänkin värivaraus, kun taas fotoneilla ei ole sähkövarausta.

Atomin ytimessä protonien välillä on hyvin voimakas sähköinen poistovoima ja nukleonit ovat nopeassa liikkeessä. Silti ydin pysyy koossa. Protoneja sitoo toisiinsa vahva vuorovaikutus (värivoima). Se aiheuttaa vetovoiman myös neutronien välille samoin kuin neutronin ja protonin välille. Myös sähkömagneettisuus vaikuttaa, mutta vahva vuorovaikutus on paljon vahvempi ja siten hallitseva.

Kvarkeilla on värejä (ei oikeita, kuviteltuja): kolme väriä ja kolme niitä vastaavaa antiväriä. Eri väriset kvarkit vetävät toisiaan puoleensa (värivoima), kuten eri sähkövaraukset omaavat hiukkaset vetävät toisiaan. Värivoima ulottuu myös hadronien ulkopuolelle ja tämä saa ytimen pysymään koossa (ydinvoima). Gluoni välittää värivoiman nukleonien kesken samoin kuin kvarkkien välisen vuorovaikutuksen. Kvarkkien värit koostuvat gluonien eri väreistä, gluonit voivat siirtyä kvarkista toiseen. Tällä tavalla kvarkki voi vaihtaa väriään. Kokonaisuutena hadronit ovat aina värineutraaleja: baryonissa on aina jokaista väriä, jolloin ne kumoavat toisensa. Mesonissa on väri ja sitä vastaava antiväri, jolloin värivaraus tulee nolllaksi. Sen sijaan gluonit ovat värivarauksellisia: ne sisältävät jonkin värin ja antivärin, jotka eivät siis ole toistensa vastavärejä.

Asymptoottinen vapaus

Vahvalla vuorovaikutuksella on asymptoottiseksi vapaudeksi kutsuttu ominaisuus. Tämä tarkoittaa sitä, että kvarkkien välisen vuorovaikutuksen suuruus riippuu etäisyydestä (tai energiaskaalasta) siten, että voima on pienillä etäisyyksillä (suurilla energioilla) heikompi kuin suurilla etäisyyksillä (tai pienillä energioilla). Tämä johtaa siihen, että kvarkkien irrottamiseksi toisistaan tarvittaisiin äärettömän suuri energia. Tämä energia kuitenkin riittää synnyttämään uusia värineutraaleja hiukkasia, joten kvarkkeja ei voida havaita vapaina.

Kvanttikromodynamiikan asymptoottisen vapauden todistivat ensimmäisenä David Gross, David Politzer ja Frank Wilczek. Heille myönnettiin tästä työstä vuoden 2004 Nobelin fysiikanpalkinto.

Vaikutusala

Vahvassa vuorovaikutuksessa nukleonien välillä voiman luonne riippuu etäisyydestä. Jos etäisyys on 0,4–2 femtometriä, vallitsee vahva vetovoima. Jos taas etäisyys on alle 0,4 fm, vallitsee vahva hylkivä voima, joten ytimessä olevat nukleonit eivät kosketa toisiaan. Kun nukleonien etäisyys on suurempi kuin 2 fm niin vuorovaikutus heikkenee nopeasti. Vaikutusta voi verrata jouseen. Mitä kauemmaksi jouta venytetään, sitä enemmän jousi panee vastaan, mutta sekin kuitenkin katkeaa joskus. Jos taas jouta puristetaan kasaan, se työntää takaisin. Sama pätee hadroneihin. Jos yritetään hajottaa mesonia kvarkiksi ja antikvarkiksi syntyy uusi mesoni. Baryonienkin hajotessa syntyy taas uusia yhdistelmähiukkasia. Esimerkiksi neutroni hajoaa protoniksi, elektroniksi ja antineutriinoksi (neutronin beta-hajoaminen).

Nukleonin halkaisija on noin 1 fm (10^{-15} m), ytimen noin 10 fm. Siksi ytimen vastakkaisilla puolilla olevien nukleonien välille ei synny vahvaa vuorovaikutusta. Nukleonit ovat tekemisissä vahvan vuorovaikutuksen

välityksellä vain lähimpien naapurinukleoniensa kanssa. Tämä on yksi syy siihen, että raskaiden ytimien rakenne on löyhempi (epästabiilimpi) kuin keskiraskaiden. Stabiilein on rautaydin.

Viitteet

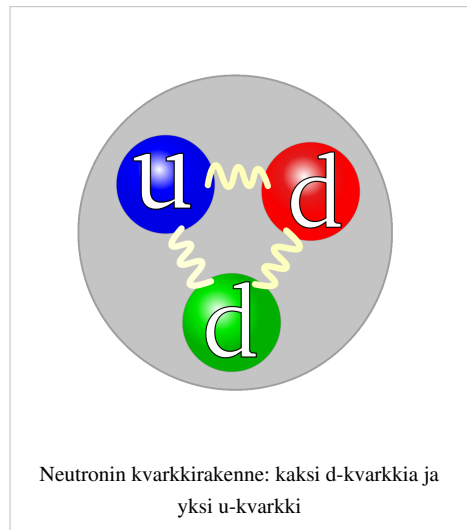
Kvarkki

Kvarkki	
Rakenne	alkeishiukkanen
Perhe	fermioni
Vuorovaikutus	gravitaatio, heikko vuorovaikutus, vahva vuorovaikutus, sähkömagneettinen vuorovaikutus
Löydetty teoreettisesti	1964, Murray Gell-Mann ja George Zweig
Sähkövaraus	u, c, t: $+2/3 e$ d, s, b: $-1/3 e$
Värivaraus	punainen, sininen tai vihreä
Spin	$1/2$

Hiukkasfysiikassa **kvarkit** ovat alkeishiukkasia, joita pidetään nykyisin jakamattomina. Kvarkit muodostavat hadroneja, joista yleisesti tunnetuimmat ovat protoni ja neutroni. Kvarkkeja on kuutta eri lajia. Kvarkkien olemassaolo postuloitiin ensimmäisen kerran vuonna 1964, kun Murray Gell-Mann ja George Zweig ehdottivat, että hadronit ovat pienempien hiukkasten yhdistelmiä. He kutsuivat näitä hiukkasia kvarkeiksi.

Vaikka kvarkit keksittiin alun perin teoreettisista syistä selittämään löydettyjen hadronien ryhmittymisen, niistä on myöhemmin saatu kokeellista todistusaineistoa. Kaikki kvarkit on havaittu hiukkaskiihdyttimissä. Huippukvarkki löydettiin viimeisenä 23. huhtikuuta 1994. Protonin sisärakenteen kvarkkeja voidaan hiukkaskiihdyttimessä havaita esimerkiksi antamalla elektronin sirota siitä.

Kvarkit vuorovaikuttavat vahvan vuorovaikutuksen kautta. Tätä luonnehtiva varaus on värivaraus. Ydinvoimat, joilla protonit ja neutronit ovat sitoutuneet toisiinsa atomiytimissä, ovat kvarkkeja toisiinsa sitovan värivoiman jäännösvoimia. Matemaattisesti erikoista on, että kvarkkien sähkövaraus ei ole alkeisvarauksen monikerta, vaan alkeisvarauksen murto-osa. Kutakin kvarkkia kohden on olemassa vastaava antikvarkki, joilla on vastakkainen kvanttiluku kuin sitä vastaavalla kvarkilla.



Nimet

Nimitys ”kvarkki” on peräisin James Joycen kryptisestä teoksesta *Finnegans Wake*:

»Three quarks for Muster Mark!
 Sure he has not got much of a bark
 And sure any he has it's all beside the mark.»

Tästä Murray Gell-Mann poimi termin nimeksi keksimilleen, tuolloin vielä hypoteettisille hiukkasille.

Yksittäisten kvarkkityyppien nimet ovat mielivaltaisesti keksittyjä; kvarkkityyppien ominaisuudet eivät millään tavoin vastaa nimitysten käyttöä arkielämässä: *ylös* (up), *alas* (down), *outo* (strange), *lumo* (charm), *pohja* (bottom) ja *huippu* (top). Kahta viimeistä kvarkkia kutsutaan myös nimillä *kauneus* (beauty) ja *totuus* (truth). Tarinan mukaan kolme ensimmäisenä löydettyä kvarkkia tunnettiin fyysikoiden keskuudessa alun perin nimillä *suklaa*, *mansikka* ja *vanilja*.^[1] Kvarkkilajeista onkin käytetty myös nimitystä maku.

Kvarkeista muodostuvia hiukkasia kutsutaan hadroneiksi, jotka puolestaan voidaan jakaa baryoneihin ja mesoneihin siten, että baryonien spin on puoliluku, mesonien kokonaisluku. Nykyään erilaisia hadroneja tunnetaan satoja, tosin useimmat niistä eivät ole vakaita.

