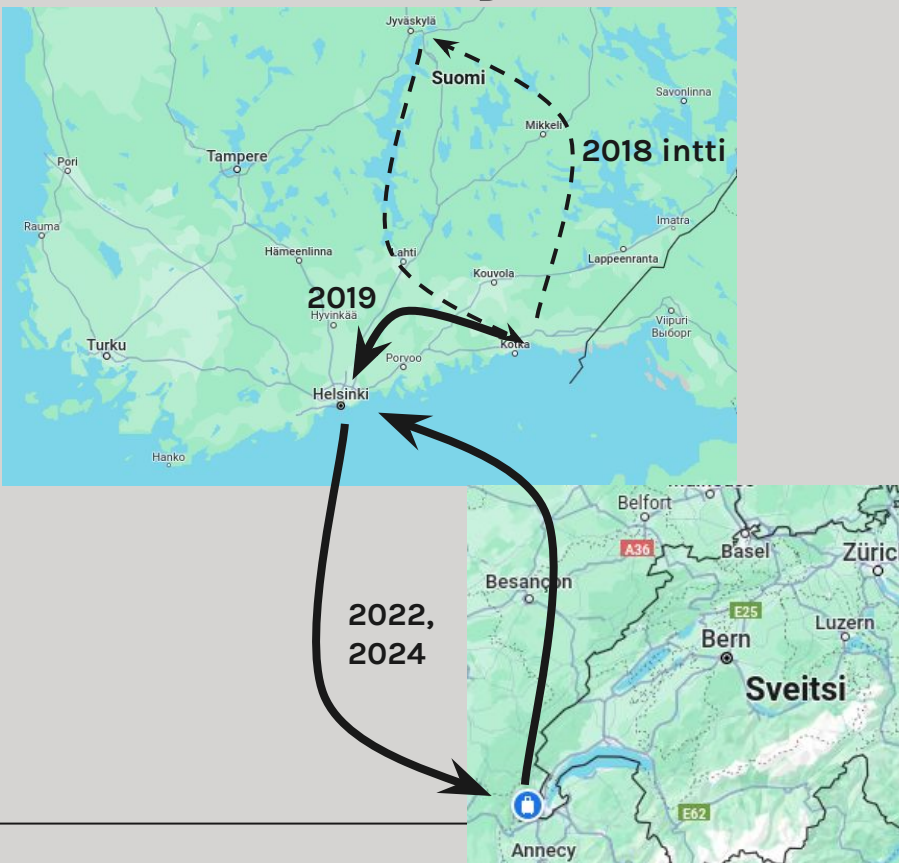


Tie tutkijaksi



Nico Toikka

Lukio: Kotkan lyseon lukio (yo. 2018)
Tyypilliset luma-aineet: pitkä matikka,
fysiikka, kemia, biologia, äikkä, englanti

Ajatuksena lääkis aloittaessa, fysiikka
vaihtoehdoksi vasta 3. vuonna

Yliopisto: Helsingin yliopisto (2019–2023)
Kandivaiheessa mielessä lääketieteellinen ja/tai
biologinen fysiikka (varmahko työllistyminen,
lähellä alkuperäistä lääkissuunnitelmaa)

Hiukkasfysiikka vaihtoehdoksi vasta 3. vuonna
HIPin kesätöiden kautta

Väikkäri: HIP (2024–???)
Hiukkasryöppyjä ja heikon
vuorovaikutuksen hiukkasia.

En vielä tiedä mikä vaihtoehdoksi 3. vuonna



Lähes kaiken teoria – Standardimalli, sen synty ja tulevaisuus

Nico Toikka - Fysiikan tutkimuslaitos

Johdanto

Teoriat fysiikassa

Max Planck, yksi
kvanttimekaniikan
“esi-isistä”



Aluksi on aina ongelma

Kokeet näkevät
jotain mitä teoria ei
kerro

Omena tippuu puusta, magneetti
luo sähkövirran, elektroni ei tipu
ytimeen...



Teoria kertoo jotain
mitä kokeet eivät
näytä

Kiertoratojen ennustaminen,
jaksollisen järjestelmän
täytyminen, selitys joidenkin
hiukkasten massoille...

