

Fysiikkaa runoilijoille

Osa 5

Kvanttikenttäteoria

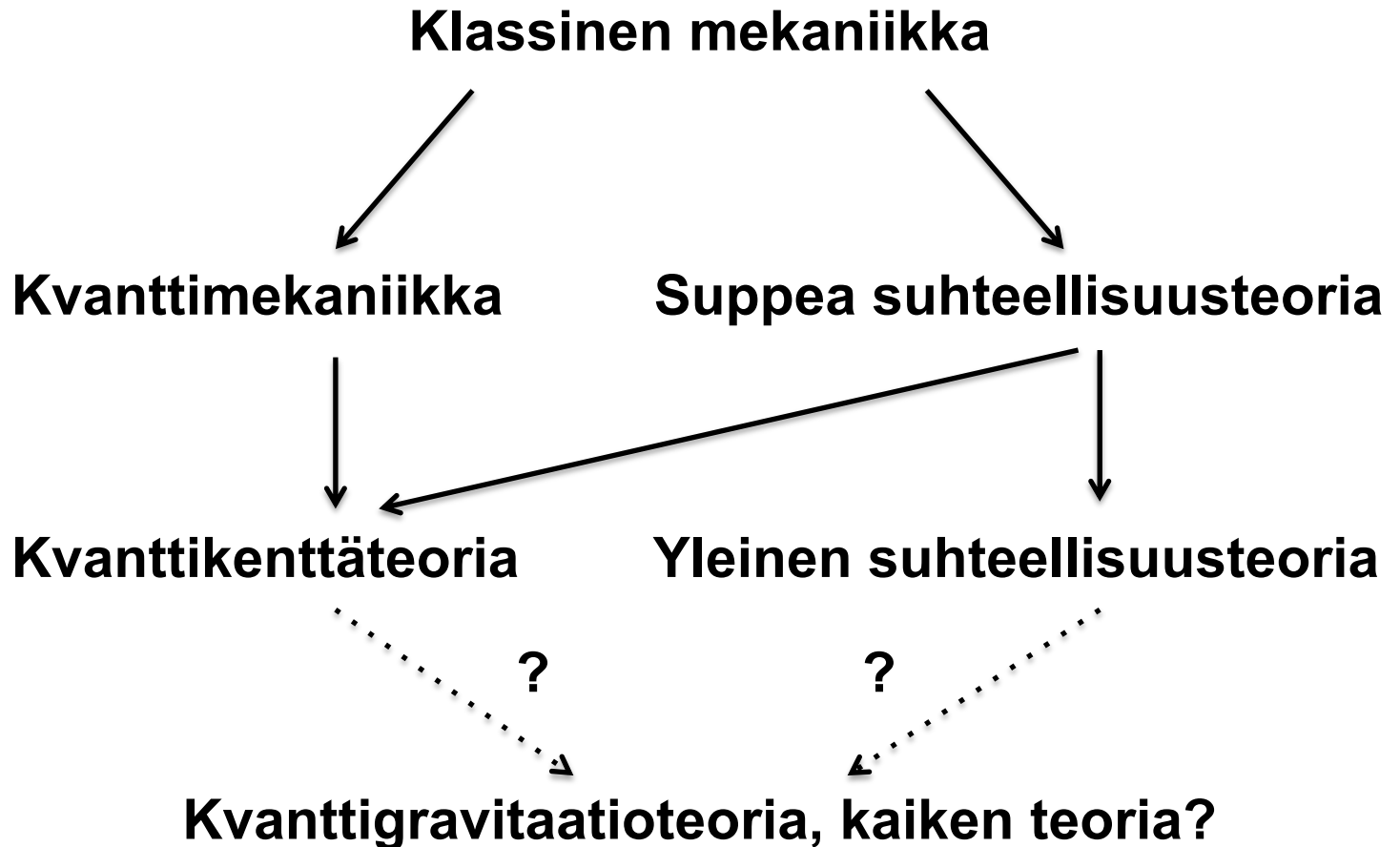
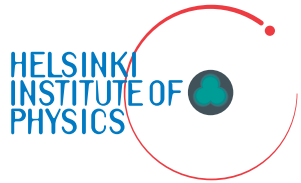
Syksy Räsänen