Historiaa

Jo 1960-luvun alussa fyysikot olivat kyenneet tuottamaan useita eksoottisia, hyvin lyhytikäisiä hiukkasia. Vuonna 1963 Murray Gell-Mann ja Yuval Ne'eman havaitsivat, että näitä hiukkasia oli mahdollista ryhmitellä säännönmukaisesti kolmen kvanttiluvun, spinin, isospinin ja outouden perusteella. Tulokseksi saadaan kahdeksan hiukkasen oktetteja sekä kymmenen hiukkasen dekupletteja. Vuonna 1964 Gell-Mann ja George Zweig keksivät toisistaan riippumatta, että ryhmittely voitaisiin selittää, jos kukin hiukkanen rakentuisi kahdesta tai kolmesta pienemmästä hiukkasesta ja/tai sellaisen antihiukkasesta. Tarve saada baryoneille todennetuksi sisärakenne kumpusi myös toisesta suunnasta, sillä neutronilla oli havaittu olevan magneettinen momentti. Neutroni on sähköisesti neutraali, joten magneettisen momentin selittämiseksi neutronin täytyisi muodostua jonkinlaisista varauksellisista hiukkasista, joiden varaukset kuitenkin kumoavat toisensa kokonaisuutena.^[2]

Kvarkkimalli ei perustu pelkkään päättelyyn, vaan matemaattisesti sen pohjana on symmetriaryhmän SU(3) käyttö. Teoriassaan Gell-Mann kykeni sen avulla muodostamaan aaltofunktiot kaikille tuolloin tunnetuille hadroneille.

Alkuperäisessä, vuoden 1964 kvarkkimallissa oli kolme kvarkkia: ylös- eli u-kvarkki, alas- eli d-kvarkki sekä outo- eli s-kvarkki sekä näiden antikvarkit. Ylös- ja alas-kvarkkien nimet johdettiin isospinistä, sillä jos u-kvarkki vastaa isospinin ylös-komponenttia ja d-kvarkki alas-komponenttia ja jos protonin kvarkkikoostumus on *uud* ja neutronin *udd*, näiden hiukkasten isospinit saadaan selitettyä. Kolmas kvarkki eli outo-kvarkki tarvittiin selittämään kaonien ja eräiden baryonien omituisen hidas hajoaminen. Näitä hiukkasia syntyy helposti protonien törmäyksissä vahvan voiman aiheuttamina, mutta niiden hajoaminen kestää jopa 10^{13} kertaa kauemmin kuin pitäisi. Selitykseksi hitaalle hajoamiselle kehitettiin ylimääräinen kvanttiluku, jota alettiin kutsua outoudeksi. Hiukkasen outous säilyy vahvan vuorovaikutuksen reaktioissa, muttei heikon vuorovaikutuksen reaktioissa. Tämän mukaisesti, jos hiukkasen rakenteeseen kuuluu outo-kvarkkeja eli niiden outous poikkeaa nollasta, kevyimpien outojen hiukkasten on ikään kuin jätävä odottamaan hajoamista hitaammin vaikuttavan heikon vuorovaikutuksen kautta, koska hajoaminen kevyemmiksi hiukkasiksi ei vahvan vuorovaikutuksen kautta ole mahdollista. Osoittautui, että näillä kolmella kvarkilla pystyttiin paitsi selittämään kaikkien tuolloin tunnettujen hadronien ominaisuudet, myös ennustamaan vielä löytymättömiä hiukkasia. Merkittävä läpimurto oli kvarkkimallista ennustetun Ω^- -baryonin löytyminen.

Ongelmana kvarkkimallissa oli, että spin-1/2-hiukkasina kvarkit ovat fermioneja, jolloin niitä koskee Paulin kieltoääntö. Kieltoääntöön mukaan samassa tilassa ei voi olla kahta fermionia, joiden kvanttiluvut ovat samat. Eräät hiukkaset näyttivät kuitenkin rikkovan tätä sääntöä, kuten Δ^{++} , jonka kvarkkirakenne on *uuu*. Ongelman selitti Oscar Greenberg ottamalla käyttöön väriksi kutsutun kvanttiluvun, jolla voi olla kolme eri tilaa. Jos kullakin Δ^{++} -hiukkasen u-kvarkilla on eri väri, yksi niiden kvanttiluvuista on erilainen, Paulin kieltoääntö jää rikkoutumatta

ja hiukkasen olemassaolo saa selityksen.

Neljannen kvarkin olemassaoloa alettiin pohtia, kun James Björken ja Sheldon Glashow huomasivat kvarkkimallin siistiytyvän, jos kvarkit muodostaisivat kahden kvarkin pareja tuolloin tunnettujen neljän leptonin tapaan. Tätä s-kvarkin oletettua paria alettiin kutsua lumo- eli c-kvarkiksi. C-kvarkin löytäminen kokeellisesti palkittiin Nobelin fysiikanpalkinnon vuonna 1976. Sen avulla kyettiin selittämään c-kvarkin sisältävien hiukkasten hajoamisprosessit hieman samaan tapaan kuin s-kvarkin avulla. Kun vielä tau-leptonin löytymisen jälkeen havaittiin, että leptonit muodostavatkin kolme hiukkasparia, oli luontevaa, että kvarkitkin muodostaisivat kolme paria. Vuonna 1973 Makoto Kobayashi ja Toshihide Maskawa ennustivat kolmannen kvarkkiparin, b- ja t-kvarkkien olemassaolon. Nämä kaksi varsin suurimassaista kvarkkia löydettiin kokeellisesti vasta vuosina 1977 ja 1995. Kobayashi ja Maskawa saivat ennusteesta Nobelin fysiikanpalkinnon vuonna 2008.

Kvanttiluvut

Kvanttiluvut ovat ominaisuuksia, jotka yksilöivät kunkin hiukkasen. Hadroneita luonnehtivista kvanttiluvuista ensimmäisinä tunnettiin spin, isospin ja outous, joiden perusteella hadronit keksittiin jakaa kahdeksan hiukkasen oktetteihin tai kymmenen hiukkasen dekupletteihin, mikä puolestaan johti kvarkkimallin syntyyn. Baryonin muodostaa kolme kvarkkia ja antibaryonin kolme antikvarkkia. Mesonit ja antimesonit puolestaan koostuvat yhdestä kvarkista ja yhdestä antikvarkista.

Myöhemmin, kun kvarkkeja löytyi lisää, saatiin vielä kolme uutta kvanttilukua: lumo, kauneus ja totuus. Tämän lisäksi kvarkeilla on oma spininsä, joka on aina 1/2 sekä baryoniluku, joka on aina 1/3. Kvarkin ja antikvarkin kvanttiluvut ovat toistensa vastalukuja.

Kaikilla kvarkeilla on vielä ylimääräinen kvanttiluku, jota kutsutaan väriksi. Kukin kvarkki voi esiintyä jossakin kolmesta mahdollisesta väristä ja antikvarkeilla on toiset kolme mahdollista arvoa, *antivärit*. Näillä kvarkkien "väreillä" ei kuitenkaan ole mitään tekemistä arkielämässä väreiksi kutsuttavien optisten ilmiöiden kanssa. Baryoneissa on kaikki eri kvarkkivärit, jolloin ne kumoavat toisensa, mesonissa taas väri ja antiväri. Tämän vuoksi vapaina esiintyvät hadronit ovat aina "värittömiä". Yksittäisen kvarkin väriä ei voida määrittää, sillä väri vaihtuu koko ajan.

Hiukkasen sähkövarausta, isospiniä ja sen muodostavien kvarkkien kvanttilukuja sitoo yhteen tärkeä Gell-Mannin–Nishijiman kaava:

$$Q = I_3 + \frac{B + S + B' + C + T}{2},$$

missä Q on sähkövaraus, I_3 isospinin z-komponentti, B baryoniluku, S outous, B' kauneus, C lumo ja T totuus. Kaavalla on suuri merkitys vahvan vuorovaikutuksen välittämässä reaktioissa, sillä kaikki sen suureet ovat tällöin säilyviä.

Nimi	Varaus	Arvioitu massa (MeV)	Isospin	Outous	Lumo	Kauneus	Totuus
Ylös (u)	+2/3	1.5...4.5 ¹	+1/2	0	0	0	0
Alas (d)	-1/3	5...8.5 ¹	-1/2	0	0	0	0
Lumo (c)	+2/3	1 000...1 400	0	0	1	0	0
Outo (s)	-1/3	80...155	0	-1	0	0	0
Huippu (t)	+2/3	178 000 ± 4 300	0	0	0	0	1
Pohja (b)	-1/3	4 000...4 500	0	0	0	-1	0

1. Massojen arviot ovat kiistanalaisia. On ehdotettu että u-kvarkki olisi lähes massaton.

Gluonit ja kvarkkien vankeus

Pääartikkeli: Väri vankeus

Kvarkit ovat sirontakokeiden perusteella lähes pistemäisiä. Hadronin sisällä niillä on vahva vuorovaikutus, joka välittyy gluonien avulla. Vahva vuorovaikutus on sikäli erikoinen, että se kasvaa etäisyyden suhtessa. Lähellä toisiaan kvarkit voivat liikkua lähes vapaasti, kaukana toisistaan ne ovat hyvin vaikeasti työnnettävissä pois päin toisistaan. Vapaita kvarkkeja ei ole havaittu.

Yli 170 MeV:n lämpötilassa, joka vallitsi kvarkkiepookkina maailmankaikkeuden alkuhetkillä, kvarkit ja gluonit kuitenkin muodostivat kvarkki-gluoniplasmaa, jossa kvarkit olivat vapaita. Samoin oletetaan olevan kvarkkitähdissä.

