

# Hiukkasfysiikan kokeet

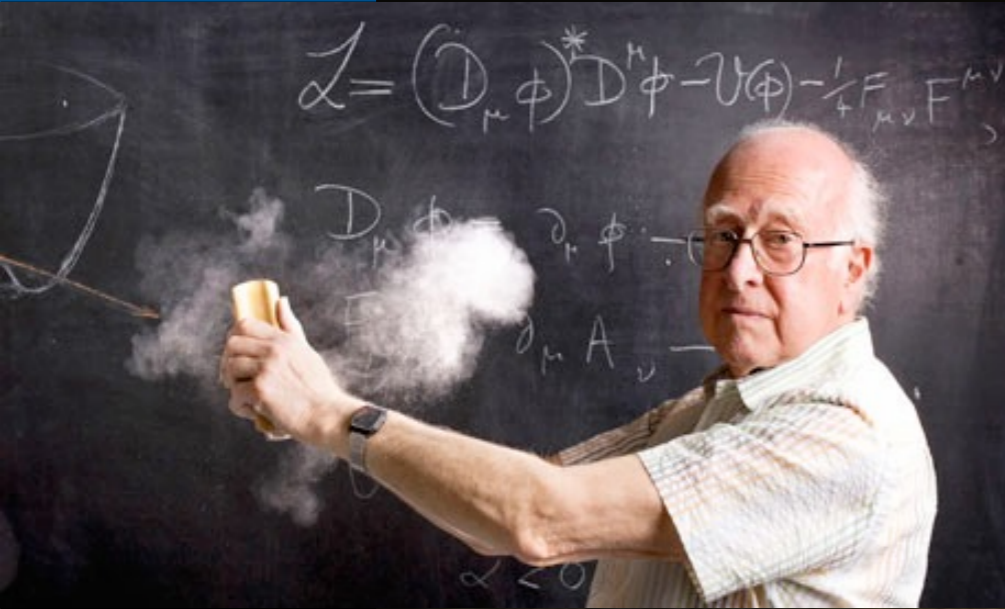


**Santeri Laurila & Kati Lassila-Perini**

Helsingin yliopisto

Fysiikan tutkimuslaitos (HIP)

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



**Teoria**

**Kokeet**



1. Hiukkaskiihdyttimet
2. Ilmaisimet
3. Data-analyysi
4. Tulevaisuus

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 tasan 3+1?
- Miksi hiukkasperheitä on kolme? Ovatko alkeishiukkaset todella alkeishiukkasia? Onko luonnossa lisää (rikkoutuneita?) symmetrioita? Supersymmetria?



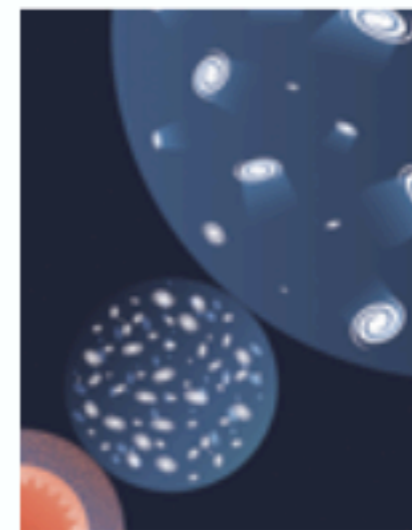
Higgs boson



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**

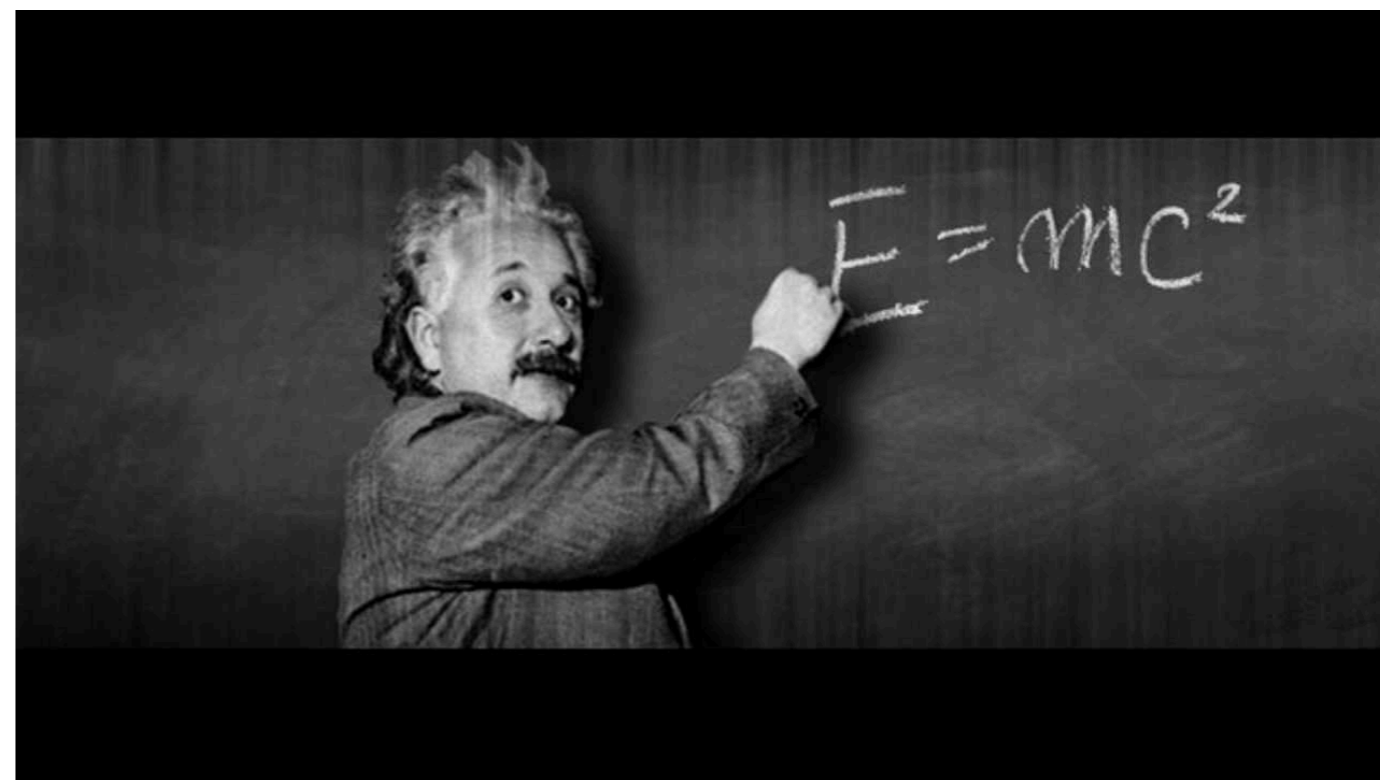
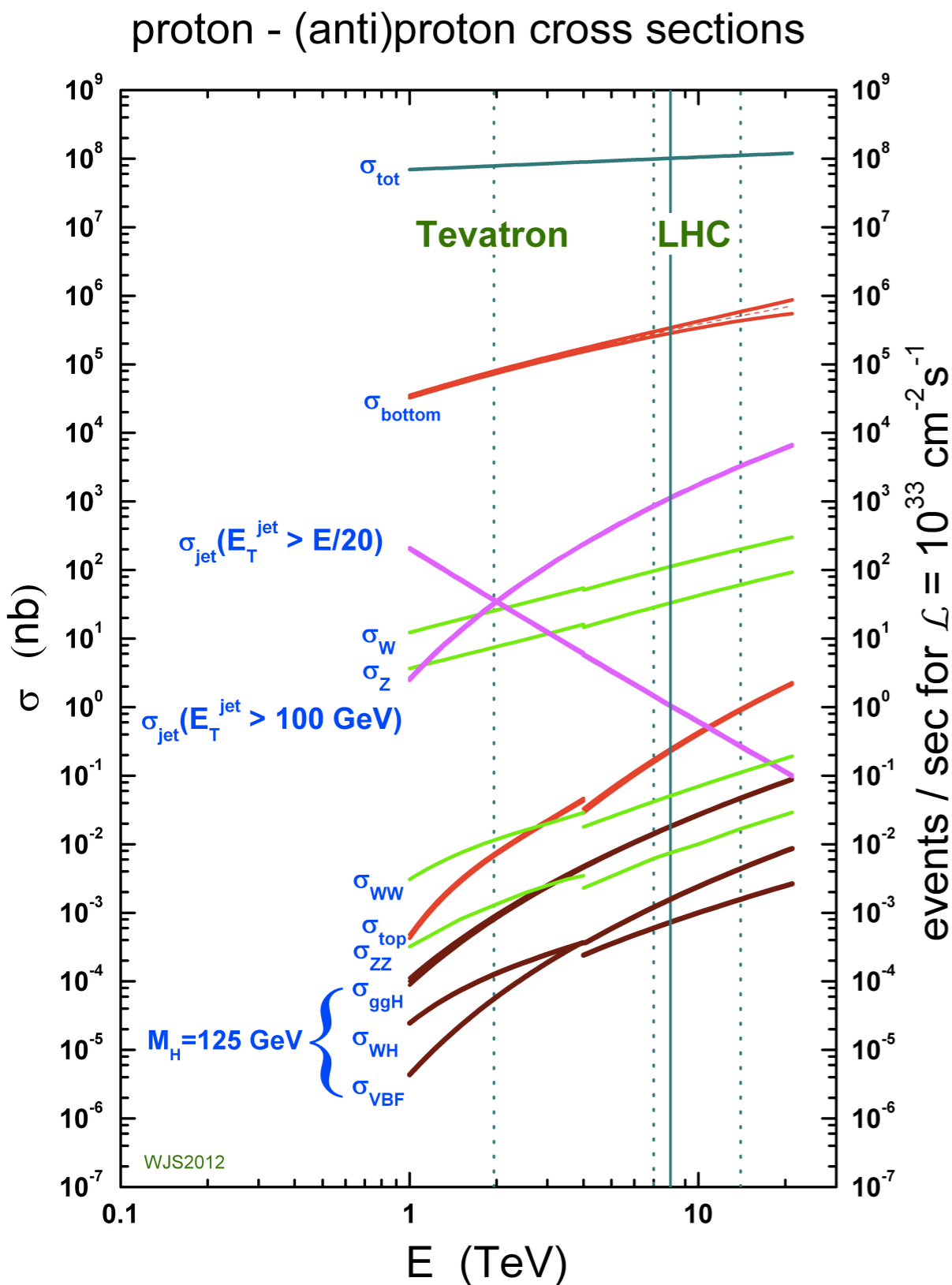
**X**

# Osa 1: Hiukkaskiihdyttimet



Hiukkasten...

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



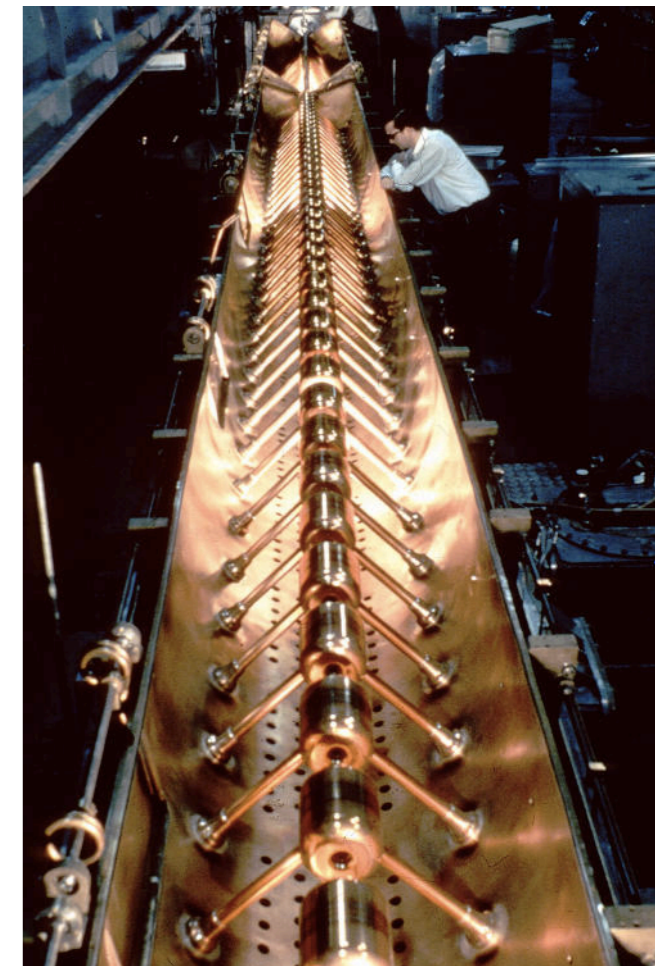
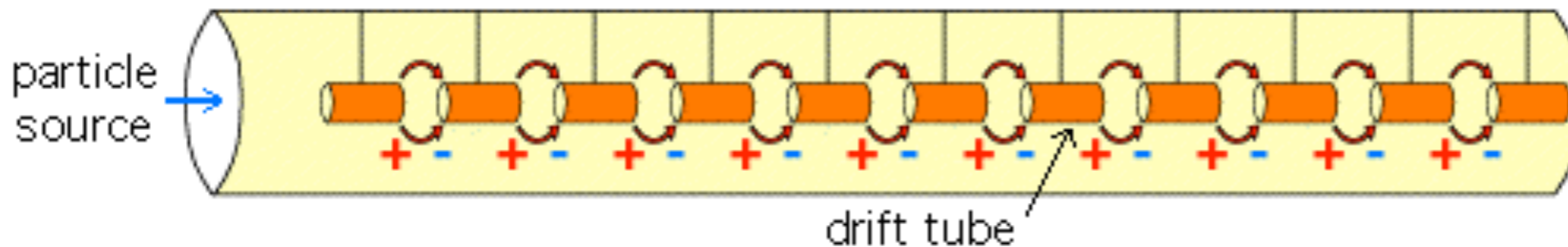
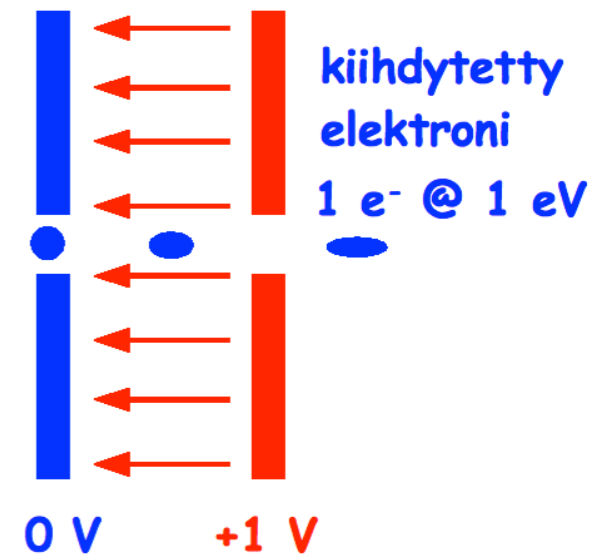
Hiukkastörmäyksissä protonien liike-energiaa muuttuu uusiksi, harvinaisemmiksi hiukkasiksi

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)

- 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

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







# LHC-tunneli

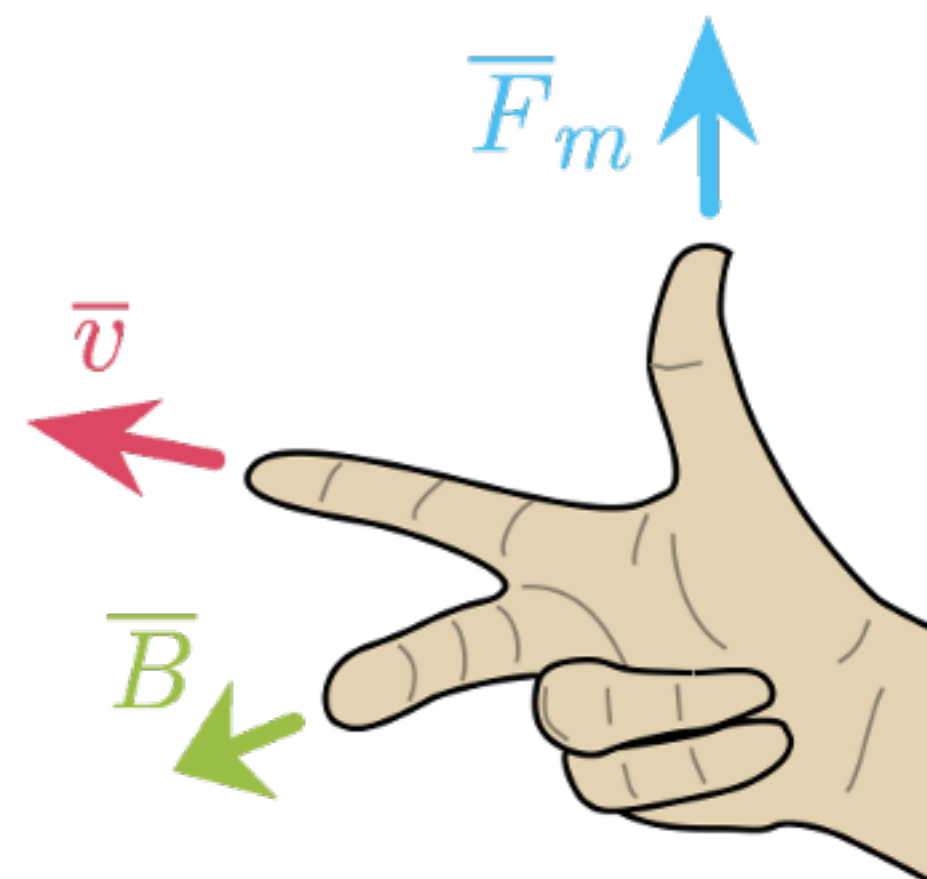


- Jokainen kiihdytin toimii tietyllä energia-alueella (LHC 0.45—6.5 TeV)
- Suureen liike-energiaan vaaditaan esikiihdyttimien ketju
- Hiukkaset kiertävät ympyrää, yhtä kiihdytinjaksoa voi käyttää monta kertaa

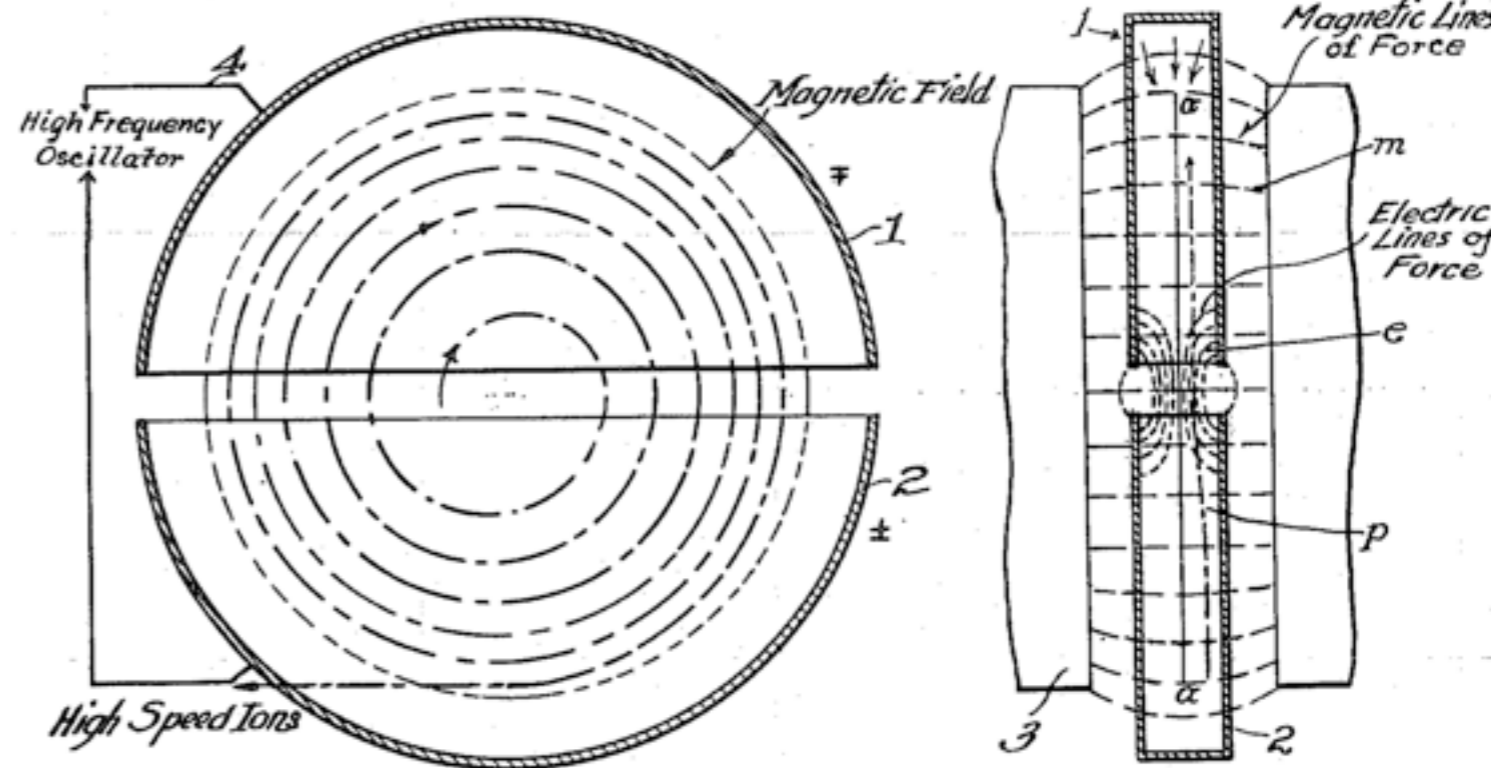


- **LINAC** (LINear Accelerator, 1978): 50 MeV, **0.31c**
- **PSB** (Proton Synchrotron Booster, 1972): 1.4 GeV, **91.6c**
- **PS** (Proton Synchrotron, 1959): 26 GeV, **99.93c**
- **SPS** (Super Proton Synchrotron, 1976): 450 GeV, **99,9998c**
- **LHC** (Large Hadron Collider, 2008): 6.5 TeV, **99,999999c**

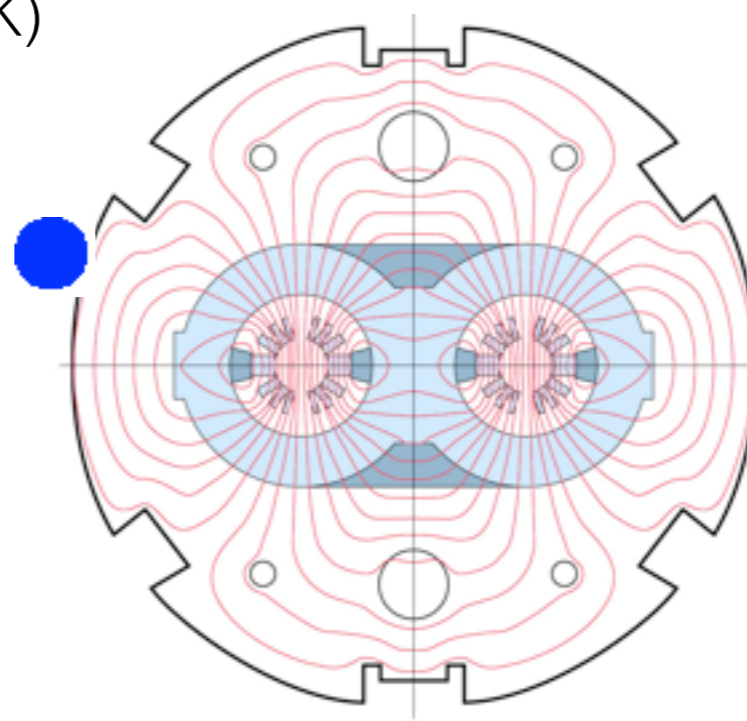
- Varatun hiukkasen rata kaareutuu magneettikentässä:
  - $\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$
  - Suunta oikean käden säännöllä (kuva!)
- Yhdistämällä Newtonin toinen laki,  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ , keskeiskiihtyvyys  $a = v^2 / R$  ja  $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ :
  - $p = qRB$  eli suurempi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



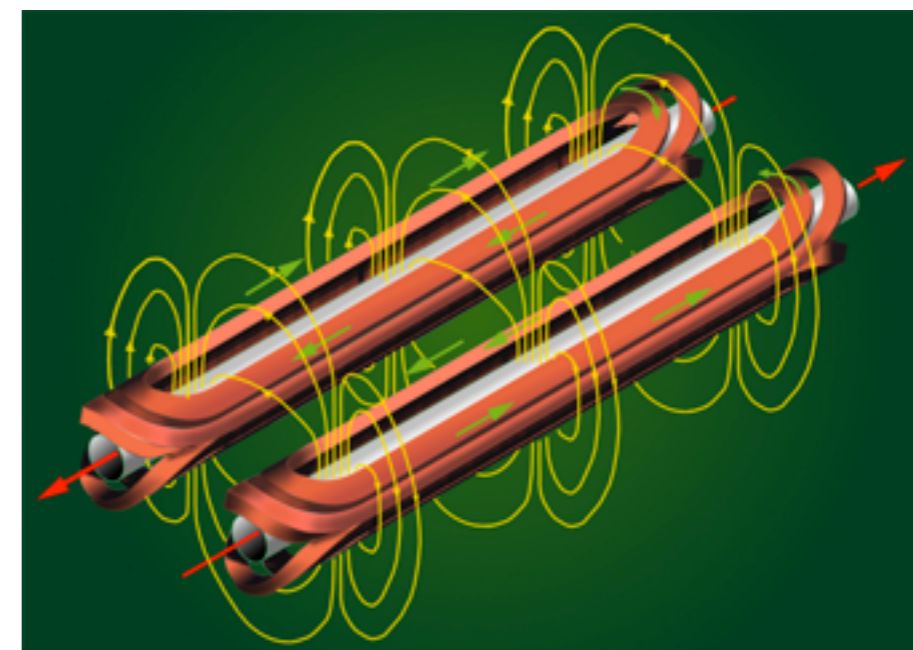
- Ensimmäiset “rengaskiihdyttimet” käyttivät **kestomagneetteja** ( **$B$  vakio**) → hiukkasten kiertosäde  **$R$  kasvaa** energian kasvaessa (*syklotroni*)
- Nykyisissä *synkrotroneissa* käytössä sähkömagneetteja, joiden virtaa voi muuttaa →  **$R$  vakio,  $B$  kasvaa**
- LHC:ssä **1232** kpl **suprajohtavia 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, **vastakkaisuuntaiset kentät**



$$p = qRB$$



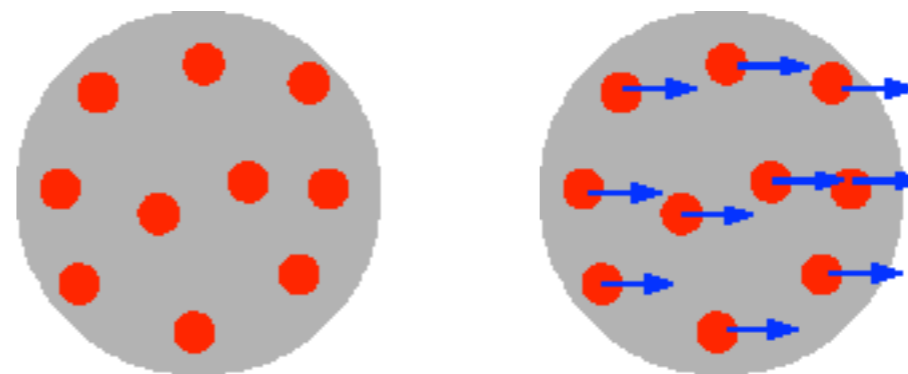
Computed magnetic flux map at  $B_0=10$  Tesla



