

# Hiukkasfysiikan kokeet



Fysiikan tutkimuslaitos (HIP)

Helsingin yliopisto

kalvot: Santeri Laurila, Kati Lassila-Perini, Mikko Voutilainen, Lauri A. Wendland



# Fyysikoille riittää työtä



Ymmärryksemme luonnosta on lisääntynyt viime vuosikymmeninä valtavaa vauhtia, mutta työ on pahasti kesken



Ymmärryksemme luonnosta on lisääntynyt viime vuosikymmeninä valtavaa vauhtia, mutta työ on pahasti kesken

- Onko löytämämme **Higgsin bosoni** standardimallin mukainen ja ainoa?
- Miksi maailmankaikkeudessa on enemmän materiaa kuin antimateriaa?
- Miten selittää **neutriinojen massa**?
- Mitä on **pimeä aine**?
- Entä pimeä energia? Miten **gravitaatio** yhdistetään muihin (kvantti)vuorovaikutuksiin? Onko ulottuvuuksia vain arkipäiväiset 3+1?
- Miksi hiukkasperheitä on kolme? Onko "alkeishiukkasilla" sisäinen rakenne? Onko luonnossa lisää symmetrioita? Supersymmetria?



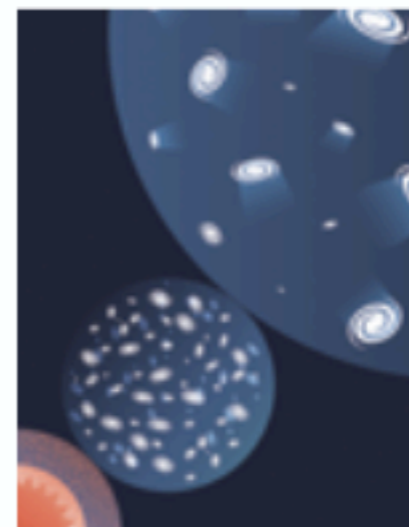
Higgs boson



Neutrino mass



Dark matter



Cosmic acceleration



Explore the unknown

*Teoria ei tarjoa selviä suuntaviivoja, joten nyt on kokeiden vuoro ajaa fysiikan kehitystä eteenpäin!*



Higgs boson



Neutrino mass



Dark matter



Cosmic acceleration



Explore the unknown

## Energy frontier colliders



**X**

(X)

**X**

**X**

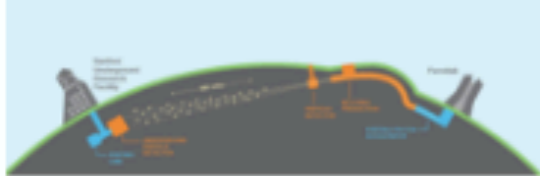
## High-precision experiments



**X**

**X**

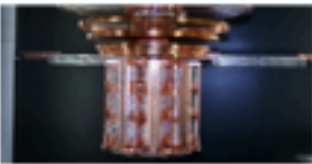
## Neutrino experiments



**X**

**X**

## Direct searches



**X**

**X**

## Cosmic surveys



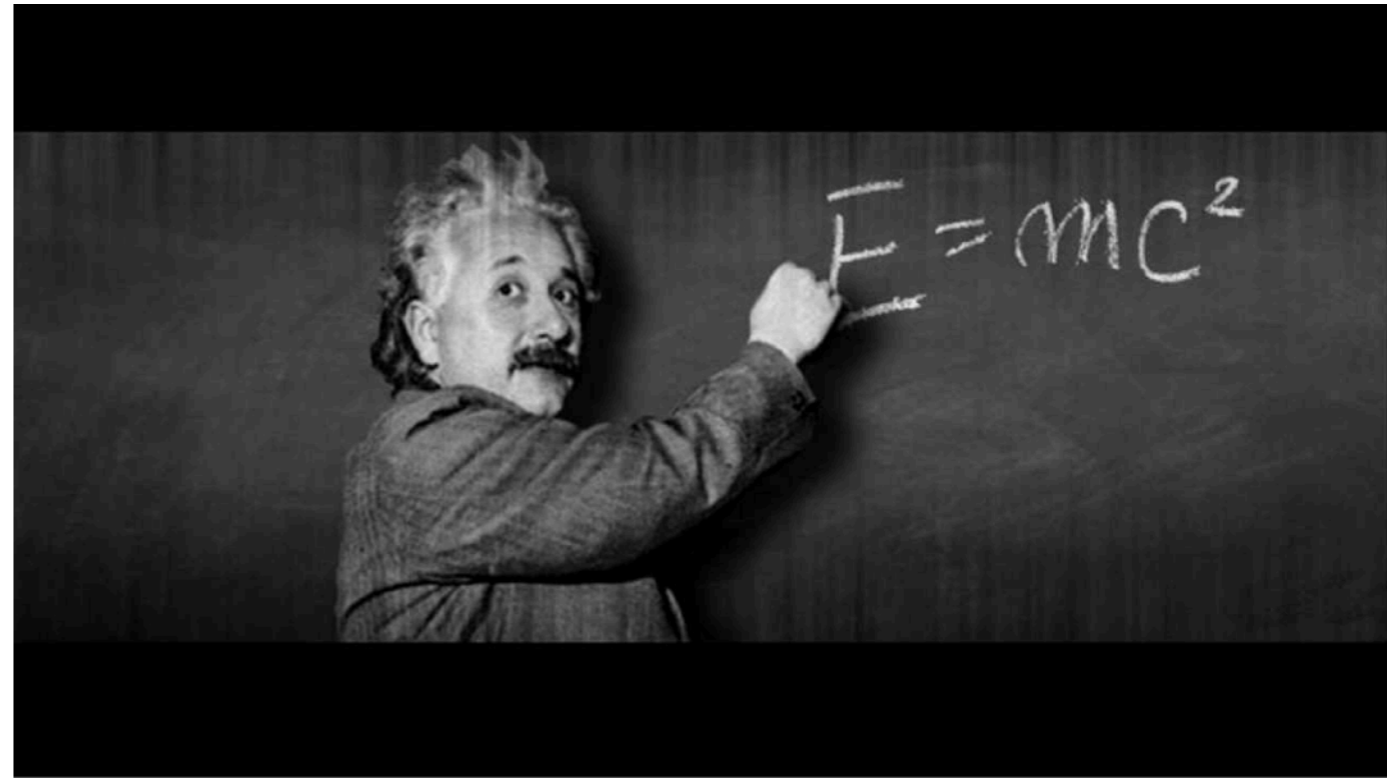
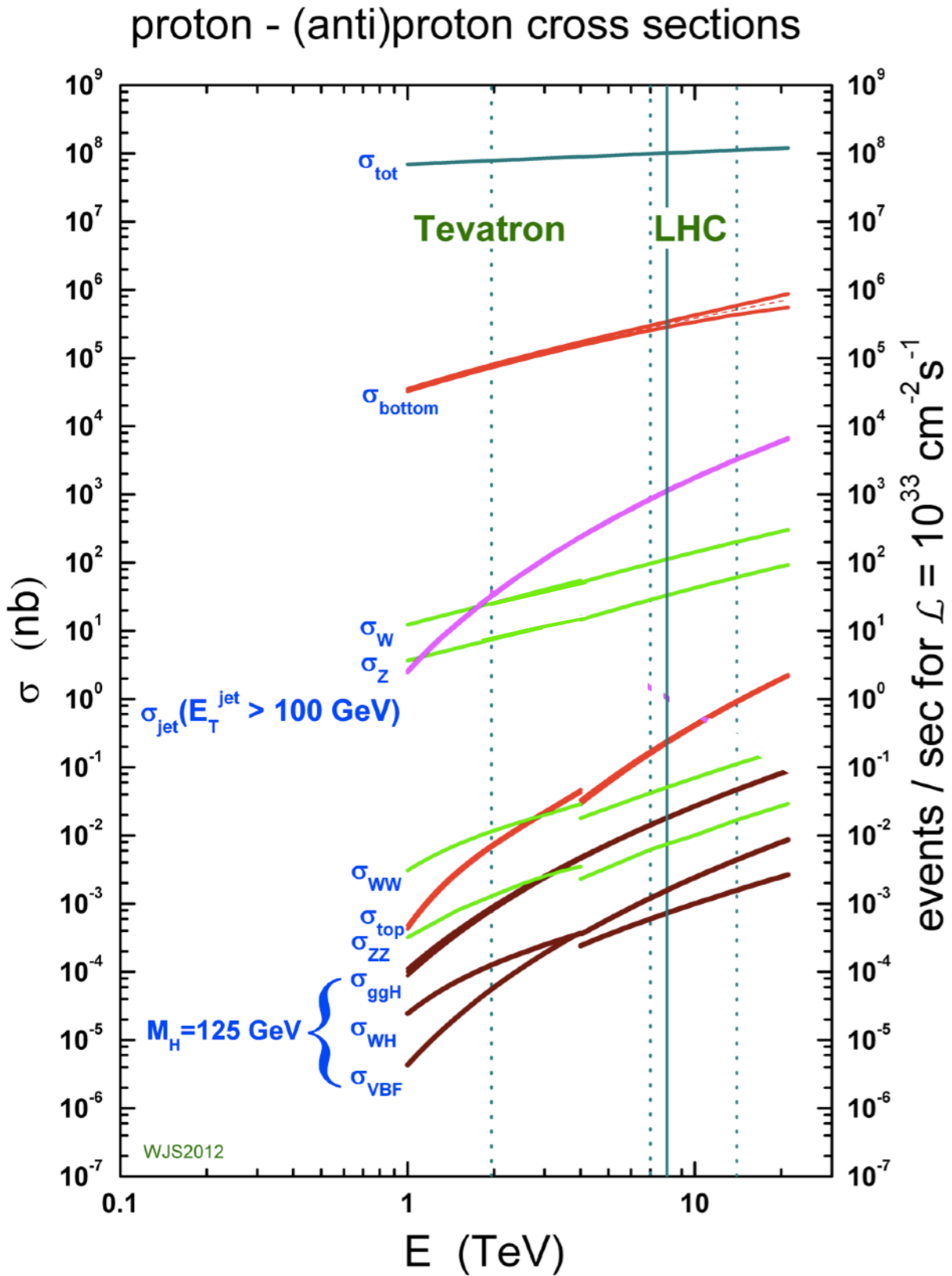
**X**

**X**

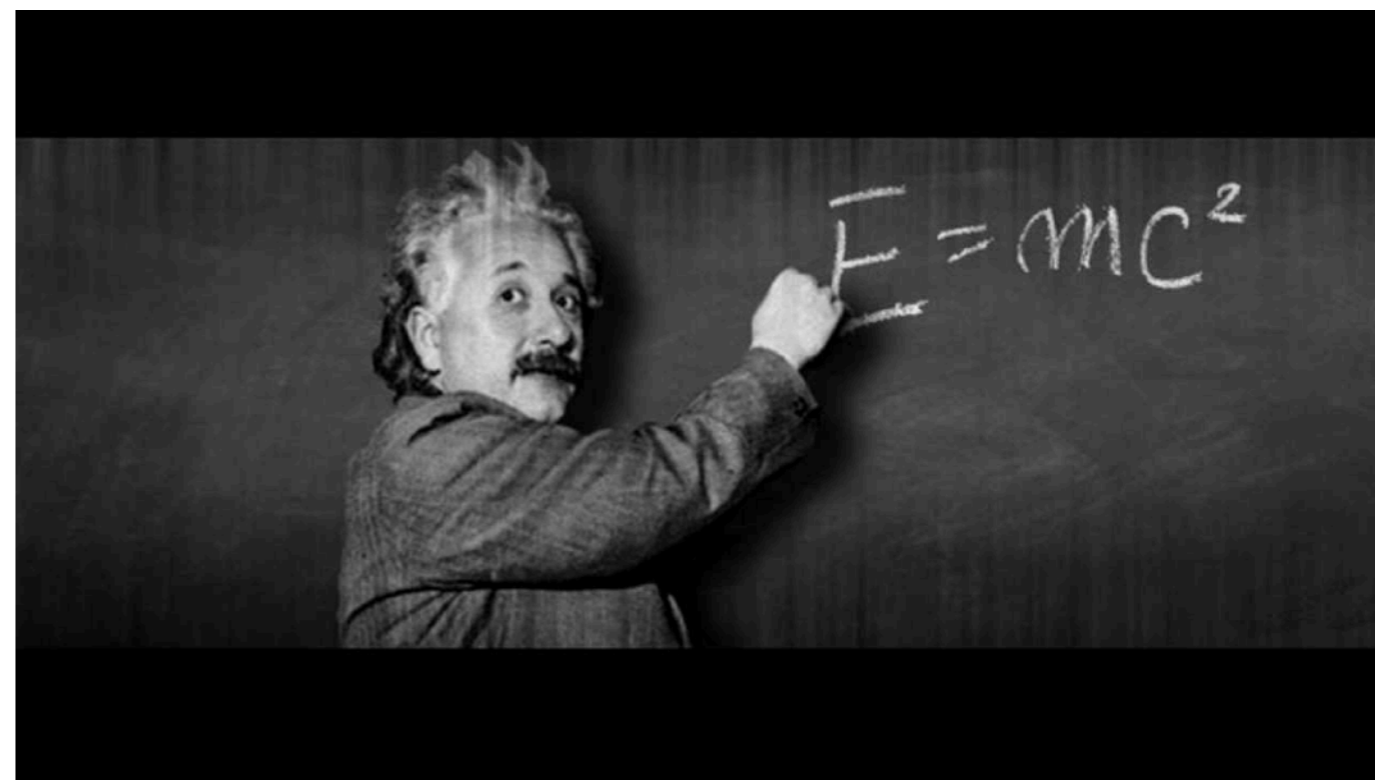
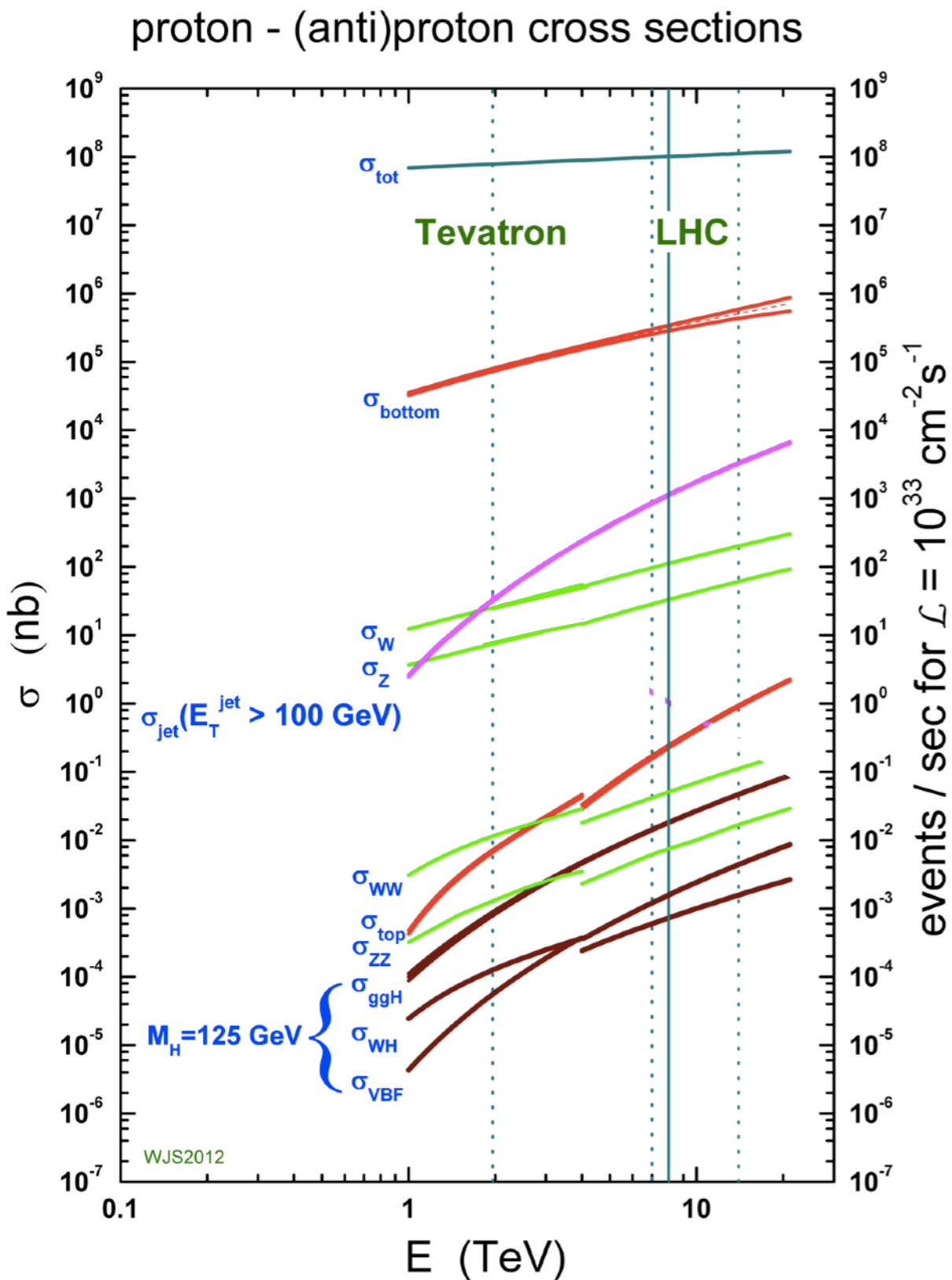


# Mitä iloa energiasta?









Hiukkastörmäyksissä protonien liike-energiaa muuttuu uusiksi, harvinaisemmiksi hiukkasiksi

Uusia hiukkasia voi syntyä monenlaisia ja erilaisten prosessien kautta – kvanttifysiikkaa: voimme ennustaa vain **todennäköisyyksiä**

← Eri prosessien todennäköisyyttä kuvaa **vuorovaikutusala** ( $\sigma$ , pystyakselilla), joka riippuu **energiasta** ( $E$ , vaaka-akselilla)



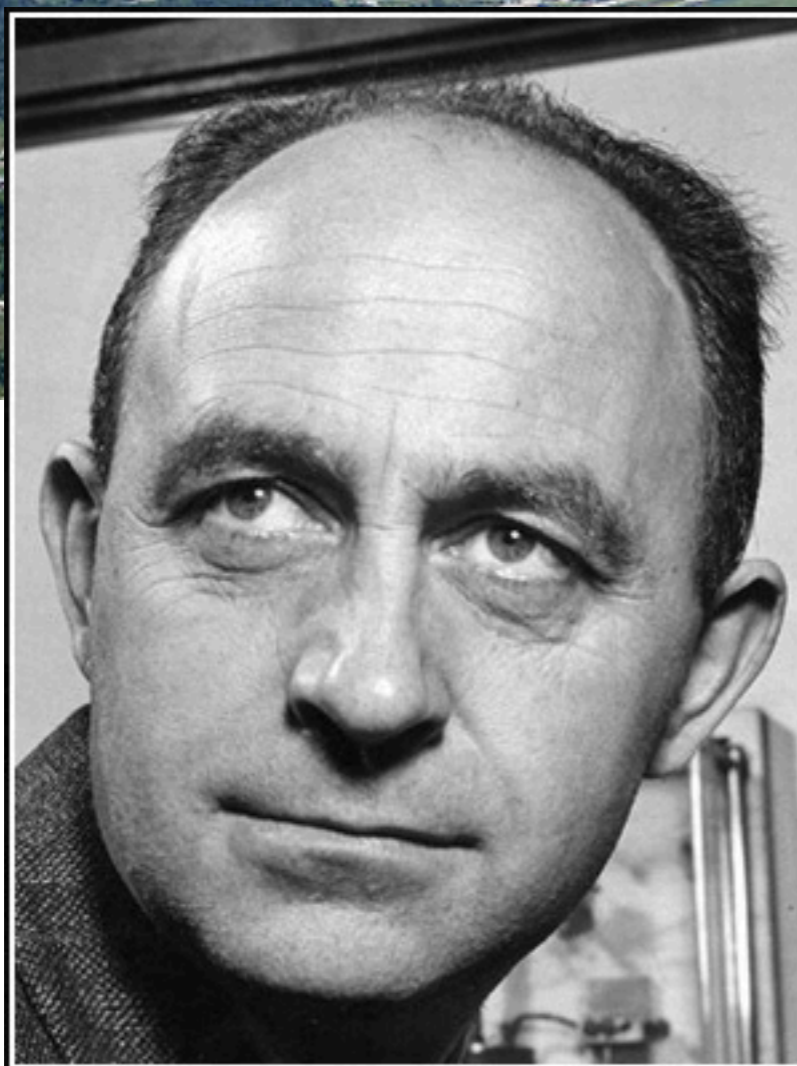
# Osa 1: Hiukkaskiihdyttimet



Hiukkasten...

- 1) kiihdyttäminen
- 2) radan kääntäminen
- 3) fokusoiminen
- 4) törmäyttäminen

# Osa 1: Hiukkaskiihdyttimet



Never underestimate the joy people  
derive from hearing something they  
already know.

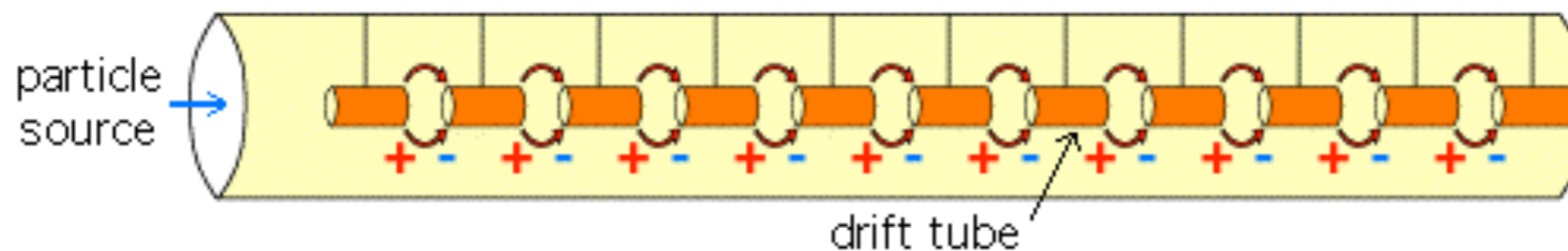
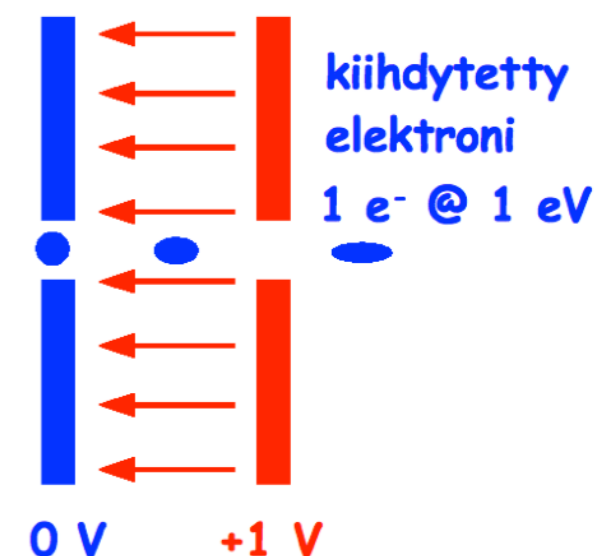
— Enrico Fermi —

AZ QUOTES

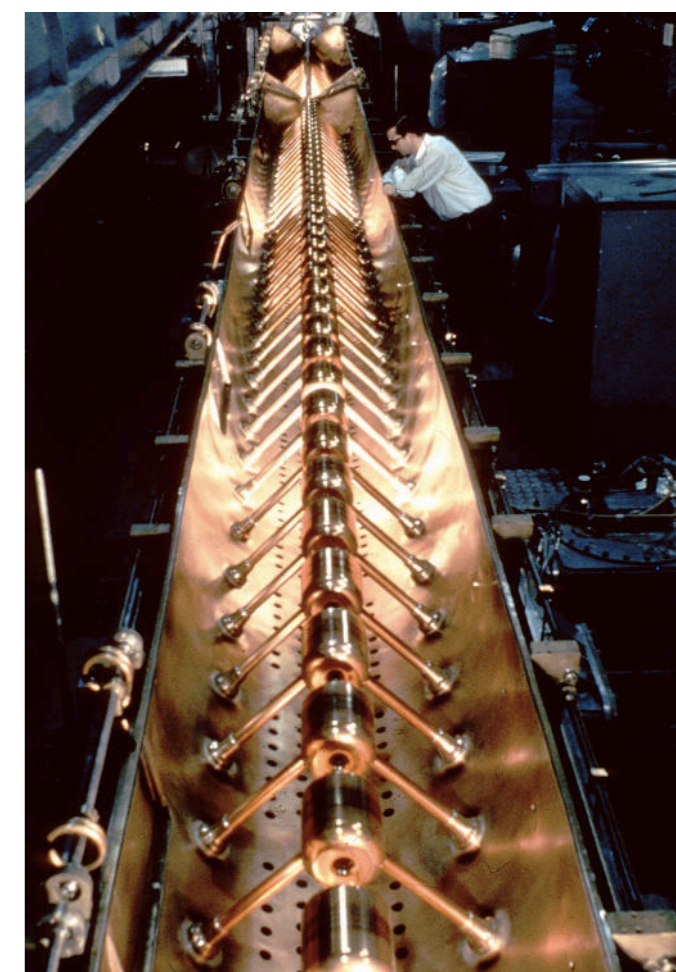


- Hiukkaskiihdyttimet perustuvat sähkövarauksellisen hiukkasen kiihdyttämiseen sähkökentällä
- Hiukkasfysiikassa energian yksikkö on 1 **eV** eli **elektronivoltti** (sovitaan  $c=1$ , jolloin eV käy myös massoille ja liikemäärille)
- Matalan energian kiihdyttimissä **ajuttamisputkia** (drift tube), joiden välissä on sähkökenttä

kondensaattori



- Lähellä valonnopeutta tarvittava taajuus liian suuri liukuputkille → **radiotaajuusresonaattorit** (RF): **seisova sähkömagneettinen aalto** (400 MHz taajuus) työntää hiukkasia eteenpäin





