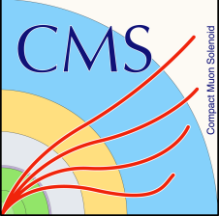


Junior

Hiukkaset hukassa

Osa 1



Hiukkaset hukassa

Aalto Junior x CMS open data

- Hiukkasfysiikka-aiheinen työpaja, jossa analysoidaan dataa koodaamalla (Pythonilla JupyterLite notebookissa)
- Työpaja on kaksiosainen
 - Osa 1: esitiedot ennen työpajaa (esim. edeltävällä opetuskerralla tai kotitehtävänä), sisältö on tässä kalvopakettissa
- Osa 2: käytännön osuus (diat ja koodausosio)

Ryhmän salapoliisitaidot pääsevät koetukselle, kun CERNin kesäopiskelija kutsuu heidät apuun todellisen datan tunnistamisessa. Onneksi isotkaan datamäärät eivät olekaan niin hankalia, kun käytössä ovat oikeat työkalut!

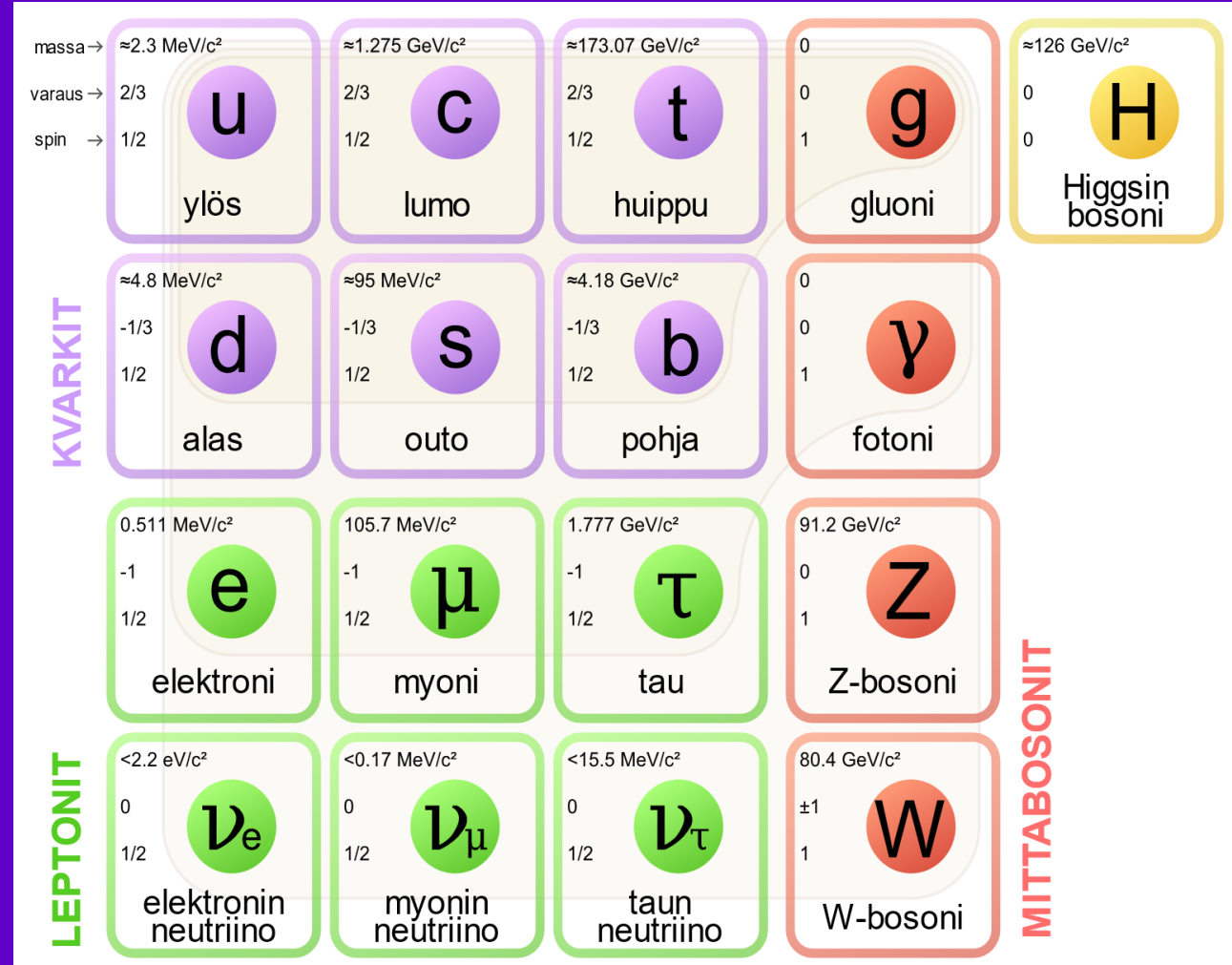
Hiukkasfysiikasta

Mitä painovoima on? Mitä massa on? Mihin antimateria hävisi alkuräjähdyksen jälkeen, jättäen jälkeensä aineesta muodostuvan universumin?

