

Mahtuuko kaikkeus liitutaalulle?

Teoreettinen näkökulma hiukkasfysiikkaan

Jaana Heikkilä

CERN - 2024

Yksi esimerkki hiukkasfysiikan urapolusta...





1991: Synnyin Raahessa





1991: Synnyin Raahessa

2007-2010: Lukio-opinnot
Madetojan musiikkilukiassa

2010: Fysiikan opiskelu alkaa Oulun yliopistossa

2011: Ensimmäinen vierailu CERNiin
Päätös: työskentelen CERNiissä vielä jokin päivä!



Matka CERNiin

1991: Synnyin Raahessa

2007-2010: Lukio-opinnot
Madetojan musiikkilukiassa

2010: Fysiikan opiskelu alkaa Oulun yliopistossa

2011: Ensimmäinen vierailu CERNiin
Päätös: työskentelen CERNiissä vielä jokin päivä!

2012: Higgsin bosoni havaitaan
"Mikä ihme on Higgsin bosoni?!"





1991: Synnyin Raahessa

2007-2010: Lukio-opinnot
Madetojan musiikkilukiossa

2010: Fysiikan opiskelu alkaa Oulun yliopistossa

2011: Ensimmäinen vierailu CERNiin
Päätös: työskentelen CERNissä vielä jokin päivä!

2010-2013: Filosofian kandidaatin
tutkinto, Oulun yliopisto

Pääaineena fysiikka,

tutkielman aihe "Higgsin mekanismi"

Työskentelin neutriinokokeessa Pyhäsalmen kaivoksella (2012)

→ Miten pääsisin CERNiin töihin?





Matka CERNiin

1991: Synnyin Raahessa

2007-2010: Lukio-opinnot
Madetojan musiikkilukiossa

2010-2013: Filosofian kandidaatin
tutkinto, Oulun yliopisto

Pääaineena fysiikka,
tutkielman aihe "Higgsin mekanismi"
Työskentelin neutriinokokeessa Pyhäsalmen kaivoksella (2012)
→ Miten pääsisin CERNiin töihin?

2010: Fysiikan opiskelu alkaa Oulun yliopistossa

2011: Ensimmäinen vierailu CERNiin
Päätös: työskentelen CERNissä vielä jokin päivä!

2013: CERNin kesäopiskelijana
tutkimassa vuonna 2012 löydetyn
Higgsin bosonin ominaisuuksia
→ Johtuuko havaittu signaali yhdestä vai
useammasta uudesta hiukkasesta?!*
(Spoiler alert:
Ei viitteitä monesta hiukkasesta...)





1991: Synnyin Raahessa

2007-2010: Lukio-opinnot
Madetojan musiikkilukiossa

**2010-2013: Filosofian kandidaatin
tutkinto, Oulun yliopisto**

Pääaineena fysiikka,
tutkielman aihe "Higgsin mekanismi"
Työskentelin neutriinokokeessa Pyhäsalmen kaivoksella (2012)
→ Miten pääsisin CERNiin töihin?

**2013-2015: Filosofian maisterin
tutkinto, Helsingin yliopisto**

Pääaineena hiukkasfysiikka
Gradu perustui kesäopiskelijana tehtyyn projektiin

2010: Fysiikan opiskelu alkaa Oulun yliopistossa

2011: Ensimmäinen vierailu CERNiin
Päätös: työskentelen CERNissä vielä jokin päivä!

**2013: CERNin kesäopiskelijana
tutkimassa vuonna 2012 löydetyn
Higgsin bosonin ominaisuuksia**
→ Johtuuko havaittu signaali yhdestä vai
useammasta uudesta hiukkasesta?!*
(Spoiler alert:
Ei viitteitä monesta hiukkasesta...)

Olisi kiva tietää lisää... pitäisköhän tehdä väikkäri?



1991: Synnyin Raahessa

2007-2010: Lukio-opinnot
Madetojan musiikkilukiassa

**2010-2013: Filosofian kandidaatin
tutkinto, Oulun yliopisto**

Pääaineena fysiikka,
tutkielman aihe "Higgsin mekanismi"
Työskentelin neutriinokokeessa Pyhäsalmen kaivoksella (2012)
→ Miten pääsisin CERNiin töihin?

**2013-2015: Filosofian maisterin
tutkinto, Helsingin yliopisto**

Pääaineena hiukkasfysiikka
Gradu perustui kesäopiskelijana tehtyyn projektiin

2010: Fysiikan opiskelu alkaa Oulun yliopistossa

2011: Ensimmäinen vierailu CERNiin

Päätös: työskentelen CERNissä vielä jokin päivä!

**2013: CERNin kesäopiskelijana
tutkimassa vuonna 2012 löydetyn
Higgsin bosonin ominaisuuksia**

→ Johtuuko havaittu signaali yhdestä vai
useammasta uudesta hiukkasesta?!*
(Spoiler alert:
Ei viitteitä monesta hiukkasesta...)

**2015-2019: Filosofian tohtorin tutkinto,
Helsingin yliopisto**

Pääaineena jälleen hiukkasfysiikka
Väitöskirjaa varten etsin uusia Higgsin bosoneita, ja
työskentelin CMS-kokeen liipaisinjärjestelmän
(trigger) parissa



1991: Synnyin Raahessa

2007-2010: Lukio-opinnot
Madetojan musiikkilukiossa

**2010-2013: Filosofian kandidaatin
tutkinto, Oulun yliopisto**

Pääaineena fysiikka,
tutkielman aihe "Higgsin mekanismi"
Työskentelin neutriinokokeessa Pyhäsalmen kaivoksella (2012)
→ Miten pääsisin CERNiin töihin?

**2013-2015: Filosofian maisterin
tutkinto, Helsingin yliopisto**

Pääaineena hiukkasfysiikka
Gradu perustui kesäopiskelijana tehtyyn projektiin

**2019-2023 : Post doc -tutkijana
Zürichin yliopistossa**

Etsin supersymmetrian ennustamia
hiukkasia ja työskentelen edelleen
liipaisinjärjestelmän parissa

2010: Fysiikan opiskelu alkaa Oulun yliopistossa

2011: Ensimmäinen vierailu CERNiin

Päätös: työskentelen CERNissä vielä jokin päivä!

**2013: CERNin kesäopiskelijana
tutkimassa vuonna 2012 löydetyn
Higgsin bosonin ominaisuuksia**

→ Johtuuko havaittu signaali yhdestä vai
useammasta uudesta hiukkasesta?!*
(Spoiler alert:
Ei viitteitä monesta hiukkasesta...)

**2015-2019: Filosofian tohtorin tutkinto,
Helsingin yliopisto**

Pääaineena jälleen hiukkasfysiikka
Väitöskirjaa varten etsin uusia Higgsin bosoneita, ja
työskentelin CMS-kokeen liipaisinjärjestelmän
(trigger) parissa

2024- : CERN Senior Research Fellow

Hiukkasfysiikan tarkoituksena on muun muassa ymmärtää

Hiukkasfysiikan tarkoituksena on muun muassa ymmärtää

- mistä kaikkeus koostuu? (hiukkaseläintarha)

- miten kaikki sai alkunsa? (Big Bang)

- miksi olemme olemassa? (antimateria+materia=X?)

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

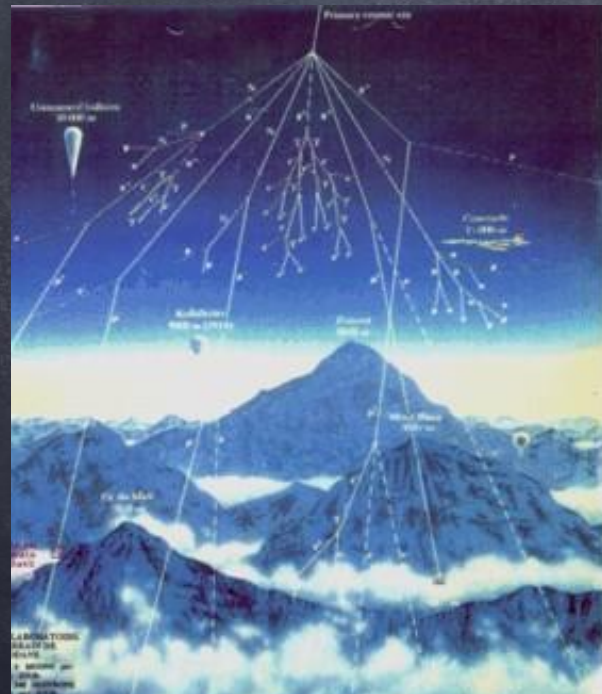
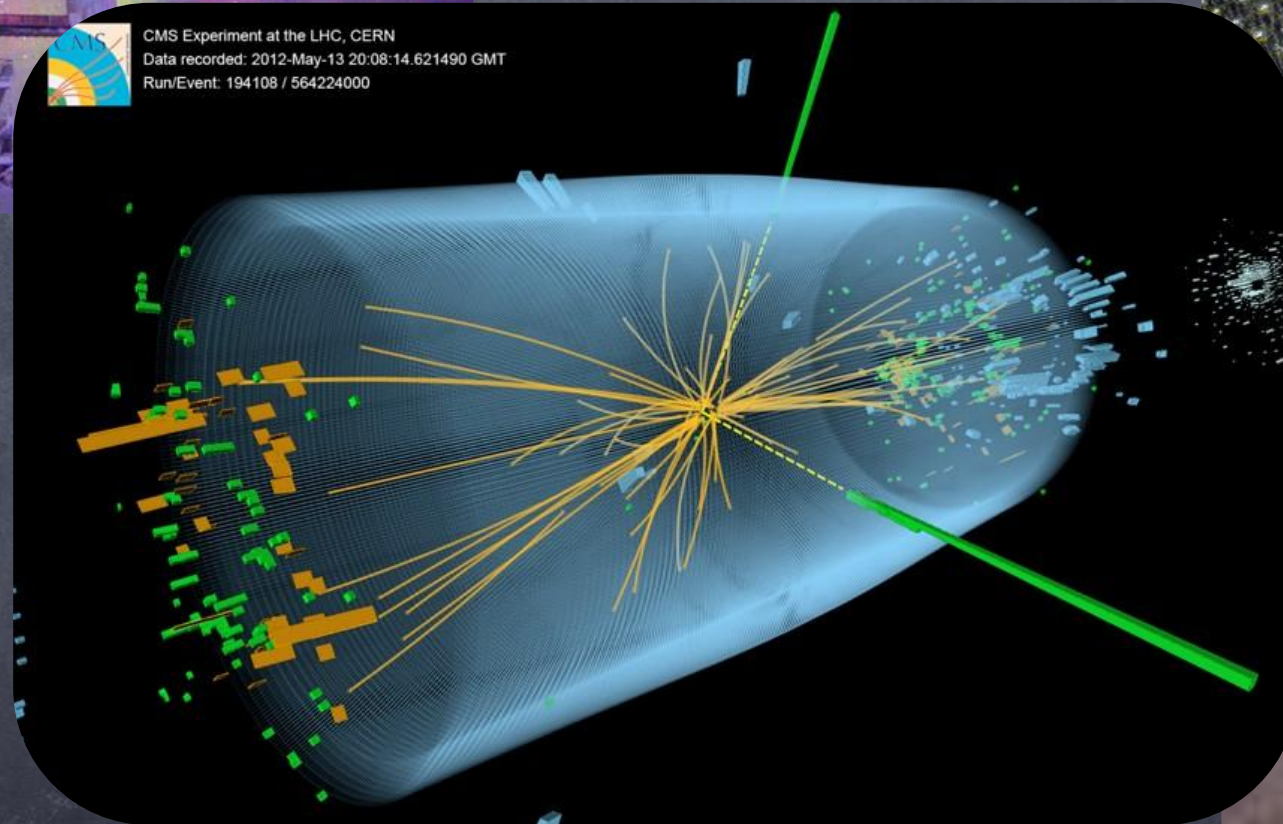
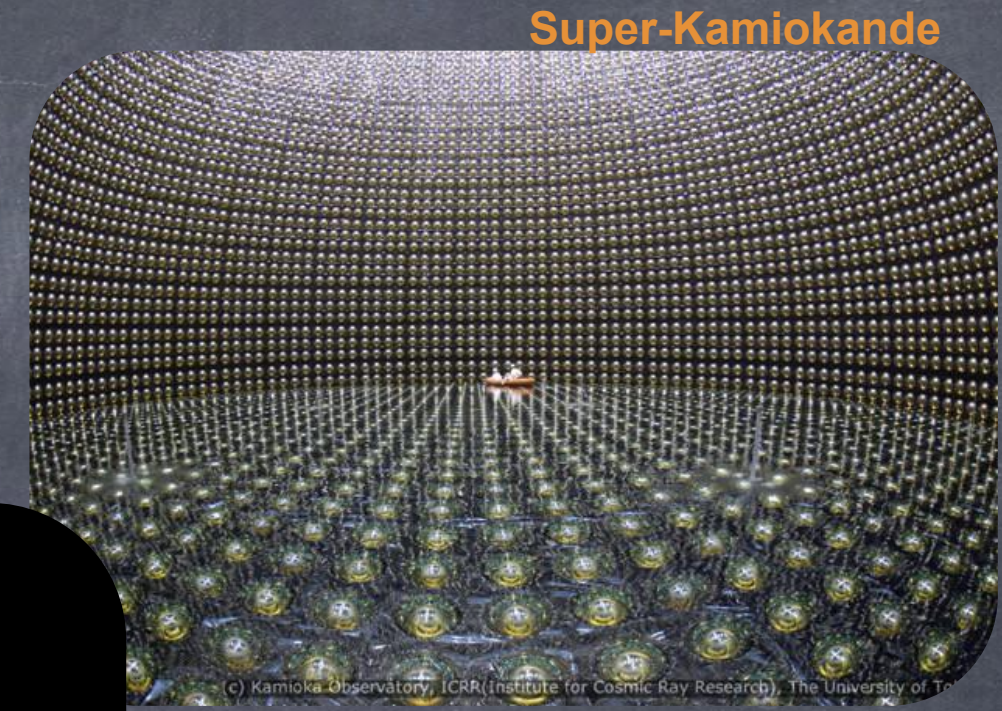
D. Joku muu, mikä?