			Tl — 50	Zr — 90	? — 180
			V — 51	Nb — 94	Ta — 182
			Cr — 52	Mo — 96	W — 186
			Mn — 55	Rh — 104,4	Pt — 197,4
			Fe — 56	Ru — 104,4	Ir — 198
			Ni — Co — 59	Pd — 106,6	Os — 199
			Cu — 63,4	Ag — 108	Hg — 200
			Zn — 65,2	Cd — 112	
			? — 68	Ur — 116	Au — 197?
			? — 70	Sr — 118	
			As — 75	Sb — 122	Bi — 210?
			Se — 79,4	Te — 128?	
			Br — 80	J — 127	
			Rb — 85,4	Ce — 135	Tl — 204
			Sr — 87,6	Ba — 137	Pb — 207
			Ce — 92		
			La — 94		
			Di — 96		
			Th — 118?		
H — 1					
	Be — 9,4	Mg — 24			
	B — 11	Al — 27,4			
	C — 12	Si — 28			
	N — 14	P — 31			
	O — 16	S — 32			
	F — 19	Cl — 35,5			
	Li — 7	Na — 23			
		K — 39			
		Ca — 40			
		? — 45			
		?Er — 56			
		?Yt — 60			
		?In — 75,6			

Mendeleevin jaksollinen
järjestelmä

kunnes ei enää ole

Kokeilijat rakentavat
kokeita
testatakseen
teorioita

Teoreetikot
rakentavat teorioita
selittääkseen
kokeita

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}$$

$$\mathbf{F} = \dot{\mathbf{p}}$$

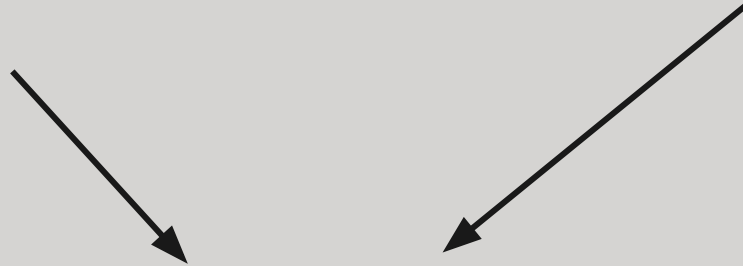
$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$$

Newtonin lait, klassisen
mekaniikan pohjakivet

kunnes taas on

Kokeilijat luovat
tarkempia kokeita ja
tutkivat uusia
alueita

Teoreetikot luovat
vanhan teorian pohjalta
uusi malleja ja miettivät
uutta testattavaa



Löytyy uusia ongelmia
pulmia

CERNin työntekijät valvomassa
alueen valmistumista



Näin on syntynyt

Klassinen mekaniikka

Newton selitti ihmisten ja planeettojen kokoluokassa olevan liikkeen, ja rakensi samalla matemaattisen välineistön muuttuvien asioiden laskemiseen

Kvanttimekaniikka

Planck selitti mustan kappaleen säteilyn energian kvanttiluonteella. **Schrödingerin** aaltoyhtälö pystyi kertomaan aineen kehityksen ajassa ja paikassa (klassisilla nopeuksilla!)

Sähkömagnetismi

Maxwell yhdisti 1800-luvun sähkömagneettiset löydöt teoriaksi, joka näytti valon olevan sähkömagneettinen ilmiö

Kvanttikenttäteoria (QFT)

Dirac yhdisti suppean suhteellisuusteorian ja kvanttimekaniikan luoden kuvauksen relativistisille hiukkasille

Suhteellisuusteoria

Einstein lisäsi klassiseen mekaniikkaan vaatimuksen suurimmasta nopeudesta ja kuvasi valon liikettä suurten massojen lähellä

Standardimalli

QFT:n päälle rakennettu malli, joka kehittyi 1900-luvulla kuvaamaan hiukkasfysiikan löytöjä.

01

**Kvanttisähköoppi
– Quantum
Electrodynamics**



Richard Feynman,
Kvanttisähköopin kehittäjä
sekä tunnettu luennoitsija

Hiukkaset 1900-luvun alussa

Atomit



Painavin aineen yksikkö

Rutherford löysi atomiytimen, joka oli silloin ainut positiivisen varauksen omaava hiukkanen

Elektronit



Virtaa ja säteilyä

Thomson löysi elektronin selityksenä katodisäteilylle. Elektronien yhtenäistä liikettä, sähkövirtaa, pystyttiin kuvaamaan hyvin Maxwellin yhtälöillä

SÄHKÖVARAUKSELLISTA

Fotonit



Valo

Einstein kykeni selittämään valosähköisen ilmiön, jossa valo pystyy irrottamaan elektroneita atomeista, valokvanteilla, eli fotoneilla. Fotoni on massaton ja varaukseton spin-1 hiukkanen

