

Hiukkaskiihdyttimet ja -ilmaisimet

Kati Lassila-Perini

Fysiikan tutkimuslaitos

- Miksi hiukkasia kiihdytetään?
- Miten hiukkasia kiihdytetään?
- Mitä törmäyksessä tapahtuu?
- Miten hiukkasia mitataan?

Esitys hiukkasfysiikan näkökulmasta, vastaavia laitteita myös

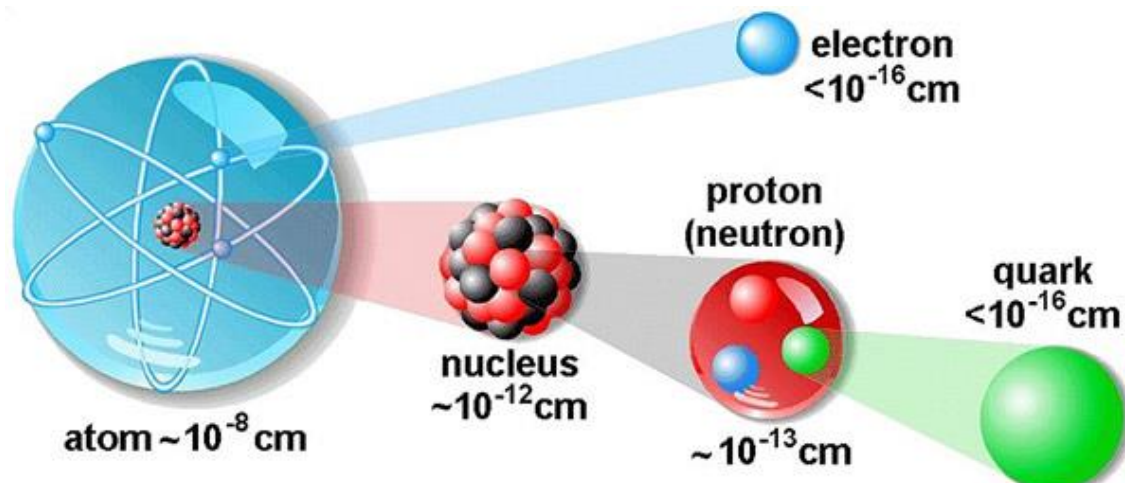
ydin- ja materiaalitutkimuksessa

lääketieteessä

monissa kaupallisissa sovelluksissa

Kiihdyttimet

Miksi kiihdytetään?



- Heisenbergin epätarkkuusperiaate: $\Delta p \Delta x \geq \frac{1}{2} \hbar$
- Jos halutaan tutkia pienimpiä aineenosia, liikemäärä on oltava vähintään
 - $\Delta p > \hbar/(2\Delta x) = 6.6 \cdot 10^{-16} \text{ eVs}/(2 \cdot 10^{-18} \text{ m}) \approx 10^{11} \text{ eV}/c = 100 \text{ GeV}/c$
- GeV/c? GeV?
 - « luonnolliset » yksiköt ($\hbar = 1$, $c = 1$) jolloin energia, massa ja liikemäärä: GeV
 - Protonin massa $\approx 1 \text{ GeV}$

Mitä kiihdytetään?

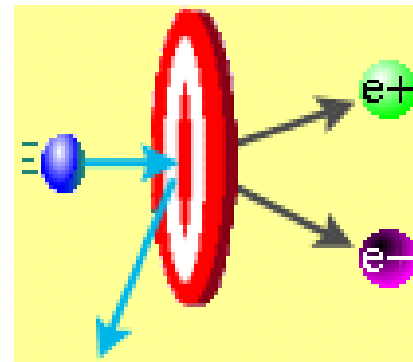
- Kiihdyttimet toimivat sähkö -ja magneettikenttien avulla:
 - **kiihdytettävillä hiukkasilla on oltava varaus.**
- Hiukkasia tarvitaan paljon:
 - **hiukkasia on oltava « helposti » saatavilla.**
- Hiukkasten kiihdytys ja törmäytys kestää jonkin aikaa:
 - **hiukkasten on syytä olla stabiileja eli niiden ei pidä hajota spontaanisti.**

→ Sopivia hiukkasia:

- **Elektronit, protonit (sekä näiden antihhiukkaset), stabiilit raskaat ionit**

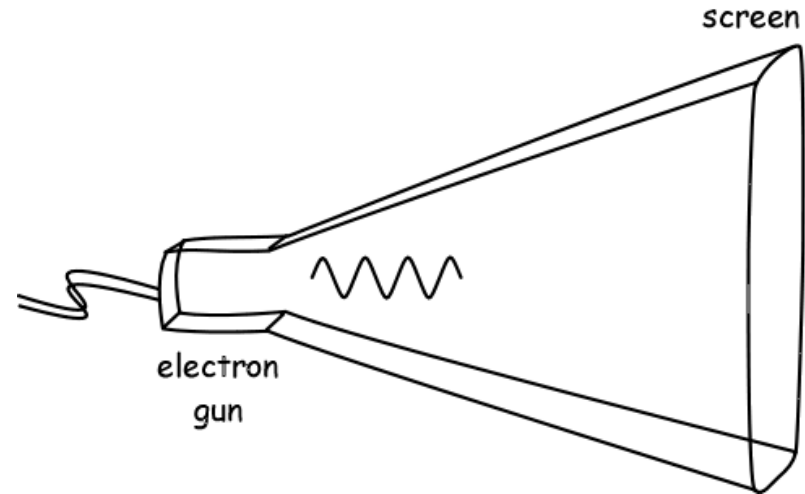
Mistä hiukkasia saadaan?

- Elektronit:
 - **metallipinnasta erkanevat elektroneita lämmitettäessä.**
- Protonit:
 - **ionisoidaan vetyä.**
- Antihukkaset:
 - **korkeaenerginen hiukkassuihku törmäytetään kohtioon, jossa tapahtuvassa reaktiossa syntyy mm. hiukas-antihukkaspareja, jotka voidaan erottaa toisistaan magneettikentässä**

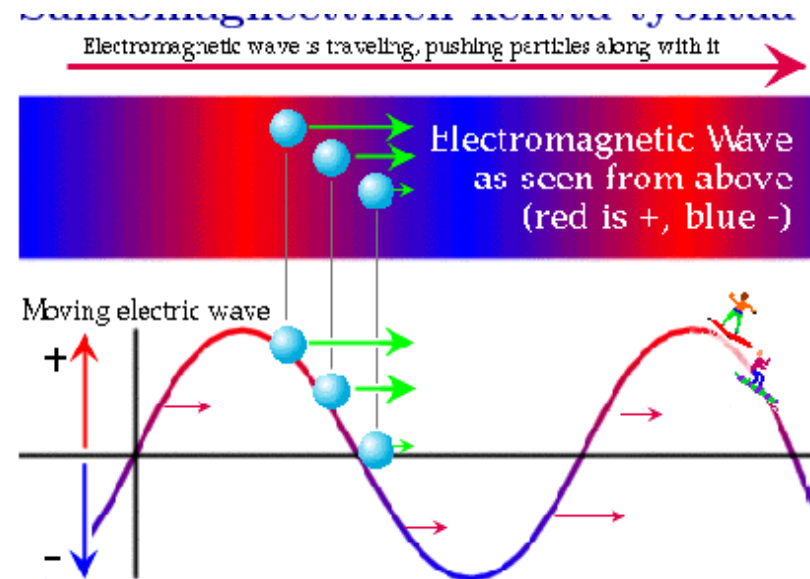


Miten hiukkasia kiihdytetään?

- « Low-tech » esimerkki:



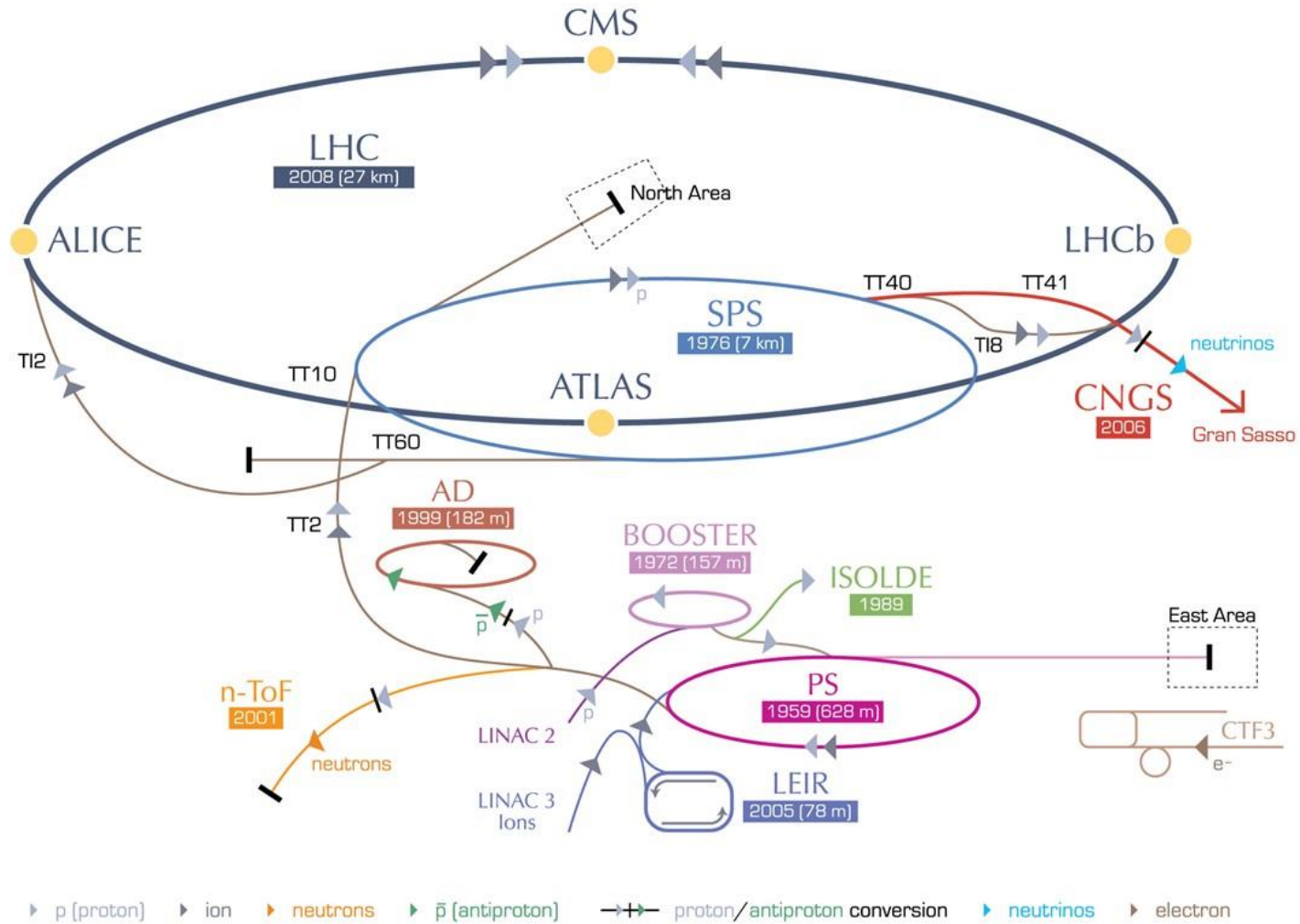
- Sähkömagneettinen kenttä työntää hiukkasia eteenpäin:



Hiukkaskiihdyttimen osat

- RF-kaviteetit
 - antavat hiukkasille lisää energiaa
- Magneetit
 - ohjaavat hiukkassuihkua
 - dipolit kääntämiseen
 - kvadrupolit fokusointiin
 - sekstupolit kromaattisten virheiden korjaamiseen
 - oktu-, deka-, ja dodekapolit muiden magneettien aiheuttamien virheiden korjaamiseen
 - törmäyskohdan magneetit
- Tyhjiöputki
- Muuta:
 - injektio linja. hiukkassuihkua puhdistavat kollimaattorit, suihkun katkaisin ja pysäytyslinja, jäähdytysjärjestelmä