- **Hiukkasfysiikka yrittää selvittää vastauksia perustavanlaatuisiin kysymyksiin maailmankaikkeuden rakenteesta ja jokapäiväisistä vuorovaikutuksista.**
- **Molekyylit ja atomit ovat tuttuja tieteen rakennuspalikoita joita on helppo havaita, mutta saadaksemme vastauksia, on tutkittava millaisista rakennuspalikoista ne vuorostaan koostuvat.**
- **Nämä palikat ovat alkeishiukkasia.**
 - **Ei omaa sisäistä rakennetta: eivät siis koostu muista hiukkasista**
 - **Mahdottoman pieniä havaittavaksi suoraan**
 - **Useimmat eivät voi esiintyä vapaina hiukkasina luonnollisissa olosuhteissa**
- **Alkeishiukkaset muodostavat standardimallin**

Alkeishiukkaset

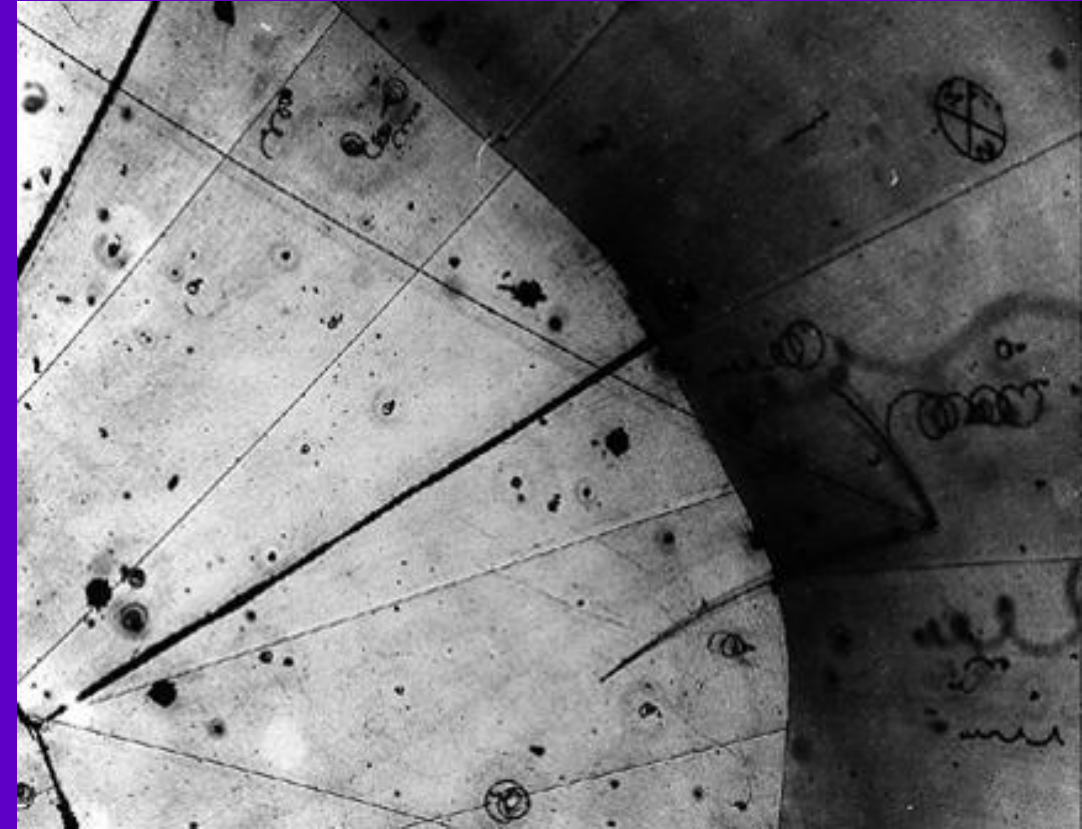
- Universumin kaikki atomit koostuvat alkeishiukkasista.
- 12 eri tyyppiä, mutta luonnollisissa oloissa niistä esiintyy nykyään vain neljää – elektroneja, elektronin neutriinoja, yläskvarkkeja ja alaskvarkkeja.
 - Muita oli luonnossa vain heti alkuräjähdyksen jälkeen, koska hiukkasten luominen vaatii korkeita energioita. Se tapahtuu tyypillisesti vain kosmisen säteilyn aiheuttamana tai hiukkaskiihdyttimissä
- Alkeishiukkaset on järjestelty osaksi standardimallia, joka pyrkii selittämään mistä aine koostuu sekä asiaankuuluvat vuorovaikutukset



Standardimalli avattuna (1/2)

Ainehiukkaset, eli fermionit on jaoteltu eri ryhmiin sen mukaan, koostuvatko ne yhdestä alkeishiukkasesta vai niiden yhdistelmistä.

