

Hiukkasfysiikan kokeet

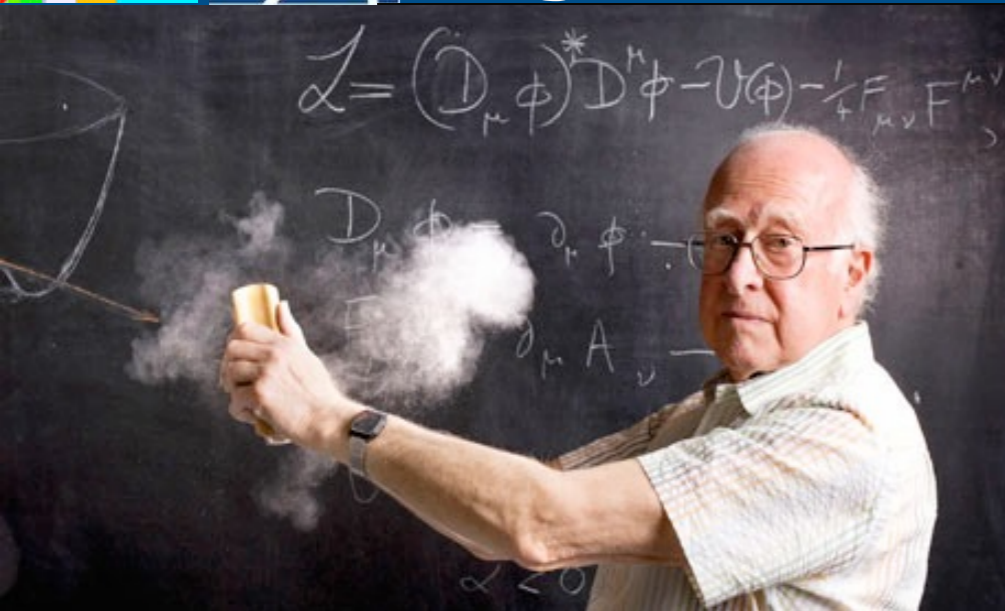


Kati Lassila-Perini

Helsingin yliopisto

Fysiikan tutkimuslaitos (HIP)

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



Teoria

Kokeet



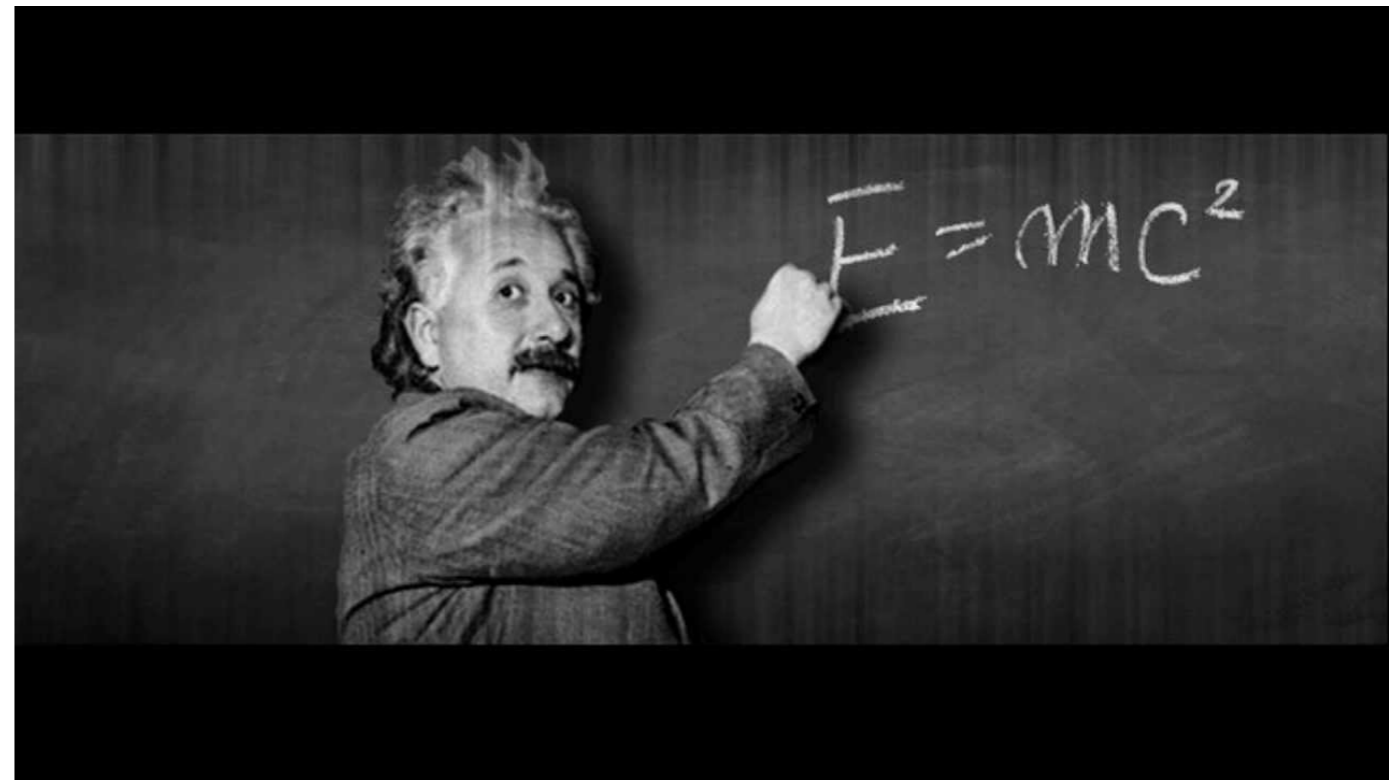
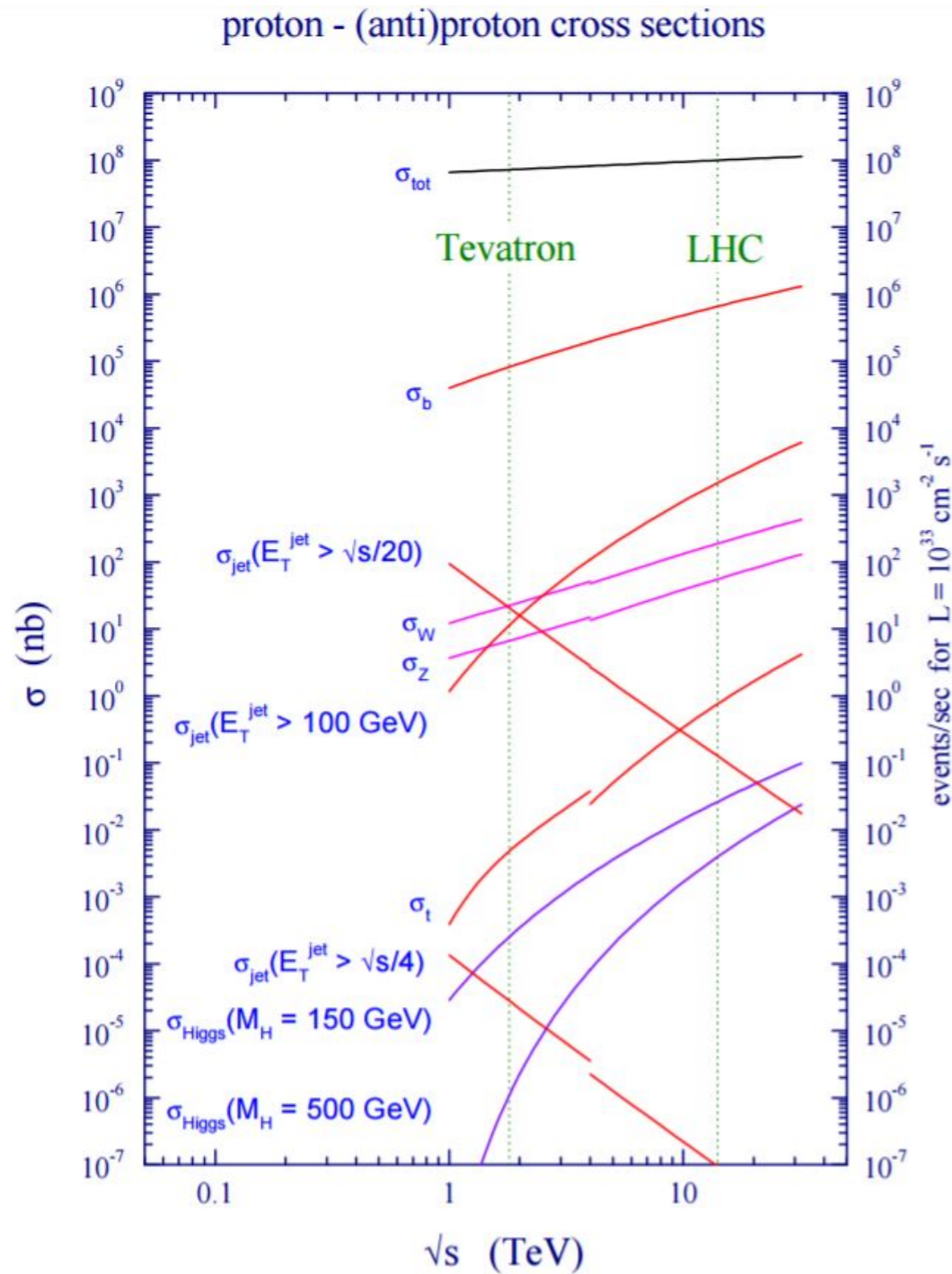
1. Hiukkaskiihdyttimet
2. Ilmaisimet
3. Data-analyysi

Osa 1: Hiukkaskiihdyttimet



Hiukkasten...

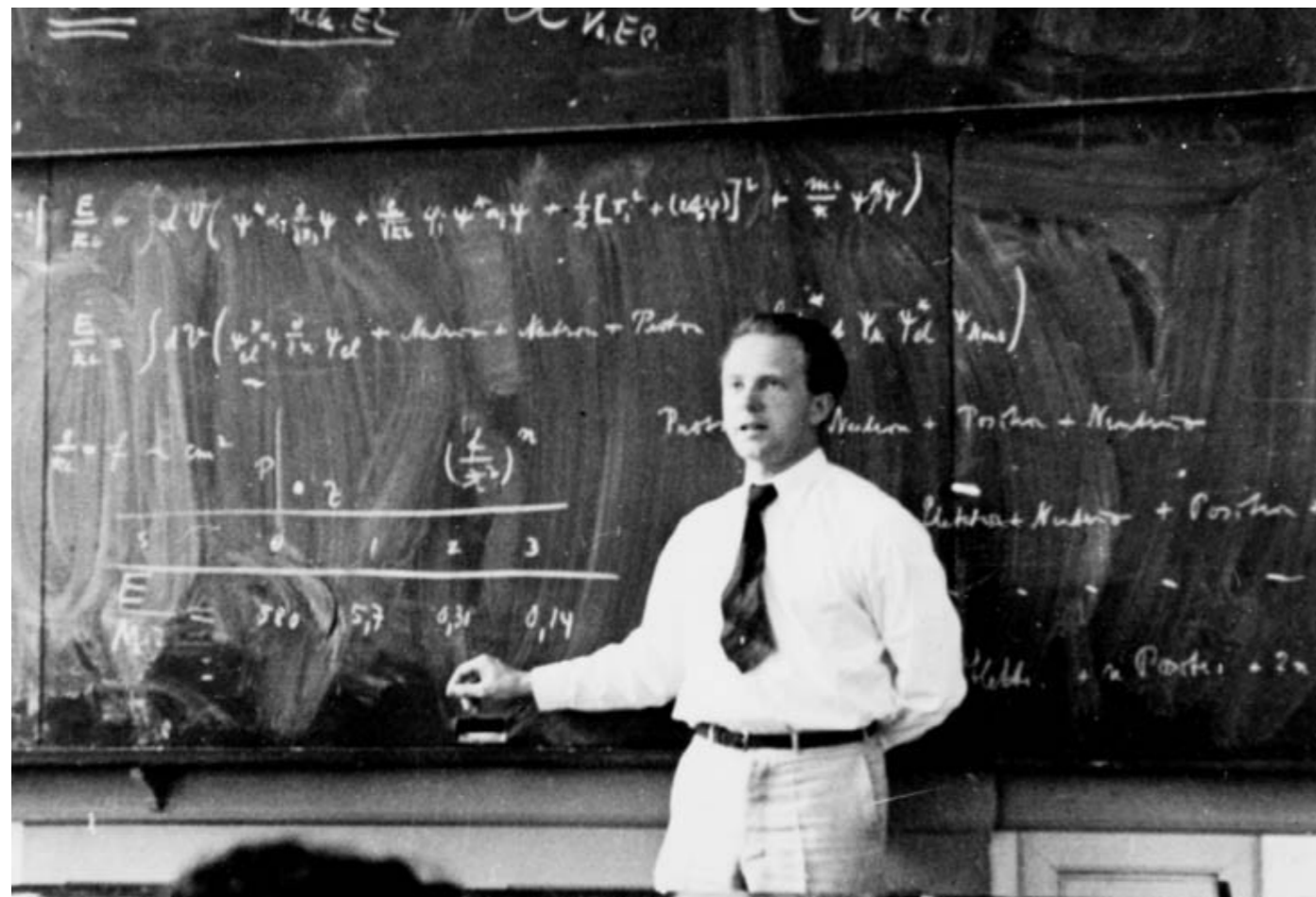
- 1) kiihdyttäminen
- 2) radan kääntäminen
- 3) fokusoiminen
- 4) törmäyttäminen



Hiukkastörmäyksissä protonien liike-energiaa muuttuu uusiksi, harvinaisemmiksi hiukkasiksi

Uusia voi syntyä hiukkasia monenlaisia ja vieläpä erilaisten prosessien kautta

← Eri prosessien todennäköisyyttä kuvaa vuorovaikutusala (σ , pystyakselilla), joka riippuu energiasta (“center-of-mass energy”, vaaka-akselilla)



Werner Heisenberg

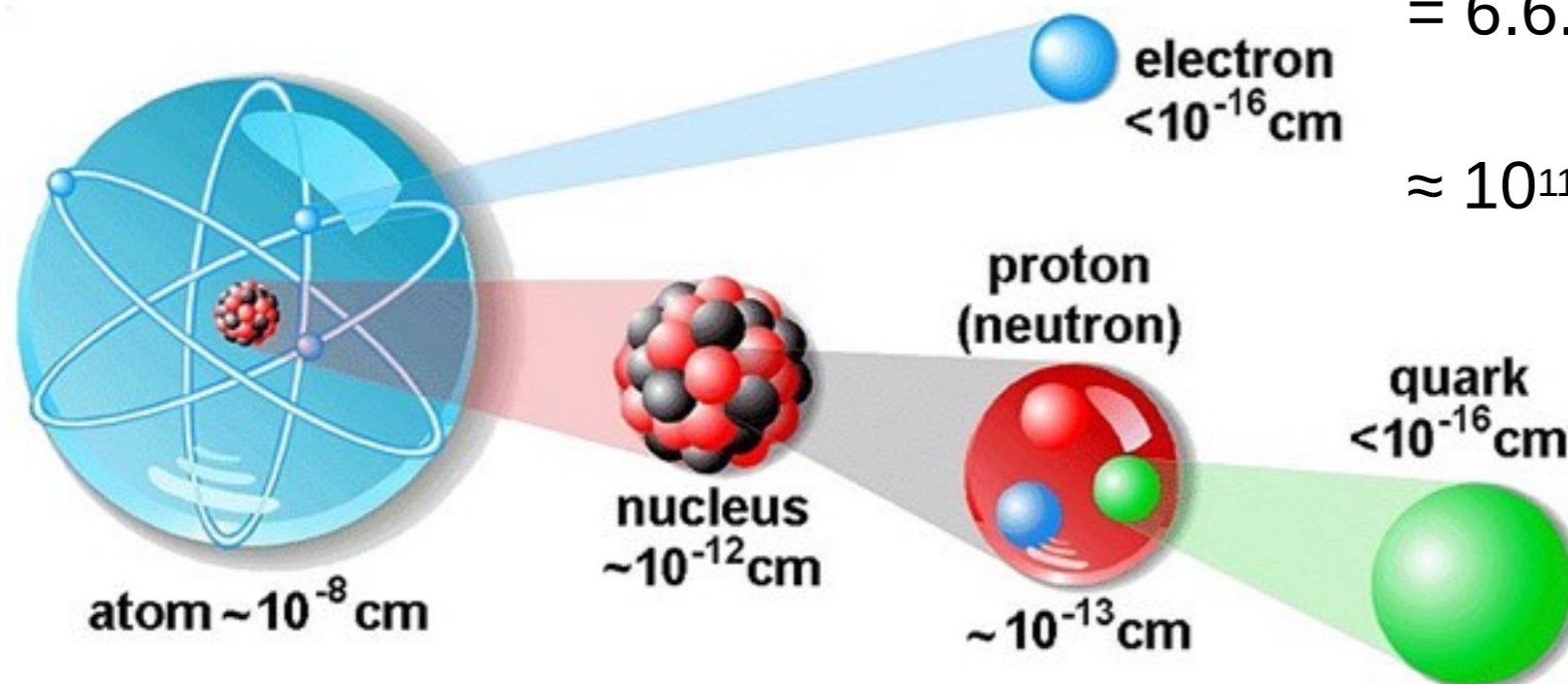
Heisenbergin epätarkkuusperiaate:
 tiettyjen suureiden arvoja ei voi määrittää yhtä aikaa tarkasti

Jos halutaan tutkia aineen pienimpiä osia, liikemäärän on oltava:

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

$$= 6.6 \cdot 10^{-16} \text{ eVs} / (2 \cdot 10^{-18} \text{ m})$$

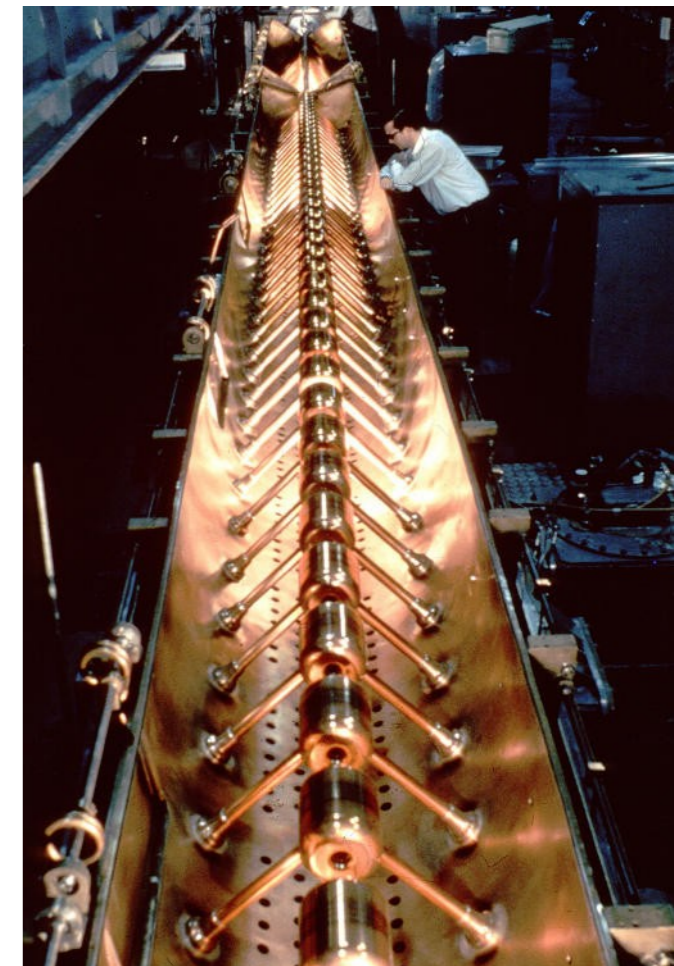
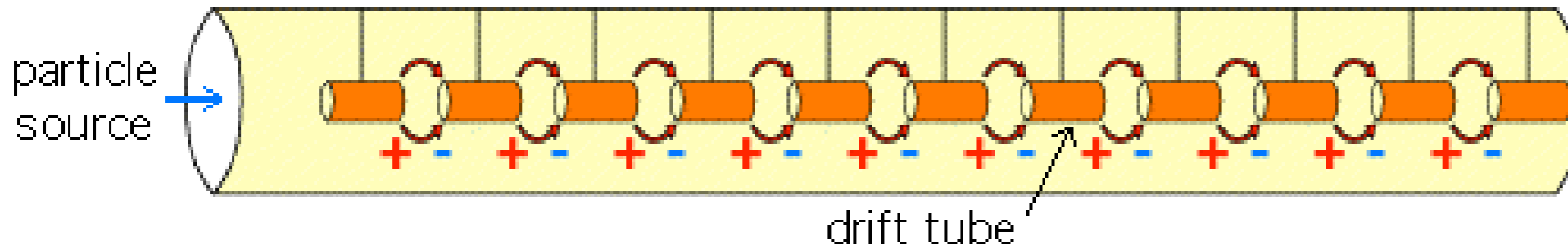
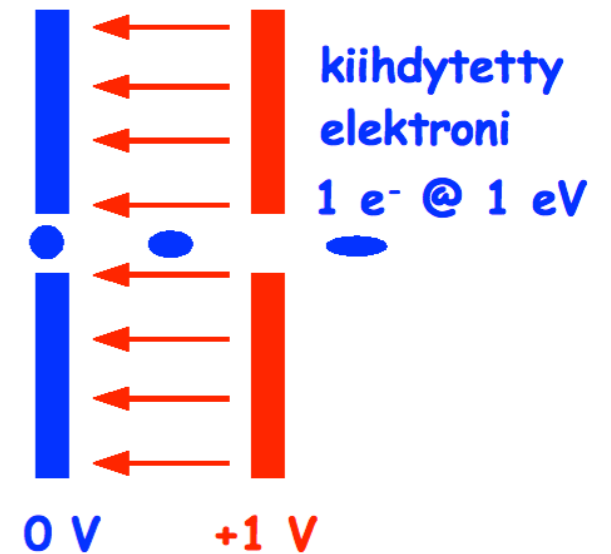
$$\approx 10^{11} \text{ eV/c} = \mathbf{100 \text{ GeV/c}}$$



Mikäs olikaan LHC:n törmäysenergia..?

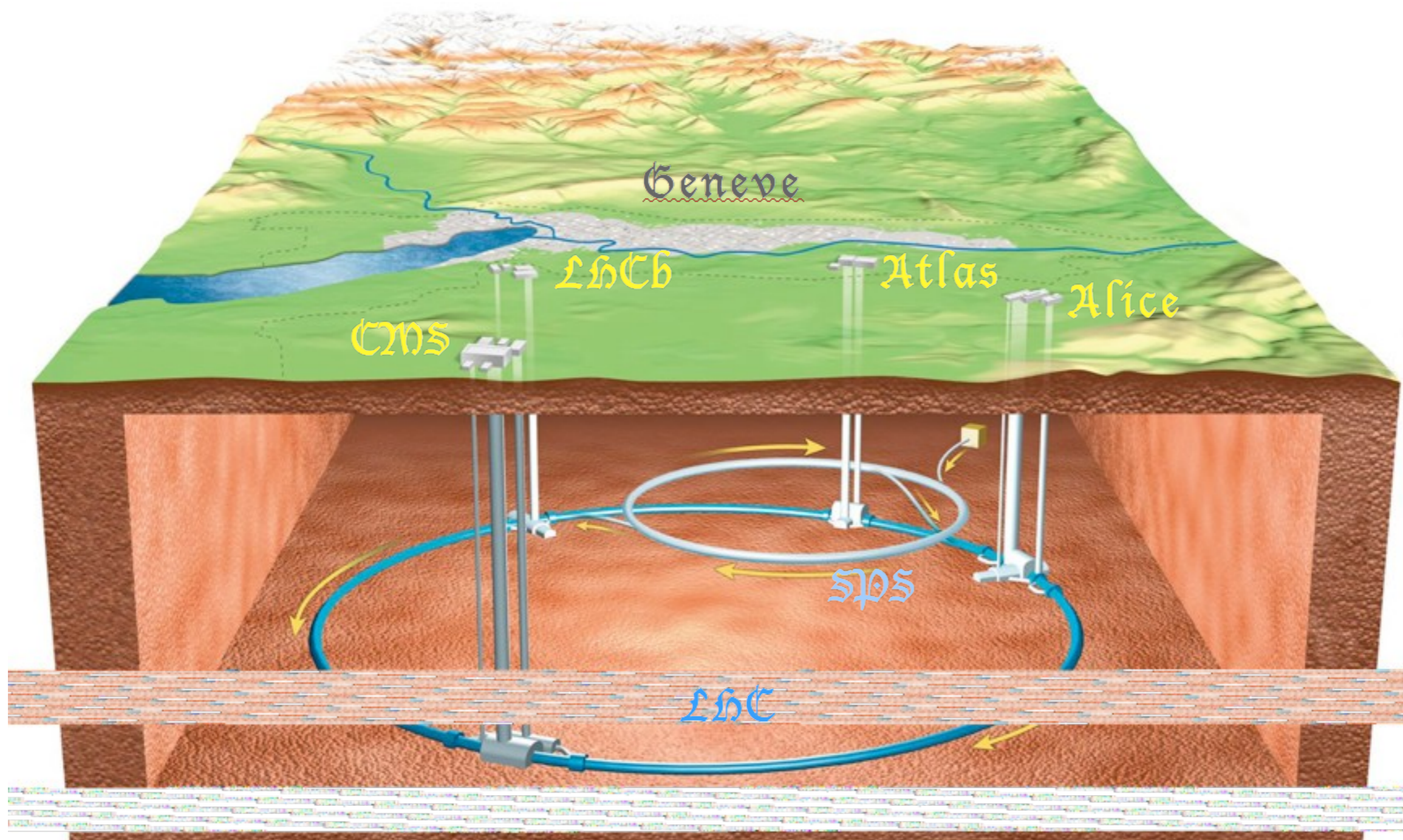
- Hiukkaskiihdyttimet perustuvat sähkövarauksellisen hiukkasen kiihdyttämiseen sähkökentällä
- Hiukkasfysiikassa energian yksikkö on 1 eV eli **elektronivoltti** (sovitaan $c=1$, jolloin eV käy myös massoille ja liikemäärille)
- Matalan energian kiihdyttimissä **ajautumisputkia** (drift tube), joiden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

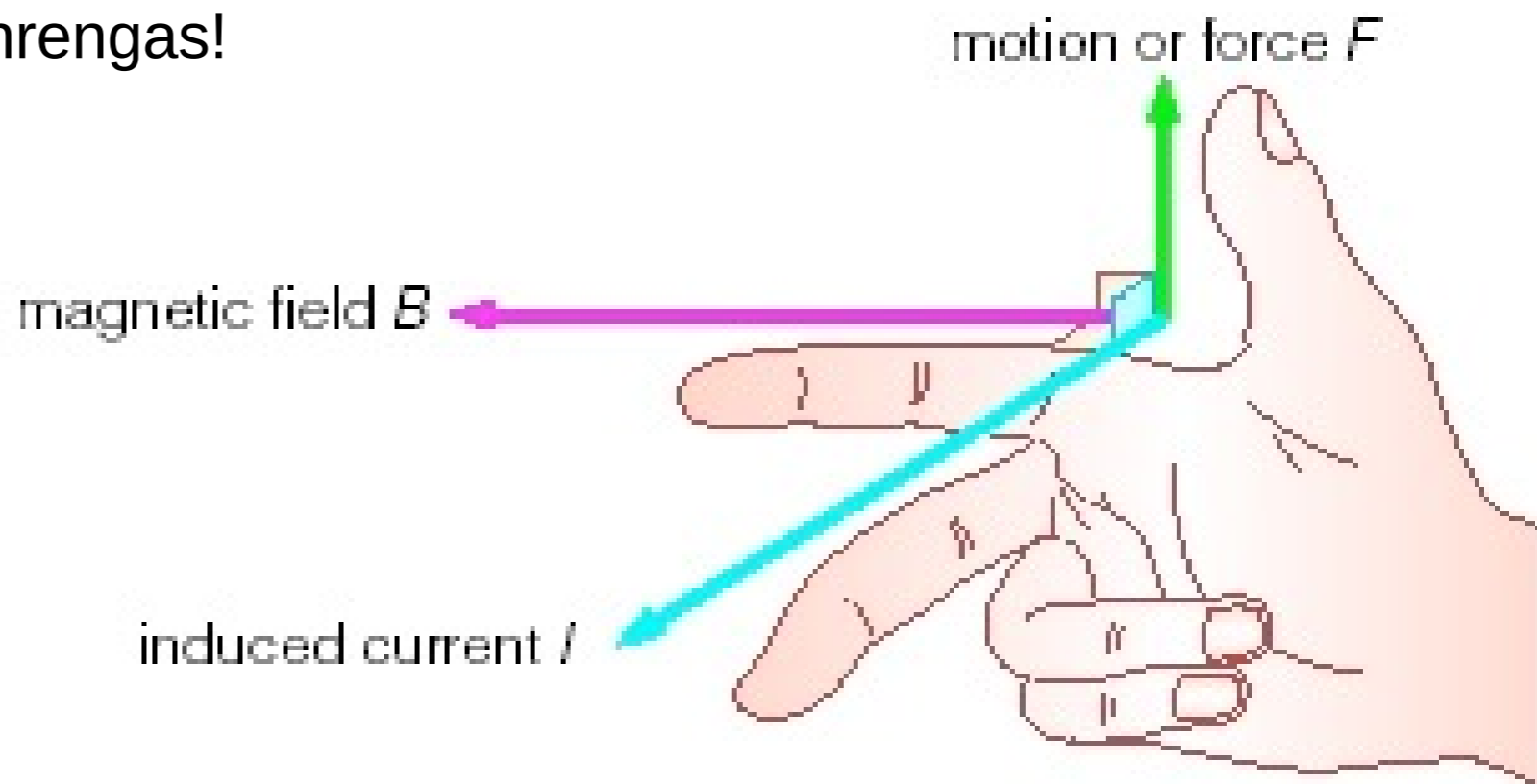


- Jokainen kiihdytin toimii tietyllä energia-alueella (LHC 0.45—6.5 TeV)
- Suureen liike-energiaan vaaditaan esikiihdyttimien ketju
- Hiukkaset kiertävät ympyrää, yhtä kiihdytinjaksoa voi käyttää monta kertaa

