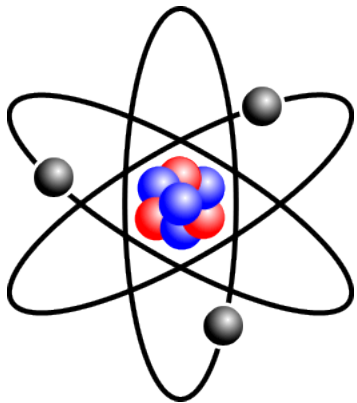


# Hiukkasfysiikkaa

Tapio Hansson

# Aineen Rakenne

- ▶ Thomson onnistui irrottamaan elektronin atomista.
- ▶ Rutherfordin kokeessa löytyi atomin ydin.
- ▶ Niels Bohrin pohdintojen tuloksena elektronit laitettiin kiertämään ympyräradoille atomin ydintä ja Arnold Sommerfeld teki vielä radoista elliptisiä, jonka jälkeen aurinkokuntamalli olikin hienosti kasassa.
- ▶ Kvanttimekaniikan myötä atomin rakenne selvitettiin matemaattisesti.



## Mitä löytyy atomin sisältä

- ▶ Elektronit ovat jo oikeita alkeishiukkasia (Hurraa!)
- ▶ Ydin on valitettavan helppo pilkkoa vielä osiin. Tätä hyödynsi jo Rutherford kokeessaan, tietämättään tosin että oli jo pilkkomassa vasta löytämänsä ydintä.
- ▶ Paitsi, että ytimiä voi pilkkoa, niistä löytyy kahdenlaisia rakennuspalikoita: protoneja ja neutroneja.
- ▶ Hiukkaskiihdyttimien avulla voitiin protoneja ja neutroneja tutkia kuten Rutherfordin kokeessa tutkittiin atomeja.
- ▶ 60-luvun alussa saatiin ensimmäiset kokeelliset viitteet kvarkeista. Nobel-palkinto jaettiin aiheesta vuonna 1990.

# Ja sitten löytyi vielä muutakin

	<p>mass → <math>\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>2/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>u</b></p> <p>up</p>	<p>mass → <math>\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>2/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>c</b></p> <p>charm</p>	<p>mass → <math>\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>2/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>t</b></p> <p>top</p>	<p>mass → <math>0</math></p> <p>charge → <math>0</math></p> <p>spin → <math>1</math></p> <p><b>g</b></p> <p>gluon</p>	<p>mass → <math>\approx 126 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>0</math></p> <p>spin → <math>0</math></p> <p><b>H</b></p> <p>Higgs boson</p>
<b>QUARKS</b>	<p>mass → <math>\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>d</b></p> <p>down</p>	<p>mass → <math>\approx 95 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>s</b></p> <p>strange</p>	<p>mass → <math>\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>b</b></p> <p>bottom</p>	<p>mass → <math>0</math></p> <p>charge → <math>0</math></p> <p>spin → <math>1</math></p> <p><b><math>\gamma</math></b></p> <p>photon</p>	
		<p>mass → <math>0.511 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>e</b></p> <p>electron</p>	<p>mass → <math>105.7 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\mu</math></b></p> <p>muon</p>	<p>mass → <math>1.777 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\tau</math></b></p> <p>tau</p>	<p>mass → <math>91.2 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>0</math></p> <p>spin → <math>1</math></p> <p><b>Z</b></p> <p>Z boson</p>
<b>LEPTONS</b>	<p>mass → <math>&lt; 2.2 \text{ eV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>0</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\nu_e</math></b></p> <p>electron neutrino</p>	<p>mass → <math>&lt; 0.17 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>0</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\nu_\mu</math></b></p> <p>muon neutrino</p>	<p>mass → <math>&lt; 15.5 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>0</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\nu_\tau</math></b></p> <p>tau neutrino</p>	<p>mass → <math>80.4 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>\pm 1</math></p> <p>spin → <math>1</math></p> <p><b>W</b></p> <p>W boson</p>	

## Se oli siinä, jos standardimalliin on uskomista

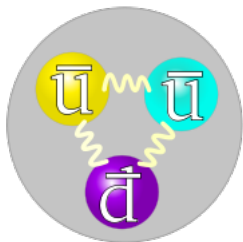
- ▶ Mikään ei periaatteessa takaa, etteikö Standardimallin takaa löytyisi vielä fundamentaalimpikin teoria.
- ▶ Higgsin hiukkasen löytyminen vuonna 2012 tosin vahvisti teorian asemia huomattavasti.
- ▶ Gravitaation sisällyttäminen on kuitenkin vielä tekemättä, ja ilman sitä standardimallia ei voida pitää kovin täydellisenä.
- ▶ Higgsin hiukkasia etsitään tänäpäivänä lisää kuumeisesti. Jos niitä löytyy useampia erilaisia, on standardimallissa jälleen korjattavaa.
- ▶ Standardimalli ei myöskään oikein selitä hiukkas-antihhiukkasepäsymmetriaa, eikä ennusta hiukkasten massoja.