Helsingin yliopisto

fysiikan osasto ja fysiikan tutkimuslaitos

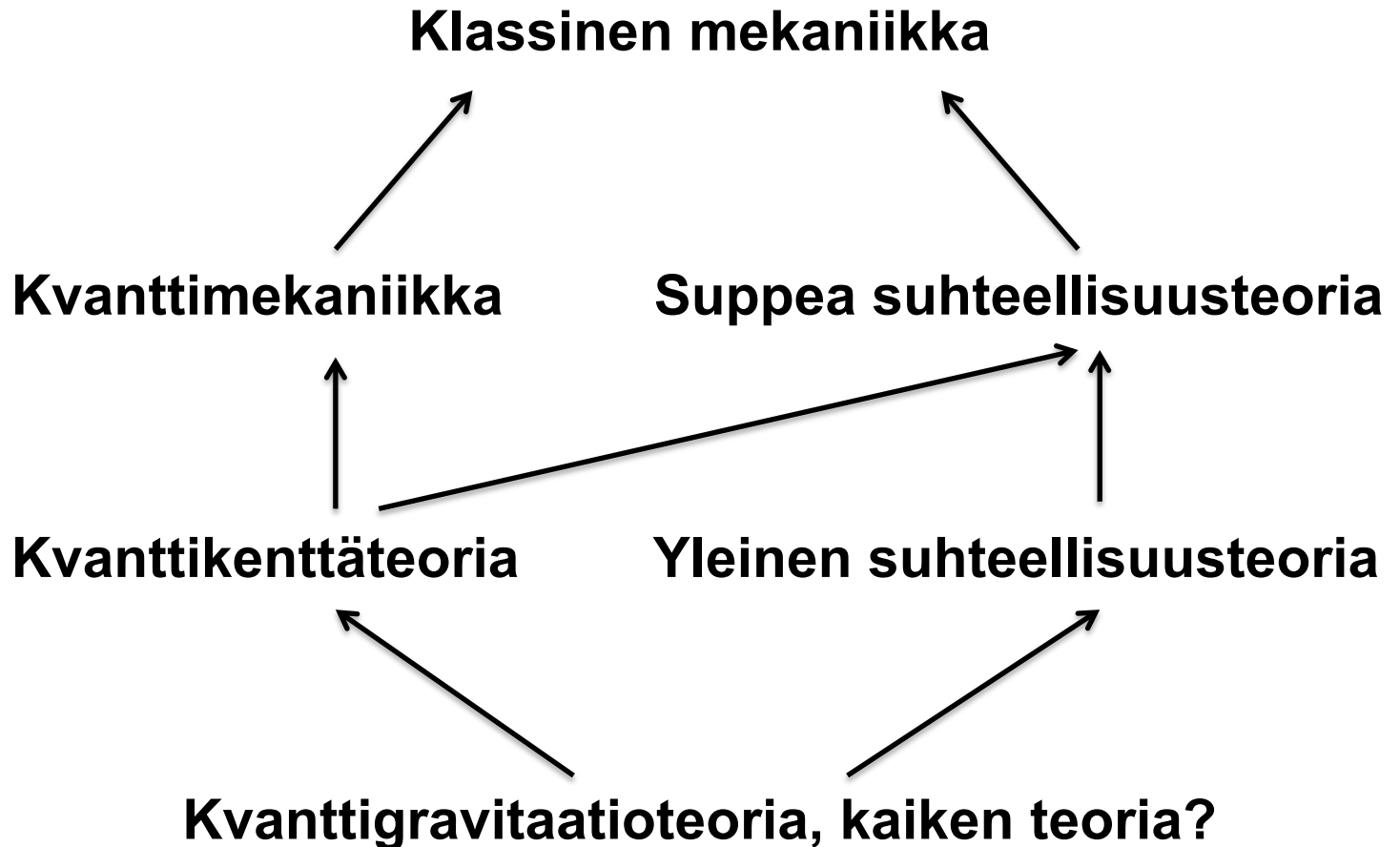
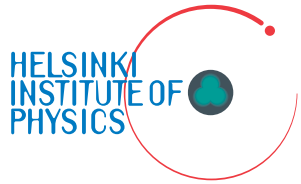


Modernin fysiikan sukupuu





Fysiikan teorioiden rajatapauksia





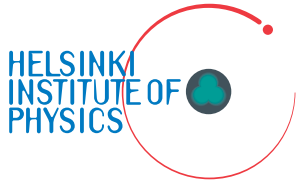
Hiukkasista kenttiin



- Kvanttimekaniikka on **epärelativistinen** teoria hiukkasista.
- Kvanttimekaniikan ja suppean suhteellisuusteorian yhdistäminen edellyttää sitä, että kaikki aine koostuu kentistä, niistä erillisiä jyväsiä ei ole.
- Kvanttikenttäteoria on **relativistinen** teoria kentistä.
- Klassisessa mekaniikassa kaikki koostuu hiukkasista, sähkömagnetismi toi mukaan kentät, kvanttikenttäteoria jättää vain kentät jäljelle.



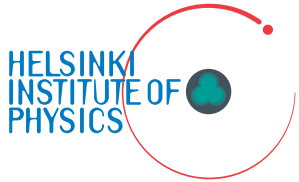
Uutta aineesta, ei olemisesta



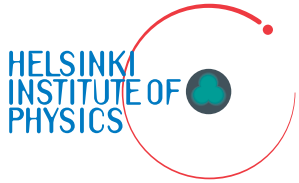
- Kvanttimekaniikka on teoria aineesta, ja sen tutkiminen on paljastanut uusia asioita olemisesta ja tapahtumisesta.
- Kvanttikenttäteoria selventää ja syventää kuvaa aineesta ja sen vuorovaikutuksista.
- Se ei kerro mitään uutta tapahtumisesta ja olemisesta (epämääräisyys, epädeterminismi, romahdus).
 - Kvanttikenttäteoria saattaa valaista sitä, miksi viestejä kulkee ajassa vain yhteen suuntaan.



Kenttiä kaikkialla



- Fotonit ovat sähkömagneettisen kentän (eli fotonikentän) aaltoja, elektronit elektronikentän aaltoja.
- Kutakin hiukkaslajia (fotonit, elektronit, jne.) vastaa yksi kenttä.
- Kaikki tietyn lajin hiukkaset ovat saman kentän tihentymiä.
- Kentässä voi olla myös muunlaista käytöstä kuin paikallisia tihentymiä. (Esimerkiksi vakiosähkökenttää ei voi kuvata hiukkasten avulla.)