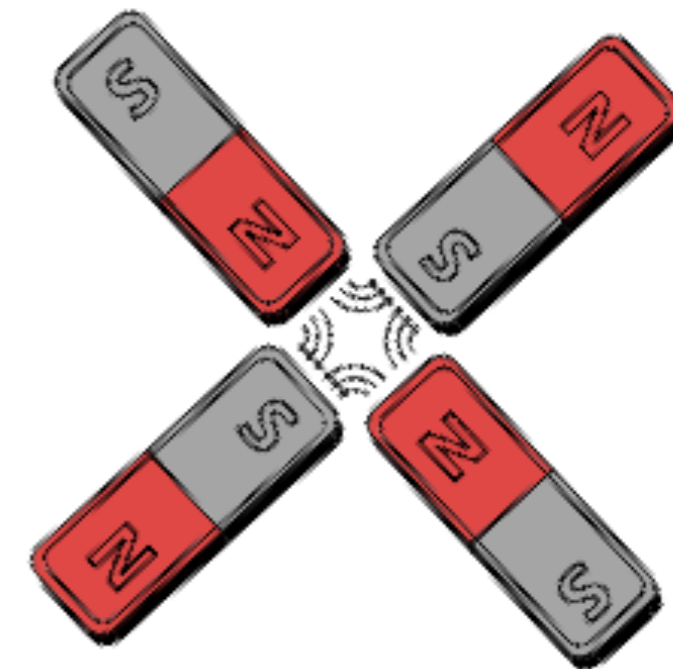
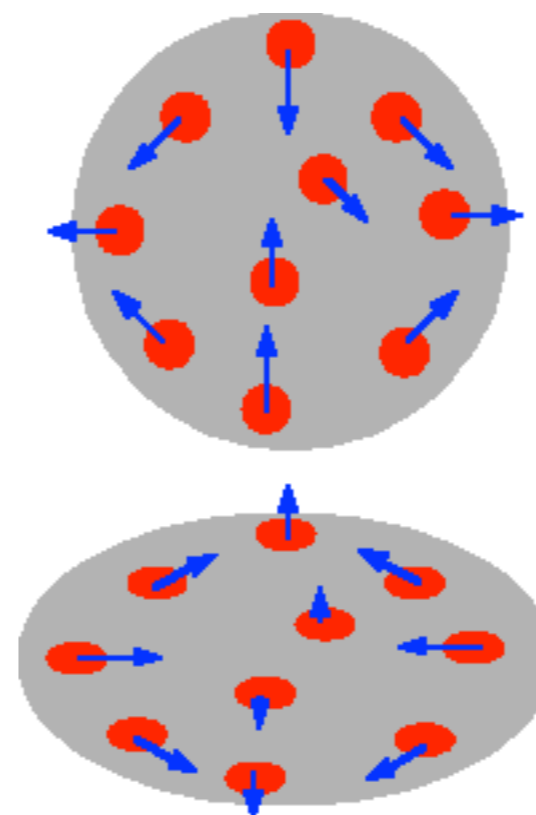
- LHC:n protoni”rihmassa” on pienessä tilassa suuri määrä ( $\sim 10^{11}$ ) saman varauksen omaavia hiukkasia, jotka pyrkivät erilleen
- Suihkun fokusointi tapahtuu 858 **kvadrupolimagneetilla**, jotka taivuttavat harhautuneita hiukkasia kohti tyhjiöputken keskipistettä
- Tyypillisessä kiihdyttimessä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

## Dipolimagneetti:

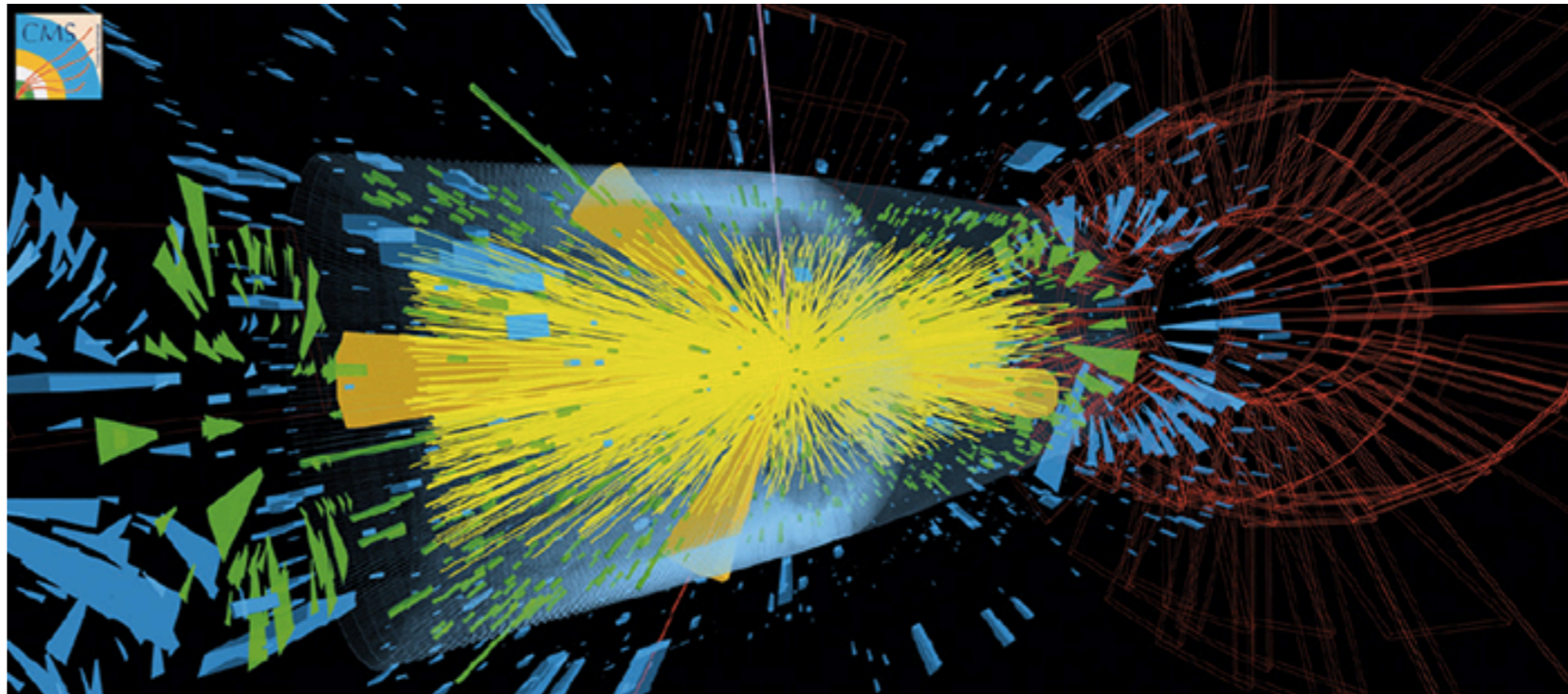
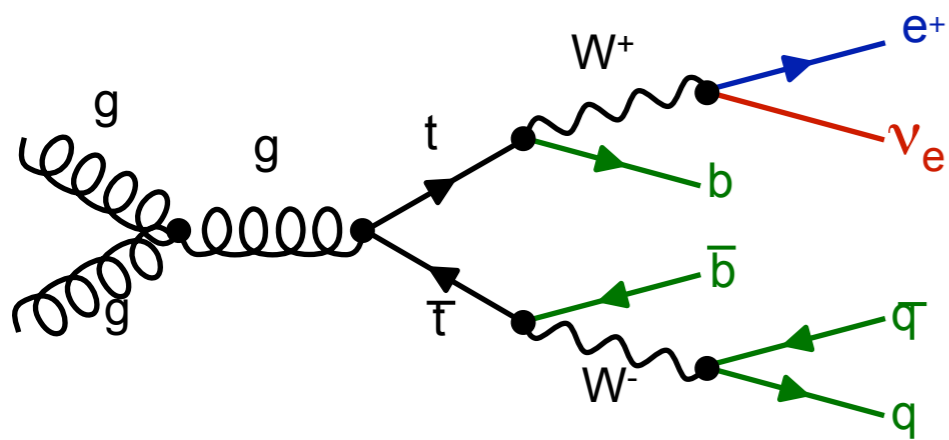
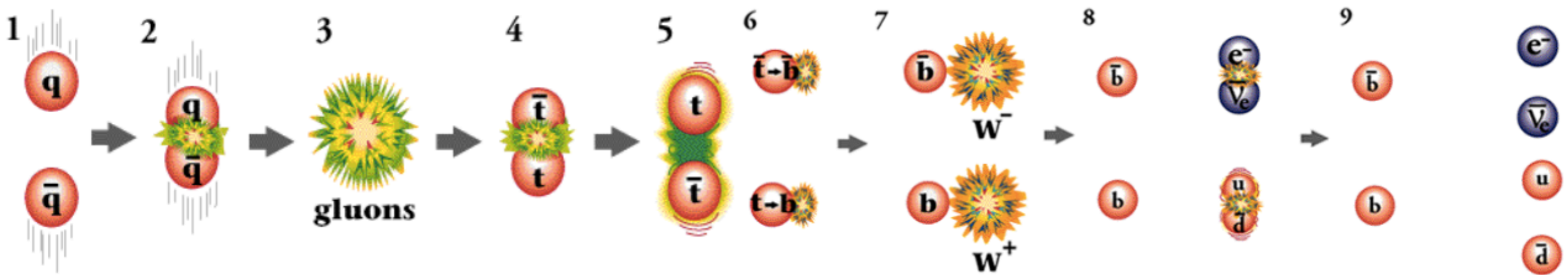
”testivarauksia”



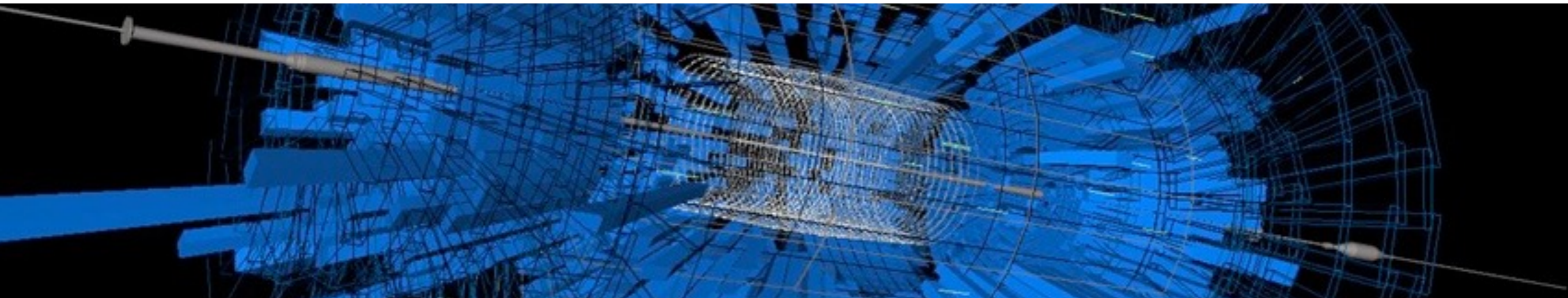
## Kvadrupolimagneetti:



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



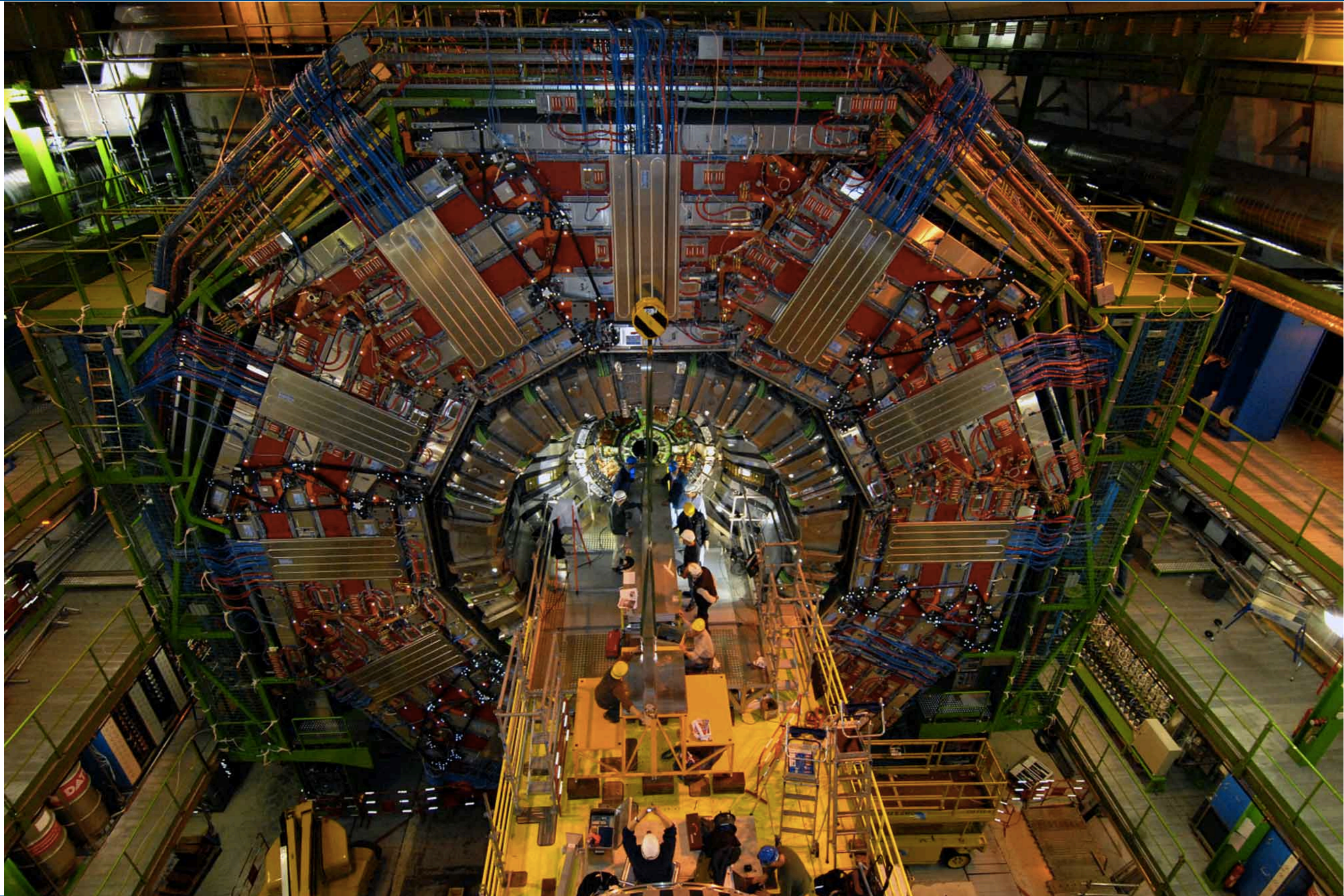
# Osa 2: Hiukkasilmaisimet



CMS-koeasema

Koeaseman mittalaitteet

Hiukkasten tunnistaminen





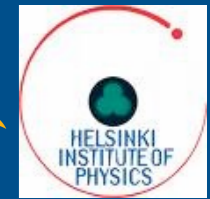


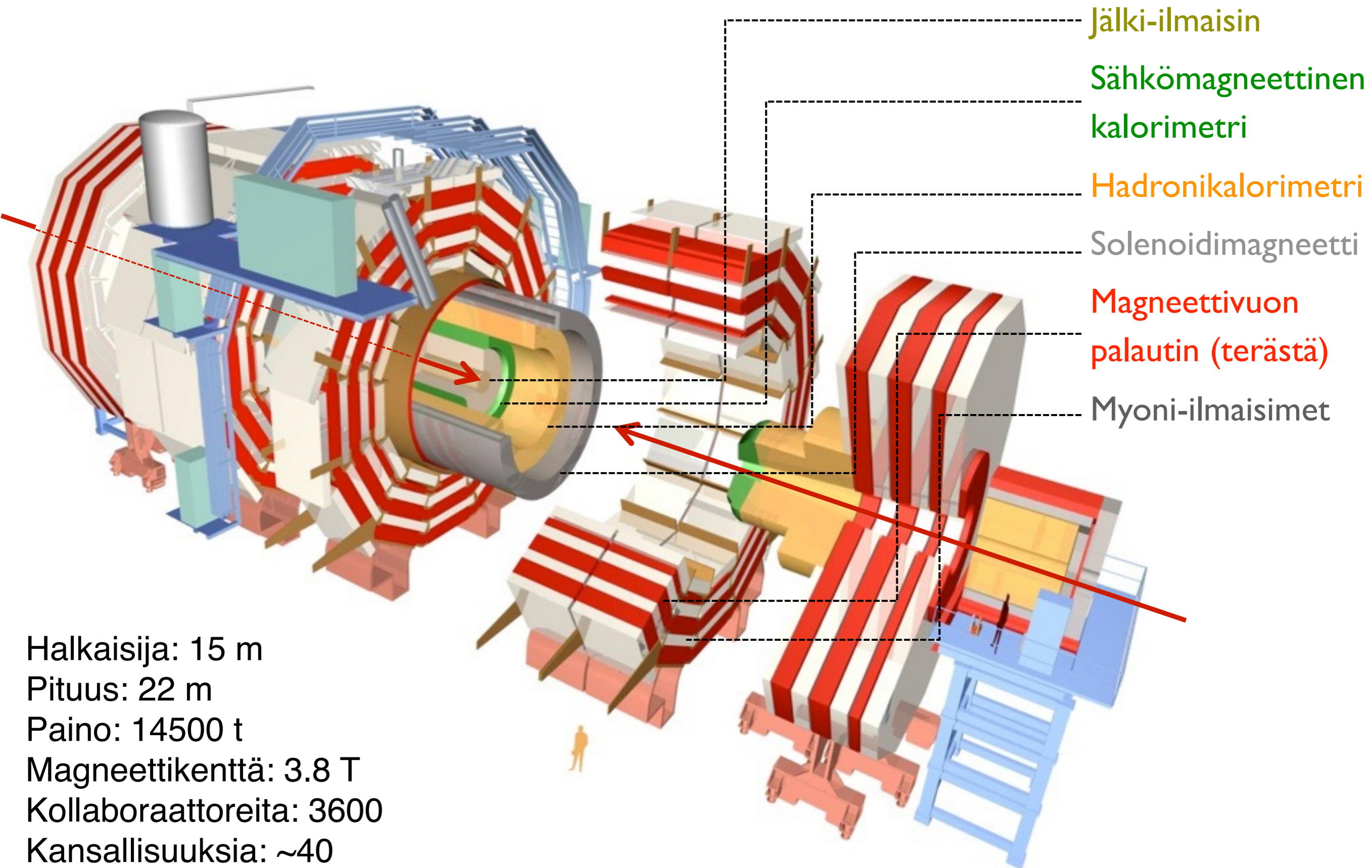
# 5000 ihmisen yhteishanke



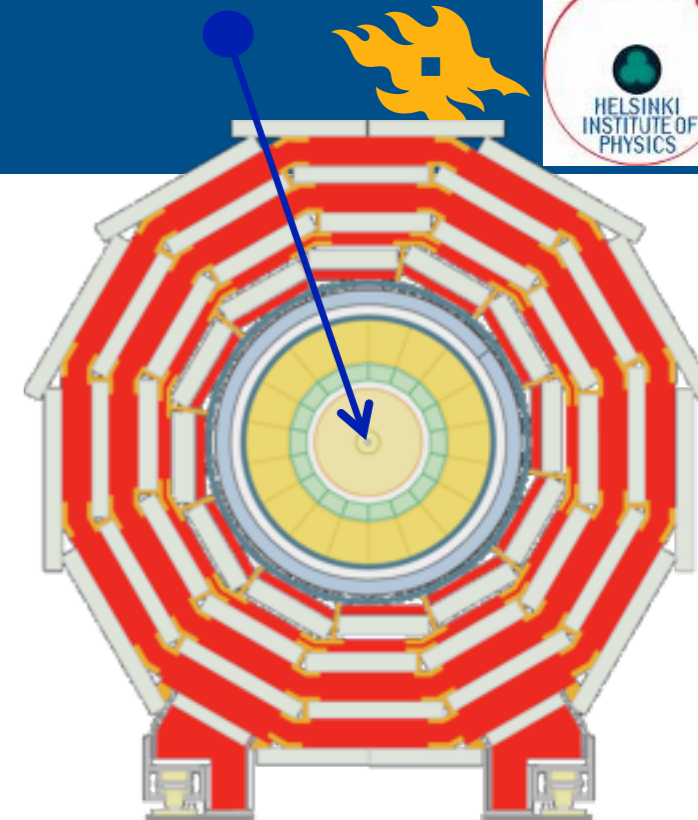


# Koeaseman valvomo



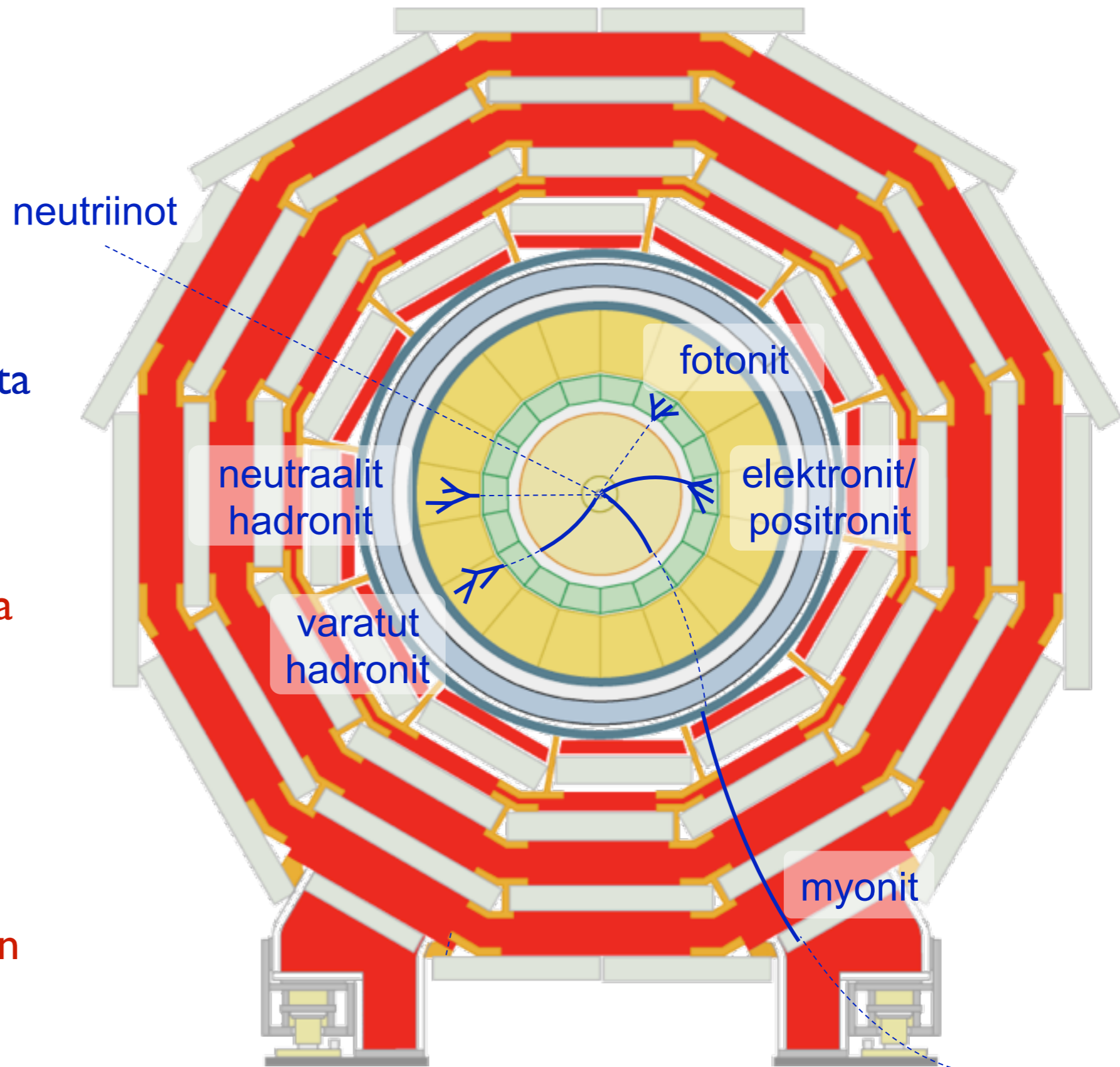


- Protonikimput (kussakin n.  $10^{11}$  protonia) kulkevat koelaitteiston läpi ohuessa ( $<1\text{mm}$ ) beryllium-putkessa, jonka sisällä on ~tyhjiö
- Törmäystuotteet lentävät yleensä vaivatta putken läpi
- Putkessa vastakkaisiin suuntiin liikkuvat protoni"rihmat" (*bunches*) kulkevat toistensa läpi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



Hiukkaset vuorovaikuttavat aineen kanssa eri tavoin

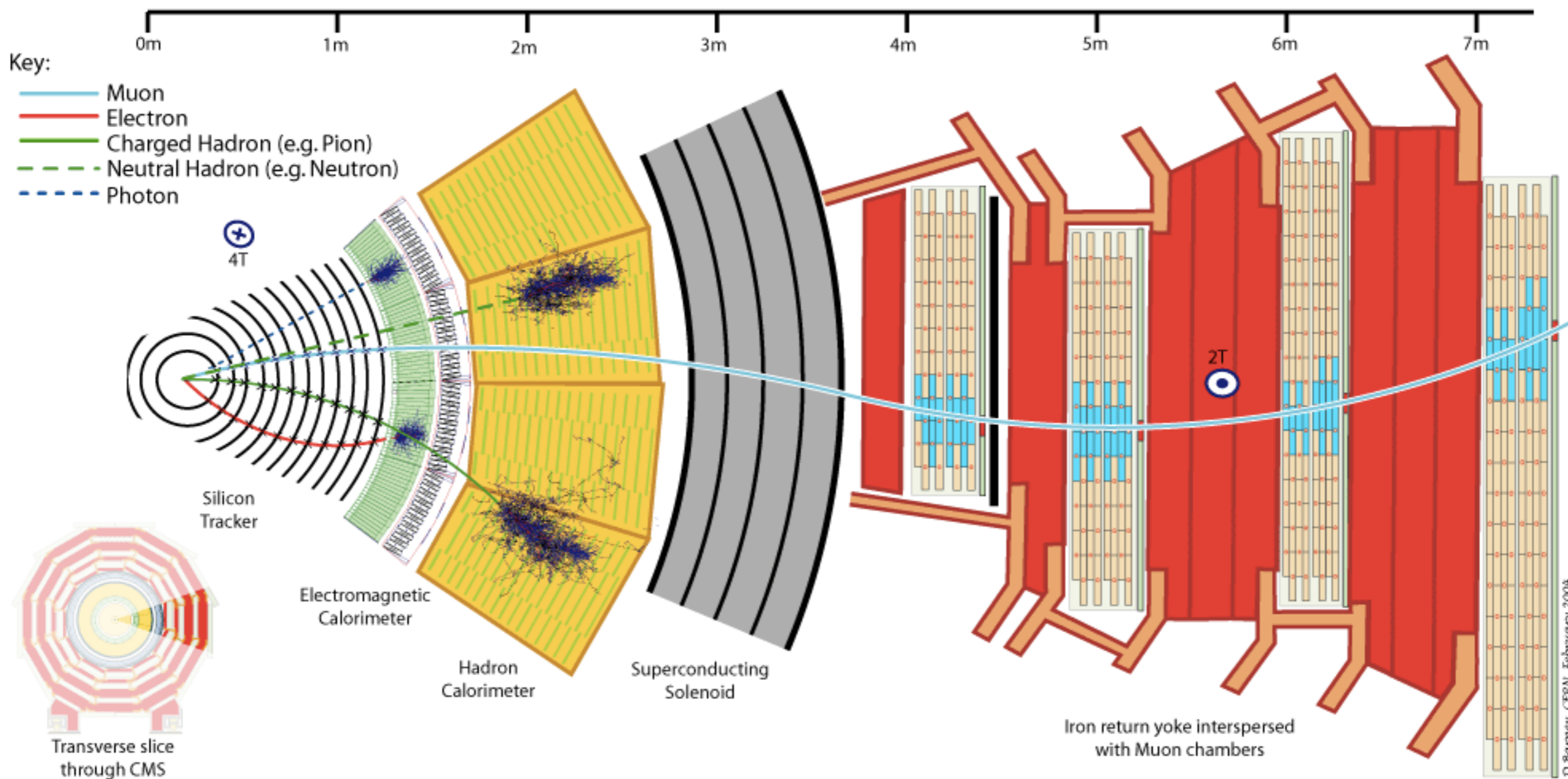
Varatut hiukkaset ionisoivat, joten niiden radat havaitaan

