



- kiihdyttimet
- ilmaisimet
- data-analyysi
- tulevaisuus

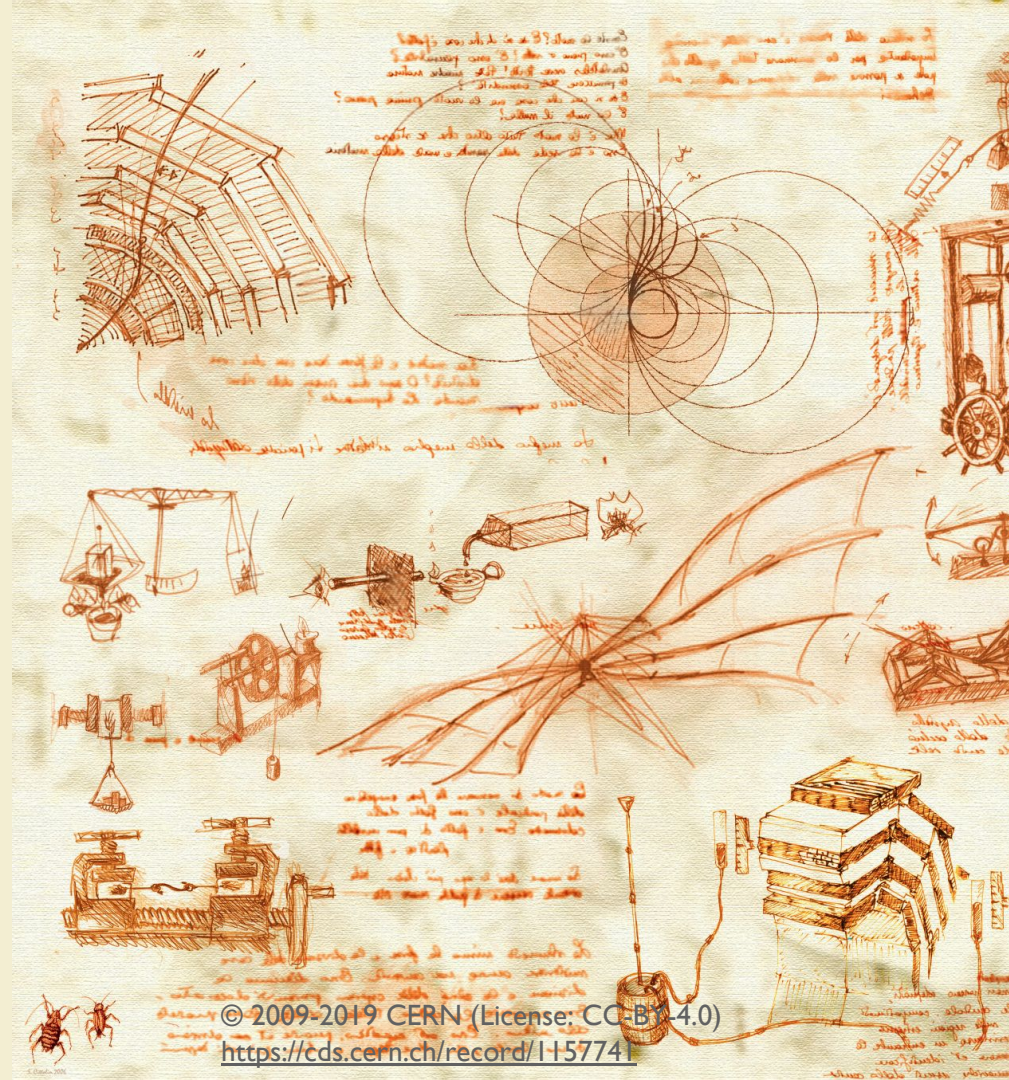
Miten hiukkasia tehdään?

Miten mitata näkymätöntä?

Etsimässä vastauksia tuntemattomaan

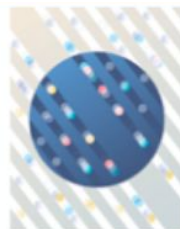
- Miksi ainetta on enemmän kuin antiainetta?
- Mitä on pimeä aine? Pimeä energia?
- Miksi hiukkasperheitä on kolme?
- Mistä neutriinot saavat massan?
- Onko löytämämme Higgsin bosoni ainoa?

Kymmeniä teorioita testattavana!





Higgs boson



Neutrino mass



Dark matter



Cosmic acceleration



Explore the unknown

Energy frontier colliders



X

(X)

X

X

High-precision experiments



X

X

Neutrino experiments



X

X

Direct searches



X

X

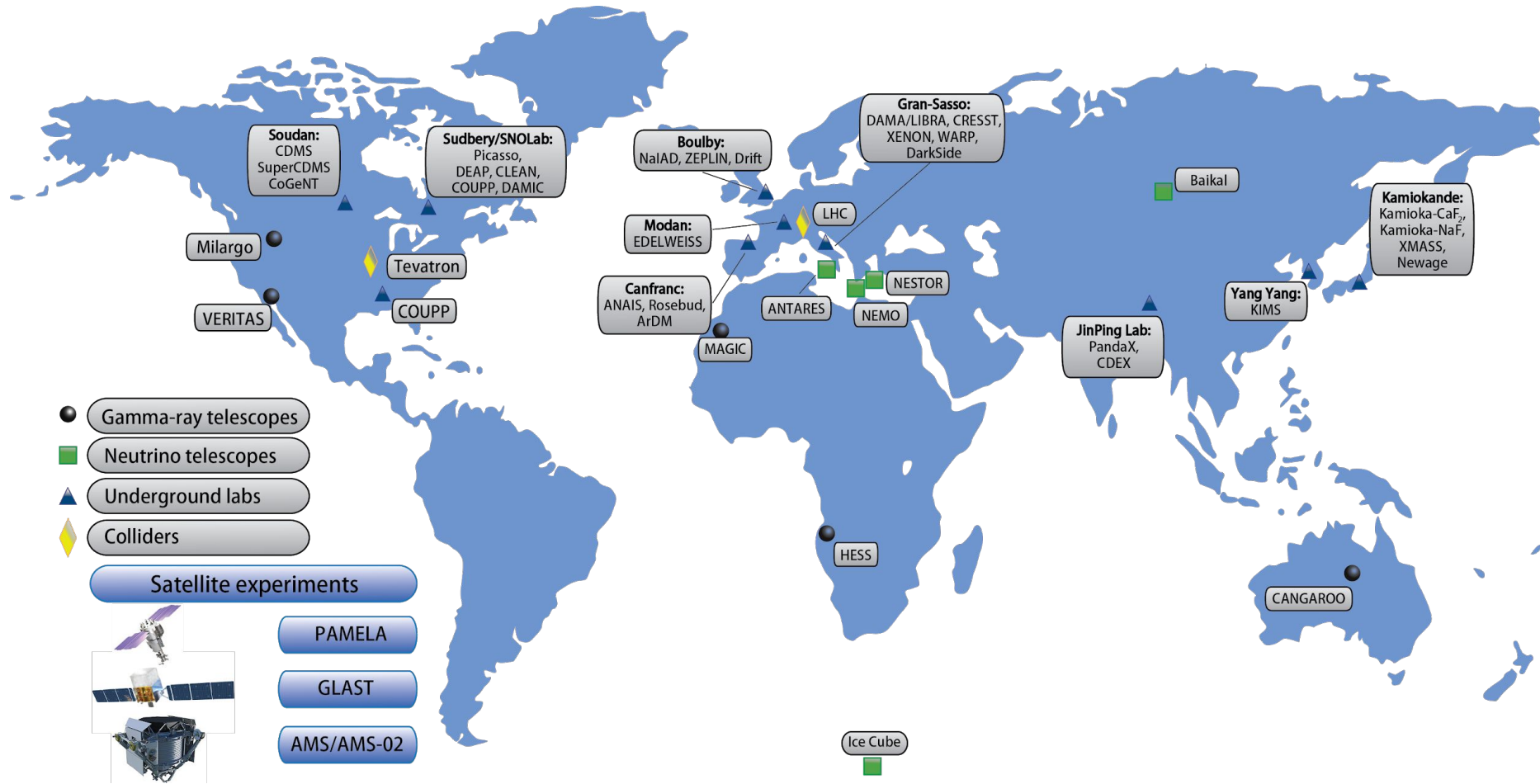
Cosmic surveys



X

X

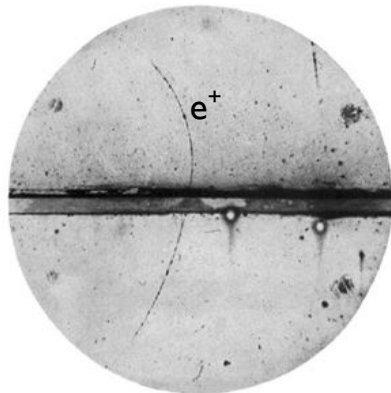
Vain muutama esimerkki monista hiukkasfysiikan kokeista ympäri maailmaa

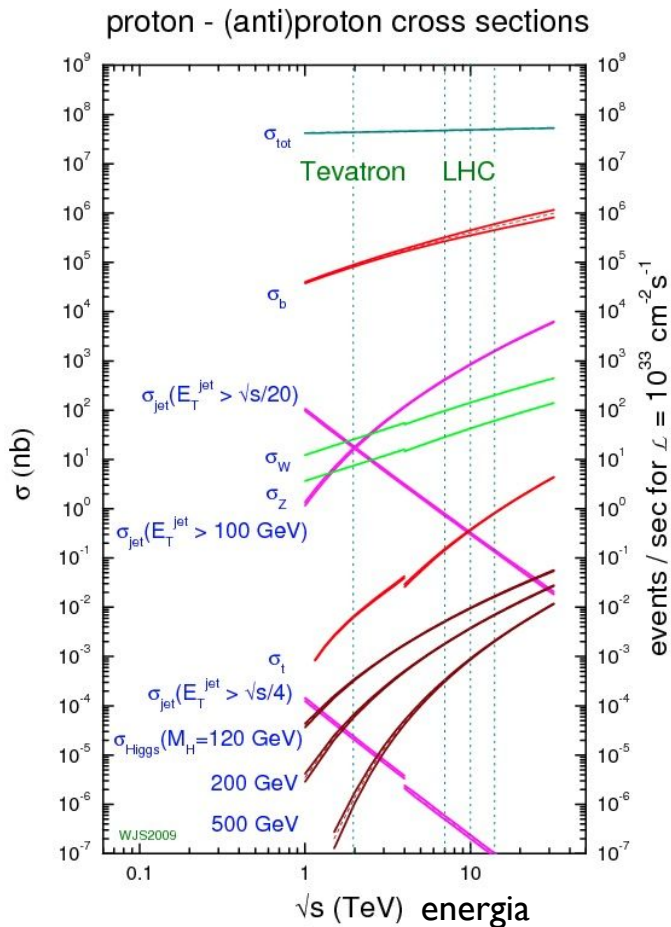


Muistutus: myös yksinkertaisella laitteistolla voi tehdä hiukkasfysiikan tutkimusta!

- uusien hiukkasten havaitseminen (esim. positroni 1932)

lyijylevy





Mitä iloa energiasta?