Kvanttisähköoppi ja antiaine

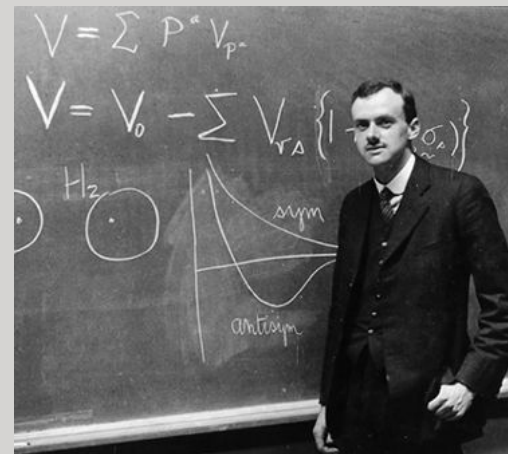
Valon ja relativististen hiukkasten liike

Paul Dirac yhdisti Schrödingerin aaltoyhtälön Einsteinin suppeaan suhteellisuusteoriaan (1928). Uusi teoria, kvanttisähköoppi, kuvasi relativististen elektronien liikettä ja pystyi selittämään fotonien spontaanin emission atomeista

Antihukkaset

Diracin teoria piti sisällään negatiivisen energian ratkaisuja, mikä voi kuulostaa ongelmalliselta. Selitys löydettiin myöhemmin (~1930) positroneista, elektronien antihiukkasista.

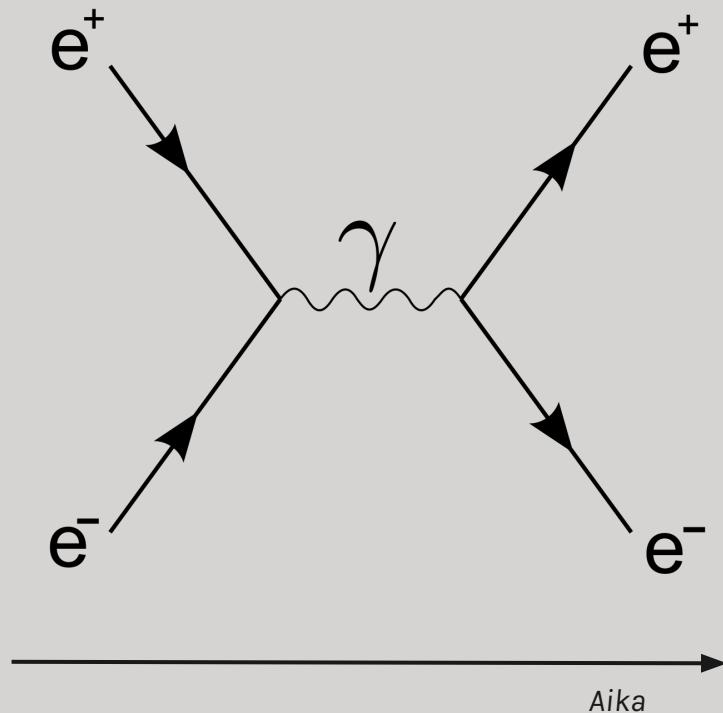
Paul Dirac



Feynmanin kaaviot

Tutkiessaan kvanttisähköoppia Feynman kehitti kaaviot, jotka kuvaavat hiukkasten välisiä vuorovaikutuksia

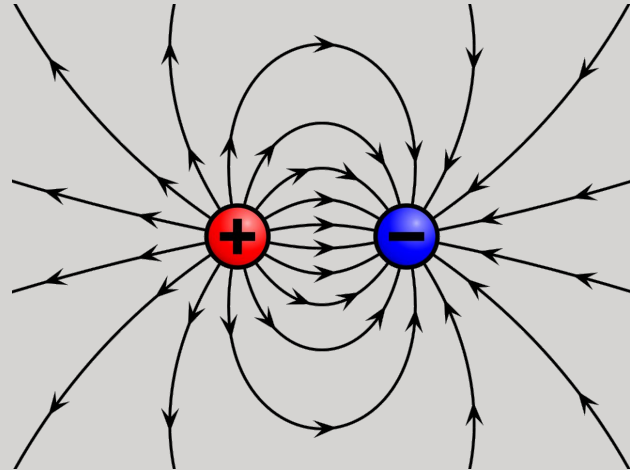
Nätistä kuvasta huolimatta kaavio pitää sisällään merkittävän matemaattisen koneiston, jonka avulla pystyy ennustamaan esimerkiksi vuorovaikutusten todennäköisyyksiä



Kvanttisähköoppi kuvaa kaikkea sähkövarauksellista ainetta

Jos aineella on varaus, se vuorovaikuttaa QED:n välittäjähiukkasen, fotonin, kautta

Antiaine ja aine voivat vuorovaikuttaa keskenään, jolloin annihilaatiossa syntyy fotoni