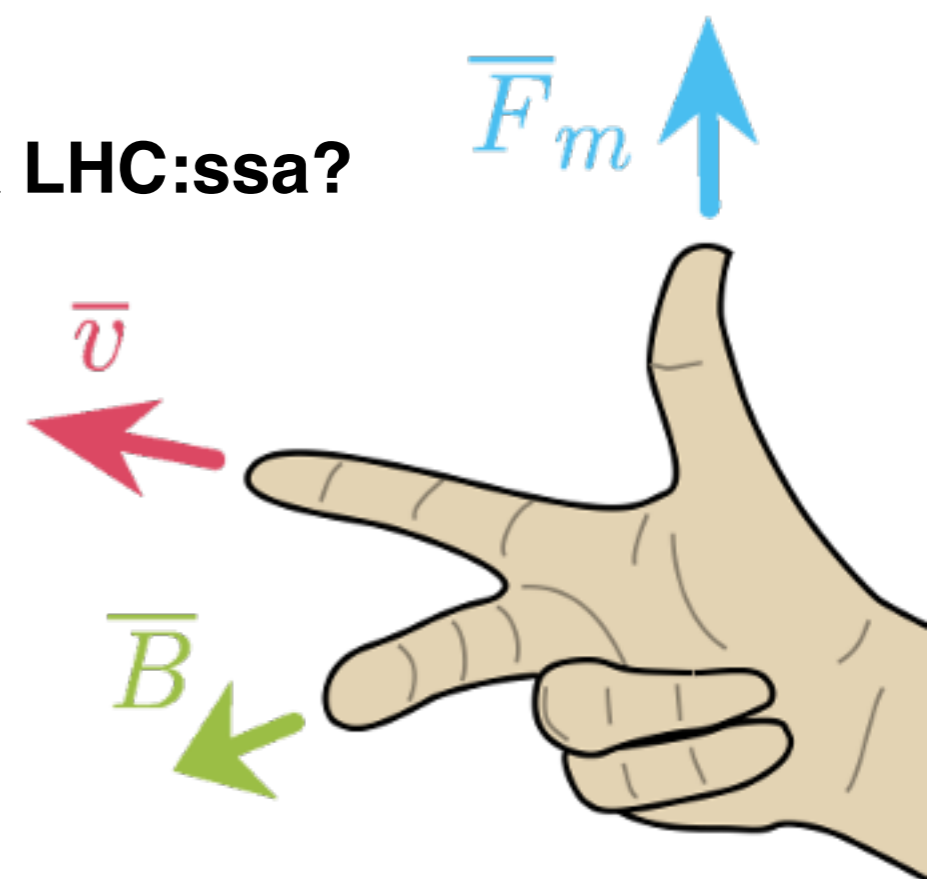
# Hiukkasen radan kääntäminen



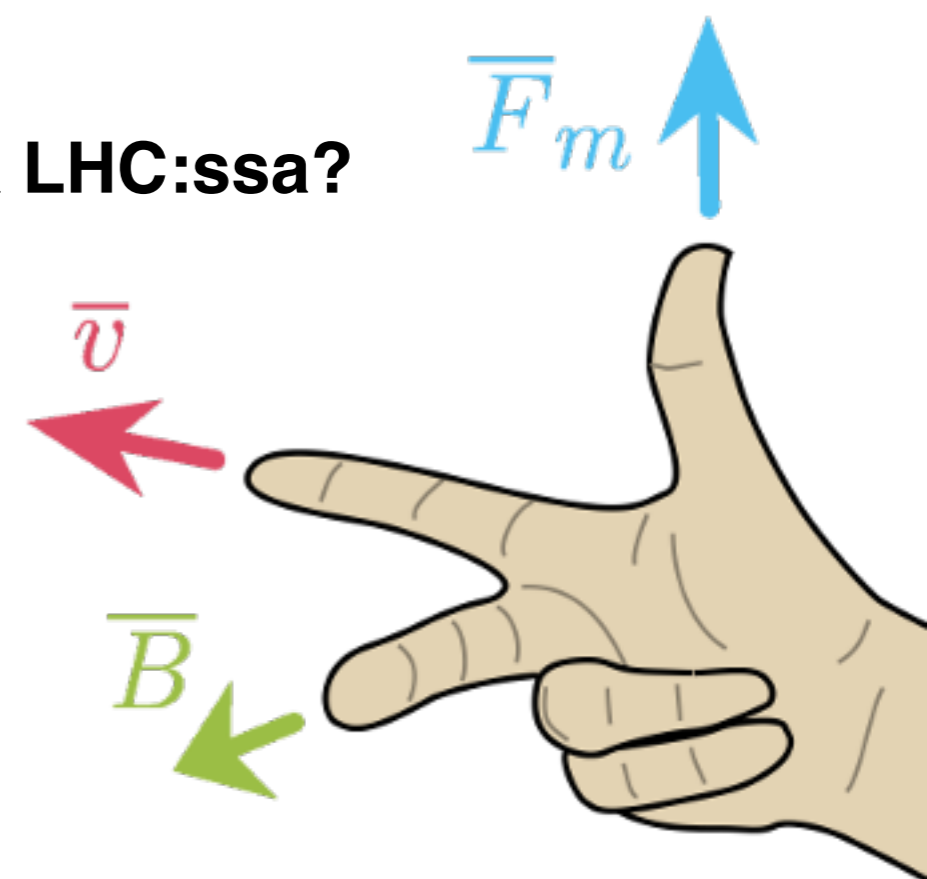
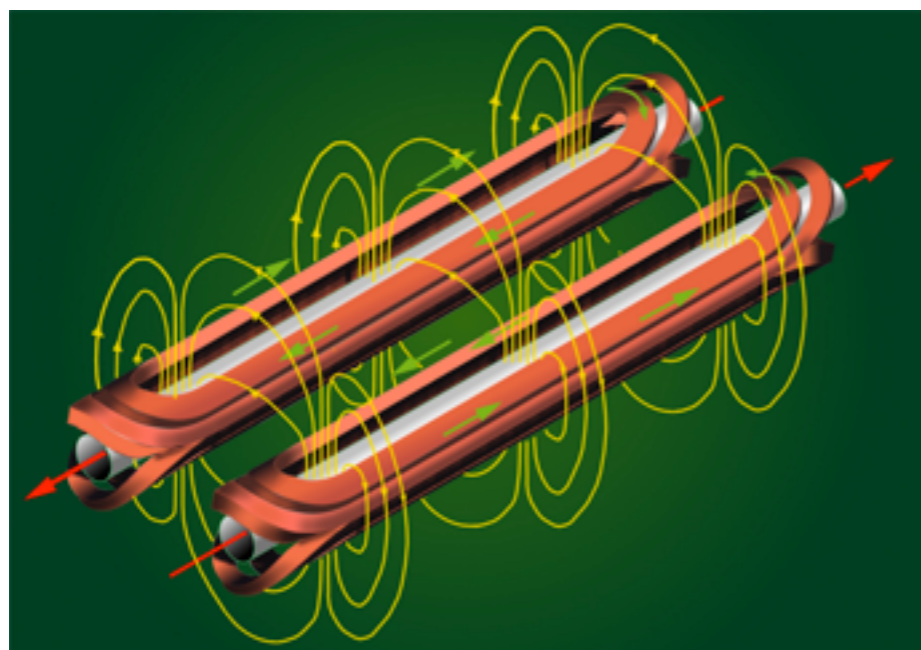
- Varatun hiukkasen rata kaareutuu magneettikentässä:
  - $\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$
  - Suunta oikean käden säännöllä (kuva!)
- Yhdistämällä Newtonin toinen laki,  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ , keskeiskiihtyvyys  $a = v^2 / R$  ja  $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ :
  - $\underline{p = qRB}$  eli suurempi liikemäärä vastaa suurempaa kaarevuussädettä
    - jos magneetin voimakkuus rajoittava tekijä, kannattaa rakentaa mahdollisimman suuri kiihdytinrengas!



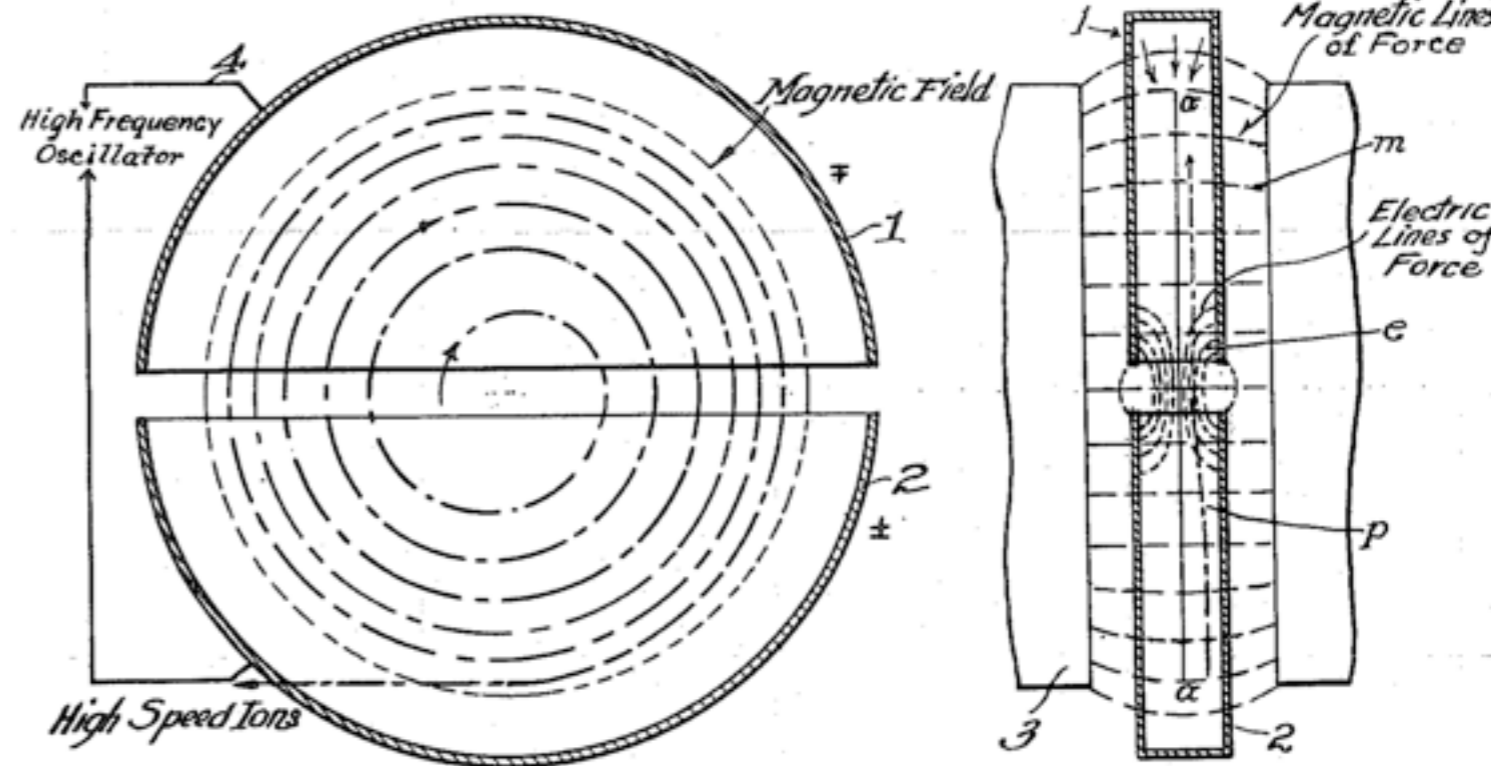
- Varatun hiukkasen rata kaareutuu magneettikentässä:
  - $\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$
  - Suunta oikean käden säännöllä (kuva!)
- Yhdistämällä Newtonin toinen laki,  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ , keskeiskiihtyvyys  $a = v^2 / R$  ja  $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ :
  - $p = qRB$  eli suurempi liikemäärä vastaa suurempaa kaarevuussädettä
    - jos magneetin voimakkuus rajoittava tekijä, kannattaa rakentaa mahdollisimman suuri kiihdytinrengas!
- **Mihin suuntaan magneettikentän pitäisi osoittaa LHC:ssa?**



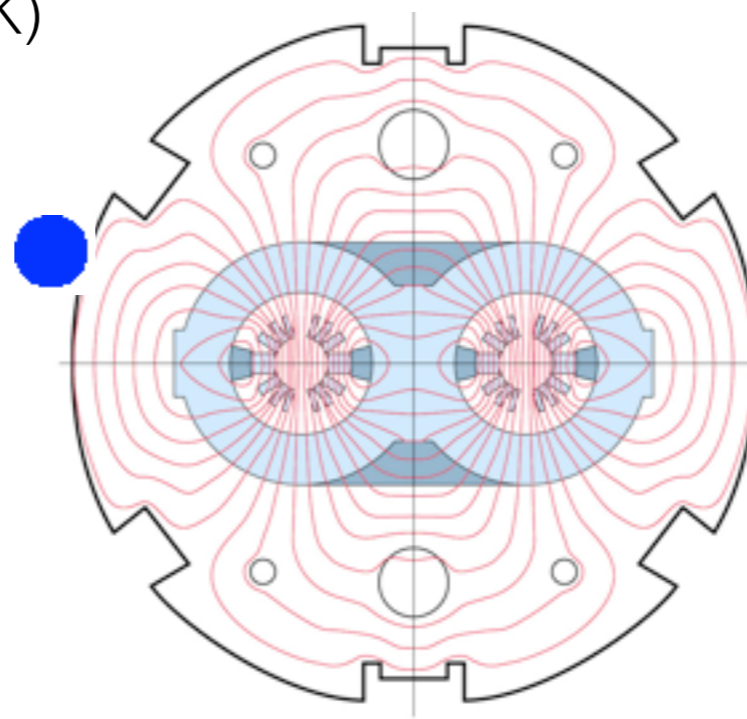
- Varatun hiukkasen rata kaareutuu magneettikentässä:
  - $\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$
  - Suunta oikean käden säännöllä (kuva!)
- Yhdistämällä Newtonin toinen laki,  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ , keskeiskiihtyvyys  $a = v^2 / R$  ja  $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ :
  - $\underline{p = qRB}$  eli suurempi liikemäärä vastaa suurempaa kaarevuussädettä
    - jos magneetin voimakkuus rajoittava tekijä, kannattaa rakentaa mahdollisimman suuri kiihdytinrenkas!
- **Mihin suuntaan magneettikentän pitäisi osoittaa LHC:ssa?**



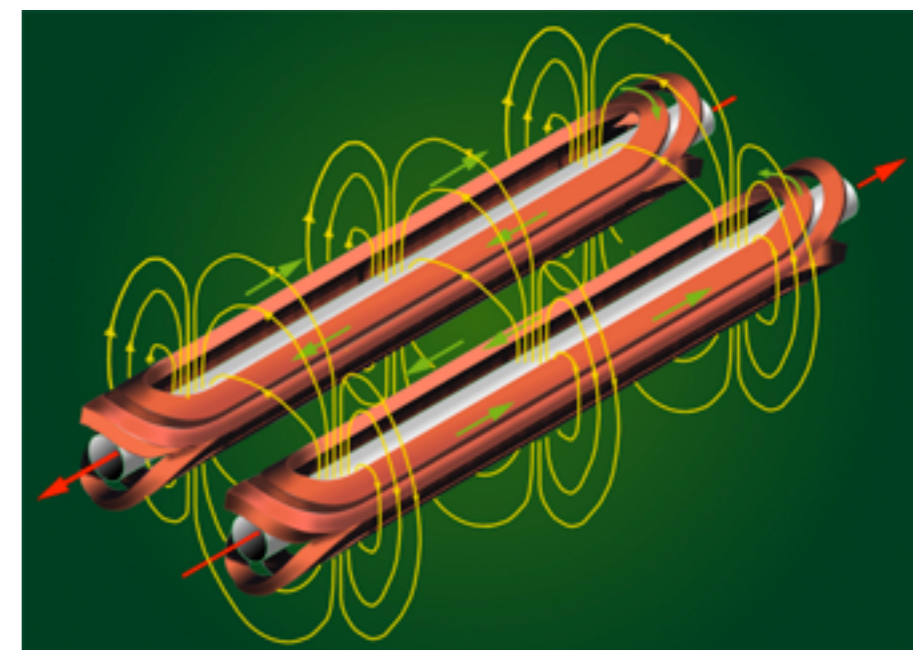
- Ensimmäiset “rengaskiihdyttimet” käyttivät **kestomagneetteja** ( **$B$  vakio**) → hiukkasten kiertosäde  **$R$  kasvaa** energian kasvaessa (*syklotroni*)
- Nykyisissä *synkrotroneissa* käytössä sähkömagneetteja, joiden virtaa voi muuttaa →  **$R$  vakio,  $B$  kasvaa**
- LHC:ssä **1232** kpl **suprajohtavia sähkömagneetteja** (15m, 35t, 1.9K)
- Hiukkanen ja sen antihiiukkanen kaartuvat magneettikentässä eri suuntiin, joten ne voivat kulkea samojen magneettien ohjaamana vastakkaisiin suuntiin
- LHC:ssä molemmat suihkut koostuvat protoneista, joten tarvitaan kaksi vierekkäistä rataa, **vastakkaissuuntaiset kentät**



$$p = qRB$$



Computed magnetic flux map at  $B_0=10$  Tesla





- Jokainen kiihdytin toimii tietyllä energia-alueella (LHC 0.45—6.5 TeV)
- Suureen liike-energiaan vaaditaan esikiihdyttimien ketju
- Hiukkaset kiertävät ympyrää, yhtä kiihdytinjaksoa voi käyttää monta kertaa



- **LINAC** (LINear Accelerator, 1978): 50 MeV, **0.31c**
- **PSB** (Proton Synchrotron Booster, 1972): 1.4 GeV, **0.916c**
- **PS** (Proton Synchrotron, 1959): 26 GeV, **0.9993c**
- **SPS** (Super Proton Synchrotron, 1976): 450 GeV, **0.999998c**
- **LHC** (Large Hadron Collider, 2008): 6.5 TeV, **0.999999999c**



- Maailman suurin kiihdytinkompleksi: LHC-kiihdytinrenkas 27 km, neljä suurta koeasemaa, lukuisia esikiihdyttimiä
- Koeasemilla protonit törmäytetään ja liike-energiasta syntyy uusia hiukkasia



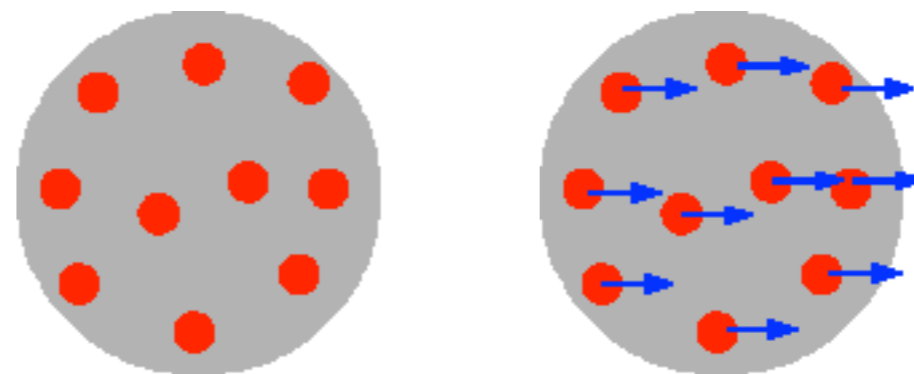




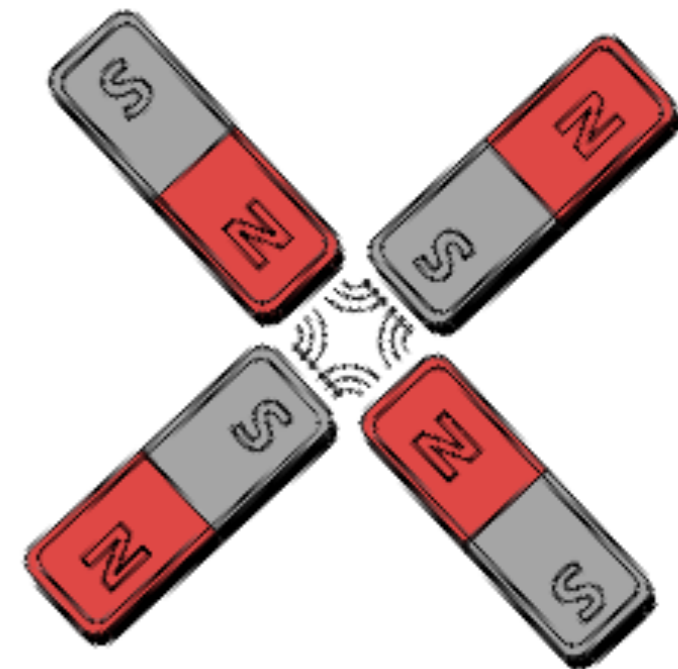
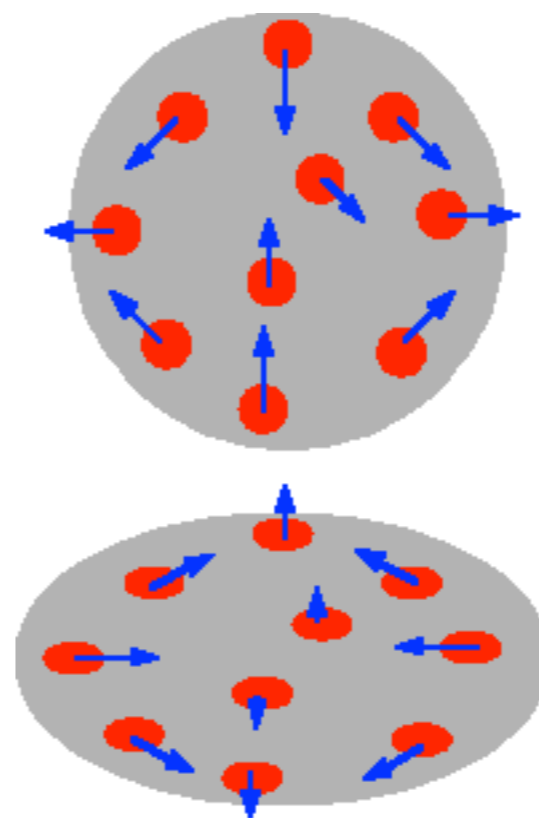


- LHC:n protoni”rihmassa” on pienessä tilassa suuri määrä ( $\sim 10^{11}$ ) saman varauksen omaavia hiukkasia, jotka pyrkivät erilleen
- Suihkun fokusointi tapahtuu 858 **kvadrupolimagneetilla**, jotka taivuttavat harhautuneita hiukkasia kohti tyhjiöputken keskipistettä
- Tyypillisessä kiihdyttimessä on nk. FODO-ketju, jossa F fokusoii pystysuunnassa, D vaakasuunnassa ja O:t kääntävät rataa

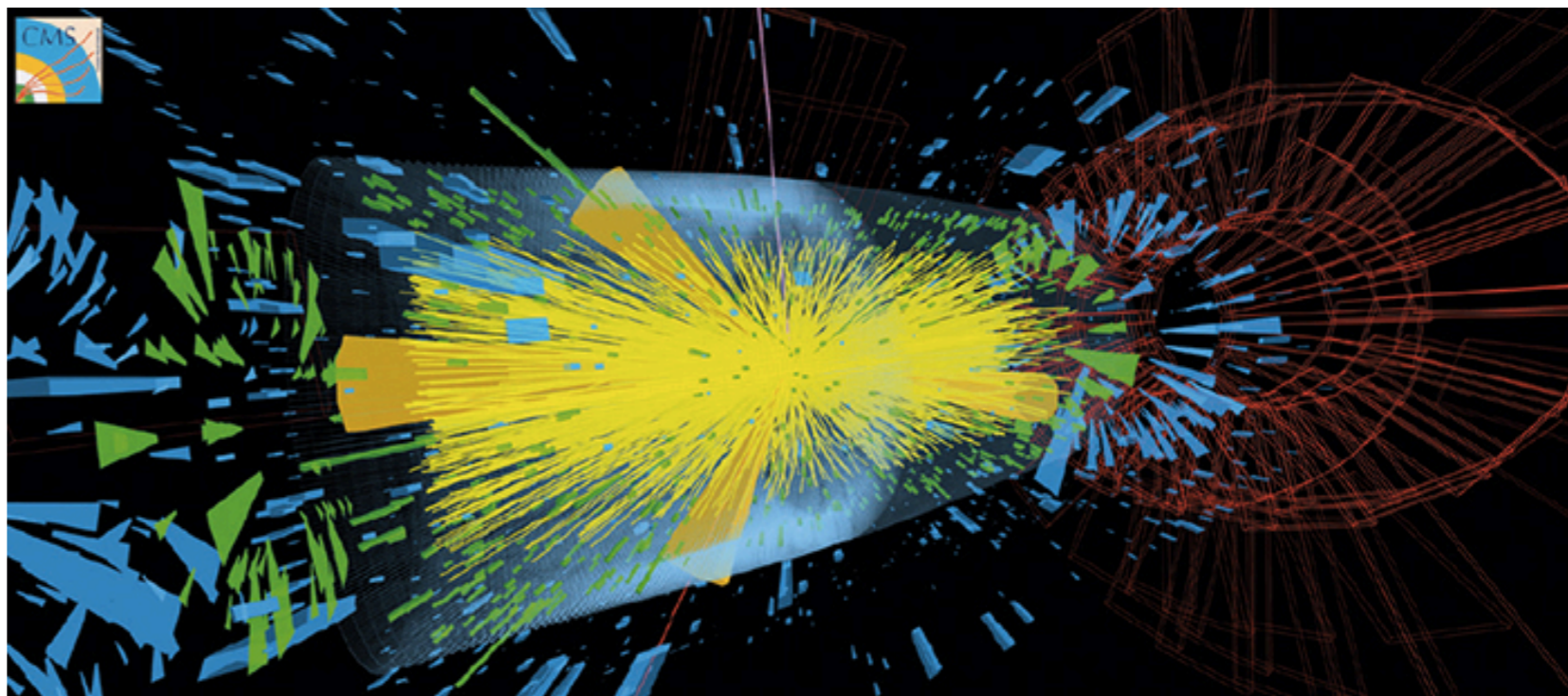
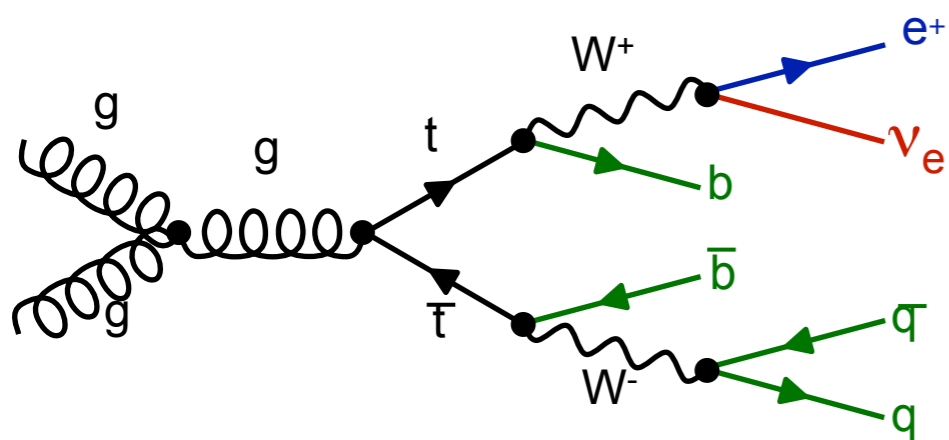
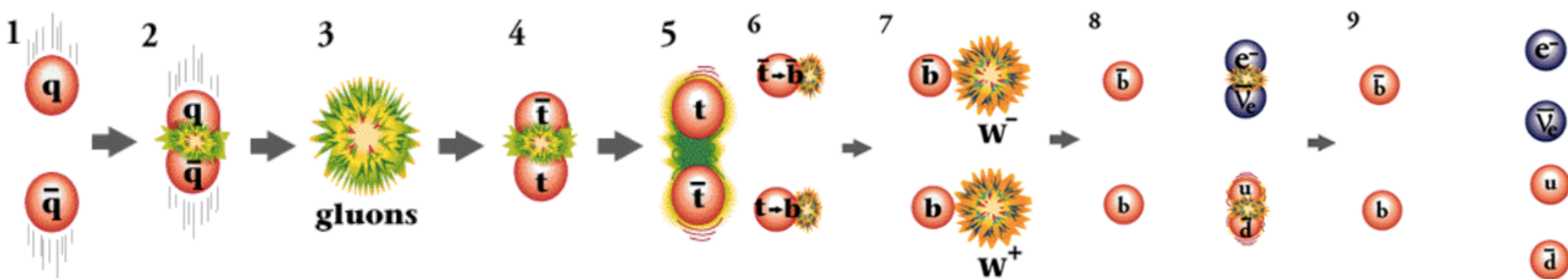
## Dipolimagneetti:



## Kvadrupolimagneetti:

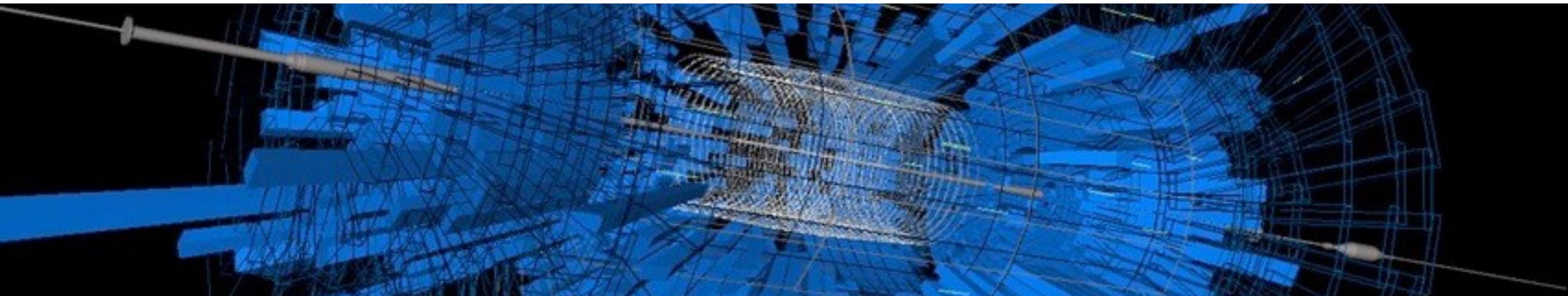


Törmäyksessä liike-energiaa muuttuu uusien hiukkasten massaksi Einsteinin kaavan  $E=mc^2$  mukaisesti