- Hiukkastörmäyksissä protonien liike-energiaa muuttuu uusiksi hiukkasiksi
- Uusia hiukkasia voi syntyä monenlaisia ja erilaisten prosessien kautta
 - *Kvanttifysiikkaa*: voimme ennustaa vain todennäköisyyksiä
 - Esim. Higgsin havaitseminen todennäköisempää korkeilla energioilla.

Teraelektronivoltti (TeV) ?

1 dumle, 8 g: 36 kcal
1 kcal: $2.6 \cdot 10^{10}$ TeV



> LHC?

Yhden protonin energia on 7 TeV
mutta yhdessä *protonikimpussa* on 10^9 protonia!



Mistä näitä protoneja oikein tulee?

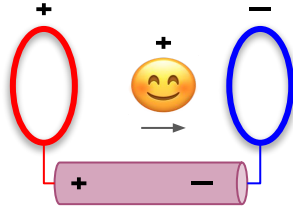


← protonilähde

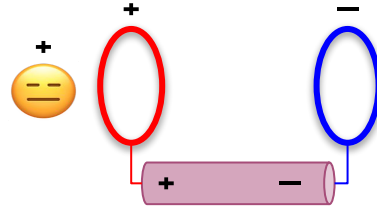
Vetyatomeista erotetaan elektroneja sähkökentällä, jolloin jäljelle jää protoneja.

“Hiukkasen kiihdytin”

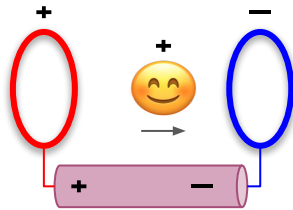
Hiukkaskiihdyttimet perustuvat varatun hiukkasen kiihdyttämiseen sähkökentällä



Protoni matkustaa positiiviselta negatiiviselle navalle, ja sen nopeus kiihtyy.



Positiivinen varaus hylkii protonia.



Jos protonin halutaan kiihdyttävän, napaisuutta täytyy vaihdella tietyllä taajuudella.

→ *Linearikiihdyttimet* käyttävät radiotaajuusresonaattoreita (RF)



Varattu hiukkanen magneettikentässä

Hiukkasen rata kaareutuu magneettikentässä:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Newtonin 2. laki: $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$

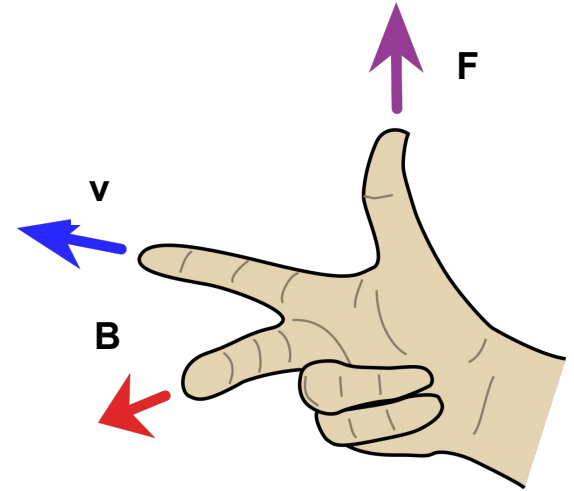
Keskeiskiihtyvyys $a = v^2/R$

Liikemäärä: $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$

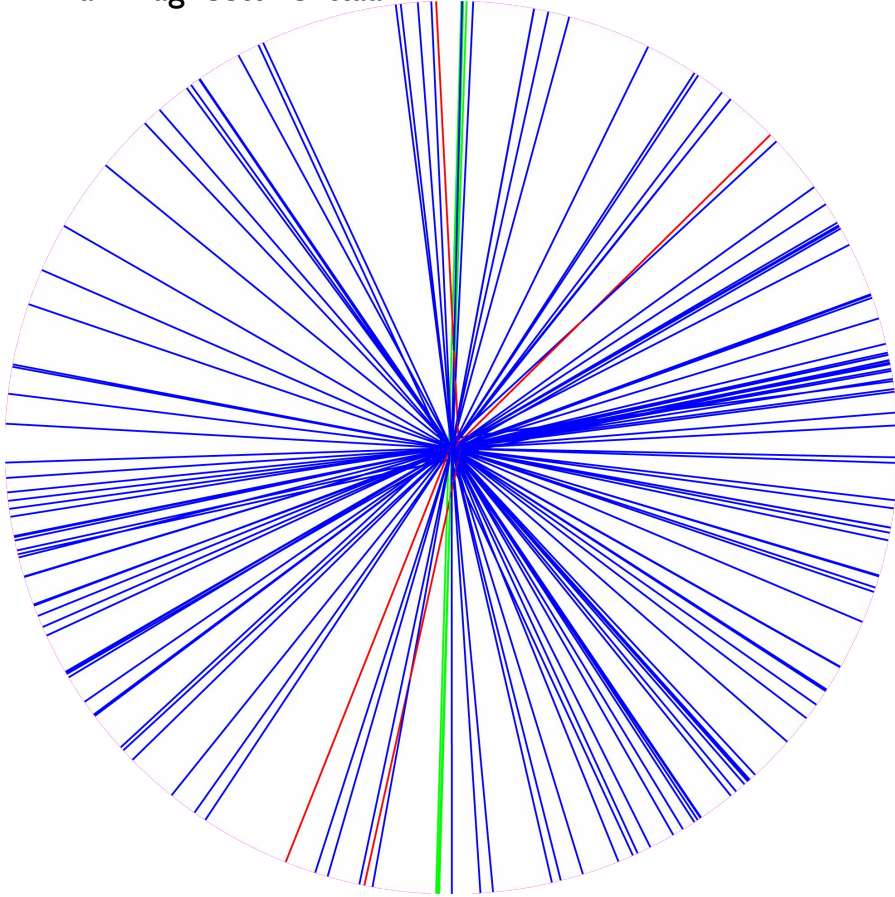
$$\rightarrow p = qRB$$

suurempi liikemäärä \rightarrow suurempi kaarevuussäde

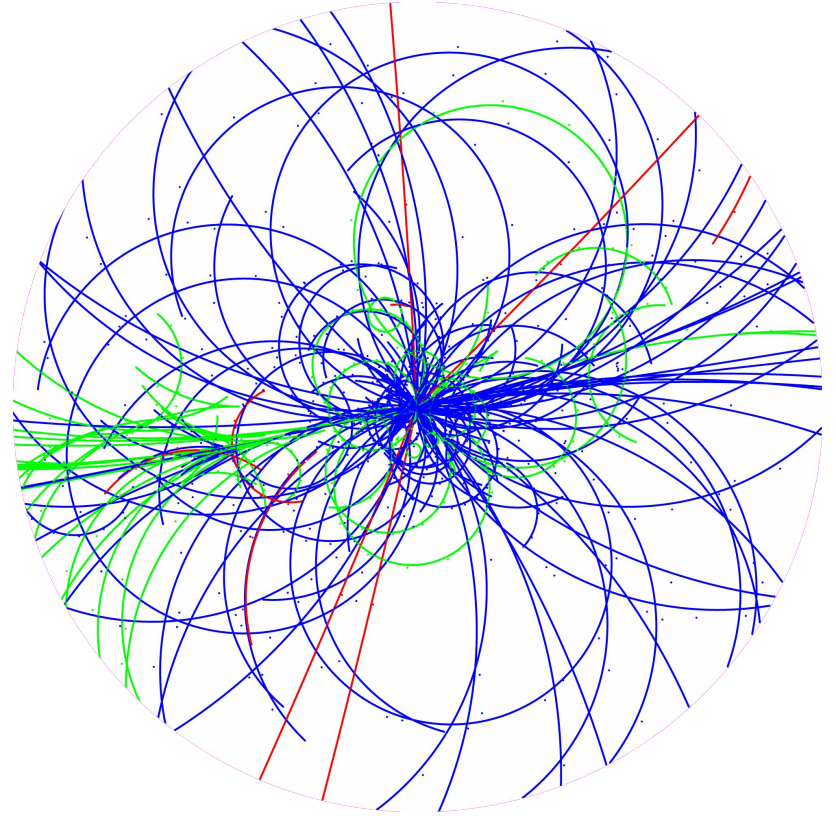
Jos magneetin voimakkuus rajoittaa, kannattaa rakentaa suurempi kiihdytinrenkas!



Ilman magneettikenttää



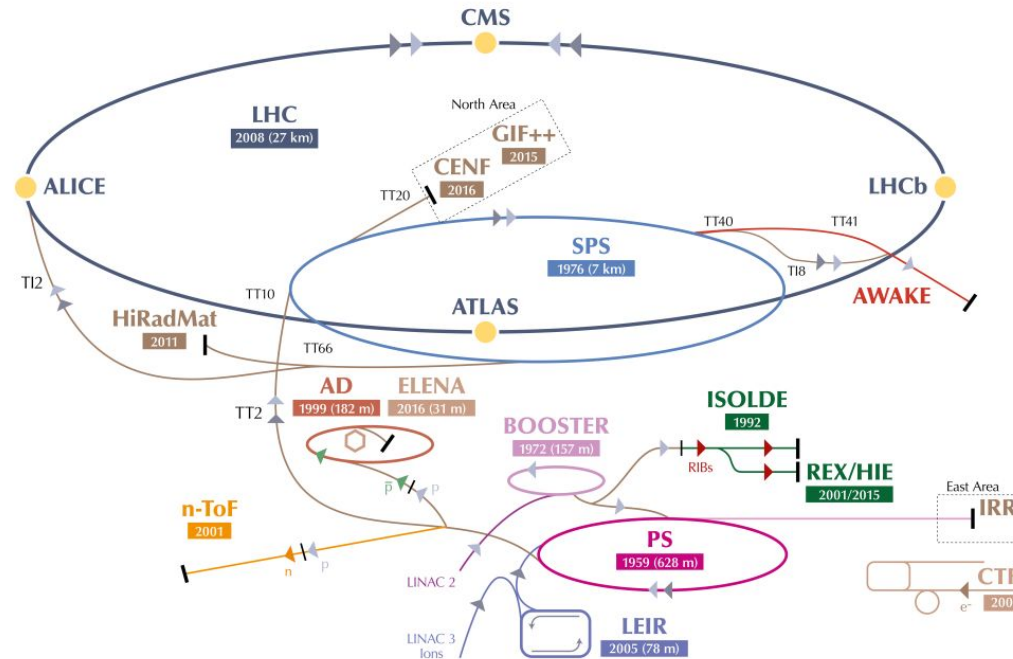
Magneettikentän kanssa



Mitä pienempi hiukkasen liikemäärä on, sitä enemmän ne taipuvat.