## Eikö tämäkään vielä riitä?

- ▶ Standardimallia yritetään pitää pohjana ns. suurelle yhtenäisteorialle (GUT, grand unified theory).
- ▶ Muitakin vaihtoehtoja on, esim. 80-luvulla innostusta herättänyt säieteoria, supersymmetriateoria ja silmukkakvanttipainovoima.
- ▶ Säieteorialla on useita variantteja, esim. M-teoria.
- ▶ Nämä teorit ovat niin sanottuja kaiken teorioita, jotka periaatteessa selittävät koko fyysisen maailmankaikkeuden.
- ▶ Niiden kokeellinen testaaminen on toistaiseksi poikkeuksellisen mahdotonta.
- ▶ Aiheeseen liittyvä xkcd: <https://xkcd.com/485/>

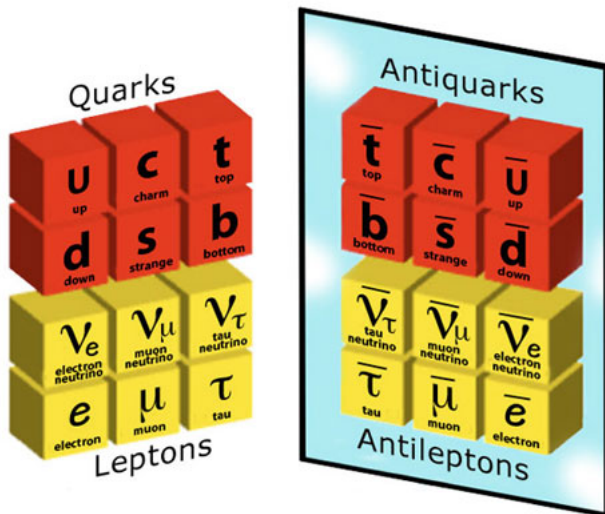
# Antimateria

- ▶ Antimateria kuuluu standardimalliin.
- ▶ Jokaisella standardimallin alkeishiukkasella on oma antishiukkasparinsa. Niiden massat ovat samat, mutta sähkövaraukset (sekä mm. spinit) vastakkaismerkkiset.
- ▶ Antishiukkasista muodostuu vastaavankaltaista antiainetta, kuin tavallisestakin aineesta. (Kolme antikvarkkia muodostaa antiprotonin ja antiprotoni ja positroni antivyötyätomien.)



Antiprotoni

# Antimateria



Kuva: Antimateriaista voi teoriassa muodostua "peilimaailma".



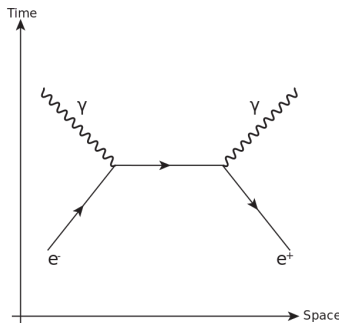
# Annihilaatio

- ▶ Mikäli antimateriahiukkanen kohtaa tavallista materiaa olevan vastinparinsa tapahtuu annihilaatio, jossa kaikki materia muuttuu "puhtaaksi energiaksi", eli fotoneiksi.
- ▶ Syntyvän energian määrä saadaan Einsteinin massan ja energian ekvivalenssin kaavasta

$$E = mc^2,$$

jossa  $E$  on energia,  $m$  materian ja antimaterian yhteenlaskettu massa ja  $c$  valonnopeuden neliö.

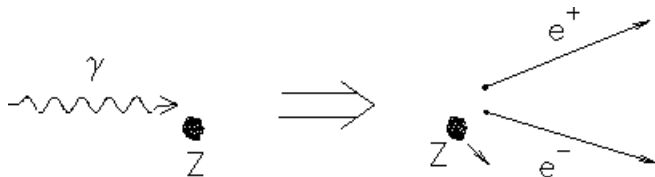
- ▶ Jos siis törmäät joskus anti-itseesi, älä mene kättelemään.



**Kuva:** Feynmandiagrammi elektronin ja positronin annihilaatiosta.

# Parinmuodostus

- ▶ Parinmuodostus on tavallaan annihilaation vastakohta.
- ▶ Korkeaenerginen fotonin voi raskaan ytimen läheisyyden tai jonkin muun vuorovaikutuksen aiheuttamana muuttua elektroni-positronipariksi.
- ▶ Fotonin energian tulee olla vähintään 1.022 MeV ( $1.637 \cdot 10^{-13} \text{J}$ ), eli kahden elektronin lepomassan verran.