CERN's accelerator complex



LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron

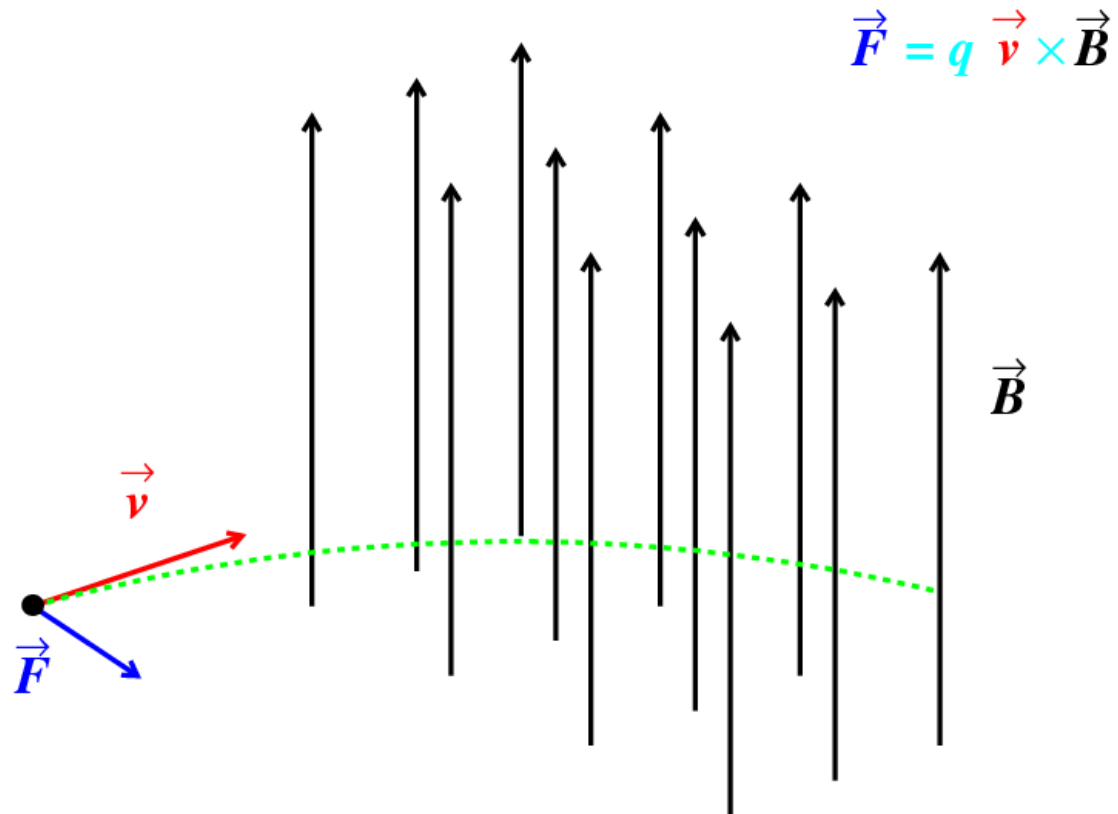
AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice
 LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINear ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight



Kinetic energy of a proton (K)	Speed (%c)	Accelerator
50 MeV	31.4	Linac 2
1.4 GeV	91.6	PS Booster
25 GeV	99.93	PS
450 GeV	99.9998	SPS
7 TeV	99.9999991	LHC

Relationship between kinetic energy and speed of a proton in the CERN machines. The rest mass of the proton is $0.938 \text{ GeV}/c^2$

Miten hiukkasia käännetään?



Millainen magneettikenttä?

Vähän matematiikkaa:

- Magneettikenttä voidaan esittää seuraavasti napakoordinaateissa:

$$B_{\theta} = B_0 \sum_{n=1}^{\infty} (r/r_0)^{n-1} (b_n \cos n\theta + a_n \sin n\theta)$$

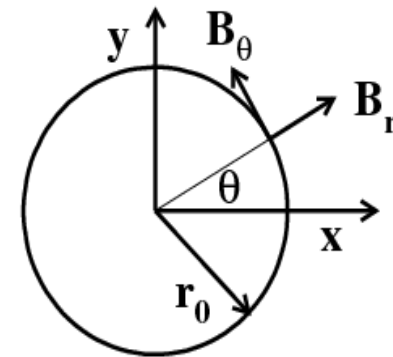
$$B_r = B_0 \sum_{n=1}^{\infty} (r/r_0)^{n-1} (-a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta)$$

r_0 : säde

n : sarjan termien kertaluku

b_n : normaalikomponentit

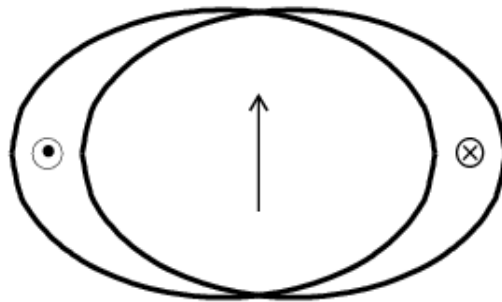
a_n : poikittaiset komponentit



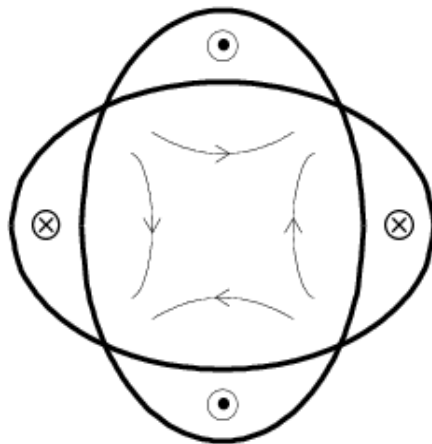
➔ *ideaalinen dipoli* : $b_1 = 1$, muut 0

➔ *ideaalinen kvadrupoli* : $b_2 = 1$, muut 0

Dipolit ja kvadrupolit

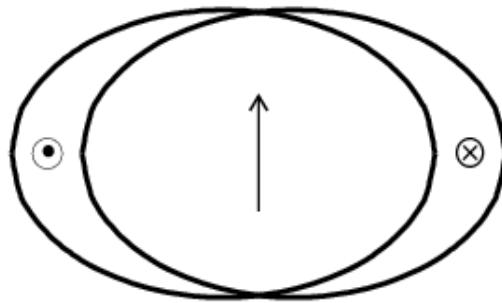


$$B_{\theta} = B_0 \cos \theta$$
$$B_r = B_0 \sin \theta$$

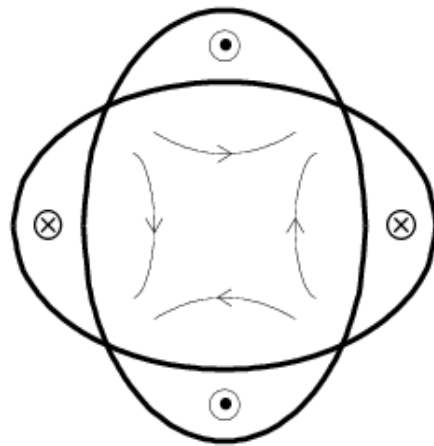


$$B_{\theta} = B_0 (r/r_0) \cos 2\theta$$
$$B_r = B_0 (r/r_0) \sin 2\theta$$

Dipolit ja kvadrupolit

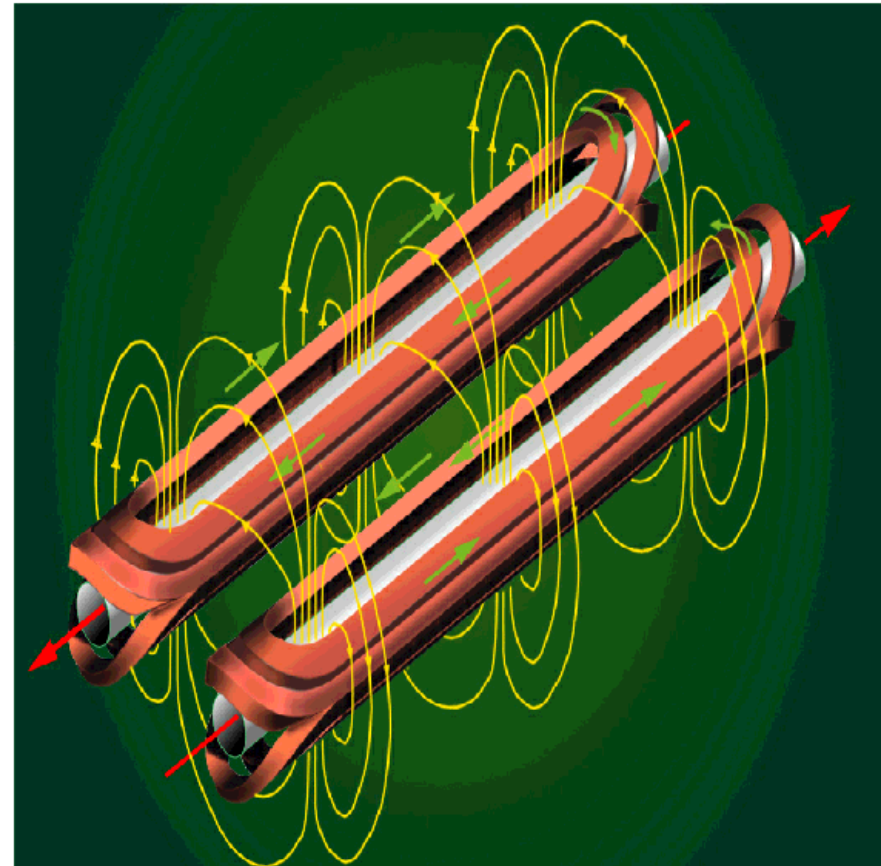
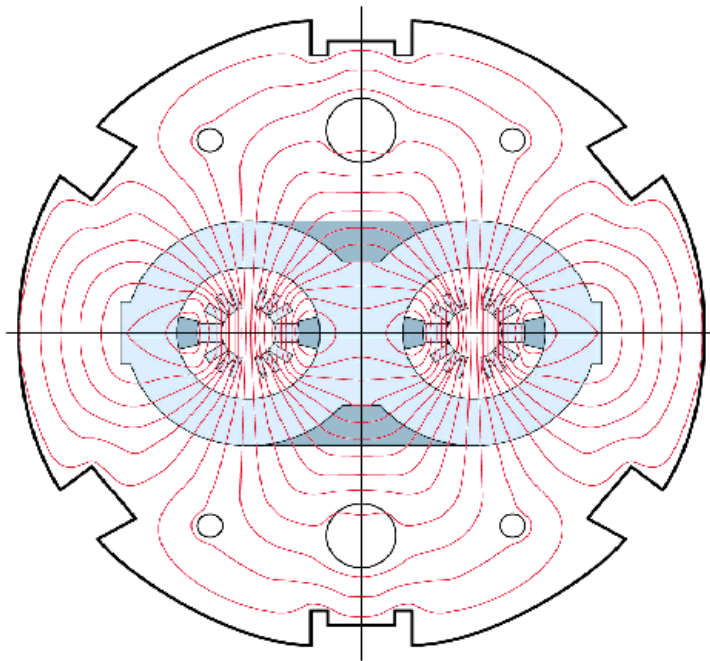


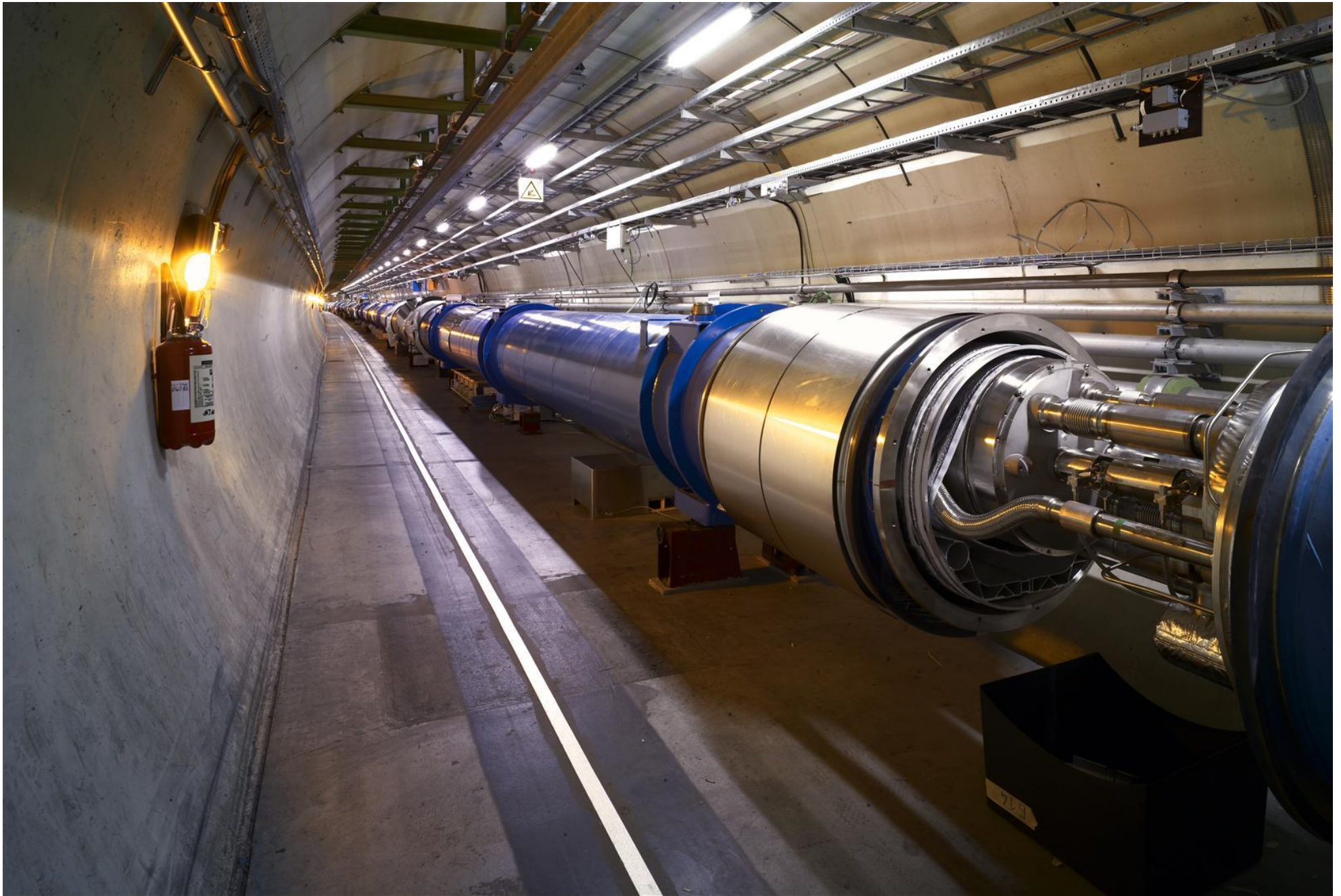
$$B_{\theta} = B_0 \cos \theta$$
$$B_r = B_0 \sin \theta$$



