Materian synty varhaisessa maailmankaikkeudessa

Mikko Laine
CERN

Mitä on materia? Hiukkasfysiikan "Standardimalli":

	B(aryoni)	L(eptoni)	"materiaa"
Vektoribosonit ($\gamma, W^{\pm}, Z^0$, gluonit)	0	0	
Higgs	0	0	
Kvarkit (u, d, c, s, t, b)	$\frac{1}{3}$	0	$\surd$
Leptonit ($e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$)	0	1	$\surd$

Kaikissa tunnetuissa reaktioissa B, L säilyvät (esim. protoni on stabiili). Häiriöteoriassa B, L säilyvät.

Materian synty
$\equiv$ Materia-antimateria-asymmetrian synty
$\equiv$ **Baryoni-asymmetrian** synty
(Neutriinoja ja siten L-asymmetriaa on vaikea havaita!)

Baryoni-asymmetrian olemassaolo on kokeellinen tosiasia:

$\star$ maan päällä tai lähiavaruudessa ei ole anti-materiaa.

$\star$ kosmisessa säteilyssä ei havaita anti-nukleoneja $\Rightarrow$ ei anti-galakseja lähistöllä

$\star$ missään ei havaita merkittävästi 150 MeV gammasäteilyä $\Rightarrow$ ei $p\bar{p}$-annihilaatioita, jota tapahtuisi materia- ja antimateria-alueiden kohdatessa.

Baryoni-asymmetrian määrä:

$\star$ Nukleosynteesi (kevyiden alkuaineiden tuotto) $\Rightarrow$ havaitut pitoisuudet alkuaineita ^{4}He, D, Li saadaan tuotettua, jos

$$\frac{n_B}{n_\gamma} = (1...9) \times 10^{-10},$$

missä n_B on nettobaryonitiheys ja n_γ on fotonitiheys.

Kuitenkin on “luonnollista”, ettei aivan maailmankaikkeuden alkuhetkillä ollut asymmetriaa ($B = 0$)!

⋆ Ainoa lisäselitystä kaipaamaton alkuehto suureelle, joka voi periaatteessa olla mikä tahansa kokonaisluku, on $B = 0$.

⋆ Tärkeä osa kosmologista standardimallia on inflaatio. Ajatus: koko nykyinen maailmankaikkeus oli aivan alussa pieni homogeeninen yhtenäinen alue, joka sitten inflaation aikana laajeni valtavasti. Inflaatiota tarvitaan selittämään, miksi koko havaittava maailmankaikkeus on niin homogeeninen (10^{-5}), vaikka eri alueet eivät näennäisesti ole olleet yhteydessä toisiinsa.

Seuraus: mahdolliset alkuehdot harvenevat pois!

$\Rightarrow$ Voidaanko asymmetria $B \neq 0$ generoida inflaation jälkeen?

$B \neq 0$ voidaan generoida!

Saharov 1967

Edellytykset:

1. **Termodynaaminen epätasapaino**
   Muuten ei ajalla ole suuntaa: $B = 0$ alussa $\Rightarrow B = 0$ aina!

2. **Mikroskooppinen B-violaatio**
   Muuten ei voi syntyä $B \neq 0$!

3. **Mikroskooppinen C, CP-violaatio (hiukkas–antihiukkasasymmetria)**
   Muuten syntyy yhtä paljon $B, \bar{B}$!

Nämä edellytykset on mahdollista toteuttaa

$\star$ ainakin GUTien energiaskaaloissa $T_{\mathsf{GUT}} \sim 10^{15}$ GeV,

$\star$ mutta myös Standardimallin energioilla $T_{\mathsf{EW}} \sim 100$ GeV!

1. Epätasapaino:

$\star$ GUTien energiaskaaloissa laajeneminen on niin nopeaa, ettei ehdi tapahtua termalisoitumista.

$\star$ EW-energiaskaaloissa on normaalisti termodynaaminen tasapaino. Mutta: 1 kl olomuodonmuutos voi johtaa epätasapainoon!

2. B-violaatio:

$\star$ GUTeissa on "uutta fysiikkaa".

$\star$ Kvanttimekaaninen anomalia Standardimallissa!