02

**Kvanttivärioppi
– Quantum
Chromodynamics**

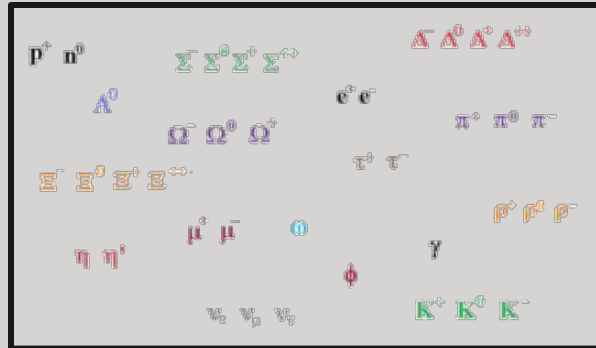


Murray Gell-Mann,
Kvanttiväriopin sekä
kvarkkien keksijä

Hiukkatarha

Kokeellisen hiukkasfysiikan riemukulku

Kiihdytinfysiikan kehittyessä löydettiin lukuisia uusia silloin näennäisesti alkeishiukkasia



Pioneja, lambdaoja, kaoneita, kaikenlaisia...
Hiukkasten tarhasta näytti puuttuvan yhtenäisyys

Missä kauneus?

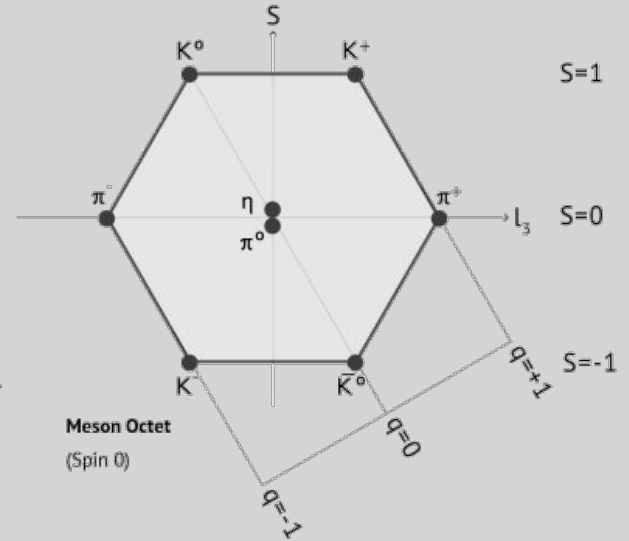
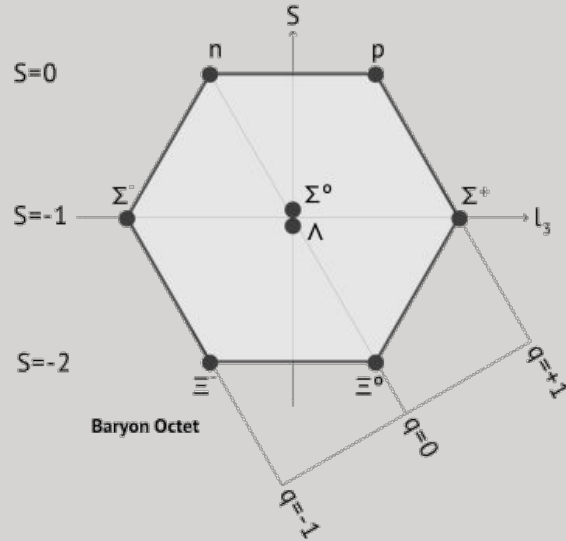
Teorioiden muodostamisessa usein etsitään “matemaattista kaunetta” -> mahdollisimman paljon pitäisi selittyä mahdollisimman vähällä

Symmetriasta suuntaa

Hiukkastarhan luokittelua

Hiukkaset eivät olleet
kuitenkaan täysin erilaisia.
Joidenkin massat olivat
lähekkäin, kun taas kaikilla oli
joko spin- $1/2$ tai spin-0. Varaukset
olivat aina +1, -1 tai 0

Näytti siltä, että hiukkaset ovat
askeleen päästä toisistaan



Jotain protonin sisällä?

Kvarkkien teoria

Samalla kehittäessään hiukkastarhan symmetriaa Gell-Mann kehitti teorian kvarkeista. Malli sisälsi ylös-, alas- ja outo-hiukkaset, mutta malliin kehittyi myös lumo-, pohja- ja huippu-hiukkaset

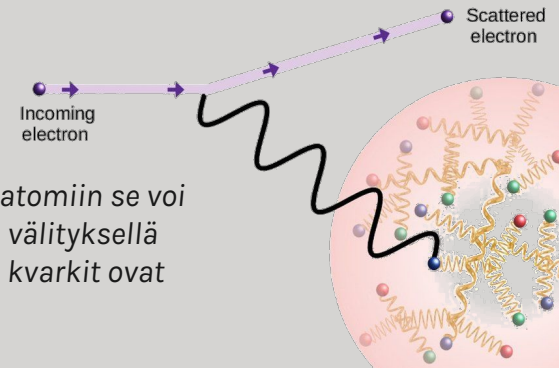
Vahvistus kokeista

Stanfordin lineaarikiihdytinkeskuksella tehdyt kokeet (1968) vahvistivat atomien partonirakenteen. Atomit eivät olekaan alkeishiukkasia, vaan koostuvat partoneista, joita ovat kvarkit ja gluoni