## Kvarkeista tarkemmin

- ▶ Kvarkkeja on kolme paria: ylös (u) ja alas (d), outo (s) ja lumo (c) sekä huippu (t) ja pohja (b).
- ▶ Jokaisella kvarkilla toki edelleen antikvarkkinsa, näitä vain ei tavata kotioiloissa.
- ▶ Kvarkkien sähkövaraus on erikoinen, varaukset ovat nimittäin murtolukuja.
- ▶ Ylös, huippu ja lumo omaavat sähkövarauksen  $\frac{2}{3}$  ja alas, pohja ja outo sähkövarauksen  $-\frac{1}{3}$ .
- ▶ Kvarkit eivät voi esiintyä yksinään, ne muodostavat joko kolmikoita tai pareja. Kvarkkikombinaatioista mahdollisia ovat vain ne, joista muodostuu kokonaislukuinen sähkövaraus.
- ▶ Tavallisessa aineessa tavataan vain u- ja d-kvarkkeja.

# Leptoneista

- ▶ Leptonit ovat alkeishiukkasia, jotka esiintyvät yksinään. Tavallisessa aineessa tavataan vain elektroneja.
- ▶ Elektronien lisäksi on  $\tau$ -leptoni ja myoni. Lisäksi jokaista näistä vastaa lähes massaton neutriino, jotka ovat myös leptonneja.
- ▶  $\tau$ -leptonit ja myonit eivät ole vakaita (vaikka ovat alkeishiukkasia), vaan normaaliolosuhteissa ne hajoavat hyvin nopeasti vastaavaksi antineutriinoksi, sekä mahdollisesti kvarkki-antikvarkkipariksi tai kevyemmiksi leptoneiksi.
- ▶ Leptonit jaetaan kolmeen perheeseen. Esim. Elektronin perheeseen kuuluu elektroni ja elektronin neutriino.

## Neutriinoista

- ▶ Neutriinojen massat ovat mitättömän pieniä, mutta niiden valtavan lukumäärän vuoksi ne ovat kuitenkin huomioitavan kokoluokan osa massallista maailmankaikkeutta.
- ▶ Neutriinot vuorovaikuttavat erittäin heikosti muun aineen kanssa, ja suurin osa niistä paahtaakin maapallon läpi täysin huomaamatta.
- ▶ Esimerkiksi japanilaisessa Super Kamiokande-ilmaisimella neutroneja on pyritty ja onnistuttukin tunnistamaan.
- ▶ Auringosta tulee, siellä tapahtuvien reaktioiden johdosta, suuri määrä neutriinoita. Havainnot eivät aluksi osuneet kohdalleen, mutta kun ymmärrettiin, että neutriinot vaihtavat perhettä omia aikojaan, alkoi teoria käydä järkeen. (Neutriino-oskillaatio)

## Mitä näistä saadaankaan aikaan

- ▶ Kaikkia kvarkeista koostuvia hiukkasia sanotaan yleisesti hadroneiksi.
- ▶ Hadronit jaetaan kahteen osaan: baryoneihin ja mesoneihin.
- ▶ Baryonit koostuvat kolmesta kvarkista, kuten protoni tai neutroni.
- ▶ Mesonit sen sijaan koostuvat kvarkista ja antikvarkista, kuten pioni, joka koostuu ylös-kvarkista ja antialas-kvarkista.
- ▶ Hadronien massasta suurin osa on itseasiassa niissä olevien kvarkkien liike- ja potentiaalienergiaa ja vain pieni osa kvarkkien omaa massaa.
- ▶ Lista baryoneista:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_baryons](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_baryons)
- ▶ Lista mesoneista:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_mesons](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_mesons)

## Hiukkasreaktiot

- ▶ Usein puhutaan siitä, miten hiukkaset hajoavat toisiksi, tai törmäyksissä syntyy uusia hiukkasia.
- ▶ Näitä tapahtumia kutsutaan hiukkasreaktioiksi, joita kuvataan samantyyllisillä reaktioyhtälöillä kuin kemiallisia reaktioita.
- ▶ Aivan mikä tahansa ei ole mahdollista, vaan hiukkasreaktioissa on voimassa useita säilymislakeja, joiden puitteissa reaktiot tapahtuvat.
- ▶ Tavalliset ovat energian, liikemäärän, kulmaliikemäärän ja sähkövarauksen säilyminen.
- ▶ Leptoniluku ja baryoniluku säilyvät myös aina, samoin outous.
- ▶ Lisäksi on olemassa erilaisia säilymislakeja, jotka ovat voimassa vain tiettyjen vuorovaikutusten aiheuttaessa reaktion.

# Hiukkasreaktiot

- ▶ Leptonilukuja on itseasiassa kolme, eli yksi jokaiselle perheelle. Elektronin ja elektronin neutriinon  $L_e = 1$ , mutta  $L_\tau = L_\mu = 0$ . Vastaavasti  $\tau$ :n ja sen neutriinon  $L_\tau = 1$ , mutta  $L_e = L_\mu = 0$ .
- ▶ Antileptonien leptoniluku on -1 ja muiden kuin leptonien 0.
- ▶ Baryonien baryoniluku  $B = 1$ , antibaryonien  $B = -1$  ja muiden hiukkasten  $B = 0$ .
- ▶ Reaktioyhtälöissä tulee aina tarkastaa, että molemmilla puolilla yhtälöä on sama määrä säilyviä asioita.

Esim:

$$\mu \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$