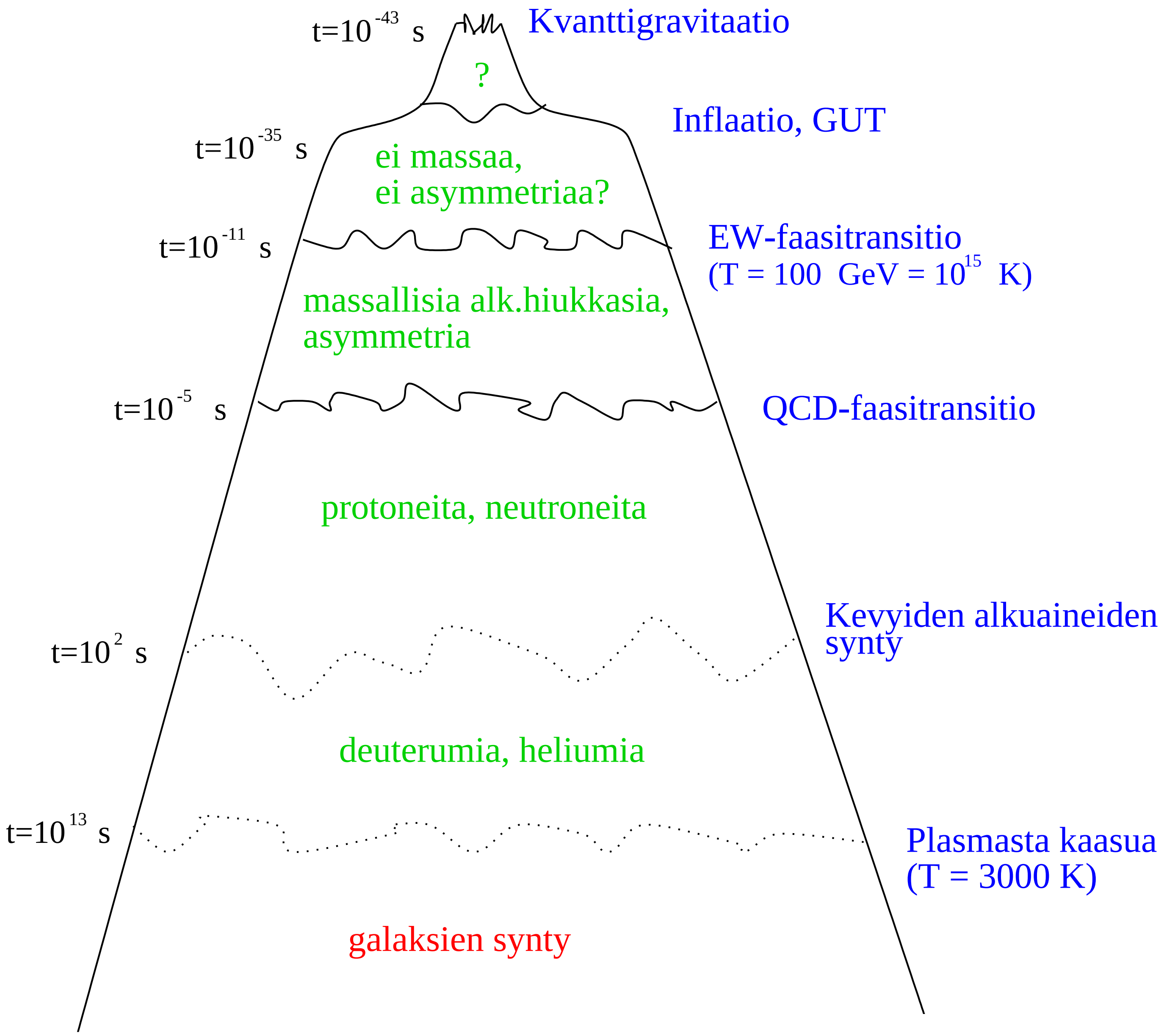
$$\dot{B} \sim \exp(-\frac{1}{\alpha_W}\frac{m_W}{T}), \quad \alpha_W \sim \frac{1}{30}.$$

3. CP-violaatio:

$\star$ GUTeissa on "uutta fysiikkaa".

$\star$ CP-violaatio havaittiin kokeellisesti 1964 K^0-mesonien hajoamisessa. Tähän liittyen Standardimallin Kobayashi-Maskawa-matriisissa on yksi kompleksinen parametri.