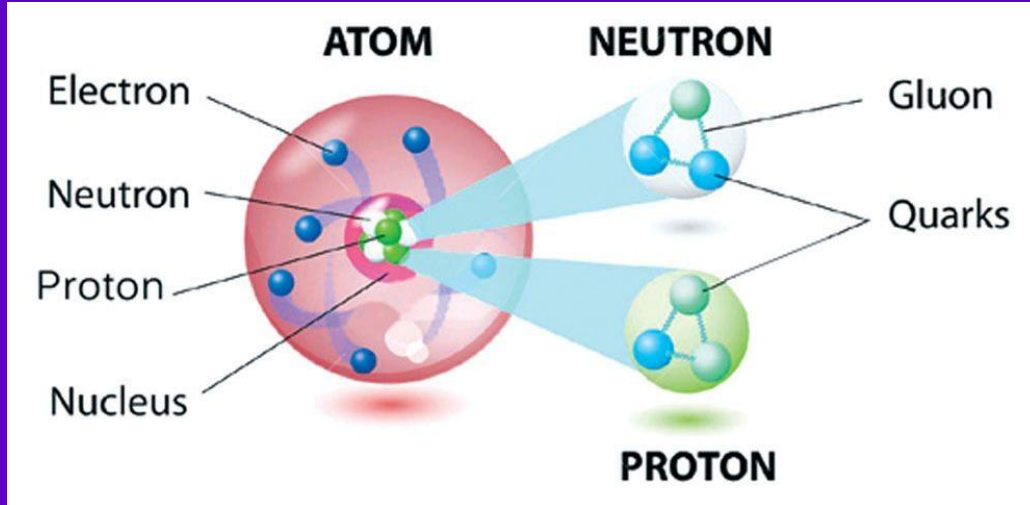
- **Kvarkit ovat alkeishiukkasia**
 - 6 eri tyyppiä: ylös, alas, outo, lumo, pohja, huippu
 - muodostavat hadroneita, yhdistelmähiukkasia, esim. protoni ja neutroni
- **Leptonit ovat myös alkeishiukkasia. Niitäkin on kuutta eri lajia, mutta vain elektroni toimii tavallisen aineen rakennusosana.**
 - Elektronit, myoni ja tau, sekä niitä vastaavat neutriinot



Kuva 2. Ensimmäinen neutriinohavainto kuvattuna (1970)

Kuvan lähde
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:First_neutrino_observation.jpg

Standardimalli avattuna (2/2)



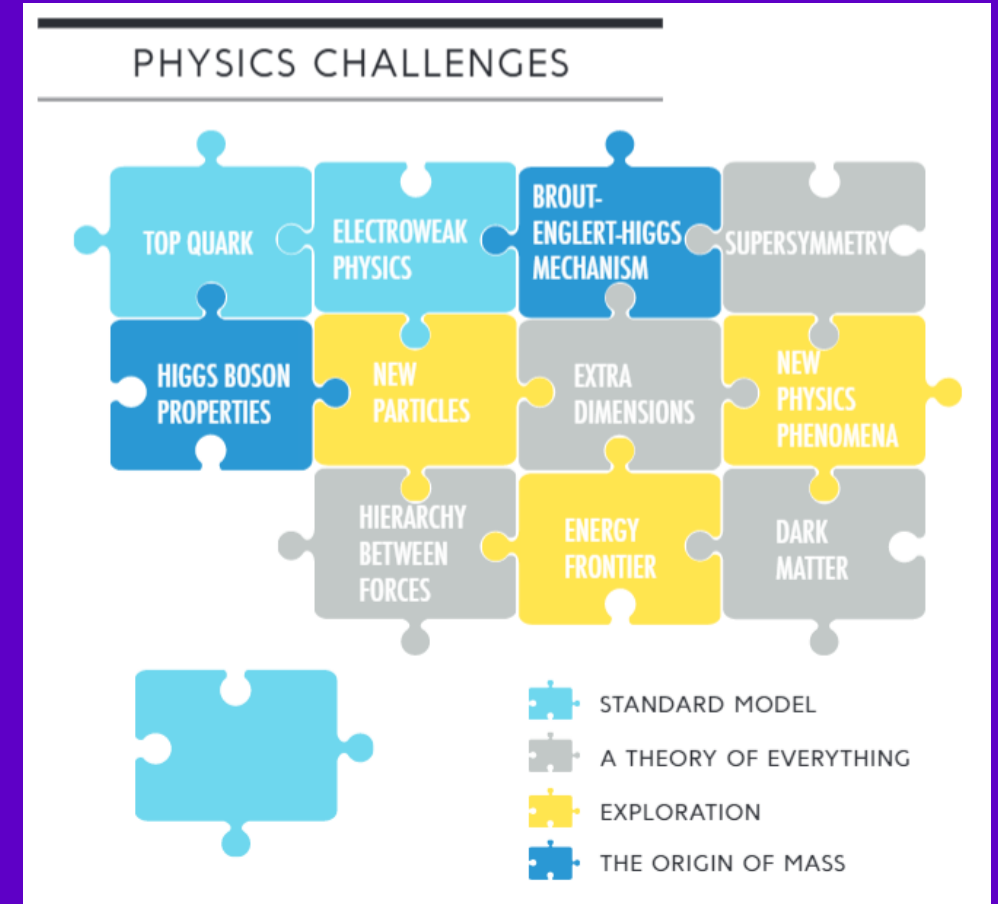
Voimia välittävät hiukkaset eli bosonit pitävät rakennusosaset kasassa. Ne välittävät atomeihin neljää luonnon perusvoimaa:

- Fotoni on massaton valohiukkanen, joka välittää sähkömagneettista voimaa.
- Gluonit liimaavat kvarkit yhteen alkeishiukkasissa ja välittävät vahvaa ydinvuorovaikutus.
- W- ja Z- hiukkaset välittävät heikkoa ydinvuorovaikutus. Ne liittyvät tietynlaisiin radioaktiivisuuden muotoihin.

Lisäksi on olemassa Higgsin hiukkanen. Se löytyi 99,99 prosentin todennäköisyydellä vuonna 2012. Hiukkanen antaa atomien rakennusosasille massan. Kvarkit kiinnittyvät voimakkaammin Higgsin hiukkasiin, ja siksi ne ovat raskaampia kuin esimerkiksi elektronit.

Standardimalli

- **Matemaattinen malli joka kuvaa:**
 - tunnetut alkeishiukkaset
 - heikon ja vahvan vuorovaikutuksen
 - sähkömagneettisen vuorovaikutuksen
- **Standardimalli ei ole ”kaiken teoria”, vaan siitä puuttuu vielä palasia. Higgsin bosonin löydön jälkeen sen ominaisuuksia on tutkittu tiiviisti.**



Kuva: <https://home.cern/science/physics/standard-model>

Mitä tarkoittaa malli?

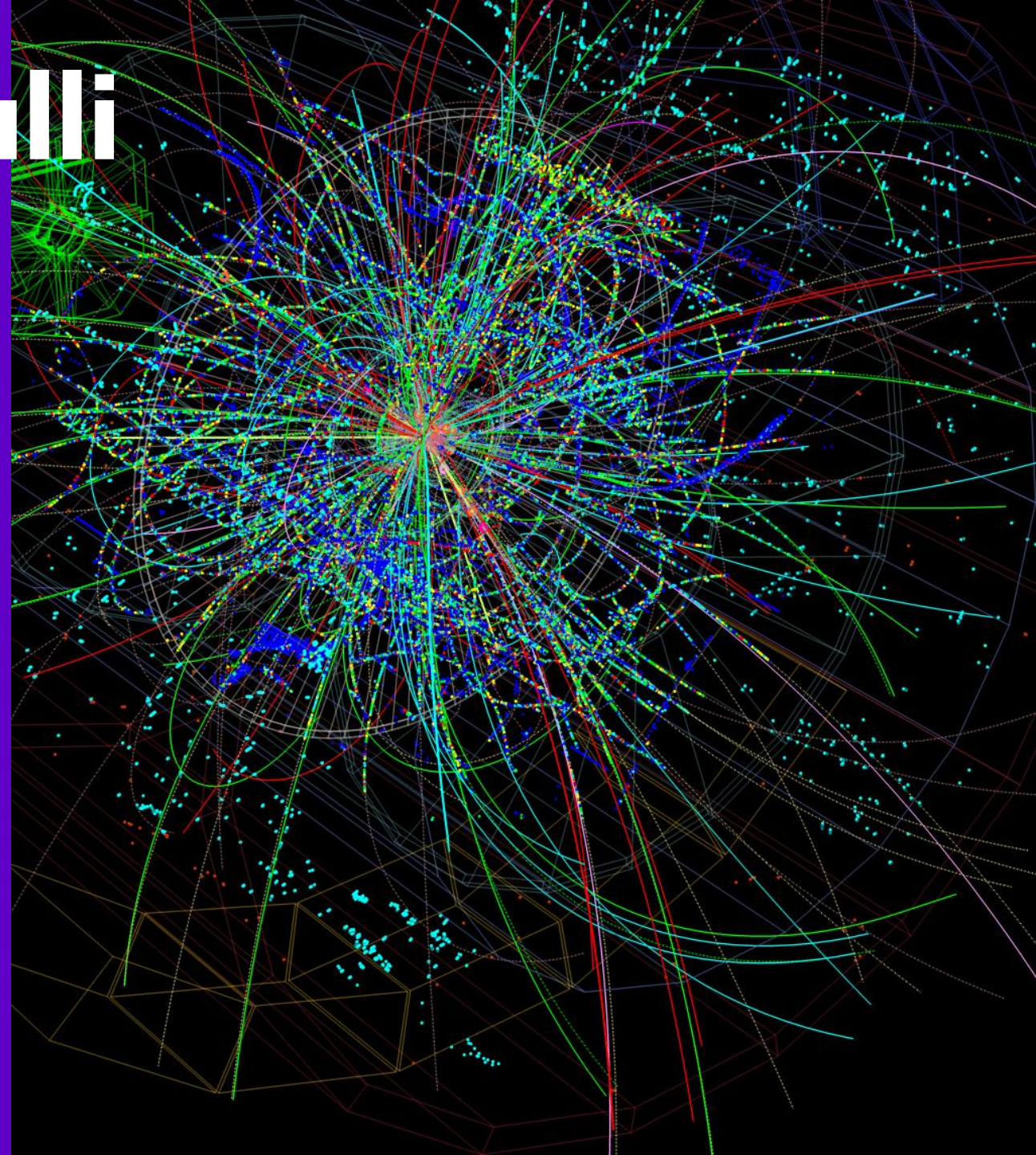
Malli on yksinkertaistettu kuvaus todellisuudesta. Fysiikan mallit rakennetaan teorian ja kokeellisen tutkimuksen yhteistyönä. Teoreetikot rakentavat malleja joita sitten testataan kokeellisesti ja muokataan sitä mukaan, kun tutkimus kehittyy ja löydetään uusia osasia palapeliin.

