

# Sukellus hiukkasfysiikkaan

Kati Lassila-Perini

Avoin data ja koulutoiminta -projekti  
Fysiikan tutkimuslaitos  
Helsinki Institute of Physics (HIP)

Data preservation and open access coordinator  
CMS experiment

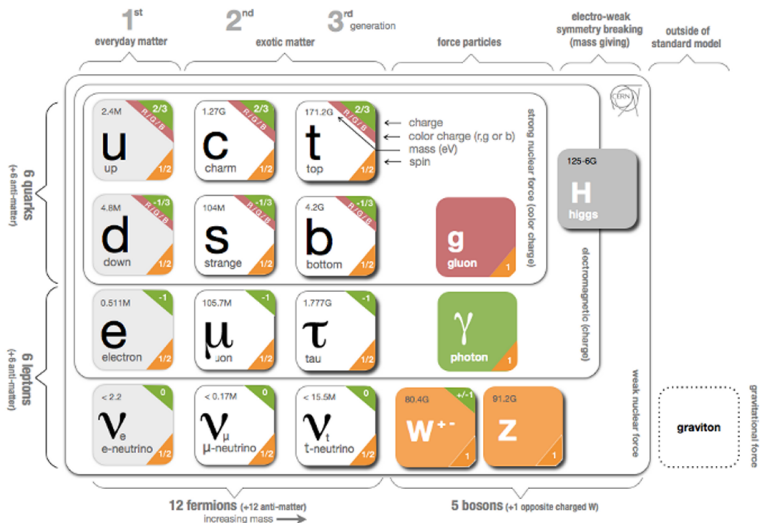
Lapin AMK 29.04.2019

# Kiitokset

Käyttämämme materiaali pohjautuu aiempaan työhön ja palautteeseen:

- CMS-data CERN Open Data -portaalin kautta [▶ Go](#) [▶ Ohjeet](#)
- Tom McCauleyn materiaalit Quarknet/eLab-projektin yhteydessä
- Harjoittelijat CERNissä:
  - ▶ Paavo Rikkilä (2016-2017) - [▶ gradu](#) aiheesta 2019
  - ▶ Henna Silvennoinen, Mira Tengvall, Edith Villegas (2017)
  - ▶ Mikko Lager (2018)
  - ▶ **Peitsa Veteli** (2017-2018-) - gradu aiheesta tekeillä
- Palautetta opettaja- ja oppilasryhmiltä:
  - ▶ Avoin data -koulutus Viikissä 2017
  - ▶ CERNin kans.välisten opettajakoulujen Open Data -työryhmät 2016-2018
  - ▶ Opettajien täydennyskoulutus CERNissä 2017-2018
  - ▶ CERNin Scoollab summer school oppilasryhmät 2017-2018
  - ▶ Avoin data -koulutus Jyväskylässä 2018
  - ▶ Peitsan pilotointi lukioryhmälle

Suurkiitokset kaikille ja myös jo teille!



Kuva: CERN, David Galbrauth

**QUARKS**

**UP QUARK**  
A teeny little point inside the proton and neutron, it is friends forever with the down quark.

**CHARM QUARK**  
A charming second generation quark.

**TOP QUARK**  
This heavyweight champion doesn't live long enough to make friends with anyone.

**DOWN QUARK**  
A tiny little point inside the proton and neutron, it is friends forever with the up quark.

**STRANGE QUARK**  
What's so strange about this second generation quark?

**BOTTOM QUARK**  
This third generation quark is puttin' on the pounds.

**LEPTONS**

**ELECTRON-NEUTRINO**  
This minuscule bandit is so light, he is practically massless.

**MUON-NEUTRINO**  
Like the other Z neutrinos, he's got an identity crisis from oscillation.

**TAU-NEUTRINO**  
He's a tau now, but what type of neutrino will he be next?

**ELECTRON**  
A familiar friend, this negatively charged, busy lil' guy likes to bond.

**MUON**  
A "heavy electron" who lives fast and dies young.

**TAU**  
A "heavy muon" who could stand to lose a little weight.

**BOSONS**

**HIGGS BOSON**  
He's the one everyone wants to meet, and now we've seen his signal from years of data at the experiments at Fermilab and CERN. You'd be smiling too if everyone was looking to interview you.

