

Hiukkasfysiikan kokeet



Fysiikan tutkimuslaitos (HIP)

Helsingin yliopisto

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

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

- 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?
- Onko löytämämme **Higgsin bosoni** standardimallin mukainen ja ainoa?
- 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

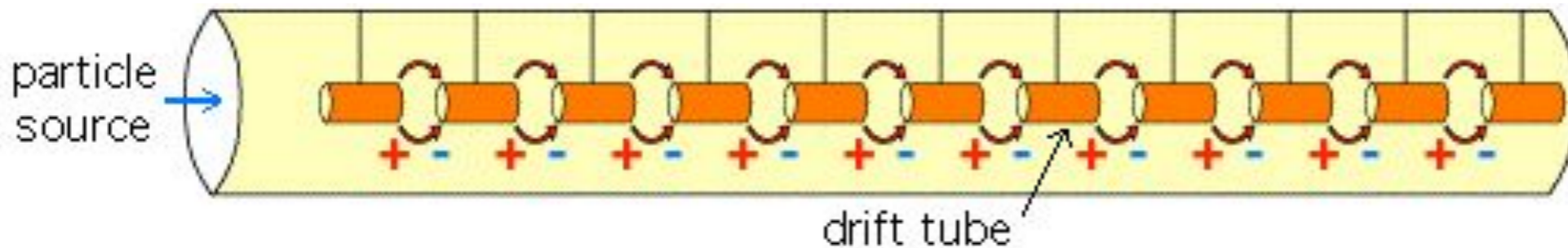
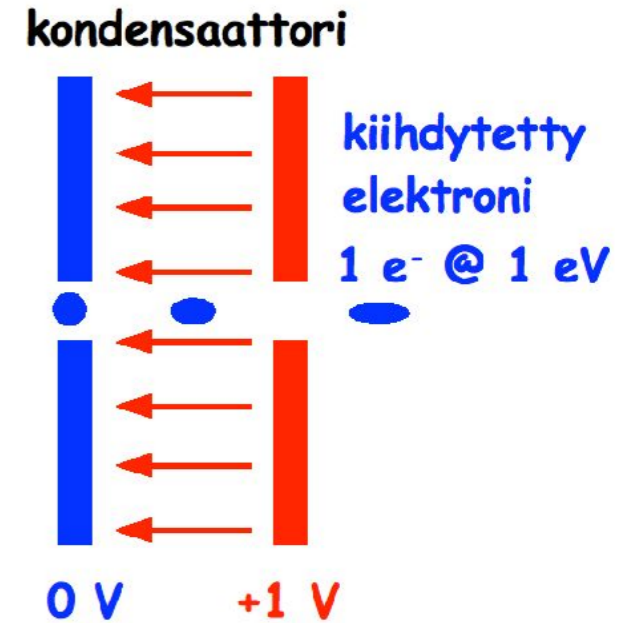
Osa 1: Hiukkaskiihdyttimet



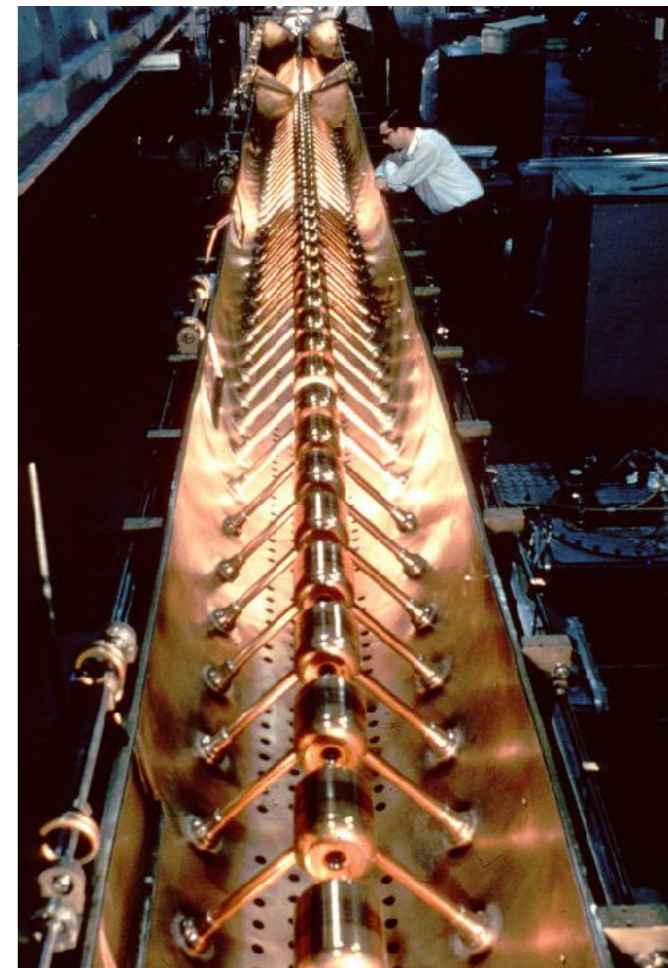
Hiukkasten...

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

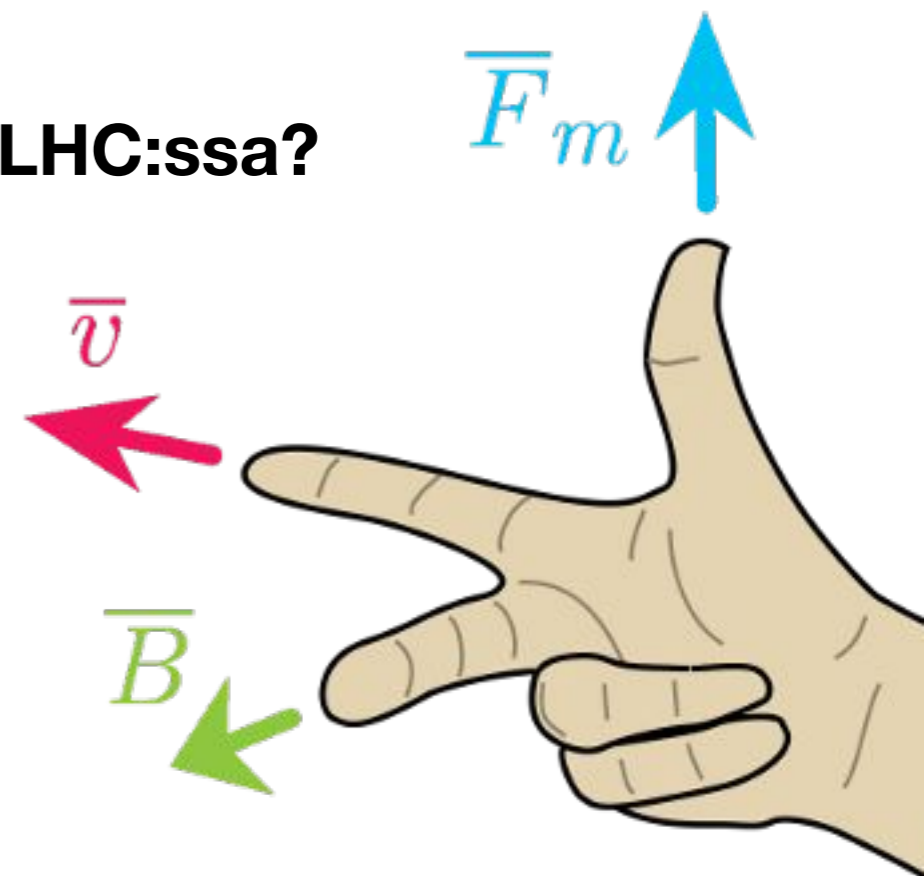
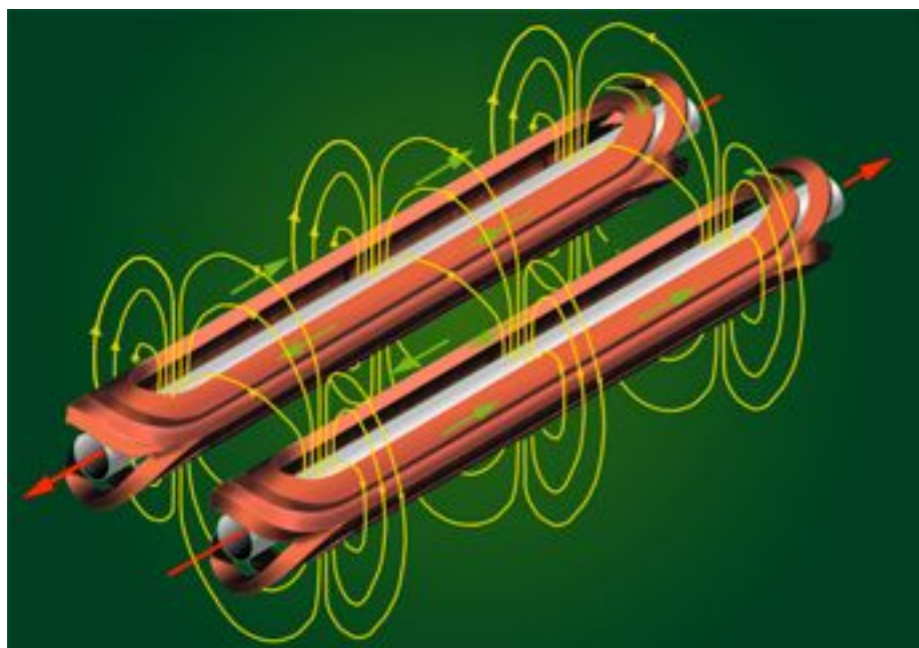
- Hiukkaskiihdyttimet perustuvat sähkövarauksellisen hiukkasen kiihdyttämiseen sähkökentällä
- Hiukkasfysiikassa energian yksikkö on 1 **eV** eli **elektronivoltti** (sovitaan $c=1$, jolloin eV käy myös massoille ja liikemäärille)
- Matalan energian kiihdyttimissä **ajauttamisputkia** (drift tube), joiden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



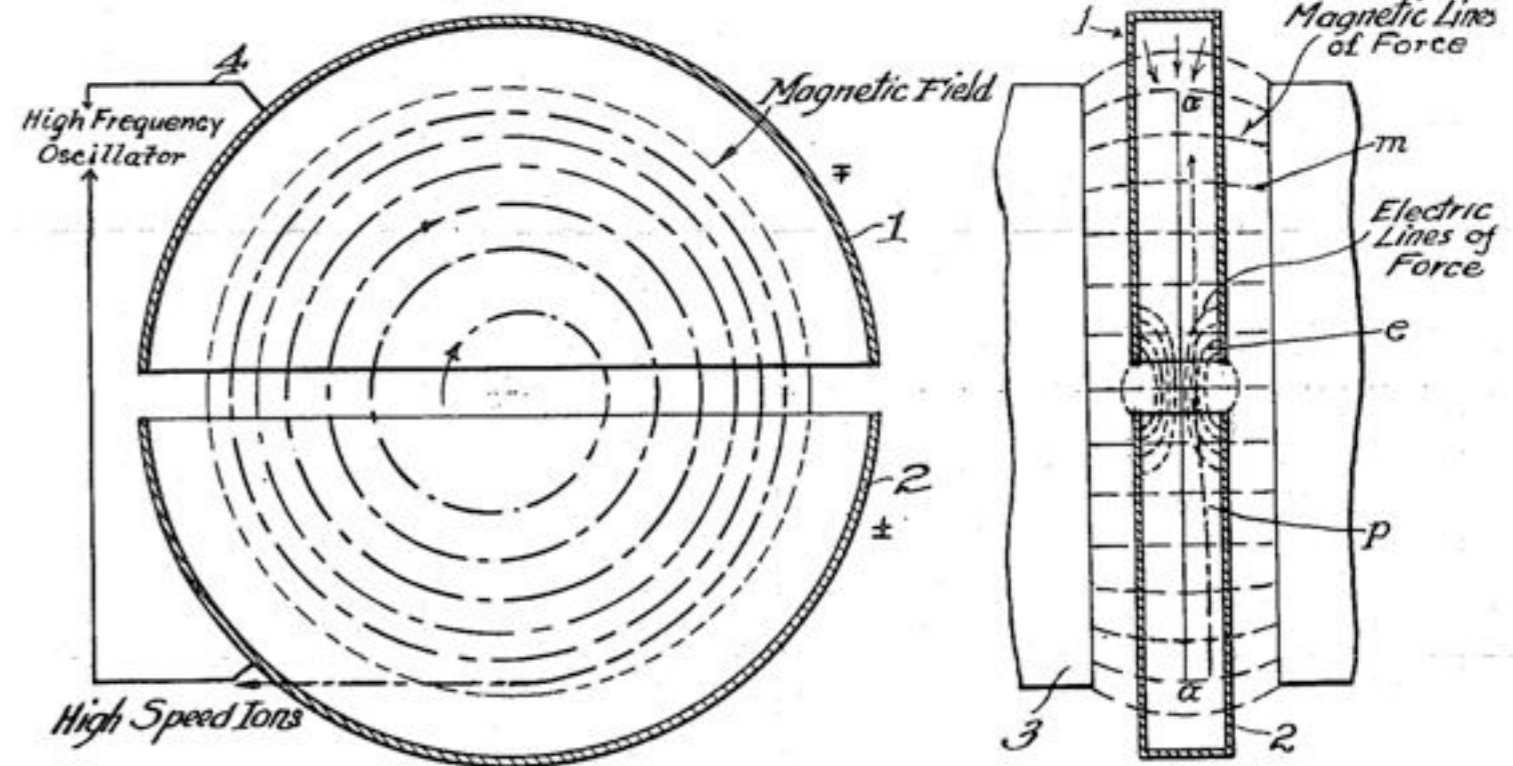
- Lähellä valonnopeutta tarvittava taajuus liian suuri liukuputkille
→ [radiotaajuusresonaattorit](#) (RF):
seisova sähkömagneettinen aalto (400 MHz taajuus)
työntää hiukkasia eteenpäin



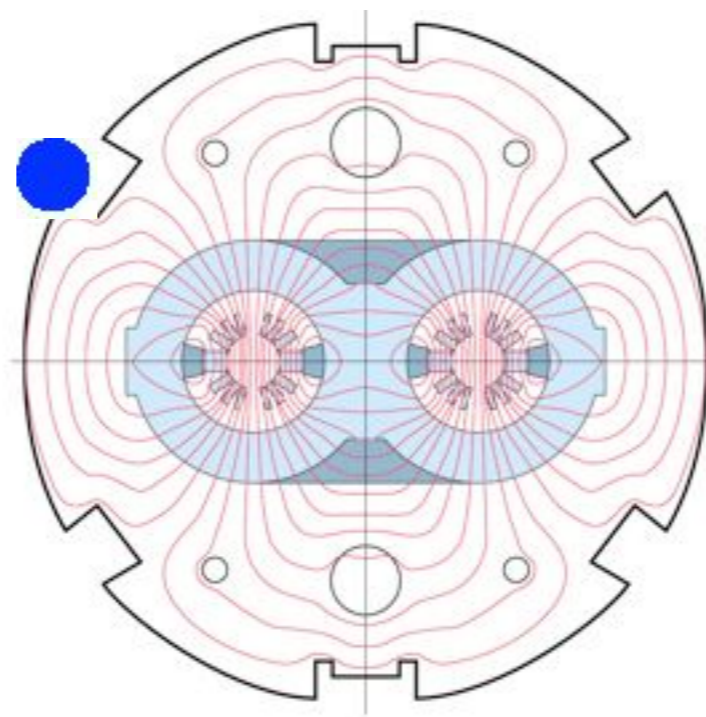
- Varatun hiukkasen rata kaareutuu magneettikentässä:
 - $F = q v \times B$
 - Suunta oikean käden säännöllä (kuva!)
- Yhdistämällä Newtonin toinen laki, $F = ma$, keskeiskiihtyvyys $a = v^2 / R$ ja $p = mv$:
 - $p = qRB$ eli suurempi liikemäärä vastaa suurempaa kaarevuussädettä
→ jos magneetin voimakkuus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



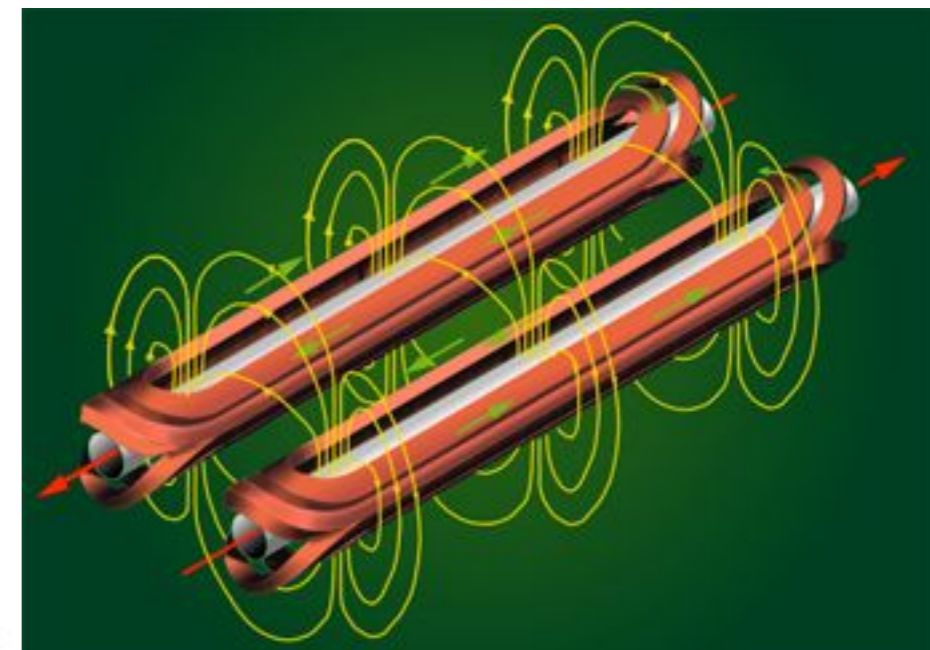
- Ensimmäiset “rengaskiihdyttimet” käyttivät **kestomagneetteja** (**B vakio**) → hiukkasten kiertosäde **R kasvaa** energian kasvaessa (*syklotroni*)
- Nykyisissä *synkrotroneissa* käytössä sähkömagneetteja, joiden virtaa voi muuttaa → **R vakio, B kasvaa**
- LHC:ssä **1232** kpl [suprajohtavia sähkömagneetteja](#) (15m, 35t, 1.9K)
- Hiukkanen ja sen antihhiukkanen 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



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



- Jokainen kiihdytin toimii tietyllä energia-alueella (LHC 0.45-6.8 TeV)
- Suureen liike-energiaan vaaditaan esikiihdyttimien ketju
- Hiukkaset kiertävät ympyrää, yhtä kiihdytinjaksoa voi käyttää monta kertaa

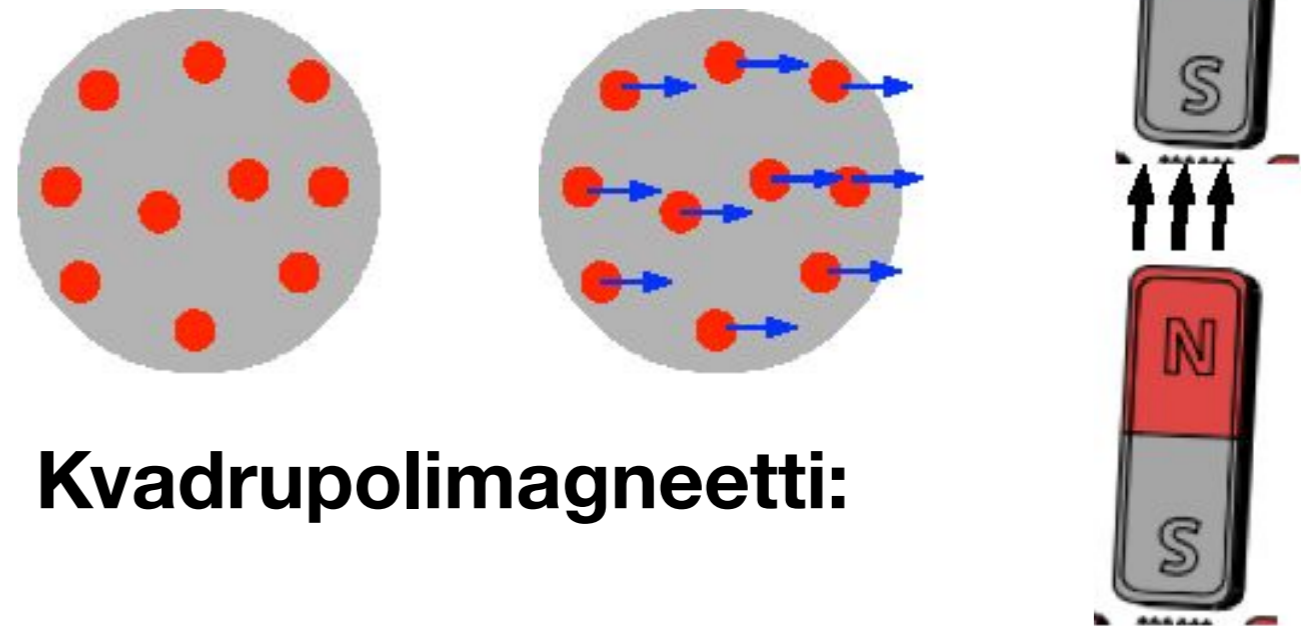


- **LINAC** (LINear Accelerator, 1978): 50 MeV, **0.31c**
- **PSB** (Proton Synchrotron Booster, 1972): 1.4 GeV, **0.916c**
- **PS** (Proton Synchrotron, 1959): 26 GeV, **0.9993c**
- **SPS** (Super Proton Synchrotron, 1976): 450 GeV, **0.999998c**
- **LHC** (Large Hadron Collider, 2008): 6.5 TeV (6.8 TeV), **0.99999999c**

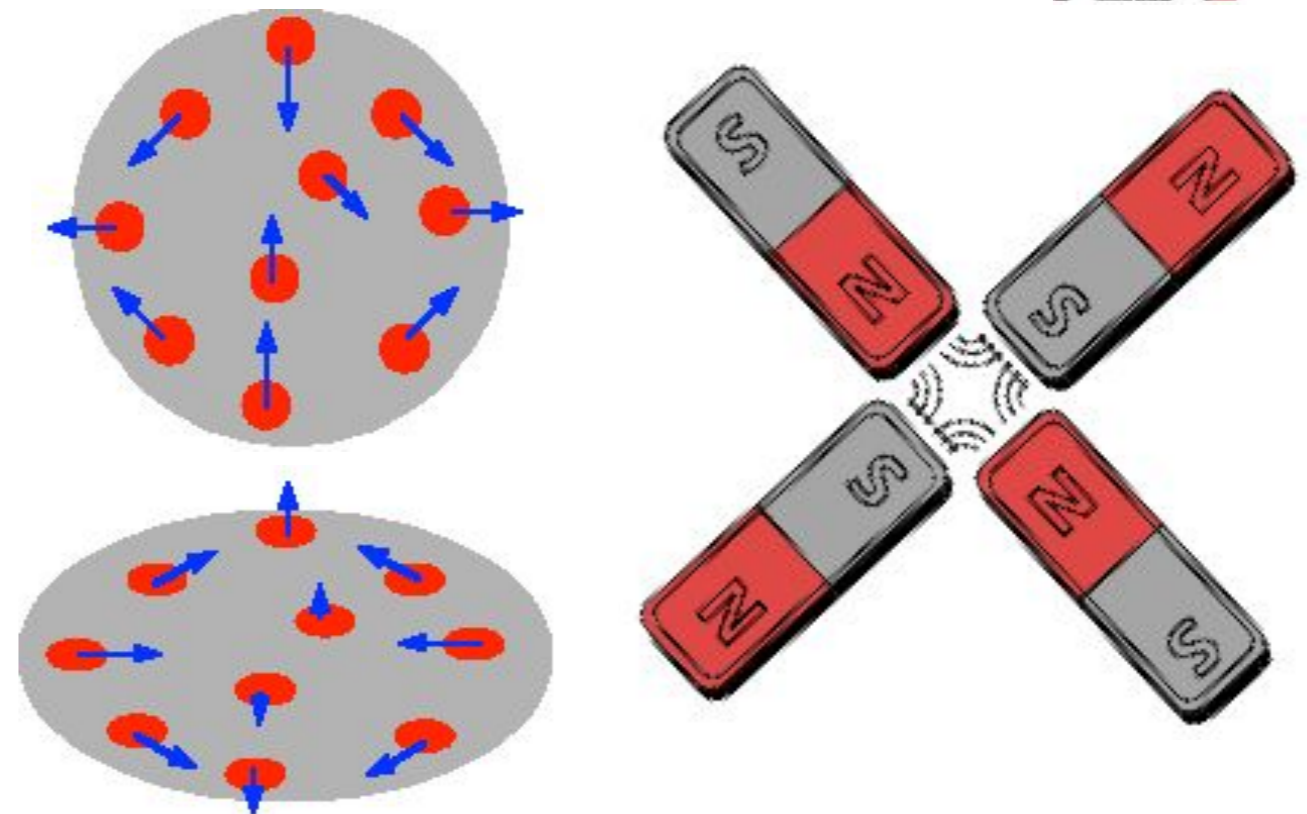


- LHC:n protoni”rihmassa” on pienessä tilassa suuri määrä ($\sim 10^{11}$) saman varauksen omaavia hiukkasia, jotka pyrkivät erilleen
- Suihkun fokusointi tapahtuu 858 **kvadrupolimagneetilla**, jotka taivuttavat harhautuneita hiukkasia kohti tyhjiöputken keskipistettä
- Tyypillisessä kiihdyttimessä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

