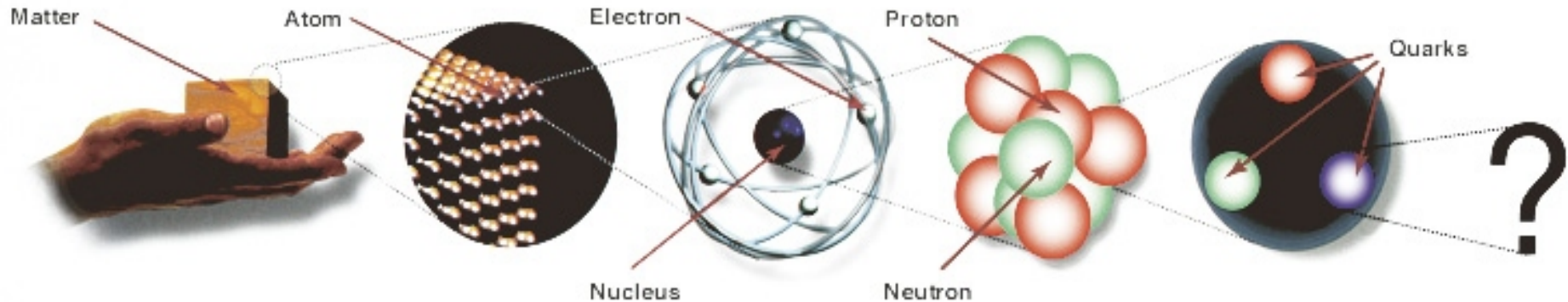


*Alkeishiukkasista maailmankaikkeuteen:*

# ***(Hiukkas)fysiikan standardimalli***

Kari Rummukainen  
Helsingin Yliopisto

# *Kaikki koostuu alkeishiukkasista:*



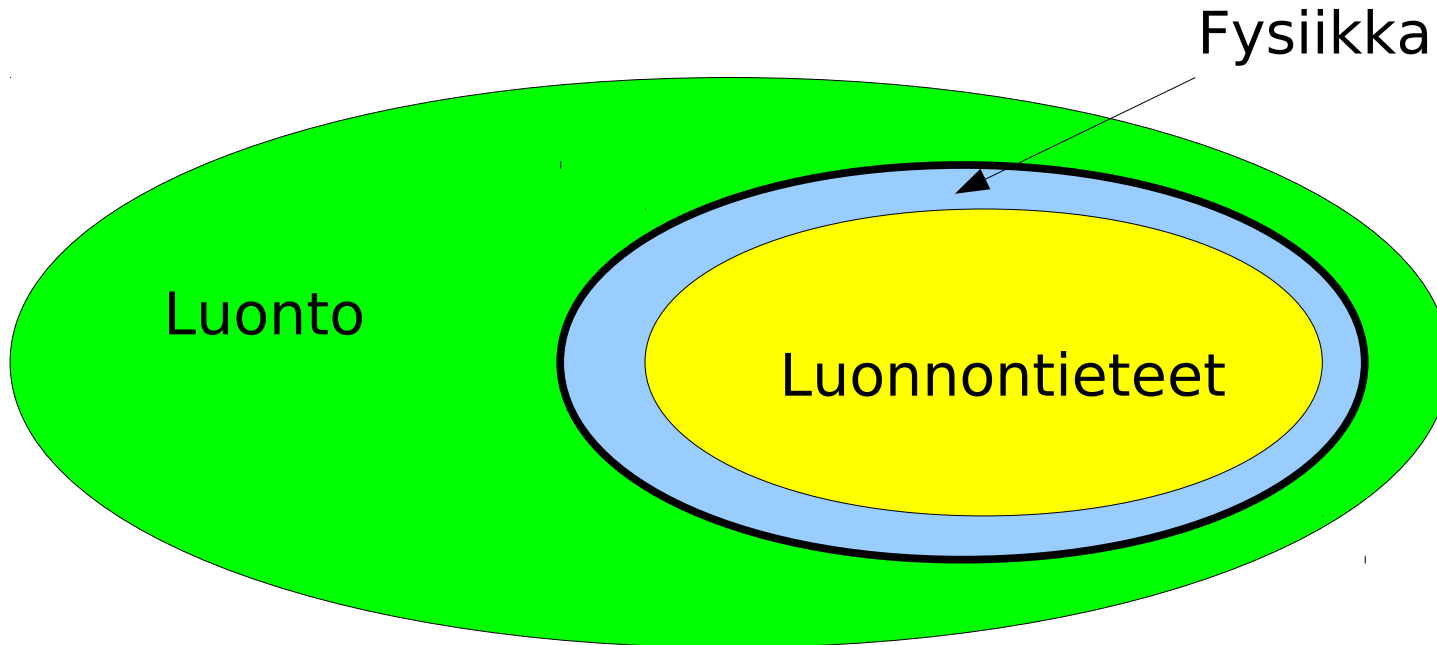
- Aine koostuu **protoneista**, **neutroneista** ja **elektroneista**
- Protonit ja neutronit koostuvat **kvarkeista**
- Hiukkasfysiikan **Standardimalli** yhdistää kaikki tunnetut alkeishiukkaset ja niiden vuorovaikutukset (paitsi painovoiman)

***Standardimalli + painovoima = tunnettu fysiikka***

- Standardimalli on erittäin menestyksenkäs: sopinut kokeisiin jo ~ 40 vuotta
- n. 5 Nobel-palkintoa liittyy suoraan Standardimalliin

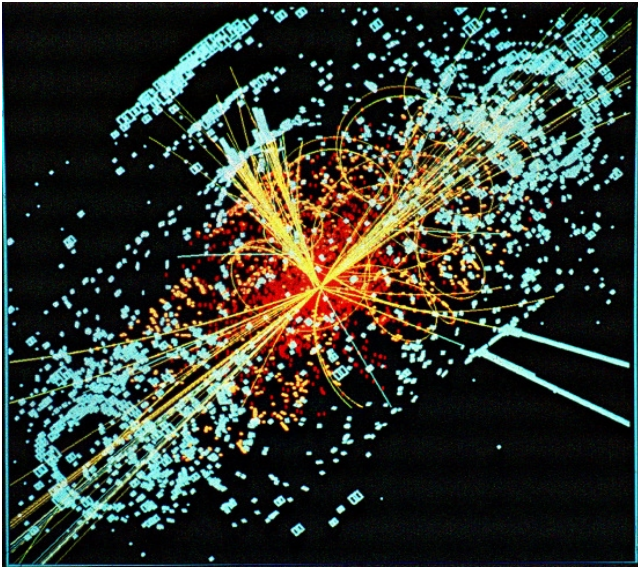
## *Miksi hiukkasfysiikka?*

- Päämäärä: luonnon *perimmäisten lakien*, **perusvuorovaikutusten** selvittäminen
- Kaikkien luonnonilmiöiden takana ovat lopulta hiukkasfysiikan perusvuorovaikutukset

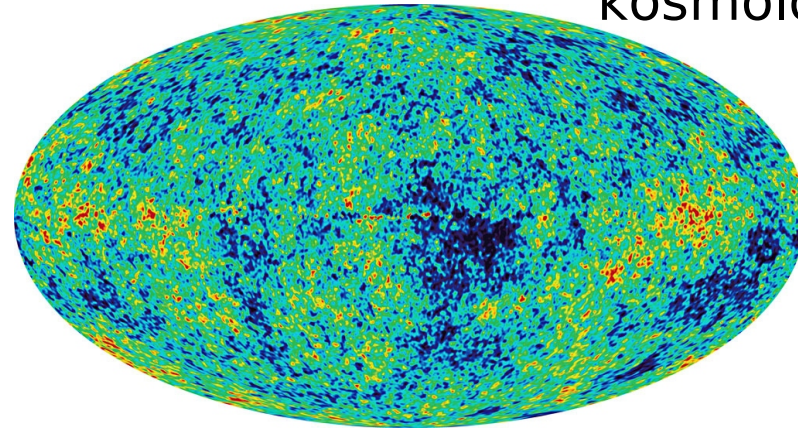


# Hiukkasfysiikan tutkiminen

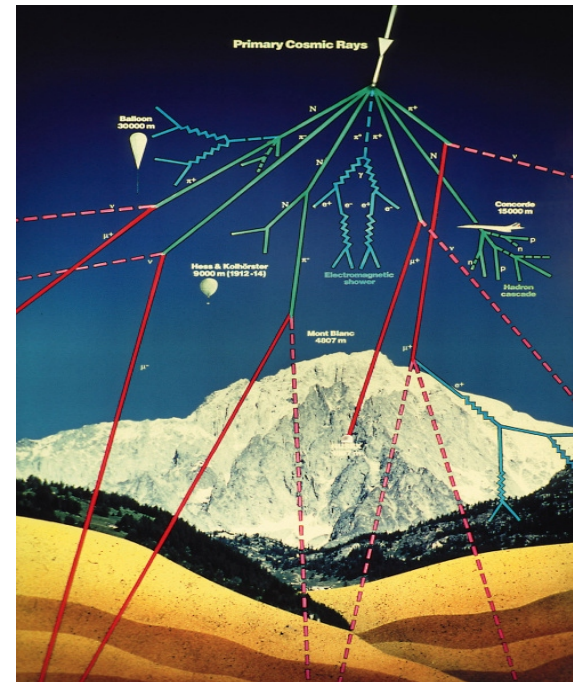
kosmologia



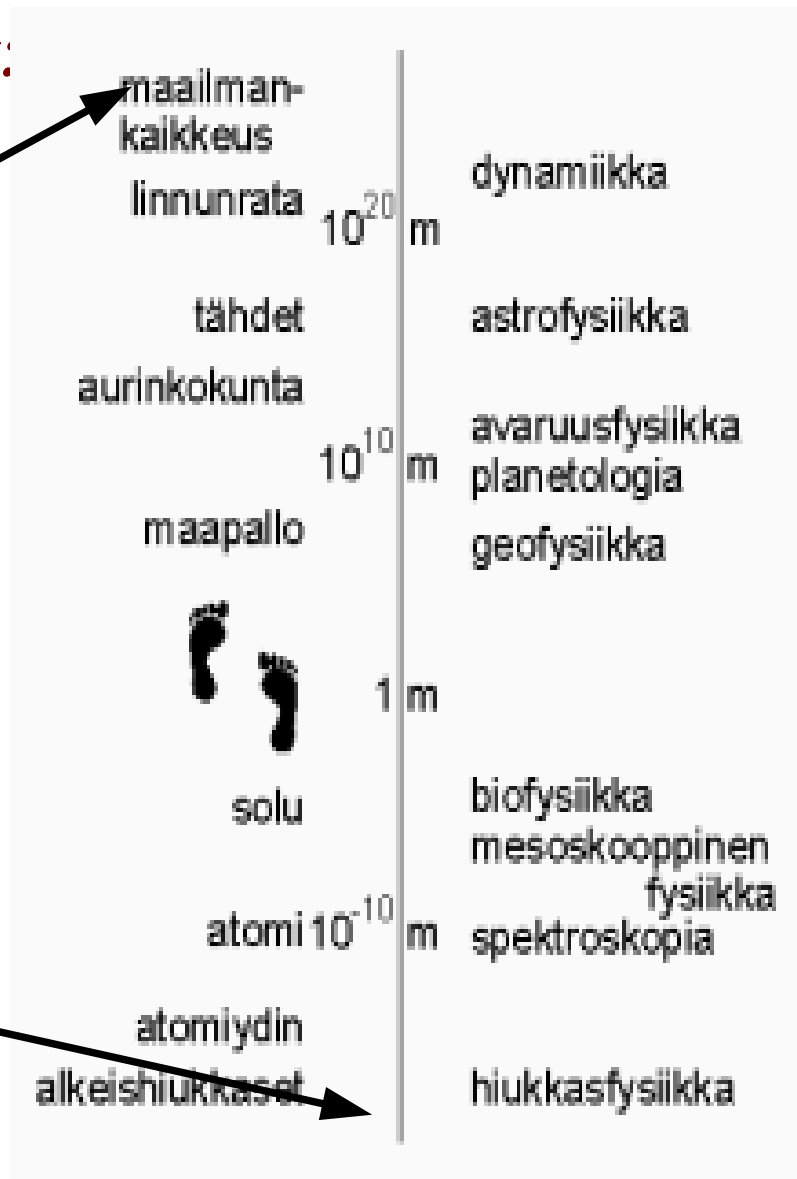
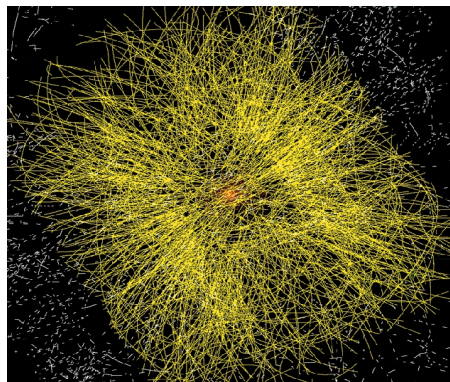
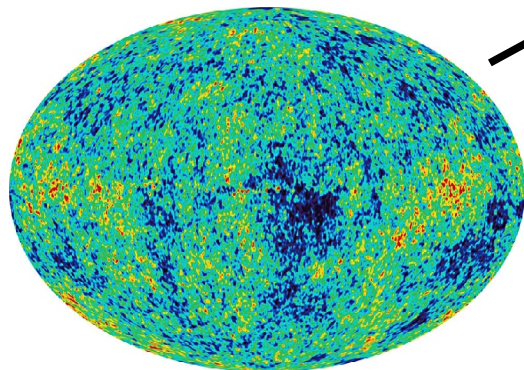
hiukkaskiihdyttimet



kosmiset säteet & astrohiukkasfysiikka



# Hiukkasfysiikan skaalat:



## *Peruslait nyt:*

Neljä nykyään tunnettua perusvuorovaikutusta:

- **Sähkömagnetismi**

Lähes kaikki arkipäivän ilmiöt

- **Vahva vuorovaikutus**

- **Heikko vuorovaikutus**

Näkyvät vain hiukkastasolla

- **Painovoima** (suhteellisuusteoria)

Ei kuulu standardimalliin!

