

# 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 CERNissä vielä jokin päivä!*



1991: Synnyin Raahessa

2007-2010: Lukio-opinnot  
Madetojan musiikkilukiassa

2010: Fysiikan opiskelu alkaa Oulun yliopistossa

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

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





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!





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?

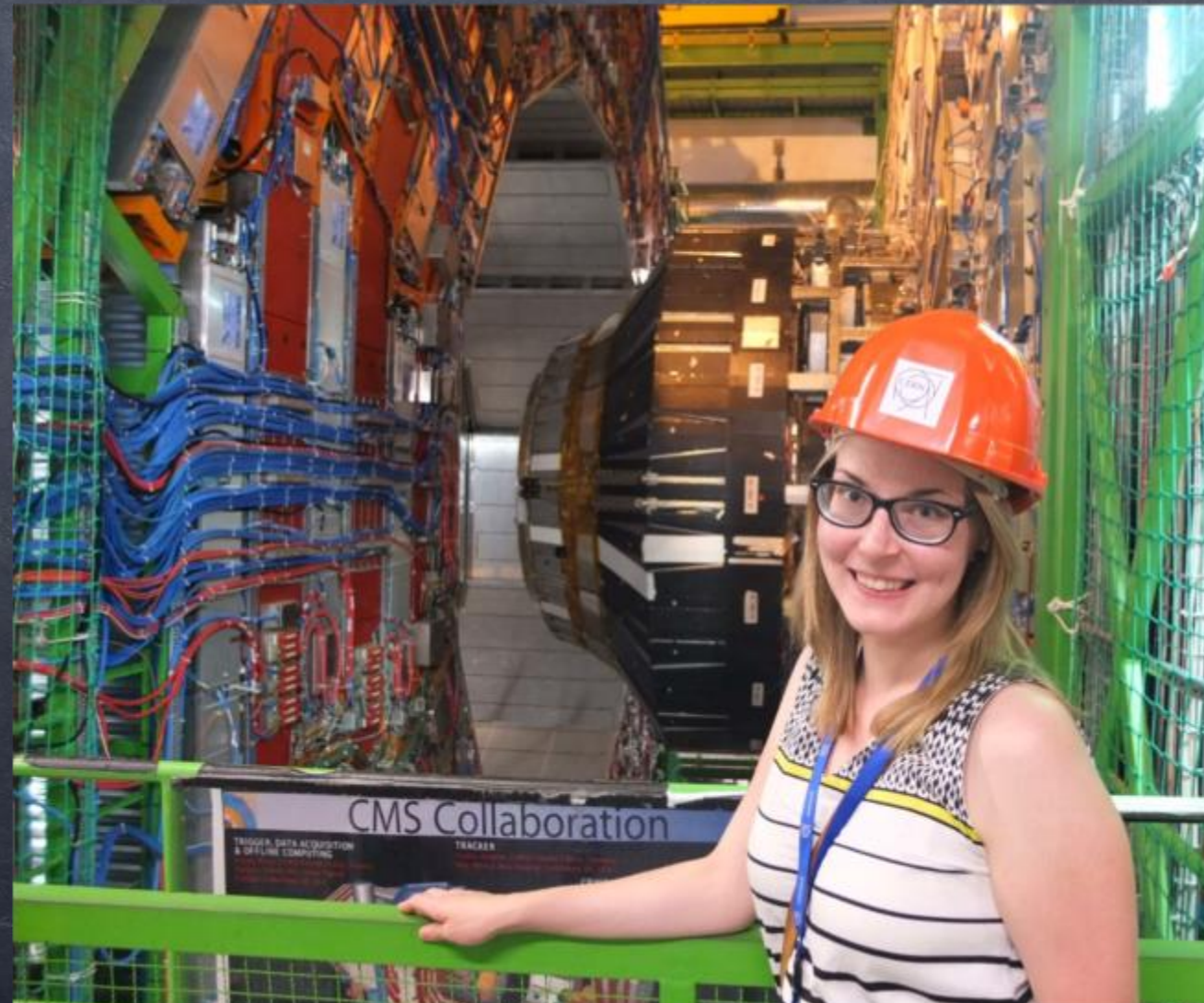
2010: Fysiikan opiskelu alkaa Oulun yliopistossa

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 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...)

*Olisi kiva tietää lisää... pitäisköhän tehdä väikkäri?*







**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?

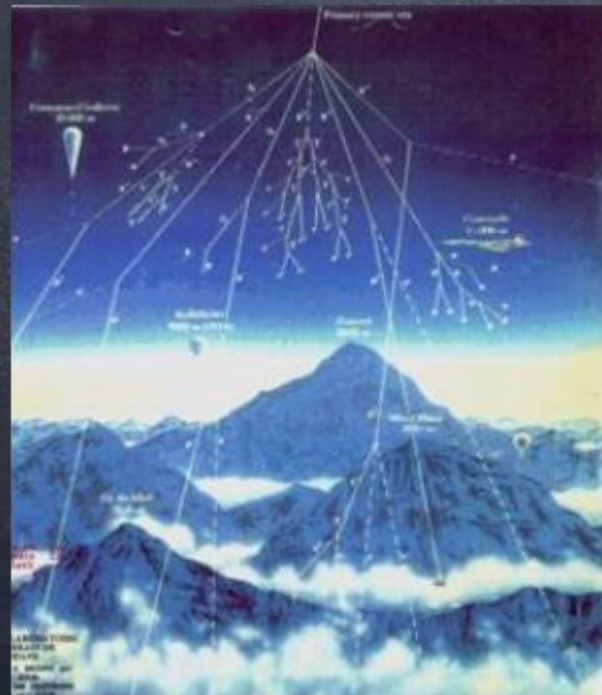
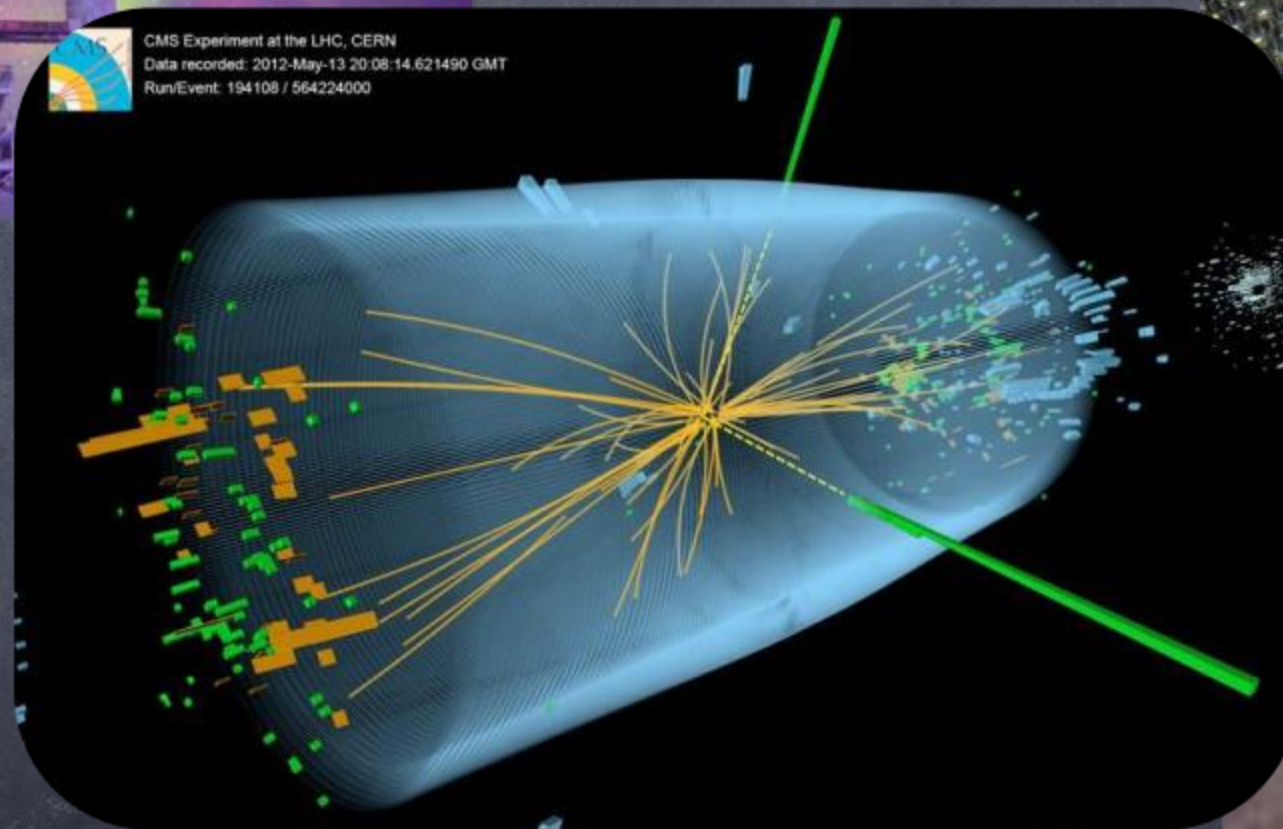
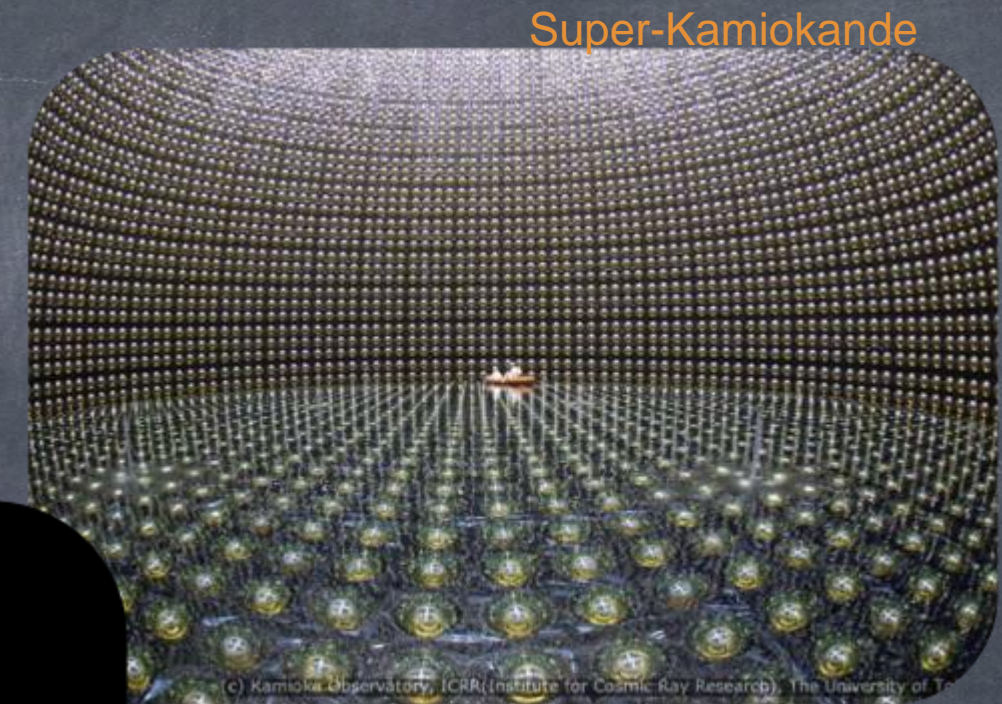
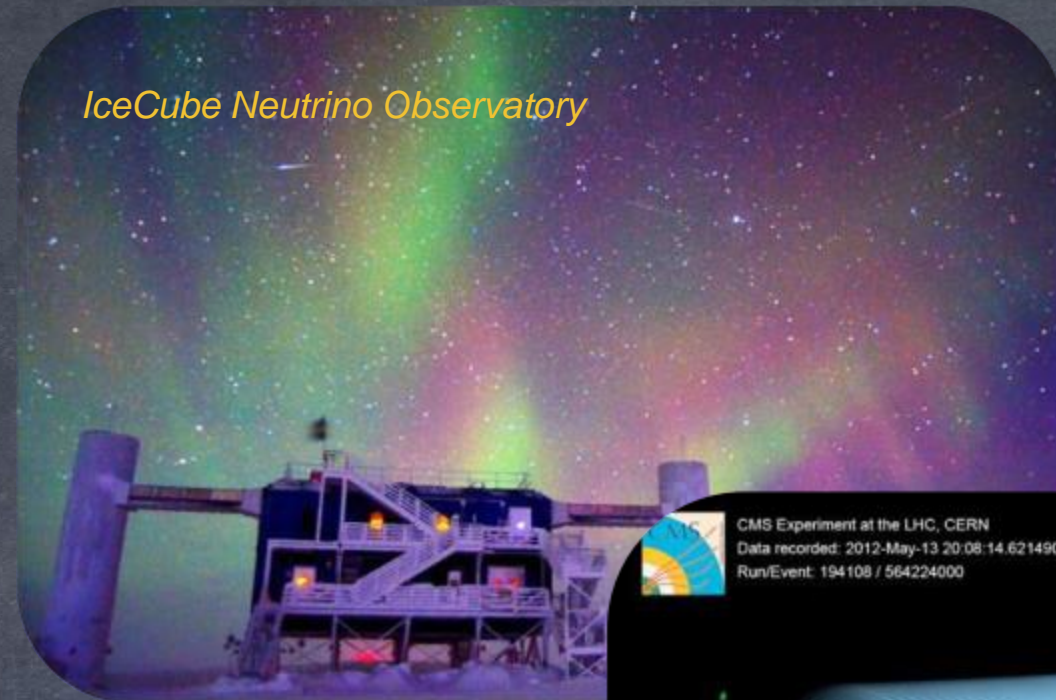
“Teoria ei ole mitään ilman kokeellista vahvistusta!”