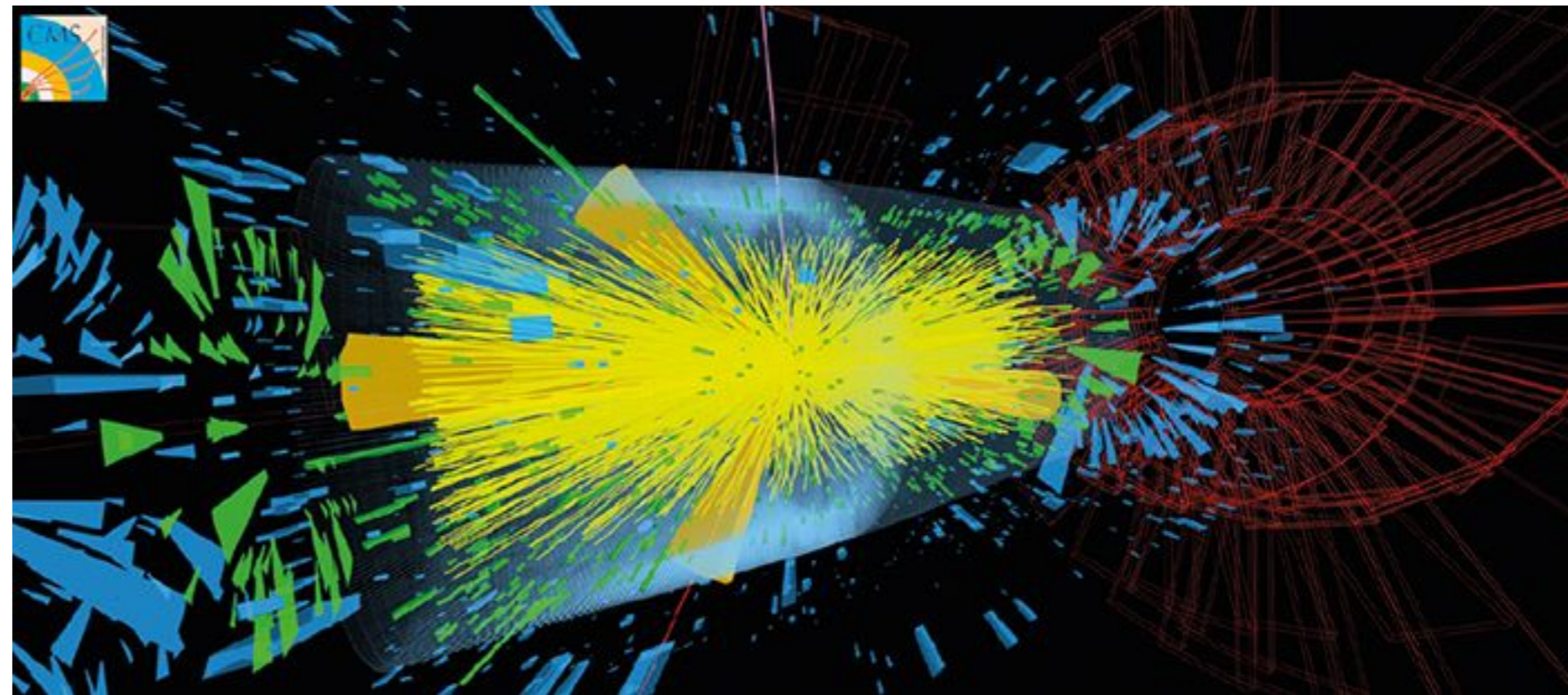
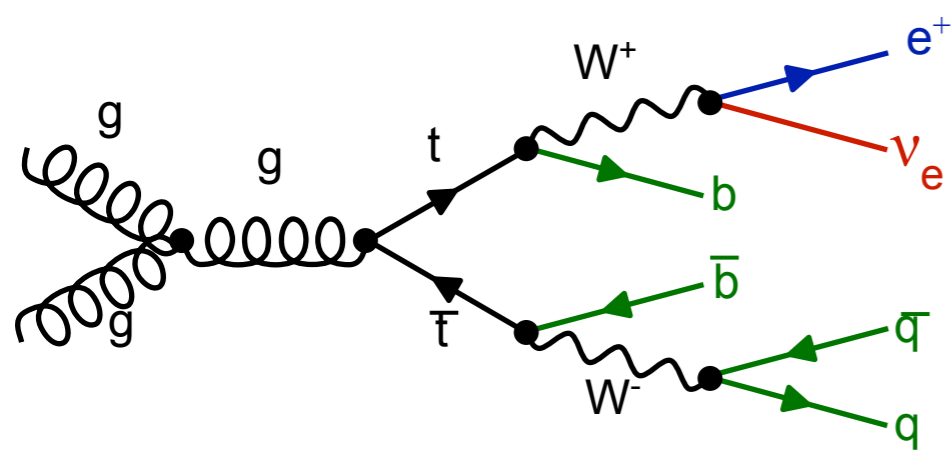
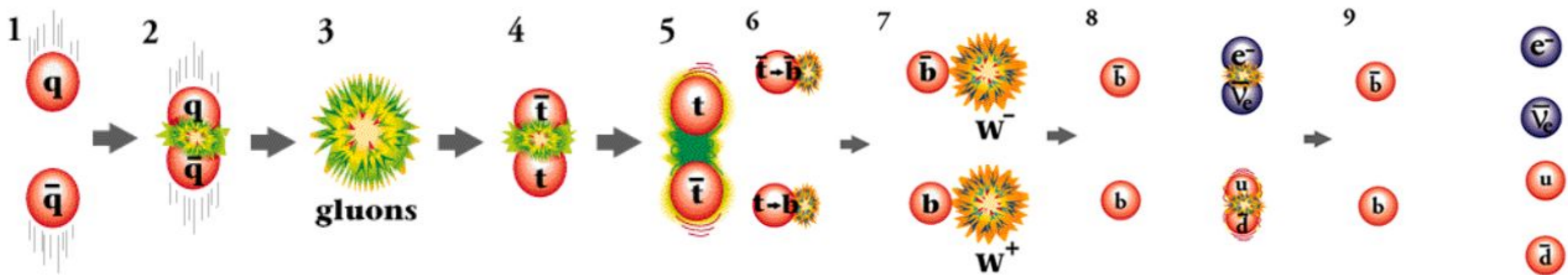
Dipolimagneetti:



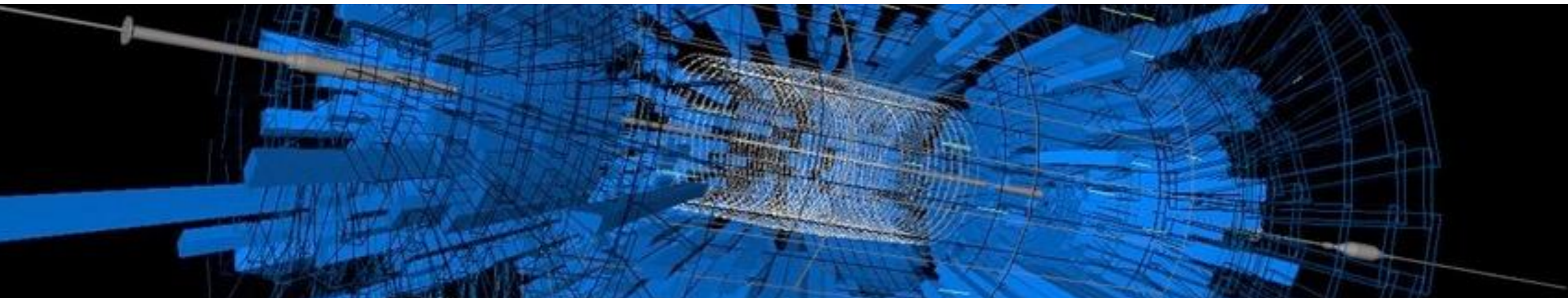
Kvadrupolimagneetti:



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



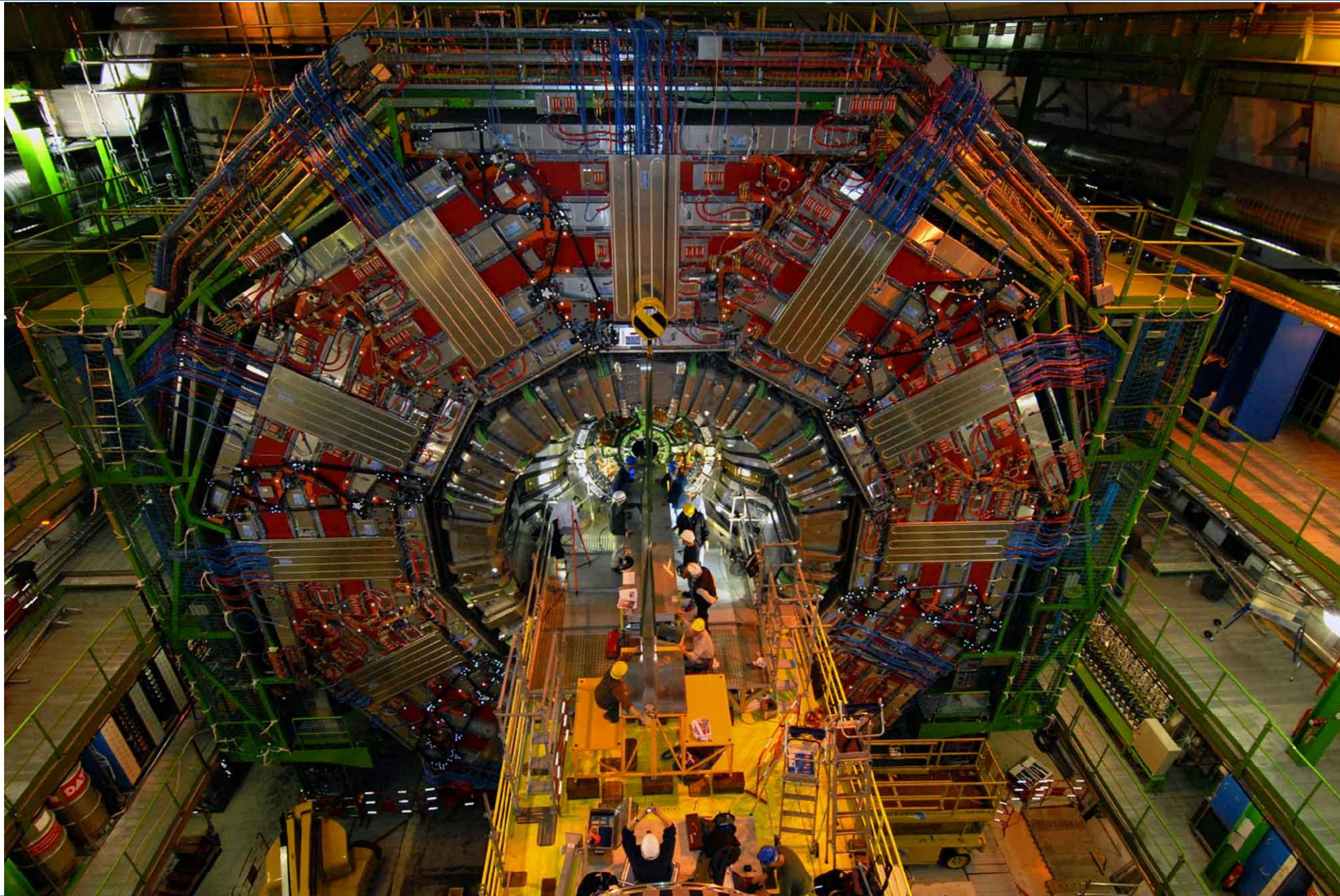
Osa 2: Hiukkasilmaisimet



CMS-koeasema

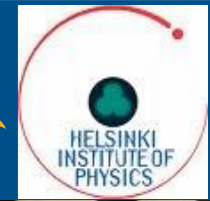
Koeaseman mittalaitteet

Hiukkasten tunnistaminen





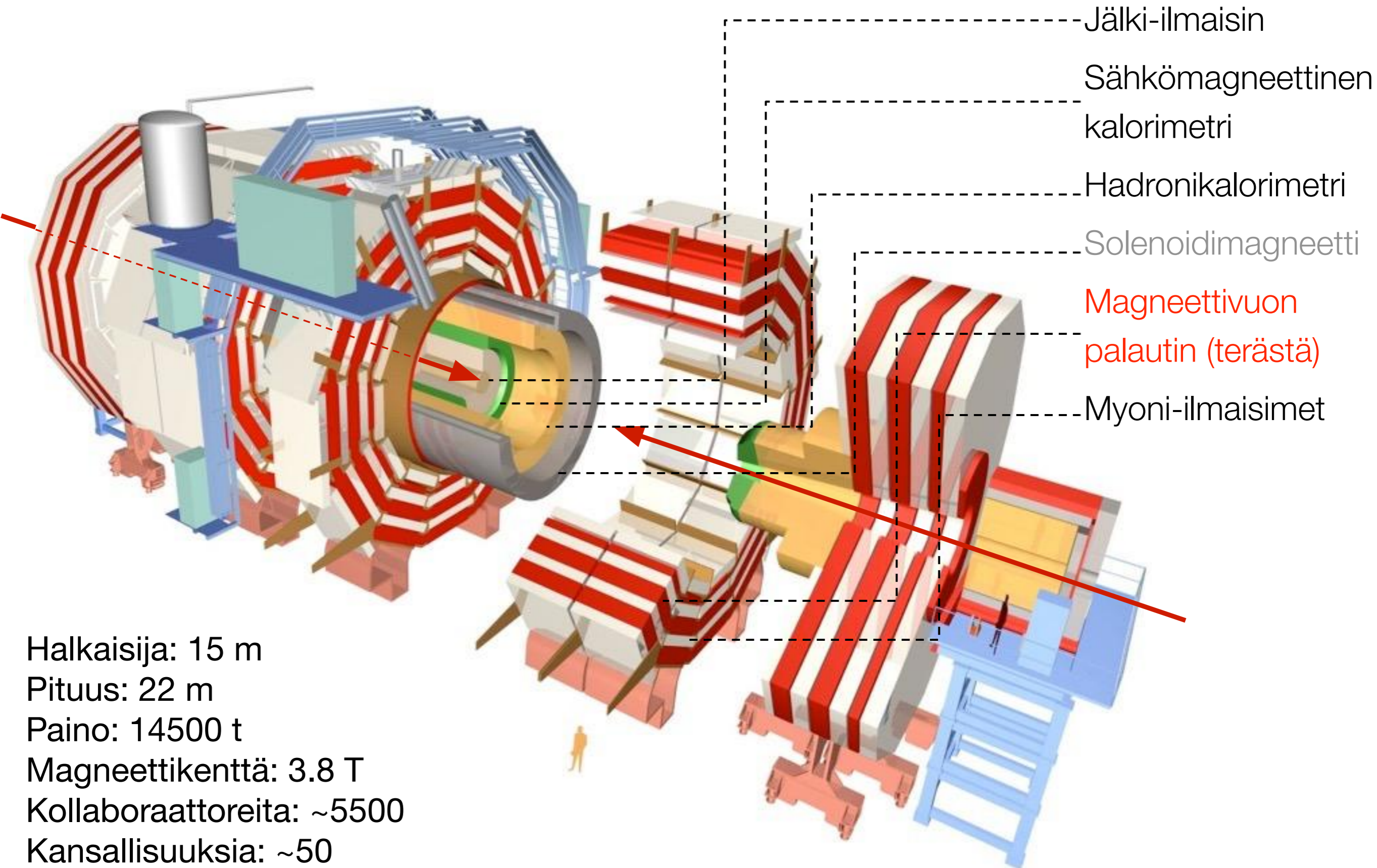
5000 ihmisen yhteishanke





Koeaseman valvomo





Hiukkaset vuorovaikuttavat aineen kanssa eri tavoin

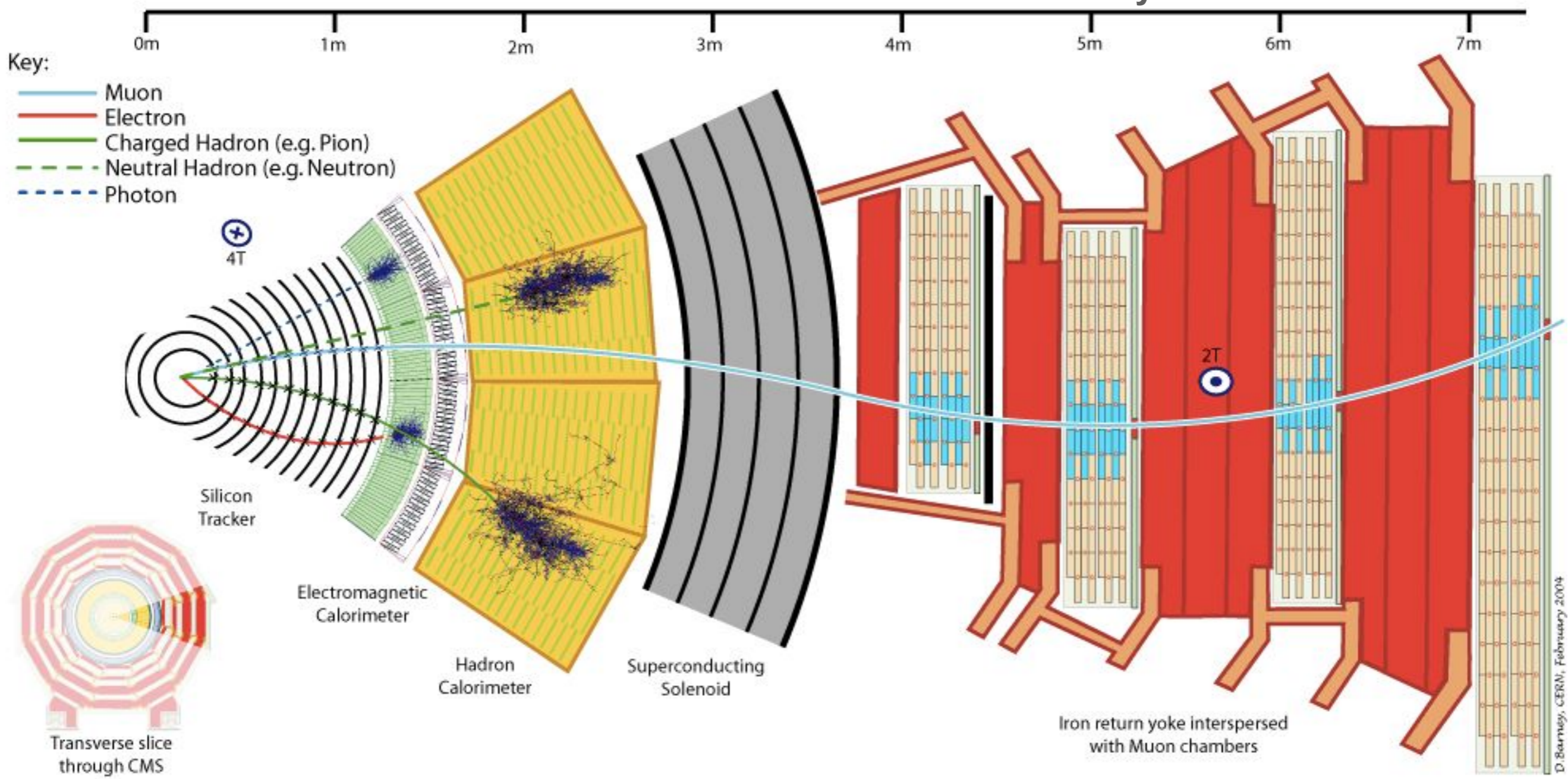
Varatut hiukkaset ionisoivat, joten niiden radat havaitaan

Elektroni ja fotonit tuottavat sähkömagneettisen ryöpyn

Hadronit tuottavat pitkän hadronisen ryöpyn

Raskaat muonit tunkeutuvat aineen läpi tehokkaasti

Neutriinot havaitaan epäsuorasti liikemäärän säilymisen kautta

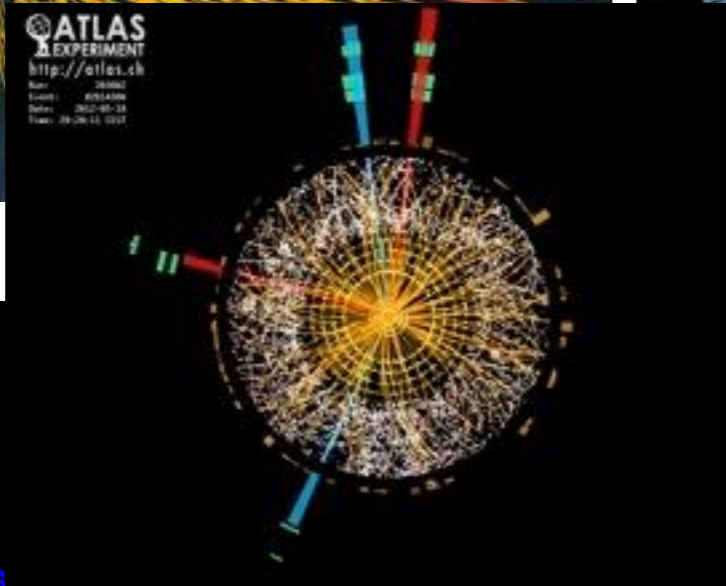
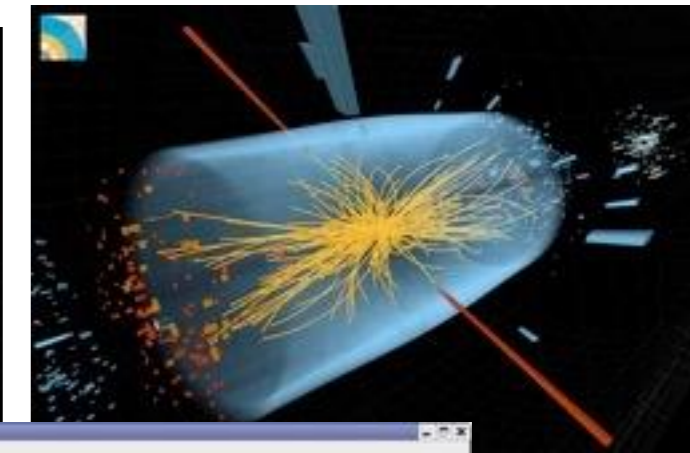
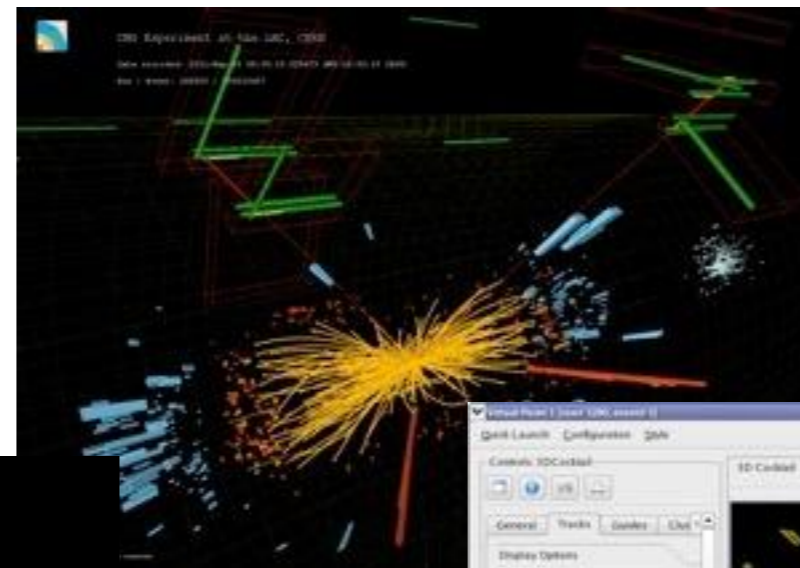
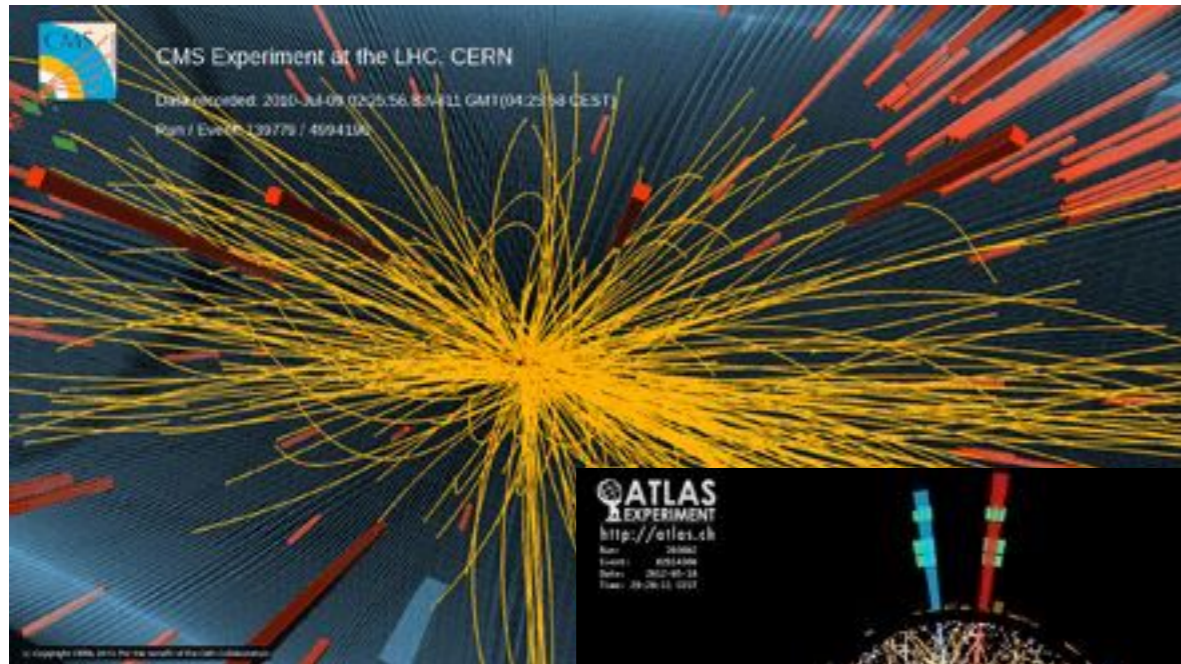


D. Barney, CERN, February 2004

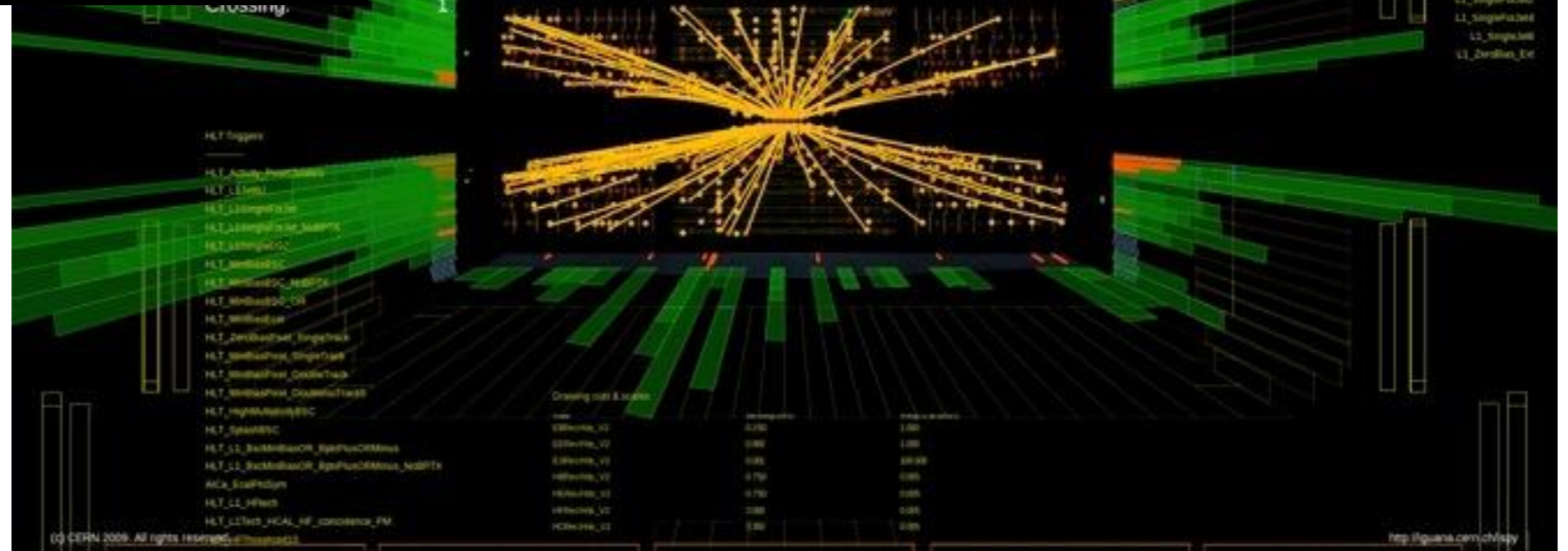
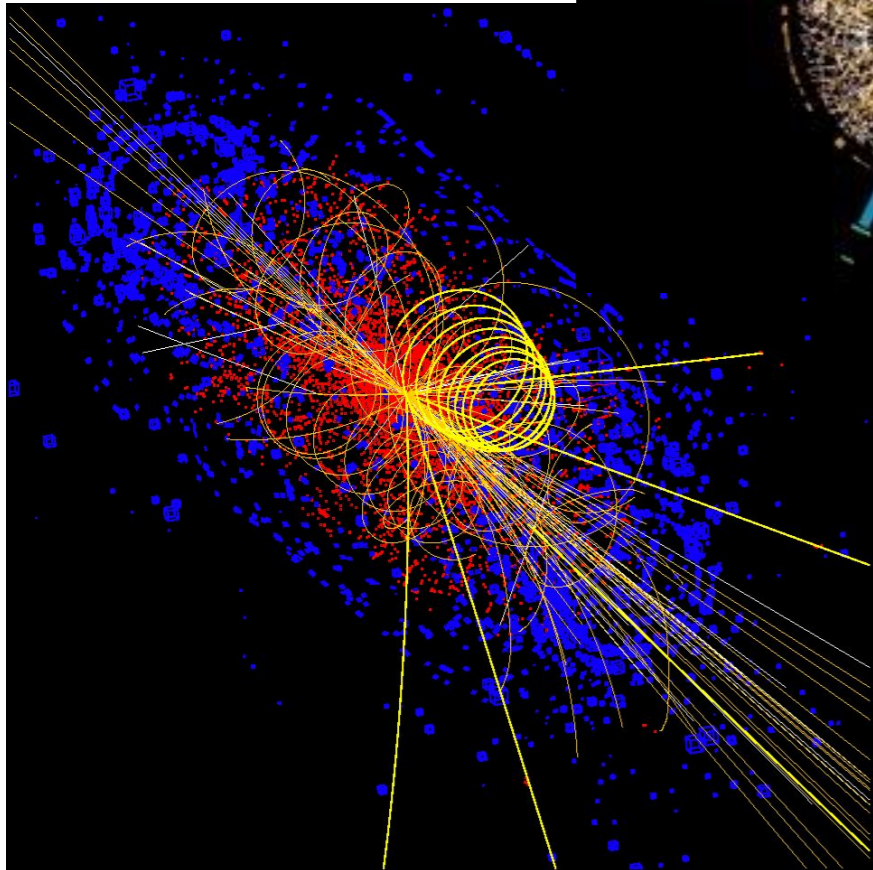
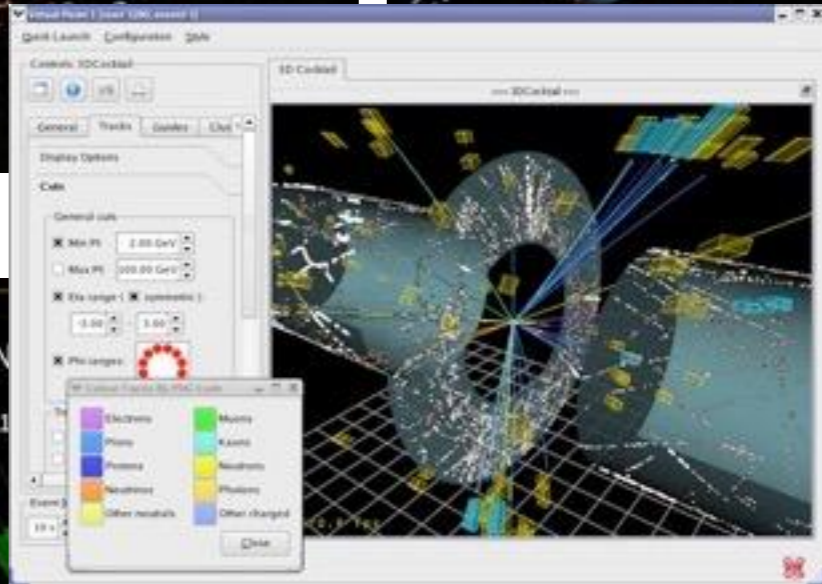
Osa 3: Data-analyysi



