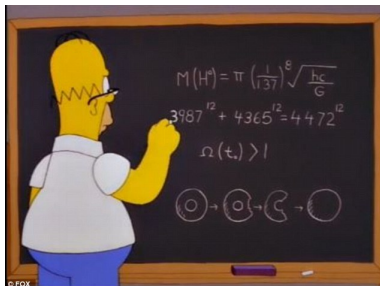


Hiukkasfysiikkaa teoreetikon näkökulmasta

@ CERN

Risto Paatelainen
CERN Theory Department



KUINKA PÄÄDYIN CERN:IIN

- ▶ **Opinnot:**
 - ▶ 2006-2011 FM, **Teorettinen hiukkasfysiikka**, Jyväskylän yliopisto
 - ▶ 2011-2014 PhD, **Teorettinen hiukkasfysiikka**, Jyväskylän yliopisto
- ▶ **Tutkijatohtorina ulkomailla/kotimaassa 2014-2018**
 - ▶ 2014-2016 Santiago de compostela, Espanja
 - ▶ Vierailevan tutkijana CERN (4kk) ja BNL (1kk)
 - ▶ 2016-2017 Jyväskylän yliopisto
 - ▶ 2017-2018 Helsingin yliopisto
 - ▶ 10/2018 **CERN teoriaosasto**

MITÄ (TEOREETTINEN) HIUKKASFYSIIKKA ON?

- ▶ Halu kuvata luonnon toimintaa pienimmillä pituusskaaloilla, ts. mahdollisimman fundamentaalilla tasolla
 - ▶ Hiukkasfysiikan peruskysymyksiä:

MITÄ (TEOREETTINEN) HIUKKASFYSIIKKA ON?

- ▶ Halu kuvata luonnon toimintaa pienimmillä pituusskaaloilla, ts. mahdollisimman fundamentaalilla tasolla
 - ▶ Hiukkasfysiikan peruskysymyksiä:
 - ▶ Mistä kaikki koostuu?

MITÄ (TEOREETTINEN) HIUKKASFYSIIKKA ON?

- ▶ Halu kuvata luonnon toimintaa pienimmillä pituusskaaloilla, ts. mahdollisimman fundamentaalilla tasolla
 - ▶ Hiukkasfysiikan peruskysymyksiä:
 - ▶ Mistä kaikki koostuu?
 - ▶ Mitkä ovat aineen pienimmät rakenneosaset?

MITÄ (TEOREETTINEN) HIUKKASFYSIIKKA ON?

- ▶ Halu kuvata luonnon toimintaa pienimmillä pituusskaaloilla, ts. mahdollisimman fundamentaalilla tasolla
 - ▶ Hiukkasfysiikan peruskysymyksiä:
 - ▶ Mistä kaikki koostuu?
 - ▶ Mitkä ovat aineen pienimmät rakenneosaset?
 - ▶ Miten niiden vuorovaikutuksia voi kuvata?

MITÄ (TEOREETTINEN) HIUKKASFYSIIKKA ON?

- ▶ Halu kuvata luonnon toimintaa pienimmillä pituusskaaloilla, ts. mahdollisimman fundamentaalilla tasolla
 - ▶ Hiukkasfysiikan peruskysymyksiä:
 - ▶ Mistä kaikki koostuu?
 - ▶ Mitkä ovat aineen pienimmät rakenneosaset?
 - ▶ Miten niiden vuorovaikutuksia voi kuvata?
 - ▶ Läheinen yhteys myös kosmologian ongelmiin:

MITÄ (TEOREETTINEN) HIUKKASFYSIIKKA ON?

- ▶ Halu kuvata luonnon toimintaa pienimmillä pituusskaaloilla, ts. mahdollisimman fundamentaalilla tasolla
 - ▶ Hiukkasfysiikan peruskysymyksiä:
 - ▶ Mistä kaikki koostuu?
 - ▶ Mitkä ovat aineen pienimmät rakenneosaset?
 - ▶ Miten niiden vuorovaikutuksia voi kuvata?
 - ▶ Läheinen yhteys myös kosmologian ongelmiin:
 - ▶ Mikä on maailmankaikkeuden suuren skaalan rakenne?