**Elektroni ja fotoni tuottavat sähkömagneettisen ryöpyn**

**Hadronit tuottavat pitkän hadronisen ryöpyn**

**Raskaat muonit tunkeutuvat aineen läpi tehokkaasti**

Neutriinot havaitaan epäsuorasti liikemäärän säilymisen kautta

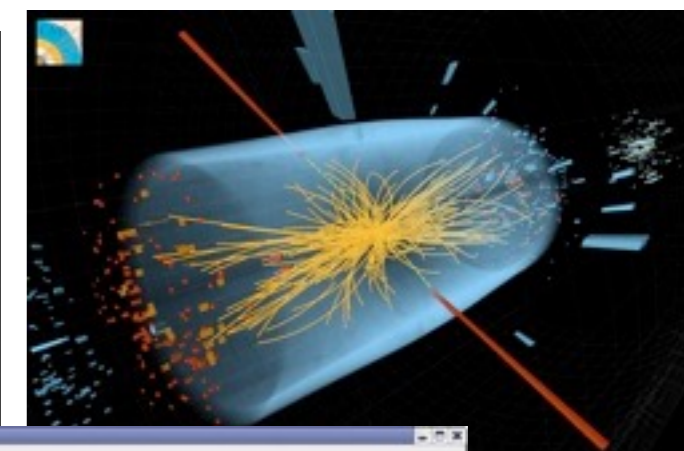
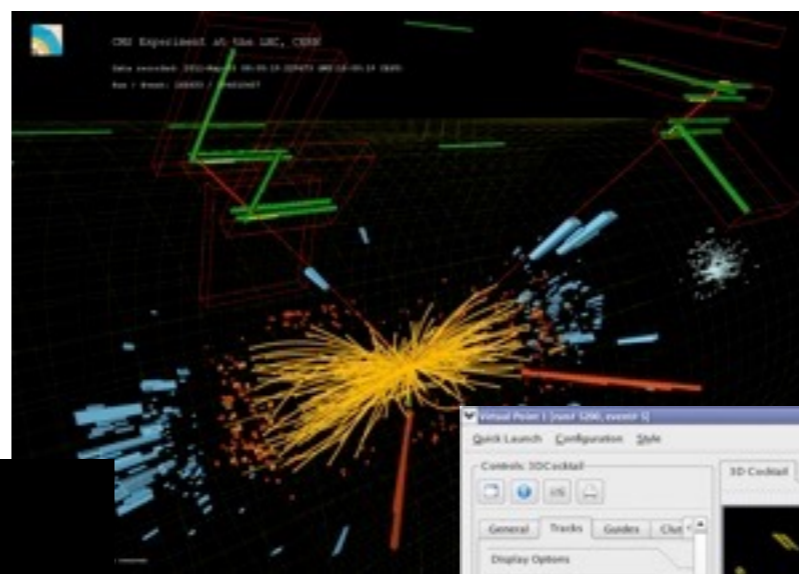
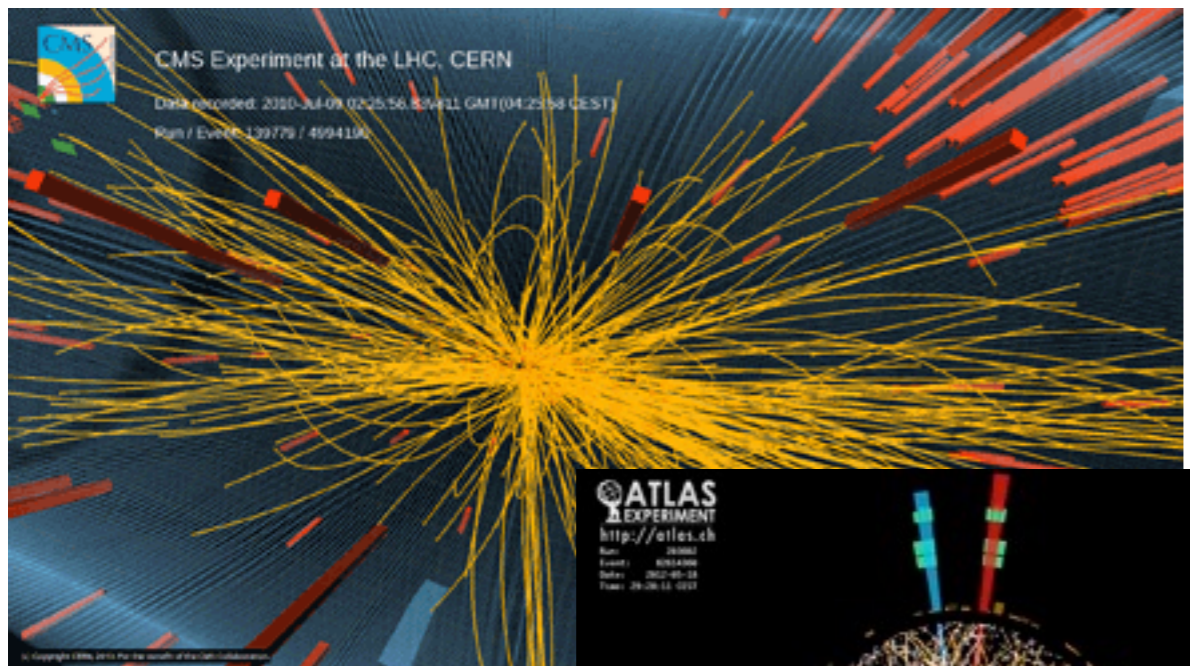


D. Barney, CERN, February 2004

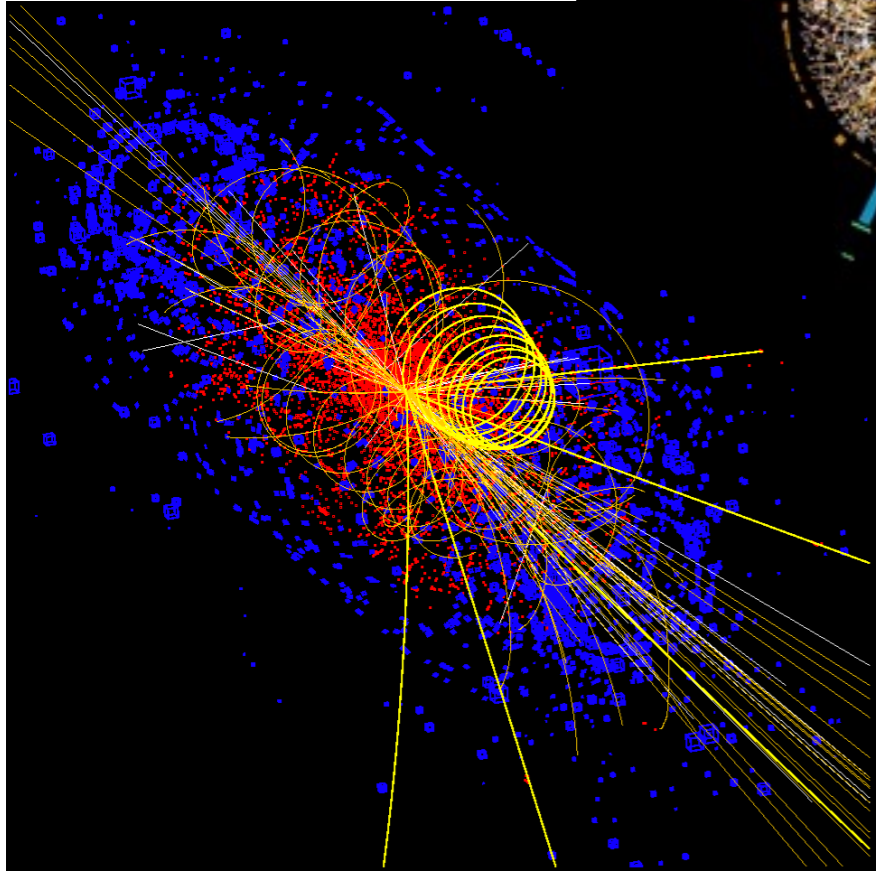
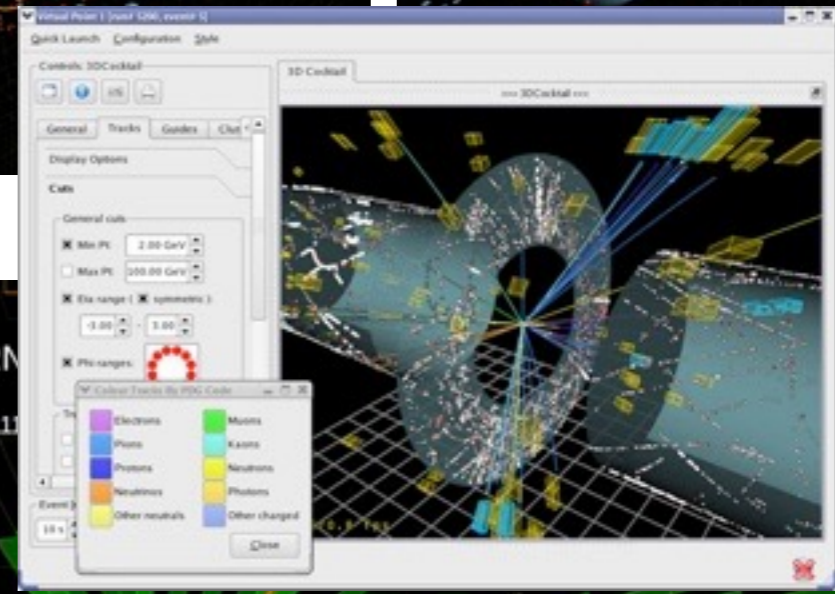
# Osa 3: Data-analyysi



Törmäysten valitseminen  
Signaali ja tausta  
Tilastolliset menetelmät



ment at the LHC, CERN  
 2010-Mar-30 11:04:14.111  
 132440  
 3087931  
 138  
 35985009  
 1



HLT triggers:

- HLT\_Abuse\_Photon
- HLT\_E1EMU
- HLT\_L1SingleMuon
- HLT\_L1SingleMuonNoPTE
- HLT\_L1SingleMuon20
- HLT\_Muon20SC
- HLT\_Muon20SC\_NoPTE
- HLT\_Muon20SC\_CR
- HLT\_Muon20SC
- HLT\_DerivedTrack\_SingleTrack
- HLT\_DerivedTrack\_SingleTrack
- HLT\_DerivedTrack\_DoubleTrack
- HLT\_Muon20Track
- HLT\_HighMultiplicityBSC
- HLT\_SpacerBSC
- HLT\_L1\_BeamHaloCR\_8pPlusCRMinux
- HLT\_L1\_BeamHaloCR\_8pPlusCRMinux\_NoPTE
- AICa\_EcalProdym
- HLT\_L1\_HFtech
- HLT\_L1Tech\_HCAL\_HF\_condensor\_PM

Trigger name	Trigger rate	Trigger status
EElectrons_V0	0.170	1.000
EElectrons_V0	0.080	1.000
EElectrons_V0	0.080	00.000
HElectrons_V0	0.170	0.000
HElectrons_V0	0.170	0.000
HElectrons_V0	0.080	0.000
HElectrons_V0	0.330	0.000

© CERN 2009. All rights reserved. http://atlas.ch



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

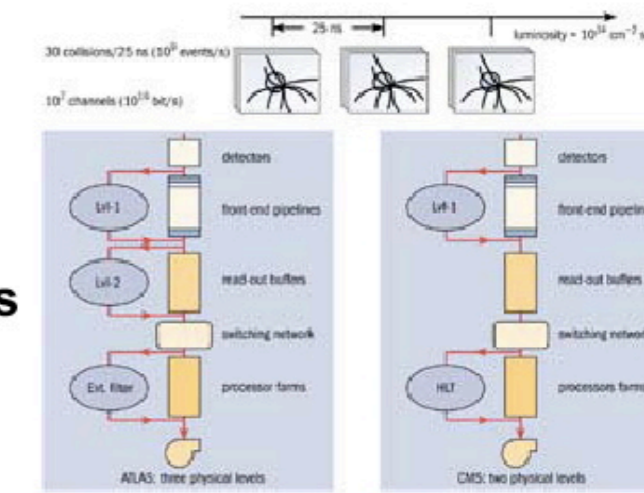
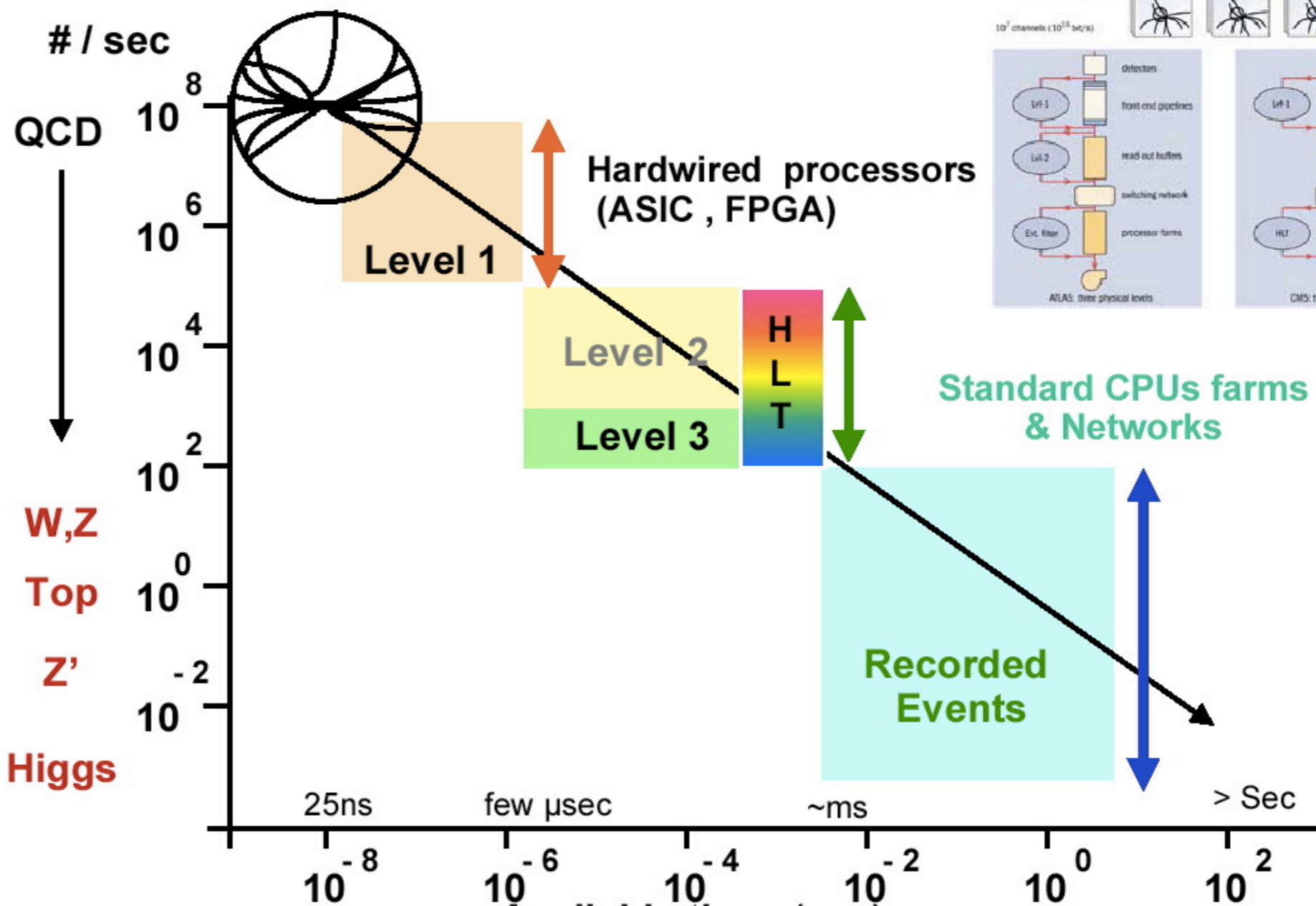
1-tason liipaisu  
 (Level-1) valitsee  
**100 kHz**, päätökseen  
 aikaa  **$\sim 1\mu\text{s}$**

HLT: n. 50 000  
 prosessorin  
 tietokonefarmi  
 valitsee  
 **$\sim 250\text{ Hz}$**  (=250 MB/s)  
 törmäystapahtumaa  
 tallennettavaksi,  
 päätökseen aikaa  **$\sim 1\text{ms}$**

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

CERNissä kerätty jo yli  
 200 PB dataa!

Production rate

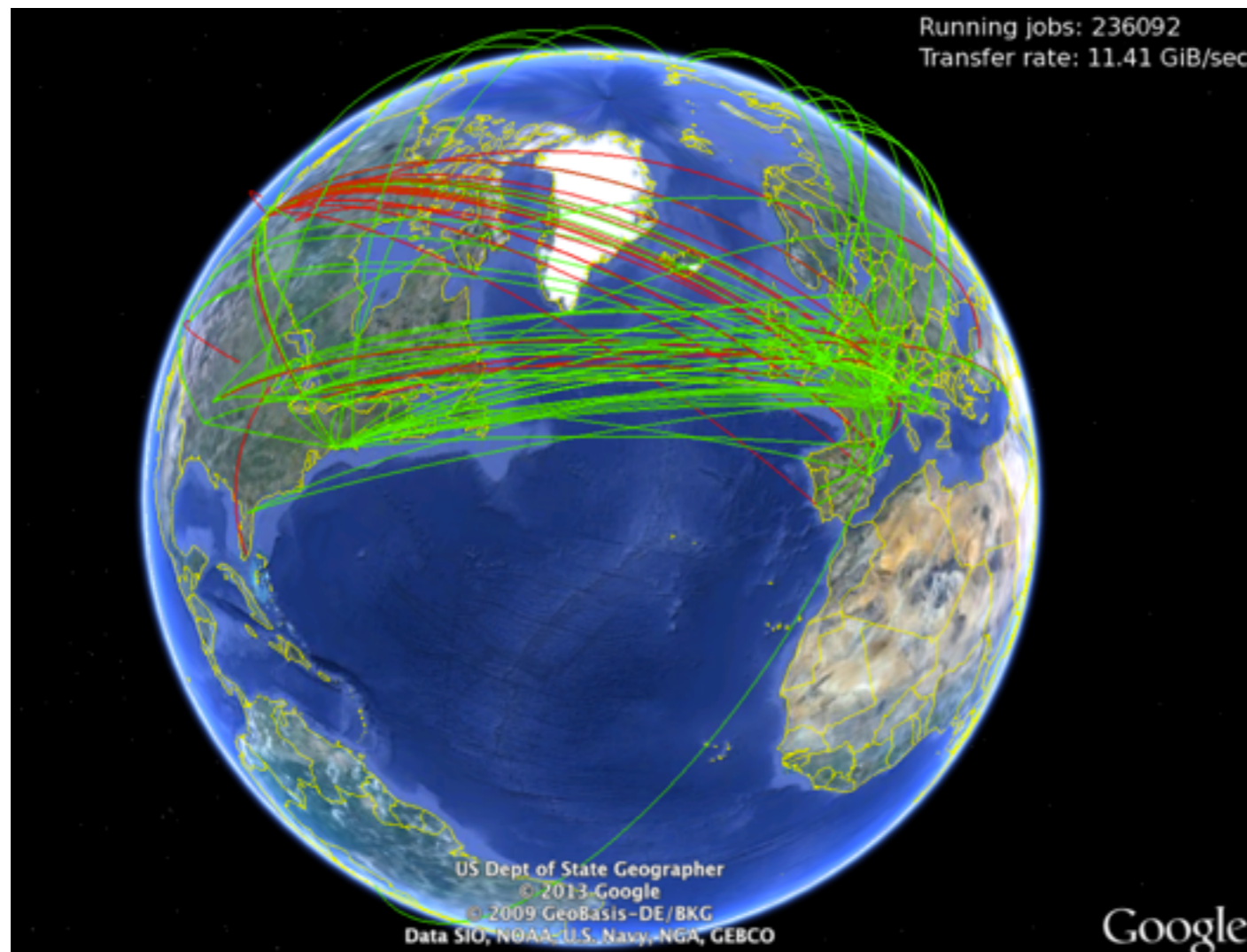




# Satoja petatavuja dataa

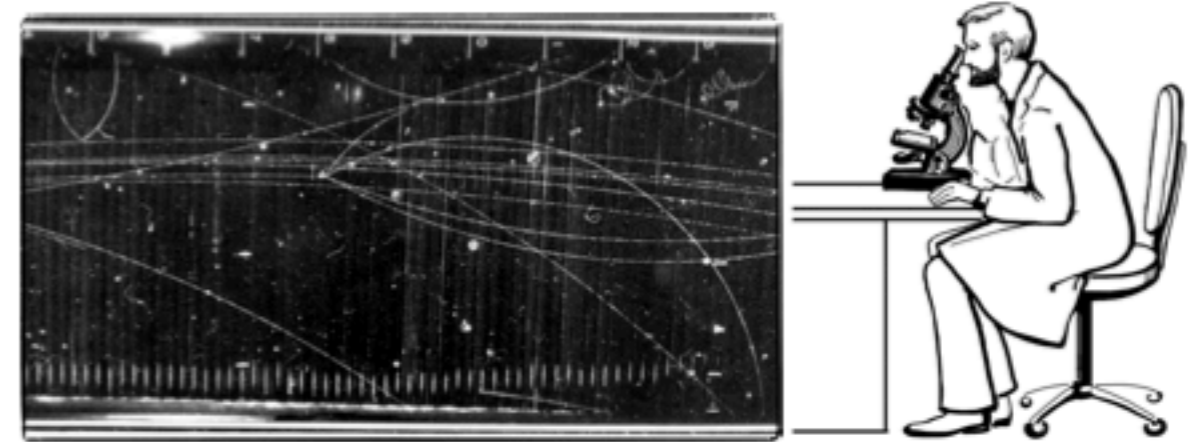


- Myös CERNin datan käsittely on jaettu maailmanlaajuisesti
- Kaikesta datasta yksi kopio CERNissä (Tier-0)
- Varmuuskopio jossain päin maailmaa (Tier-1)
- Analyysikopioita (Tier-2, Tier-3) jaettuna useille tietokonekeskuksille
  - Datan voi analysoida lähettämällä työn tietokonekeskukselle, jolla on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

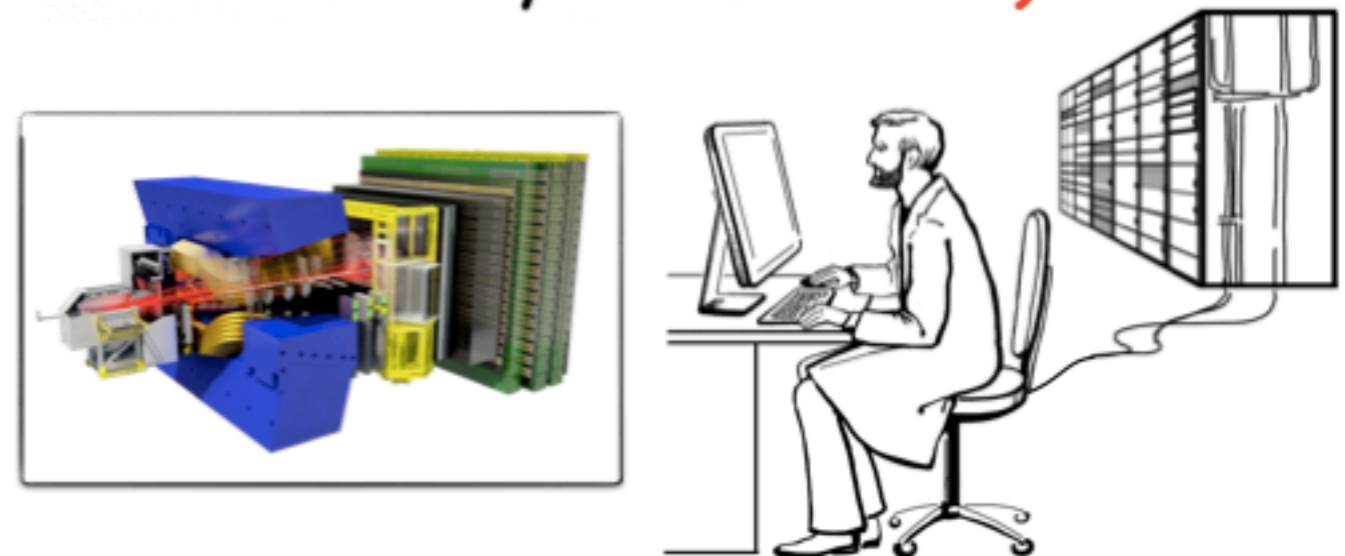


<http://wlcg.web.cern.ch/wlcg-google-earth-dashboard>

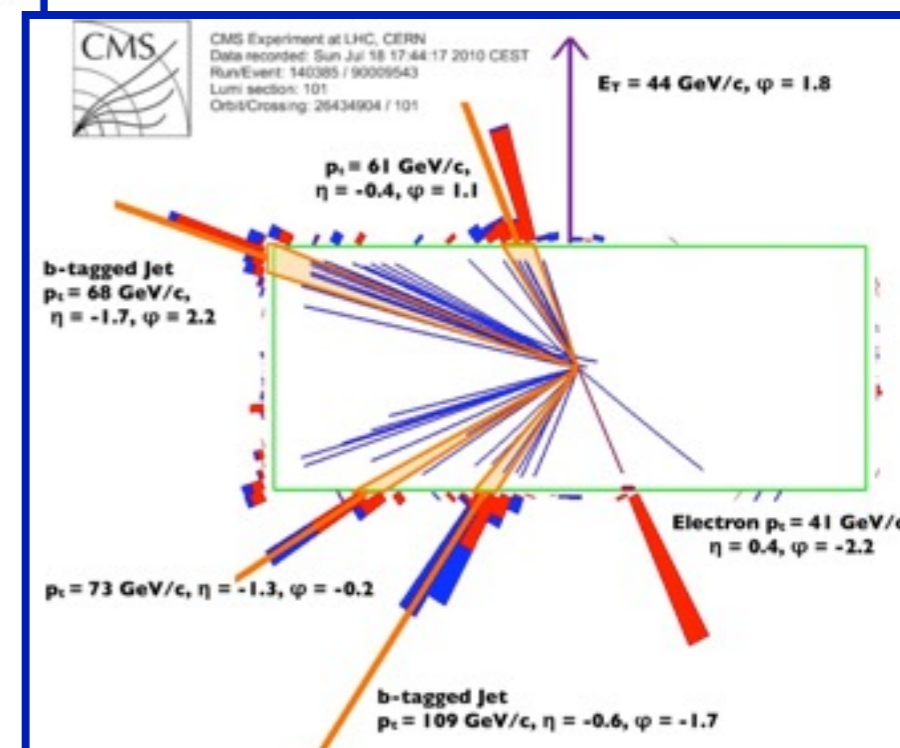
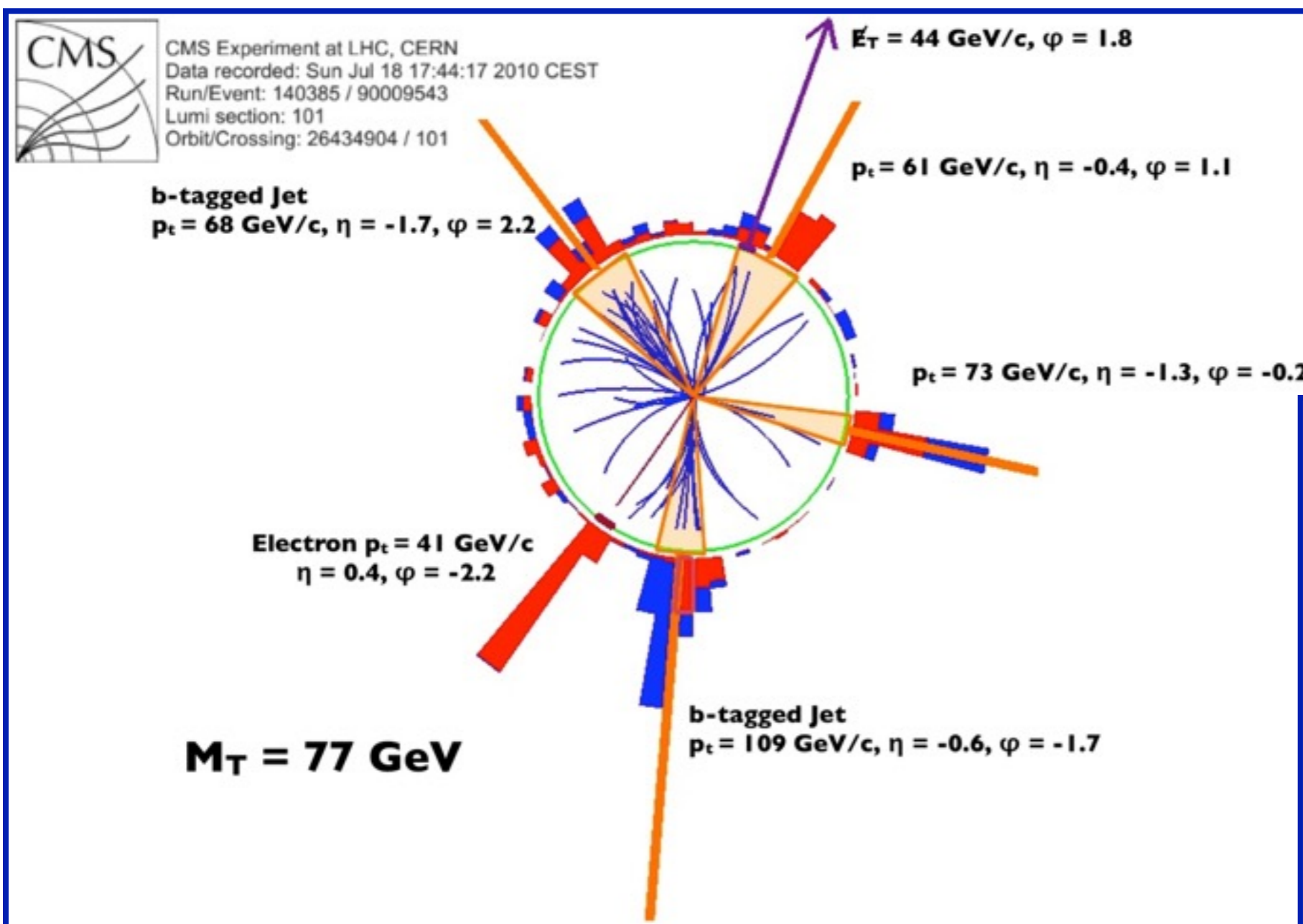
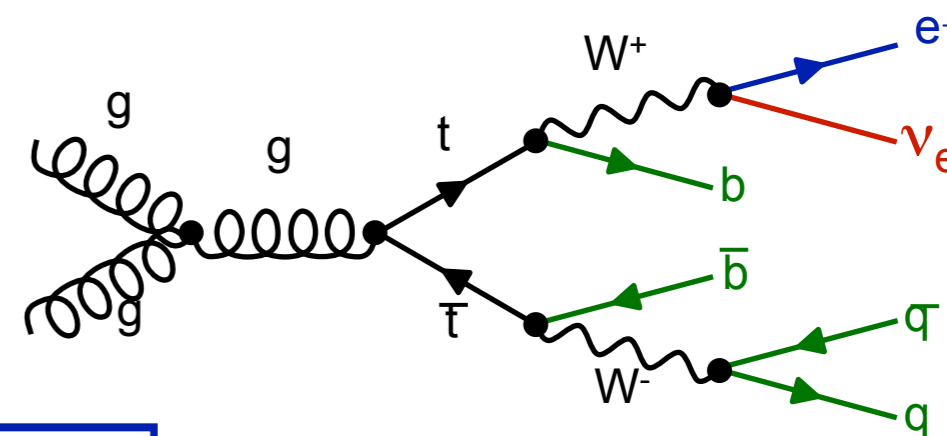
## What is Physics? *Yesterday*