Törmäysten valitseminen
Signaali ja tausta
Tilastolliset menetelmät



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



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

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

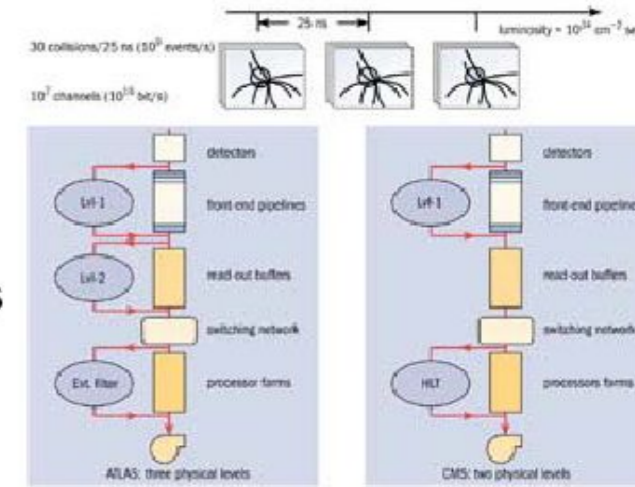
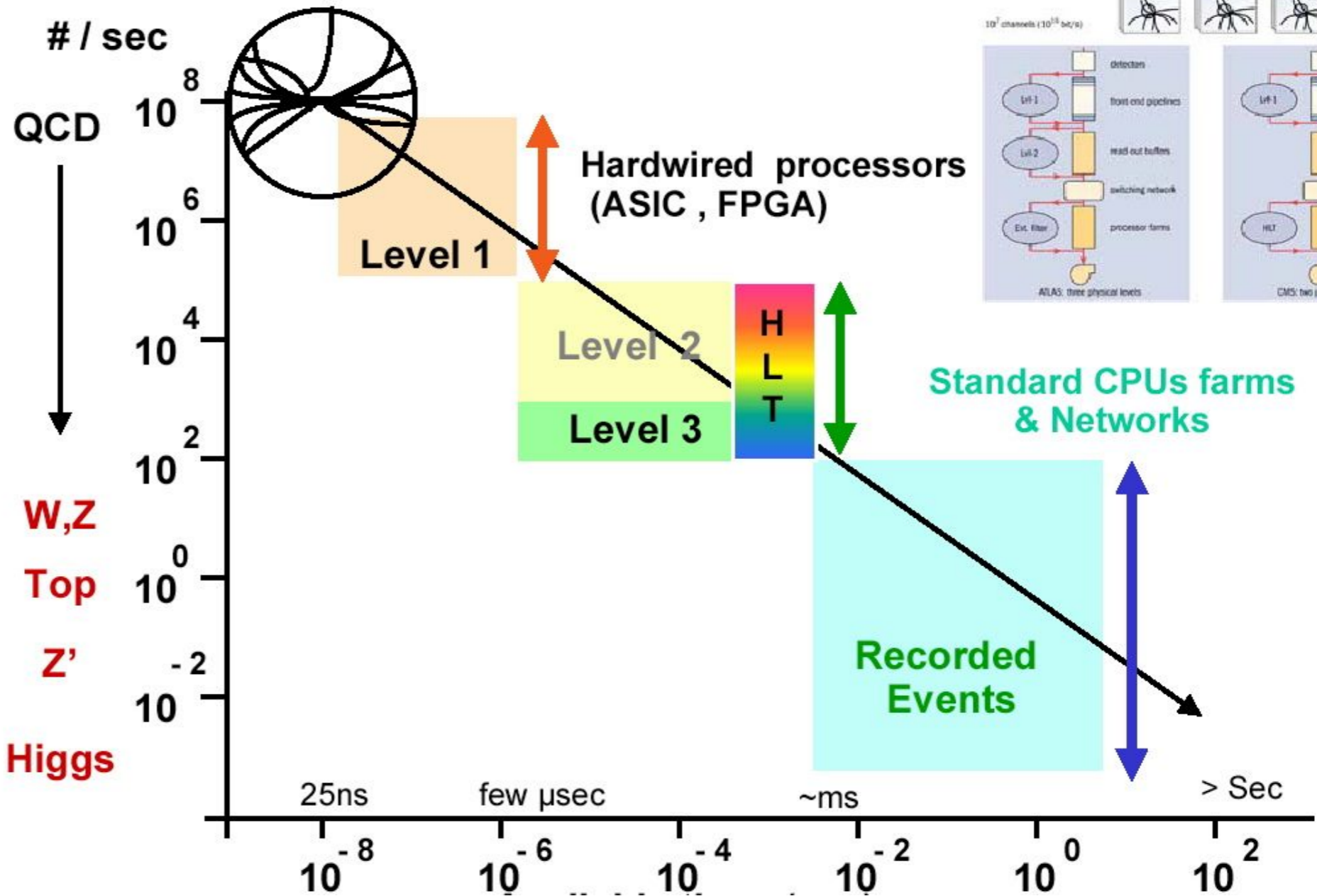
HLT: n. 50 000
 prosessorin
 tietokonefarmi
 valitsee

~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

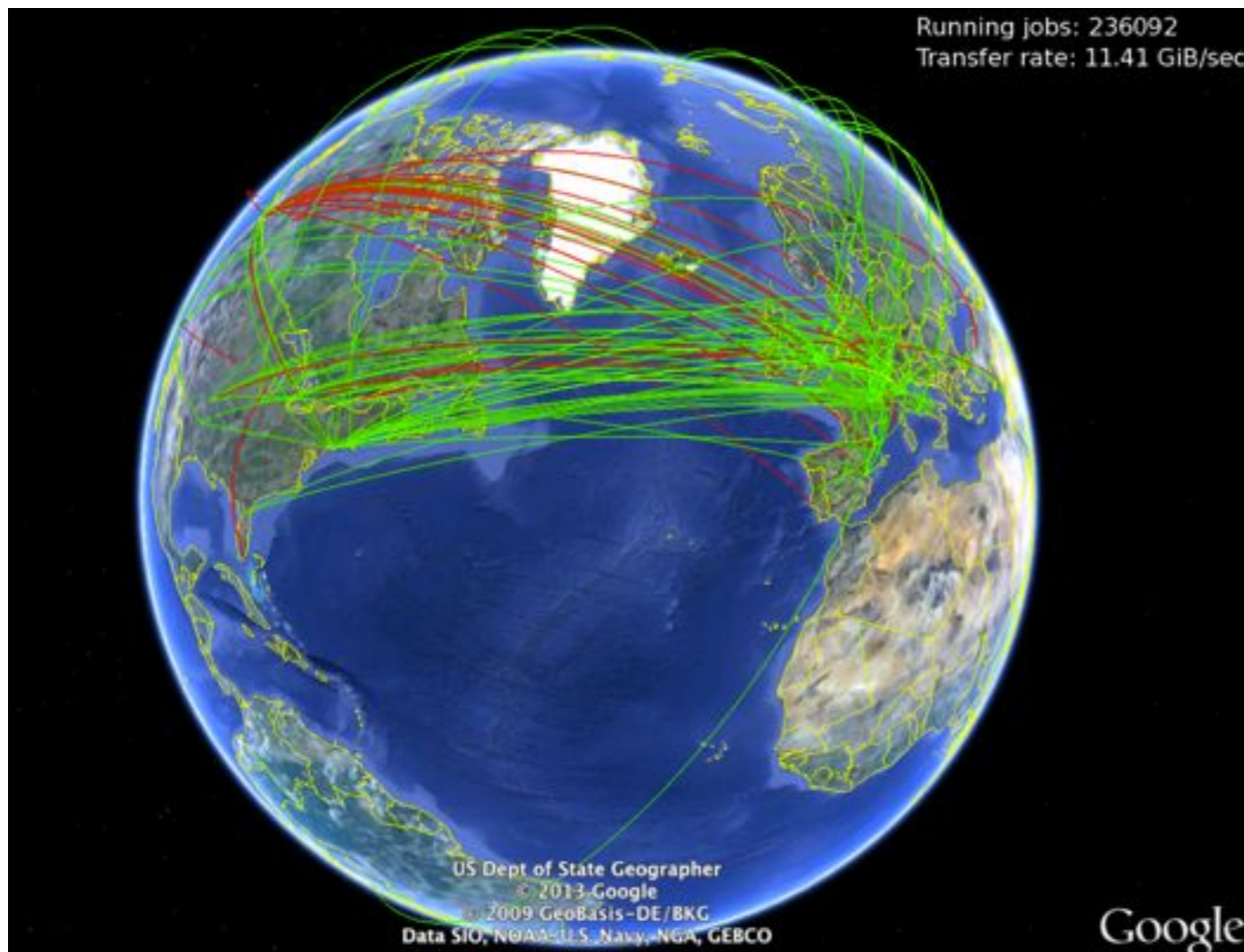




Satoja petatavuja dataa

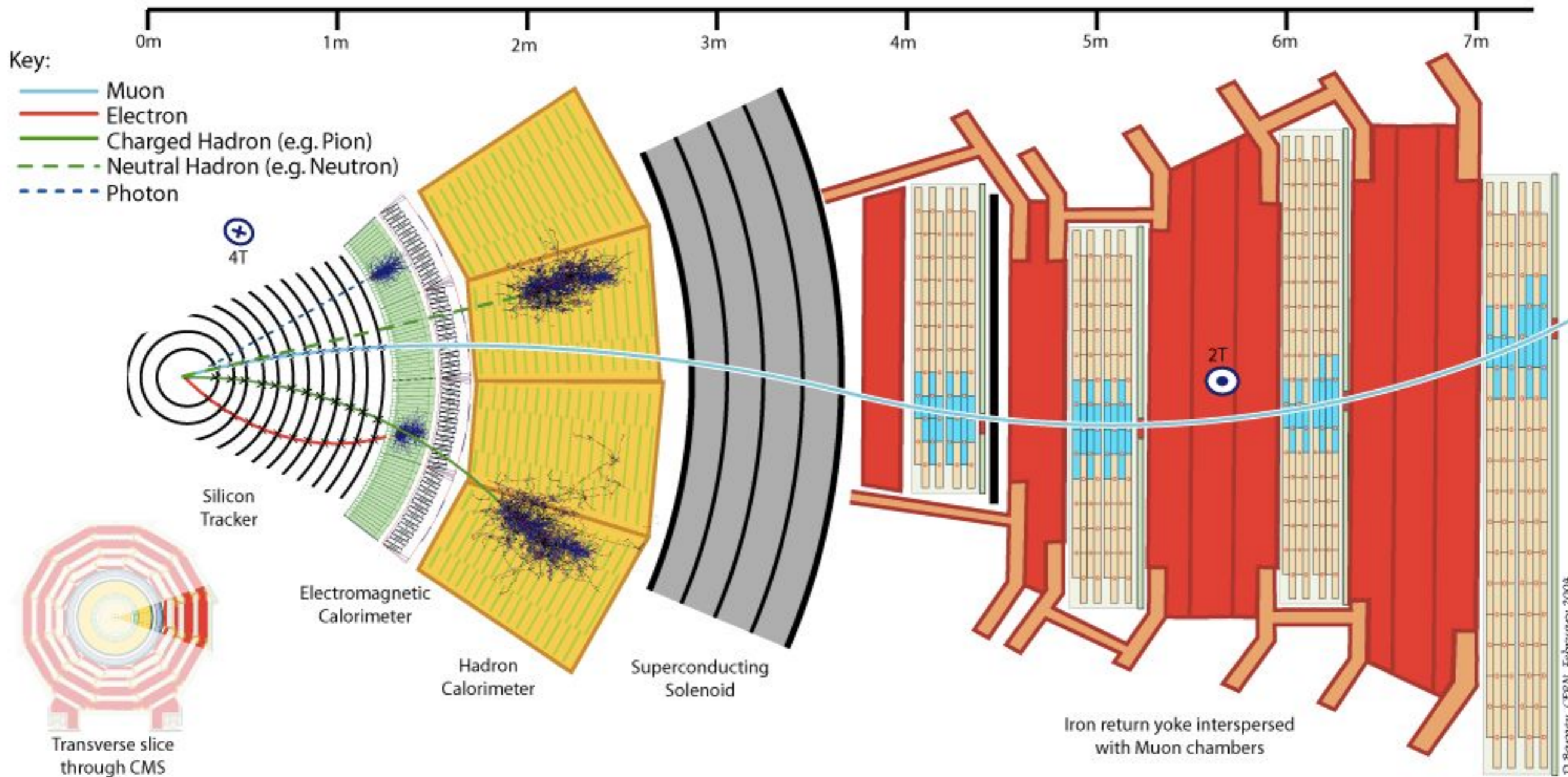


- Myös CERNin datan käsittely on jaettu maailmanlaajuisesti
- Kaikesta datasta yksi kopio CERNissä (Tier-0)
- Varmuuskopio jossain päin maailmaa (Tier-1)
- Analyysikopioita (Tier-2, Tier-3) jaettuna useille tietokonekeskuksille
- Datan voi analysoida lähettämällä työn tietokonekeskukselle, jolla on kopio

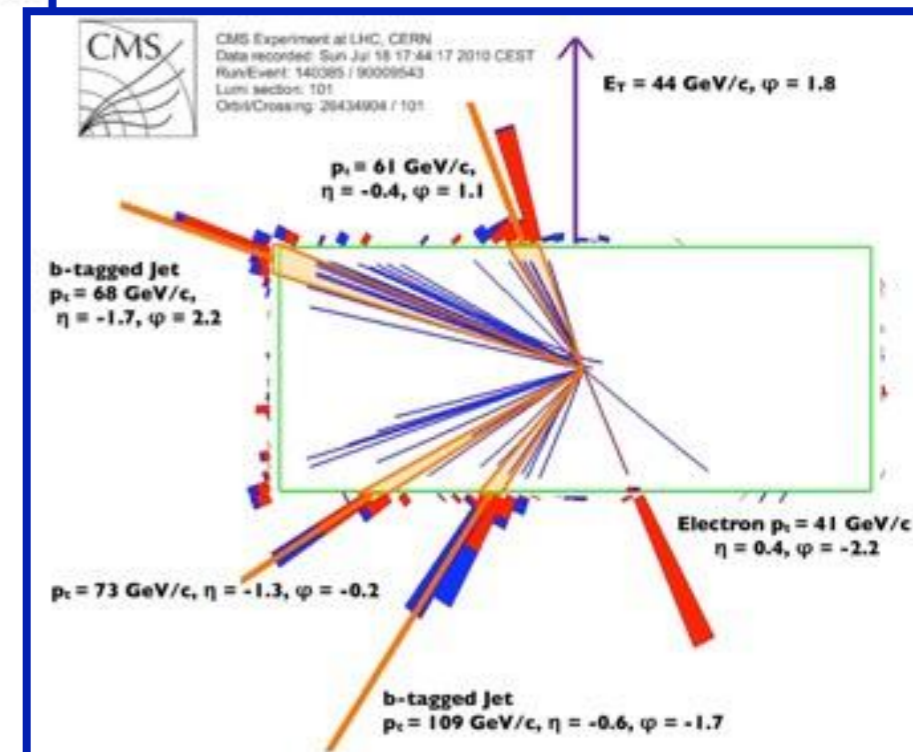
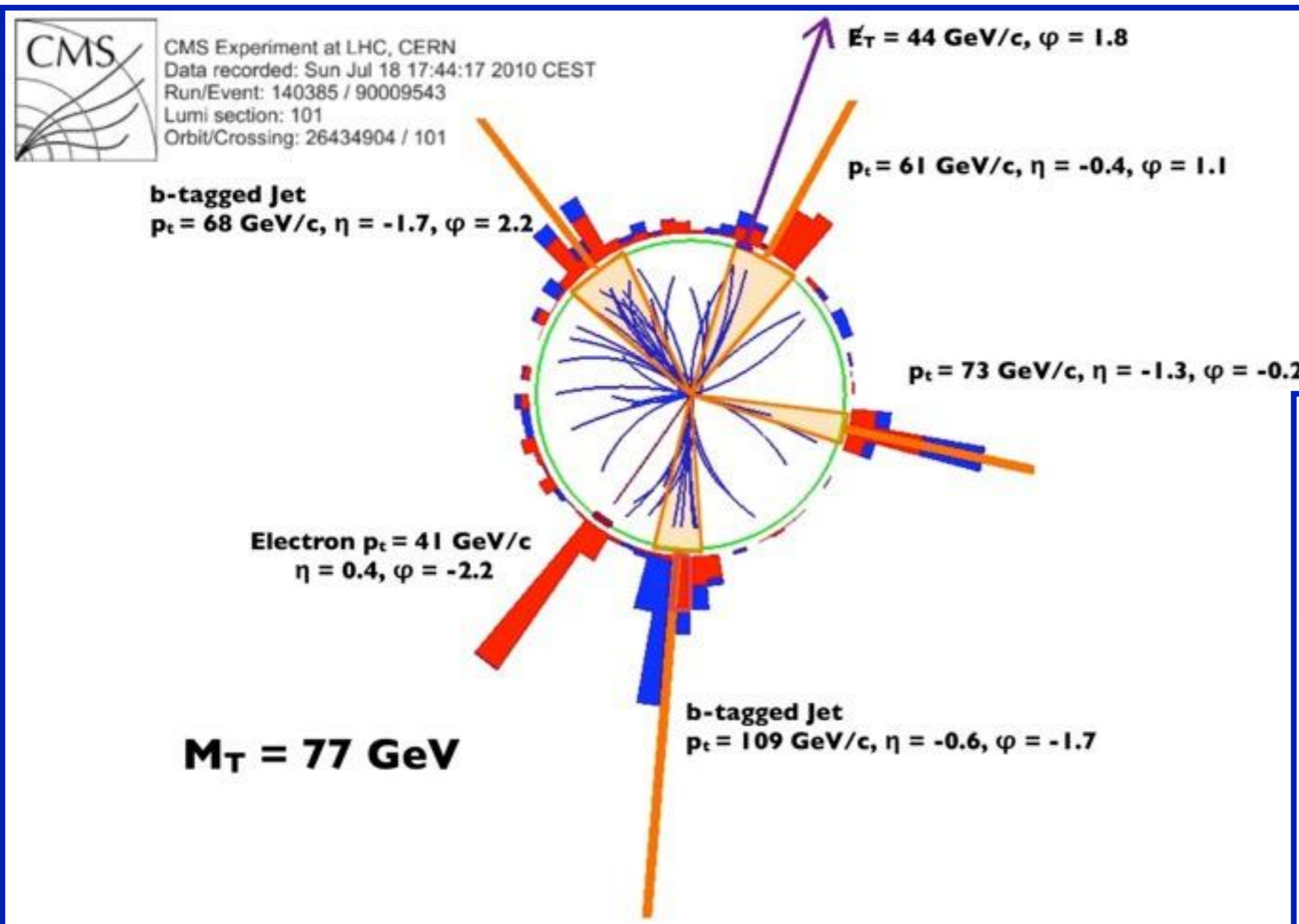
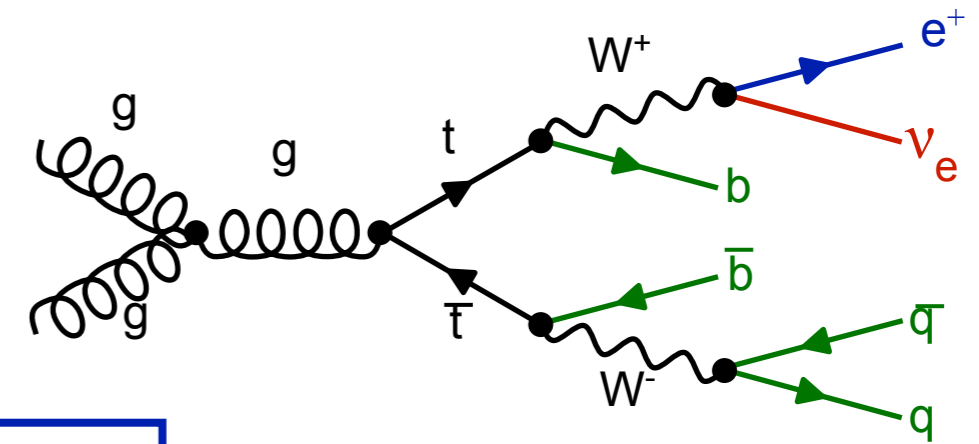


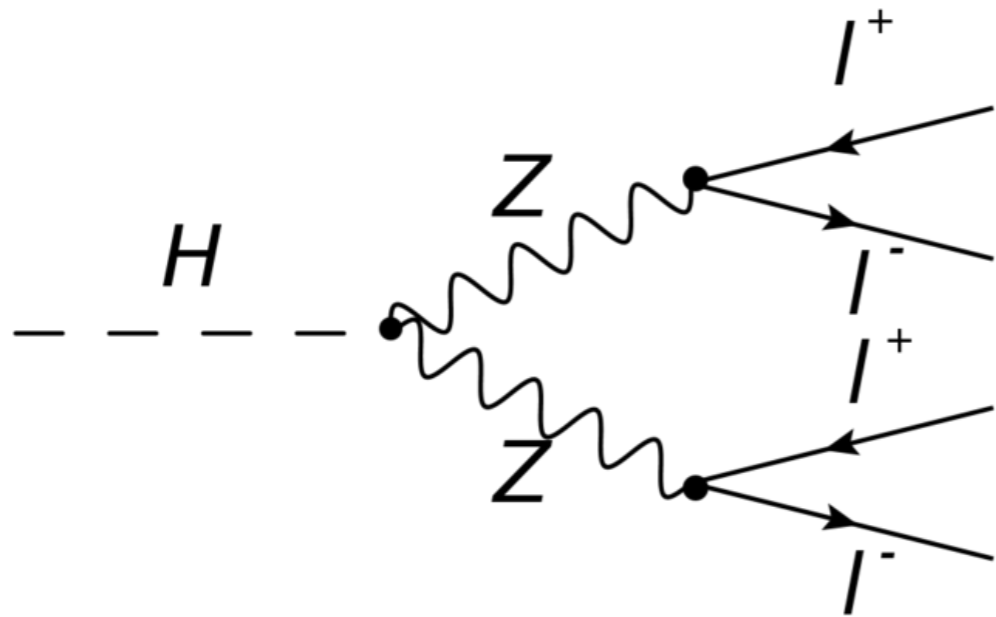
<http://wlcg.web.cern.ch/wlcg-google-earth-dashboard>

CMS rekonstruoii törmäystapahtumissa syntyvät hiukkaset yhdistämällä signaaleja eri ali-ilmaisimista

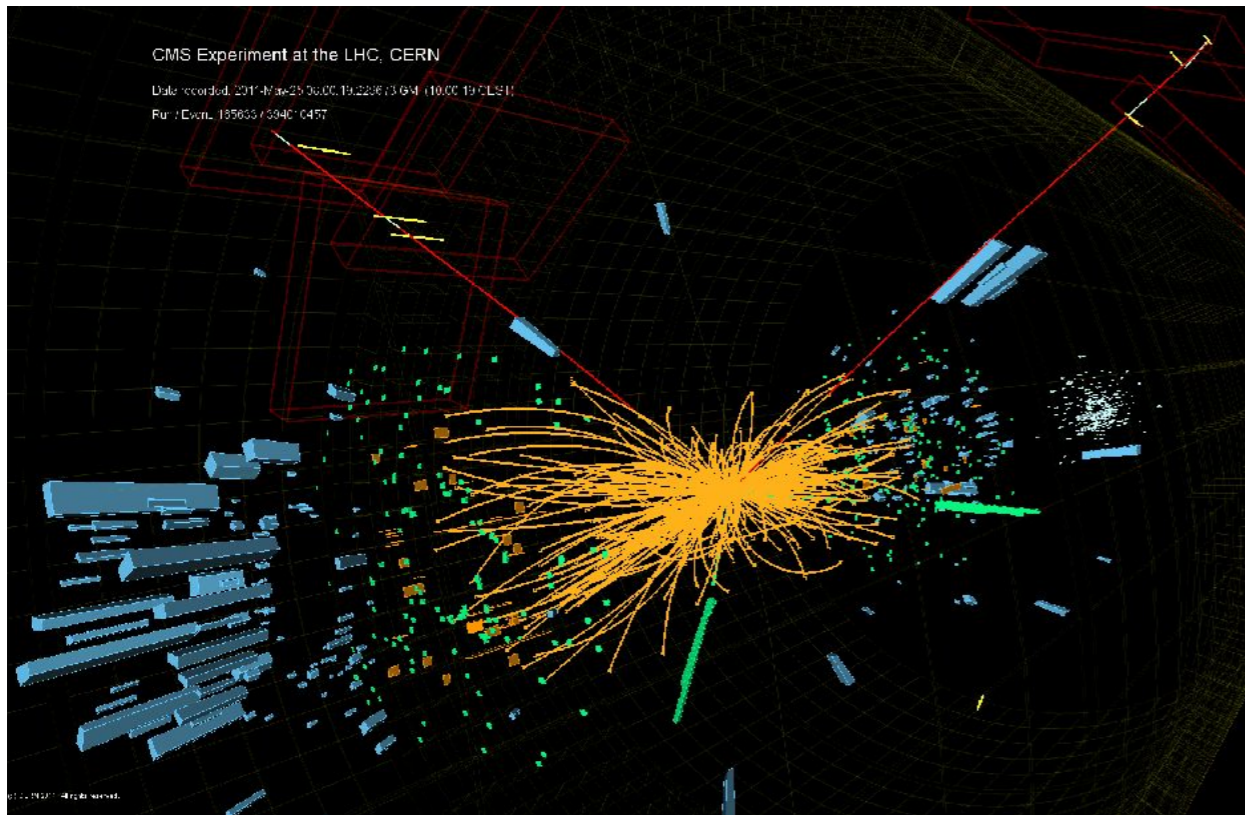
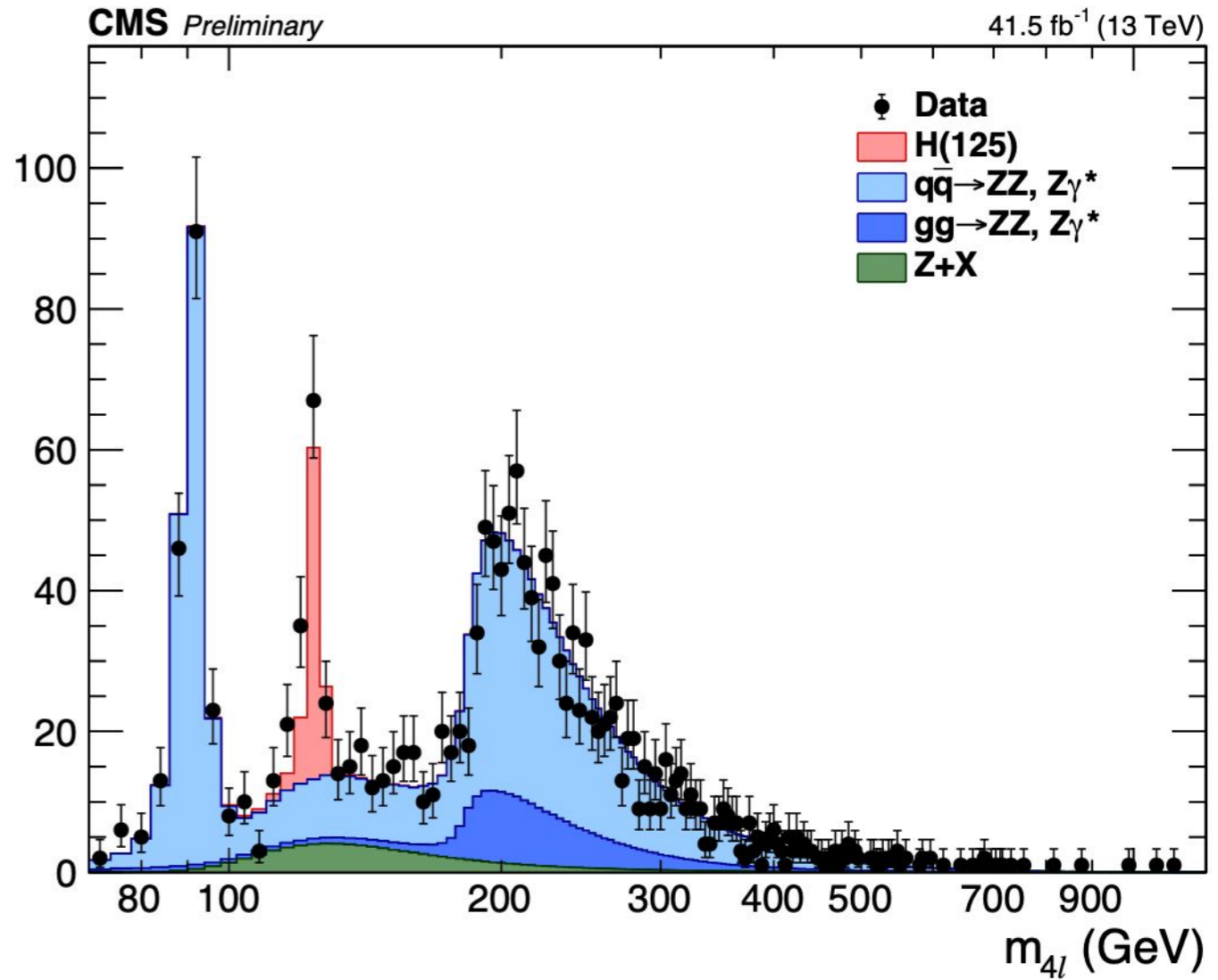


