

Mahtuuko kaikkeus liitutaalulle?

Teoreettinen näkökulma hiukkasfysiikkaan

Jaana Heikkilä, CERN, 304-1-007

7.2.2017

- Ylioppilas, 2010, Madetojan musiikkilukio, Oulu
- LuK (Fysiikka, teor. fysiikka), 2013, Oulun yliopisto
- FM (Hiukkasfysiikka), 2015, Helsingin yliopisto
- Työura:
 - CUPP, Pyhäsalmi/Oulu, kesä 2012
 - CERN (summer student), kesä 2013
 - HIP (tohtorikoulutettava), 2015 -

Hiukkasfysiikan tarkoituksena on muun muassa ymmärtää

- mistä kaikkeus koostuu? (hiukkaseläintarha)
- miten kaikki sai alkunsa? (Big Bang)
- miksi olemme olemassa? (antimateria+materia=X?)

Teoreetikot pyrkivät vastaamaan näihin kysymyksiin...

MUTTA... miksi hiukkasfysiikan kokeita tarvitaan?

Tietovisa: Miksi hiukkasfysiikan kokeita tarvitaan?

A) Koska fyysikotkin tarvitsevat töitä

B) Koska niihin liittyen saa “hyviä” elokuvia
(esim. *Enkelit ja demonit*)

C) Koska salaliittoteorioita pitää ruokkia jotenkin

D) Joku muu, mikä?

Tietovisa: Miksi hiukkasfysiikan kokeita tarvitaan?

A) Koska fyysikotkin tarvitsevat töitä

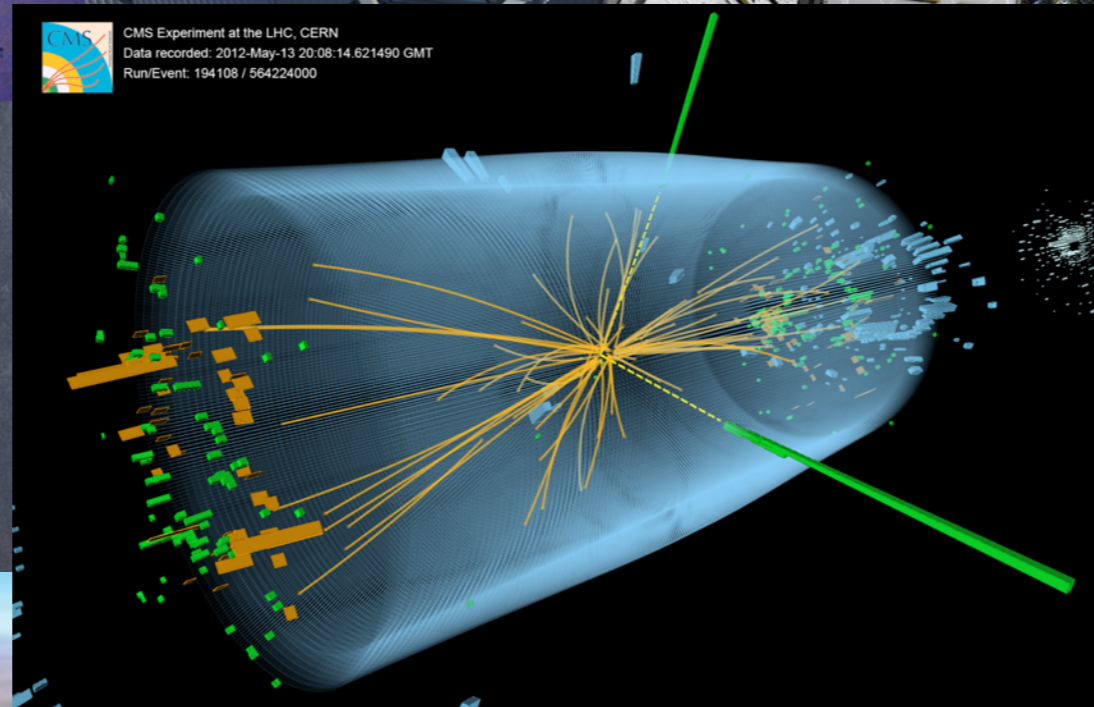
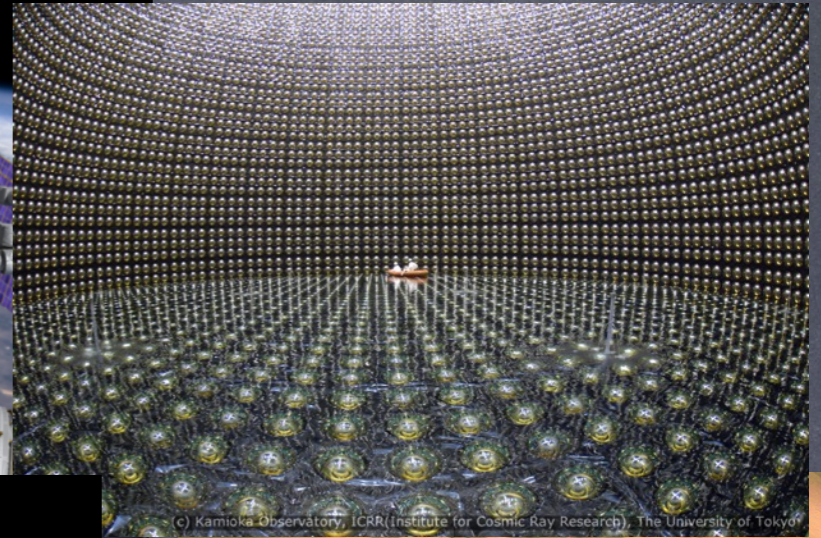
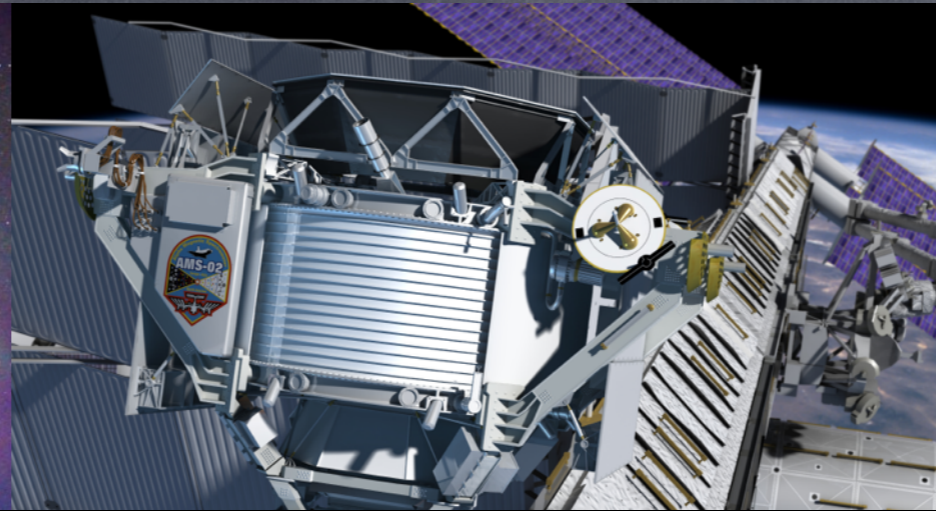
B) Koska niihin liittyen saa “hyviä” elokuvia
(esim. *Enkelit ja demonit*)

C) Koska salaliittoteorioita pitää ruokkia jotenkin

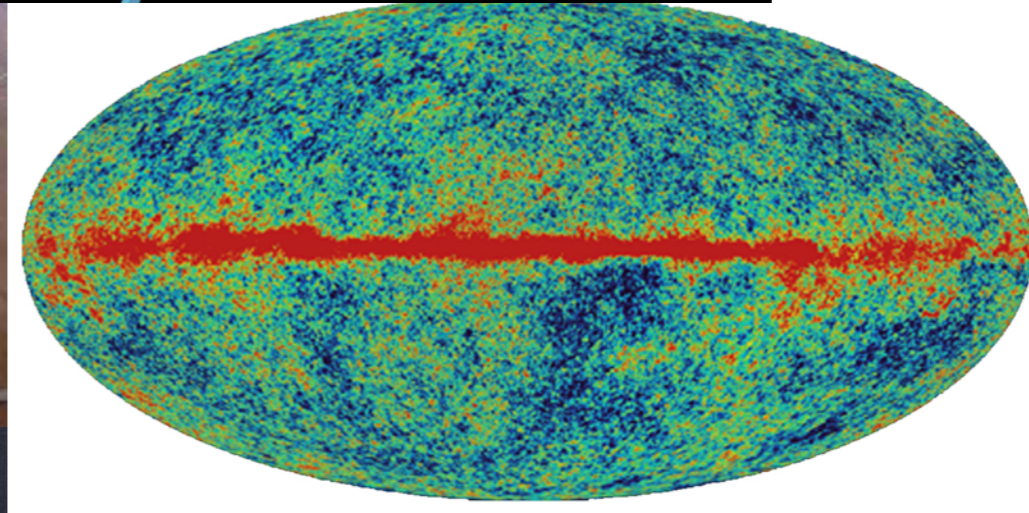
D) Joku muu, mikä?

“Teoria ei ole mitään ilman kokeellista vahvistusta!”

Hiukkasfysiikan kokeita - jokaiselle jotakin!



(c) Kamioka Observatory, ICRR (Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo





Minä ja CMS-koelaitte, kesällä 2013

“Teoria ei ole mitään ilman kokeellista vahvistusta!”

...mutta ilman teorioita kokeet eivät tiedä mitä ja mistä etsiä!

CMS-kokeen tavoitteet

- Standardimallin tutkiminen:

Higgsin bosoni sekä muut kaverit!



- Supersymmetrian ja lisäulottuvuuksien etsiminen
- Korkeaenergisien hiukkasfysiikan tutkiminen

CMS-kokeen tavoitteet

Puhutaan tästä

- Standardimallin tutkiminen:

Higgsin bosoni sekä muut kaverit!



- Supersymmetrian ja lisäulottuvuuksien etsiminen
- Korkeaenergisien hiukkasfysiikan tutkiminen

CMS-kokeen tavoitteet

Puhutaan tästä

- Standardimallin tutkiminen:

Higgsin bosoni sekä muut kaverit!

Mihin tätä tarvittiinkaan?!



- Supersymmetrian ja lisäulottuvuuksien etsiminen
- Korkeaenergisien hiukkasfysiikan tutkiminen

CMS-kokeen tavoitteet

Puhutaan tästä

- Standardimallin tutkiminen:

Higgsin bosoni sekä muut kaverit!



Mihin tätä tarvittiinkaan?!

- Supersymmetrian ja lisäulottuvuuksien etsiminen

Mikä on supersymmetria?

- Korkeaenergisien hiukkasfysiikan tutkiminen

Standardimalli

Hiukkasfysiikan “jaksollinen järjestelmä”



Kertoo meille

- mitkä ovat aineen rakennuspalikat,
- miten ne vuorovaikuttavat, ja
- miten alkeishiukaset saavat massansa!