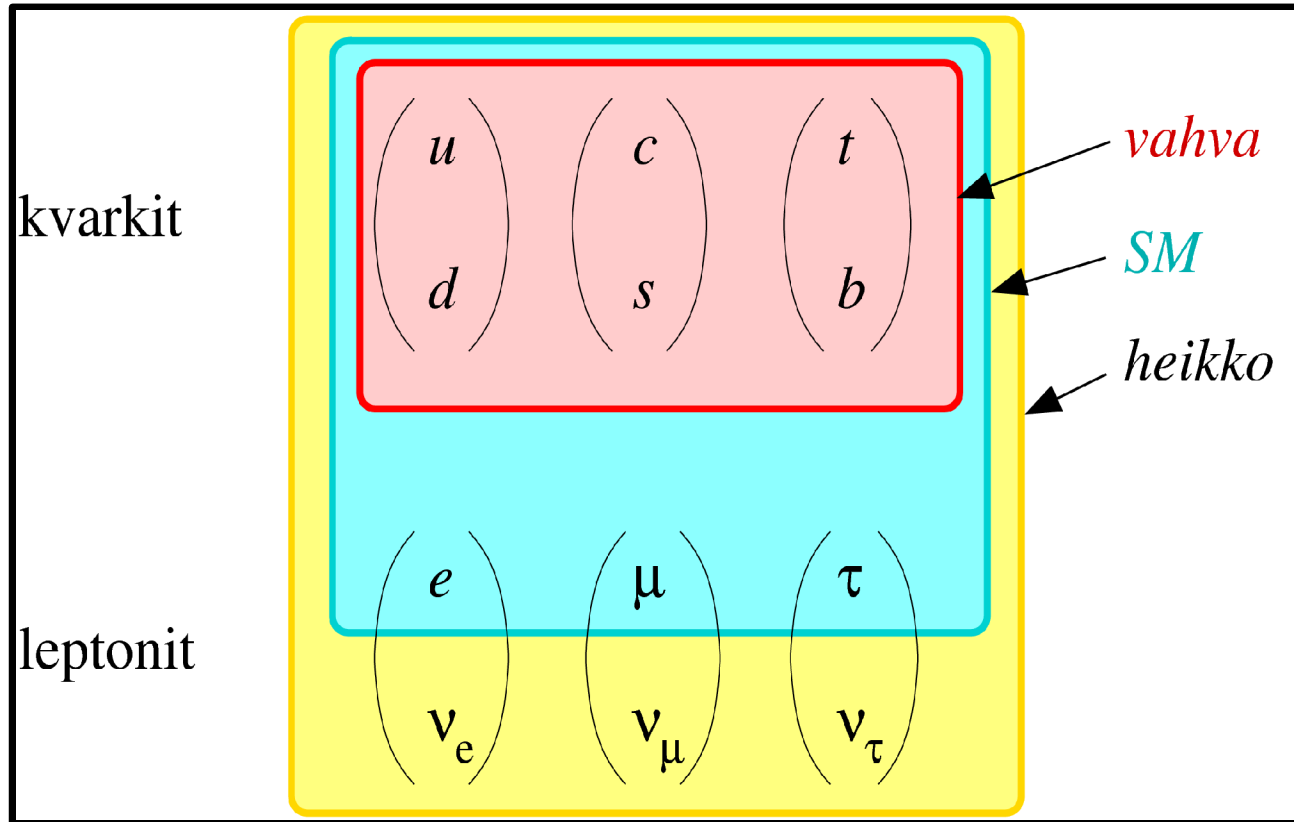
Ei lopullinen tieteen sana! Näiden takana on luultavasti uusi perusvuorovaikutus, “**uusi fysiikka**”. Mahdollisesti havaitaan tulevilla kokeilla ja astrofysikaalisilla mittauksilla

# Hiukkasfysiikan standardimalli:

Paketoiti tunnetun fysiikan: alkeishiukkaset + vuorovaikutukset:

Vuorovaikutukset:

- Sähkömagnetismi  
**fotoni**
- Vahva  
**gluoni**
- Heikko  
**W, Z -bosonit**



Ainoa puuttuva pala: **Higgsin hiukkanen**, ei vielä löydetty!

# The PARTICLE ZOO

Handmade Subatomic Particle Plushies FROM THE STANDARD MODEL OF PHYSICS & beyond!

Nyt myös  
pehmoleluina:

<b>QUARKS</b>	<b>UP QUARK</b> A teeny little point inside the proton and neutron, it is friends forever with the down quark.		<b>CHARM QUARK</b> A second generation quark, he is charmed, indeed.		<b>TOP QUARK</b> This heavyweight champion doesn't live long enough to make friends with anyone.				
	<b>DOWN QUARK</b> A tiny little point inside the proton and neutron, it is friends forever with the up quark.		<b>STRANGE QUARK</b> What's so strange about this second generation quark?		<b>BOTTOM QUARK</b> This third generation quark is puttin' on the pounds.		<b>FORCE CARRIERS</b>	<b>PHOTON</b> The massless wavicle we know and love.	
	<b>ELECTRON-NEUTRINO</b> This minuscule bandit is so light, he is practically massless.		<b>MUON-NEUTRINO</b> Like the other 2 neutrinos, he's got an identity crisis from oscillation.		<b>TAU-NEUTRINO</b> He's a tau now, but what type of neutrino will he be next?			<b>GLUON</b> The "glue" of the strong nuclear force.	
	<b>ELECTRON</b> A familiar friend, this negatively charged, busy li'l guy likes to bond.		<b>MUON</b> A "heavy electron" who lives fast and dies young.		<b>TAU</b> A "heavy muon" who could stand to lose a little weight.			<b>W BOSON</b> <b>Z BOSON</b>	
	<b>HIGGS BOSON</b> He's the one everyone wants to meet, but for now he's playing hard to get. You'd be smiling too if everyone was looking to interview <i>you</i> .		<b>GRAVITON</b> Still unobserved, yet theoretically <i>everywhere</i> , he's got big legs for jumping branes.		<b>NUCLEONS</b>	<b>PROTON</b> We would not be here without her positivity.			
	<b>TACHYON</b> Can this devious and clever particle really travel faster than light?		<b>DARK MATTER</b> The mysterious missing mass. Difficult to see because he's so dark.		<b>NEUTRON</b> He insists on remaining neutral.				

Visit the **ANTIPARTICLE ANNEX**



**NEW! MINI-POSTER**  
11"x17" (29x43 cm)



**GREETING CARDS**



**STAMPSHEET**  
Twenty-three particles on one 8.5x11" sheet of perforated "stamps"



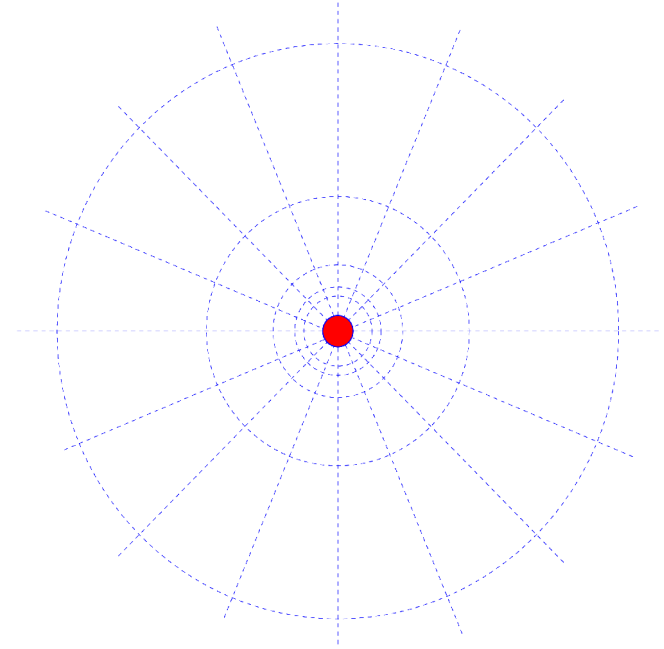


# Standardimallin vuorovaikutukset

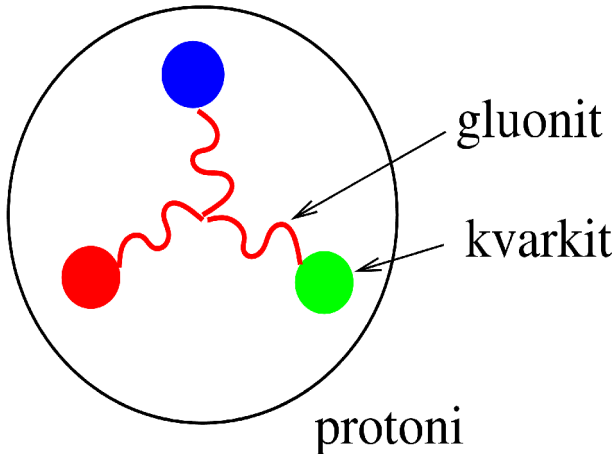
## Sähkömagnetismi:

### Kvanttielektrodynamiikka, QED

- Välittäjä fotoni, massaton
- Sitoo elektronit atomiytimiin ja atomit toisiinsa
- Kantama ääretön, mutta voima heikkenee etäisyyden kasvaessa
- Vastaa lähes kaikesta “tavallisesta” fysiikasta!



## Vahva vuorovaikutus: Kvanttikromodynamiikka, QCD



- Välittäjä gluoni, massaton
- Muodostaa “kuminauhan” kvarkkien välille. Voima ei vähene etäisyyden kasvaessa → vapaita kvarkkeja ei esiinny!
- Kvarkkien välinen vetovoima  $\sim 10^5$  N
- Pitää baryonit (protonit, neutronit jne) kasassa

- Kvarkkien oma massa protonin sisällä on vain n. 1% protonin massasta
- 99% kaikesta tavallisen aineen massasta tulee vahvan vuorovaikutuksen sidosenergiasta ( $E = mc^2$ )

### ***Heikko vuorovaikutus:***

- Välittäjähiukkaset W,Z bosonit, hyvin massiivisia → vuorovaikutus heikko, hyvin lyhyt kantama
- Radioaktiivisuus

# Standardimallin rakenne:

Lagrangen tiheys (hieman skemaattisesti)

$$\mathcal{L} = \bar{q}[i\gamma^\mu D_\mu^s - y_q \Phi]q + \bar{\ell}[i\gamma^\mu D_\mu^w - y_\ell \Phi]\ell + m_\Phi^2 |\Phi|^2 + \lambda |\Phi|^4 + \frac{1}{4}[D_\mu, D_\nu]^2$$

$$D_\mu^s = \partial_\mu - ig^s G_\mu - ig^w A_\mu - ieB_\mu$$

$$D_\mu^w = \partial_\mu - ig^w A_\mu - ieB_\mu$$

$q$  - kvarkit,  $\ell$  - leptonit (elektroni, neutriinot)

$G, A, B$  - mittabosonit (fotoni, gluoni, W, Z)

$\Phi$  - Higgsin hiukkanen

# ***Kvanttikenttäteoriat***

## ***Kaikki fysiikka on pohjimmiltaan kvanttikenttien fysiikkaa (?)***

Mikä on kenttä?

- vrt. järven pinta: täyttää koko järven, muttei tee mitään
- aalto : kuljettaa energiaa → **hiukkanen** (aaltopaketti)
- aaltopaketit liikkuvat, vuorovaikuttavat jne..