$$B_{\theta} = B_0 (r/r_0) \cos 2\theta$$
$$B_r = B_0 (r/r_0) \sin 2\theta$$

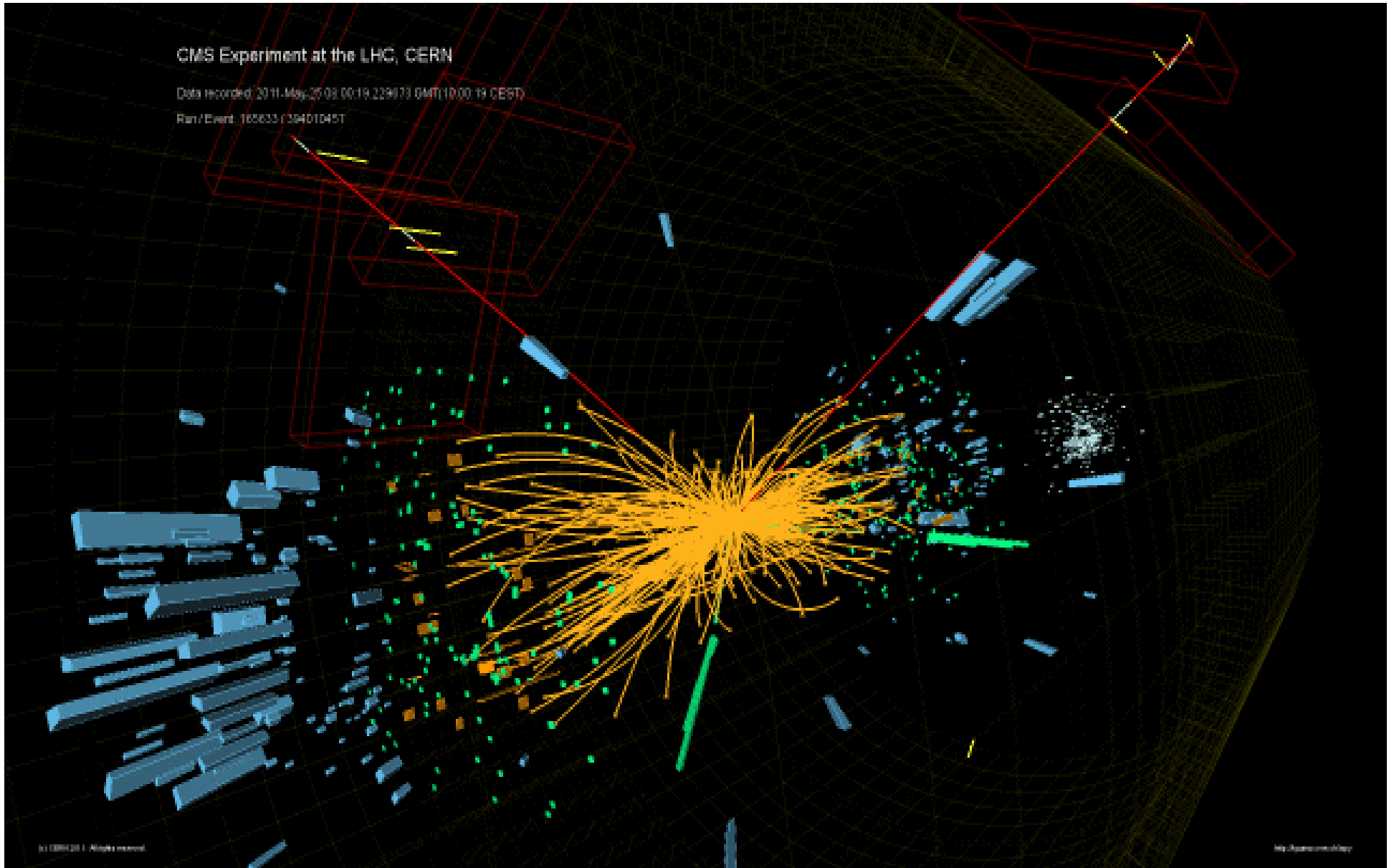
LHC-kiihdyttimen dipolit





Hiukkaskiihdyttimet ja -ilmaisimet

Törmäykset

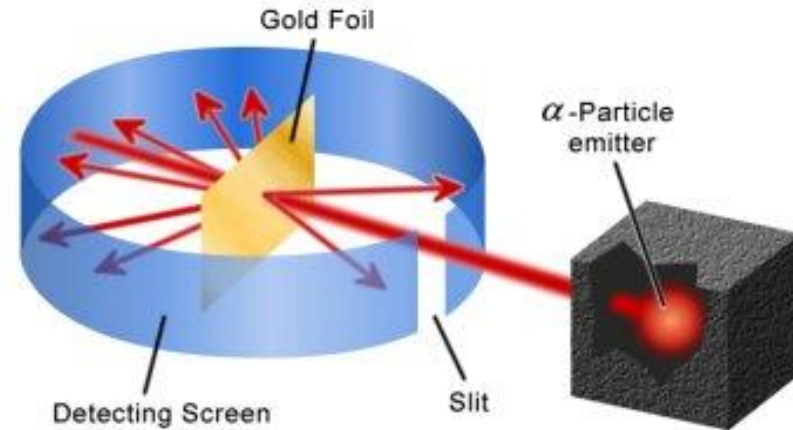


Mitä törmäyksessä tapahtuu?

- Elektroni-positroni-törmäys:
 - **hiukkaset annihiloituvat ja niiden energia vapautuu uusiin hiukkasiin**
- Protoni-(anti)protoni-törmäys
 - **hiukkasten osaset – kvarkit ja gluonit – vuorovaikuttavat.**
- Raskaiden ionien törmäys
 - kvarkki-gluoni-plasma.

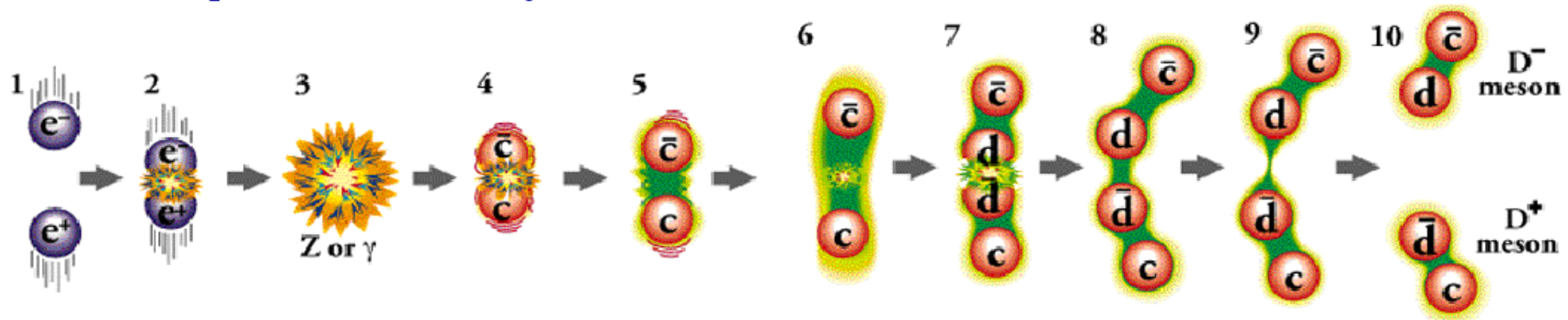
Törmäykset

- Kiinteä kohtio
 - Rutherfordin koe
 - Kalibrointi, laitteiden testaus
- Hiukkasten törmäyttäminen

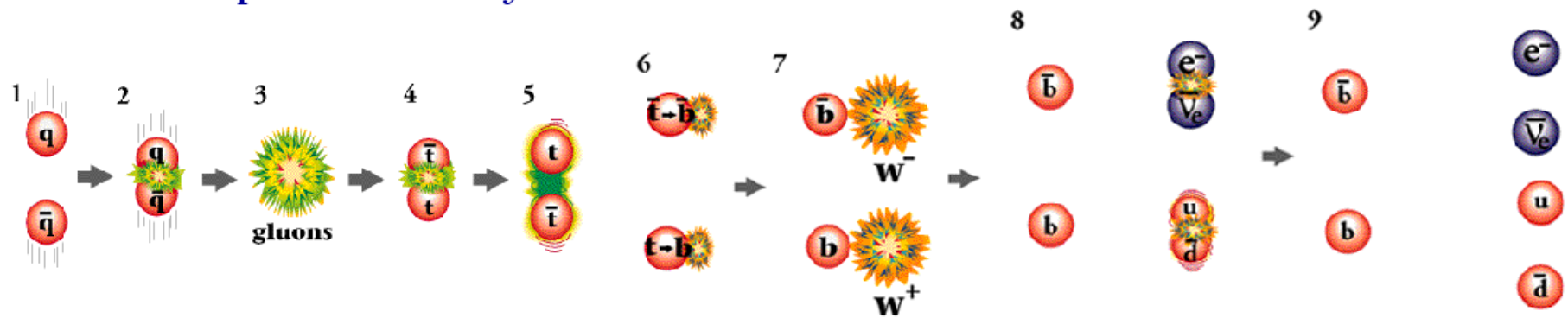


Esimerkiksi

Elektroni-positroni-törmäys:



Protoni-antiprotoni-törmäys:



Mittaukset

Miten dataa tulkitaan?

Esimerkki:

- Törmäyksessä on syntynyt **Higgsin hiukkanen**, joka hajoaa kahteen fotoniin $H \rightarrow \gamma\gamma$.
- Hiukkassysteemin massa on invariantti (Higgsin massa m_H), jolloin fotonien **energiasta** ja **liikemäärästä** voidaan laskea:

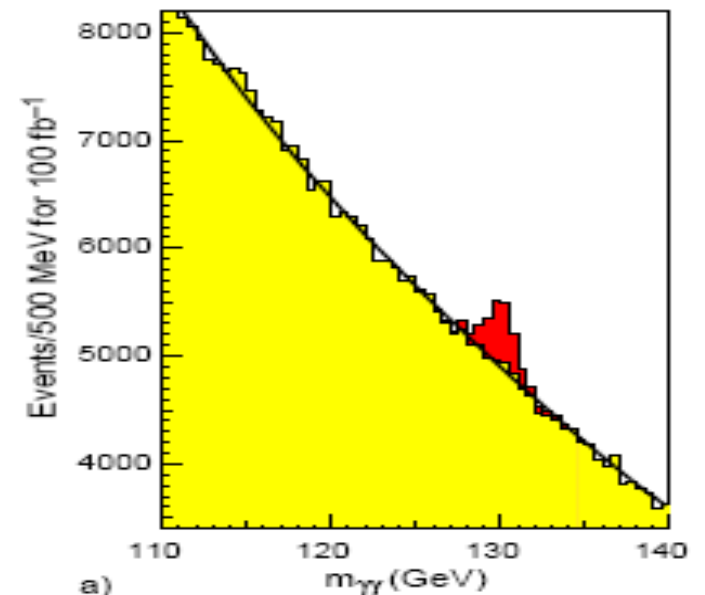
$$m^2_H = (E_{\gamma 1} + E_{\gamma 2})^2 - [(p_{x\gamma 1} + p_{x\gamma 2})^2 + (p_{y\gamma 1} + p_{y\gamma 2})^2 + (p_{z\gamma 1} + p_{z\gamma 2})^2]$$

Ilmaisimen pitää:

- tunnistaa fotoni
- mitata sen energia ja liikemäärä
- kirjoittaa tiedot muistiin.

Fyysikon pitää:

- löytää ne törmäykset, joissa on Higgs
- vakuuttua ja vakuuttaa, että löydetty signaali on todella Higgsin hiukkanen.

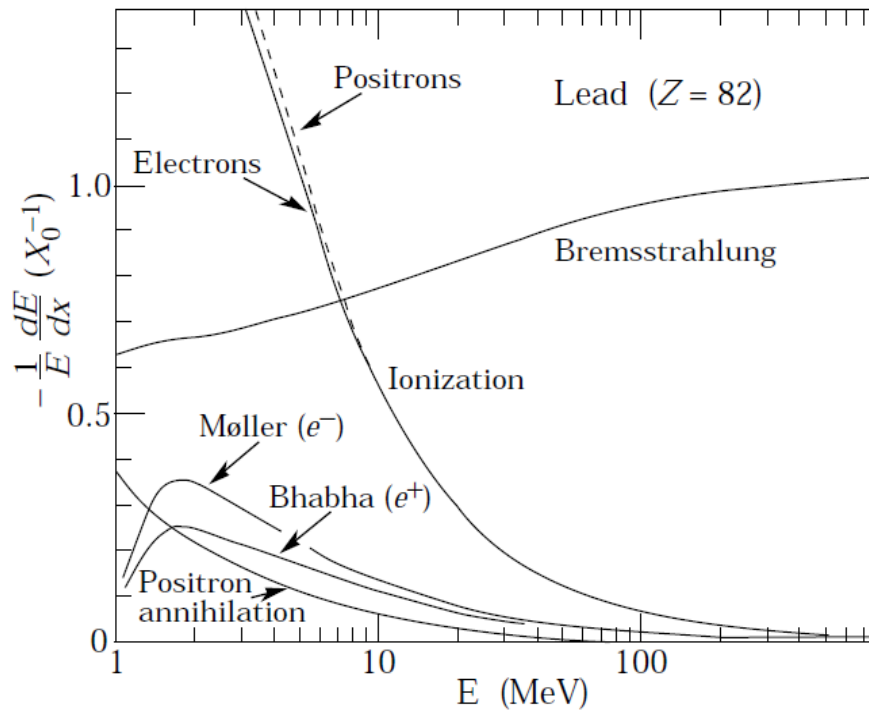


Miten hiukkaselle käy aineessa (= hiukkasilmaisimessa)?