Rakennuspalikat eli alkeishiukkastarha

The PARTICLE ZOO Sewing the fabric of spacetime

ELEMENTARY PARTICLES of THE STANDARD MODEL:

	FERMIONS			BOSONS
	I	II	III	
QUARKS	 u UP QUARK	 c CHARM QUARK	 t TOP QUARK	 γ PHOTON
	 d DOWN QUARK	 s STRANGE QUARK	 b BOTTOM QUARK	 g GLUON
LEPTONS	 ν_e ELECTRON-NEUTRINO	 ν_μ MUON-NEUTRINO	 ν_τ TAU-NEUTRINO	 Z Z BOSON
	 e^- ELECTRON	 μ MUON	 τ TAU	 W W BOSON

Fermionit = “ainehiukkaset”

kvarkit (6 kpl)

leptonit (6 kpl)

Bosonit = “voimänvälittäjät”

Higgsin hiukkanen (bosoni)

+



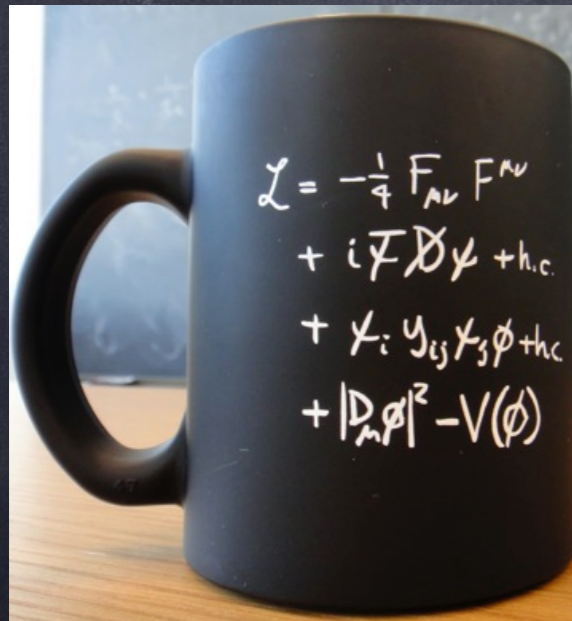
Mikä on hiukkanen?

Kvanttimekaniikka

aalto-hiukkasdualismi
epätarkkuusperiaate
 $\Delta x \Delta p > \hbar$

Suppea suhteellisuusteoria

valonnopeus vakio
fysiikan lait nopeudesta
riippumattomat



Kvanttikenttäteoria

Hiukkanen -- kenttä

Hiukkanen on kenttä, kenttä on hiukkanen

- Valo on sähkö- ja magneettikenttien värähtelyä
- Pienin mahdollinen värähdys: fotoni
- Elektroni on *elektronikentän värähdys*



Fermionit (ainehiukkaset)

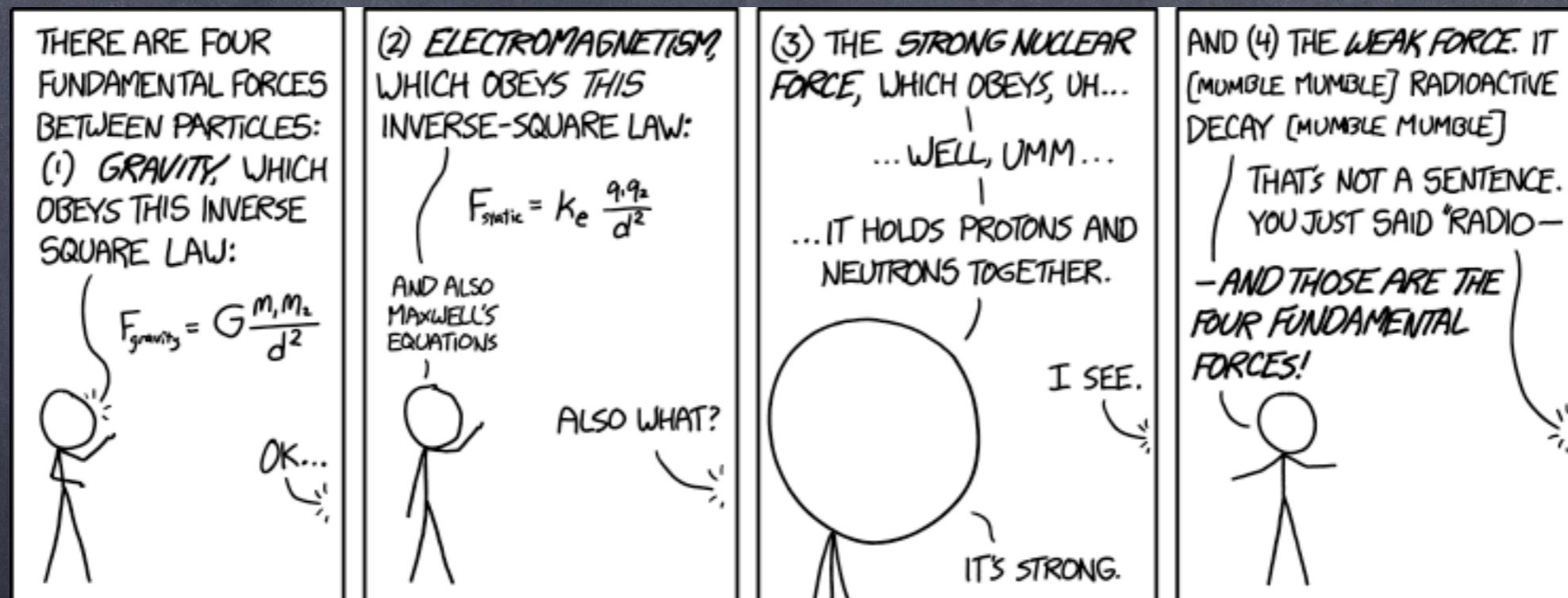
- Muodostavat kaiken tunnetun aineen
protoni = 2 ylös-kvarkkia + 1 alas-kvarkki
neutroni = 1 ylös-kvarkki + 2 alas-kvarkkia
- Fermioneilla spin on puoliluku
- Paulin kieltosääntö:

Kahta täysin identtistä fermionia ei voi laittaa samaan kvanttitilaan

TÄH?!
MITEN NIIN IDENTTISIÄ?

FERMIONS			
	I	II	III
QUARKS	 u UP QUARK	 c CHARM QUARK	 t TOP QUARK
	 d DOWN QUARK	 s STRANGE QUARK	 b BOTTOM QUARK
LEPTONS	 ν_e ELECTRON-NEUTRINO	 ν_μ MUON-NEUTRINO	 ν_τ TAU-NEUTRINO
	 e^- ELECTRON	 μ MUON	 τ TAU

Hiukkaset vuorovaikuttavat keskenään perusvuorovaikutuksilla

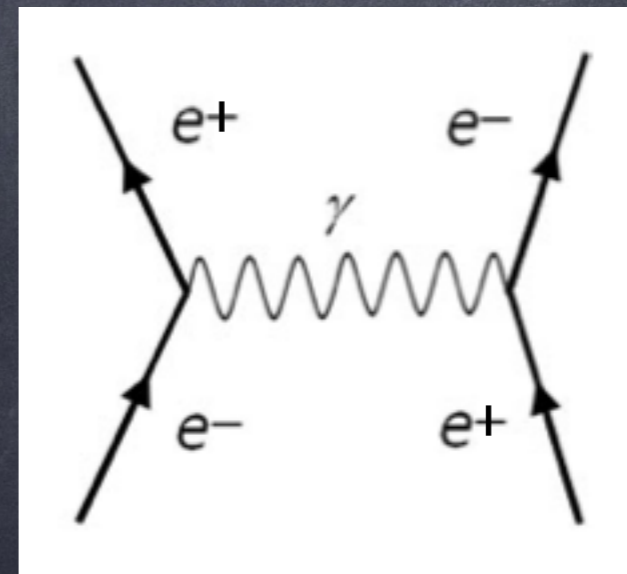
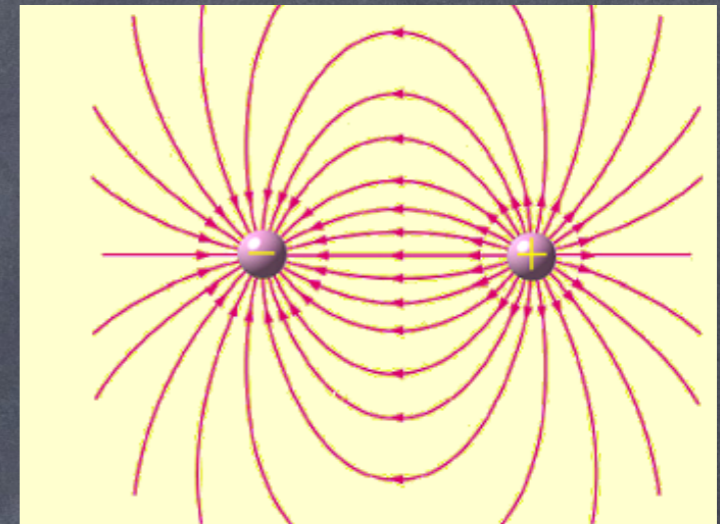


Neljä perusvuorovaikutusta

- Sähkömagnetismi: sähkö- ja magneettikentät
- Vahva ydinvoima: pitää atomiytimet kasassa
- Heikko ydinvoima: saa auringon paistamaan
- Painovoima: estää australialaisia putoamasta avaruuteen

Kuinka vuorovaikutus toimii?