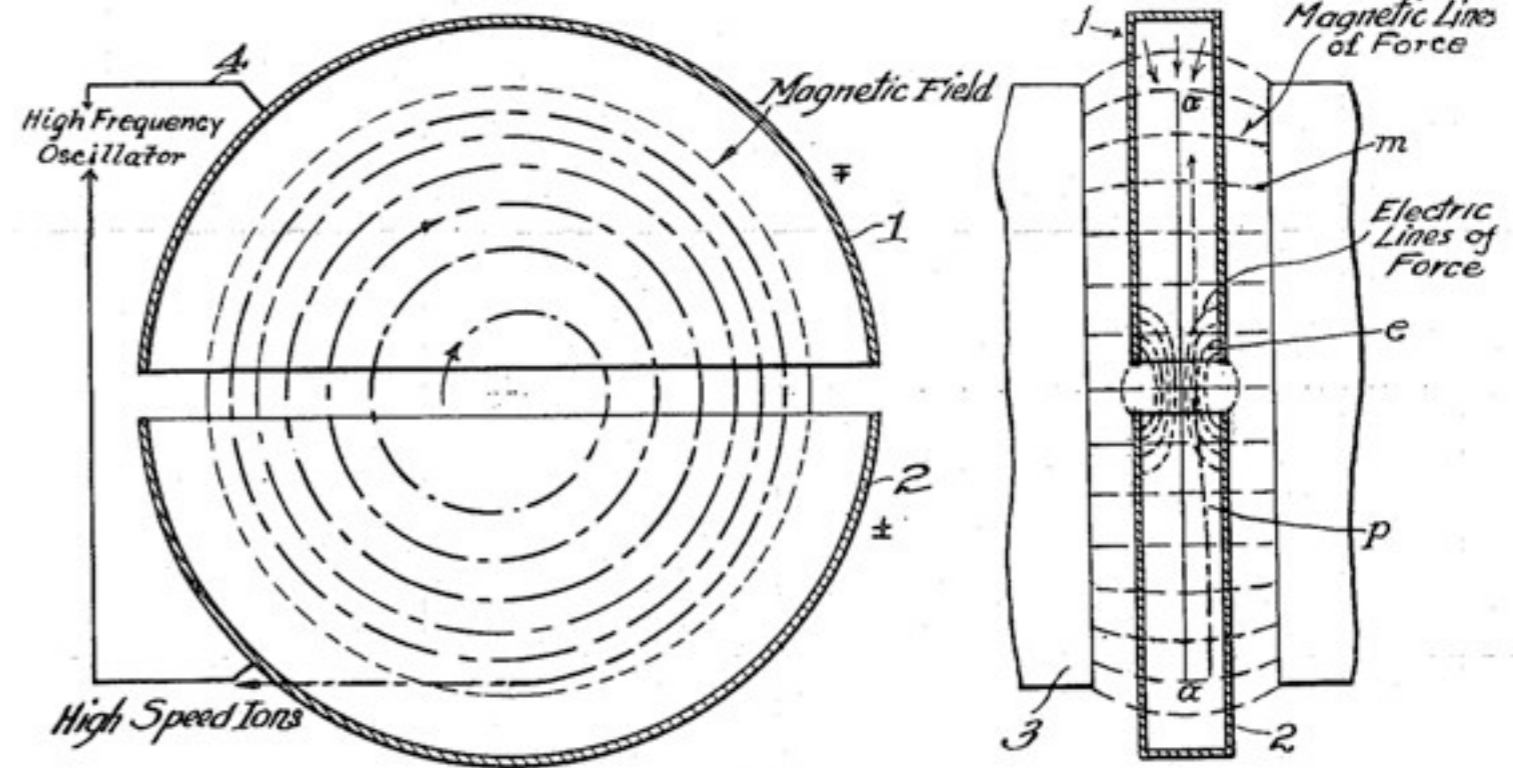


- **LINAC** (LINear Accelerator, 1978): 50 MeV, **0.31c**
- **PSB** (Proton Synchrotron Booster, 1972): 1.4 GeV, **91.6c**
- **PS** (Proton Synchrotron, 1959): 26 GeV, **99.93c**
- **SPS** (Super Proton Synchrotron, 1976): 450 GeV, **99,9998c**
- **LHC** (Large Hadron Collider, 2008): 6.5 TeV, **99,999999c**

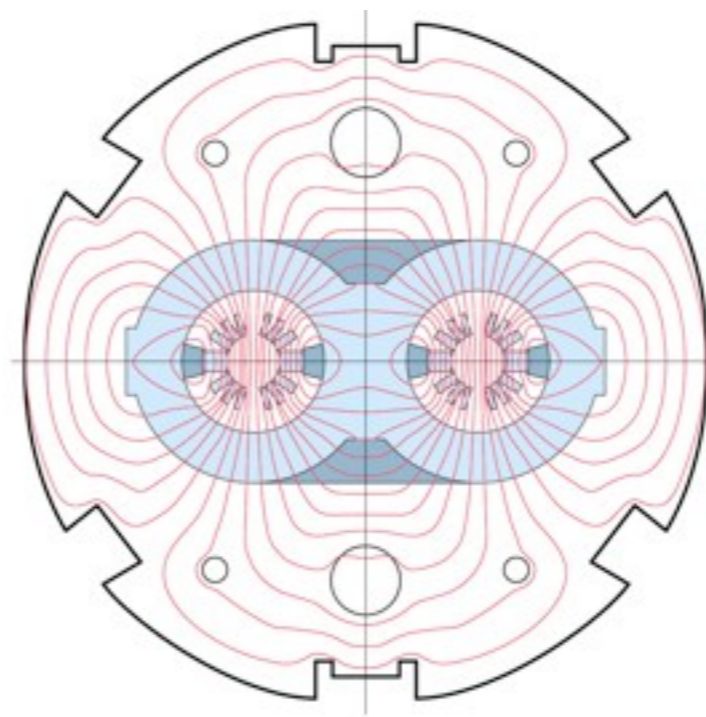
- Varatun hiukkasen rata kaareutuu magneettikentässä:
 - $F = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$
 - Risti- eli vektoritulon suunta oikean käden säännöllä $\mathbf{X} \times \mathbf{Y} = \mathbf{Z}$
 - ...tai vasemman käden muistisäännöllä **F.B.I.** ($I=qv$)
- Yhdistämällä Newtonin toinen laki, $F = ma$, 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:ssä?



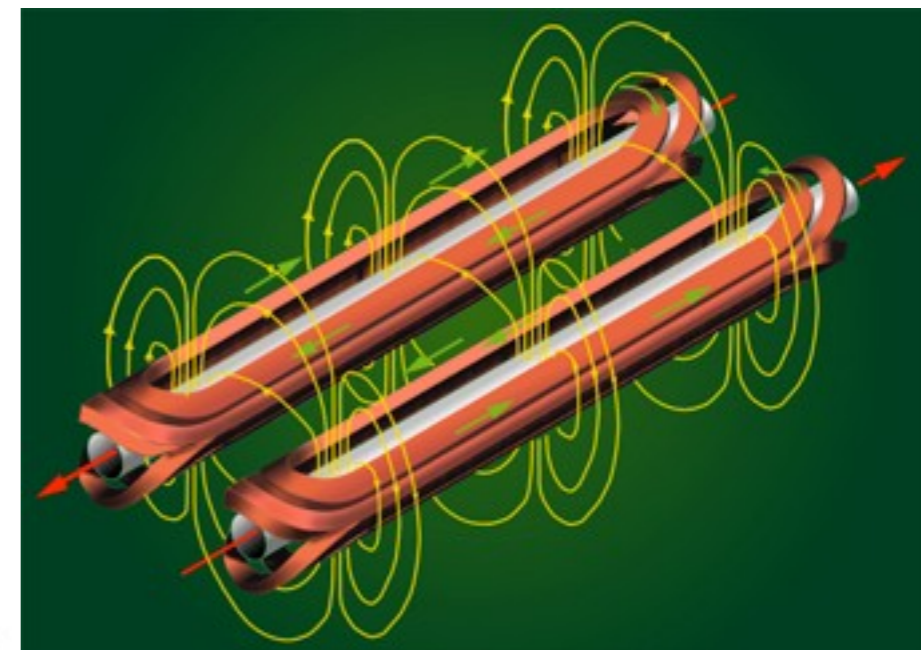
- Ensimmäiset “rengaskiihdyttimet” käyttivät **kestomagneetteja** (B vakio)
→ hiukkasten kiertorata laajenee energian kasvaessa (syklotroni)
- Nykyisissä *synkrotroneissa* käytössä sähkömagneetteja, joiden virtaa voi muuttaa → **B muuttuu, R vakio**
- LHC:ssä **1232** kpl [suprajohtavia sähkömagneetteja](#) (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



$$p = qRB$$



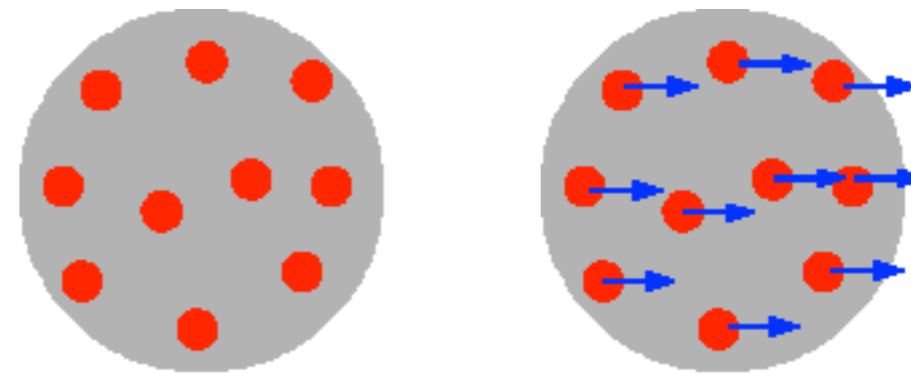
Computed magnetic flux map at $B_0=10$ Tesla



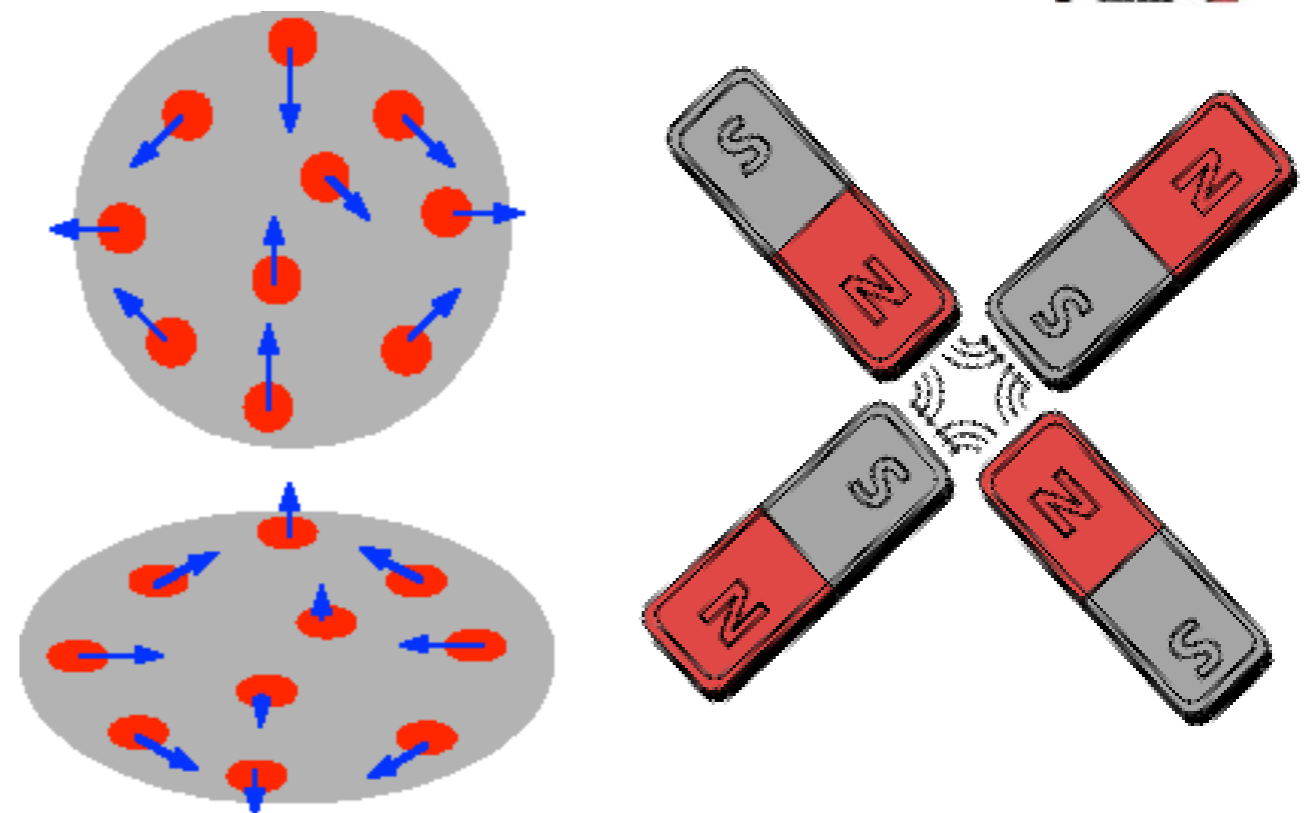
- LHC:n protonikimpussa on pienessä tilassa suuri määrä ($\sim 10^{11}$) saman varauksen omaavia hiukkasia, jotka pyrkivät erilleen
- Suihkun fokusointi tapahtuu 858 kvadrupolimagneetilla, jotka taivuttavat harhautuneita hiukkasia kohti tyhjiöputken keskipistettä
- Tyypillisessä kiihdyttimessä on nk.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

Dipolimagneetti:

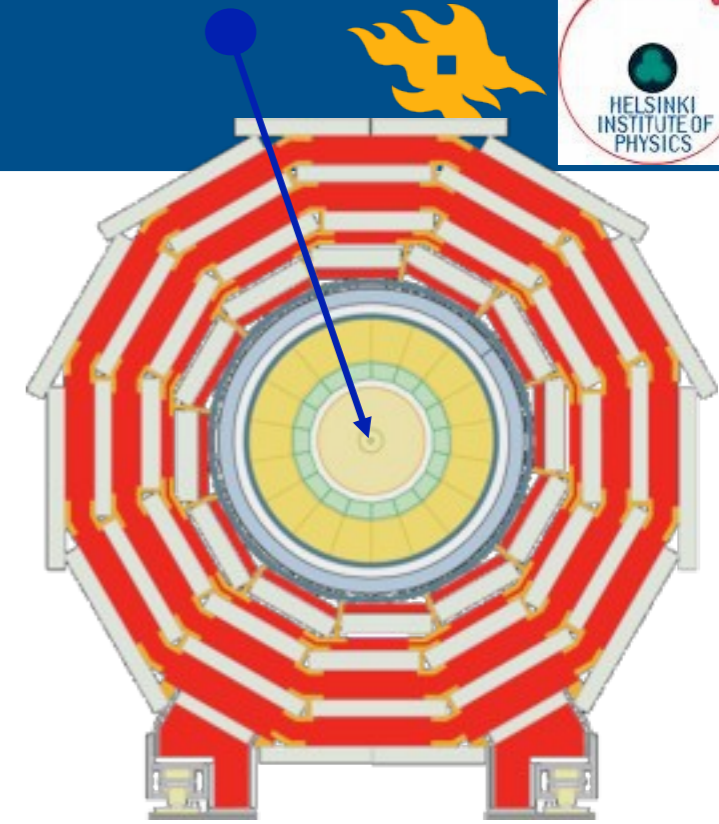
“testivarauksia”



Kvadrupolimagneetti:

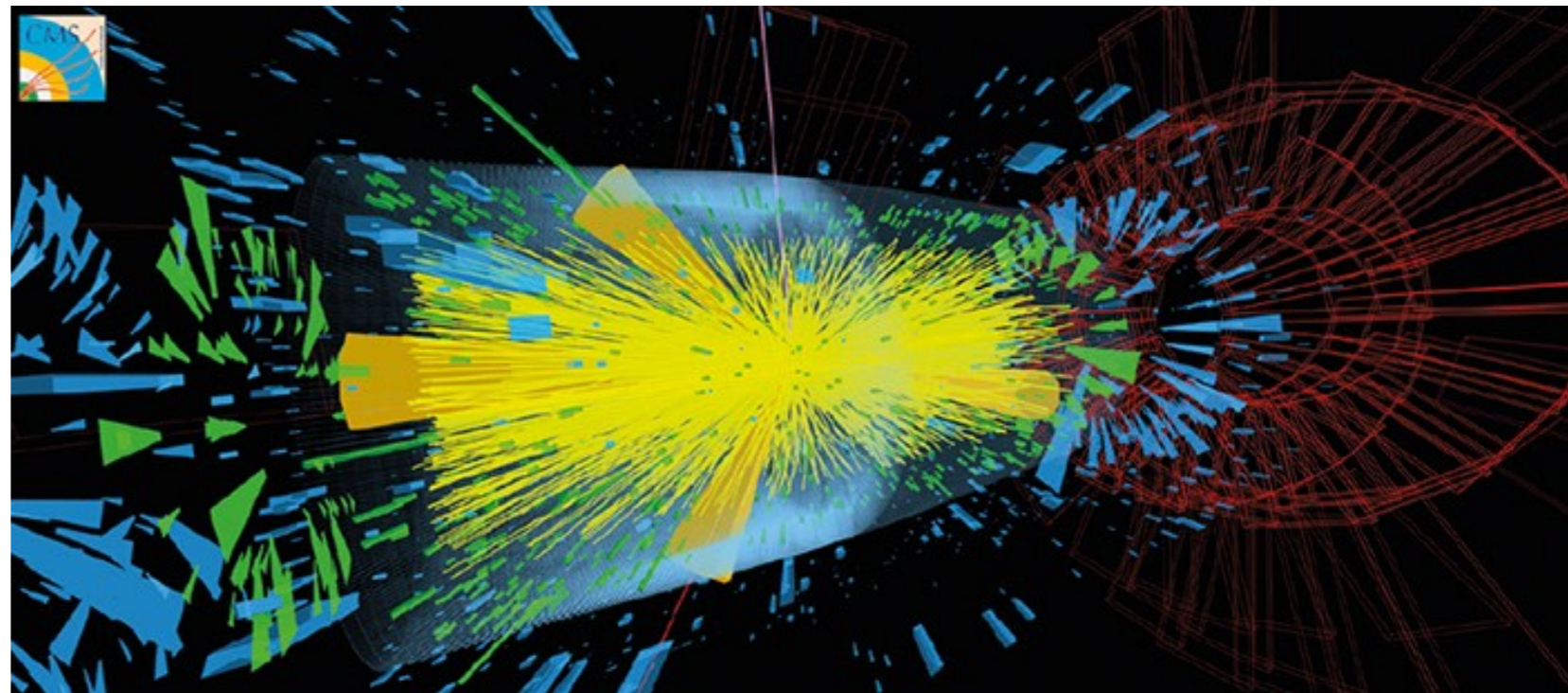
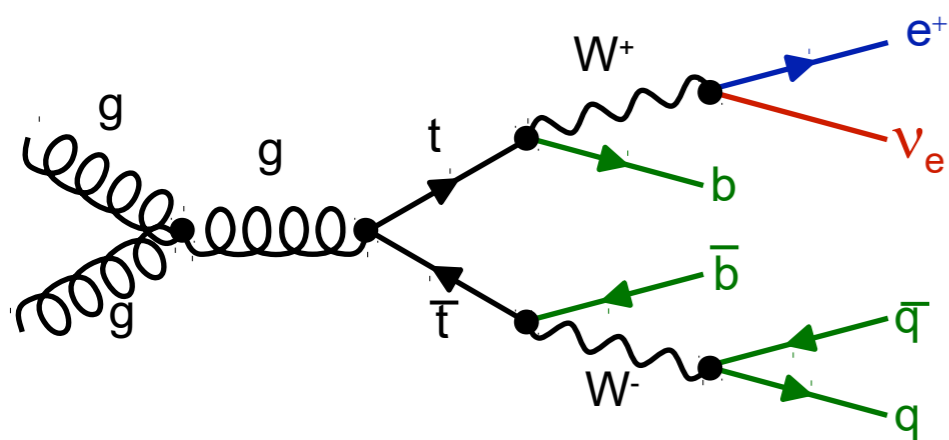
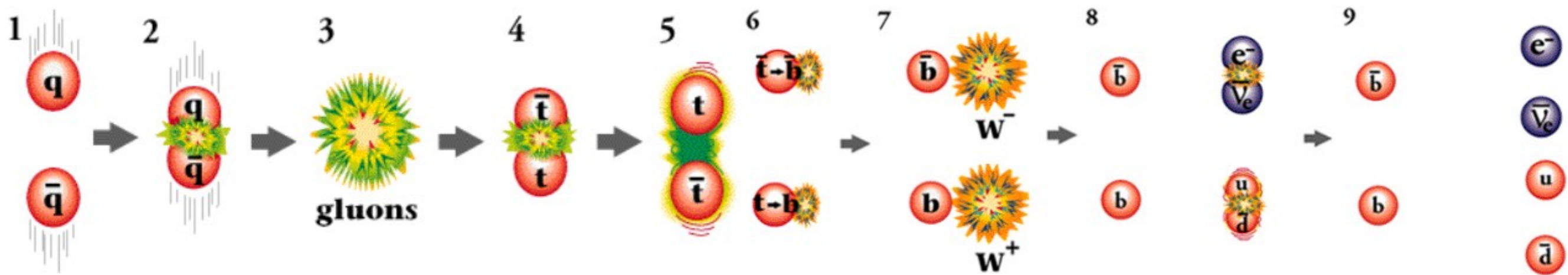


- Protonkimput (kussakin n. 10^{11} protonia) kulkevat koelaitteiston läpi ohuessa ($<1\text{mm}$) beryllium-putkessa, jonka sisällä on ~tyhjiö
- Törmäystuotteet lentävät yleensä vaivatta putken läpi
- Putkessa vastakkaisiin suuntiin liikkuvat protonikimput kulkevat toistensa läpi n. $20\ \mu\text{m}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

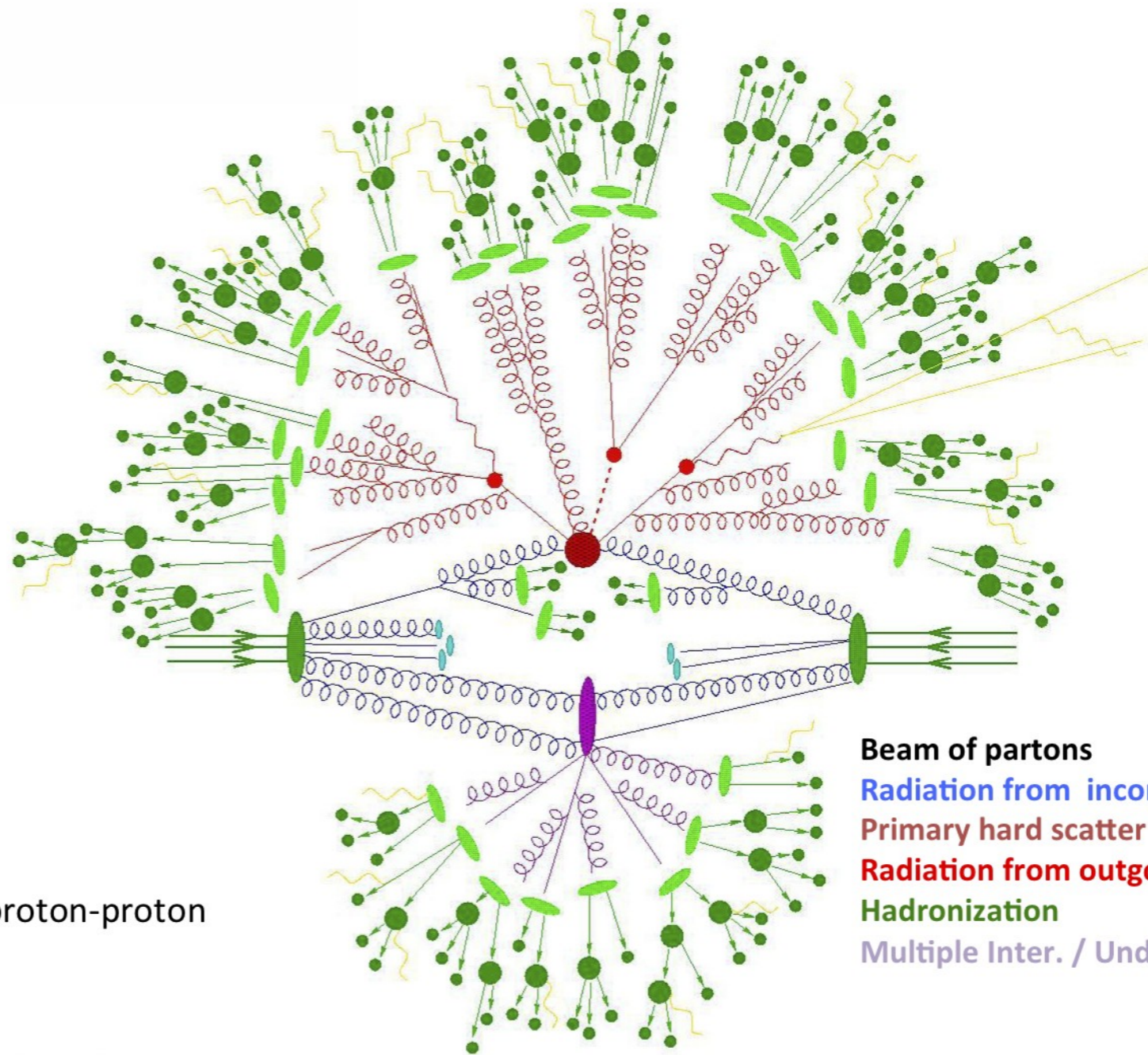


Asennettu tyhjiöputki (kokonaisuudessaan 44m)

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



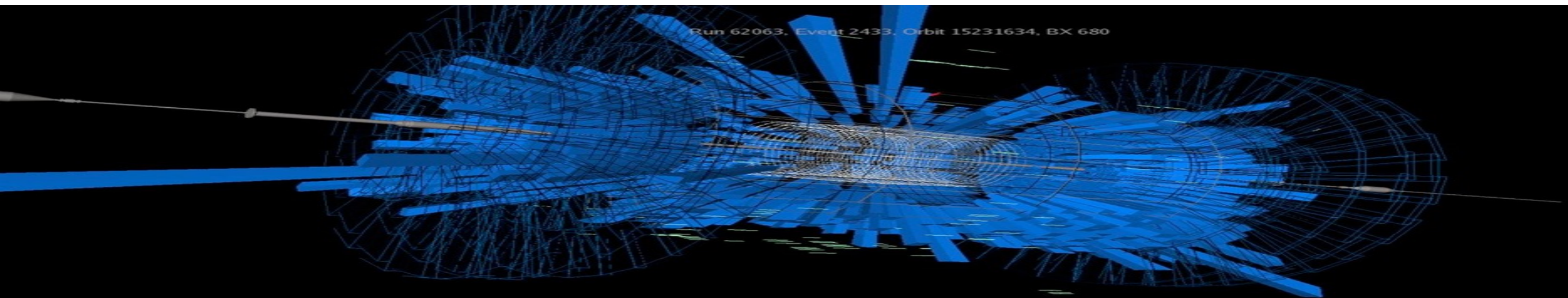
No mistä nämä kaikki hiukset sitten tulevat?