Standardimalli

Mitä standardimalli ei selitä?

- 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?

→ **Työtä siis vielä riittää**



Hiukkasfysiikan tutkiminen (1/2)

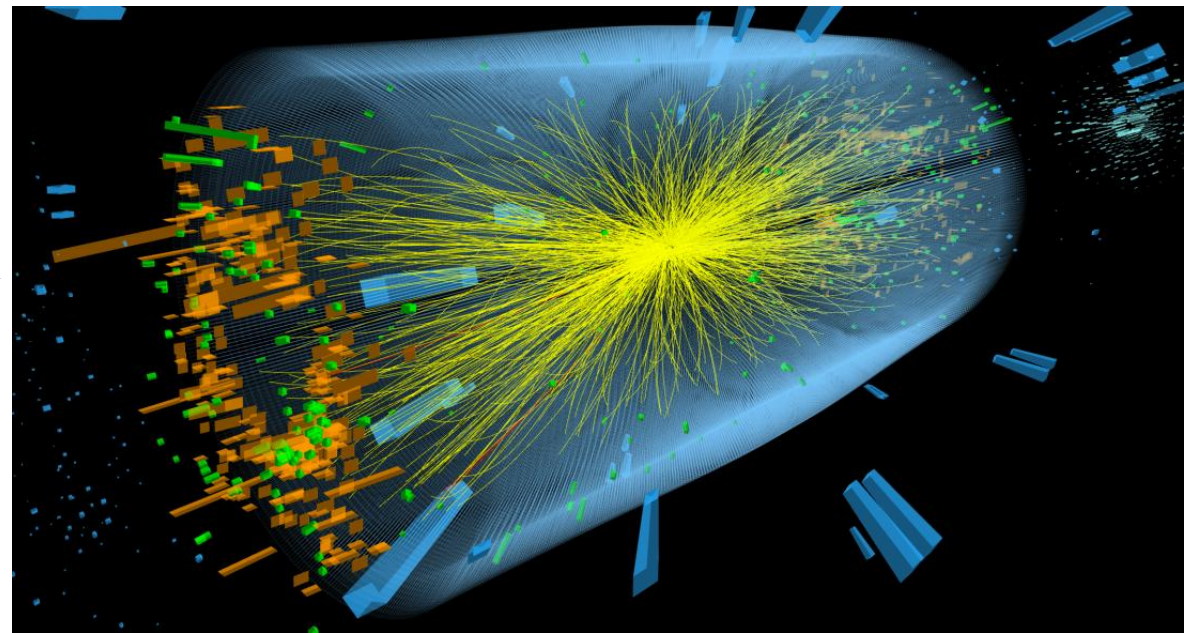
Jos hiukkasia ei esiinny luonnollisesti, niin miten niitä sitten tutkitaan?

“[Muita alkeishiukkasia] esiintyi luonnossa vain heti alkuräjähdyksen jälkeen, koska hiukkasten luominen vaatii korkeita energioita.”

...on replikoitava alkuräjähdyksen kaltaiset olosuhteet, joissa energiaa on paljon ja hiukkasia voi syntyä!