“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 alkeishiukkaset



• Fermionit = “ainehiukkaset”

• kvarkit (6 kpl)

• leptonit (6 kpl)

• Bosonit = “voimavälittäjät”

• Higgsin hiukkanen (bosoni)

+





# Mikä on hiukkanen?

## Kvanttimekaniikka

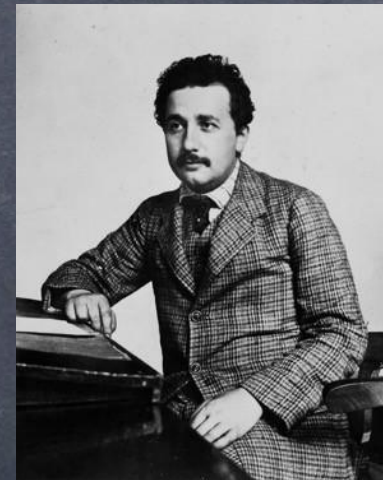
aalto-hiukkasdualismi  
epätarkkuusperiaate  
 $\Delta x \Delta p > \hbar$

## Suppea suhteellisuusteoria

valonnopeus vakio  
fysiikan lait nopeudesta riippumattomat



Werner Heisenberg

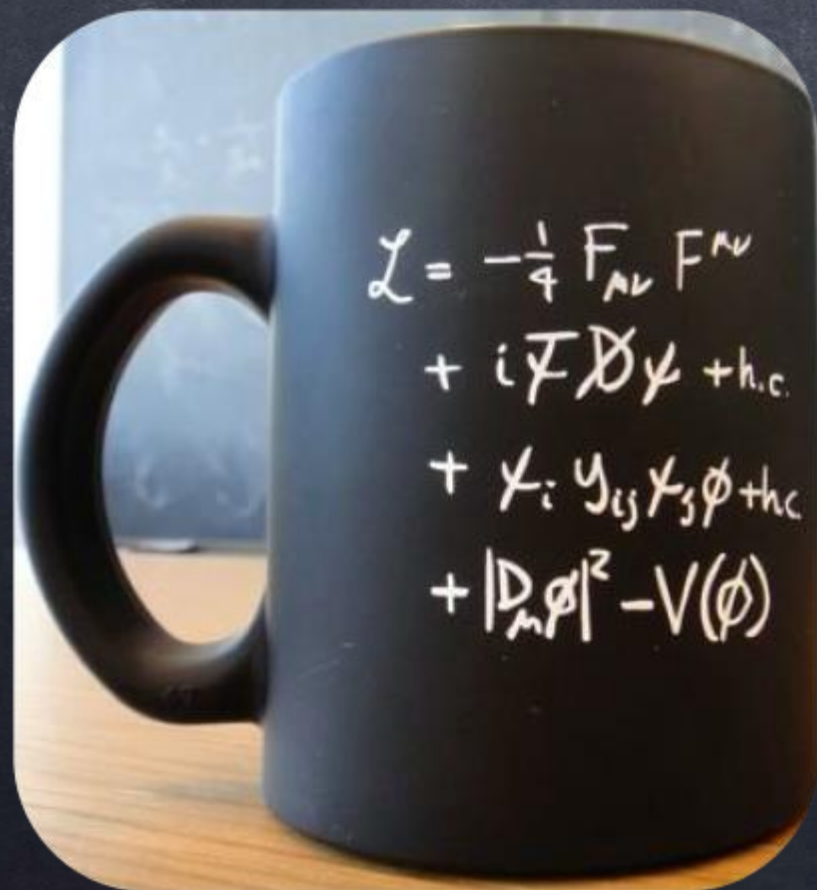


Albert Einstein

## 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)

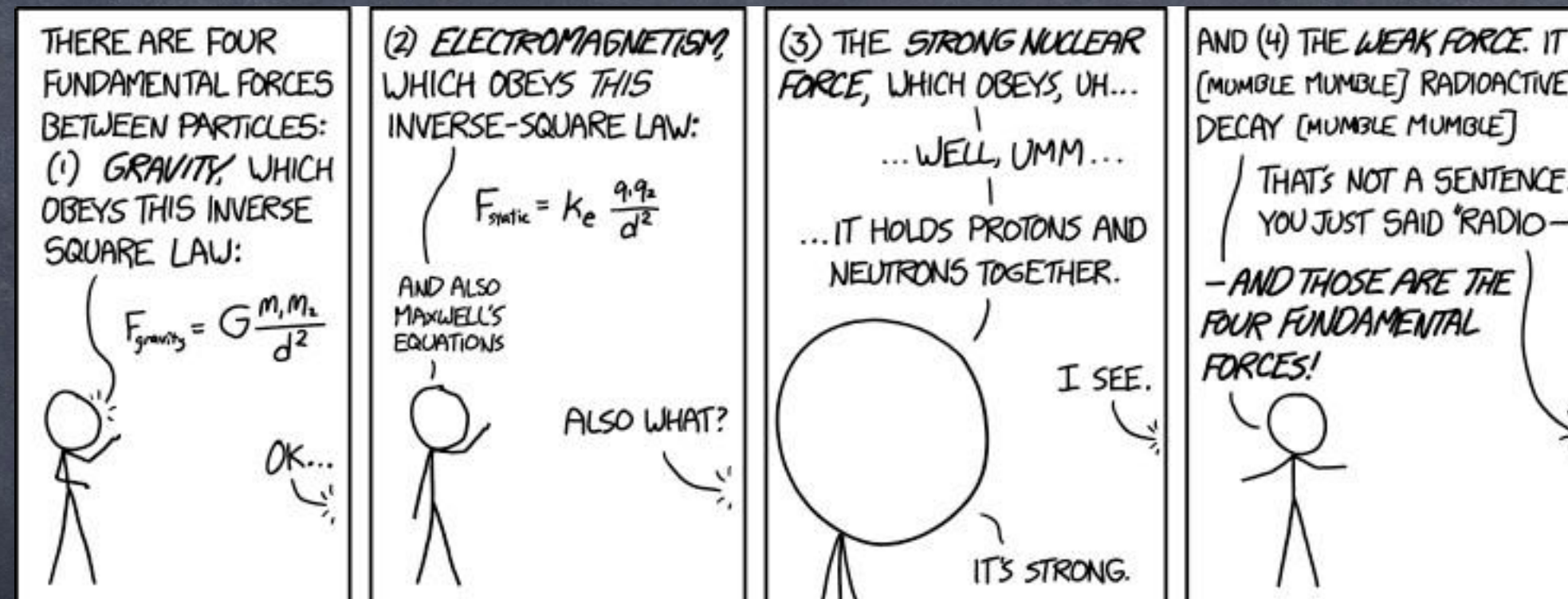
- Muodostavat kaiken tunnetun aineen  
protoni = 2 ylös-kvarkkia + 1 alas-kvarkki  
neutroni = 1 ylös-kvarkki + 2 alas-kvarkkia
- Fermioneilla spin on puoliluku
- Paulin kieltosääntö:

*Kahta täysin identtistä fermionia ei voi laittaa samaan kvanttitilaan*

(identtisten fermionien aaltofunktion on oltava antisymmetrinen )