“Teoria ei ole mitään ilman kokeellista vahvistusta!”

“Teoria ei ole mitään ilman kokeellista vahvistusta!”

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

Hiukkasfysiikan kokeita - jokaiselle jotakin!



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

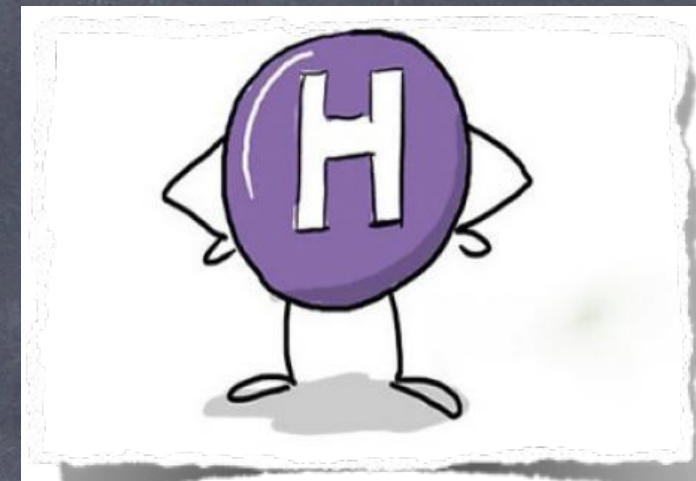
CMS-kokeen tavoitteet

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 alkeishiukkaset saavat massansa!



Rakennuspalikat eli alkeishiukkastarha



• Fermionit = “ainehiukkaset”

• kvarkit (6 kpl)

• leptonit (6 kpl)

• Bosonit = “voimavälittäjät”

• Higgsin hiukkanen (bosoni)

+



Mikä on hiukkanen?

Kvanttimekaniikka

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

Suppea suhteellisuusteoria

valonnopeus vakio
fysiikan lait nopeudesta riippumattomat



Werner Heisenberg

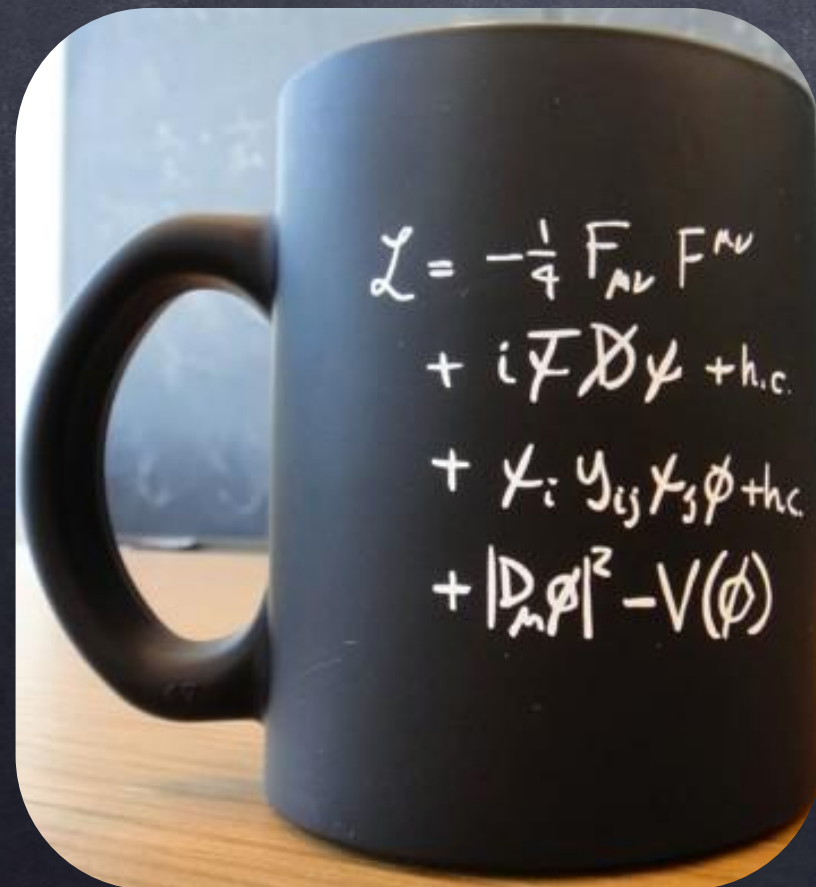


Albert Einstein

Kvanttikentäteoria

Hiukkanen \sim kenttä

Haaste: mitä nämä merkit tarkoittavat?!



Hiukkanen on kenttä, kenttä on hiukkanen

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



Fermionit (ainehiukkaset)

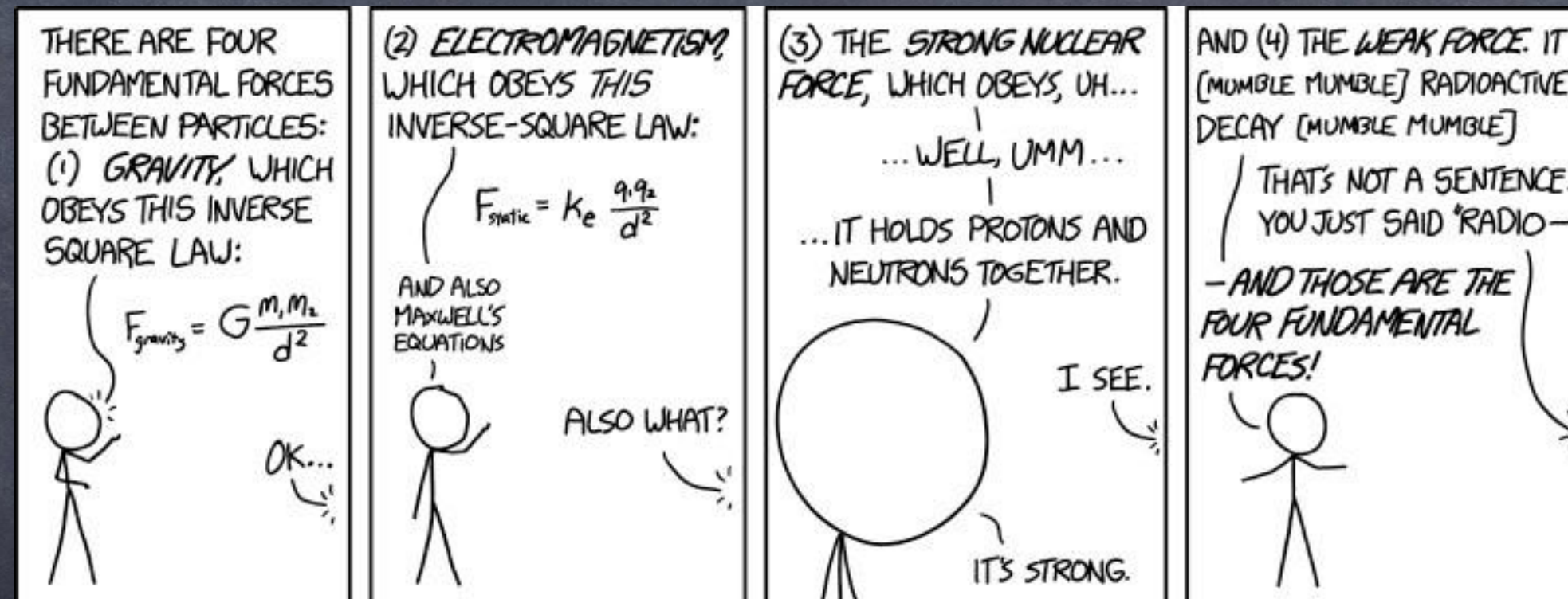
- Muodostavat kaiken tunnetun aineen
protoni = 2 ylös-kvarkkia + 1 alas-kvarkki
neutroni = 1 ylös-kvarkki + 2 alas-kvarkkia
- Fermioneilla spin on puoliluku
- Paulin kielto­sääntö:

Kahta täysin identtistä fermionia ei voi laittaa samaan kvanttitilaan

(identtisten fermionien aaltofunktion on oltava antisymmetrinen)