- Esimerkki: Gluoni-gluonifuusio, jossa syntyy top-kvarkkeja



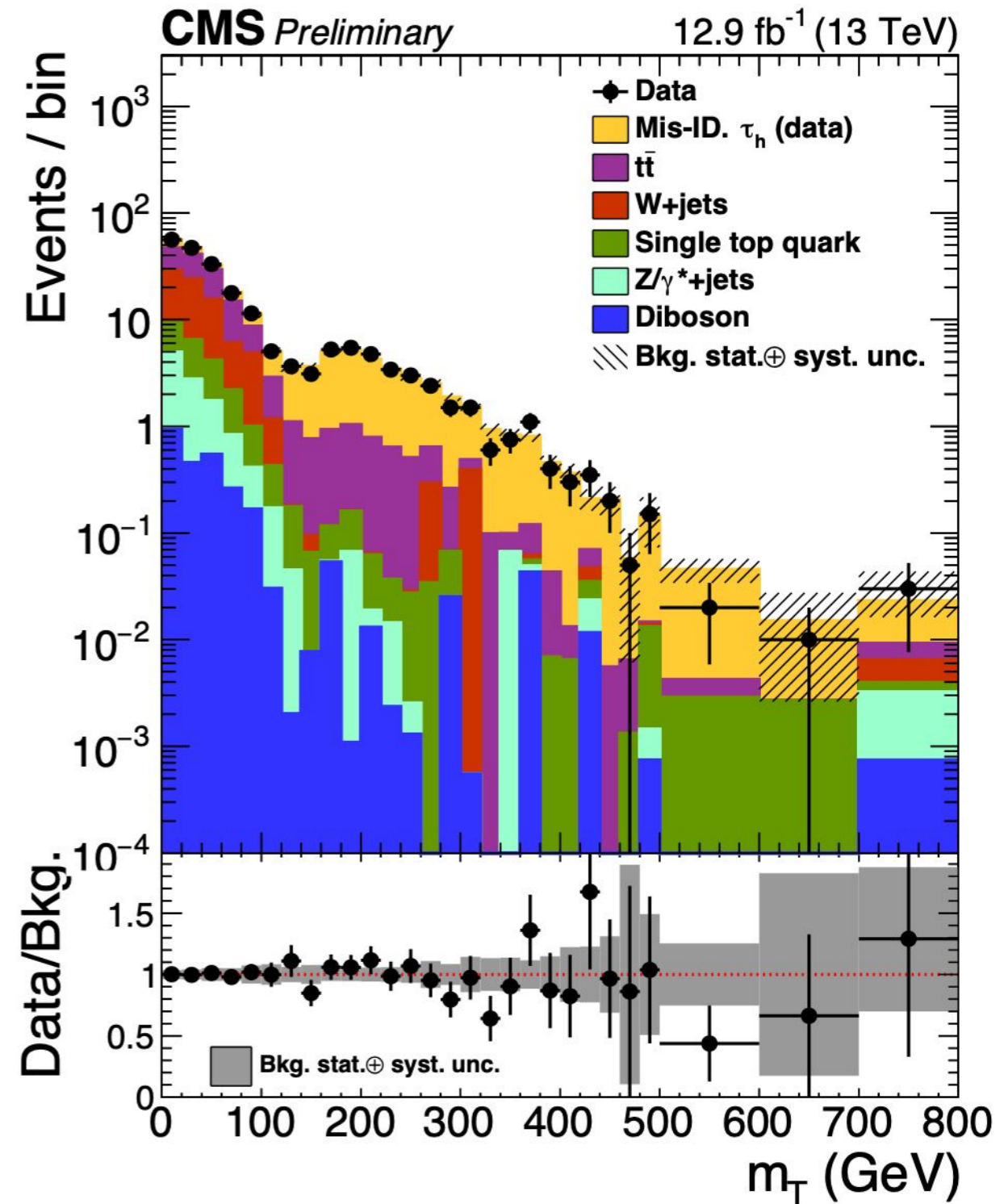
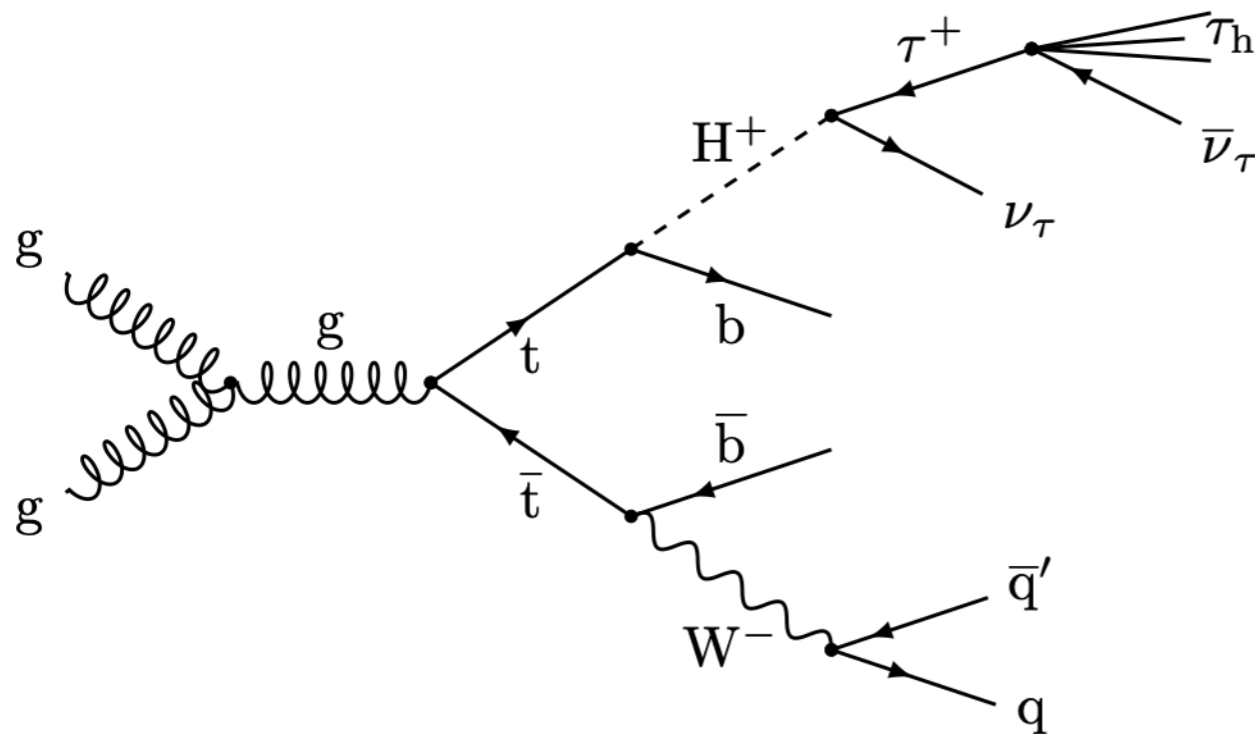


Events / 4 GeV

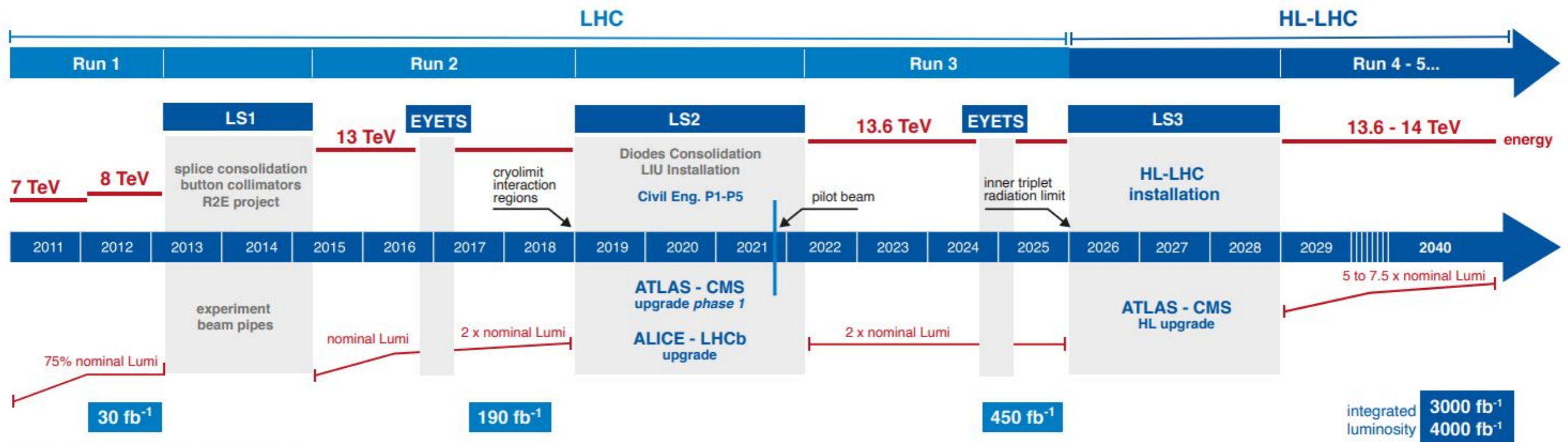


**Neljän leptonin systeemin
 ”invariantti massa”
 vastaa sen hiukkasen massaa
 josta leptonit ovat peräisin**

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



Osa 4: Tulevaisuuden haasteet



Tulevaisuuden kiihdyttimet
Suuret kysymykset

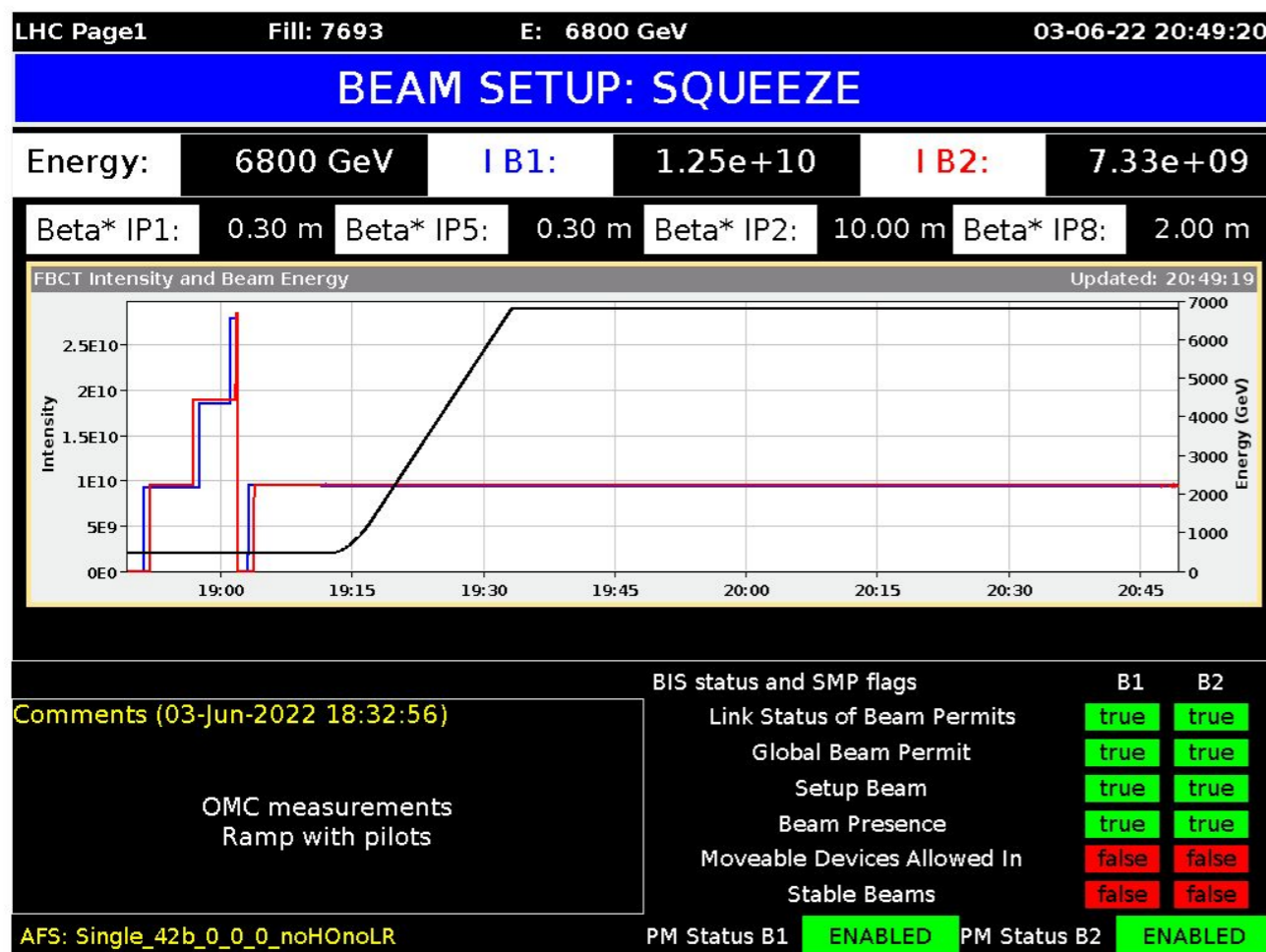
Large Hadron Collider restarts

Beams of protons are again circulating around the collider's 27-kilometre ring, marking the end of a multiple-year hiatus for upgrade work

22 APRIL, 2022

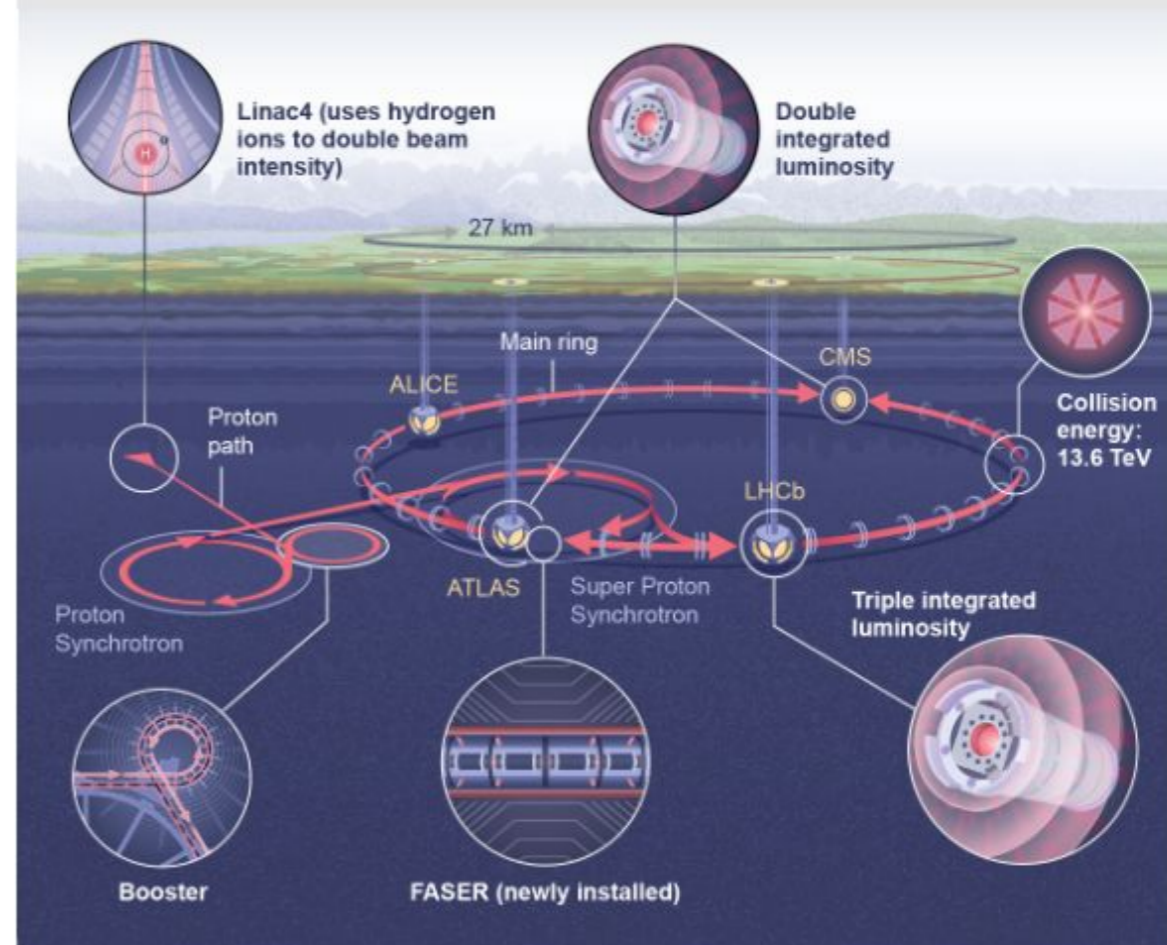
<https://home.cern/news/news/accelerators/large-hadron-collider-restarts>

- Testejä menossa, fysiikkaa heinäkuussa?



The Large Hadron Collider, Illuminated

An improved "booster" and a new proton beam source called Linac4 have given the upgraded Large Hadron Collider (LHC) at CERN denser, more luminous beams that will yield many more collisions over time. Enhancements to the resolution of the ATLAS, CMS and LHCb experiments at the LHC will help these detectors better handle the resulting flood of collision data. Improved magnets will allow proton collisions to occur at higher energies: 13.6 trillion electron volts (TeV) instead of 13 TeV. And a small new detector called FASER will seek out extremely low-mass particles leaking from ATLAS.

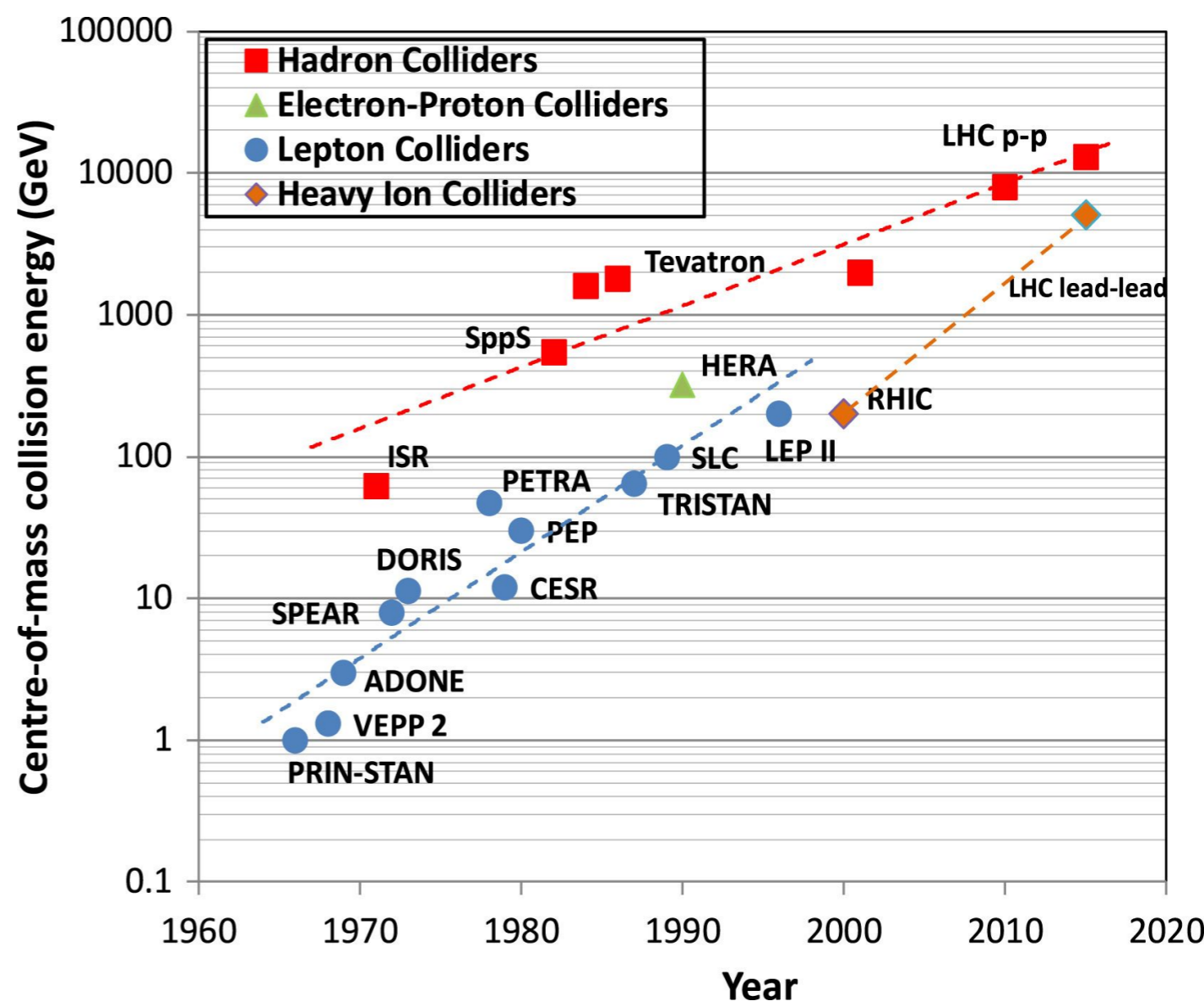
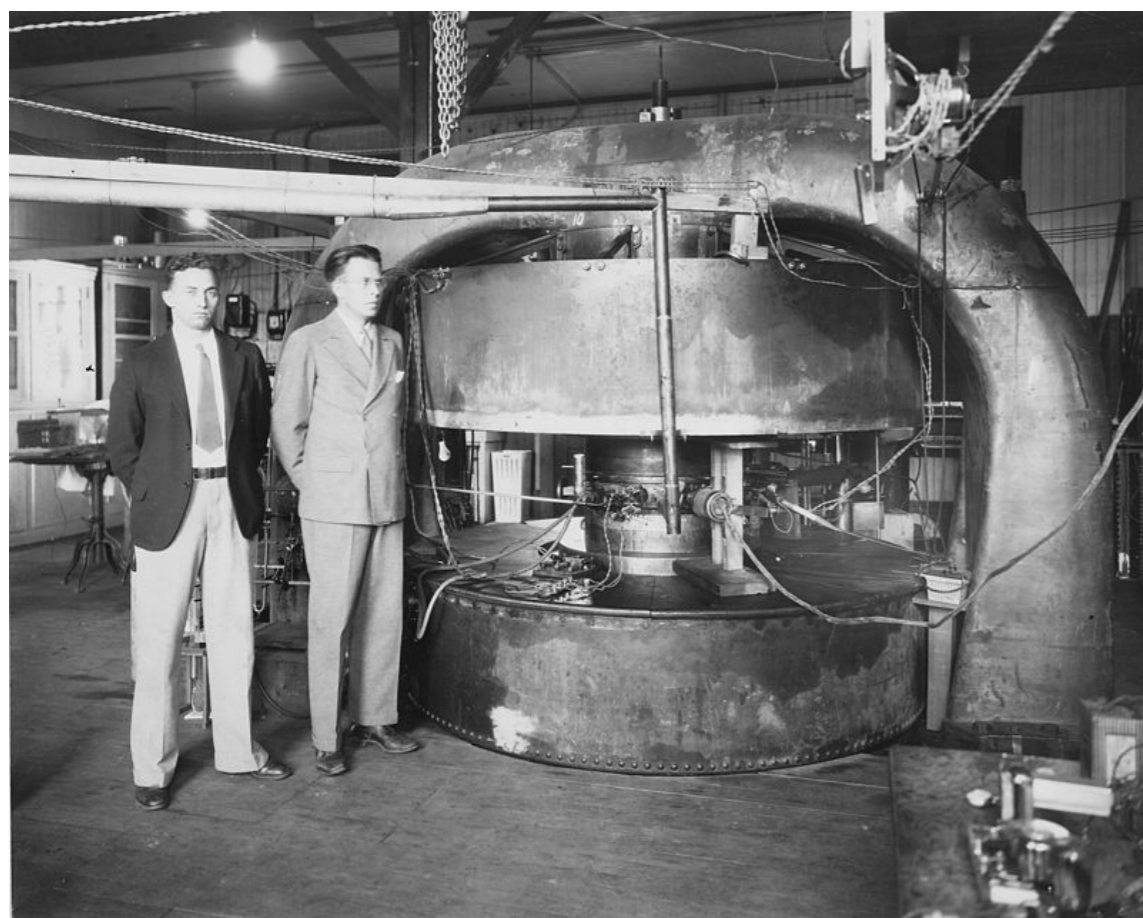


Credit: Nick Bockelman

<https://www.scientificamerican.com/article/large-hadron-collider-seeks-new-particles-after-major-upgrade/>

