Aineen rakenteen standardimalli

Mikko Laine/CERN

Mistä aine pohjimmiltaan koostuu?

Minkälaisia vuorovaikutuksia aineen pienimmät rakenneosat tuntevat?

Mitä merkitystä tällä kaikella on?

$\boxed{\begin{array}{l}\text{Elektroni} \sim 1900 \\ \text{Protoni} \sim 1905 \\ \text{Neutroni} \sim 1930\end{array}}$	$\Rightarrow$	kaikki normaali aine
$\boxed{\text{Positroni} \sim 1930}$	$\Rightarrow$	on olemassa antiainetta!
$\boxed{\text{Myoni} \sim 1935}$	$\Rightarrow$	on olemassa “normaalin” fysiikan kannalta “tarpeetonta” ainetta!
$\boxed{\text{Neutriino} \sim 1955}$	$\Rightarrow$	on myös “näkymätöntä” ainetta!
$\boxed{\text{Kvarkit} \sim 1965}$	$\Rightarrow$	aineella on hienorakennetta!

Uusien hiukkasten lisäksi on löytynyt uusia luonnonlakeja:

Klassinen hiukkasmekaniikka $\sim$1600
(Newtonin liikeyhtälöt)

Klassinen kenttäteoria $\sim$1800
(sähkömagnetismi, painovoima)

Kvanttimekaniikka $\sim$1900
(hiukkas–kenttädualismi)

Kvanttikenttäteoria $\sim$1940
(kvanttimekaniikka + erikoinen suhteellisuusteoria)

Mittasymmetria $\sim$1960
(valitsee kvanttikenttäteorioista parhaiten toimivat)

Yhdessä näistä seuraa hiukkasfysiikan "standardimalli":

(mitta)kvanttikenttäteoria, jonka rakenneosia ovat

$$\text{Kvarkit:}\quad \begin{pmatrix} u\text{[p]} \\ d\text{[own]} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c\text{[harm]} \\ s\text{[trange]} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} t\text{[op]} \\ b\text{[ottom]} \end{pmatrix},$$

$$\text{Leptonit:}\quad \begin{pmatrix} \nu_e \\ e\text{[lectron]} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu\text{[on]} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau\text{[au]} \end{pmatrix}.$$

Jokaisella hiukkasella on jokin massa, jokin sisäinen rakenne (spin), sekä erityinen tapansa osallistua eri vuorovaikutuksiin.

Kaikki normaali aine rakentuu ensimmäisestä perheestä.

Rakenneosien vuorovaikutuksia välittävät

fotonit — sähkömagnetismi,

W, Z — heikko vuorovaikutus,

gluonit — vahva vuorovaikutus,

[gravitonit — painovoima].

Nämä eroavat voimakkuudeltaan, kantamaltaan ja kohteiltaan.

Standardimallilla on myös tuntematon osansa:

Kvanttikenttäteoreettiset laskut ovat hyvin määriteltyjä vain, jos teoriassa on myös yksi toistaiseksi tuntematon hiukkanen, "Higgsin hiukkanen". Se antaa olemassaolollaan ja vuorovaikutuksillaan samalla muille hiukkasille massan.

Miksei Higgsin hiukkasta vielä ole nähty?

Se voi olla niin raskas, ettei nykyisten kiihdyttimien energia riitä sen tuottamiseen ($E = mc^2$.) Higgsin etsiminen on kokeellisen hiukkasfysiikan suurimpia haasteita ja jatkuu paraikaa USA:ssa, sekä $\sim$ 2007 alkaen CERN:in uudella LHC–kiihdyttimellä.

Toinen merkittävä ongelma on neutriinojen massojen määritys. Neutriinot vuorovaikuttavat niin heikosti, että kaikki mittaukset ovat tavattoman vaikeita. Tyypillinen neutriino ei pysähdy edes maapallon läpi mennessään.

Neutriinojen massoilla on kuitenkin merkitystä mm. siksi, että avaruudessa on jäänteenä alkuräjähdyksen ajoilta vapaita neutriinoja niin paljon, että niiden yhteismassalla voisi olla vaikutusta maailmankaikkeuden laajenemiseenkin.