MITÄ (TEOREETTINEN) HIUKKASFYSIIKKA ON?

- ▶ Halu kuvata luonnon toimintaa pienimmillä pituusskaaloilla, ts. mahdollisimman fundamentaalilla tasolla
 - ▶ Hiukkasfysiikan peruskysymyksiä:
 - ▶ Mistä kaikki koostuu?
 - ▶ Mitkä ovat aineen pienimmät rakenneosaset?
 - ▶ Miten niiden vuorovaikutuksia voi kuvata?
 - ▶ Läheinen yhteys myös kosmologian ongelmiin:
 - ▶ Mikä on maailmankaikkeuden suuren skaalan rakenne?
 - ▶ Miten universumi syntyi ja miten se tulee kehittymään?

MITÄ (TEOREETTINEN) HIUKKASFYSIIKKA ON?

- ▶ Halu kuvata luonnon toimintaa pienimmillä pituuskaaloilla, ts. mahdollisimman fundamentaalilla tasolla
 - ▶ Hiukkasfysiikan peruskysymyksiä:
 - ▶ Mistä kaikki koostuu?
 - ▶ Mitkä ovat aineen pienimmät rakenneosaset?
 - ▶ Miten niiden vuorovaikutuksia voi kuvata?
 - ▶ Läheinen yhteys myös kosmologian ongelmiin:
 - ▶ Mikä on maailmankaikkeuden suuren skaalan rakenne?
 - ▶ Miten universumi syntyi ja miten se tulee kehittymään?
- ▶ Teoreettinen fysiikka: "liitutaululla tehtävä työ"

MITÄ (TEOREETTINEN) HIUKKASFYSIIKKA ON?

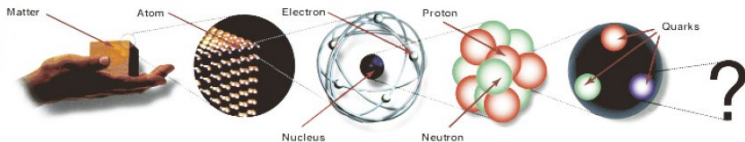
- ▶ Halu kuvata luonnon toimintaa pienimmillä pituuskaaloilla, ts. mahdollisimman fundamentaalilla tasolla
 - ▶ Hiukkafysiikan peruskysymyksiä:
 - ▶ Mistä kaikki koostuu?
 - ▶ Mitkä ovat aineen pienimmät rakenneosaset?
 - ▶ Miten niiden vuorovaikutuksia voi kuvata?
 - ▶ Läheinen yhteys myös kosmologian ongelmiin:
 - ▶ Mikä on maailmankaikkeuden suuren skaalan rakenne?
 - ▶ Miten universumi syntyi ja miten se tulee kehittymään?
- ▶ Teoreettinen fysiikka: "liitutaululla tehtävä työ"
 - ▶ Havaittujen luonnonlakien pukeminen matemaattisten mallien muotoon. Symmetrioilla usein tärkeä rooli prosessissa.

MITÄ (TEOREETTINEN) HIUKKASFYSIIKKA ON?

- ▶ Halu kuvata luonnon toimintaa pienimmillä pituuskaaloilla, ts. mahdollisimman fundamentaalilla tasolla
 - ▶ Hiukkasfysiikan peruskysymyksiä:
 - ▶ Mistä kaikki koostuu?
 - ▶ Mitkä ovat aineen pienimmät rakenneosaset?
 - ▶ Miten niiden vuorovaikutuksia voi kuvata?
 - ▶ Läheinen yhteys myös kosmologian ongelmiin:
 - ▶ Mikä on maailmankaikkeuden suuren skaalan rakenne?
 - ▶ Miten universumi syntyi ja miten se tulee kehittymään?
- ▶ Teoreettinen fysiikka: "liitutaululla tehtävä työ"
 - ▶ Havaittujen luonnonlakien pukeminen matemaattisten mallien muotoon. Symmetrioilla usein tärkeä rooli prosessissa.
 - ▶ Lisähaaste: pyrkimys eleganssiin — toive selittää eri ilmiöt mahdollisimman yleispätevän teorian avulla