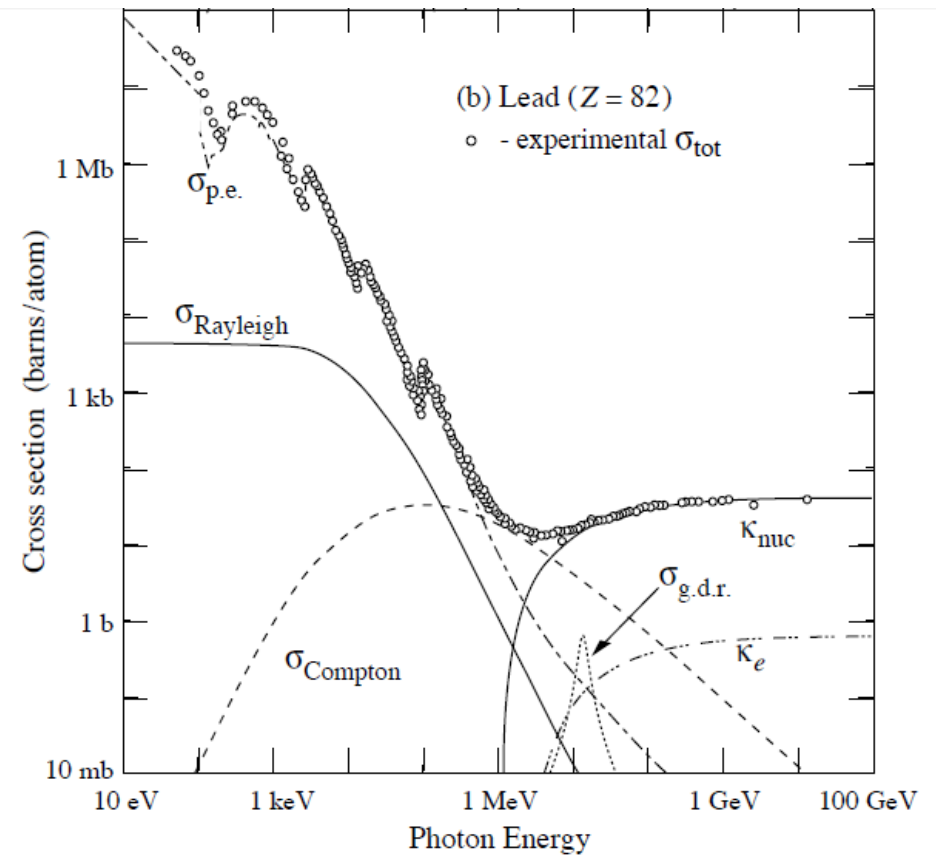
- Kaikki varatut hiukkaset:
 - **sähkömagneettinen vuorovaikutus aineen atomien kanssa: energiaa kuluu atomien ionisaatioon.**
- Elektronit ja positronit:
 - **jarrutussäteily $e^\pm + N \rightarrow e^\pm + N + \gamma$**
- Fotonit:
 - **parinmuodostus $\gamma + N \rightarrow e^+ + e^- + N$**
- Hadronit (protonit, neutronit, pionit, kaonit jne.)
 - **vahva vuorovaikutus aineen atomien ydinten kanssa.**

Hiukkasten vuorovaikutus aineessa

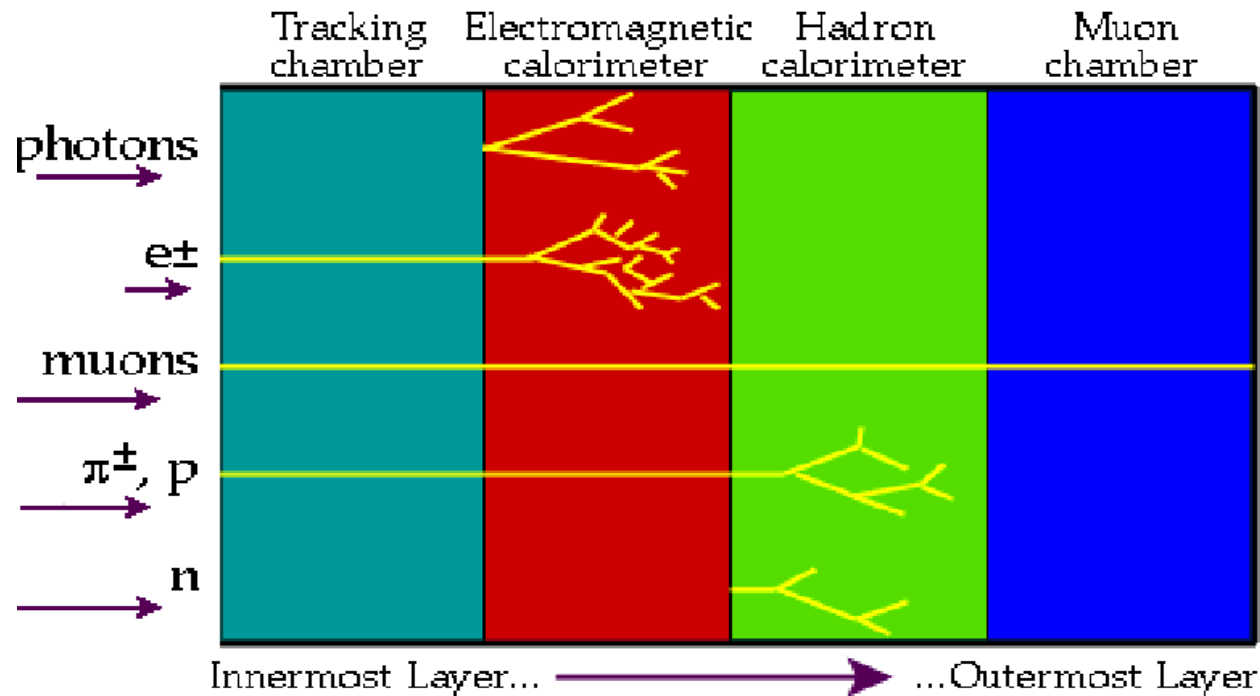
Elektronit ja positronit



Fotonit

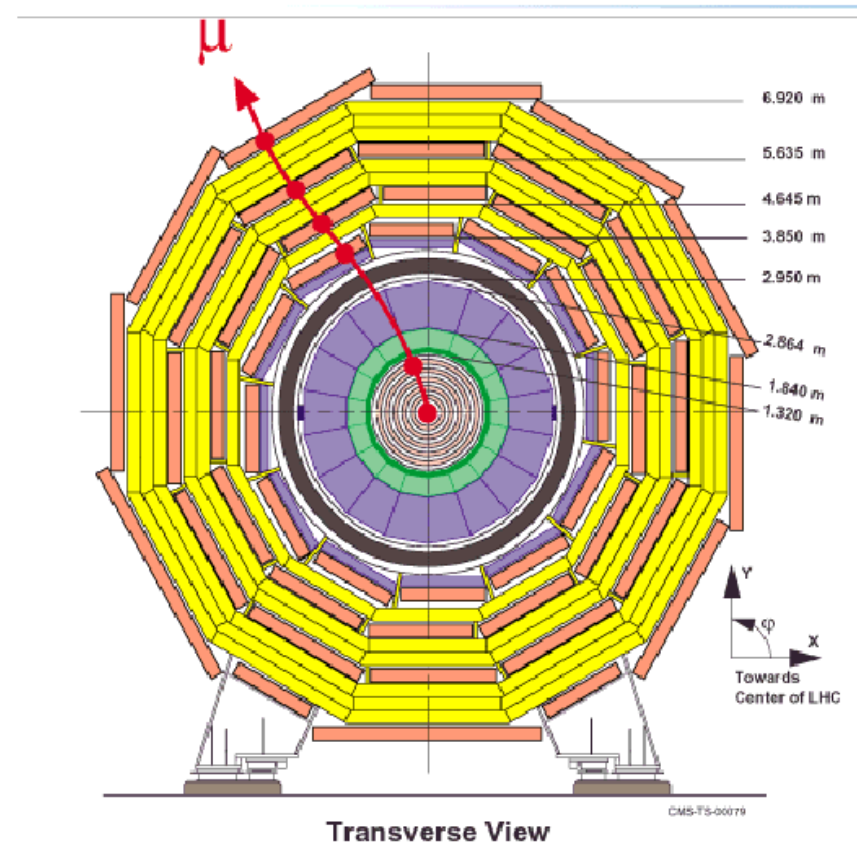
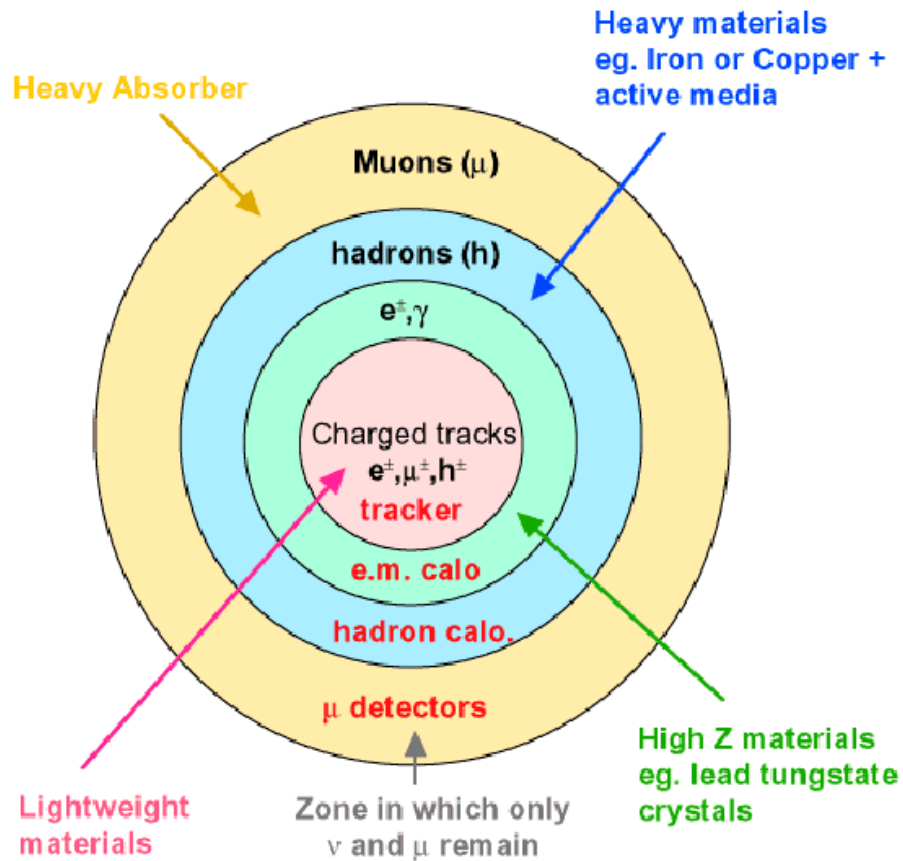


Miten hiukkasia mitataan?



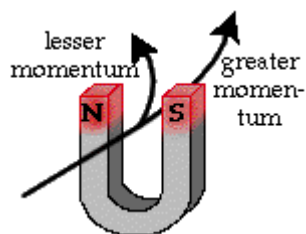
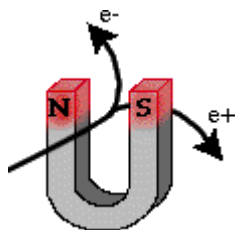
- Jälkikammio – mittaa varatun hiukkasen radan hajottamatta sitä
- Kalorimetrit – hajottaa hiukkasen ja mittaa menetetyn energia
- Myonikammiot – mittaa muiden osien läpi kulkevat myonit.

Hiukkasilmäsimen osat



Jälkikammio

- Aktiiviset osat keräävät varauksen, joka vapautuu ohikulkevan hiukkasen ionisoidessa aineen atomeja.
- Osumista voidaan rekonstruoida hiukkasen rata.
- Sijoitetaan voimakkaaseen magneettikenttään, jolloin hiukkasen rata kaartuu.