Esim. 1 elektronikenttä täyttää koko maailmankaikkeuden

- kaikki elektronit (ja positronit) ovat tämän eksitaatioita
- Elektronikentällä 4 vapausastetta ( [2 spin] x [ $e^-$ ,  $e^+$ ] )

Standardimallissa yht. 90 fermionista + 30 bosonista vapausastetta

(Painovoima? Suhteellisuusteoria ei ole kvanttikenttäteoria, eikä kvanttimekaaninen. Lopullinen teoria tuntematon.)

# ***Miksi kvanttikenttäteoria?***

***(suppeampi) suhteellisuusteoria + kvanttimekaniikka  
--> kvanttikenttäteoria***

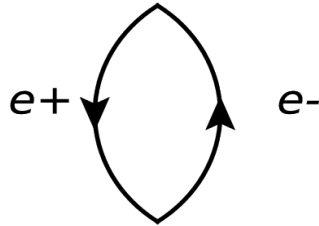
- Ainoa tunnettu tapa yhdistää konsistentisti kvanttimekaniikka ja relativistinen Lorentz-invarianssi
- Kuvaavat todellisuutta: standardimalli sopii yhteen kokeiden kanssa

kvanttielektrodynamiikka, QED,  
on kenties fysiikan tarkimmin varmennettu teoria (kokeet ja laskut yhtäpitäviä 10 desimaalin tarkkuudella!)

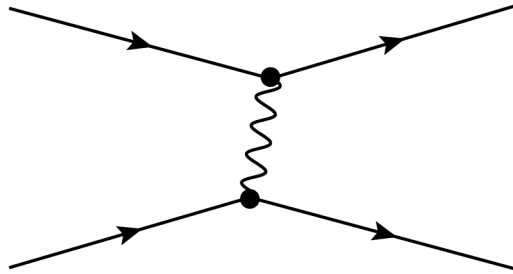
# ***Kvanttikenttien ominaisuuksia 1***

- **Antihiukkaset:** hiukkas-antihhiukkaparien tuotto ja annihilaatio (myös tyhjiössä)

*Feynmanin diagramma*

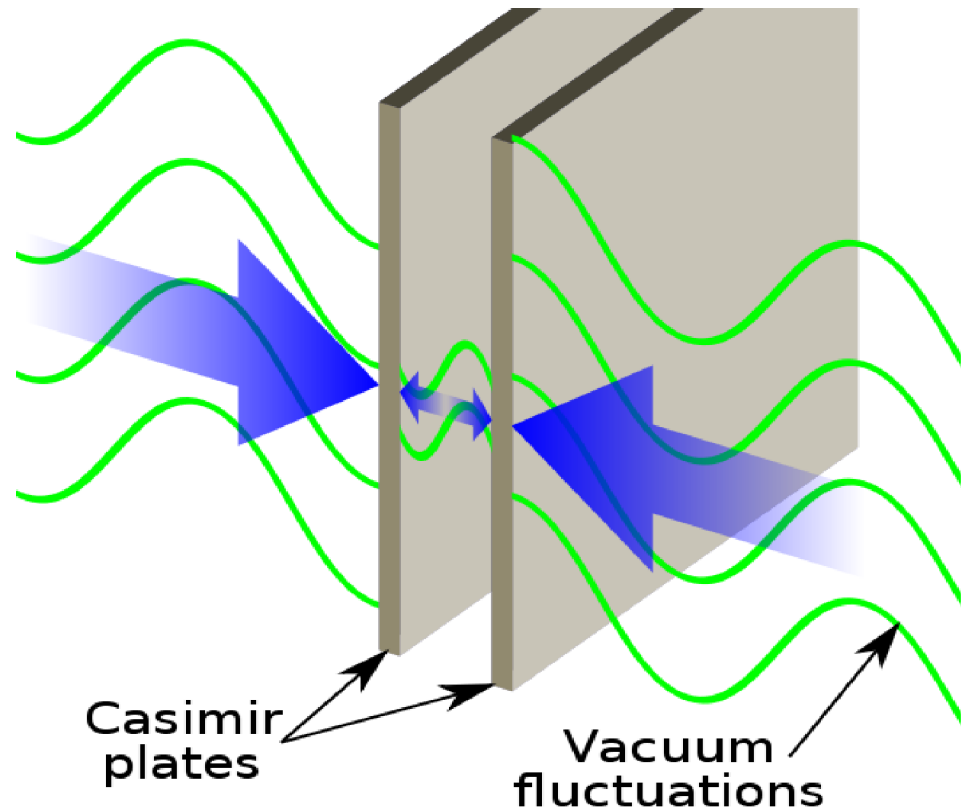


- **Vuorovaikutukset:** hiukkaset vuorovaikuttavat välittäjähiukkasia vaihtamalla



## ***Kvanttikenttien ominaisuuksia 2***

- Ei ole pelkästään yhden hiukkasen systeemiä: riippuen systeemin ja havaitsijan suhteellisesta liike-tilasta, nähdään eri määrä hiukkasia/antihhiukkasia
- Esim relativistisen protonin ympärillä näkyy “laivue”  $e^-$ ,  $e^+$ , fotoneja
- Tyhjiö ei ole tyhjä:  
0-pistevärähtelyt,  
**Casimirin efekti**

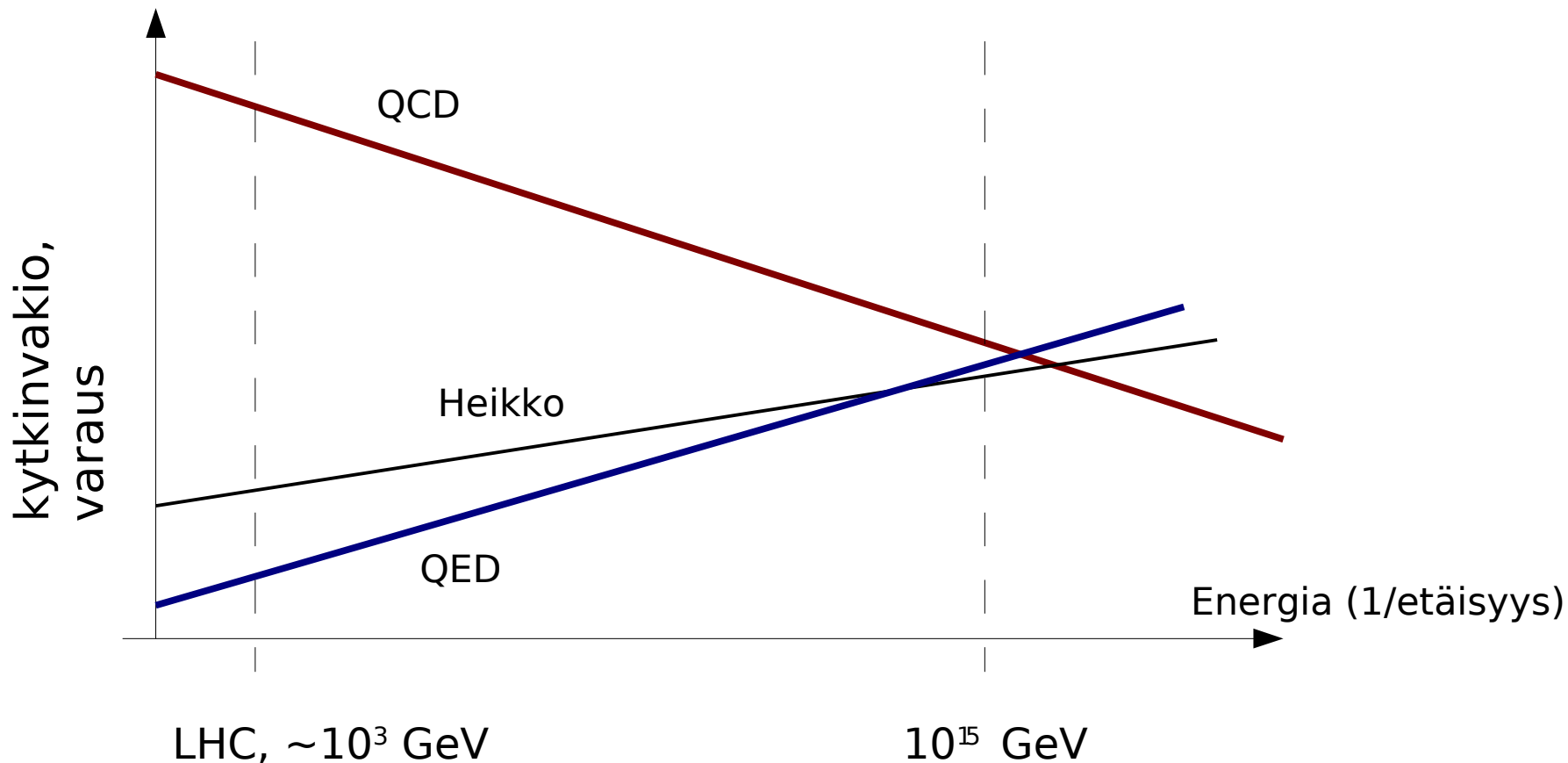


# ***Kvanttikenttien ominaisuuksia 3***

- Tyhjiö polarisoituu varatun hiukkasen ympärillä. Indusoituneet dipolit varjostavat “paljasta” varausta → näennäinen varaus riippuu etäisyydestä
- Lyhyt etäisyys ↔ suuri energia → ***Juokseva kytkinvakio***
- Esim. **elektronin varaus** muuttuu riippuen siitä miltä etäisyydeltä (millä energialla) se mitataan
- Varaus taulukkokirjassa: varaus äärettömän kaukana, pieni energia
- LHC:n energialla varaus ~ 8% suurempi kuin levossa!
- QCD:n kytkentävakio, “värivaraus”, pienenee energian kasvaessa



# Juokseva kytkinvakio standardimallissa



Kytkinvakiot  $\sim$  yhdistyvät  $10^{15}$  GeV:n energiassa:  
**yhtenäisteoria, GUT?**

# Säilyvät suureet

Standardimallin rakenteesta seuraa säilyviä suureita (“symmetria  $\leftrightarrow$  säilyvä varaus”)

- Energia, liikemäärä (4-impulssi), kulmaliikemäärä
- Sähkövaraus
- Baryoniluku  $B ==$  protonien+neutronien lukumäärä  
 $==$  kvarkkien lukumäärä / 3
- Leptoniluku  $L ==$  elektronit + neutriinot

Koska  $B$  on säilyvä, **aine on stabiili**. Protonin hajoaminen olisi signaali standardimallin ulkopuolisesta fysiikasta.

(tarkkaan ottaen vain  $B+L$  on säilyvä, ei  $B-L$ . Prosessi on SM:ssä kuitenkin niin hidas ettei sitä tapahdu.)

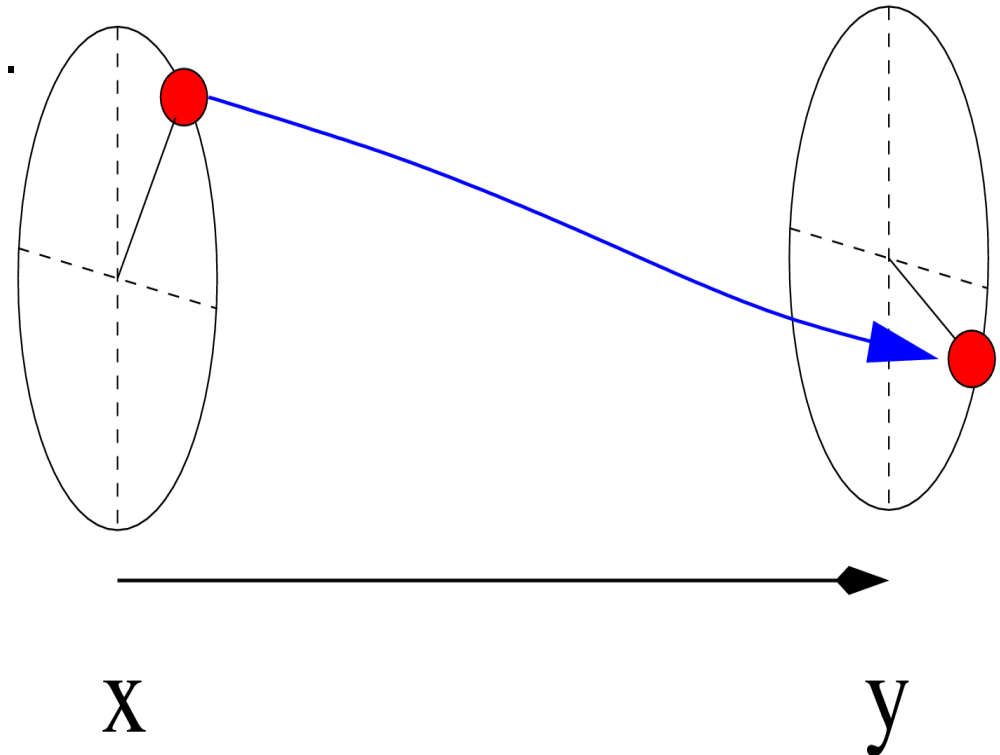
# Mittakenttäteoria

Standardimallin vuorovaikutukset ovat kaikki mittakenttäteorioita (gauge field theory).