## What is Physics? *Today*



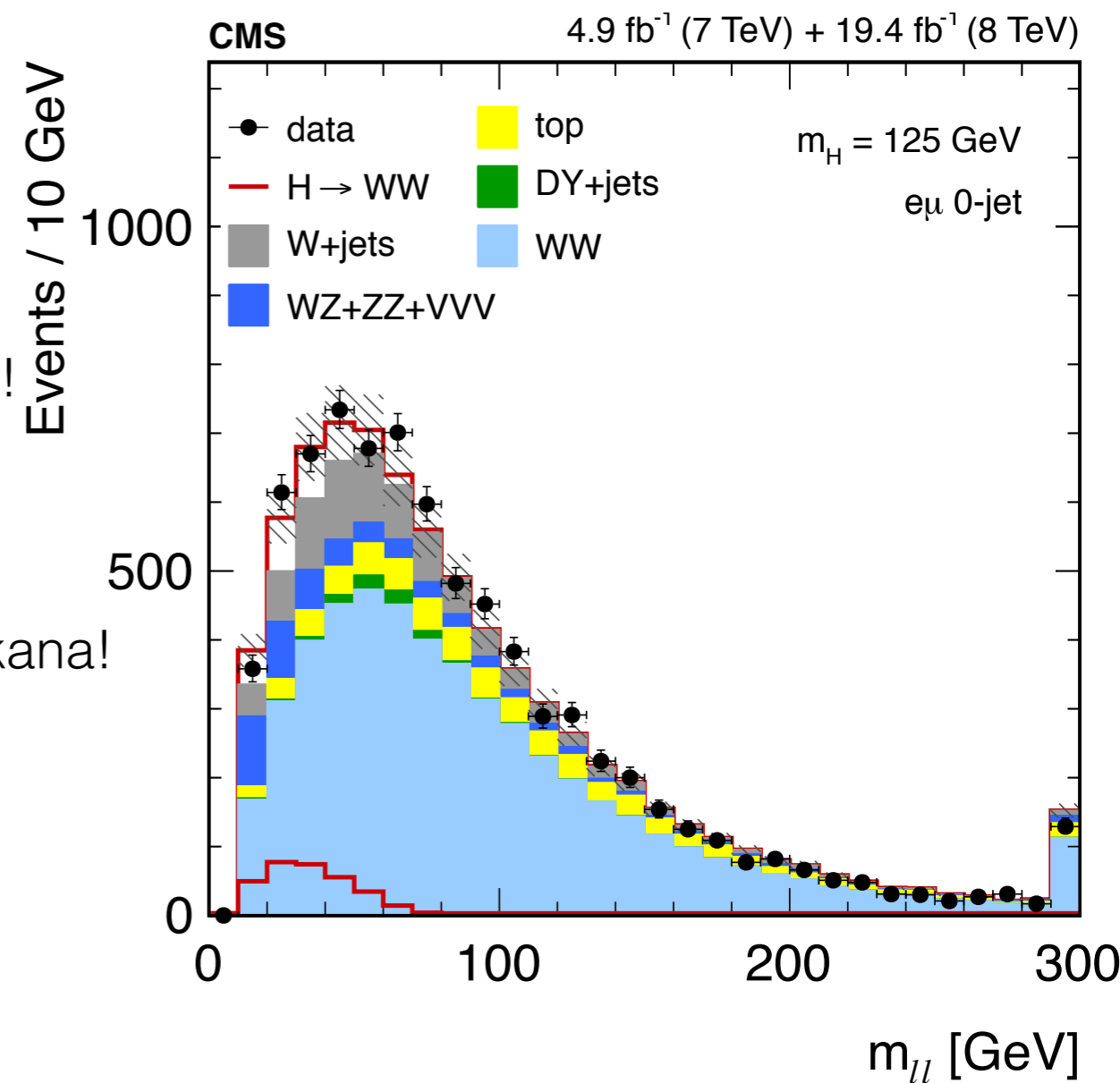
- Esimerkki: Gluoni-gluonifuusio, jossa syntyy top-kvarkkeja



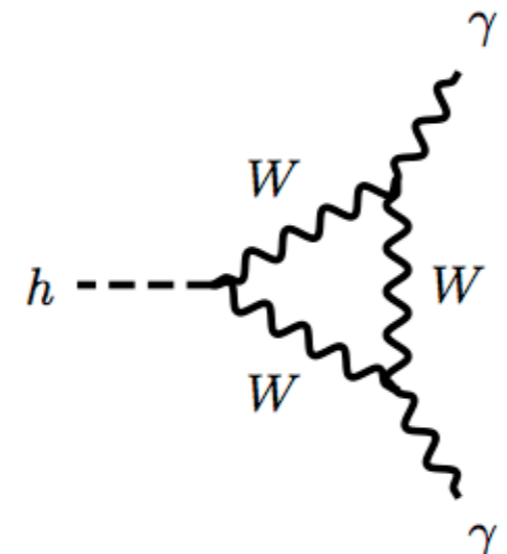
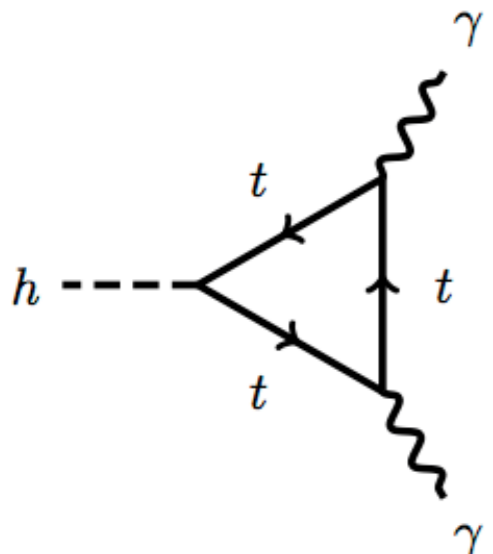
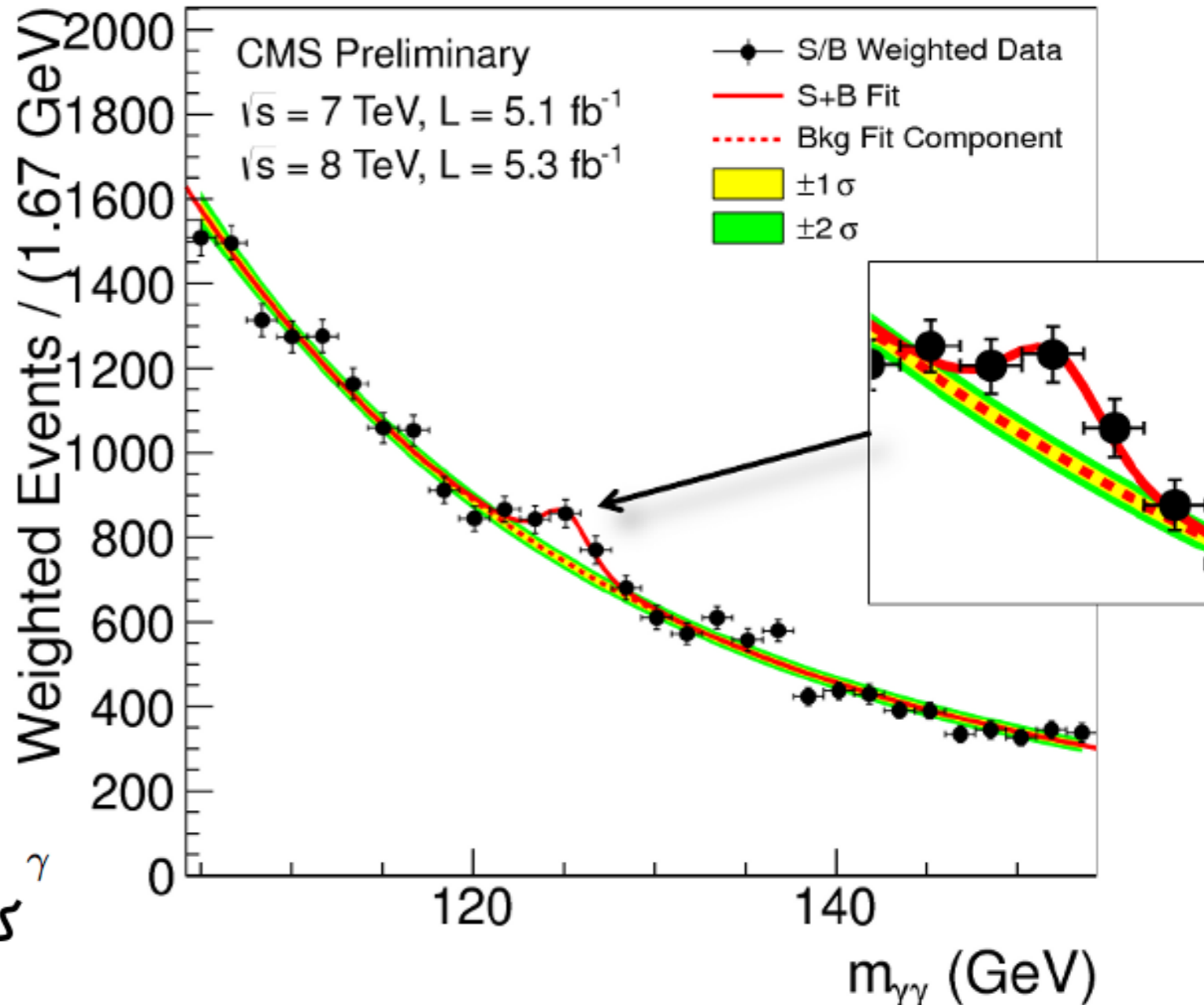
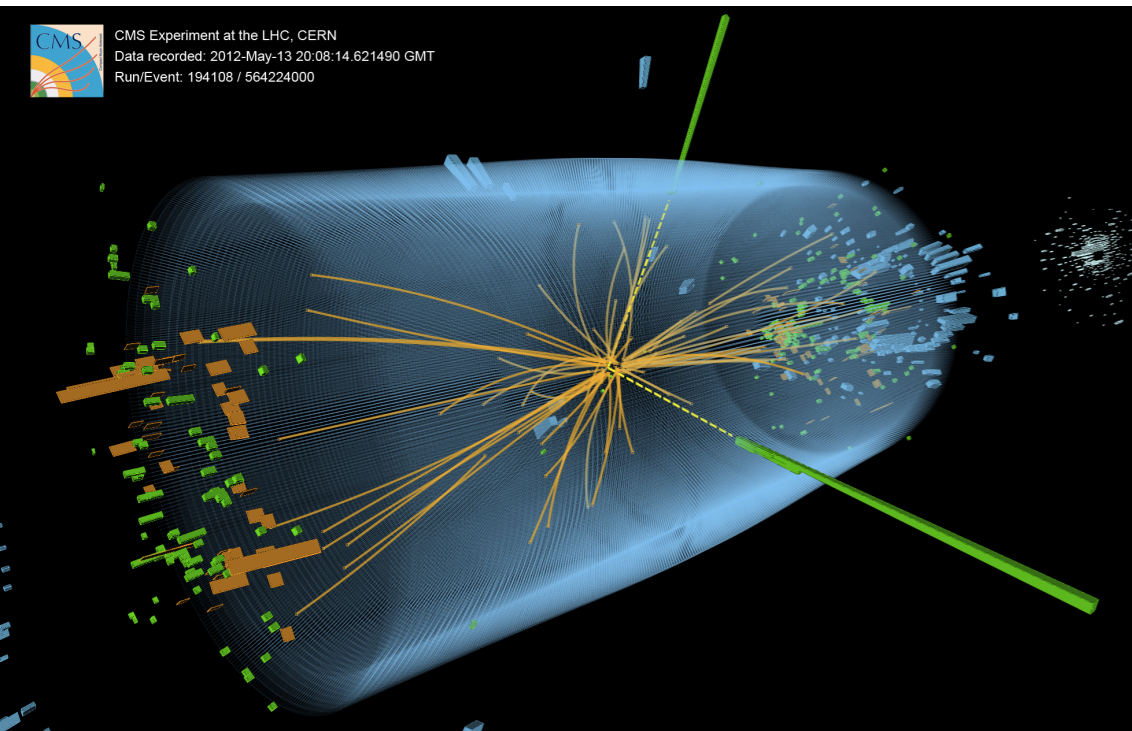
- Esimerkki: **Tavoitteena löytää Higgsin bosoni**
- Higgsin bosoni hajoaa toisinaan kahteen W-bosoniin,  $H \rightarrow W^+ W^-$ 
  - Tämä on etsimämme **signaali**
- $W^+ W^-$ -pareja syntyy protoni–protoni-törmäyksissä myös ilman Higgsin bosonia
  - Tämä on **taustaa** etsinnöillemme: jotain joka näyttää signaalilta (ainakin melkein) vaikka ei ole!

- **Kuinka erottaa signaali ja tausta toisistaan?**

- Yksittäisestä törmäyksestä mahdotonta sanoa!
- Taustaa voidaan arvioida **simulaatioilla**
- Taustaa voidaan arvioida **mittauksilla**
  - mitataan niin että signaalia ei varmasti mukana!
- **Suuri joukko törmäyksiä + tilastotiede**
- Valitaan sopiva joukko törmäystapahtumia
  - valintakriteerit sellaisiksi että tausta pienenee

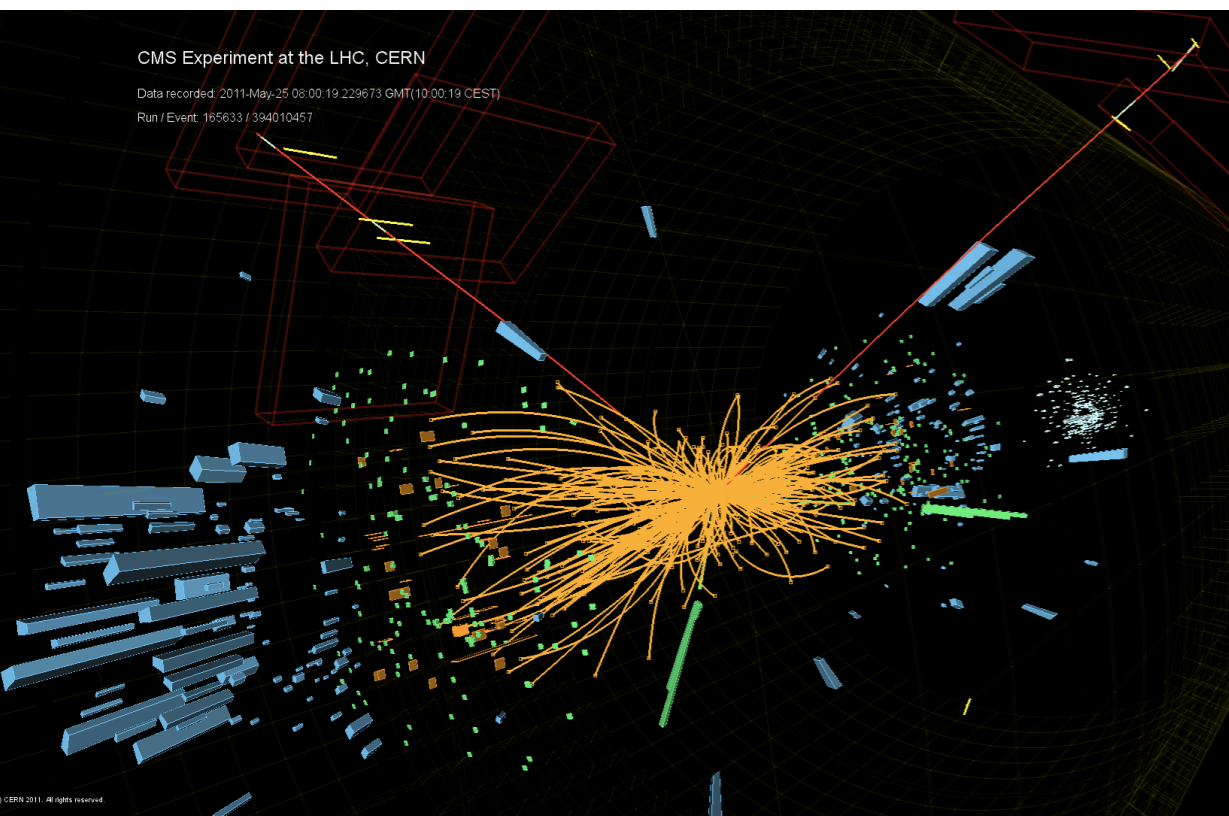
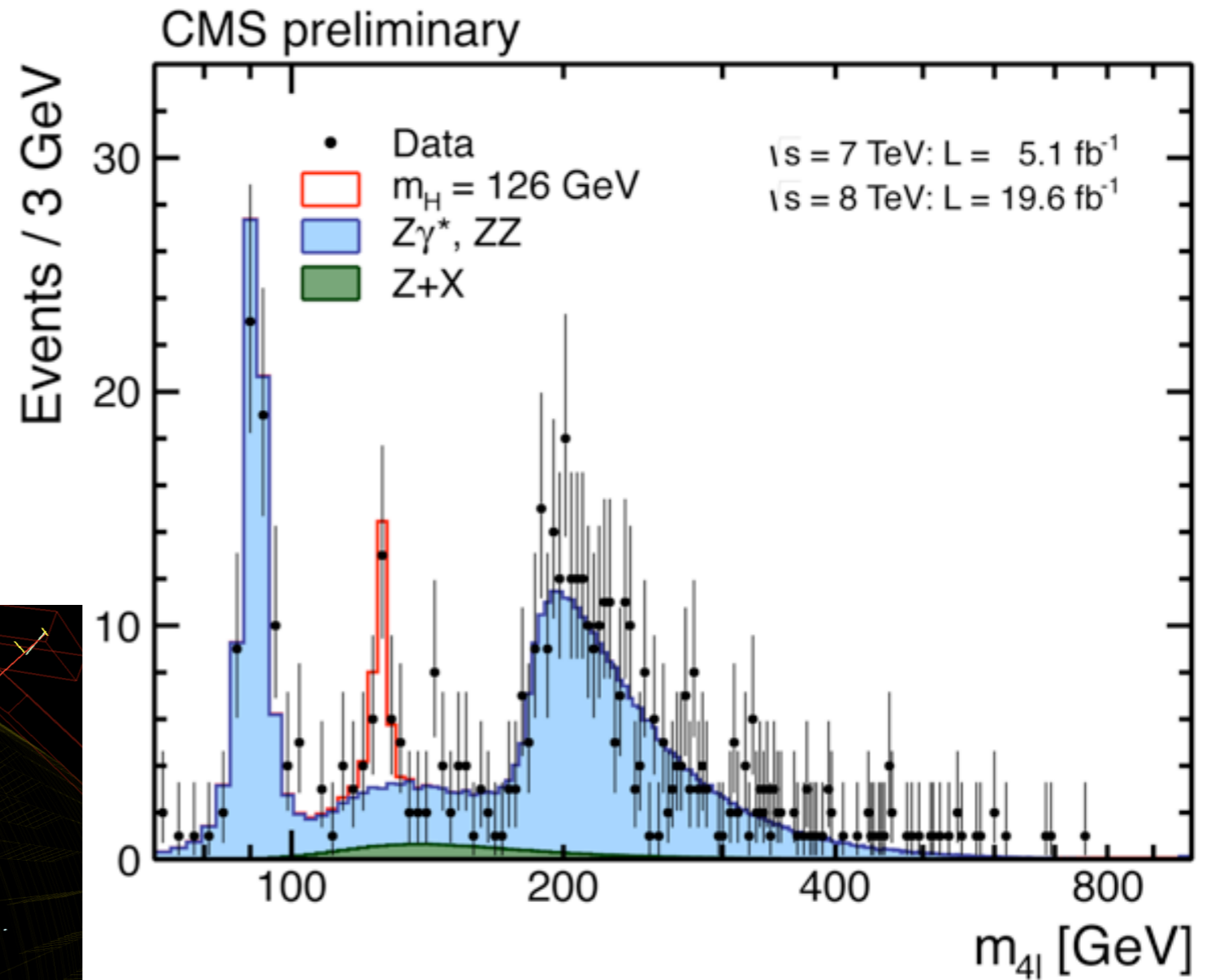
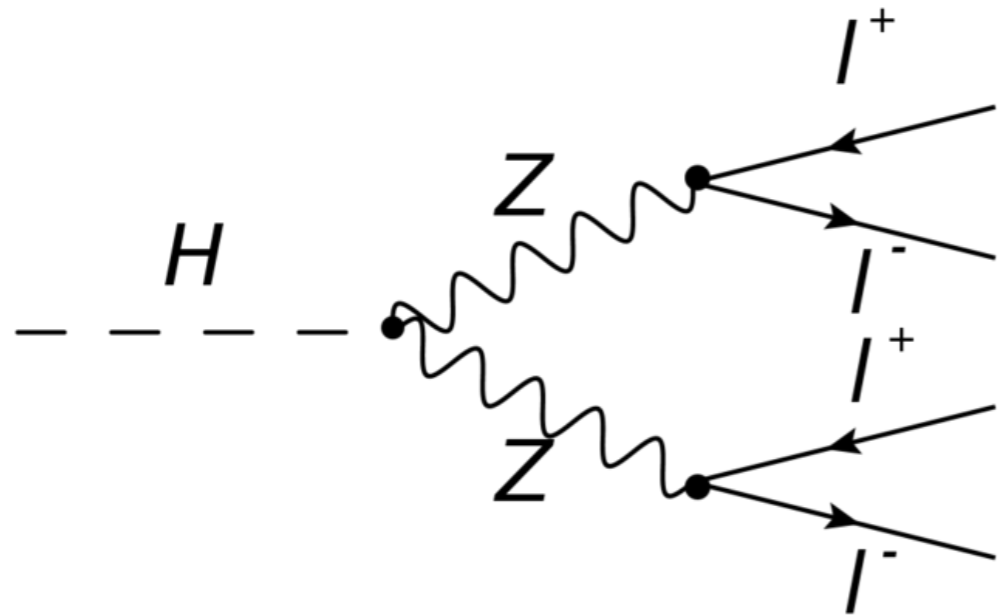


# Kaksi fotonia ( $H \rightarrow \gamma\gamma$ )



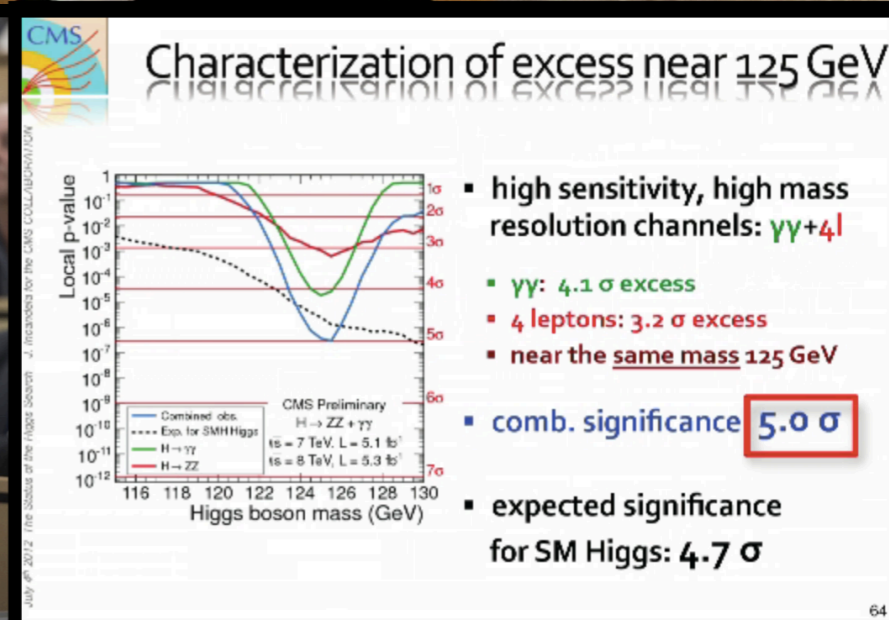
**Fotoniparin "invariantti massa" vastaa sen hiukkasen massaa josta fotonit ovat peräisin**

# Neljä leptonia ( $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ )

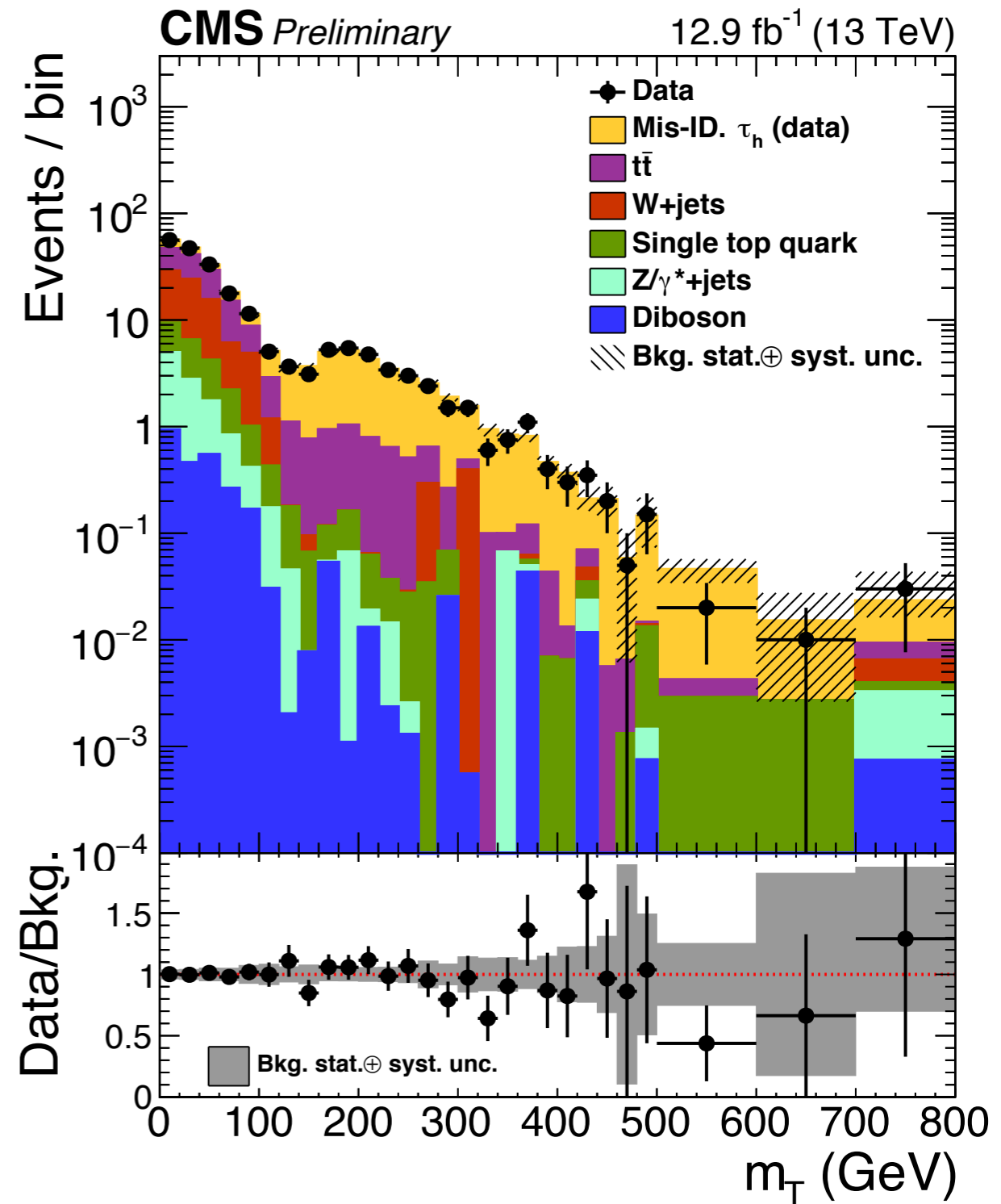
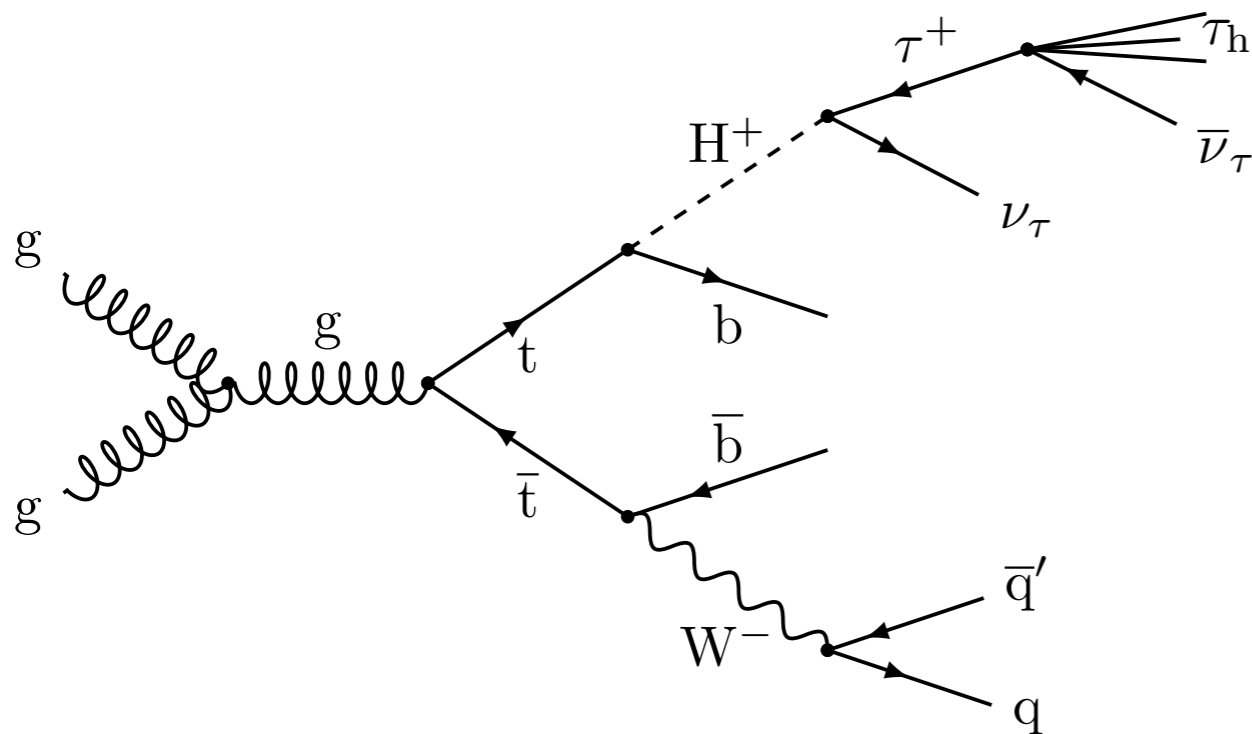