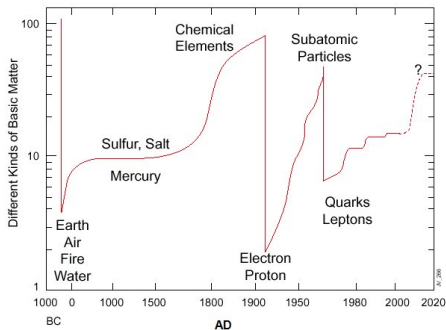
Hiukkasfysiikan historia matka kohti yhä pienempiä pituus- ja suurempia energiaskaaloja — ja uusia hiukkasia

- ▶ Kehitys useimmiten koevetoista: ilmiö havaitaan ensin ja yritetään sitten selittää matemaattisella mallilla
- ▶ Tällä hetkellä asetelma päinvastainen: kokeellisen hiukkasfysiikan "state of the art" 10^{-20} m, teoreettisen 10^{-36} m. Esim. Higgsin mekanismi jo miltei 50-vuotias.



Hiukkasfysiikan historian peruskaava: pitkiä jaksoja koevetoista työtä, joita seuraa (teoreettinen) läpimurto

- ▶ Jatkuuko sama myös tulevaisuudessa? Putoaako peruselementtien määrä vielä joskus yhteen?



EFFEKTIIVISET TEORIAT

Puheen loppuosa yhdessä lauseessa:

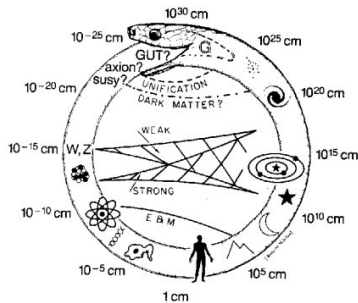
Tähän päivään mennessä kokeellisesti havaittujen hiukkasfysiikan ilmiöiden **effektiivinen teoria** on **Standardimalli**.

EFFEKTIIVISET TEORIAT

- ▶ Kaikki fysiikan — ja muidenkin (luonnon)tieteiden — teorat efektiivisiä: äärellinen pätevyysalue
- ▶ "Kaiken teoria" ei luultavasti kovin käytännöllinen

EFFEKTIIVISET TEORIAT

- ▶ Kaikki fysiikan — ja muidenkin (luonnon)tieteiden — teoriat efektiivisiä: äärellinen pätevyysalue
- ▶ "Kaiken teoria" ei luultavasti kovin käytännöllinen
- ▶ Teoriaa rakennettaessa tärkeää identifioida:
 - ▶ Olennot vapausasteet (muuttujat)
 - ▶ Teoriaa kuvaavat parametrit, jotka mitataan tai lasketaan fundamentaalisimmasta teoriasta
- ▶ Esimerkkejä: atomifysiikka, kemia, **Standardimalli**,...



STANDARDIMALLIN OSAT JA RAKENNE

Kaikki tavallinen aine koostuu atomeista, jotka puolestaan protoneista, neutroneista ja elektroneista

STANDARDIMALLIN OSAT JA RAKENNE

Kaikki tavallinen aine koostuu atomeista, jotka puolestaan protoneista, neutroneista ja elektroneista

- ▶ Protoni ja neutroni esimerkkejä hadroneista, joilla edelleen alirakenne: pistemäiset *kvarkit*
 - ▶ Mesoni = kvarkki-antikvarkkiparin sidottu tila
 - ▶ Baryoni = kolmen kvarkin sidottu tila

STANDARDIMALLIN OSAT JA RAKENNE

Kaikki tavallinen aine koostuu atomeista, jotka puolestaan protoneista, neutroneista ja elektroneista