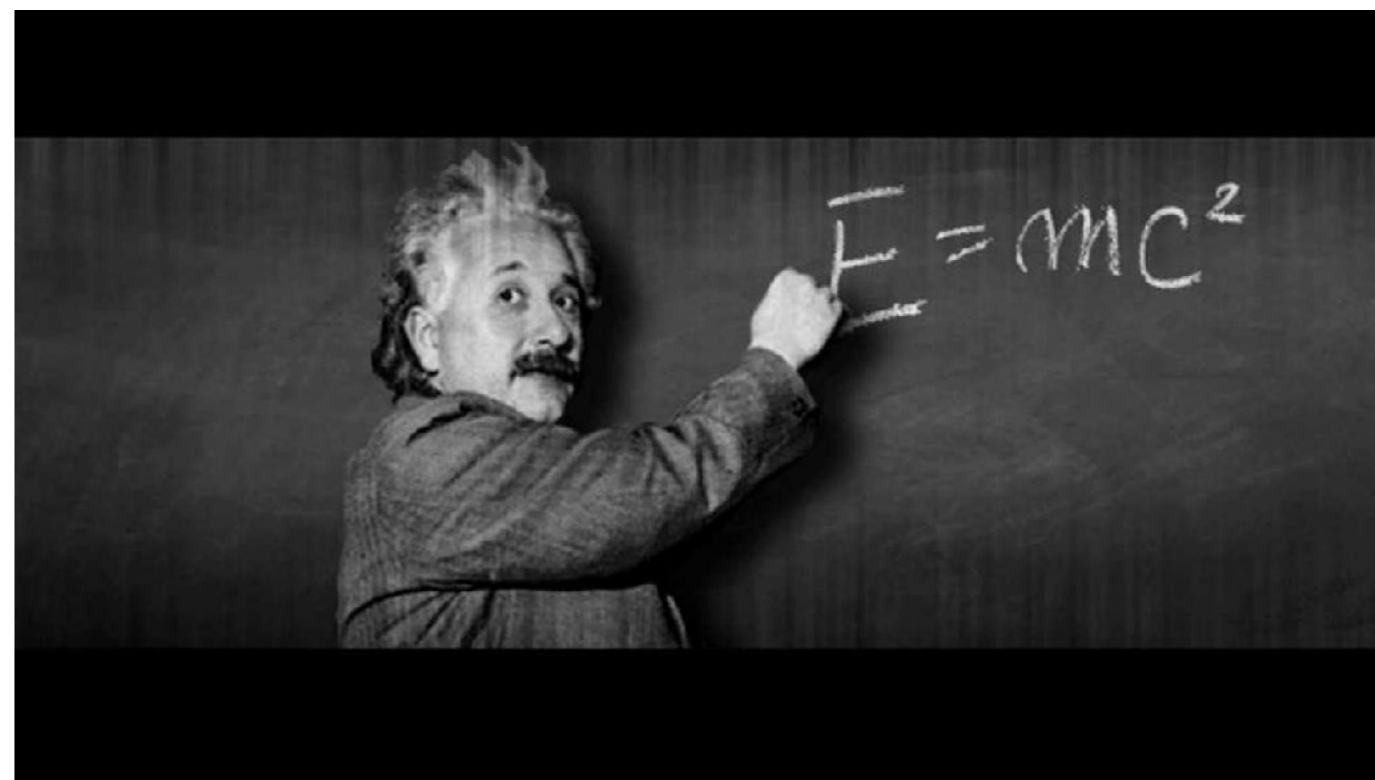
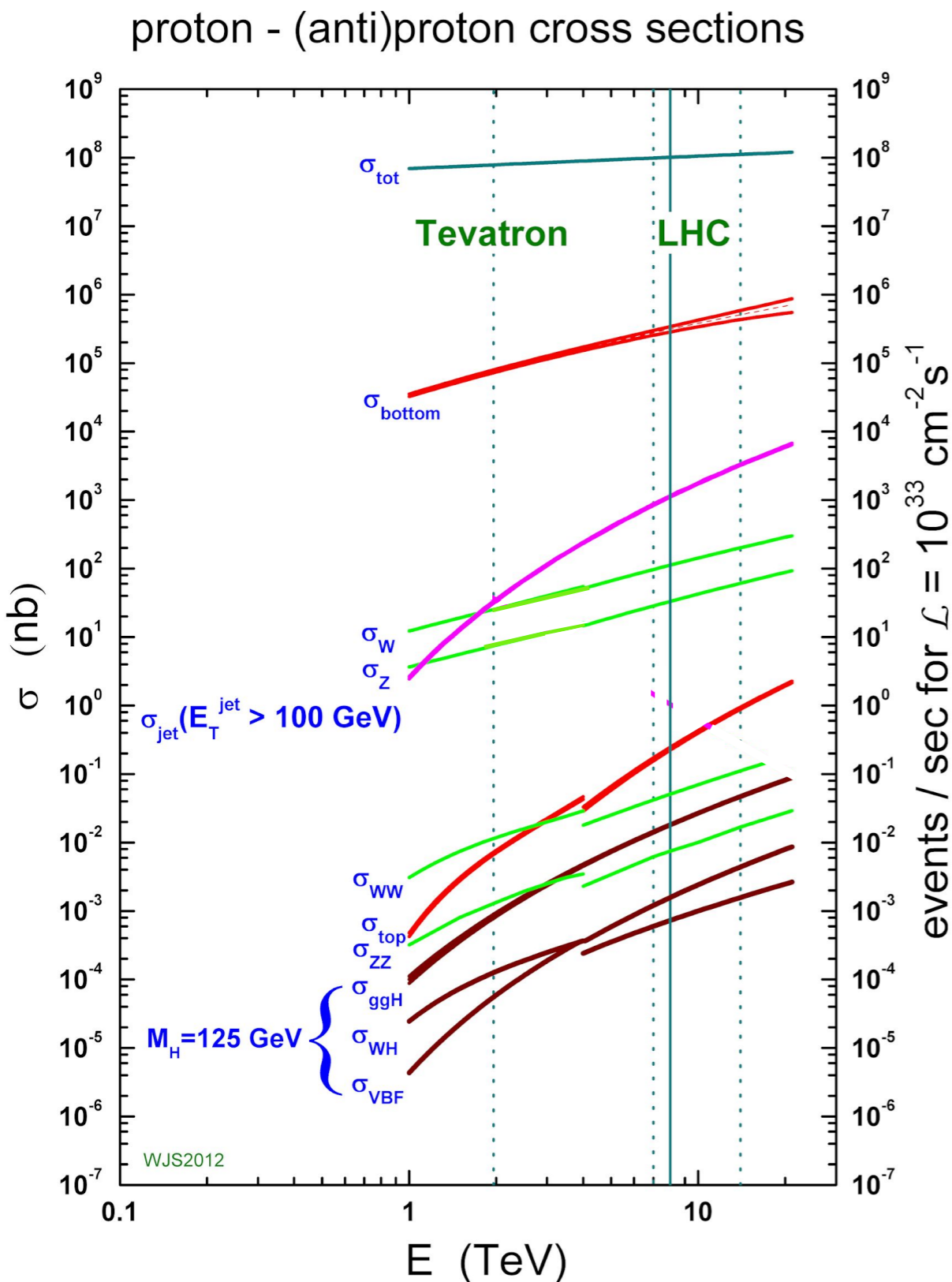
<https://www.symmetrismagazine.org/article/whats-new-for-lhc-run-3>

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



Kuva: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900218300512>

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



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** (σ , pystyakselilla), joka riippuu **energiasta** (E , vaaka-akselilla)

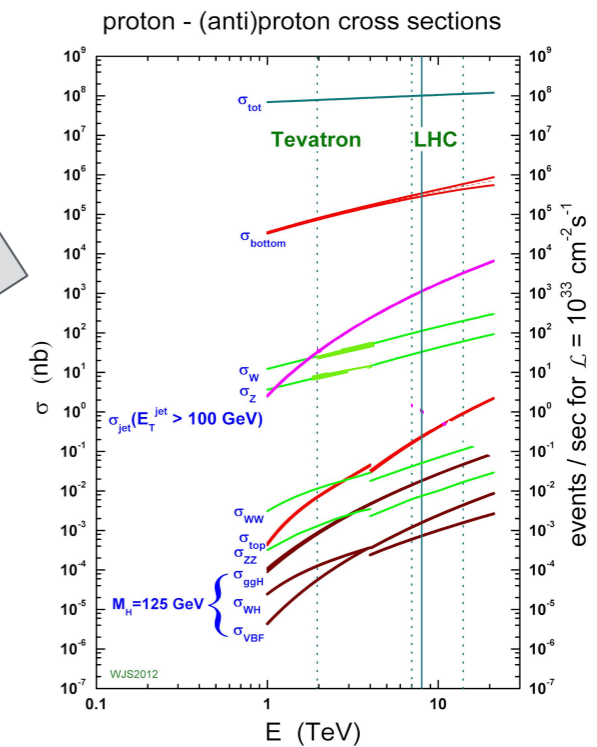
- **Luminositeetti \mathcal{L}** kertoo kuinka paljon törmäyksiä kiihdyttimessä voidaan tuottaa

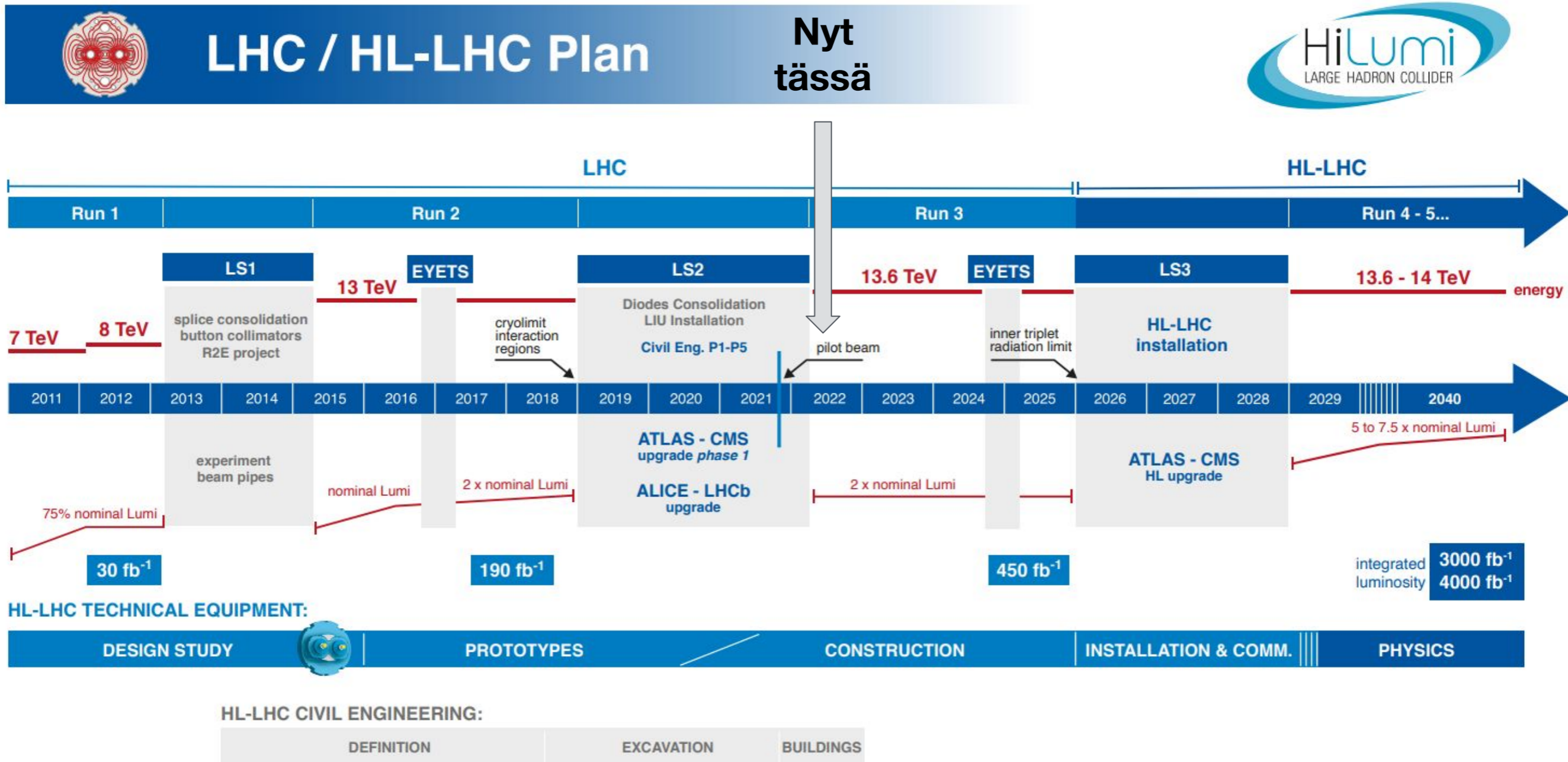
- Yksikkö $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ tai $\text{b}^{-1}\text{s}^{-1}$ (b = barni)
- **Mitä suurempi luminositeetti, sitä enemmän törmäyksiä**
- Törmäystapahtumien määrä riippuu myös vaikutusalasta

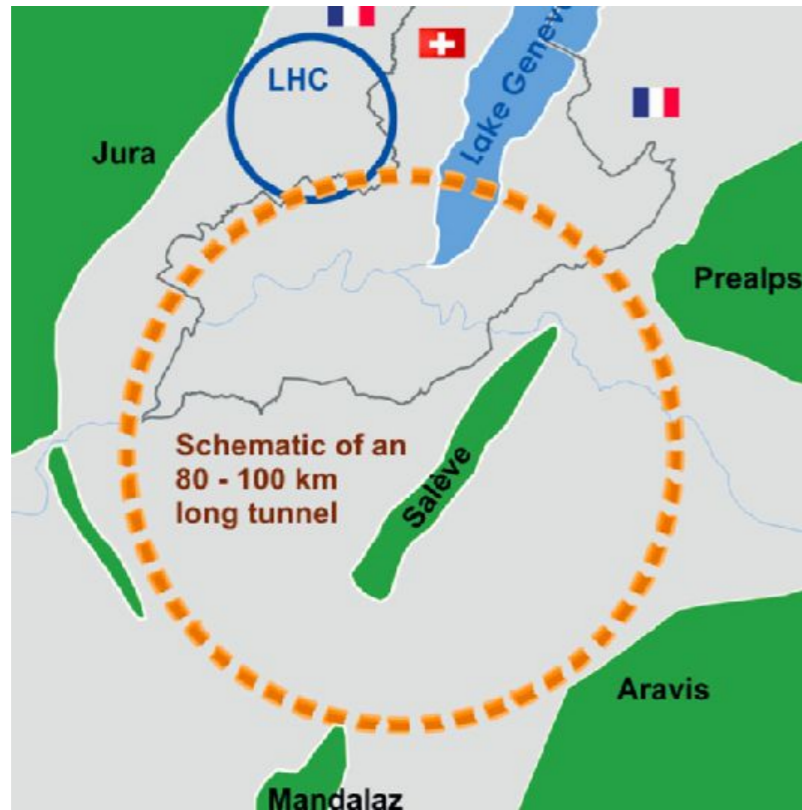
- Lisäksi **integroitu luminositeetti** kuvaa ajanjaksossa kerättyjen törmäystapahtumien määrää

- Yksikkö b^{-1} , käytännössä käytetään femtobarnia fb^{-1}

$$\frac{dR}{dt} = \mathcal{L}\sigma$$

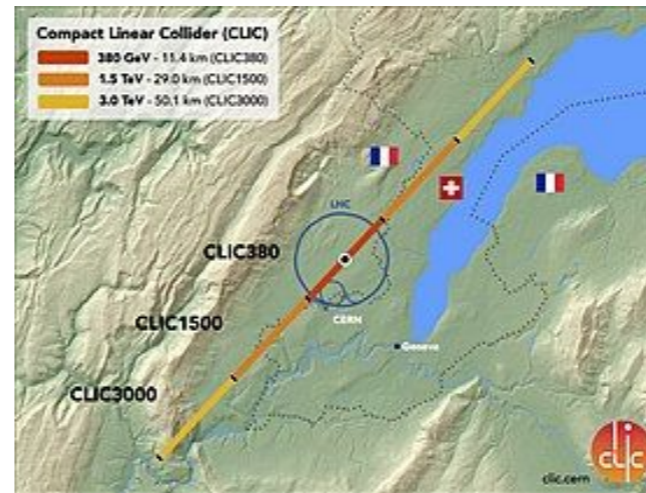






Rengaskiihdytin?

Future Circular Collider



Lineaarikiihdytin?



Compact Linear Collider

- FCC: kiihdytinohjelman looginen seuraava askel: 100 km, 100 TeV

- Haasteet: Sähkömagneettiteknologian rajat, synkrotronisäteily, data-analyysi



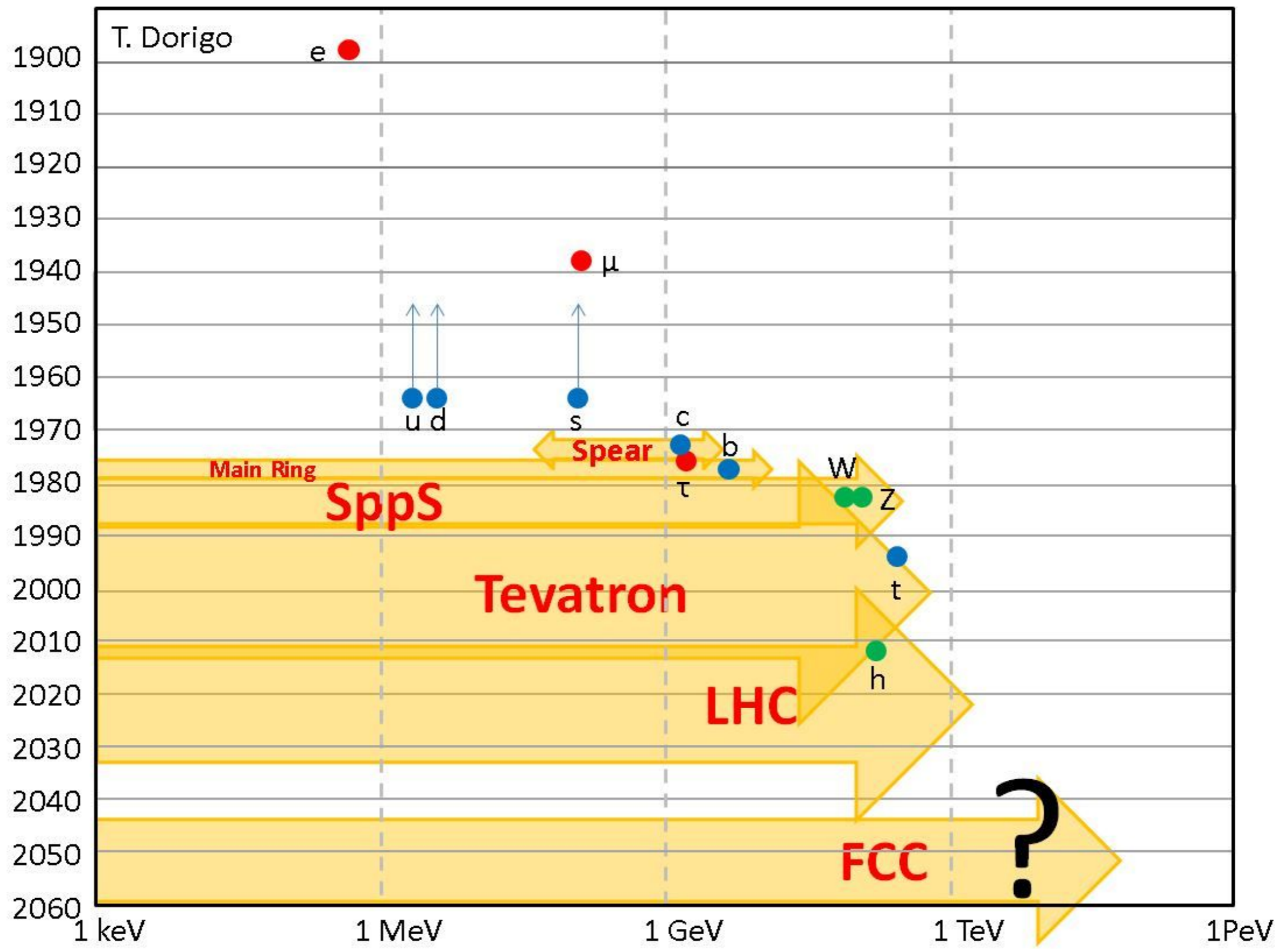
- Hintalappu: 20 mrd. €
- LHC maksoi 5 mrd, operointi ~1 mrd/vuosi

Ehtiikö Kiina ensin?

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



Mitä on vielä löytämättä?



- Onko löytämämme **Higgsin bosoni** standardimallin mukainen ja ainoa?
- Miksi maailmankaikkeudessa on enemmän materiaa kuin antimateriaa?
- Miten selittää **neutriinon 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



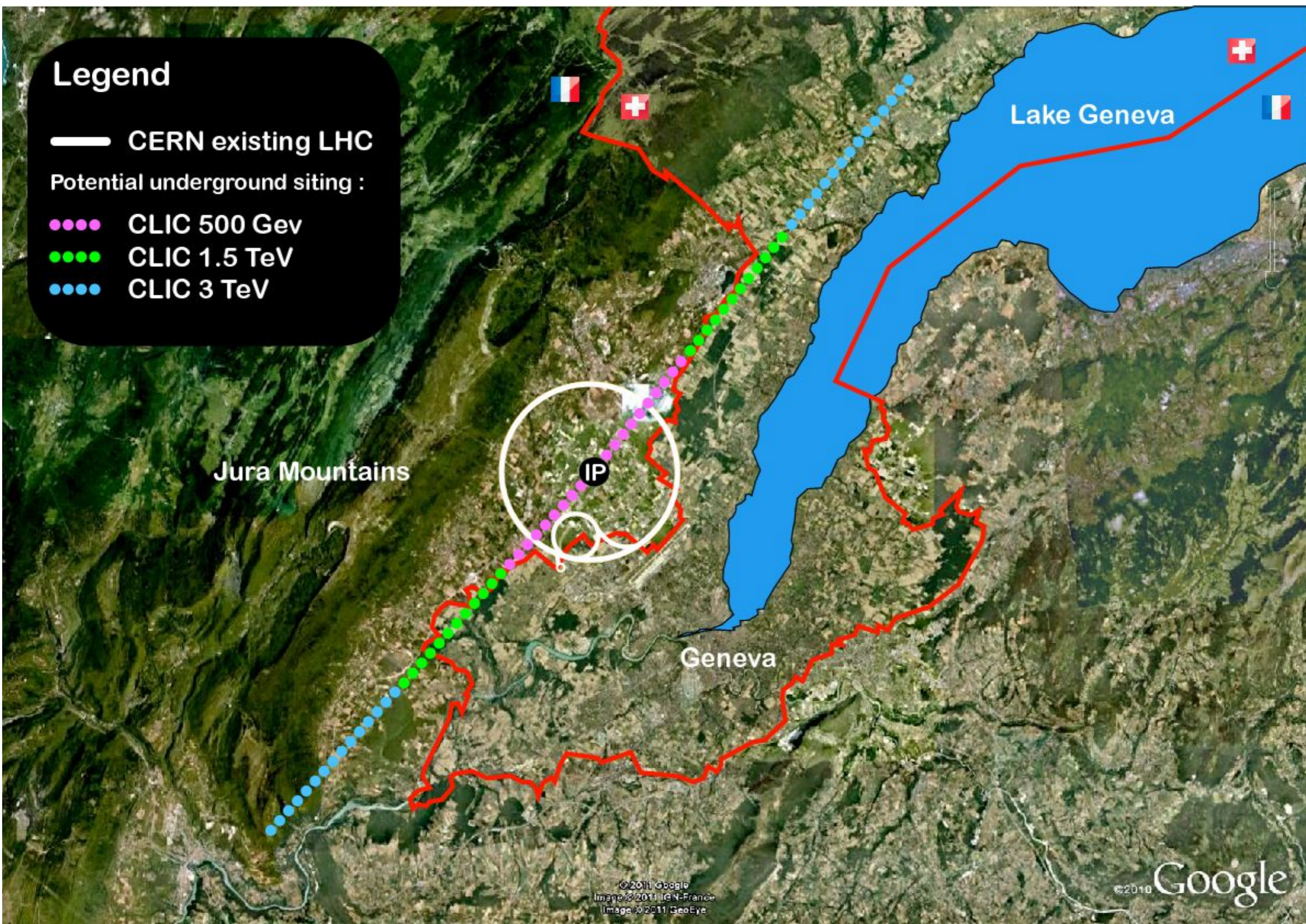
Cosmic acceleration

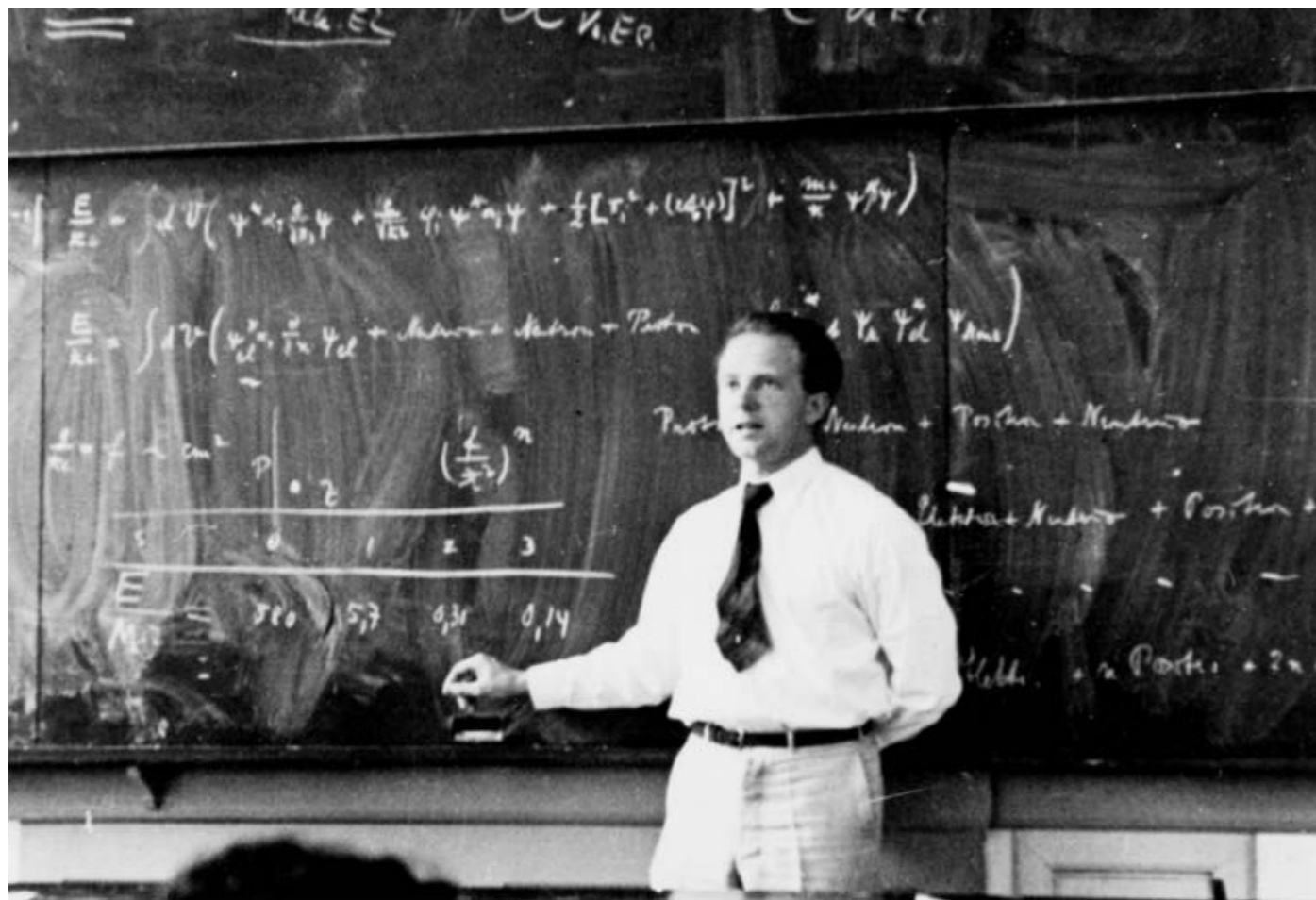


Explore the unknown

Kysymyksiä?

Varakalvot





Werner Heisenberg

Heisenbergin epätarkkuusperiaate:

tietyjen suureiden arvoja ei voi määrittää yhtä aikaa tarkasti –energiaa voi ”syntyä tyhjästä” lyhyeksi ajanhetkeksi!