- Vuorovaikutus välittyy:
 - Klassisesti: **kentän** kautta
 - Kvanttimekaanisesti:
“virtuaalisen” **hiukkasen** vaihto



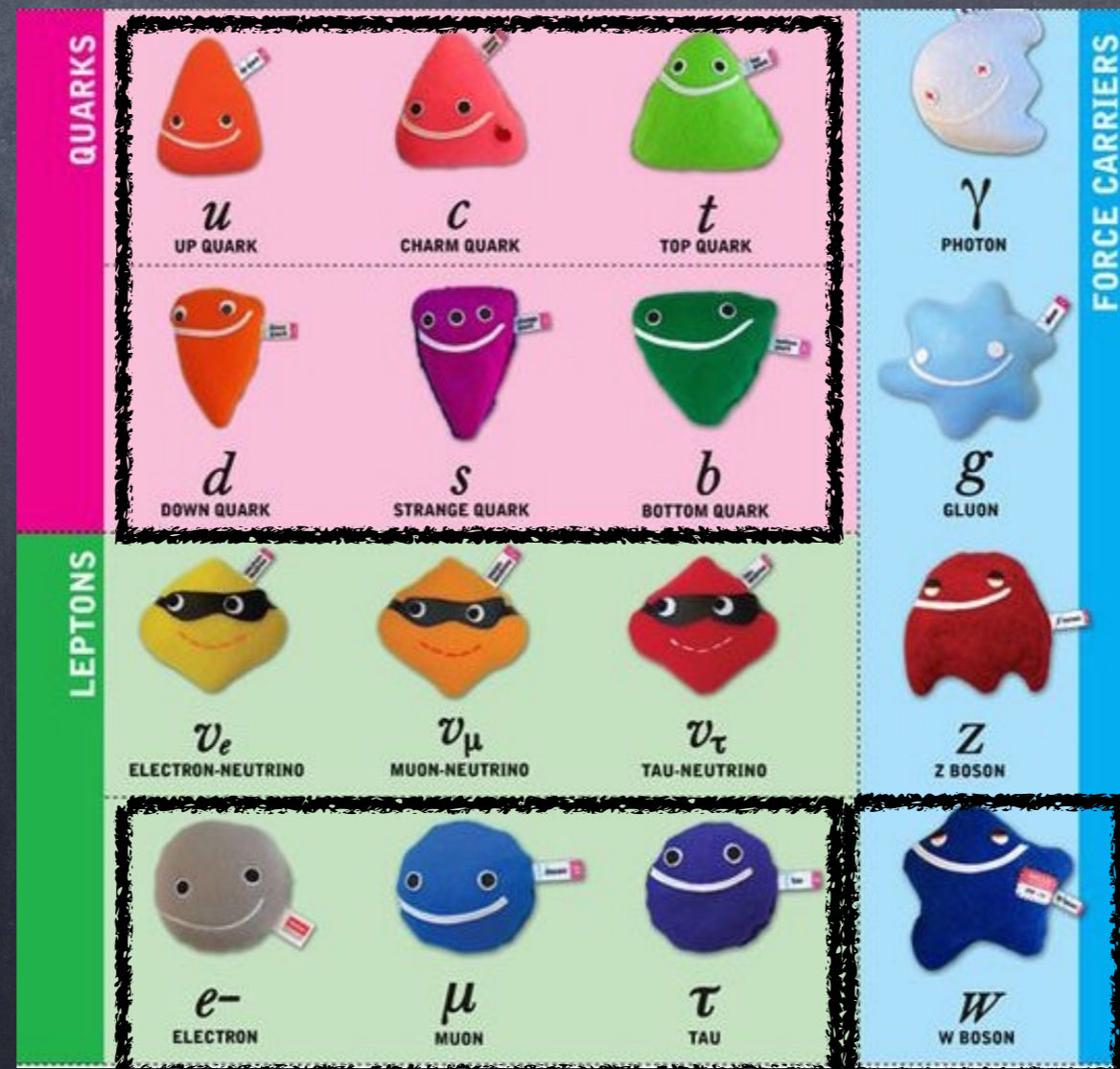
Sähkömagnetismi

- Aiheuttaa sähköiset ja magneettiset ilmiöt
- Välittäjäbosoni: fotoni
- Kaikki sähkövaratut hiukkaset kokevat tämän



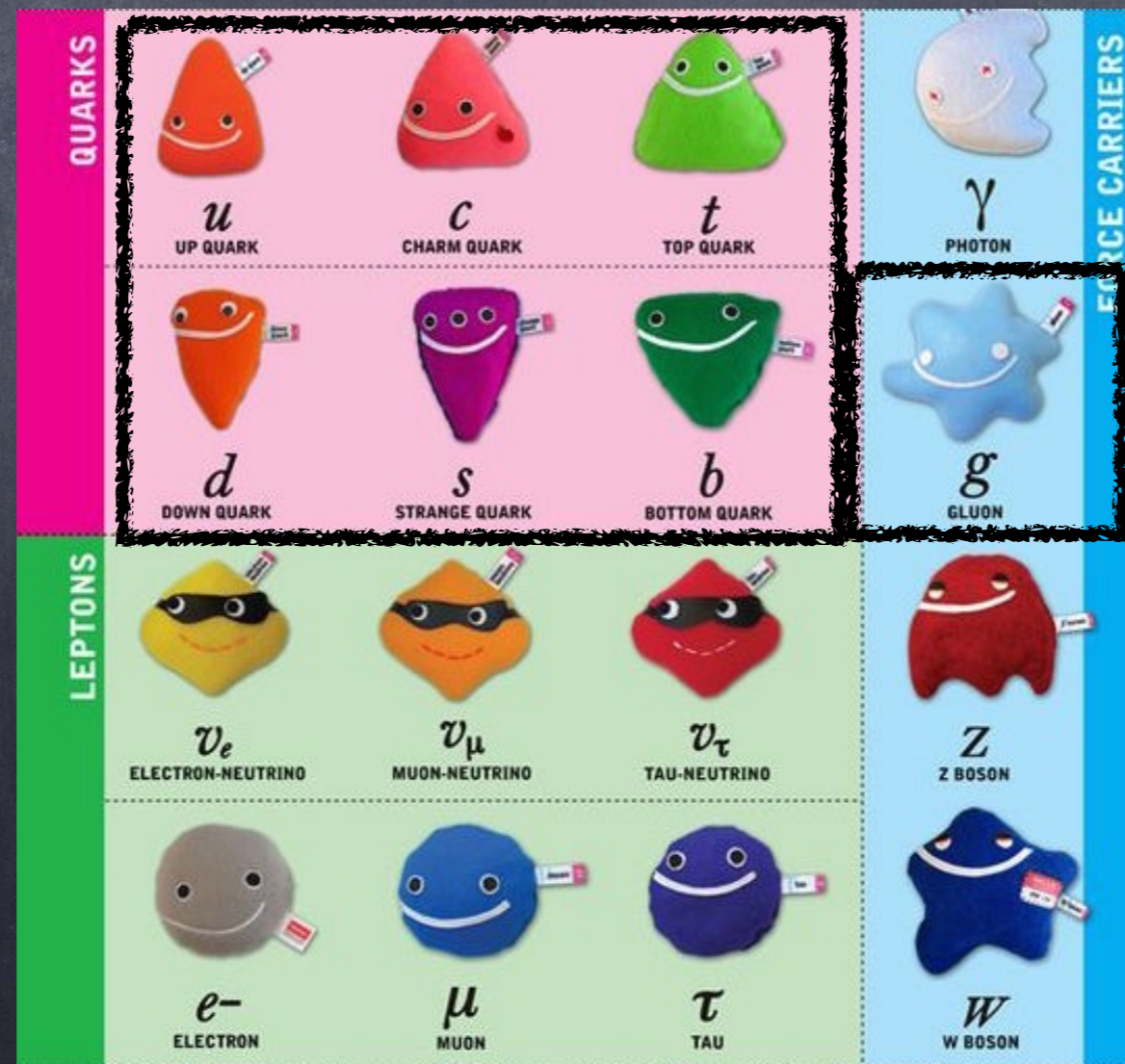
Sähkömagnetismi

- Aiheuttaa sähköiset ja magneettiset ilmiöt
- Välittäjäbosoni: fotoni
- Kaikki sähkövaratut hiukkaset kokevat tämän



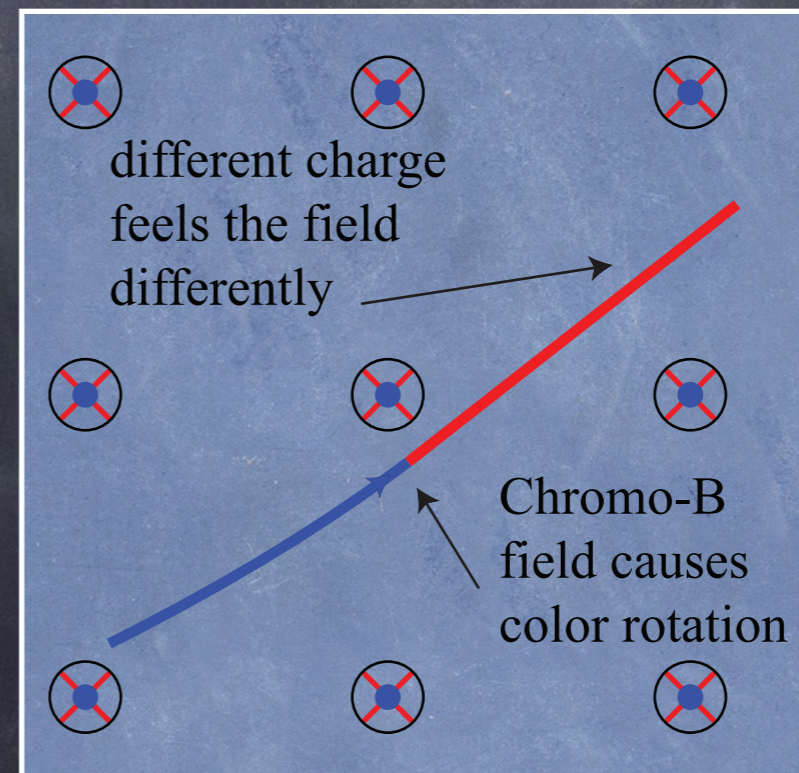
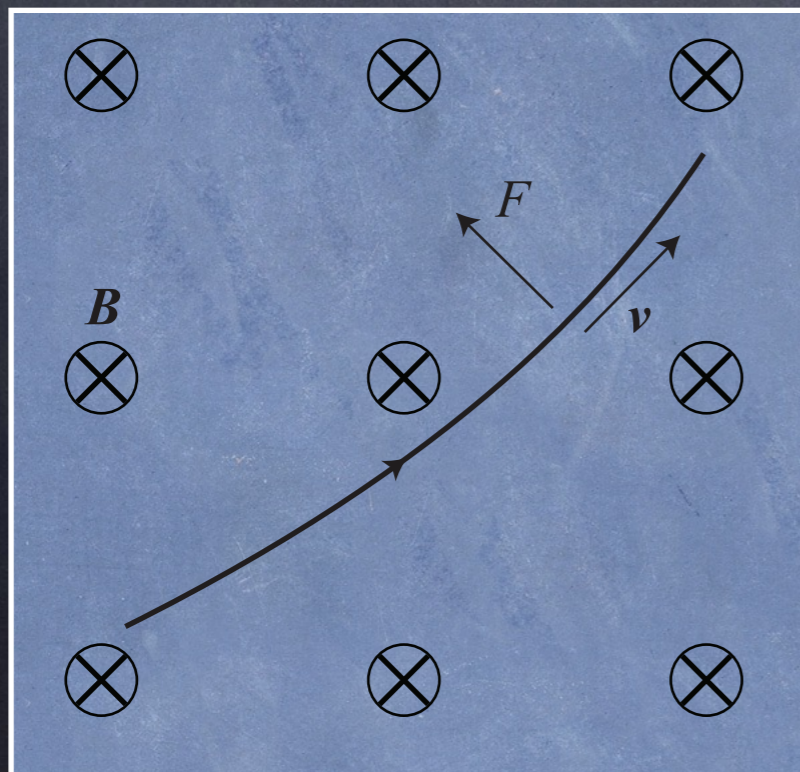
Vahva vuorovaikutus