# Osa 2: Hiukkasilmaisimet

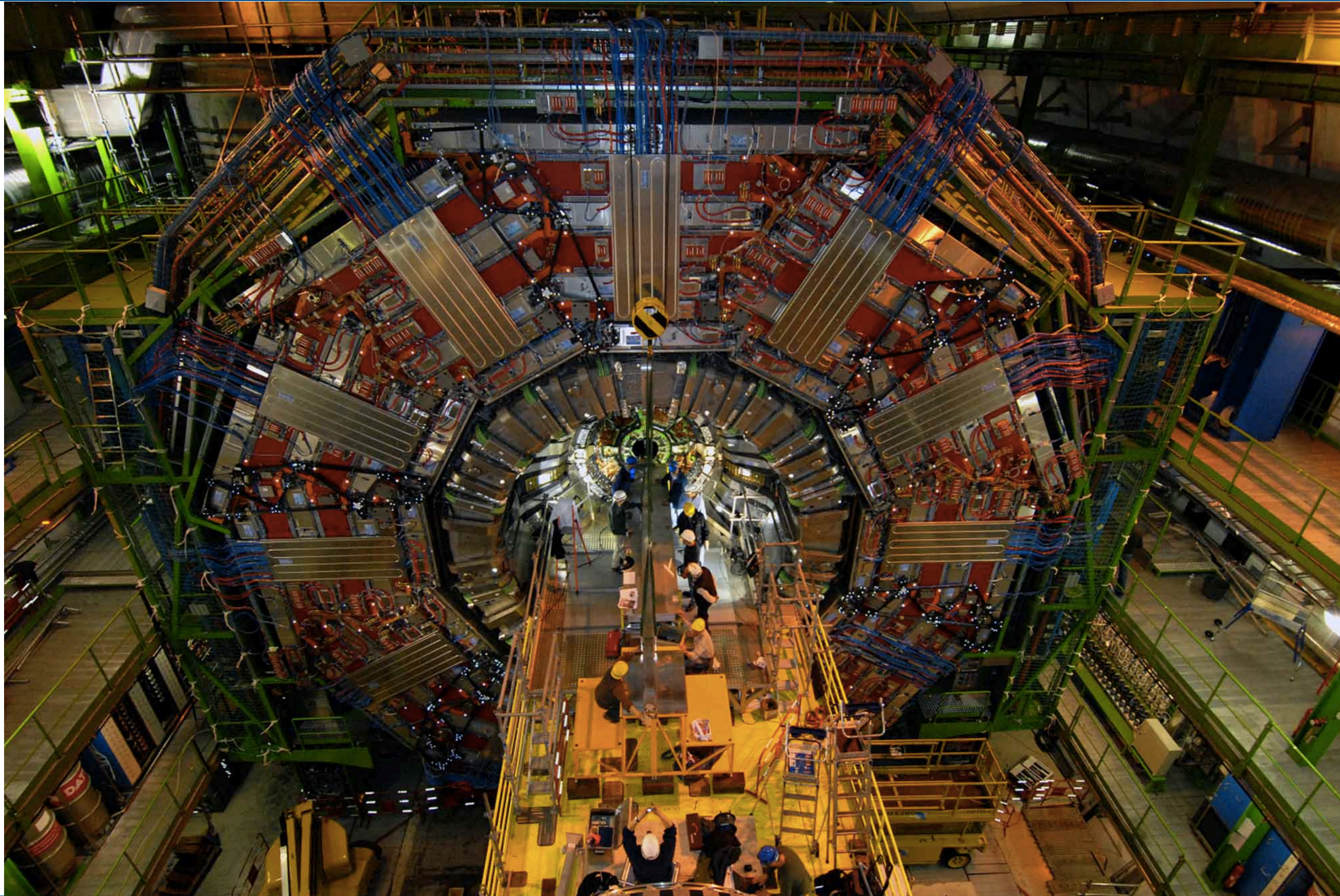


CMS-koeasema

Koeaseman mittalaitteet

Hiukkasten tunnistaminen





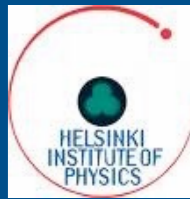




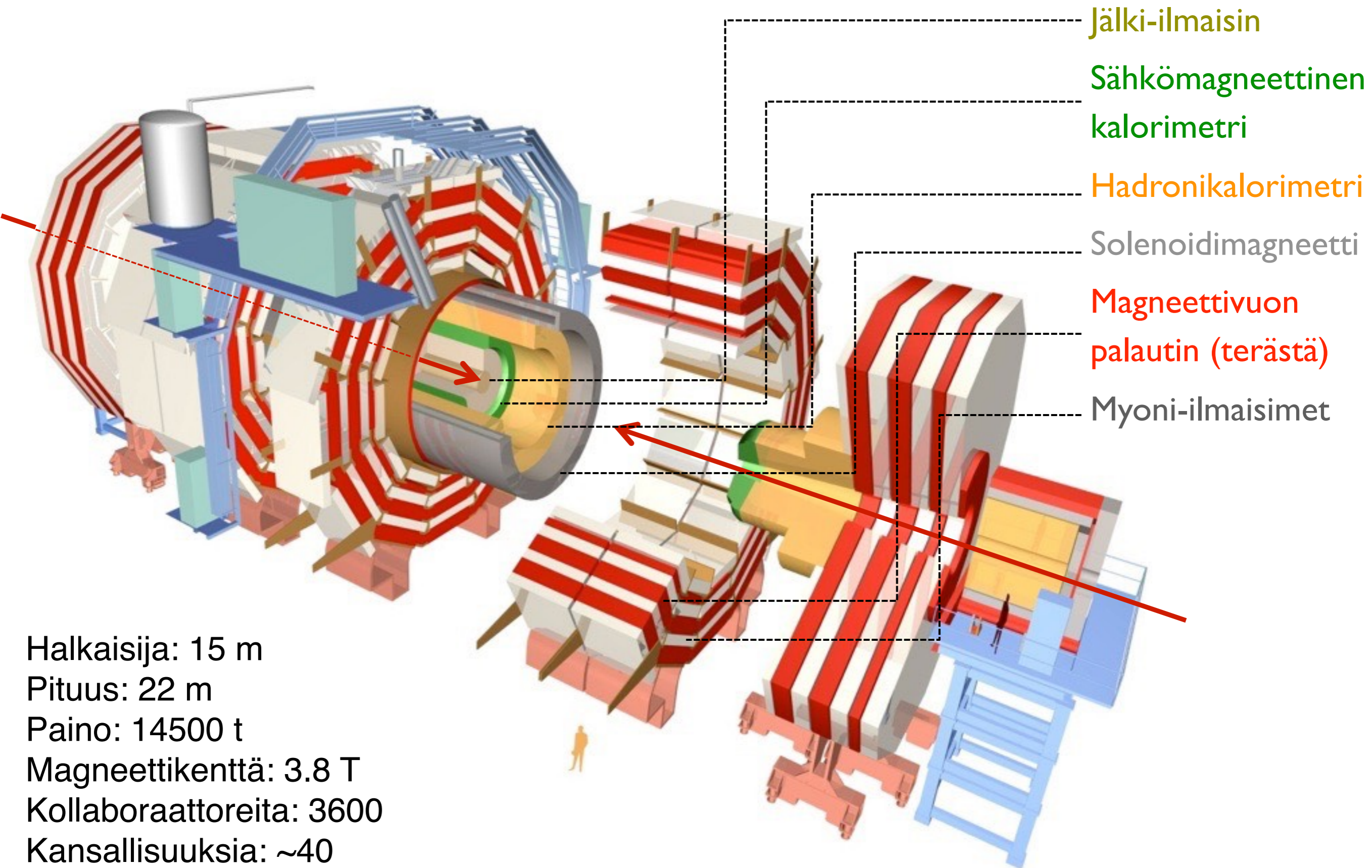




# Koeaseman valvomo









Hiukkaset vuorovaikuttavat aineen kanssa eri tavoin

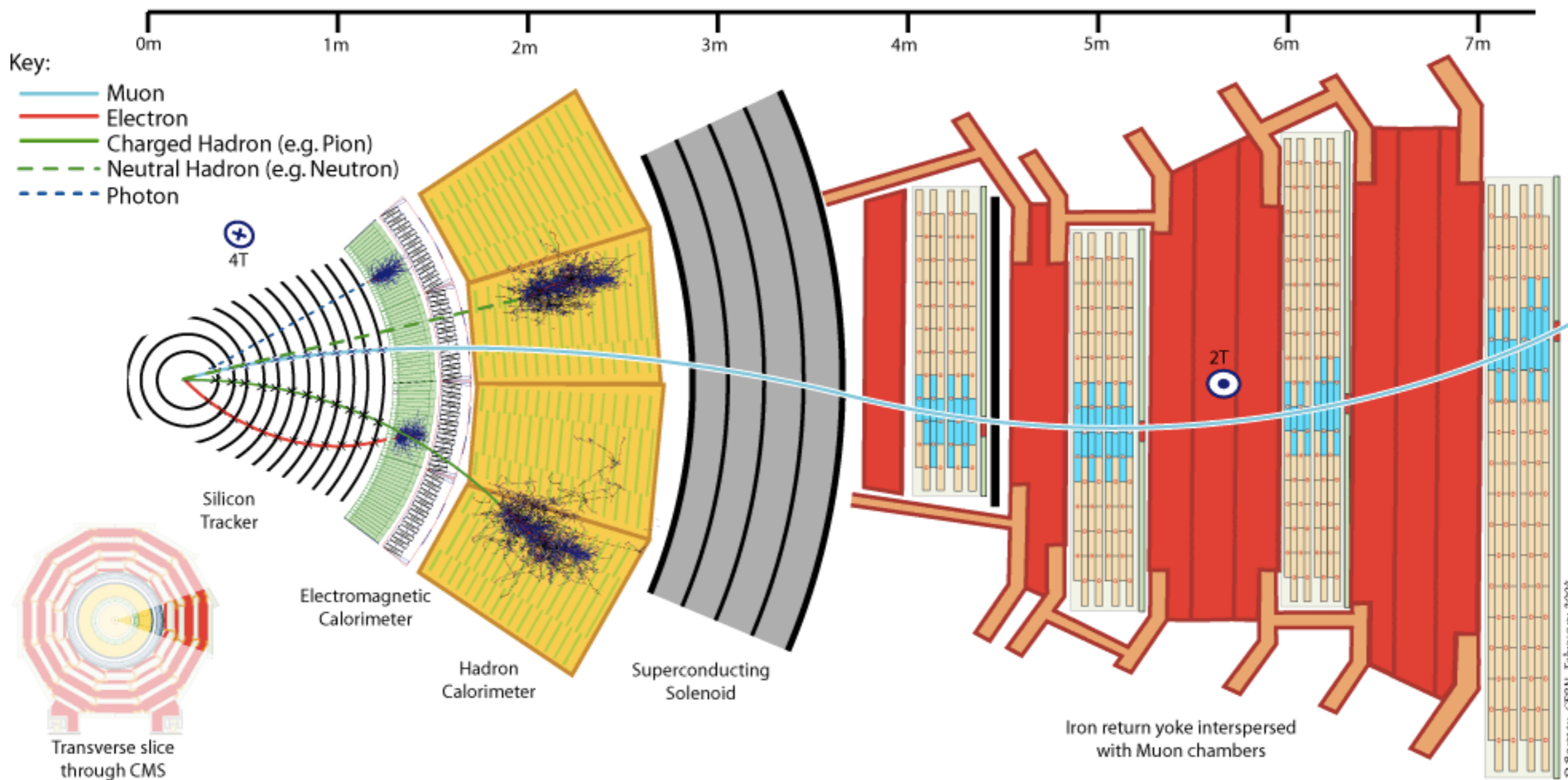
Varatut hiukkaset ionisoivat, joten niiden radat havaitaan

**Elektroni ja fotoni tuottavat sähkömagneettisen ryöpyn**

**Hadronit tuottavat pitkän hadronisen ryöpyn**

**Raskaat muonit tunkeutuvat aineen läpi tehokkaasti**

Neutriinot havaitaan epäsuorasti liikemäärän säilymisen kautta



D. Barney, CERN, February 2004

# Osa 3: Data-analyysi



Törmäysten valitseminen  
Signaali ja tausta  
Tilastolliset menetelmät







Törmäystapahtumia  
**40 MHz**, jokaisessa  
 dataa n. **1 MB**

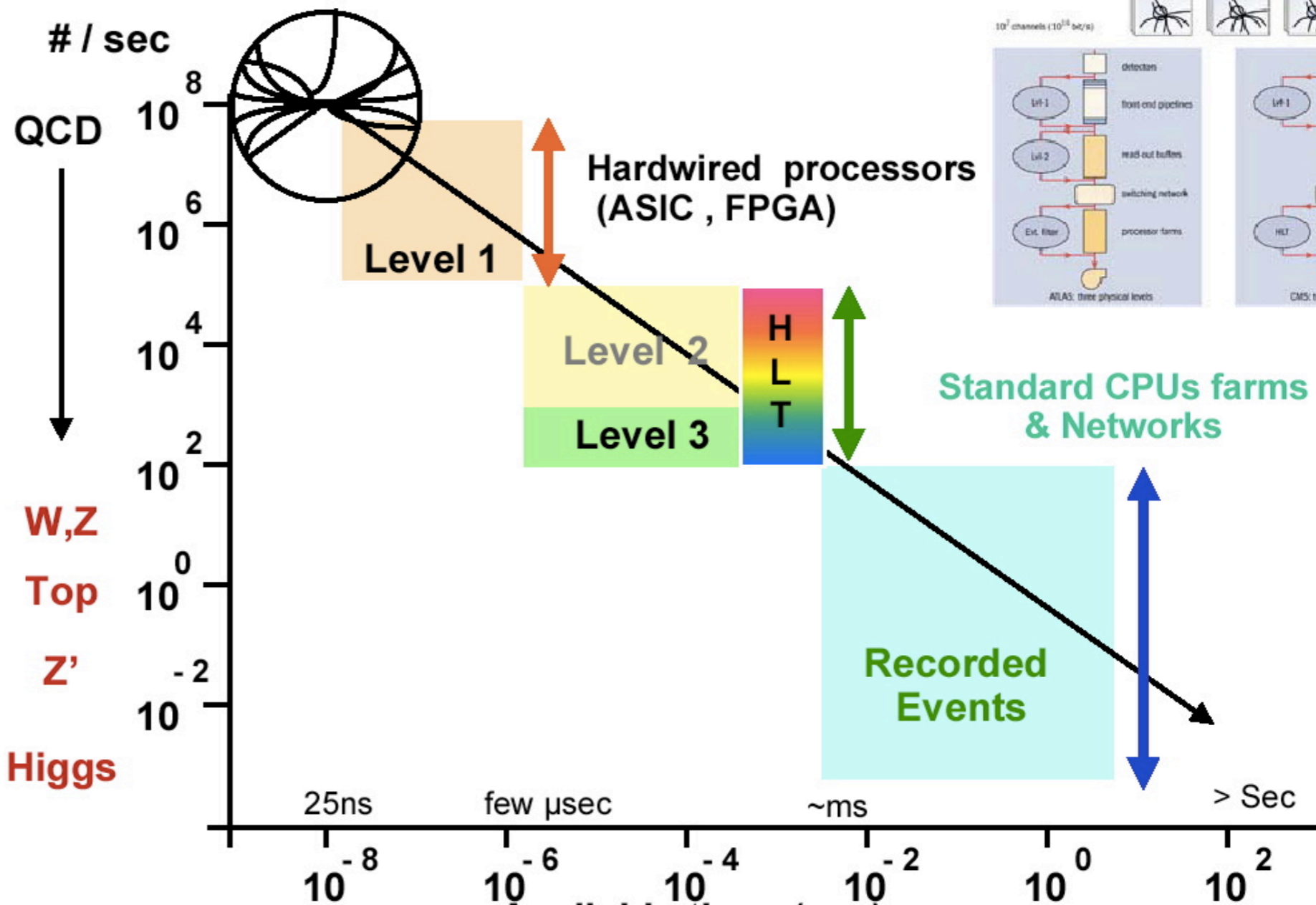
1-tason liipaisu  
 (**Level-1**) valitsee  
**100 kHz**, päätökseen  
 aikaa **~1 μs**

HLT: n. 50 000  
 prosessorin  
 tietokonefarmi  
 valitsee  
**~250 Hz**  
 törmäystapahtumaa  
 tallennettavaksi,  
 päätökseen aikaa **~1ms**

Dataa kertyy nykyään  
 n. **50 000 TB / vuosi** eli  
 50 PB / vuosi

CERNissä kerätty jo yli  
**200 PB** dataa!

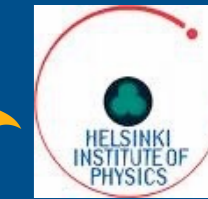
## Production rate





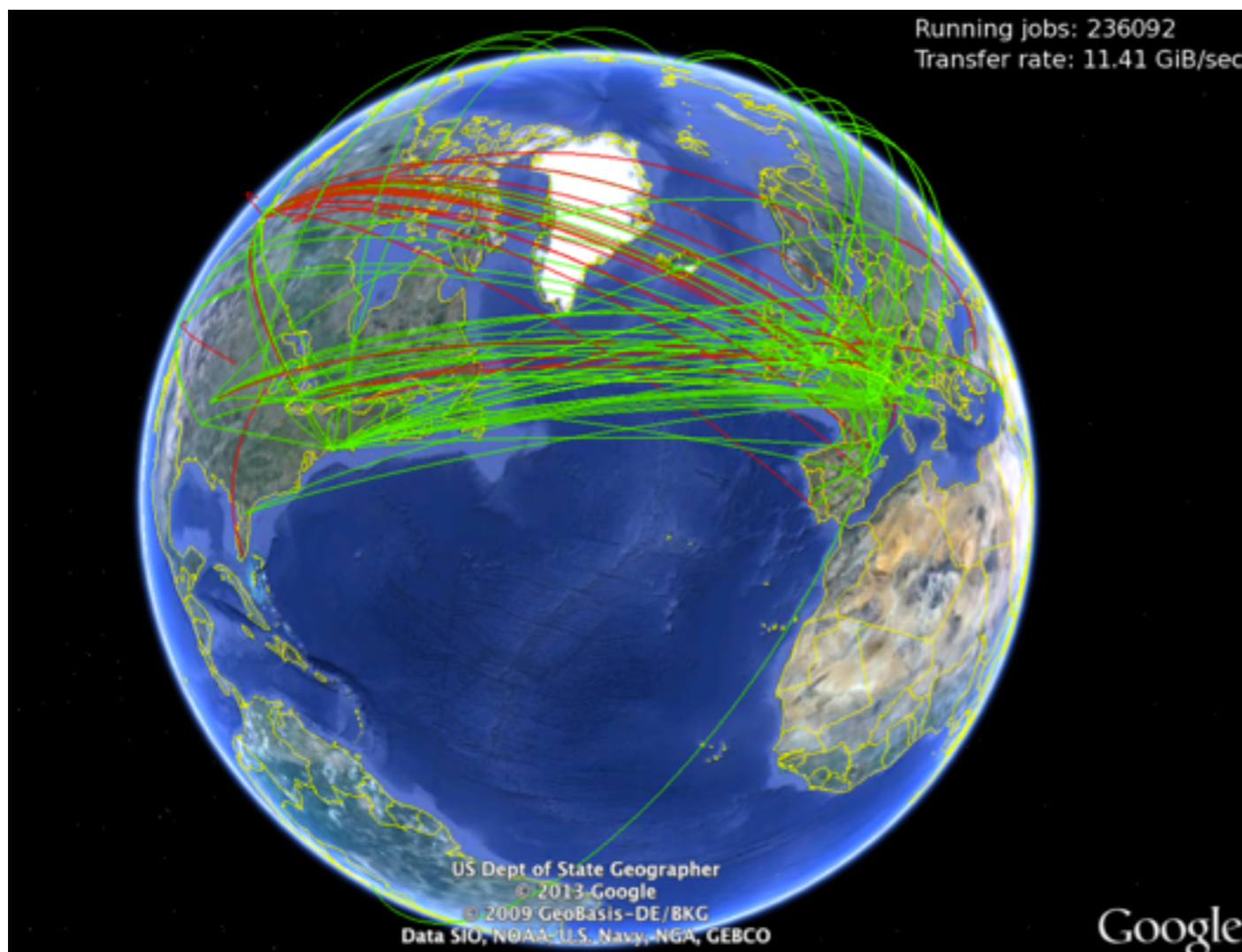


# Satoja petatavuja dataa



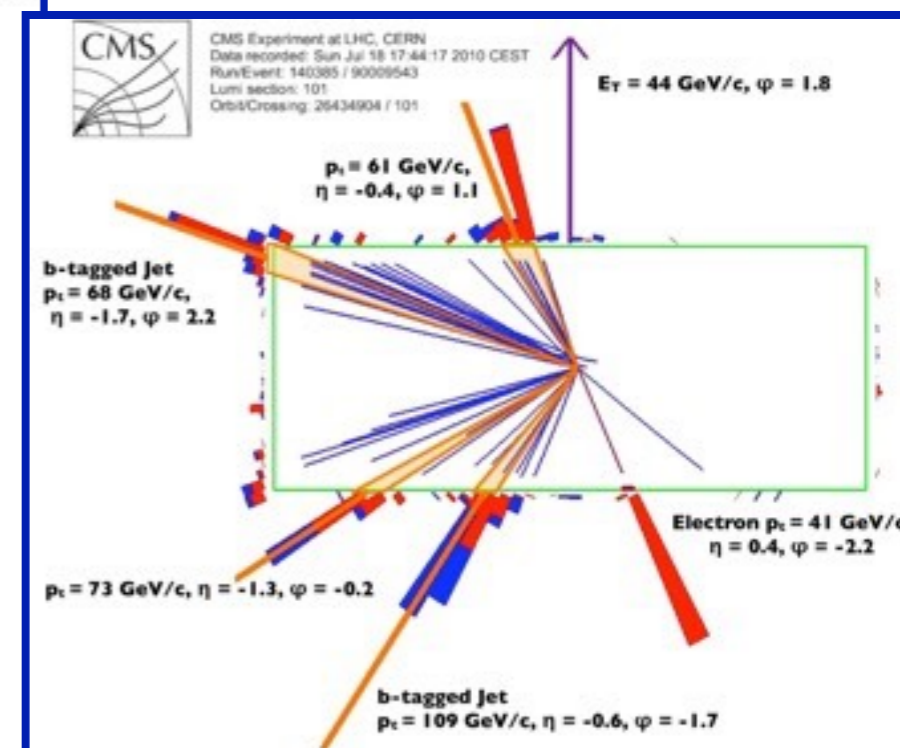
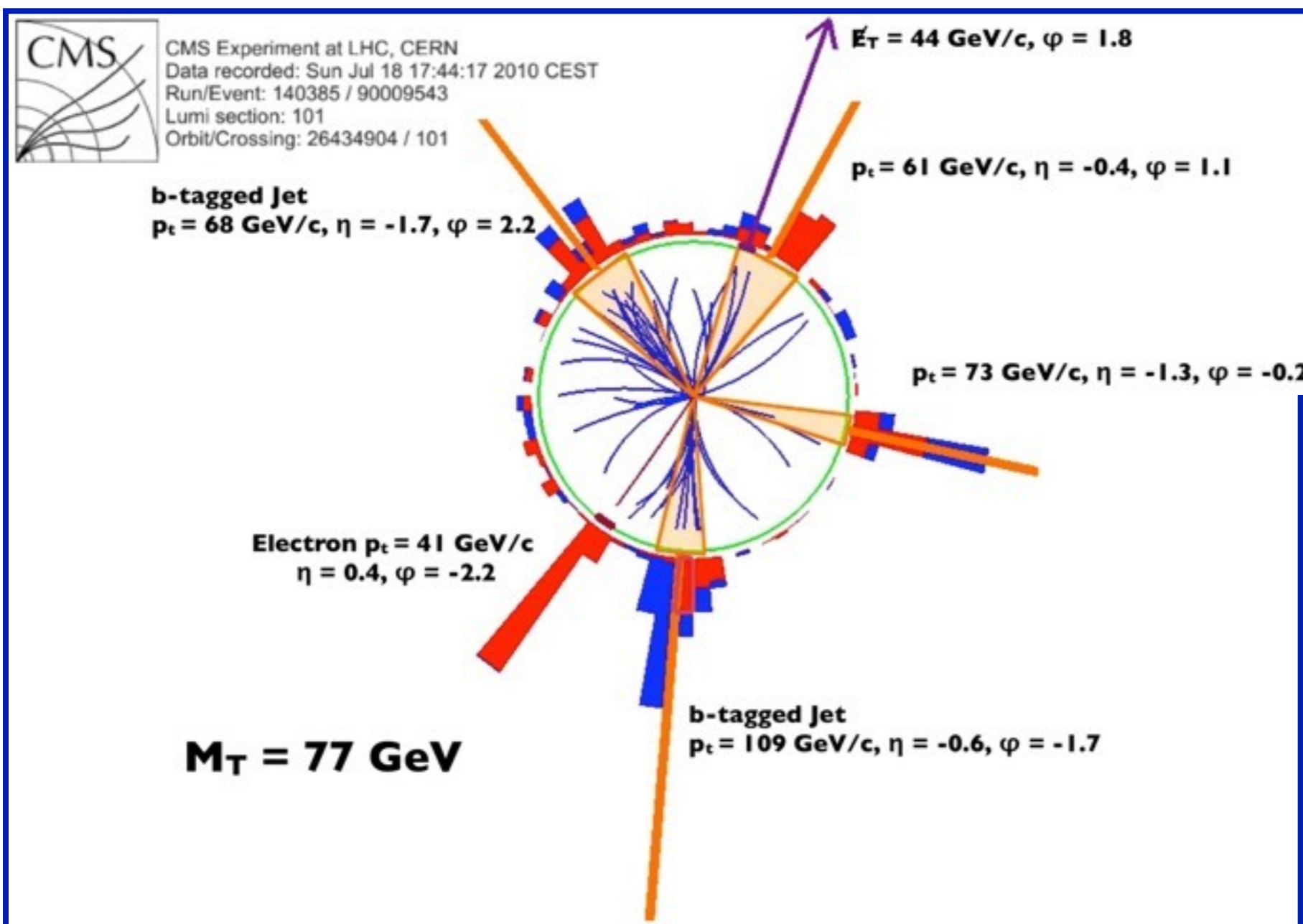
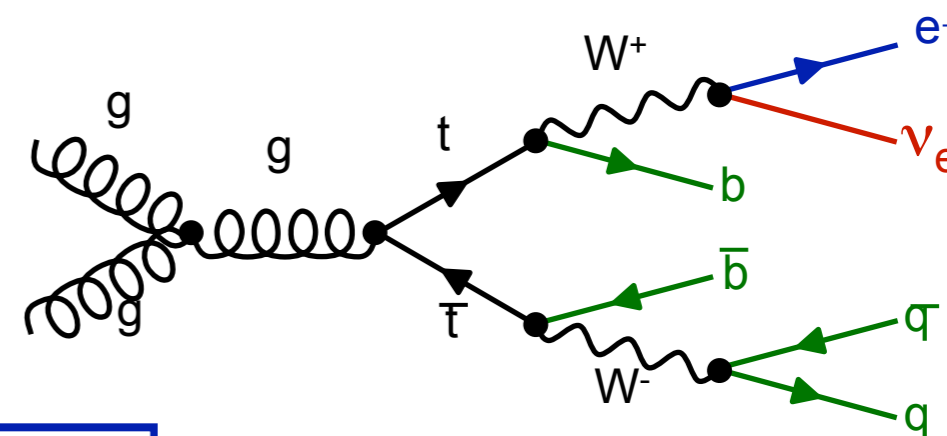


- Myös CERNin datan käsittely on jaettu maailmanlaajuisesti
- Kaikesta datasta yksi kopio CERNissä (Tier-0)
- Varmuuskopio jossain päin maailmaa (Tier-1)
- Analyysikopioita (Tier-2, Tier-3) jaettuna useille tietokonekeskuksille
  - Datan voi analysoida lähettämällä työn tietokonekeskukselle, jolla on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