Kvarkkien ei uskota koskaan esiintyvän yksittäin, vaan aina kahden tai kolmen ryhmässä. Tätä ilmiötä kutsutaan kvarkkien vankeudeksi. Uskomukselle on vahva kokeellinen näyttö, sillä yhdessä vuoden 1977 jälkeen suoritettussa kokeessa ei ole havaittu yksittäistä kvarkkia. Sen sijaan tiedetään, että jos vaikkapa mesonista yritetään vetää sen sisältämät kvarkki ja antikvarkki erilleen, tehdään hiukkasten väliseen värivoimakenttään lopulta niin paljon työtä, että kentästä voi materialisoida uusi kvarkki-antikvarkkipari. Näin kahden erillisen kvarkin sijaan saadaan aikaan energiasta materialisoitunut uusi mesoni.

Kvarkkien vankeuden yksityiskohdat ovat osittain tuntemattomia. Sen aihepiiri on aktiivisen tutkimuksen kohde.

Kirjallisuutta

- Gell-Mann, Murray: *Kvarkki ja jaguaari: Seikkailuja yksinkertaisessa ja monimutkaisessa*. (Alkuteos: *The quark and the jaguar*, 1994.) Suomentaneet Ritva ja Tapio Tuomi. Helsinki: WSOY, 1996. ISBN 951-0-20464-1.
- Hawking, Stephen W.: *Ajan lyhyt historia*. (Alkuteos: *The Illustrated A Brief History of Time*, 1996.) Tarkistettu ja täydennetty, kuvitettu laitos. Suomentanut Risto Varteva. Porvoo Helsinki Juva: WSOY, 2000. ISBN 951-0-19440-9.

Lähteet

[1] <http://cc.oulu.fi/~ljalonen/Kurssit/Fysiikka%20ja%20kemia/Fysiikka%20ja%20kemia%20-%20luku%209.pdf>

[2] Antti Hakola: Ydin- ja alkeishiukkasfysiikka, Raportti TTK-F-B204, ISBN 978-951-22-9178-6, luku 7 (<http://tfy.tkk.fi/aes/AES/courses/crspages/Tfy-0.3243/luku7.pdf>)

Gluoni

Gluoni	
Rakenne	Alkeishiukkanen
Perhe	Bosoni
Ryhmä	Mittabosoni
Vuorovaikutus	Vahva vuorovaikutus
Löydetty teoreettisesti	1962
Löydetty	DESY 1979
Symboli	g
Massa	0 MeV/c ²
Sähkövaraus	0 e
Värivaraus	Oktetti, 8 eri väriä
Spin	1

Gluoni on mittabosoneihin kuuluva alkeishiukkanen, joka välittää vahvaa voimaa eli värivoimaa. Se pitää kvarkit kiinni toisissaan, jolloin näistä voi muodostua protonia, neutroneita ja muita hadroneita. Atomytimet pysyvät koossa nimenomaan gluonien ansiosta. Nimitys gluoni tulee englanninkielisestä sanasta *glue*, eli liima. Gluonien olemassaolo todistettiin kokeellisesti vuonna 1979 DESY:n Petra-ilmaisimella.

Ominaisuudet

Gluoneita on kahdeksaa eri tyyppiä ja niillä on myös itsellään värivaraus eli ne tuntevat vahvan vuorovaikutuksen. Tämän takia vahva vuorovaikutus on voimakkaampi suuremmalla etäisyydellä.

Gluonien kvarkkeja sitova vaikutus lakkaa, jos hadronit saatetaan tarpeeksi kuumaan ja suuripaineisiin olosuhteisiin törmäyttämällä niitä suurilla energioilla. Tällöin hadronit ikään kuin sulavat vapaiksi kvarkeiksi ja gluoneiksi, kvarkki-gluoniplasmaksi.

Gluonien värivaraukset

Toisin kuin fotoneja, joita on vain yhtä lajia, on kvanttikromodynamiikan mukaan olemassa kahdeksaa tyyppiä gluoneja, joilla on erilainen värivaraus.

Asia ei ole aivan helppo käsittää. Kvarkeilla on kolme erilaista värivarausta ja antikvarkeilla näiden antivärit. Gluoneilla voidaan ajatella olevan sekä väri että antiväri, mutta tämän selventämiseksi on tarkasteltava värivarausten matematiikkaa yksityiskohtaisemmin.

Värivaraus ja superpositio

Kvanttimekaniikassa hiukkasten tiloja voidaan laskea yhteen superpositioperiaatteen avulla. Toisin sanoen hiukkasen tila voi olla perustilojen yhdistelmä, jossa kuhunkin perustilaan liittyy tietty todennäköisyys, jolla tämä tila havaitaan mitattaessa. Gluonien värivarauksen tapauksessa eräs sellainen tila voidaan ilmaista lausekkeella:

$$(\bar{r}\bar{b} + b\bar{r})/\sqrt{2}$$

Tämä luetaan "punainen-antisininen plus sininen-antipunainen". (Tässä r merkitsee "punaista" (engl. *red*) ja b "sinistä" (engl. *blue* värivarausta; kvarkkien kolmas värivaraus on "vihreä", g (engl. *green*). Tekijä $\sqrt{2}$ on mukana aaltofunktion normalisoimiseksi ja on asian ymmärtämiseksi epäoleellinen.) Jos tässä tilassa olevan gluonin värivaraus voitaisiin tavalla tai toisella suoraan mitata, tulokseksi saataisiin 50 %:n todennäköisyydellä punainen-antisininen ja 50 %:n todennäköisyydellä sininen-antipunainen.

Värisinglettitila

Kvarkeista muodostuneiden hadronien kuten protonien ja neutronien sanotaan usein olevan "värittömiä", mutta täsmällisemmin sanottuna ne ovat "värisinglettitilassa", joka on matemaattisesti analoginen spinin singlettitilalle.^[1] Tällainen tila sallii niiden vuorovaikuttaa toisten värisinglettien, mutta ei muiden väritylojen kautta: koska gluonien välittämiä pitkän kantaman vuorovaikutuksia ei ole, tämä osoittaa, ettei ole myöskään singlettitilassa olevia gluoneja.^[2]

Tämä singlettitila voidaan esittää muodossa:^[3]

$$(\bar{r}\bar{r} + \bar{b}\bar{b} + \bar{g}\bar{g})/\sqrt{3}$$

Toisin sanoen, jos tilan värivaraus voitaisiin mitata, tulokseksi saataisiin yhtä suurella todennäköisyydellä punainen-antipunainen, sininen-antisininen tai vihreä-antivihreä.

Gluonien kahdeksan väriä

Näiden lisäksi on kahdeksan toisistaan riippumatonta värityloa, jotka vastaavat gluonien kahdeksaa tyyppiä tai värivarausta. Koska tiloja voidaan yhdistää toisiinsa edellä kerrotulla tavalla, on olemassa useita tapoja kuvata näitä tiloja, jotka yhdessä muodostavat "värioktetin". Eräs yleisesti käytetty luettelo on:

$$\begin{aligned} &(\bar{r}\bar{b} + b\bar{r})/\sqrt{2} \quad -i(\bar{r}\bar{b} - b\bar{r})/\sqrt{2} \\ &(\bar{r}\bar{g} + g\bar{r})/\sqrt{2} \quad -i(\bar{r}\bar{g} - g\bar{r})/\sqrt{2} \\ &(\bar{b}\bar{g} + g\bar{b})/\sqrt{2} \quad -i(\bar{b}\bar{g} - g\bar{b})/\sqrt{2} \\ &(\bar{r}\bar{r} - \bar{b}\bar{b})/\sqrt{2} \quad (\bar{r}\bar{r} + \bar{b}\bar{b} - 2\bar{g}\bar{g})/\sqrt{6} \end{aligned}$$

Nämä ovat yhtäpitäviä Gell-Mannin matriisien kanssa: siinä punainen-antipunainen sijoittuu matriisiin vasempaan yläkulmaan, punainen-antisininen vasemman laidan keskimmäiselle riville, sininen-antivihreä alarivin keskimmäiselle sarakkeelle ja niin edelleen. Oleellista tässä on, että nämä kahdeksan hiukkasten tilaa ovat lineaarisesti riippumattomia toisistaan ja myös singlettitilasta: mitään näistä ei tiloista ei voida laskea yhteen siten, että tuloksena olisi jokin kolmas näistä tiloista. Näitä ei myöskään voida laskea yhteen siten, että tuloksena olisi $\bar{r}\bar{r}$, $\bar{g}\bar{g}$ tai $\bar{b}\bar{b}$, muutoinhan kielletty singlettitila voitaisiin myös saada näitä yhteenlaskemalla. Gluonien värivaraukset voidaan valita muillakin tavalla, mutta ne kaikki ovat matemaattisesti yhtäpitäviä ja ainakin yhtä monimutkaisia ja johtavat samoihin fysikaalisiin tuloksiin.