LHC:n esikiihdyttimet

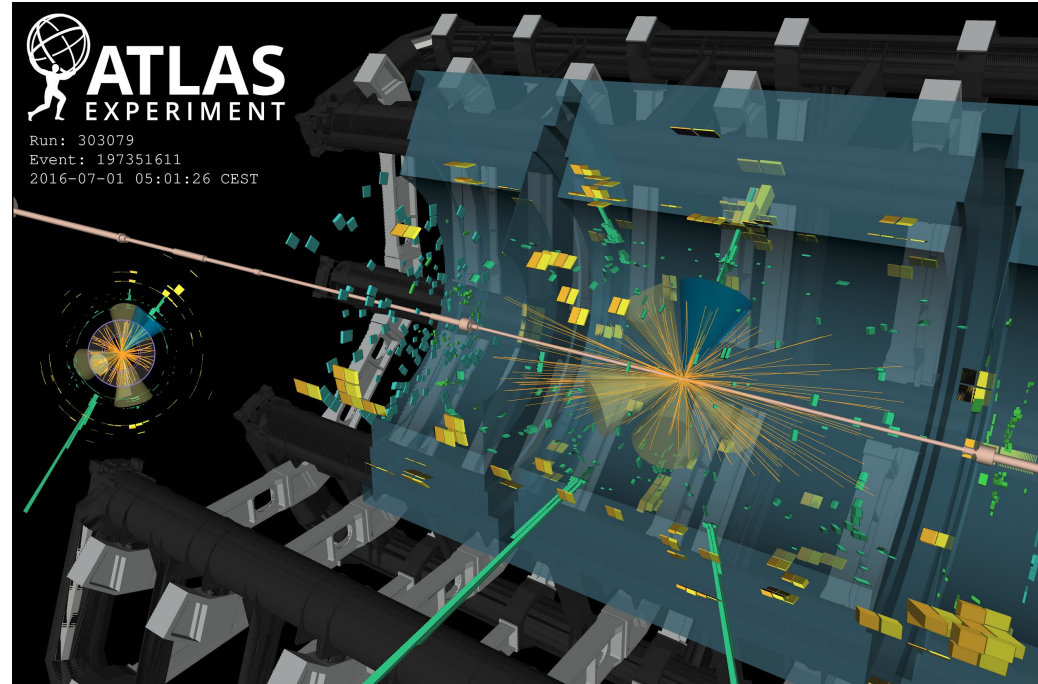
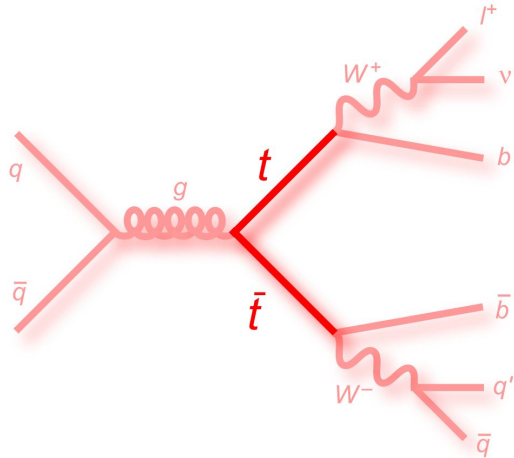
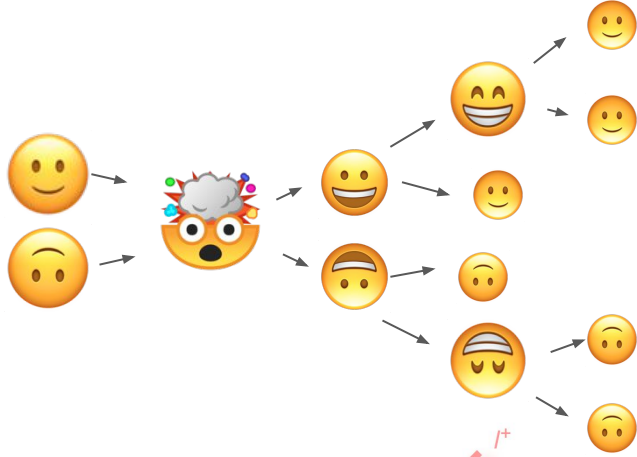
- Laitteiston pienentämiseksi hiukkaset kierrätetään ympyrää ja yhtä kiihdytinjaksoa käytetään uudelleen ja uudelleen
- Suureen liike-energiaan vaaditaan esikiihdyttimien ketju:
- **Linac 2:** protoneille 50 MeV
- **Proton Synchrotron Booster (PSB):** protoneille 1.4 GeV
- **Proton Synchrotron (PS):** protoneille 25 GeV
- **Super Proton Synchrotron (SPS):** protoneille 450 GeV
- **LHC:** protoneille 7 TeV



Hiukkastörmäykset

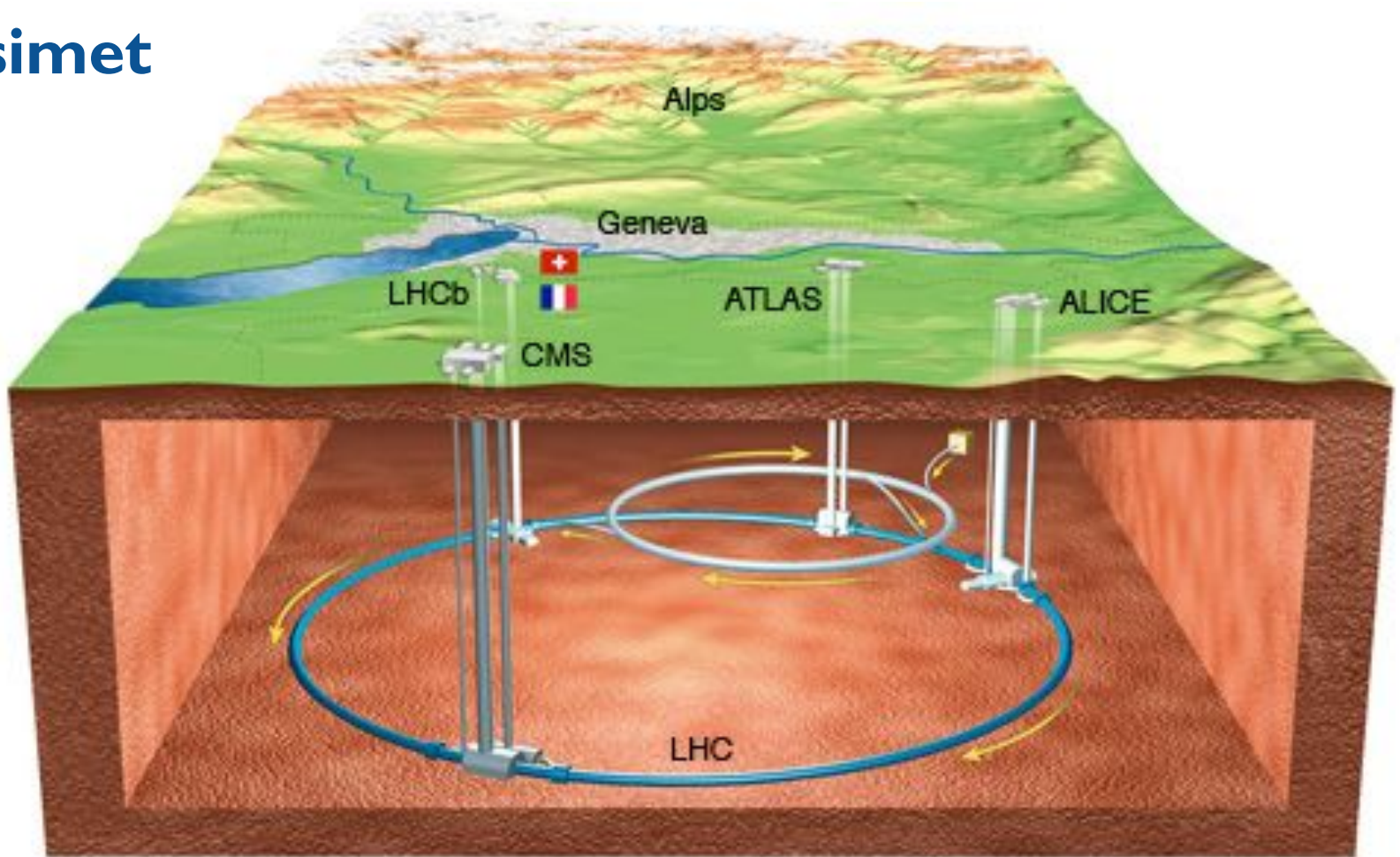
Törmäyksessä liike-energia muuttuu uusien hiukosten massaksi