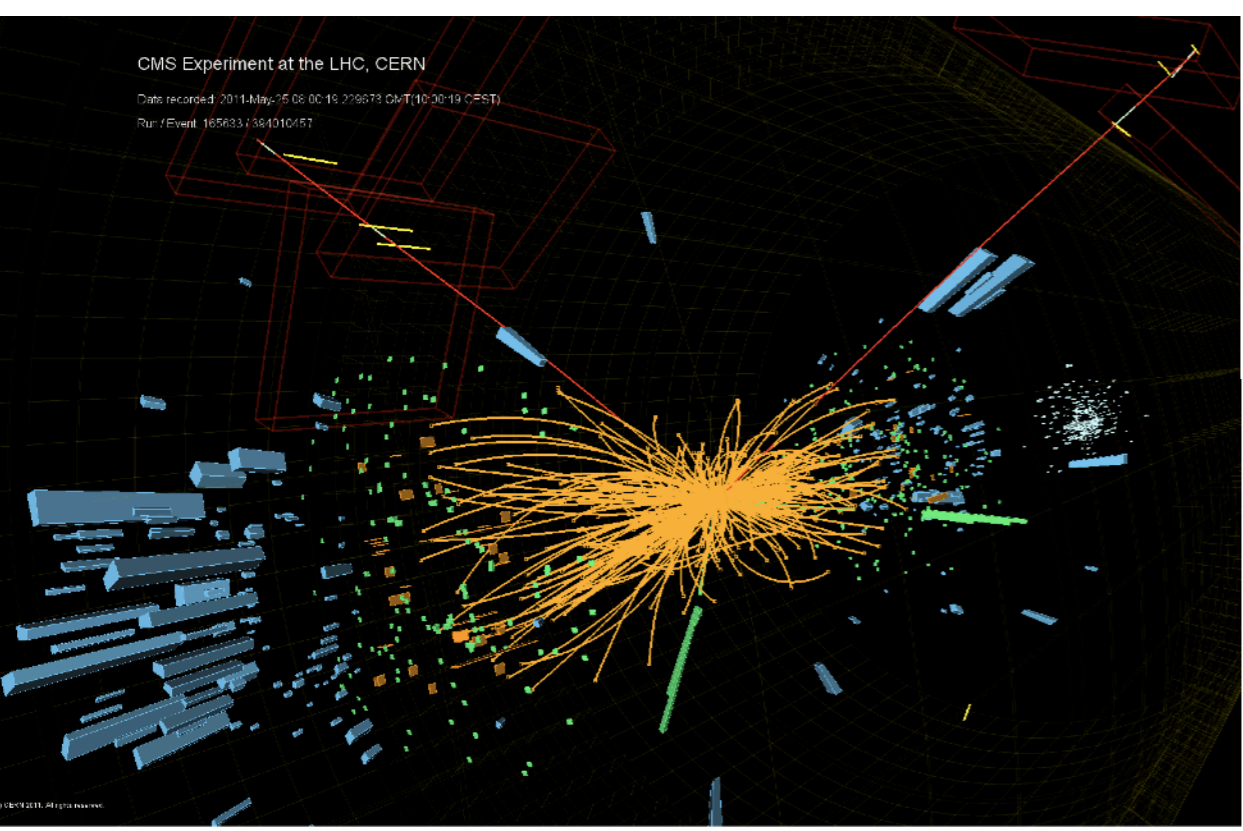
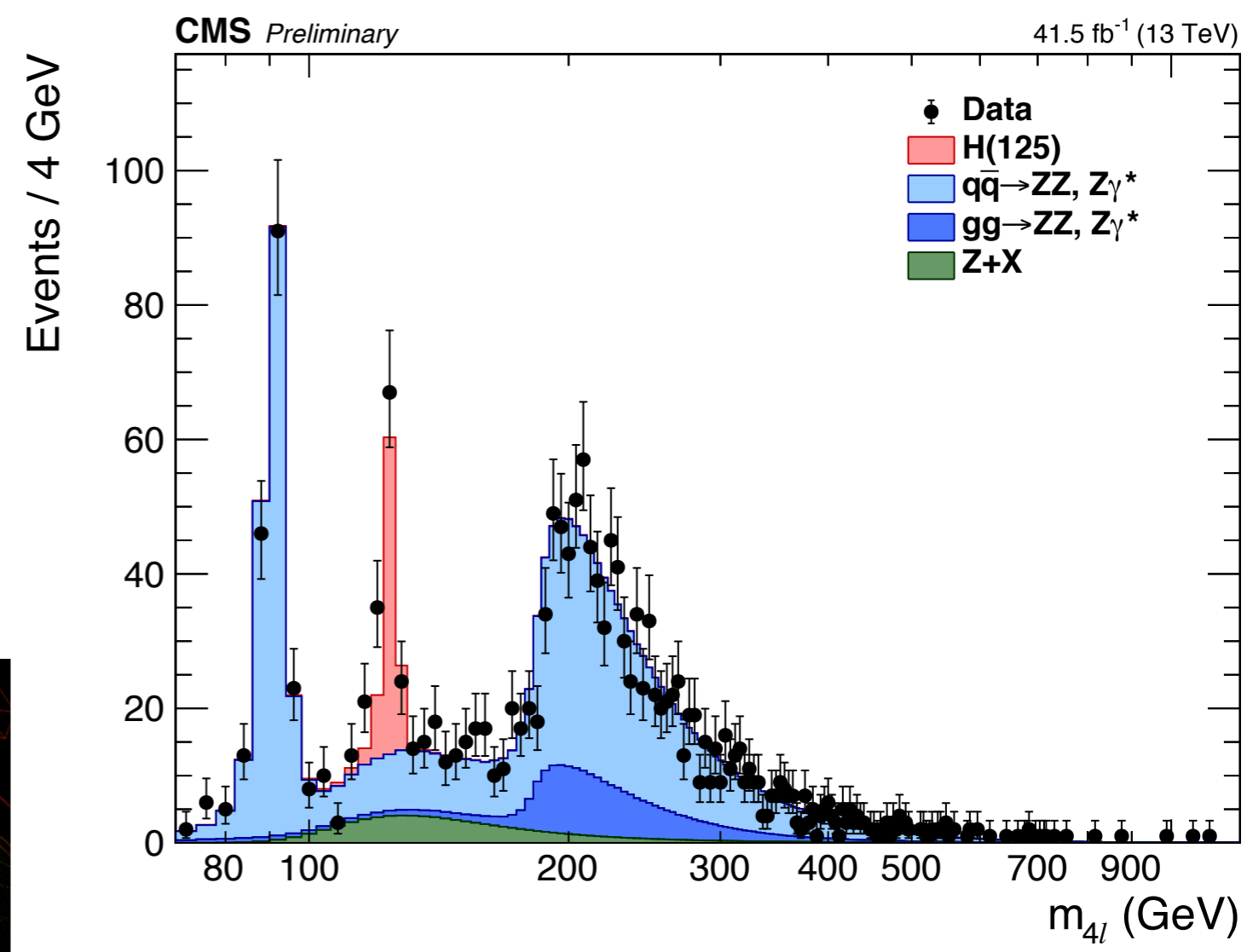
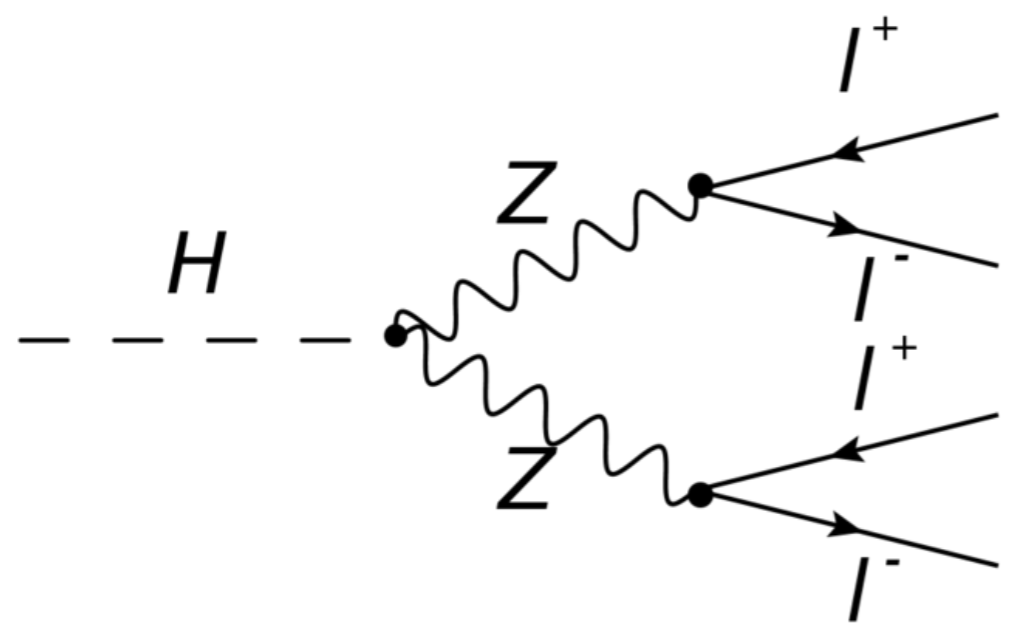


<http://wlcg.web.cern.ch/wlcg-google-earth-dashboard>

- Esimerkki: Gluoni-gluonifuusio, jossa syntyy top-kvarkkeja

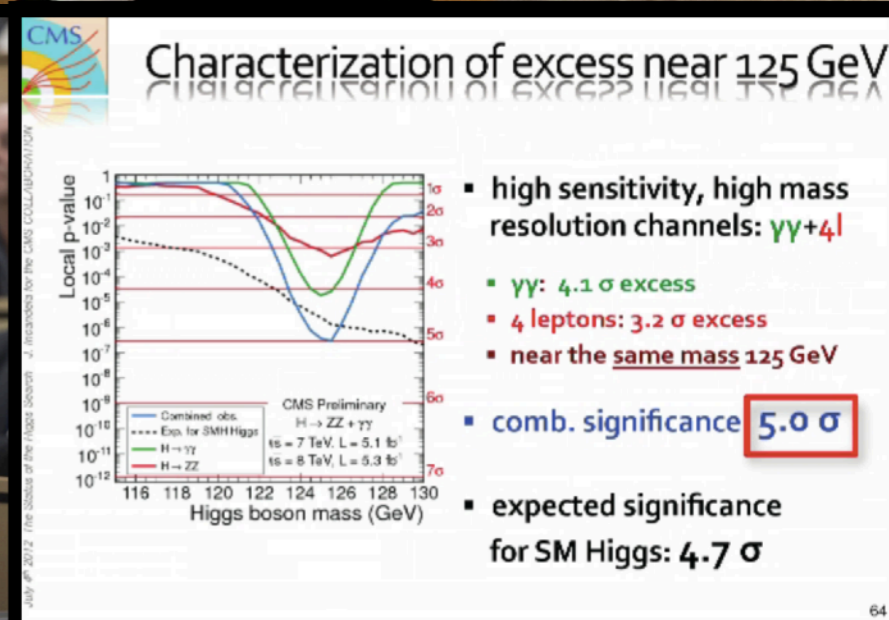






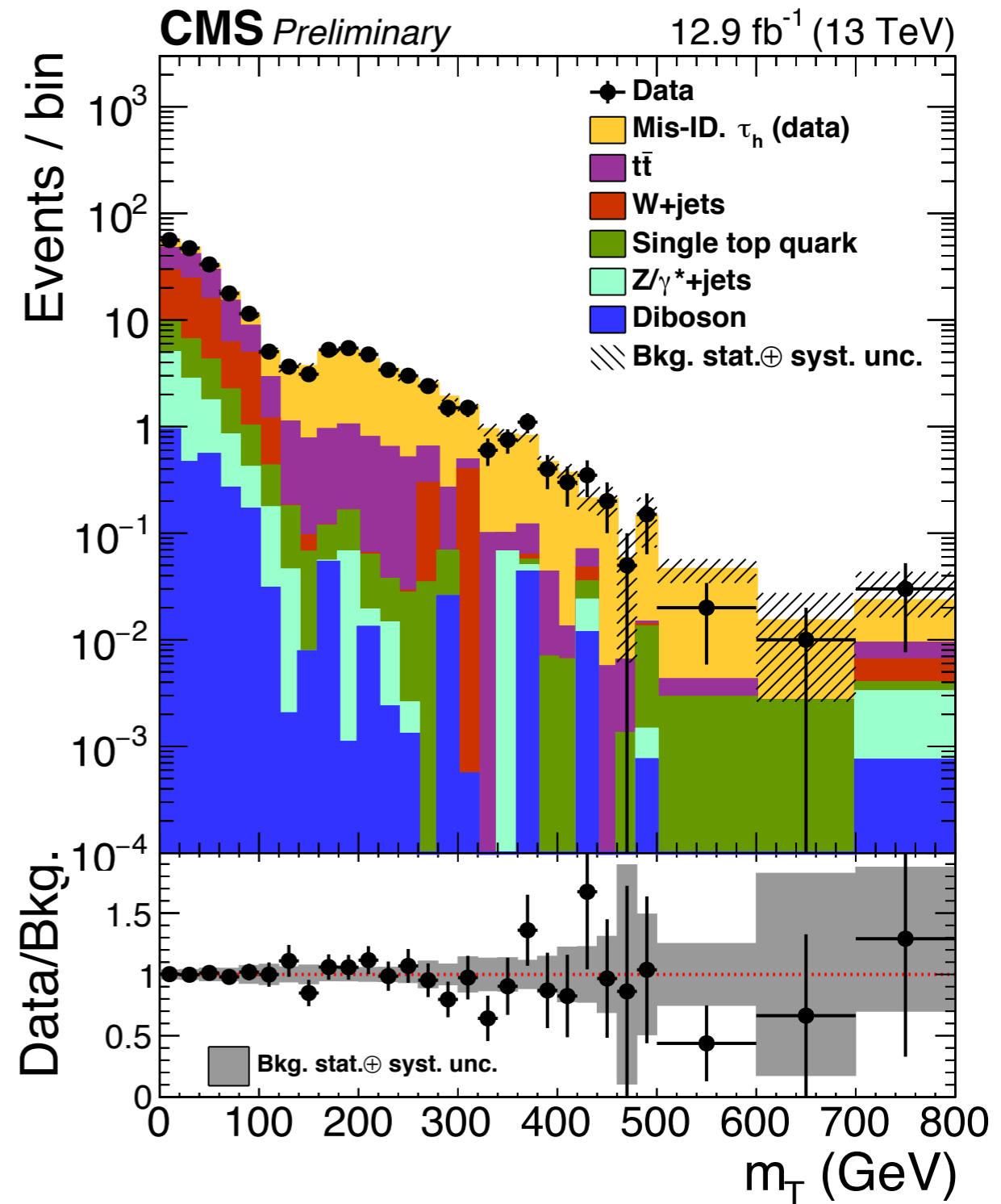
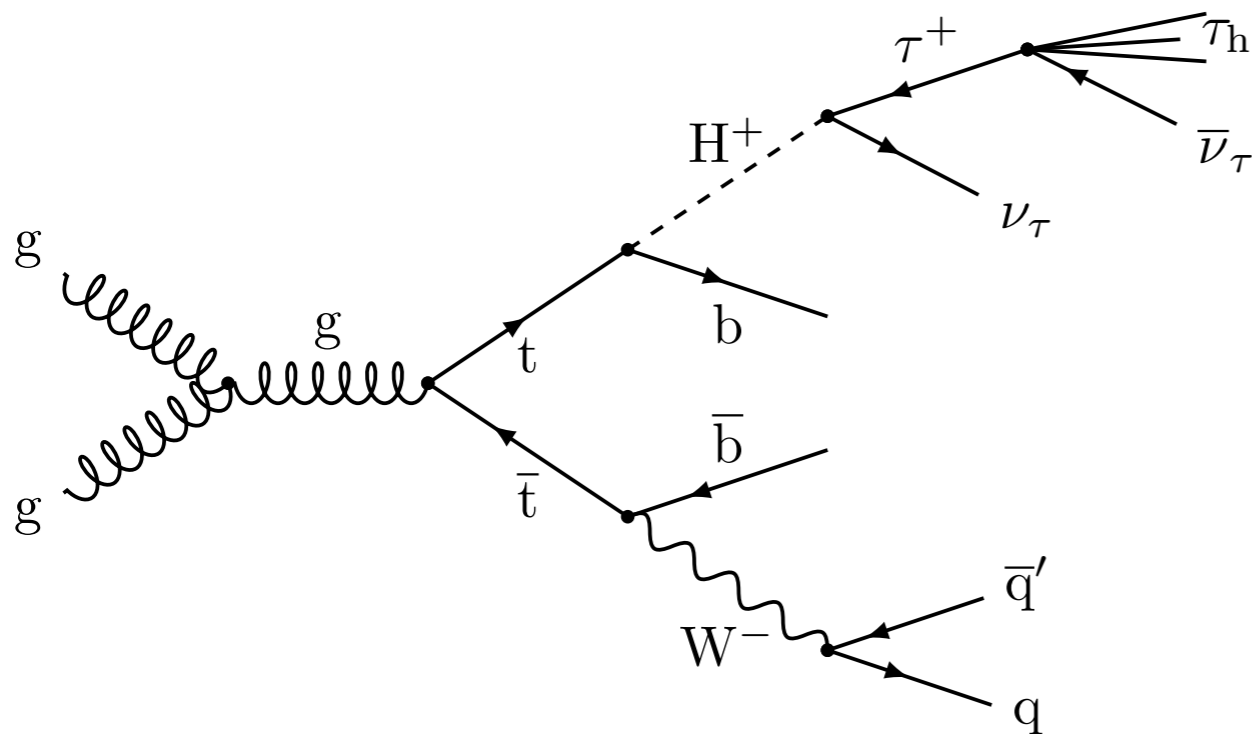
**Neljän leptonin systeemin  
 ”invariantti massa”  
 vastaa sen hiukkasen massaa  
 josta leptonit ovat peräisin**



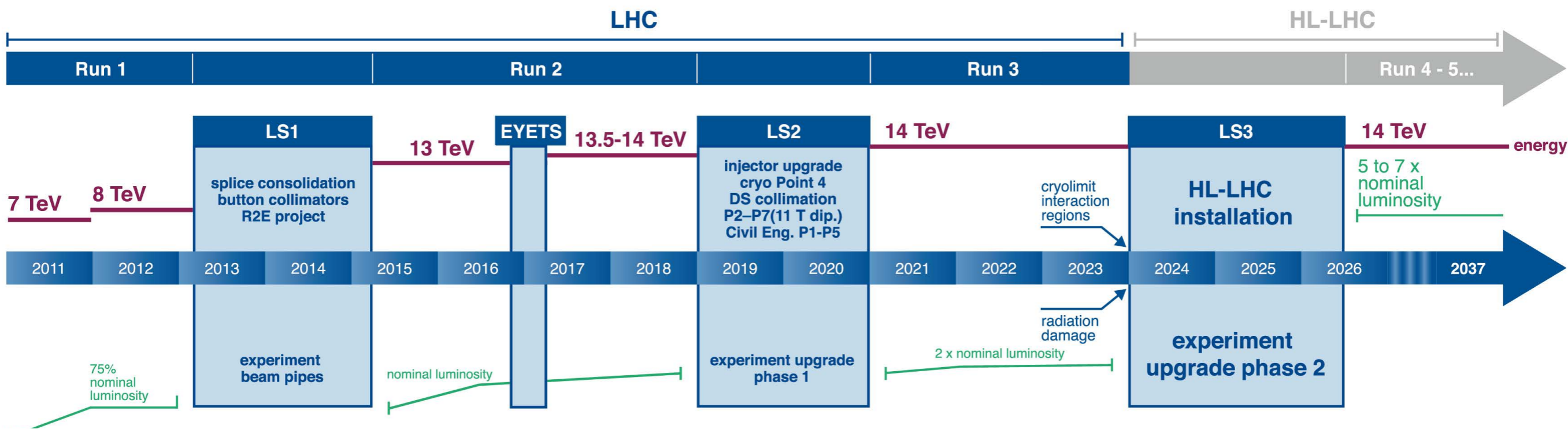




- Monet nykyistä standardimallia laajemmista teorioista ennustavat useita erilaisia Higgsin bosoneita
- Helsingin ryhmä etsii sähkövarauksellista Higgsin bosonia joka hajoaisi tau-leptoniksi ja neutriinoksi



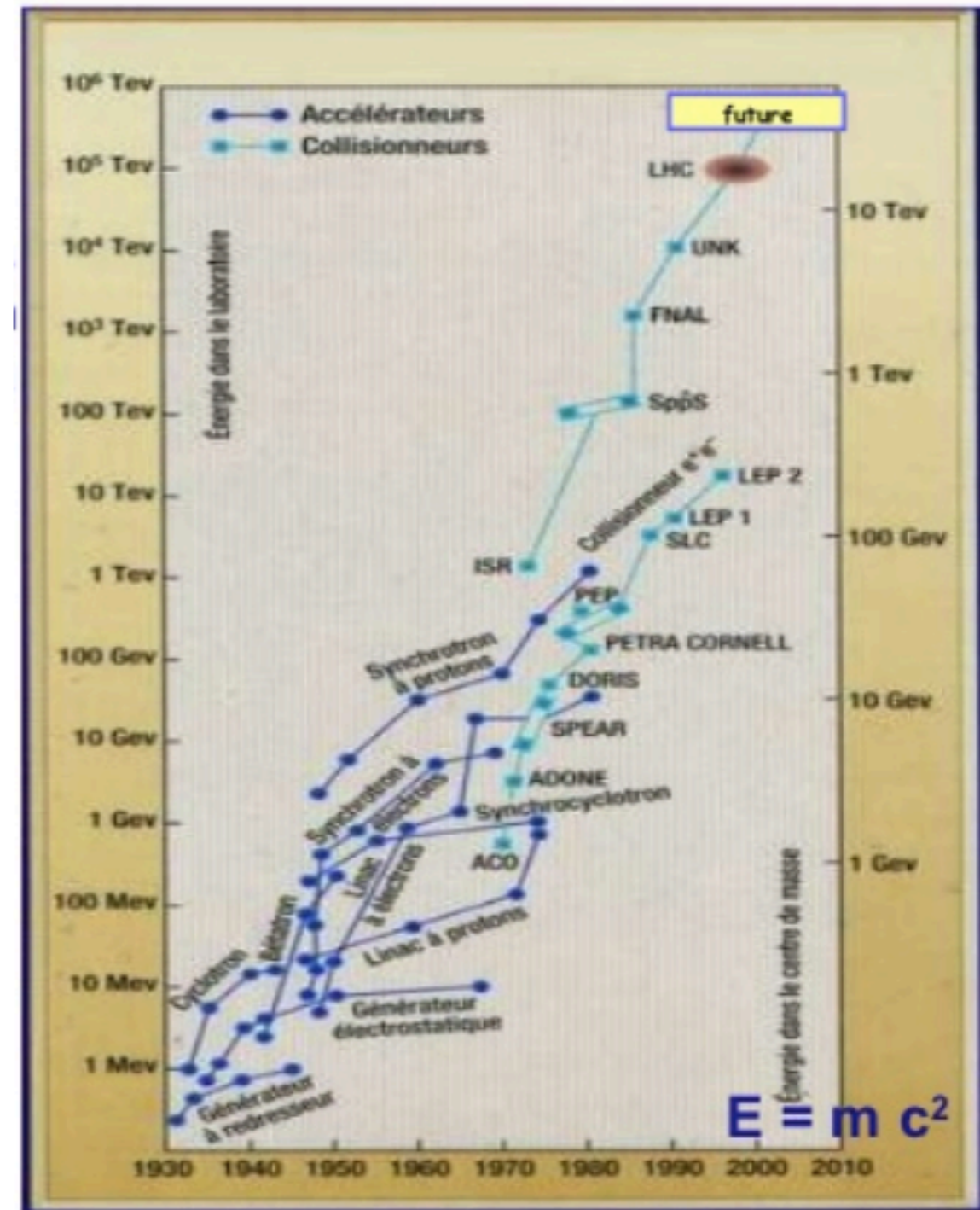
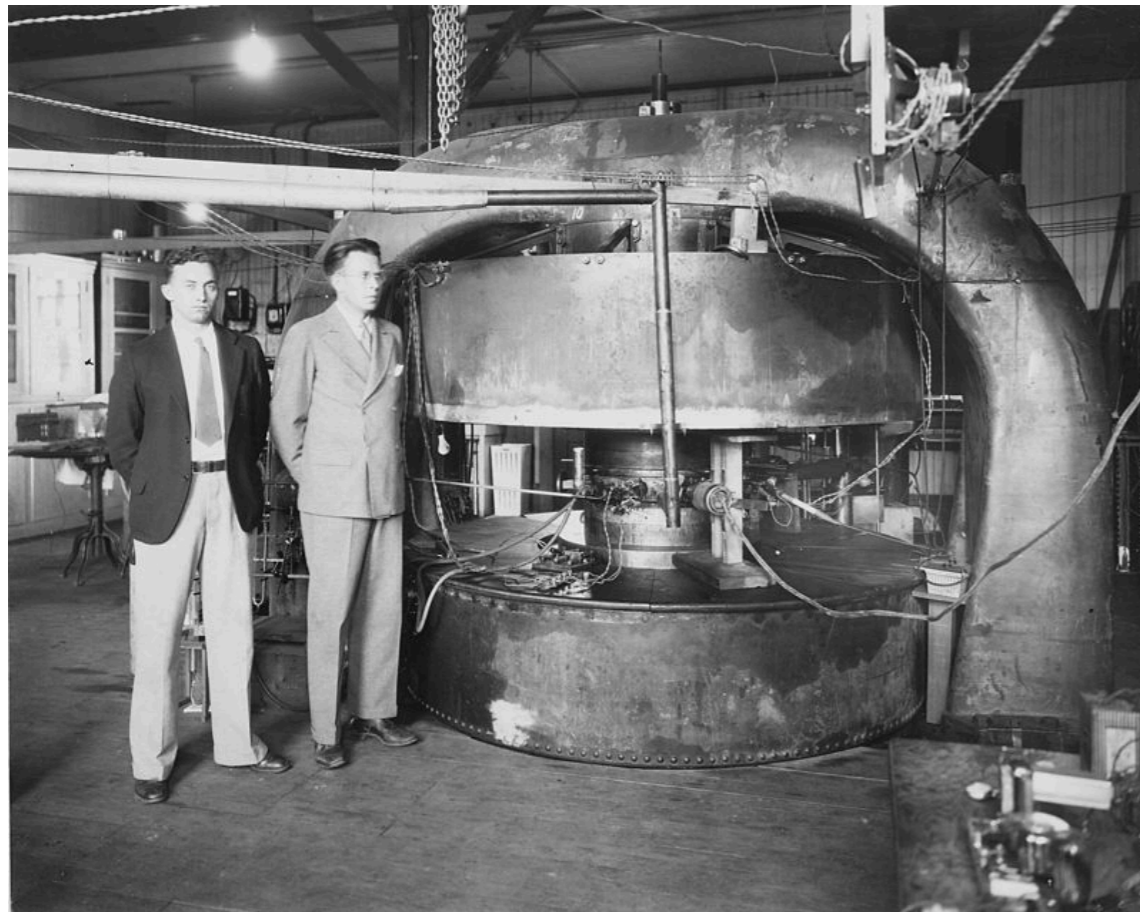
# Osa 4: Tulevaisuuden haasteet