- Sitoo protonit yhteen
- Välittäjäbosoni: gluoni
- Kaikki **värivaratut** hiukkaset osallistuvat vv:hen

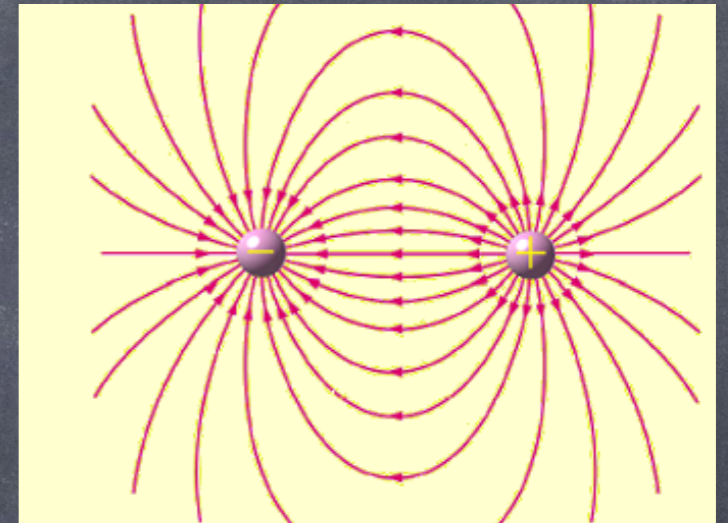


Vahva vuorovaikutus

- Kvarkkeja 3 eri “väriä” [rgb]
- Fotonit kytkeytyvät sähkövaraukseen, gluonit värivaraukseen: vain kvarkit [rgb]
- Gluonit myös värivarattuja: itseisvuorovaikutus!
- Värisähkökenttä ei ainoastaan aiheuta voimaa vaan muuttaa kvarkkien värivarausta: rb, bg,...



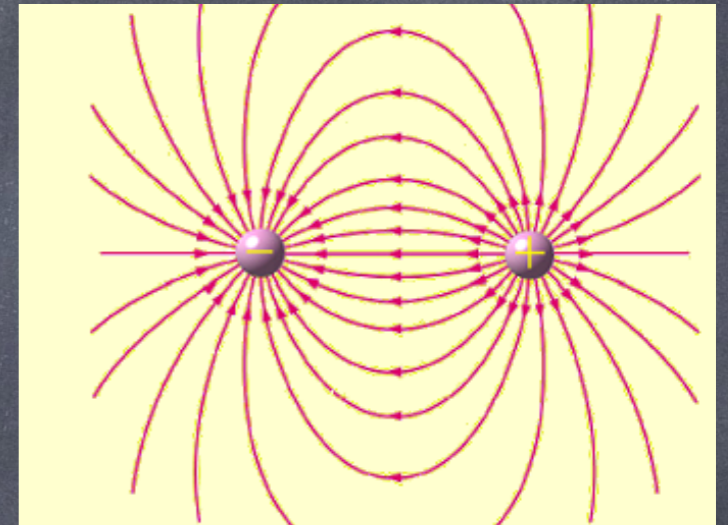
Standardimallin gluonit



Standardimallin gluonit

- Voima jolla kaksi sähkövarausta vetää toisiaan puoleensa

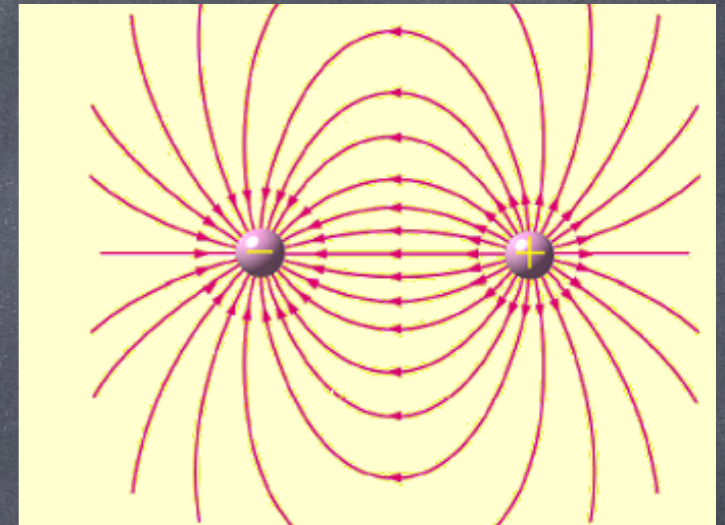
- $F = q_1 q_2 / r^2$



Standardimallin gluonit

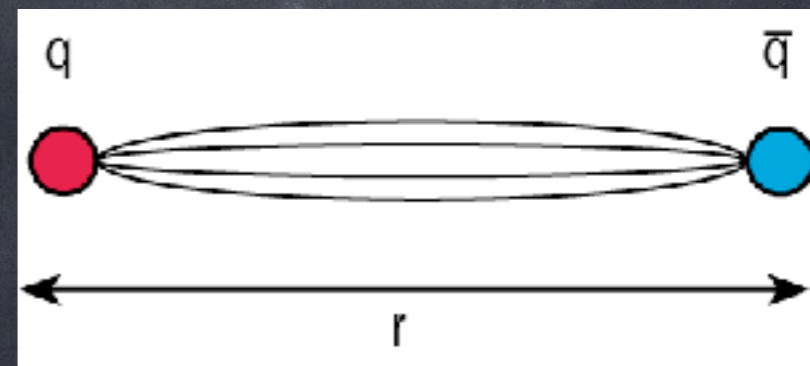
- Voima jolla kaksi sähkövarausta vetää toisiaan puoleensa

- $F = q_1 q_2 / r^2$

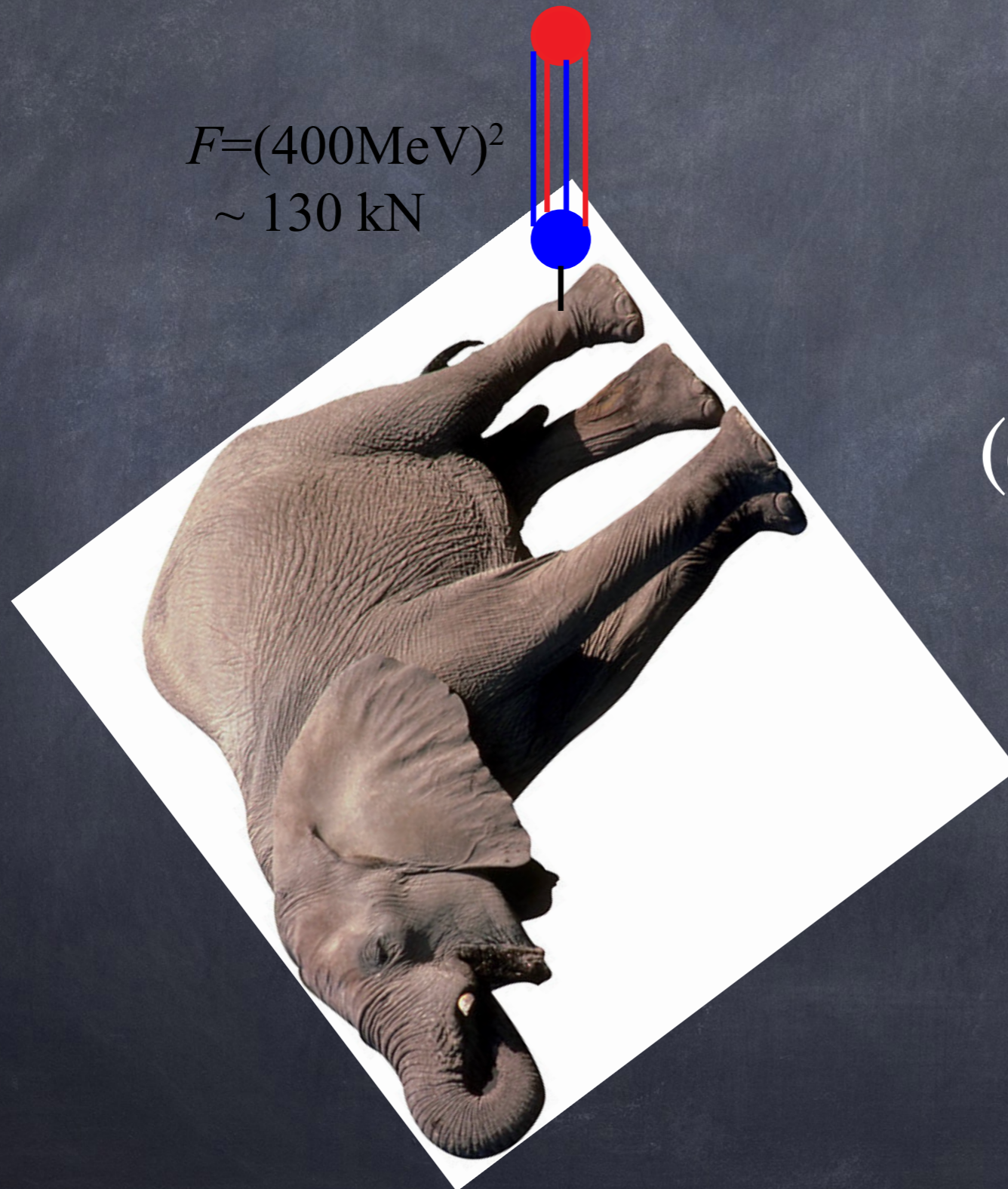


- Voima jolla kaksi värivarausta vetää toisiaan puoleensa on vakio (pitkällä matkalla)

- $F = (400 \text{ MeV})^2$



Niin siis kuinka paljon?