$$E = mc^2$$

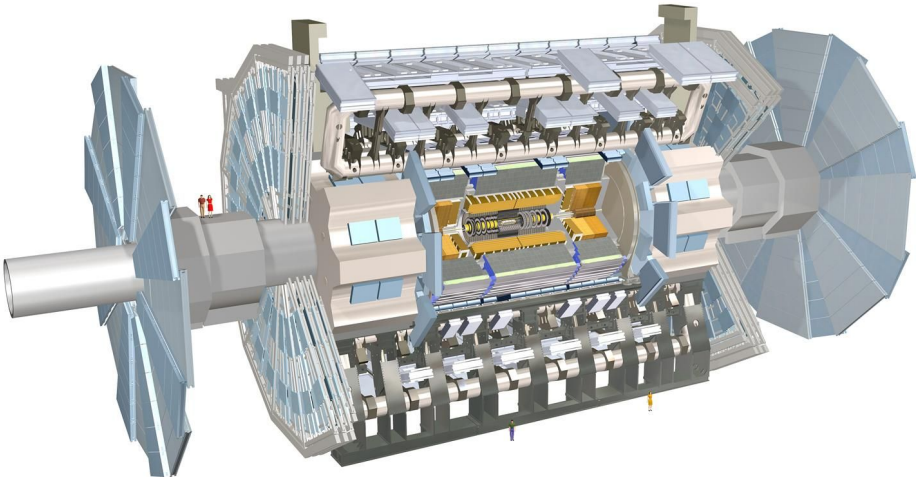


arXiv:1806.00425

Ilmaisimet



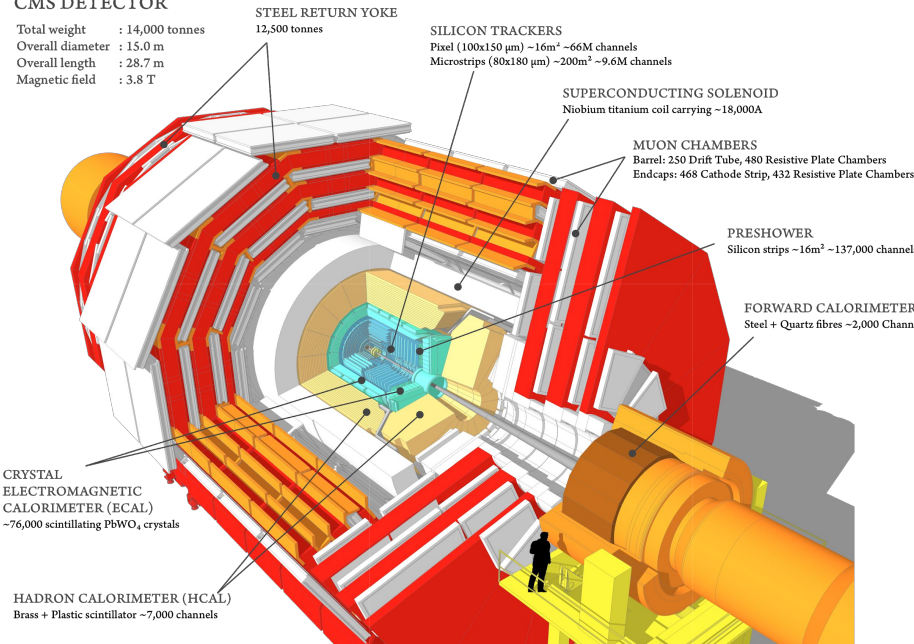
A Toroidal LHC ApparatuS



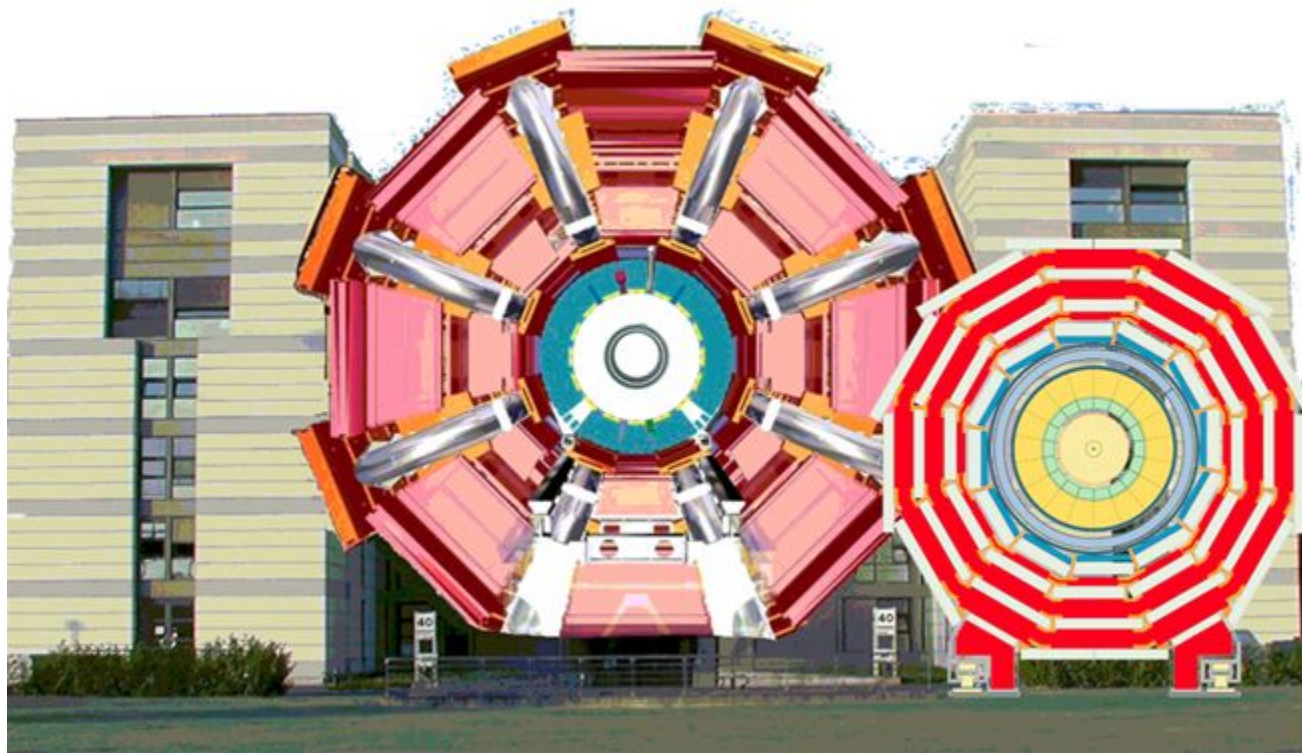
Compact Muon Solenoid

CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
 Overall diameter : 15.0 m
 Overall length : 28.7 m
 Magnetic field : 3.8 T



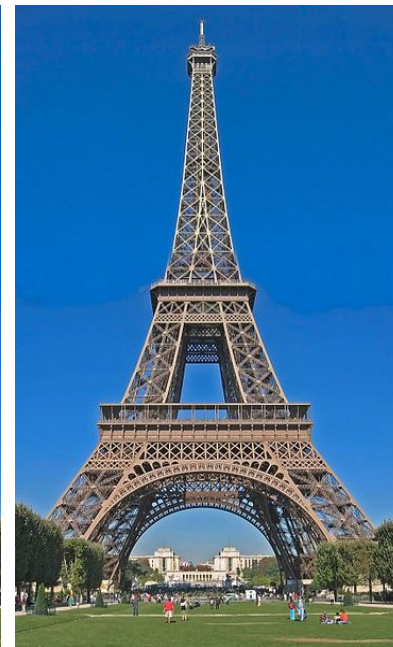
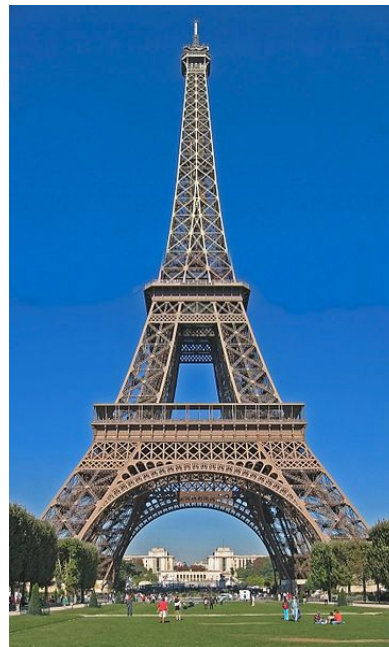
4 π !