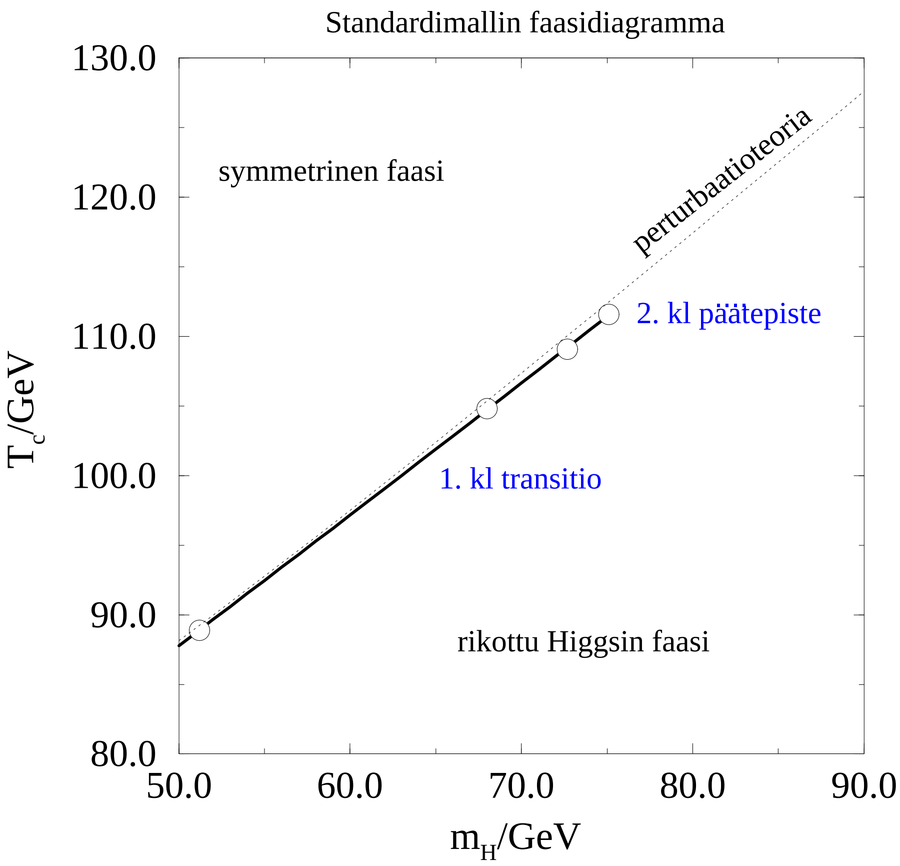
Kosmologinen historia:



Vaikka onkin OK kvalitatiivisesti, niin kvantitatiivisesti Standardimalli ei kuitenkaan toimi!

⋆ CP-violaatiota on erittäin vähän, $\frac{\mathrm{Im}\, c}{|c|} \approx 10^{-3}$.

⋆ Ei ole epätasapainoa!



Kuten veden ja höyryn faasidiagramma!

Nykyisin kokeellisesti sallituilla Higgsin massoilla $m_H > 90$ GeV ei ole lainkaan transitiota, eikä siten epätasapainoa!

Tarvitaan siis jotain muuta kuin Standardimalli!

Paljon mahdollisuuksia:

⋆ GUTit, inflaatio, ...
Mutta: miten todentaa nämä skenaariot kokeellisesti?

⋆ Tehdään pieniä muutoksia Standardimalliin!
$\Rightarrow$ **M**inimaalinen **S**upersymmetrinen **S**tandardi**M**alli!
Supersymmetriset mallit ovat myös teoreettiselta kannalta erittäin houkuttelevia.

Miksi MSSM toimisi paremmin kuin Standardimalli?

⋆ Enemmän CP-violaatiota kuin Standardimallissa
(uusia kompleksisia parametreja)

⋆ Vahvempi transitio
(enemmän bosonisia vapausasteita: **skvarkit**!)

$\Rightarrow$ baryoni-asymmetria voidaan tuottaa MSSM:ssa, jos

$$m_H < 110\,\mathrm{GeV}, \quad m_{\tilde{t}_R} < 170\,\mathrm{GeV}.$$

Tämä parametrialue katetaan muutaman seuraavan vuoden kuluessa LEP- ja Tevatron-kiihdyttimillä!

Yhteenveto & kosmologian filosofia

⋆ hiukkasfysiikka → kosmologia

Jos Higgsin hiukkanen/supersymmetria löydetään, voidaan tällä hiukkasteorialla tehdä statististista fysiikkaa laajenevan maailmankaikkeuden taustassa, ja siten voidaan ymmärtää universumin kehitys yhä varhempiin aikoihin saakka.

Erityisesti voidaan laskea, kuinka paljon materia-antimateria-asymmetriaa on näiden vuorovaikutusten johdosta generoitunut.

⋆ kosmologia → hiukkasfysiikka

Materia-antimateria-asymmetrian olemassaolo todistaa, että on olemassa jotain meille tuntematonta, "uutta" fysiikkaa!

Tämä on yksi lisämotivaatio uusille hiukkaskiihdytinkokeille: jossain vaiheessa täytyy löytyä jotain!