	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

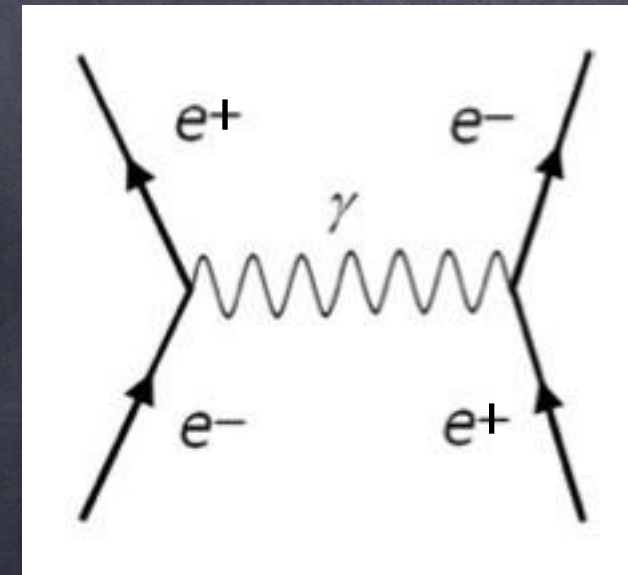
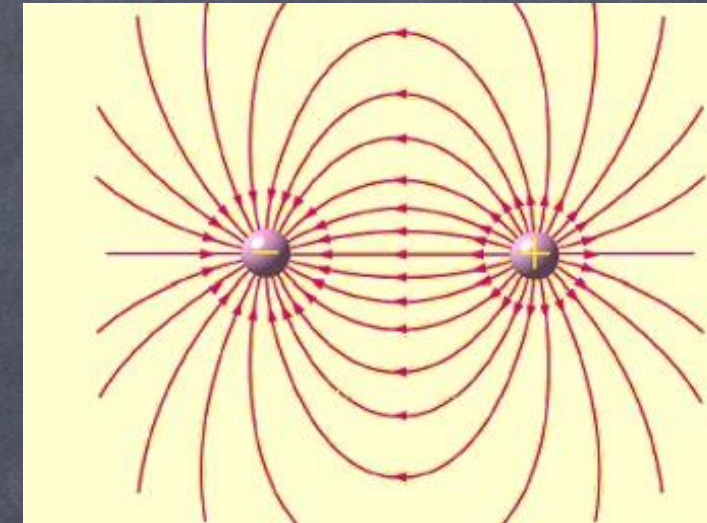