Typical proton-proton collision

- Beam of partons**
- Radiation from incoming partons**
- Primary hard scatter**
- Radiation from outgoing partons**
- Hadronization**
- Multiple Inter. / Underlying event**

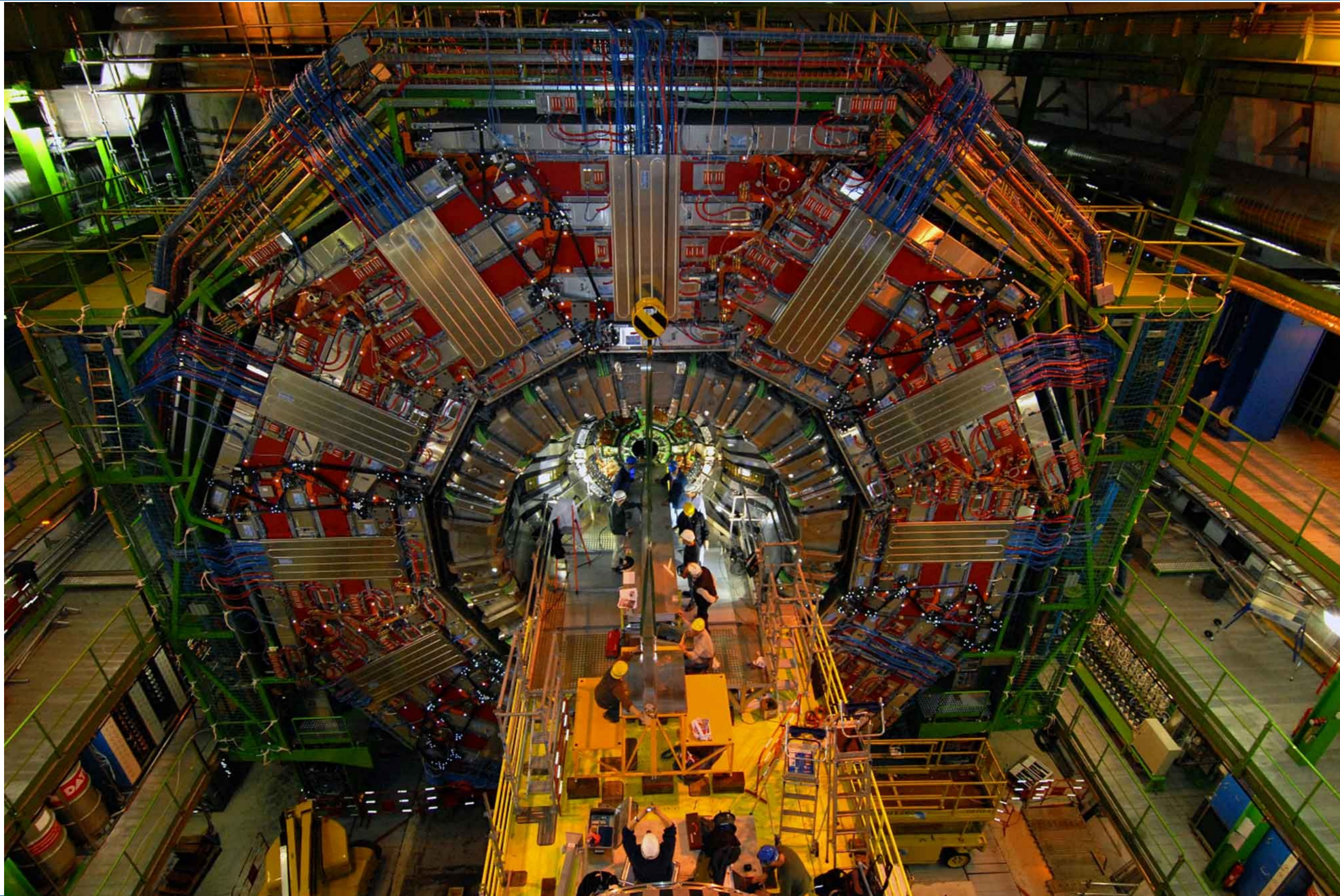
Osa 2: Hiukkasilmaisimet



CMS-koeasema

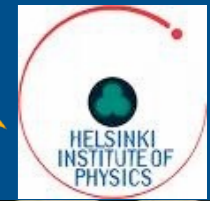
Koeaseman mittalaitteet

Hiukkasten tunnistaminen





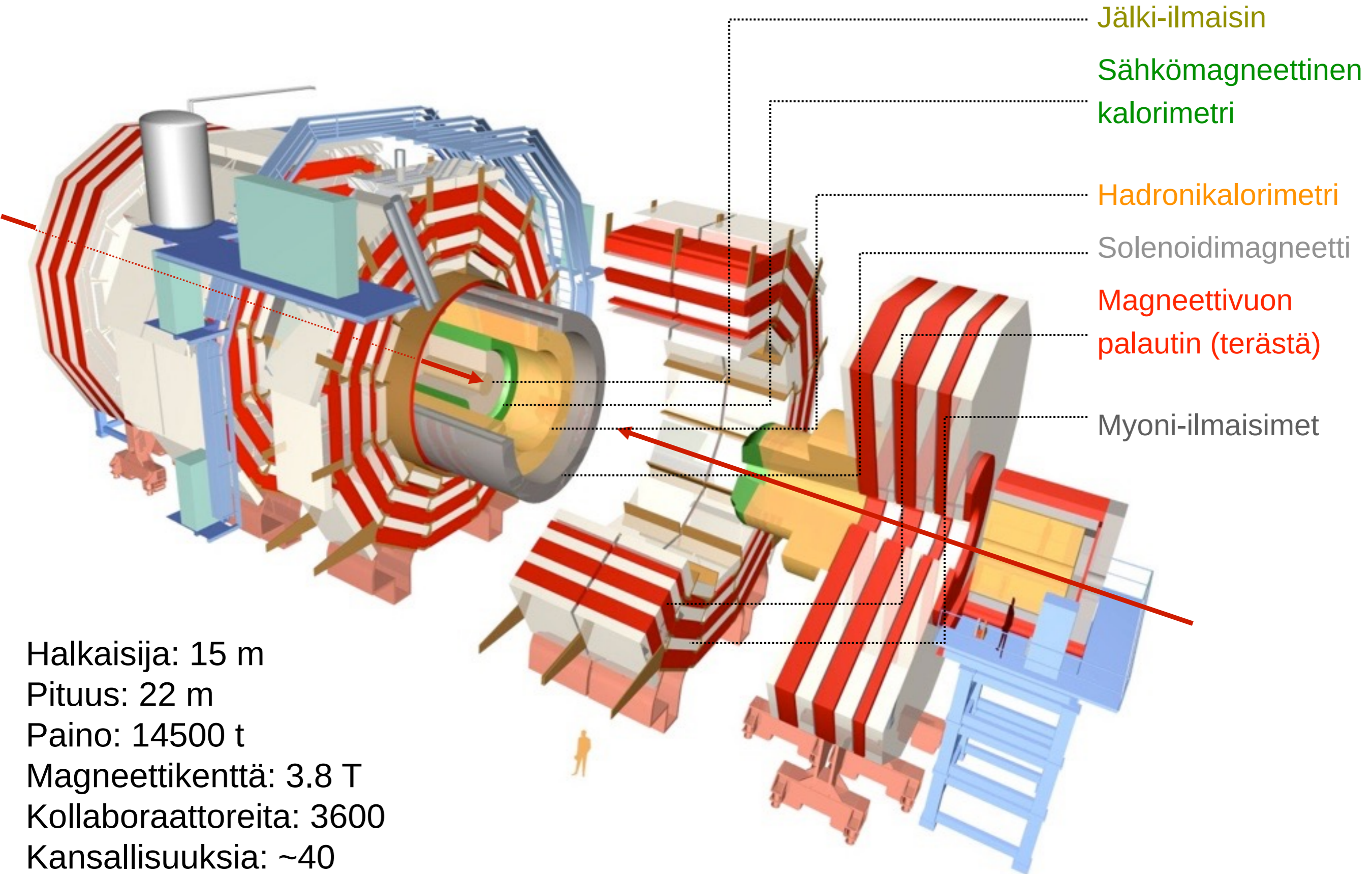
5000 ihmisen yhteishanke



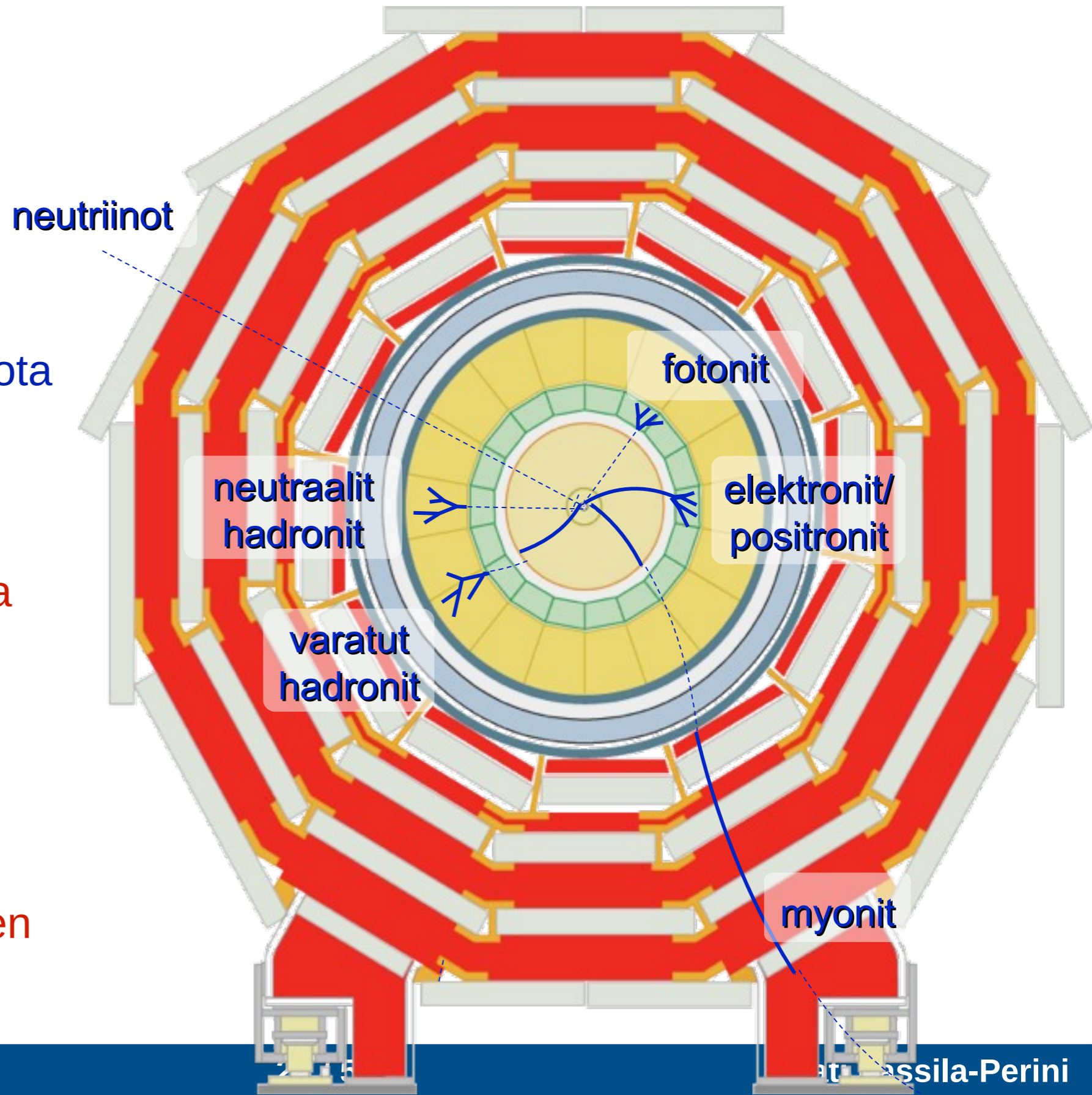


Koeaseman valvomo





- 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

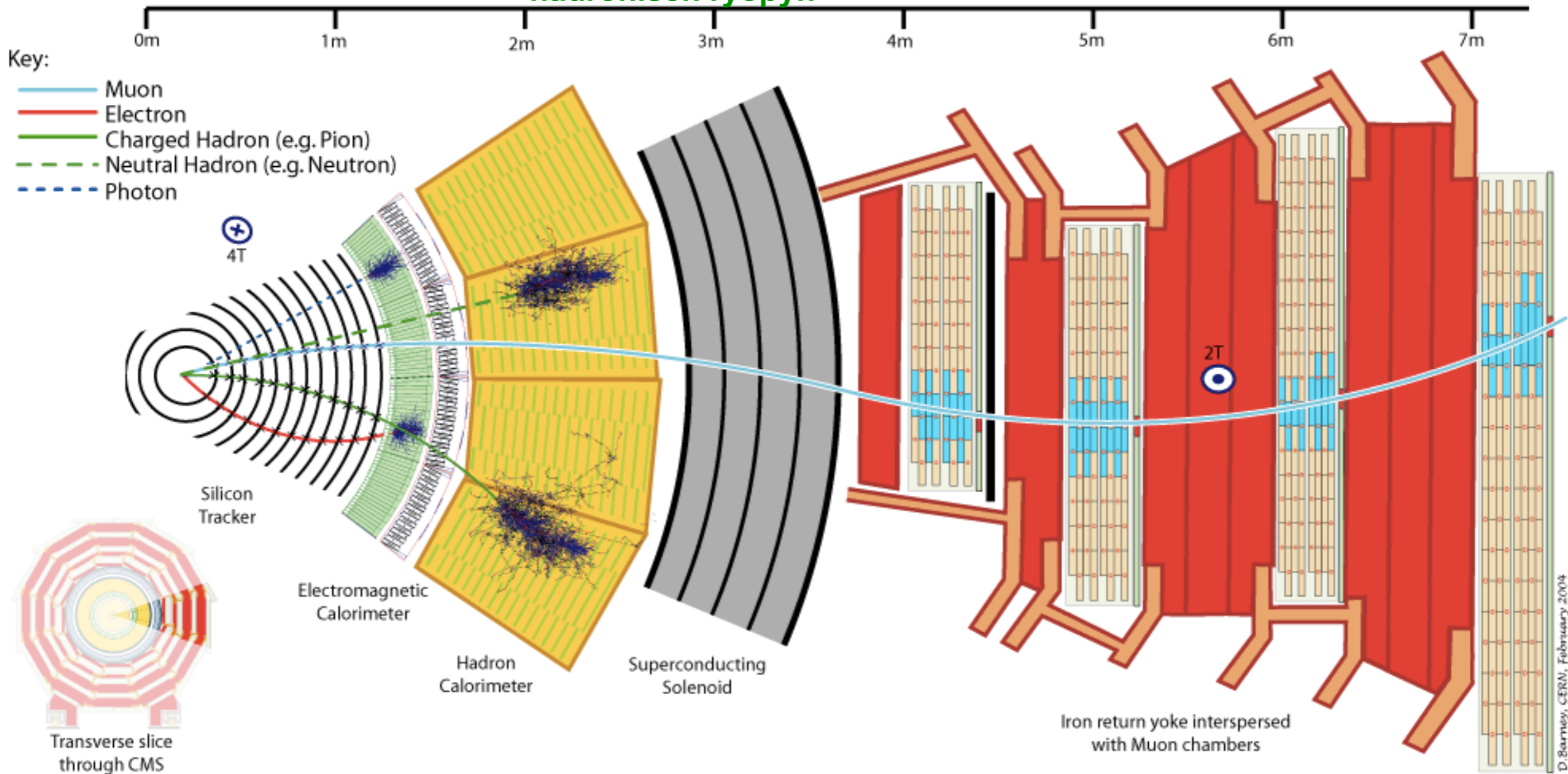
Varatut hiukkaset ionisoivat, joten niiden radat havaitaan

Elektroni ja fotonit tuottavat sähkömagneettisen ryöpyn

Hadronit tuottavat pitkän hadronisen ryöpyn

Raskaat muonit tunkeutuvat aineen läpi tehokkaasti

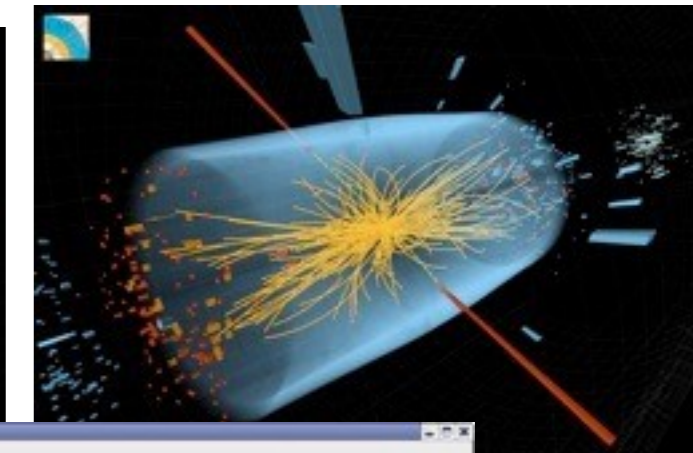
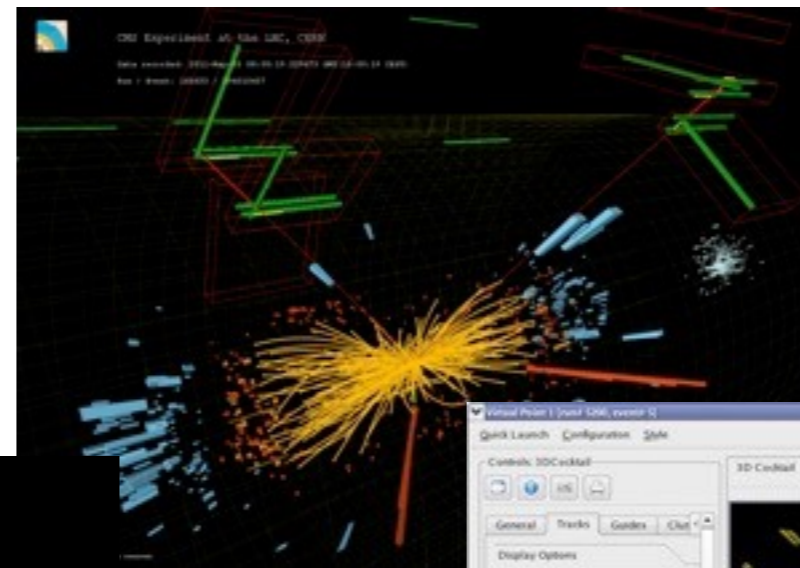
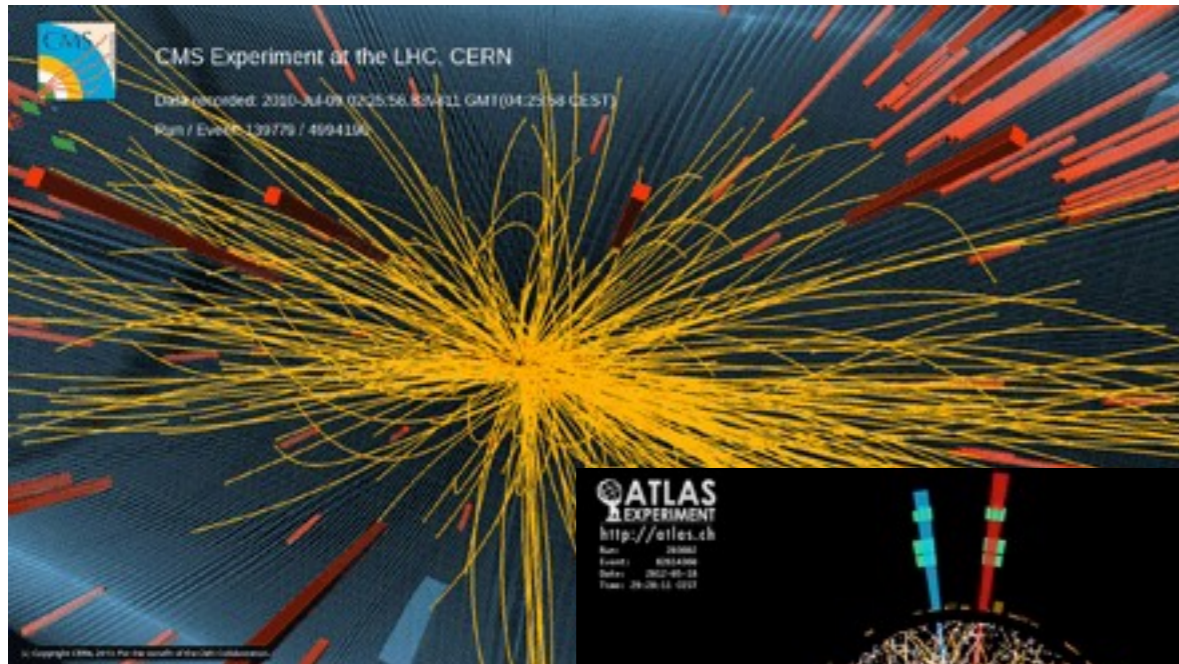
Neutrinot havaitaan epäsuorasti liikemäärän säilymisen kautta



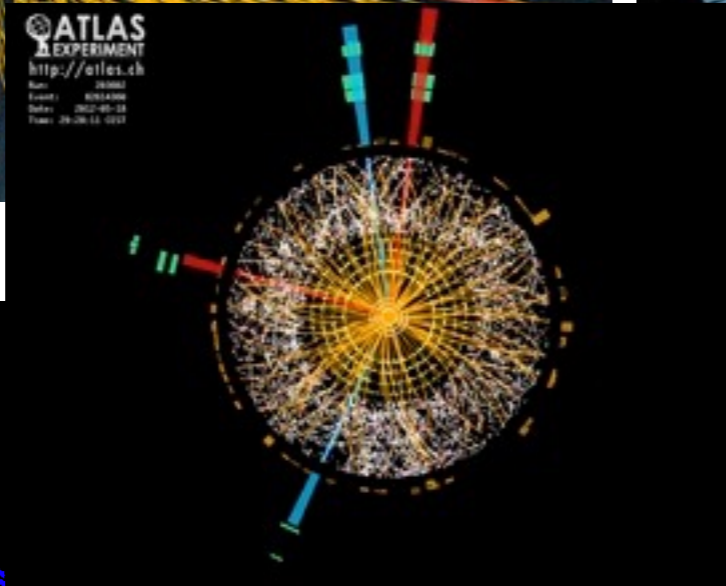
Osa 3: Data-analyysi



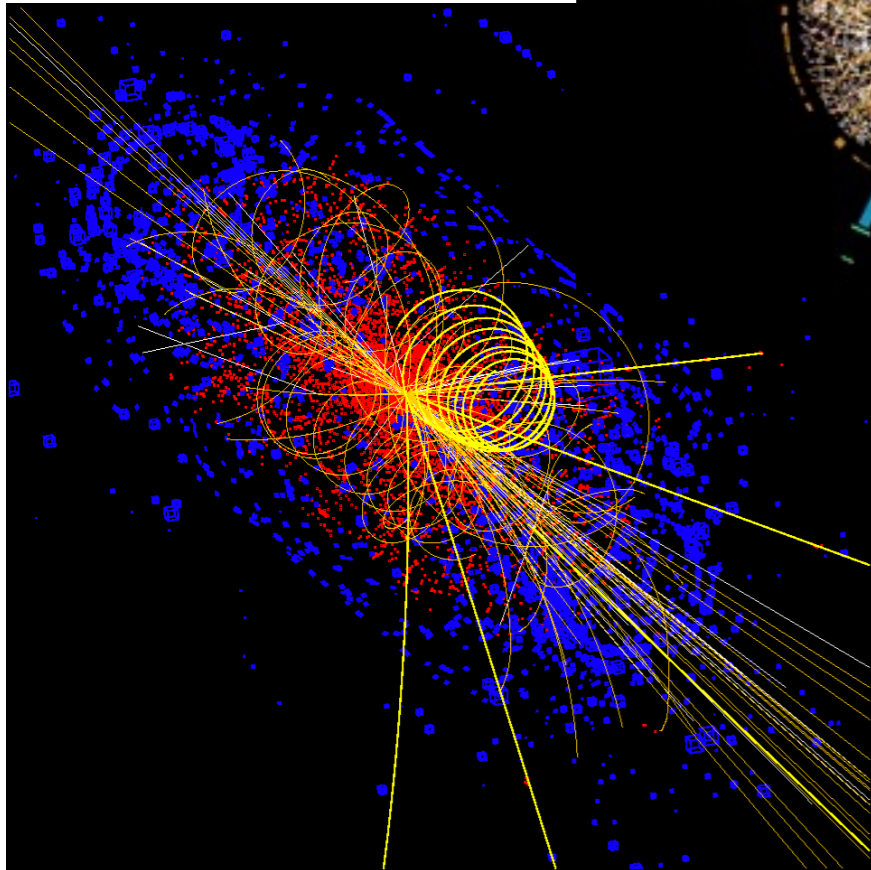
Törmäysten valitseminen
Signaali ja tausta
Tilastolliset menetelmät



ATLAS EXPERIMENT
<http://atlas.ch>
 Run: 263661
 Event: 8081498
 Date: 2012-01-18
 Time: 20:36:11:0101



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



40 MHz
Törmäystapahtumia

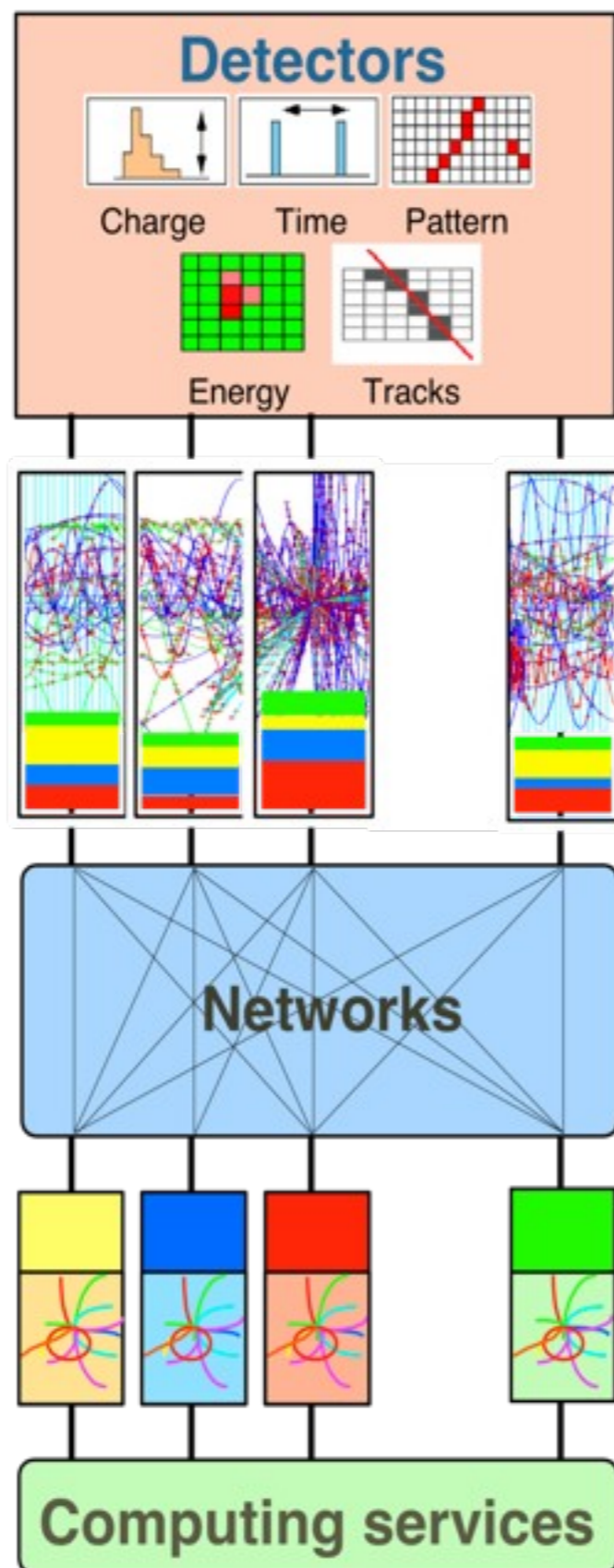
100 kHz
1. vaiheen valinta

1 Tb/s
Törmäyksen
rekonstruointi

500 Gb/s kytkin
Eri ilmaisinten tiedon
yhdistäminen

Tietokonefarmi
Päätös onko tapahtuma
mielenkiintoinen

~1 kHz (=1 GB/s)
Valittujen törmäys-
tapahtumien tallennus



Analogia valokuvaamiseen:

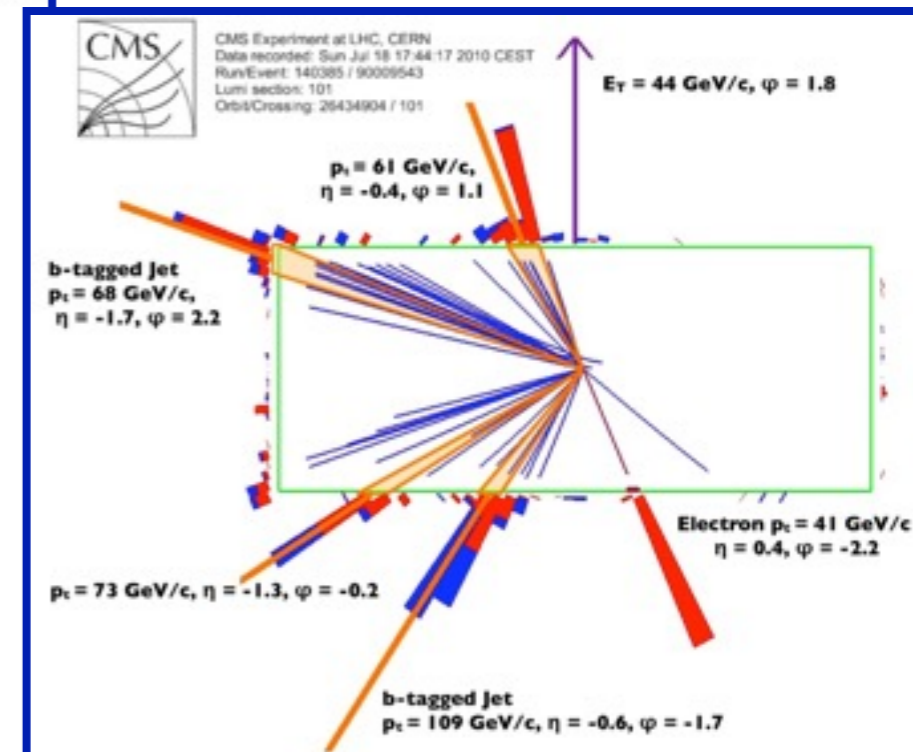
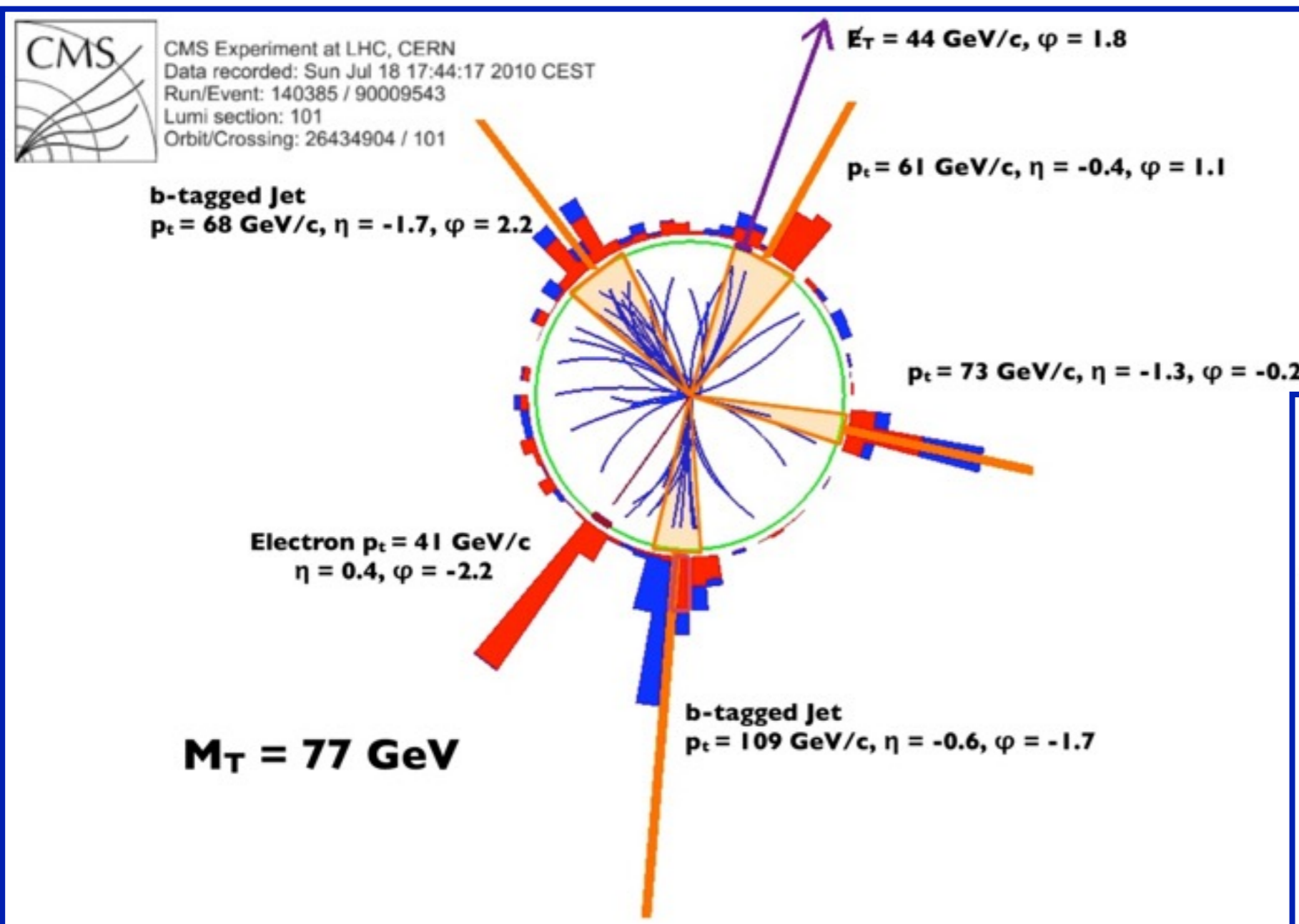
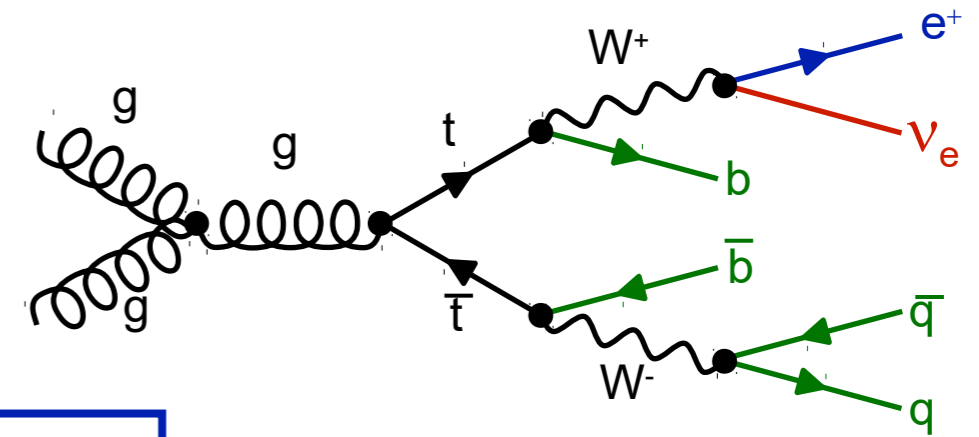
- otetaan 40 milj. kertaa sekunnissa
- jokaisen kuvan koko n. 1 MB
- kuva otetaan n. 500 eri osassa
- kuvan osat yhdistetään nopealla kytkimellä
- yhdistetyt osat analysoidaan prosessorilla (n. 50.000 prosessoria)
- valitaan n. 1000 mielenkiintoista kuvaa sekunnissa ja tallennetaan ne maailmanlaajaan valokuva-arkistoon (n. 10 000 000 GB / vuosi)



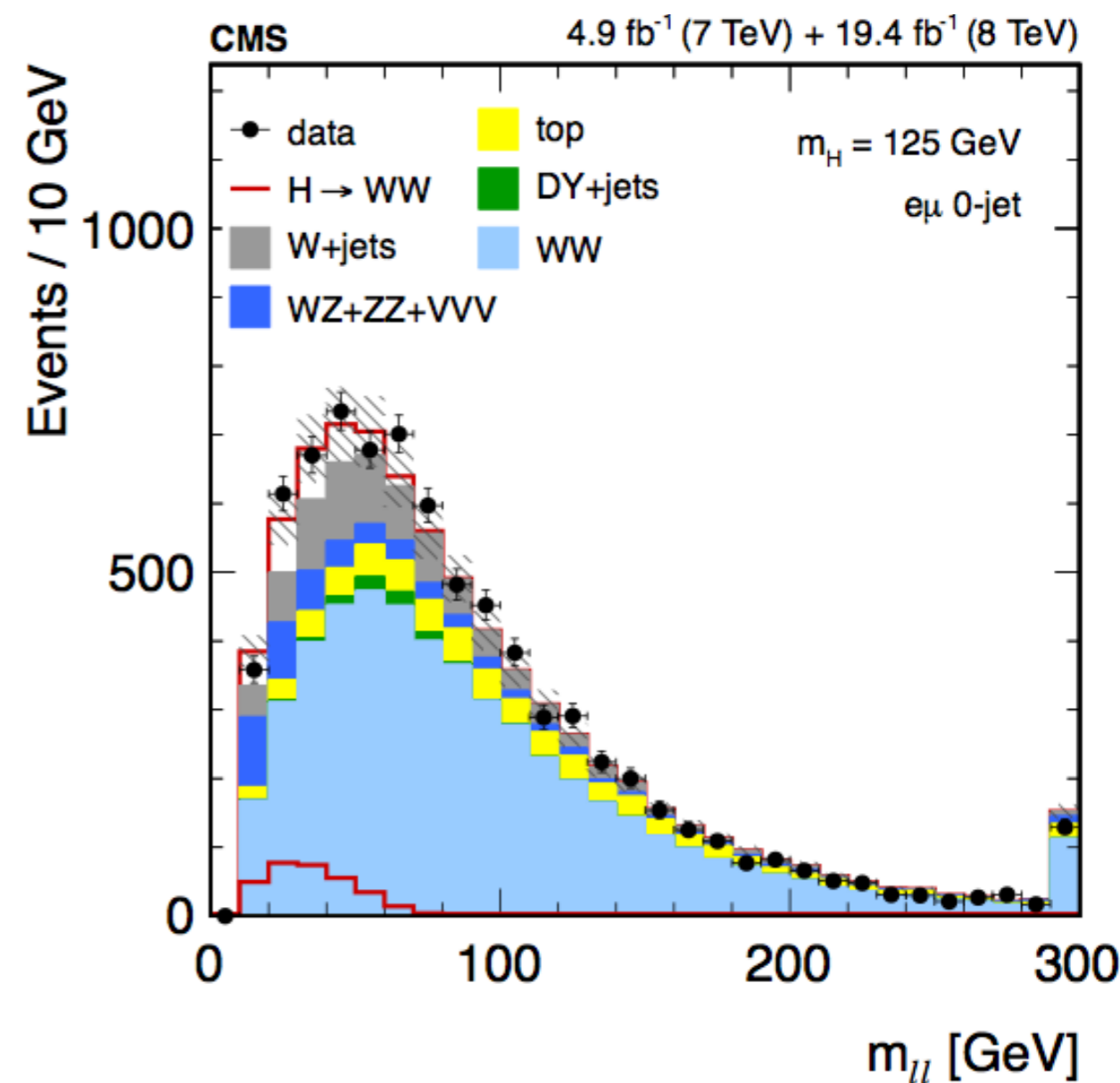
Satoja petatavuja dataa



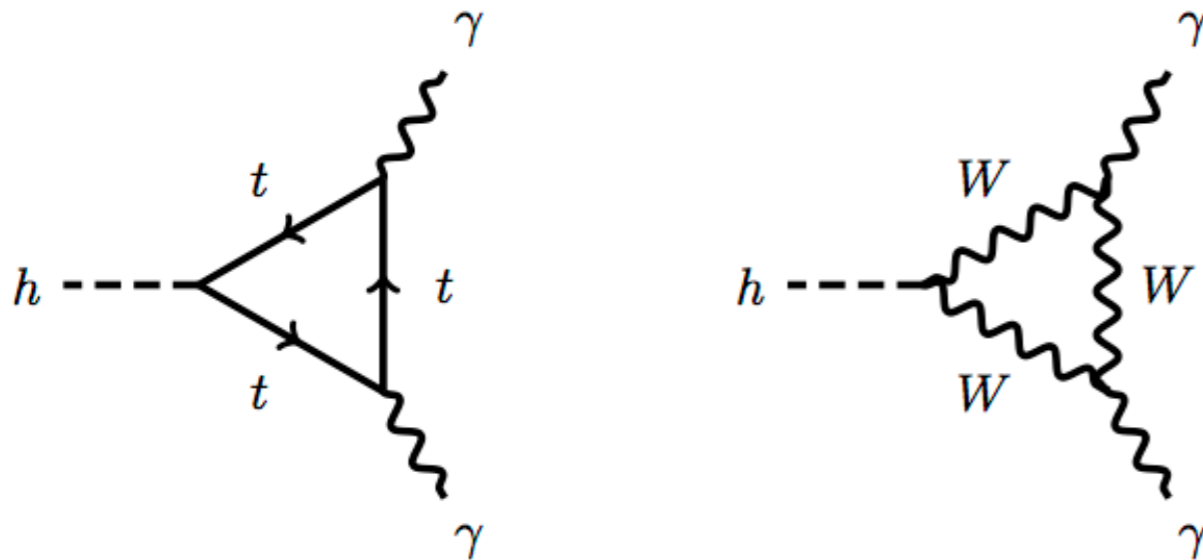
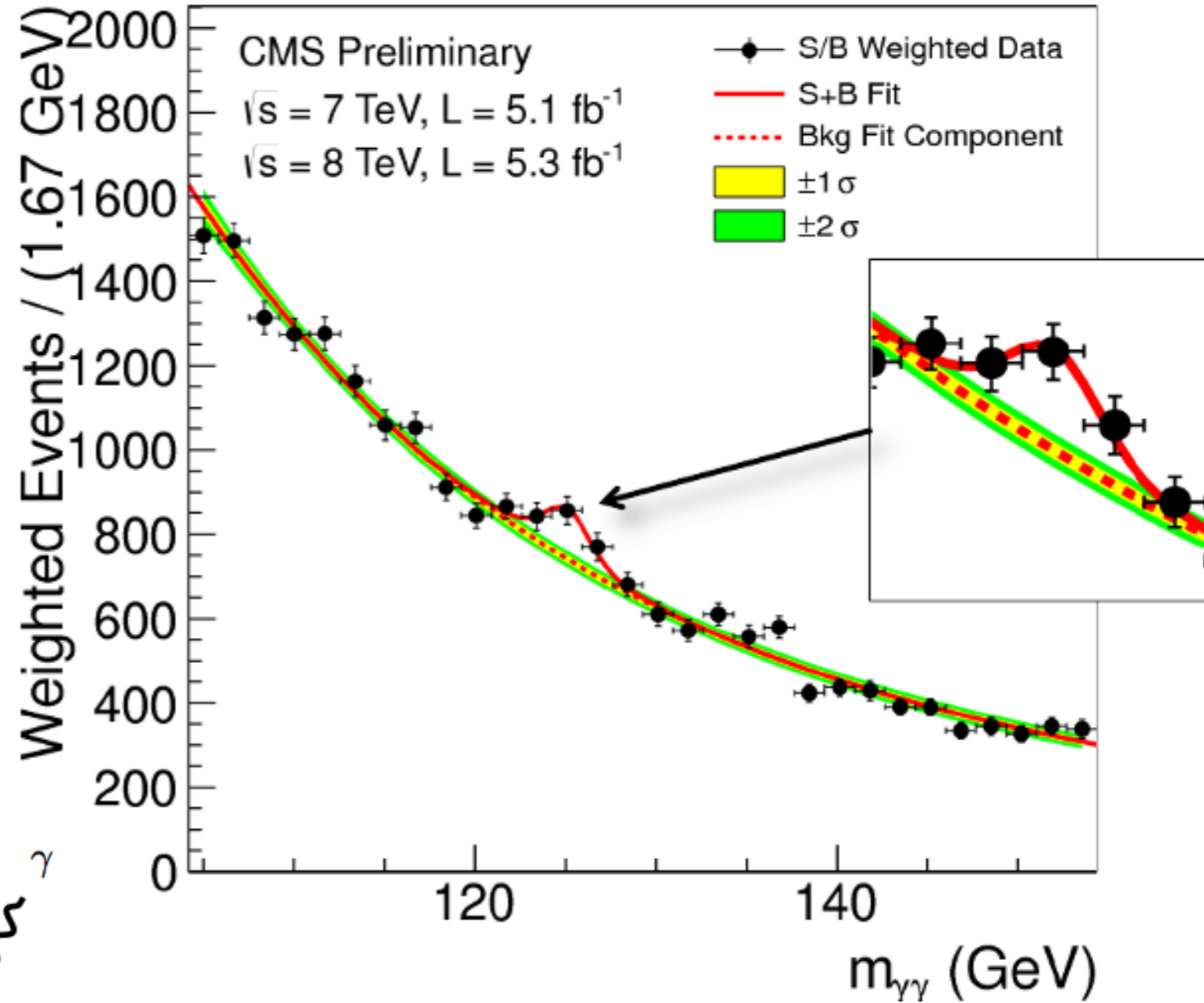
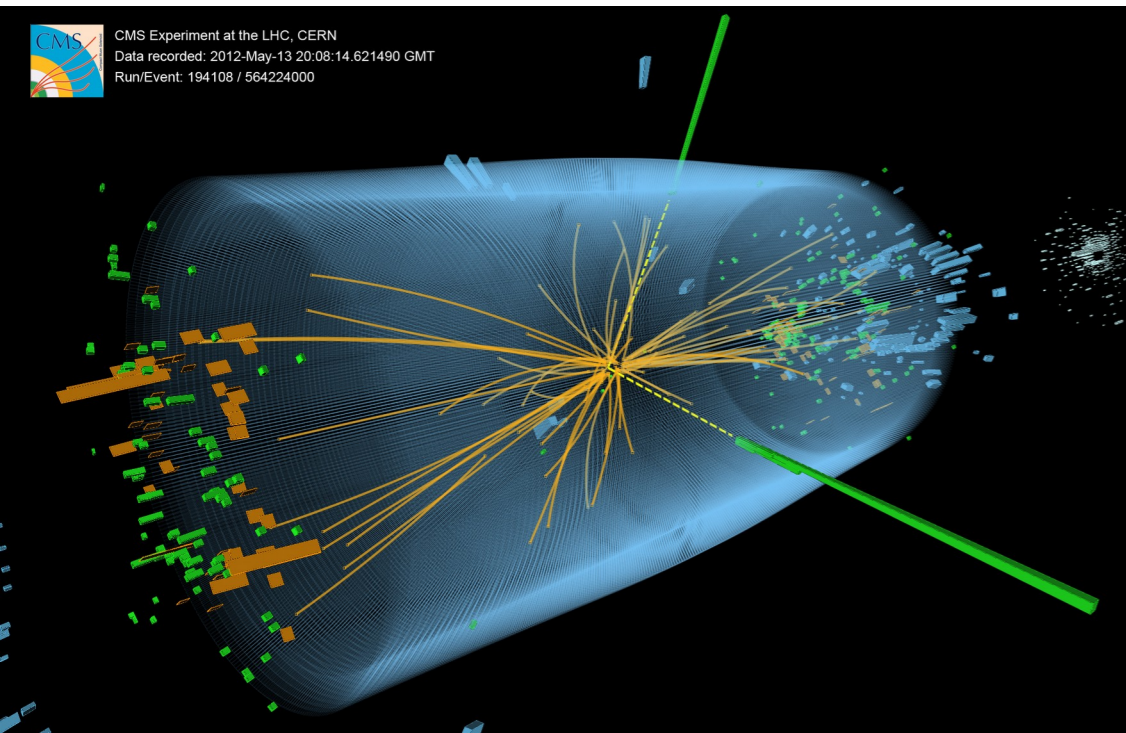
- Esimerkki: Gluoni-gluonifuusio, jossa syntyy top-kvarkkeja



- 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 ei voi sanoa varmasti!
 - 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

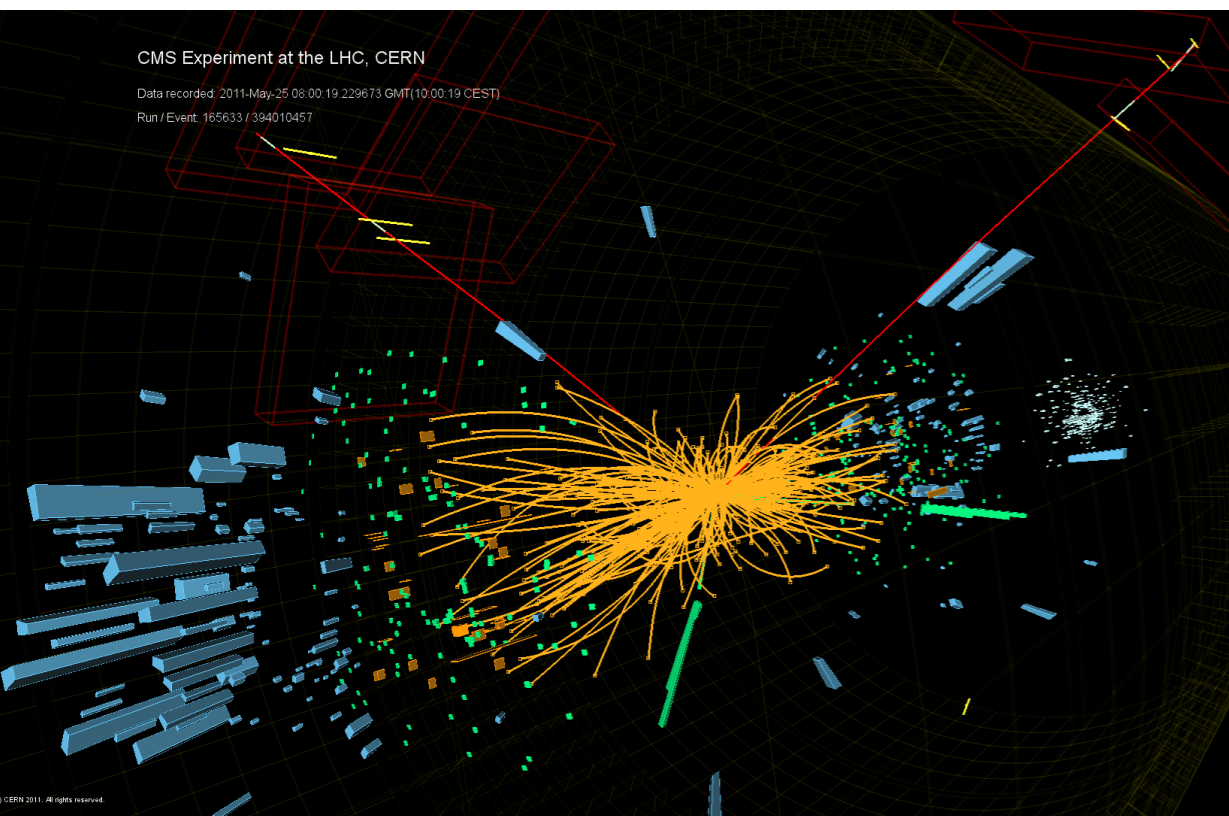
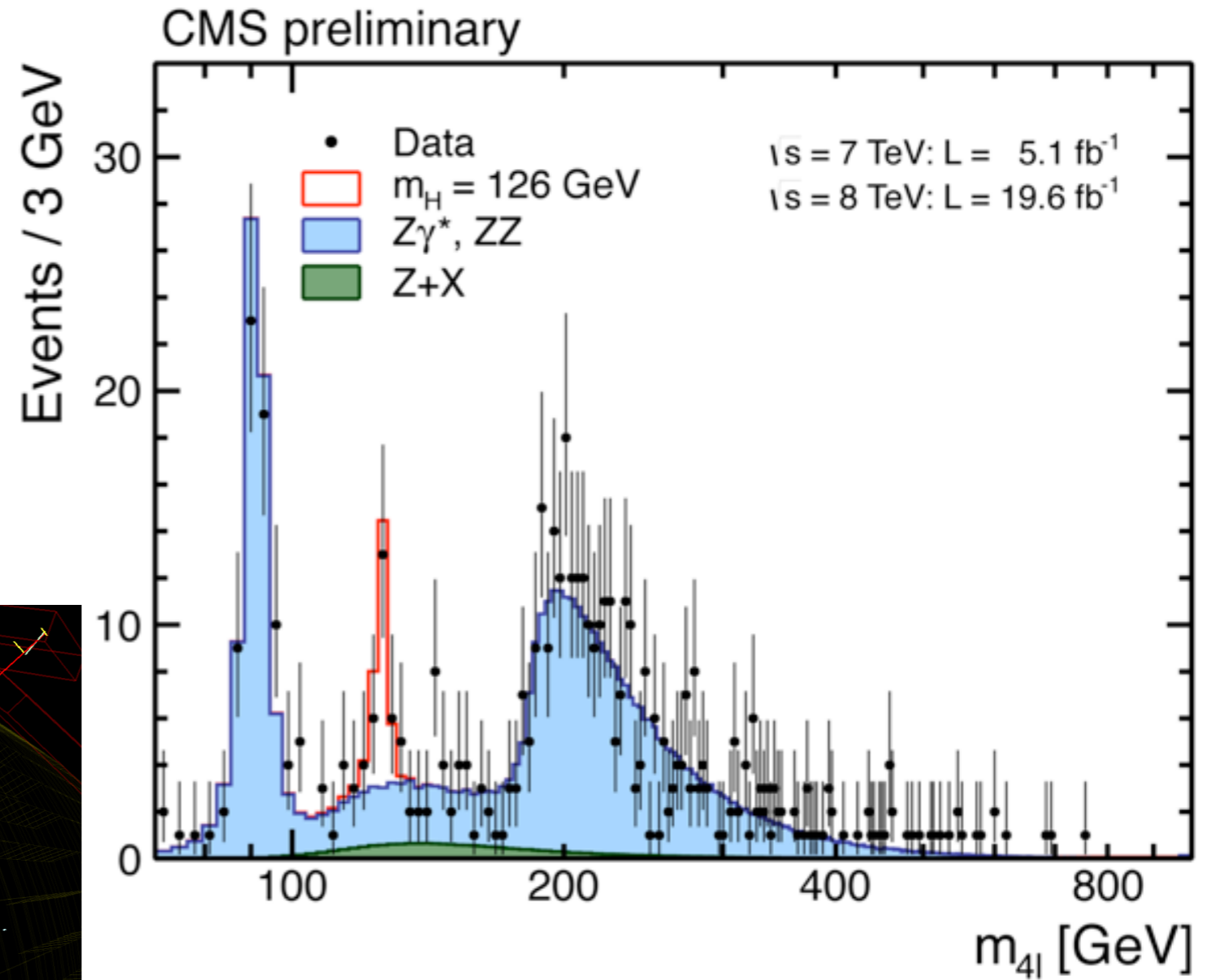
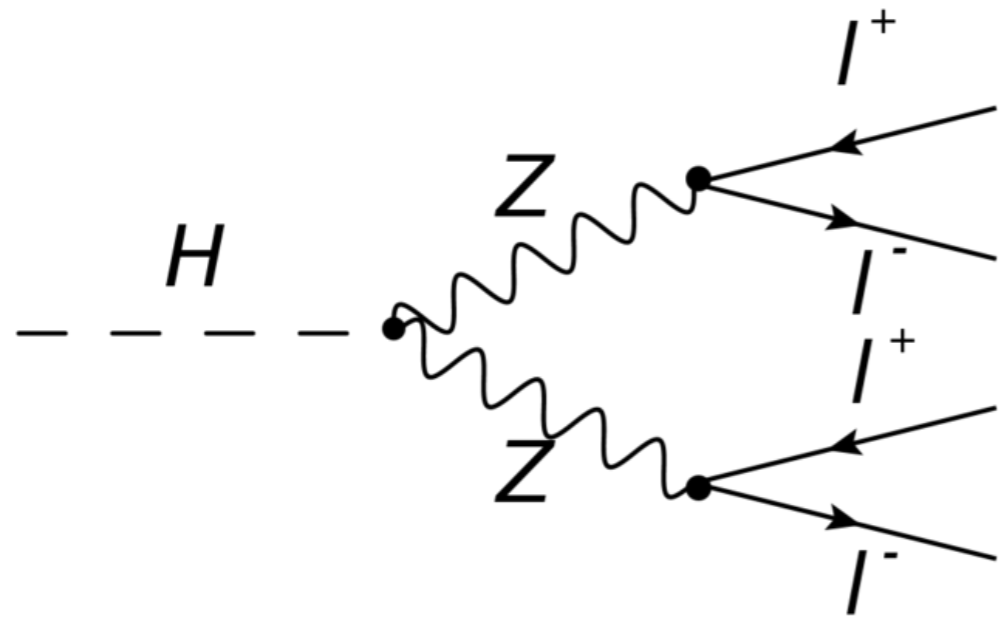