Ryhmäteoreettisia yksityiskohtia

Matemaattisesti kvanttikromodynamiikka on mittakentäteoria, jonka symmetriaryhmä on $SU(3)$. Kvarkkeja käsitellään spinoreina, joiden triplettila muodostaa mittaryhmän $SU(3)$ fundamentaalien esityksen. Gluonit taas ovat vektorikenttiä Lie ryhmänsä adjungoidussa esityksessä, toisin sanoen ryhmän $SU(3)$ oktettitilassa. Yleisessä Lie ryhmässä välittäjähiukkasten (kuten fotonien tai gluonien) lukumäärä on aina sama kuin tähän liittyvän esitystavan ulottuvuus. Yksinkertaisessa tapauksessa, jossa ryhmä on $SU(N)$, tämä luku on $N^2 - 1$.

Ryhmäteorian termein toteamus, että gluoni ei esiinny singlettitilassa, johtuu suoraan siitä, että kvanttikromodynamiikan symmetriaryhmä on $SU(3)$ eikä $U(3)$. Ei ole mitään apriorista syytä, jonka vuoksi näin olisi välttämättä oletettava, mutta havainnot tukevat käsitystä, jonka mukaan symmetriaryhmä on $SU(3)$.^[4]

Kvarkkien ja gluonien vankeus

Koska gluoneilla itselläänkin on värivaraus, ne osallistuvat vahvaan vuorovaikutukseen. Nämä kahden gluonin väliset vuorovaikutukset rajoittavat värikentät säikeen kaltaisiin "virtausputkiin", joissa niitä venytettäessä ilmenee vakiovoima. Tämän voiman vuoksi kvarkit pysyvät ikään kuin vangittuina niistä muodostuviin hadroneihin. Samasta syystä vahva vuorovaikutus ei ilmene suuremmilla kuin 10^{-15} metrin etäisyyksillä, mikä suunnilleen vastaa atomytimen läpimittaa. Tietyn etäisyyden yläpuolella kahta kvarkkia toisiinsa sitovan virtausputken energia kasvaa lineaarisesti. Tarpeeksi suurilla etäisyyksillä tämä johtaa siihen, että tarvitaan vähemmän energiaa uuden kvarkki-antikvarkki-parin muodostamiseen kuin virtausputken pidentämiseen.

Samaan tapaan myös gluonit pysyvät vangittuina hadronien sisään. Tästä seuraa myös, että gluonit eivät suoraan vaikuta ytimessä olevien protonien ja neutronien välisiin voimiin, vaan niitä välittävät mesonit.

Vaikka normaalisti gluonit eivät liiku vapaasti, on ennustettu, että saattaa olla olemassa myös pelkistä gluoneista koostuvia hadroneja, joille on annettu nimi glueball ("liimapallo"). On myös esitetty hypoteettisia eksoottisia hadroneja, joissa gluonit olisivat pääkomponentteina. Ääriolosuhteissa kuten hyvin korkeassa lämpötilassa ja paineessa saattaa muodostua kvarkki-gluoniplasmaa. Sellaisessa plasmassa ei ole hadroneja, vaan kvarkit ja gluonit esiintyvät vapaina hiukkasina.

Kokeelliset havainnot

Ensimmäiset suorat havainnot gluoneista saatiin vuonna 1979, kun PETRA:ssa tehtiin elektronien ja positronien törmäyskokeita. Vähän aikaisemmin oli kuitenkin DESY:n DORIS-III:ssa havaittu ilmiö, joka viittasi kolmen gluonin hajoamiseen.

Kokeellisesti kvarkkien vankeuden osoittaa se, että yritykset vapaiden kvarkkien löytämiseksi eivät ole onnistuneet. Vapaita gluoneja ei ole koskaan havaittu; kuitenkin Fermilabissa on tilastollisesti osoitettu top-kvarkkien muodostuminen. Vaikka on saatu viitteitä eksoottisista hadroneista, glueballeja ei myöskään ole havaittu. Kvarkki-gluoniplasma on äskettäin havaittu Brookhaven National Laboratoryn (BNL) Relativistic Heavy Ion Colliderissa (RHIC).

Aiheesta muualla

- Particle Data Group ^[5]
- HyperPhysics ^[6]

Lähteet

- [1] D.J. Griffiths (1987), pp. 280–281
 [2] D.J. Griffiths (1987), p. 281
 [3] D.J. Griffiths (1987), p. 280
 [4] D.J. Griffiths: Particles & Fields, Scientific American 1980, s. 281
 [5] <http://pdg.lbl.gov/>
 [6] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/particles/expar.html>

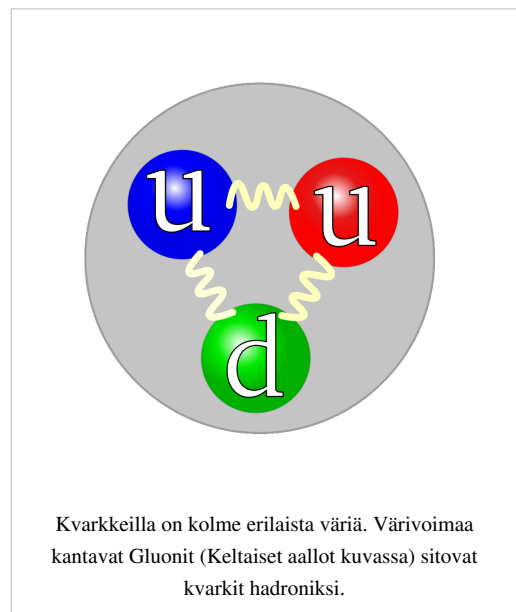
Kvanttiväridynamiikka

Kvanttiväridynamiikka eli **kvanttikromodynamiikka** eli QCD on kvarkkien ja gluonien välistä vuorovaikutusta eli vahvaa vuorovaikutusta kuvaava fysiikan teoria. QCD on oleellinen osa hiukkasfysiikan standardimallia. Kvarkit ja gluonit ovat hadronien, kuten neutronien ja protonien rakenneosasia. QCD:ssä vahvaa vuorovaikutusta, eli värivoimaa kantavat gluonit sitovat kvarkit hadroneiksi. Gluoneilla on kahdeksan väristä ja jostakin antiväristä koostuvaa väriyhdistelmää, kun taas kvarkeilla on kolme eri väriä (ja antikvarkeilla kolme eri antiväriä).

QCD:lle ominaista on asymptoottinen vapaus, mikä tarkoittaa sitä, että kvarkkien lähestyessä hadronissa toisiaan niiden välinen vuorovaikutus pienenee kohti nollaa. Vastaavasti hadronissa olevien kvarkkien irrottaminen toisistaan vaatii lähes äärettömän suuren voiman. Teorian asymptoottisesta vapaudesta keksi David Politzer, Frank Wilczek ja David Gross vuonna 1973.

QCD on jossain määrin analoginen kvanttisähködynamiikalle eli QED:lle, jossa välittäjähiukkasena massaton sähkömagneettista voimaa kuljettava fotonin vastikkeena QCD:n värivoimaa kuljettavalle gluonille. Olellisin ero QCD:n ja QED:n välillä lienee se, että gluonit voivat vuorovaikuttaa keskenään värivarauksensa takia, mutta fotoneilla ei ole sähkövarausta, joten ne eivät vuorovaikuta keskenään.

Kvarkkeja on kuutta eri tyyppiä eli *makua*: u (*up*, ylös), d (*down*, alas), s (*strange*, outo), c (*charm*, lumo), t (*top*, huippu), b (*bottom*, pohja). Alkeisvarausyksiköissä mitattuna u-, c- ja t-kvarkkien varaukset ovat $+2/3$ ja d-, s- ja b-kvarkkien $-1/3$, jolloin niiden yhdistelmistä saadaan nukleonien ja muiden hadronien varaukset ja koostumus. Hadronit ovat ns. värineutraaleja, eli niiden värivaraus on aina nolla. Joten hadronin sisällä olevilla kvarkeilla on joko kaikki kolme väriä (punainen, sininen ja vihreä), kaikki kolme antiväriä (antipunainen, antisininen ja antivihreä) tai väri ja sitä vastaava antiväri (esim. sininen ja antisininen).



Lähteet

Hadroni

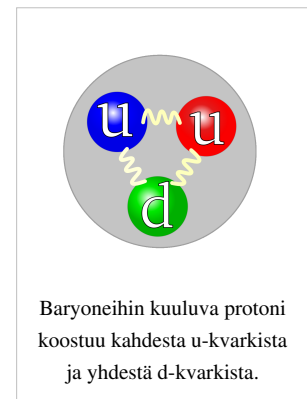
Hadroneiksi sanotaan hiukkasia, jotka koostuvat vahvaa vuorovaikutusta välittävien gluonien yhteensitomista kvarkeista. Hadronit voidaan jakaa kvarkkilukumääränsä mukaan kahteen alaluokkaan: baryoneihin ja mesoneihin. Esimerkiksi protoni on hadroni. ^{lähde?}

Baryonit

Baryonit koostuvat kolmesta kvarkista ja antibaryonit kolmesta antikvarkista.