Massoja yritetään mitata mm. Japanissa, sekä tulevaisuudessa mahdollisesti myös CERN:issä.

Standardimallin ei kuitenkaan uskota olevan koko totuus!

Sillä on edelleen laskennallisia ongelmia: olettaen, että Higgs on olemassa, teorialla voidaan laskea huomattavan hyvin, mutta ei kuitenkaan mielivaltaisen suurienergisiä ilmiöitä.

Ei myöskään tunneta, miten voitaisiin muotoilla painovoiman kvanttikenttäteoria ("kvanttigravitaatio"), jota myös tarvittaisiin hyvin suurilla energioilla.

Teoreetikoiden mielestä standardimallilla on myös kauneusongelma: se on liian “monimutkainen”!

- Miksi on juuri kolme “perhettä”?
- Miksi niin monenlaisia eri massoja?
- Miksi monenlaisia eri vuorovaikutuksia?
- Miksi rikottuja symmetrioita? (Peilisymmetria,...)
- ...

Mitä on standardimallin takana? Ideoita riittää!

“Supersymmetria?”

Uusia hiukkasia, vieläkin monimutkaisempi kuin standardimalli. Kuitenkin teorialla on matemaattisia symmetriaominaisuuksia, niin että osa laskennallisista ongelmista katoaa.

Lopulta kokeet päättävät, miten asia on! Jos uusia hiukkasia on, niiden pitäisi näkyä paremmissa hiukkaskiihdytinkokeissa, tai sitten “pimeänä” aineena avaruudessa.

$\Rightarrow$ LHC, GENIUS (kaivokseen sijoitettu havaintolaite), ...

“Suuri yhtenäisteoria”?

Sähkömagneettisen, heikon ja vahvan vuorovaikutuksen yhdistäminen yhdeksi teoriaksi. Yksi tällaisten teorioiden ennuste on, että materia ei ole pysyvää, vaan hajoaa lopulta!

Jälleen kokeet päättävät!

$\Rightarrow$ Otetaan valtava tankki vettä (syvällä kaivoksessa) ja katsotaan, hajoaako siellä ajan kuluessa ainoakaan protoni.

"Supersäikeet?"

Pistehiukkaset $\longrightarrow$ värähtelevät säikeet. Laskennalliset ongelmat vähenevät? Vähemmän parametreja? Kvanttigravitaatio? Kätkettyjä korkeampia ulottuvuuksia?

Kuitenkaan toistaiseksi ei tunneta kokeita, joilla nämä ideat voitaisiin kunnolla tarkistaa!

Periaatteessa on toki mahdollista, että kätkettyjä korkeampia ulottuvuuksia voisi nähdä epäsuorasti esimerkiksi tarpeeksi suurienergisillä hiukkaskiihdyttimillä.