- ▶ Protoni ja neutroni esimerkkejä hadroneista, joilla edelleen alirakenne: pistemäiset *kvarkit*
 - ▶ Mesoni = kvarkki-antikvarkkiparin sidottu tila
 - ▶ Baryoni = kolmen kvarkin sidottu tila
- ▶ Elektroni esimerkki pistemäisistä *leptoneista*

STANDARDIMALLIN OSAT JA RAKENNE

Kaikki tavallinen aine koostuu atomeista, jotka puolestaan protoneista, neutroneista ja elektroneista

- ▶ Protoni ja neutroni esimerkkejä hadroneista, joilla edelleen alirakenne: pistemäiset *kvarkit*
 - ▶ Mesoni = kvarkki-antikvarkkiparin sidottu tila
 - ▶ Baryoni = kolmen kvarkin sidottu tila
- ▶ Elektroni esimerkki pistemäisistä *leptoneista*
- ▶ Lisäksi vuorovaikutusten välittäjähiukkasia, *mittabosoneja*
 - ▶ SM:ssa vuorovaikutuksia kolme: sähkömagneettinen sekä heikko ja vahva (ydin)voima

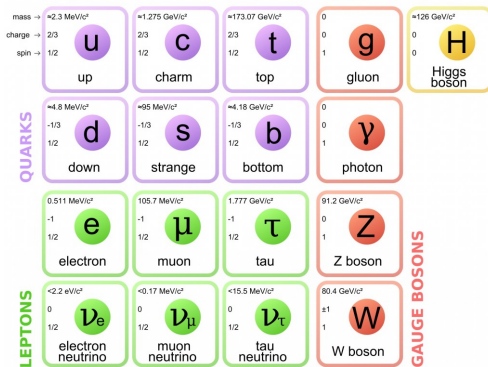
STANDARDIMALLIN OSAT JA RAKENNE

Kaikki tavallinen aine koostuu atomeista, jotka puolestaan protoneista, neutroneista ja elektroneista

- ▶ Protoni ja neutroni esimerkkejä hadroneista, joilla edelleen alirakenne: pistemäiset *kvarkit*
 - ▶ Mesoni = kvarkki-antikvarkkiparin sidottu tila
 - ▶ Baryoni = kolmen kvarkin sidottu tila
- ▶ Elektroni esimerkki pistemäisistä *leptoneista*
- ▶ Lisäksi vuorovaikutusten välittäjähiukkasia, *mittabosoneja*
 - ▶ SM:ssa vuorovaikutuksia kolme: sähkömagneettinen sekä heikko ja vahva (ydin)voima
- ▶ ... sekä 2011 vihdoon havaittu, sähköisheikon symmetriariikon (massojen synnyn) selittävä *Higgsin hiukkanen*

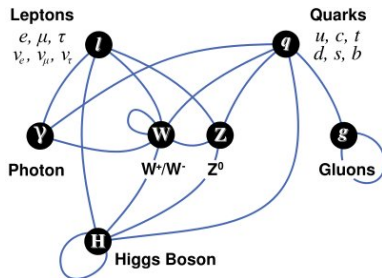
STANDARDIMALLIN OSAT JA RAKENNE

- ▶ Ainehiukkaset
 - ▶ Kvarkit ja leptonit
 - ▶ 3 perhettä
- ▶ Välittäjähiukkaset
 - ▶ γ, W^{\pm}, Z, g
- ▶ Higgin hiukkanen
 - ▶ Tarvitaan selittämään hiukkasten massat
 - ▶ $m_H \approx 126 \text{ GeV}$
- ▶ $1 \text{ MeV}/c^2 = 1.8 \times 10^{-30} \text{ kg}$