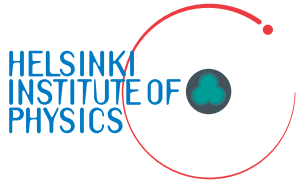


Hiukkasen kolme merkitystä

- Sanalla **hiukkanen** on kvanttikenttäteoriassa kolme eri merkitystä.
- Ensinnäkin se tarkoittaa klassisen mekaniikan mallia aineen osasille: pistemäistä, jatkuvasti olemassa olevaa jyväästä.
- Toisekseen se tarkoittaa kentän paikallista tihentymää, kuten fotonia tai elektronia.
- Kolmanneksi se tarkoittaa itse kenttää.



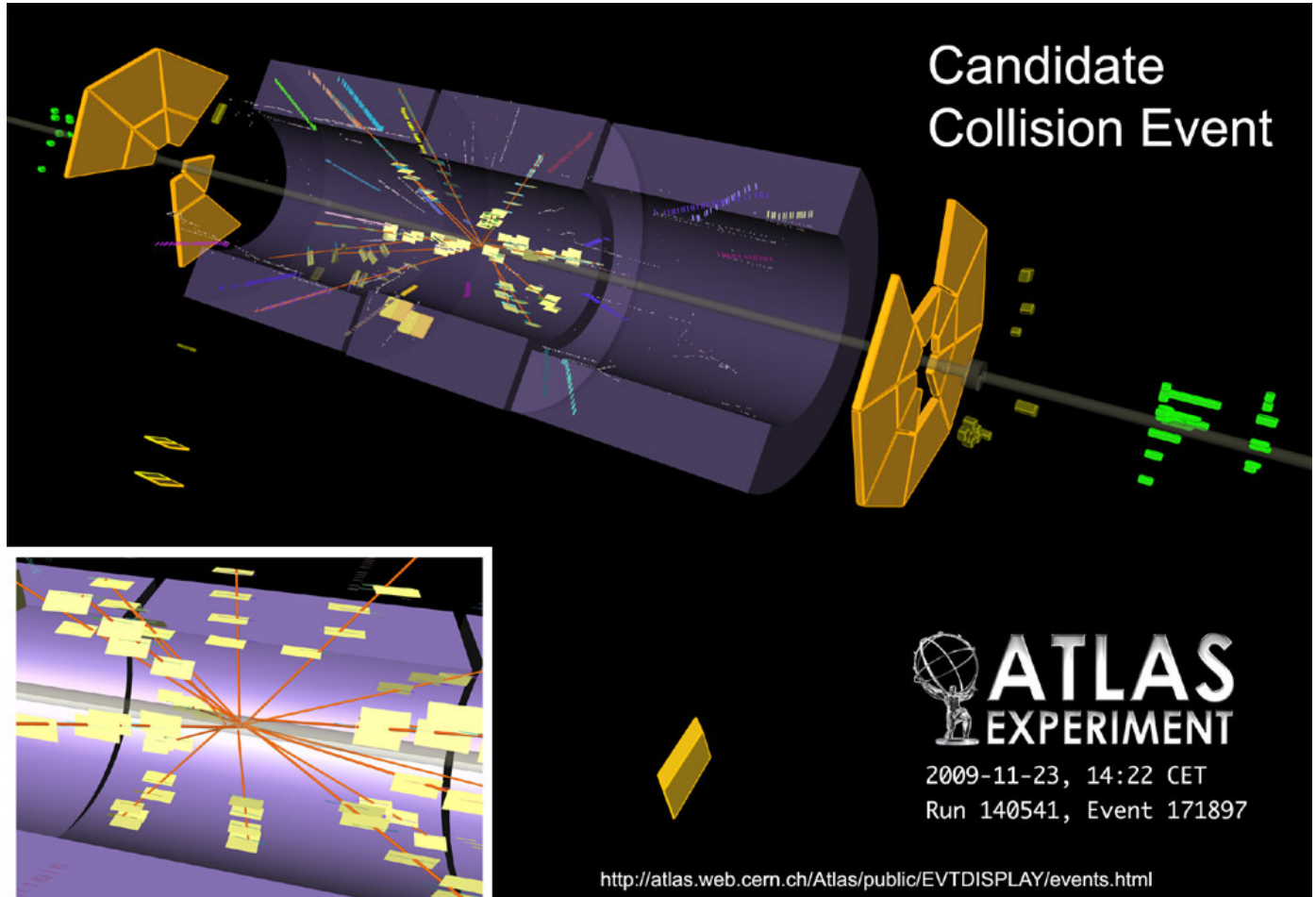
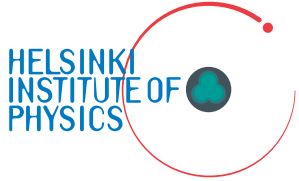
Hiukkasten synty ja tuho



- Kvanttikenttäteoria selittää, mitä kvanttimekaniikan hiukkaset ovat. Ne eivät ole perustavanlaatuisia rakennuspalikoita.
- Kvanttimekaniikan aaltofunktio kuvaa yhteen hiukkaseen liittyviä todennäköisyyksiä (paikka, nopeus).
- Kvanttikenttä kuvaa todennäköisjakaumaa kaikille (yhden lajin) hiukkasille.
- Lisäksi se kuvaa todennäköisyyttä sille, montako kyseisen kentän hiukkasta on olemassa.



Hiukkasten luominen ja hävittäminen





Teoria vuorovaikutuksista



- Newtonin lait eivät kerro, millaisia vuorovaikutuksia on olemassa.
- Kvanttimekaniikka ei kerro, millaisia vuorovaikutuksia on olemassa.
- Molemmassa tapauksissa teoria kertoo, miten hiukkaset käyttäytyvät, jos ne vuorovaikuttavat tietyllä tavalla.
- Kvanttikenttäteoria kertoo, millaisia vuorovaikutuksia on olemassa.