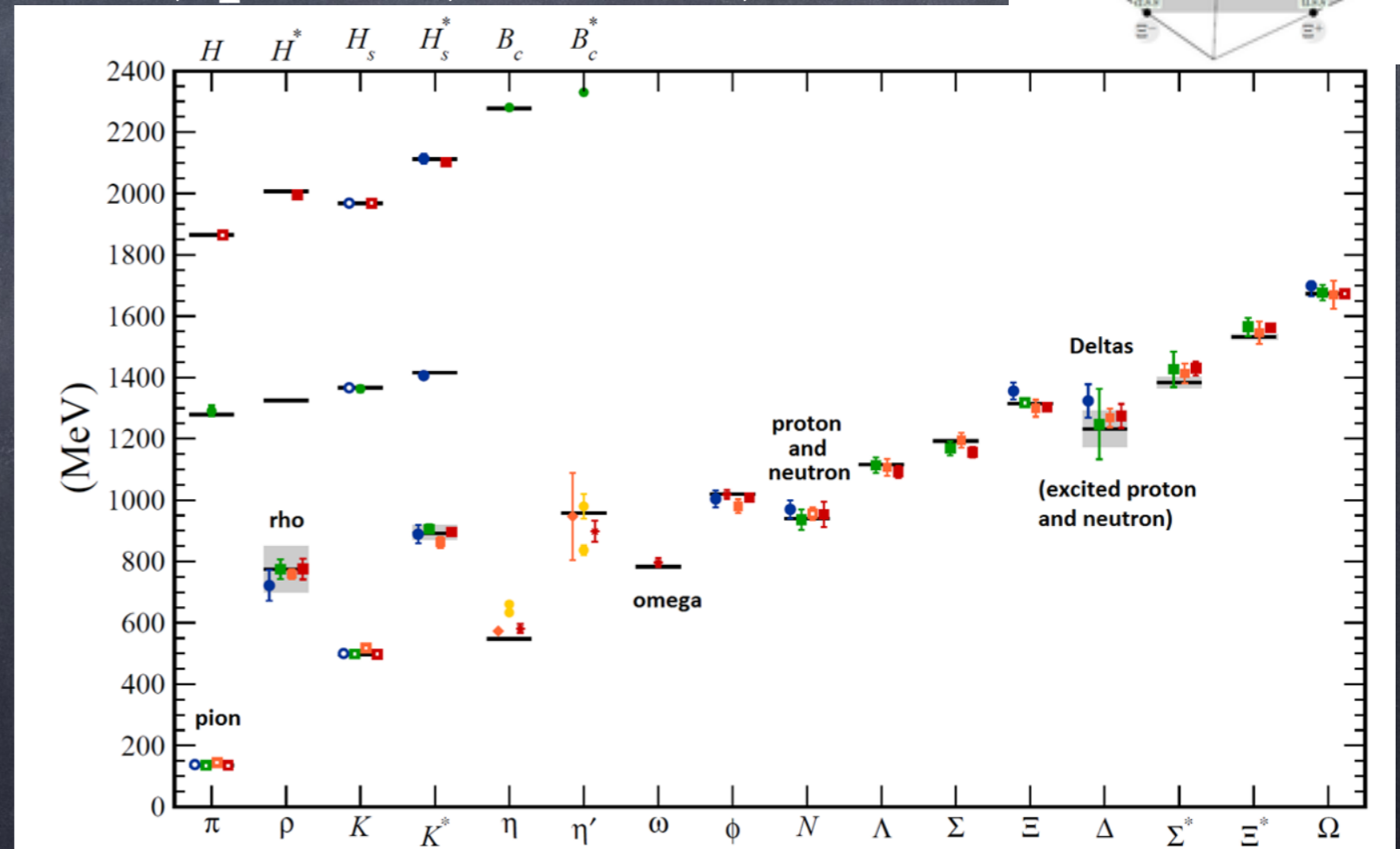
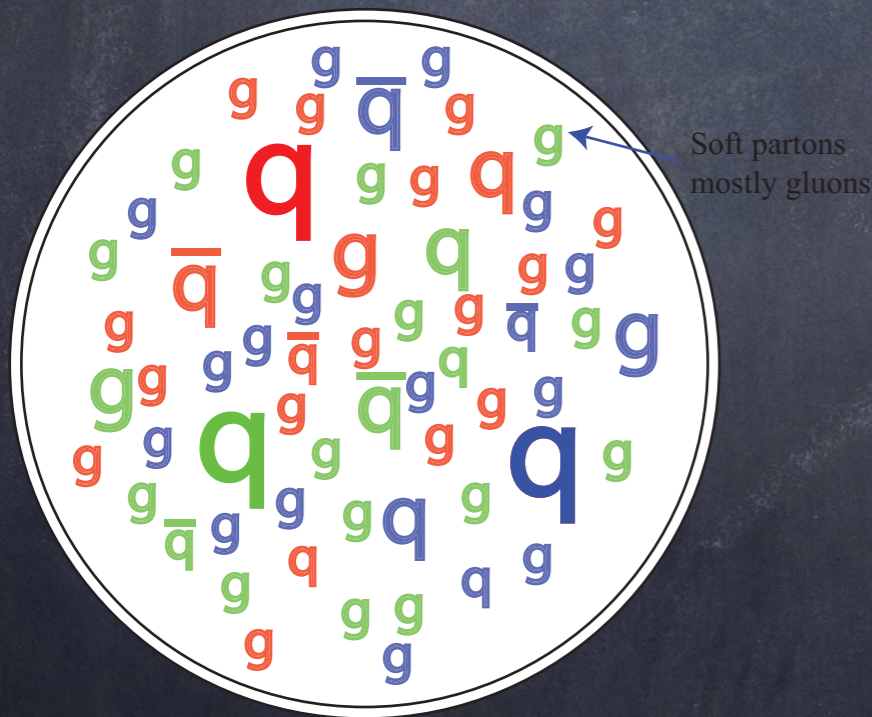
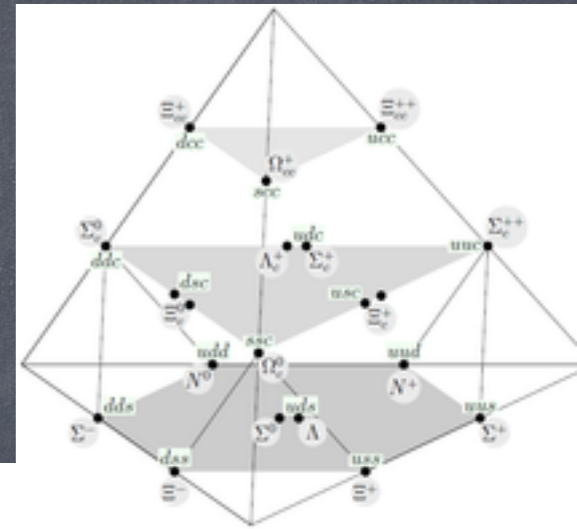


$$F=(400\text{MeV})^2$$
$$\sim 130 \text{ kN}$$

Väri vankeus
(color confinement)

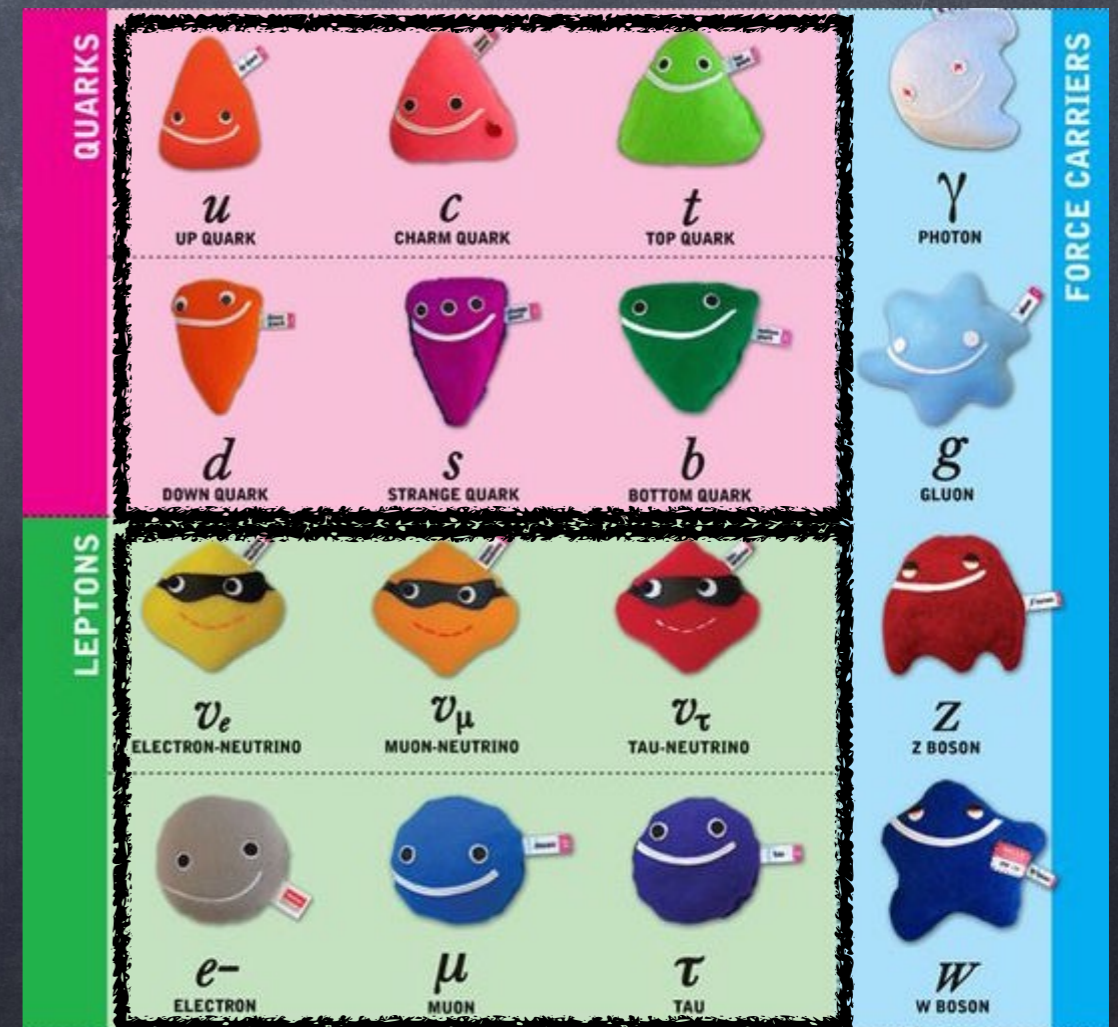
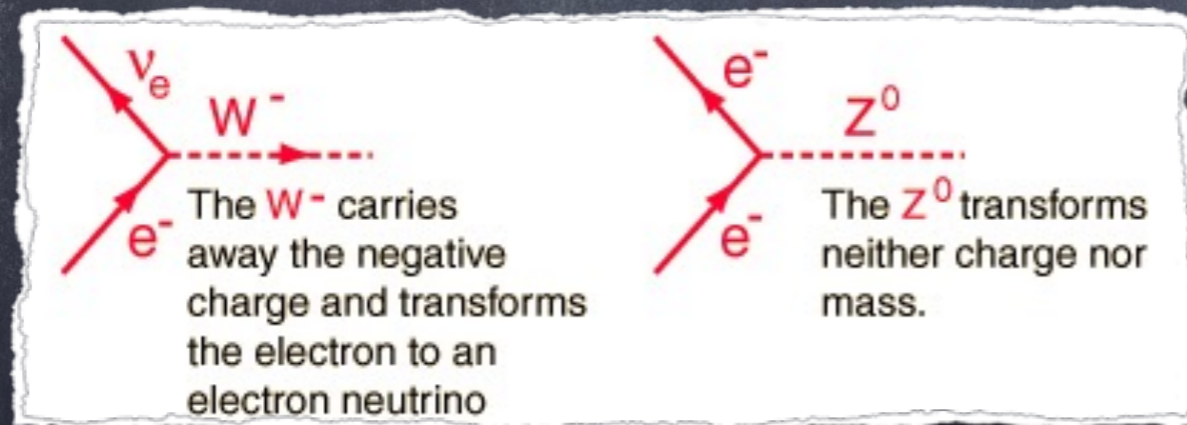
Standardimallin gluonit

- Väri- ja makuvariankeuden takia kvarkit ja gluonit pysyvästi sidottu värineutraaleihin möykkyyihin: Protonit, Neutronit, pionit, kaonit,...