# Hiukkaset vuorovaikuttavat keskenään perusvuorovaikutuksilla

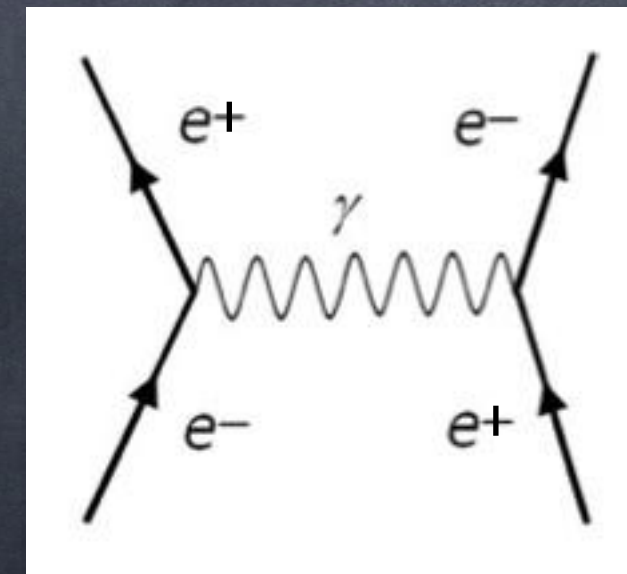
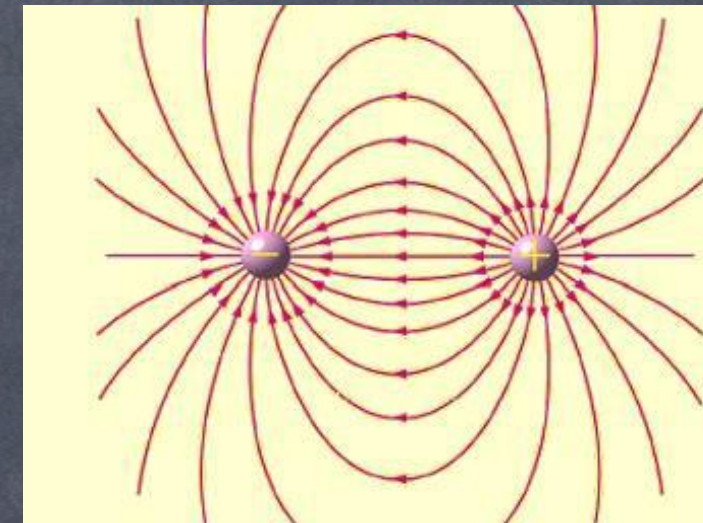


# Neljä perusvuorovaikutusta

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

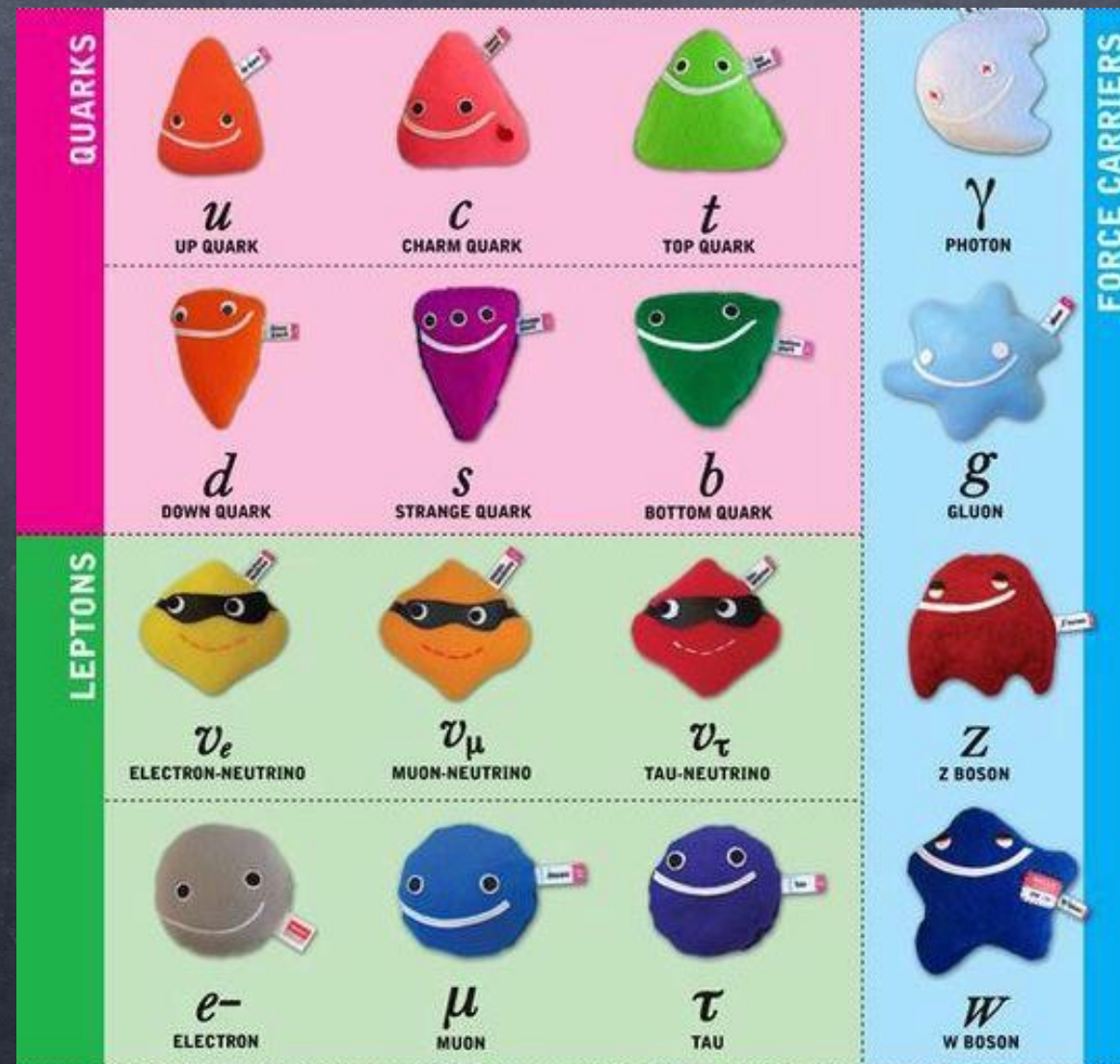
# Kuinka vuorovaikutus toimii?