Hiukkaset ja vuorovaikutukset



- Kvanttikenttäteorioita on erilaisia.
- Kvanttikenttäteorian määrittävät kaksi tekijää:
 - Millaisia hiukkasia teoriassa on.
 - Millaisia vuorovaikutuksia hiukkasilla on.
- Kvanttikenttäteorian matemaattinen rakenne sitoo nämä kaksi seikkaa yhteen.
- Rajoittava tekijä on teorian symmetriat, eli muunnokset joissa se säilyy samanlaisena.



Totalitaristinen periaate



- Kvanttikenttäteorioiden rakenne noudattaa Murray Gell-Manin (1929-2019) **totalitaristista periaatetta**:
”Kaikki mikä ei ole kiellettyä on pakollista.”
- Valitaan tietty hiukkassisältö ja symmetria, ja kirjoitetaan yleisin mahdollinen teoria, joka toteuttaa tämän symmetrian.
- Kaikki symmetrian toteuttavat vuorovaikutukset otetaan mukaan. Usein mahdollisuuksia on vain kourallinen.
- Kvanttikenttäteorian symmetriat ovat hyvin rajoittavia.



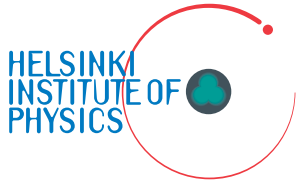
QED



- Ensimmäinen kvanttikenttäteoria oli **kvanttielektrodynamiikka (Quantum Electrodynamics, QED)**.
- Monien vaiheiden jälkeen sen löysivät vuonna 1948 Richard Feynman (1918-1988), Julian Schwinger (1918-1994) ja Shin'ichirō Tomonaga (1906-1979).
- QED:ssa on kaksi kenttää: fotonit ja elektronit.
- Tavoitteena oli kuvata fotoneita, elektroneita ja niiden vuorovaikutusta kvanttimekaanisesti ja relativistisesti.



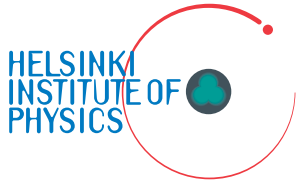
Symmetria poikii



- QED:n voi rakentaa lähtemällä siitä, että on olemassa elektronikenttä ja vaatimalla, että teorialla on sen tiettyyn muunnokseen liittyvä symmetria.
 - Kiertosymmetria kenttien avaruudessa.
- Teoria ei säily samanlaisena, ellei ole olemassa myös toinen kenttä, foton, joka muuttuu vastakkaisella tavalla.
- Sen lisäksi, että symmetria kertoo fotonin olemassaolon ja ominaisuudet, se myös sanelee fotonin ja elektronin mahdolliset tavat vuorovaikuttaa.
 - Niitä on vain yksi.



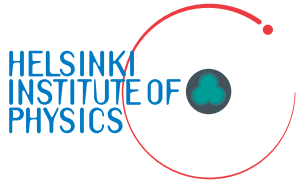
Välittäjähiukkaset



- QED:n yksinkertaisesta lähtökohdasta seuraa Maxwellin yhtälöt, vetyatomi* ja kaikki arjen ilmiöt (gravitaatiota lukuun ottamatta).
 - * Kun lisää protonin.
- QED:ssä elektronien vuorovaikutuksia välittävät fotonit.
- Kvanttikenttäteoriassa yleisesti on ainehiukkasia ja **välittäjähiukkasia**.
 - Välittäjähiukkasten lukumäärä ja ominaisuudet seuraavat symmetriasta, ainehiukkasten kohdalla on valinnanvapautta.



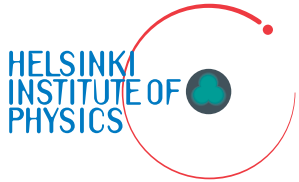
Antihiukkaset



- Kaikilla hiukkasilla, joilla on sähkövaraus (tai jokin muu varaus), on antihiuukkanen, jolla on vastakkainen varaus.
 - Hiukkanen ja antihiuukkanen ovat saman kentän ilmentymiä.
- Negatiivisesti varattua elektronia vastaa positiivisesti varattu positroni.
 - Ennustettu 1931, löydetty 1932.
- Kun hiukkanen ja sen antihiuukkanen kohtaavat, ne **annihiloituvat**, eli muuttuvat toisiksi hiukkasiksi.