Baryonit voidaan jakaa spin-luvun mukaan vielä kahteen alaluokkaan spin 1/2 ja spin 3/2 -baryoneihin. Spin 1/2 -baryoneilla kahden kvarkin spin on samansuuntainen ja kolmannen kvarkin erisuuntainen. Spin 3/2 -baryonien kaikkien kvarkkien spinit ovat samansuuntaiset. Koska baryonien spin on puoliluku, ne kuuluvat fermioneihin.

Tunnetuimmat ja pysyvimät (eivät hajoa heti muiksi hiukkasiksi) baryonit ovat kahdesta ylös-tyypin kvarkista ja yhdestä alas-tyypin kvarkista koostuva protoni sekä kahdesta alas-tyypin ja yhdestä ylös-tyypin kvarkista koostuva neutroni. Ylös-kvarkin varaus on +2/3 ja alas-kvarkin -1/3. Näin protonin varaukseksi tulee +1 ja neutronin varaukseksi 0.



Vuosina 2003 on nähty joitain kokeellisia viitteitä neljästä kvarkista ja yhdestä antikvarkista koostuvasta baryonista. Tuoreimmat kokeet ovat saattaneet nämä tulokset epäilyksen alaisiksi. Tiedeyhteisö pitää todennäköisempänä, että löydöt ovat olleet vain tilastollista harhaa.

Mesonit

Mesonit koostuvat kvarkki-antikvarkkiparista.

Mesonit voidaan jakaa spinien perusteella spin 0 ja spin 1 -mesoneihin. Koska niiden spin on kokonaisluku, kuuluvat ne bosoneihin. Spin 0 -mesoneilla kahden kvarkin spinit ovat erisuuntaiset ja spin 1 -mesoneilla samansuuntaiset. Mesoneista kevyimmät ovat pionit, joita on kolme (sähkövarauksin +1,0 ja -1). Pysyviä mesoneja ei ole, vaan ne hajoavat kevyemmiksi hiukkasiksi erittäin nopeasti.



Tutkimus

CERN:in vuonna 2008 valmistuneella Large Hadron Colliderilla tullaan raskaita alkuaineita (lyijy) törmäyttämällä tutkimaan niiden perimmäistä rakennetta. Nykyisin kvarkkien oletetaan olevan jakaumattomia, tulevien kokeiden hadroni-kiihdyttimellä odotetaan tuovan lisätietoa asiasta.

Lähteet

Heikko vuorovaikutus

Heikko vuorovaikutus eli **heikko ydinvoima** on yksi neljästä perusvuorovaikutuksesta. Muut ovat gravitaatio eli painovoima, sähkömagneettinen vuorovaikutus ja vahva vuorovaikutus eli vahva ydinvoima.

Ominaisuuksia

Heikolle vuorovaikutukselle ominainen piirre on se, että se pystyy vaihtamaan hiukkasen toiseksi. Ensimmäinen havaittu heikon vuorovaikutuksen ilmiö oli beetahajoaminen, jolle Enrico Fermi kehitti niin kutsuttuihin heikkoihin virtoihin perustuvan teoreettisen kuvauksen 1930-luvulla. Tätä teoriaa pidetään ensimmäisenä mallina heikosta vuorovaikutuksesta. Sittemmin on löydetty paljon muitakin heikon vuorovaikutuksen alaisia reaktioita. Heikon vuorovaikutuksen tuntevat kaikki leptonit ja kvarkit mukaan luettuna neutriinot, jotka eivät mahdollista pientä gravitaatiovuorovaikutusta lukuunottamatta muulla tapaa vuorovaikuta.

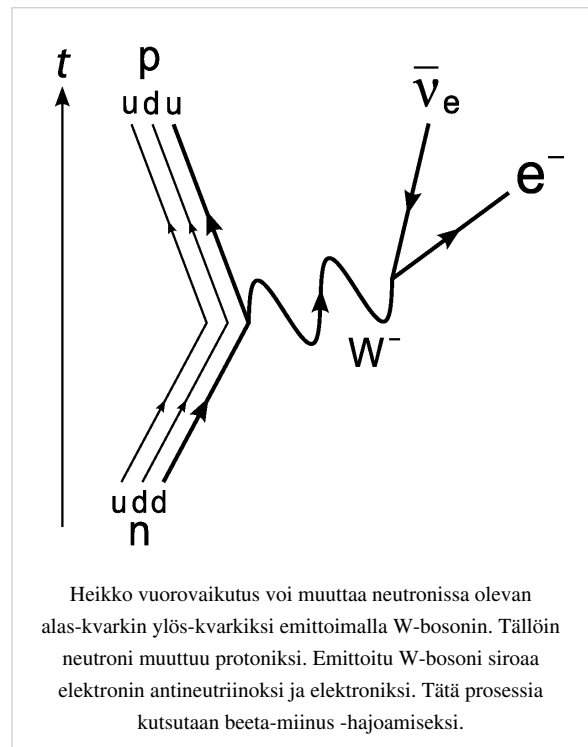
Erikoisena piirteenä heikko voima rikkoo niin kutsutun pariteetti- eli P-symmetrian. Tämä tarkoittaa, että heikon vuorovaikutuksen ohjaamat reaktiot eivät ole symmetrisiä avaruuden peilauksissa. Kokeellisesti on myös osoittautunut, että P-symmetrian rikkoutuessa rikkoutuu myös niin kutsuttu varauskonjugaatio- eli C-symmetria, joka kuvaa hiukkasen vaihtamista antihiukkasekseen. Käytännössä tämä tarkoittaa, että hiukkanen ja antihiukkanen eroavat toisistaan. Kuitenkin nämä yhdessä eli CP-symmetria näyttää säilyvän. CP-symmetriassa ilmiö on samanlainen, jos hiukkaset korvataan antihiukkasillaan ja tilannetta katsotaan peilattuna.

Vuonna 1964 havaittiin CP-symmetrian rikkoutuvan pienessä osassa kaonien hajoamisissa.

Välittäjähiukkaset

Pääartikkeli: W- ja Z-bosonit

Hiukkasfysiikan standardimallin mukaan perusvuorovaikutukset siirtyvät välittäjähiukkasten (mittabosonien) kuljettamana, joita on heikolla vuorovaikutuksella kolmenlaisia. Kaksi W-bosonia, sähkövaraukseltaan positiivinen ja negatiivinen, sekä yksi sähköisesti neutraali Z-bosoni. Näitä hiukkasia kutsutaan myös yhteisnimellä välilibosoneiksi. Näillä bosoneilla on hiukkasfysiikan skaalassa suuri massa: W-bosoneilla noin $80 \text{ GeV}/c^2$ ja Z-bosonilla noin $91 \text{ GeV}/c^2$. Bosonien suuren massan takia heikon vuorovaikutuksen kantama on hyvin lyhyt, noin



10^{-17} m.

Fotonin tapaan myös välibosonit esiintyvät vapaina hiukkasina, joskin niiden elinaika on erittäin lyhyt.

Sähköheikko vuorovaikutus

Pääartikkeli: Sähköheikko vuorovaikutus

Sähkömagneettista vuorovaikutusta välittävän fotonin tapaan myös välibosonit ovat spin 1 -hiukkasia ja molempia vuorovaikutuksia voidaan kuvata eräänlaisten virtojen avulla. 1960-luvulla Sheldon Glashow, Steven Weinberg ja Abdus Salam onnistuivatkin yhdistämään sähkömagneettiset ja heikon voiman aiheuttamat ilmiöt yhteen mittakenttäteoriaan, jota kutsutaan sähköheikoksi teoriaksi. Teoriaan liittyvä spontaani symmetriarikko on keskeinen syy Higgsin bosonin keksimiselle.

Lähteet

Aiheesta muualla

- Heikko vuorovaikutus (<http://www.joensuu.fi/fysiikka/ope/materiaali/hiukkasfysiikka/frameless/weak.html>)
- SLAC - Weak Interaction (<http://www2.slac.stanford.edu/vvc/theory/weakinteract.html>)

Fotoni

Fotoni	
Rakenne	Alkeishiukkanen
Perhe	Bosoni
Ryhmä	Mittabosoni
Vuorovaikutus	Sähkömagneettinen vuorovaikutus
Löydetty teoreettisesti	Albert Einstein
Symboli	γ
Elinaika	Stabiili
Sähkövaraus	0
Spin	1

Fotoni eli valokvantti on sähkömagneettisen vuorovaikutuksen välittäjähiukkanen (mittabosoni). Tyhjiössä fotoni kulkee vakionopeudella $c = 299\,792\,458$ m/s, eli noin 300 000 km sekunnissa. Fotonilla ei ole lepomassaa eikä sähkövarausta (tai varaus on ainakin alle 10^{-46} kertaa alkeisvaraus). Sen kuljettama energia ja liikemäärä ovat verrannollisia säteilyn taajuuteen. Materian kohdatessaan fotoni hidastuu tai absorboituu. Fotoneilla on sekä aaltoliikkeen että hiukkasten ominaisuuksia. Fotonin spin on 1.

Näkyvä valo koostuu fotoneista, kuten kaikki sähkömagneettinen säteily: radioaallot, infrapuna- ja ultravioletivalo sekä röntgen- ja gammasäteily. Fotoneilla on erilaisia aalto- ja hiukkasluonteen yhteisiä ominaisuuksia. Niitä ovat mm. emissio, absorptio, tahtuminen ja heijastuminen.