Terminologiaa

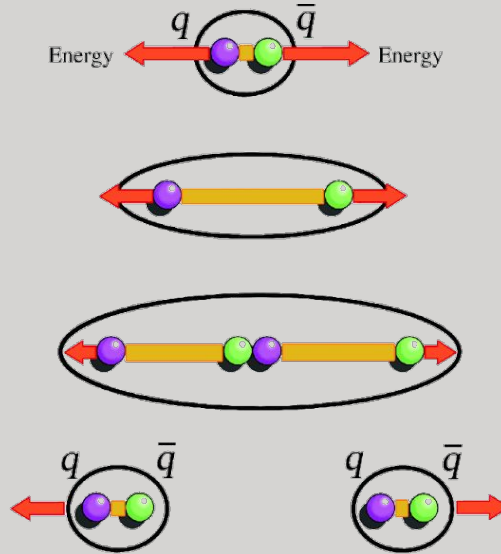
Kaikki kvarkeista koostuvat hiukkaset ovat **hadroneita**. Jos hadronissa on parillinen määrä kvarkkeja, se on **mesoni**. Jos hadronissa on pariton määrä kvarkkeja, se on **baryoni**.

Ampumalla elektronin atomiin se voi vuorovaikuttaa fotonin välityksellä kvarkkien kanssa, sillä kvarkit ovat varattuja hiukkasia



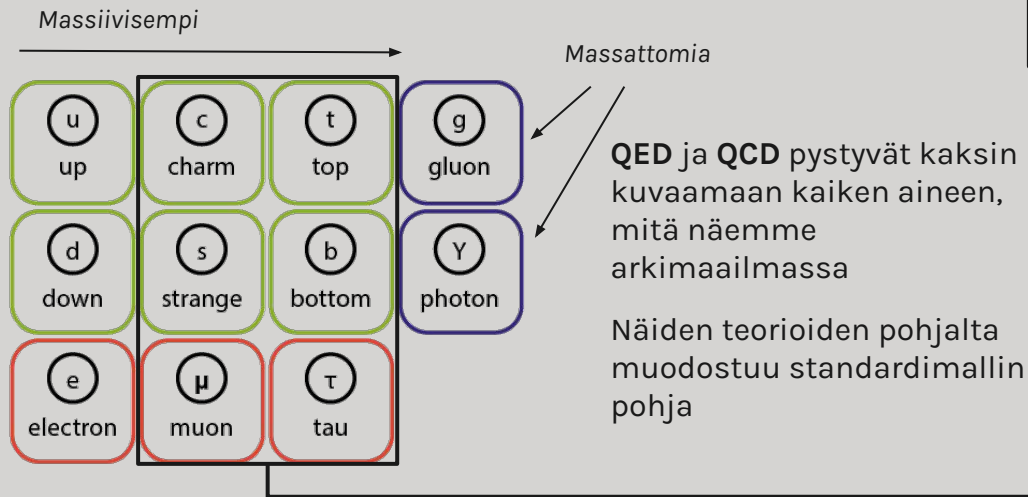
Kvanttivärioppi on vahvan vuorovaikutuksen ja värivarauksen teoria

Gluoni on vahvan vuorovaikutuksen välittäjähiukkanen. Gluoneilla ja kvarkeilla on värivaraus, mutta ne näkyvät luonnossa vain värineutraaleina hiukkasina, kuten protoneina



Vahva vuorovaikutus ei heikkene tietyn pisteen jälkeen \rightarrow lisätty energia menee hiukkas-antihhiukkaspariin

Välikatsaus: Näkyvä aine ja standardimalli



Lisätietoa

Bosoneilla on kokonaisluku spin (esim. 1 tai 0), **fermioneilla** on spin $\frac{1}{2}$ tai sen monikerta (esim. spin $\frac{3}{2}$). Fermionit voi jakaa **kvarkkeihin**, joilla on väriveraus, ja **leptoneihin**, jotka ovat väri neutraaleja.

Myös baryonit ovat fermioneja ja mesonit bosoneita!