Standardimalli



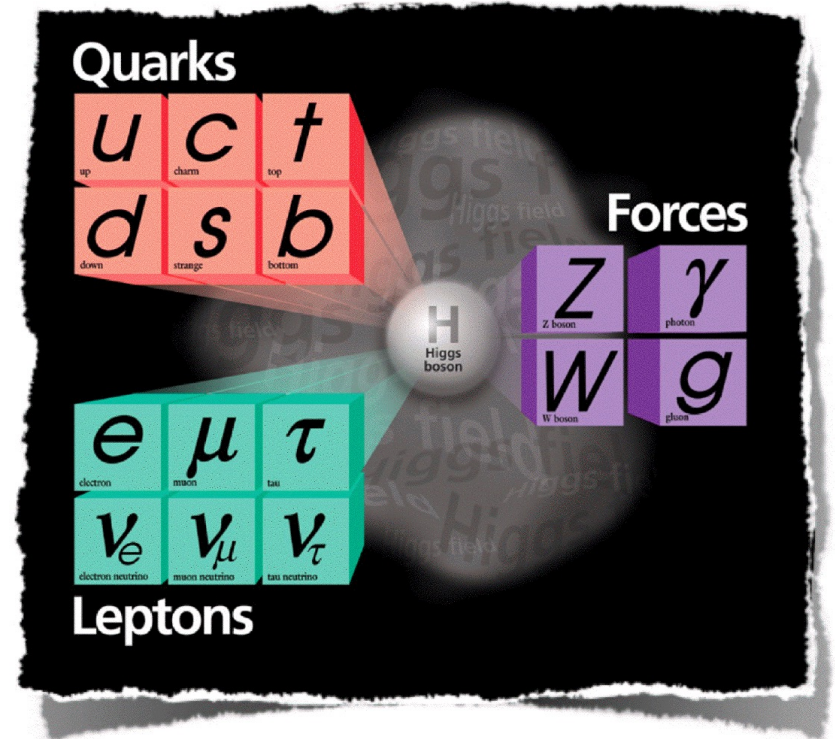
- QED on osa isompaa kokonaisuutta nimeltä hiukkasfysiikan **Standardimalli**.
- Standardimallissa on QED:n lisäksi kaksi muuta osaa, joilla on oma symmetriansa ja siihen liittyvä vuorovaikutus.
- Standardimallin kaikki osat saatiin paikalleen 1970-luvulla. Hiukkaskiihdyttimet ovat varmentaneet sen ennusteet miljardisosan tarkkuudella.



Kolme symmetriaa



- Standardimallissa on kolme vuorovaikutusta.
 - Sähkömagneettinen
 - **Vahva**
 - **Heikko**
- Kullakin on omat välittäjähiukkaset.
 - Symmetria määrää, millaisia ne ovat.

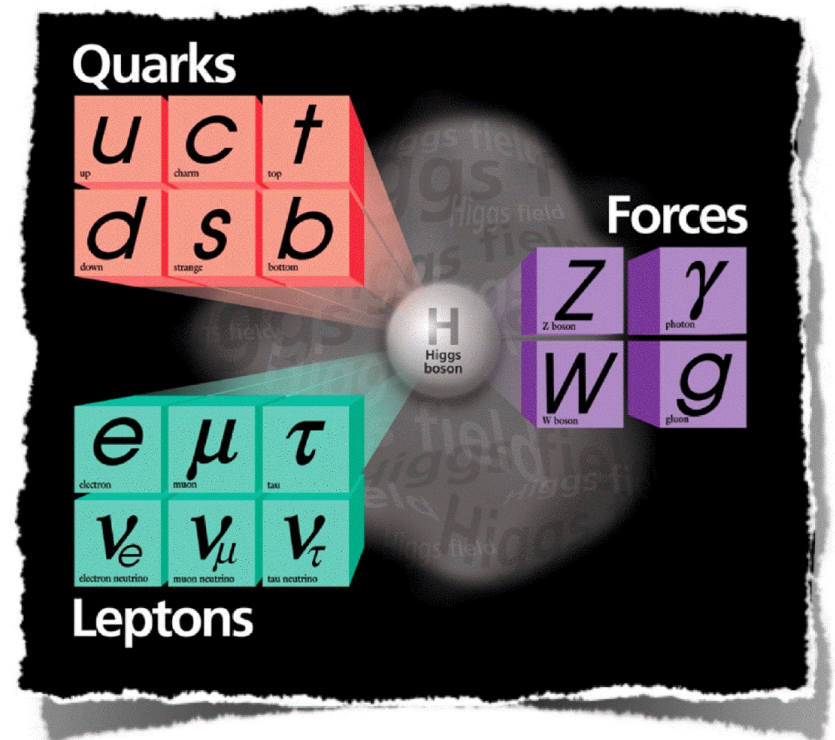




Kolmenlaista ainetta



- Standardimallissa on kolmenlaista ainetta.
 - Leptonit
 - Kvarkit
 - Higgsin hiukkanen
- Symmetria rajoittaa sitä, millaisia ne ovat.
 - Kvarkit ja leptonit ovat pareittain.





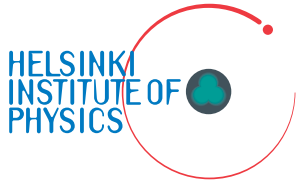
Vahva vuorovaikutus



- Vahva vuorovaikutus tunnetaan myös nimillä **väri vuorovaikutus** ja **kvanttikromodynamiikka** (Quantum Chromodynamics, QCD).
- QCD:ssä on kolme eri varausta, joille on annettu nimet punainen, sininen ja vihreä. Kukin niistä voi olla + tai -.
 - Ei mitään tekemistä valon värien kanssa.
- Väri vuorovaikutuksen tuntevia hiukkasia sanotaan **värillisiksi**.



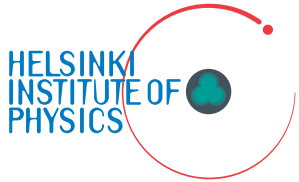
Kvarkkien ja gluonien värit



- Standardimallissa värillisiä ovat kvarkit ja **gluonit**.
 - Kvarkilla on yksi väri (antikvarkilla antiväri).
 - Gluonilla on väri ja antiväri.
- Kvarkit hahmottivat Murray Gell-Man ja George Zweig (1937-) vuonna 1964.
- Koska gluoneilla on väriveraus, ne vuorovaikuttavat toistensa kanssa.
 - Fotonilla ei ole sähkövarausta.
 - QCD on QED:tä monimutkaisempi.