- Tyypillisiä tekniikoita:
 - pii-ilmaisimet
 - lankakammiot (aktiivisena aineena kaasu, esim. Ar, CH)



Hiukkaskiihdyttimet ja -ilmaisimet

Varatun hiukkasen rata magneettikentässä

Voima, joka pitää massan kaarevalla radalla:

$$F = mv^2/r$$

Magneettikentän varatulle hiukkaselle aiheuttama voima:

$$F = qvB$$

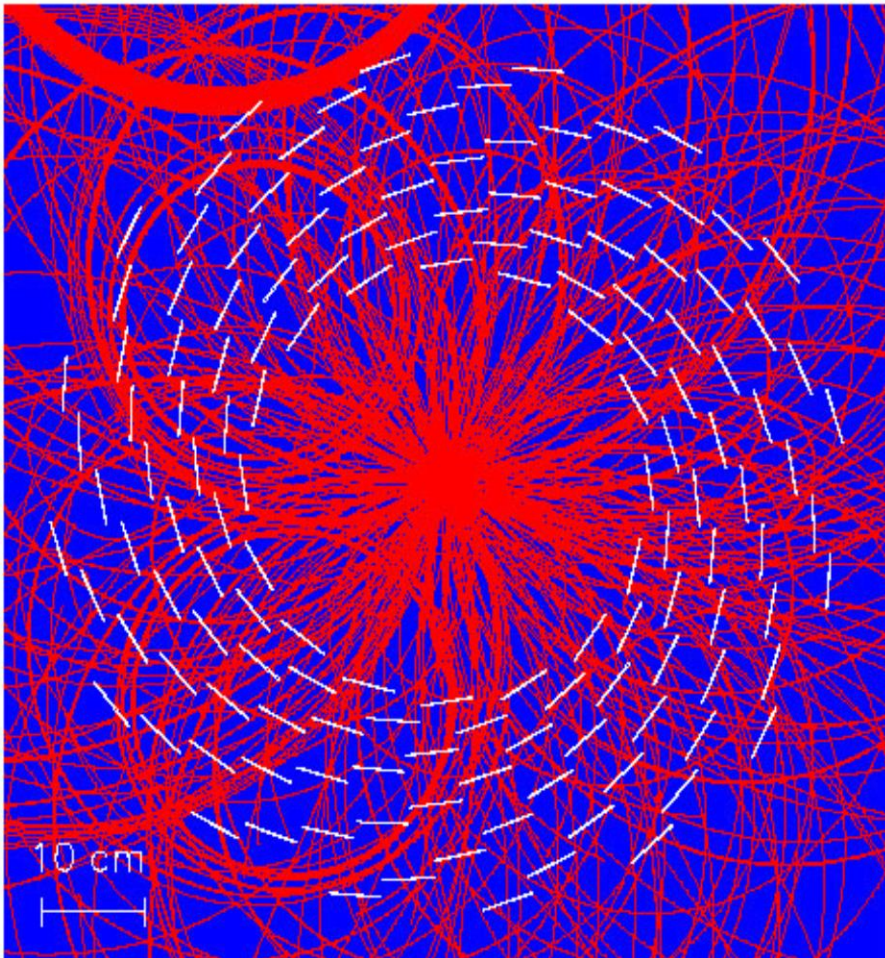
\Leftrightarrow

$$qvB = mv^2/r$$

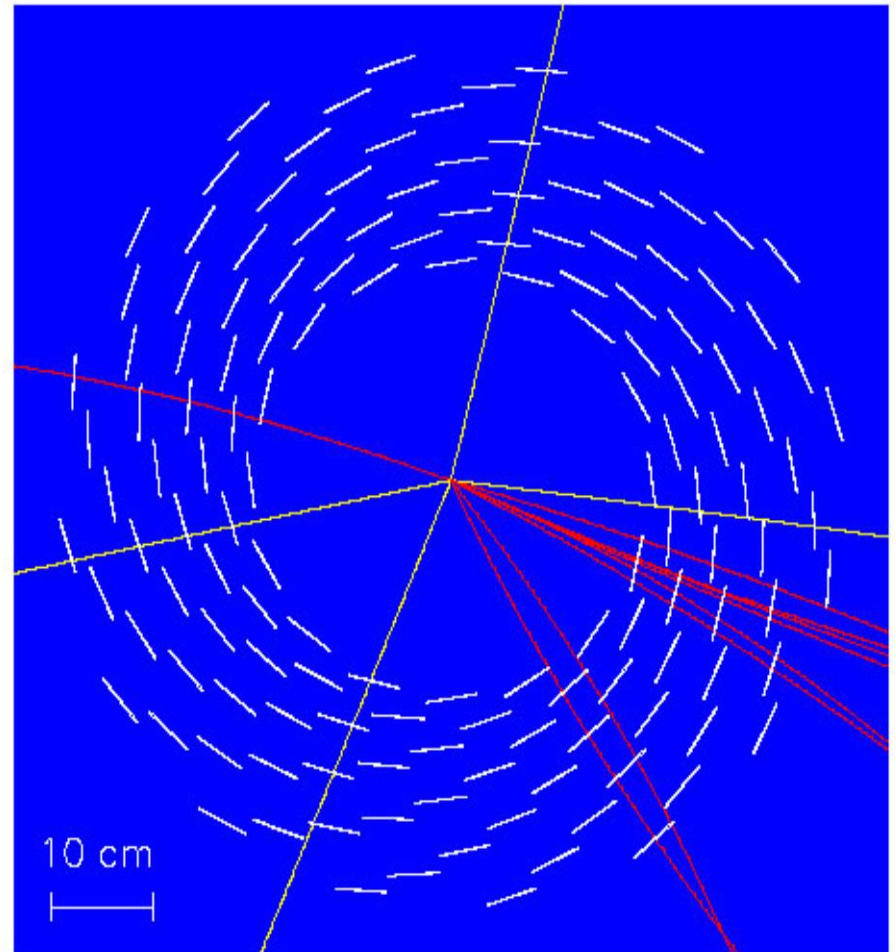
\Leftrightarrow

$$mv = p = qBr$$

Miksi pitää mitata niin tarkkaan?



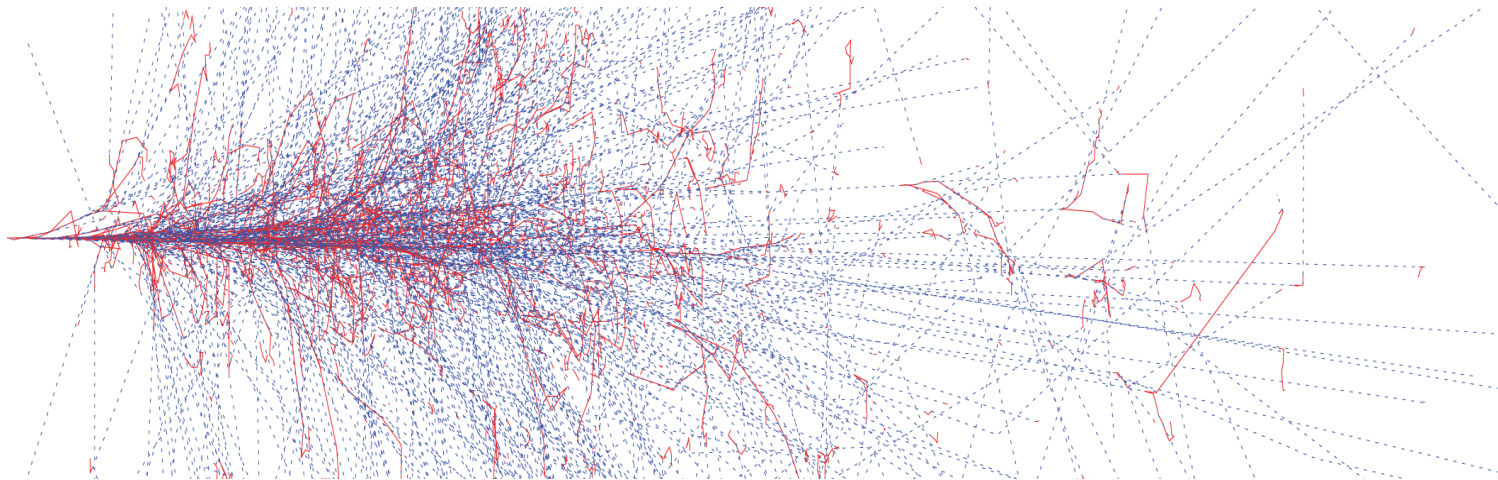
18 päällekkäistä p-p-törmäystä, mukana neljä muonia Higgsin hajontatuotteina (simuloitua dataa)



Poistettu kaikki jäljet, joiden $p_t < 2 \text{ GeV}/c$

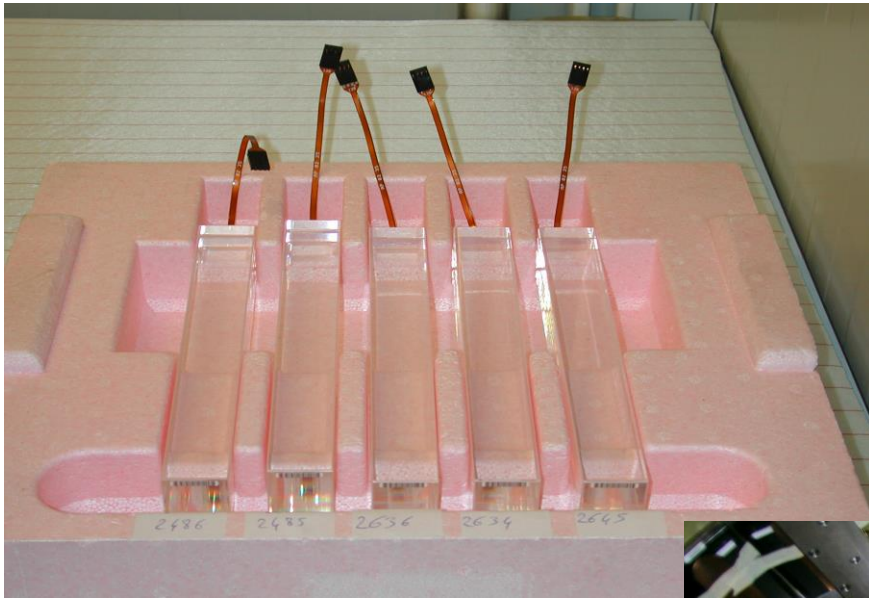
Kalorimetri

- Sähkömagneettinen kalorimetri
 - pysäyttää ja mittaa elektronit, positronit, fotonit
- Hadronikalorimetri
 - pysäyttää ja mittaa hadronit.
- Ensimmäisessä vuorovaikutuksessa syntyneet hiukkaset vuorovaikuttavat edelleen ja syntyy ketjureaktio, joka loppuu kun kaikki energia on kulunut.



Kalorimetri

- Koostuvat
 - joko kokonaan aktiivisesta aineesta
 - esim. kristallit CMS-kokeessa
 - tai levyrakenteessa jossa aktiiviset ja passiiviset osat vuorottelevat
 - esim. aktiivinen neste Ar, tuikemuovi – passiivinen lyijy. messinki
- Aktiivinen osa mittaa varausta tai valoa
 - varaus: ionisaatio
 - valo: hiukkasten menettämä energia kohottaa aktiivisen aineen elektronit korkeammalle energiatasolle, josta palautuminen aiheuttaa valokvantin
- Passiivinen osa pysäyttää hiukkassuihkun



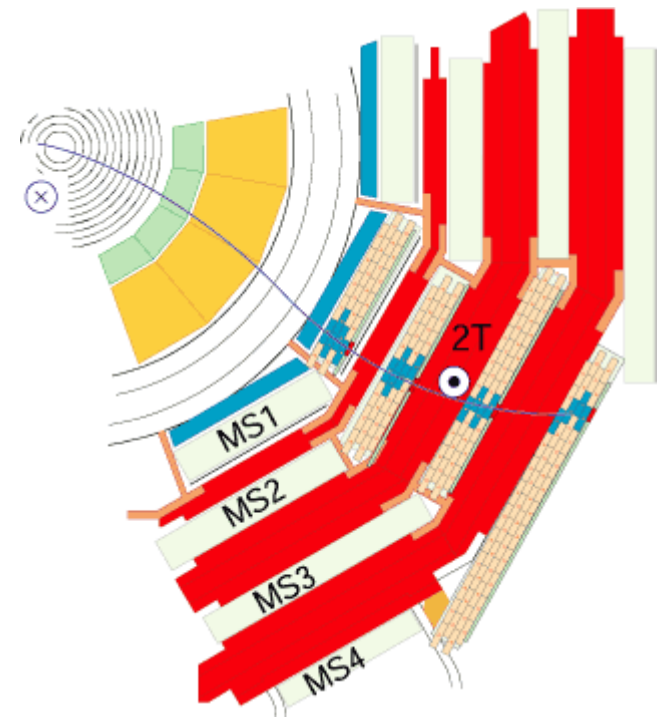
Hiukkaskiihdyttimet ja -ilmaisimet



Hiukkaskiihdyttimet ja -ilmaisimet

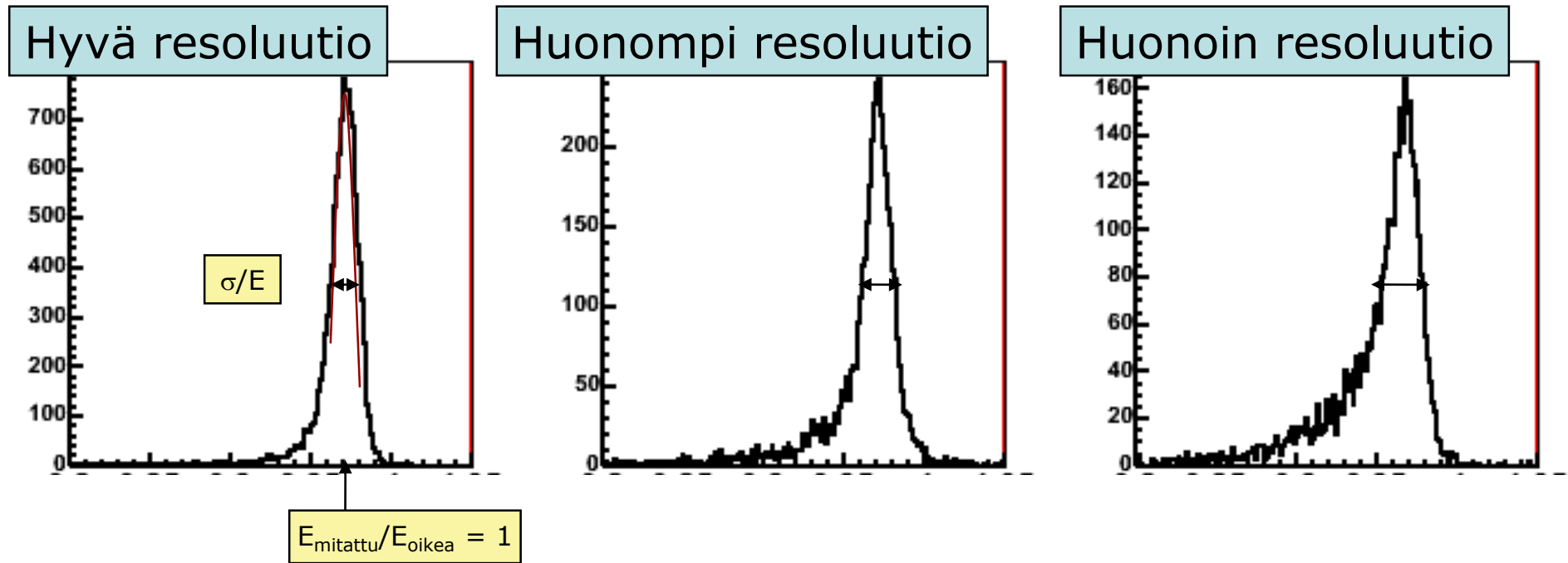
Myonikammio

- Myonikammiot ovat jälkikammioita, jotka ovat koeasemassa uloimpana.
- Kaikki muut hiukkaset pysähtyvät aiemmin.