Neljä perusvuorovaikutusta

- 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



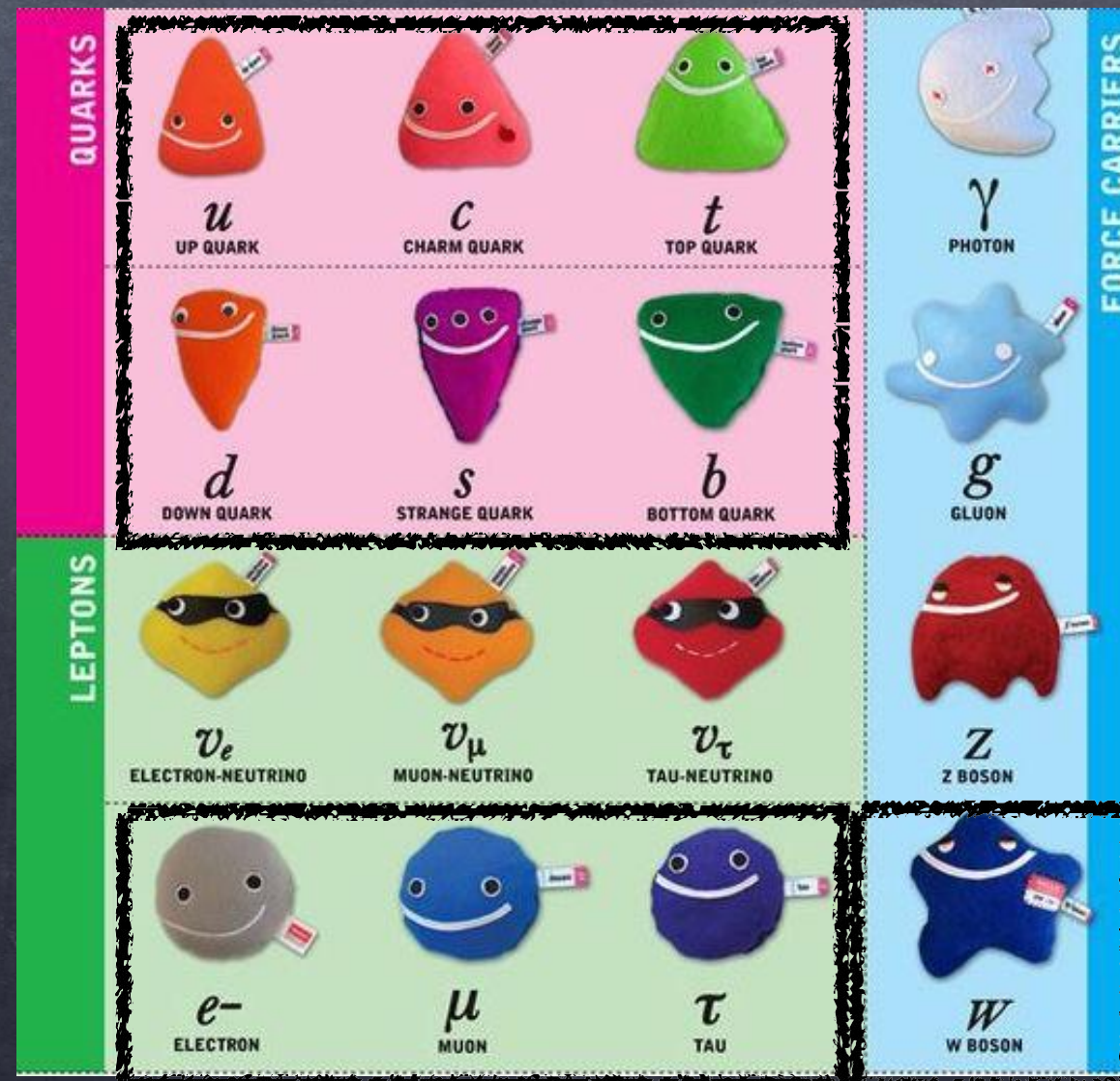
Sähkömagnetismi

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



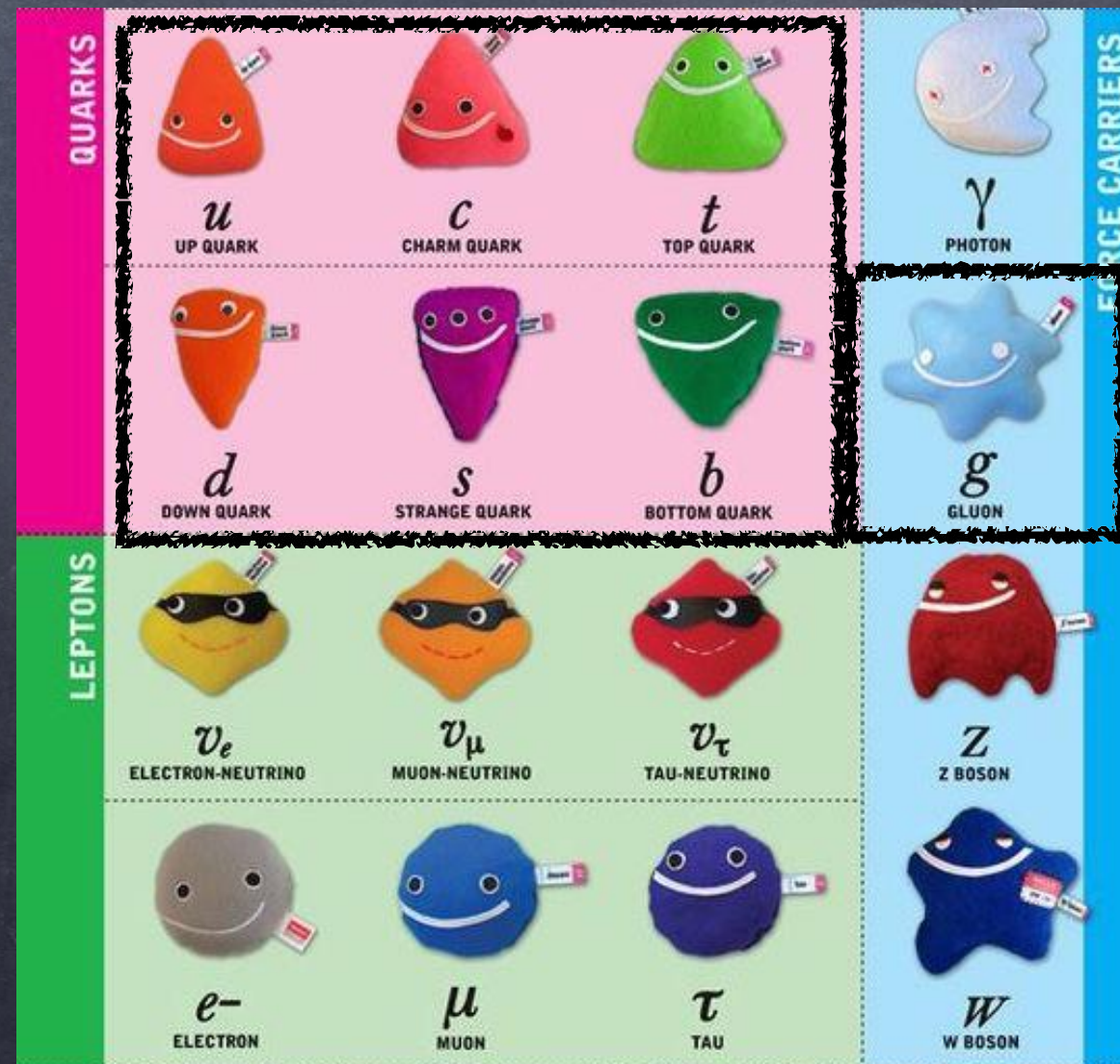
Sähkömagnetismi

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



Vahva vuorovaikutus

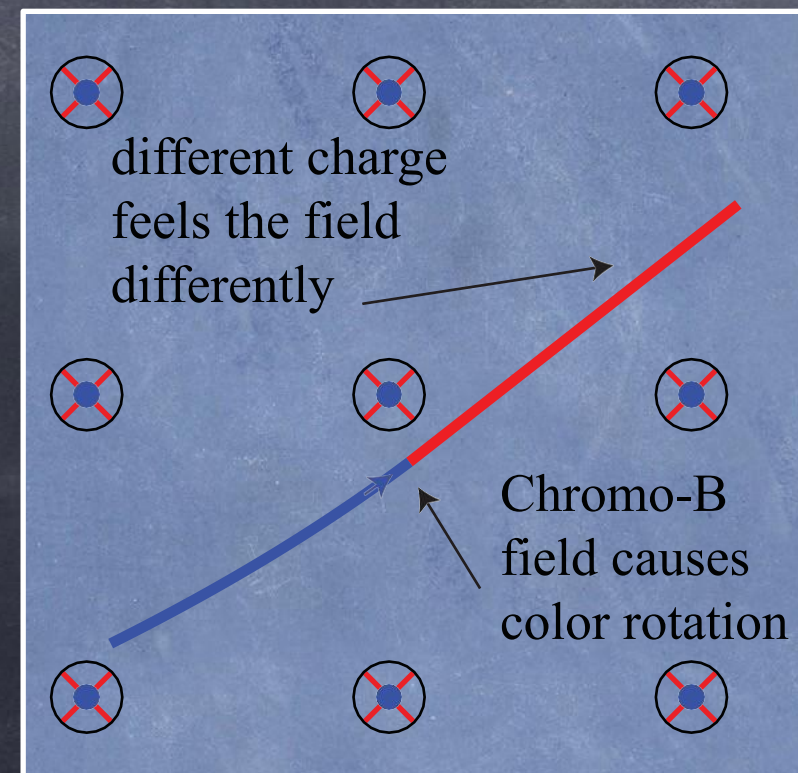
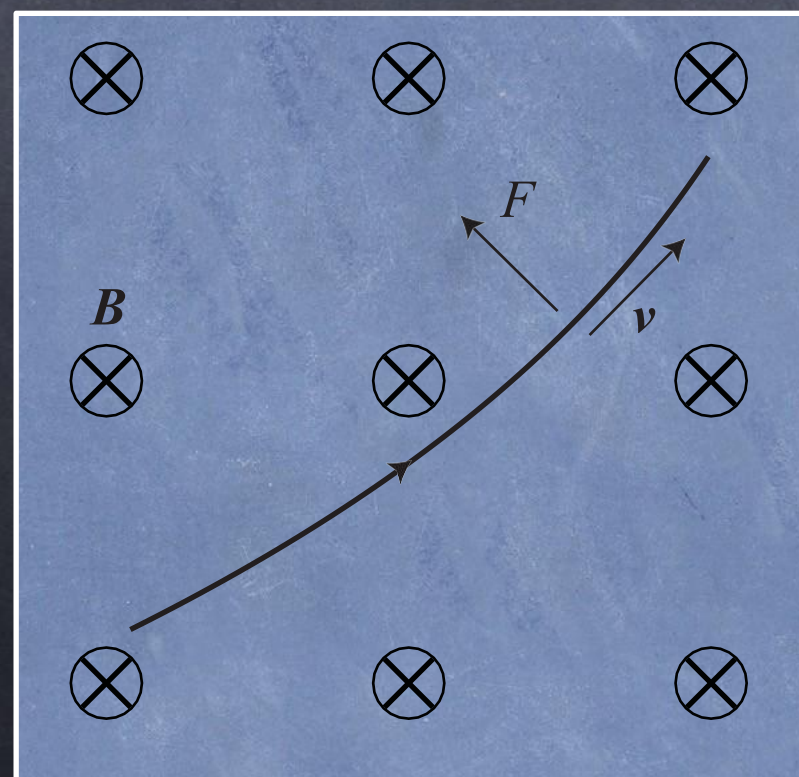
- Sitoo protonit yhteen
- Välittäjäbosoni: gluoni
- Kaikki **värivaratut** hiukkaset osallistuvat vv:hen



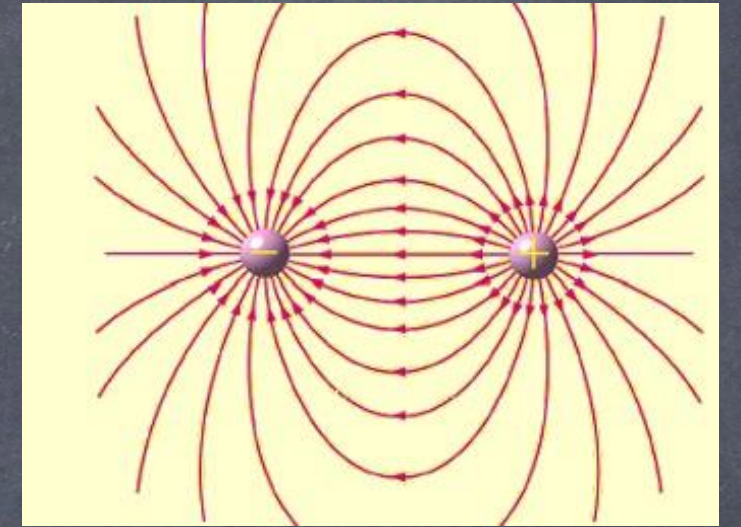
Vahva vuorovaikutus



- 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,...




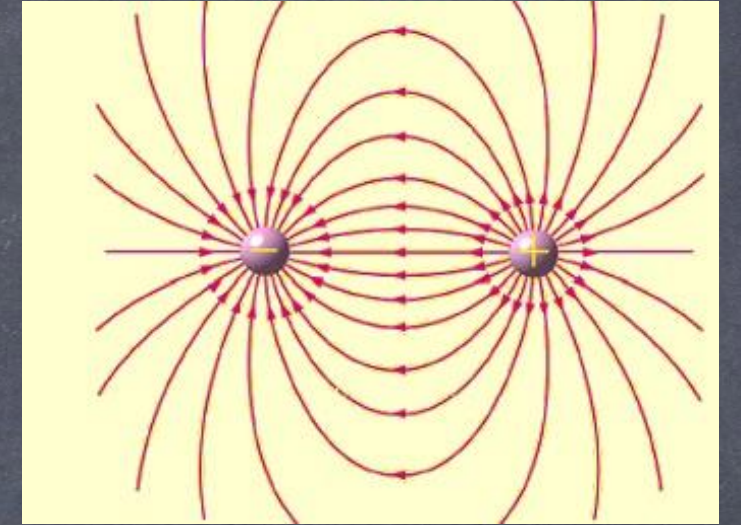
Standardimallin gluonit



Standardimallin gluonit

- Voima jolla kaksi sähkövarausta vetää toisiaan puoleensa

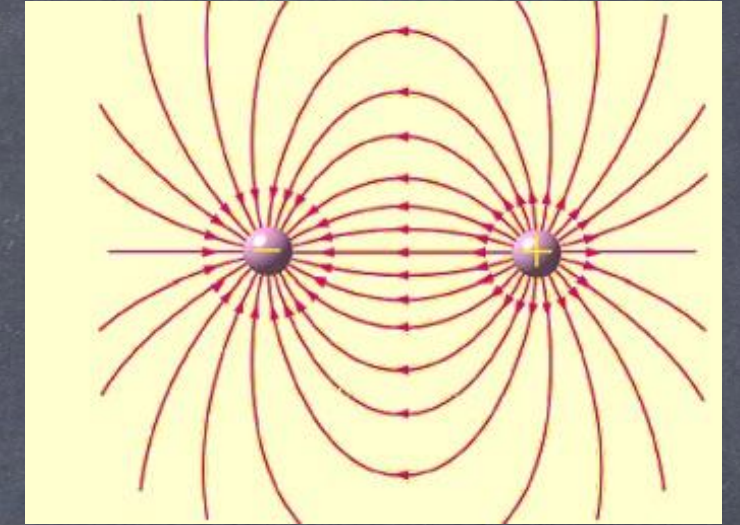
- $F = q_1 q_2 / r^2$ 



Standardimallin gluonit

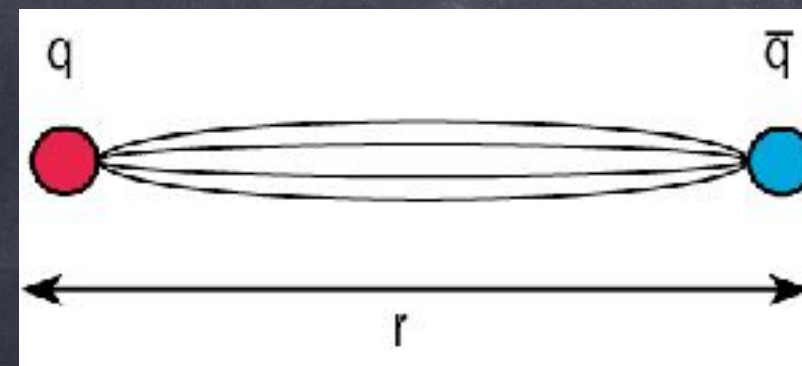
- Voima jolla kaksi sähkövarausta vetää toisiaan puoleensa

$$F = q_1 q_2 / r^2$$



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

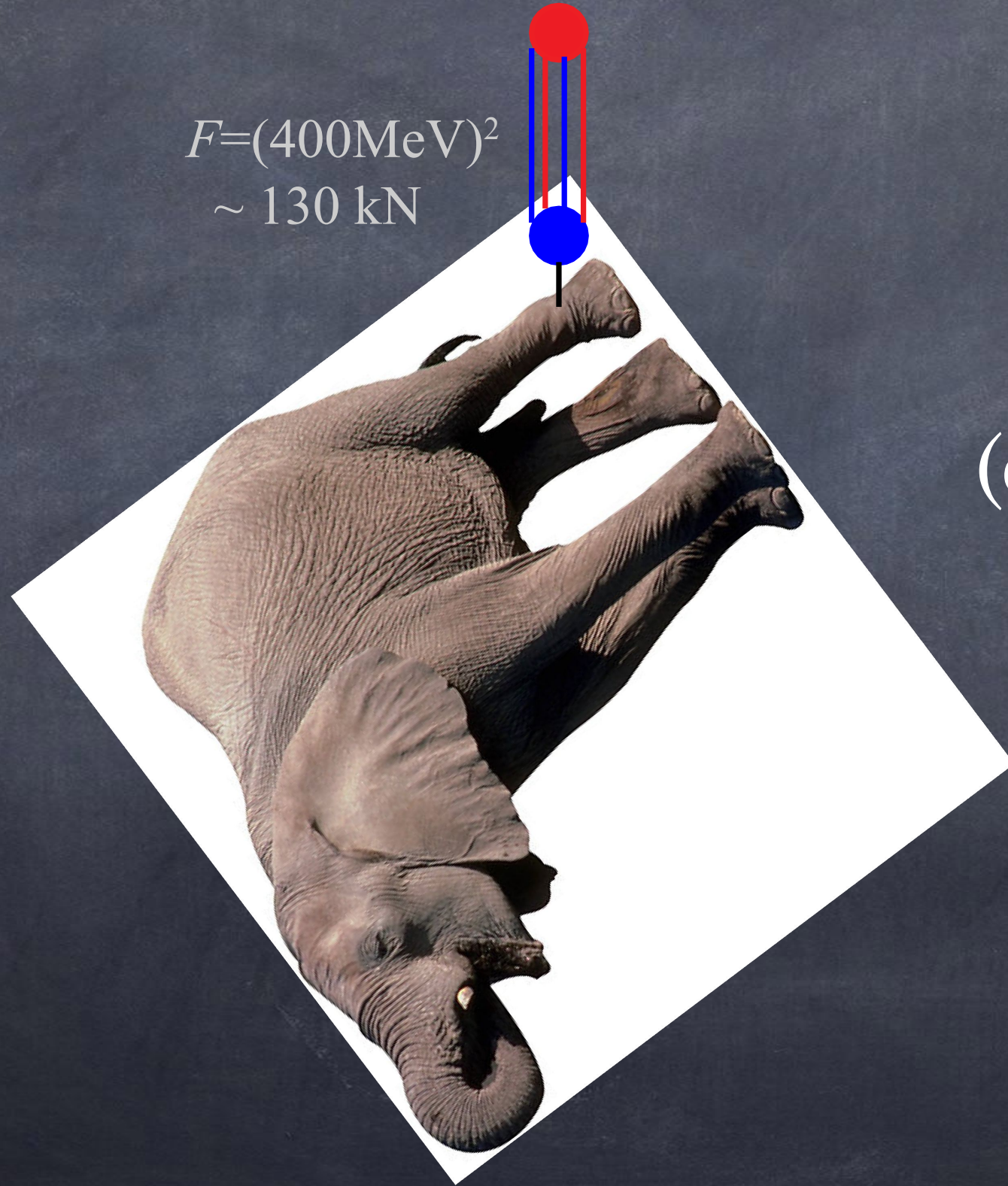
$$F = (400 \text{ MeV})^2$$



Niin siis kuinka paljon?