Heikko vuorovaikutus

- Mukana radioaktiivisessa hajoamisessa
- Välittäjäbosonit: $W(+,-)$ ja Z
- W :n erikoisuus: vaihtaa **väsenkätisen** hiukkasen toiseksi



Miksi heikkovuorovaikutus on “heikko”?

- Välittäjäbosonit ovat raskaita
→ kantama on todella lyhyt

$$m_e = 0,0005 \text{ GeV}$$

91 GeV

80 GeV



Miksi heikkovuorovaikutus on “heikko”?

- Välittäjäbosonit ovat raskaita
→ kantama on todella lyhyt

$$m_e = 0,0005 \text{ GeV}$$

91 GeV

80 GeV



Nobelian arvoinen ongelma:

Jos gluoni ja fotoni ovat massattomia,
miksi W ja Z ovat painavia?

Miksi heikkovuorovaikutus on "heikko"?

- Välittäjäbosonit ovat raskaita
→ kantama on todella lyhyt

$$m_e = 0,0005 \text{ GeV}$$

91 GeV

80 GeV



Nobelin arvoinen ongelma:

Jos gluoni ja fotonit ovat massattomia,
miksi W ja Z ovat painavia?

Nobelin sai Higgs & Englert.....

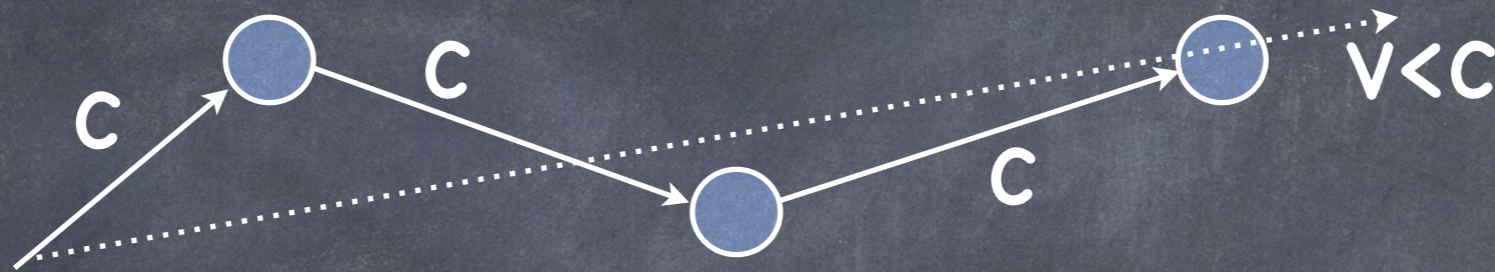
Löydä Higgs



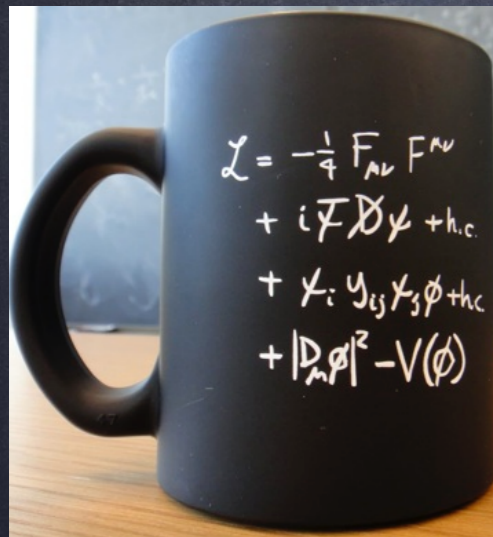
Löydä Higgs



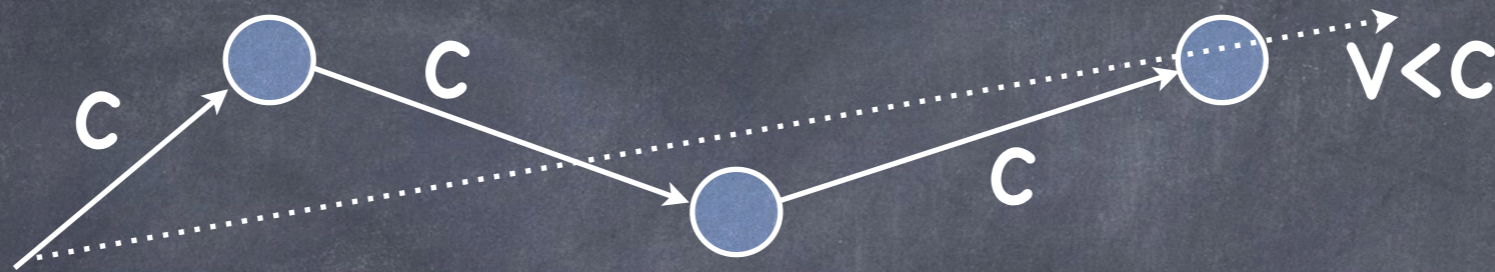
Higgsin mekanismi



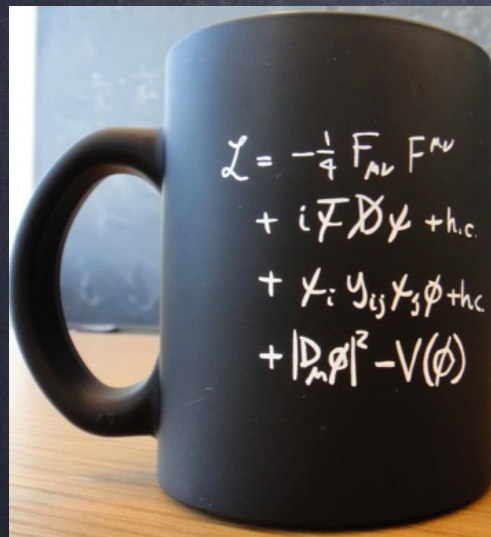
- Kun valo etenee väliaineessa, sen nopeus on pienempi kuin c . Siroaa kuin pingispallo.
- Higgs et al. ajattelivat että ehkä tyhjiö ei olekaan tyhjä, vaan sen täyttää “Higgsin kenttä”
- Jotkut hiukkaset hidastuvat Higgsin kentässä enemmän kuin toiset
→ *mitä enemmän hidastuu, sitä raskaampi*
- Higgsin kentän värähtelyt = Higgsin hiukkanen