STANDARDIMALLIN OSAT JA RAKENNE

- ▶ Sähkömagneettinen vuorov.
 - ▶ Välittäjä: fotoni γ
 - ▶ Tuntee: kaikki sähköisesti varatut hiukkaset
- ▶ Heikko ydinvoima:
 - ▶ Välittäjät: W^\pm, Z
 - ▶ Tuntee: Kaikki paitsi γ ja g
 - ▶ Erikoisuus: Mittabosonien massat, W :n itseisvuorovaikutus
- ▶ Vahva ydinvoima:
 - ▶ Välittäjä: gluoni g
 - ▶ Tuntee: kvarkit ja gluonit
 - ▶ g :n itseisvv, confinement



STANDARDIMALLI FYSIKAALISENA TEORIANA

- ▶ Standardimalli on ns. *kvanttikenttäteoria*
 - ▶ Kvanttimekaniikan yleistys jatkumoon — vrt. klassinen mekaniikka ja elektrodynamiikka

STANDARDIMALLI FYSIKAALISENA TEORIANA

- ▶ Standardimalli on ns. *kvanttikenttäteoria*
 - ▶ Kvanttimekaniikan yleistys jatkumoon — vrt. klassinen mekaniikka ja elektrodynamiikka
- ▶ Teorian peruselementtejä kentät, joiden pistemäisiä virittyneitä tiloja havaittavat hiukkaset ovat
 - ▶ Hiukkasen massa määrää sen aalto-/hiukkasluonteen: Mitä massiivisempi hiukkanen, sitä pienempi sen aallonpituus (ts. sitä vähemmän aaltomainen)
 - ▶ Hiukkasen elinikään vaikuttavat mm. mahdollisten hajoamiskanavien määrä

STANDARDIMALLI FYSIKAALISENA TEORIANA

- ▶ Standardimalli on ns. *kvanttikenttäteoria*
 - ▶ Kvanttimekaniikan yleistys jatkumoon — vrt. klassinen mekaniikka ja elektrodynamiikka
- ▶ Teorian peruselementtejä kentät, joiden pistemäisiä virittyneitä tiloja havaittavat hiukkaset ovat
 - ▶ Hiukkasen massa määrää sen aalto-/hiukkasluonteen: Mitä massiivisempi hiukkanen, sitä pienempi sen aallonpituus (ts. sitä vähemmän aaltomainen)
 - ▶ Hiukkasen elinikään vaikuttavat mm. mahdollisten hajoamiskanavien määrä
- ▶ Teorian perusominaisuuksia ovat sen *symmetriat*
 - ▶ Pääteltävissä hiukkaspektrin ominaisuuksista; määräävät vuorovaikutusten muodon
 - ▶ Standardimallin *mittaryhmä* $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$