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

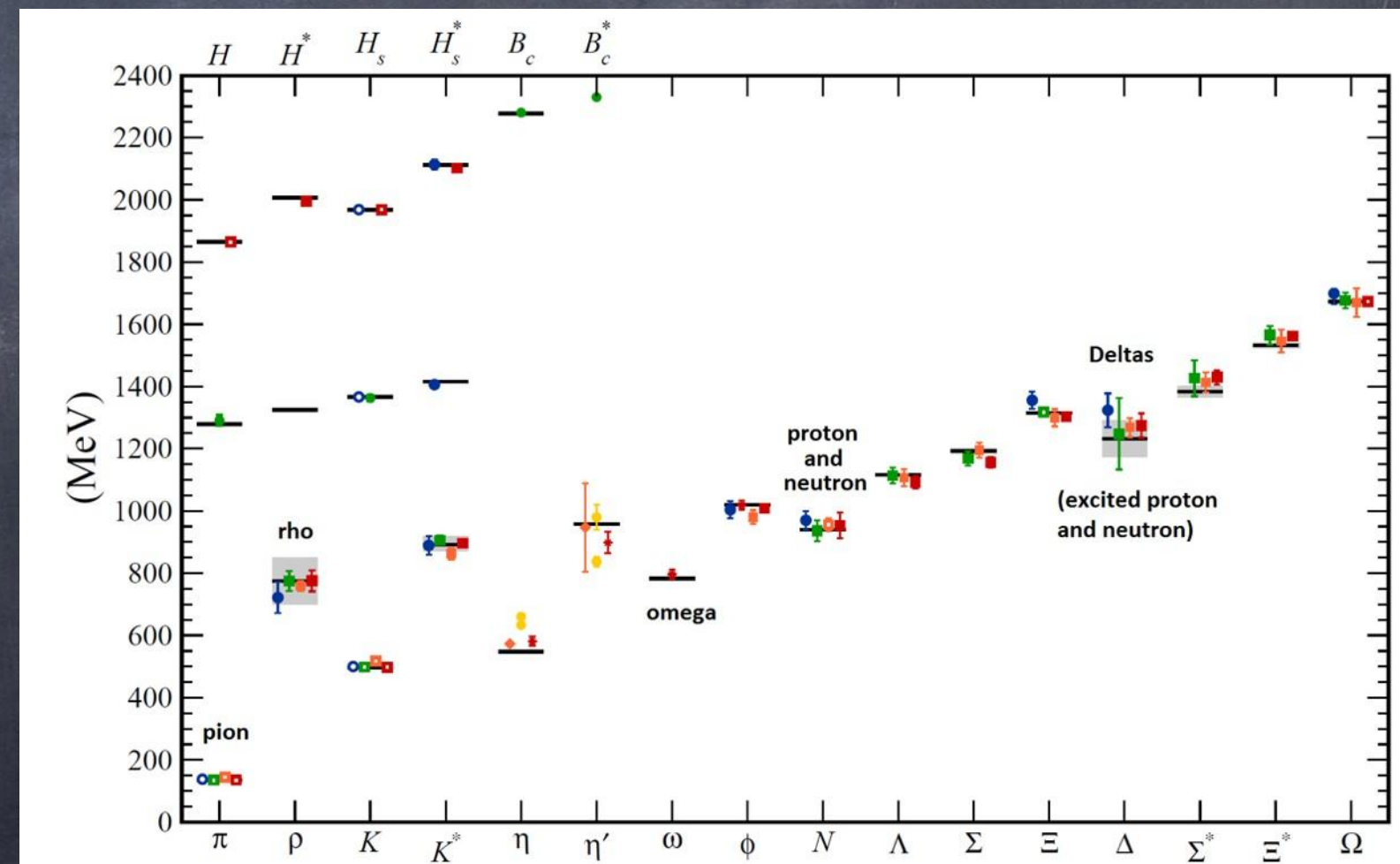
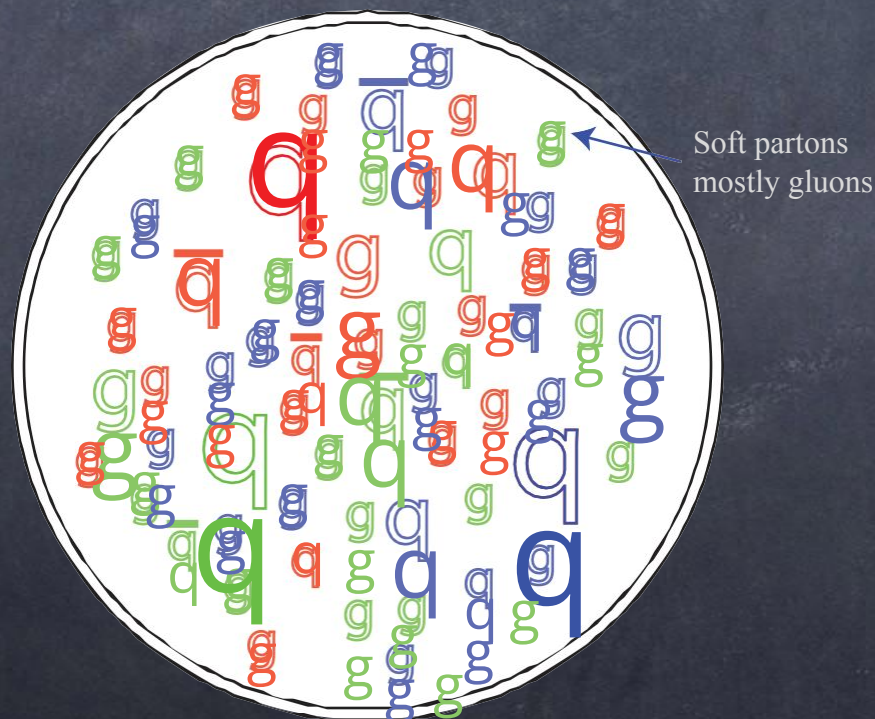
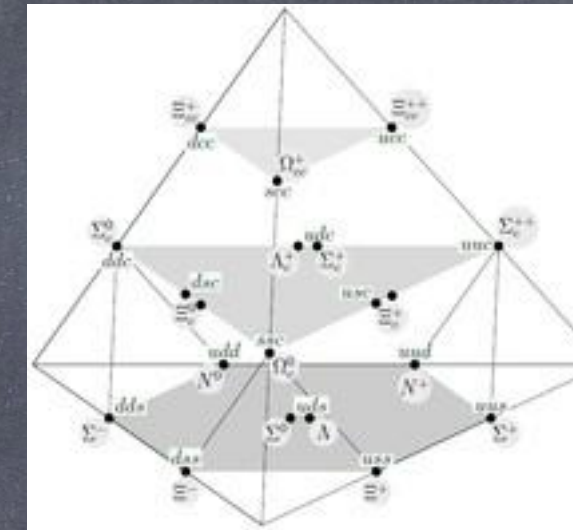
$\sim 130 \text{ kN}$



Väri vankeus
(color confinement)

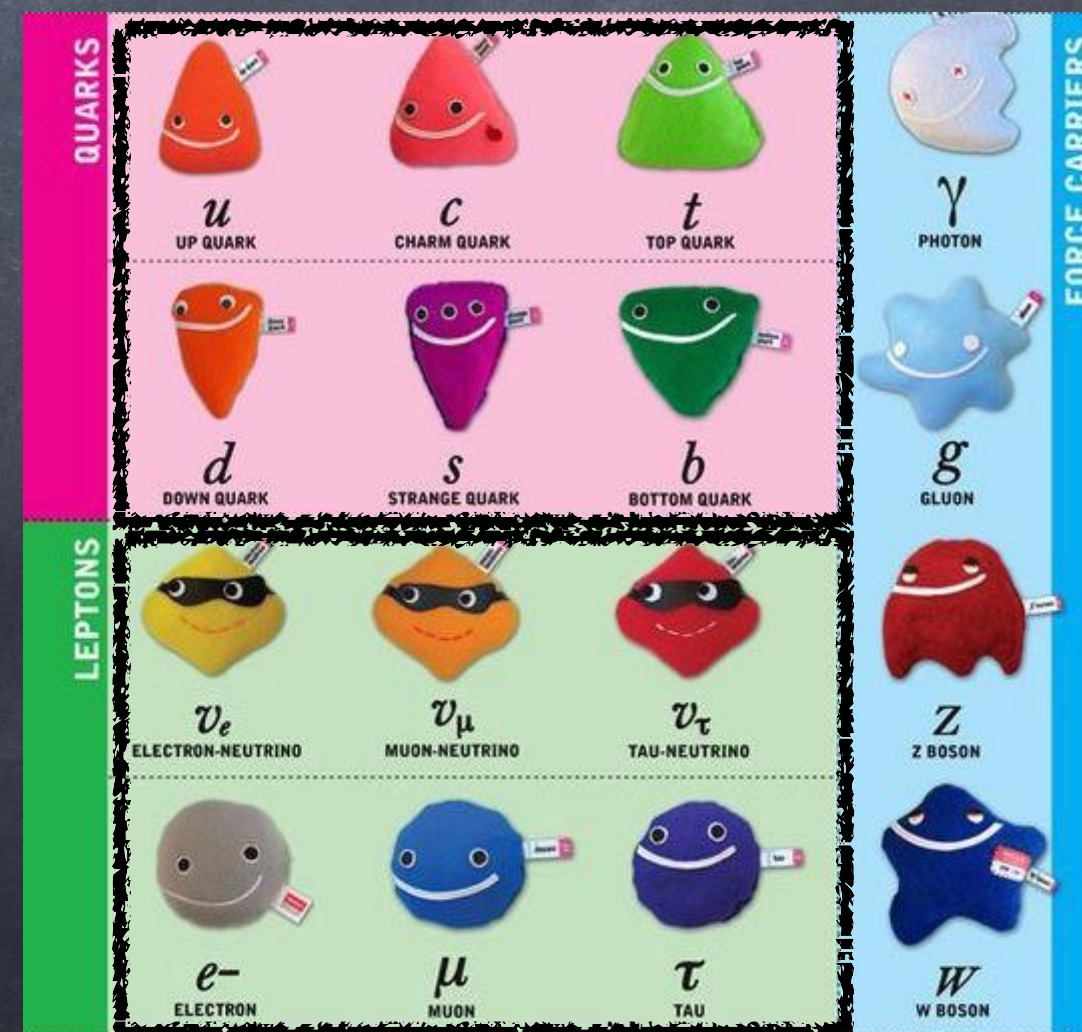
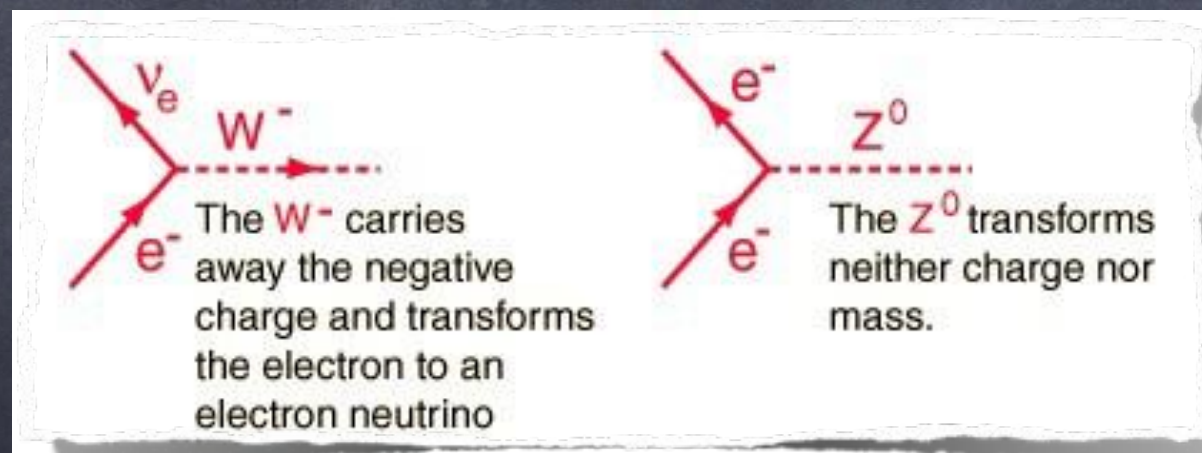
Standardimallin gluonit