Modernin fotonin mallin kehitti Albert Einstein vuosien 1905 ja 1917 välillä selittämään kokeiden tuloksia, jotka eivät käyneet yhteen perinteisen valon aaltomallin kanssa. Erityisesti fotoniteoria sisälsi energian riippuvuuden valon aallonpituudesta ja selitti aineen ja säteilyn kyvyn olla termodynaamisessa tasapainossa. Muut fyysikot yrittivät selittää näitä puoliklassisilla malleilla, joissa valoa kuvattiin edelleen Maxwellin yhtälöillä, mutta valoa emittoivat tai absorboivat esineet oli kvantisoitu. Vaikka puoliklassiset mallit edistivät kvanttimekaniikan kehitystä, kokeet osoittivat todeksi Einsteinin hypoteesin valon hiukkasluonteesta.

Fotoniteorian keksiminen mahdollisti teoreettisen ja kokeellisen fysiikan edistysaskeleet kuten laserin, Bose–Einstein-kondensaatin, kvanttikenttäteorian ja kvanttimekaniikan todennäköisyyslaskennan. Hiukkasfysiikan standardimallin mukaan fotonit tuottavat kaikki sähkö- ja magneettikentät ja ovat itse tulosta avaruusaajan symmetrian vaatimuksesta. Fotonien ominaisuudet – varauksen, massan ja spinin – määrittää mittasymmetria.

Nimestä ja merkinnöistä

Fotonin alkuperäinen nimi oli Einsteinin tekstissä *valokvantti* (das Lichtquant). Nykyinen termi 'fotoni' tulee kreikan kielen valoa tarkoittavasta sanasta $\varphi\omega\varsigma$. Sen otti käyttöön 1926 kemisti Gilbert Newton Lewis, joka julkaisi spekulatiivisen teorian, jonka mukaan fotonit olivat tuhoutumattomia ja niitä ei ollut mahdollista luoda. Lewisin teoriaa ei hyväksytty, ja se oli ristiriidassa havaintojen kanssa, mutta uusi termi otettiin lähes välittömästi käyttöön.

Fysiikassa ftonia merkitään kreikkalaisella gamma-kirjaimella γ . Symboli on todennäköisesti peräisin gammasäteilystä, jonka havaitsi ja nimesi vuonna 1900 Paul Ulrich Villard ja osoittivat valon muodoksi 1914 Ernest Rutherford ja Edward Andrade. Kemiassa ja optiikassa fotoneja merkitään usein $h\nu$, joka merkitsee fotonin energiaa. Tässä h on Planckin vakio ja ν on fotonin taajuus. Vaikka fotonilla ei ole lepomassaa on sillä kuitenkin energiasta riippuva relativistinen liikemassa, jonka suuruus voidaan laskea relaatiosta $E = h\nu = mc^2$.

Fysikaaliset ominaisuudet

Fotoni on massaton, sillä ei ole sähkövarausta, eikä se hajoa spontaanisti. Fotonilla on kaksi mahdollista polarisaatiotilaa ja sitä kuvataan kolmella parametrilla: aaltovektorilla, joka määrittää aallonpituuden λ , ja kulkusuunnalla. Fotoneja syntyy luonnossa monissa prosesseissa: esimerkiksi kun sähkövarausta kiihdytetään, atomi tai ydin putoaa matalammalle energiatilalle, tai kun hiukkanen ja antihiukkanen annihiloituvat. Fotoneja absorboituu noiden ilmiöiden T-käänteisissä tapahtumissa, esimerkiksi hiukkas–antihiukkasparin syntyessä tai atomin tai hiukkasen siirtyessä korkeampaan energiatilaan.

Koska fotoni on massaton, se liikkuu tyhjiössä nopeudella c ja sen energia E ja liikemäärä \mathbf{p} ovat suhteessa $E = cp$. Vertailun vuoksi lepomassallisilla hiukkasilla suhde on erityisen suhteellisuusteorian mukaan $E^2 = c^2 p^2 + m_0^2 c^4$.

Fotonin energia ja liikemäärä riippuvat vain taajuudesta ν tai yhtäpitävästi aallonpituudesta λ .

$$E = \hbar\omega = h\nu$$

$$\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}$$

Tästä seuraa että:

$$p = \hbar k = \frac{h}{\lambda} = \frac{h\nu}{c},$$

jossa $\hbar \equiv h/2\pi$ on Diracin vakio, \mathbf{k} aaltovektori (jonka aaltoluku on $k \equiv 2\pi/\lambda$) ja $\omega \equiv 2\pi\nu$ kulmataajuus.

\mathbf{k} osoittaa fotonin etenemissuuntaan.

Fotoni kantaa myös spin-impulssimomenttia, joka ei riipu sen taajuudesta. Spinin itseisarvo on $\sqrt{2}\hbar$ ja aaltovektorin suuntainen komponentti (helisiteetti) $\pm\hbar$. Tämä vastaa fotonin kahta mahdollista polarisaatiotilaa.

Tämän merkitys on, että hiukkasen ja sen antihiukkasen annihiloituessa *täytyy* syntyä ainakin kaksi fotonia: törmäävillä hiukkasilla ei ole liikemäärää niiden massakeskipistekoordinaatistossa, kun taas fotonilla on. Täten liikemäärän säilymislain mukaan kahden syntyvän fotonin liikemäärän täytyy olla nolla.

Klassisen teorian sähkömagneettisen säteilyn energia ja liikemäärä voidaan ilmaista fotonien muodossa: esimerkiksi säteilypainetta johtuu fotonien liikemäärän sitoutumisesta kohteeseen.

Säteilyn ja aineen vuorovaikutus

Emissio: Kun atomin energiatila muuttuu, saattaa vapautuva energia emittoitua yhtenä fotonina. Valoemissio on mahdollinen myös kun vapaan elektronin energia muuttuu kiteen energiavyön sisällä. Sähkömagneettinen aalto emittoituu aina kun sähkövaraus on kiihtyvässä liikkeessä.

Absorptio: Kun fotoni törmää atomiin, se saattaa siirtää energiansa atomille, joka virittyy. Prosessi on mahdollinen vain, jos atomissa on tilojen energiaero, joka on sama kuin fotonin energia. Fotonin absorptiossa on kaiken energian siirryttävä tai prosessia ei tapahdu; fotoni ei siis voi absorboitua osittain.

Sironta: Fotoni voi sirotta atomista niin, että atomi absorboi fotonin ja emittoi toisen fotonin.

Heijastuminen: Jos valo lähetetään kohti tasoa, osa siitä heijastuu takaisin. Tasoon tulevan ja tasosta heijastuvan valon kulma on tason normaaliin nähden sama.

Taittuminen: Kun valonsäde siirtyy väliaineesta toiseen, sen kulkusuunta muuttuu, ellei tulosuunta ole pinnan normaalin suuntainen.

Kirjallisuus

- Anton Zeilinger: Fotonien tanssi - Einsteinistä kvanttiteleportaatioon. Terra Cognita. ISBN 978-952-5697-47-6.

Mesoni

Mesoni	
Rakenne	Yhdistelmähiukkanen (1 kvarkki ja 1 antikvarkki)
Perhe	Bosoni
Ryhmä	Hadroni
Vuorovaikutus	Vahva vuorovaikutus
Löydetty teoreettisesti	Hideki Yukawa (1935)
Löydetty	1946
Sähkövaraus	-1 e, 0 e, +1 e
Spin	0, 1

Hiukkasfysiikassa **mesoni** on kvarkista ja antikvarkista koostuva hadroni. (Toinen hadroneihin kuuluva ryhmä on baryoni.) Mesoni on bosoni, eli sen spin on kokonaisluku. Mesonit ovat epästabiileja ja hajoavat nopeasti itsestään kevyemmiksi hiukkasiksi, yleensä leptoneiksi.

Mesonit voidaan jakaa spinien perusteella spin 0 ja spin 1 -mesoneihin. Spin 0 -mesoneilla kahden kvarkin spinit ovat erisuuntaiset ja spin 1 -mesoneilla samansuuntaiset. Keveimmät mesonit kuuluvat spin-nolla -oktettiin. Näitä ovat pionit (kaksi varattua ja yksi neutraali), kaonit (kaksi varattua ja kaksi neutraalia) ja eeta-mesoni (neutraali). Näiden massat ovat pionien 140 MeV:sta kaonien 500 MeV:iin.

Aiheesta muualla

- HyperPhysics - Table of Mesons ^[1]

Lähteet

[1] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/particles/meson.html#c1>

Baryoni

Baryoni	
Rakenne	Yhdistelmähiukkanen (tavallisesti 3 kvarkkia)
Perhe	Fermioni
Ryhmä	Hadroni
Vuorovaikutus	Vahva vuorovaikutus Gravitaatio
Symboli	p, n, Λ^0 , Σ^+ , Ω^- , ...
Sähkövaraus	-1 e, 0 e, 1 e, 2 e
Spin	1/2, 3/2

Baryoni on kolmesta kvarkista koostuva hiukkanen. Antibaryonit muodostuvat kolmesta antikvarkista. Baryonit ovat fermioneja eli niiden spin on puoliluku. Ne kuuluvat hadroneihin eli vahva ydinvoima vaikuttaa niihin.