QED: kuvataan varattua hiukkasta kompleksiluvulla. Jos hiukkanen siirretään  $x \rightarrow y$ , niin sähkömagneettinen kenttä **kiertää** kompleksiluvun vaihekulmaa

$$\phi \rightarrow U \phi, U = e^{i\theta}$$

Lukujen  $U$  muodostama ryhmä =  $U(1)$ ,  
"1x1 unitaarinen matriisi"



# Mittakenttäteoria

**Heikko:** sama homma, mutta nyt hiukkanen on 2-komponenttinen kompleksivektori:

$$\begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix} \rightarrow U \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix}, \quad U \in SU(2)$$

Nyt kiertoa kuvaa 2x2 kompleksinen unitaarinen matriisi: (ryhmä SU(2)).

**QCD:** nyt hiukkasella on 3 komponenttia, “väriä”:

$$\begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{pmatrix} \rightarrow U \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{pmatrix}, \quad U \in SU(3)$$

kiertoa kuvaa 3x3 kompleksinen unitaarinen matriisi (SU(3)).

# ***Mittakenttäteoria***

Standardimallin vuorovaikutuksia kuvaavat siis 1, 2 ja 3 -komponenttisten kompleksivektoreiden rotaatioita kuvaavat ryhmät (“mittaryhmät”).

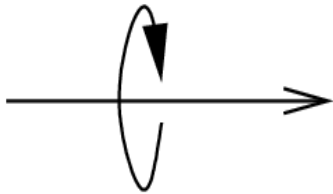
Miksi juuri nämä? Tätä ei tiedetä.

Periaate on hyvin yksinkertainen, ilmiömaailma monimutkainen

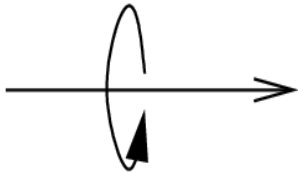
# *Pariteetti ja varauskonjugaatio*

**QED ja QCD** ovat symmetrisiä heijastusten suhteen, ts. toimivat samalla tavalla peilikuvamaailmassa.

**Heikko** vuorovaikutus ei: se vuorovaikuttaa vain “vasenkätisten” hiukkasten kanssa. **Pariteetti P** on rikkoutunut. Massattomille hiukkasille tämä tarkoittaa vasenkätistä spin-tilaa liikesuunnan suhteen:



vasen, vuorovaikuttaa heikosti



oikea, ei vuorovaikuta heikosti

Ainoa luonnonlaki mikä tekee eron oikean ja vasemman välillä! (Vaikutus ei näy arkimaailmassa)

# ***Pariteetti ja varauskonjugaatio***

**Antihukkaset** toimivat kuten peilikuva, ts. niillä heikko vuorovaikutus vaikuttaa vain oikeakätisiin tiloihin.

Jos **varauskonjugaatio C** vaihtaa hiukkaset antihukkasiksi ja päinvastoin, on yhdistelmä CP Standardimallin symmetria-melkein!

Standardimalli rikkoo myös CP:n mutta hyvin heikosti. CP-symmetrian rikko aiheuttaa epäsymmetrian materian ja antimaterian välille, ja on välttämätön ehto mm. sille että maailmankaikkeudessa on ainetta (eikä antiainetta).

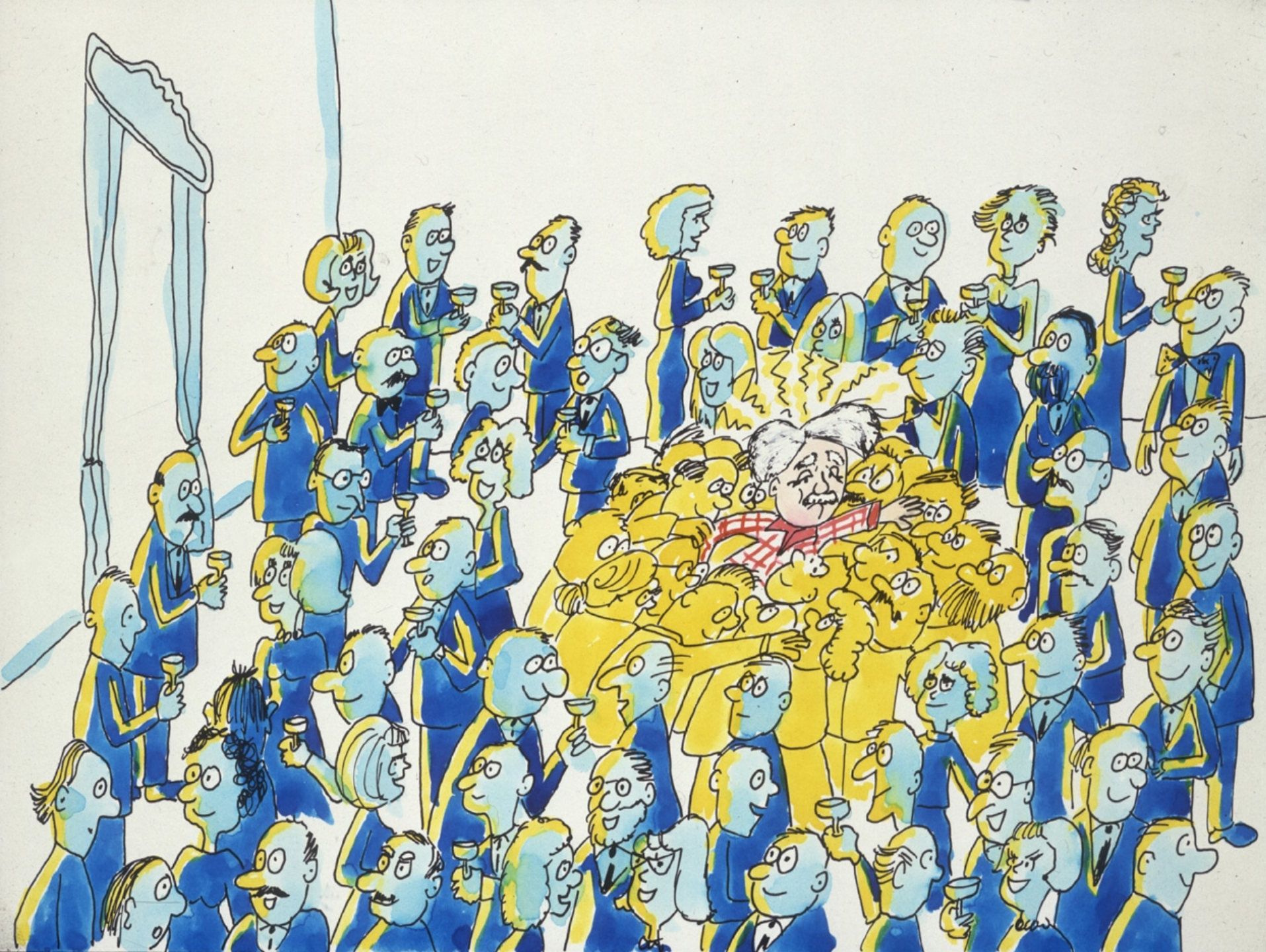
# *Higgs:*

- LHC:n ensimmäinen päätavoite: löytää Higgsin hiukkanen
- Higgsin hiukkanen (tai Higgsin *kenttä*) antaa muille alkeishiukkasille **massan**, välttämätön Standardimallille











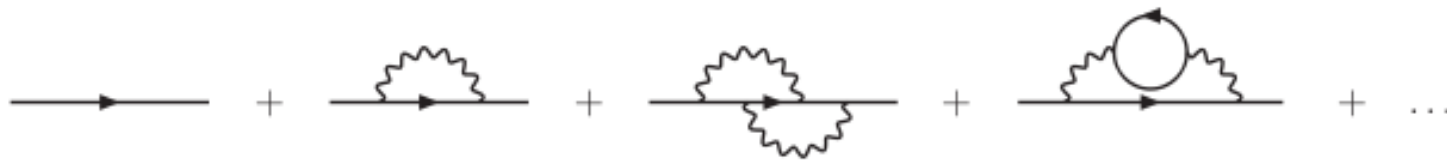


*Kuinka standardimallia tai  
“uuden fysiikan” teorioita  
tutkitaan teoreettisesti?*

Laskemalla:

**Teoria -> lasku -> vertaa havaintoihin**

- Laskut voivat olla analyyttisiä:
- ***Feynmanin diagrammat, häiriöteoria***



- Toimii erittäin hyvin sähkömagneettisella vuorovaikutuksella (10 desimaalin tarkkuus)
- Ei toimi vahvalla ja toimii huonosti heikolla vuorovaikutuksella



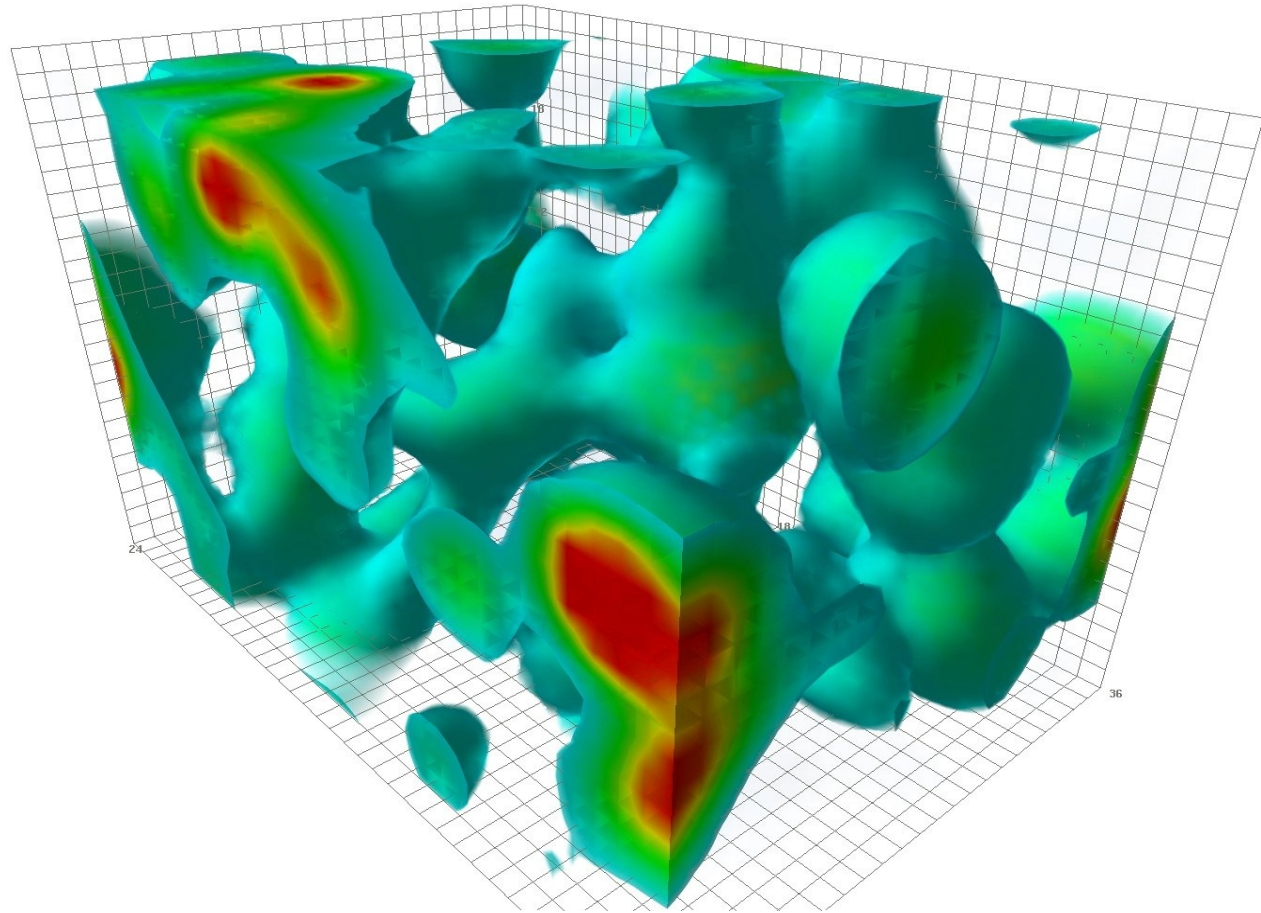


Tai sitten  
mallinnetaan  
hiukkaskentät  
diskreetillä hilalla ja  
simuloidaan  
tietokoneilla:

## ***Hilasimulaatiot***

Suomessa pitkät  
perinteet

Raskaan sarjan  
superlaskentaa



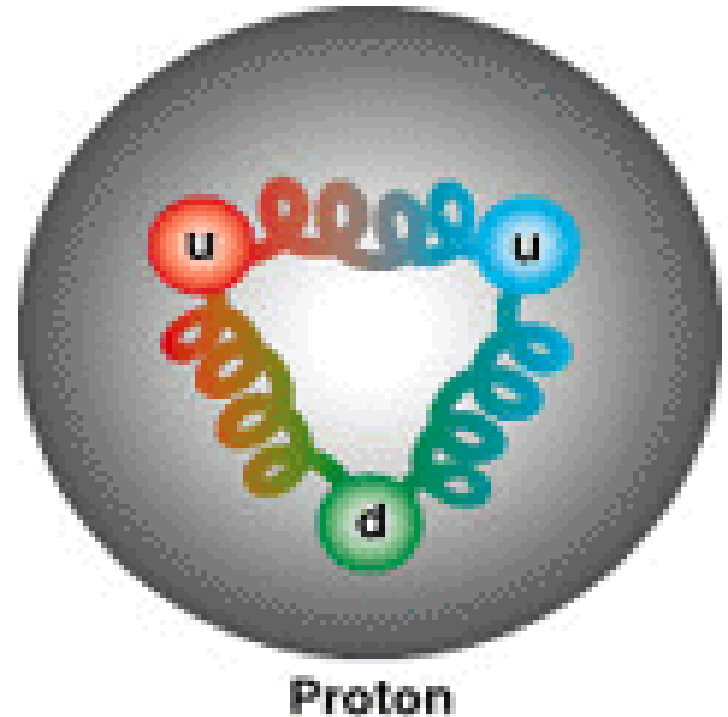
# Vahvat vuorovaikutukset hilalla (QCD, kvanttiväridynamiikka)

Kvarkit & gluonit: protonien rakennuspalikat  
Vahvasti kytketty, “ei-Abelinen”

- > *Teoria on ei-häiriöteoreettinen*
- > *Protonin rakennetta ei voi ratkaista analyttisesti, ei edes approksimoiden!*

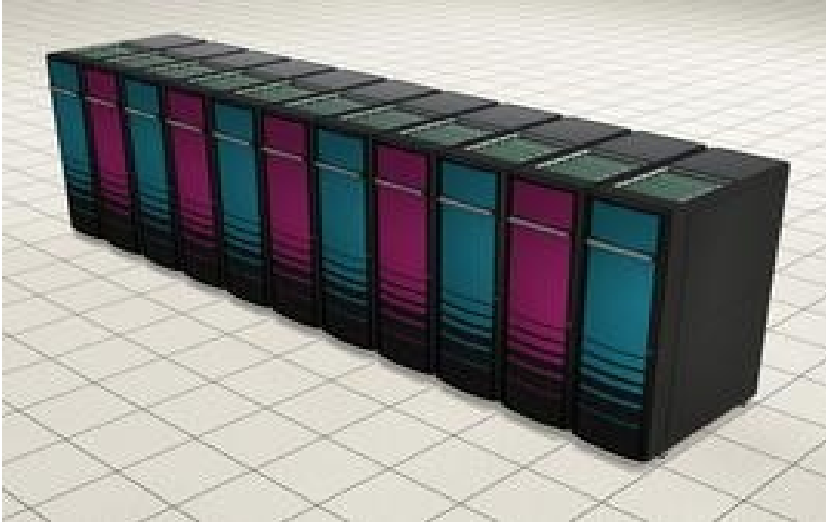
70-luvulla Ken Wilson näytti  
kuinka panna kvanttikentät  
(ml. QCD) diskreetille hilalle

- > Tietokonesimulaatiot  
80 -luvun alusta
- > Tuloksena saadaan nykyään protonin ominaisuudet tarkasti
- kvarkkien välinen vetovoima, protonin massa jne.



# *Suuren skaalan laskentaa*

Hilasimulaatiot ovat haastavia superlaskentaprojekteja.  
Aktiivinen tieteenala, n. 500 osallistujaa vuosittaisissa “lattice”-kokouksissa



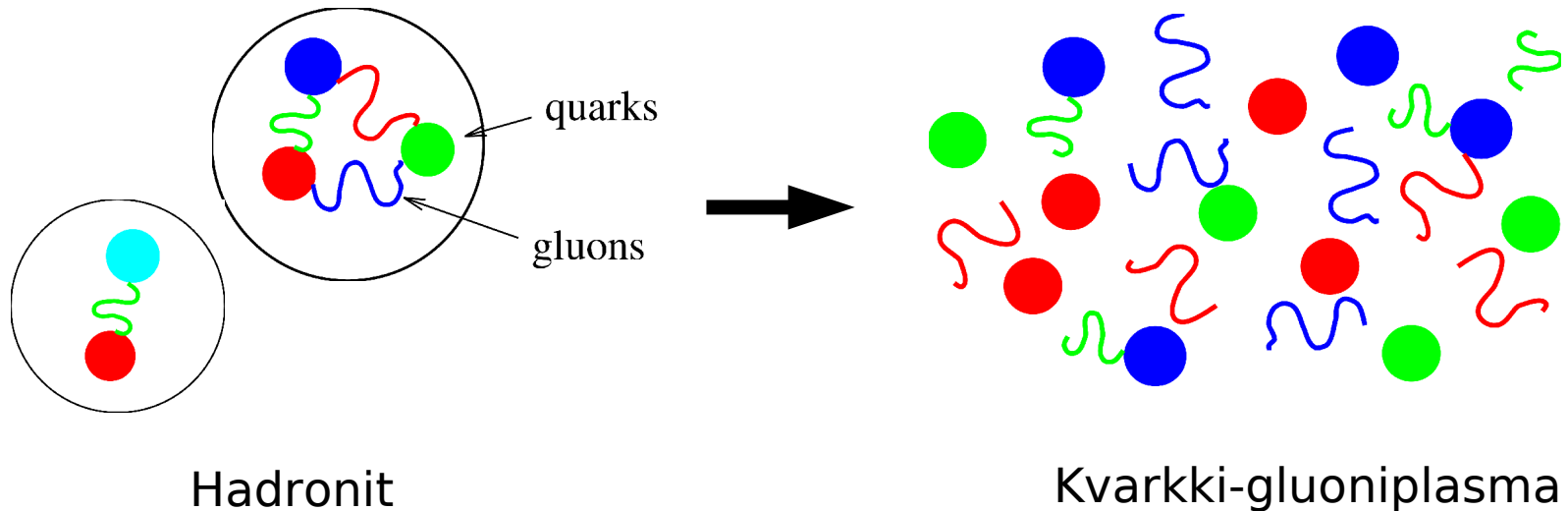
**Louhi, CSC, Espoo**

**QCDOC, Brookhaven**



# Esimerkki: kvarkki-gluoniplasma

Hyvin korkeissa lämpötiloissa hadronit (protonit, neutronit jne.) “sulavat” ja muodostavat **kvarkki-gluoniplasmaa**: tiheä kaasu kvarkkeja ja gluoneja



Löydetty hilasimulaatioilla (mm. Helsingissä); vahvistettiin **raskasionikokeissa** (RHIC, Brookhaven; CERN)

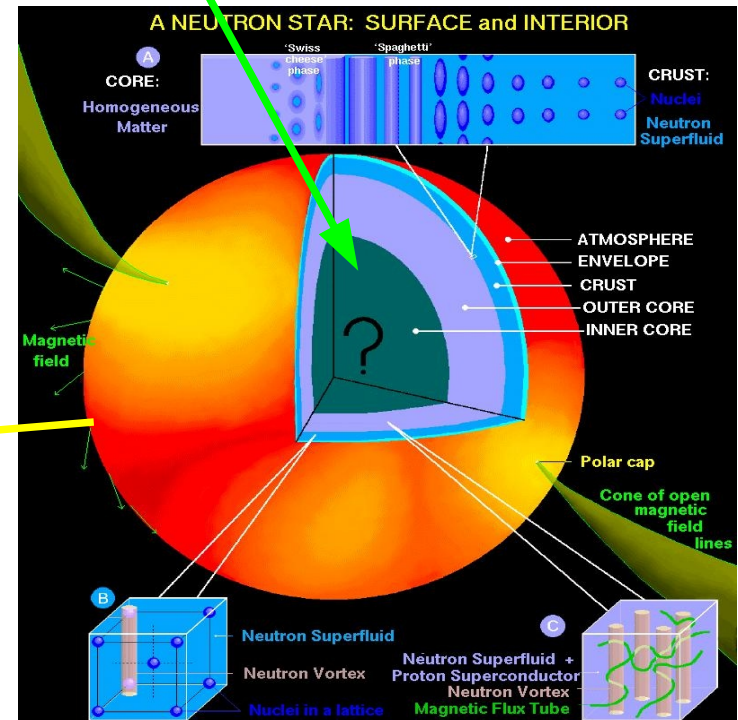
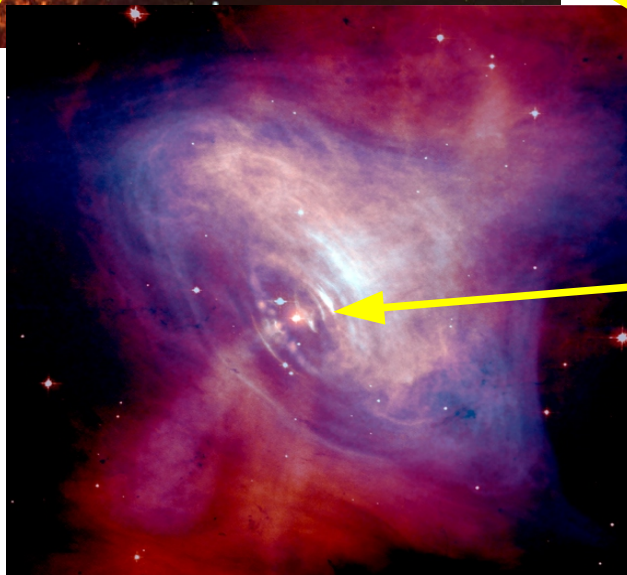
Tutkitaan LHC:llä (ALICE-koe)

# *Kvarkkiplasmaa neutronitähdissä?*

- Onko ytimessä kvarkkiplasmaa?
- Ei osata vielä laskea
- Ominaisuudet määräävät neutronitähden stabiiliuden ja suurimman koon



*Crab nebula*



*Jos Higgs löytyy, onko kaikki kunnossa? Ei: nyt standardimallin 40-vuotinen valta-asema rapautumassa:*

## **Kosmologisia havaintoja**

joita standardimalli ei pysty selittämään:

- Miksi ainetta ylipäänsä on olemassa? (4% ainetta ~ 1 protoni 4 kuutiometriä kohti.) Miksi ei antiainetta?
- Mitä on pimeää aine (22%)?
- Entä pimeää energia (74%)?

## **Lisäksi:**

- Standardimalli on **ruma**, paljon parametrejä jne.
- Hienosäätö-ongelma: luontainen validiteettialue loppumassa suurilla energioilla? Ollaanko lähestymässä rajaa?
- Painovoima?