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



Heikko vuorovaikutus

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



Miksi heikko vuorovaikutus on “heikko”?

- Välittäjäbosonit ovat raskaita
→ kantama on todella lyhyt

$$m_e = 0.0005 \text{ GeV}$$

91 GeV

80 GeV



Miksi heikko vuorovaikutus 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 fotoni ovat massattomia,
miksi W ja Z ovat painavia?

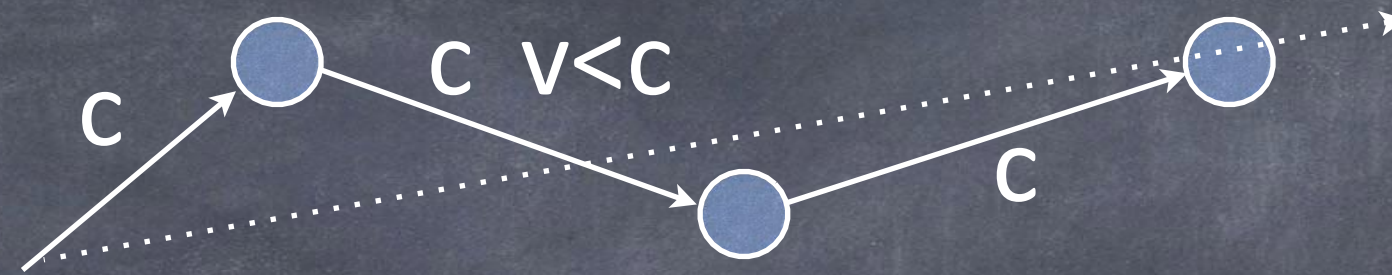
Löydä Higgs



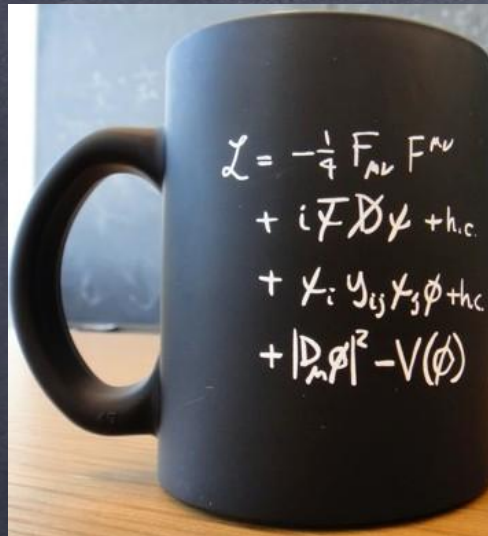
Löydä Higgs



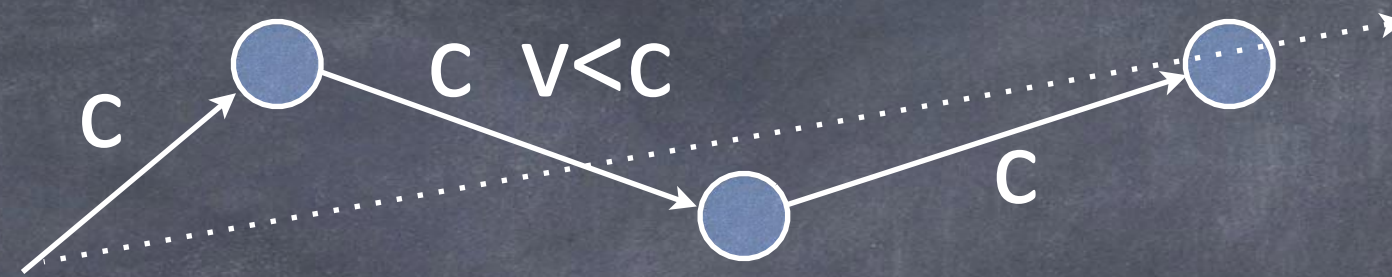
Higgsin mekanismi



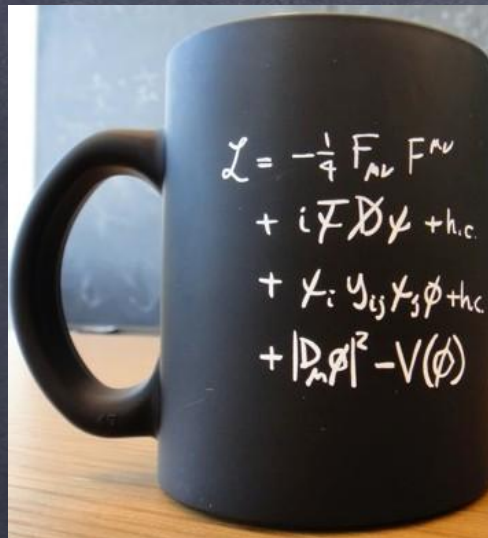
- Kun valo etenee väliaineessa, sen nopeus on pienempi kuin c . Siroaa kuin pingispallo.
- Higgs et al. ajattelivat että ehkä tyhjiö ei olekaan tyhjä, vaan sen täyttää “Higgsin kenttä”
- Jotkut hiukkaset hidastuvat Higgsin kentässä enemmän kuin toiset
→ *mitä enemmän hiukkanen hidastuu, sitä raskaampi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