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



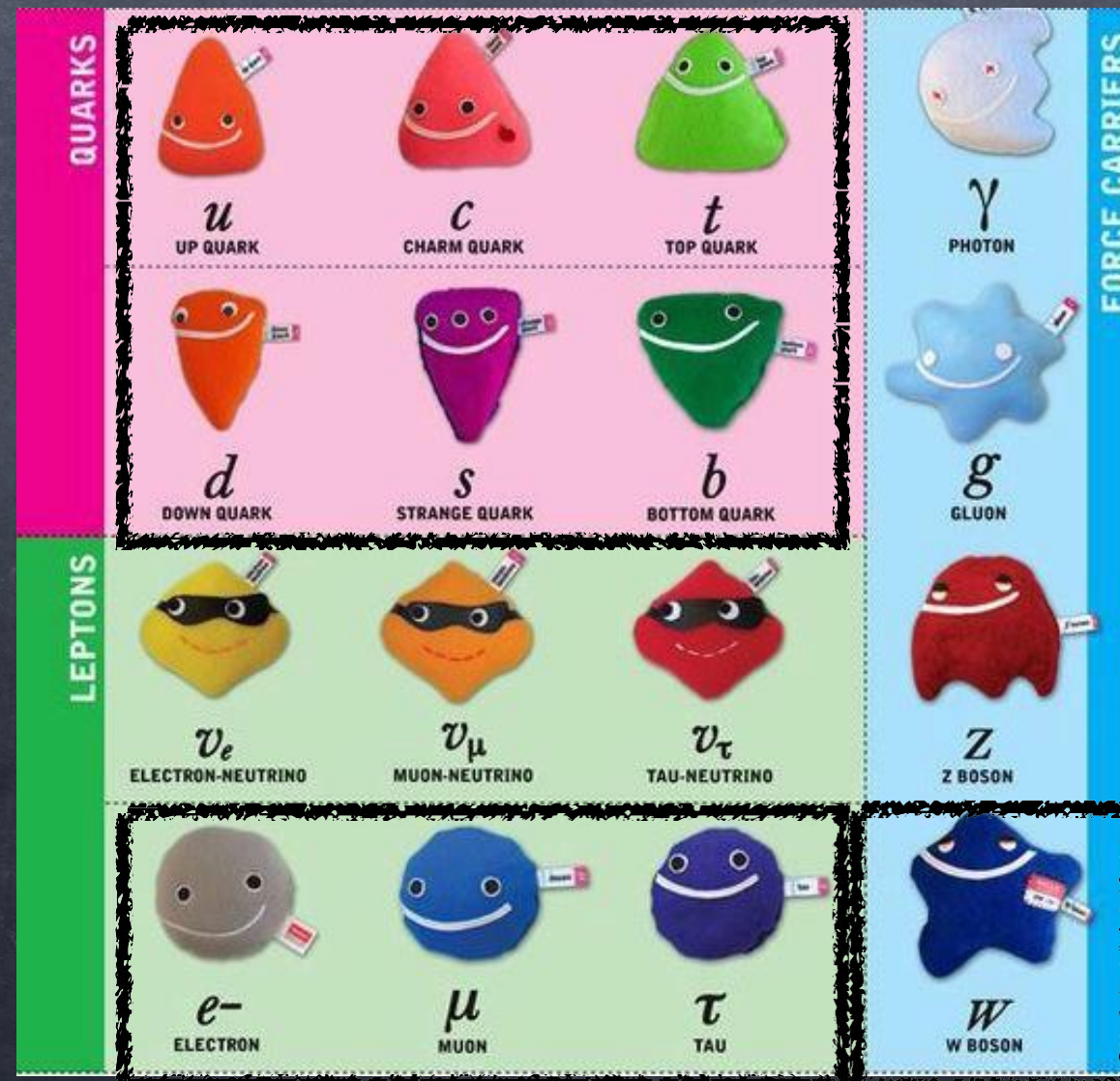
# Sähkömagnetismi

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



# Sähkömagnetismi

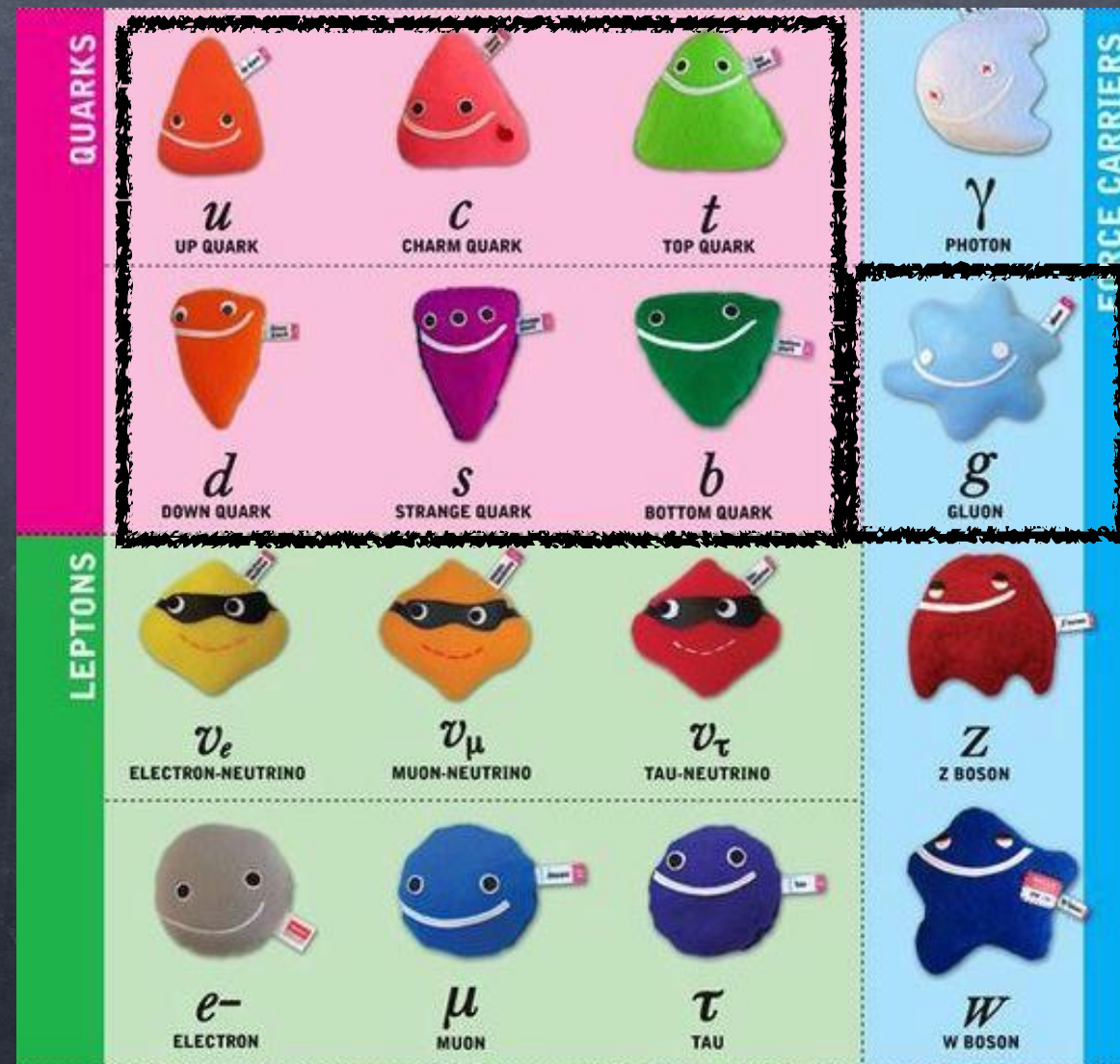
- Aiheuttaa sähköiset ja magneettiset ilmiöt
- Välittäjäbosoni: fotoni
- Kaikki sähkövaratut hiukkaset kokevat tämän





# Vahva vuorovaikutus

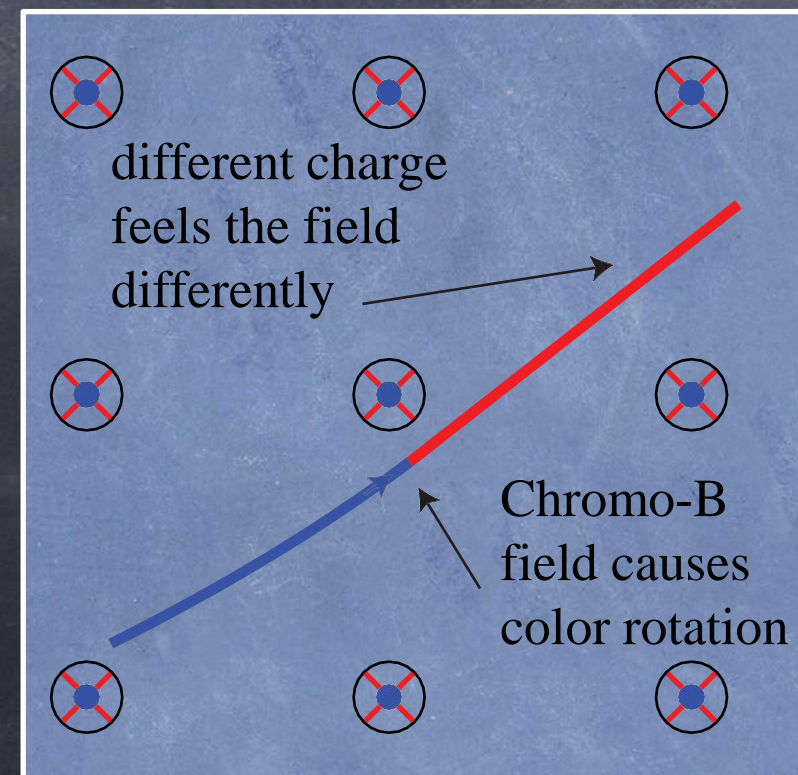
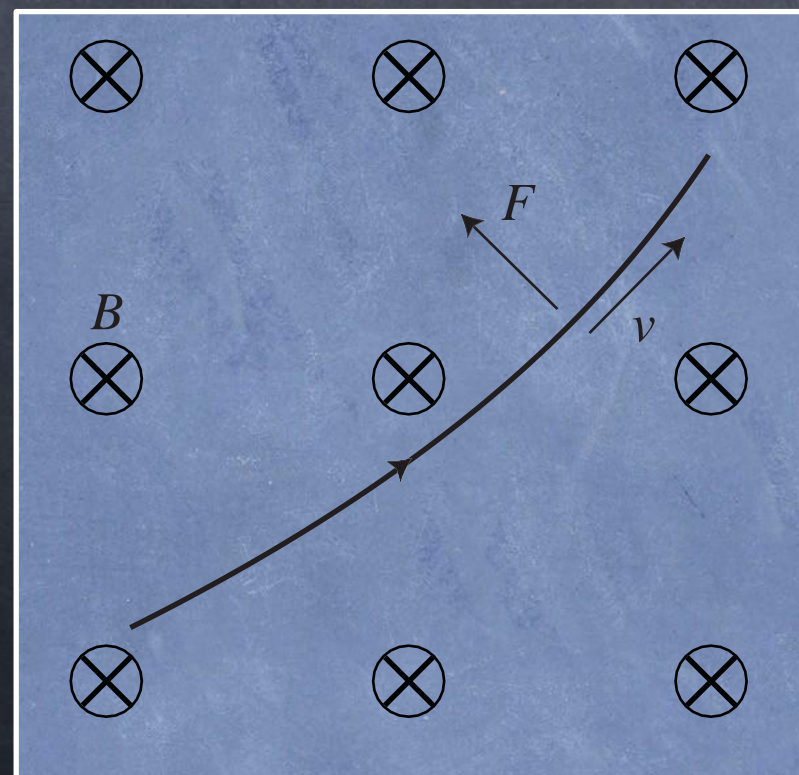
- Sitoo protonit yhteen
- Välittäjäbosoni: gluoni
- Kaikki värivaratut hiukkaset osallistuvat vv:hen



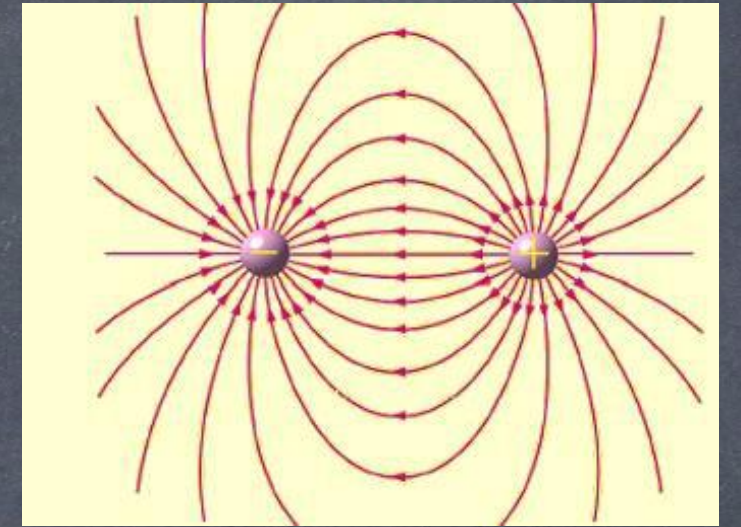
# Vahva vuorovaikutus



- 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,...