## **Uusi fysiikka häämöttää?**

**Uudet kokeet (LHC, CERN); astrohiukkasfysiikka & kosmologia**

# *Standardimallin teoreettisia ongelmia*

## *Syyllinen: Higgsin hiukkanen!*

**Hierarkiaongelma:** jos Standardimalli olisi voimassa GUT-skaalalle ( $10^{15}$  GeV),

täytyy Higgsin massaparametrin olla hienosäädetty tarkkuudelle  $1/10^{23}$

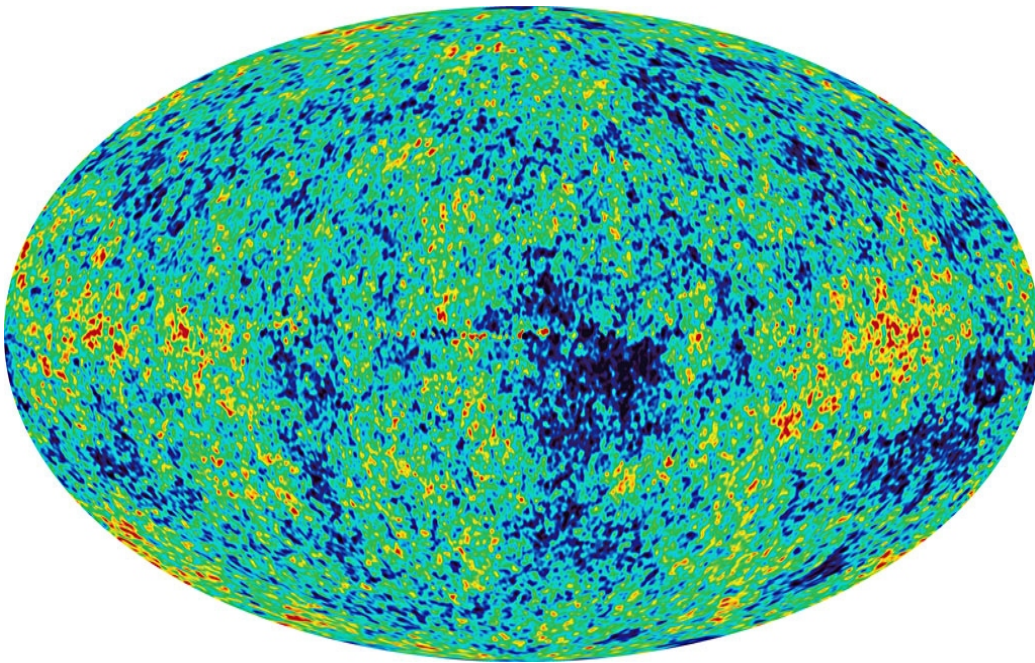
**Vakuumin stabiilius:** jos Higgs on liian kevyt, on nykyinen vakuumi vain metastabiili → tunneloituminen oikeaan vakuumiin?

**Triviaalisuus:** jos Higgs on liian raskas, loppuu teorian validiteettialue jo ennen GUT-skaalaa.

Ongelmat osoittavat että Standardimalli on vain “matalan energian” **efektiivinen teoria**, joka on korvattava uudella kuvauksella korkeilla energioilla

# ***Kosmologiasta on tullut täsmätiedettä:***

- Varhainen maailmankaikkeus oli äärimmäisen kuuma: hiukkasfysiikka tärkeää!
- Energia **paljon** suurempi kuin hiukkaskiihdyttimissä!
- Jättänyt jälkensä maailmankaikkeuteen:



WMAP-satelliitin  
mittaama mikroaalto-  
taustasäteilyn  
epähomogeenisuus

*alkuräjähdyksen  
jälkihehku*



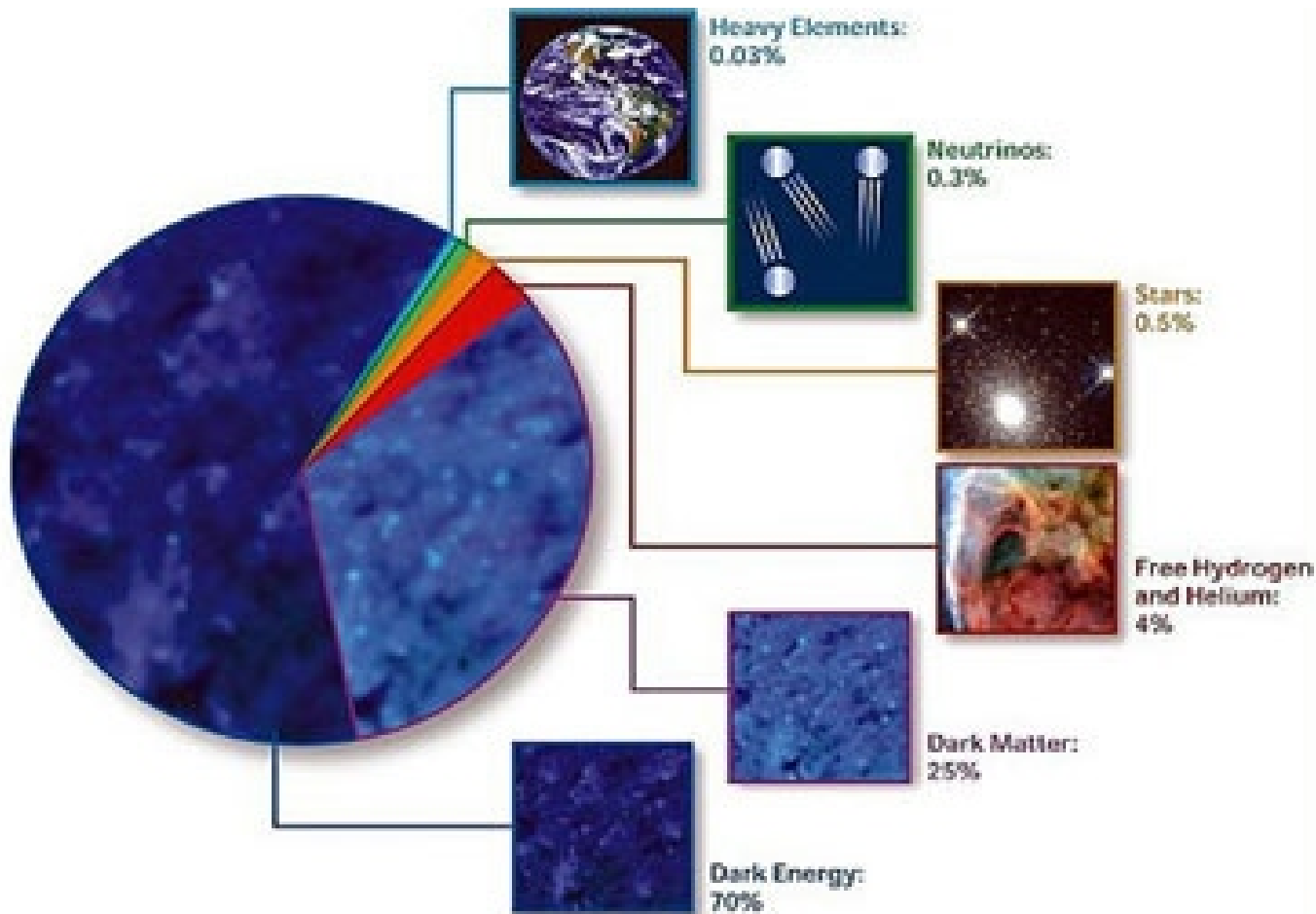
# ***Maailmankaikkeuden koostumus:***

Taustasäteilystä ja muista astrofysikaalisista havainnoista:

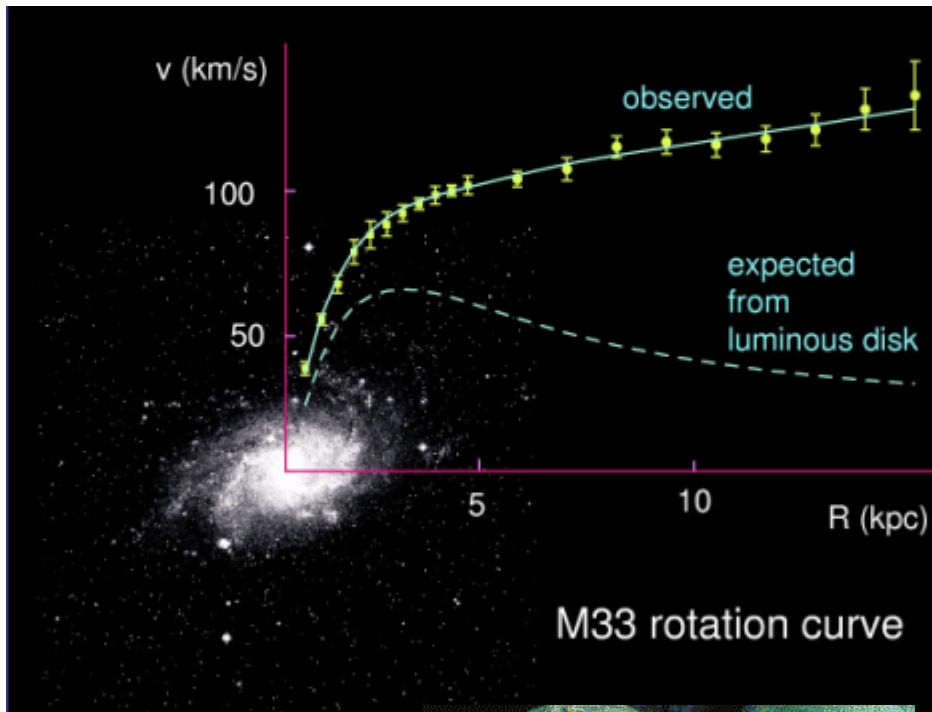
4% tavallinen aine (Standardimalli)

22% **pimeä aine** (tuntematon hiukkanen)

74% **pimeä energia**



# Pimeä aine – galaksien rakenne



Jo 1937 F. Zwicky havaitsi että galakseissa on paljon enemmän näkymätöntä, "pimeää" ainetta kuin näkyvää.

Vera Rubin 1970:  
systemaattinen galaksien rotaatiospektrin tutkimus

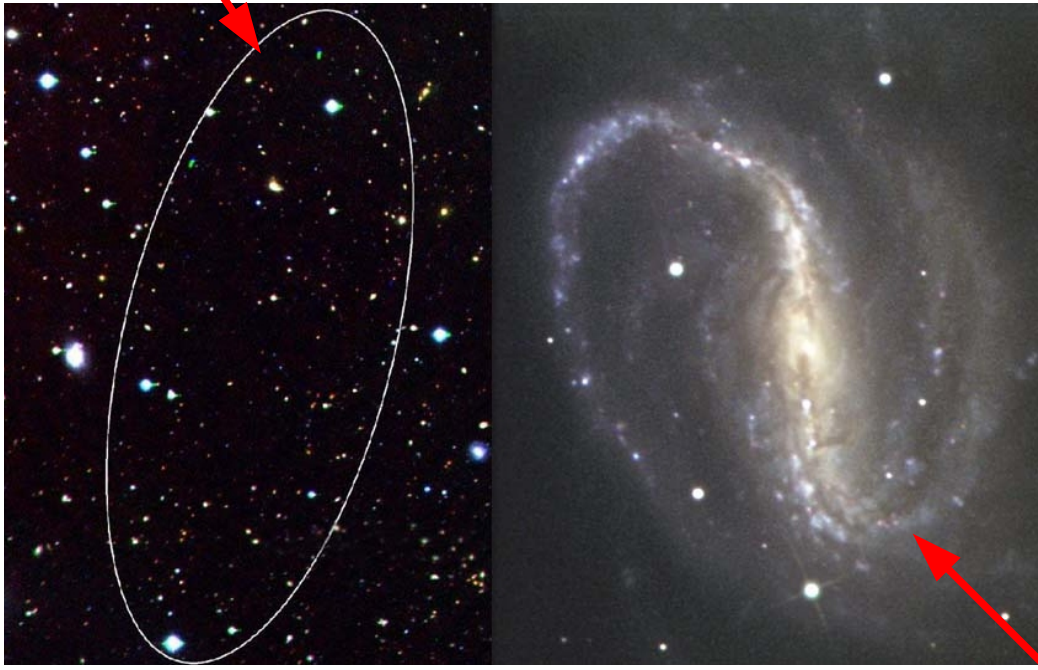
=> n. 90% aineesta on pimeää, siis ei säteile valoa

Aineen luultiin olevan pölyä ja kaasua. Vasta viime vuosina on selvinnyt että se ei voi koostua tunnetuista alkeishiukkasista.