Tulevaisuuden kiihdyttimet  
 Kehittyvät analyysimenetelmät  
 Suuret kysymykset



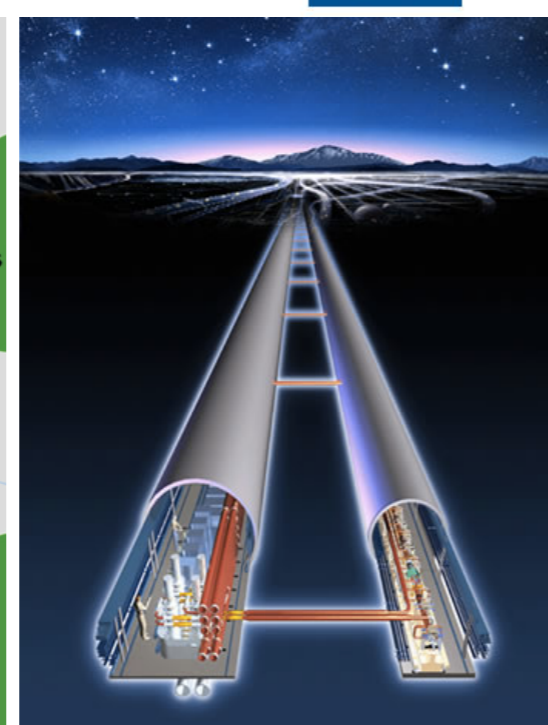
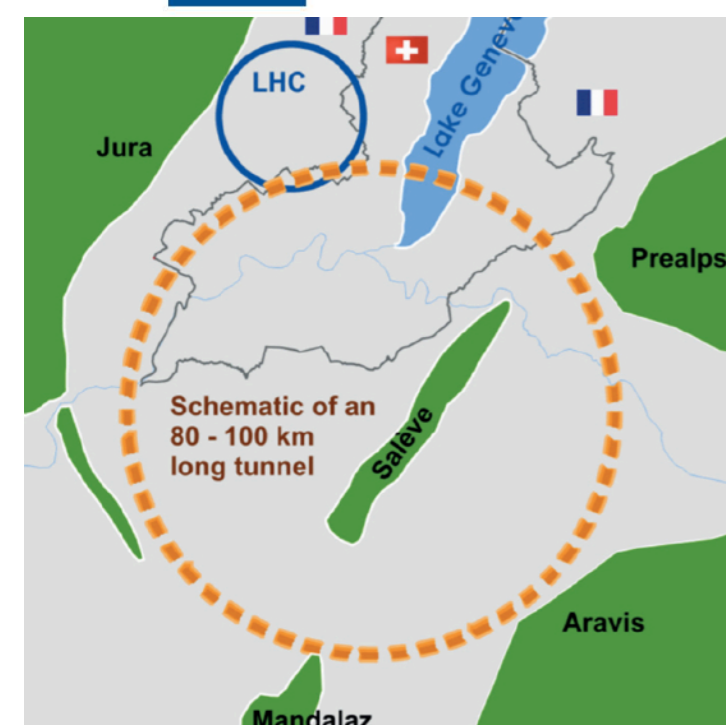
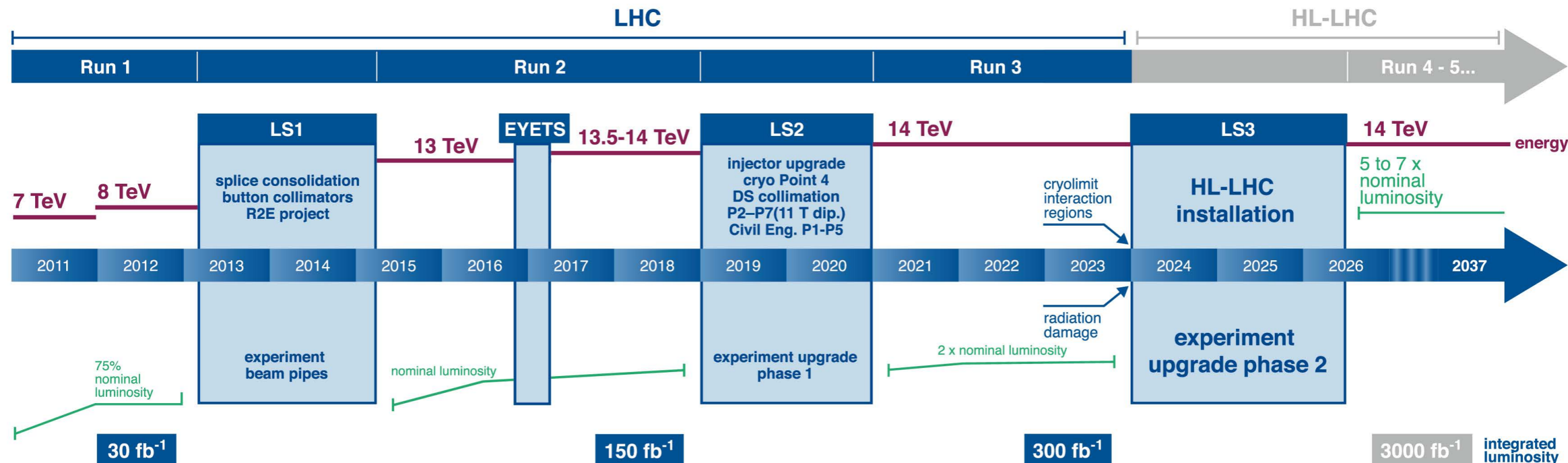
Kiihdytinfyysikko Stanley Livingstonin havainto vuodelta 1950 (pätee edelleen):  
**Kun rakennettujen kiihdytinten energiat asettaa logaritmiselle skaalalle, kuvaan voi sovittaa suoran!**



**Kiihdytinten ja törmäytinten rakentajat ovat siis onnistuneet kasvattamaan energiaa kertoimella ~33 joka vuosikymmenellä!**



## LHC / HL-LHC Plan



### WORLD OF COLLIDERS

Physicists around the world are designing a range of particle colliders that are much bigger than the Large Hadron Collider at CERN, Europe's particle-physics laboratory.

- Proton collider
- Electron-positron collider

**CERN-HOSTED LARGE HADRON COLLIDER**  
 2009–35  
 Energy: 14 teraelectronvolts (TeV)  
 US\$5 billion

**JAPAN-HOSTED INTERNATIONAL LINEAR COLLIDER**  
 Proposed: 2030  
 Energy: ≤1 TeV  
 US\$10 billion



**CHINA-HOSTED ELECTRON-POSITRON COLLIDER**  
 Proposed: 2028  
 Energy: 0.24 or ≤0.35 TeV  
 US\$3 billion



**CHINA-HOSTED PROTON COLLIDER**  
 Proposed: 2030s  
 Energy: 70–100 TeV or 100–140 TeV



**CERN-HOSTED SUPER PROTON COLLIDER**  
 Proposed: 2035–40  
 Energy: 100 TeV  
 < US\$10 billion



- FCC: kiihdytin ohjelman looginen seuraava askel: 100 km, 100 TeV
  - Haasteet:  
Sähkömagneettiteknologian rajat, synkrotronisäteily, data-analyysi
  - Hintalappu: 20 mrd. €
  - LHC maksoi 5 mrd, operointi ~ 1 mrd/vuosi
- 

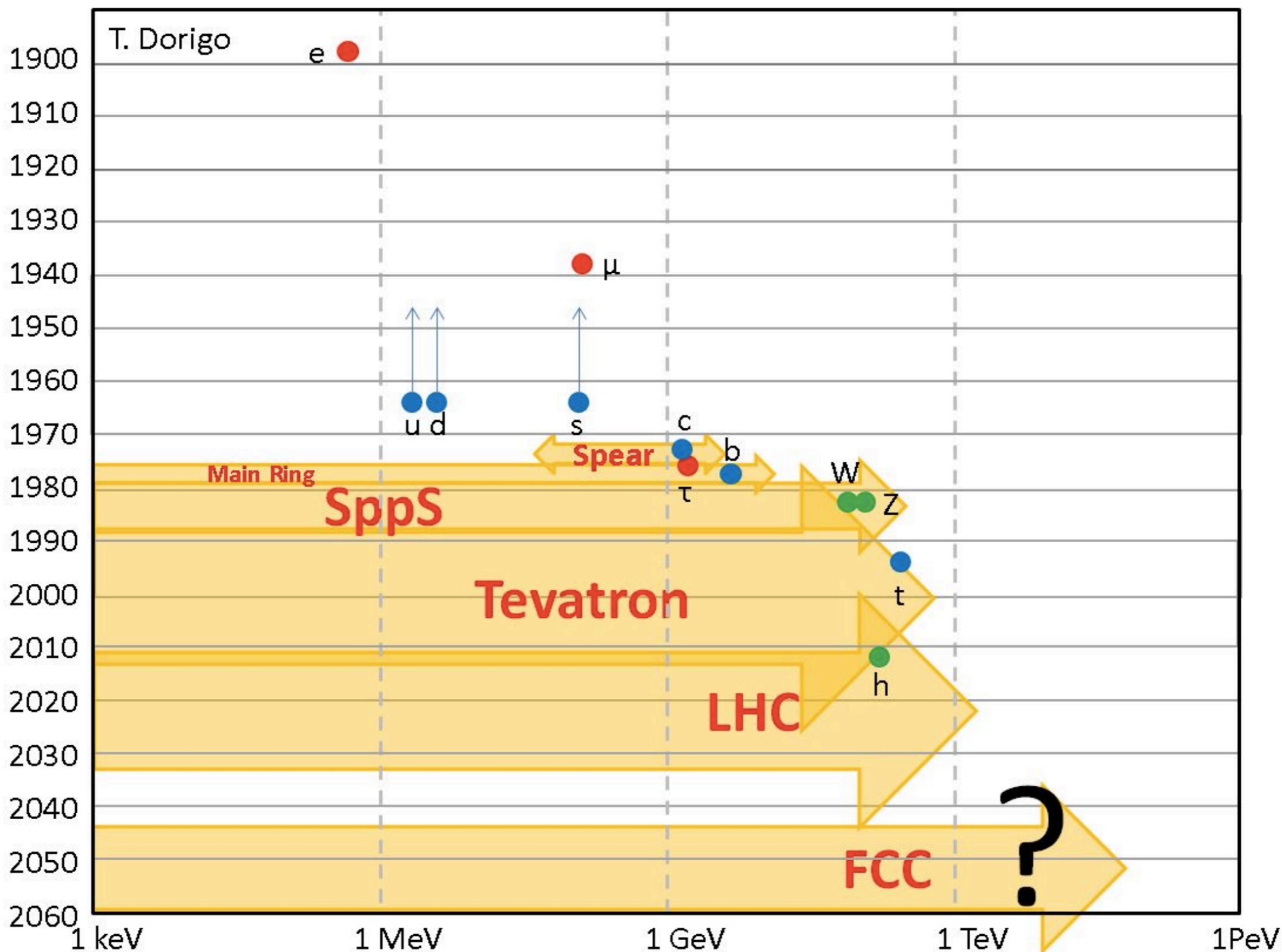


# Ehtiikö Kiina ensin?

**CepC/SppC study (CAS-IHEP), CepC CDR end of 2014,  $e^+e^-$  collisions ~2028;  $pp$  collisions ~2042**











# Fyysikoille riittää työtä



Ymmärryksemme luonnosta on lisääntynyt viime vuosikymmeninä valtavaa vauhtia, mutta työ on pahasti kesken



Ymmärryksemme luonnosta on lisääntynyt viime vuosikymmeninä valtavaa vauhtia, mutta työ on pahasti kesken

- Onko löytämämme **Higgsin bosoni** standardimallin mukainen ja ainoa?
- Miksi maailmankaikkeudessa on enemmän materiaa kuin antimateriaa?
- Miten selittää **neutriinojen massa**?
- Mitä on **pimeä aine**?
- Entä pimeä energia? Miten **gravitaatio** yhdistetään muihin (kvantti)vuorovaikutuksiin? Onko ulottuvuuksia vain arkipäiväiset 3+1?
- Miksi hiukkasperheitä on kolme? Onko "alkeishiukkasilla" sisäinen rakenne? Onko luonnossa lisää symmetrioita? Supersymmetria?



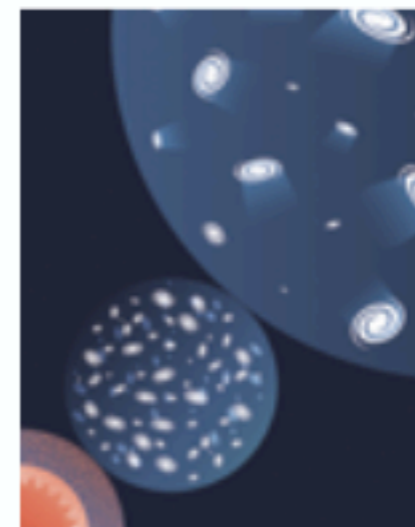
Higgs boson



Neutrino mass



Dark matter



Cosmic acceleration



Explore the unknown





Higgs boson



Neutrino mass



Dark matter



Cosmic acceleration



Explore the unknown

## Energy frontier colliders



**X**

(X)

**X**

**X**

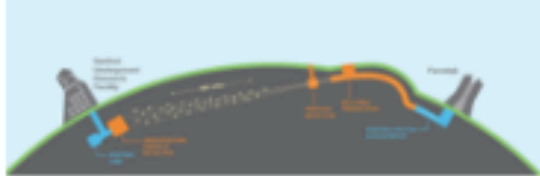
## High-precision experiments



**X**

**X**

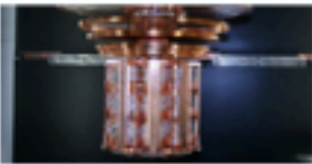
## Neutrino experiments



**X**

**X**

## Direct searches



**X**

**X**

## Cosmic surveys



**X**

**X**



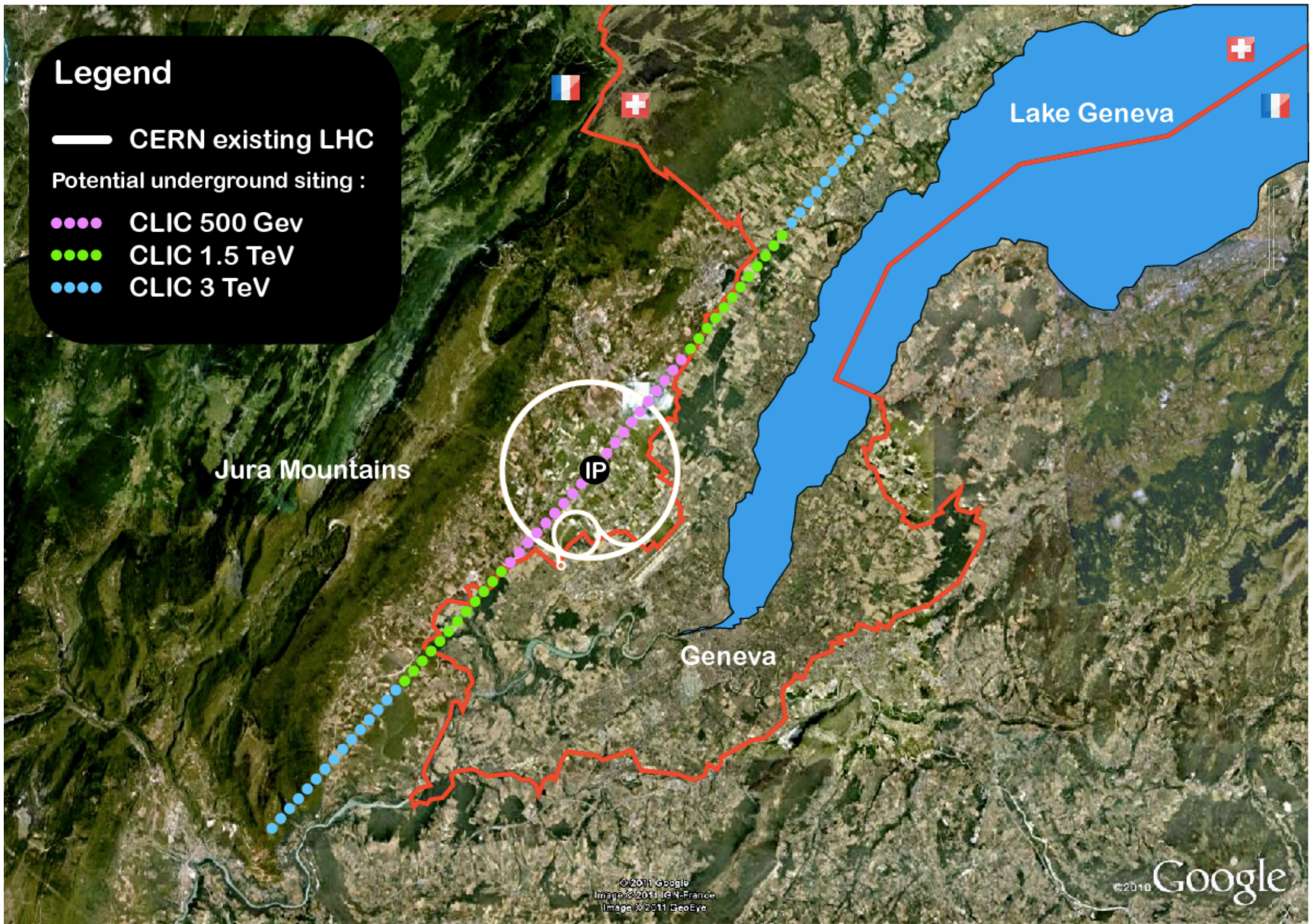


# Kiitos!



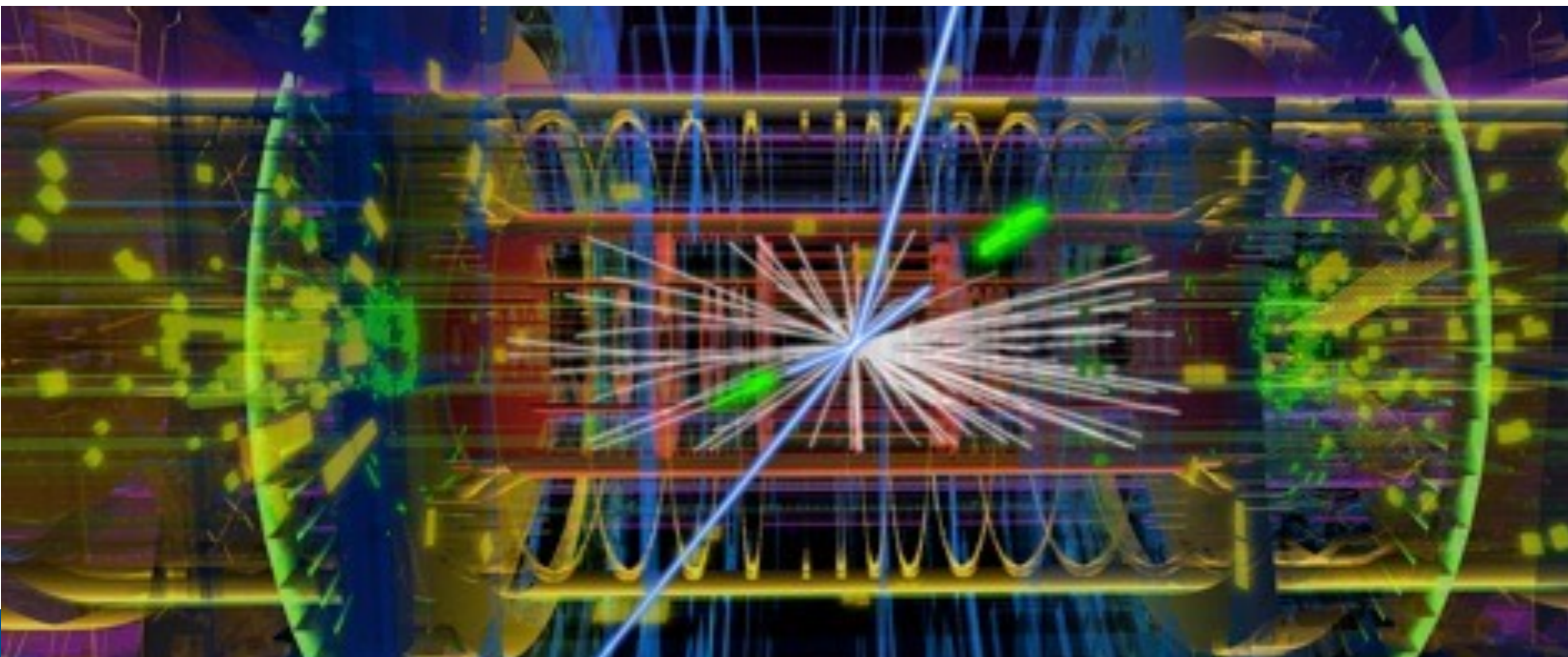
# Varakalvot







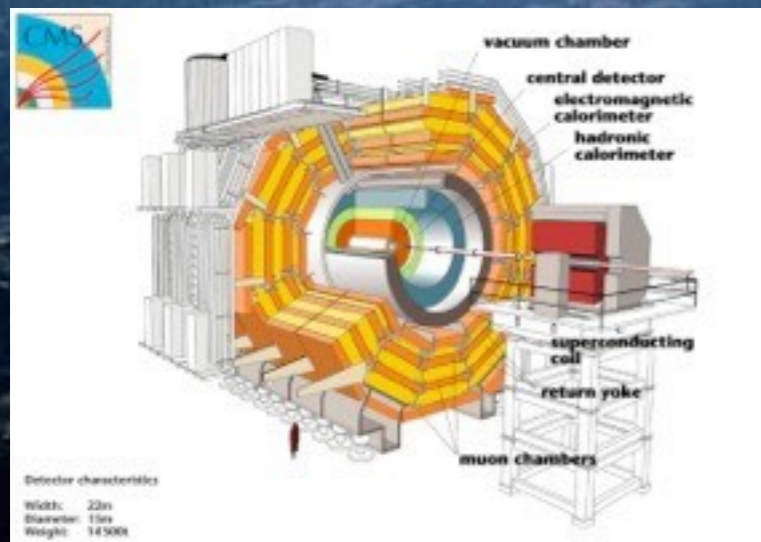
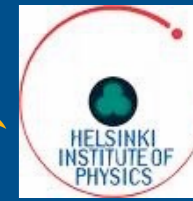
- Törmäyksessä protonien energia muuttuu uusien hiukkasten massaksi Einsteinin kaavan  $E = mc^2$  mukaisesti
- Osa energiasta päätyy uusien hiukkasten liike-energiaksi, eli itse asiassa  $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$ :
  - hiukkaset **relativistisia** Nopeus  $v$  lähes valonnopeus  $c$
  - Energia  $E$  ja liikemäärä  $p$  paljon suurempia kuin hiukkasen massa  $m$ :  $E \gg mc^2$ , jolloin  $p \sim E/c$
- **Kiinteällä kohtiolla** vain  $\sqrt{E_{\text{suihku}}}$  käytettävissä uusien hiukkasten massaan, **protoni–protoni-törmäyksessä**  $2 \cdot E_{\text{suihku}}$
- Usein ”sovitaan” että  $c=1$  ja  $\rightarrow$  energiasta (GeV), liikemäärästä (GeV/c) ja massoista (GeV/c<sup>2</sup>) voi käyttää samaa energiayksikköä **GeV** (vastaa noin protonin massaenergiaa)





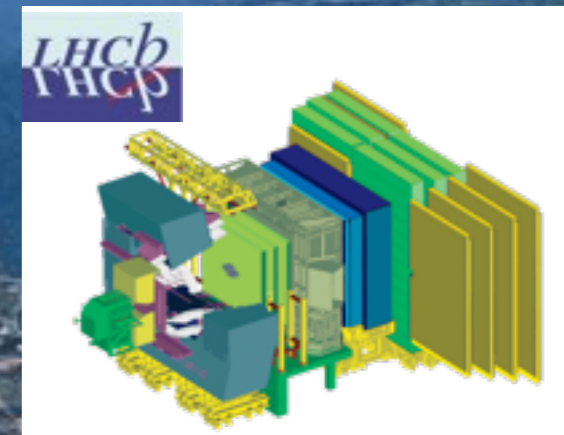


# LHC:n koeasemat



**CMS**  
+TOTEM

B-fysiikkaa  
protoni-protoni  
-törmäyksillä



**LHCb**  
+MoEDAL

Yleisilmais  
protoni-protoni ja  
lyijy-lyijy -törmäyksille

LHC-törmäytin

SPS-törmäytin

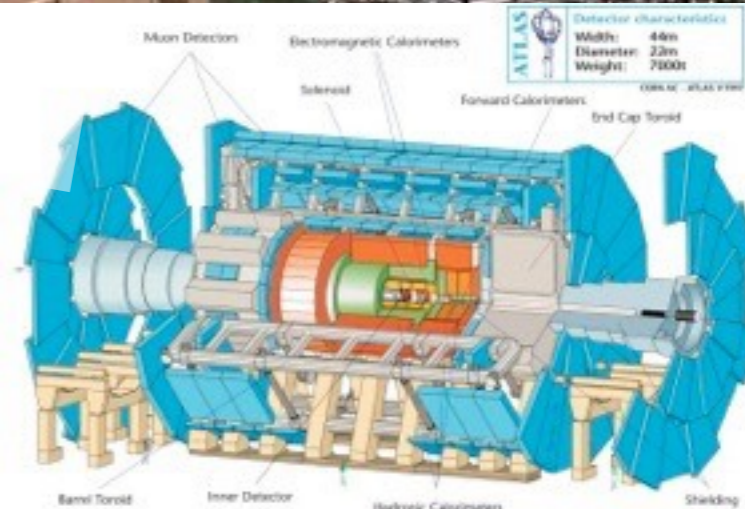
Raskasionifysiikkaa



**ALICE**

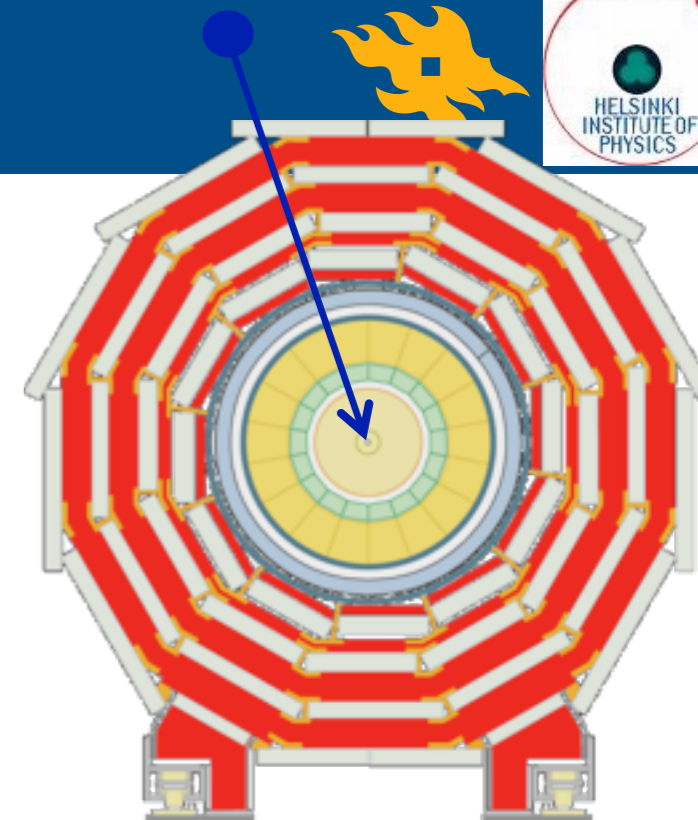
**ATLAS**  
+LHCf

PS-törmäytin





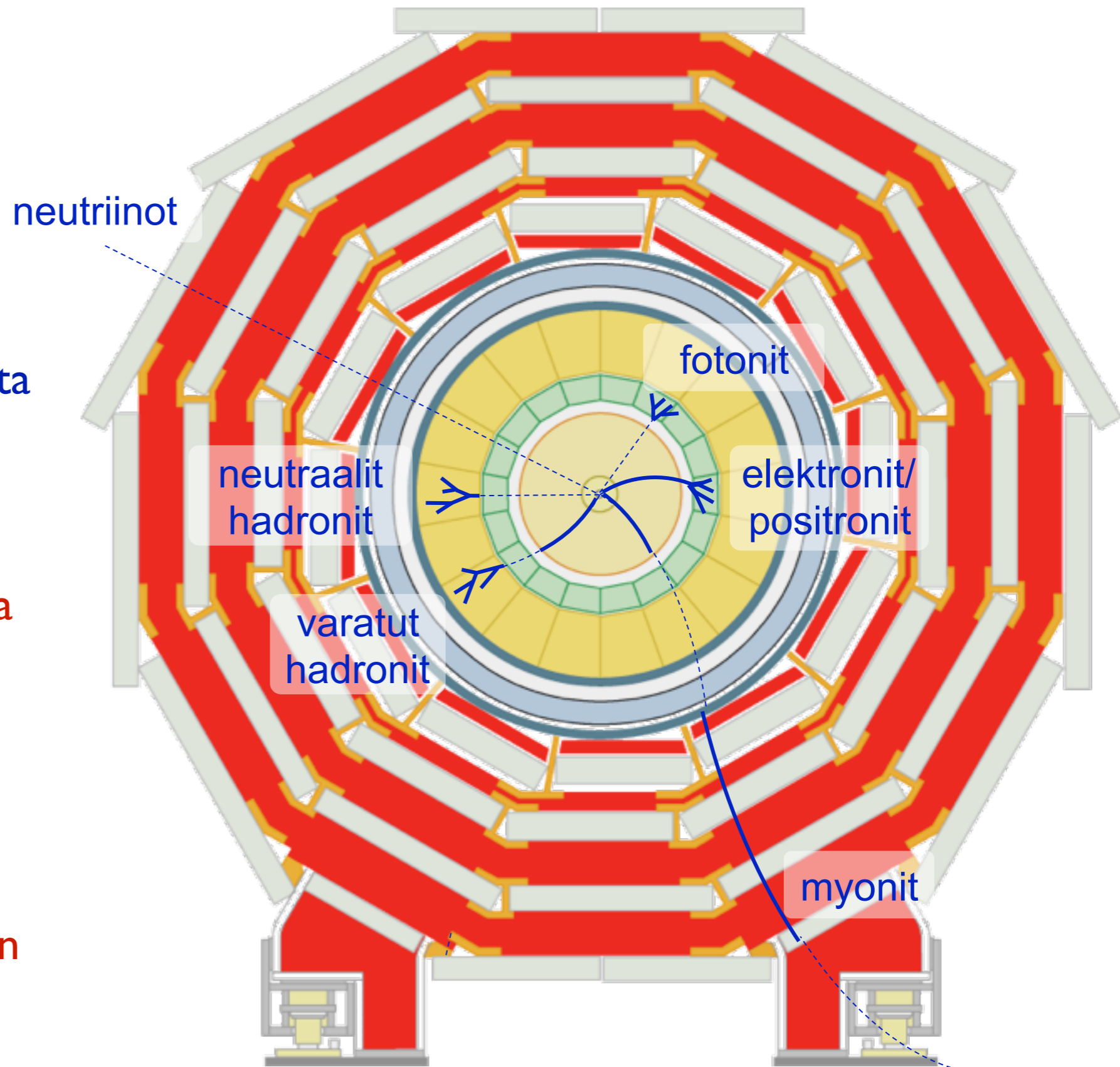
- Protonikimput (kussakin n.  $10^{11}$  protonia) kulkevat koelaitteiston läpi ohuessa ( $<1\text{mm}$ ) beryllium-putkessa, jonka sisällä on ~tyhjiö
- Törmäystuotteet lentävät yleensä vaivatta putken läpi
- Putkessa vastakkaisiin suuntiin liikkuvat protoni"rihmat" (*bunches*) kulkevat toistensa läpi n.  **$20\ \mu\text{m} \times 10\ \text{cm}$**  kokoisella törmäysalueella keskellä koeasemaa