STANDARDIMALLI FYSIKAALISENA TEORIANA

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^\alpha \partial_\nu g_\mu^\alpha - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\nu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^a g_\nu^b g_\nu^c g_\nu^d g_\nu^e + \\
 & \frac{1}{2}g_s^2 (\bar{\psi}_\mu^\alpha \gamma^\mu \psi_\mu^\alpha) g_\mu^\alpha + G^a G^a C^a + g_s f^{abc} \partial_\mu C^a C^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2\alpha} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \\
 & \frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2\alpha} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[\frac{2M}{g^2} H + \right. \\
 & \left. W_\nu^+ W_\nu^- - Z_\nu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\nu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\nu^+) + Z_\nu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\nu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\nu^+) \right] - \\
 & ig_s w_\nu [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+)] + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) - \\
 & \frac{1}{2}g^2 W_\nu^+ W_\nu^- W_\nu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\nu^0 W_\nu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\nu^0 Z_\nu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) + \\
 & g^2 s_w^2 (A_\nu W_\nu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\nu A_\nu W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w [A_\nu Z_\nu^0 (W_\nu^+ W_\nu^- - W_\nu^- W_\nu^+)] - \\
 & 2A_\mu Z_\mu^0 W_\mu^+ W_\nu^- - g\alpha [H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-] - \frac{1}{8}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - \\
 & gMW_\nu^+ W_\nu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \\
 & \frac{1}{2}g [W_\mu^+ (H\partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H\partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} [Z_\mu^0 (H\partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig \frac{2c_w}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & ig_s w_\nu M A_\nu (W_\nu^+ \phi^- - W_\nu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig_s w_\nu A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\
 & \frac{1}{2}g^2 W_\nu^+ W_\nu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{2c_w}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{2c_w}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - \\
 & g^2 s_w^2 (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - e^2 (\gamma \partial + m_\nu^2) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^2 (\gamma \partial + m_\nu^2) u_j^2 - \bar{d}_j^2 (\gamma \partial + m_\nu^2) d_j^2 + ig_s w_\nu A_\mu [- (\bar{e}^\lambda \gamma e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^2 \gamma u_j^2) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^2 \gamma d_j^2)] + \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^2 \gamma^\mu (\frac{2}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) u_j^2) + (\bar{d}_j^2 \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^2)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^2 \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\mu} d_j^2)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^2 \gamma^\mu C_{\lambda\mu} u_j^2)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_\nu^2}{M} [-\phi^+ (\nu^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \frac{g}{2} \frac{m_\nu^2}{M} [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_\nu^2 (\bar{u}_j^2 C_{\lambda\mu} (1 - \gamma^5) d_j^2) + m_\nu^2 (\bar{u}_j^2 C_{\lambda\mu} (1 + \gamma^5) d_j^2)] - \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_\nu^2 (\bar{d}_j^2 C_{\lambda\mu} (1 + \gamma^5) u_j^2) - m_\nu^2 (\bar{d}_j^2 C_{\lambda\mu} (1 - \gamma^5) u_j^2)] - \frac{g}{2} \frac{m_\nu^2}{M} H (\bar{u}_j^2 u_j^2) - \frac{g}{2} \frac{m_\nu^2}{M} H (\bar{d}_j^2 d_j^2) + \frac{ig}{2} \frac{m_\nu^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^2 \gamma^5 u_j^2) - \frac{ig}{2} \frac{m_\nu^2}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^2 \gamma^5 d_j^2) + X^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + X^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + Y \partial^2 Y + ig_c w_\nu W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig_s w_\nu W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig_s w_\nu W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^- X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^+) + ig_c w_\nu Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- - \partial_\mu \bar{X}^- X^+) + ig_s w_\nu A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- - \partial_\mu \bar{X}^- X^+) - \frac{1}{2}gM [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 H] + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM [\bar{X}^+ X^0 \phi^- - \bar{X}^- X^0 \phi^+] + \frac{1}{c_w} igM [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + igM s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

Toimii loistavasti: (lähes) kaikki tähän mennessä tehdyt hiukkasfysiikan mittaukset voidaan ennustaa kvantitatiivisesti tästä funktiosta lähtien.

STANDARDIMALLIN PUUTTEET

Effektiivisenä teoriana SM epätäydellinen

- ▶ Rajallinen pätevyysalue: ongelmia pienillä pituusskaaloilla / suurilla energioilla
- ▶ Hiukkasten massoilla (ja monilla muilla parametreilla) "mielivaltaiset" arvot
- ▶ Perheiden lukumäärälle ei selitystä
- ▶ Vain sähkömagneettinen ja heikko vuorov. yhdistyvät korkeilla energioilla, vahva jää erilleen
- ▶ Hierarkiaongelma: miksi SM:n energiaskaala (100 GeV) niin kaukana kvanttigravitaation skaalasta (10^{19} GeV)?