→ Kiihdytetään ja törmäytetään hiukkasia hiukkaskiihdyttimessä, jolloin ne hajoavat alkeishiukkasiksi

Hiukkasfysiikkaa
kutsutaan myös
suurenergiafysiikaksi
(*high energy physics*)



Hiukkasfysiikan tutkiminen (2/2)



- Hiukkasfysiikan kokeellinen tutkimus onkin usein epäsuoraa ja dataa kerätään paljon, jotta todennäköisyyksien avulla saadaan tuloksia ja uusia havaintoja.
 - Tuloksia varmennetaan statistisilla testeillä, esim. laskemalla p-arvo tai keskihajonta (sigma, σ)
 - Vertaa: Biolääketieteellisessä tutkimuksessa tyypillinen ”hyväksytty” raja tilastollisesti merkittävälle tulokselle on ($p < 0.05$), kaksi sigmaa. Hiukkasfysiikassa vastaavasti tähdätään paljon pienempään arvoon, ($p < 0.0000003$), todella tiukka viisi sigmaa.
- LHC generoi noin 90 petatavua dataa vuosittain eri tutkimusasemiltaan
 - “Yksi petatavu (PB) on tuhat teratavua. Maailman noin 50 000 elokuvan varastointiin studiolaatuisena tarvitaan 10 petatavua.”

**Tarkoittaako
“tilastollisesti
merkittävä” myös
“tieteellisesti
tärkeää”?**

Lisätietoa englanniksi:

<https://blogs.scientificamerican.com/observations/five-sigmawhats-that/>

Hiukkaskiihdytin

Lyhyt esittelyvideo CERNistä,
Euroopan hiukkasfysiikan
tutkimuskeskuksesta

- Tutkimuslaitteistona
hiukkaskiihdytin LHC,
Large Hadron Collider
 - Törmäyttää hadroneita, kuten
protoneita tai neutroneita :D
- Monta ilmaisinta (*detectors*),
esim. CMS, compact myon
solenoid

*Video on hieman vanhentunut; LHC on
ollut toisella pitkällä huoltotauolla (2019–
2022), jonka aikana sen suorituskykyä on
paranneltu ja säteilystä kärsineitä osia
vaihdettu.*