Kaksi fotonia ($H \rightarrow \gamma\gamma$)

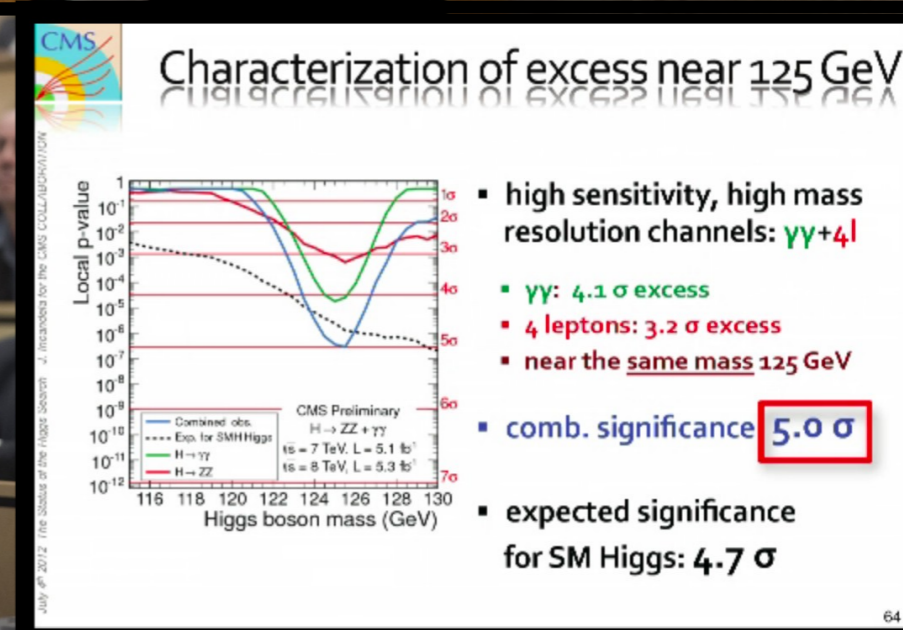


Fotoniparin "invariantti massa" vastaa sen hiukkasen massaa josta fotonit ovat peräisin

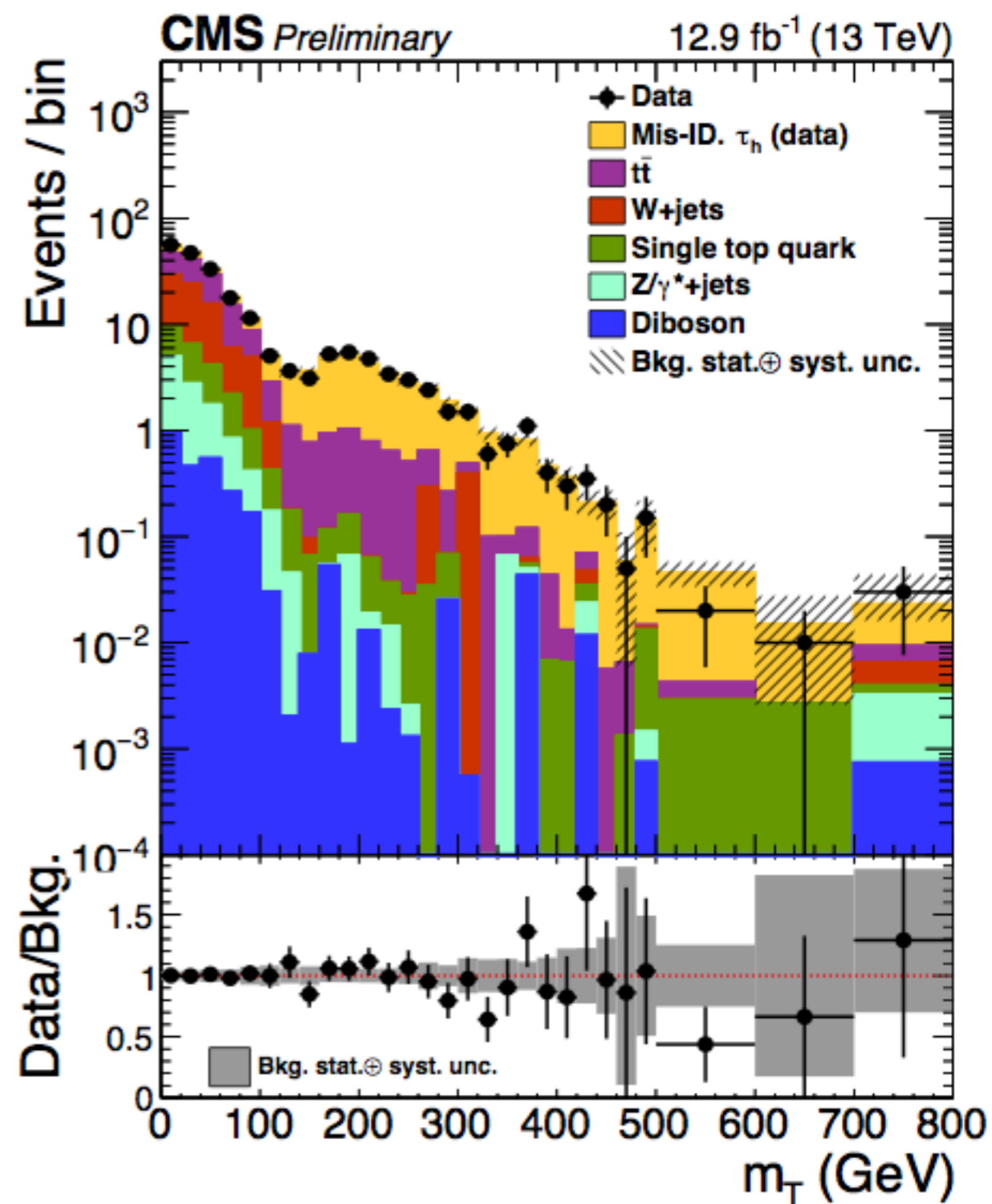
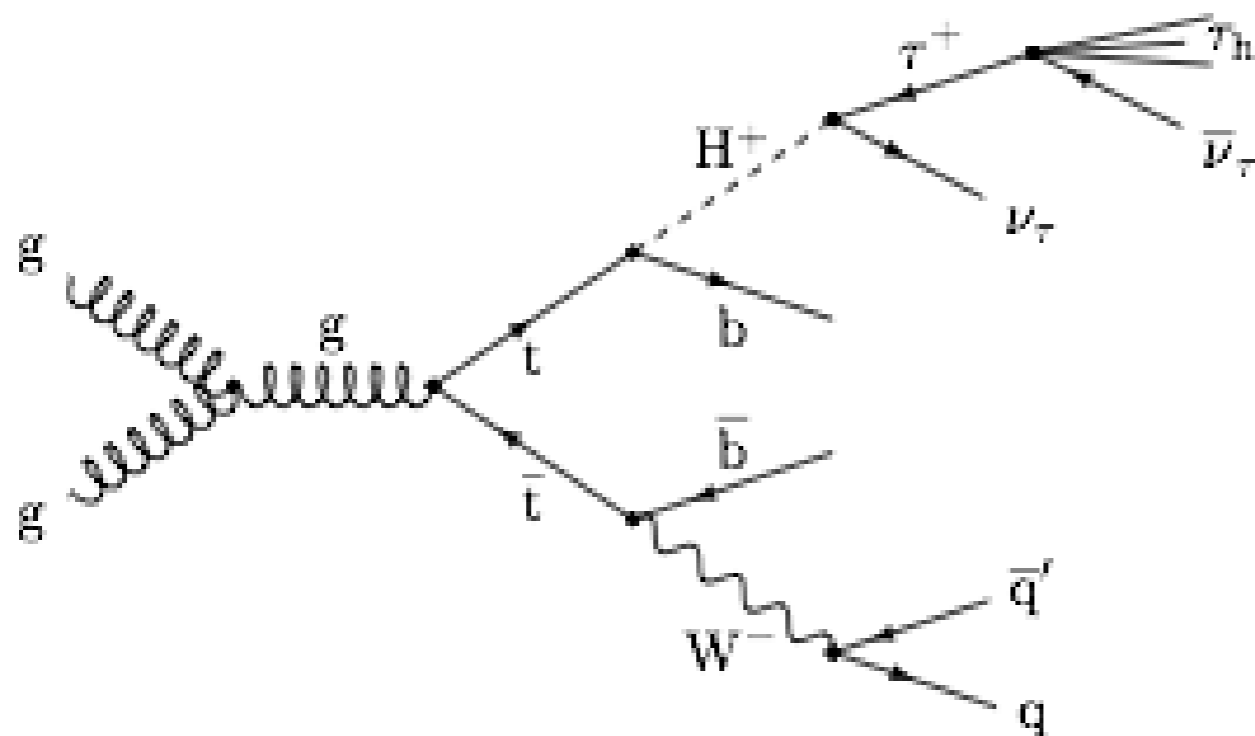
Neljä leptonia ($H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$)



**Neljän leptonin systeemin
 ”invariantti massa”**



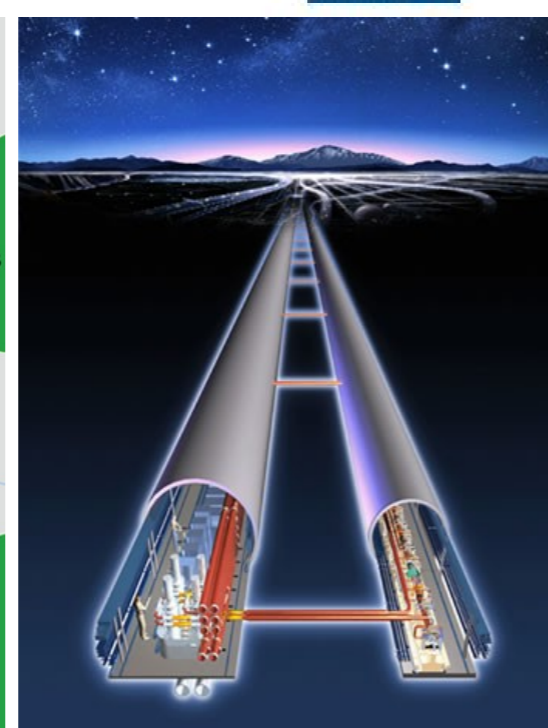
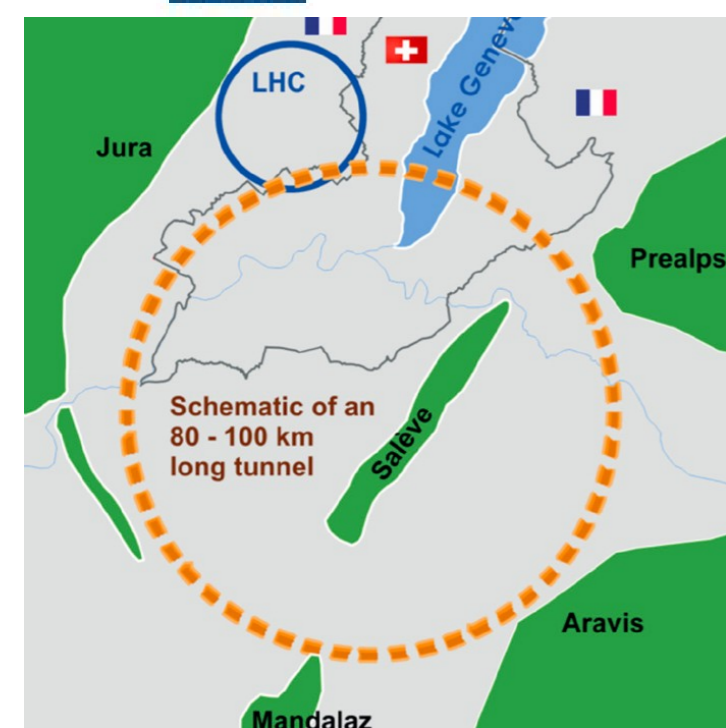
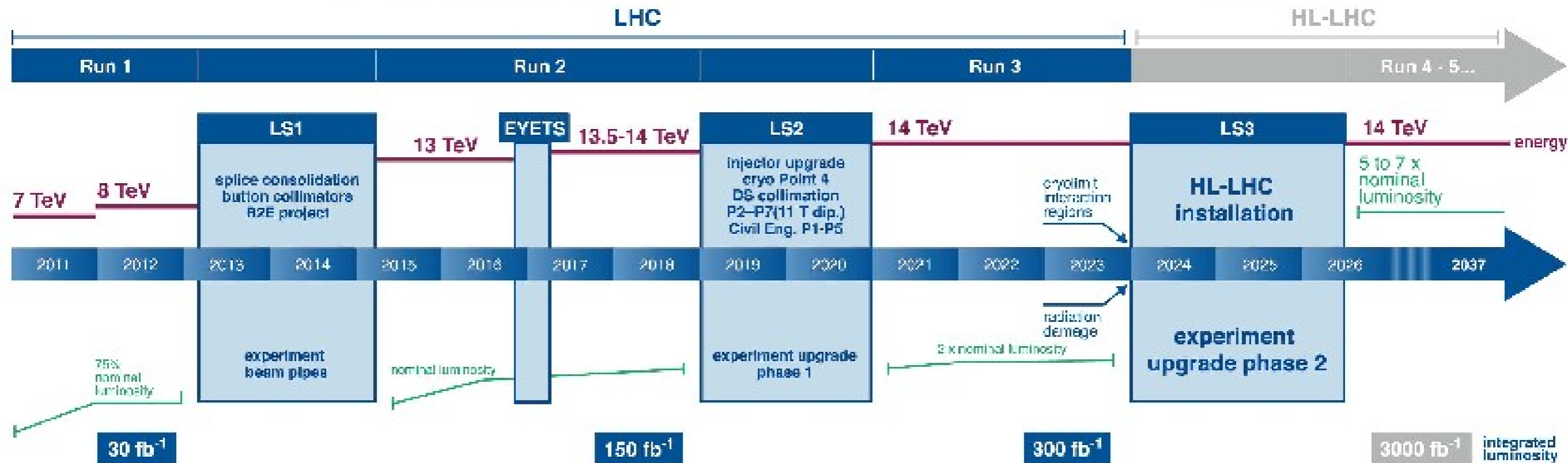
- Monet nykyistä standardimallia laajemmat teoriat ennustavat useita erilaisia Higgsin bosoneita
- Helsingin ryhmä etsii sähkövarauksellista Higgsin bosonia joka hajoaisi tau-leptoniksi ja neutriinoksi



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

- Mitä on pimeää aine? Entä pimeää energia?
- Miksi maailmankaikkeudessa on enemmän materiaa kuin antimateriaa?
- Miten selittää neutriinojen massa?
- Ovatko alkeishiukkaset todella alkeishiukkasia?
- Miksi hiukkasperheitä on kolme?
- Onko luonnossa lisää (rikkoutuneita?) symmetrioita? Supersymmetria?
- Monet nykyistä standardimallia laajemmat teoriat ennustavat useita erilaisia Higgsin bosoneita
- Miten gravitaatio yhdistetään muihin (kvantti)vuorovaikutuksiin?
- Onko ulottuvuuksia tasan $3+1$?
- Onko löytämämme Higgsin bosoni standardimallin ennustama ja ainoa?

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.

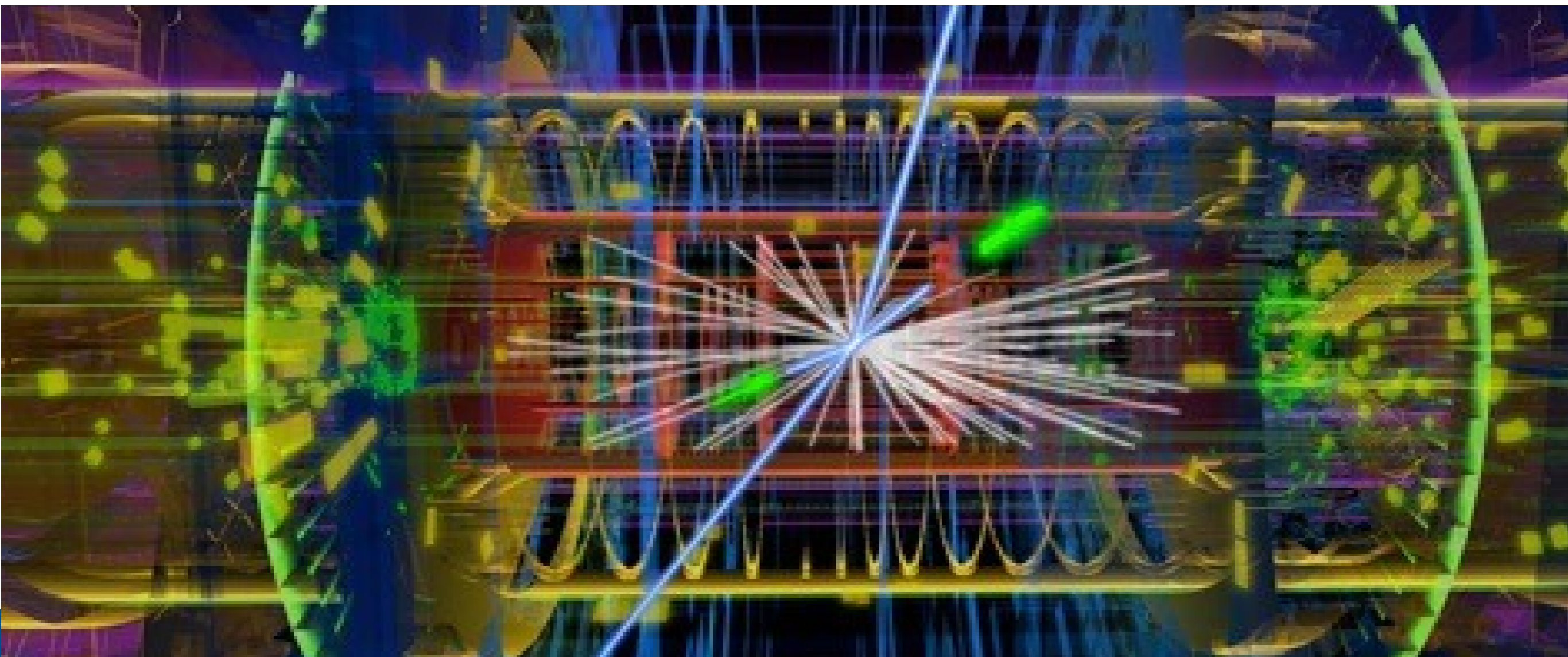
- Proton collider
- Electron-positron collider
- CERN-HOSTED LARGE HADRON COLLIDER**
2009–35
Energy: 14 teraelectronvolts (TeV)
US\$5 billion
Circumference: 27 km
- JAPAN-HOSTED INTERNATIONAL LINEAR COLLIDER**
Proposed: 2030
Energy: ≤1 TeV
US\$10 billion
Length: 31 km

- CHINA-HOSTED ELECTRON-POSITRON COLLIDER**
Proposed: 2028
Energy: 0.24 or ≤0.35 TeV
US\$3 billion
50 or 100 km
- CHINA-HOSTED PROTON COLLIDER**
Proposed: 2030s
Energy: 70–100 TeV or 100–140 TeV
50 or 100 km
- CERN-HOSTED SUPER PROTON COLLIDER**
Proposed: 2035–40
Energy: 100 TeV
< US\$10 billion

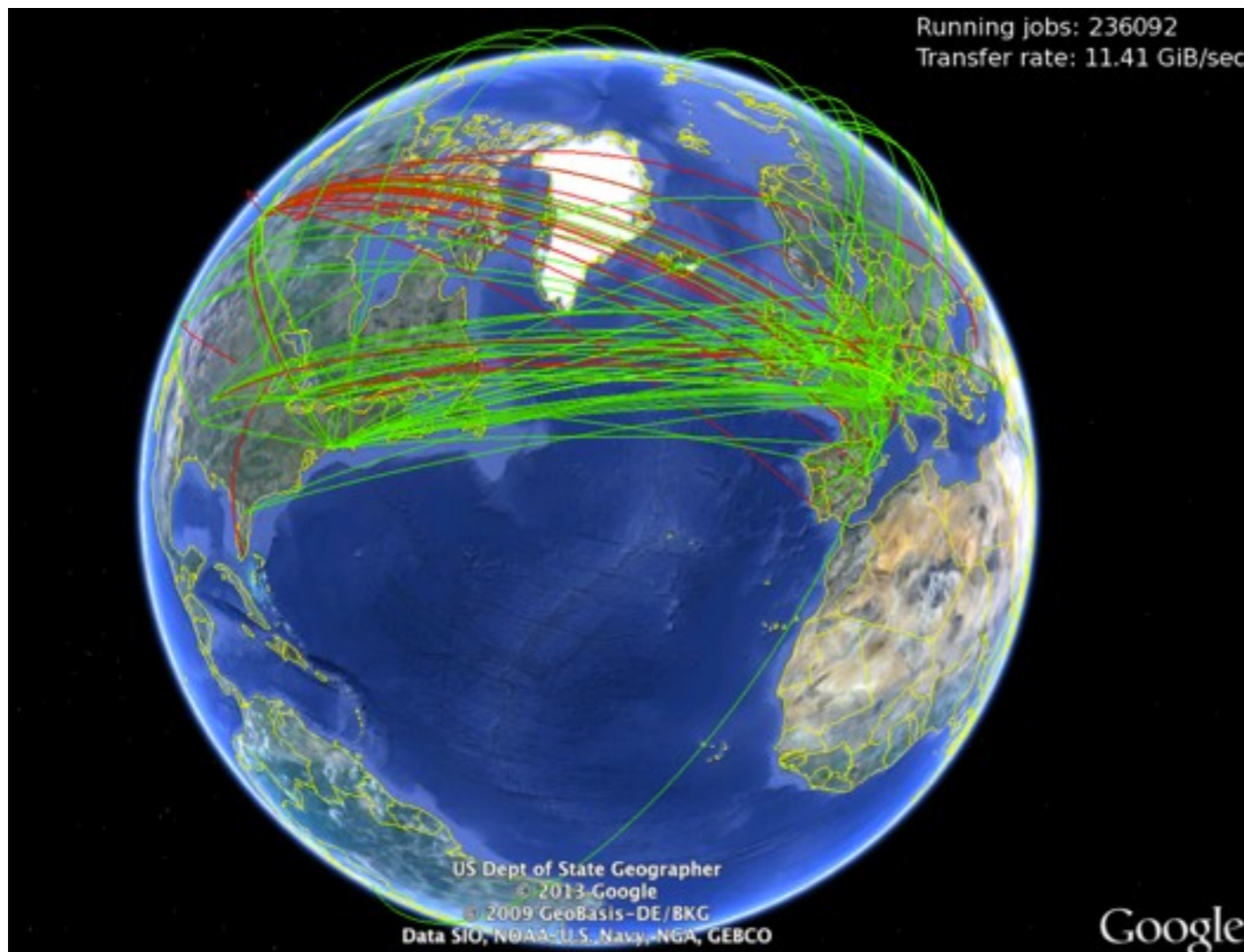
Kiitos!