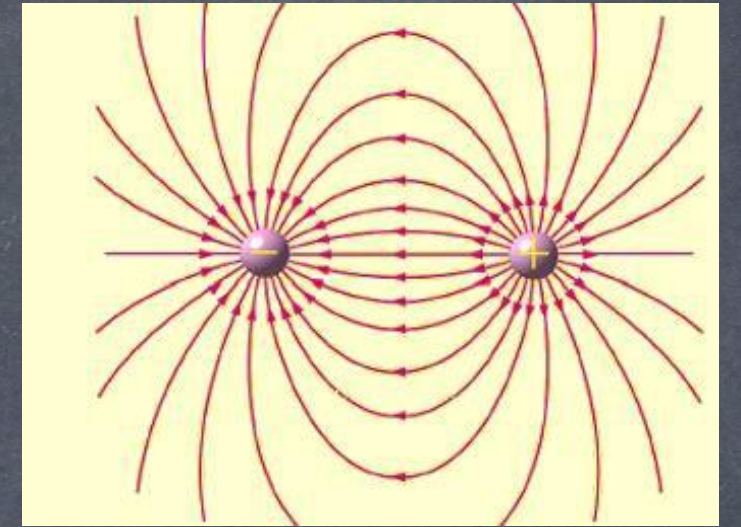
# Standardimallin gluonit



# Standardimallin gluonit

- Voima jolla kaksi sähkövarausta vetää toisiaan puoleensa

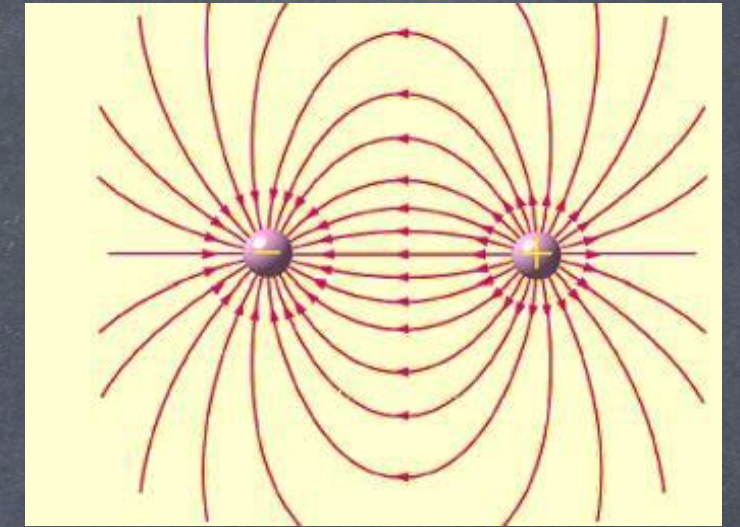
- $F = q_1 q_2 / r^2$  



# Standardimallin gluonit

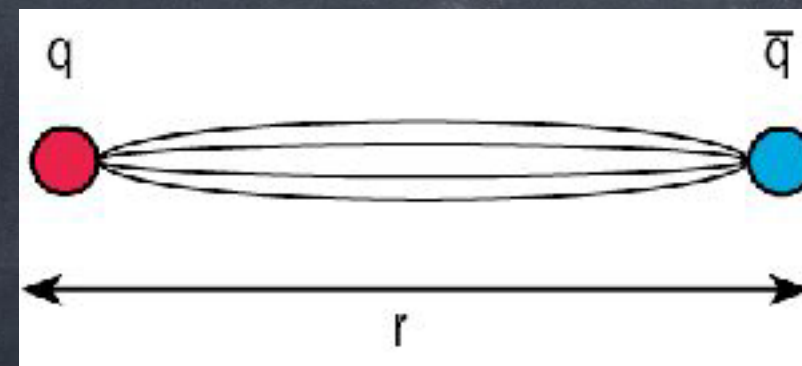
- Voima jolla kaksi sähkövarausta vetää toisiaan puoleensa

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



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

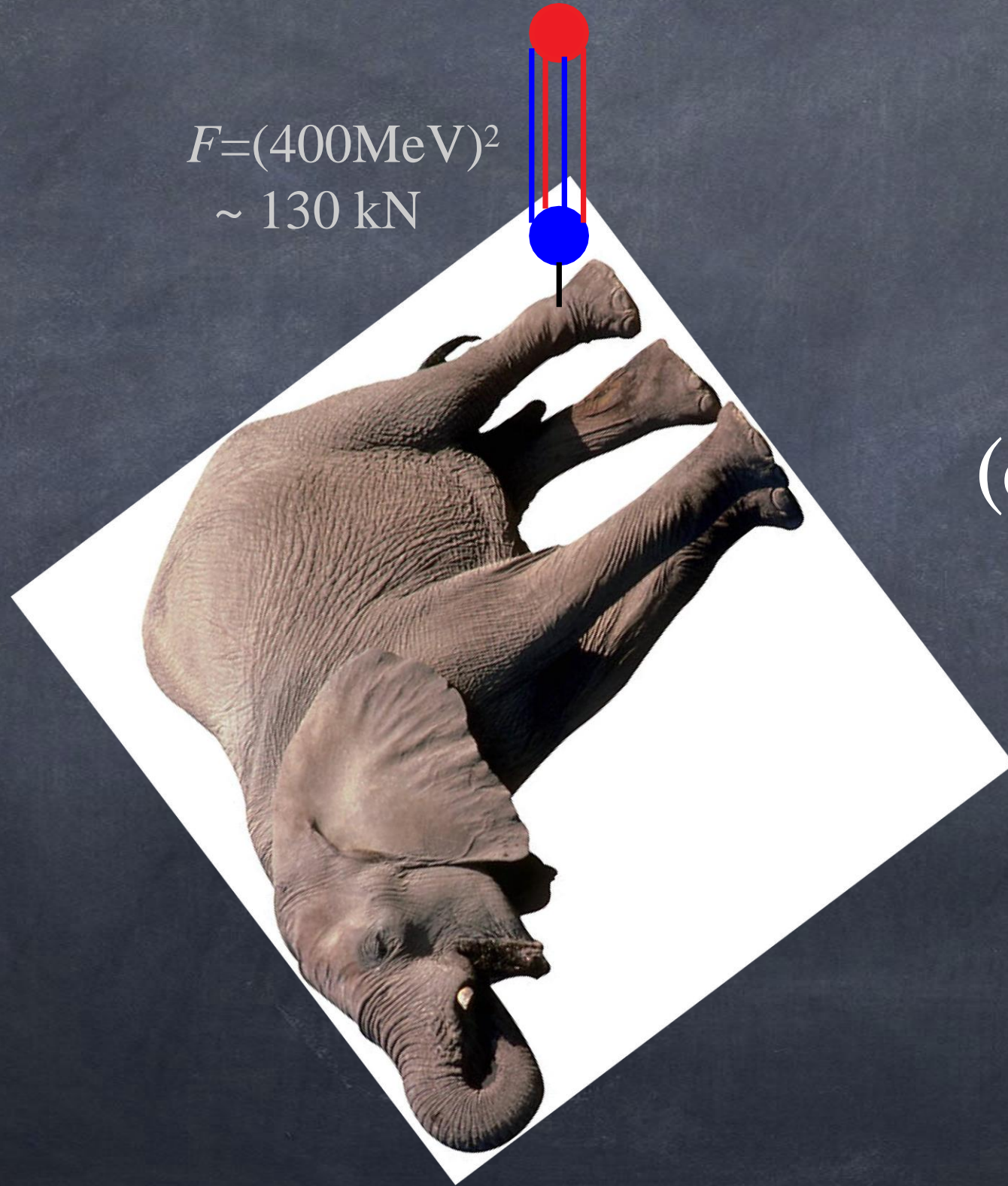
$$F = (400 \text{ MeV})^2$$



# Niin siis kuinka paljon?

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

~ 130 kN

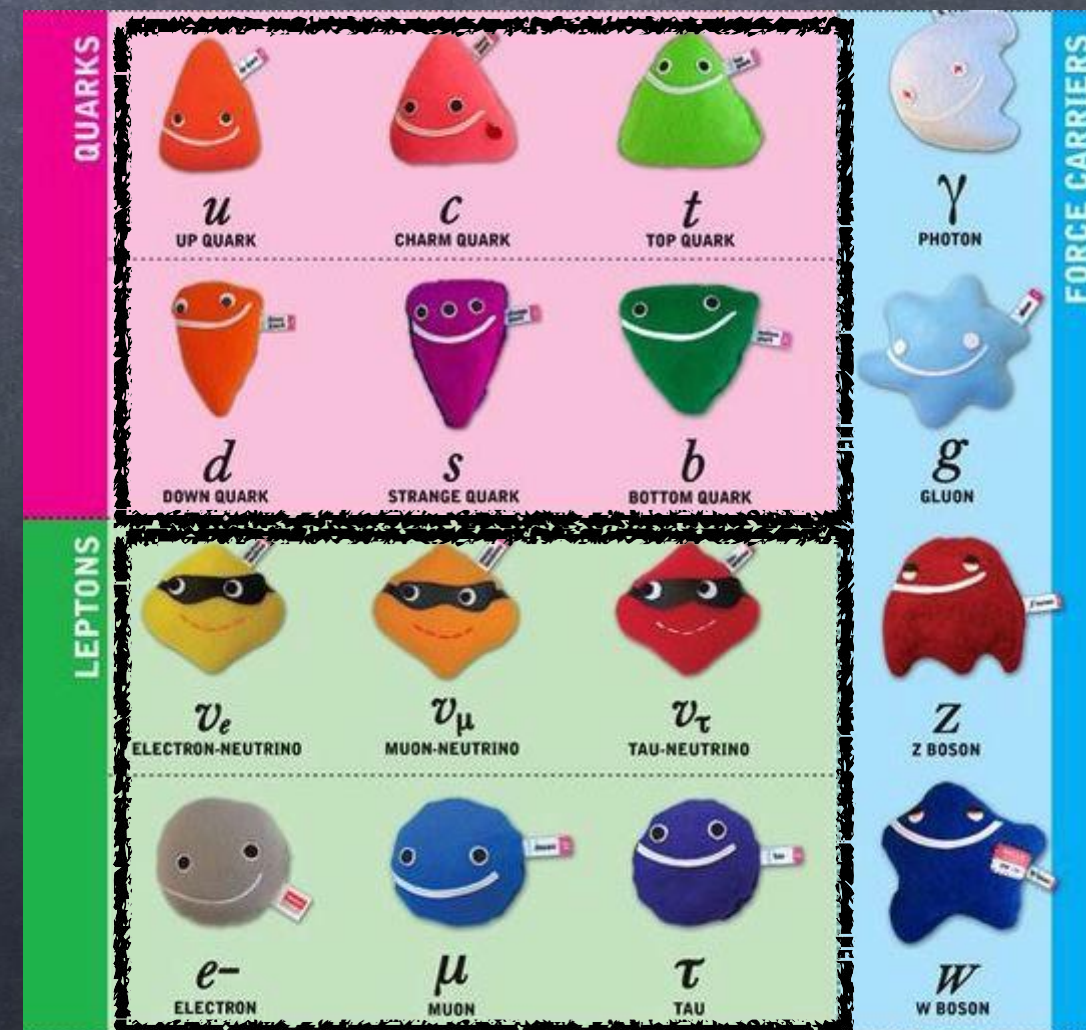
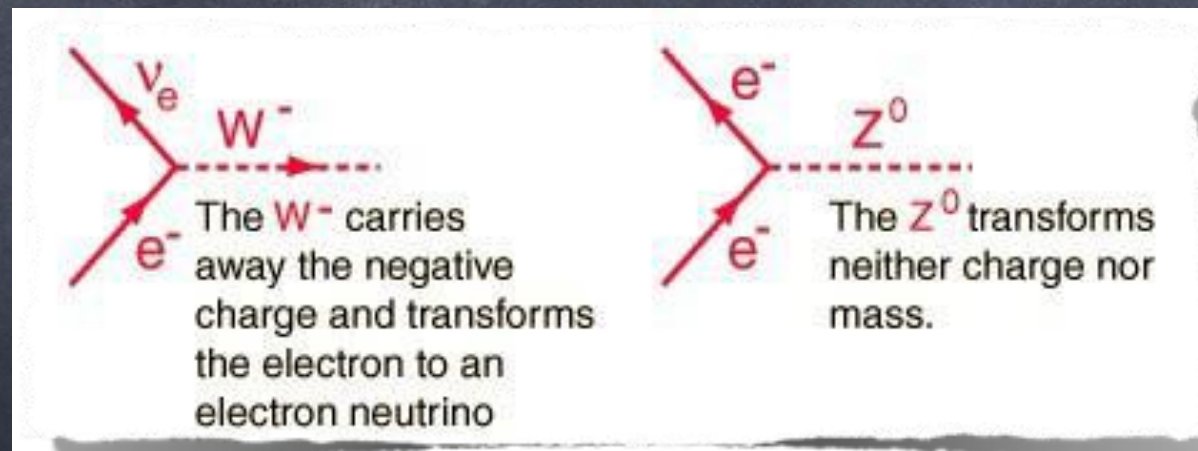