ATLAS: 44 m

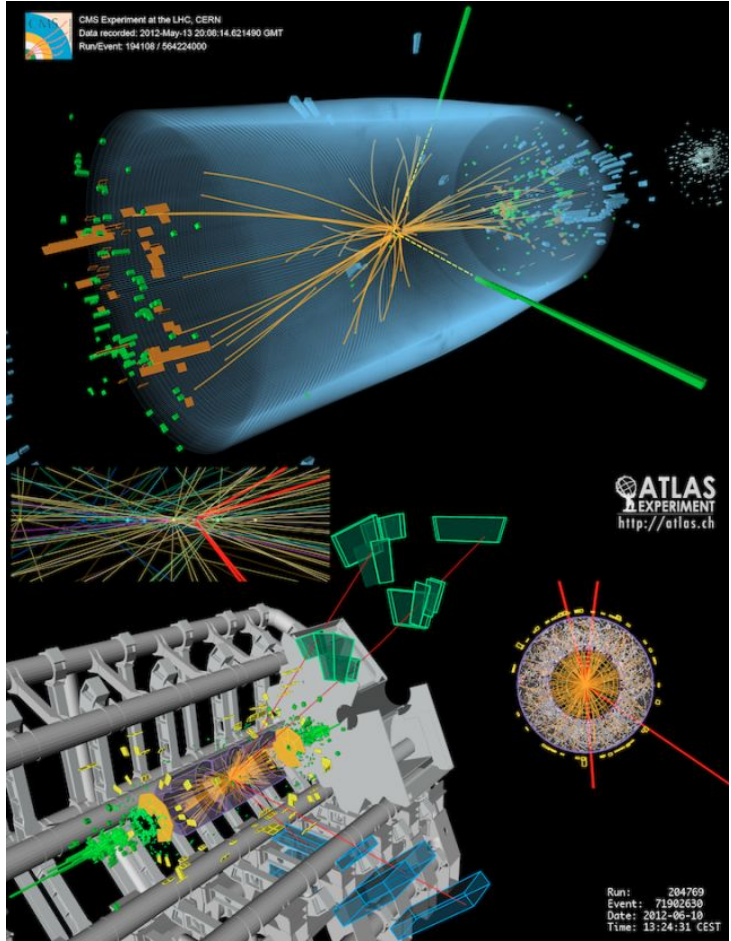
Notre Dame: 48 m



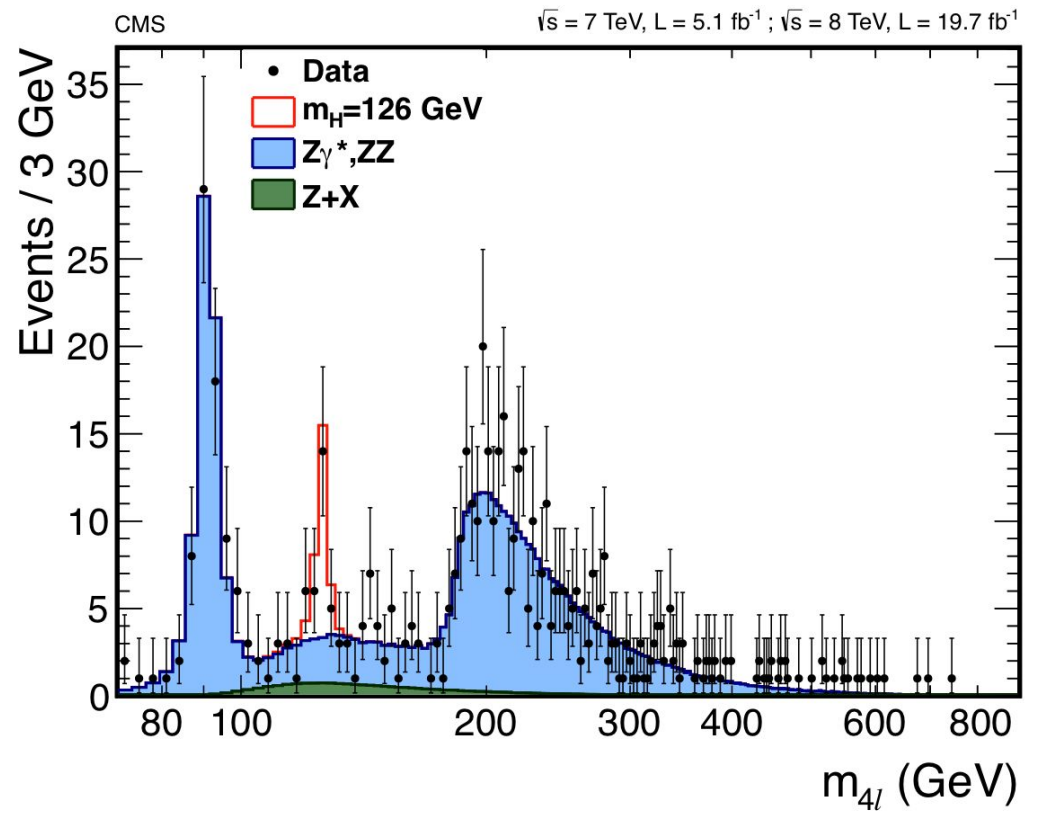
CMS: 14 000 tonnia

Eiffel-torni: 7300 tonnia

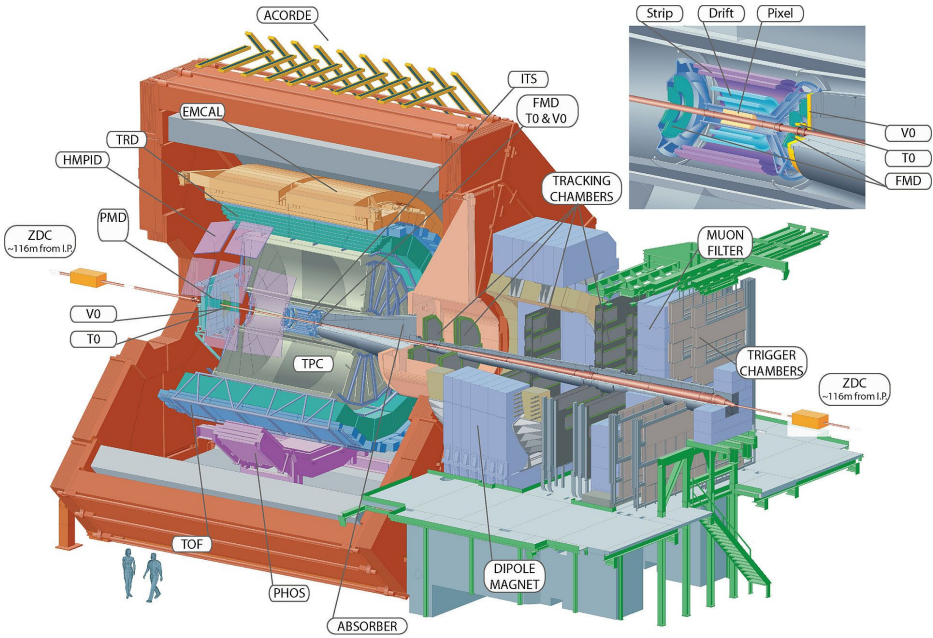
Higgsin bosoni



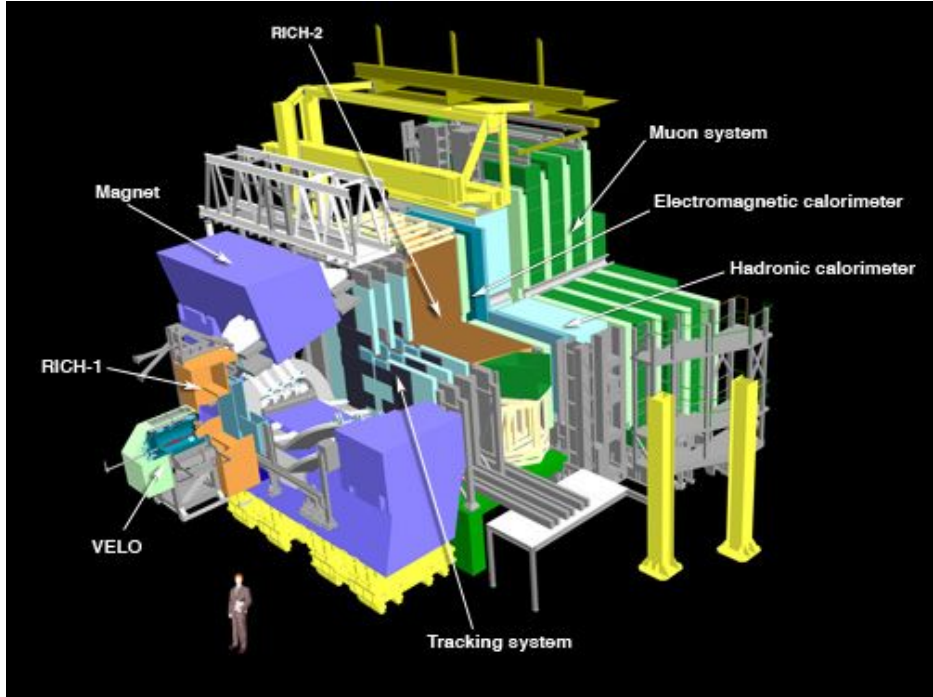
4.7.2012: ATLAS ja CMS havaitsevat
8.10.2013: Nobel: François Englert ja Peter Higgs



A Large Ion Collider Experiment

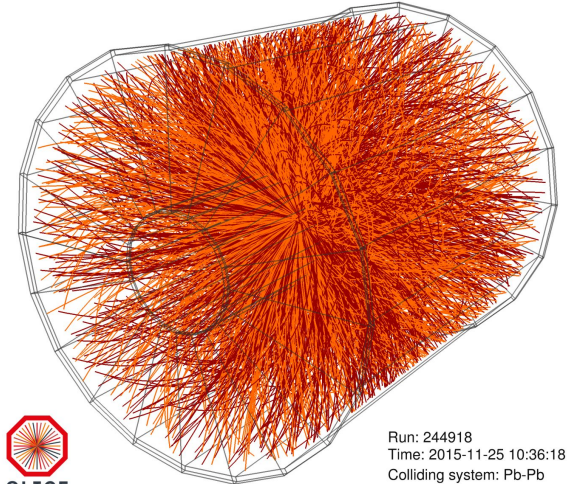
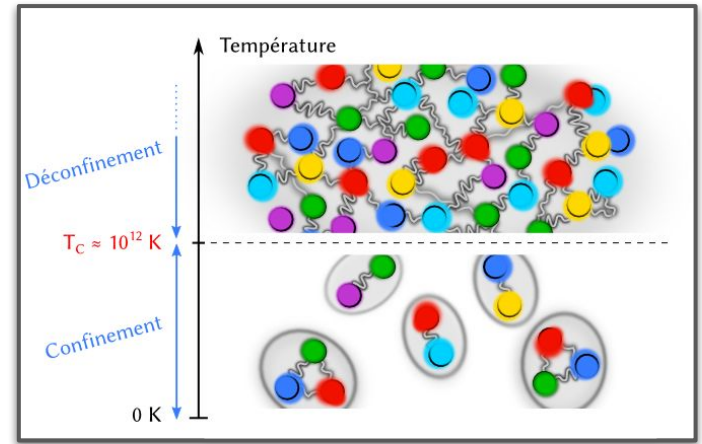


LHC beauty apparatus



ALICE

- Tutkii raskaiden ionien (kuten lyijy) törmäyksiä
- Hiukkastörmäyksissä saadaan 100 000 kertaa suurempia lämpötiloja kuin Auringon keskustassa
- Aineen olotila juuri alkuräjähdyksen jälkeen
- *Kvarkki-gluoniplasma*: protonit ja neutronit "sulavat", kvarkit ja gluonit vapautuvat



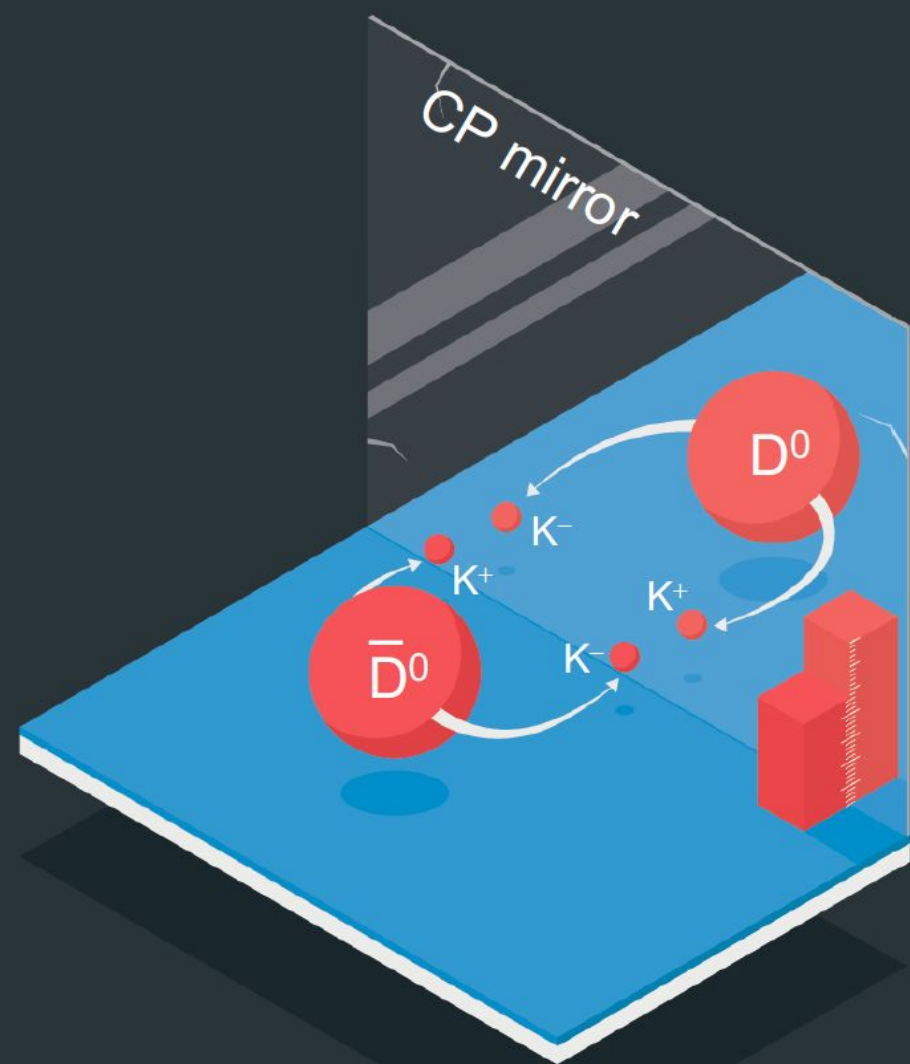
LHCb 21.3.2019 uusi löytö: CP-rikkoo lumo-hiukkasten hajoamisissa



- Varaus-pariteettirikko
→ miksi maailmankaikkeudessa enemmän ainetta kuin antiainetta?
- Havaittiin ensimmäistä kertaa D-mesoneilla (sisältää c-kvarkkeja)
- Havaittu jo aiemmin K- ja B-mesoneilla (sisältävät s- ja b-kvarkkeja)

massa →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
varaus →	2/3	2/3	2/3
spin →	1/2	1/2	1/2
	u ylös	c lumo	t huippu
	d alas	s outo	b pohja

KVARKKIT

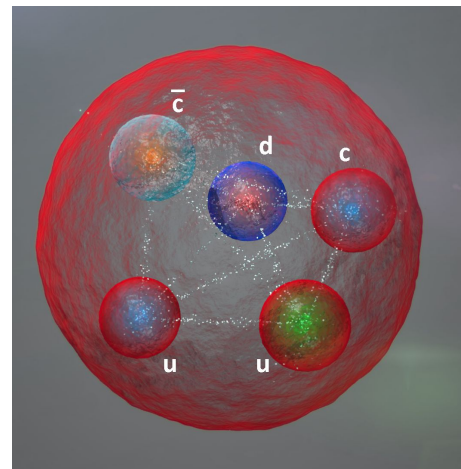
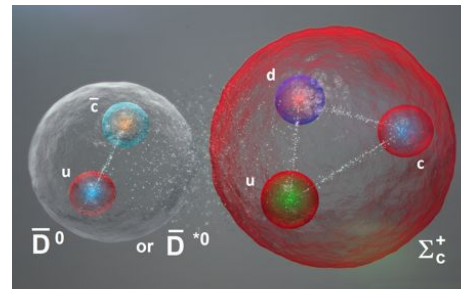


LHCb: Uusia pentakvarkkeja!