**Neljän leptonin systeemin  
 ”invariantti massa”**

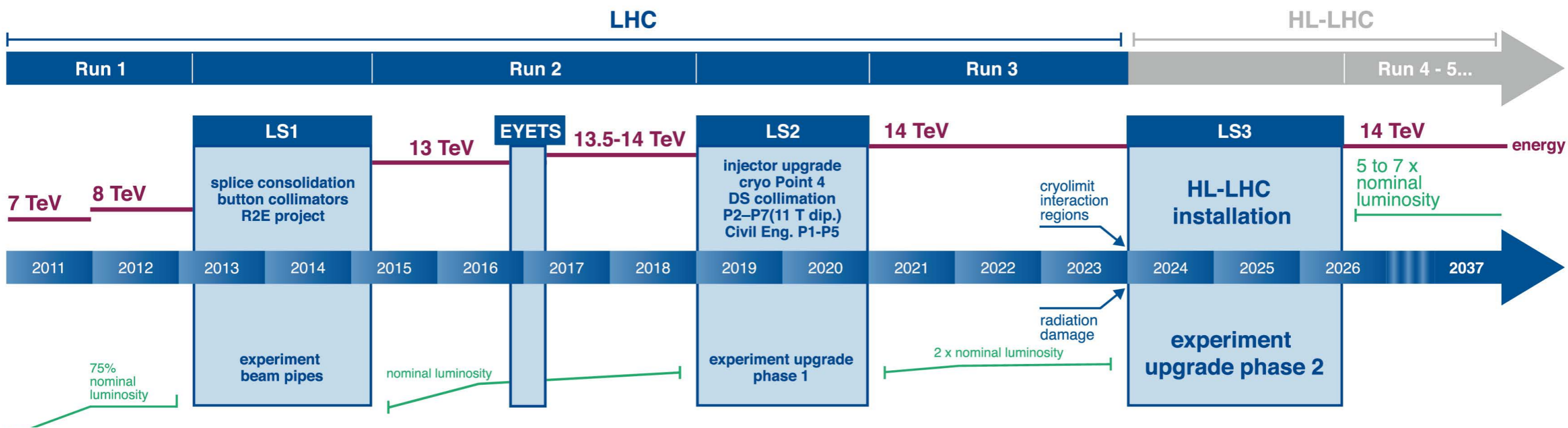




- Monet nykyistä standardimallia laajemmista teorioista ennustavat useita erilaisia Higgsin bosoneita
- Helsingin ryhmä etsii sähkövarauksellista Higgsin bosonia joka hajoaisi tau-leptoniksi ja neutriinoksi

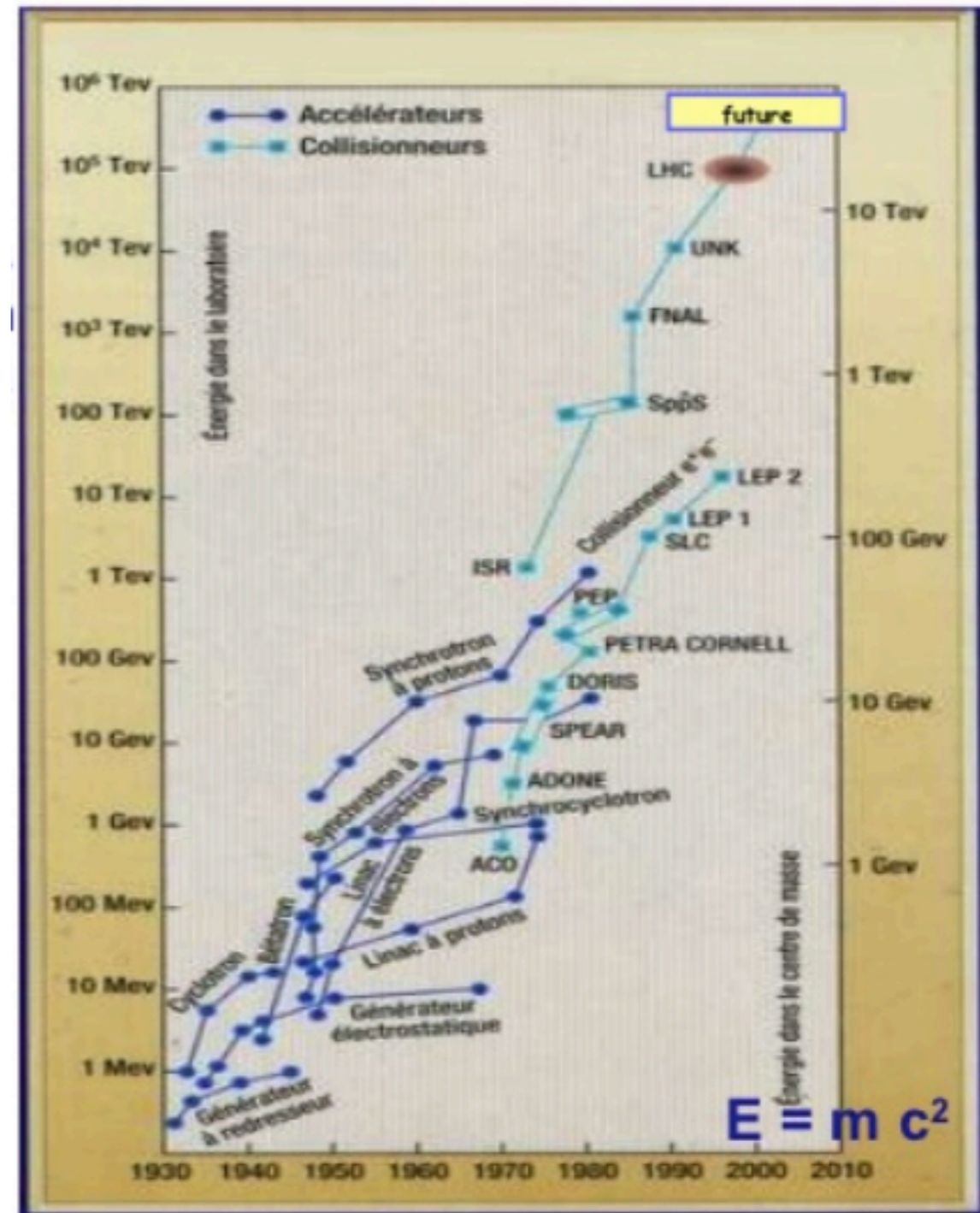
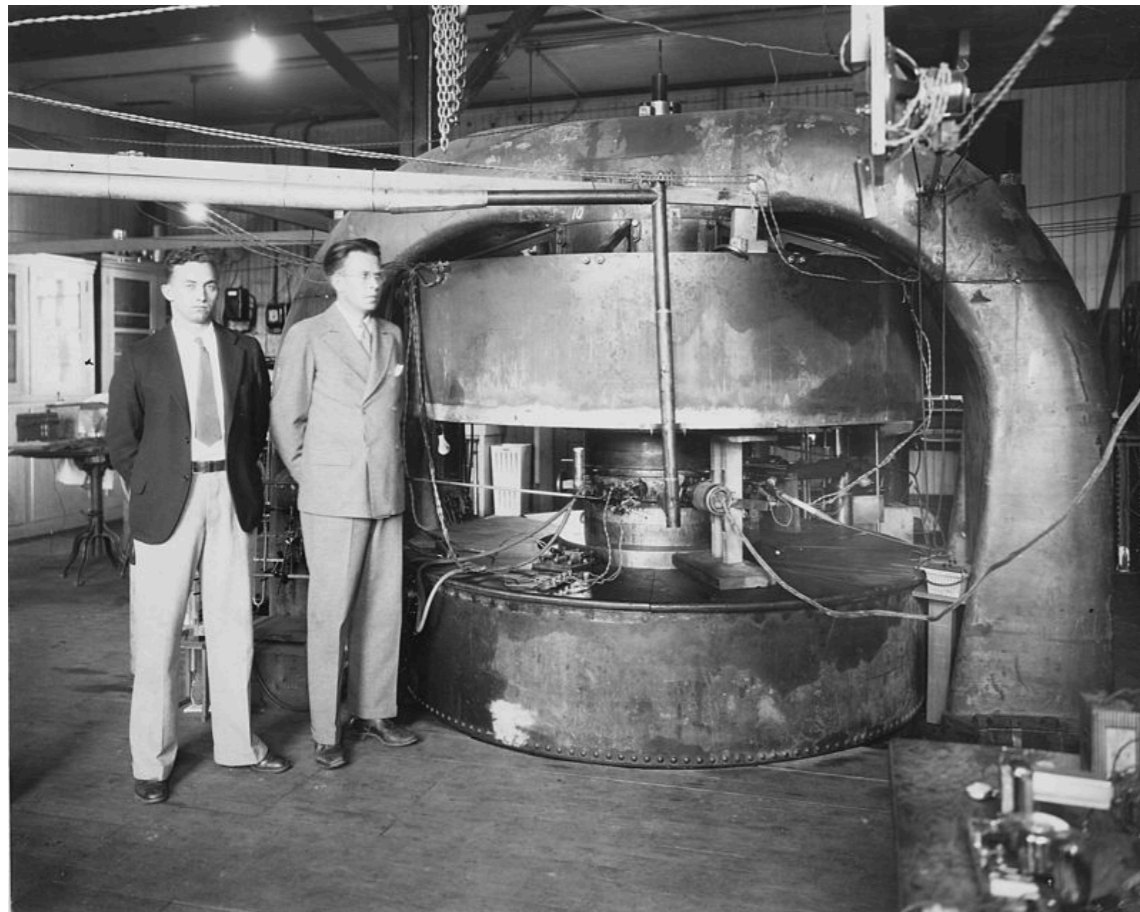


# Osa 4: Tulevaisuuden haasteet



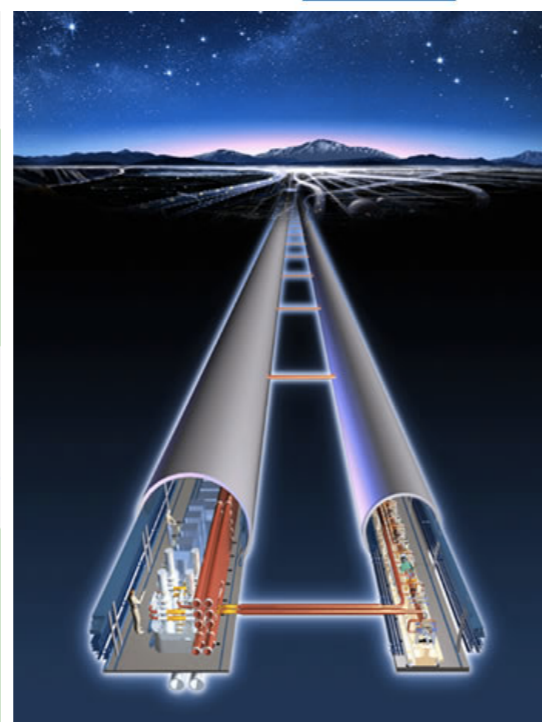
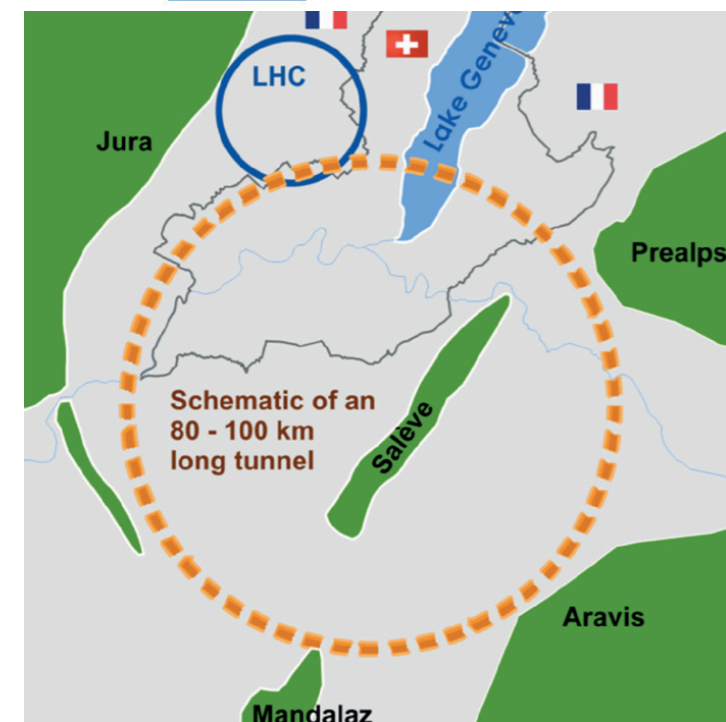
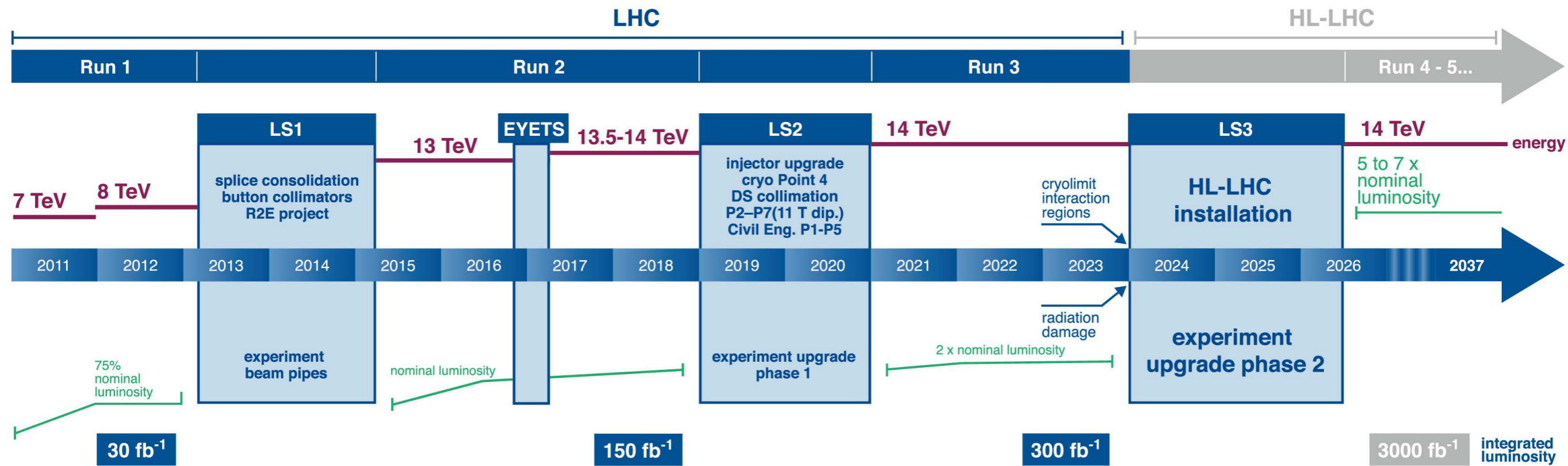
Tulevaisuuden kiihdyttimet  
 Kehittyvät analyysimenetelmät  
 Suuret kysymykset

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

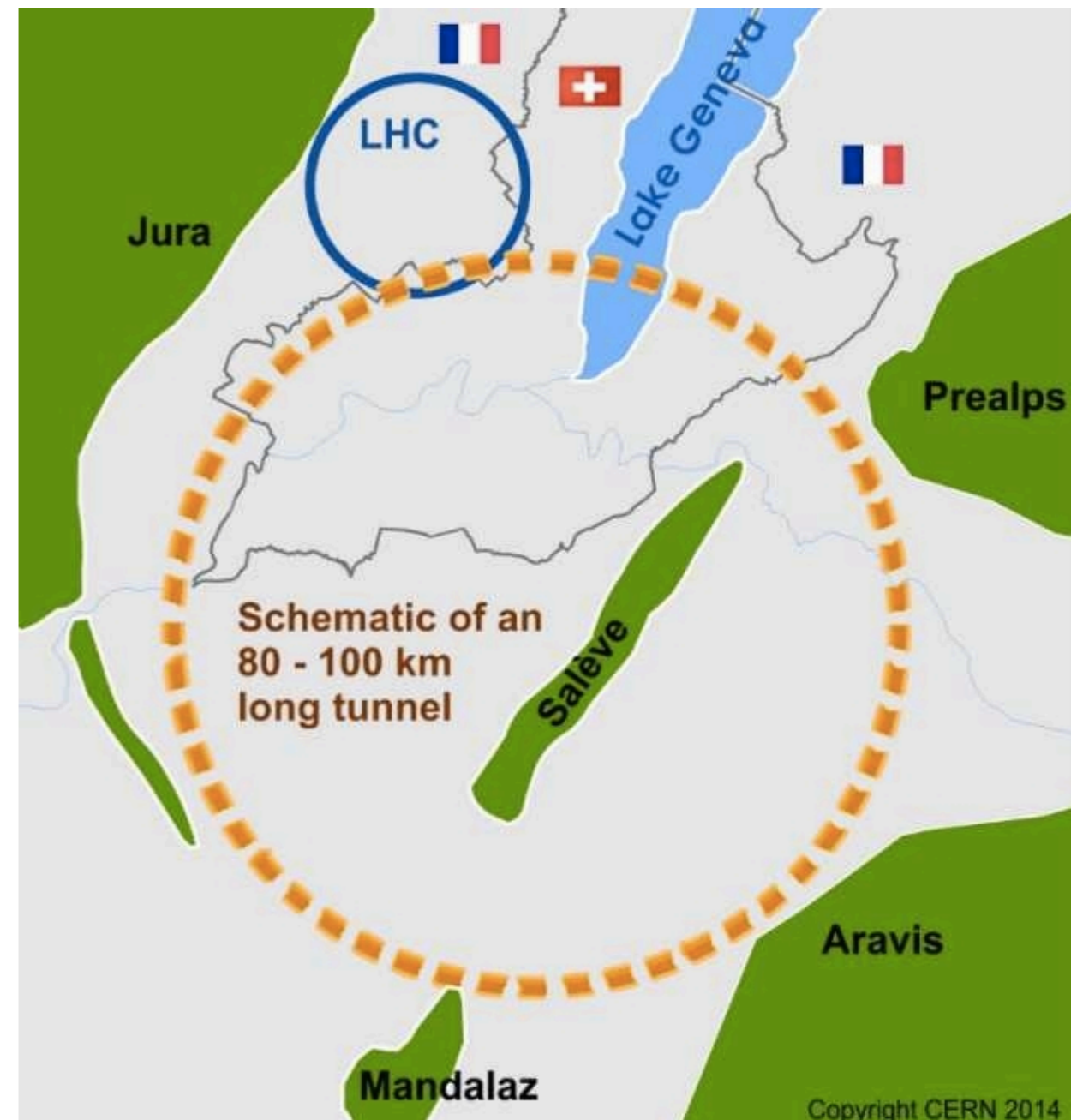
Physicists around the world are designing a range of particle colliders that are much bigger than the Large Hadron Collider at CERN, Europe's particle-physics laboratory.

- Proton collider
- Electron-positron collider

Collider Name	Proposed	Energy	Cost
China-hosted Electron-positron Collider	2028	0.24 or ≤0.35 TeV	US\$3 billion
China-hosted Proton Collider	2030s	70-100 TeV or 100-140 TeV	
CERN-hosted Large Hadron Collider	2009-35	14 TeV	US\$5 billion
Japan-hosted International Linear Collider	2030	≤1 TeV	US\$10 billion
CERN-hosted Super Proton Collider	2035-40	100 TeV	< US\$10 billion

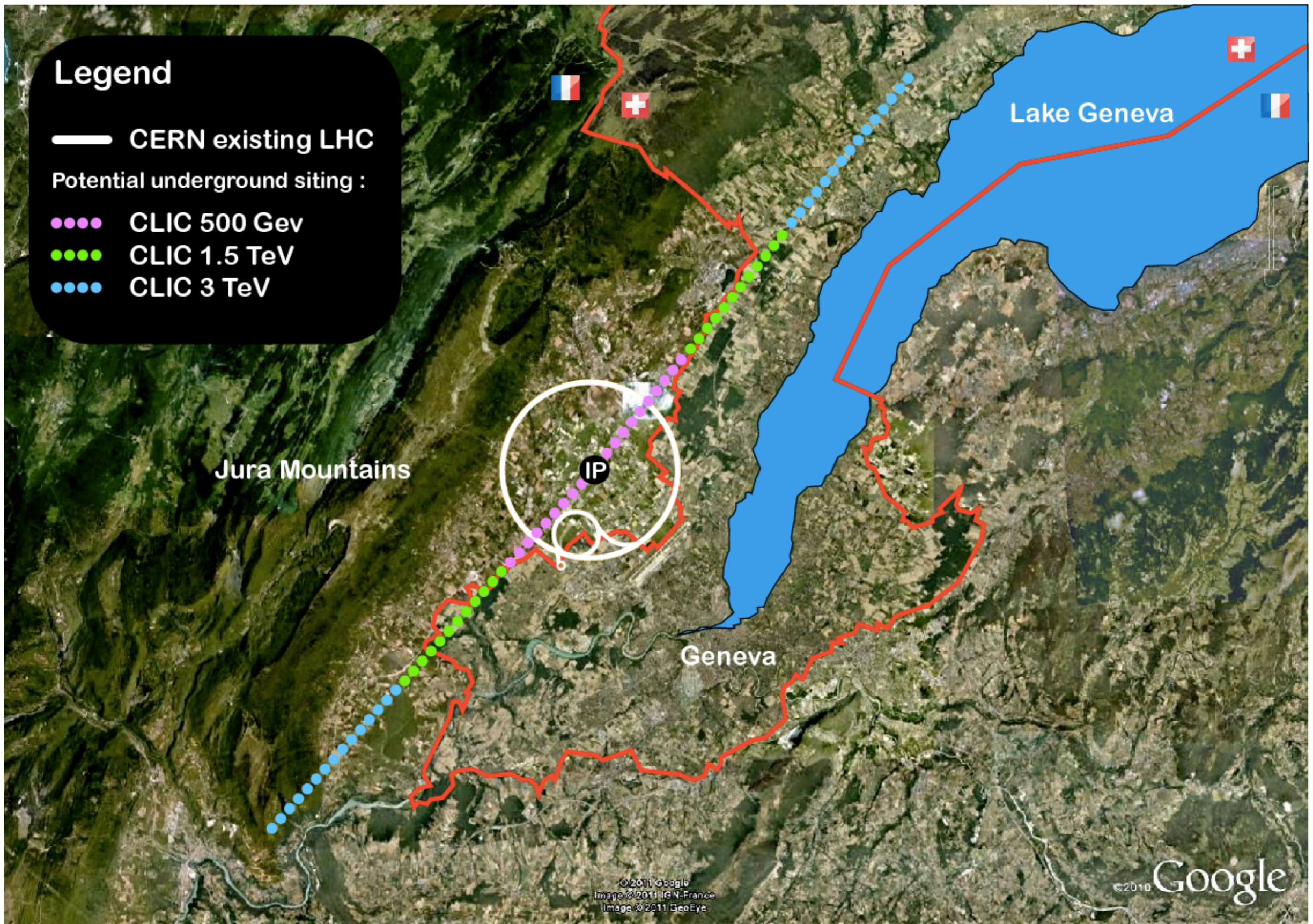
©nature

- Synkrotronit ovat modernin hiukkasfysiikan perustyökalu, joten miksi emme vain rakentaisi suurempaa ja energeettisempää versiota LHC:stä?
  - Sähkömagneettiteknologian rajat
  - Lisääntyvä synkrotronisäteily
  - Korkeampi energia vaatii myös suurempaa törmäystiheyttä eli kehittyneempiä ilmaisimia ja data-analyysimenetelmiä
  - Hintalappu (FCC ~30 mrd. €?)
    - LHC maksoi ~5 mrd. ja koeasemat toisen mokoman, operointi ~1mrd/vuosi



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







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 pimeää aine?
- Entä pimeää energia? Miten gravitaatio yhdistetään muihin (kvantti)vuorovaikutuksiin? Onko ulottuvuuksia tasan  $3+1$ ?
- Miksi hiukkasperheitä on kolme? Ovatko alkeishiukkaset todella alkeishiukkasia? Onko luonnossa lisää (rikkoutuneita?) symmetrioita? Supersymmetria?