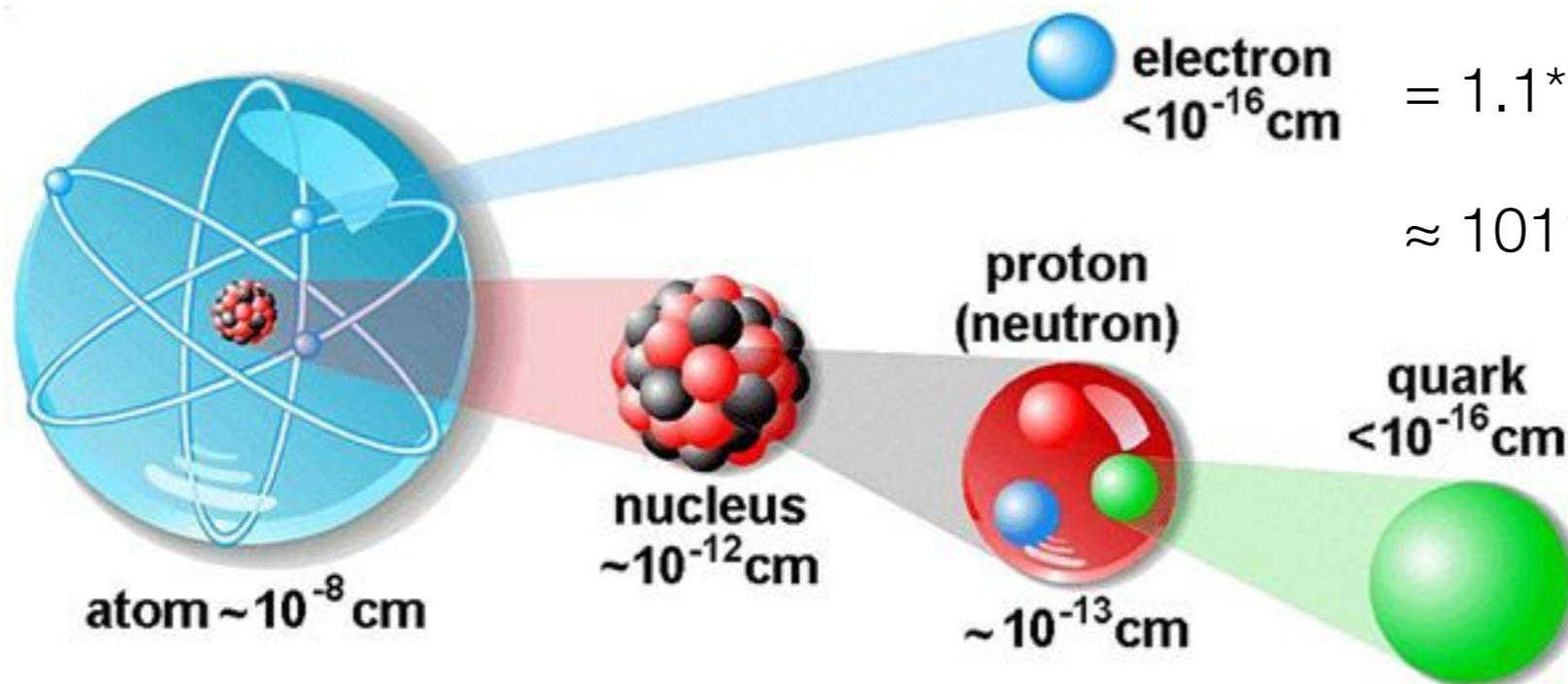
Harvinaiset hiukkaset ovat hyvin lyhytikäisiä (siksi ne ovat harvinaisia!)

Jos halutaan tutkia aineen pienimpiä osia, liikemäärän on oltava:

$$\Delta p \geq \hbar / (2\Delta x)$$

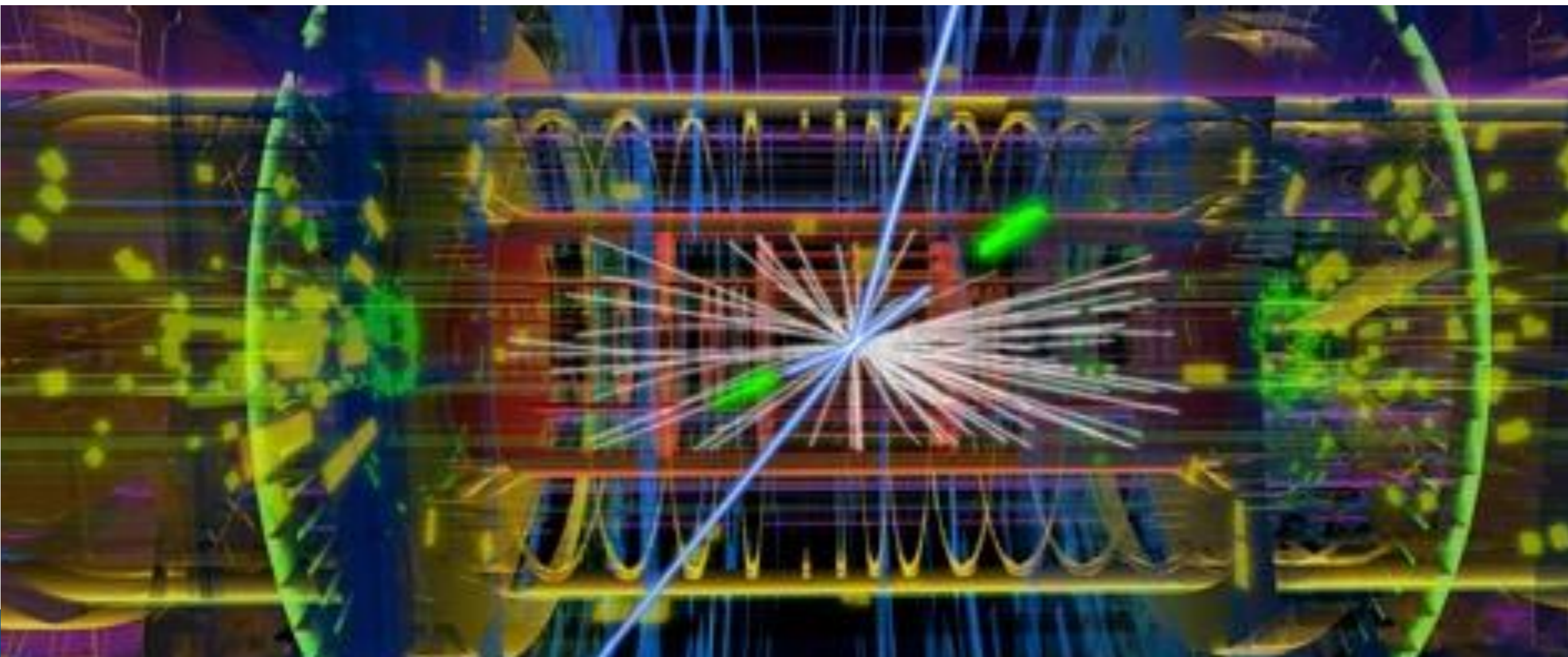
$$= 1.1 \cdot 10^{-34} \text{ eVs} / (2 \cdot 10^{-16} \text{ m})$$

$$\approx 10^{11} \text{ eV/c} = \mathbf{100 \text{ GeV/c}}$$



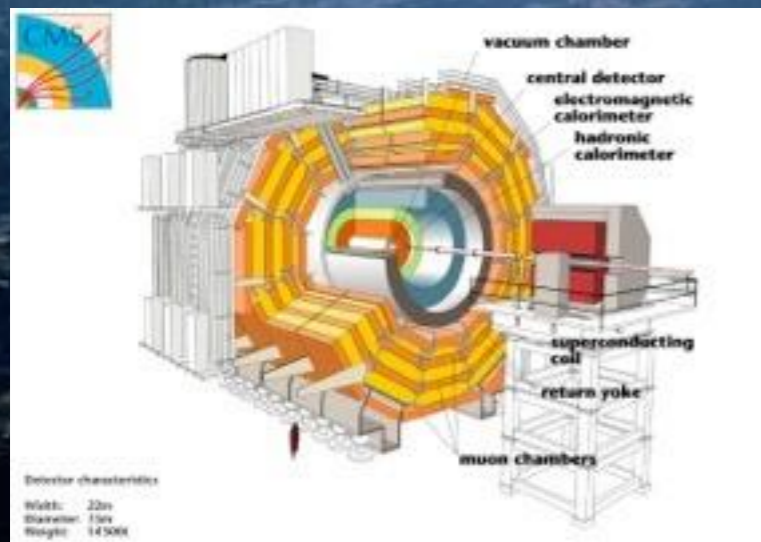
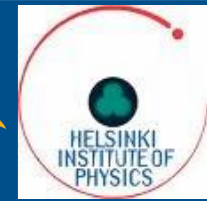
Mikäs olikaan LHC:n törmäys-energia..?

- 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 massa, **protoni-protoni-törmäyksessä** $2 \cdot E_{\text{suihku}}$
- Usein "sovitaan" että $c=1$ ja \rightarrow energiasta (GeV), liikemäärästä (GeV/c) ja massoista (GeV/c²) voi käyttää samaa energiayksikköä **GeV** (vastaa noin protonin massaenergiaa)



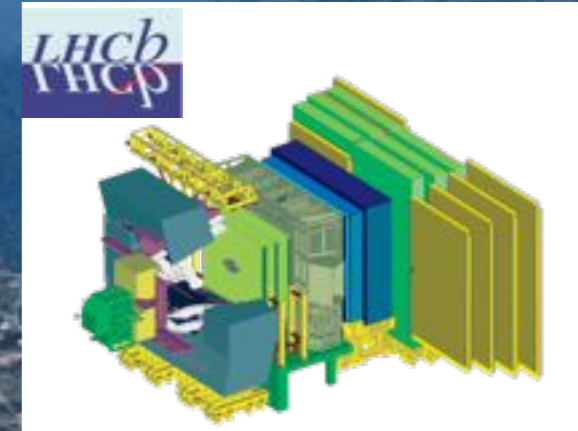


LHC:n koeasemat



CMS
+TOTEM

B-fysiikkaa
protoni-protoni
-törmäyksillä



LHCb
+MoEDAL

Yleisilmais
protoni-protoni ja
lyijy-lyijy -törmäyksille

SPS-törmäytin

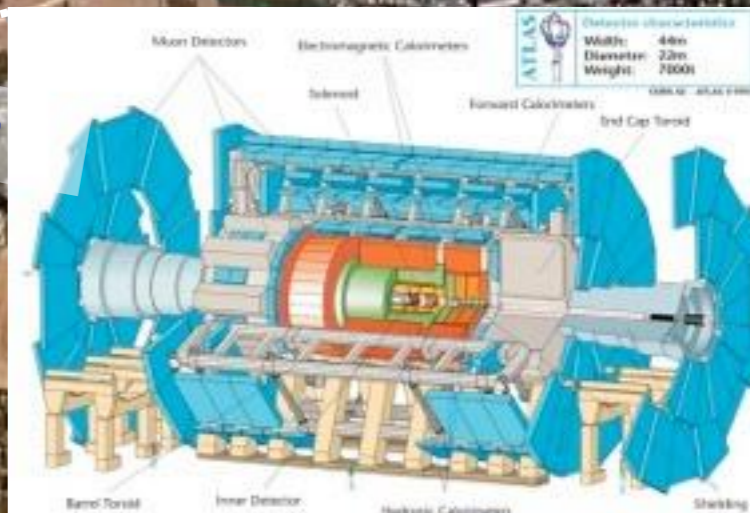
Raskasionifysiikkaa



ALICE

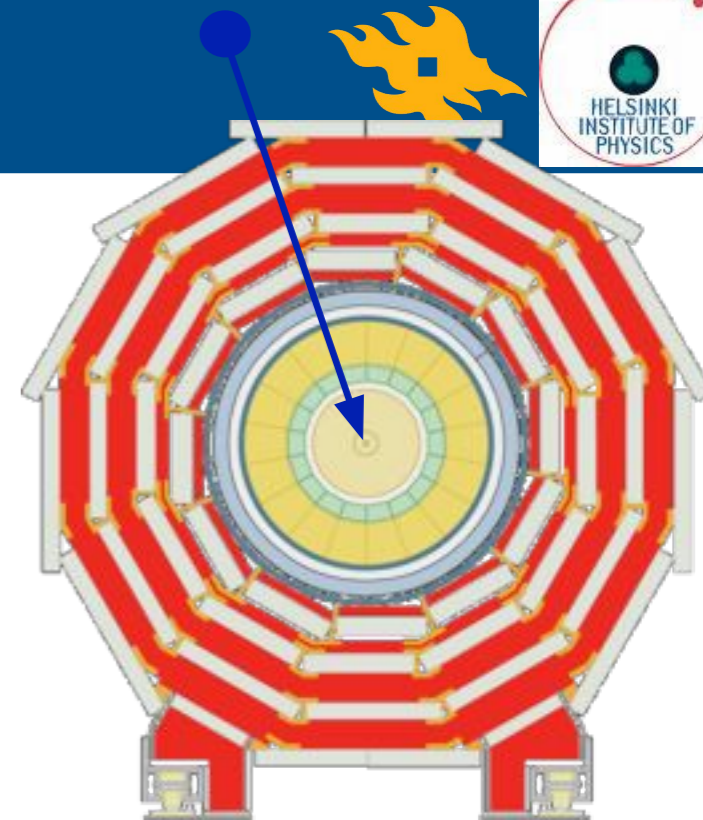
ATLAS
+LHCf

PS-törmäytin





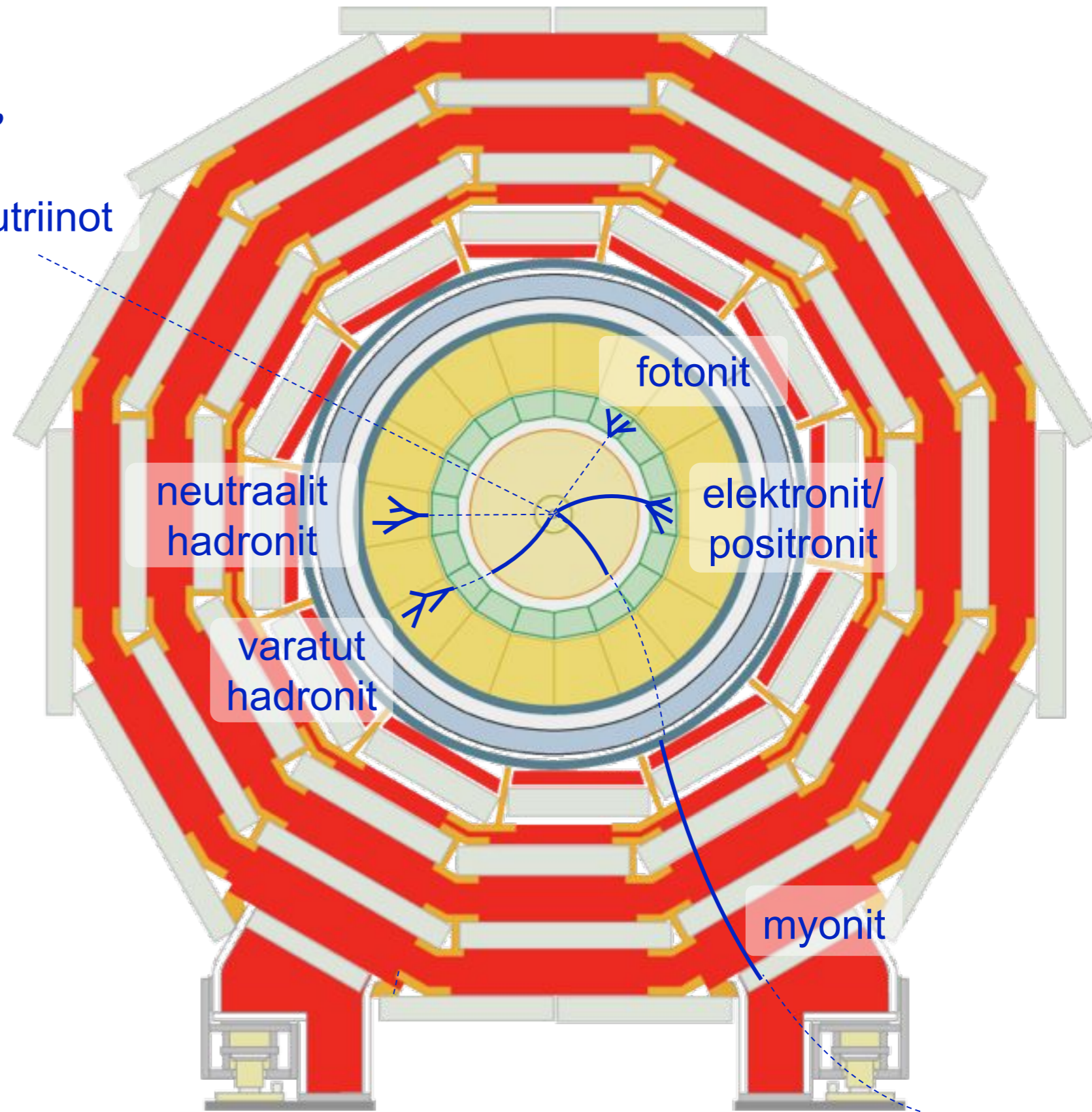
- Protonkimput (kussakin n. 10^{11} protonia) kulkevat koelaitteiston läpi ohuessa ($<1\text{mm}$) beryllium-putkessa, jonka sisällä on ~tyhjiö
- Törmäystuotteet lentävät yleensä vaivatta putken läpi
- Putkessa vastakkaisiin suuntiin liikkuvat protoni”rihmat” (*bunches*) kulkevat toistensa läpi n. $20\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

neutriinot



fotonit

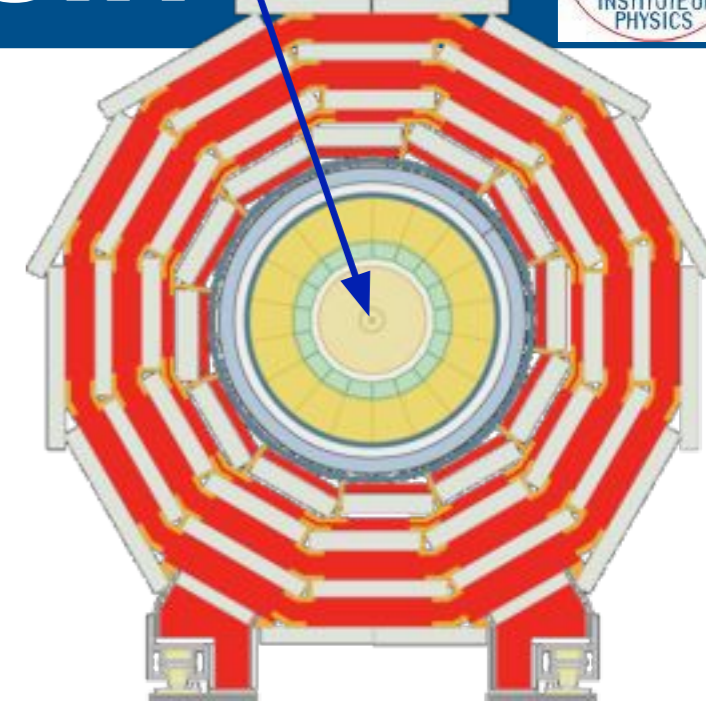
neutraalit hadronit

elektronit/positronit

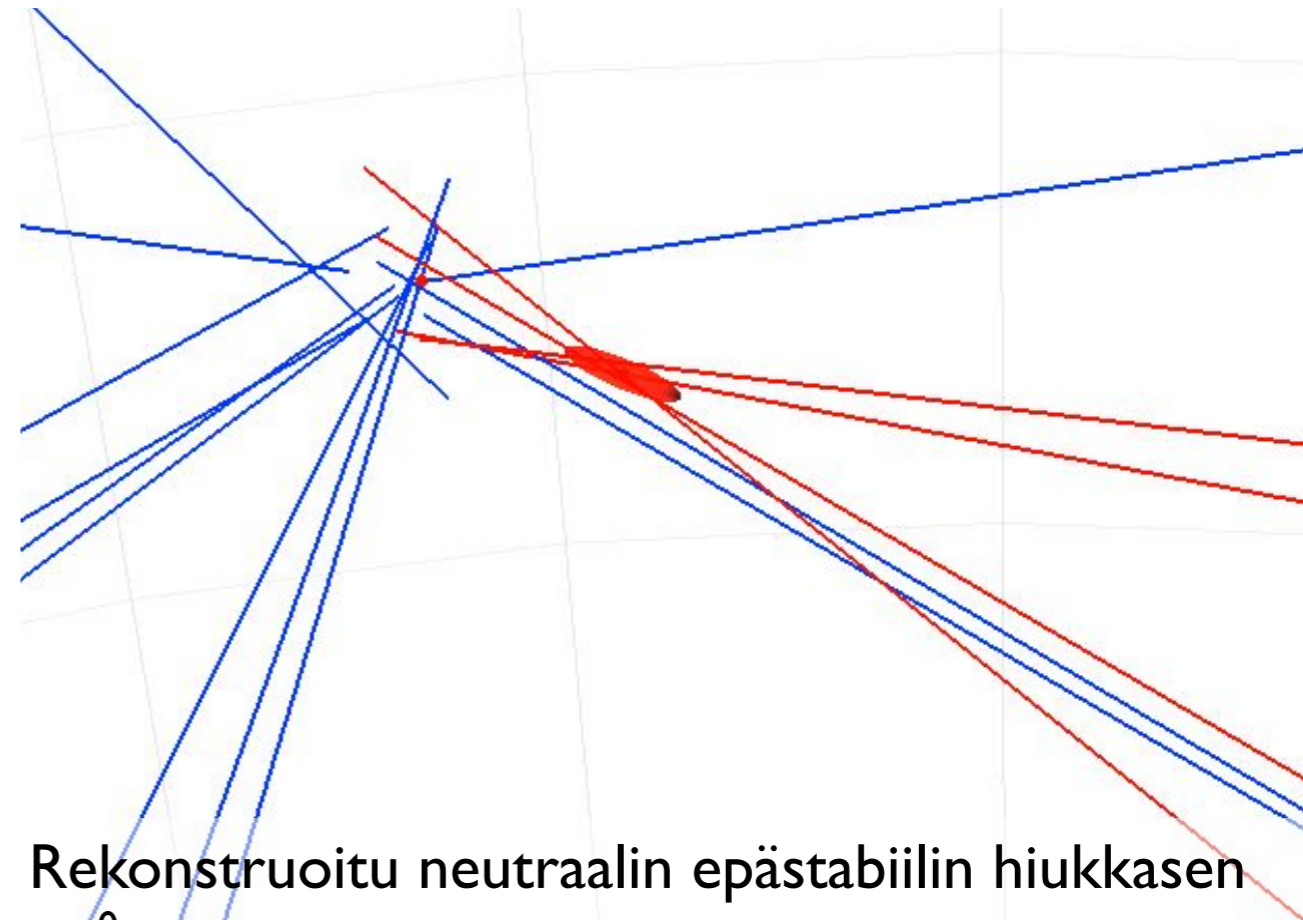
varatut hadronit

myonit

- 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

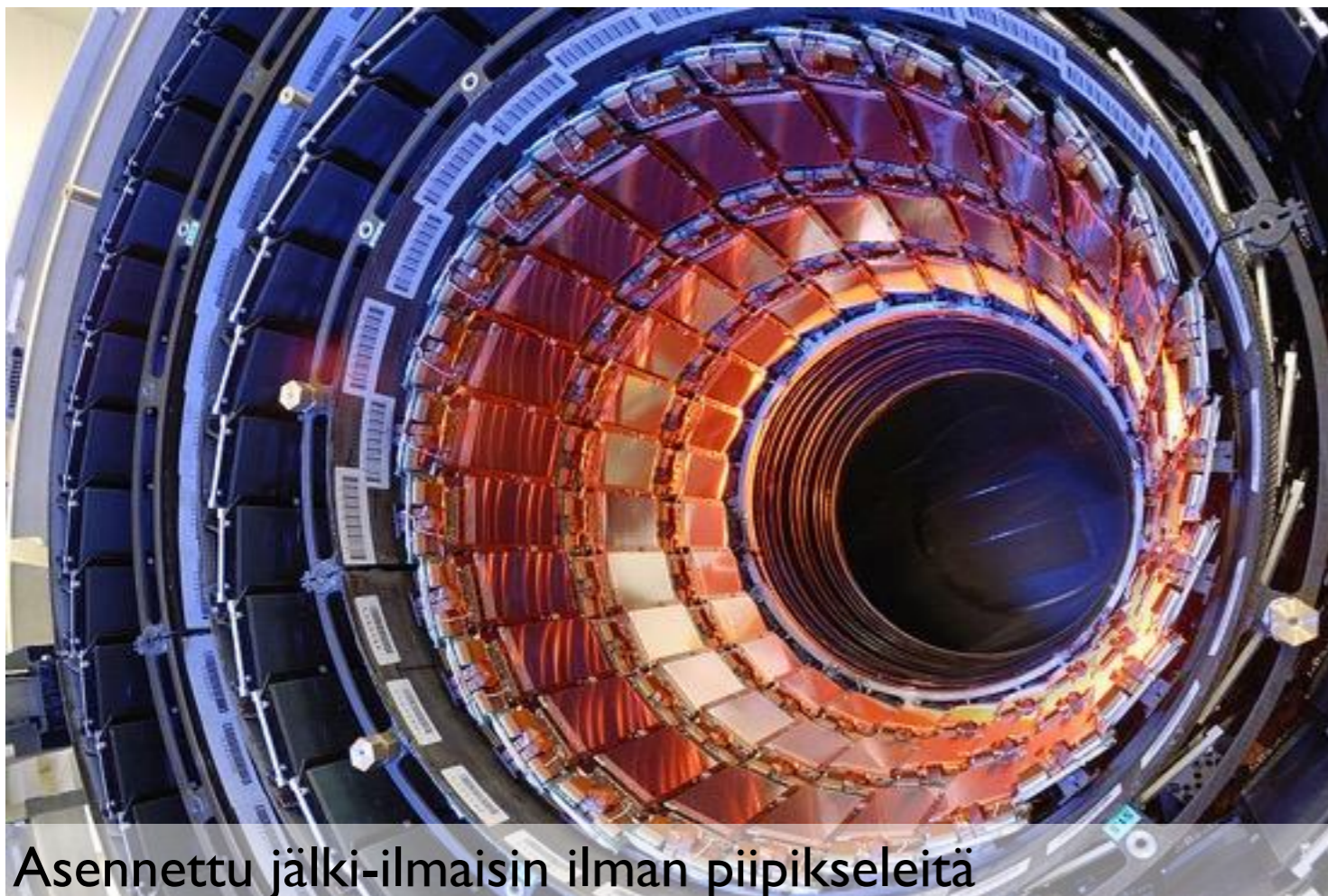
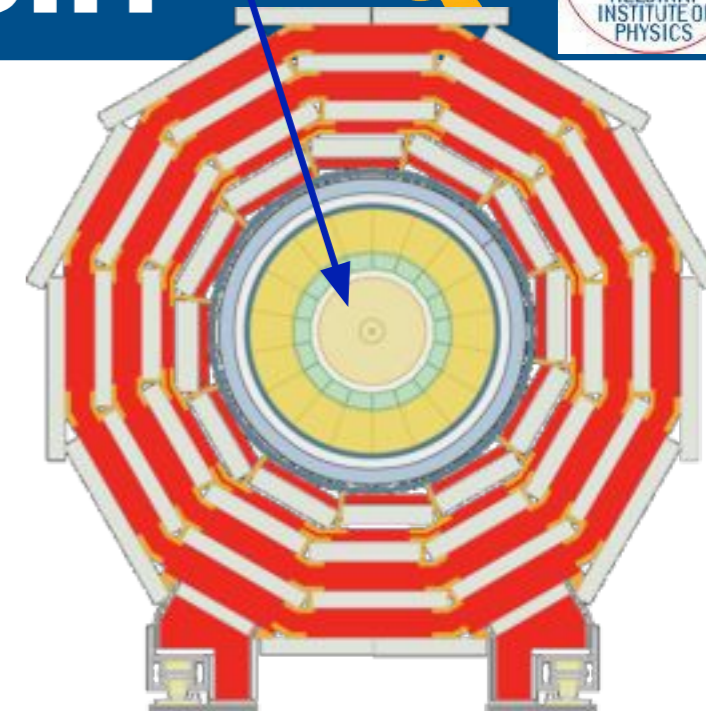