Higgsin mekanismi



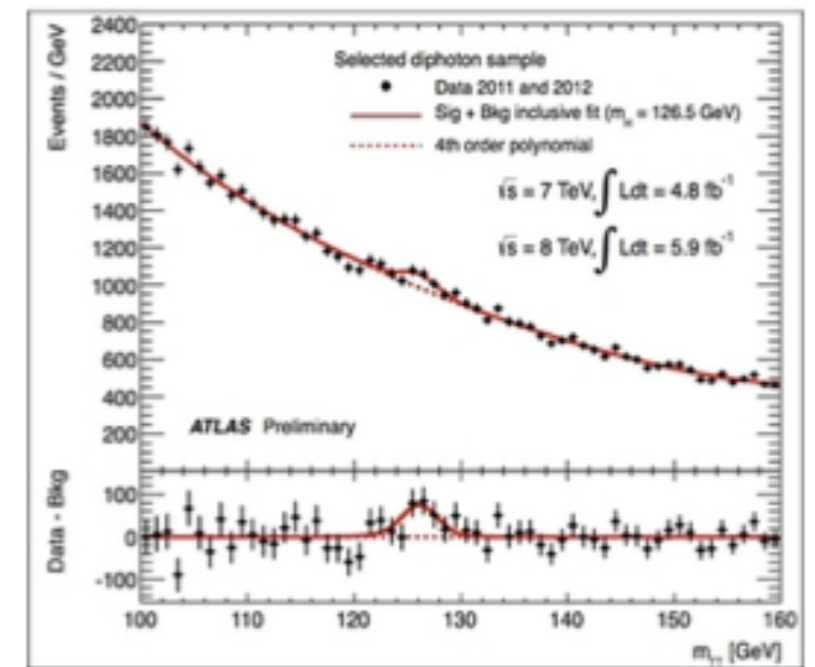
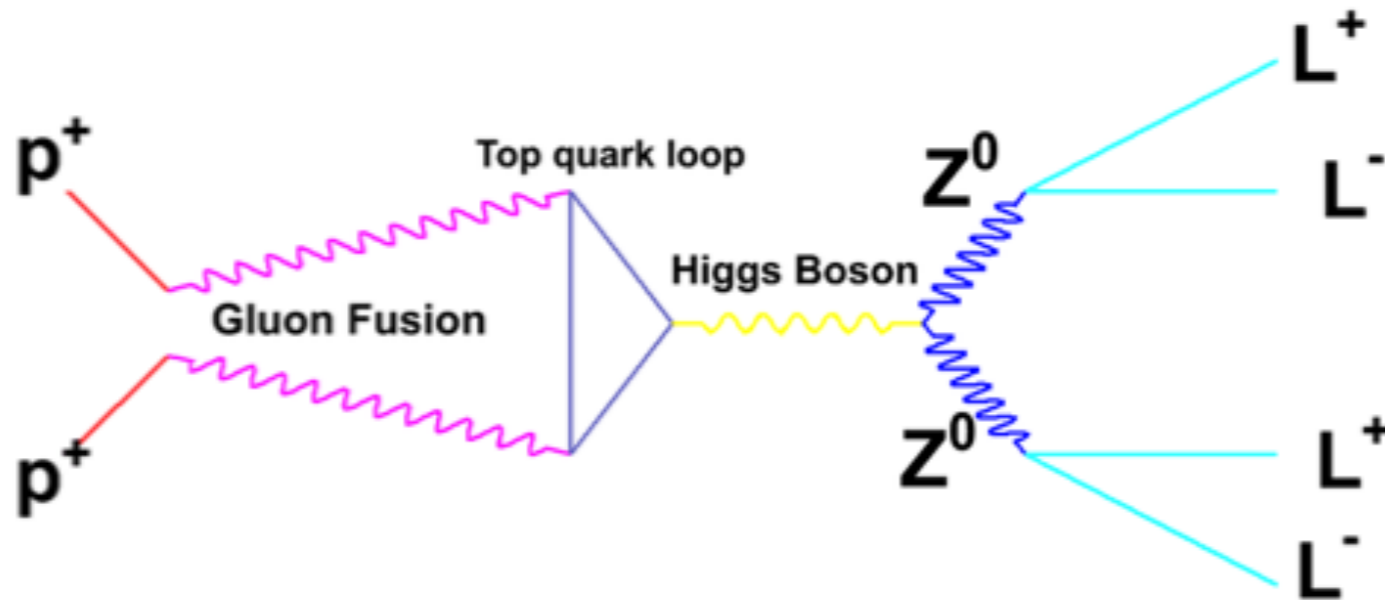
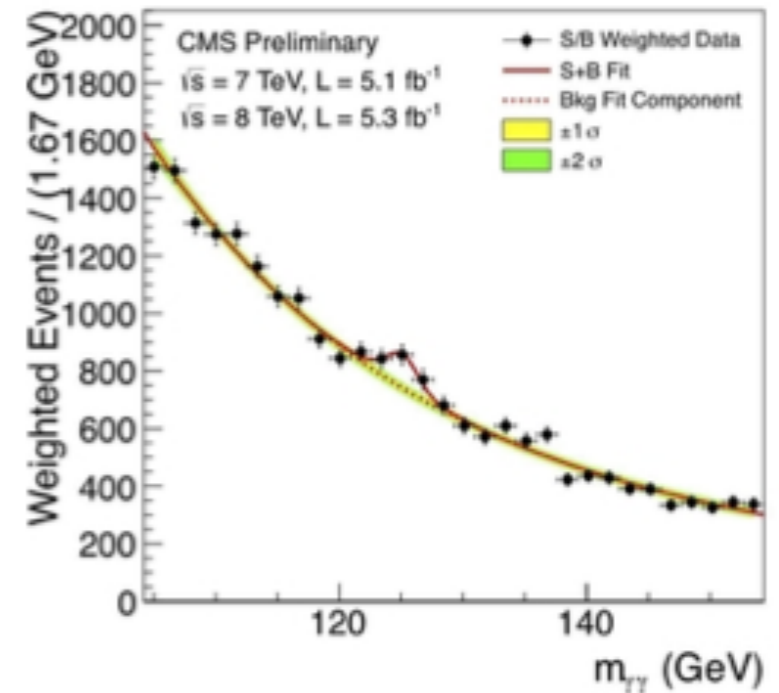
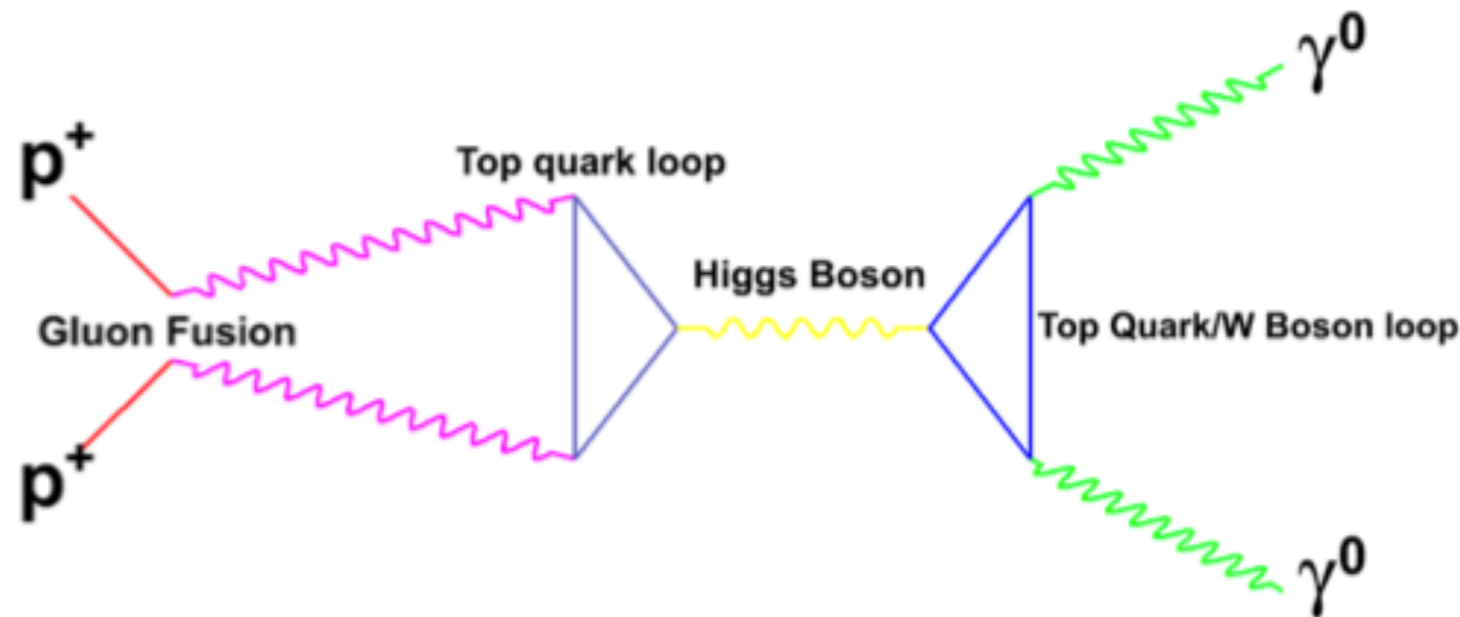
- Kun valo etenee väliaineessa, sen nopeus on pienempi kuin c . Siroaa kuin pingispallo.
- Higgs et al. ajattelivat että ehkä tyhjiö ei olekaan tyhjä, vaan sen täyttää “Higgsin kenttä”
- Jotkut hiukkaset hidastuvat Higgsin kentässä enemmän kuin toiset
→ *mitä enemmän hidastuu, sitä raskaampi*
- Higgsin kentän värähtelyt = Higgsin hiukkanen



Jos Higgsin bosoni havaitaan,
teoria Higgsin kentästä on oikein!

Higgsin bosonin kokeellinen löytö 2011

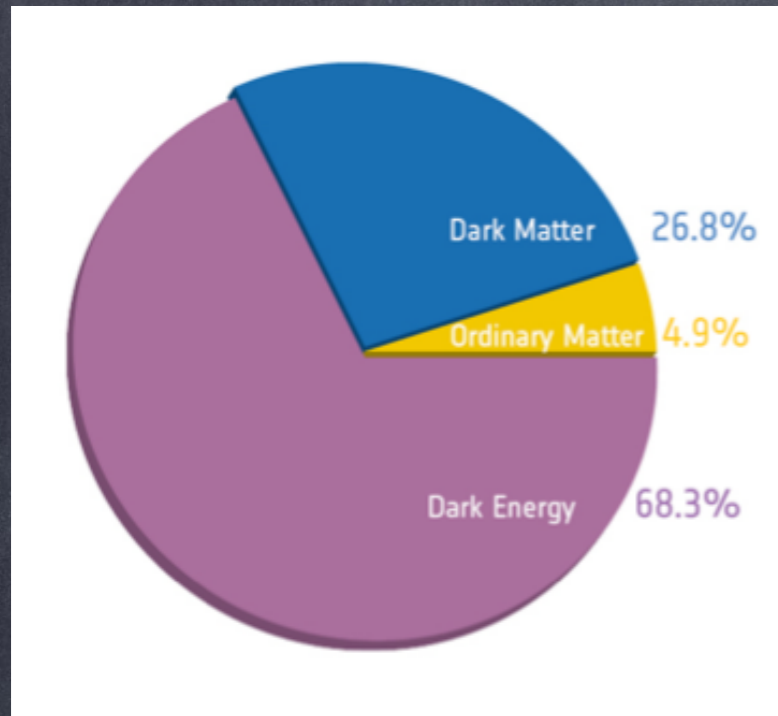
$m = 125 \text{ GeV}$



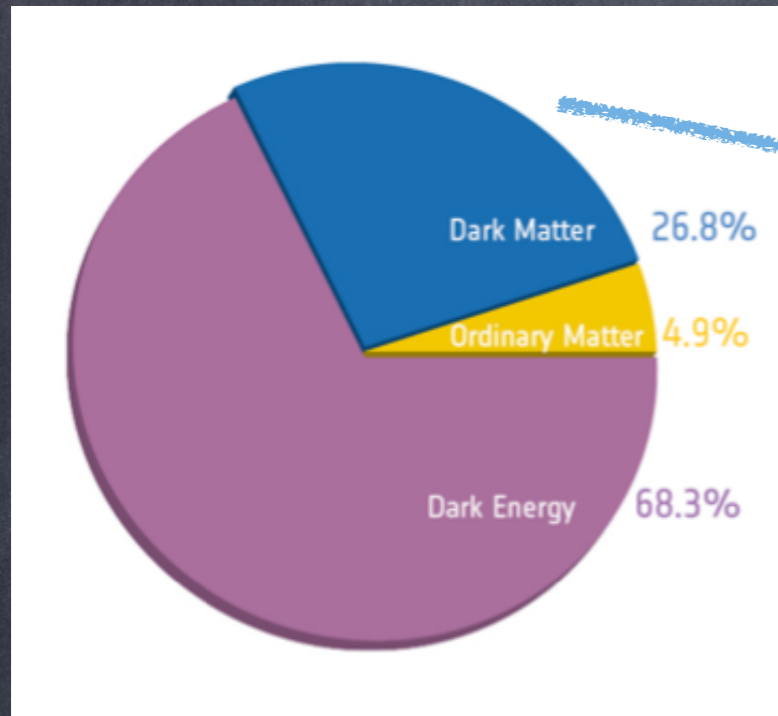
Maailma ja ymmärrys on valmis, lähdetään kahville!

...vai unohtuiko muutama juttu?

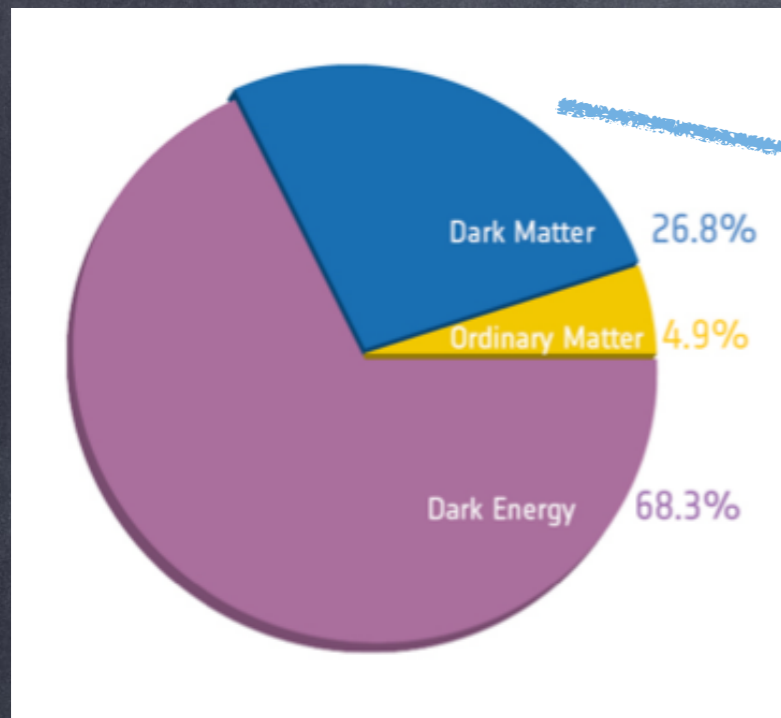
Mikä tai ketkä tippui kelkasta?