**PHOTON**  
The massless waveric we know and love.

**GLUON**  
The "glue" of the strong nuclear force.

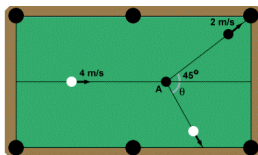
**W BOSON**

**Z BOSON**  
As the carrier particles of the weak nuclear force, they are downright obese.

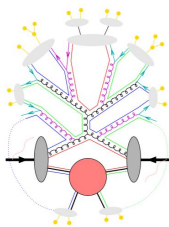
Kuvat: The particle zoo

## Vuorovaikutukset hiukkasten välillä

Ei enää

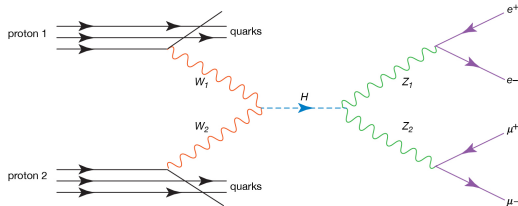


Valokuvat: Manatari



Zeppenfeld - Lecture

SparkNotes Editors. (n.d.). SparkNote on Linear Momentum: Collisions. Viitattu 20.2.2017



© 2013 Encyclopædia Britannica, Inc.

Encyclopedia britannica

vaan

/Higgs/4lepton.ig:Events/Run\_178424/Event\_66626491

**Detector Model** ?

- Tracker Barrels
- Tracker Endcaps
- ECAL Barrel
- ECAL Endcaps
- ECAL Preshower
- HCAL Barrel
- HCAL Endcaps
- HCAL Outer
- HCAL Forward
- Drift Tubes (muon)
- Cathode Strip Chambers (muon)
- Resistive Plate Chambers (muon)

**Tracking** ?

- Tracks (reco.)
- Clusters (Si Pixels)
- Clusters (Si Strips)
- Rec. Hits (Tracking)

**ECAL** ?

- Barrel Rec. Hits  ▷
- Endcap Rec. Hits  ▷
- Preshower Rec. Hits  ▷

**HCAL** ?

- Barrel Rec. Hits  ▷
- Endcap Rec. Hits  ▷
- Forward Rec. Hits  ▷
- Outer Rec. Hits  ▷

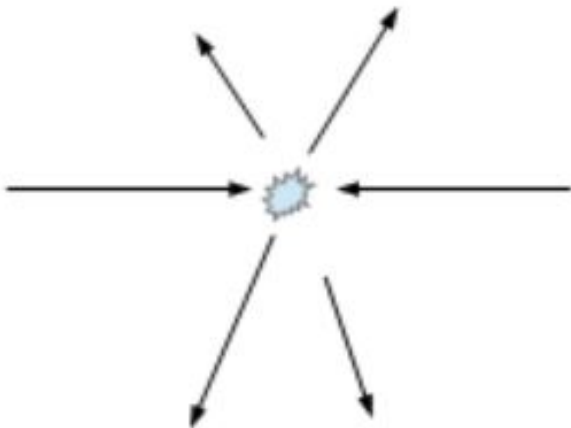
**Muon** ?

**Controls:**

- rotate
- Ctrl** + → pan x/y
- Ctrl** + → pan x/y
- Shift** + → zoom
- Shift** + → zoom



Alkutila:

Elektroni  $E, \vec{p}$ Positroni  $E, -\vec{p}$  $E_i, \vec{p}_i$ 

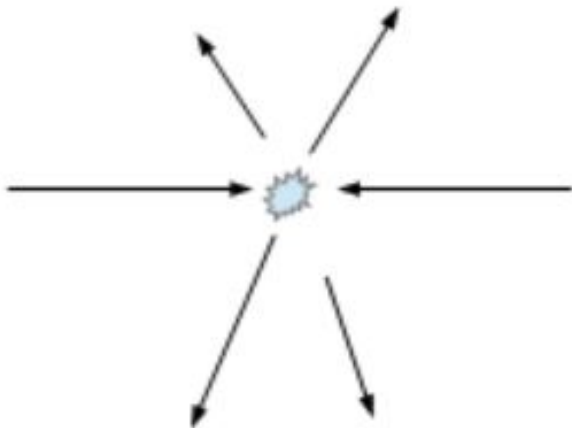
Lopputila:

$$2E = \sum E_i$$

$$0 = \sum \vec{p}_i$$



Alkutila:

Kvarkki tai gluoni  $E_A, \bar{p}_A$ Kvarkki tai gluoni  $E_B, \bar{p}_B$ 

Lopputila:

$$? = E_A + E_B = \sum E_i$$

$$? = \bar{p}_A + \bar{p}_B = \sum \bar{p}_i$$

 $E_i, \bar{p}_i$

## CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes  
 Overall diameter : 15.0 m  
 Overall length : 28.7 m  
 Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE  
 12,500 tonnes

## SILICON TRACKERS

Pixel ( $100 \times 150 \mu\text{m}$ )  $\sim 16\text{m}^2$   $\sim 66\text{M}$  channels  
 Microstrips ( $80 \times 180 \mu\text{m}$ )  $\sim 200\text{m}^2$   $\sim 9.6\text{M}$  channels

## SUPERCONDUCTING SOLENOID

Niobium titanium coil carrying  $\sim 18,000\text{A}$

## MUON CHAMBERS

Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers  
 Endcaps: 468 Cathode Strip, 432 Resistive Plate Chambers

## PRESHOWER

Silicon strips  $\sim 16\text{m}^2$   $\sim 137,000$  channels

## FORWARD CALORIMETER

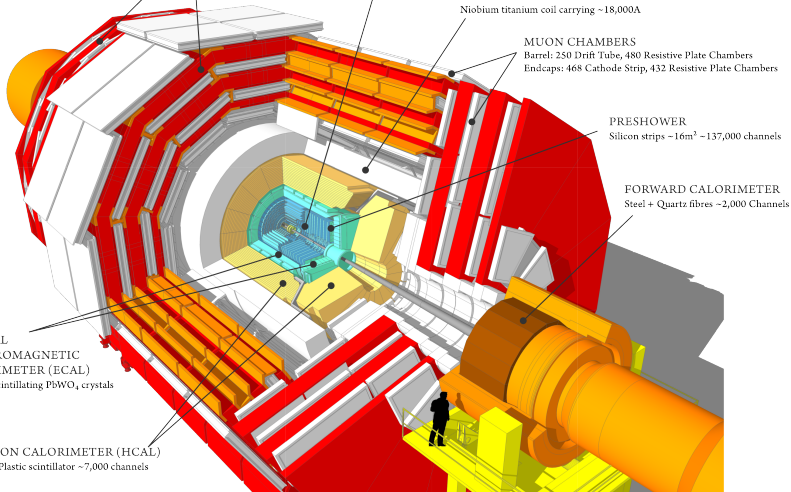
Steel + Quartz fibres  $\sim 2,000$  Channels

CRYSTAL  
ELECTROMAGNETIC  
CALORIMETER (ECAL)

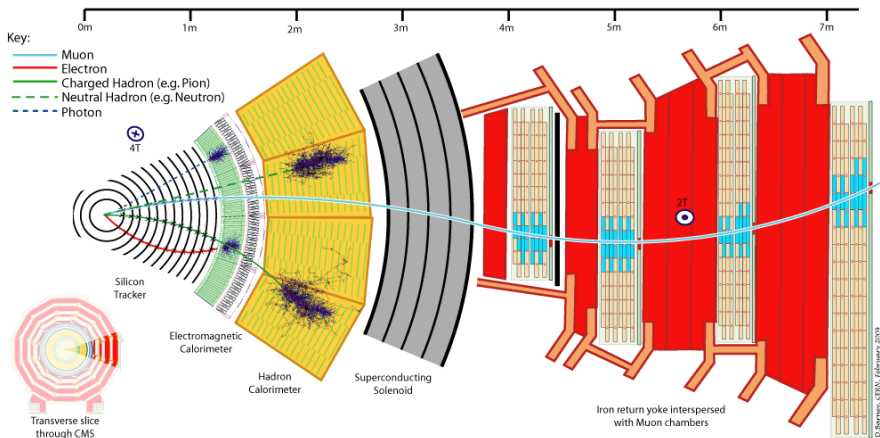
$\sim 76,000$  scintillating  $\text{PbWO}_4$  crystals