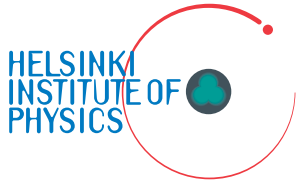
Kaksi tapaa olla väritön



- Sähköisesti varatut hiukkaset ovat sitoutuneet sähköisesti neutraaleiksi kokonaisuuksiksi, **atomeiksi**.
- Värilliset kvarkit ovat sitoutuneet värineutraaleiksi kokonaisuuksiksi, **hadroneiksi**.
- Sähkövarauksia on vain yksi, joten nollavarauksen voi saavuttaa vain laittamalla yhtä paljon + ja - varauksia.
- Värivarauksia on kolme, joten hiukkanen voi olla väritön kahdella tavalla.
 - Yhtä paljon väriä ja antiväriä.
 - Yhtä paljon kaikkia kolmea väriä (tai antiväriä).



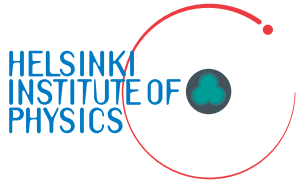
Hadronit



- Hadronit on vanhastaan jaettu kahteen luokkaan:
 - **Mesonit** (yksi kvarkki ja antikvarkki)
 - **Baryonit** (kolme kvarkkia)
- Protonin kvarkkisisältö on *uud* ja neutronin *udd*.
 - Protoni on ainoa stabiili hadroni.
- 2000-luvulla on löydetty uudenlaisia hadroneita:
 - **Tetrakvarkit** (kaksi kvarkkia ja kaksi antikvarkkia)
 - **Pentakvarkit** (neljä kvarkkia, yksi antikvarkki)



Liimapallot

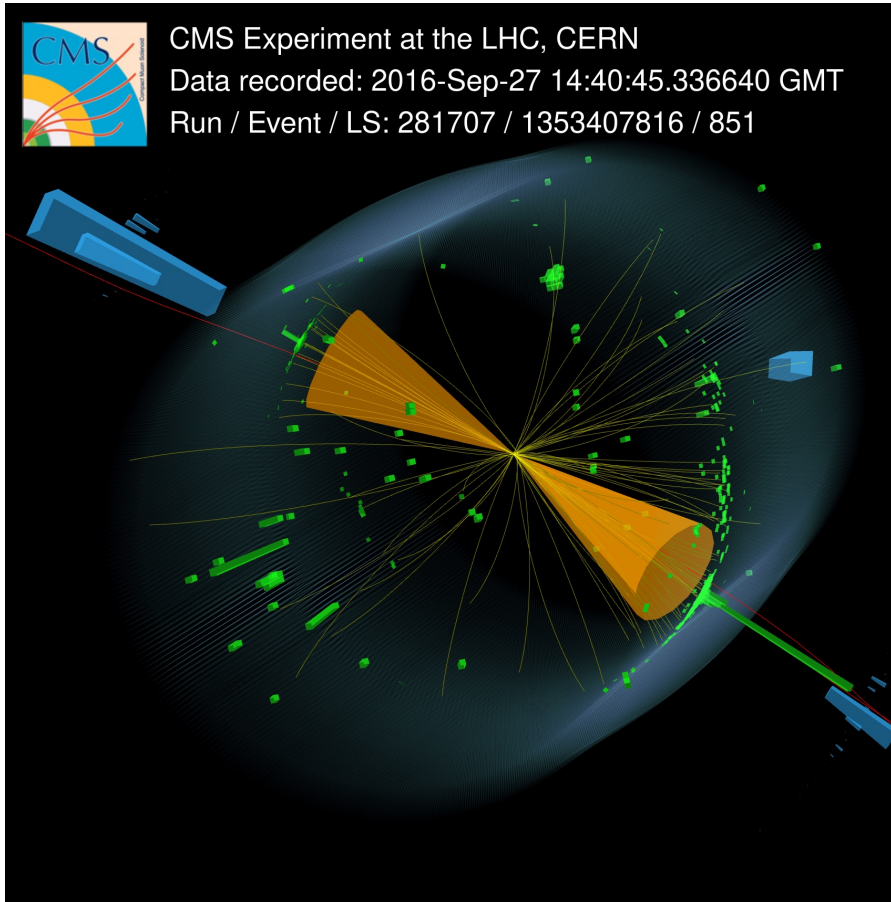
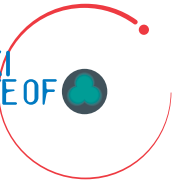


- Gluonien sidottuja tiloja eli **liimapalloja (glueballs)** etsitään.
- Yksinkertaisimmissa on gluoni ja antigluoni tai kolme gluonia.
 - Vrt. mesonit ja baryonit.
- QCD ennustaa (periaatteessa) hadronien ja liimapallojen ominaisuudet.
 - Käytännössä kaikkia ei osata laskea.



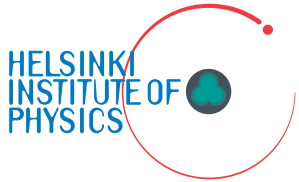
Matka vankeuteen

HELSINKI
INSTITUTE OF
PHYSICS





Väri vankeus



- Atomin voi hajottaa elektroneiksi ja ytimeksi.
- Hadroneita rikottaessa kvarkit sitoutuvat aina toisiksi väri neutraaleiksi tiloiksi.
 - Kvarkkeja tai gluoneja ei havaita, ainoastaan niiden sidottuja tiloja. (**Infrapunaorjuus.**)
- Väri voima on vahva, mutta sen kantama on lyhyt, koska gluonit elävät vankeudessa.
- Sillä, että värillisiä hiukkasia nähdään vain värittömissä yhdistelmissä on nimi **väri vankeus**.