Asennettu tyhjiöputki (kokonaisuudessaan 44m)



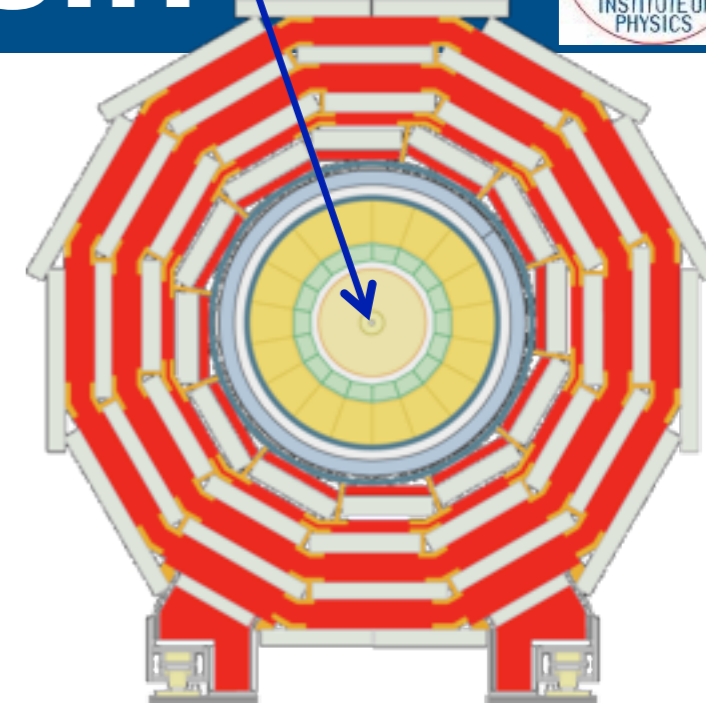
- Törmäystapahtuman selvittäminen on salapoliisityötä, jossa yhdistellään vihjeitä eri ilmaisimista
- Yhdistetään erilaisten ilmaisintyyppien informaatiota
  - Jälki-ilmaisimet (varattujen hiukkasten jäljet)
  - Sähkömagneettinen kalorimetri (elektronien ja fotonien energia)
  - Hadroninen kalorimetri
  - Myoni-ilmaisimet
  - Ilmaisimet voimakkaan magneettikentän sisällä, jotta varattujen hiukkasten radat taipuvat



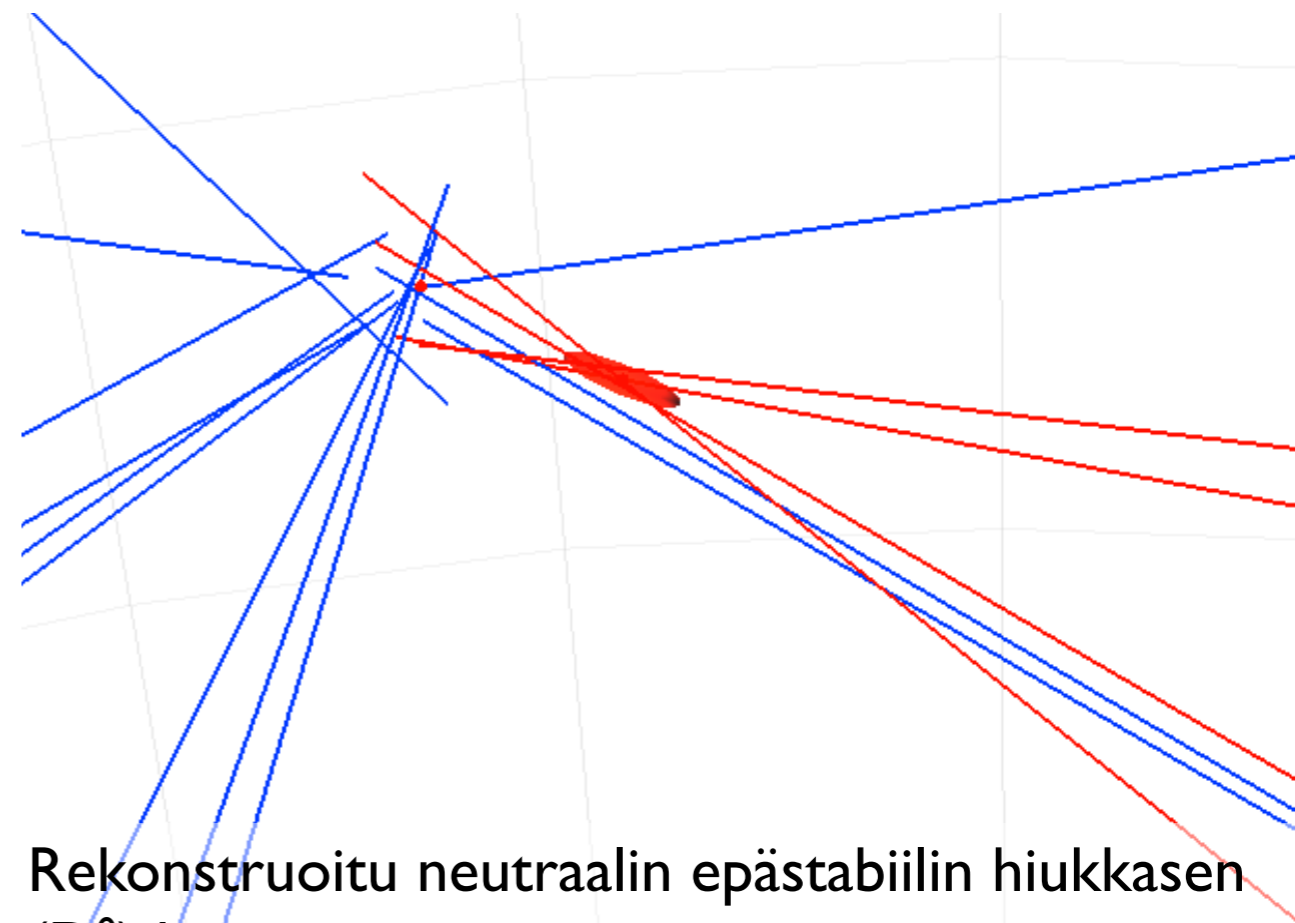




- Sisempi osa jälki-ilmaisimesta: piipikseli-ilmaisimia
  - 70 milj. piipikseliä, joiden koko  $100\ \mu\text{m} \times 150\ \mu\text{m}$
  - Toimintaperiaate: varatut hiukkaset tuottavat piissä (puolijohde) elektroni–aukko-pareja
  - Vähintään kolme mittauspistettä kullekin radalle
  - Mahdollistaa hiukkasen hajoamispaikan määrittämisen
  - Radan kaarevuussäde  $R$  kertoo hiukkasen liikemäärän ( $p=qRB$ ) ja varauksen merkin



Puolikas piipkselimoduuli

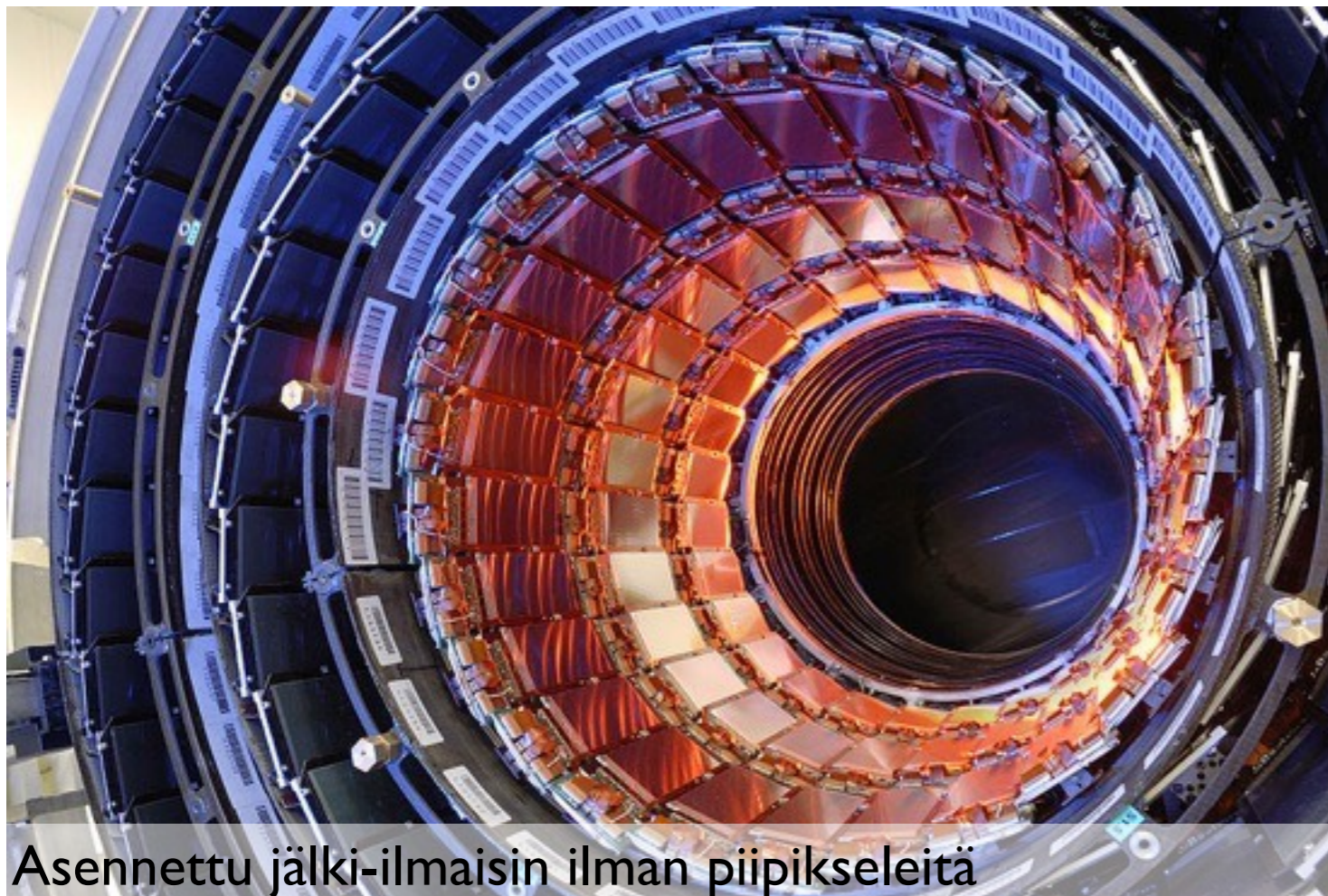
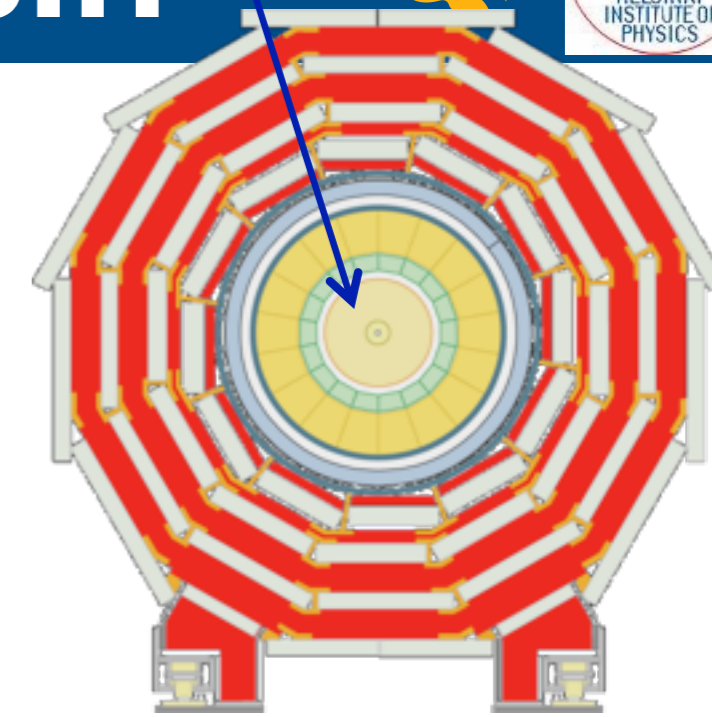


Rekonstruoitu neutraalin epästabiilin hiukkasen ( $D^0$ ) hajoamispiste



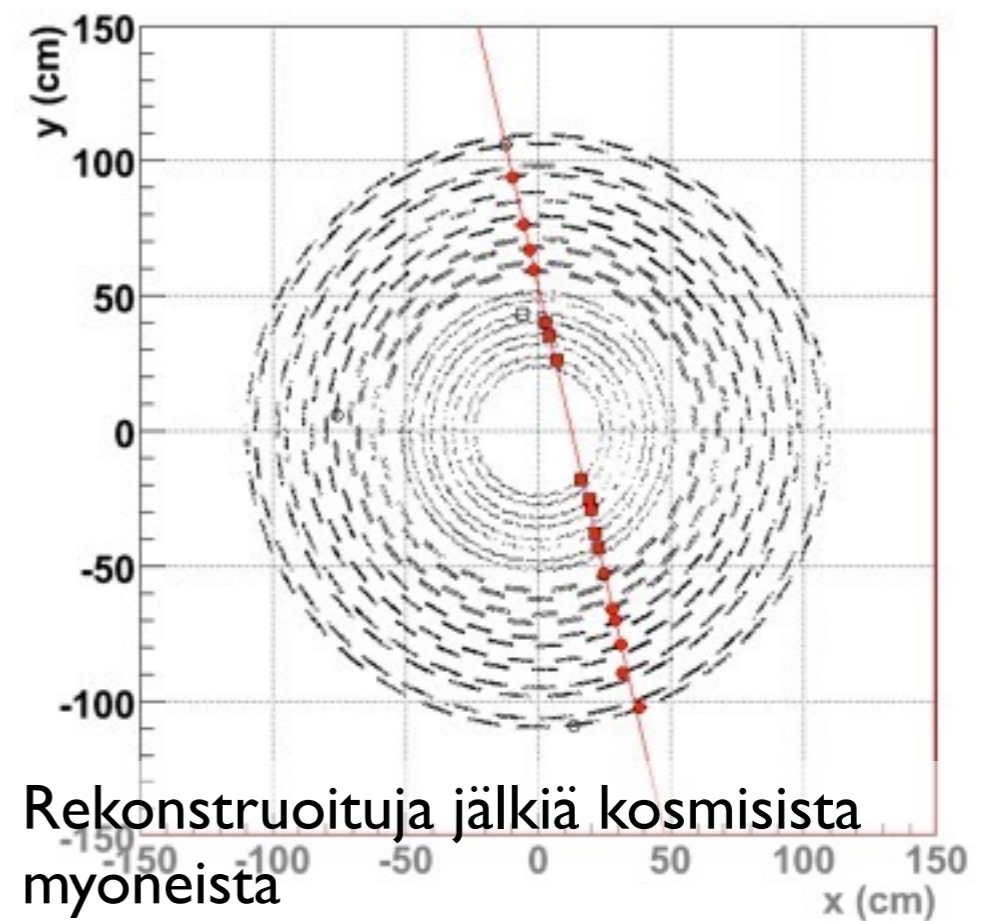


- Ulompi osa jälki-ilmaisimesta: piinauhailmaisimia
  - N. miljoona pii” nauhaa”; n. 200 m<sup>2</sup> piitä
  - Varatut hiukkaset tuottavat piissä elektroni-aukkopareja
  - Mittaa varattujen hiukkasten jälkiä n. 10 μm tarkkuudella, ~10 mittauspistettä kullekin radalle
  - Signaali perustuu ionisaatioon: hiukkanen irrottaa atomien elektroneja



Asennettu jälki-ilmaisimien ilman piipikseleitä

Run 50905 Event 1576, y vs x

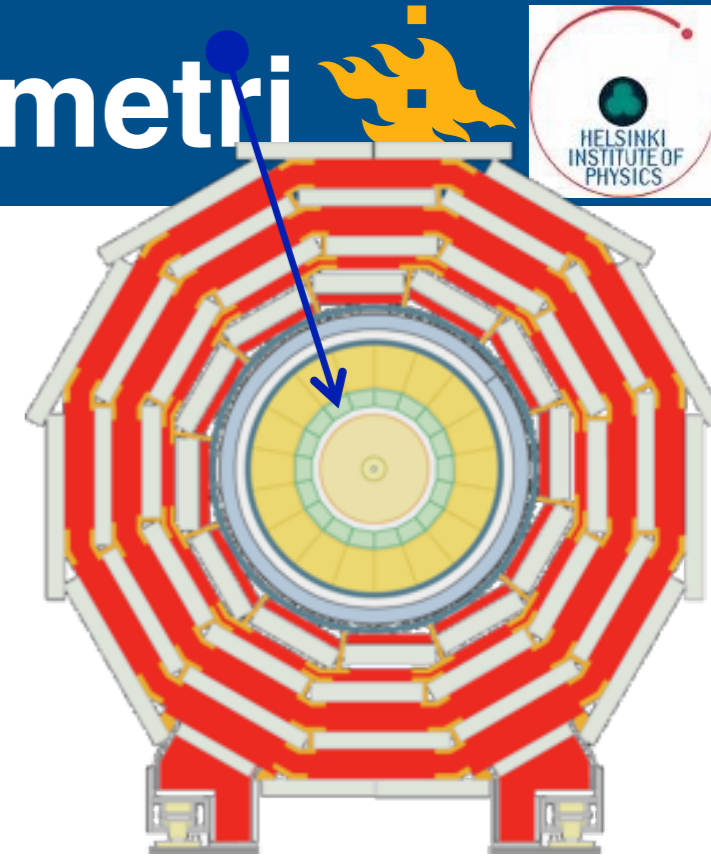


Rekonstruoituja jälkiä kosmisista myoneista

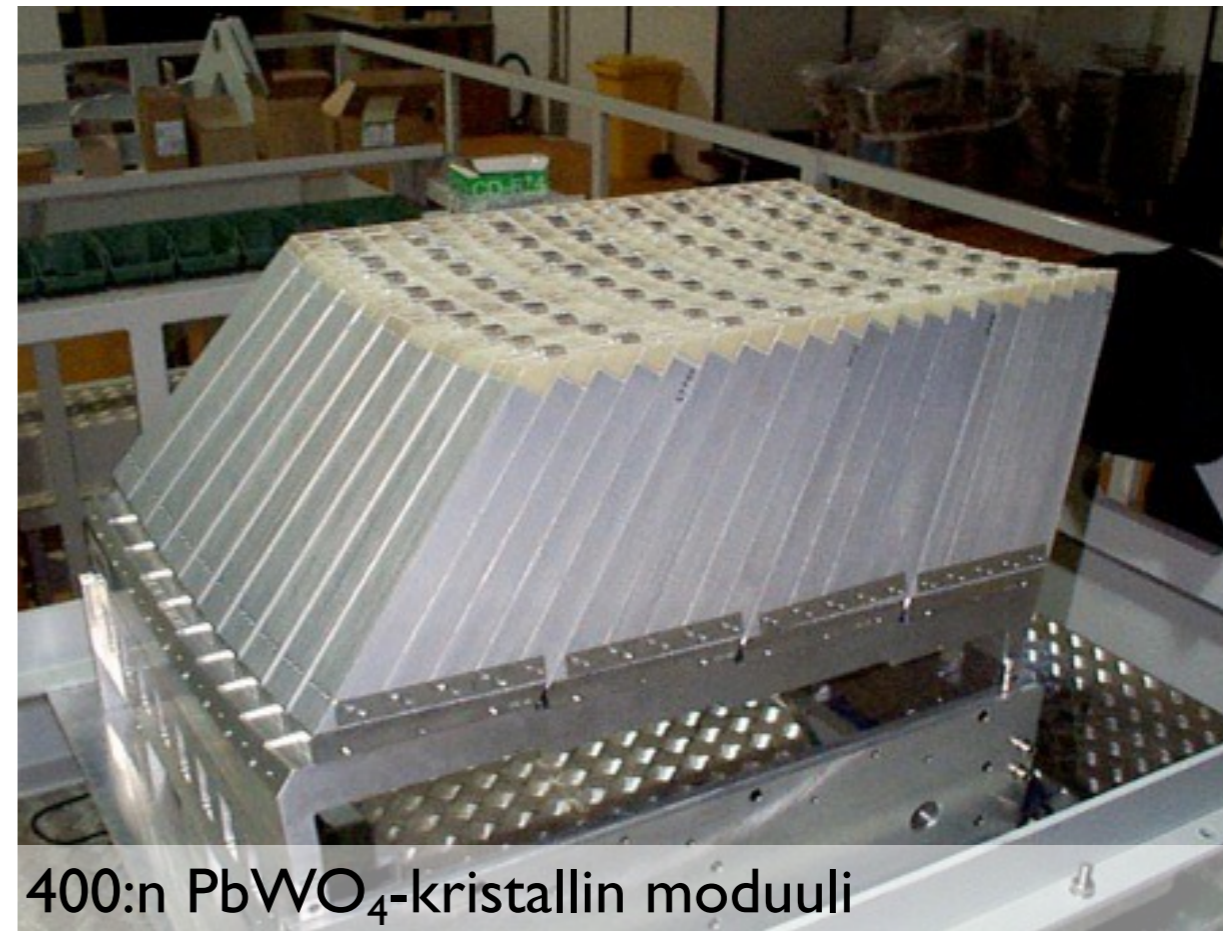




- N. 80.000  $\text{PbWO}_4$  (lyijyvolframaatti)kristallia
- Pysäyttää elektronit/positronit sekä fotonit
- Signaali perustuu tuikevaloon: hiukkanen virittää atomeita, viritystilan purkautuminen tuottaa fotonin, valon kokonaismäärä verrannollinen hiukkasen energiaan
- Valo johdetaan valonmonistimiin, jotka muuttavat signaalin sähköiseksi



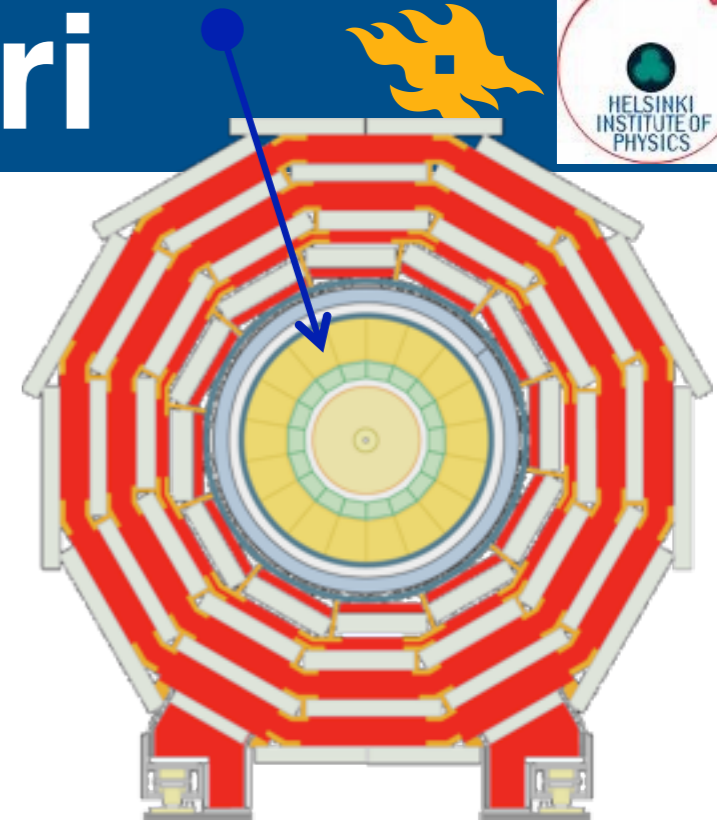
Valmiiksi asennettu kalorimetri



400:n  $\text{PbWO}_4$ -kristallin moduuli



- ”Voileipä-rakenne”
  - Pino messinkilevyjä, joiden välissä tuikeilmaisimia
- Pysäyttää raskaat hiukkaset ja mittaa yksittäisen hiukkasen tai hiukkasryöpyn energian
  - Perustuu vuorovaikutukseen atomiydinten välillä
  - Tuikeilmaisinten valon määrä vastaa hiukkasten energiaa



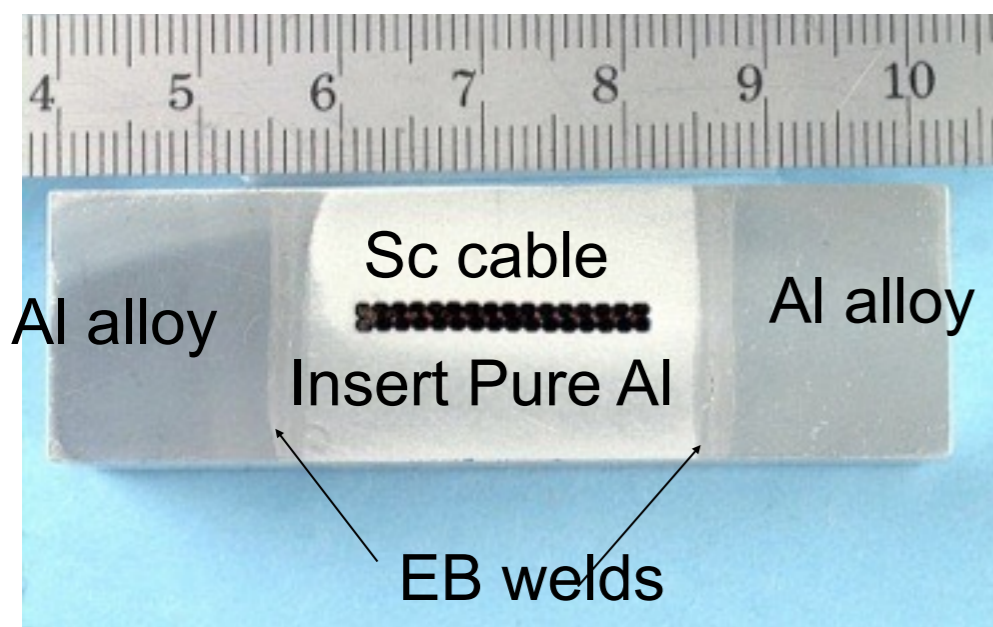
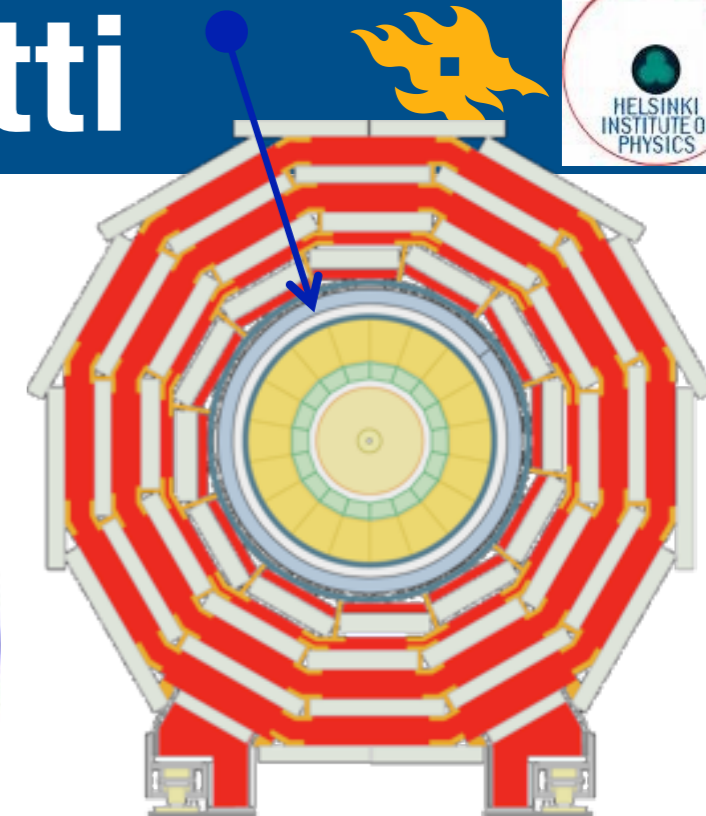
Valmiiksi koottu kalorimetri