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/c²) voi käyttää samaa energiayksikköä **GeV** (vastaa noin protonin massaenergiaa)



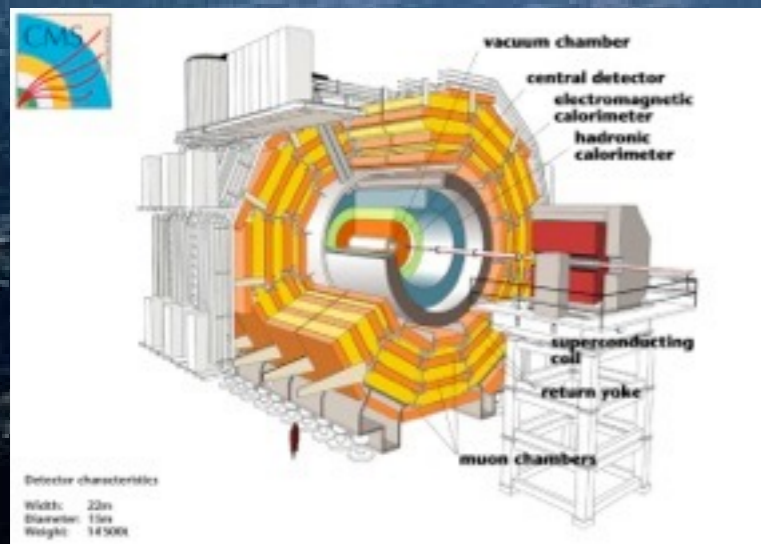
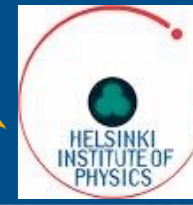
- Myös CERNin datan käsittely on jaettu maailmanlaajuisesti
- Kaikesta datasta yksi kopio CERNissä (Tier-0)
- Varmuuskopio jossain päin maailmaa (Tier-1)
- Analyysikopioita (Tier-2, Tier-3) jaettuna useille tietokonekeskuksille
- Datan voi analysoida lähettämällä työn tietokonekeskukselle, jolla on kopio



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

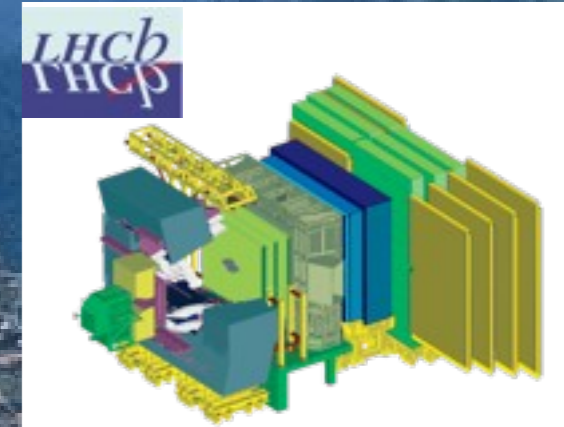


LHC:n koeasemat



CMS
+TOTEM

B-fysiikkaa
protoni-protoni
-törmäyksillä



LHCb
+MoEDAL

Yleisilmaisoin
protoni-protoni ja
lyijy-lyijy -törmäyksille

SPS-törmäytin

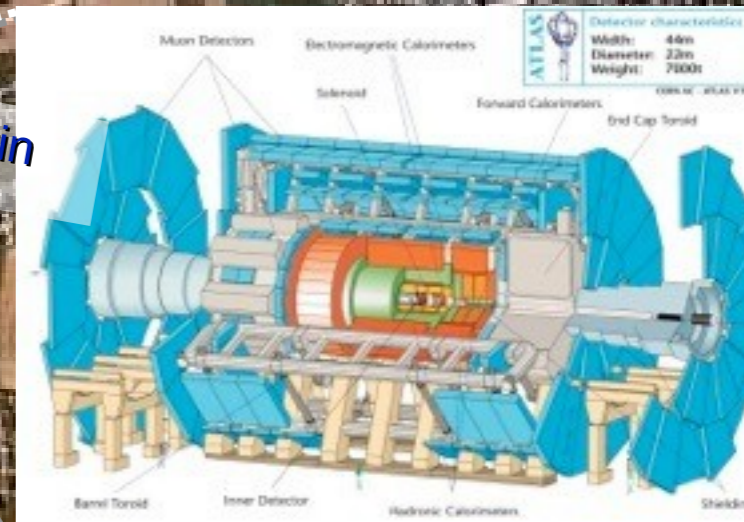
Raskas-ionifysiikka



ALICE

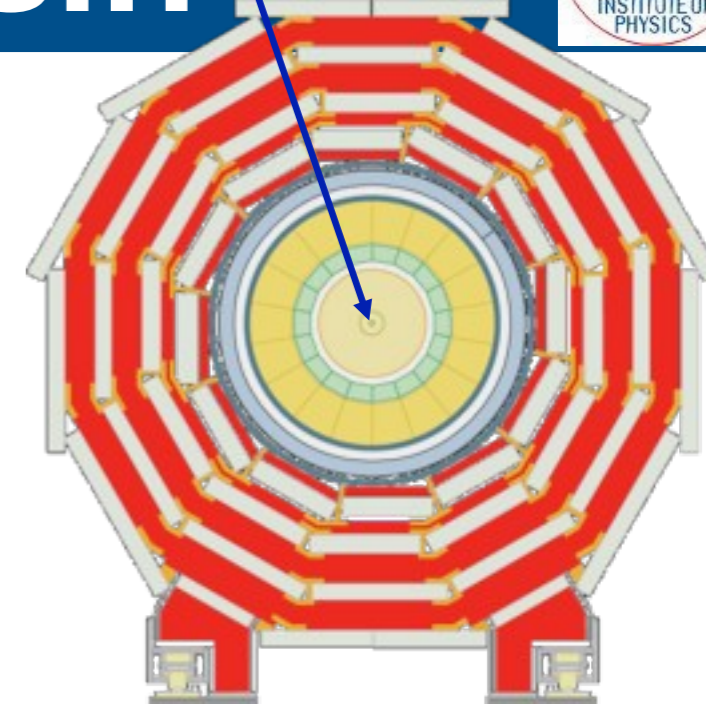
ATLAS
+LHCf

PS-törmäytin

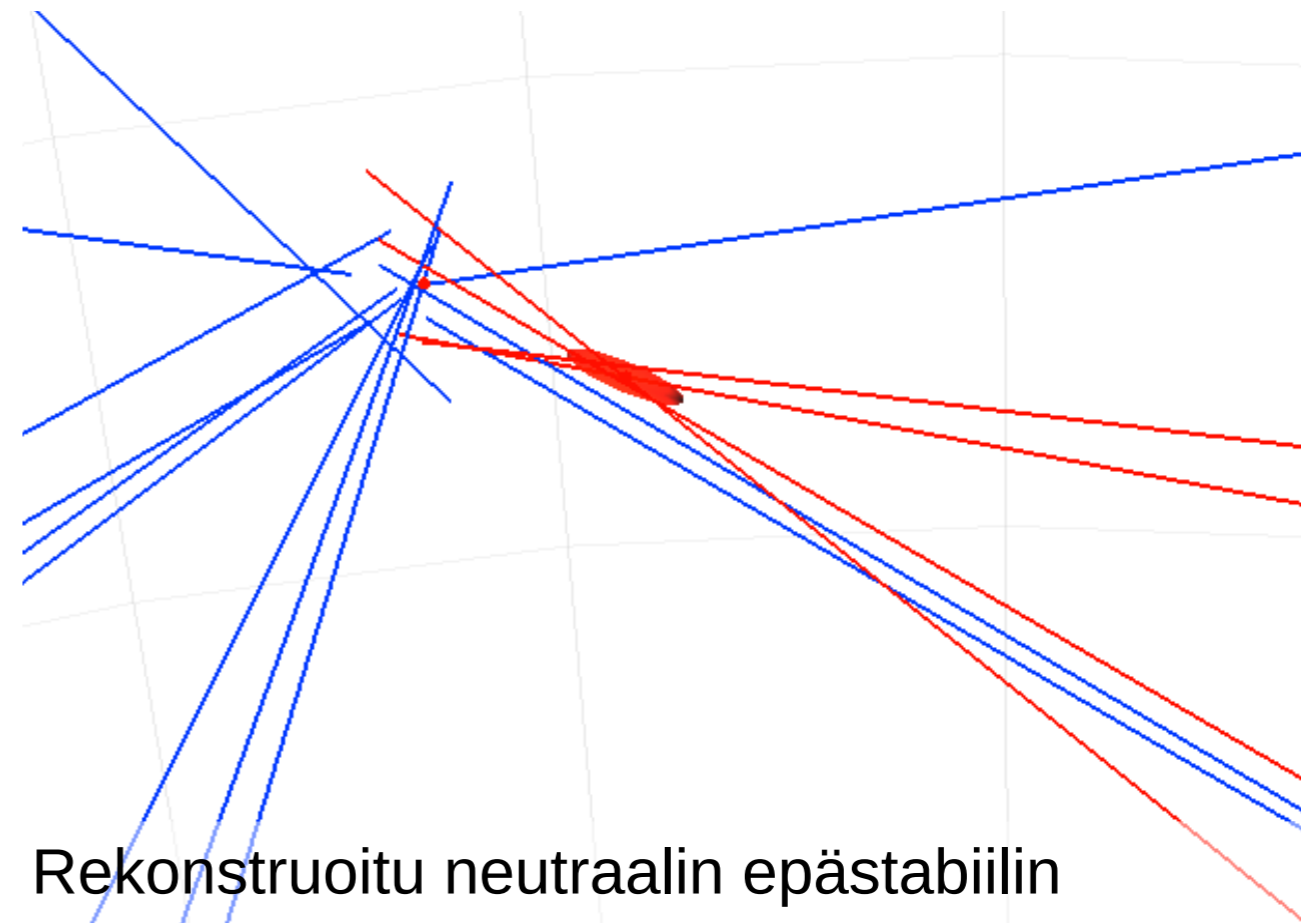




- Sisempi osa jälki-ilmaisimesta: piipikseli-ilmaisimia
 - 70 milj. piipikseliä, joiden koko $100\ \mu\text{m} \times 150\ \mu\text{m}$
 - Toimintaperiaate: varatut hiukkaset tuottavat piissä (puolijohde) elektroni–aukko-pareja
 - Vähintään kolme mittauspistettä kullekin radalle
 - Mahdollistaa hiukkasen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

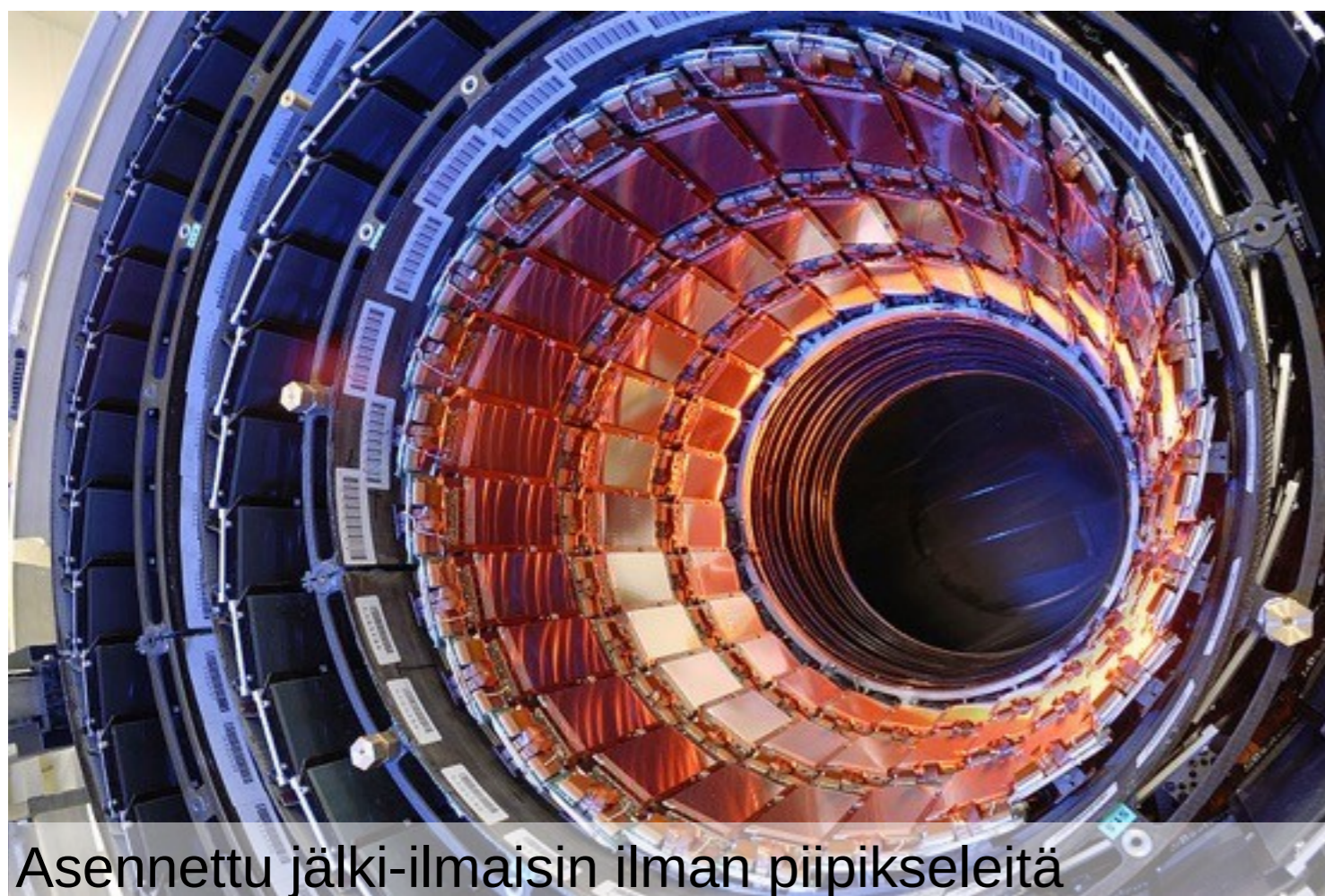
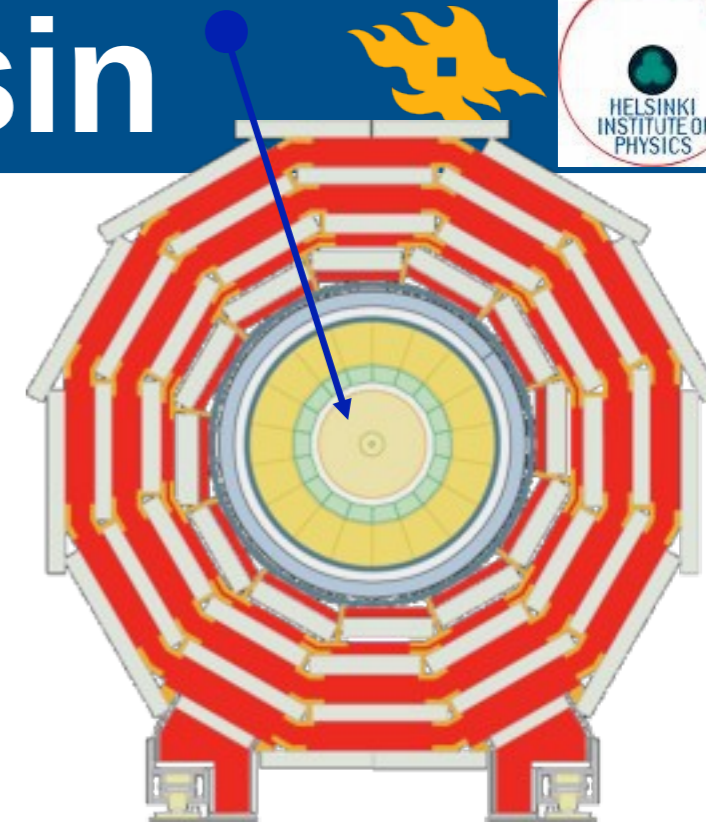


Puolikas piipikselimoduuli

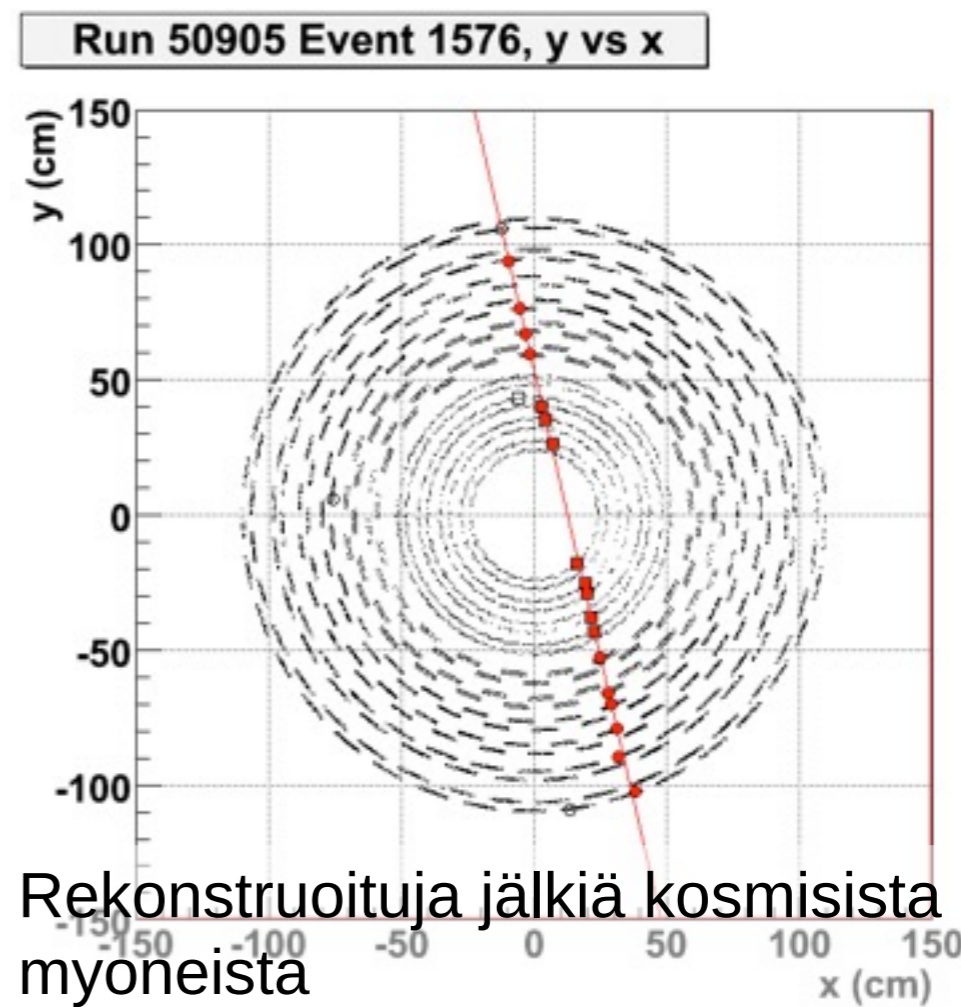


Rekonstruoitu neutraalin epästabiliin hiukkasen (D^0) hajoamispiste

- 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

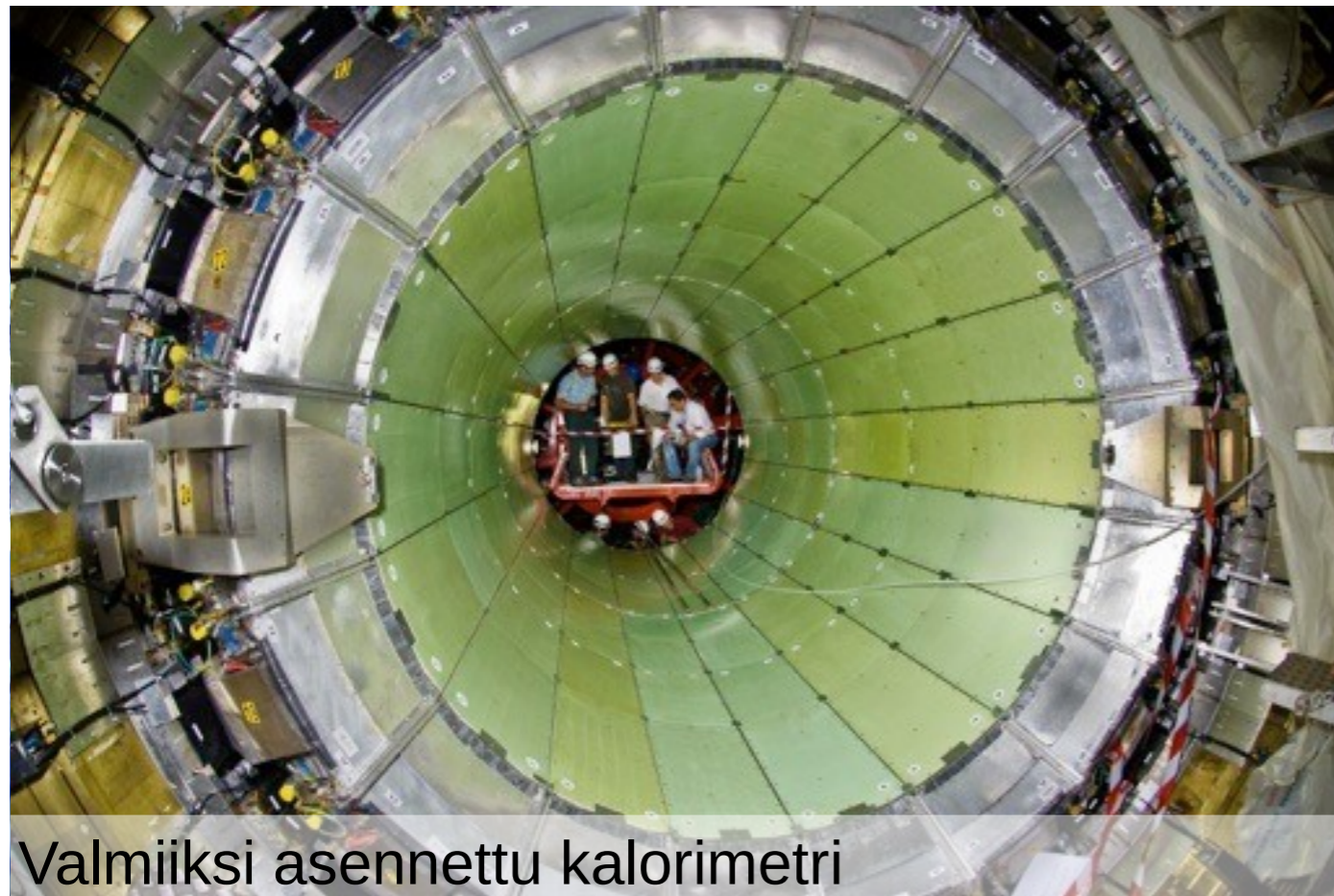
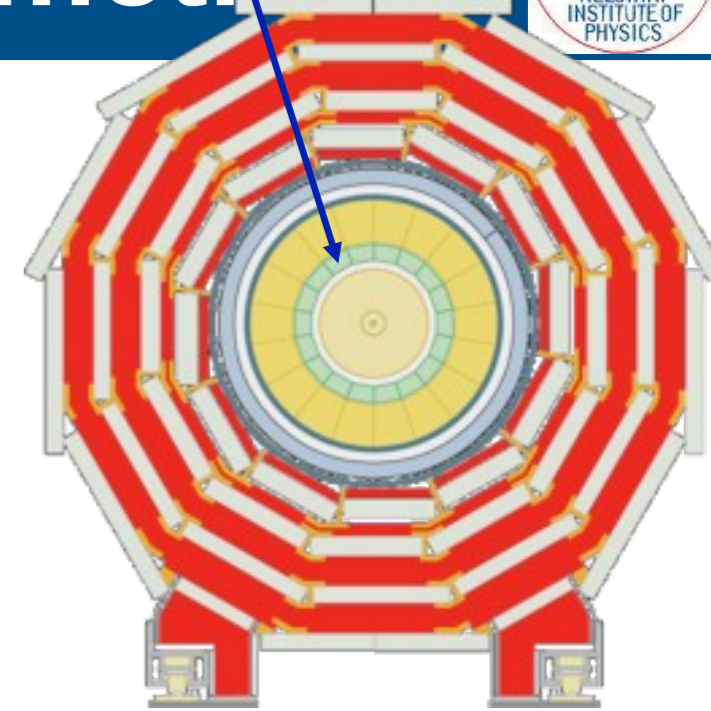


Asennettu jälki-ilmaisimien ilman piipikseleitä

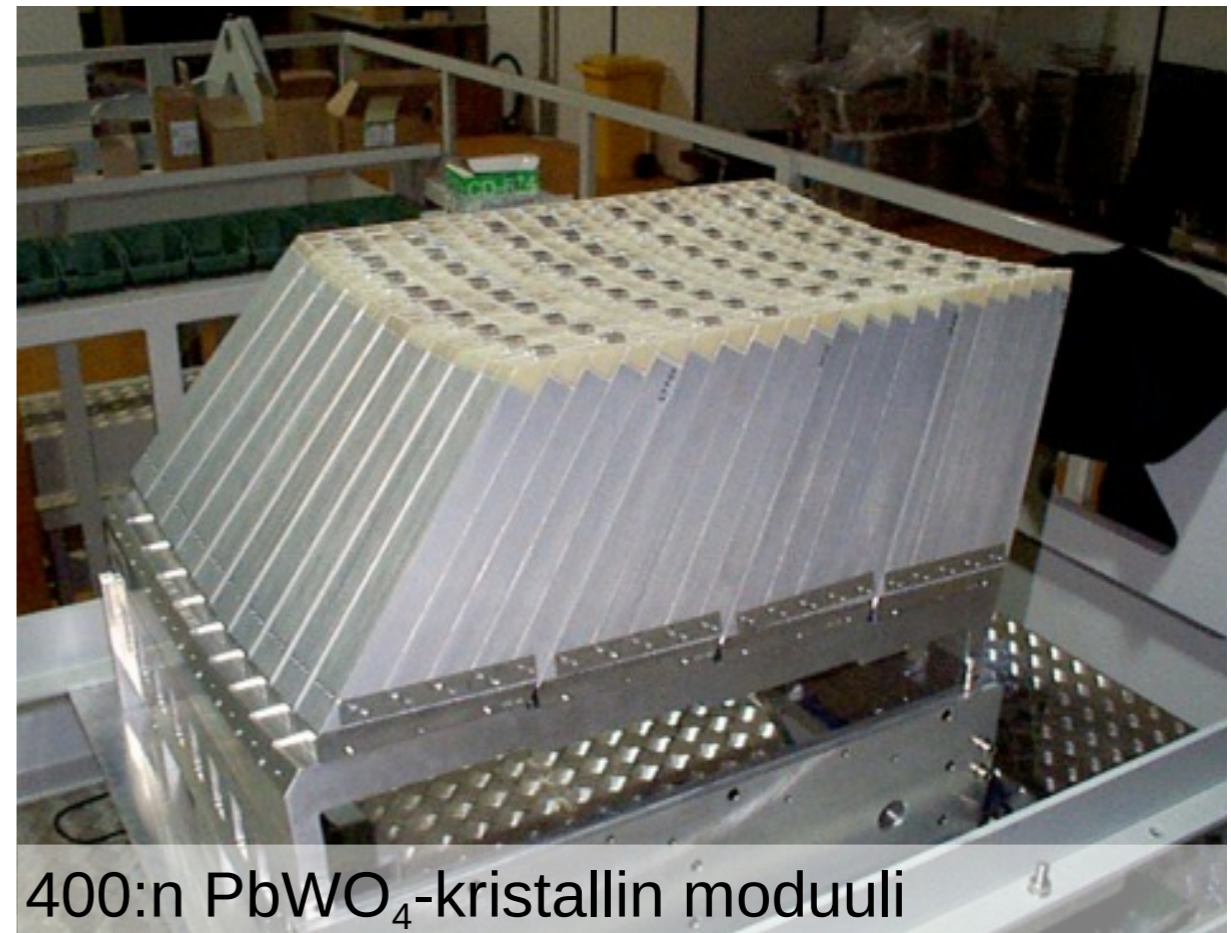




- N. 80.000 PbWO_4 (lyijyvolframaatti)kristallia
- Pysäyttää elektroneit/positroneit sekä fotonit
- Signaali perustuu tuikevaloon: hiukkanen virittää atomeita, viritystilän purkautuminen tuottaa fotonin, valon kokonaismäärä verrannollinen hiukkasen energiaan
- Valo johdetaan valonmonistimiin, jotka muuttavat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

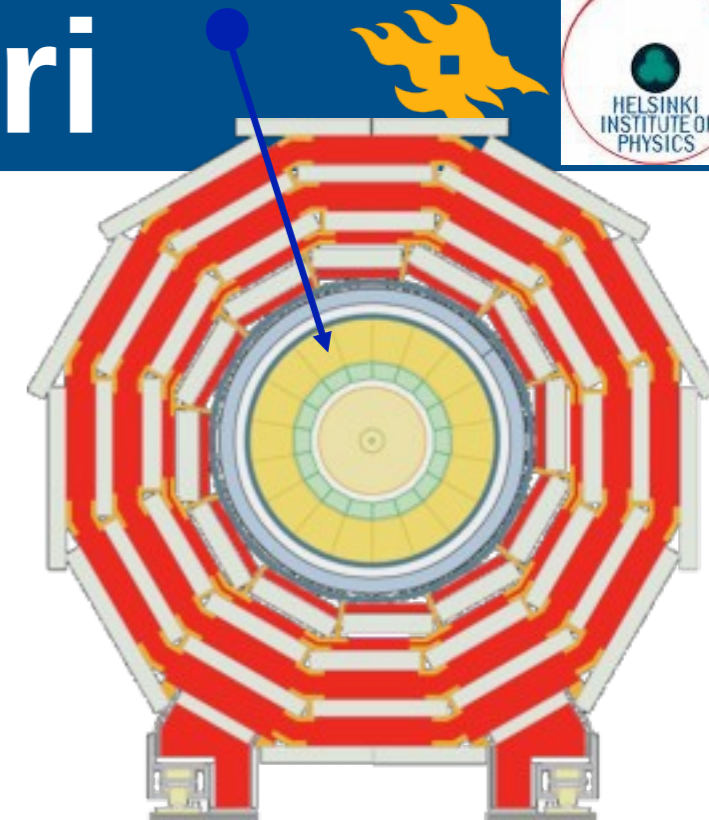


Valmiiksi asennettu kalorimetri



400:n PbWO_4 -kristallin moduuli

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

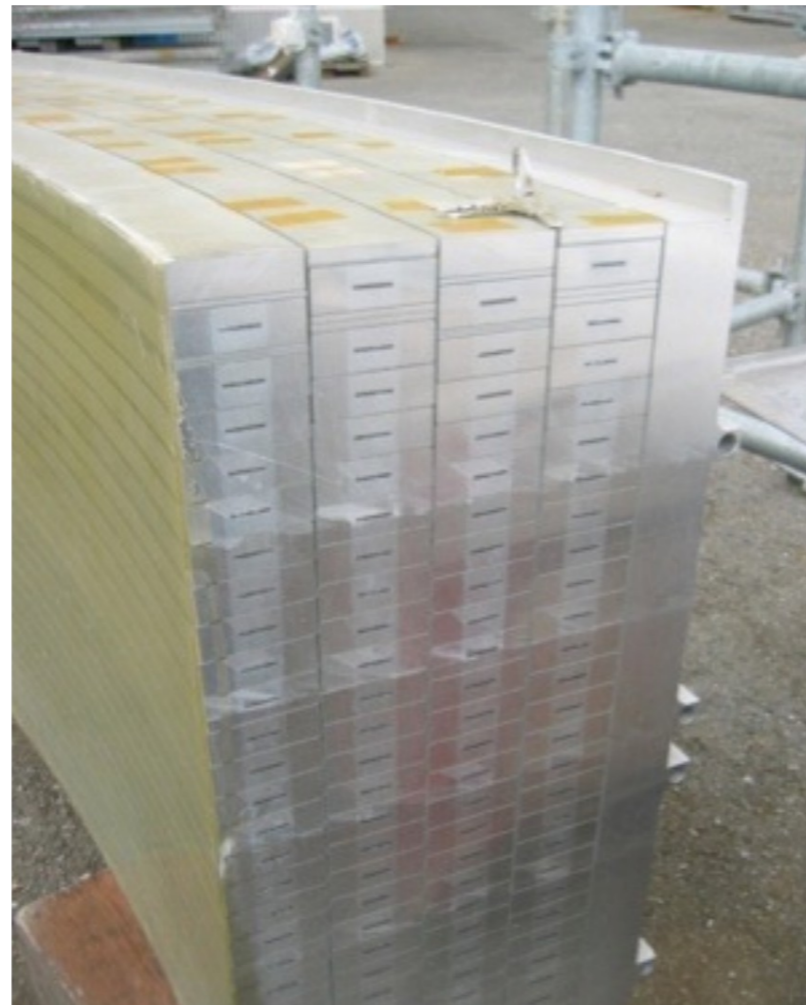
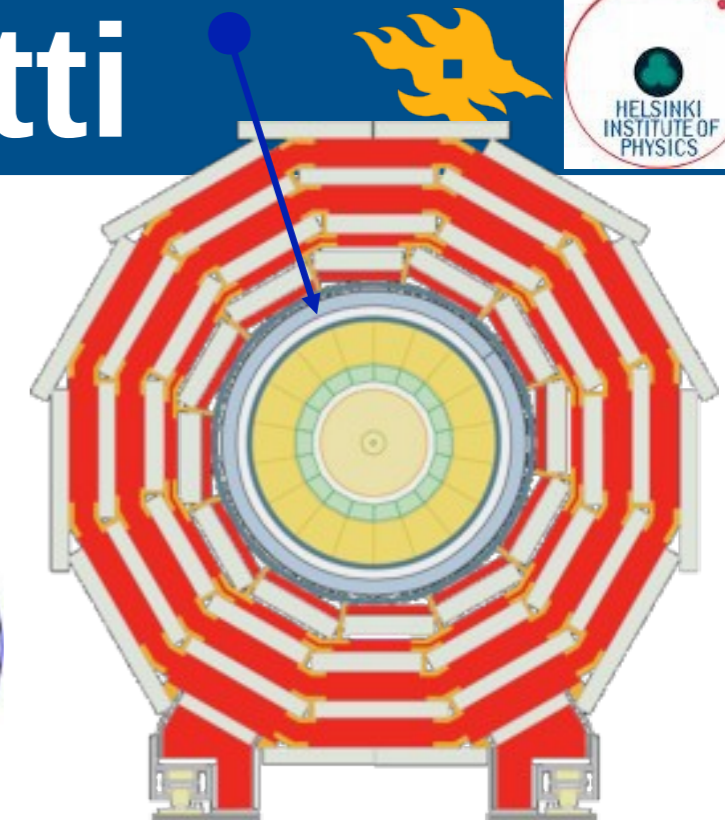