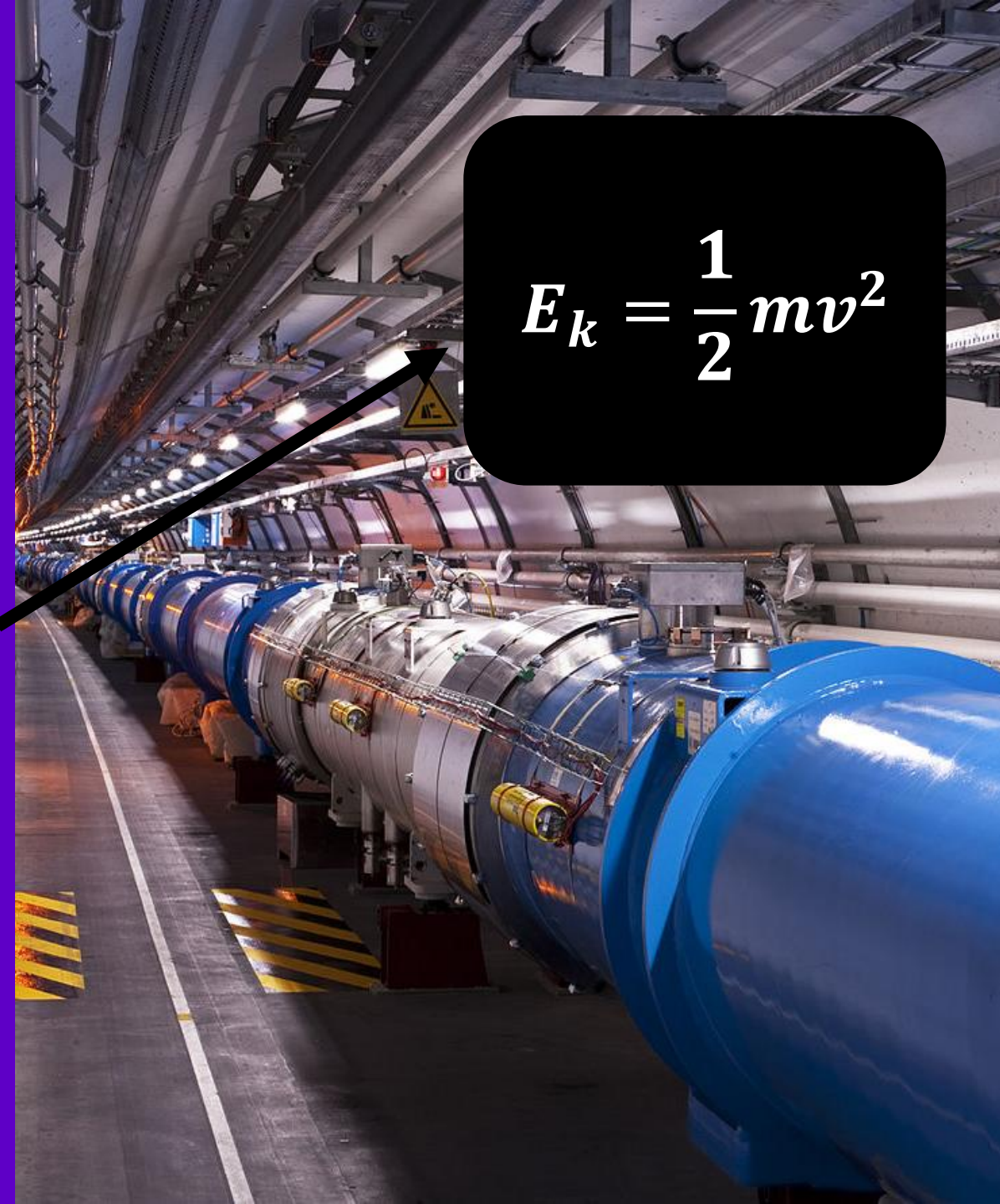


<https://www.youtube.com/watch?v=S99d9BQmGB0>

Hiukkaskiihdytin

- Yksinkertaisimmillaan hiukkaskiihdytin on tyhjiöputki, jonka sisälle luodaan jännite, joka aiheuttaa varattujen hiukkasten liikettä.
 - Sähkökenttä kiihdyttää ja magneettikenttä suuntaa
- LHC törmäyttää lähes valonnopeudella kulkevia protoneja.
 - Energia kasvaa nopeuden kasvaessa (liike-energian kaava...)
- Näissä suurenergisissä törmäyksissä voi syntyä uusia hiukkasia jotka hajaantuvat eri suuntiin.
- Törmäyskohdan ympärillä olevan ilmaisimen (esim. CMS) tavoitteena on mitata törmäyksistä syntyvien hiukkasten varaukset, kulkuradat ja energiat, jotta hiukkaset on mahdollista tunnistaa.

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

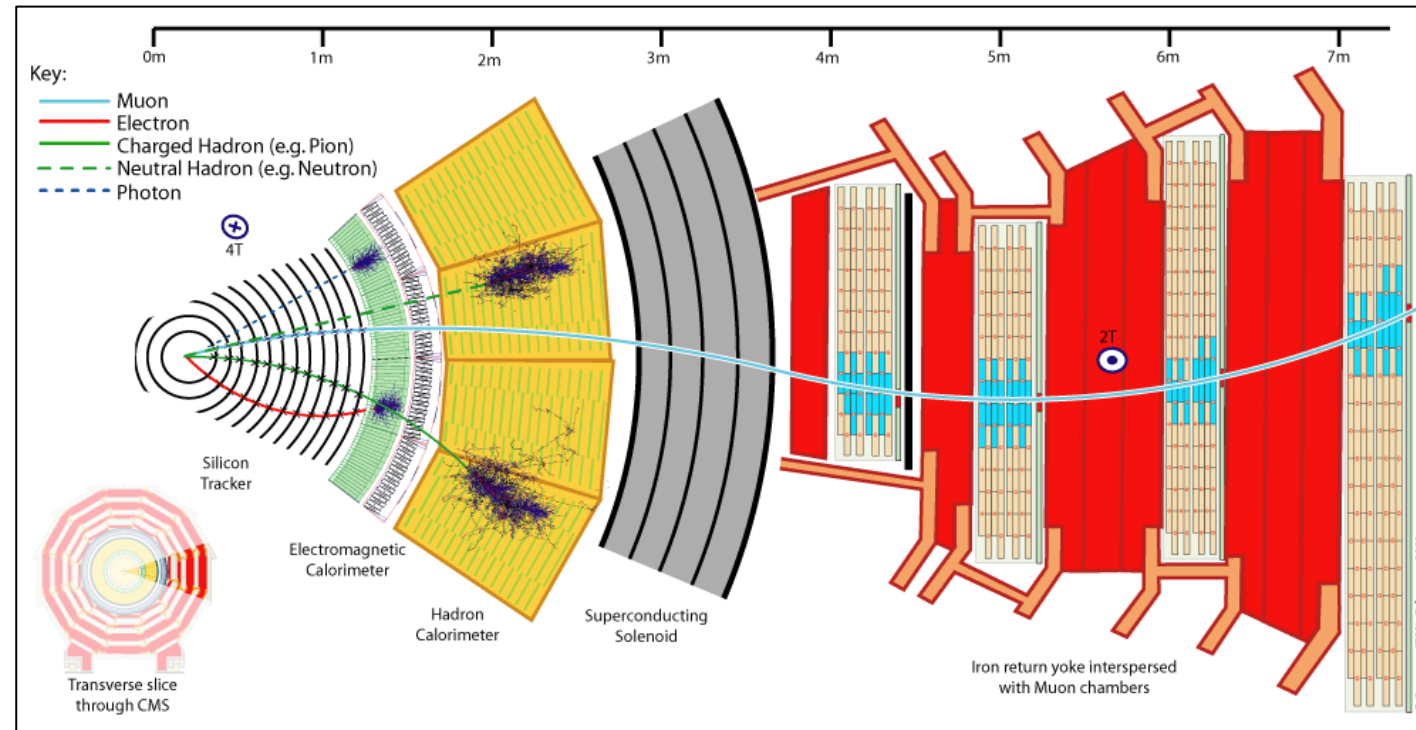


Hiukkasdatan mittaaminen CMS-ilmaisimella

Eri hiukkaset vaikuttavat aineen kanssa eri tavoin

→ Mitatuista ominaisuuksista on mahdollisuus päätellä, mikä hiukkanen on kyseessä.