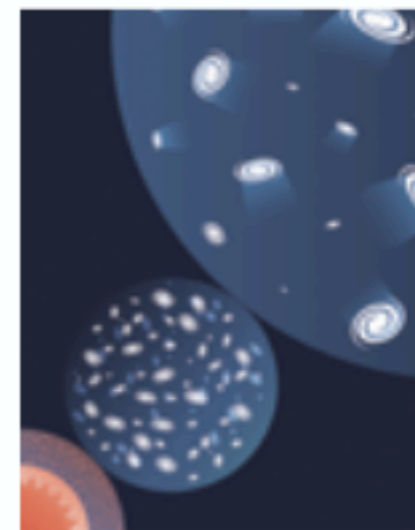
Higgs boson



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**

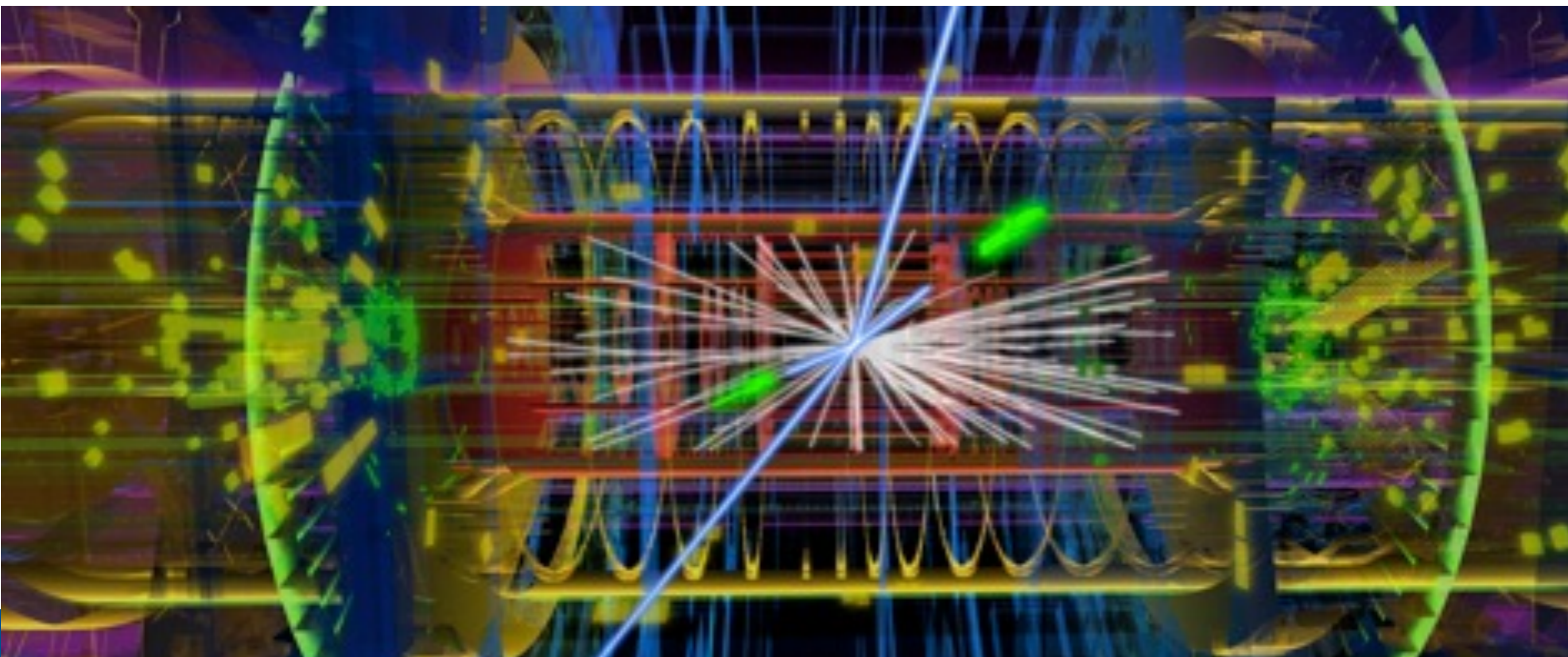


# Kiitos!



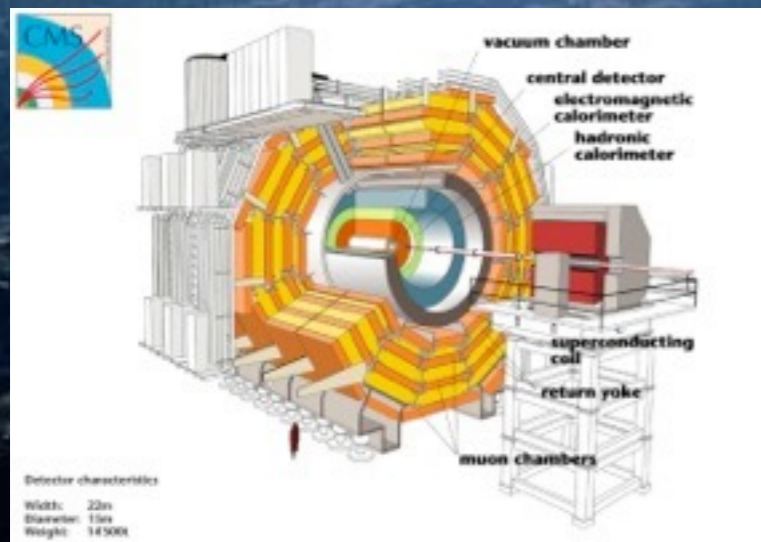
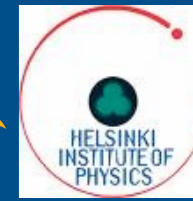
# Varakalvot

- 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)



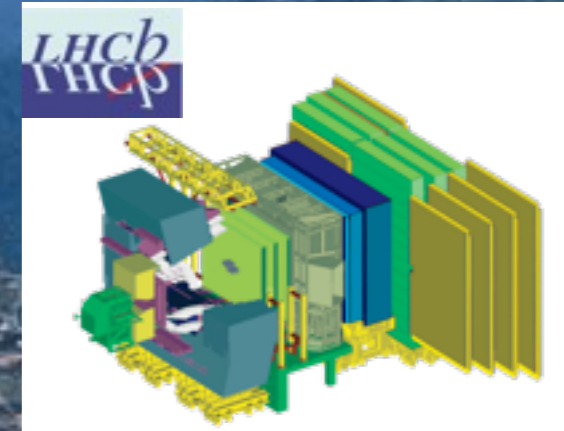


# LHC:n koeasemat



**CMS**  
+TOTEM

B-fysiikkaa  
protoni-protoni  
-törmäyksillä



**LHCb**  
+MoEDAL

LHC-törmäytin

Yleisilmais  
protoni-protoni ja  
lyijy-lyijy -törmäyksille

SPS-törmäytin

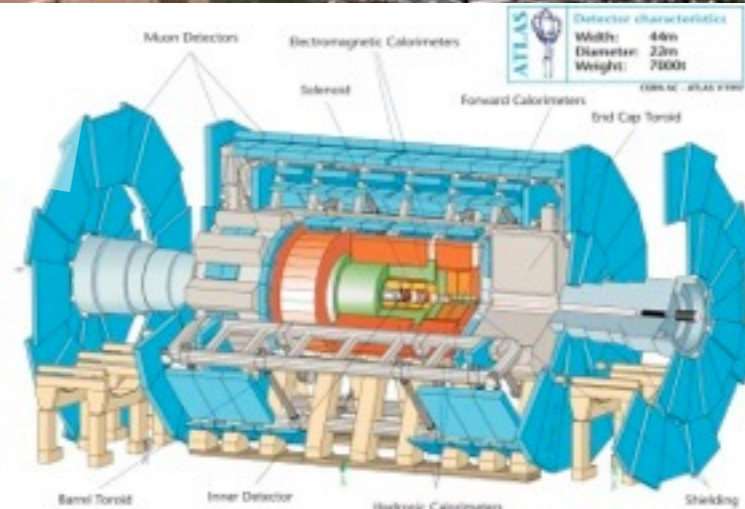
Raskasionifysiikkaa



**ALICE**

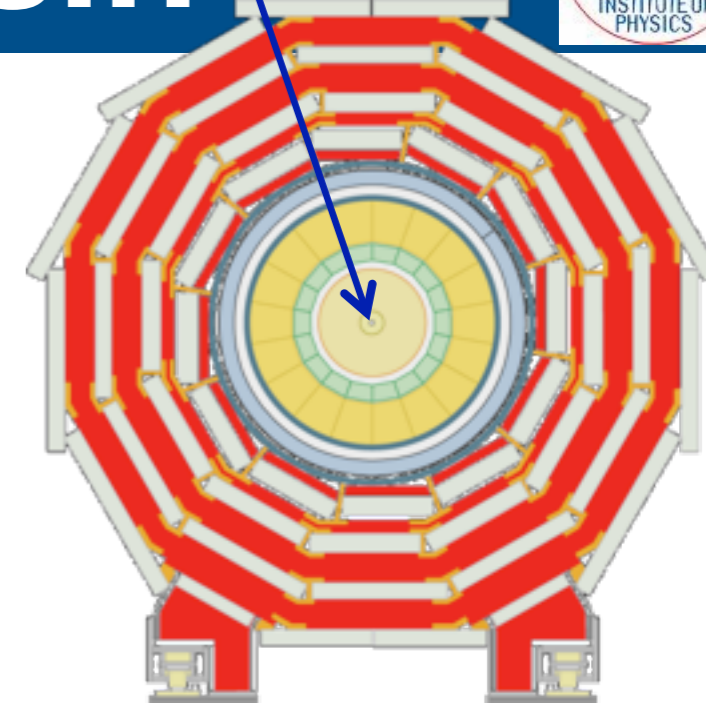
**ATLAS**  
+LHCf

PS-törmäytin

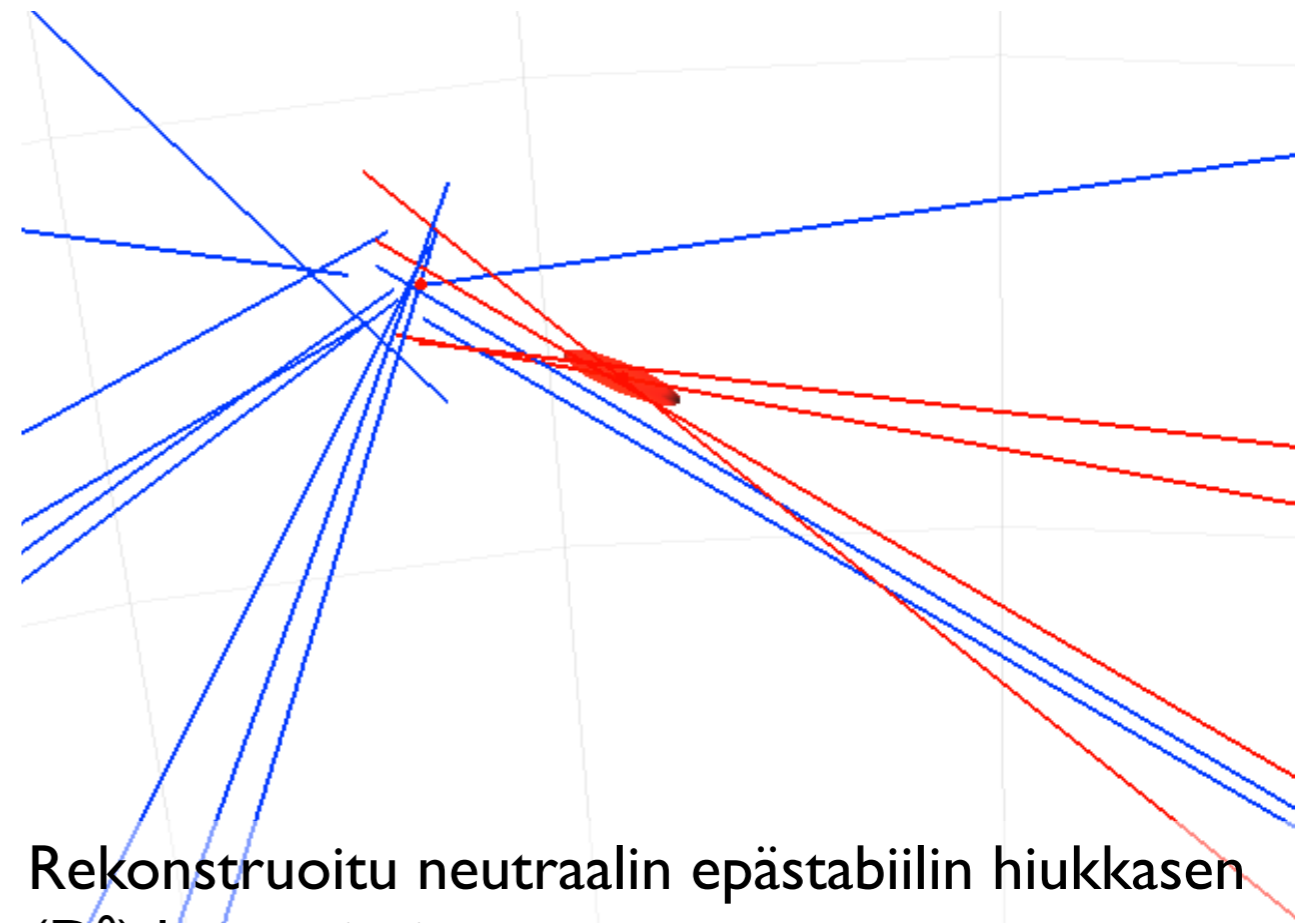




- Sisempi osa jälki-ilmaisimesta: piipikseli-ilmaisimia
  - 70 milj. piipikseliä, joiden koko  $100\ \mu\text{m} \times 150\ \mu\text{m}$
  - Toimintaperiaate: varatut hiukkaset tuottavat piissä (puolijohde) elektroni–aukko-pareja
  - Vähintään kolme mittauspistettä kullekin radalle
  - Mahdollistaa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



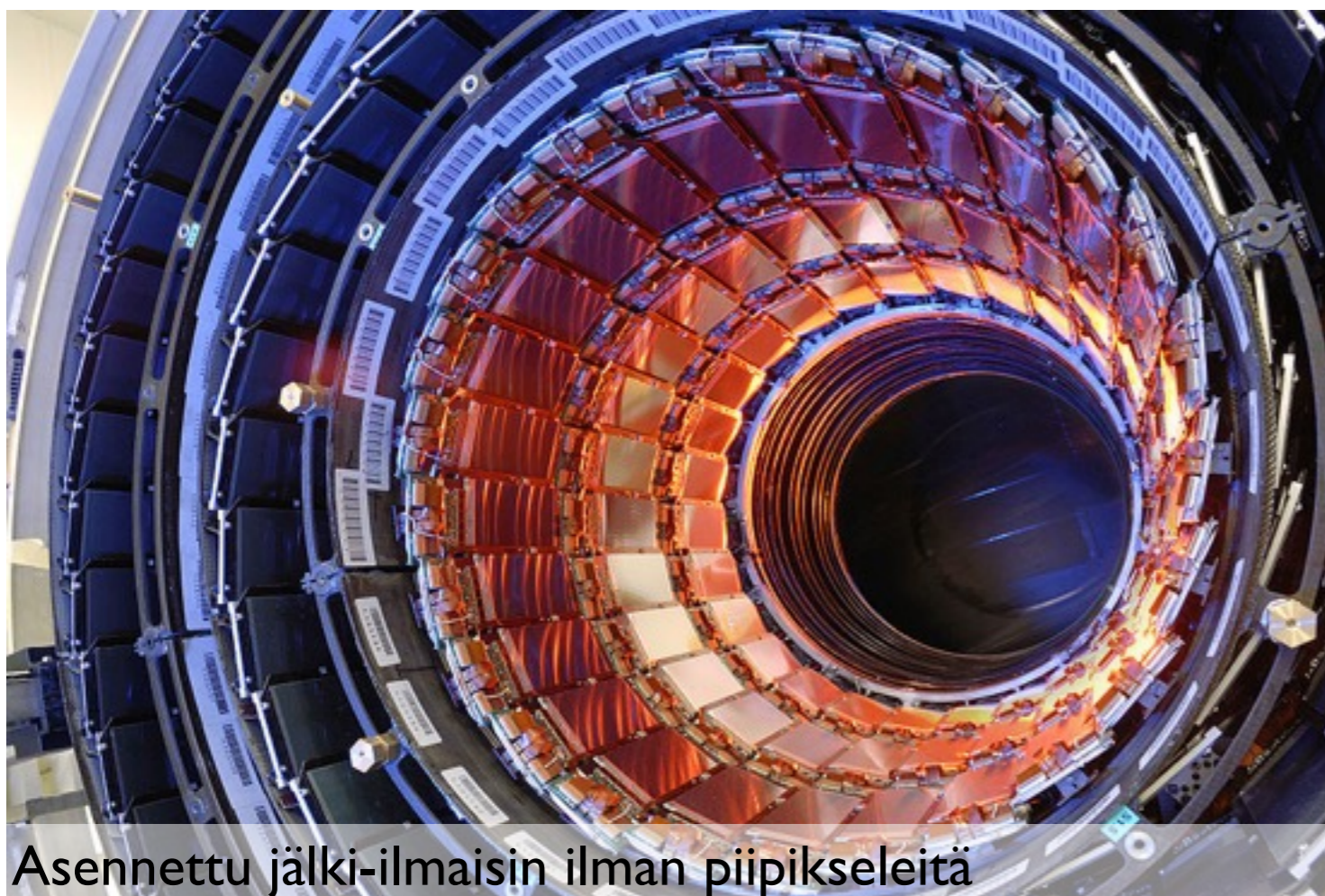
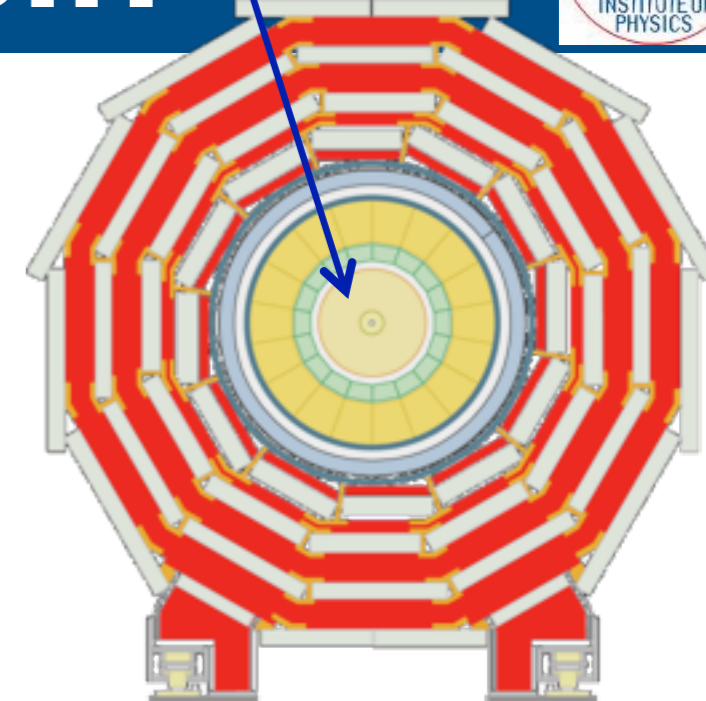
Puolikas piipkselimoduuli



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

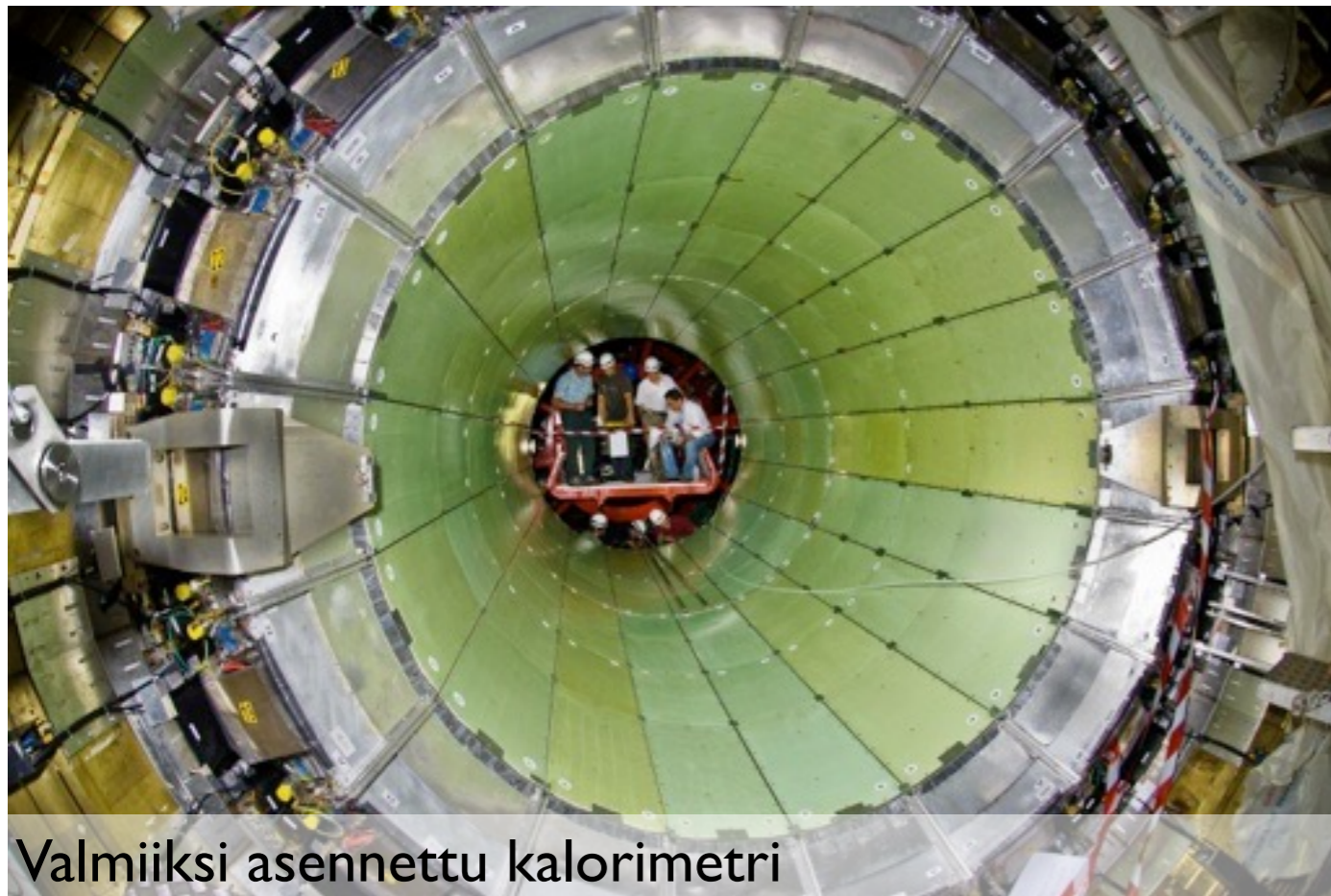
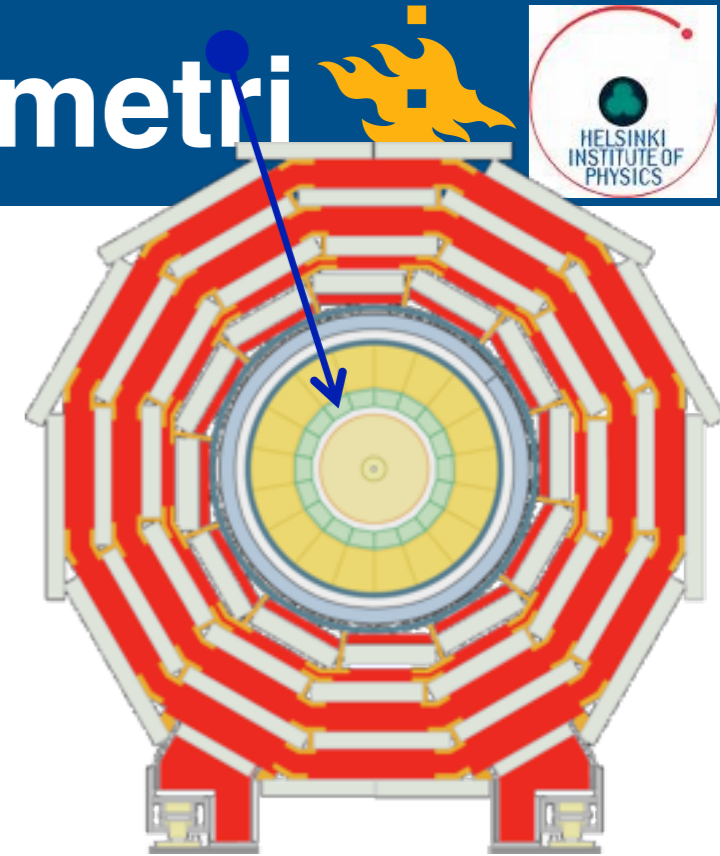


Rekonstruoituja jälkiä kosmisista myoneista

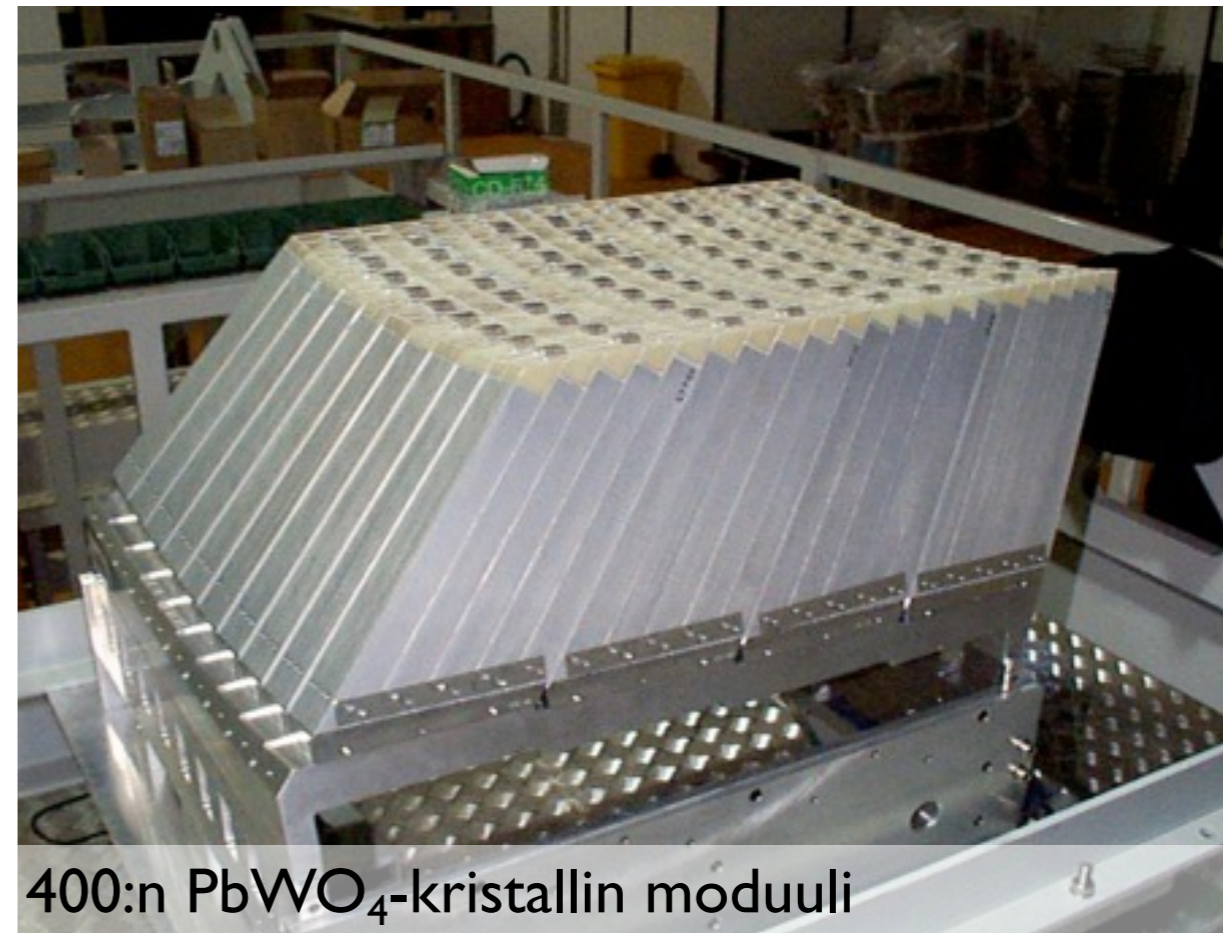




- N. 80.000  $\text{PbWO}_4$  (lyijyvolframaatti)kristallia
- Pysäyttää elektronit/positronit sekä fotonit
- Signaali perustuu tuikevaloon: hiukkanen virittää atomeita, viritystilan purkautuminen tuottaa fotonin, valon kokonaismäärä verrannollinen hiukkasen energiaan
- Valo johdetaan valonmonistimiin,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