Higgsin mekanismi



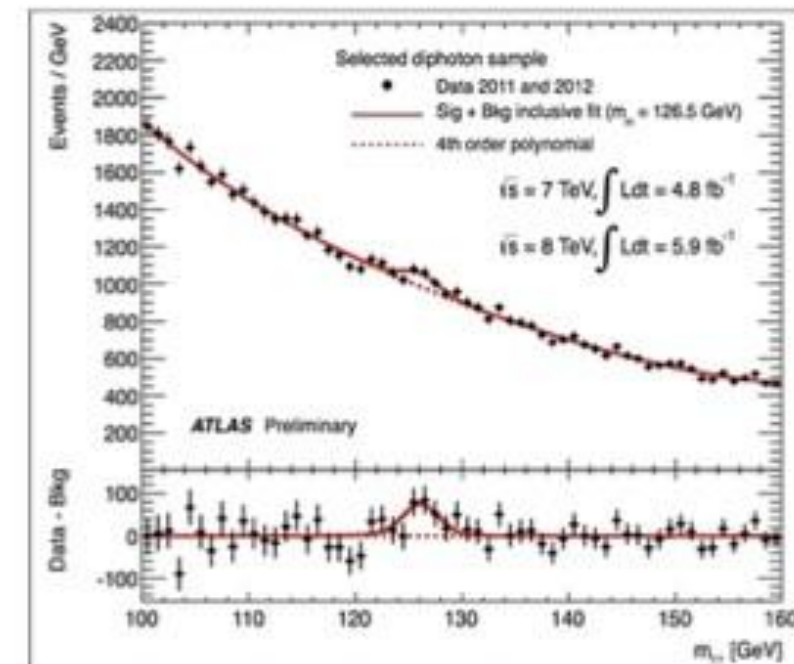
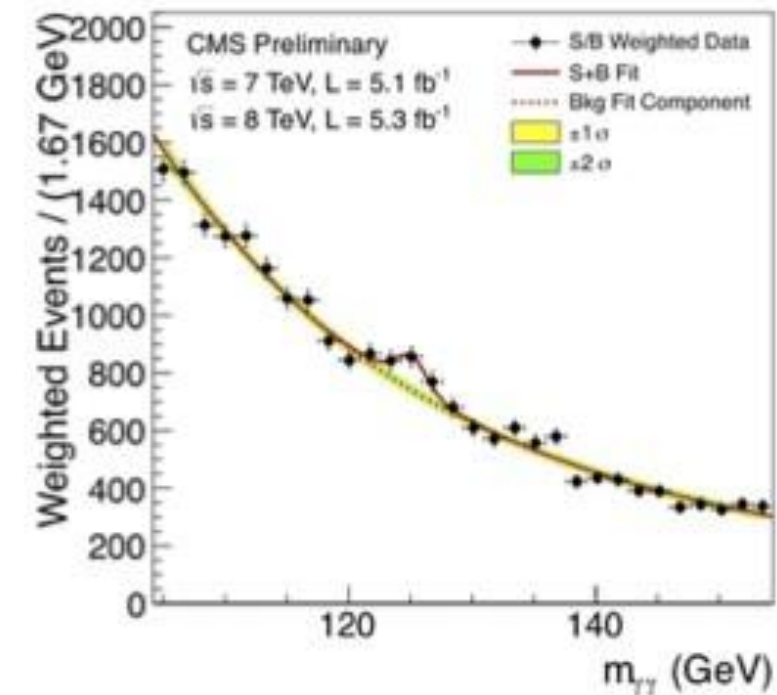
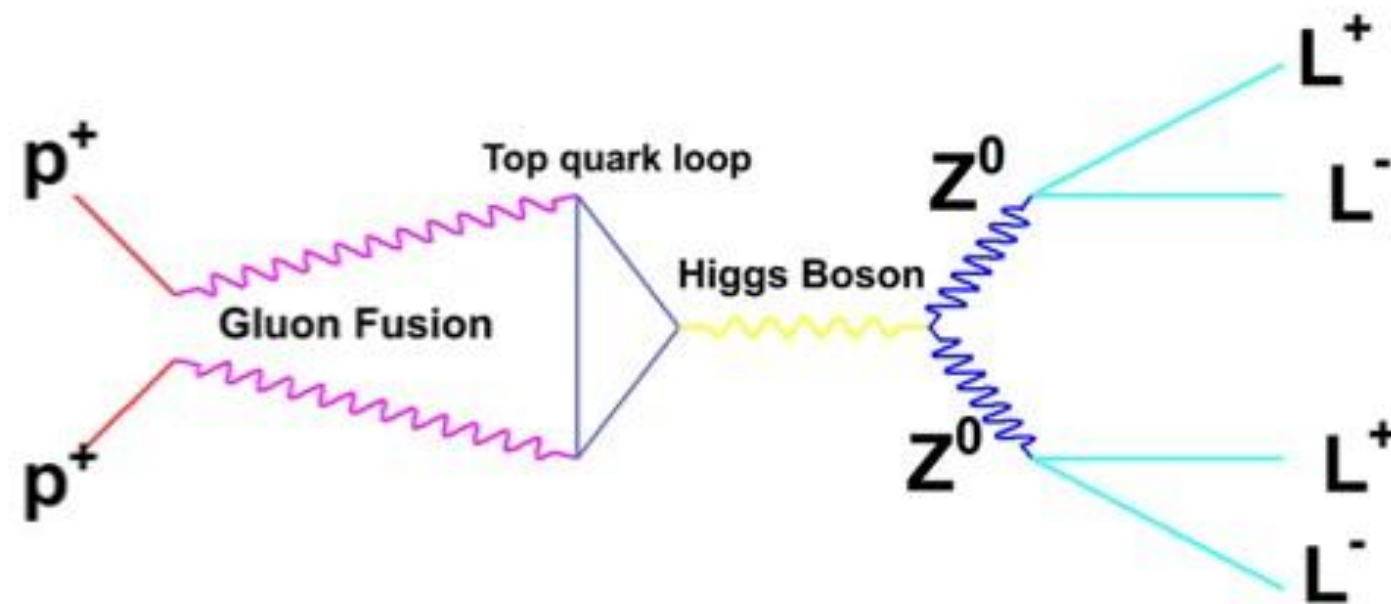
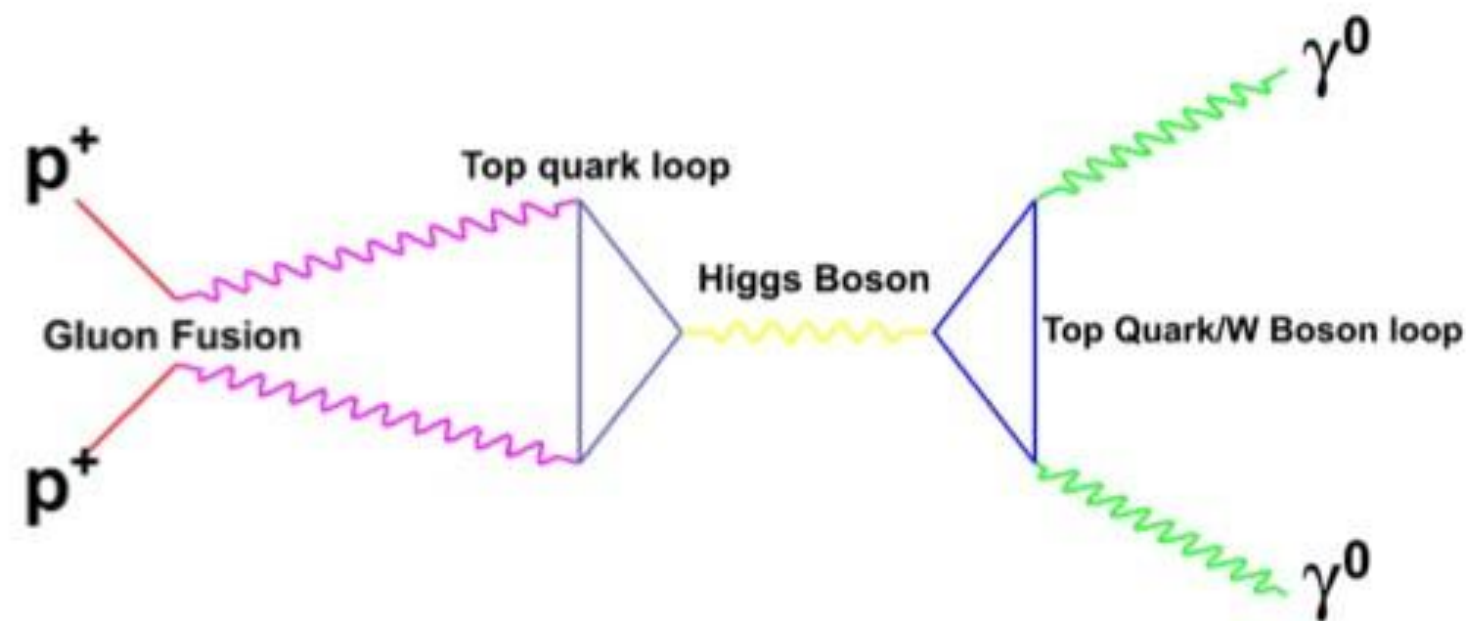
- Kun valo etenee väliaineessa, sen nopeus on pienempi kuin c . Siroaa kuin pingispallo.
- Higgs et al. ajattelivat että ehkä tyhjiö ei olekaan tyhjä, vaan sen täyttää “Higgsin kenttä”
- Jotkut hiukkaset hidastuvat Higgsin kentässä enemmän kuin toiset
→ *mitä enemmän hiukkanen hidastuu, sitä raskaampi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



Jos Higgsin bosoni havaitaan, teoria Higgsin kentästä on oikein!

Higgsin bosonin kokeellinen löytö 2012

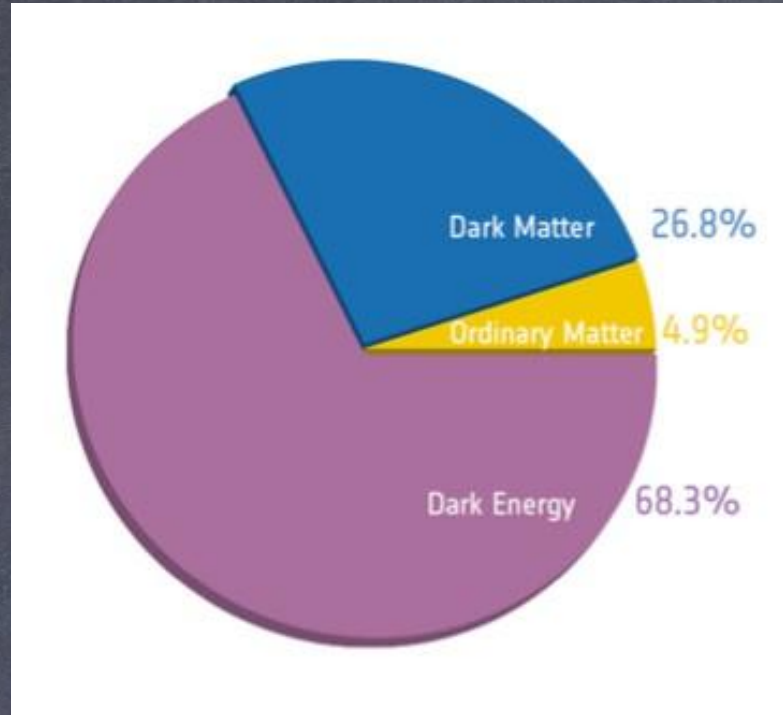
$m = 125 \text{ GeV}$



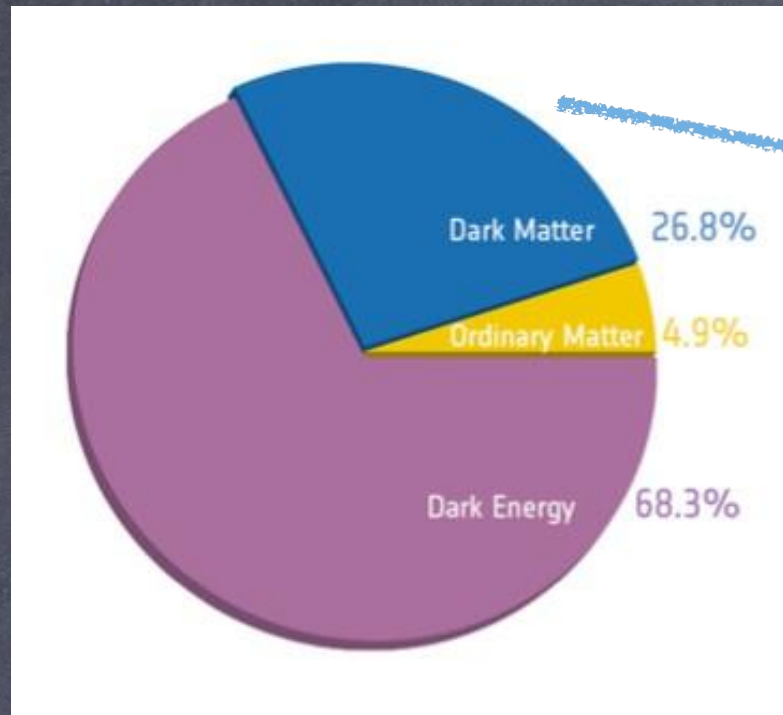
Maailma ja ymmärrys on valmis, lähdetään kahville!

....vai unohtuiko muutama juttu?

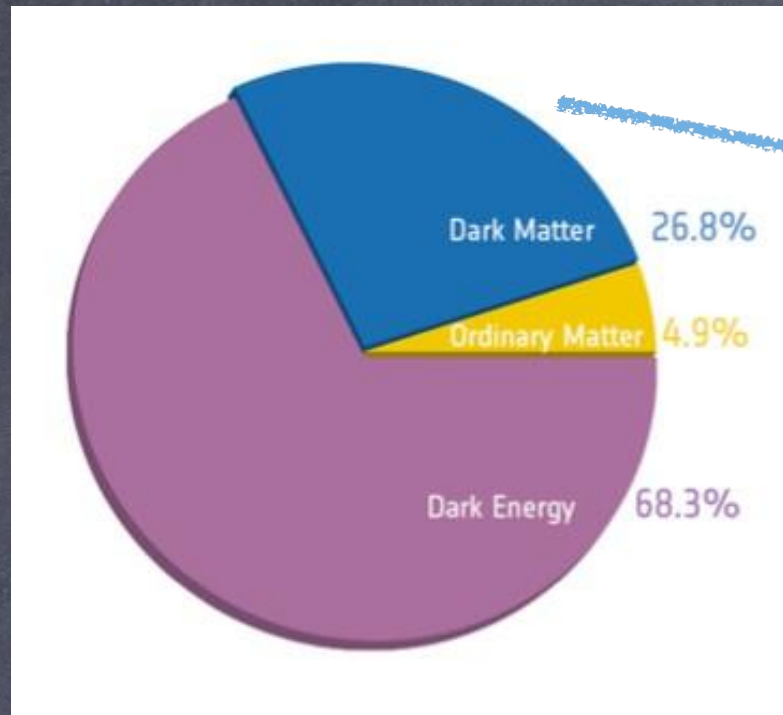
Mikä tai ketkä tippui kelkasta?