Kvarkeilla on joko $+\frac{1}{3}$ (u_ct) tai $-\frac{2}{3}$ (d_sb) varaus. **Jokaisella** standardimallin hiukkasella on oma antihukkanen, jolla on vastakkainen varaus. Hiukkaset kuten fotoni ja gluoni ovat omia antihikkasiaan

Kokeista löytyi uusia hiukkasia, mutta teorian tasolla näiden vuorovaikutukset olivat hyvin ymmärrettyjä - samankaltaisia fermioneja kuin aikaisemmat

03

**Heikko
vuorovaikutus ja
Higgsin bosoni**

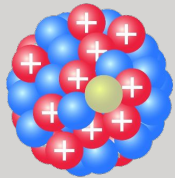
Francois Englert ja Peter Higgs,
Brout-Englert-Higgs-mekanismin
sekä samalla Higgsin bosonin
keksijät



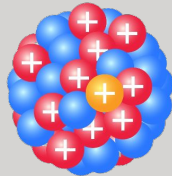
Säteilystä potkua

Beetahajoaminen

1920-luvulla säteilyn ja radioaktiivisen hajoamisen tutkimus oli vauhdissaan. Yksi säteilyn muoto on beetahajoaminen, jossa ydin vaihtaa protonin neutroniksi (tai toisinpäin) ja emittoi elektronin sekä antineutriinon



Parent



Daughter



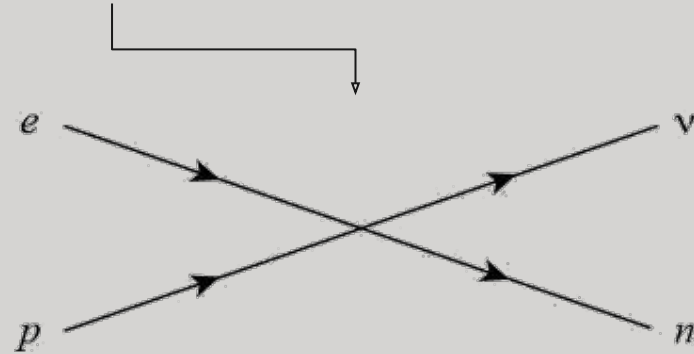
Beta Particle



Anti-Neutrino

Heikko vuorovaikutus

Fermi kehitti teorian beetahajoamiselle, mistä syntyi heikko vuorovaikutus. Tällöin hiukkasten miellettiin vuorovaikuttavan ilman välittäjää



Minne energia katosi?

Neutriinot

Beetahajoamisessa syntyvä neutriino on erittäin vaikea havaita. Neutraaleina ja kevyinä hiukkasina ne häidin tuskin havaitaan aineessa



Uudet leptonit

Neutriinoja kuitenkin onnistuttiin havaitsemaan neutriinokokeilla. Jokaiselle leptonille löydettiin vastaava neutriino (tau-neutriino ennustettiin jo ennen löytöä tau-hiukkasen olemassaolosta!)

Kadonnut energia

Kiihdyttimillä kuten LHC neutriinoja ei havaita suoraan, vaan niiden olemassaolo päätellään puuttuvasta energiasta

Heikko vuorovaikutus, osa 2

Uudet bosonit

1960-luvulla kehittyi Glashow-Salam-Weinberg-malli, joka on heikon vuorovaikutuksen perusta.

Uudessa mallissa on 3 uutta massallista bosonia, ja se yhdisti heikon vuorovaikutuksen sähköiseen vuorovaikutukseen luoden sähköheikon vuorovaikutuksen



Varaus: 0



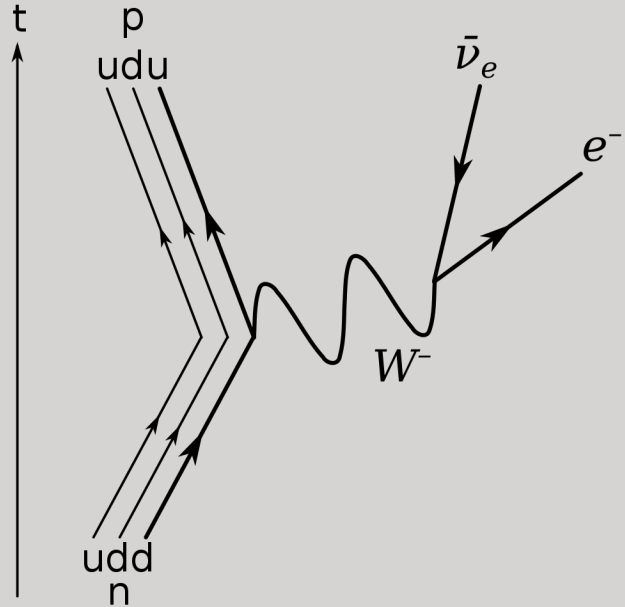
Varaus: +/-1

Mistä massat?