# Täysin pimeä galaksi?

VIRGO HI21: kokonaismassa  $\sim 10^{11} M_{\text{sn}}$ , mutta vetyä on vain  $\sim 10^8 M_{\text{sn}}$  ! Näkyy painovoiman kautta



R. Minchin et al.,  
ApJ 622 (2005) L21

vastaavan massainen  
"normaali" galaksi

*Bullet-galaksiklusteri: pimeä aine vs. tavallinen aine*



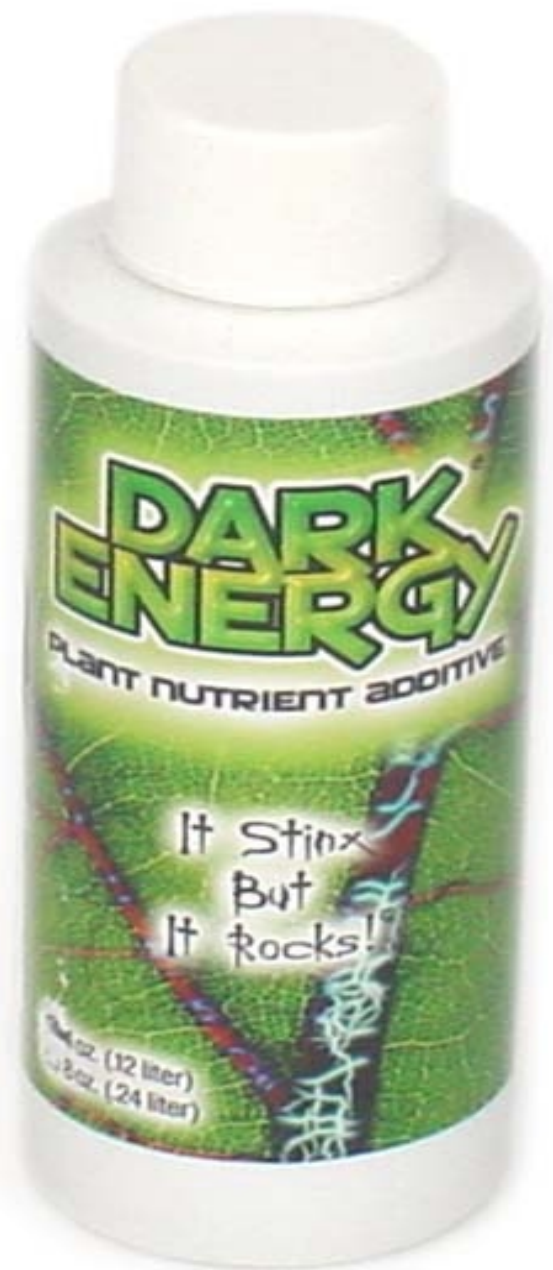
# *Pimeä energia*

**Pimeä aine** koostuu todennäköisimmin eksoottisista, standardimalliin kuulumattomista hiukkasista =>

Uusi hiukkasfysiikan teoria. Useita kandidaatteja, mahdollisesti löydetään kokeellisesti 2010-18 (LHC, CERN)

**Pimeä energia:** mysteeri, tunnettu fysiikka antaa  $10^{120}$  -kertaa liian suuren arvon!  
Kvanttigravitaatio? Supersäikeet? ... ?

Ei tunneta toimivaa tapaa.



# Mitä standardimallin jälkeen?

- Teoreettisten fyysikoiden leikkikenttä
- Kymmeniä teoriakandidaatteja, joista lähes kaikki karsiutuvat pois ennemmin tai myöhemmin, kun havaitaan etteivät ne sovi yhteen havaintojen kanssa.

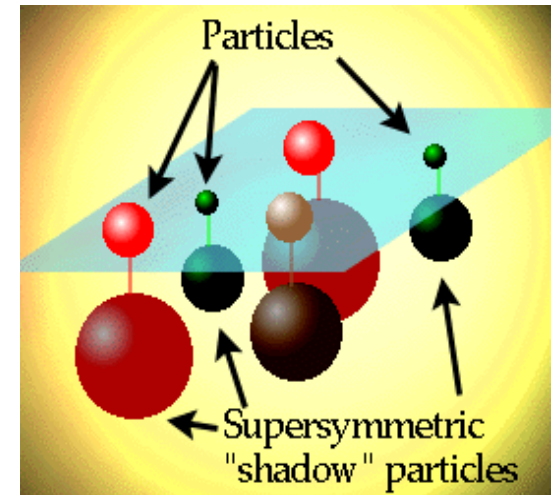
**Supersymmetria** : suosituin standardimallin laajennus.

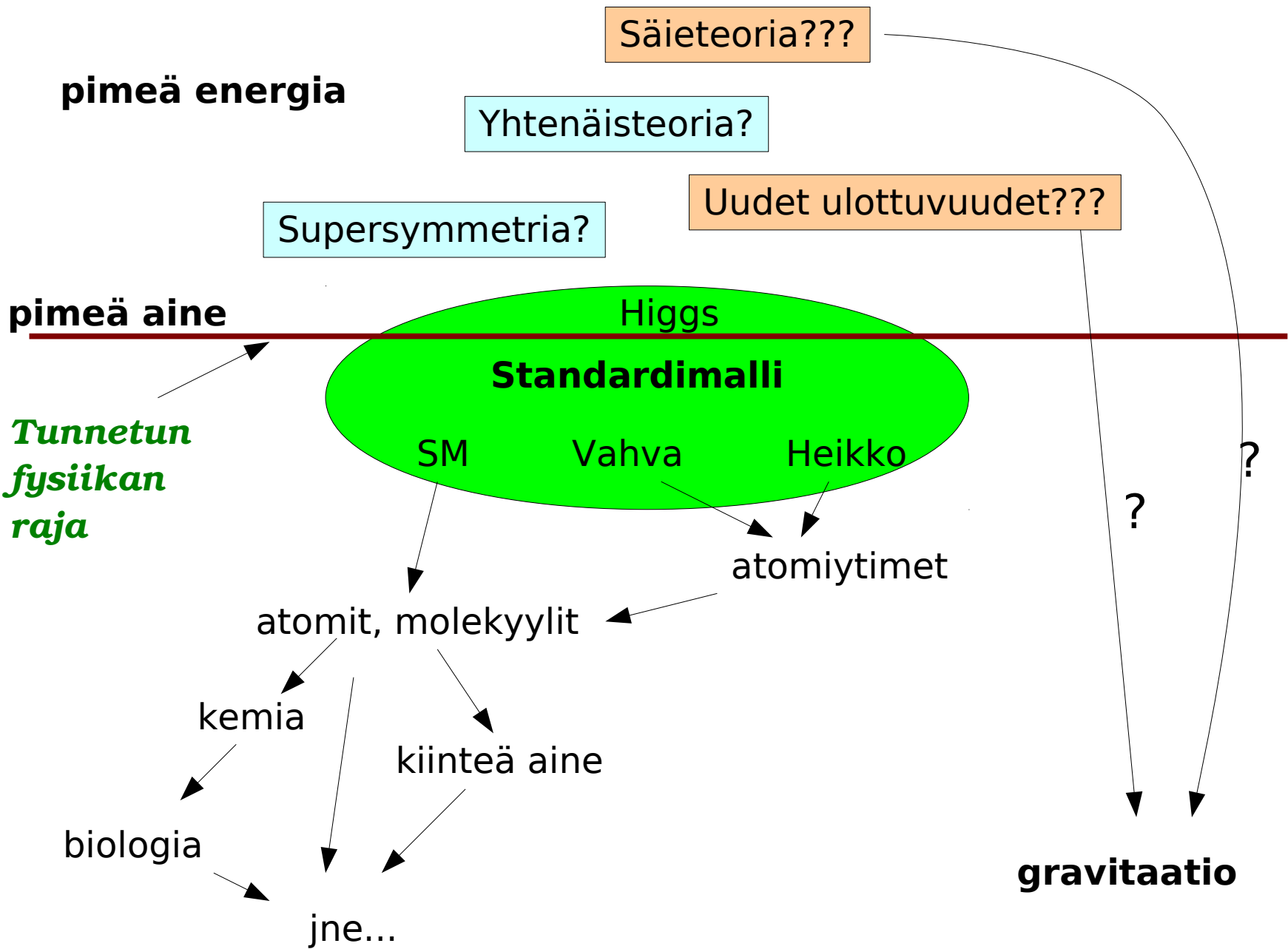
**Uudet ulottuvuudet**: avaruus voi sisältää enemmän kuin 3 ulottuvuutta! Nämä lisäulottuvuudet on "rullattu" niin pieniksi ettei niitä ole vielä havaittu. Hyvin spekulatiivisia.

**Yhtenäisteoriat (GUT)**: yhdistävät sähkömagnetismin, vahvan ja heikon vuorovaikutuksen yhdeksi vuorovaikutukseksi.

**Säieteoriat**: pistemäiset hiukkaset korvataan 1-ulotteisilla säikeillä. Mahdollisuus yhdistää myös gravitaatio: "kaiken teoria".

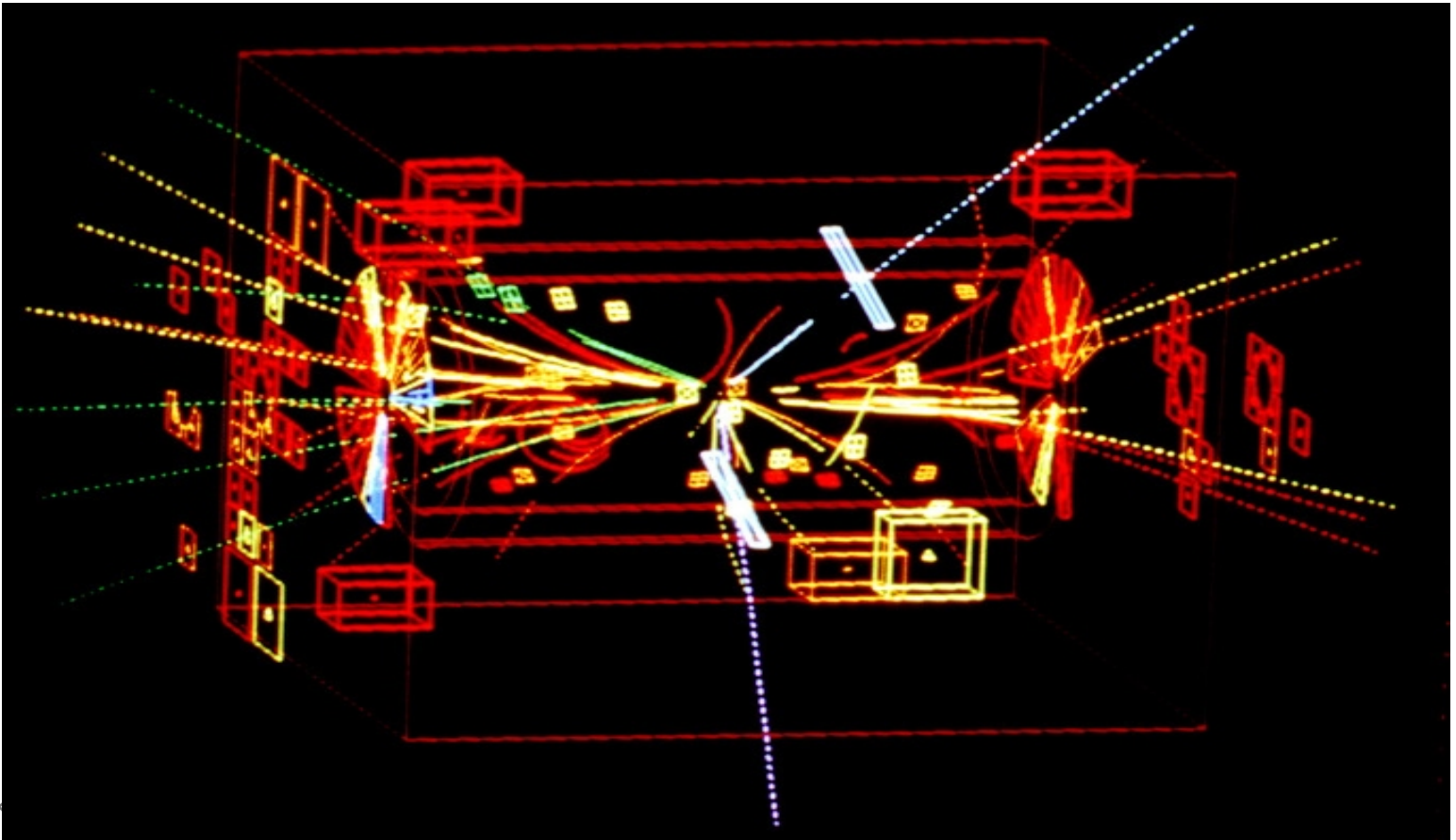
Jne ....