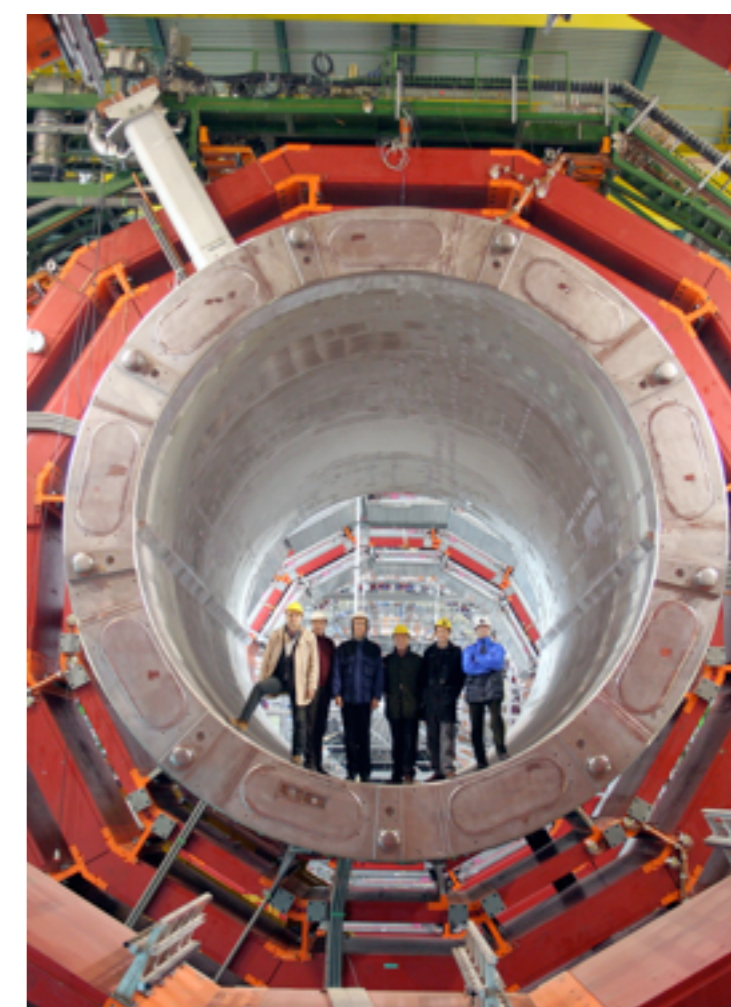
Kierrätettyä messinkiä Venäjän laivastolta



- Suurin koskaan rakennettu suprajohtava magneetti
  - magneettikenttä 3.8 T (max 4.0 T)
  - operointilämpötila: 5 K (220 t kylmämassa)
  - magneettikenttään varastoitunut energia: 2.3 GJ (riittää sulattamaan 17 t kultaa)
  - kaareuttaa varattujen hiukkasten lentoratoja**
- Magneettivuon hajautuminen ympäristöön estetään rautalevyillä



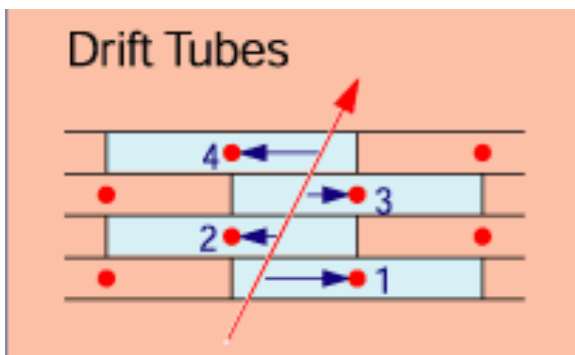
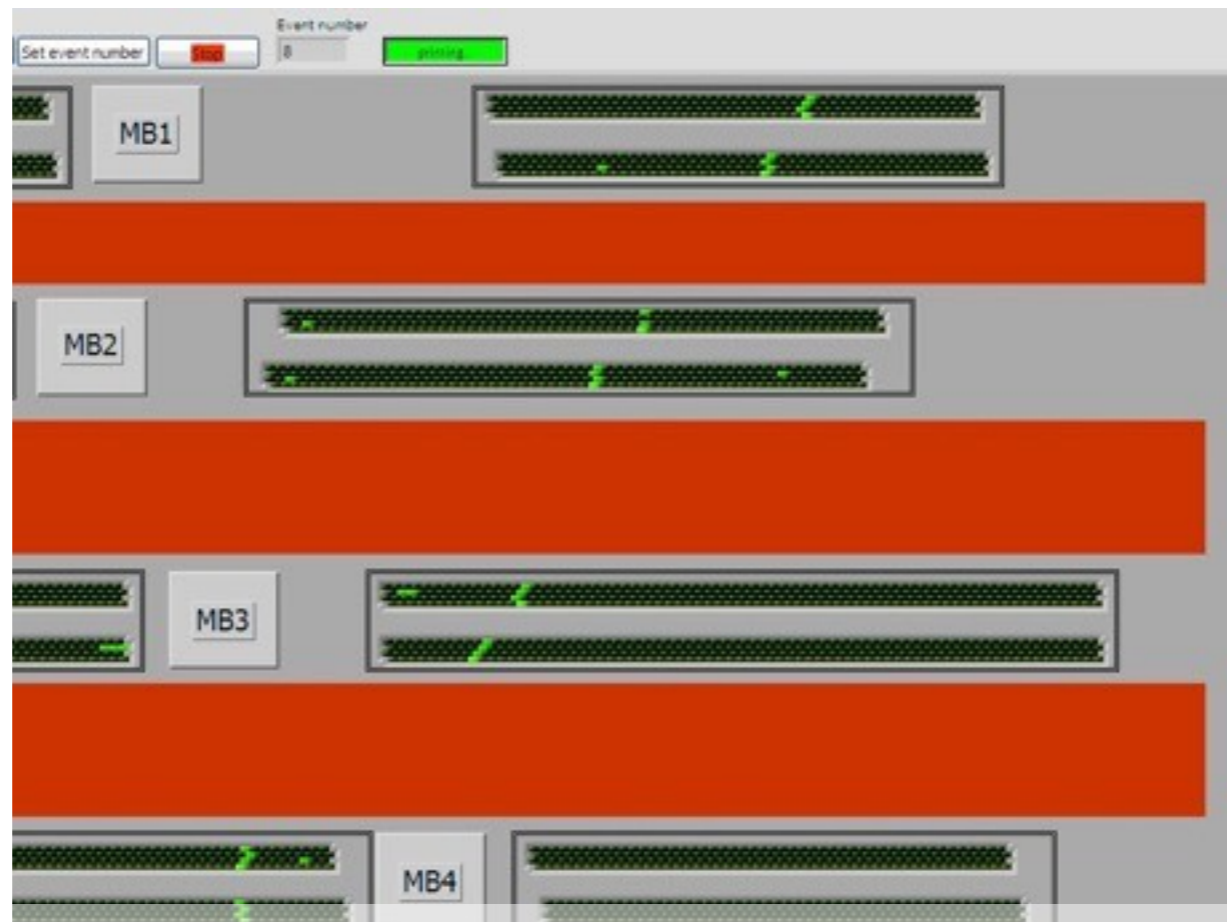
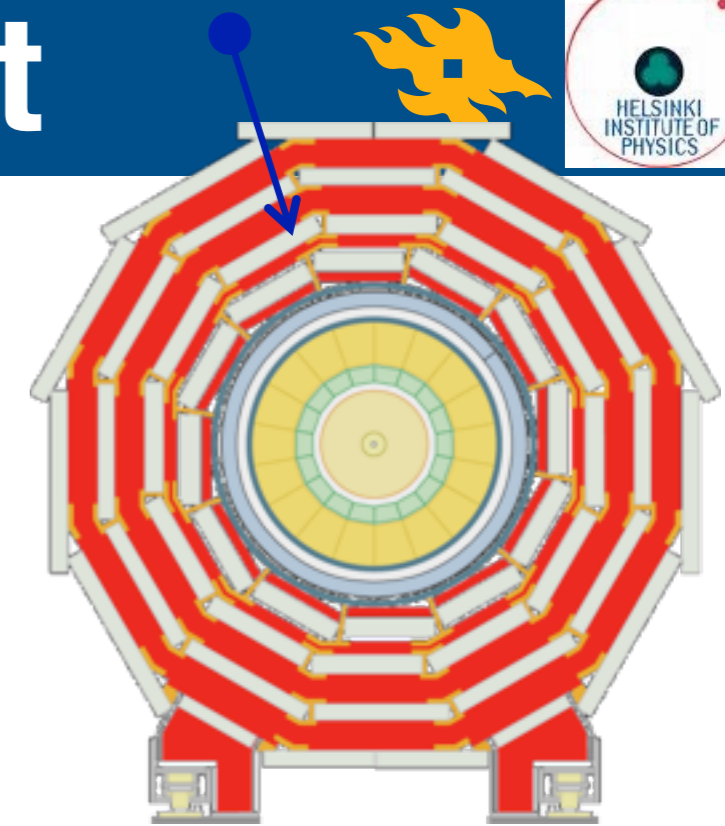
Mallikappale käämityksestä



Asennettu magneetti



- Kolme eri ilmaisinteknologiaa
  - perustuu myonin aiheuttamaan **ionisaatioon**
  - n. miljoona mittauskanavaa
  - n. 25000 m<sup>2</sup> mittauspinta-alaa
- Mahdollistaa myoneiden tunnistamisen sekä niitä sisältävien törmäysten nopean valinnan

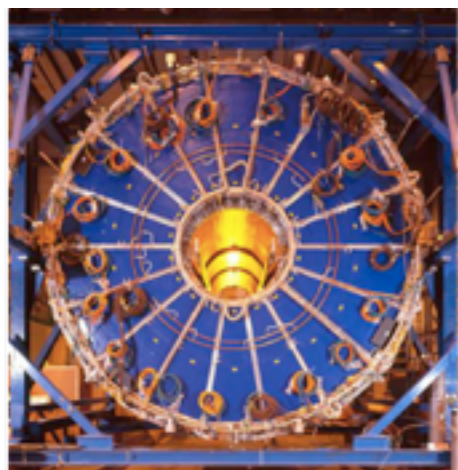


Mittauspisteitä kosmisesta myonista



Asennettuja ilmaisimia





## A Large Ion Collider Experiment

Tutkii kvarkki-gluoniplasmaa lyijy-lyijy-ydintörmäyksillä

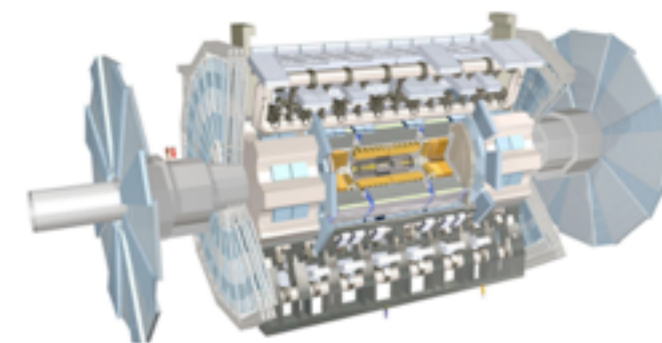
LIISA IHMEMAASSA



## A Toroidal Lhc Apparatus

Yleiskäyttöinen ilmaisim: Higgsin bosoni, supersymmetria jne.

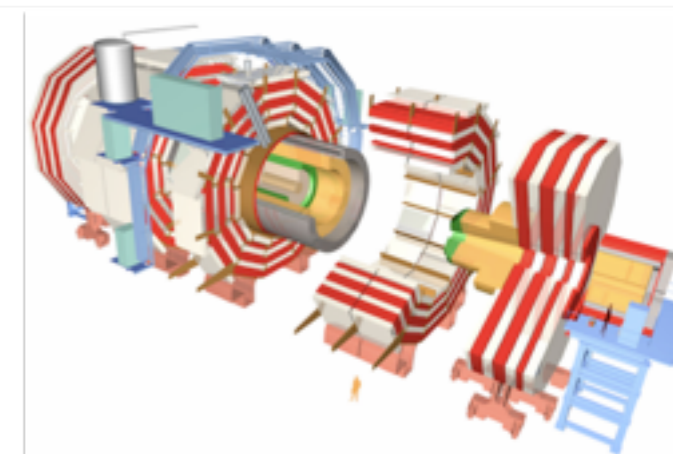
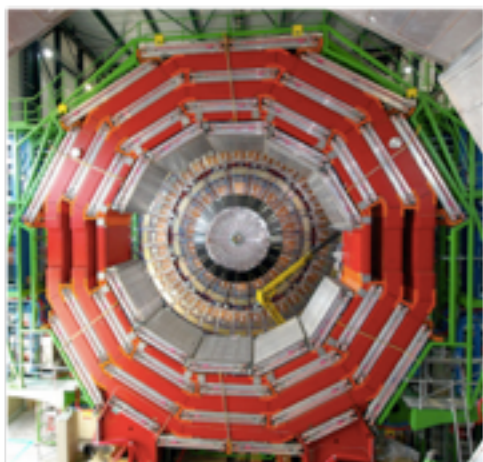
KOOKKAIN



## Compact Muon Solenoid

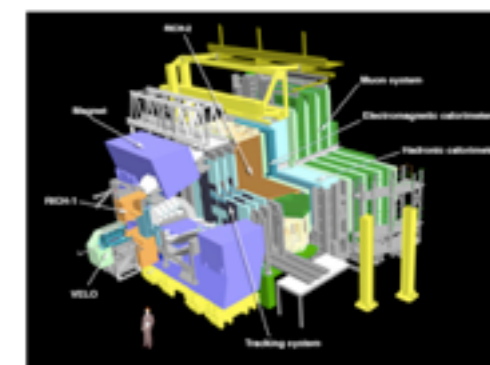
Yleiskäyttöinen ilmaisim. Loistava fotonikalorimetri, suuri magneetti, myonikammiot

RASKAIN



## LHC Beauty Experiment

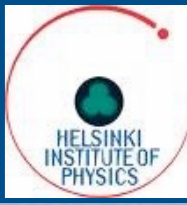
Tutkii b-kvarkkien (beauty, bottom) fysiikkaa, aine-antiaine-symmetriaa (CP-symmetriarikko) PIENIN







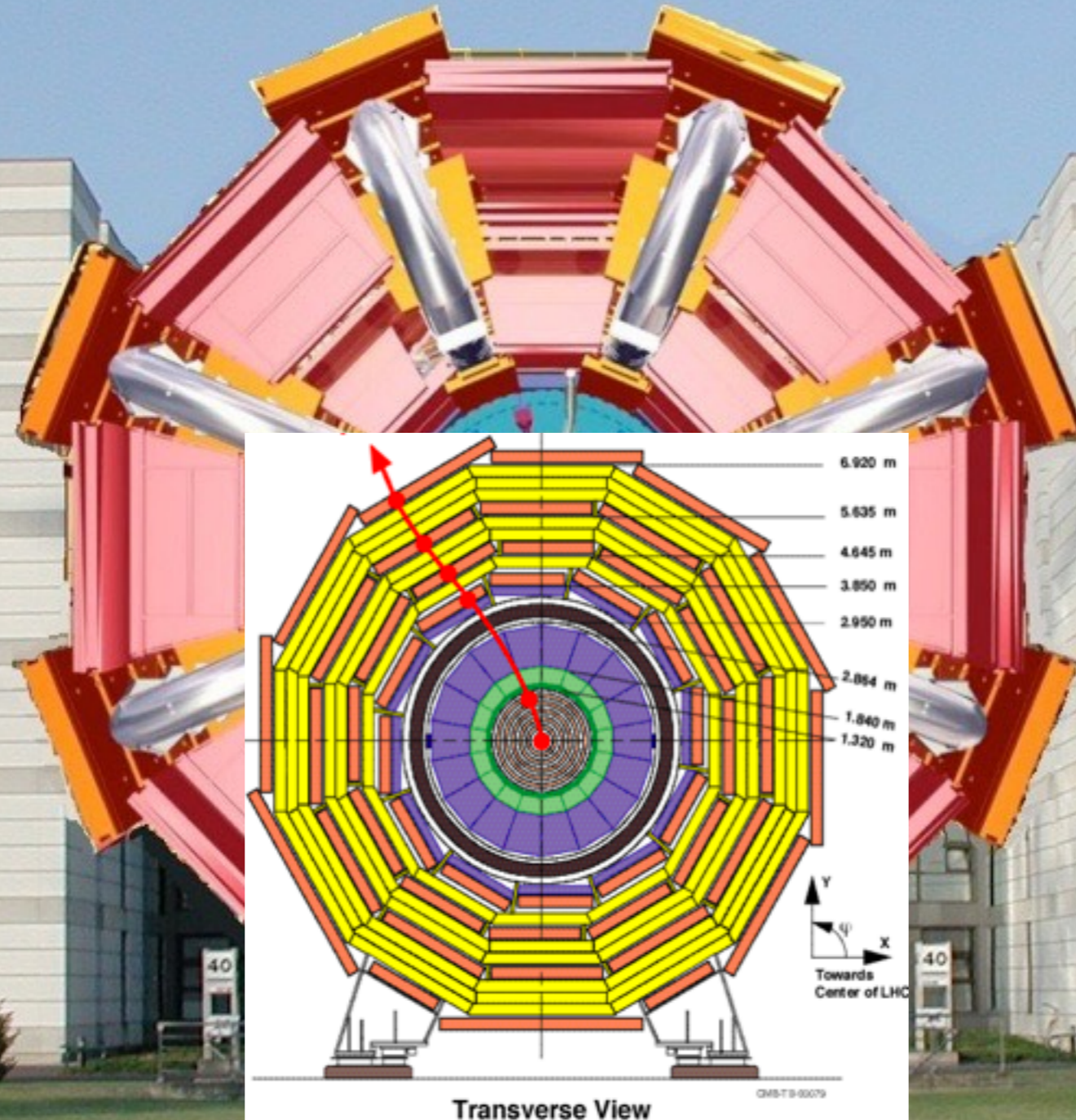
# Pienet kohteet - isot laitteet



CERN, Building 40

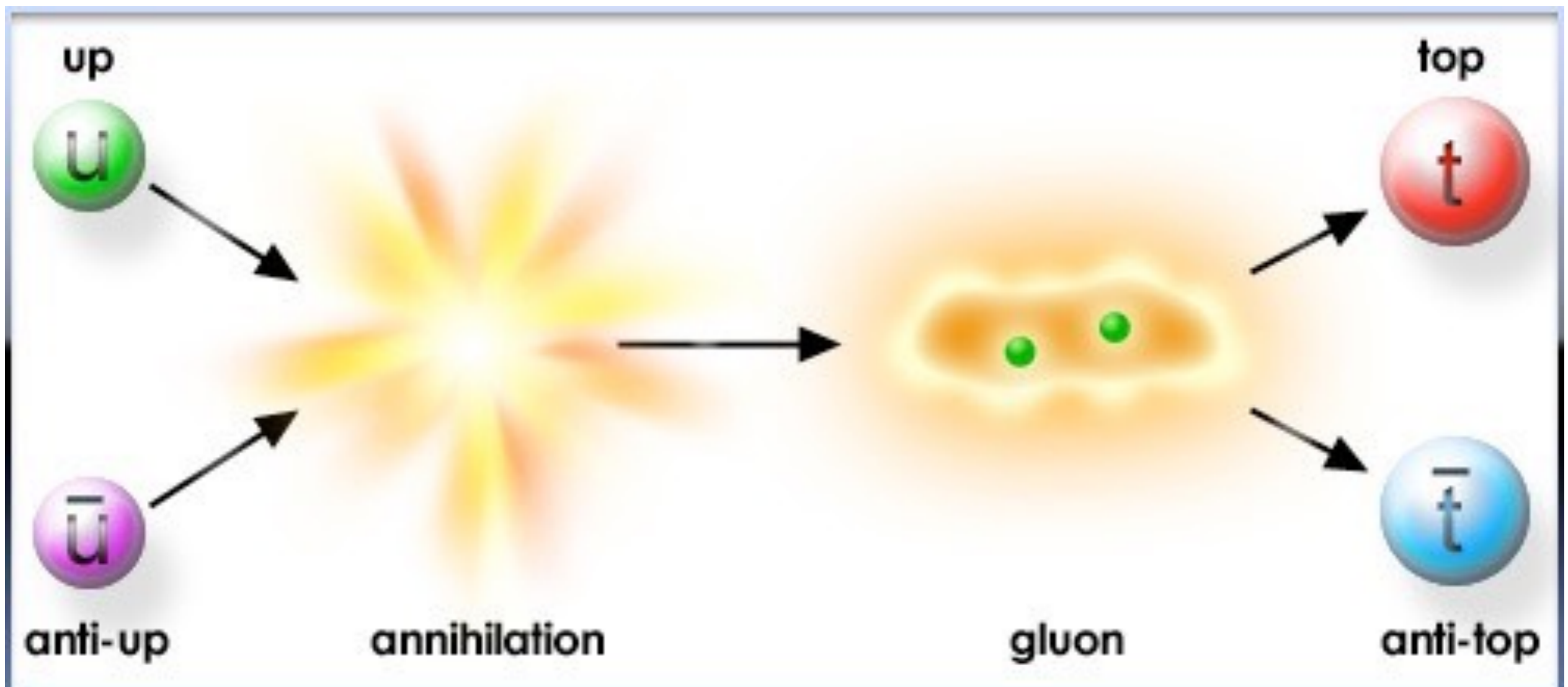
CMS

ATLAS



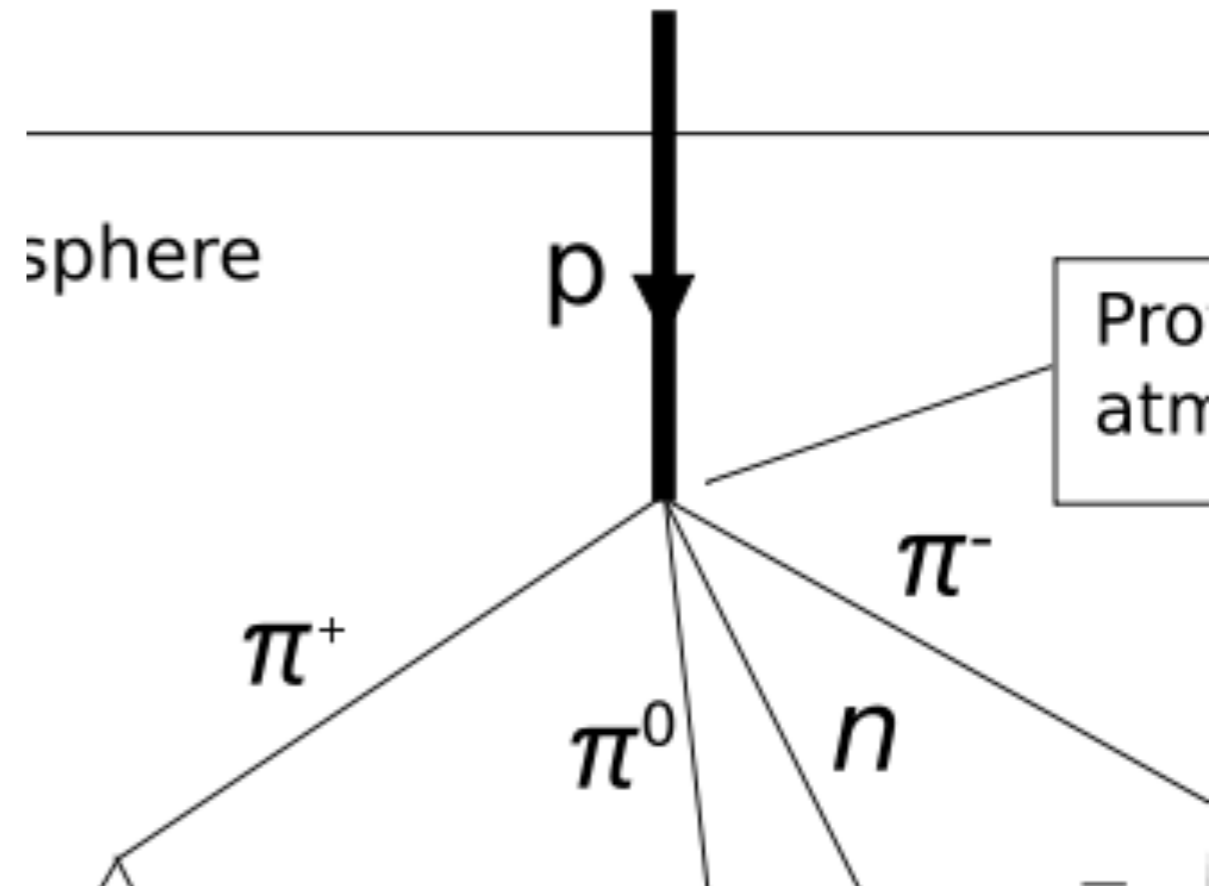
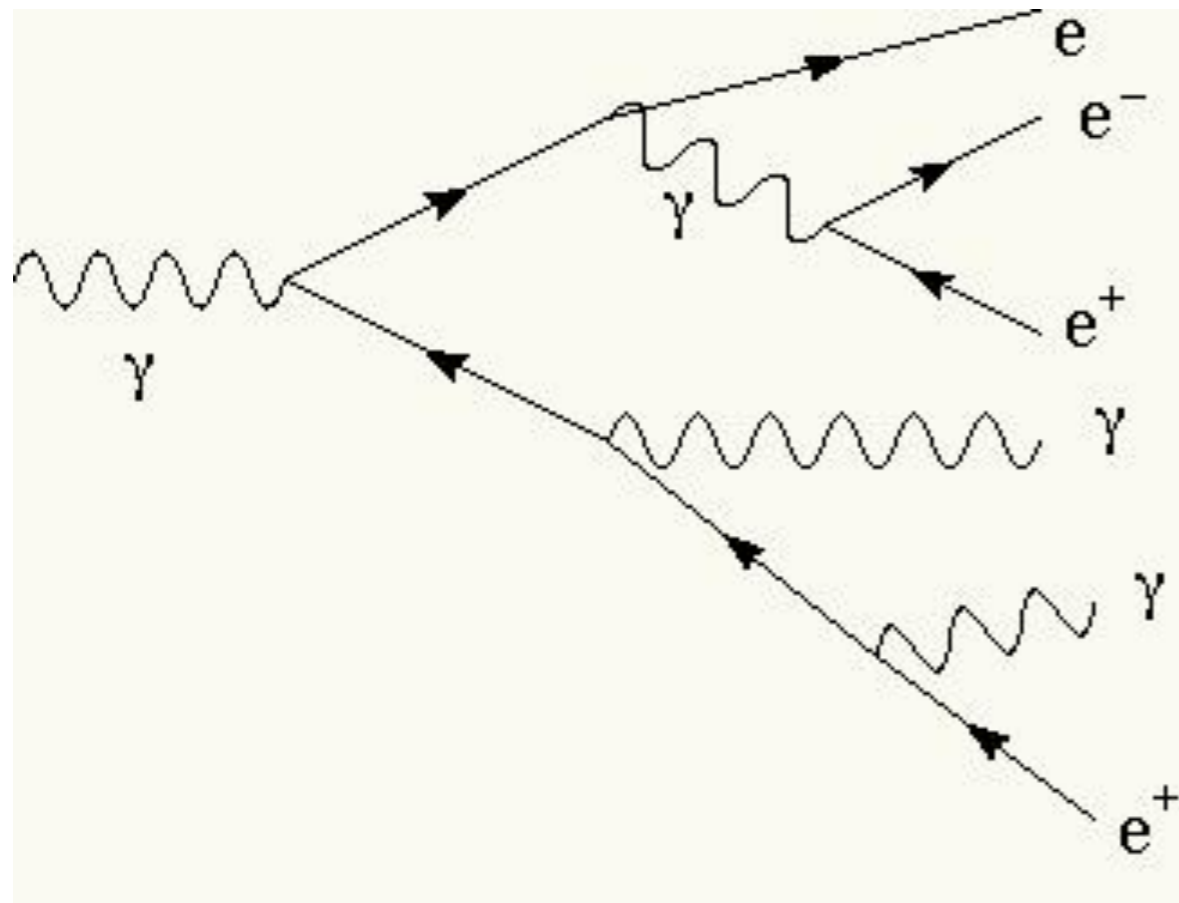
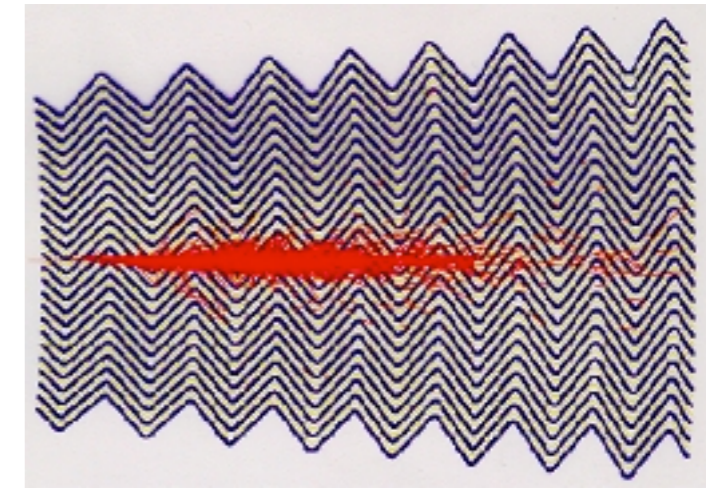