W- ja Z-bosonit ovat massiivisia hiukkasia, ja tämä tiedettiin jo GSW:n syntyessä. Jotta massa olisi teoriassa mukana, vaadittiin uusi kenttä, joka rikkoisi mallin symmetrian

Heikko?

Massojen takia W- ja Z-bosonit hajoavat nopeasti ja kulkevat vain lyhyitä etäisyyksiä. Tästä nimi heikko vuorovaikutus

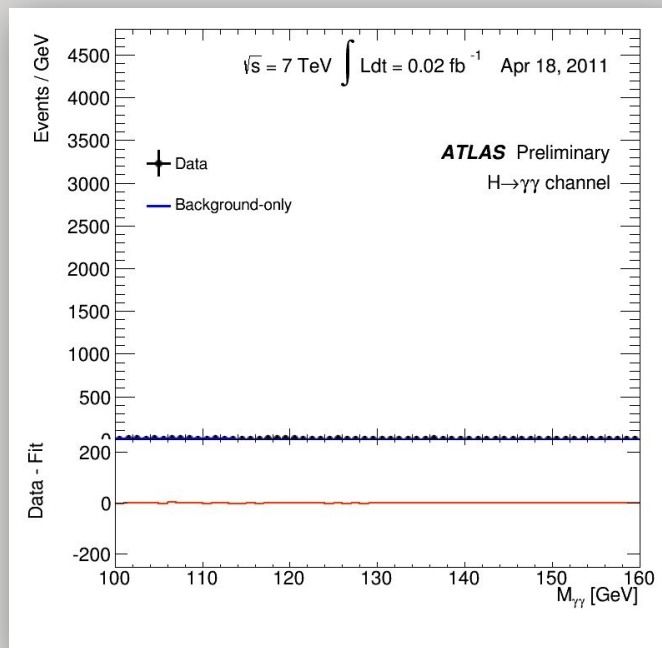


W-bosonin massa on 85 kertaa protonin massa ja 157300 kertaa elektronin!

Higgsin bosoni

Viimeinen pala

1960-luvulla todettiin, että pitäisi olla kenttä, joka kattaa koko avaruuden ja antaa hiukkasille massan. Nykyään kenttä tunnetaan Higgsin kenttänä, joka vuorovaikuttaa aineen kanssa Higgsin bosonin kautta



Vuosituhannen löytö

Higgsin bosoni löydettiin täällä CERNissä vuonna 2012 noin 40:n vuoden suunnittelun jälkeen. Löytö oli viimeinen standardimallin “vaatima”

Skalaaribosoni

Higgsin bosoni tunnetaan myös skalaaribosonina, sillä se on spin-0-hiukkanen - vastaavaa ei ole standardimallissa

Hiukkasfysiikan standardimalli

Lähes kaiken teoria

Standardimalli kattaa kolme neljästä luonnon vuorovaikutuksesta. Se kuvaa kaiken materiaalin luonteen ja pystyy ennustamaan vakioita jopa 10 desimaalin tarkkuudella

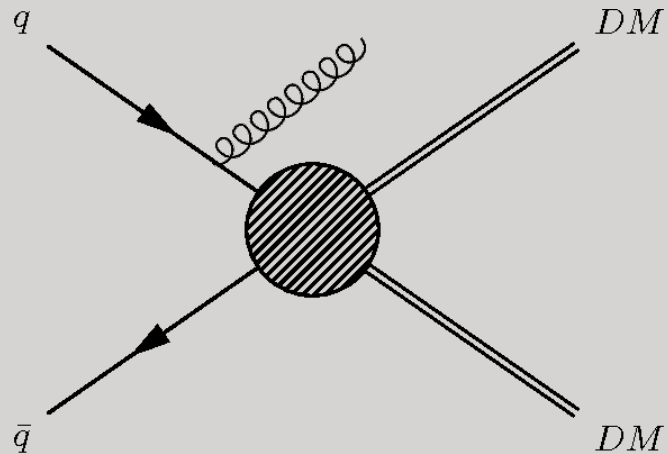
Kristallipallo

Standardimallin rakentuessa 1900-luvulla se ennusti muun muassa uusien kvarkkien, W- ja Z-bosonien, ja uusien neutriinujen olemassaolon ennen kokeellista havaintoa. Erityismaininta Higgsin bosonille, joka keksittiin 60-luvulla ja löydettiin 50-vuotta myöhemmin - juuri sieltä mistä pitikin.