Väri vankeus  
(color confinement)



# 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



Nobelín arvoinen ongelma:

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

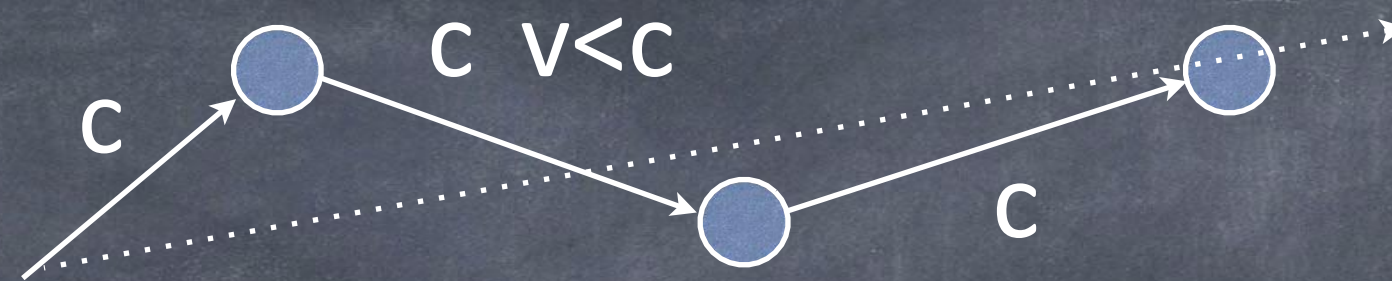
# Löydä Higgs



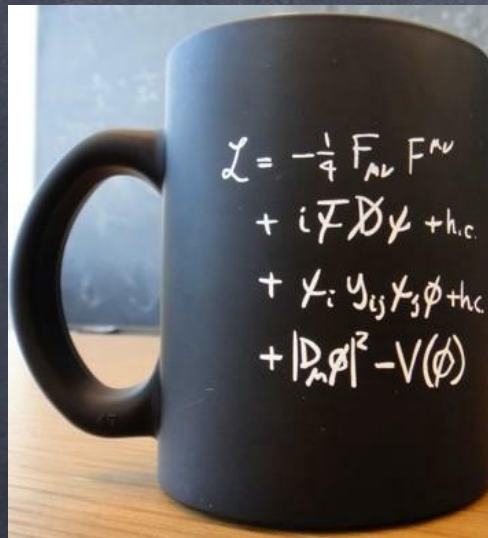
# Löydä Higgs



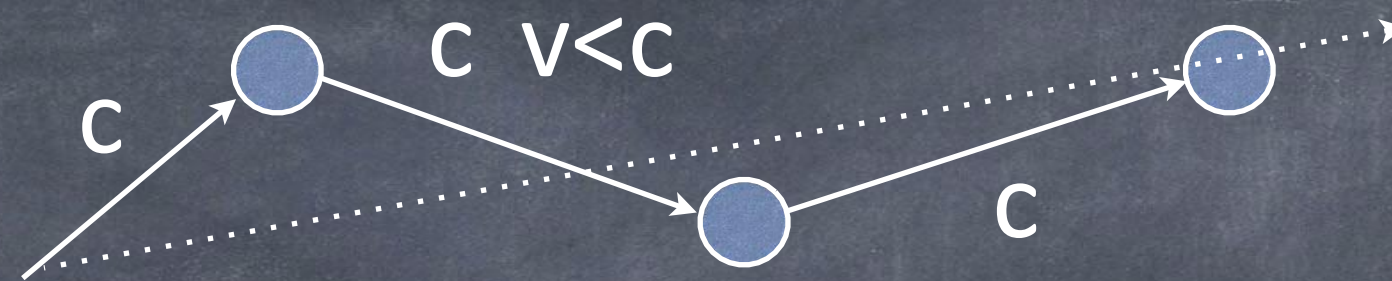
# Higgsin mekanismi



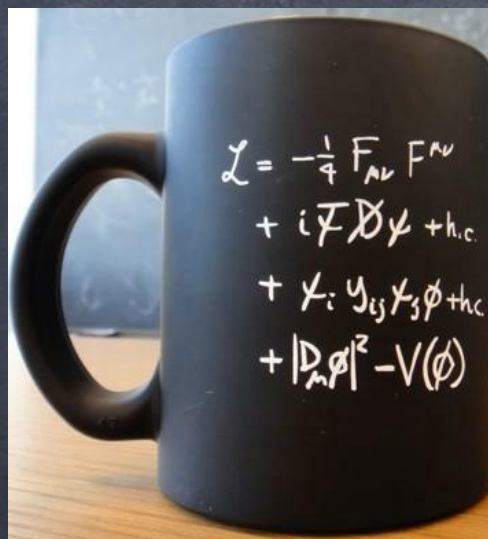
- Kun valo etenee väliaineessa, sen nopeus on pienempi kuin  $c$ . Siroaa kuin pingispallo.
- Higgs et al. ajattelivat että ehkä tyhjiö ei olekaan tyhjä, vaan sen täyttää “Higgsin kenttä”
- Jotkut hiukkaset hidastuvat Higgsin kentässä enemmän kuin toiset  
→ *mitä enemmän hiukkanen hidastuu, sitä raskaampi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