Mikä tai ketkä tippui kelkasta?



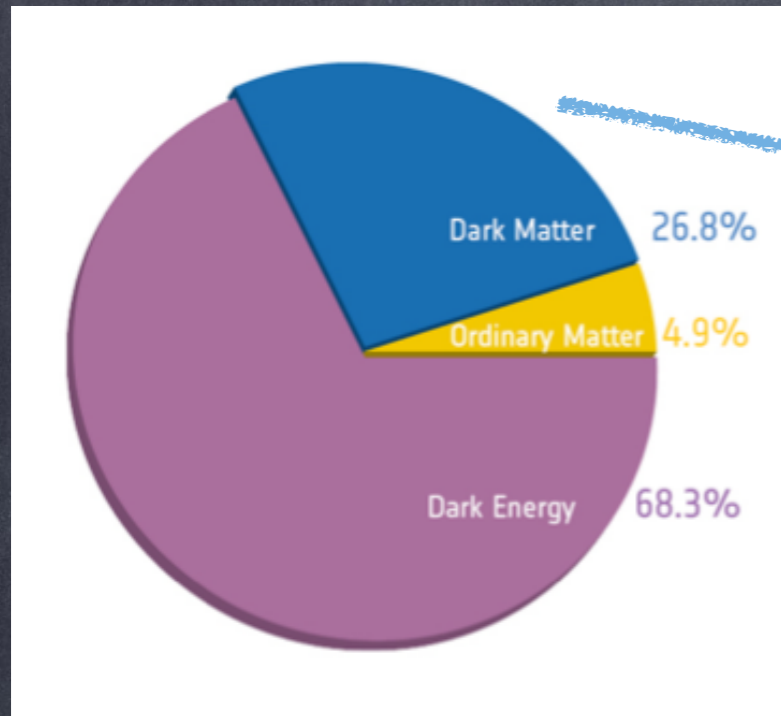
Mikä tai ketkä tippui kelkasta?



Kuka dumppasi gravitaation?
Missä on gravitoni?



Mikä tai ketkä tippui kelkasta?

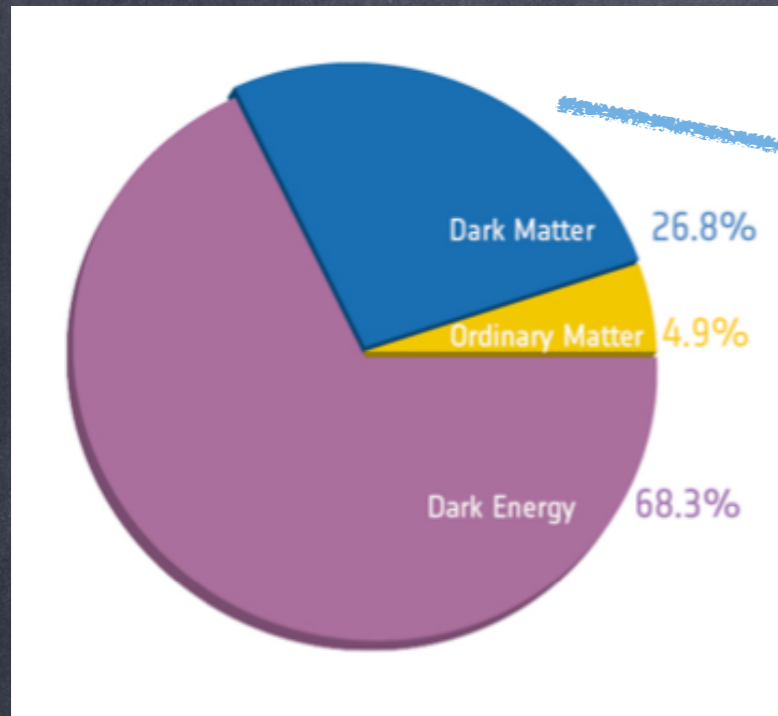


Kuka dumppasi gravitaation?
Missä on gravitoni?



Mistä muodostuu "jaksollisen järjestelmän rakenne"?

Mikä tai ketkä tippui kelkasta?



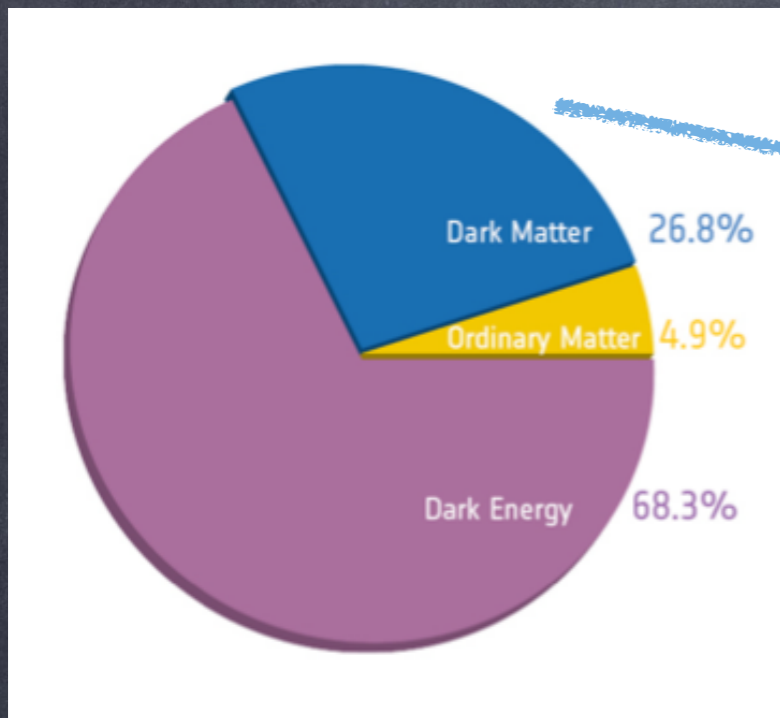
Kuka dumppasi gravitaation?
Missä on gravitoni?



Mistä muodostuu "jaksollisen järjestelmän rakenne"?

Miksi ainetta enemmän kuin anti-ainetta? Baryogenesis

Mikä tai ketkä tippui kelkasta?



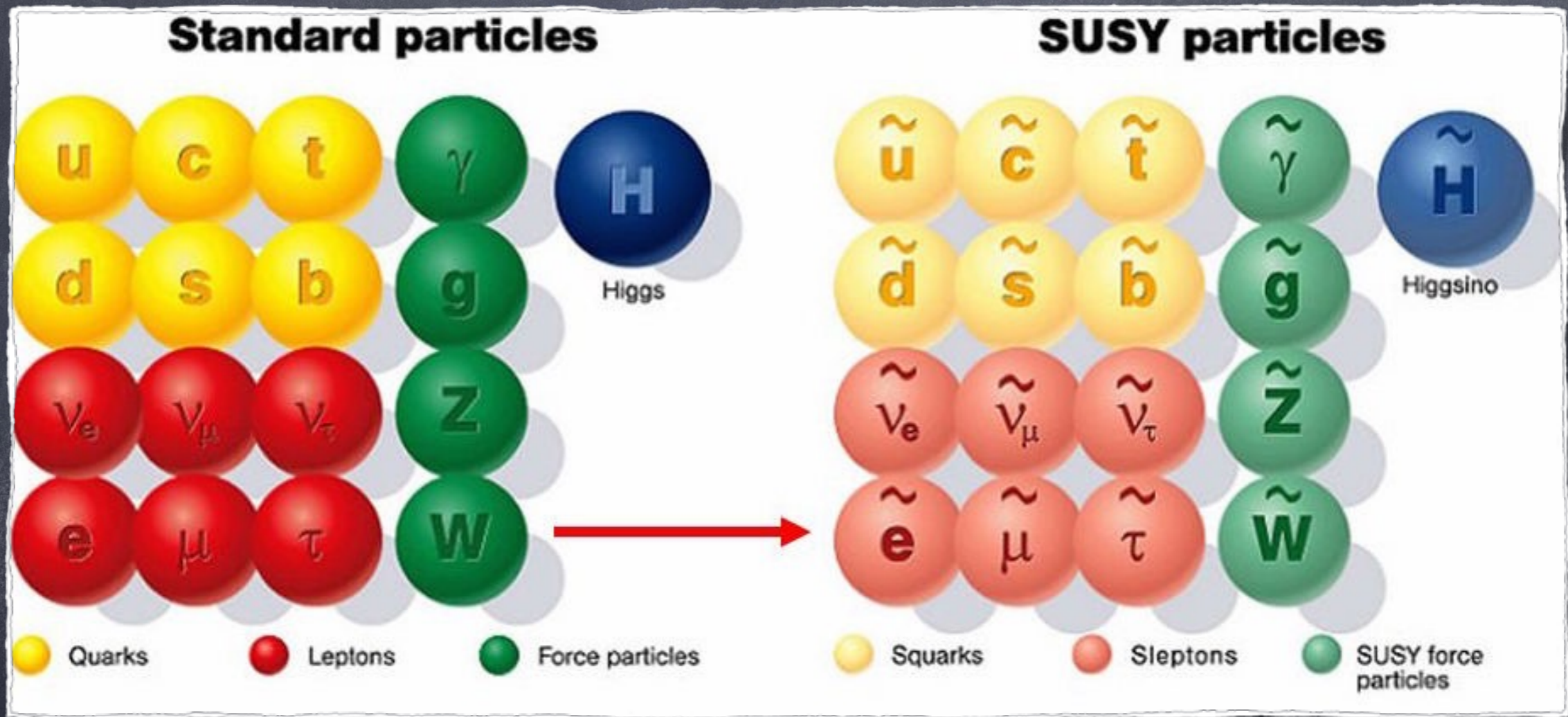
Kuka d... gravitaation?
... on gravitoni?

Miksi Higgsin bosoni on niin kevyt... tai niin raskas?



Miksi ainetta enemmän kuin anti-ainetta? Baryogenesis

Eräs ratkaisu: supersymmetria (SUSY)



- Selittää Higgsin kevyen massan
- Sisältää pimeän aineen kandidaatin
- Kuvaa, miksi ainetta on enemmän kuin anti-ainetta

Mutta onko mikään täydellistä?

SUSY ei myöskään sisällä gravitaatiota...

Mutta onko mikään täydellistä?

SUSY ei myöskään sisällä gravitaatiota...

...eikä sitä ole vielääkään havaittu!

Etsimmekö väärästä paikasta, vai onko teoria väärin?

Yhteenveto

- Hiukkaset ovat **kvanttikentän** värähdyksiä
- Johtava teoria: epätäydellinen standardimalli
- Standardimallin ongelmia ratkaistaan monimutkaisemmilla teorioilla (SUSY)
- Teoriat joko tapetaan tai vahvistetaan kokeellisin menetelmin
- **Elämme jännittäviä aikoja:**
LHC voi muuttaa kuvion kokonaan