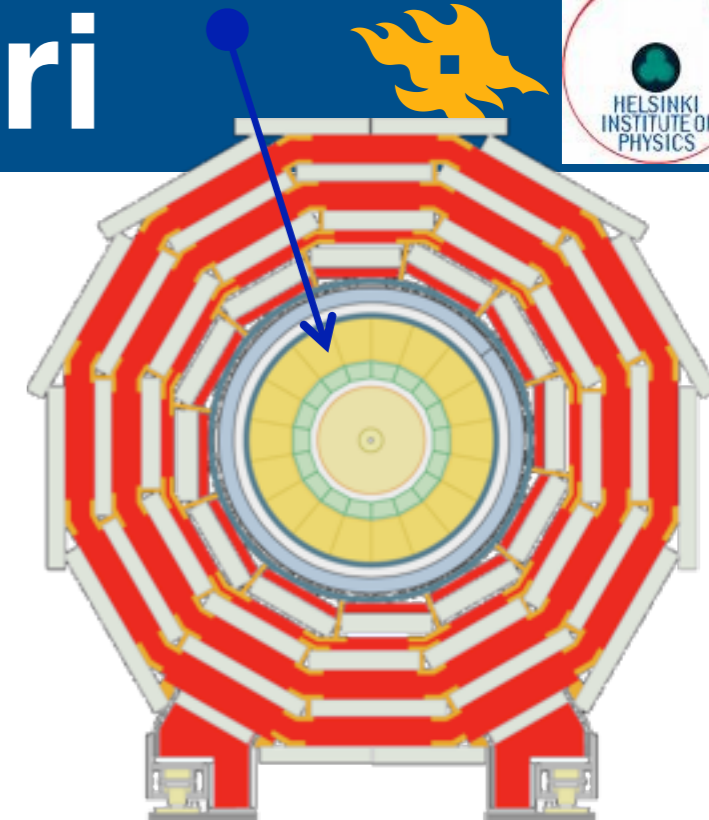


Valmiiksi asennettu kalorimetri



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

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

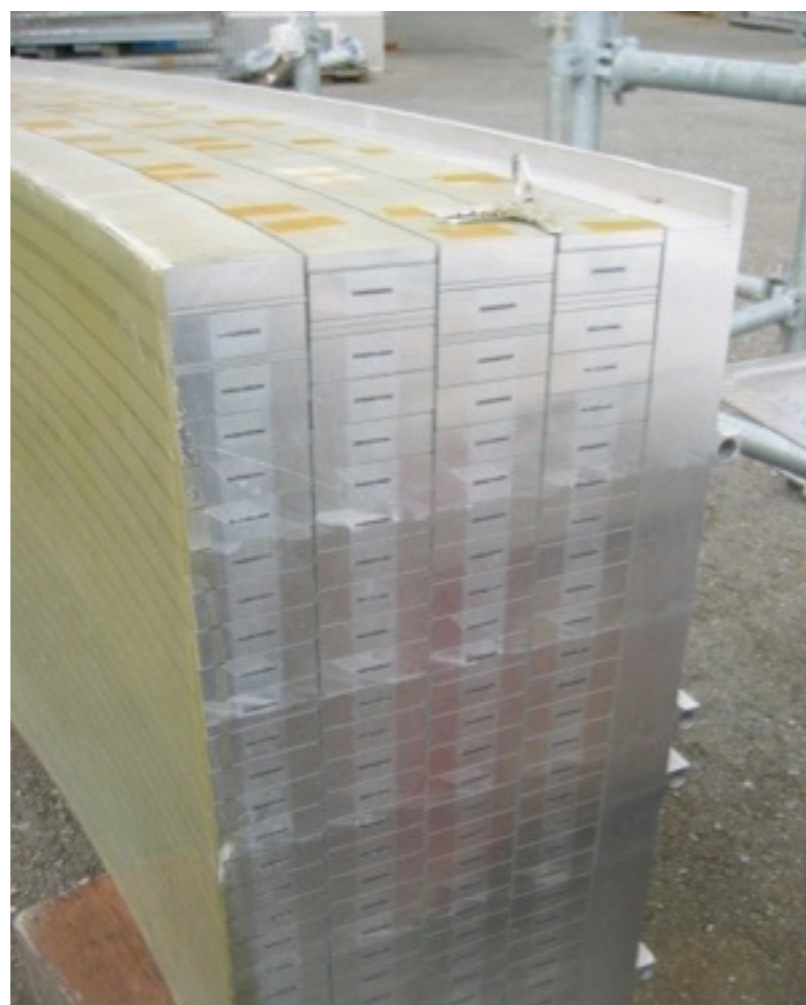
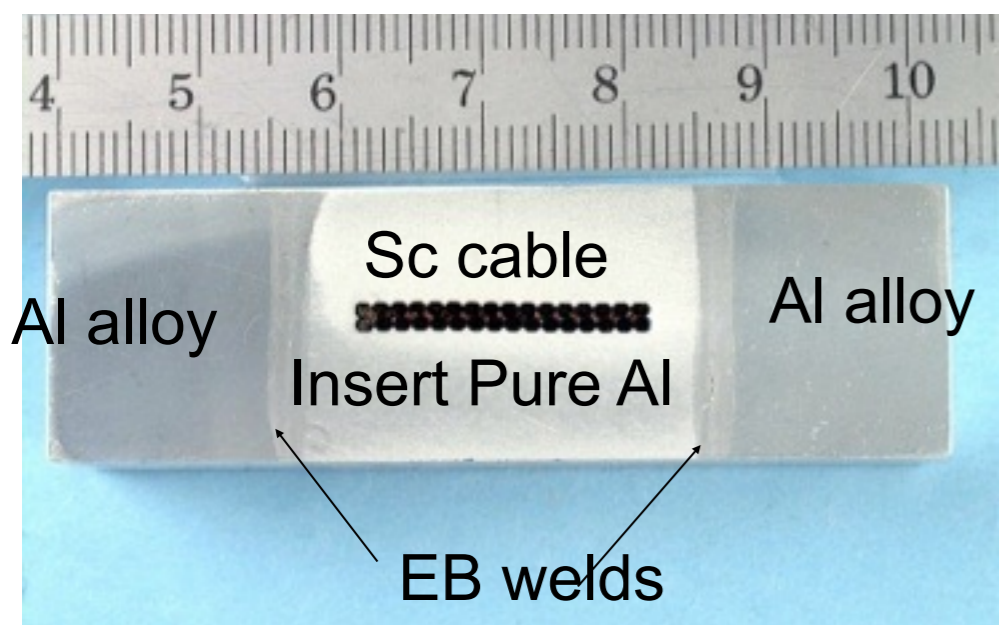
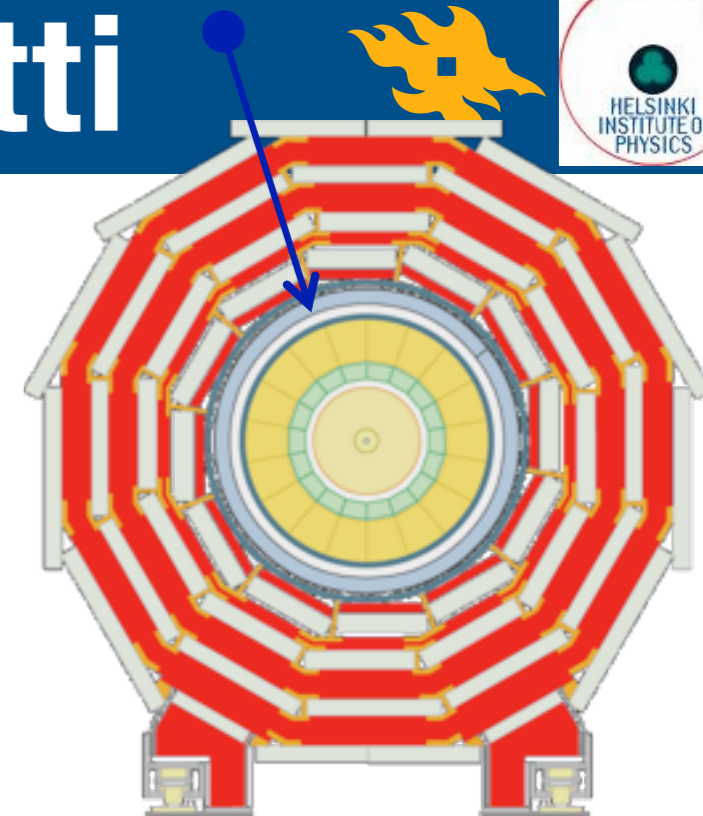


Valmiiksi koottu kalorimetri

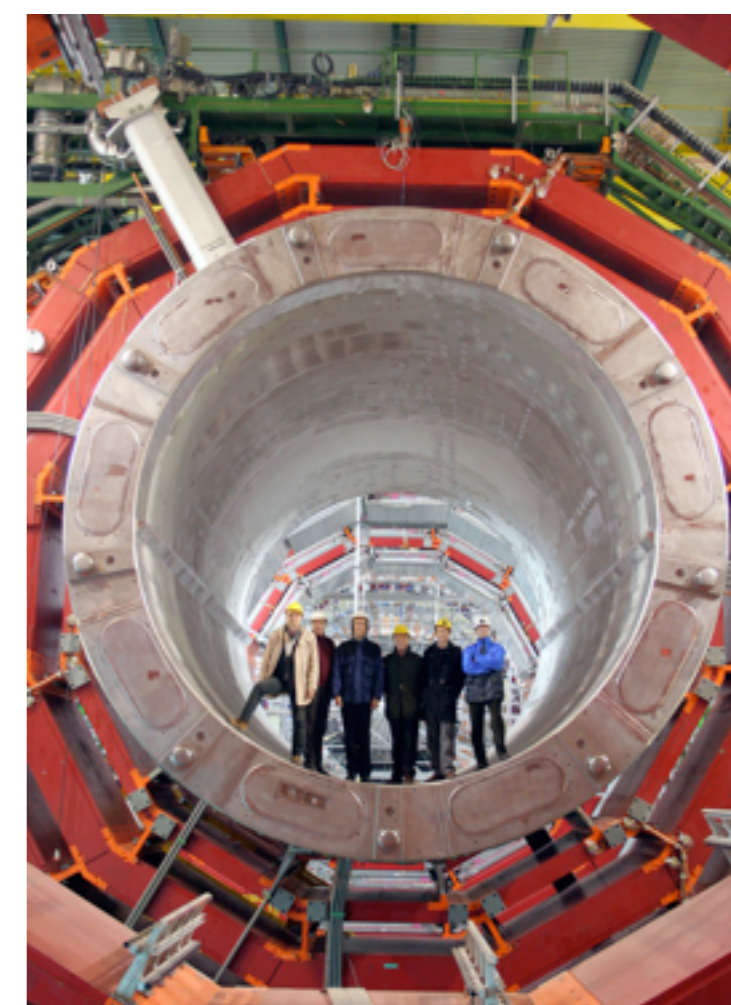


Kierrätettyä messinkiä Venäjän laivastolta

- 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

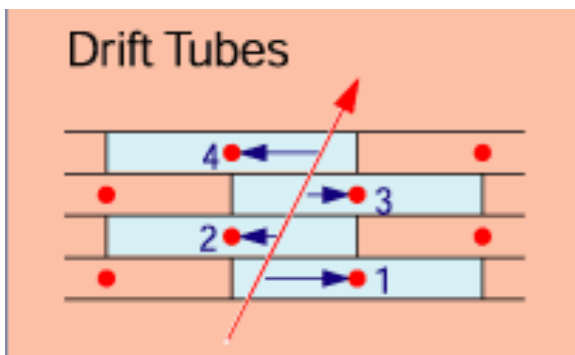
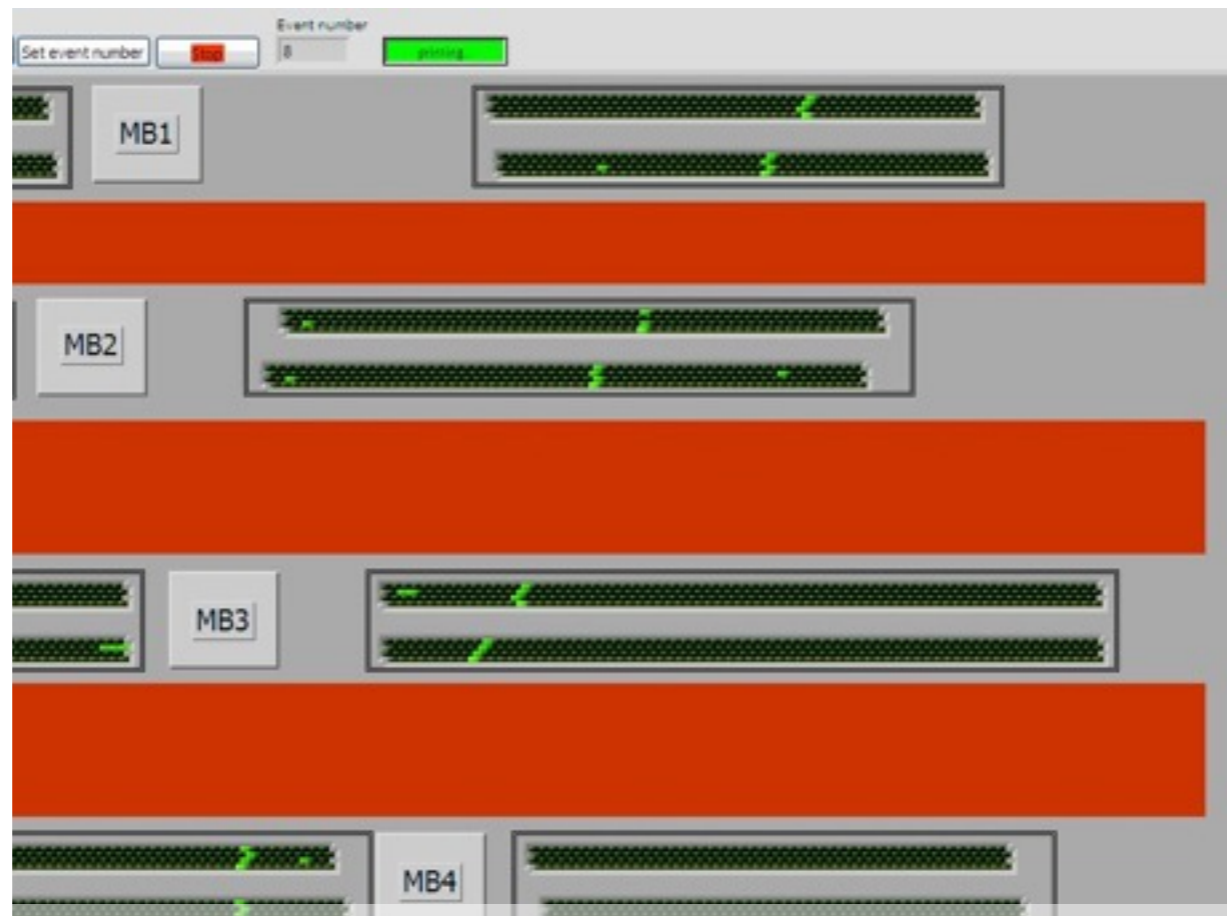
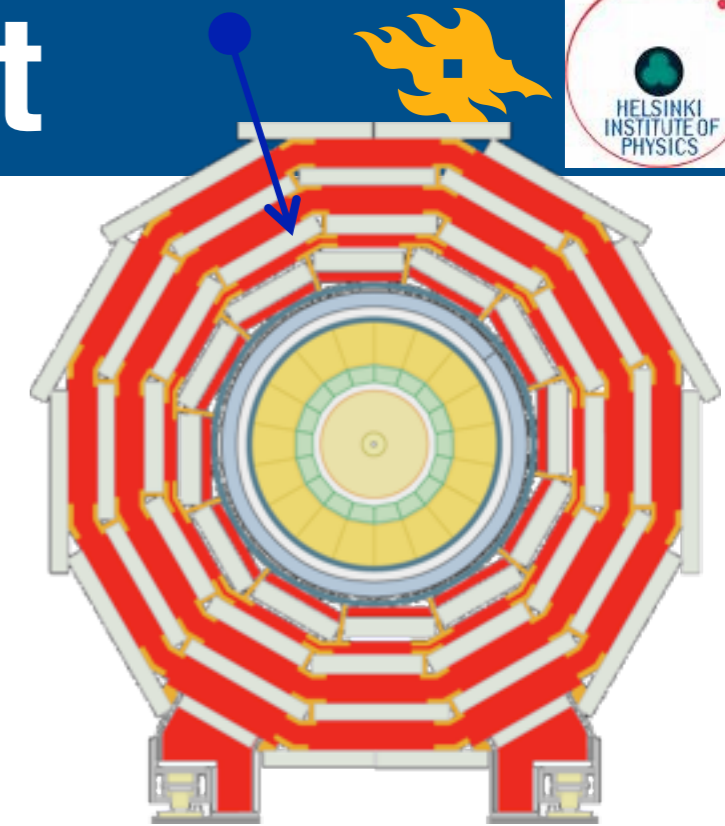


Mallikappale käämityksestä



Asennettu magneetti

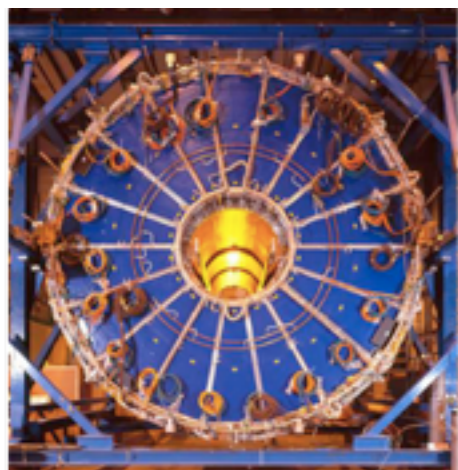
- Kolme eri ilmaisinteknologiaa
  - perustuu myonin aiheuttamaan **ionisaatioon**
  - n. miljoona mittauskanavaa
  - n. 25000 m<sup>2</sup> mittauspinta-alaa
- Mahdollistaa myoneiden tunnistamisen sekä niitä sisältävien törmäysten nopean valinnan



Mittauspisteitä kosmisesta myonista



Asennettuja ilmaisimia



## A Large Ion Collider Experiment

Tutkii kvarkki-gluoniplasmaa lyijy-lyijy-ydintörmäyksillä

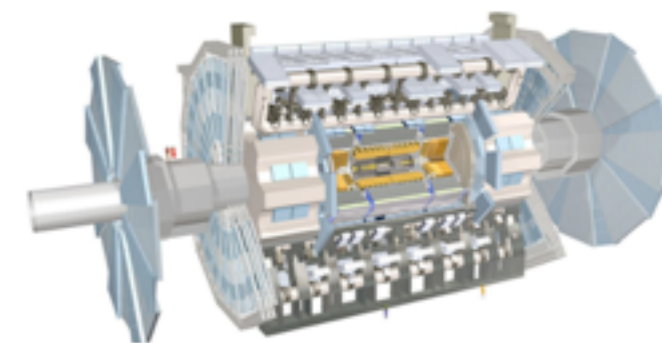
LIISA IHMEMAASSA



## A Toroidal Lhc Apparatus

Yleiskäyttöinen ilmaisim: Higgsin bosoni, supersymmetria jne.

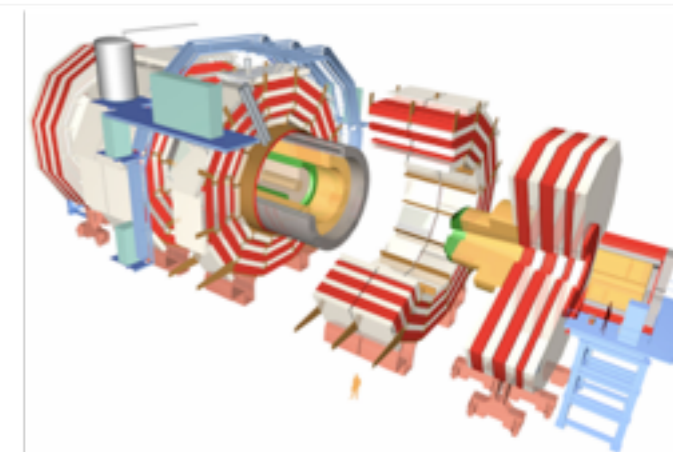
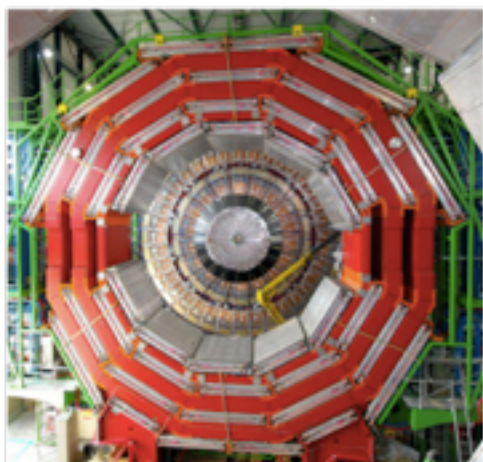
KOOKKAIN



## Compact Muon Solenoid

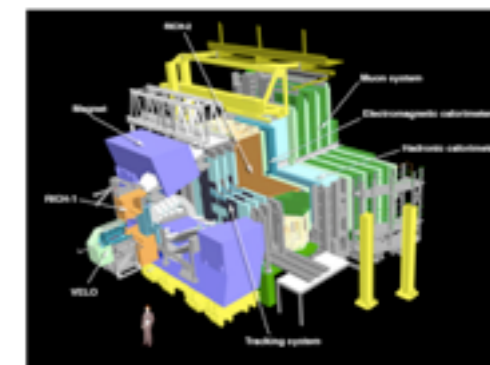
Yleiskäyttöinen ilmaisim. Loistava fotonikalorimetri, suuri magneetti, myonikammiot