Atomiytimissä esiintyvät nukleonit, neutroni ja protoni ovat yleisimmät baryonit. Muita baryoneja kutsutaan hyperoneiksi. Ne ovat neutronia raskaampia hiukkasia, joiden hajoamisaika on nanosekuntia lyhyempi. Hajoamistuotteet ovat yleensä kevyempiä baryoneja sekä kvarkista ja antikvarkista koostuvia mesoneja. Hyperoneja voidaan valmistaa hiukkaskiihdyttimissä, ja joidenkin mallien mukaan neutronitähtien ytimet koostuvat hyperoneista.

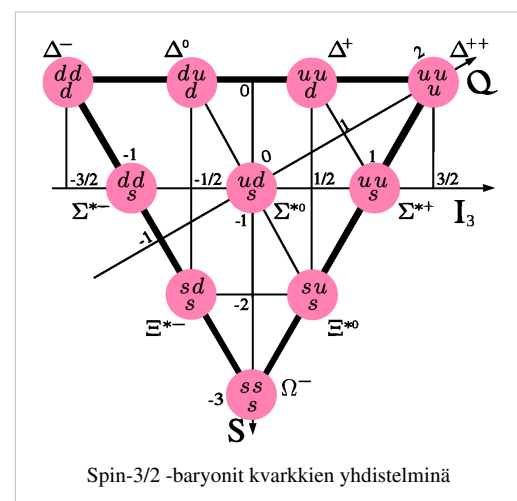
Kvarkeista u-kvarkin sähkövaraus on $+2/3$ alkeisvarausyksikköä, d- ja s-kvarkkien kummankin $-1/3$ alkeisvarausyksikköä. Kaikkien näistä muodostettavien kolmen kvarkin yhdistelmien eli baryonien varaus alkeisvarausyksikkönä on kokonaisluku.

Baryoneja koskee baryoniluvun säilymlaki. Jokaisen baryonin baryoniluku on määritelmän mukaan 1, mutta niillä on kullakin myös antihiukkasensa, jonka baryoniluku on -1. Protonia raskaammat baryonit ovat epästabiileja ja ne hajoavat nopeasti muiksi baryoneiksi siten, että uusien hiukkasten kokonaisbaryoniluku on sama kuin hajoaneen baryonin. Sen sijaan baryonin ja antibaryonin annihilaatiossa molemmat muuttuvat muiksi hiukkasiksi, joiden baryoniluku on 0.

Baryonien ryhmittely

Baryonit voidaan jakaa spinin perusteella kahteen alaluokkaan, spin $1/2$ - ja spin $3/2$ -baryoneihin. Spin $1/2$ -baryoneilla kahden kvarkin spin on samansuuntainen ja kolmannen kvarkin erisuuntainen. Sekä protoni että neutroni ovat spin $1/2$ -baryoneja. Spin $3/2$ -baryonien kaikkien kvarkkien spinit ovat samansuuntaiset.

Gell-Mannin alkuperäisen kvarkkimallin mukaan spin $1/2$ -baryoneja on kahdeksan erilaista (oktetti), spin $3/2$ -baryoneja taas kymmenen (dekupletti). Kummatkin jaetaan eri ryhmiin ns. outouden perusteella, joka on niissä olevien s-kvarkkien (outojen kvarkkien) lukumäärän vastaluku. Tuolloin tunnetuissa baryoneissa esiintyy vain ylös- (u-), alas- (d) ja outous-kvarkkeja (s). Nykyisin tunnetaan näiden lisäksi vielä kolme muutakin kvarkkilajia, minkä vuoksi myös erilaisia baryoneja on enemmän.



Muiden baryonien kuin nukleonien niminä käytetään kreikkalaisia kirjaimia, joiden yhteyteen lisätään niiden sähkövarauksen etumerkki sekä eräissä tapauksissa *-merkki erottamaan spin 3/2 -hiukkaset spin 1/2 -hiukkasista.

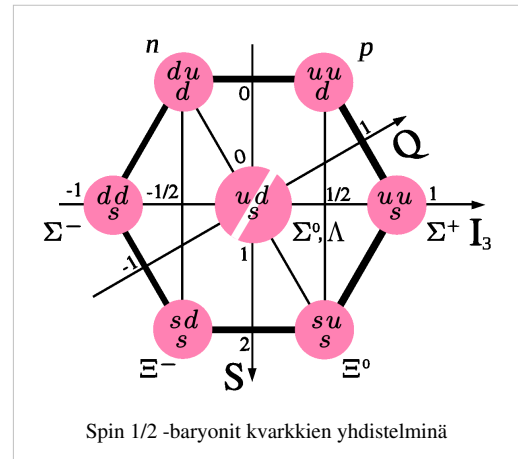
Seuraavissa luetteloissa ja kaavioissa ovat mukana vain Gell-Mannin kvarkkimallin mukaiset baryonit, joissa on ainoastaan u-, d- ja s-kvarkkeja.

Spin 1/2 -baryonit ovat:

- Outous 0:
 - protoni (p), kaksi u-kvarkkia, yksi d-kvarkki, varaus +1
 - neutroni (n), yksi u-kvarkki, kaksi d-kvarkkia, varaus 0
- Outous -1:
 - Sigma-miinus (Σ^-), kaksi d-kvarkkia ja yksi s-kvarkki, varaus -1
 - Sigma-nolla (Σ^0), yksi u-, yksi d- ja yksi s-kvarkki, varaus 0
 - Lambda (Λ), yksi u-, yksi d- ja yksi s-kvarkki mutta spinit jakautuneet toisin kuin edellä, varaus 0
 - Sigma-plus (Σ^+), kaksi u-kvarkkia, yksi s-kvarkki, varaus +1
- Outous -2
 - Ksii-miinus (Ξ^-), yksi d-kvarkki ja kaksi s-kvarkkia, varaus -1
 - Ksii-nolla (Ξ^0), yksi u-kvarkki, kaksi s-kvarkkia, varaus 0

Vastaavat spin 3/2 -baryonit ovat:

- Outous 0:
 - Delta-miinus (Δ^-), kolme d-kvarkkia, varaus -1
 - Delta-nolla (Δ^0), yksi u-kvarkki, kaksi d-kvarkkia, varaus 0
 - Delta-plus (Δ^+), kaksi u-kvarkkia, yksi d-kvarkki, varaus +1
 - Delta-kaksiplus (Δ^{2+}), kolme u-kvarkkia
- Outous -1
 - Sigma-miinus (Σ^{*-}), kaksi d-kvarkkia ja yksi s-kvarkki, varaus -1
 - Sigma-nolla (Σ^{*0}), yksi u-, yksi d- ja yksi s-kvarkki, varaus 0
 - Sigma-plus (Σ^{*+}), kaksi u-kvarkkia, yksi s-kvarkki, varaus +1
- Outous -2
 - Ksii-miinus (Ξ^{*-}), yksi d-kvarkki ja kaksi s-kvarkkia, varaus -1
 - Ksii-nolla (Ξ^{*0}), yksi u-kvarkki, kaksi s-kvarkkia, varaus 0
- Outous -3:
 - Omega-miinus, kolme s-kvarkkia, varaus -1



Lähteet

Aiheesta muualla

- HyperPhysics - Table of Baryons (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Particles/baryon.html>)
- Particle Data Group (<http://pdg.lbl.gov/>)

Artikkelin lähteet ja muokkaajat

Kvanttikentäteoria *Lähde:* <http://fi.wikipedia.org/w/index.php?oldid=12862985> *Muokkaajat:* Blizzardo, Hasdrubal, Hwaltari, Kulmalukko, Thi, Tiedemies1984, Usp, 1 nimetöntä muokkausta

Vuorovaikutus *Lähde:* <http://fi.wikipedia.org/w/index.php?oldid=13761434> *Muokkaajat:* Anr, Dovraga, Jawacz, Juha Kämäräinen, KLS, Marraskuu, Nvidia, Pafcu, Pasixxxx, Pwc, Routari, Savir, Setti-Matti, Uvainio, 18 nimetöntä muokkausta

Sähkömagneettinen vuorovaikutus *Lähde:* <http://fi.wikipedia.org/w/index.php?oldid=13191795> *Muokkaajat:* Anchjo, Bapil, Cursarion, Finlandia, Hasdrubal, Htm, Hwaltari, Japsu, Jawacz, Jni, Jpk, KLS, Kobsu, Miihkali, Tiku80, Usp, Wikiman897, Рыцарь поля, 5 nimetöntä muokkausta

Kenttä (fysiikka) *Lähde:* <http://fi.wikipedia.org/w/index.php?oldid=14063292> *Muokkaajat:* Hasdrubal, Hwaltari, KLS, Lebha, Matikkapoika, Mschindwein, Tbone, TeemuN, Thi, Tomisti, 4 nimetöntä muokkausta

Kvanttisähködynamiikka *Lähde:* <http://fi.wikipedia.org/w/index.php?oldid=13172723> *Muokkaajat:* Ejs-80, Kulmalukko, PtG, Tiedemies1984, 2 nimetöntä muokkausta