Valmiiksi koottu kalorimetri

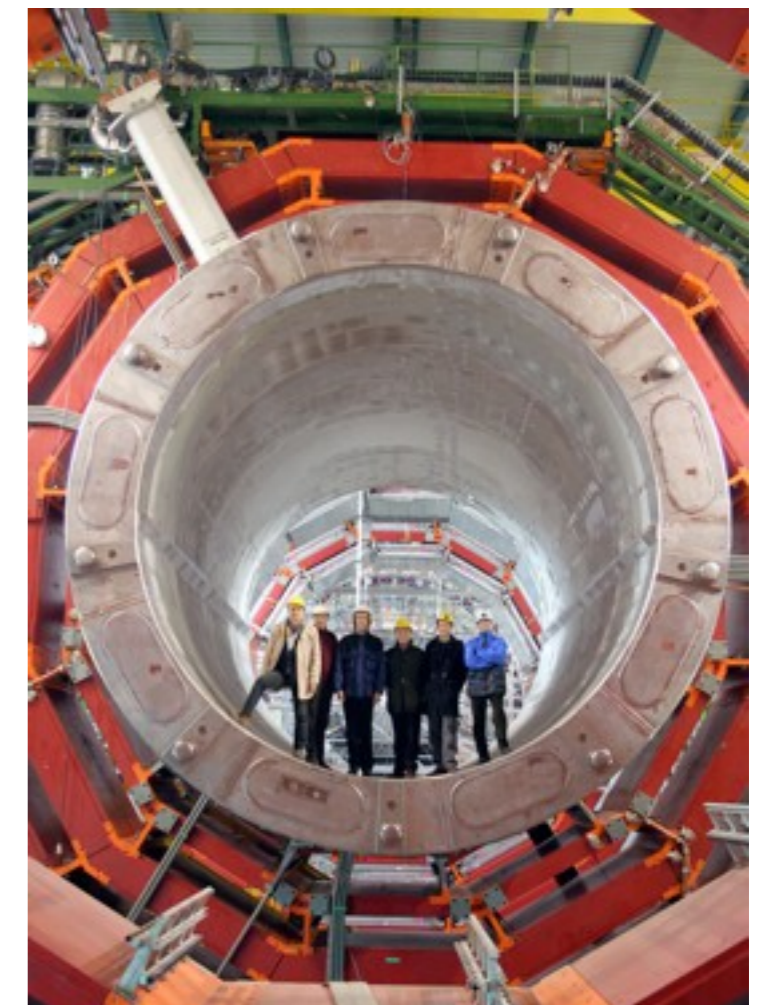


Kierrätettyä messinkiä Venäjän laivastolta

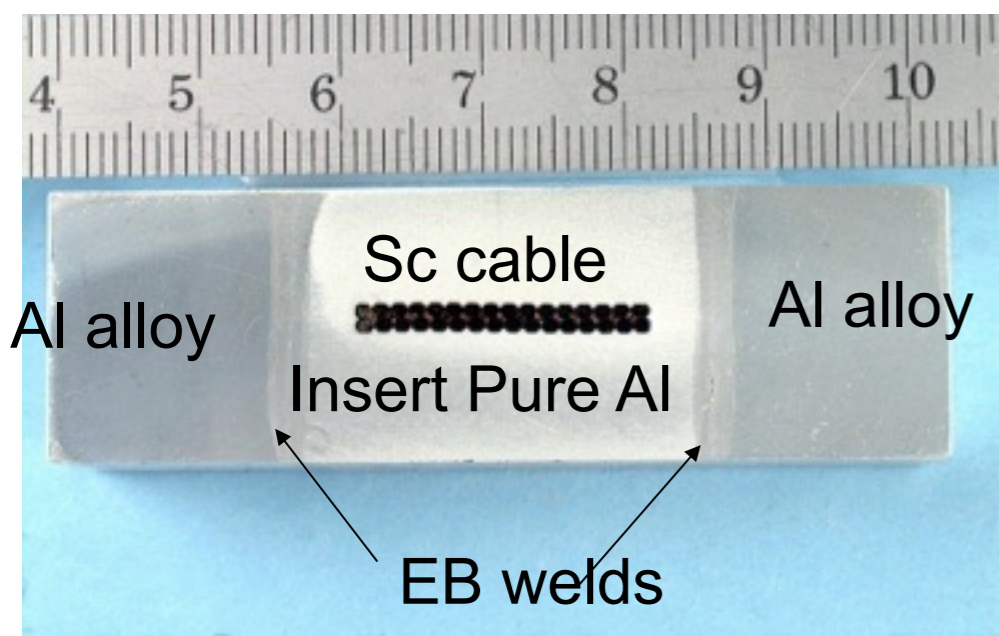
- Suurin koskaan rakennettu suprajohtava magneetti
 - magneettikenttä 3.8 T (max 4.0 T)
 - operointilämpötila: 5 K (220 t kylmämassa)
 - magneettikenttään varastoitunut energia: 2.3 GJ (riittää sulattamaan 17 t kultaa)
 - kaareuttaa varattujen hiukkasten lentoratoja**
- Magneettivuon hajautuminen ympäristöön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



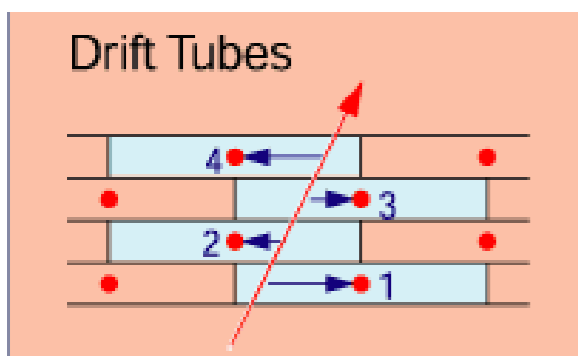
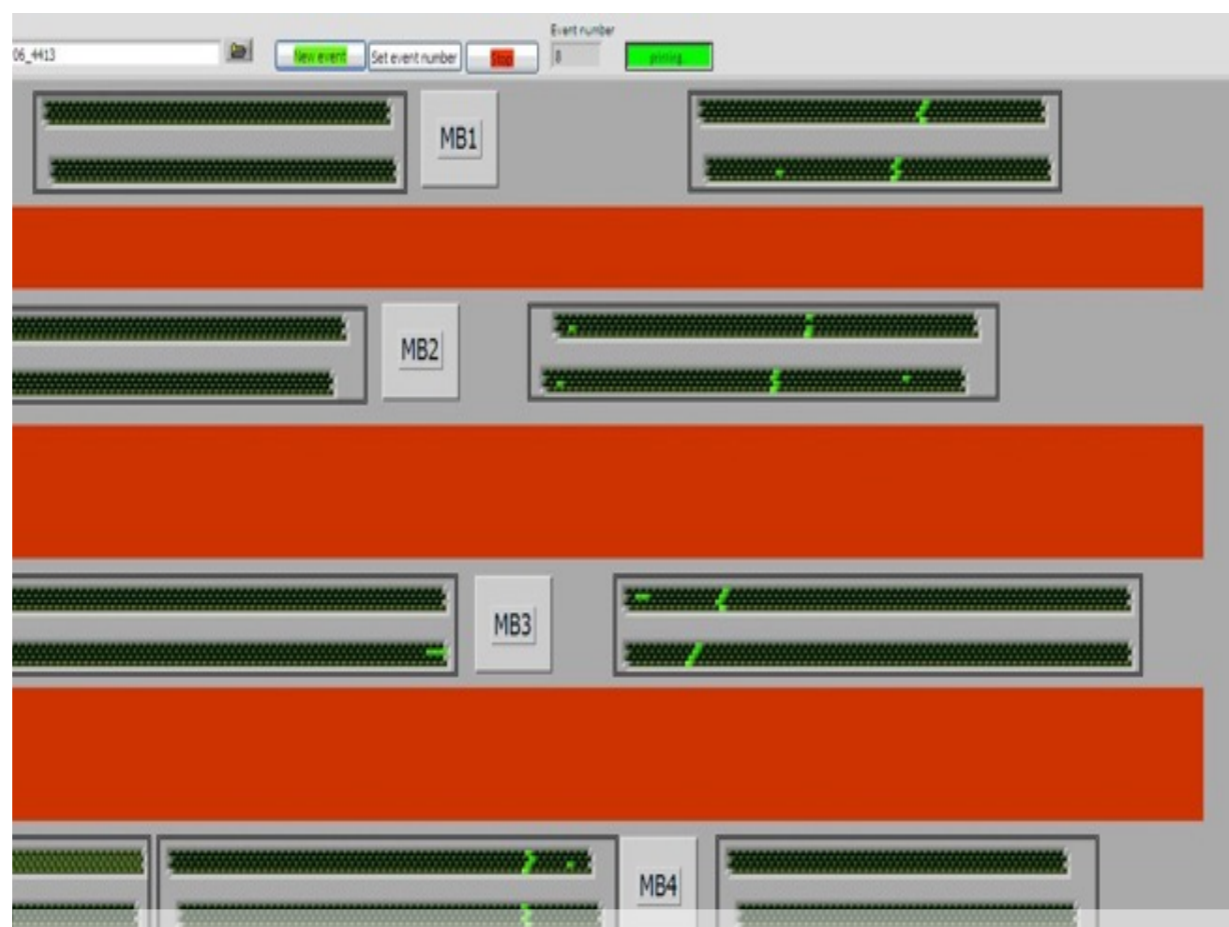
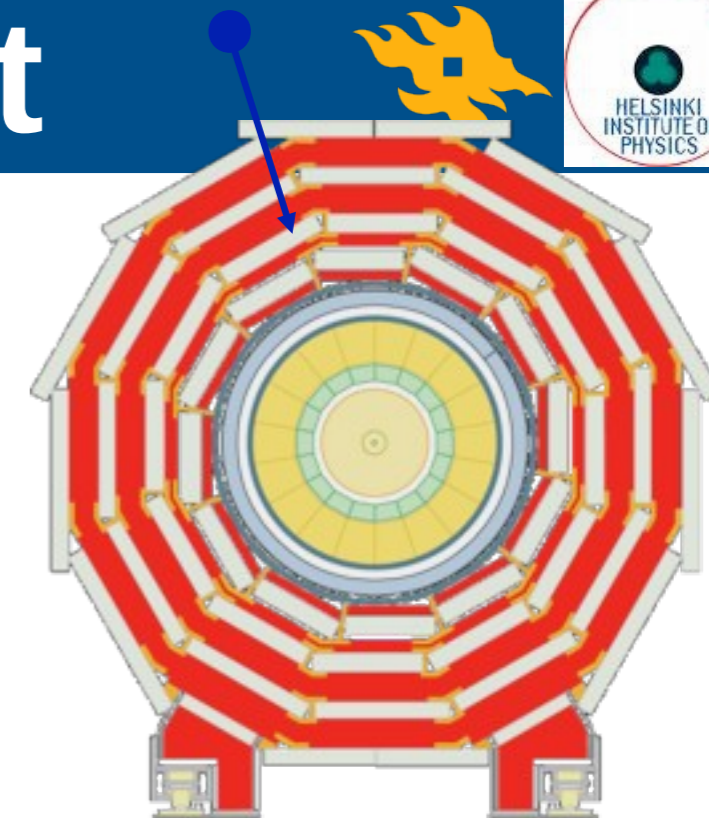
Mallikappale käämityksestä



Asennettu magneetti



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



Mittauspisteitä kosmisesta myonista



Asennettuja ilmaisimia



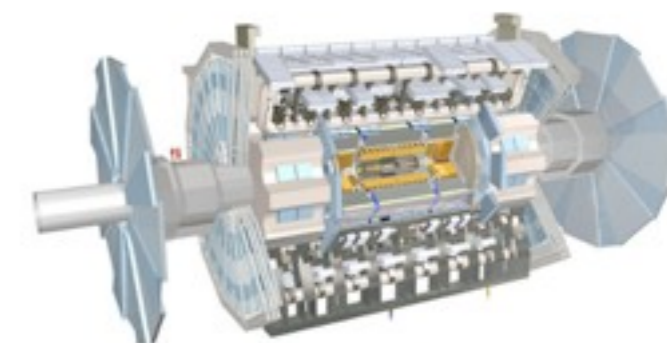
A Large Ion Collider Experiment
 Tutkii kvarkki-gluoniplasmaa lyijy-lyijy-
 ydintörmäyksillä



LIISA IHMEMAASSA



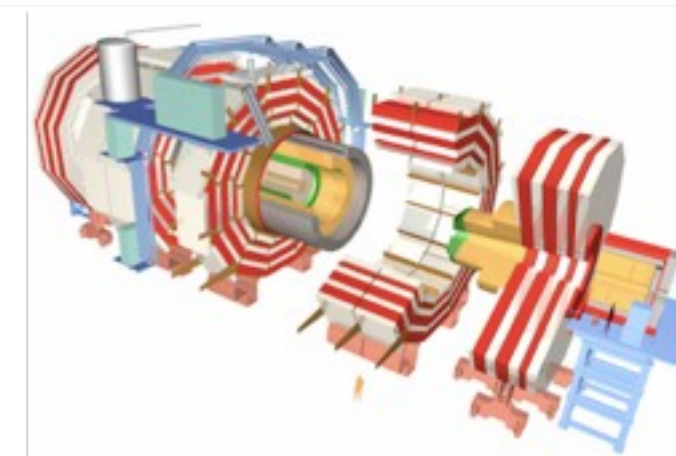
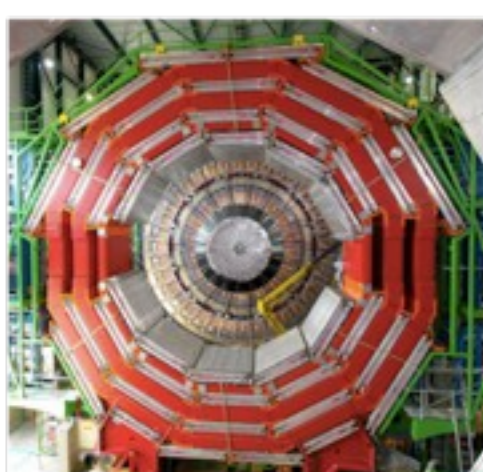
A Toroidal Lhc ApparatuS
 Yleiskäyttöinen ilmaisim: Higgsin
 bosoni, supersymmetria jne.



KOOKKAIN

Compact Muon Solenoid

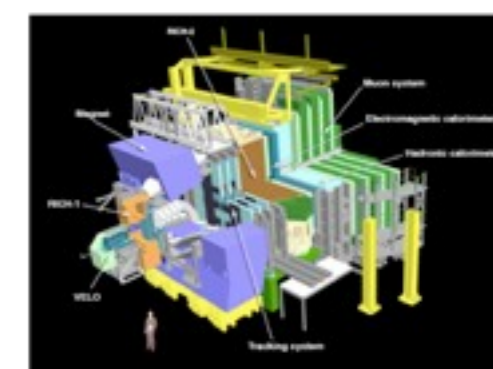
Yleiskäyttöinen ilmaisim. Loistava
 fotonikalorimetri, suuri magneetti,
 myonikammiot



RASKAIN

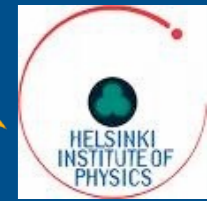
LHC Beauty Experiment

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





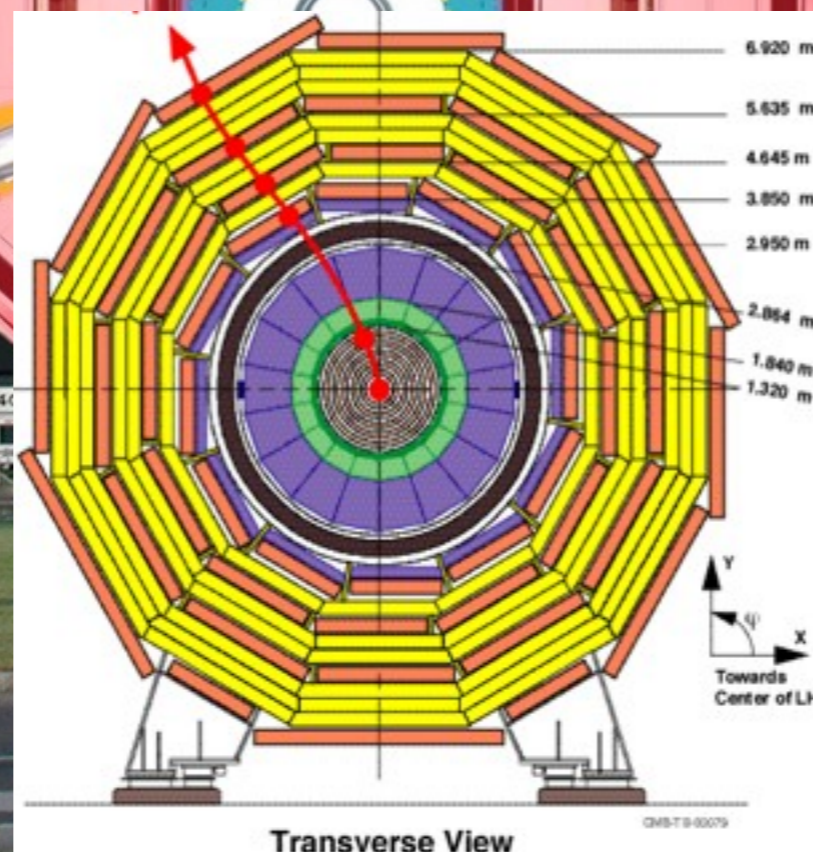
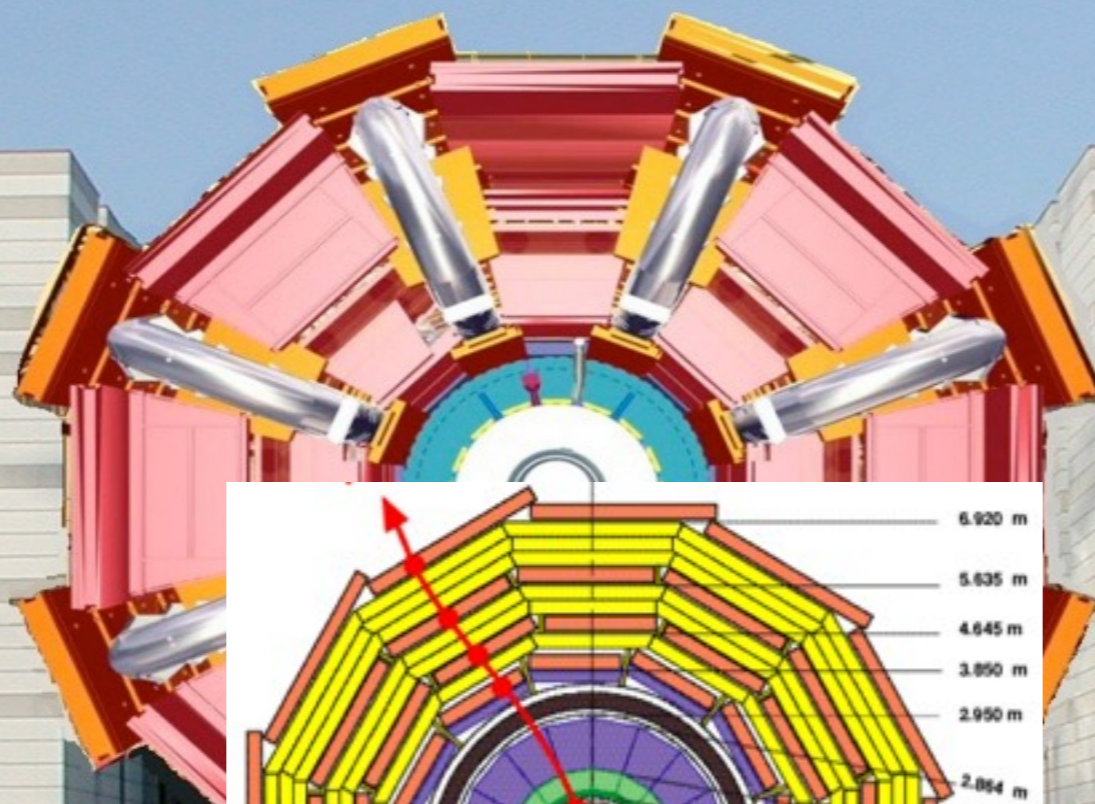
Pienet kohteet - isot laitteet