STANDARDIMALLIN PUUTTEET

SM ei selitä kaikkia havaintoja

- ▶ Ei sisällä gravitaatiota
- ▶ Neutriinoilla ei massoja, vaikka havainnot (neutriino-oskillaatio) osoittavat toisin
- ▶ Ei selitä baryoniasymmetriaa: miksi ainetta enemmän kuin antiainetta?
- ▶ Suurin osa maailmankaikkeuden energiasisällöstä ei SM:n piiristä (pimeä aine, pimeä energia)

STANDARDIMALLIN PUUTTEET

SM ei selitä kaikkia havaintoja

- ▶ Ei sisällä gravitaatiota
- ▶ Neutriinoilla ei massoja, vaikka havainnot (neutriino-oskillaatio) osoittavat toisin
- ▶ Ei selitä baryoniasymmetriaa: miksi ainetta enemmän kuin antiainetta?
- ▶ Suurin osa maailmankaikkeuden energiasisällöstä ei SM:n piiristä (pimeä aine, pimeä energia)

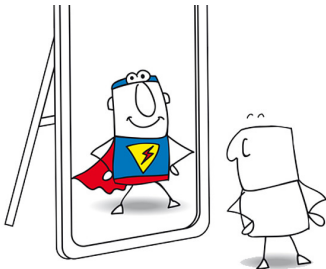
LHC:n törmäysenergian uskottu yleisesti riittävän SM:n ulkopuolisen fysiikan löytämiseen — toistaiseksi mitään viitteitä tästä ei kuitenkaan ole ilmaantunut

STANDARDIMALLIN YLEISTYKSIÄ

- ▶ Paljon malleja — vähän kokeellista dataa

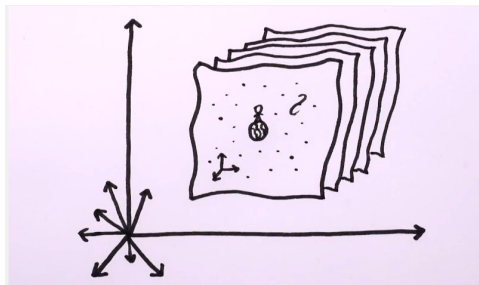
STANDARDIMALLIN YLEISTYKSIÄ

- ▶ Paljon malleja — vähän kokeellista dataa
- ▶ SUSY: Jokaisella SM:n hiukkasella *superpartneri*
 - ▶ Superpartnereja ei vielä löydetty \Rightarrow Symmetria rikkoutunut toistaiseksi tutkituilla energioilla
 - ▶ Tarjoaa selitysmallit mm. pimeälle aineelle ja baryoniasymmetrialle



STANDARDIMALLIN YLEISTYKSIÄ

- ▶ Paljon malleja — vähän kokeellista dataa
- ▶ Lisäulottuvuudet: entä jos universumissa on enemmän kuin $3 + 1$ dimensiota?
 - ▶ Ylimääräiset ulottuvuudet yleensä mikroskooppisia, eivätkä siksi helposti havaittavissa
 - ▶ Pimeä aine ja hierarkiaongelma ratkaistavissa



STANDARDIMALLIN YLEISTYKSIÄ

- ▶ Paljon malleja — vähän kokeellista dataa
- ▶ Säieteoria: Hiukkaset \rightarrow Planckin pituuden kokoiset säikeet 9+1 ulottuvuudessa
 - ▶ Ainoa vakavasti otettava yrite kvanttigravitaation teoriaksi
 - ▶ Sisältää sekä SUSY:n että lisäulottuvuuksia
 - ▶ "Landscape"-ongelma: säieteoria ei välttämättä koskaan prediktiivinen/falsifioitavissa



YHTEENVETO

- ▶ Teorettinen hiukkasfysiikka pyrkimistä kohti aineen pienimpien rakenneosasten vuorovaikutusten ymmärrystä ja matemaattista hallintaa
 - ▶ Lähes kaikki tähän päivään mennessä havaitut ilmiöt selittää Standardimalli
 - ▶ SM:n viimeinen "puuttuva lenkki" vihdoinkin löytynyt
- ▶ Standardimallin ulkopuolinen fysiikka läheisesti yhteydessä kosmologiaan
 - ▶ Varhainen maailmankaikkeus hiukkasfysiikan laboratorio
 - ▶ Hiukkasfysiikka välttämätöntä universumin alkuhetkien ymmärtämiseksi
- ▶ Elämme jännittäviä aikoja: LHC:n löydöt määräävät pitkälti koko alan tulevaisuuden