Sähkövara *Lähde:* <http://fi.wikipedia.org/w/index.php?oldid=13557681> *Muokkaajat:* Aulis Eskola, Egoles, Jawacz, JoonasD6, Jpk, KLS, Kulmalukko, Myl, Riojajar, Samulili, Tsemii, Unara, Usp, Velma, 19 nimetöntä muokkausta

Hiukkasfysiikan standardimalli *Lähde:* <http://fi.wikipedia.org/w/index.php?oldid=13260797> *Muokkaajat:* Crimson Cherry Blossom, Ejs-80, Envy, Hapo, Hartz, Hasdrubal, Hwaltari, Japsu, Jpk, Kimmolaine, Kulmalukko, Lebha, Miihkali, Muu-karhu, Phii, Syed, Teveten, Tiedemies1984, Usp, 6 nimetöntä muokkausta

Mittabosoni *Lähde:* <http://fi.wikipedia.org/w/index.php?oldid=13294023> *Muokkaajat:* CERminator, Hautala, Heikki, Hwaltari, J Hazard, Jannev, Kulmalukko, Muu-karhu, Tiedemies1984, Tiiliskivi, Uvainio, 3 nimetöntä muokkausta

Vahva vuorovaikutus *Lähde:* <http://fi.wikipedia.org/w/index.php?oldid=13350329> *Muokkaajat:* Hasdrubal, Hwaltari, Japsu, Jpk, Kulmalukko, Miihkali, Muu-karhu, Potus55, Usp, Vesteri, 3, 14 nimetöntä muokkausta

Kvarkki *Lähde:* <http://fi.wikipedia.org/w/index.php?oldid=13670732> *Muokkaajat:* Anr, Arctan, Card, Hartz, Hasdrubal, Hautala, Heikki, Hermis, Höyhens, Ism, Japsu, Jpk, Junafani, KLS, Kompak, Kulmalukko, Mikalaari, Mikko Paananen, Muu-karhu, Nikerabbit, Palosirkka, PeeKoo, Pitke, PtG, QWerk, Rbnqss, RicHard-59, Sakari Ahvenainen, Samulili, Shizhao, Tbone, Thi, Tiedemies1984, Wikiman897, Xepheid, Yartsa, 19 nimetöntä muokkausta

Glioni *Lähde:* <http://fi.wikipedia.org/w/index.php?oldid=13642185> *Muokkaajat:* Card, George Esayas, Hwaltari, J Hazard, Jpk, KLS, Kulmalukko, Miihkali, Muu-karhu, QWerk, Quadriplegia, Seppo Linnaluoto, Tbone, Tiedemies1984, Uvainio, Velma, Yartsa, 2 nimetöntä muokkausta

Kvanttiväridynamiikka *Lähde:* <http://fi.wikipedia.org/w/index.php?oldid=13697704> *Muokkaajat:* Hasdrubal, Hwaltari, IA, Jpk, Kulmalukko, Silvonon, Tiedemies1984, Tiku80, Usp, 3 nimetöntä muokkausta

Hadroni *Lähde:* <http://fi.wikipedia.org/w/index.php?oldid=12793740> *Muokkaajat:* Arctan, Hwaltari, Jpk, Kulmalukko, Lauriv, Muu-karhu, Ppntori, QWerk, Usp, Uvainio, 14 nimetöntä muokkausta

Heikko vuorovaikutus *Lähde:* <http://fi.wikipedia.org/w/index.php?oldid=14059572> *Muokkaajat:* Agony, Hasdrubal, Hautala, Japsu, KLS, Kulmalukko, Lakefall, QWerk, Tve4, Tynkänen, Usp, Xepheid, 15 nimetöntä muokkausta

Fotoni *Lähde:* <http://fi.wikipedia.org/w/index.php?oldid=13973147> *Muokkaajat:* Amanita, Arctan, Aulis Eskola, Deus, Hwaltari, J Hazard, Japsu, Jawacz, Jpk, KLS, Ketarax, Kulmalukko, Mikko Paananen, Mikko.kataja, Mr. Fysiikka 94, Muu-karhu, Myl, Neofelis Nebulosa, OM, Palica, PeeKoo, Ppntori, Se Elmeri, Seppo Linnaluoto, Shizhao, Styroks, Tappinen, Tbone, Tiedemies1984, Tom, Uvainio, Viel, 16 nimetöntä muokkausta

Mesoni *Lähde:* <http://fi.wikipedia.org/w/index.php?oldid=13725606> *Muokkaajat:* Alter Ego, Dilaudid, George Esayas, Hwaltari, Kulmalukko, Muu-karhu, Pafcu, QWerk, Uvainio, 2 nimetöntä muokkausta

Baryoni *Lähde:* <http://fi.wikipedia.org/w/index.php?oldid=12803963> *Muokkaajat:* Arctan, George Esayas, Jawacz, KLS, Kulmalukko, Lepax, Muu-karhu, Neofelis Nebulosa, QWerk, Uvainio, 4 nimetöntä muokkausta

Kuvien lähteet, lisenssit ja muokkaajat

Tiedosto:Feynmandiagram.svg *Lähde:* <http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:Feynmandiagram.svg> *Lisenssi:* Creative Commons Attribution-Share Alike *Muokkaajat:*: Papa November

Tiedosto:Field-illustrations-add.png *Lähde:* <http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:Field-illustrations-add.png> *Lisenssi:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Muokkaajat:*: User:Vegard

Tiedosto:Field-illustrations-sub.png *Lähde:* <http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:Field-illustrations-sub.png> *Lisenssi:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Muokkaajat:*: User:Vegard

Tiedosto:Newtonian gravity field (physics).svg *Lähde:* [http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:Newtonian_gravity_field_\(physics\).svg](http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:Newtonian_gravity_field_(physics).svg) *Lisenssi:* Creative Commons Zero *Muokkaajat:*: User:Maschen

Tiedosto:em monopoles.svg *Lähde:* http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:Em_monopoles.svg *Lisenssi:* Creative Commons Zero *Muokkaajat:*: User:Maschen

Tiedosto:em dipoles.svg *Lähde:* http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:Em_dipoles.svg *Lisenssi:* Creative Commons Zero *Muokkaajat:*: User:Maschen

Tiedosto:Relativistic gravity field (physics).svg *Lähde:* [http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:Relativistic_gravity_field_\(physics\).svg](http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:Relativistic_gravity_field_(physics).svg) *Lisenssi:* Creative Commons Zero *Muokkaajat:*: User:Maschen

Tiedosto:Qcd fields field (physics).svg *Lähde:* [http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:Qcd_fields_field_\(physics\).svg](http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:Qcd_fields_field_(physics).svg) *Lisenssi:* Creative Commons Zero *Muokkaajat:*: User:Maschen

Tiedosto:VFPt charges plus minus thumb.svg *Lähde:* http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:VFPt_charges_plus_minus_thumb.svg *Lisenssi:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Muokkaajat:*: Geek3

File:Electric field point lines equipotentials.svg *Lähde:* http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:Electric_field_point_lines_equipotentials.svg *Lisenssi:* Public Domain *Muokkaajat:*: Sjllegg

Kuva:Electric Field Lines.svg *Lähde:* http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:Electric_Field_Lines.svg *Lisenssi:* Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported *Muokkaajat:*: Nein Arimasen

File:Standard Model of Elementary Particles (fi).svg *Lähde:* [http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:Standard_Model_of_Elementary_Particles_\(fi\).svg](http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:Standard_Model_of_Elementary_Particles_(fi).svg) *Lisenssi:* Creative Commons Attribution 3.0 *Muokkaajat:*: Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg: MissMJ derivative work: Syed

Kuva:Quark structure neutron.svg *Lähde:* http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:Quark_structure_neutron.svg *Lisenssi:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Muokkaajat:*: User:Harp

Image:Quark structure proton.svg *Lähde:* http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:Quark_structure_proton.svg *Lisenssi:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Muokkaajat:*: Made by Arpad Horvath

Kuva:Quark structure proton.svg *Lähde:* http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:Quark_structure_proton.svg *Lisenssi:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Muokkaajat:*: Made by Arpad Horvath

Kuva:Quark structure pion.svg *Lähde:* http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:Quark_structure_pion.svg *Lisenssi:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Muokkaajat:*: User:Harp

Image:Beta Negative Decay.svg *Lähde:* http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:Beta_Negative_Decay.svg *Lisenssi:* Public Domain *Muokkaajat:*: Joel Holdsworth (Joelholdsworth)

Tiedosto:Noneto mesónico de spin 0.png *Lähde:* http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:Noneto_mesónico_de_spin_0.png *Lisenssi:* Public Domain *Muokkaajat:*: E2m, Pieter Kuiper, Stannered

Kuva:Baryon-decuplet-small.svg *Lähde:* <http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:Baryon-decuplet-small.svg> *Lisenssi:* Public Domain *Muokkaajat:*: Trassiorf

Kuva:Baryon-octet-small.svg *Lähde:* <http://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Tiedosto:Baryon-octet-small.svg> *Lisenssi:* Public Domain *Muokkaajat:*: Trassiorf

Lisenssi

Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0
[//creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)