## HADRON CALORIMETER (HCAL)

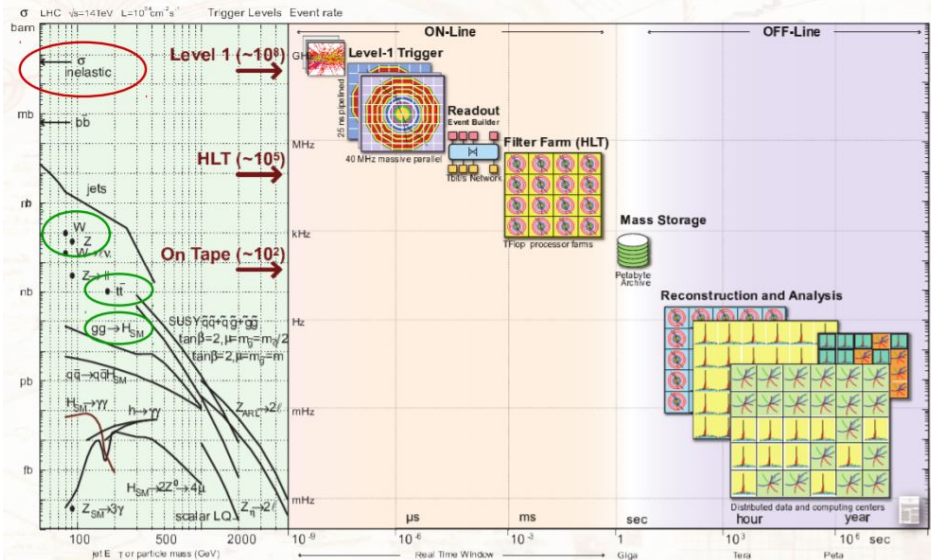
Brass + Plastic scintillator  $\sim 7,000$  channels



# Miten hiukkasia havaitaan?



# Miten data valitaan?



Andrea Bocci - Triggers for LHC Physics

# Taustatiedoksi: Mitä data sisältää?

- Jokaiselle törmäystapahtumalle (“event”) erikseen:
  - ▶ listat erilaisista ilmaisimissa *rekonstruoiduista* hiukkasista ja niiden ominaisuuksista
    - ★ esim. elektronit, myonit, fotonit, hiukkasryöpyt “jets” (alunperin kvarkki tai gluoni)...
    - ★ saattavat olla useina versioina eri algoritmeilla tuotettuina
  - ▶ listat eri hiukkasten *rekonstruointiin* tarvittavista hiukkasilmaisimista saaduista signaaleista
    - ★ esim. jäljet jälkikammioista, klusterit kalorimetreistä...
  - ▶ listat erilaisista hiukkasten tunnistamiseen tarvittavista suureista
  - ▶ törmäyksen tallentamiseen käytetyt valintakriteerit
  - ▶ erilaisia törmäyskohtaisia suureita
    - ★ esim. yhteenlaskettu energia, liikemäärä.
- Yksikkönä luonnolliset yksiköt ( $c=h=1$ ):
  - ▶ eli  $[m] = [E] = [p] = \text{GeV}$



# Miltä data näyttää?

CMS-Open-Data-1.2.0 [Running] - Oracle VM VirtualBox  
 File Machine View Input Devices Help  
 Applications Menu ROOT Object Browser Terminal - cms-openda... Terminal - cms-openda... Terminal - cms-openda... 19:11

ROOT Object Browser  
 Browser File Edit View Options Tools Help

Files  
 Draw Option:

- extral1JetPartSides\_1extraPartSides\_Tau\_REC0.
- extral1MuonPartSides\_1extraPartSides\_\_REC0.
- recoBasicJets\_ak7BasicJets\_\_REC0.
- recoCaloClusters\_hybridClusters\_\_REC0.
- recoCaloClusters\_hybridSuperClusters\_hybridBarrelBasicClusters\_\_REC0.
- recoCaloClusters\_mkt5k5SuperClusters\_mkt5k5EndcapBasicClusters\_\_REC0.
- recoCaloClusters\_gfElectronTranslator\_gf\_REC0.
- recoCaloClusters\_gfPhotonTranslator\_gfREC0.
- recoCaloClusters\_hybridSuperClusters\_uncleanedOnlyHybridBarrelBasicClusters\_\_REC0.
- recoCaloJets\_ak4CaloJets\_\_REC0.
- recoCaloJets\_ak7CaloJets\_\_REC0.
- recoCaloJets\_JH\_CaloJets\_\_REC0.
- recoCaloJets\_HS\_CaloJets\_\_REC0.
- recoCaloMETs\_corMetGlobalMeans\_\_REC0.
- recoCaloMETs\_mkt\_\_REC0.
- recoCaloMETs\_mktHD\_\_REC0.
- recoCaloMETs\_mktHF\_\_REC0.
- recoCasterTowers\_CasterTowerReco\_\_REC0.
- recoConversions\_akConversions\_\_REC0.
- recoConversions\_conversions\_\_REC0.
- recoConversions\_uncleanedOnlyAllConversions\_\_REC0.
- recoConversions\_gfPhotonTranslator\_gfREC0.
- recoGfElectrons\_gfElectrons\_\_REC0.
- recoGfElectrons\_gfElectrons\_\_RECO present
  - recoGfElectrons\_gfElectrons\_\_RECO obj
    - recoGfElectrons\_gfElectrons\_\_RECO obj.eph3\_
    - recoGfElectrons\_gfElectrons\_\_RECO obj.eph4\_
    - recoGfElectrons\_gfElectrons\_\_RECO obj.eph5\_
    - recoGfElectrons\_gfElectrons\_\_RECO obj.mmap\_
    - recoGfElectrons\_gfElectrons\_\_RECO obj.vertex\_coordinates FX
    - recoGfElectrons\_gfElectrons\_\_RECO obj.vertex\_coordinates FY
    - recoGfElectrons\_gfElectrons\_\_RECO obj.vertex\_coordinates FZ

Canvas\_1 Editor 1  
 recoGsfElectrons\_gsfElectrons\_\_RECO.obj.pt\_

htemp  
 Entries 23388  
 Mean 32.94  
 RMS 32.13

recoGsfElectrons\_gsfElectrons\_\_RECO.obj.pt\_

Command  
 Command (local):

Filter: All Files (\*.\*)

CTRL DROITE

# Mitä me käytämme?



Jupyter Laske-invariantti-massa (unsaved changes)



File Edit View Insert Cell Kernel Widgets Help

Not Trusted

Python 3

Run

## Datan hakeminen

```
In [5]: # Haetaan tarvittavat moduulit. Nimetään pandas-moduuli 'pd'ksi ja numpy-moduuli 'np'ksi.
import pandas as pd
import numpy as np

# Haetaan data ja tallennetaan se muuttujaan 'datasetti'.
datasetti = pd.read_csv('http://cern.ch/opendata/record/545/files/Dimuon_DoubleMu.csv')
```

Saamme tarkistettua 'datasettiin' tallentamamme datan sisällön tulostamalla viisi ensimmäistä tapahtumaa alla olevalla koodilla:

```
In [6]: datasetti.head()
```

Out[6]:

	Run	Event	type1	E1	px1	py1	pz1	pt1	eta1	phi1	...	type2	E2	px2	py2	pz2	pt2	eta2	phi2
0	165617	74601703	G	9.6987	-9.5104	0.3662	1.8633	9.5175	0.1945	3.1031	...	G	9.7633	7.3277	-1.1524	6.3473	7.4178	0.7756	-0.1
1	165617	75100943	G	6.2039	-4.2666	0.4565	-4.4793	4.2910	-0.9121	3.0350	...	G	9.6690	7.2740	-2.8211	-5.7104	7.8019	-0.6786	-0.3
2	165617	75587682	G	19.2892	-4.2121	-0.6516	18.8121	4.2622	2.1905	-2.9881	...	G	9.8244	4.3439	-0.4735	8.7985	4.3697	1.4497	-0.1
3	165617	75660978	G	7.0427	-6.3268	-0.2685	3.0802	6.3325	0.4690	-3.0992	...	G	5.5857	4.4748	0.8489	-3.2319	4.5546	-0.6605	0.1
4	165617	75947690	G	7.2751	0.1030	-5.5331	-4.7212	5.5340	-0.7736	-1.5522	...	G	7.3181	-0.3988	6.9408	2.2825	6.9523	0.3227	1.6

5 rows x 21 columns

# Miten dataa voi käyttää?

- 1 Visualisoi yksittäisiä törmäyksiä: [Go](#) [Ohjeet](#) [... ja lisää](#)
  - ▶ Toimii selaimessa, osin älypuhelimessa, myös 3D-view
  - ▶ Minimiaika 15 min
  - ▶ Kaikille tasoille
- 2 Analysoi alkuperäisestä tutkimusdatasta suodatettua dataa
  - ▶ Taulukkolaskentaa (excel, libre office)
    - ★ [Ohjeita](#)
  - ▶ Python-kielellä ohjelmointi jupyter notebook -sovelluksessa
    - ★ **Tämän kurssin ohjelma:** [Materiaalit](#) [Nopea esimerkki](#)
  - ▶ Minimiaika noin 1.5 tuntia
  - ▶ Lukiotaso
- 3 Analysoi dataa niin kuin tutkijat
  - ▶ Lataa linux-ympäristö virtuaalikonekuvana [Ohjeet](#)
  - ▶ Aja esimerkkikoodi (C++, python) [Ohjeet](#)
  - ▶ Minimiaika <1 tunti (copy-paste), mutta paljon pidempään data-analyysistä oppimiseen
  - ▶ Yliopistotaso tai komentorivikoodaamisesta innostuneet yksittäiset oppilaat.



# Yksittäisten törmäystapahtumien visualisointi

← → ↻ Not secure | opendata.cern.ch/visualise/events/CMS

opendata  
CERN Search

Need HELP?

ISpy WebGL 4lepton.lg:Events/Run\_178424/Event\_666626491 [1 of 3]

Detector

- Pixel Barrel
- Pixel Endcap (+)
- Pixel Endcap (-)
- Tracker Inner Barrel
- Tracker Outer Barrel
- Tracker Inner Detector (+)
- Tracker Inner Detector (-)
- Tracker Endcap (+)

CMS Experiment at the LHC, CERN  
Data recorded: 2011-Oct-13 12:47:38.421105 GMT  
Run / Event / LS: 178424 / 666626491 / 585

Click on a name under "Provenance", "Tracking", "ECAL", "HCAL", "Muon", and "Physics" to view contents in table

▶ Tutoriaali

▶ Aktiiviteetti

▶ Go

# Tärkeitä käsitteitä hiukkasfysiikan datan analyysissä

- Etsittävät ja/tai mitattavat hiukkaset ovat lyhytikäisiä eikä niitä voida suoraan havaita
  - ▶ Havaitaan vain hiukkasten hajontatuotteet.
- Analyysi perustuu vakioina pysyville suureille (alkutila - lopputila):
  - ▶ Säilymislait (energia - liikemäärä)
  - ▶ Invariantti massa:  $m = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - |\vec{p}_1 + \vec{p}_2|^2}$
- Useita samoja tai samankaltaisia lopputiloja
  - ▶ Signaali - tausta
  - ▶ Esimerkkejä: Higgsin bosonin hajonta ▶ kahteen fotoniin ▶ neljään leptoniin
- Tilastolliseen analyysiin tarvitaan paljon dataa.

Lopuksi esimerkki hiukkasfysiikan datan analyysistä: ▶ Haetaanpa Higgsin bosoni!