Vahvasti vuorovaikuttavat hiukkaset:

- Mesonit (kvarkki-antikvarkki-pari)
- Baryonit (kolme kvarkkia)

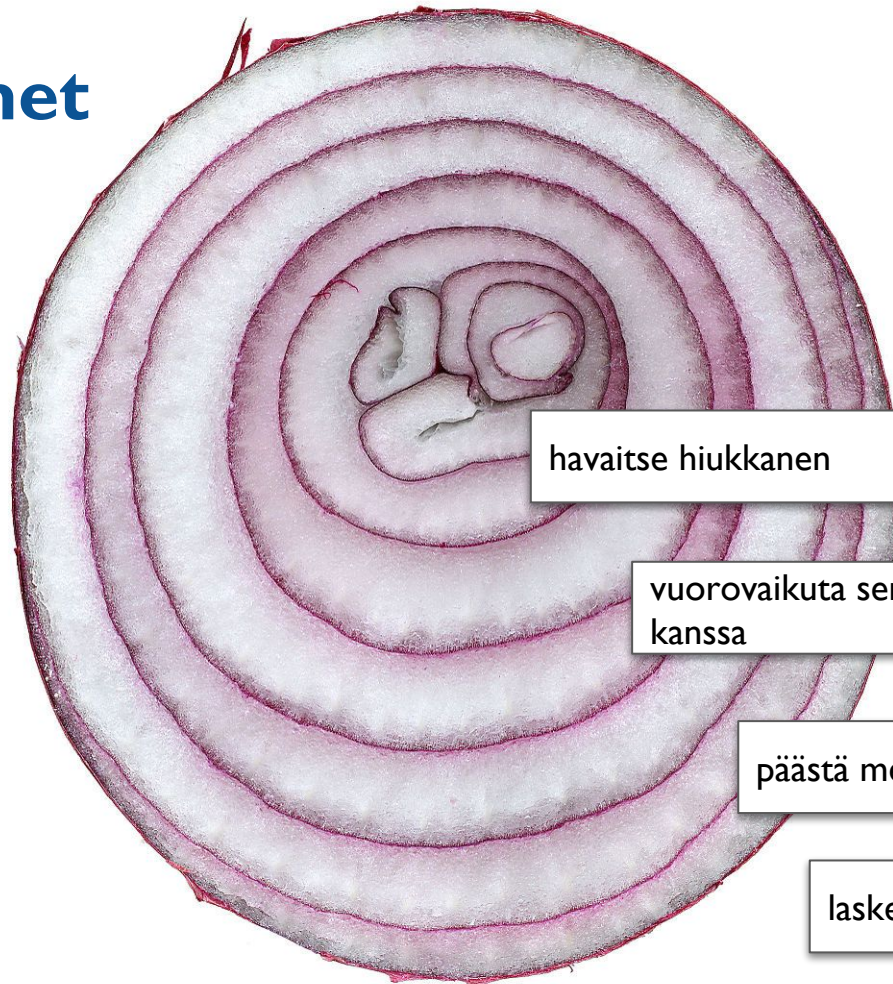
Hiukkaset, joita ei voida lajitella näin, ovat *eksoottisia hadroneita*





Miten mitata näkymätöntä?

Yleisilmaisimet



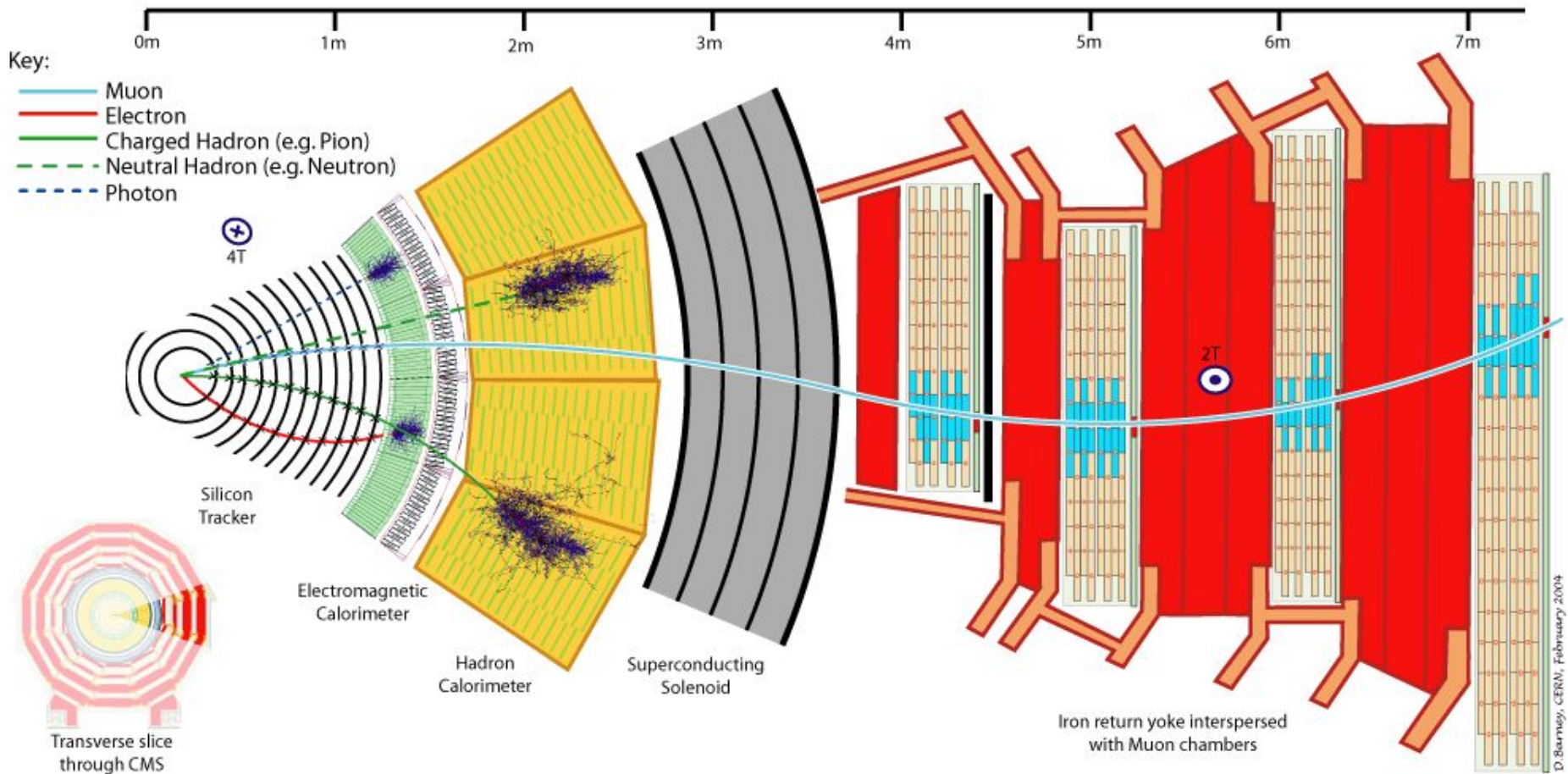
havaitse hiukkanen

vuorovaikuta sen kanssa

päästä menemään

laske: puuttuuko jotain?

Hiukkasten tunnistaminen



Törmäysten valitseminen

- Vain osa hiukkastörmäyksistä on mielenkiintoisia, emmekä pysty tallentamaan kaikkia tapahtumia myöhempää käsittelyä varten.
- **I-tason liipaisu** (Level-I, hardware) valitsee 100 kHz, päätökseen aikaa n. 1 μ s
- **HLT-liipaisu** (software) valitsee n. 250 Hz (= 250 MB/s) tapahtumia tallennettavaksi, päätökseen aikaa n. 1 ms
- Dataa kertyy n. 50 000 TB/vuosi, eli 50 PB/vuosi
- CERNissä kerätty jo yli 200 PB dataa!

hiukkastörmäyksiä
40 MHz

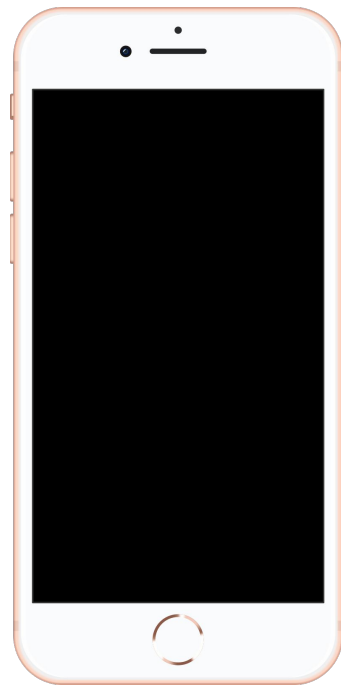


Törmäysten valitseminen

Analogia valokuvaamiseen:

- otetaan 40 miljoonaa kuvaa sekunnissa
- jokaisen kuvan koko n. 1 MB
- kuva otetaan n. 500 eri osassa
- kuvan osat yhdistetään nopealla kytkimellä
- yhdistetyt osat analysoidaan 50 000 prosessorilla
- valitaa n. 250 mielenkiintoista kuvaa sekunnissa ja tallennetaan ne arkistoon

200 PB
= 781250 x 256 GB
= 781250 x iPhone8



Data-analyysi pähkinäkuoressa

- Kun valittu data on kerätty, päästään sitä vihdoin analysoimaan:
 - tarkemmat mittaukset, esim. todennäköisyydet ja hiukkasten ominaisuudet
 - uuden fysiikan etsiminen
- Tapahtumien valitseminen
 - perustuen johonkin muuttujaan
 - koneoppiminen
- Tilastollinen analyysi



Paljon haasteita:

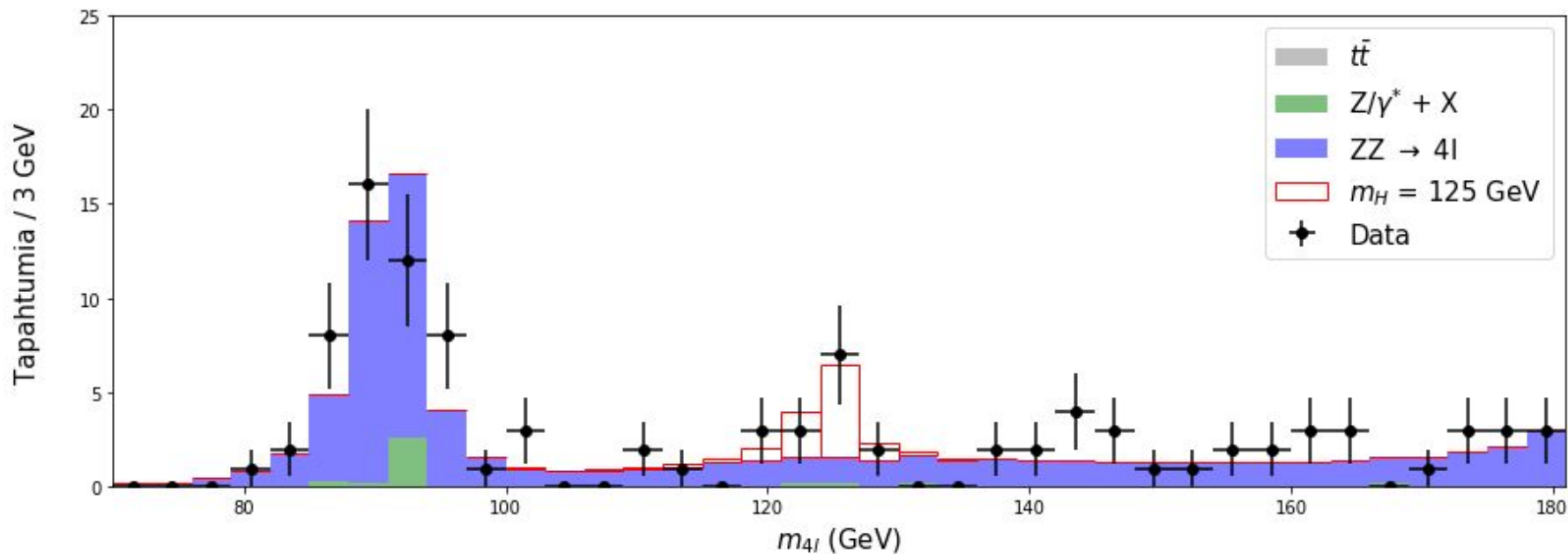
- Mistä aloittaa: mitä etsiä ja tutkia?
- Miten mallintaa tausta oikein? (“feikit”, simulaatiot vs. data)
- Miten vähentää taustan määrää, jotta signaali erottuu selvemmin?
- Miten tulkita dataa oikein ja tehdä tilastollinen analyysi oikein?