# Higgsin mekanismi



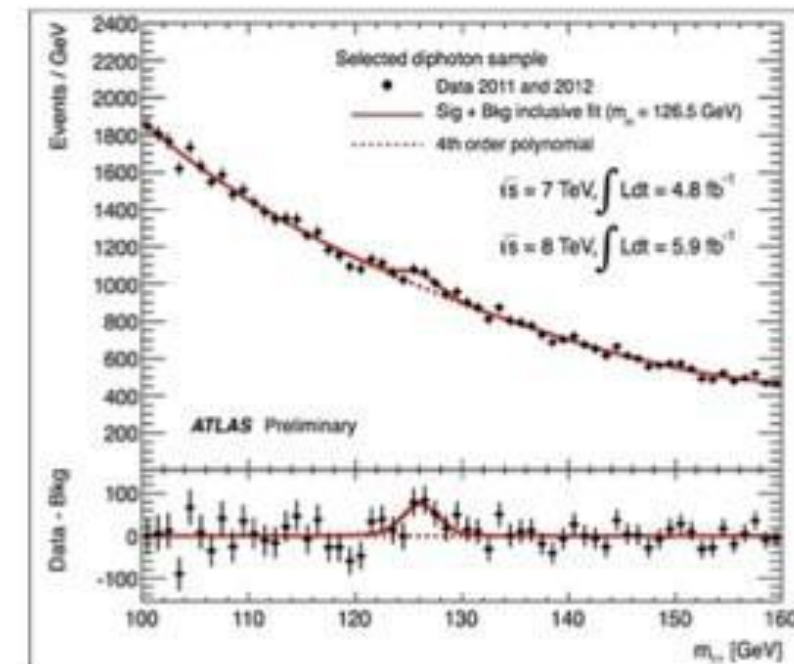
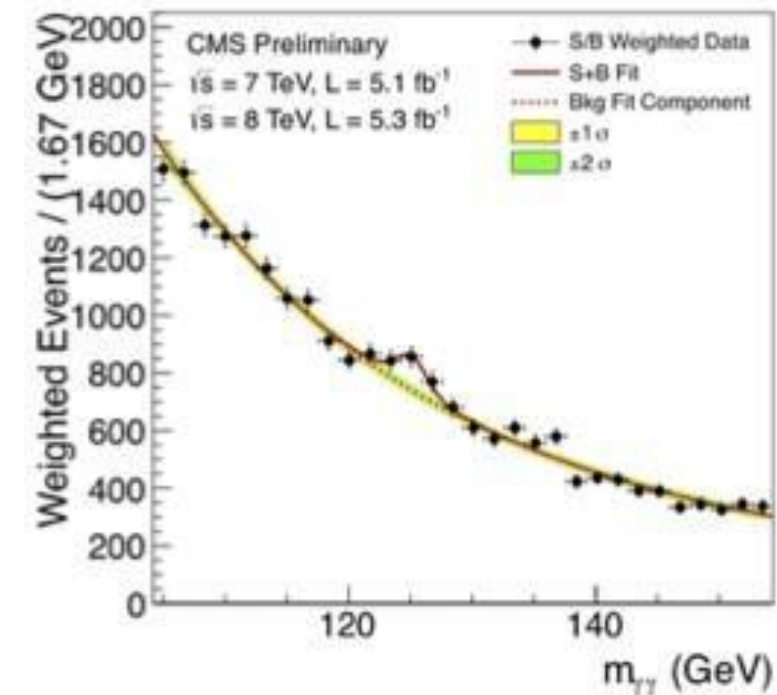
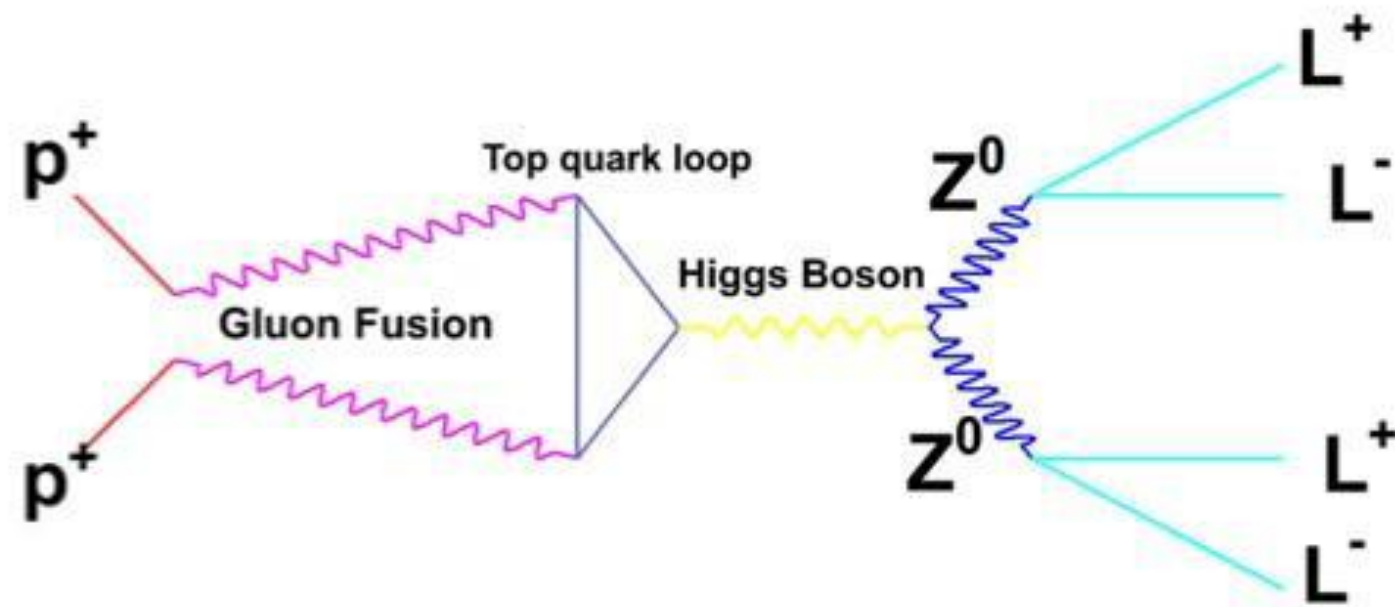
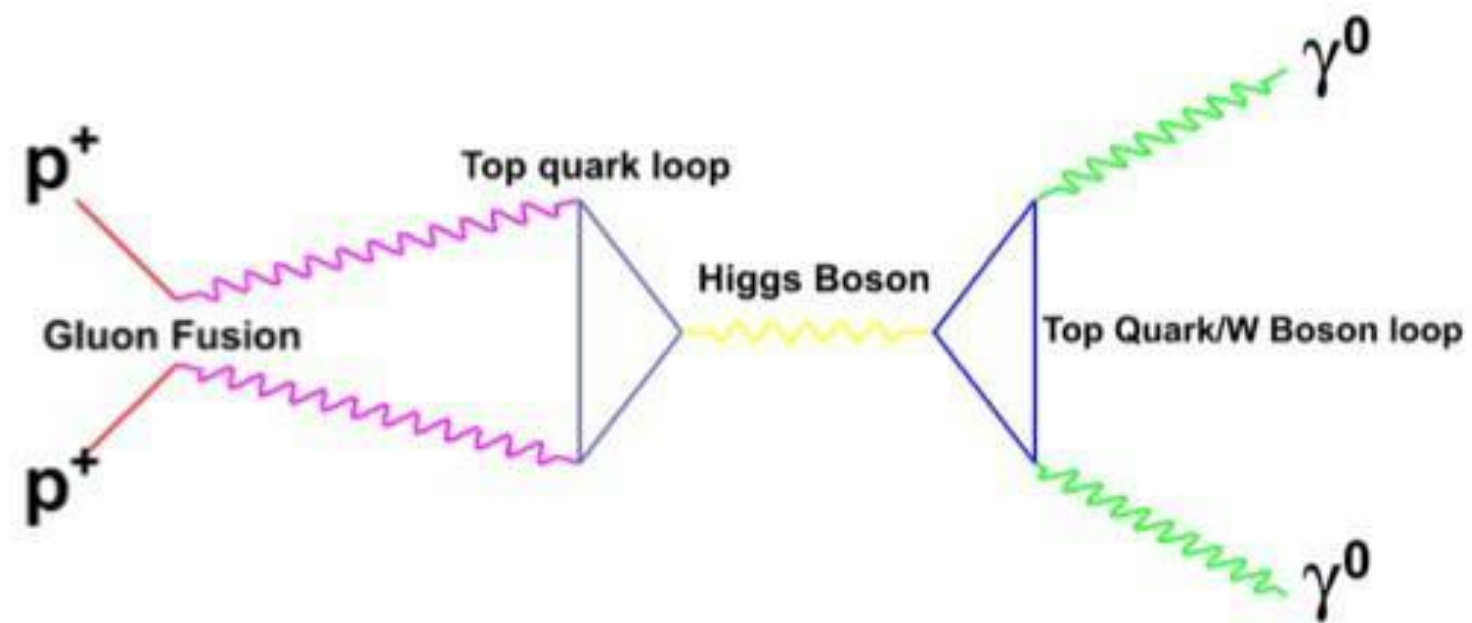
- Kun valo etenee väliaineessa, sen nopeus on pienempi kuin  $c$ . Siroaa kuin pingispallo.
- Higgs et al. ajattelivat että ehkä tyhjiö ei olekaan tyhjä, vaan sen täyttää “Higgsin kenttä”
- Jotkut hiukkaset hidastuvat Higgsin kentässä enemmän kuin toiset  
→ *mitä enemmän hiukkanen hidastuu, sitä raskaampi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



*Jos Higgsin bosoni havaitaan, teoria Higgsin kentästä on oikein!*

# Higgsin bosonin kokeellinen löytö 2012

$m = 125 \text{ GeV}$

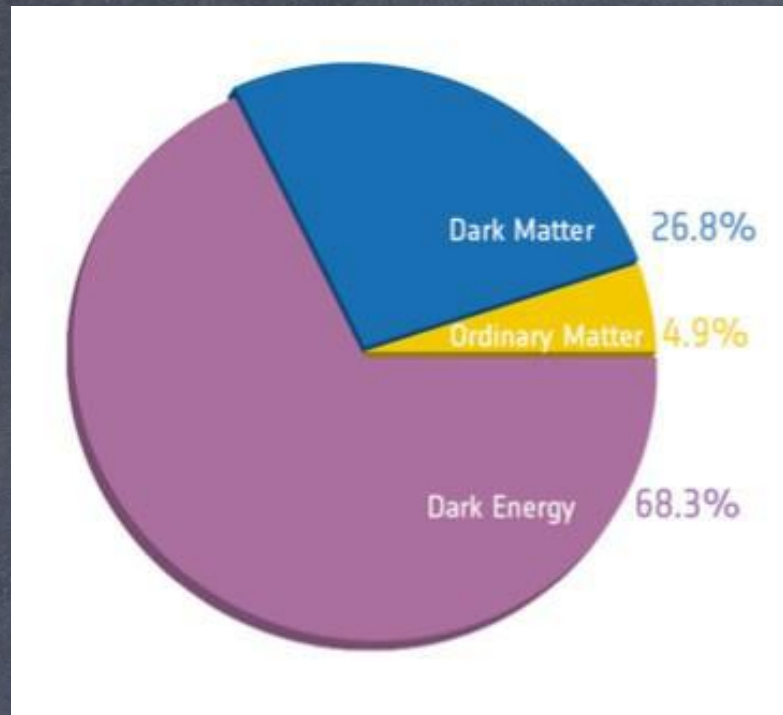


*Maailma ja ymmärrys on valmis, lähdetään kahville!*

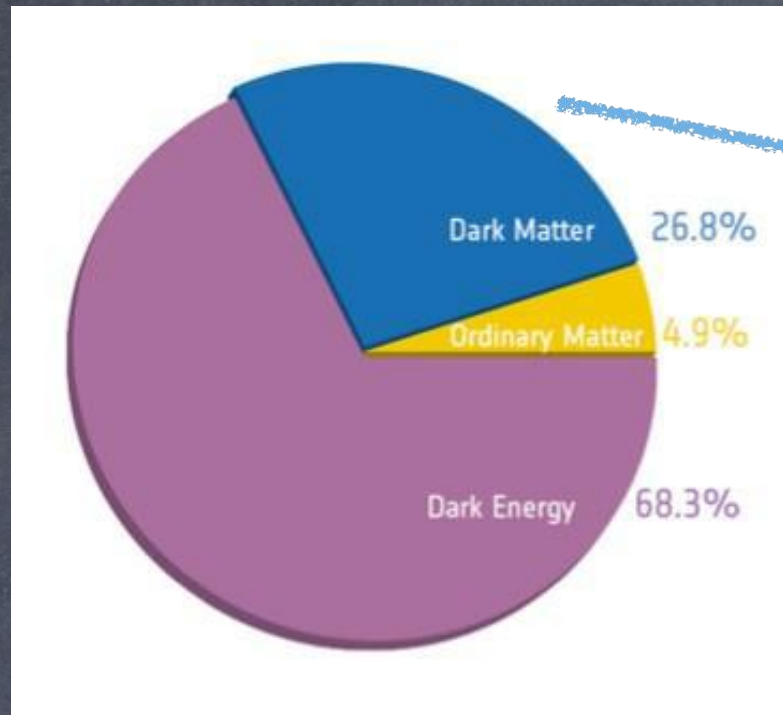
*....vai unohtuiko muutama juttu?*



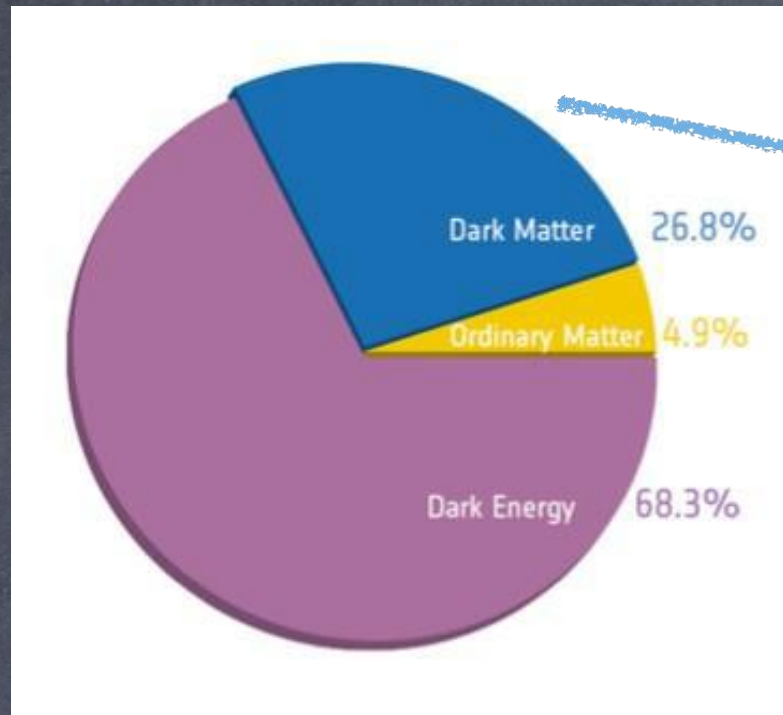
*Mikä tai ketkä tippui kelkasta?*



Mikä tai ketkä tippui kelkasta?