Ydinvuorovaikutus



- Sähkövarauksia sisältävien atomien sitoutuminen molekyyleiksi ja molekyylien vuorovaikutus on **kemiaa**.
- Värivarauksia sisältävien hadronien sitoutuminen atomiytimiksi on **ydinfysiikkaa**.
- Kummassakin tapauksessa varaus on epätasaisesti jakautunut.
- Kuten vahva vuorovaikutus, ydinvuorovaikutus on voimakas, mutta sen kantama on lyhyt.



Atomien rikkominen vs. ydinten rikkominen



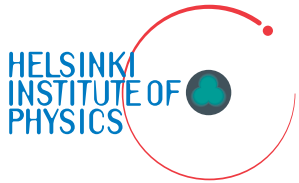
<https://www.pexels.com/photo/fire-fireplace-burning-on-fire-38712/>



<http://www.abomb1.org/images/mohawkb.jpg>



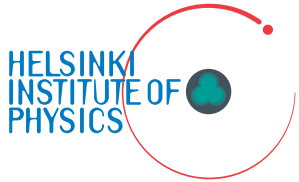
Alkeis- vs yhdistelmä-



- Standardimallin rakennuspalikat ovat **alkeishiukkasia (elementary particles)**, eli niillä ei ole alirakennetta.
- Ytimet, kuten atomit, ovat alkeishiukkasten sidottuja tiloja, **yhdistelmähiukkasia (composite particles)**.
- Yhdistelmähiukkasten massa (tai lepoenergia, $E=mc^2$) koostuu osasten massoista plus sidosenergiasta.



Yksinkertaisuudesta monimuotoisuuteen



- Standardimallissa on 6 leptonia ja 6 kvarkkia.
 - Jokaista kvarkkia on kolmea eri väriä.
- Protonit ja neutronit rakentuvat kvarkeista u ja d .
 - Ytimet rakentuvat protoneista ja neutroneista.
- Leptoneista tavallisessa aineessa on vain elektroneita.



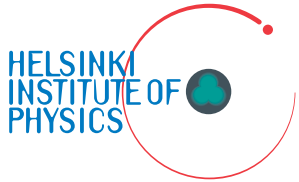
Yksinkertaisuudesta monimuotoisuuteen



- Tavallisen aineen monimuotoisuus juontuu vain kolmesta palasta ja niiden yksinkertaisista symmetrioista seuraavista vuorovaikutuksista.
- Missä ovat muut hiukkaset?



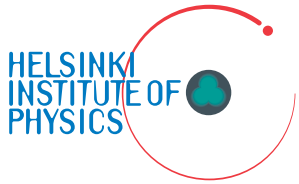
Symmetria ja stabiilius



- Vuorovaikutukset muuttavat hiukkasia toisiksi.
- Hiukkaset hajoavat, ellei ole jotain syytä, miksi ne eivät voi hajota.
 - **Säilymislait** seuraavat symmetrioista.
- Elektroni on kevyin hiukkanen, jolla on sähkövaraus.
- Kvarkit u ja d ovat kevyimpiä hiukkasia, joilla on **baryoniluku**.



Säilyviä varauksia

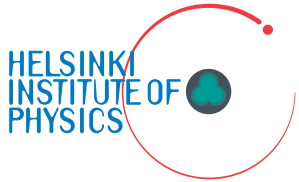


	sähkö- varaus	värivaraus	baryoni- luku	leptoni- luku
kvarkit u, c, t	+2/3	yksi väri	+1/3	0
kvarkit d, s, b	-1/3	yksi väri	+1/3	0
leptonit e, μ, τ	-1	0	0	+1
neutriinot	0	0	0	+1
fotoni	0	0	0	0
gluonit	0	yksi väri ja yksi antiväri	0	0
Z	0	0	0	0
W	+1	0	0	0

Lisäksi energia ja liikemäärä säilyvät.



Hiukkasten hajoaminen



- Myös suurin osa ytimistä hajoaa, eli ne ovat **radioaktiivisia**.
- Kvanttikenttäteoria ennustaa vain hajoamisen todennäköisyyden, ei koska se tapahtuu.
- Jotkut ytimet hajoavat ydinvuorovaikutuksen takia nopeasti.
- Toiset hajoavat hitaasti, koska niiden hajoamisesta on vastuussa heikko vuorovaikutus.



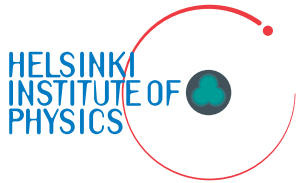
Heikko vuorovaikutus



- Heikkoa vuorovaikutusta välittävät W - ja Z -bosonit.
- Kuten gluonit, ne vuorovaikuttavat toistensa kanssa.
- Kuten väri vuorovaikutus, heikko vuorovaikutus ei ulotu kauas, eikä vaikuta arjen mittakaavassa.
- QED ja heikko vuorovaikutus ovat osa samaa kokonaisuutta, **sähköheikkoa vuorovaikutusta**.



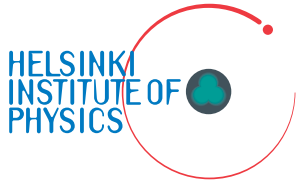
Sähköheikko symmetriarikko



- Sähkömagneettinen ja heikko vuorovaikutus ovat yhdessä korkeilla energioilla.
- W - ja Z -bosonit ja fotonit ovat silloin massattomia.
- W - ja Z -bosonit (toisin kuin fotonit) vuorovaikuttavat suoraan **Higgsin kentän** kanssa.
- Kun Higgsin kentän arvo on nolasta eroava, se rikkoo symmetrian näiden hiukkasten välillä ja antaa massan W - ja Z -bosoneille (mutta ei fotonille).