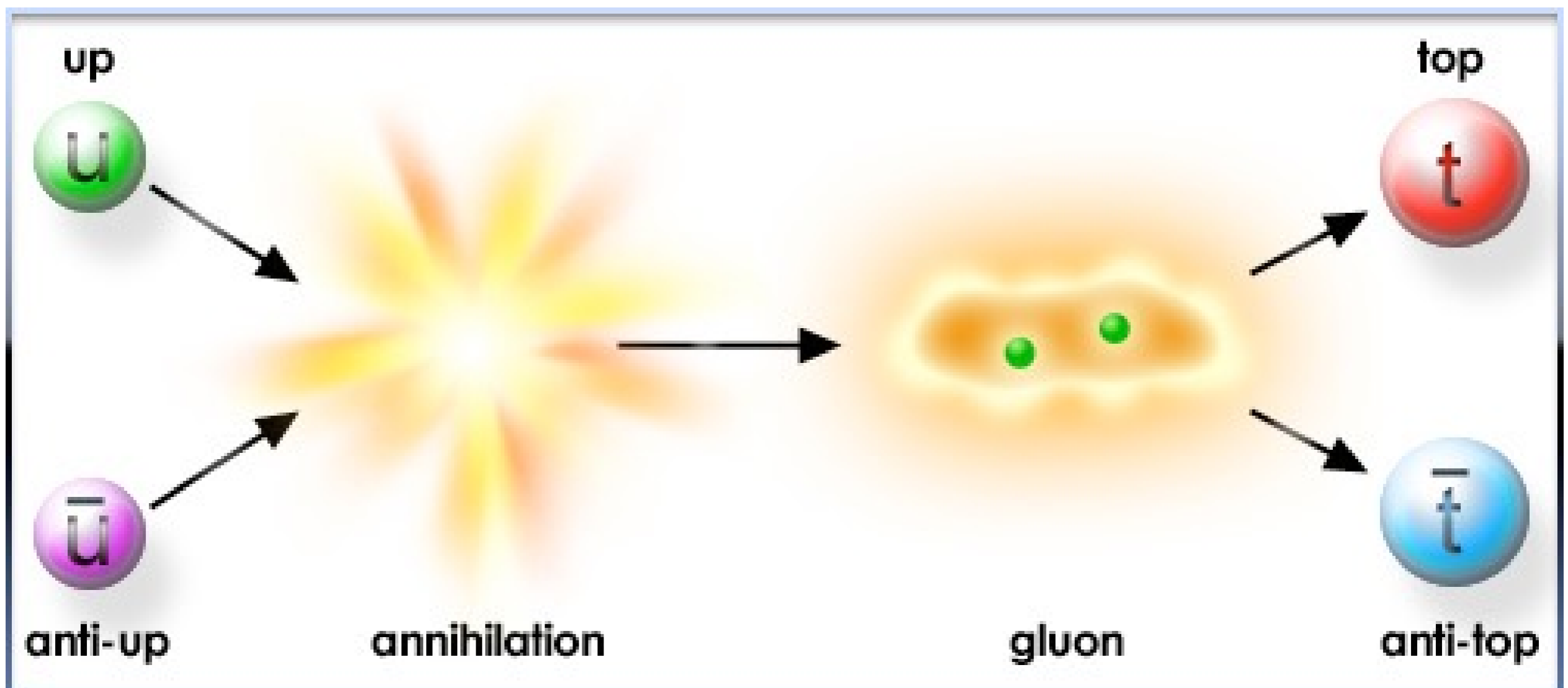
CERN, Building 40

CM
S

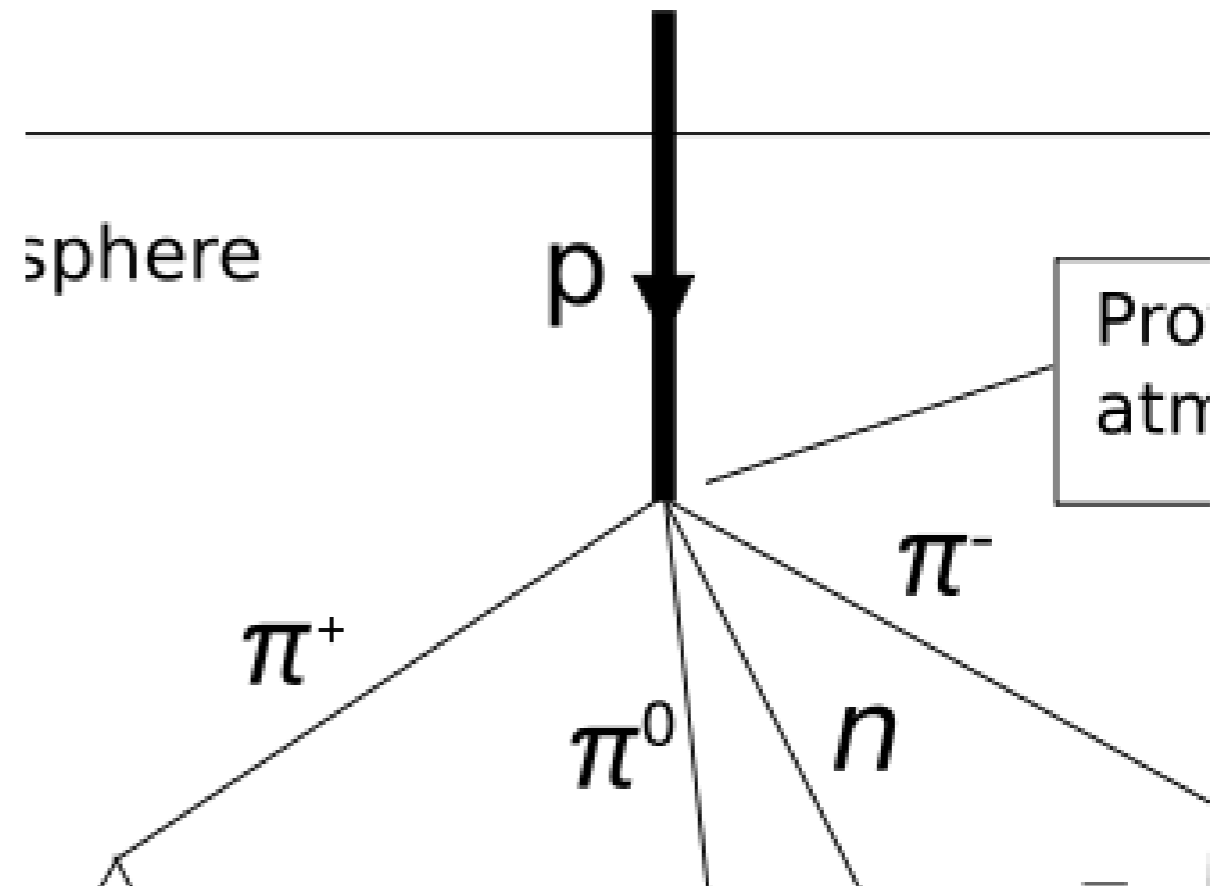
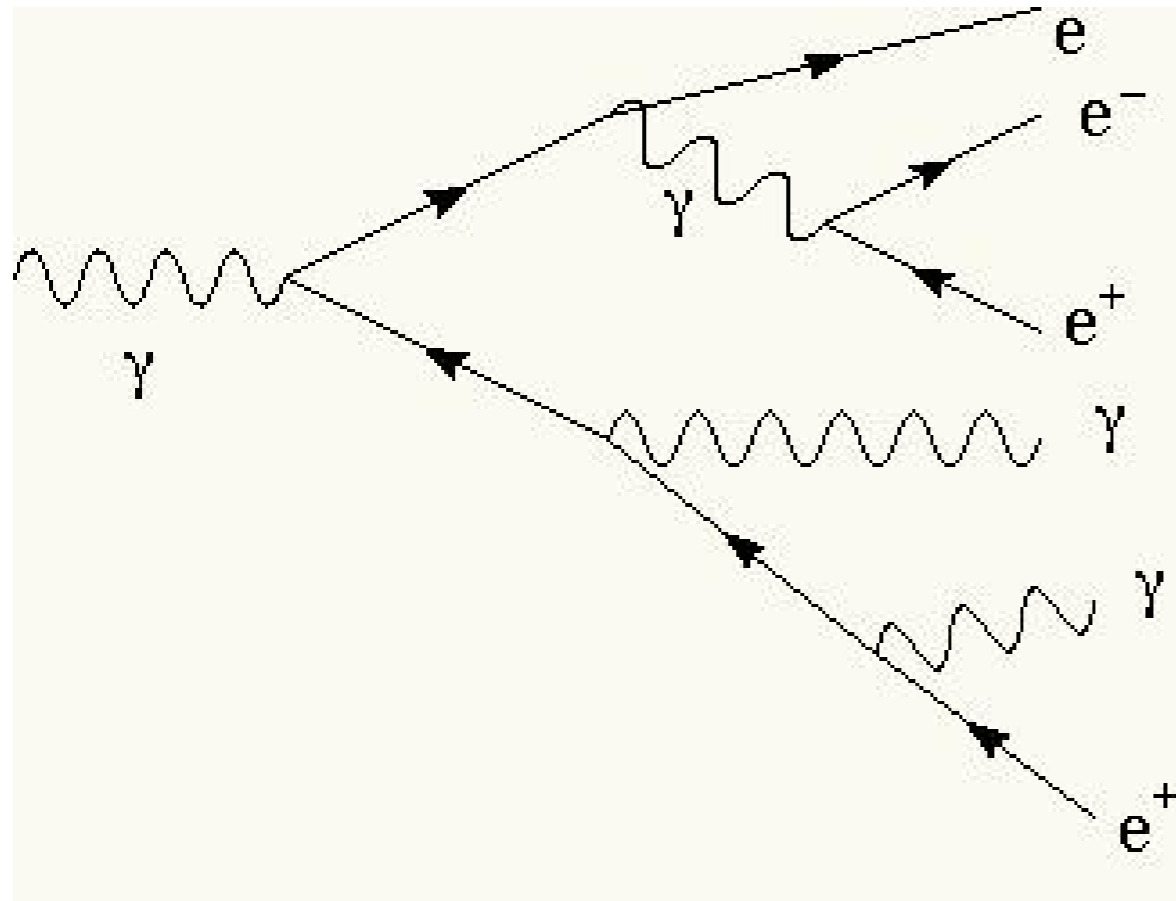
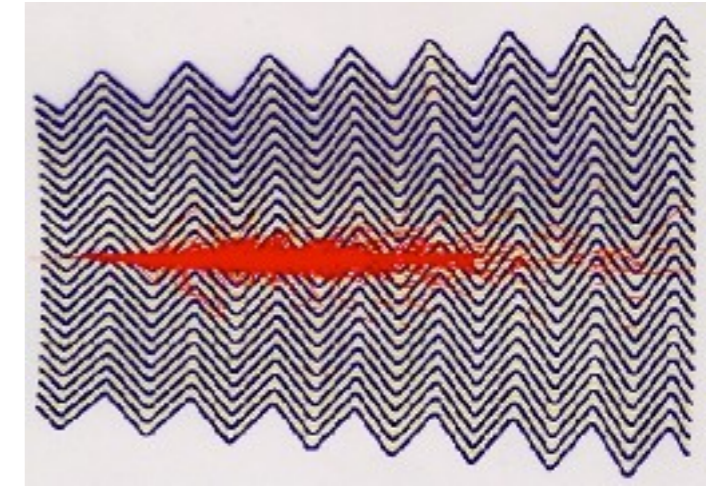
ATLAS



- 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 antihiukkanen kohtaavat, syntyy puhdasta energiaa



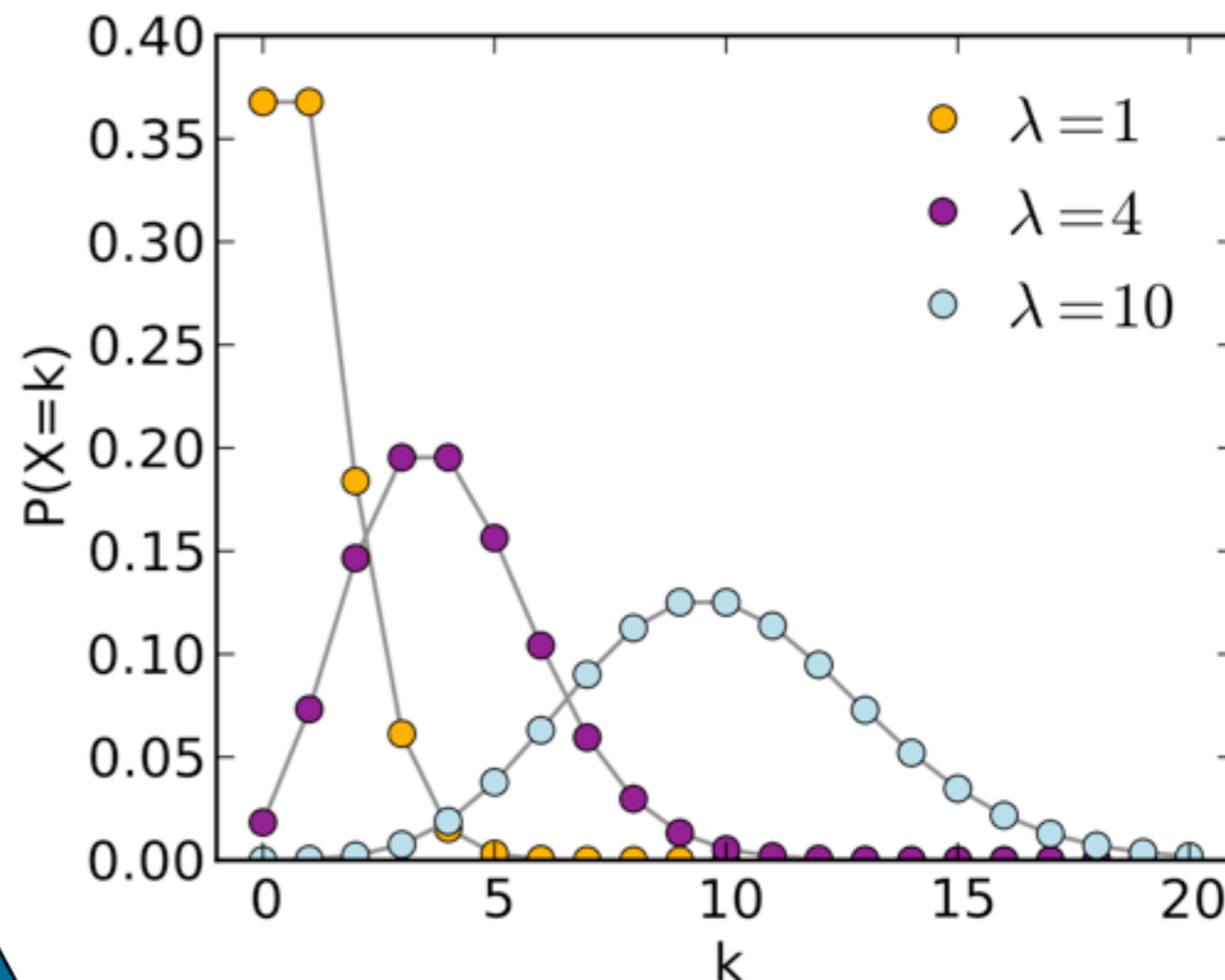
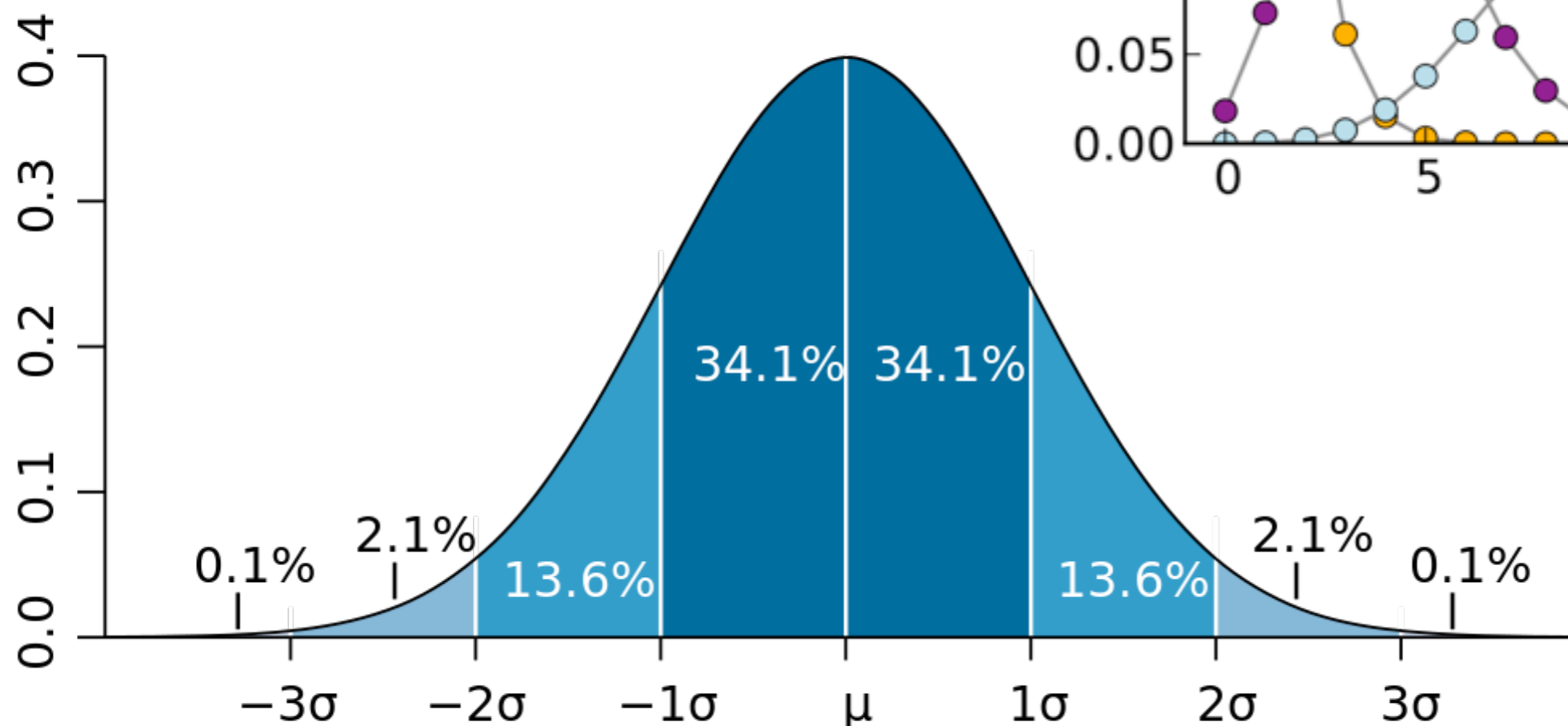
- Kalorimetreissä primäärihiukkanen tuottaa kuuron sekundäärihiukkasia:
 - **sekundäärihiukkasia** syntyy niin kauan kuin energiaa riittää niiden tuottoon
 - **sähkömagneettinen kuuro**, n. 2 cm x 20 cm
 - **jarrutussäteily** ja **e^+e^- -parintuotto** ytimen sähkökentässä vuorottelevat
 - jarrutussäteily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



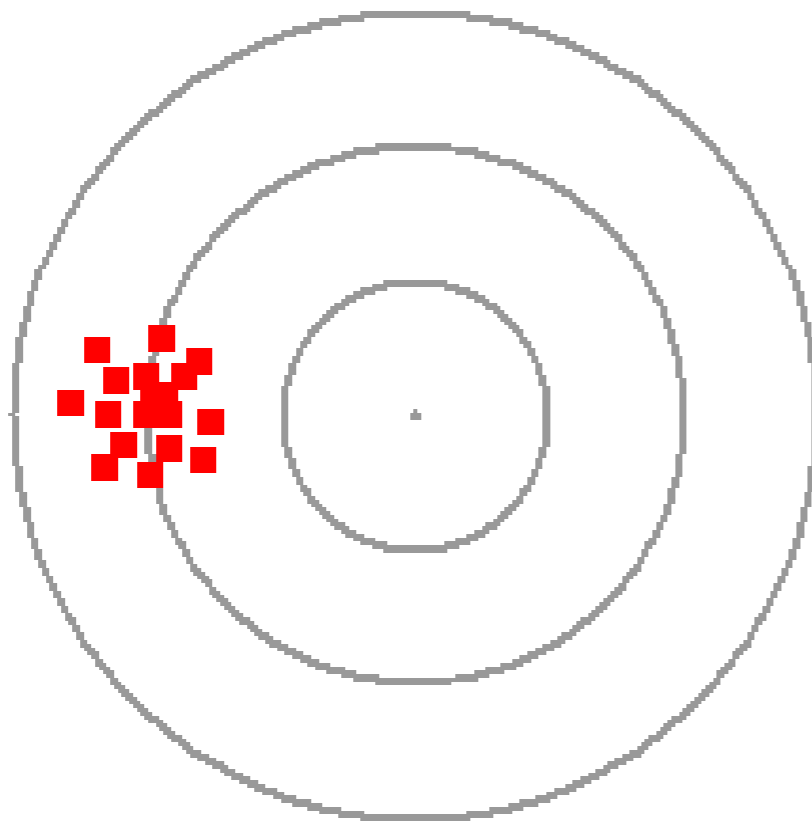
- a) Kuinka Higgsin bosoni voi hajota kahteen W tai Z bosoniin, vaikka sen massa on alle puolet näiden massoista?
 - $m_H = 125 \text{ GeV}$, $m_Z = 91.2 \text{ GeV}$, $m_W = 80.4 \text{ GeV}$
 - Vastaus: kvanttimekaniikassa lyhytikäisten Z ja W bosonien massa ei ole tarkkaan määrätty, vaan niillä on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



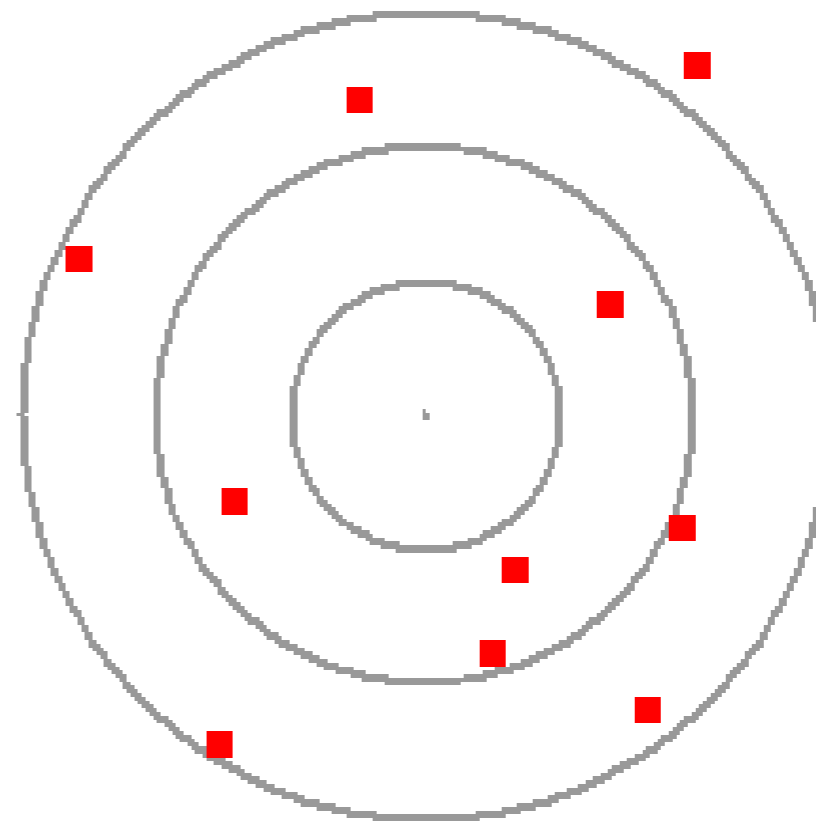
- Tapahtumien (eventtien) lukumäärät ovat yleensä **Poisson-jakautuneita**
- keskihajonta N tapahtumalle on tällöin \sqrt{N}
- lähestyy suurilla N normaalijakaumaa, jossa $\mu=N$ ja $\sigma=\sqrt{N}$
- Systemaattiset virheet ovat yleensä **normaalijakautuneita** (Gaussin jakauma)
- Ilmoitetaan tyypillisesti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





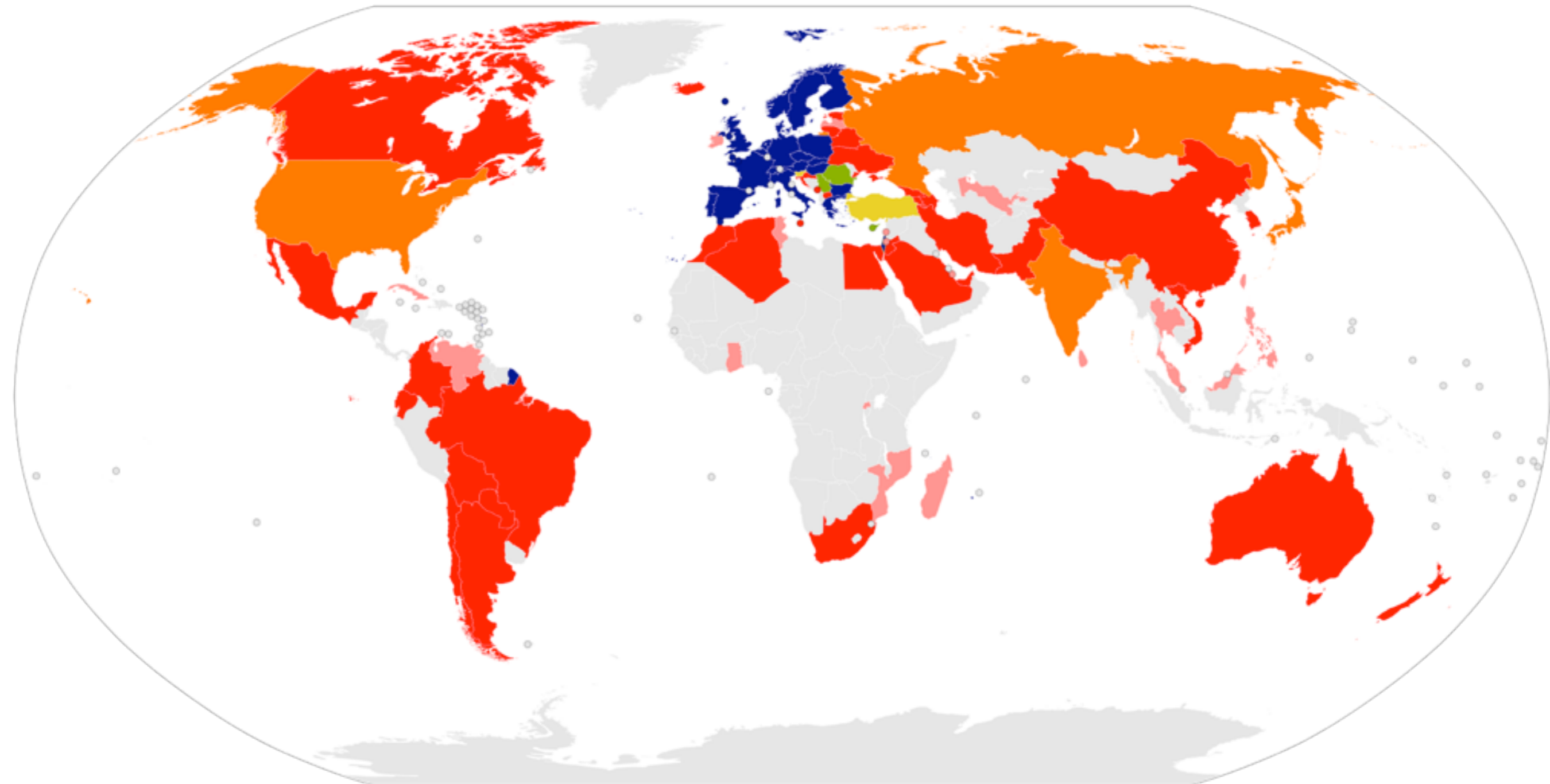
Systematic Error



Random Error

- CERNin tutkimuksessa mukana olevat maat kattavat lähes koko kehittyneen maailman

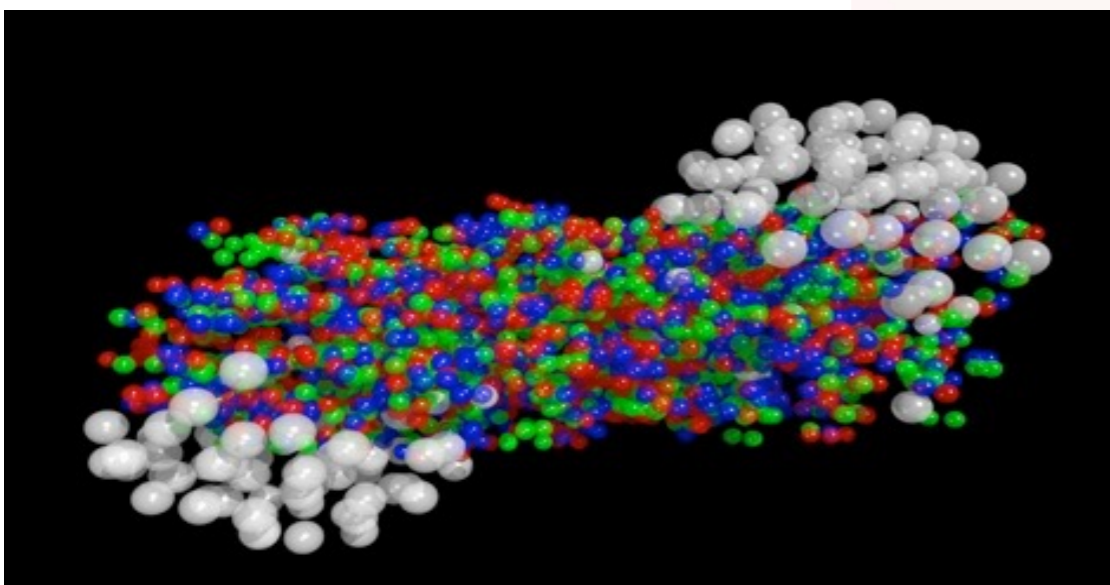
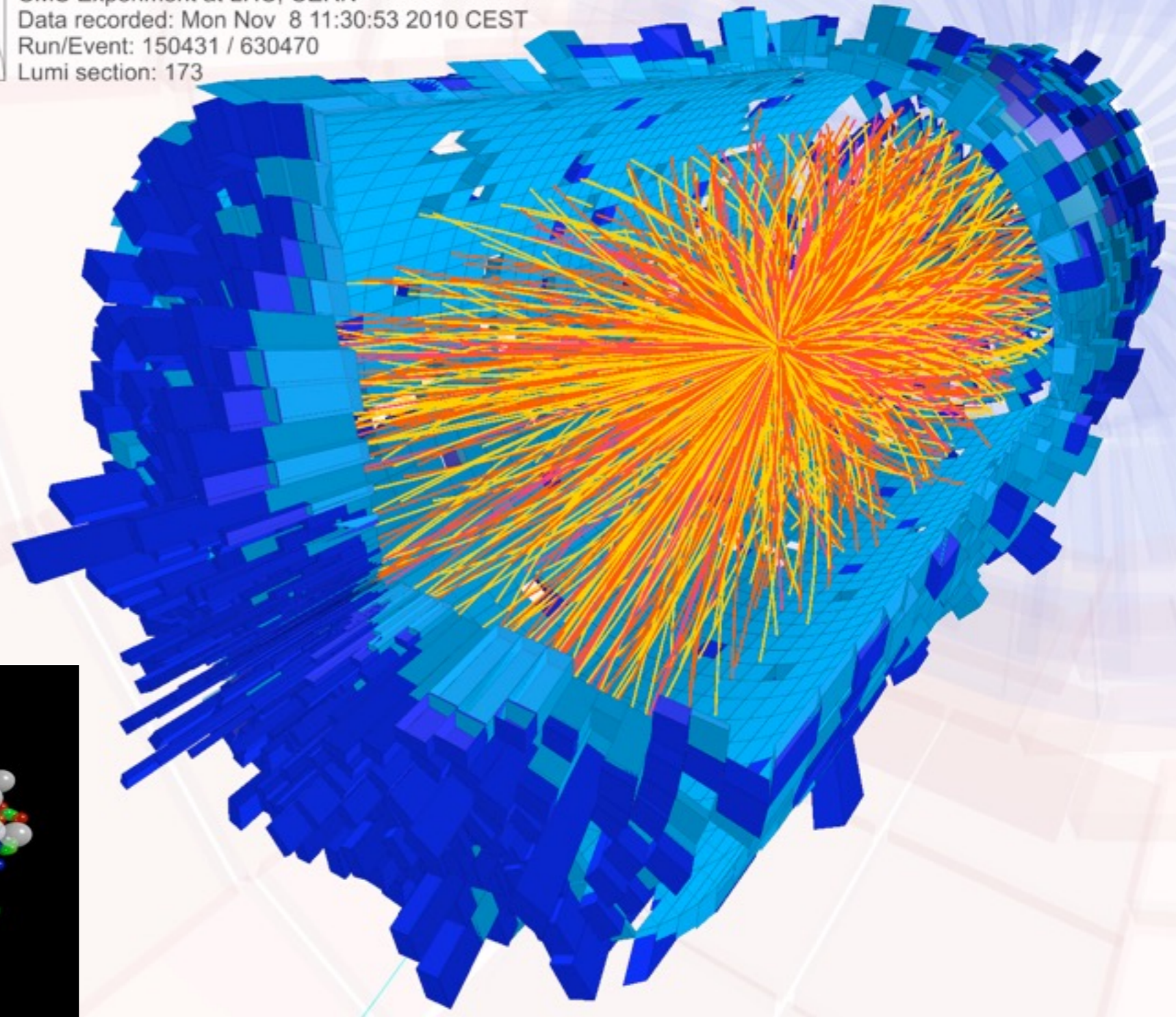
	CERN member states: 20 c.
	Accession in progress: 3 c.
	Declared intent to join: 3 c.
	Observers: 4 c. + EU, Turkey
	Cooperation agreement: 35 c. + Slovenia, Cyprus
	Scientific contacts: 19 c.



- 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

Top mass M_t in GeV