04

Tulevaisuus



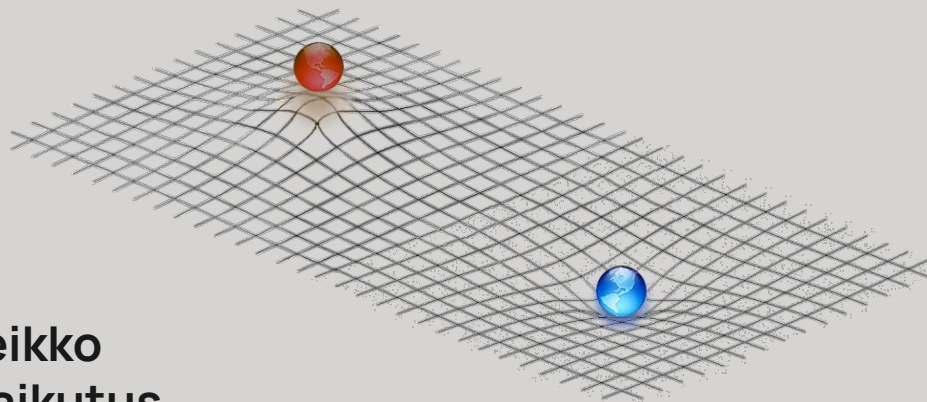
Missä painovoima?

Uusi hiukkanen

Standardimallin silmiin pistävin puute on painovoima-hiukkanen, gravitoni, joka lisäisi neljännen vuorovaikutuksen malliin

Liian heikko vuorovaikutus

Hiukkasten tasolla painovoima on liian heikko havaittavaksi. Gravitonin vaikutus vuorovaikutuskanaviin on mittausten kannalta olematon



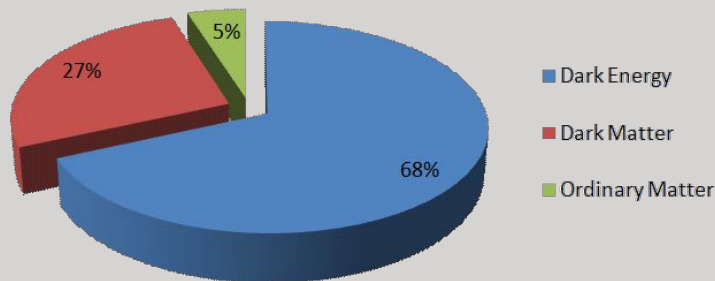
Ääretön ongelma

Standardimallin häiriöteoriassa käytetty renormalisaatio ei ole yhteen sopiva yleisen suhteellisuusteorian kanssa, mistä seuraa äärettömyksiä teorialaskuihin

Missä 95 % energiasta?

Pimeä sektori

95 % prosenttia havaitusta energiasta ja 85 % aineesta koostuu pimeästä energiasta ja aineesta



Sähkömagnetismin ulkopuolella

Pimeä aine ei näytä vuorovaikuttavan valon kanssa. Kytkennät Higgsin kenttään ja värikenttään kuitenkin mahdollistaisivat sen havaitsemisen kiihdyttimillä

Epätasapainottelua

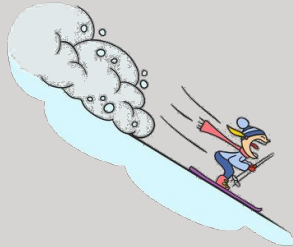
Vaikka alkuräjähdyksessä olisi pitänyt syntyä yhtä paljon hiukkasia ja antihiukkasia, havaitsemme vain oikeita hiukkasia ympärillämme

Baryogeenille, eli aineen ja antiaineen epäsymmetrialle, ei ole mitään selvää syytä standardimallissa...

Tuonpuolen standardimalli

Beyond Standard Model

Uutta fysiikka pyritään selittämään lisäosilla standardimalliin. Mahdollisia lisäosia ovat **supersymmetria, aksionit** ja yksittäiset pimeään aineen hiukkaset



Suunnan puute

Toisin kuin 1900-luvulla, hiukkasfysiikassa ei ole vallitsevaa uutta teoriaa tai havaittuja *hiukkasia*, jotka vaatisivat teorian

Yksikin havainto...

Varmistettu uuden hiukkasen havainto voisi aloittaa uuden teorioiden ja havaintojen lumivyöryn



Yhteenveto

Hiukkasfysiikan vallitseva **standardimalli** kattaa kolme neljästä vuorovaikutuksesta ja kuvaa kaikkia havaittuja hiukkasia

Maaillmankaikkeudessa on huomattavia vastaamattomia kysymyksiä, joihin pyritään vastaamaan hiukkasfysiikan menetelmillä kuten uusilla hiukkasilla ja kytkennöillä

Mikään ei kuitenkaan takaa, että olisi uusia hiukkasia. HL-LHC ja Run 3 tulokset ovat kriittisiä hiukkasfysiikan tulevaisuudelle

KIITOS SEURAAMISESTA

Future circular collider on yksi tulevaisuuden suunnitelluista kiihdyttimistä