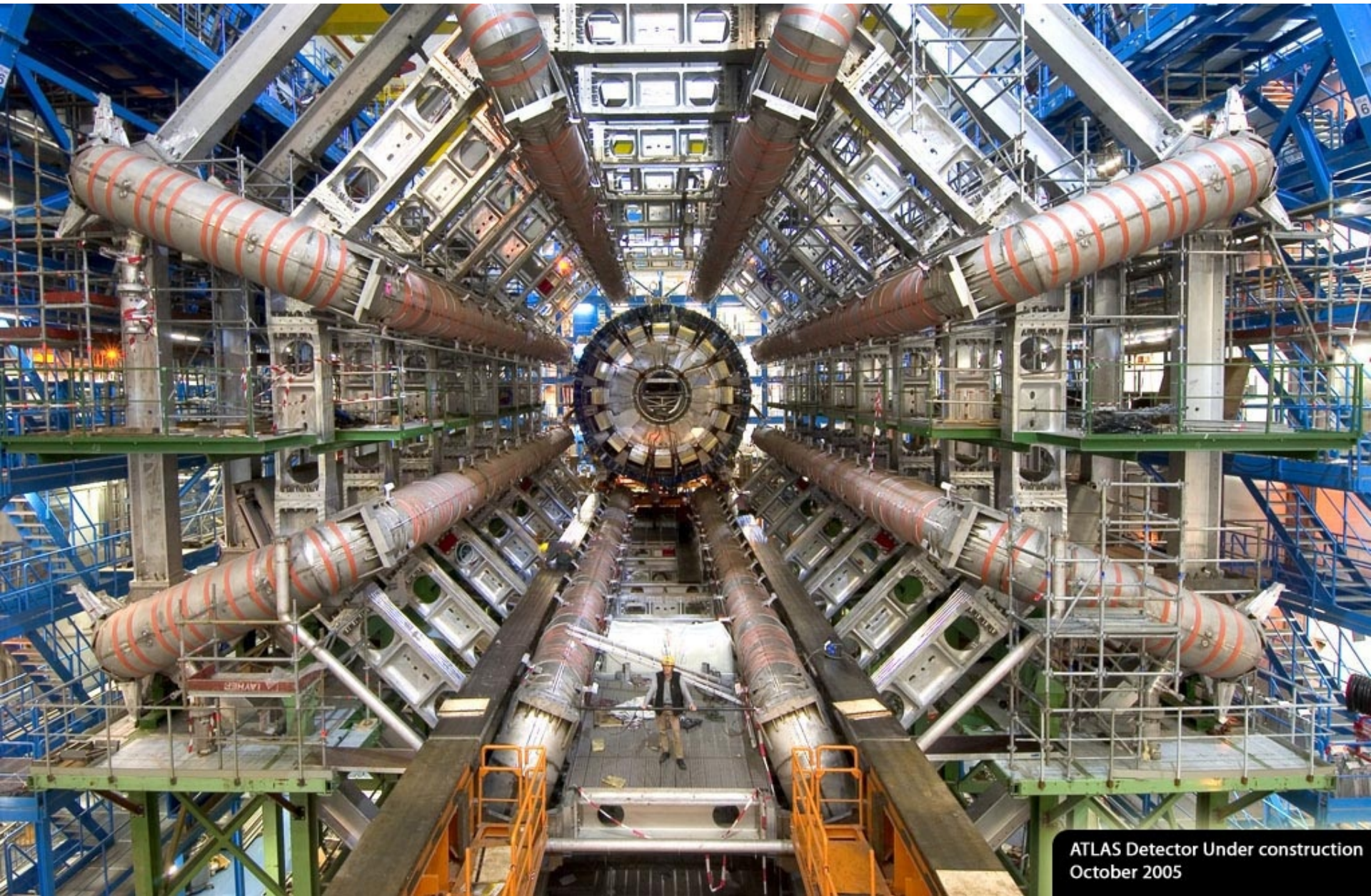
# ***Hiukkaskiihdyttimet:***

- Kiihdytetään hiukkaset (protonit) suureen nopeuteen
- Törmäytetään vastakkaiseen suuntaan kulkevaan hiukkasiin
- Paljon energiaa -> uusia hiukkasia









ATLAS Detector Under construction  
October 2005

# LAGUNA

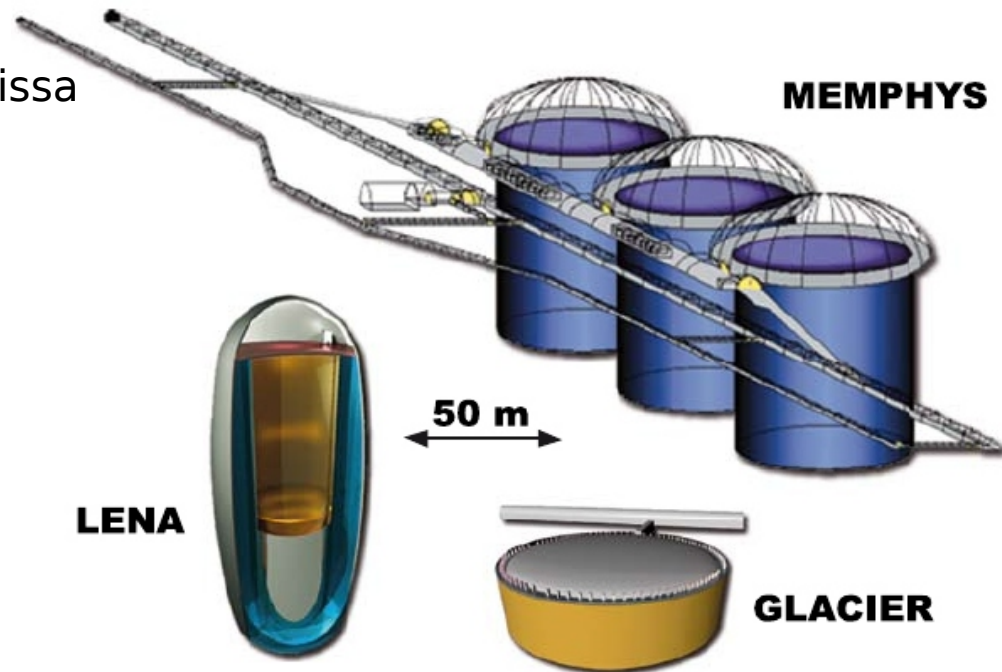
Syvällä maan alla, suojassa häiriöiltä tutkitaan:

- Avaruudesta tulevia, heikosti vuorovaikuttavia hiukkasia (neutriinot, pimeä aine)
- Aineen stabiiliutta - “protonin hajoaminen”

Eurooppalaisessa LAGUNA-projektissa valmistellaan suurta maanalaista havaintolaitetta.

Suomi on LAGUNAssa aktiivisesti mukana (CUPP, Oulun yliopisto)

Pyhäsalmen kaivos on kärjessä ehdolla olevista sijoituspaikoista



# Mitä LAGUNAlla tutkitaan?

Laguna mittaa ennen kaikkea **neutriinoja**, joita syntyy eri ydinreaktioissa:

- *Neutriinojen ominaisuudet*
- *Aineen hajoaminen*
- Supernovat
- Auringon rakenne
- Maan ytimen ydinreaktiot

- Rakentamisaikataulu: 2012-2020
- Käyttöaika: vähintään 50 vuotta
- Hinta: 300-500 milj.€.

## DETECTOR LAYOUT

### Cavern

height: 115 m, diameter: 50 m  
shielding from cosmic rays: ~4,000 m.w

### Muon Veto

plastic scintillator panels (on top)  
Water Cherenkov Detector  
1,500 phototubes  
100 kt of water  
reduction of fast  
neutron background

### Steel Cylinder

height: 100 m, diameter: 30 m  
70 kt of organic liquid  
13,500 phototubes

### Buffer

thickness: 2 m  
non-scintillating organic liquid  
shielding external radioactivity

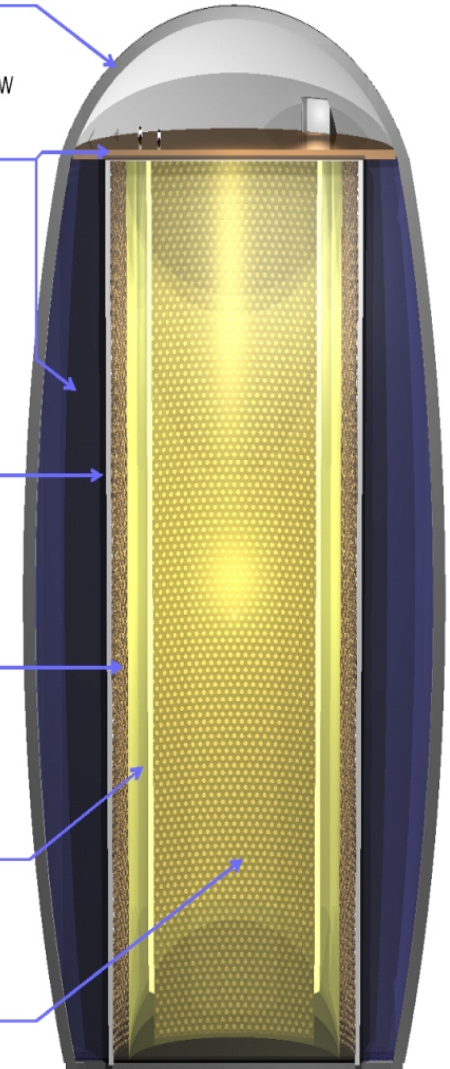
### Nylon Vessel

parting buffer liquid  
from liquid scintillator

### Target Volume

height: 100 m, diameter: 26 m  
50 kt of liquid scintillator

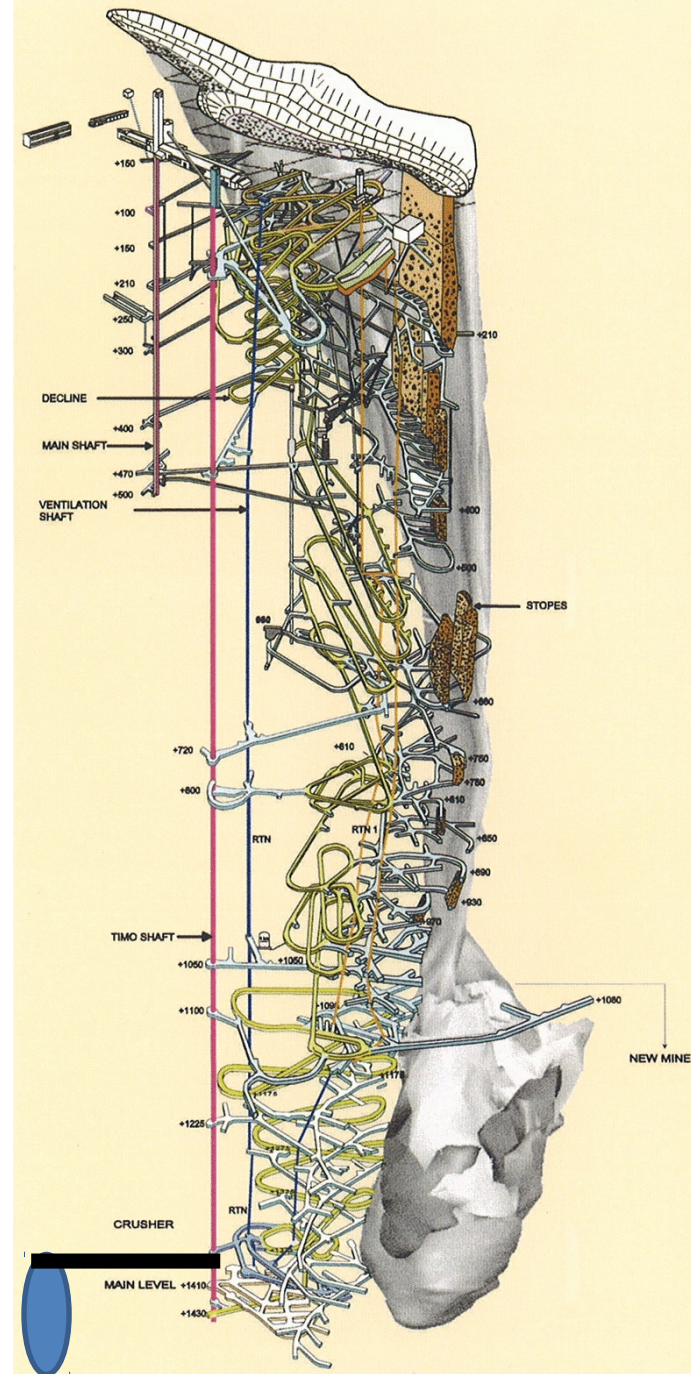
vertical design is favourable in terms of rock pressure and buoyancy forces



# *Pyhäsalmen kaivos*

**Pyhäsalmen kaivos on erittäin kilpailukykyinen paikka kansainväliselle tutkimuslaboratoriolle:**

- Euroopan syvin toimiva kaivos, 1400 m (~ 4000 m.W.e.)
- Stabiili, kova kivi
- Helppo pääsy eri syvyyksille: laajenemismahdollisuudet
- Alueen geologia tunnetaan hyvin
- Matala taustasäteily
- Kaivoksessa jo toimii Oulun yliopiston alainen tutkimuslaitos, **CUPP** (Centre for Underground Physics, Pyhäsalmi), johtaja Timo Enqvist
- EMMA-koe



# ***Lopuksi:***

***Uusi fysiikka*** tulossa:

- Viimeaikaiset kosmologiset ja astrofysikaaliset havainnot edellyttävät standardimallin ulkopuolista fysiikkaa. Tätä ei ole vielä havaittu maanpäällisissä kokeissa.
- Löydettävissä uusilla hiukkaskiihdyttimillä (LHC) ja astrohiukkasfysiikan kokeilla (mm. maanalaiset havaintolaitteet)
- Runsaasti uutta dataa: teoreettisten mallien pudotuspeli.
- Suomi on mahdollinen isäntämaa etulinjan hiukkasfysiikan kokeelle!

→ Hiukkasfysiikassa odotettavissa mielenkiintoisin vuosikymmen sitten 70-luvun!