Puolikas piipikselimoduuli

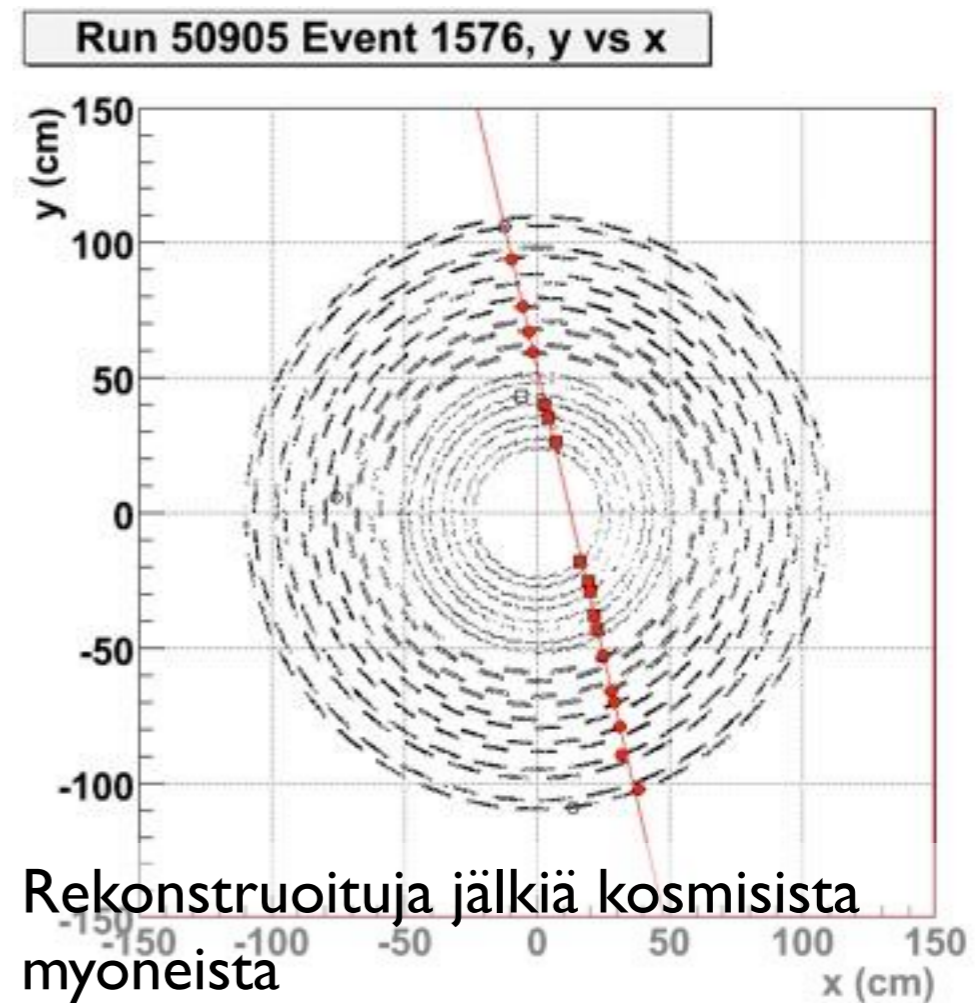


Rekonstruoitu neutraalin epästabiilin hiukkasen (D^0) hajoamispiste

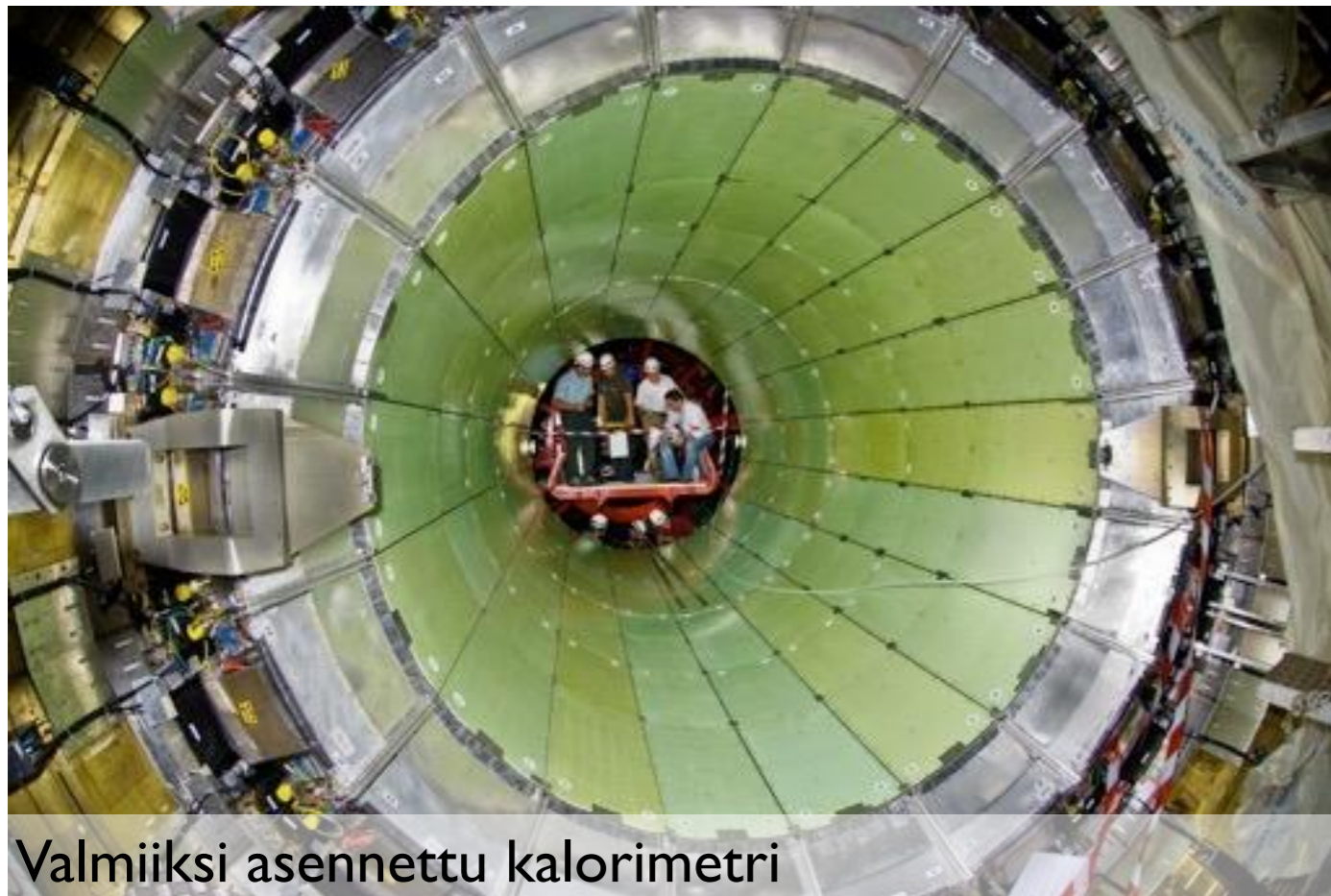
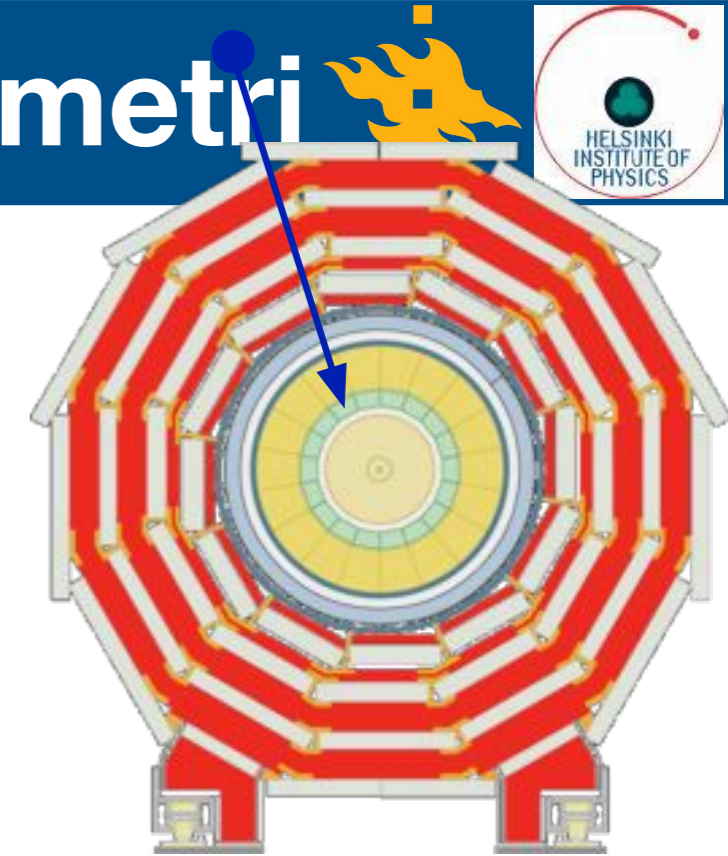
- Ulompi osa jälki-ilmaisimesta: piinauhailmaisimia
 - N. miljoona pii”nauhaa”; n. 200 m² piitä
 - Varatut hiukkaset tuottavat piissä elektroni-aukkopareja
 - Mittaa varattujen hiukkasten jälkiä n. 10 μm tarkkuudella, ~10 mittauspistettä kullekin radalle
 - Signaali perustuu ionisaatioon: hiukkanen irrottaa atomien elektroneja



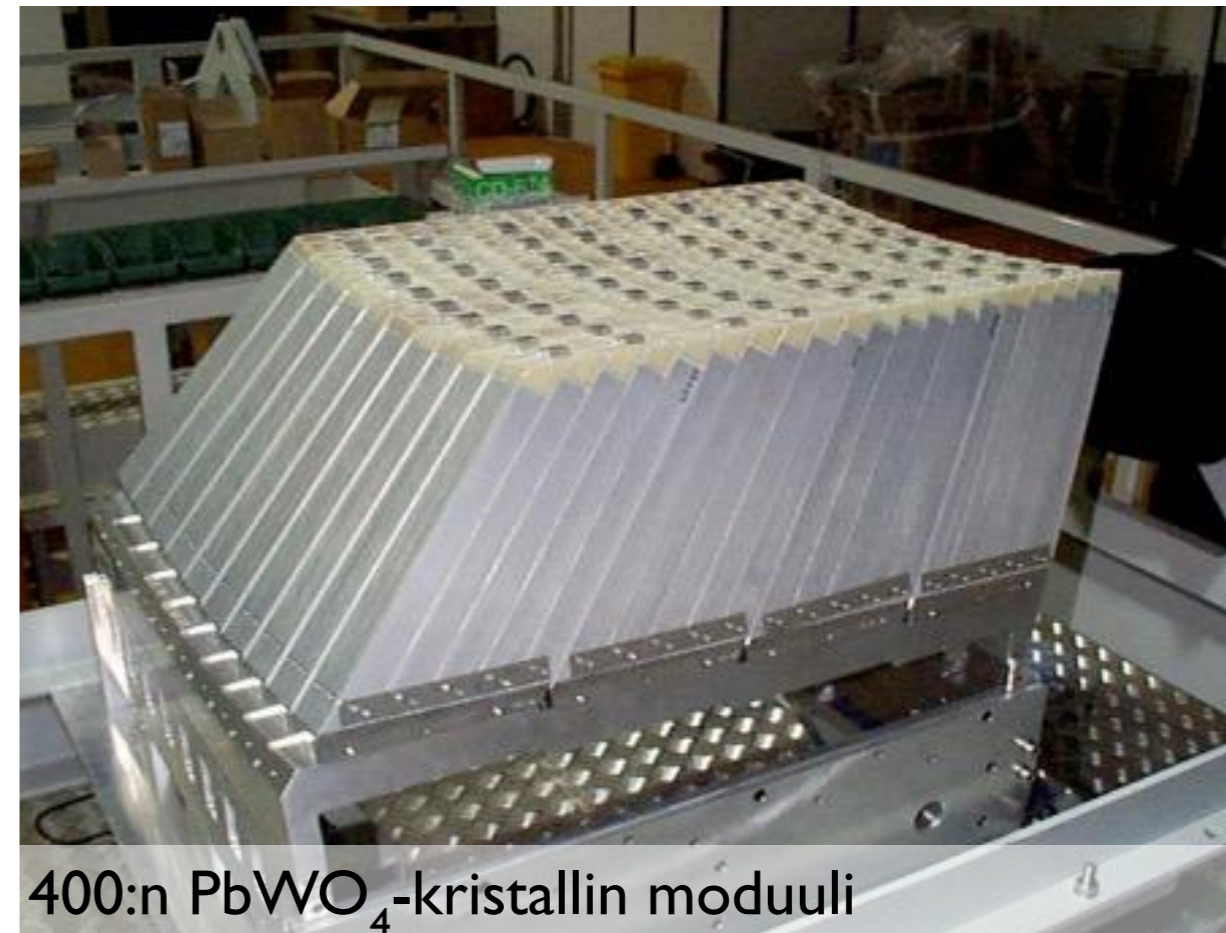
Asennettu jälki-ilmaisimien ilman piipikseleitä



- N. 80.000 PbWO_4 (lyijyvolframaatti)kristallia
- Pysäyttää elektroneit/positroneit sekä fotonit
- Signaali perustuu tuikevaloon: hiukkanen virittää atomeita, viritystilan purkautuminen tuottaa fotonin, valon kokonaismäärä verrannollinen hiukkasen energiaan
- Valo johdetaan valonmonistimiin, jotka muuttavat signaalin sähköiseksi



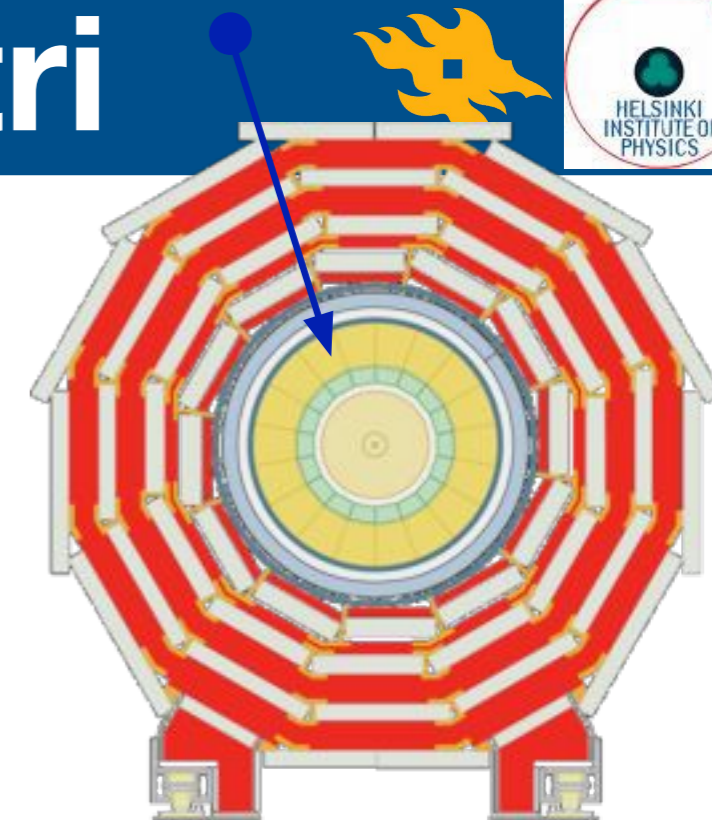
Valmiiksi asennettu kalorimetri



400:n 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

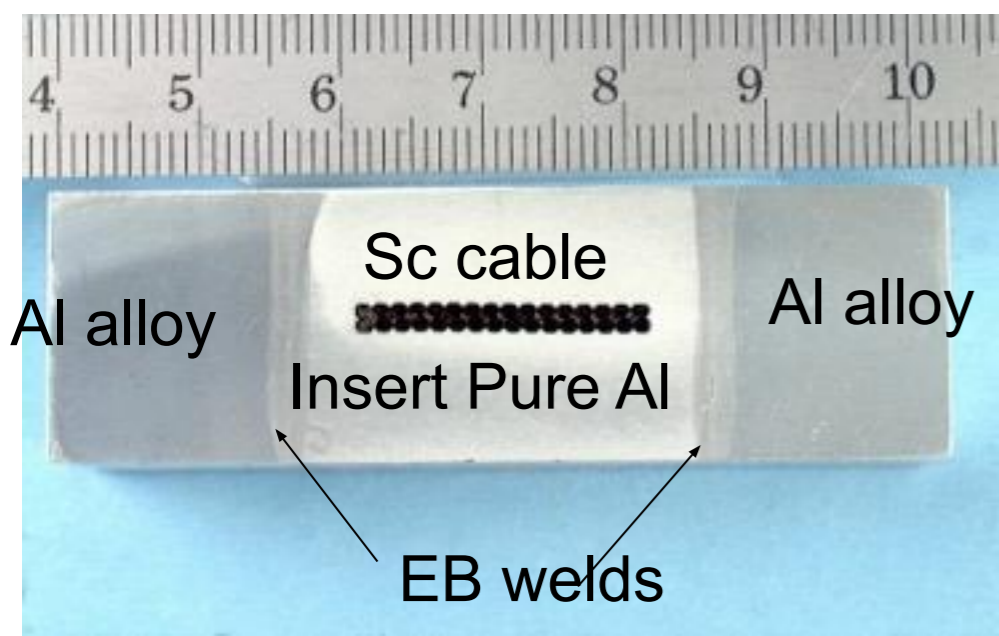
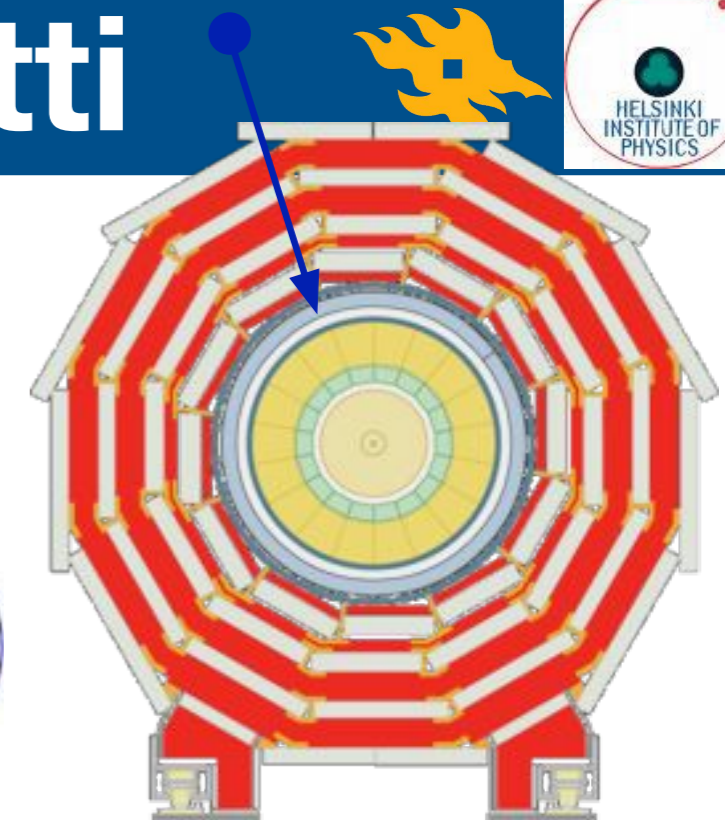


Valmiiksi koottu kalorimetri

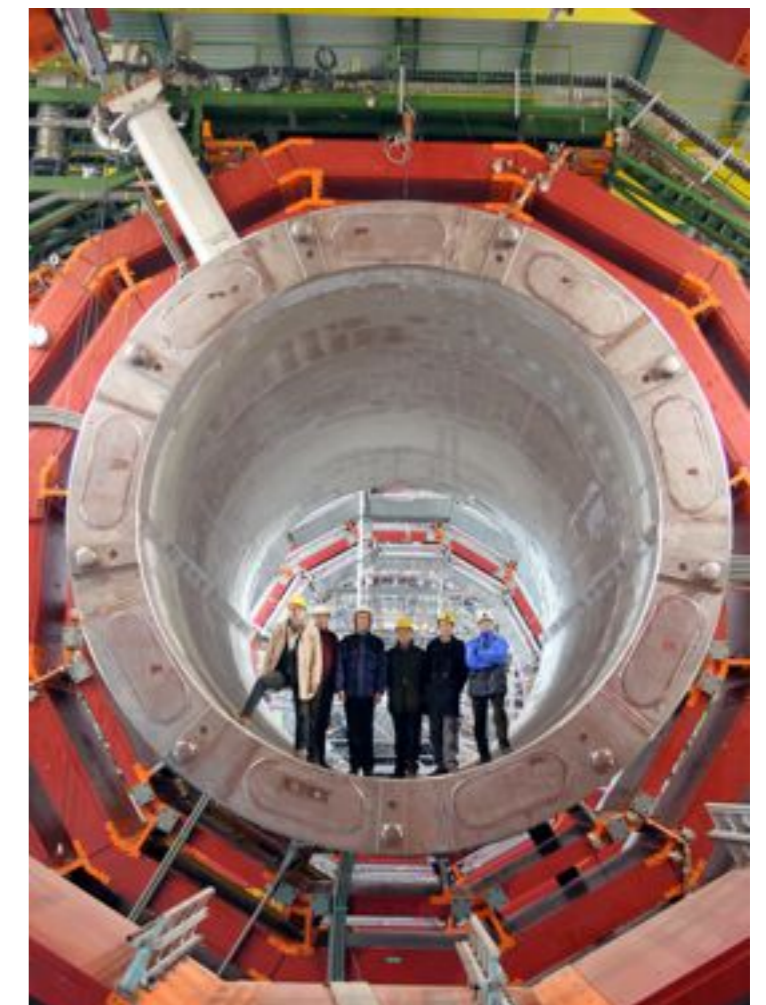


Kierrätettyä messinkiä Venäjän laivastolta

- 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

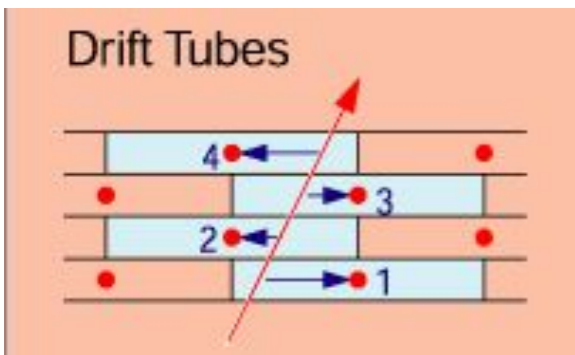
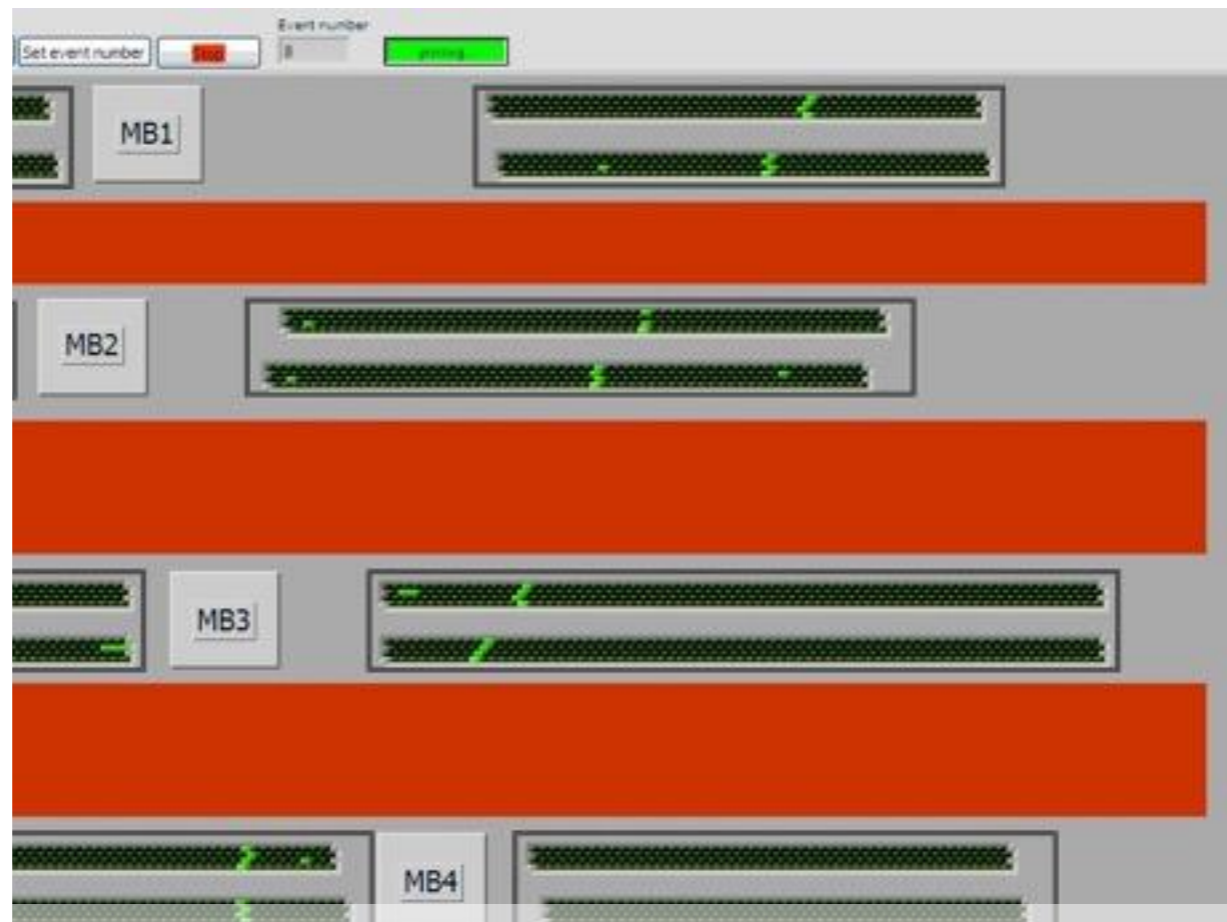
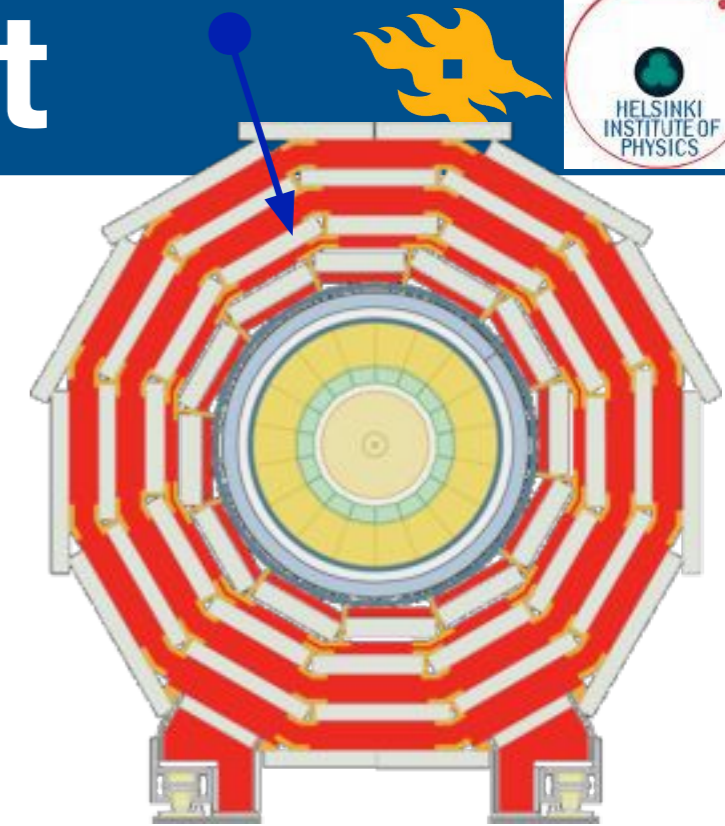