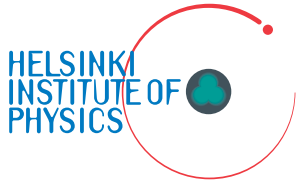
Massojen mekanismi



- Peter Higgs (1929-) hahmotti vuonna 1964, että W - ja Z -bosonit saavat massansa Higgsin kentältä.
 - Higgs antaa massan myös tunnetuille kvarkeille ja leptoneille (paitsi ehkä neutriinoille).
- Mitä voimakkaammin hiukkanen vuorovaikuttaa Higgsin kentän kanssa, sitä isomman massan se saa.
 - Standardimalli ei selitä näiden vuorovaikutusten voimakkuutta.
- Suurin osa protonien ja neutronien massasta, ja siten tavallisen aineen massasta, tulee vahvan vuorovaikutuksen sidosenergiasta.



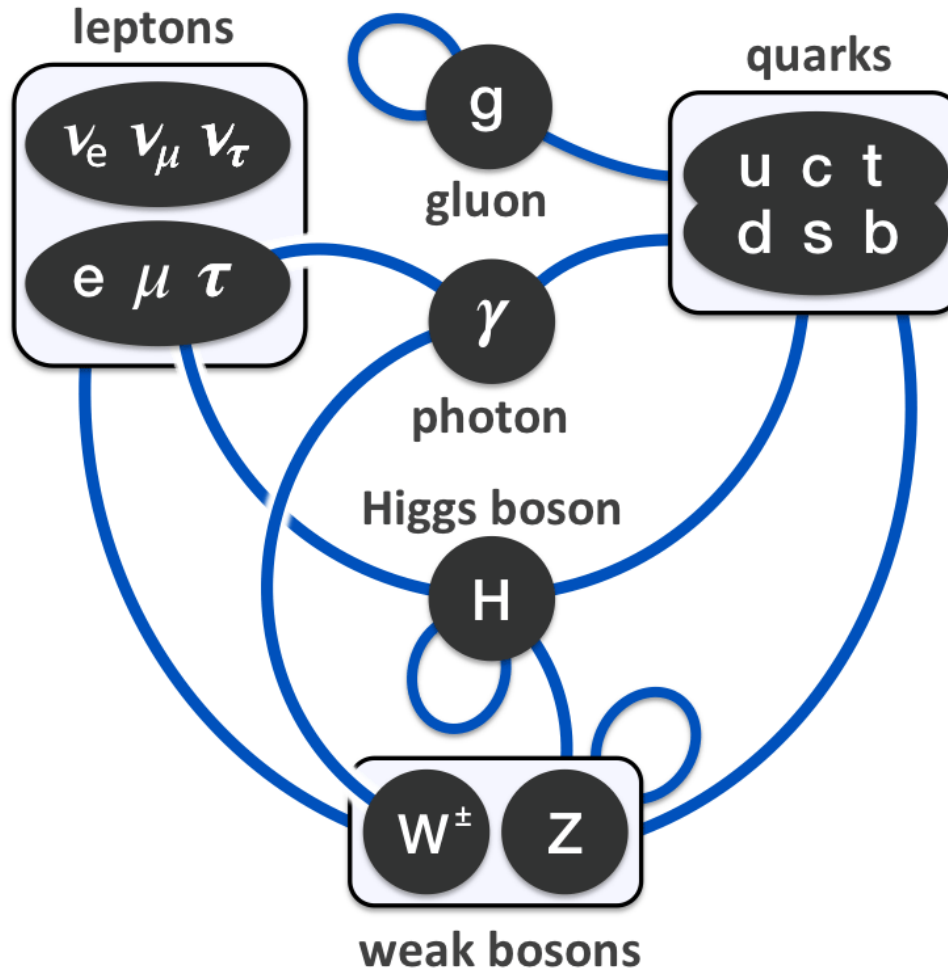
Viimeinen pala



- Kvanttikenttäteoria on perustavanlaatuinen teoria aineesta, sekä muista vuorovaikutuksista kuin gravitaatiosta.
- Standardimalli tuli valmiiksi 1973 top-kvarkin myötä.
- Higgsin hiukkanen oli viimeinen Standardimallin löydetty pala (löydetty 2012, Nobelin palkinto 2013).



Standardimallin hiukkaset ja vuorovaikutukset

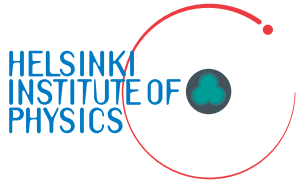


Viivat yhdistävät hiukkasia, jotka vuorovaikuttavat toistensa kanssa suoraan.

(Vaikka kaikki muut hiukkaset poistettaisiin, viivalla yhdistetyt hiukkaset vuorovaikuttaisivat keskenään.)



Maan päältä taivaaseen



- Standardimalli on vienyt pitkälle maailman monimutkaisuuden selittämisen yksinkertaisista lähtökohdista.
 - Silmien näköalue määräytyy elektronin massasta, eli siitä, miten voimakkaasti se vuorovaikuttaa Higgsin kanssa.
- Se on tarkimmin testattu teoria historiassa.
- Poikkeamia siitä on etsitty hiukkaskiihdyttimissä kohta 50 vuotta, tuloksetta.
- Kosmologiassa on nähty Standardimallin tuolle puolen.