- Kaikissa tunnetuissa reaktioissa syntyy lähes täysin sama määrä **ainetta** ja **antiainetta**:
  - **varatut hiukkaset** syntyvät vastapareittain
  - **leptoniluku** säilyy ( $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ )
  - **baryoniluku** (kolmen kvarkit hiukkaset kuten protoni ja neutroni) säilyy
- Kun hiukkanen ja antihhiukkanen kohtaavat, syntyy puhdasta energiaa





- Kalorimetreissä primäärihiukkanen tuottaa kuuron sekundäärihiukkasia:
  - **sekundäärihiukkasia** syntyy niin kauan kuin energiaa riittää niiden tuottoon
  - **sähkömagneettinen kuuro**, n. 2 cm x 20 cm
    - **jarrutussäteily** ja  $e^- e^+$ -**parintuotto** ytimen sähkökentässä vuorottelevat
    - jarrutussäteily vaatii kevyen hiukkasen (=elektroni; myonit ja hadronit liian raskaita)
  - **hadroninen kuuro**, n. 20 cm x 200 cm
    - useita hadroneita kun **osuma ytimeen**; pieni maali, siksi pitkä kuuro
    - hadroninen kuuro vaatii vahvasti vuorovaikuttavan hiukkasen (protoni, neutroni, pioni)
- Suurin osa ionisaatiosta ja tuikevalosta sekundäärihiukkasten tuottamaa



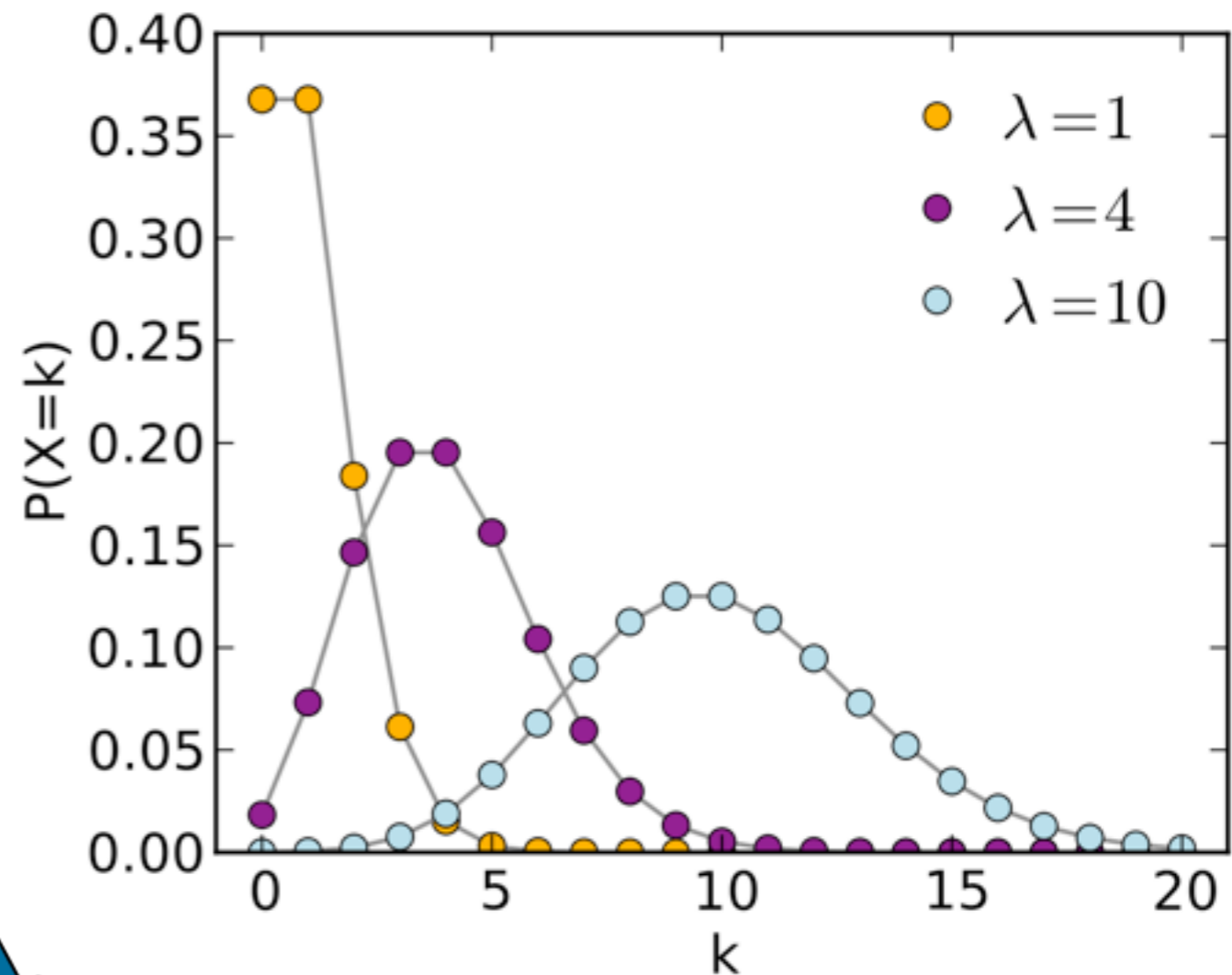
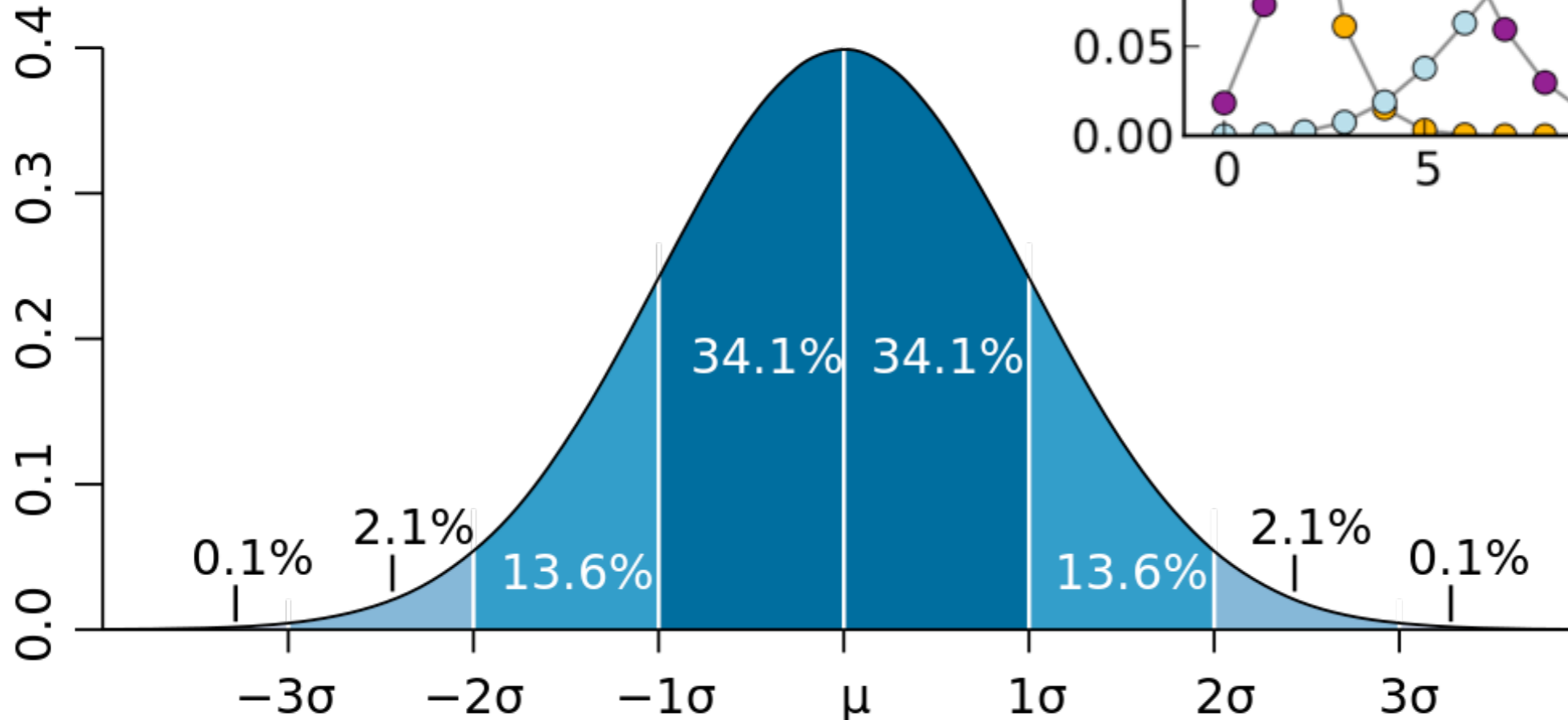


- a) Kuinka Higgsin bosoni voi hajota kahteen W tai Z bosoniin, vaikka sen massa on alle puolet näiden massoista?
  - $m_H = 125 \text{ GeV}$ ,  $m_Z = 91.2 \text{ GeV}$ ,  $m_W = 80.4 \text{ GeV}$
  - Vastaus: kvanttimekaniikassa lyhytikäisten Z ja W bosonien massa ei ole tarkkaan määrätty, vaan niillä on pieni todennäköisyys olla myös paljon normaalia keveämpiä ennen hajoamistaan edelleen
- b) Kuinka keveämpi Z voi säteillä raskaamman Higgsin bosonin?
  - Vastaus: kuten yllä, Z bosonilla on pieni todennäköisyys olla hetken normaalia raskaampi ennen Higgsin bosonin säteilyä. Tällaista väliaikaisesti lihonutta hiukkasta kutsutaan virtuaaliseksi
- Yleisesti, kvanttimekaniikassa saa rikkoa energian ja liikemäärän säilymistä, kunhan se tapahtuu hyvin lyhyen aikaa. Tämä on yksi ilmentymä **Heisenbergin epätarkkuusperiaatteesta** ( $\Delta E \times \Delta t < \hbar$ )



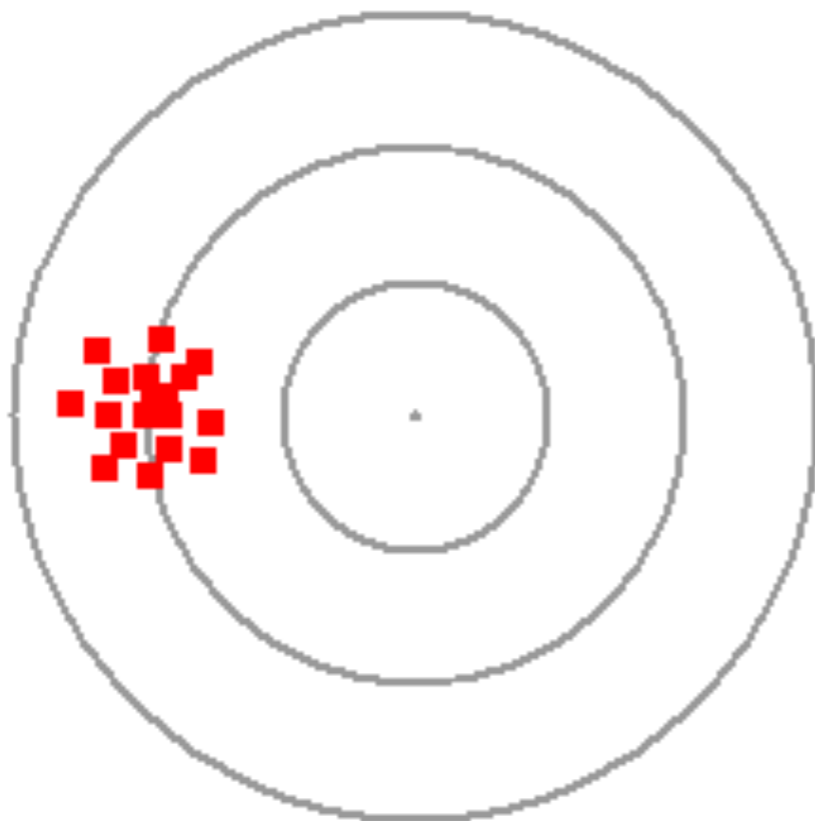


- Tapahtumien (eventtien) lukumäärät ovat yleensä **Poisson-jakautuneita**
  - keskihajonta  $N$  tapahtumalle on tällöin  $\sqrt{N}$
  - lähestyy suurilla  $N$  normaalijakaumaa, jossa  $\mu=N$  ja  $\sigma=\sqrt{N}$
- Systemaattiset virheet ovat yleensä **normaalijakautuneita** (Gaussin jakauma)
  - Ilmoitetaan tyypillisesti  $1\sigma$  (68% luottamusväli) tai  $2\sigma$  (95% luottamusväli) tasolla

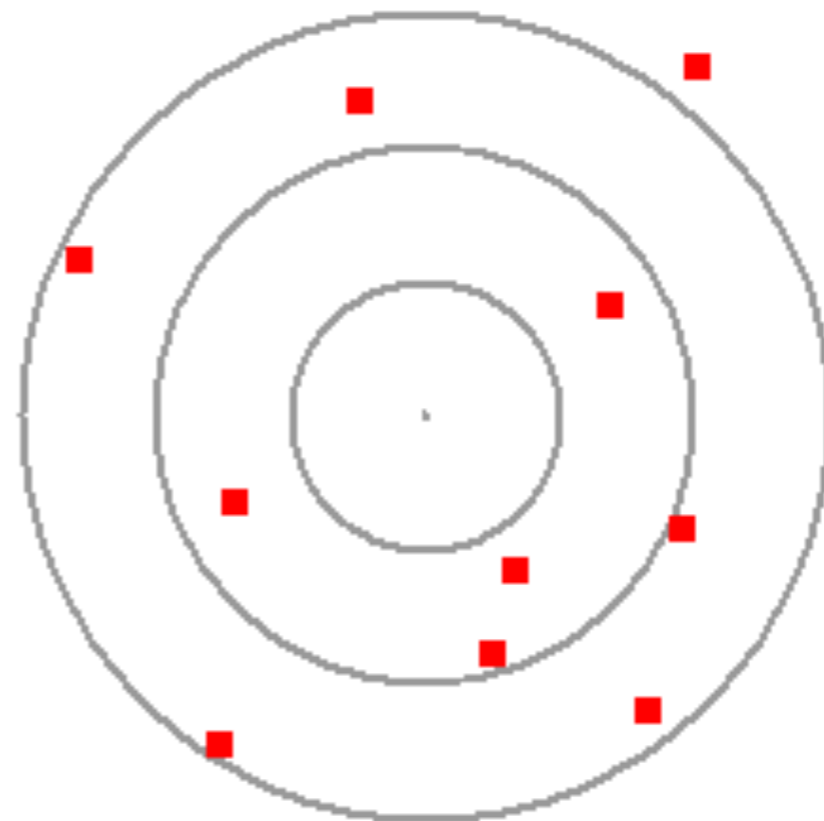




- Virheitä arvioitaessa ne jaetaan tyypillisesti kahteen kategoriaan:
  - **Tilastolliset virheet** satunnaisvaihteluista esim. tapahtumien lukumäärissä
    - suhteellinen virhe skaalautuu  $1/\sqrt{N}$  tai  $\sigma/\sqrt{N}$ , joten toistot auttavat
  - **Systemaattiset virheet** esim. teorian ennustamissa hajoamissuhteissa
    - suhteellinen virhe pysyy vakio-% ilman parannuksia menetelmissä









**Systematic Error**

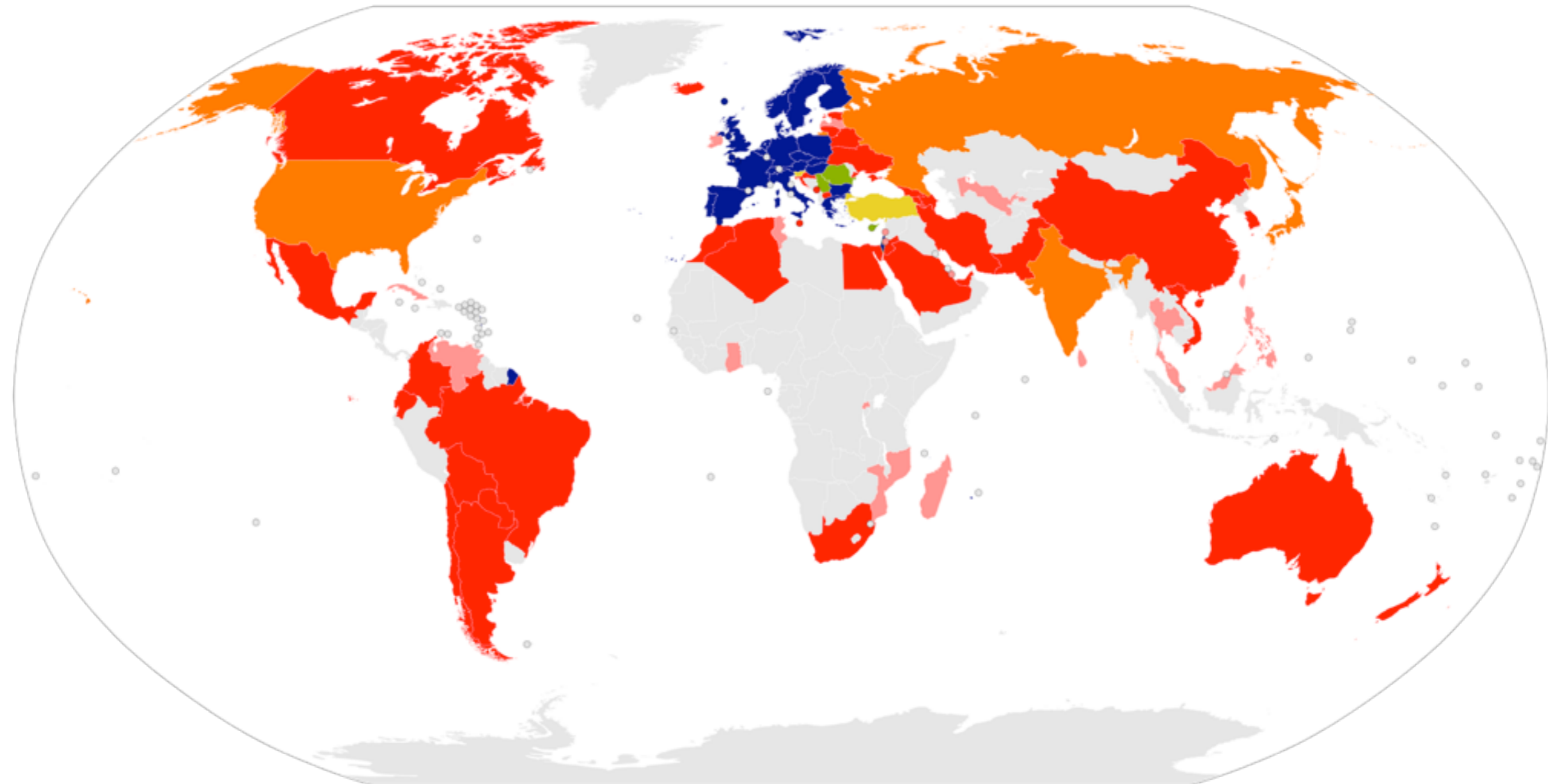


**Random Error**



- CERNin tutkimuksessa mukana olevat maat kattavat lähes koko kehittyneen maailman

	CERN member states: 20 c.
	Accession in progress: 3 c.
	Declared intent to join: 3 c.
	Observers: 4 c. + EU, Turkey
	Cooperation agreement: 35 c. + Slovenia, Cyprus
	Scientific contacts: 19 c.

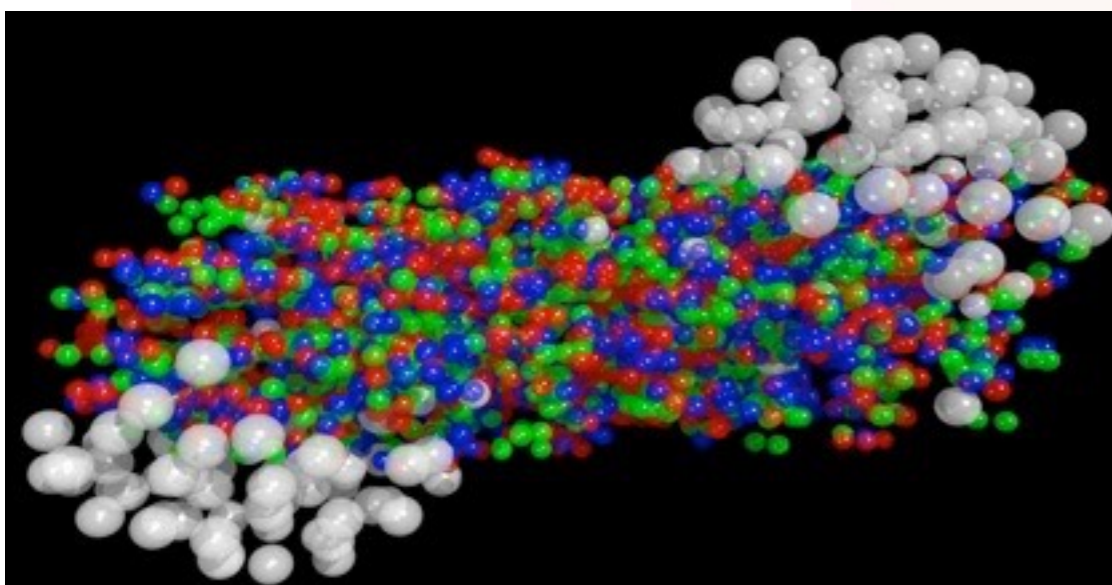
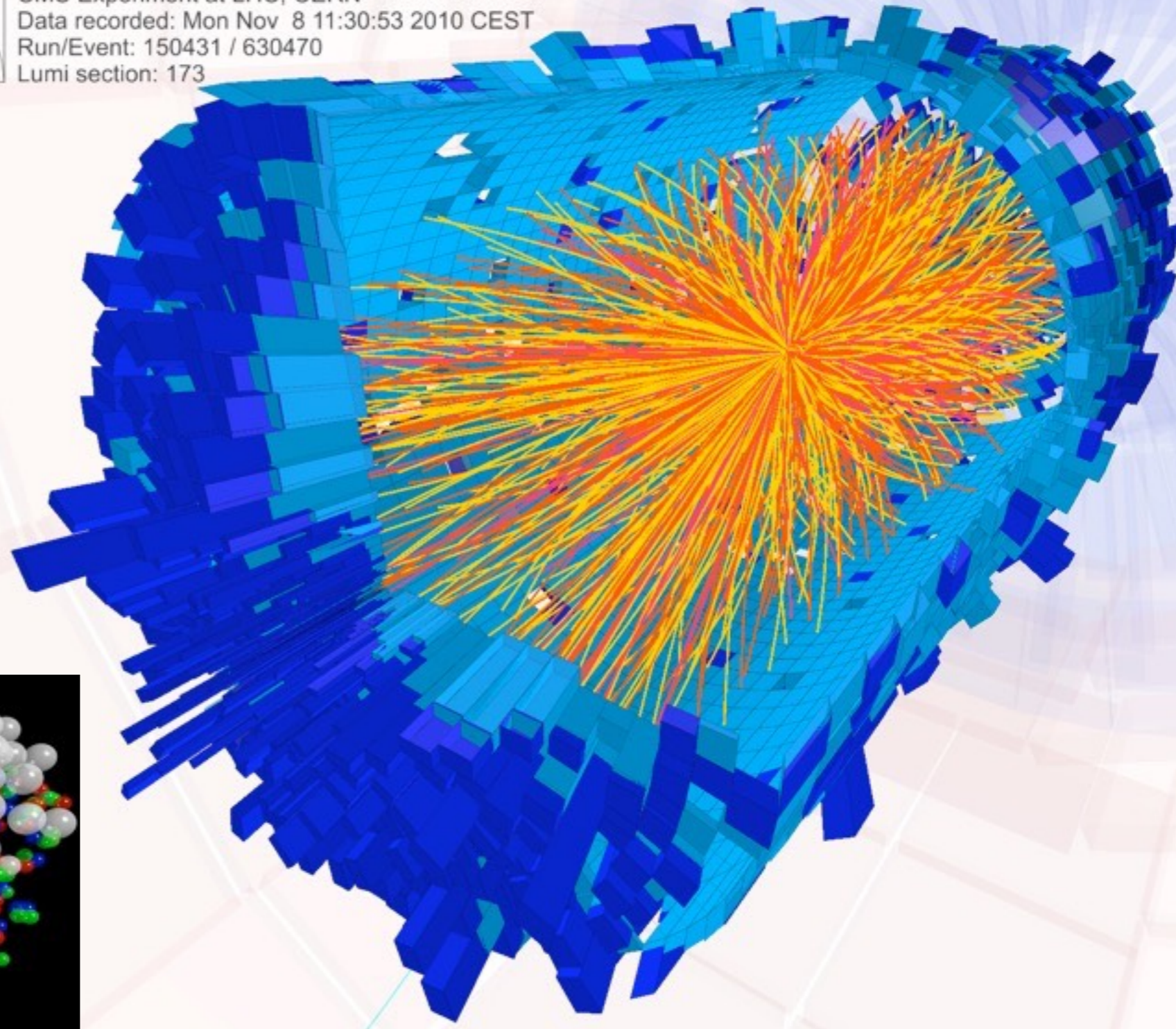




- LHC:llä törmäytetään myös lyijy-ytimiä energialla 2.76 TeV per nukleoni
- Tavoitteena tutkia aineen olomuotoa, jossa kvarkit ja gluonit ovat vapaita: aikaa heti alkuräjähdyksen jälkeen



CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Mon Nov 8 11:30:53 2010 CEST  
Run/Event: 150431 / 630470  
Lumi section: 173



Simulaatio kvarkki-gluoni-plasmasta