Mikä tai ketkä tippui kelkasta?



Mikä tai ketkä tippui kelkasta?

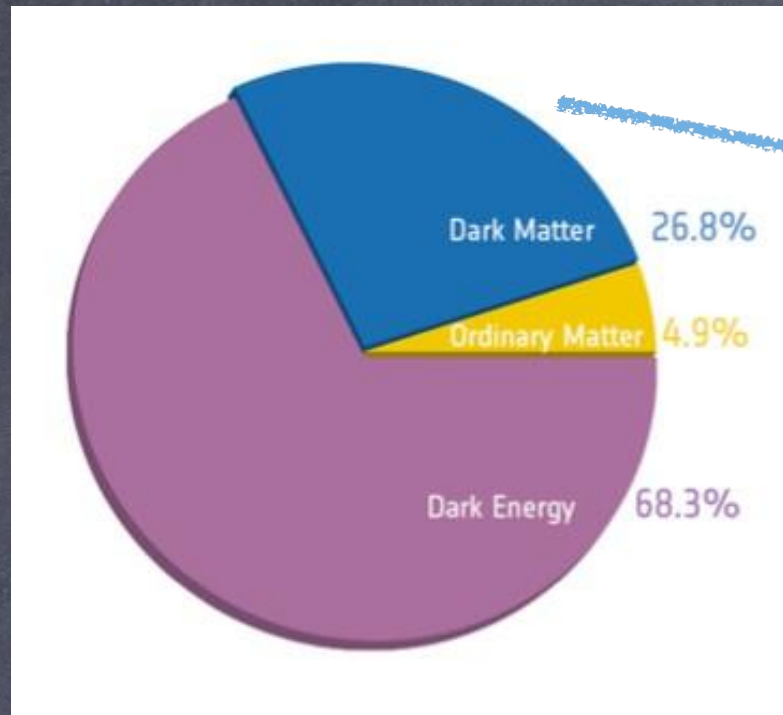


Kuka dumppasi gravitaation?

Missä on gravitoni?

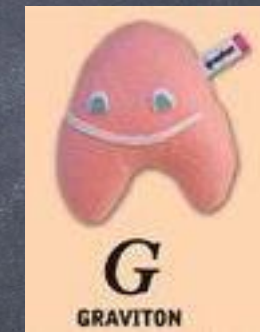


Mikä tai ketkä tippui kelkasta?



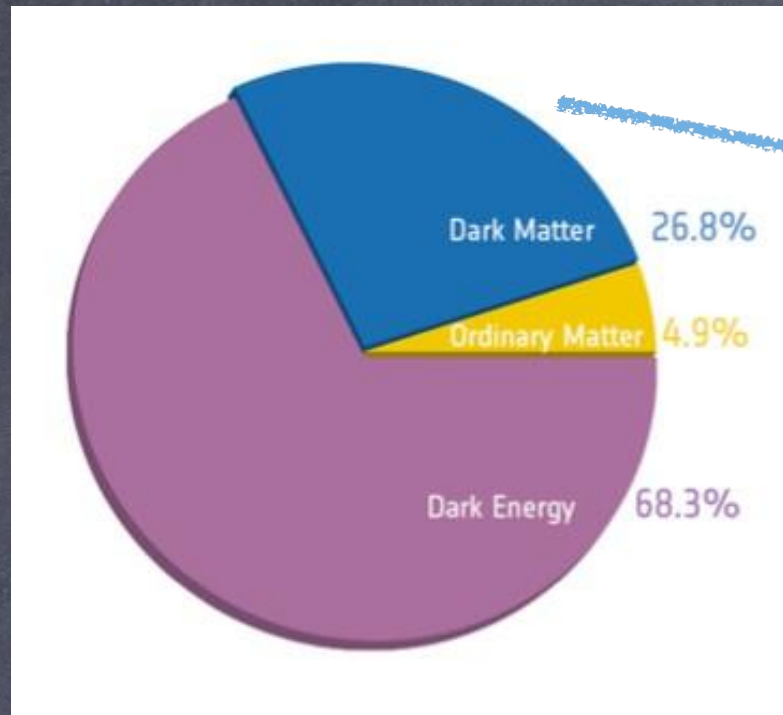
Kuka dumppasi gravitaation?

Missä on gravitoni?



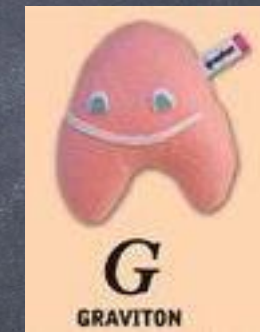
Mistä muodostuu "jaksollisen järjestelmän rakenne"?

Mikä tai ketkä tippui kelkasta?



Kuka dumppasi gravitaation?

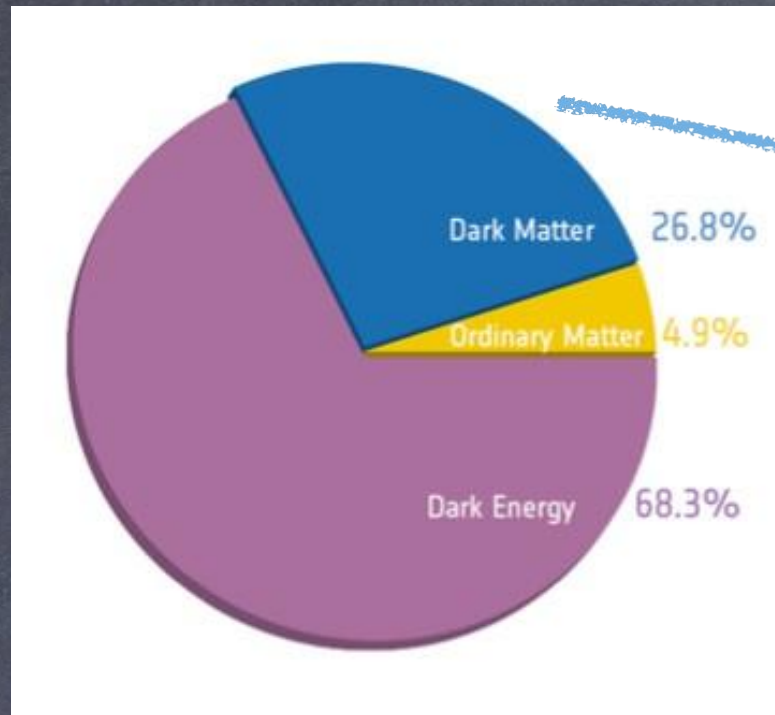
Missä on gravitoni?



Mistä muodostuu "jaksollisen järjestelmän rakenne"?

Miksi ainetta on enemmän kuin anti-ainetta? (Baryogenesis)

Mikä tai ketkä tippui kelkasta?



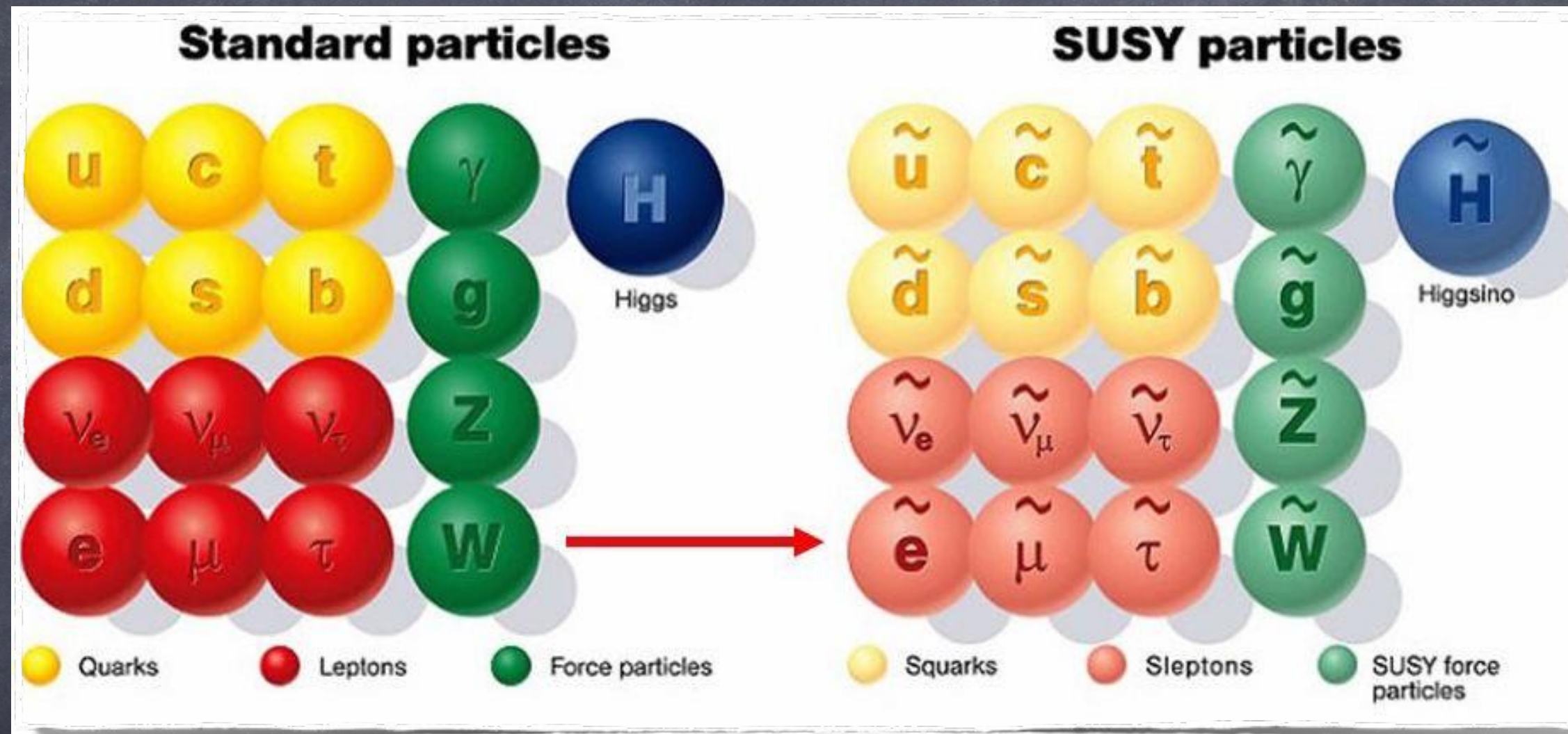
Miksi Higgsin bosoni on niin kevyt... tai raskas?
Kul... rasi gravitaation?
Missä on gravitoni?



Mistä muodostuu "jaksollisen järjestelmän rakenne"?

Miksi ainetta on 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!

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: (epä)täydellinen standardimalli
- Standardimallin ongelmia ratkaistaan monimutkaisemmilla teorioilla (esimerkiksi SUSY)
- Teoriat joko mitätöidään tai vahvistetaan kokeellisin menetelmin
- Elämme jännittäviä aikoja:
LHC voi muuttaa kuvion kokonaan