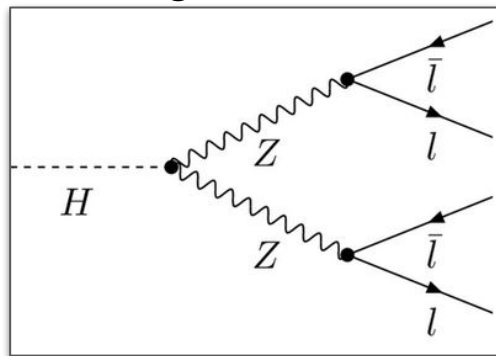
```
plt.title('$ \sqrt{s} = 7$ TeV, L = 2.3 $fb^{-1}$; $ \sqrt{s} = 8$ TeV, L = 11.6 $fb^{-1}$ \n', fontsize = 12)  
plt.xlabel('$m_{4l}$ (GeV)', fontsize = 15)  
plt.ylabel('Tapahtumia / 3 GeV\n', fontsize = 15)  
plt.ylim(0,25)  
plt.xlim(rmin,rmax)  
plt.legend(fontsize = 15)  
  
plt.show()
```

muistutus tammikuulta!

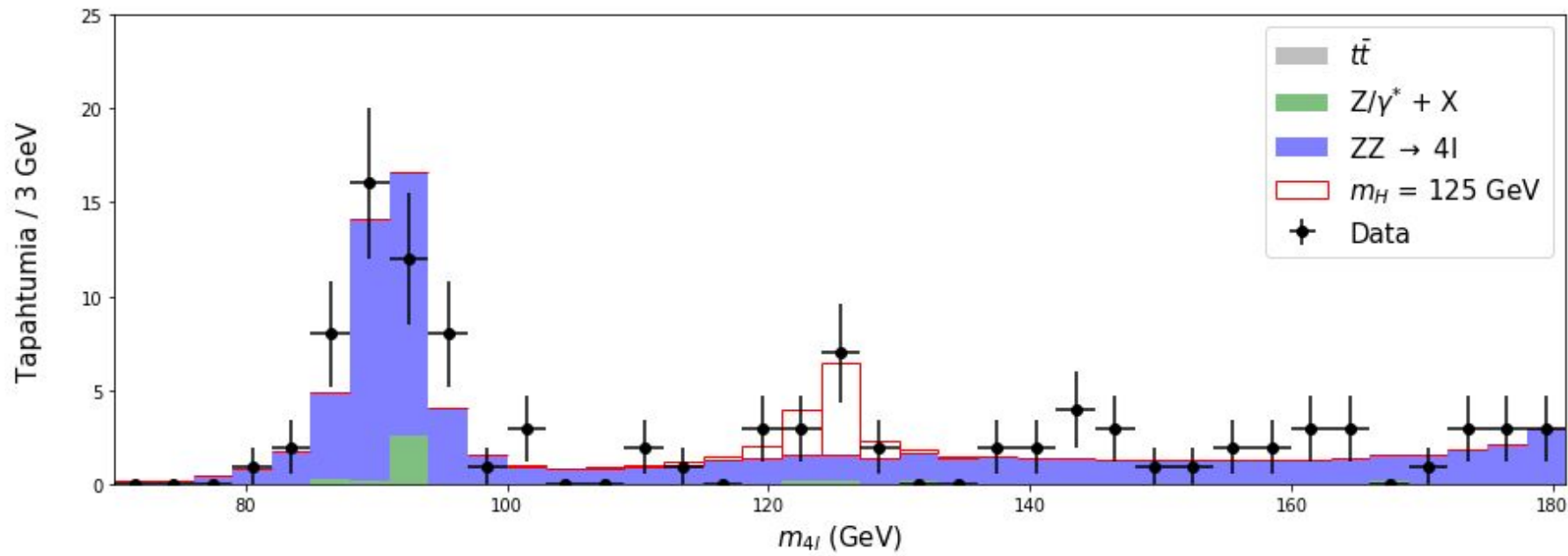
$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}, L = 2.3 \text{ fb}^{-1}; \sqrt{s} = 8 \text{ TeV}, L = 11.6 \text{ fb}^{-1}$



Signaali

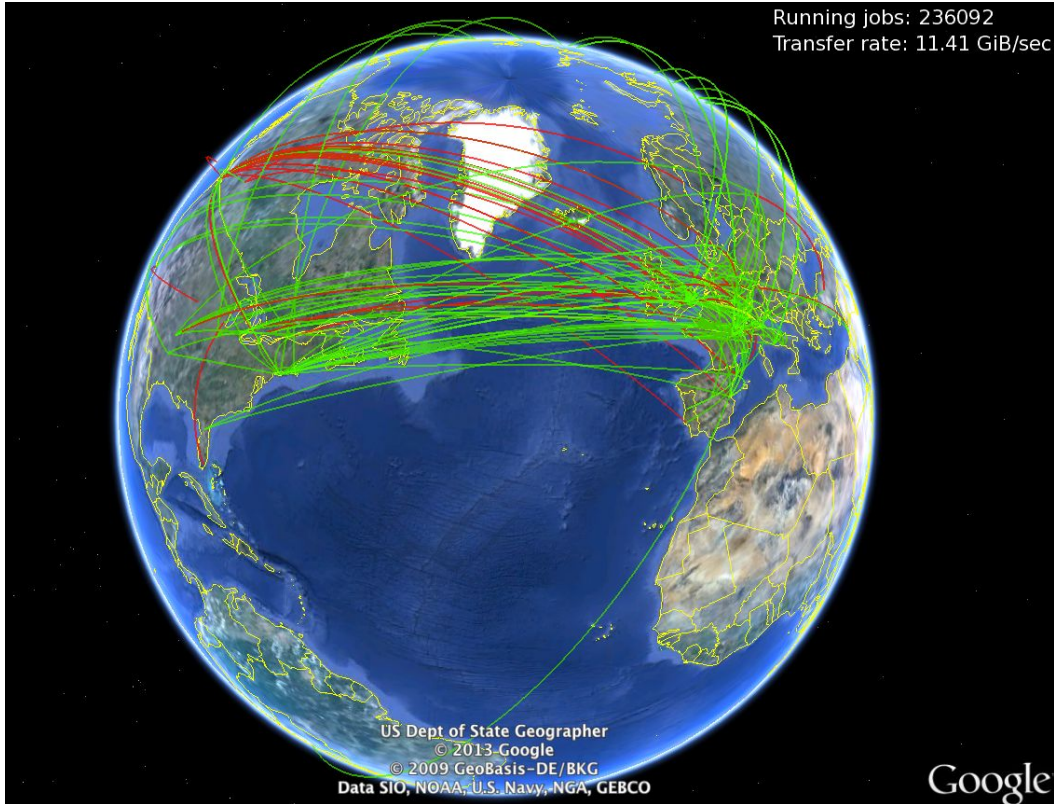


+ useita taustaprosesseja, joissa sama lopputila (4 leptonia)



Datankäsittely

Enemmän vierailulla
datakeskukseen!

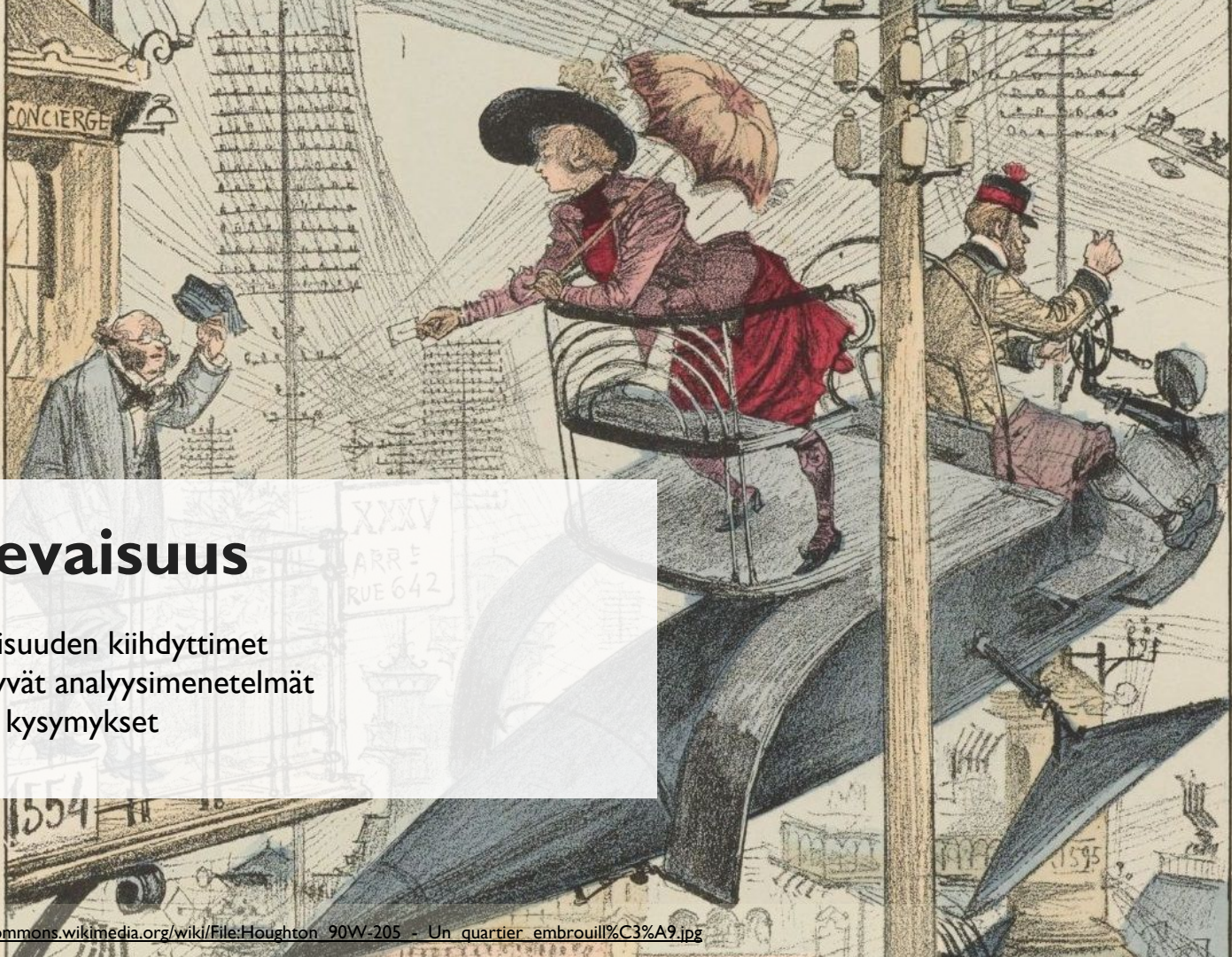


- Data jaettu maailmanlaajuisesti
- Kaikesta datasta yksi kopio CERNissä (Tier-0)
- Varmuuskopio jossain päin maailmaa (Tier-1)
- Analyysikopioita (Tier-2, Tier-3) jaettuna useille tietokonekeskuksille
- Datan voi analysoida lähettämällä työn tietokonekeskukselle, jolla on kopio.