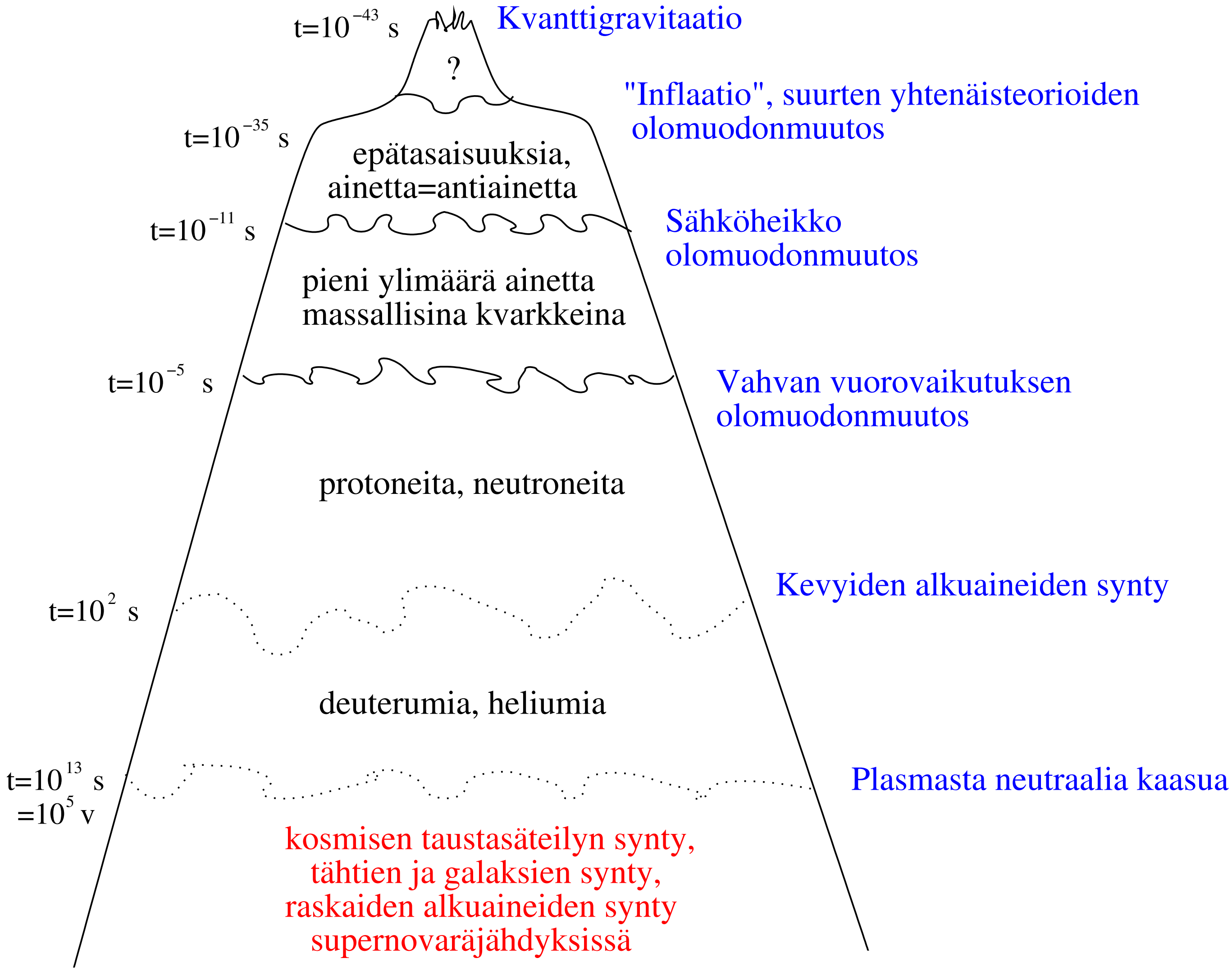
Mitä merkitystä tällä kaikella on?

Varhainen maailmankaikkeus oli hyvin kuuma: Einsteinin yleisestä suhteellisuusteoriasta seuraa kosmologian perusyhtälö

$$t[s] \approx \frac{1}{(T[10^{10}\ \mathsf{K}])^2},$$

$t =$ aika, $T =$ lämpötila.

Kuumassa ja tiheässä aineessa hiukkasten lämpöliikkeen energia on hyvin suuri ja hiukkaset ovat lähekkäin $\Rightarrow$ reaktioita joita tuotetaan yksittäin kiihdyttimillä, tapahtuukin valtavasti. Hiukkasfysiikalla alkaa olla todellista merkitystä!


$t=10^{-43}$ s
Kvanttigravitaatio
?
"Inflaatio", suurten yhtenäisteorioiden olomuodonmuutos
$t=10^{-35}$ s
epätasaisuuksia,
ainetta=antiainetta
$t=10^{-11}$ s
Sähköheikko olomuodonmuutos
pieni ylimäärä ainetta
massallisina kvarkkeina
$t=10^{-5}$ s
Vahvan vuorovaikutuksen olomuodonmuutos
protoneita, neutroneita
Kevyiden alkuaineiden synty
$t=10^{2}$ s
deuterumia, heliumia
$t=10^{13}$ s
$=10^{5}$ v
Plasmasta neutraalia kaasua
kosmisen taustasäteilyn synty,
tähtien ja galaksien synty,
raskaiden alkuaineiden synty
supernovaräjähdyksissä