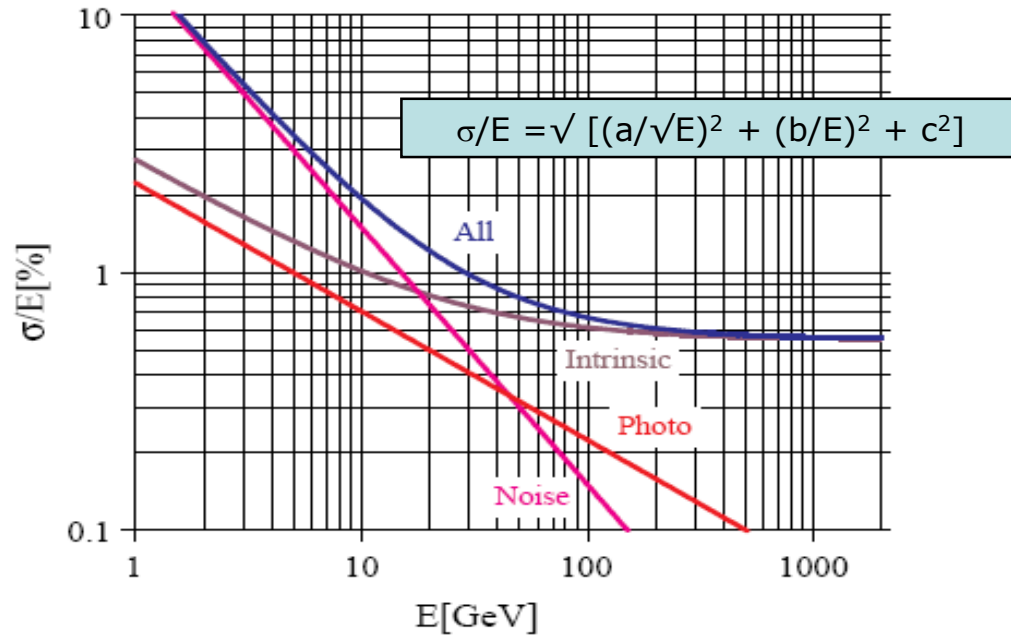
Resoluutio

- Resoluutio = mittaustarkkuus, esim. energian mittaus



- Jakauman keskiosaan sovitetaan normaalijakauman tiheysfunktio, josta saadaan σ (keskihajonta)

Kalorimetrin resoluutio

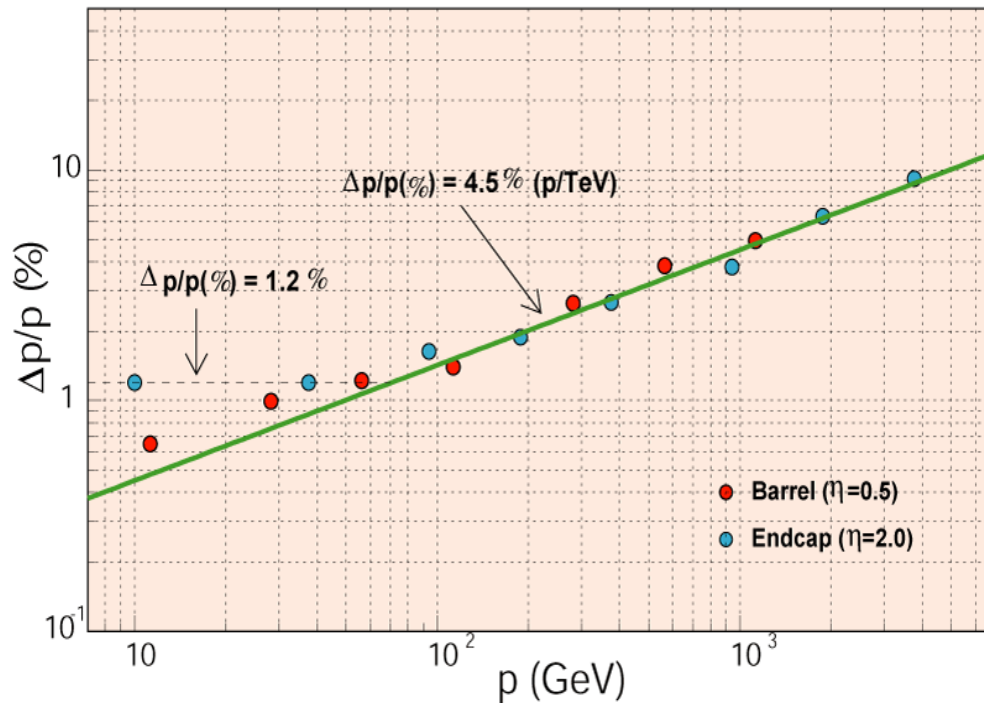


Kalorimetrit:
Mitä suurempi energia,
sitä tarkempi mittauss.

Table 28.5: Resolution of typical electromagnetic calorimeters. E is in GeV.

Technology (Experiment)	Depth	Energy resolution	Date
NaI(Tl) (Crystal Ball)	$20X_0$	$2.7\%/E^{1/4}$	1983
$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) (L3)	$22X_0$	$2\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$	1993
CsI (KTeV)	$27X_0$	$2\%/\sqrt{E} \oplus 0.45\%$	1996
CsI(Tl) (BaBar)	$16\text{--}18X_0$	$2.3\%/E^{1/4} \oplus 1.4\%$	1999
CsI(Tl) (BELLE)	$16X_0$	1.7% for $E_\gamma > 3.5$ GeV	1998
PbWO_4 (PWO) (CMS)	$25X_0$	$3\%/\sqrt{E} \oplus 0.5\% \oplus 0.2/E$	1997
Lead glass (OPAL)	$20.5X_0$	$5\%/\sqrt{E}$	1990
Liquid Kr (NA48)	$27X_0$	$3.2\%/\sqrt{E} \oplus 0.42\% \oplus 0.09/E$	1998
Scintillator/depleted U (ZEUS)	$20\text{--}30X_0$	$18\%/\sqrt{E}$	1988
Scintillator/Pb (CDF)	$18X_0$	$13.5\%/\sqrt{E}$	1988
Scintillator fiber/Pb spaghetti (KLOE)	$15X_0$	$5.7\%/\sqrt{E} \oplus 0.6\%$	1995
Liquid Ar/Pb (NA31)	$27X_0$	$7.5\%/\sqrt{E} \oplus 0.5\% \oplus 0.1/E$	1988
Liquid Ar/Pb (SLD)	$21X_0$	$8\%/\sqrt{E}$	1993
Liquid Ar/Pb (HI)	$20\text{--}30X_0$	$12\%/\sqrt{E} \oplus 1\%$	1998
Liquid Ar/depl. U (DØ)	$20.5X_0$	$16\%/\sqrt{E} \oplus 0.3\% \oplus 0.3/E$	1993
Liquid Ar/Pb accordion (ATLAS)	$25X_0$	$10\%/\sqrt{E} \oplus 0.4\% \oplus 0.3/E$	1996

Jälkiresoluutio



Jälkikammio:
Mitä suurempi energia,
sitä epätarkempi mittauss.

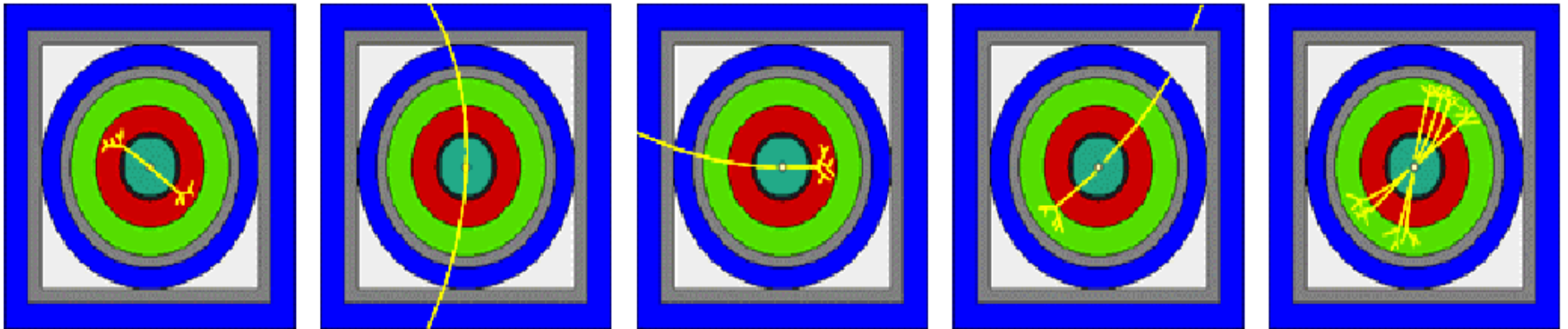
Table 28.1: Typical spatial and temporal resolutions of common detectors. Revised September 2003 by R. Kadel (LBNL).

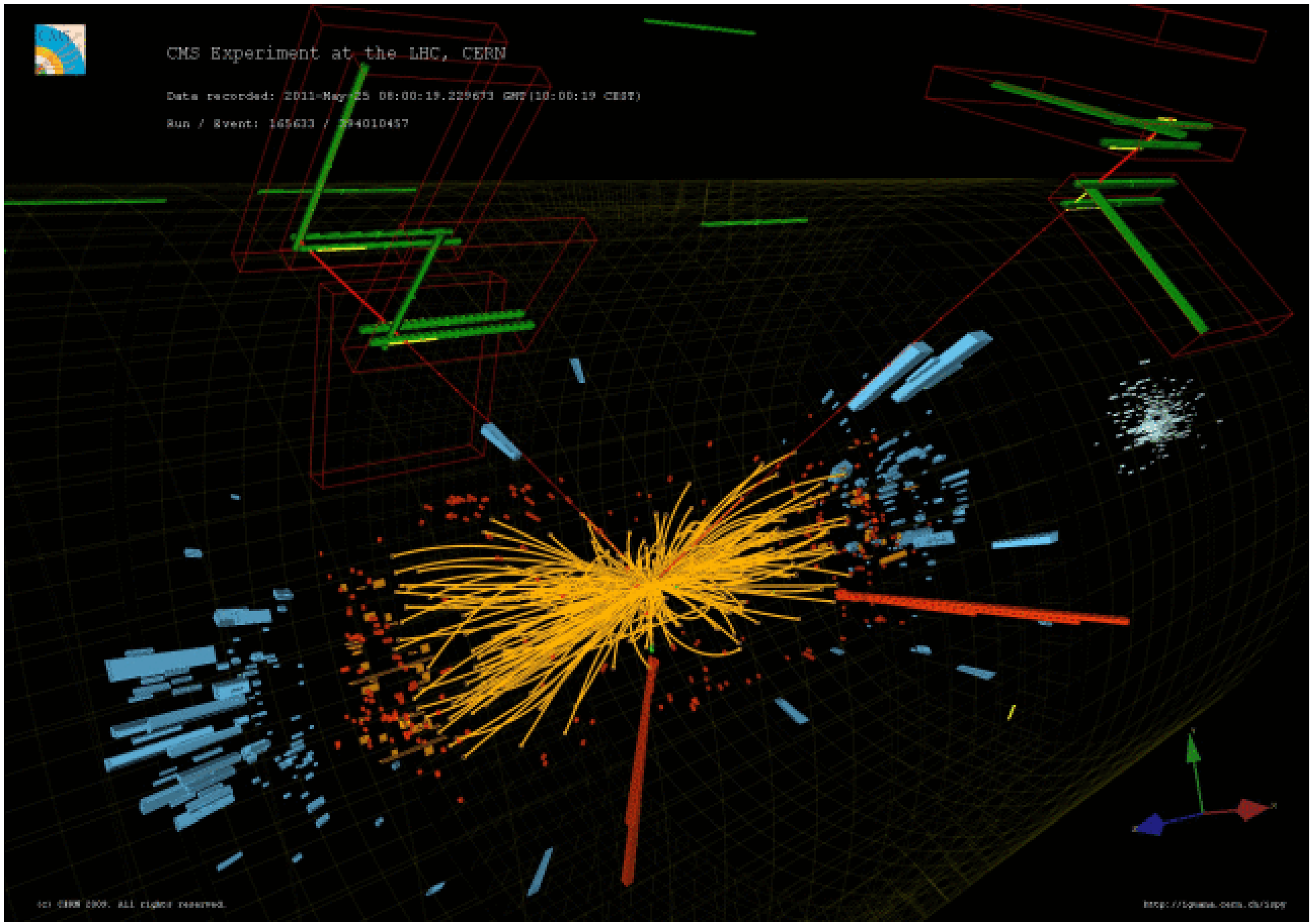
Detector Type	Accuracy (rms)	Resolution Time	Dead Time
Bubble chamber	10–150 μm	1 ms	50 ms ^d
Streamer chamber	300 μm	2 μs	100 ms
Proportional chamber	50–300 μm ^{b,c,d}	2 ns	200 ns
Drift chamber	50–300 μm	2 ns ^e	100 ns
Scintillator	—	100 ps/n ^f	10 ns
Emulsion	1 μm	—	—
Liquid Argon Drift [Ref. 6]	$\sim 175\text{--}450 \mu\text{m}$	$\sim 200 \text{ ns}$	$\sim 2 \mu\text{s}$
Gas Micro Strip [Ref. 7]	30–40 μm	< 10 ns	—
Resistive Plate chamber [Ref. 8]	$\lesssim 10 \mu\text{m}$	1–2 ns	—
Silicon strip	pitch/(3 to 7) ^g	h	h
Silicon pixel	2 μm^2	h	h

