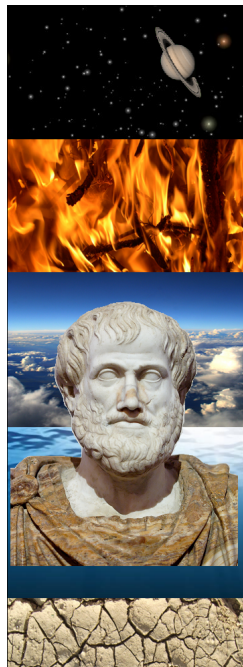


Aineen rakenteesta

Tapio Hansson

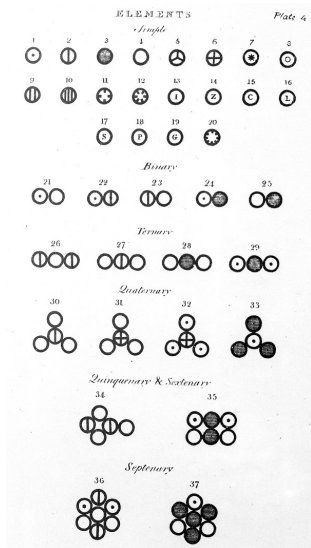
Ykköskurssista jo muistamme...

- ▶ Atomin käsite on peräisin antiikin Kreikasta. Demokritos päätteli alunperin, että jatkuva aine ei voi koostua äärettömän pienistä alkeisosasista → tarvitaan pienin osanen, atomi.
- ▶ Alkuperäisiä Empedoklesin alkuaineita oli maa, vesi, tuli ja ilma. Joskus myös "avaruus" eli eetteri. Itäisissä maissa saattoi olla myös puu ja metalli.
- ▶ Aristoteleen myötä nämä alkuaineet pysyttelivät valtakäsityksenä aina 1800-luvulle asti.



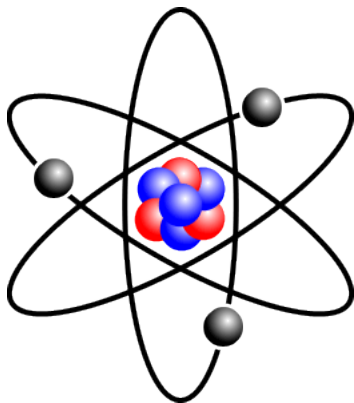
... mm. tämän

- ▶ John Dalton hoksasi, että kemialliset yhdisteet koostuvat alkuaineista aina tietyissä kokonaislukusuhteissa. Näin alkoi muodostua ensimmäinen jaksollinen järjestelmä.
- ▶ J.J. Thomson löysi elektronin, mikä tarkoitti sitä, että atomissa on positiivisia ja negatiivisia varauksia. Vuoden 1900 tienoolla ajateltiin atomin olevan pallukka jossa on vähän positiivisia ja negatiivisia osasia.
- ▶ Sitten Rutherford teki kokeensa ja atomi ei ollutkaan enää jakamaton.



Hereillä olijat saattavat muistaa jotain tästäkin

- ▶ Rutherfordin kokeessa löytyi siis 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.
- ▶ Tällainen mekanistinen lähestymistapa on niin sanottua klassista höttöä, kuten myöhemmin tulemme huomaamaan.



Vieläkö tämä jatkuu?

- ▶ Elektronit ovat jo oikeita alkeishiukkasia (Hurraa!)
- ▶ Mutta ydin on valitettavan helppo pilkkoa vielä osiin. Tätä hyödynsi jo Rutherford kokeessaan, tietämättään tosin että oli jo pilkkomassa vasta löytämänsä ydintä.

Vieläkö tämä jatkuu?

- ▶ Elektronit ovat jo oikeita alkeishiukkasia (Hurraa!)
- ▶ Mutta 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

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
				GAUGE BOSONS	

Se oli siinä, jos standardimalliin on uskomista

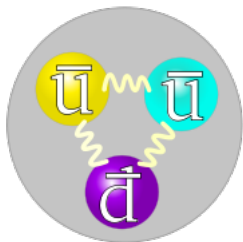
- ▶ Mikään ei periaatteessa takaa, etteikö Standardimallin takaa löytyisi vielä fundamentaalimpikin teoria.
- ▶ Higgsin hiukkasen löytyminen 2012 tosin vahvisti teorian asemia huomattavasti.
- ▶ Gravitaation sisällyttäminen on kuitenkin vielä tekemättä, ja ilman sitä standardimallia ei voida pitää kovin 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/>

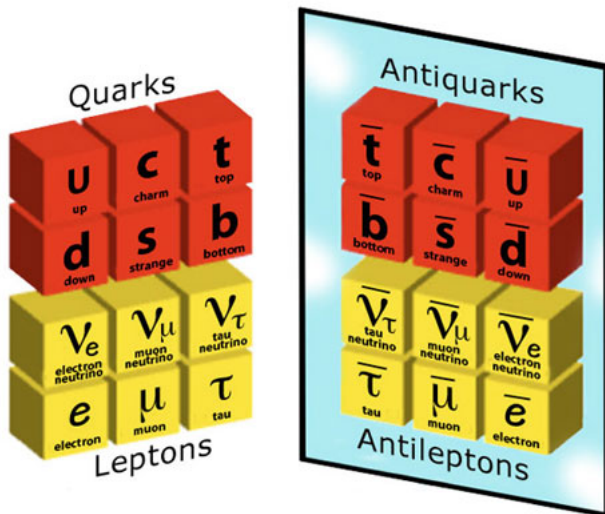
Antimateria

- ▶ 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: Antimateriasta voi teoriassa muodostua "peilimaailma".

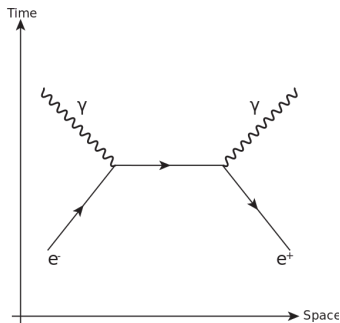
Annihilaatio

- ▶ 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.

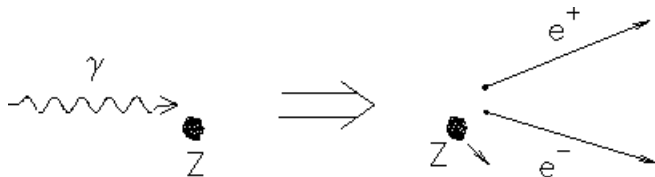
- ▶ Jos siis törmäät joskus anti-itseesi, älä mene kättelemään.



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 τ -leptoni ja myoni. Lisäksi jokaista näistä vastaa lähes massaton neutriino, jotka ovat myös leptonneja.
- ▶ τ -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
- ▶ Lista mesoneista:
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 τ :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:

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