*Mikä tai ketkä tippui kelkasta?*

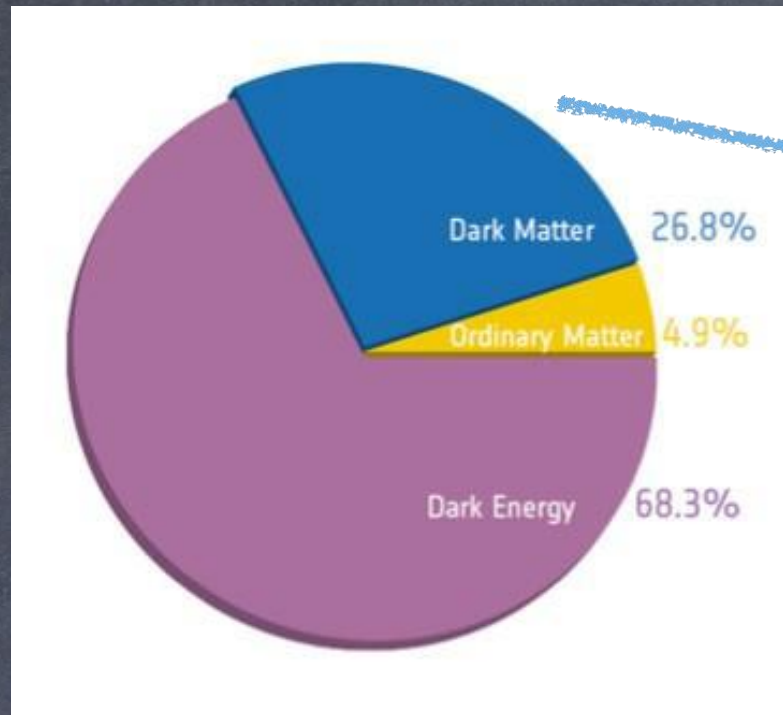


*Kuka dumppasi gravitaation?*

*Missä on gravitoni?*



Mikä tai ketkä tippui kelkasta?



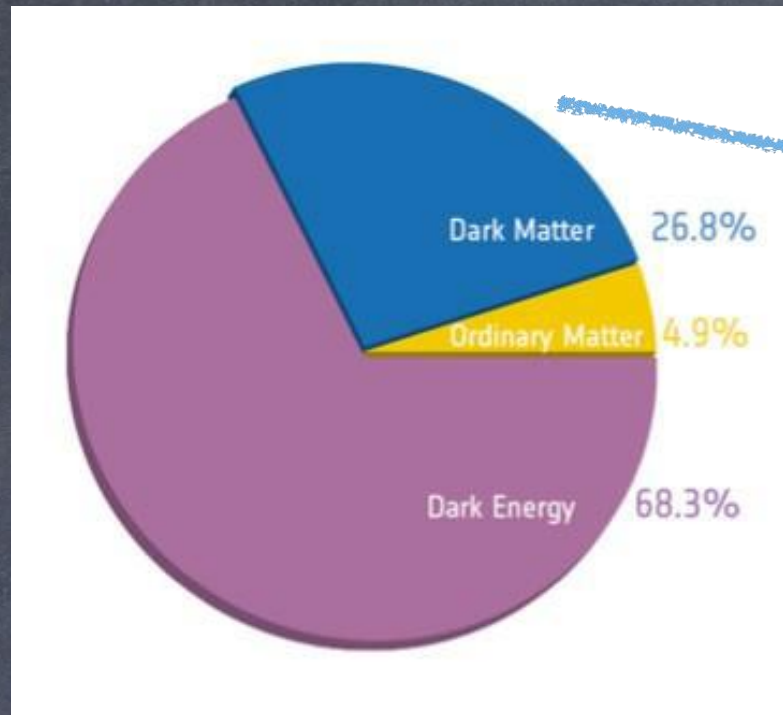
Kuka dumppasi gravitaation?

Missä on gravitoni?



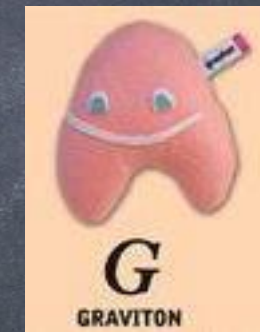
Mistä muodostuu "jaksollisen järjestelmän rakenne"?

*Mikä tai ketkä tippui kelkasta?*



*Kuka dumppasi gravitaation?*

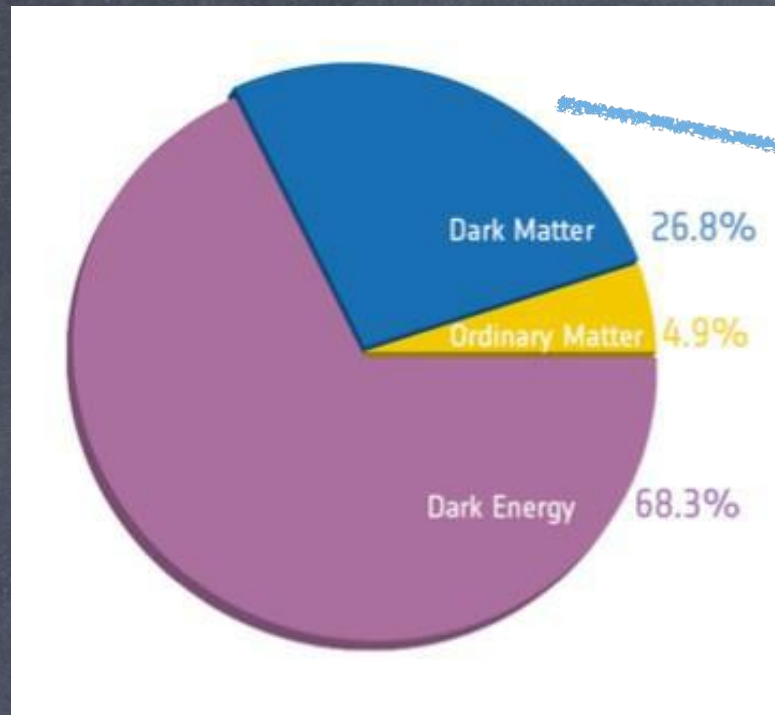
*Missä on gravitoni?*



*Mistä muodostuu "jaksollisen järjestelmän rakenne"?*

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

Mikä tai ketkä tippui kelkasta?



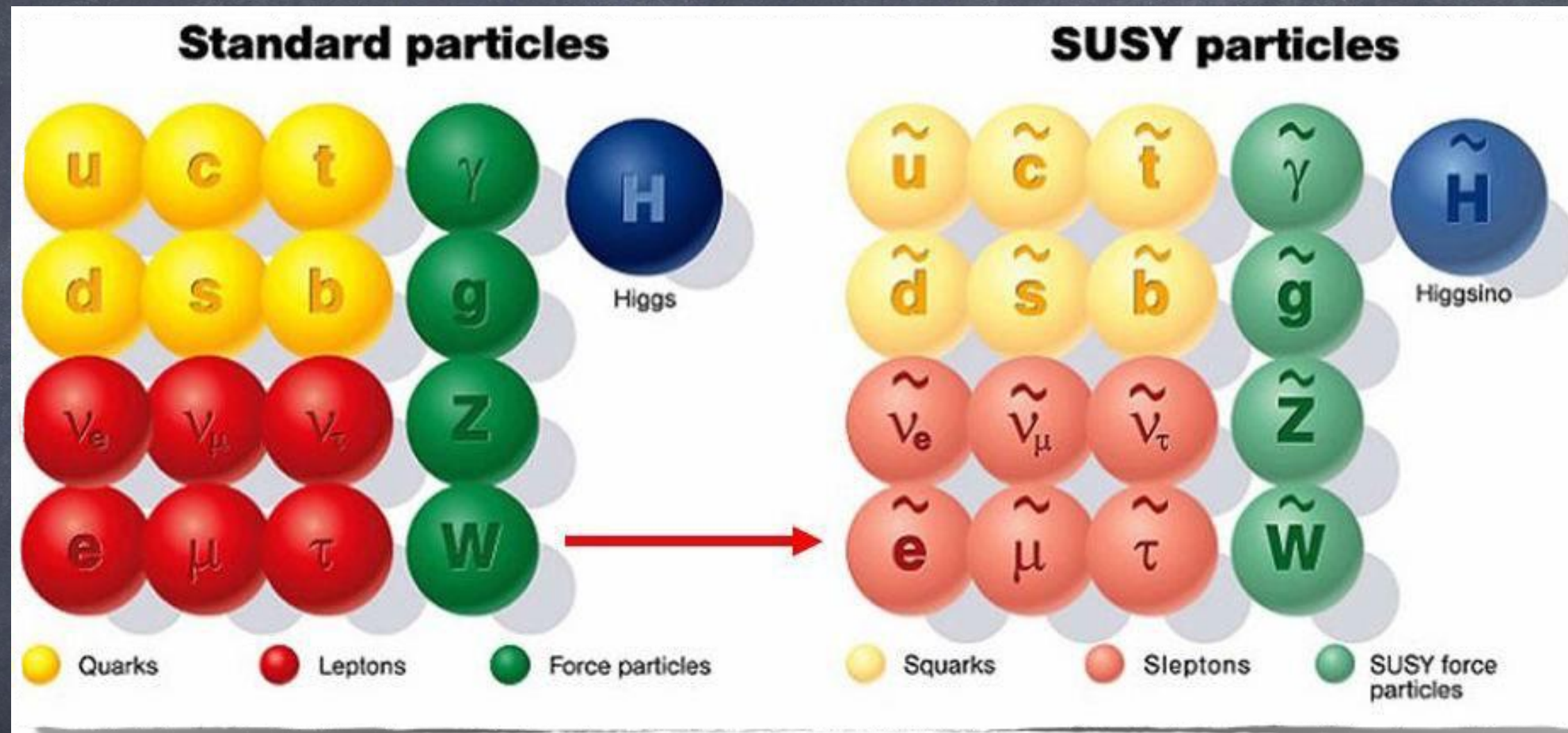
Miksi Higgsin bosoni on niin kevyt... tai kuka domppasi gravitaation? Missä on gravitoni?



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