Mikä hajonta?

- Z-bosoni voi hajota seuraavasti: e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$, $q\bar{q}$
- μ^- voi hajota $e^-\bar{\nu}_e\nu_\mu$
- τ^- voi hajota $e^-\bar{\nu}_e\nu_\tau$, $\mu^-\bar{\nu}_\mu\nu_\tau$ tai hadroneihin (π , K ...)

Mitä Z-bosonin hajonta näissä eventeissä on tapahtunut:



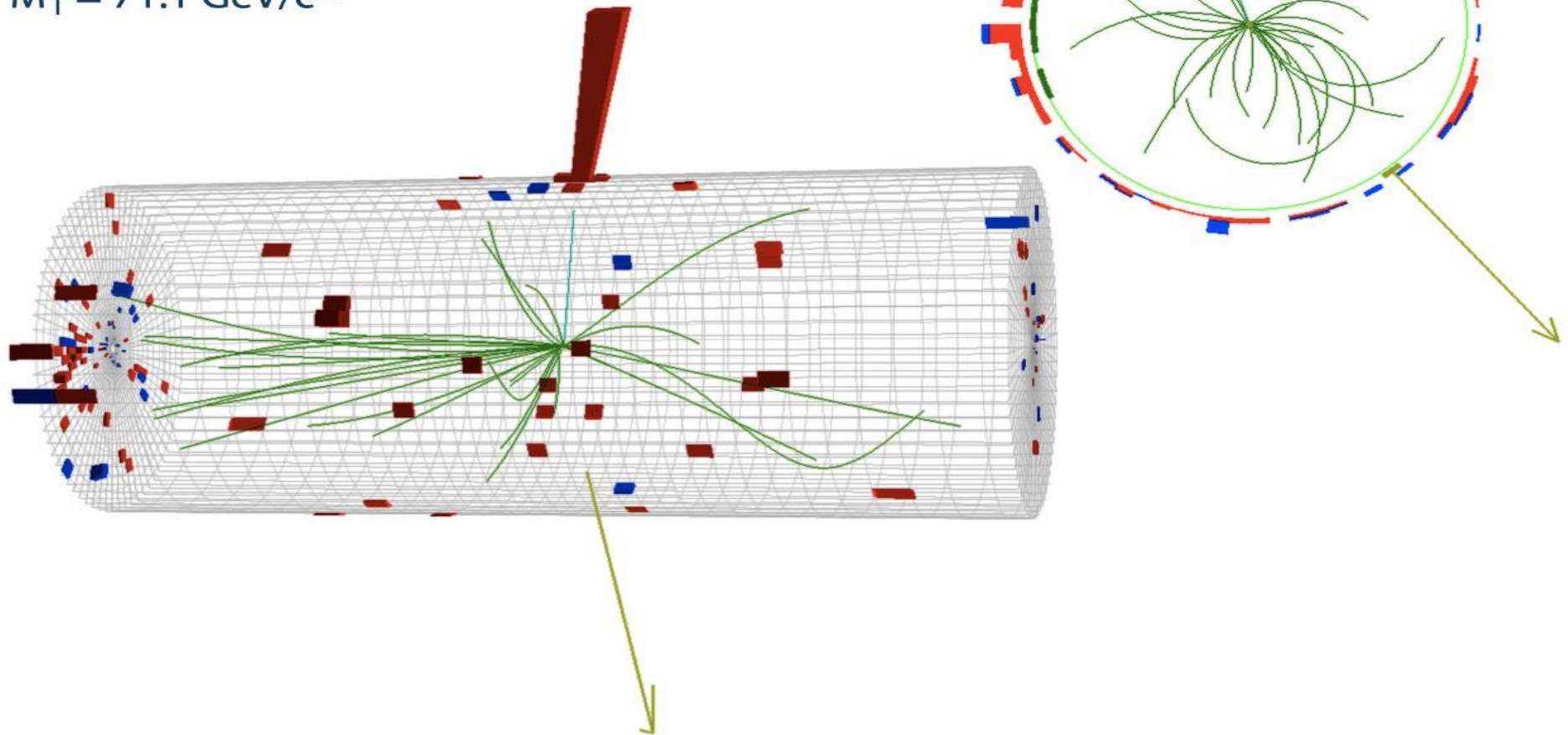


Hiukkaskiihdyttimet ja -ilmaisimet



CMS Experiment at LHC, CERN
Run 133874, Event 21466935
Lumi section: 301
Sat Apr 24 2010, 05:19:21 CEST

Electron $p_T = 35.6$ GeV/c
 $ME_T = 36.9$ GeV
 $M_T = 71.1$ GeV/c²



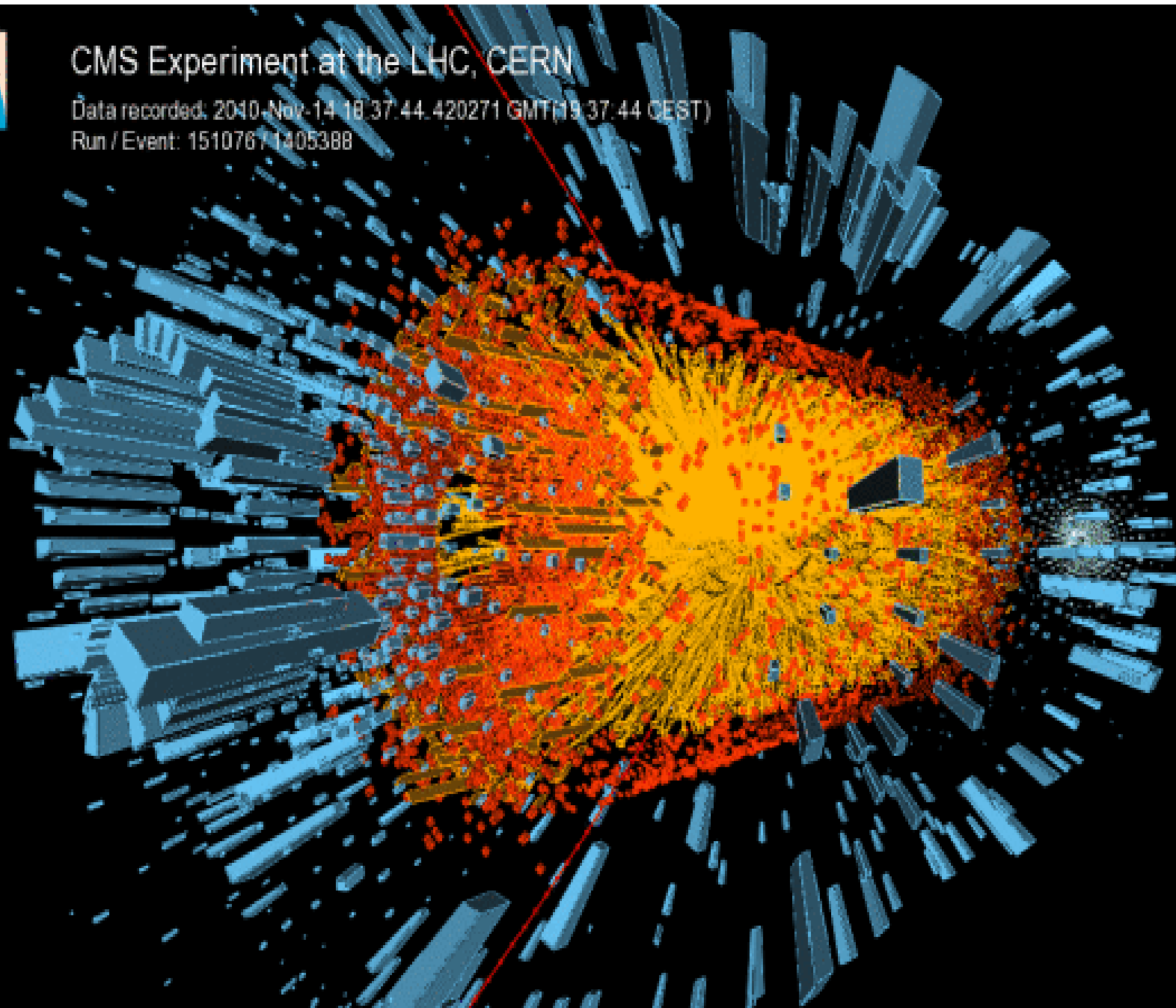
Hiukkaskiihdyttimet ja -ilmaisimet

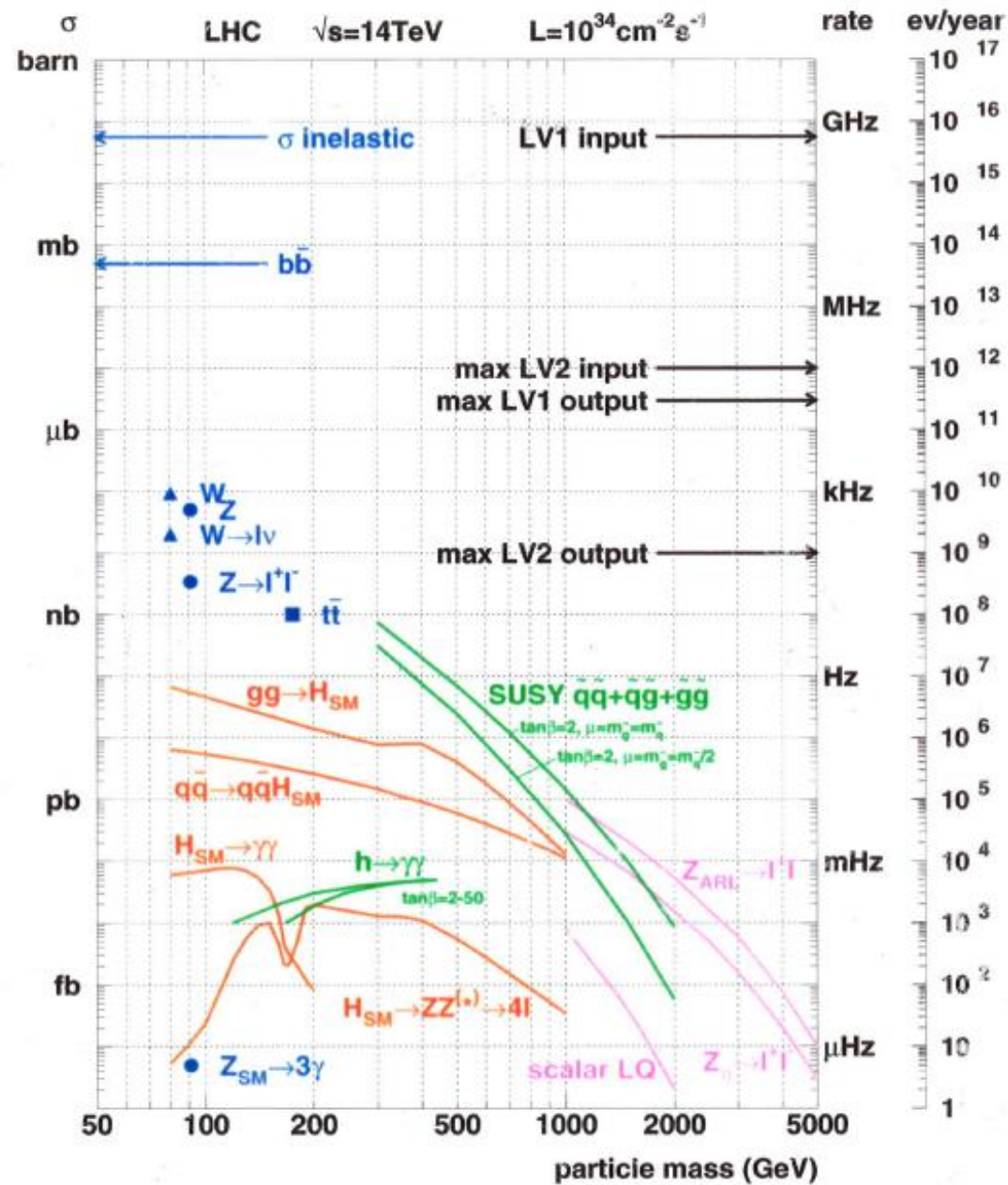


CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2010-Nov-14 18:37:44.420271 GMT(19:37:44 CEST)

Run / Event: 151076 / 1405388





Hiukkaskiihdyttimet ja -ilmaisimet

Kiinnostavien törmäysten valinta

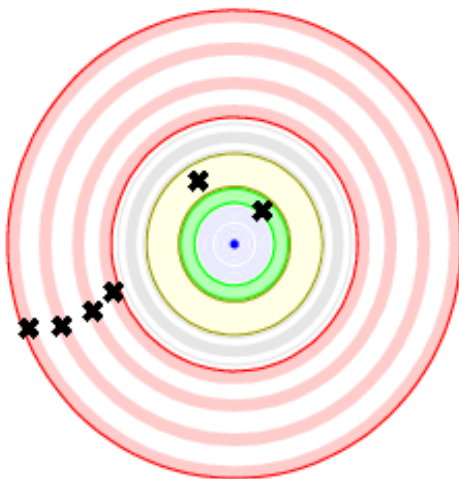
- Miksi pitää valita:

- suurin osa törmäyksistä ei sisällä mitään kiinnostavaa
- yhden törmäyksen data on noin Mb, joten kaiken datan säilyttäminen on mahdotonta.