Mallikappale käämityksestä



Asennettu magneetti

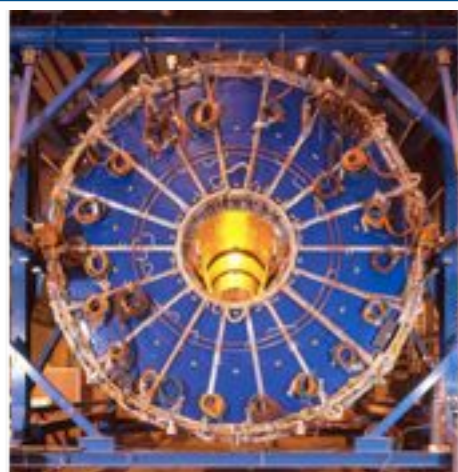
- Kolme eri ilmaisinteknologiaa
 - perustuu myonin aiheuttamaan ionisaatioon
 - n. miljoona mittauskanavaa
 - n. 25000 m² mittauspinta-alaa
- Mahdollistaa myoneiden tunnistamisen sekä niitä sisältävien törmäysten nopean valinnan



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

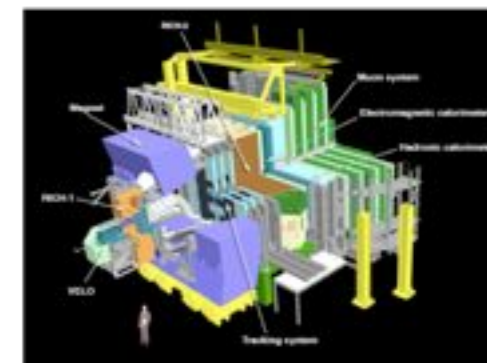
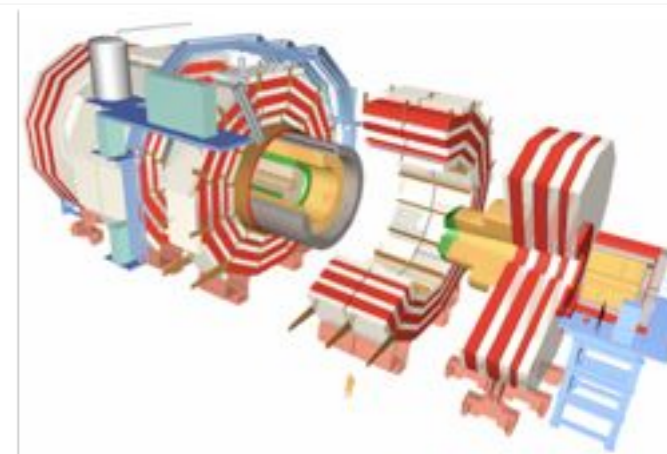
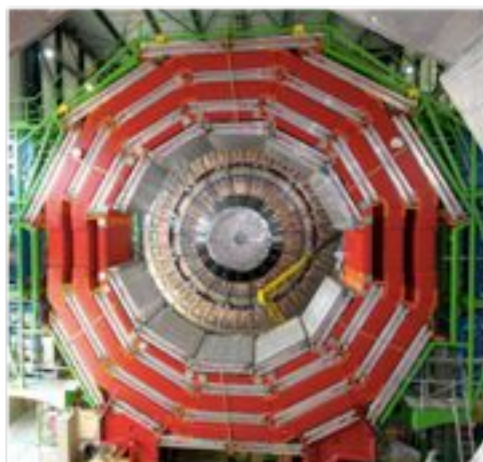
Compact Muon Solenoid

Yleiskäyttöinen ilmaisim. Loistava fotonikalorimetri, suuri magneetti, myonikammiot

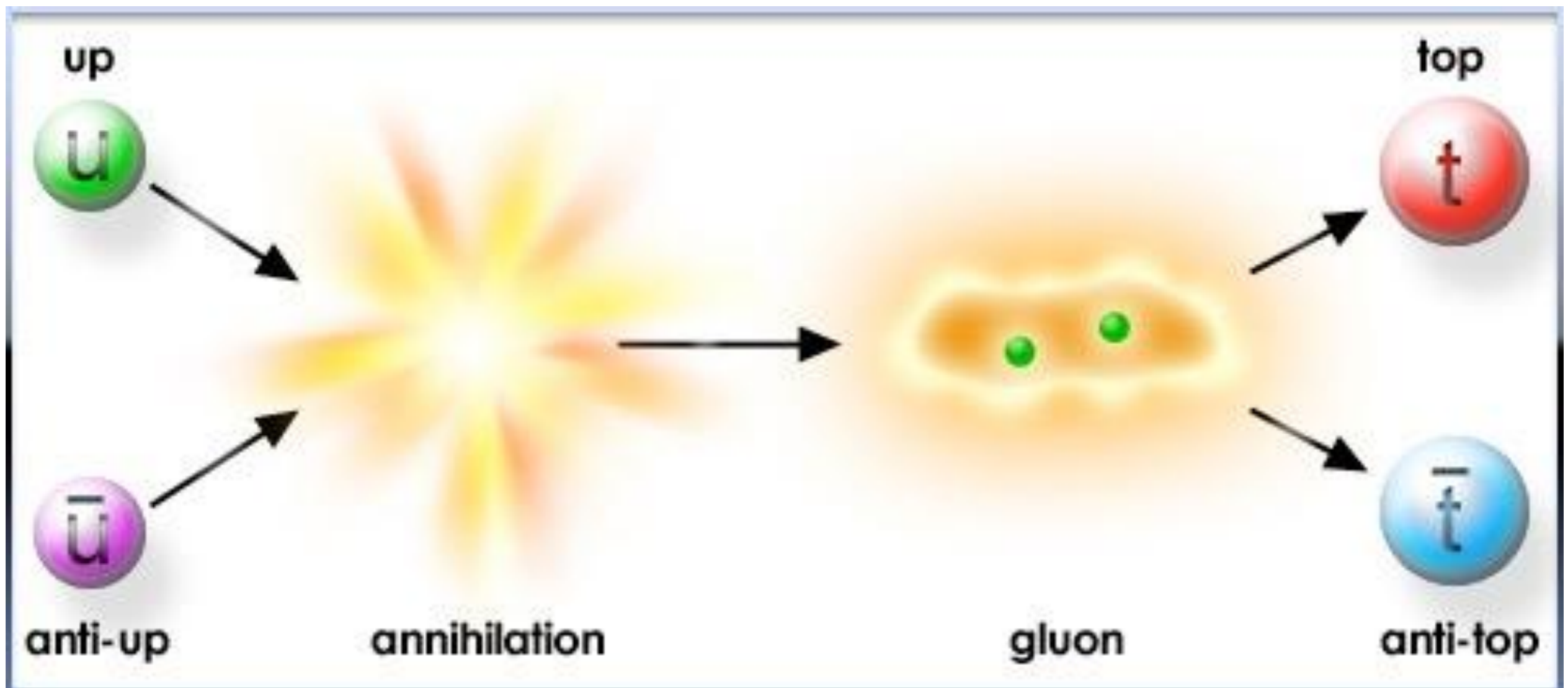
RASKAIN

LHC Beauty Experiment

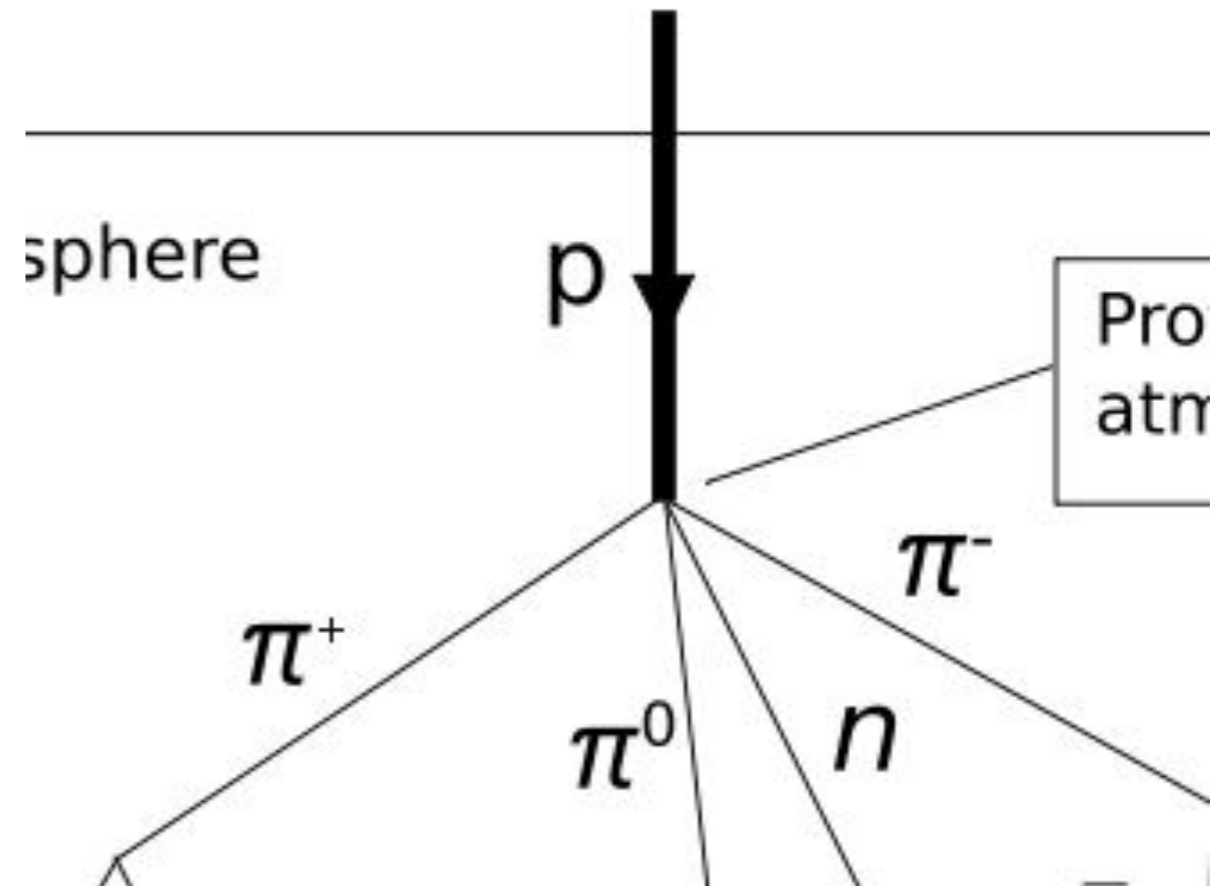
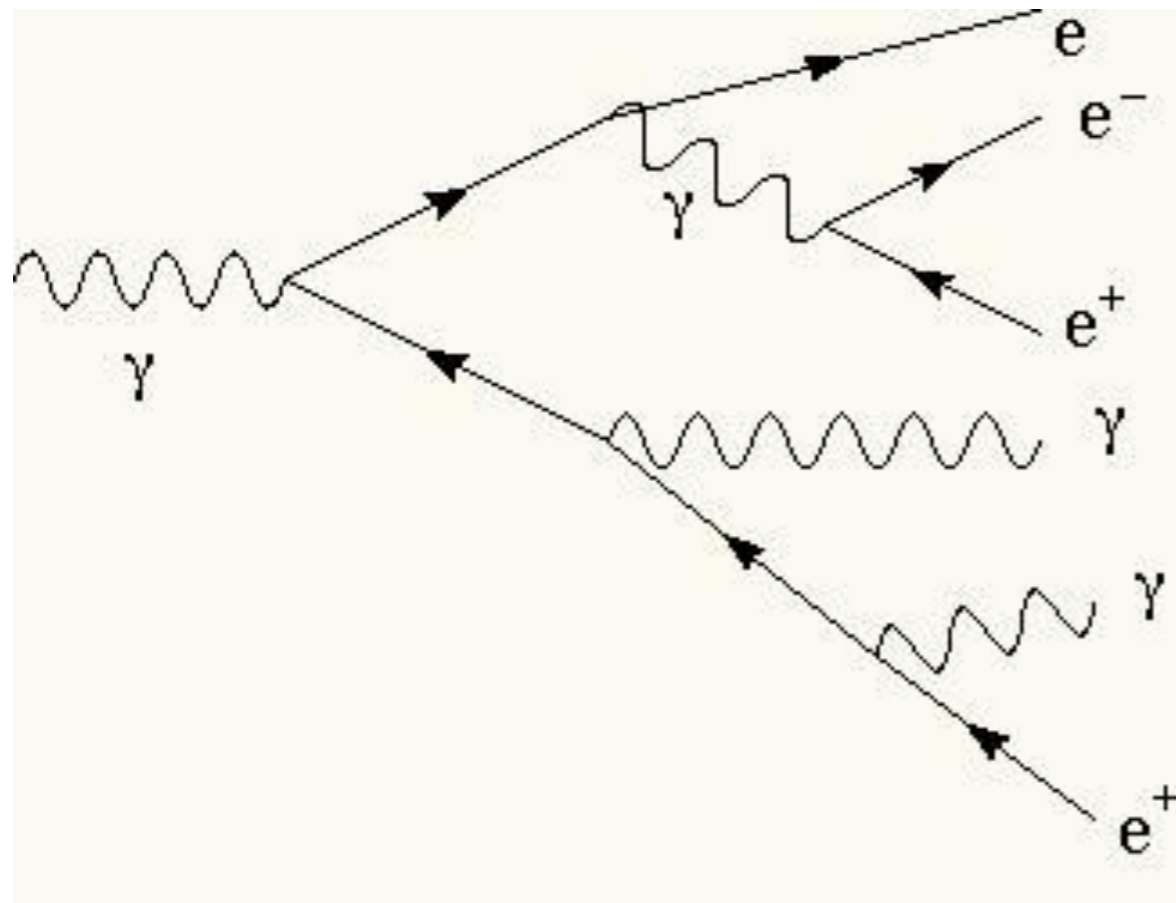
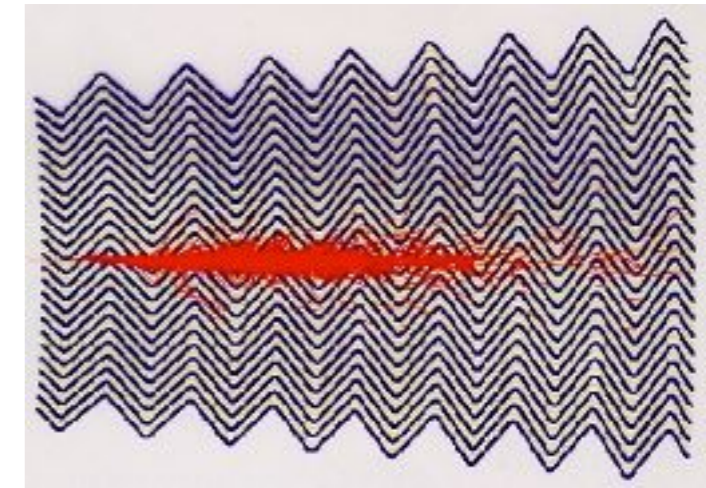
Tutkii b-kvarkkien (beauty, bottom) fysiikkaa, aine-antiaine-symmetriaa (CP-symmetriarikko) PIENIN



- 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 antihiukkanen kohtaavat, syntyy puhdasta energiaa



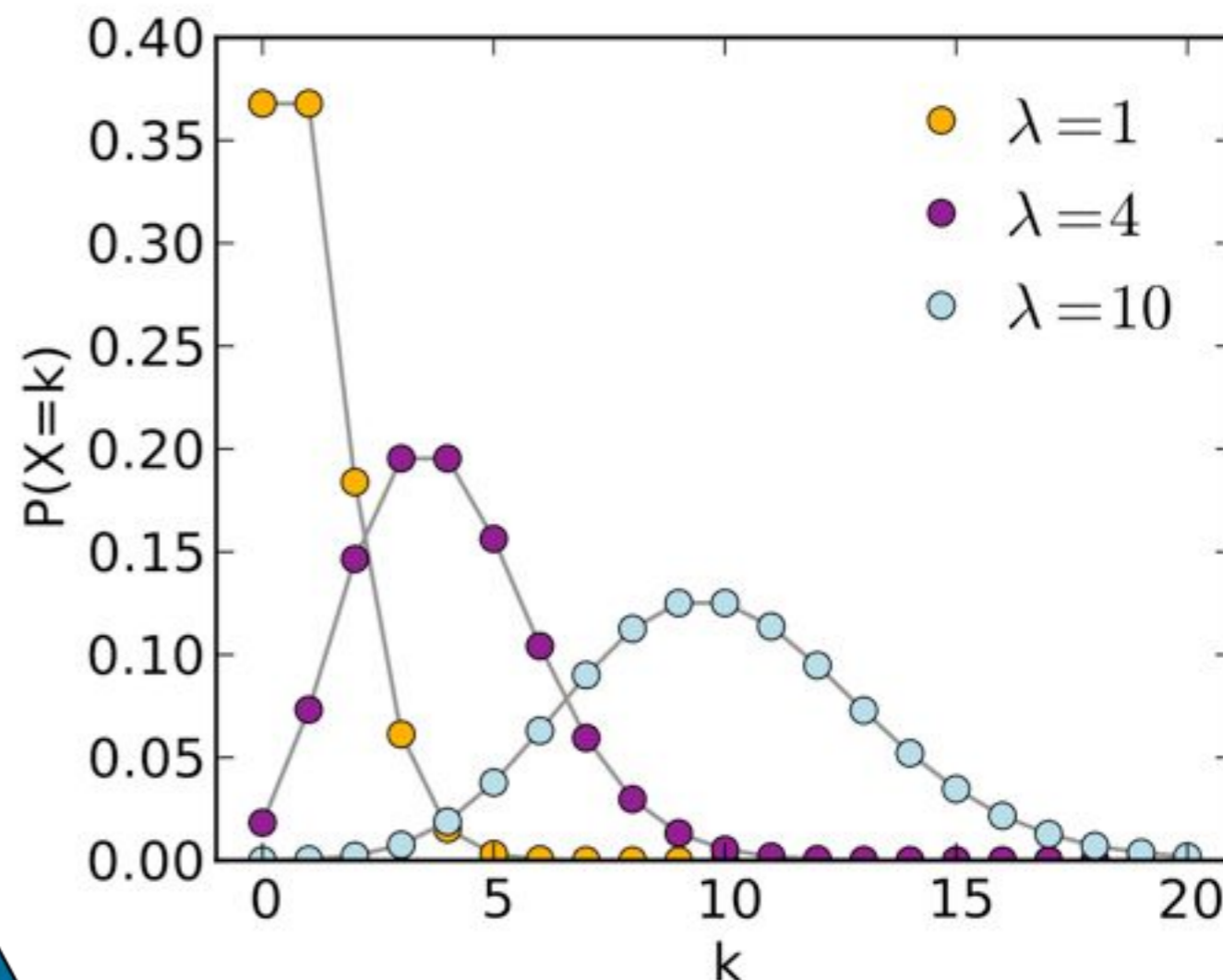
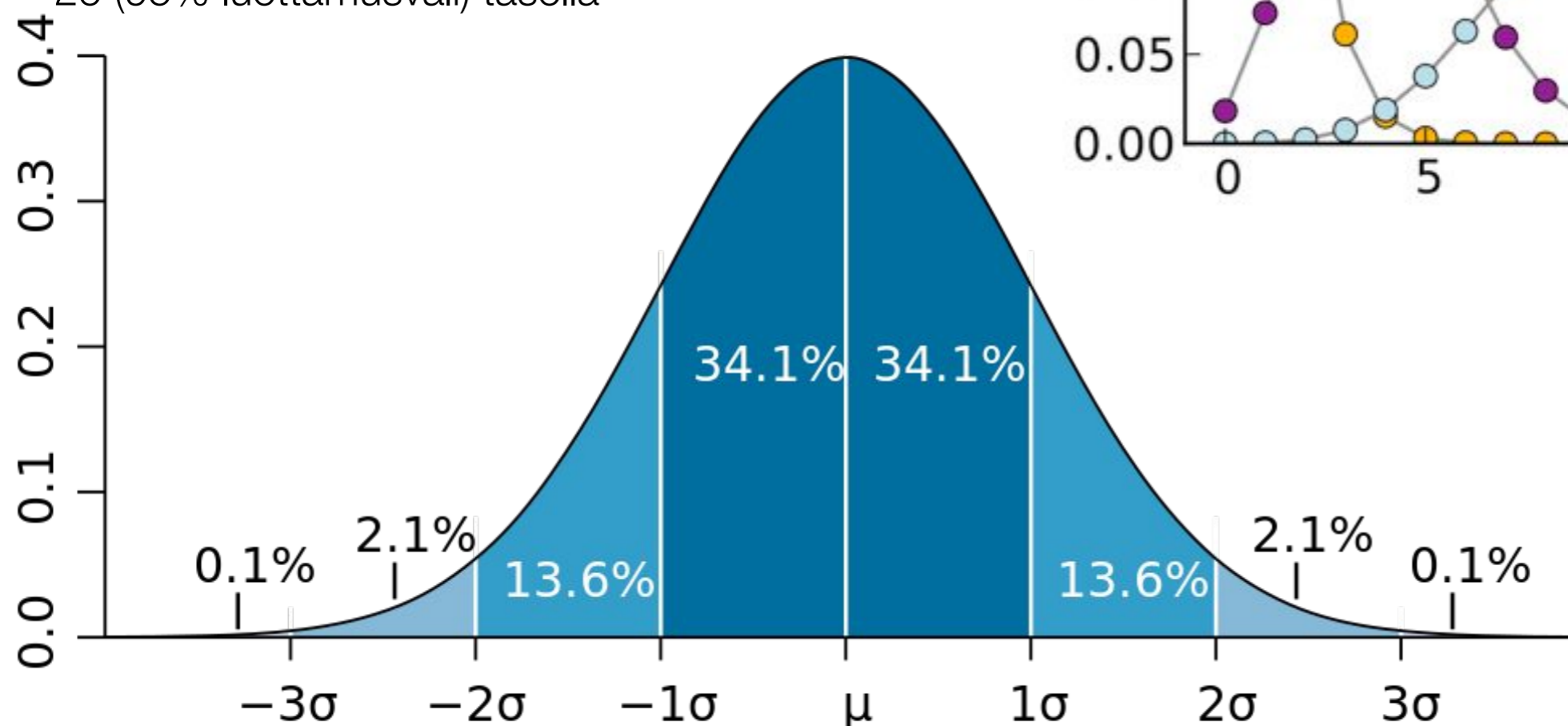
- Kalorimetreissä primäärihiukkanen tuottaa kuuron sekundäärihiukkasia:
 - **sekundäärihiukkasia** syntyy niin kauan kuin energiaa riittää niiden tuottoon
 - **sähkömagneettinen kuuro**, n. 2 cm x 20 cm
 - **jarrutussäteily** ja e^+e^- -**parintuotto** ytimen sähkökentässä vuorottelevat
 - jarrutussäteily 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



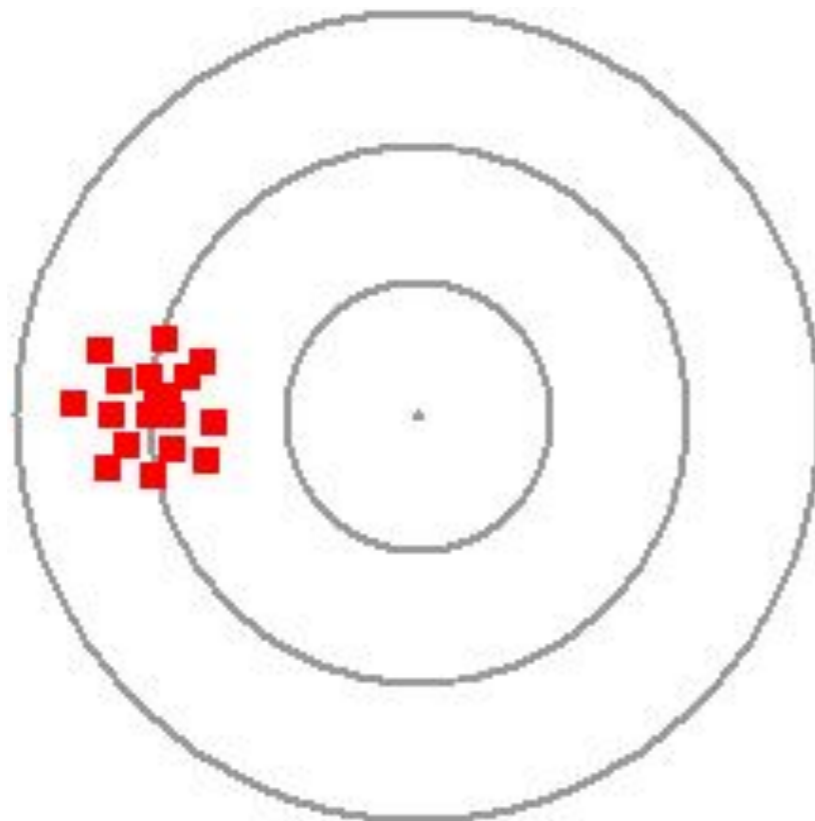
- a) Kuinka Higgsin bosoni voi hajota kahteen W tai Z bosoniin, vaikka sen massa on alle puolet näiden massoista?
 - $m_H = 125 \text{ GeV}$, $m_Z = 91.2 \text{ GeV}$, $m_W = 80.4 \text{ GeV}$
 - Vastaus: kvanttimekaniikassa lyhytikäisten Z ja W bosonien massa ei ole tarkkaan määrätty, vaan niillä on 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** ($\Delta E \times \Delta t < \hbar$)



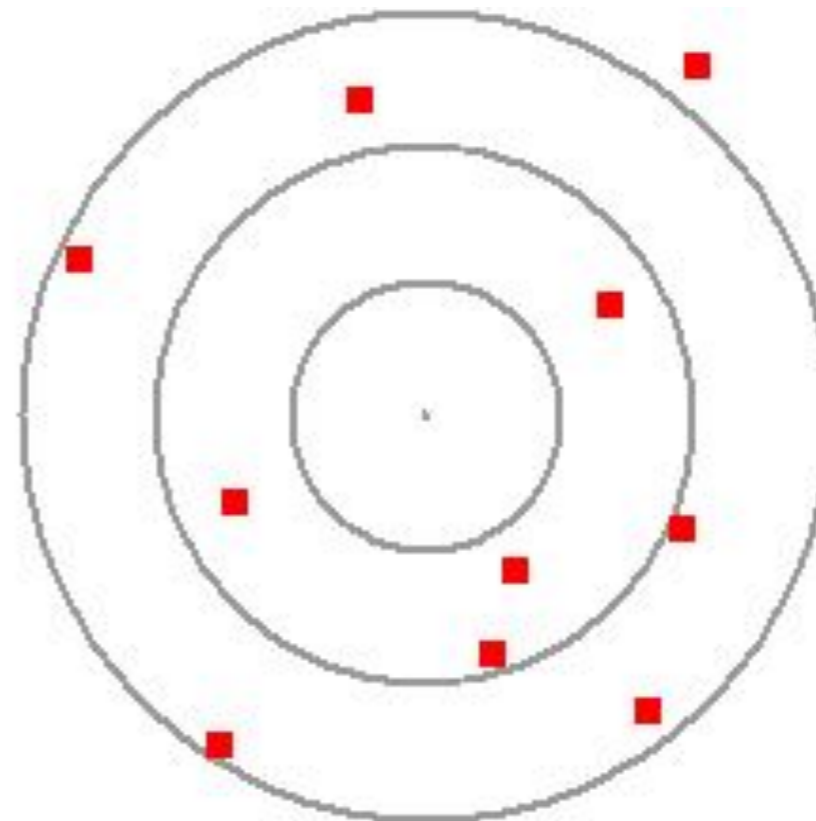
- Tapahtumien (eventtien) lukumäärät ovat yleensä **Poisson-jakautuneita**
 - keskihajonta N tapahtumalle on tällöin \sqrt{N}
 - lähestyy suurilla N normaalijakaumaa, jossa $\mu=N$ ja $\sigma=\sqrt{N}$
- Systemaattiset virheet ovat yleensä **normaalijakautuneita** (Gaussin jakauma)
 - Ilmoitetaan tyypillisesti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



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



Systematic Error



Random Error

- 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