RASKAIN



## LHC Beauty Experiment

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





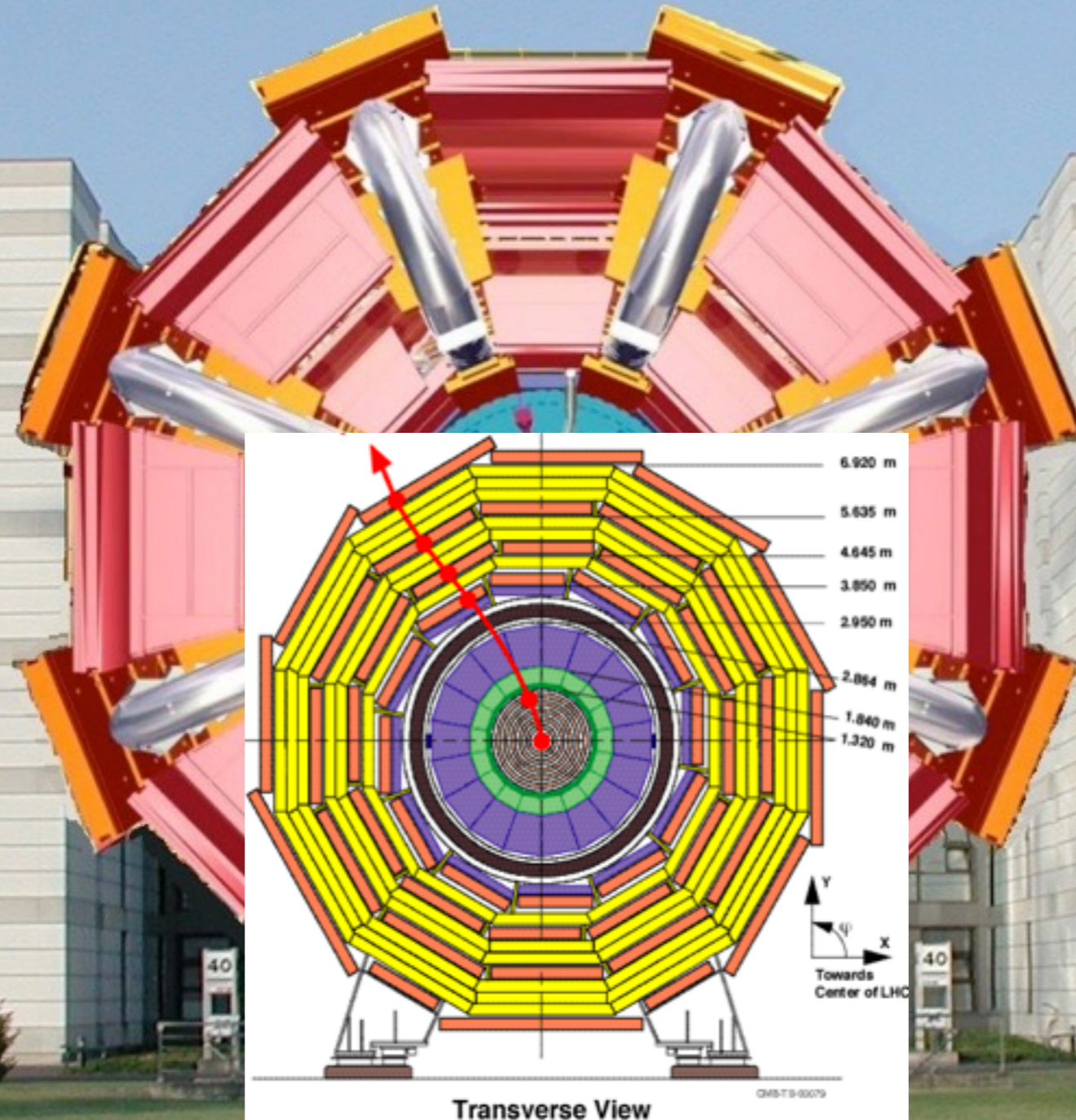
# Pienet kohteet - isot laitteet



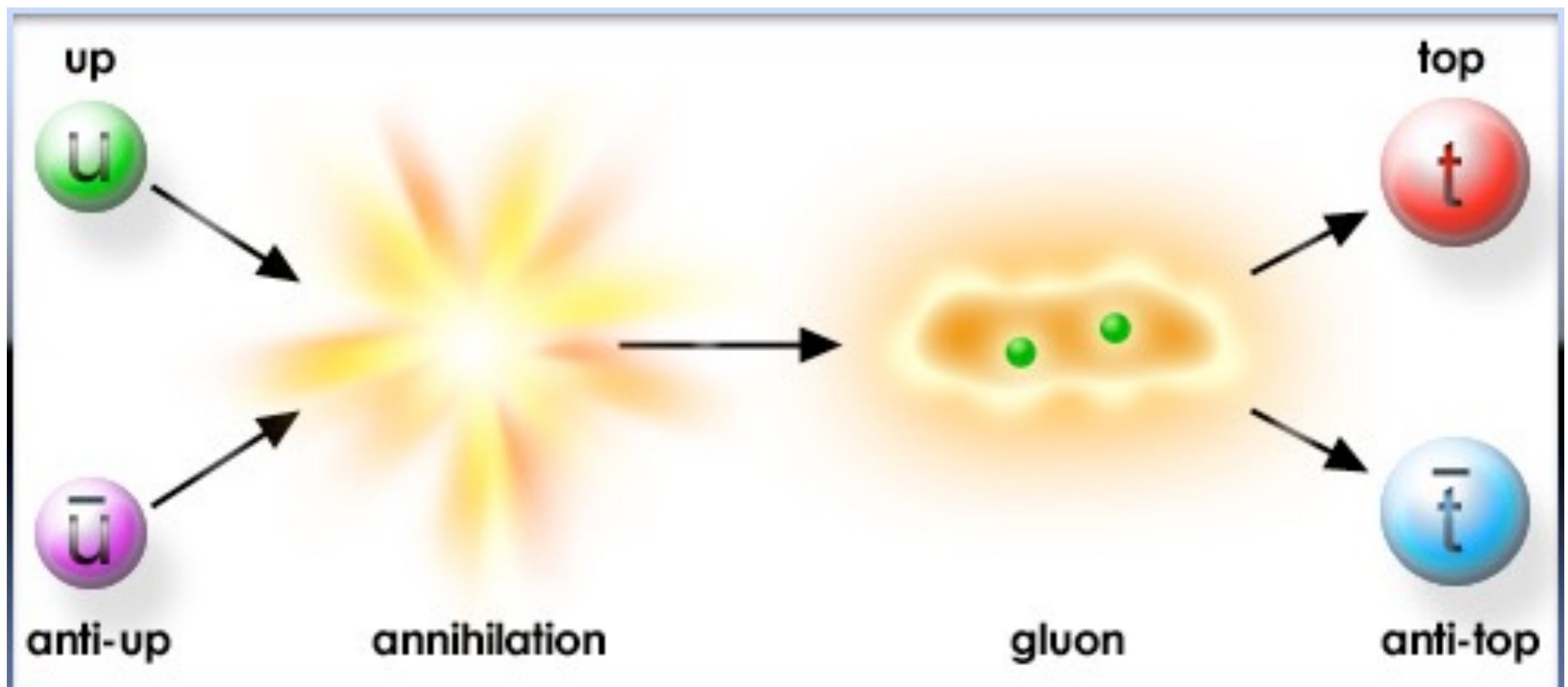
CERN, Building 40

CMS

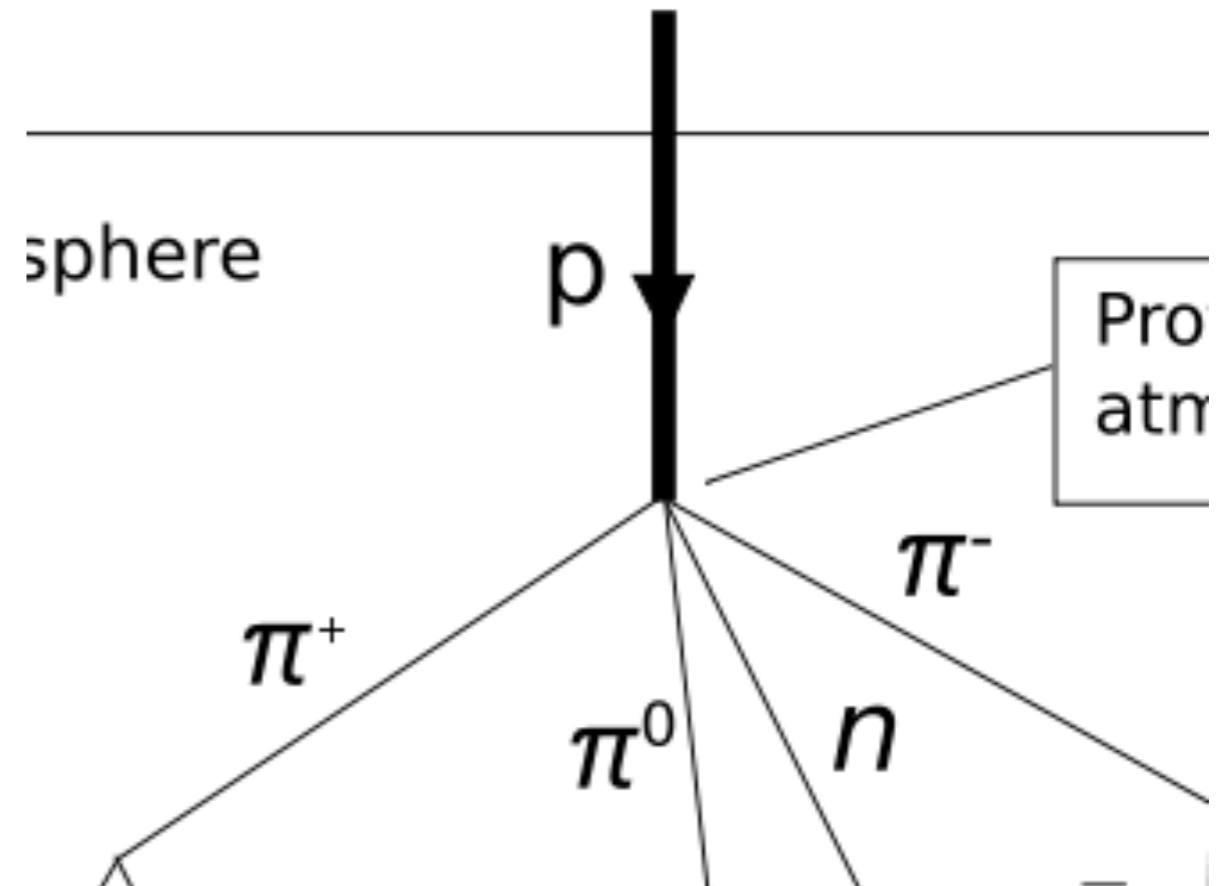
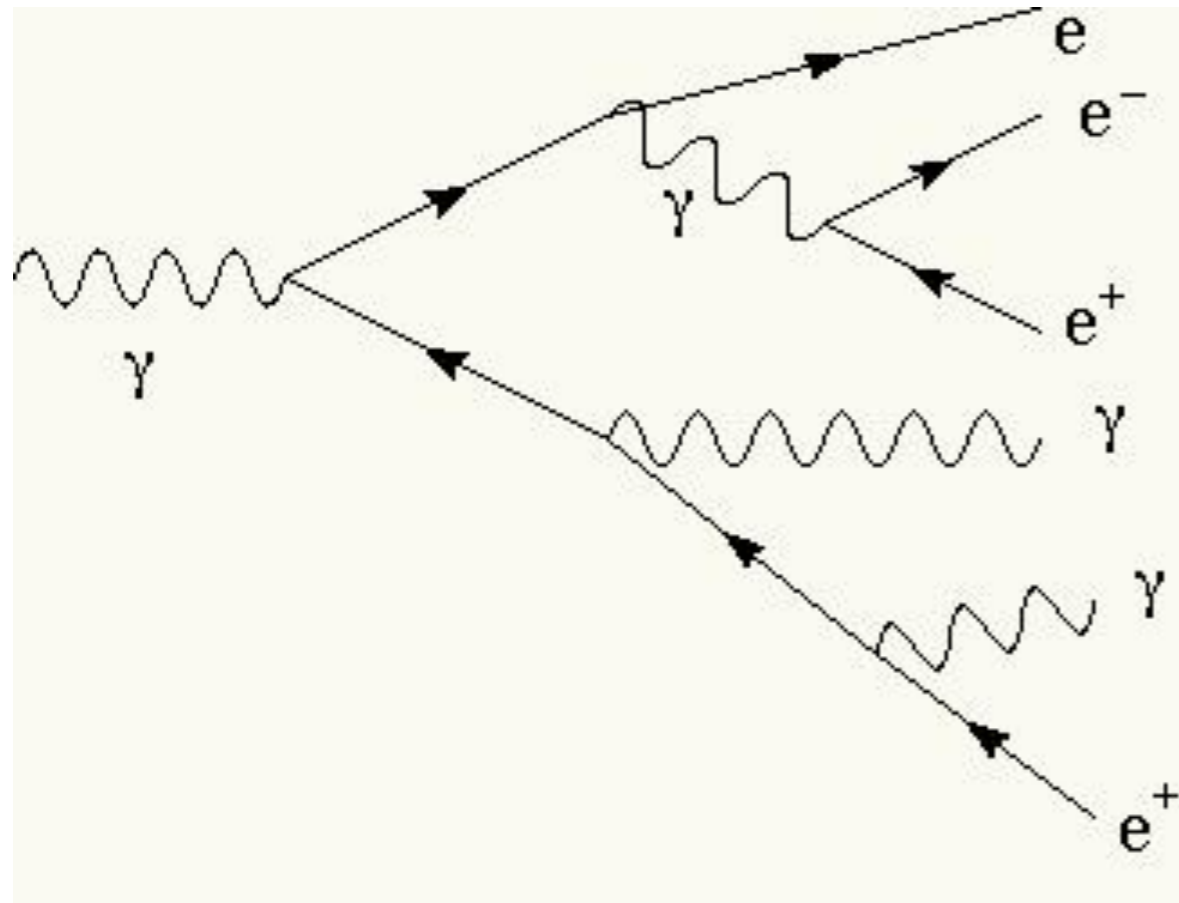
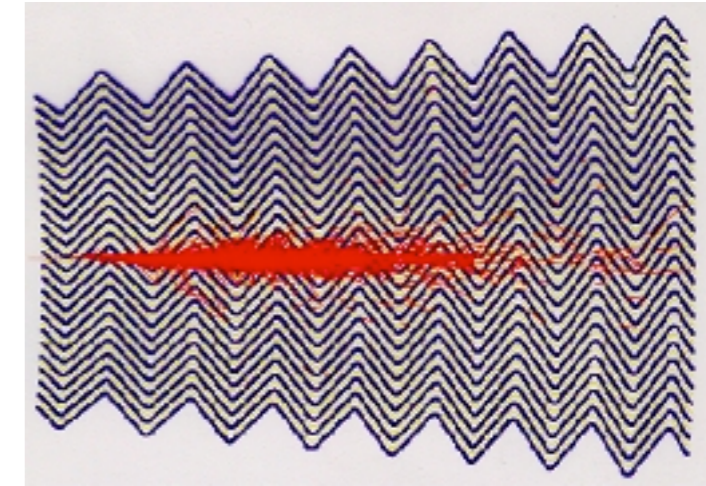
ATLAS



- 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** ( $\Delta E \times \Delta t < \hbar$ )

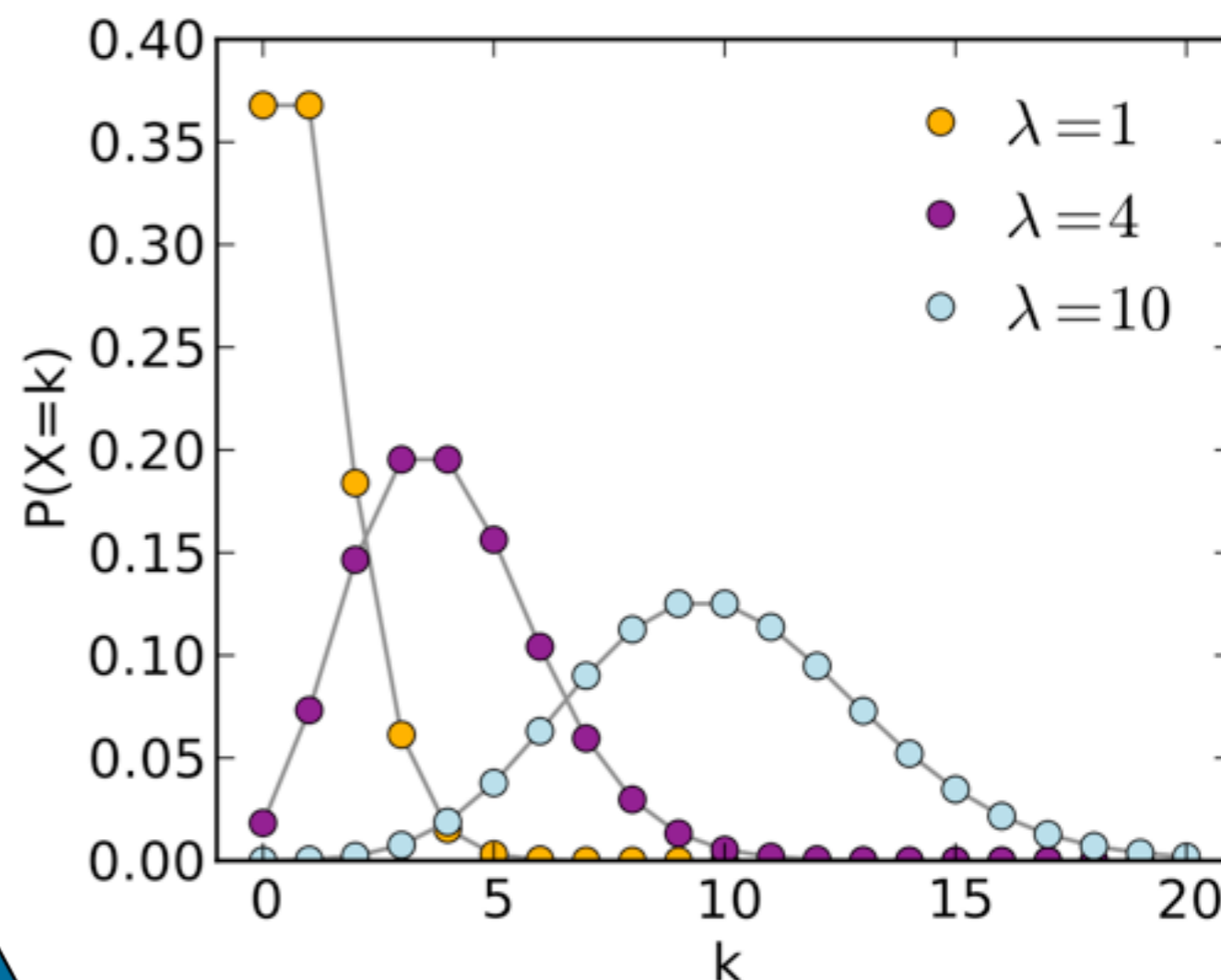
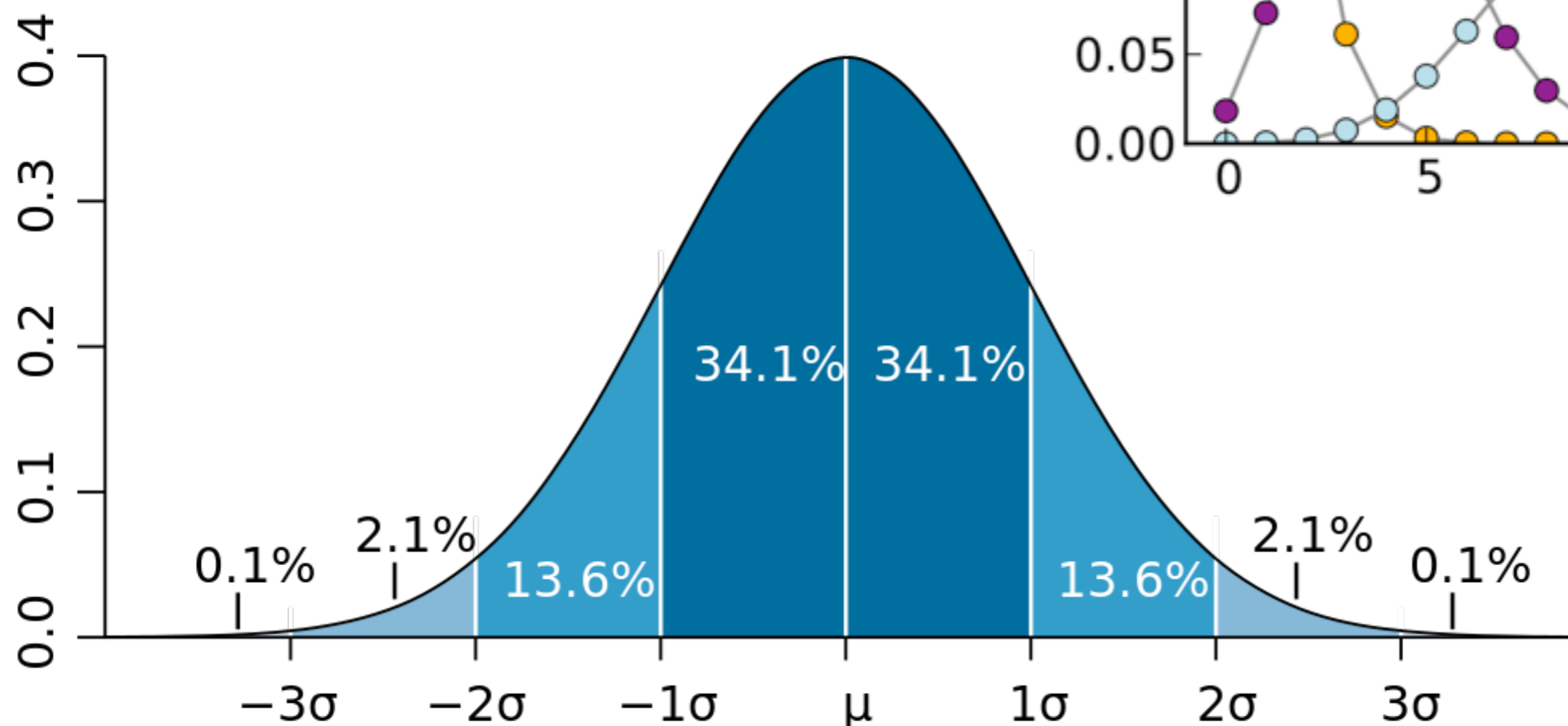


- Tapahtumien (eventtien) lukumäärät ovat yleensä **Poisson-jakautuneita**

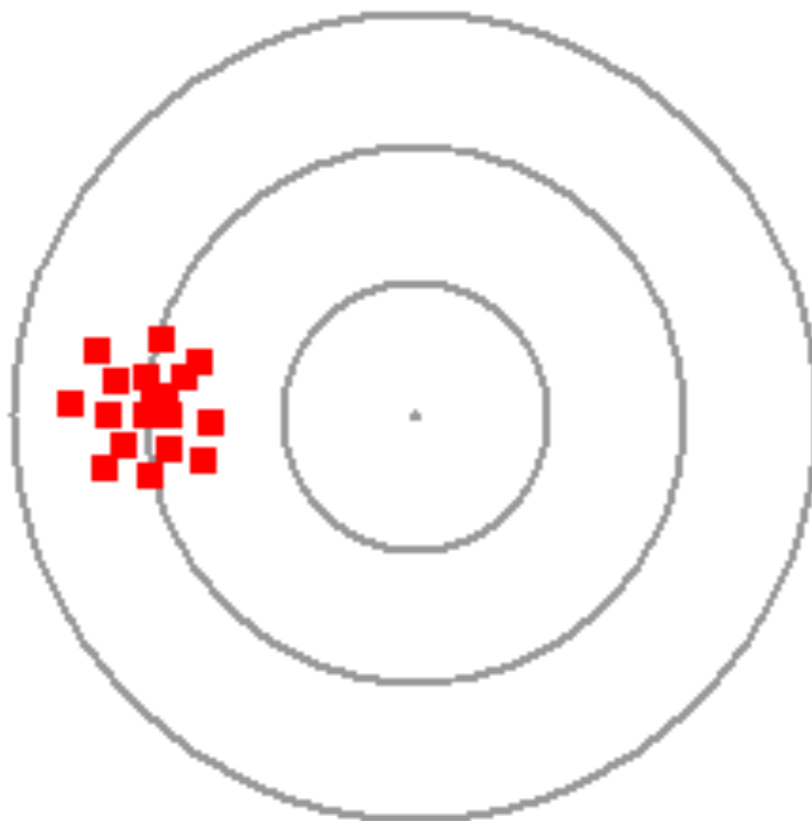
- keskihajonta  $N$  tapahtumalle on tällöin  $\sqrt{N}$
- lähestyy suurilla  $N$  normaalijakaumaa, jossa  $\mu=N$  ja  $\sigma=\sqrt{N}$

- Systemaattiset virheet ovat yleensä **normaalijakautuneita** (Gaussin jakauma)

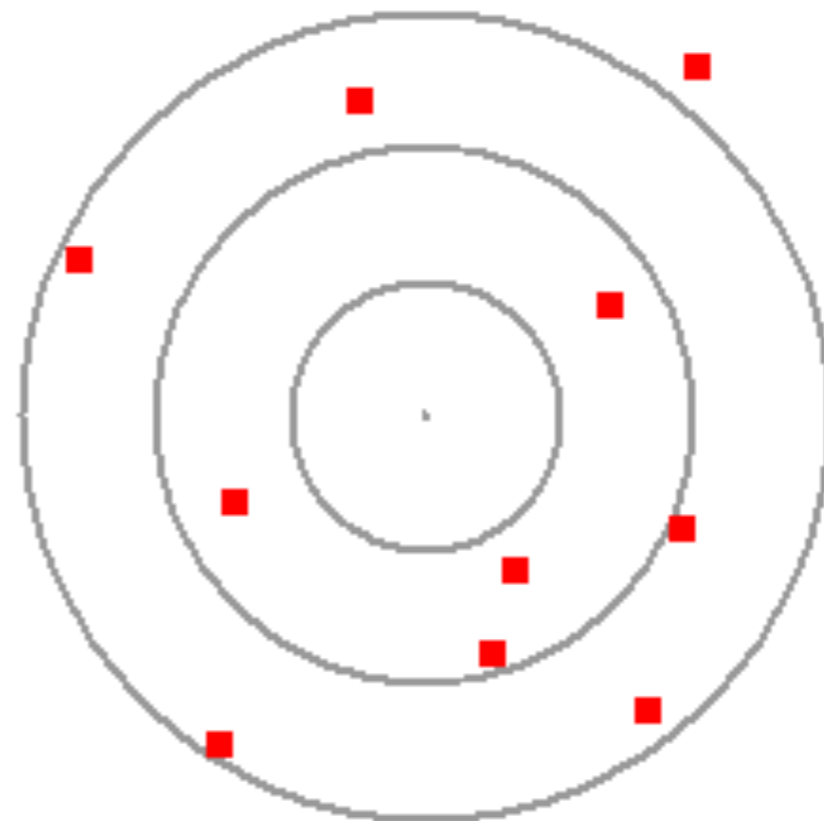
- Ilmoitetaan tyypillisesti  $1\sigma$  (68% luottamusväli) tai  $2\sigma$  (95% luottamusväli) tasolla



- 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









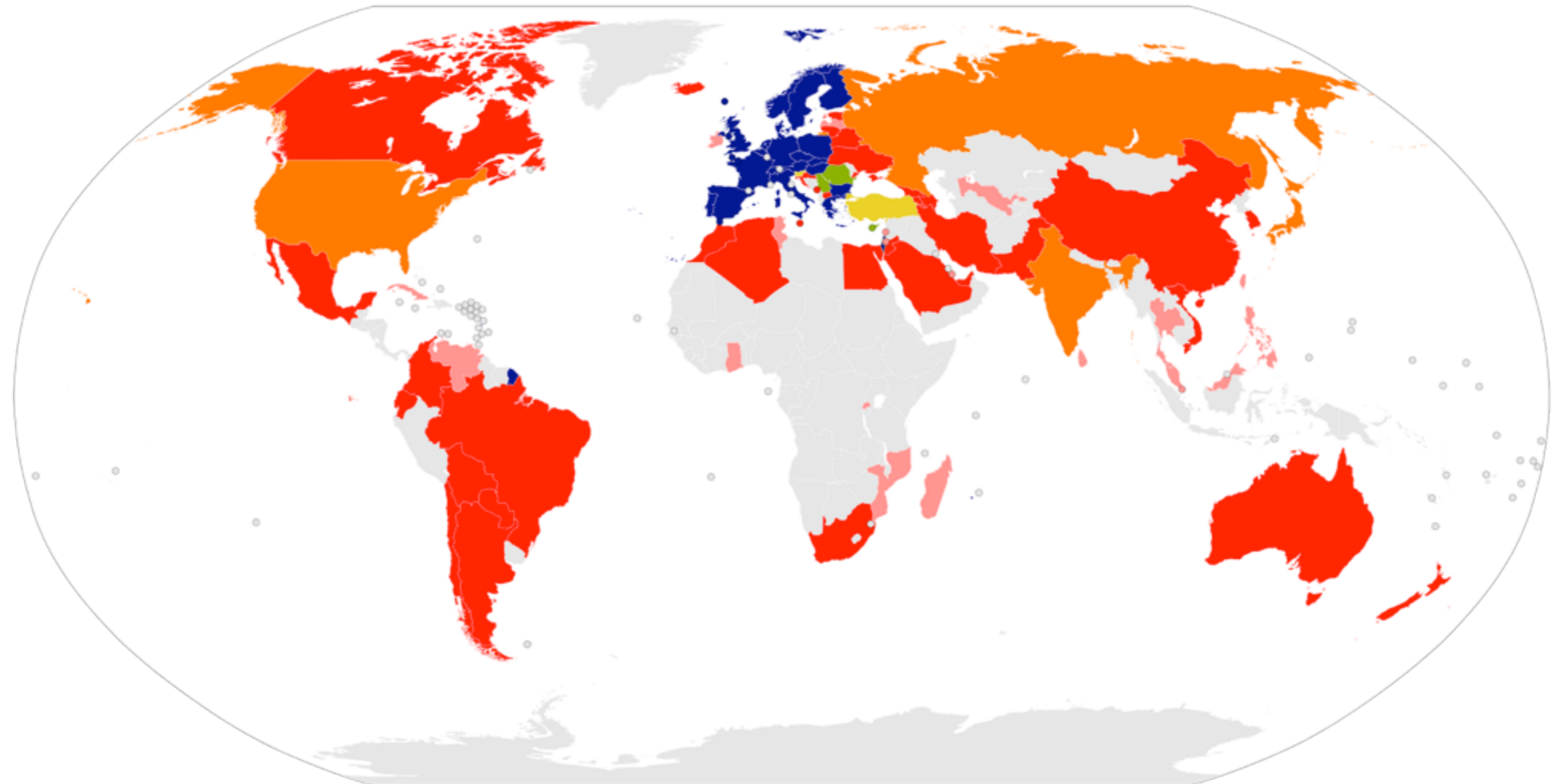
**Systematic Error**



**Random Error**

- CERNin tutkimuksessa mukana olevat maat kattavat lähes koko kehittyneen maailman

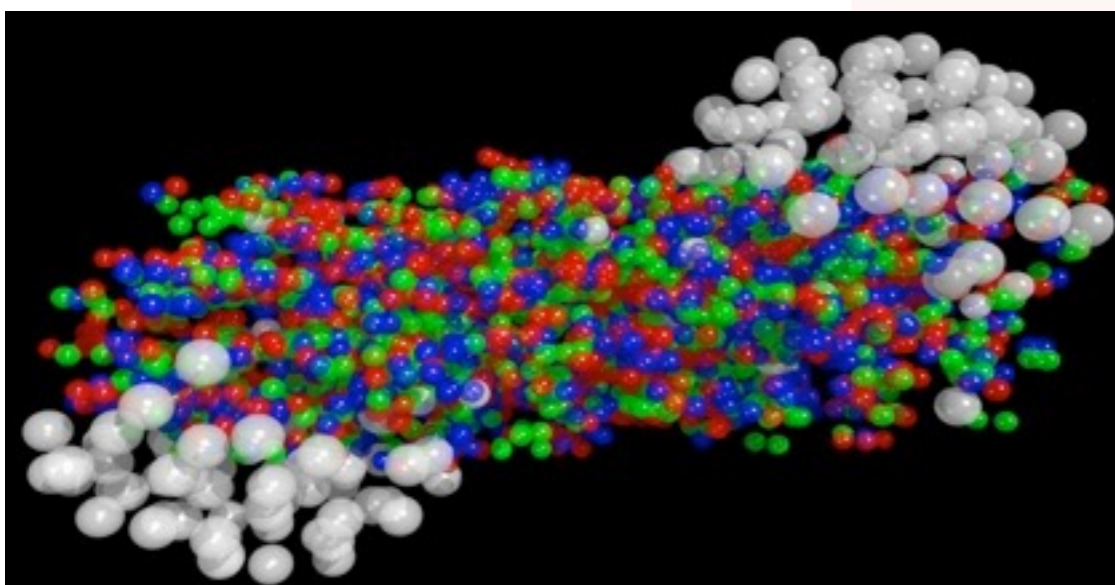
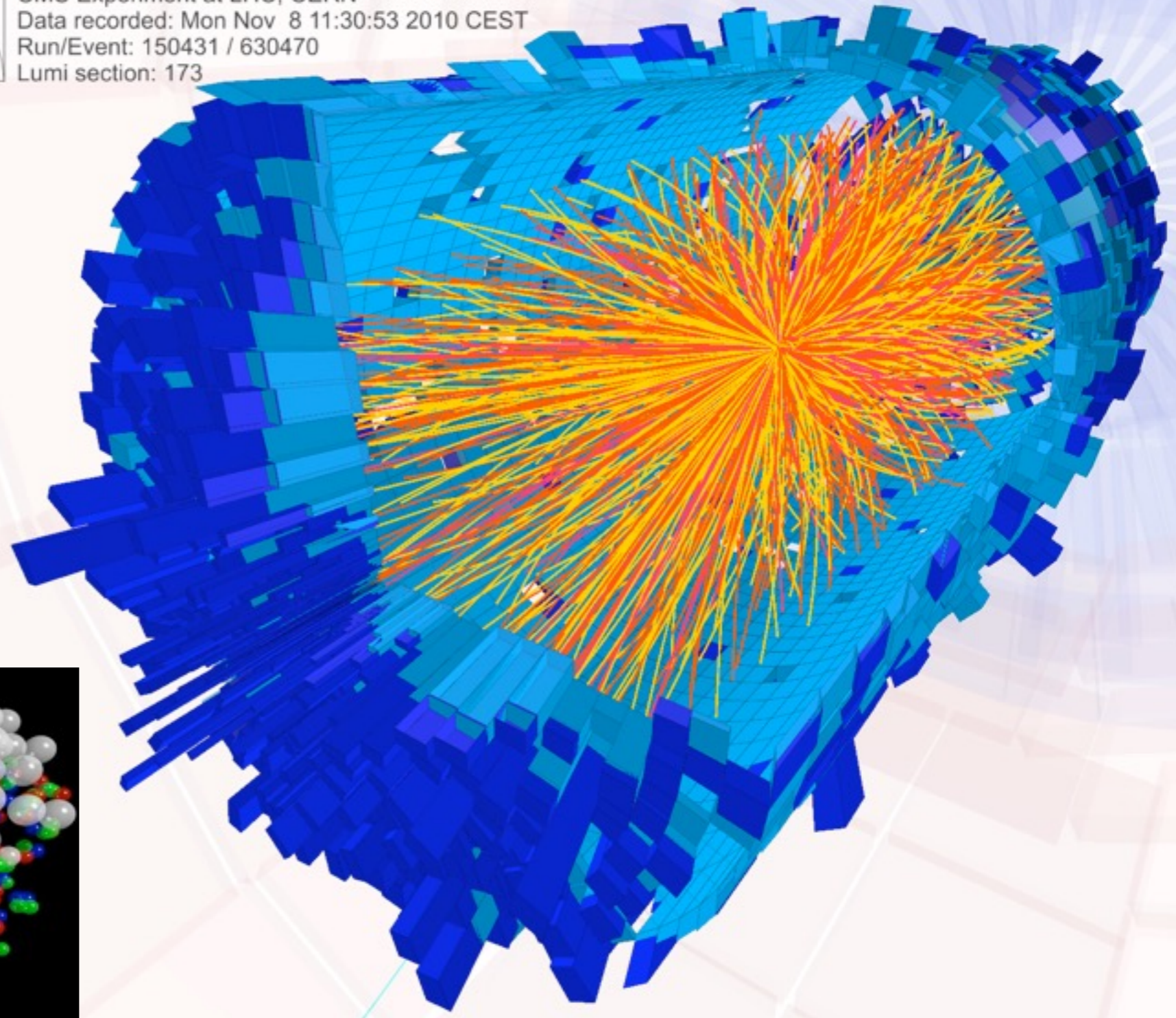
	CERN member states: 20 c.
	Accession in progress: 3 c.
	Declared intent to join: 3 c.
	Observers: 4 c. + EU, Turkey
	Cooperation agreement: 35 c. + Slovenia, Cyprus
	Scientific contacts: 19 c.



- 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

- LHC:ltä on lupa odottaa lisää mielenkiintoisia tuloksia
- Mm. pimeän aineen etsinnät jatkuvat
- Vakuumin metastabiilisuus yllätävä tulos