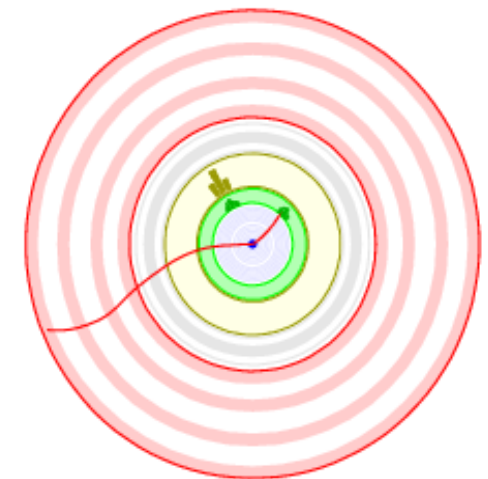
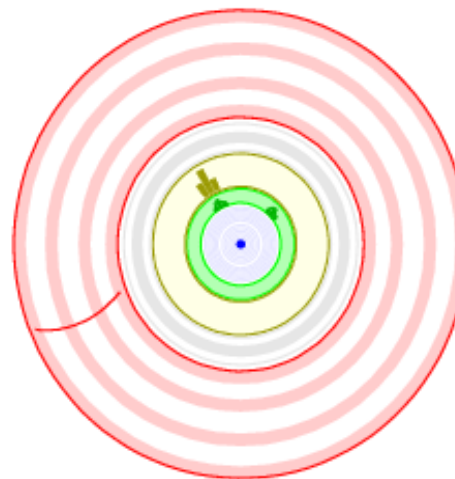
- Triggeri (=liipaisin) etsii törmäyksestä indikaatioita kiinnostavasta eventistä.

- suurenergisiä e^\pm , γ , μ , hadroneita, “puuttuvaa” energiaa (ν)

1 GHz \rightarrow 100 kHz (aikaa 3 μ s)



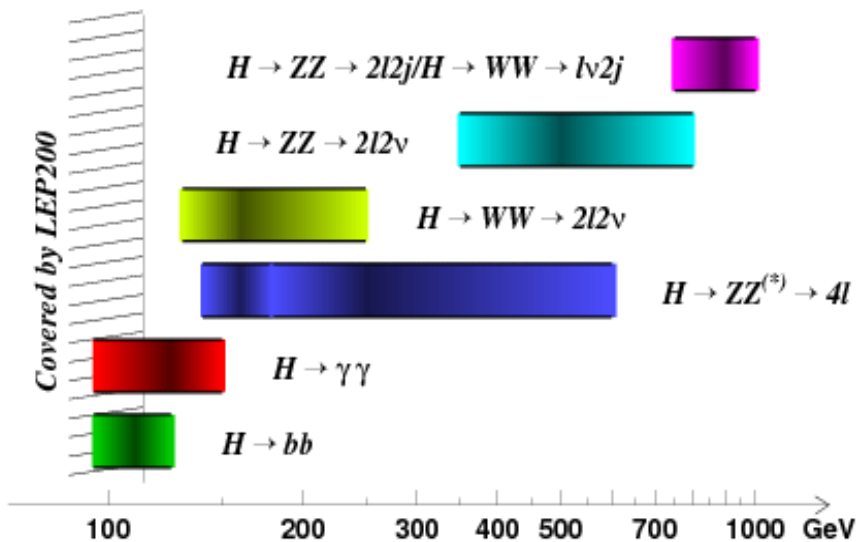
100 kHz \rightarrow 100 Hz (aikaa 1 s)



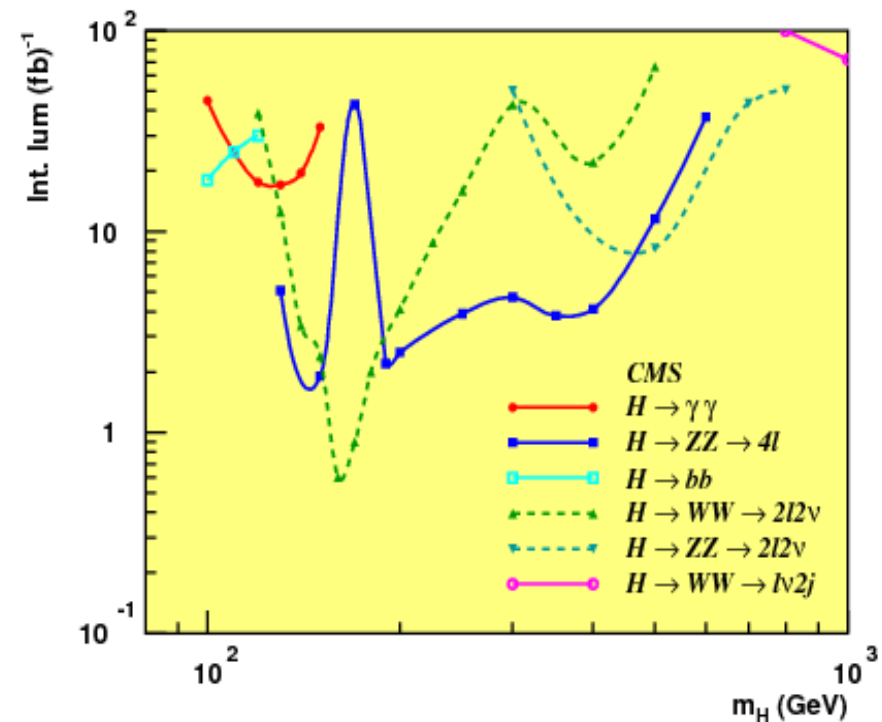
- Higgs ja alkeishiukkasten massan alkuperä:

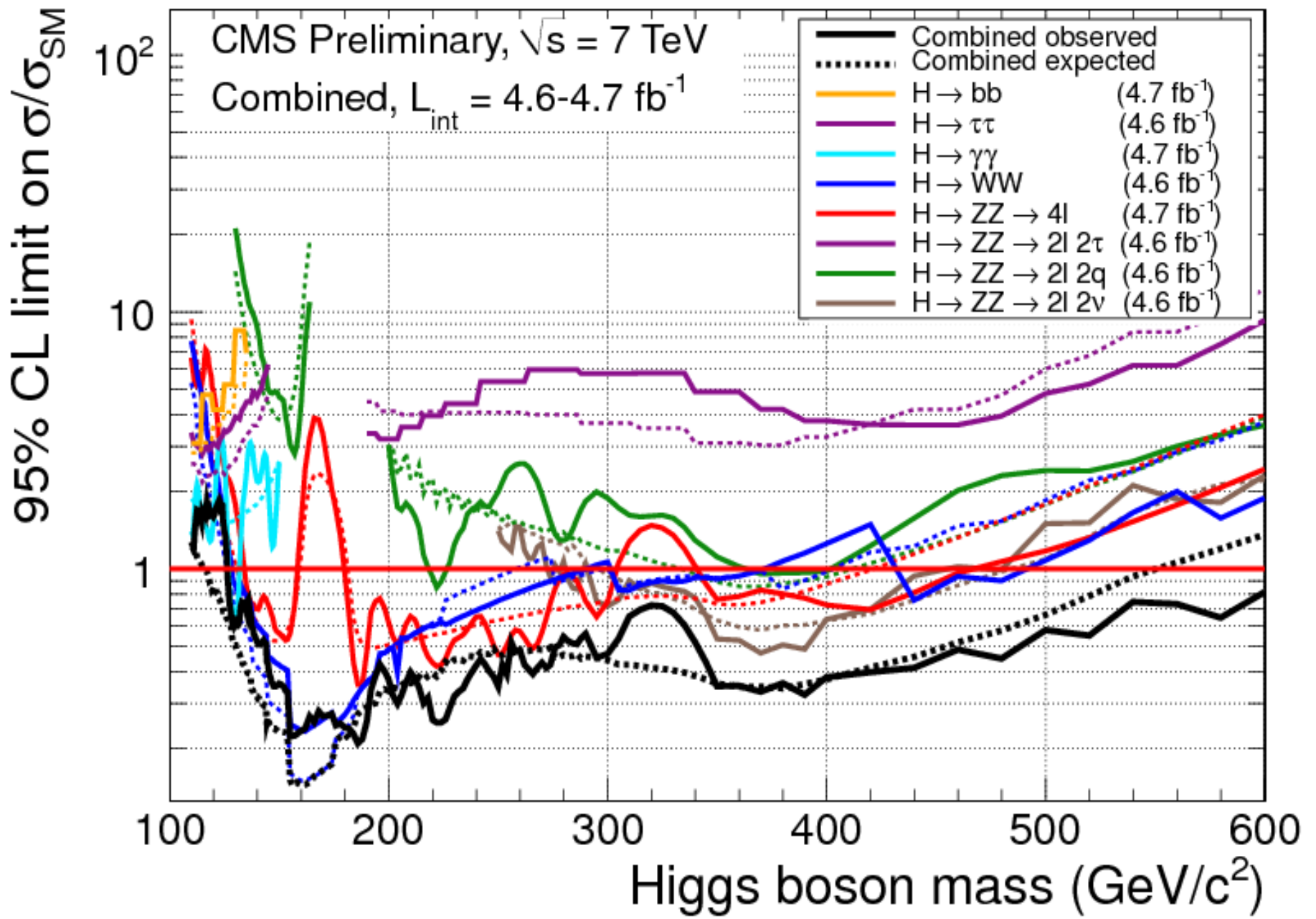
- LHC vastaa tähän kysymykseen: joko Higgs löydetään LHC-kokeissa tai löydetään ilmenemiä vastaavasta mekanismista
- Standardimallin Higgs:

Löytökanavat



Löytöön kuluva aika





Tulevaisuuden näkymiä

- Higgsin ominaisuuksien mittaaminen
 - LHC-kokeet pystyvät mittaamaan useita Higgsin ominaisuuksia
 - LHC-kiihdyttimen hiukkasenergiaa voidaan tuskin nostaa, mutta hiukkas-suihkun tiheyttä on mahdollista kasvattaa
 - (törmäyksiä saadaan enemmän, jolloin mittausten statistinen tarkkuus paranee)
 - Hadronitörmäyttimet eivät koskaan voi olla yhtä tarkkoja kuin elektroni-positroni-törmäyttimet
 - (törmäävien hiukkasten energiaa ei tunneta sekä törmäyksessä syntyy lukematon määrä hiukkasia)
 - Tulevaisuuden optiona elektroneja ja positroneja törmäyttävä lineaarikiihdytin
 - (LEP kiihdytinrenkaiden ylärajoilla; synktronisäteily suhteessa energian 4. potenssiin ja $1/\text{kaarevuussäteeseen}$)

Avoimia kysymyksiä

- Miten ratkaistaan Standardimallin ongelmat, kuten luonnottomanoloiset laskennalliset korjaukset häiriöteorian laskujen kaikissa kertaluvuissa?
- Onko uusia symmetrioita? Supersymmetria?
- Miksi $m_H \ll m_{Planck}$?
- Ekstradimensiot?
- Mikä aiheuttaa materian ja antimaterian välisen epätasapainon?
- Ovatko alkeishiukkaset todella alkeishiukkasia?
- Mikä on neutriinon massa?
- Miksi hiukkasperheitä on kolme?
- Miksi täysin erilaisten hiukkasten, elektronien ja kvarkkien, sähkövaraukset vastaavat toisiaan (tietyin kombinaatioin)?
- Miten gravitaatio yhdistetään muihin vuorovaikutuksiin?