Lisäksi avointa dataa:

<http://opendata.cern.ch/>



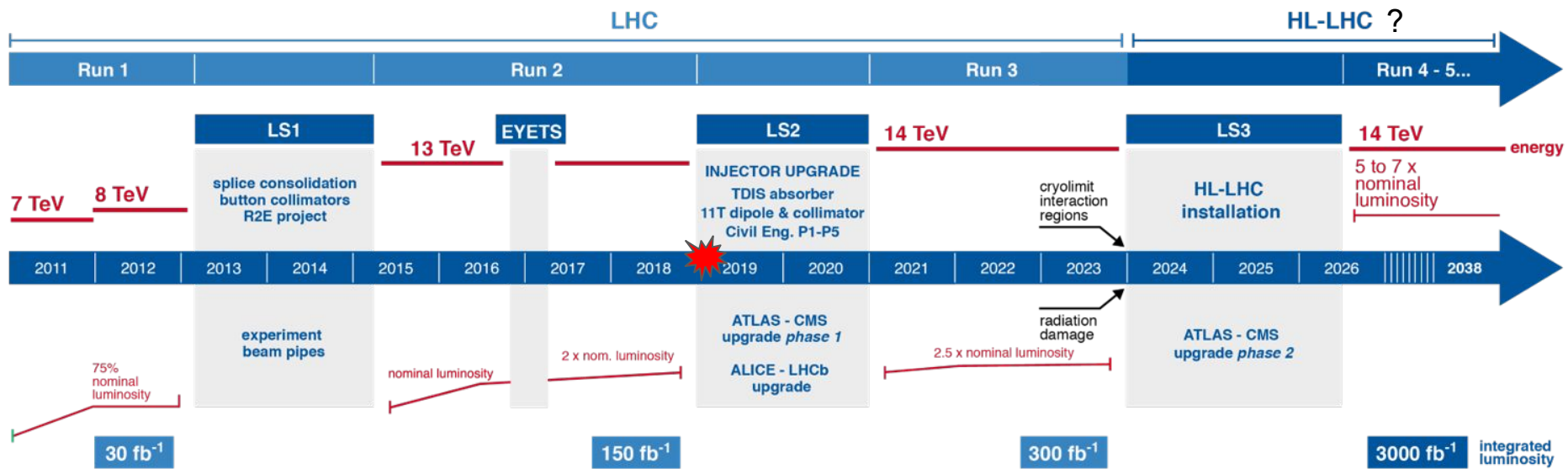


Tulevaisuus

Tulevaisuuden kiihdyttimet
Kehittyvät analyysimenetelmät
Suuret kysymykset

SHUTDOWN: NO BEAM

	BIS status and SMP flags	B1	B2	
Comments (21-Feb-2019 12:08:02)	Link Status of Beam Permits	false	false	
	Global Beam Permit	false	false	
LS2	Setup Beam	false	false	
	Beam Presence	false	false	
	Moveable Devices Allowed In	false	false	
	Stable Beams	false	false	
AFS: 75_150ns_733Pb_733_702_468_42bpi_20inj	PM Status B1	ENABLED	PM Status B2	ENABLED

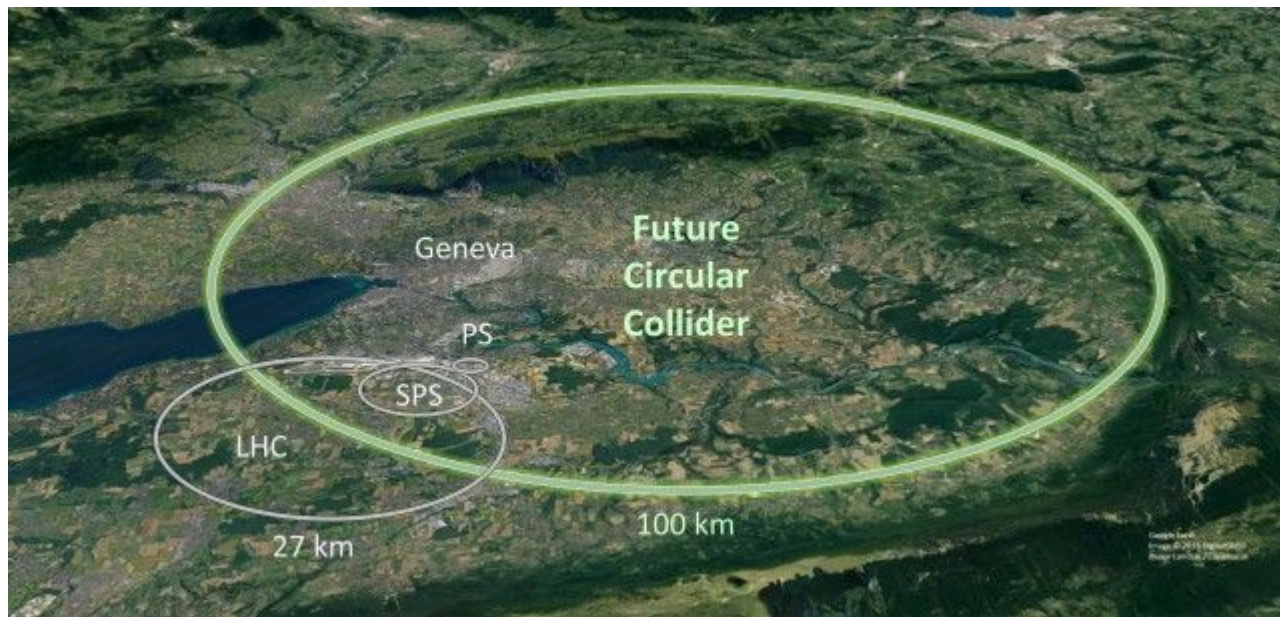


Mitä seuraavaksi?

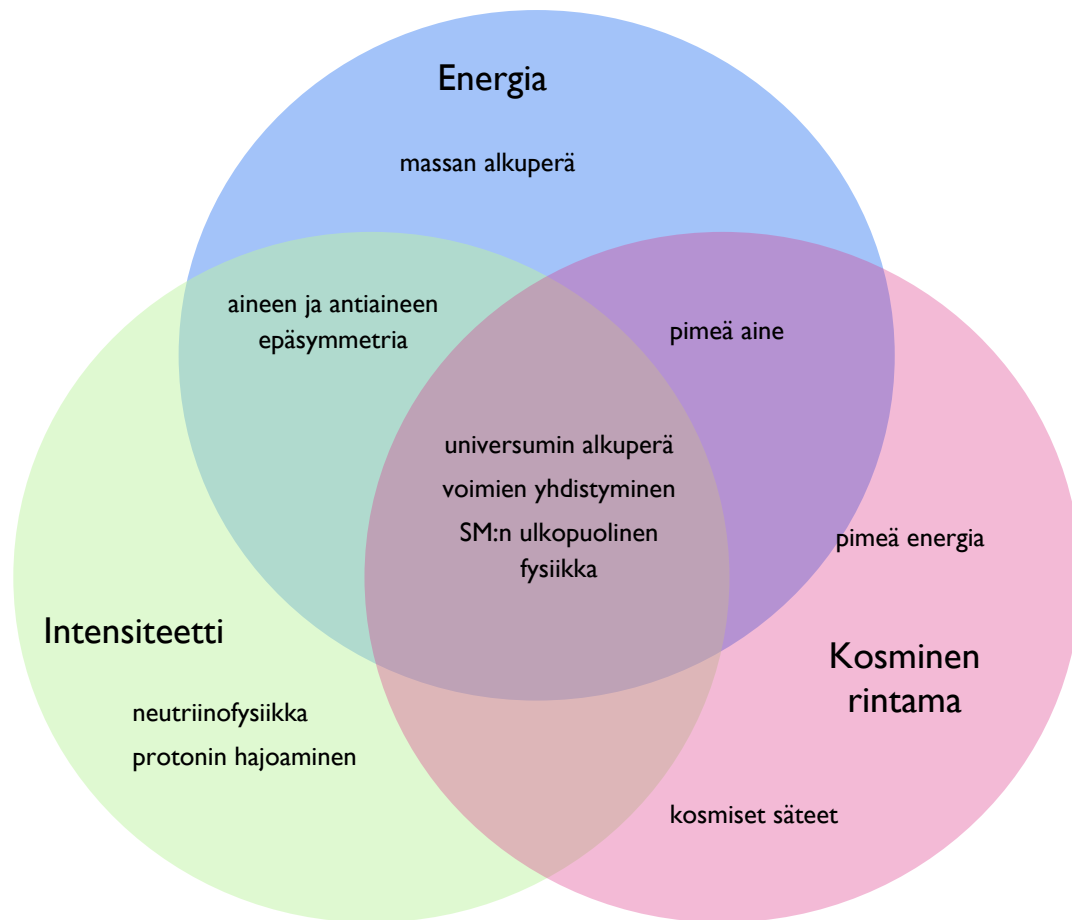
- Uusia törmäyttimiä?
 - protoneja, elektroneja, myoneja?
- Lineaarikiihdyttimiä?
 - International Linear Collider (ILC)?
 - Compact Linear Collider (CLIC)?
- Sijainti?

Haasteita:

- (magneetti)teknologian rajat
- korkeampi energia vaatii suurempaa törmäystiheyttä eli kehittyneempiä ilmaisimia ja analyysimenetelmiä
- hinta



Paljon tutkittavaa eri rintamalla!



An aerial view of a university campus. In the foreground, a large, orange, dome-shaped building with a textured, woven appearance sits on a green lawn. A blue and white tram is visible on a track extending from the dome. In the background, a large complex of modern university buildings with grey and white facades is spread across a green landscape with trees. A blue tram is also visible on a track in the middle ground. The overall scene is bright and clear.

**Vastausten etsintä
jatkuu!**