CMS (compact myon solenoid) on kuin sipuli – sen eri kerrokset havainnoivat erilaisia ominaisuuksia, joita hiukkasilla on (esim. varausta)



Hiukkasfysiikan tutkiminen – Yksiköistä (1/2)

Planckin vakio:
luonnonvakio, joka
yhdistää taajuuden ja
energian yksiköt
toisiinsa ($E = hf$)

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

$$= 1.055 * 10^{-34} Js$$

- Hiukkasfysiikan maailmassa tavallisen mekaniikan kaavat eivät enää aina päde kun massa muuttuu energiaksi ja toisin päin. Siksi meille luontevat yksiköt kuten metri tai kilogramma eivät sovi hiukkasfyysikon arkeen...
- Nopeudet lähestyvät valonnopeutta, $v \sim c$
- Energia ja liikemäärä ovat paljon massaa suurempia, $E \gg mc^2$, $p \sim E/c$
- Tavallista onkin tehdä seuraava oletus: $\hbar = c = 1$
jossa c = valonnopeus ja $\hbar$ = pelkistetty Planckin vakio
 - Muutoksen voi huoletta tehdä, sillä valonnopeus (tyhjiössä) on vakio ja sen numeerinen arvo on riippuvainen valitusta esitysyksiköstä
 - Sama muutos vaikuttaa käytettävään järjestelmään siten, että nopeudesta tulee dimensioton, eli sillä ei ole yksikköä. Näin ollen myös liikemäärän ja energian yksiköt muuttuvat:

$$\begin{aligned} p &= m * v & \rightarrow & p = m \\ E &= m * v^2 & \rightarrow & E = m \end{aligned}$$
- Oletuksella $c = 1$ saadaan myös useita kaavoja siistinpään muotoon (esim. $E = mc^2 \rightarrow E = m$)

Hiukkasfysiikan tutkiminen – Yksiköistä (2/2)

- Säilymislait pitävät edelleen paikkaansa. Voimme muodostaa hiukkasten energian ja liikemäärän avulla suureen, invariantti massa, m_0 .

$$m_0 = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - \|p_1 + p_2\|^2}$$

- Kun hiukkanen hajoaa eli lakkaa olemasta, sen massa ennen hajoamista voidaan laskea hajoamistuotteiden energioista ja liikemääristä. Viitekehys (reference frame) jossa energiat ja liikemäärät mitattiin eivät vaikuta inferoituun massan arvoon. Se on siis riippumaton, invariantti massa.

→ Invariantti massa säilyy hiukkasen hajotessa uusiksi hiukkasiksi

- Jos sen laskee tietystä törmäyksestä syntyneille tytärhiukkasille, saadaan arvo joka on lähellä emohiukkasen massaa.
- Jos taas lasketaan invariantti massa hiukkasille jotka eivät liity mitenkään toisiinsa saadaan arvo joka ei kuvaa mitään, eli taustakohinaa.
- Energiaa, liikemäärä ja invariantti massa ilmaistaan tutussa energian yksiköissä elektronivoltti, eV, $= 1.602176634 \times 10^{-19}$ Joulea

Hiukkasfysiikka

- Kaikkia hiukkasia ei voi havaita CMS:llä. Esim. neutriinot havaitaan epäsuorasti liikemäärän säilymisen kautta
→ Törmäystapahtumien selvittäminen on kuin palapeli, jossa yhdistetään eri ilmaisintyyppien keräämä informaatio
- Suurenergisissä törmäyksissä voi syntyä uusia hiukkasia, joista osa on vakaita ja osa epävakaita.
 - Koska epävakait hiukkaset ovat olemassa vain hyvin lyhyen ajan, eivät hiukkasilmaisimet havaitse niitä.
 - Jotta saisimme tietää, mitä hiukkasia törmäyksessä on syntynyt, meidän tulee tarkastella vakaiden hiukkasten ominaisuuksia.
- Hiukkasilmaisimien keräämä data kertoo meille syntyneiden hiukkasten energian ja liikemäärän. Näiden suureiden avulla voimme laskea, mikä oli hajonneen hiukkasen massa.
 - Mutta miten? Hiukkasfysiikan liikkuu kuitenkin aivan eri suuruusluokissa ja voimien suhteissa. Siitä huolimatta...

– Jälki-ilmaisimien (varattujen hiukkasten jäljet)
– Kalorimetri (energia)
– Tiettyjä hiukkasia mittaavat ilmaisimet
– Asetetaan ilmaisimet magneettikentän sisään

Hiukkasfysiikka

→ Invariantti massa säilyy hiukkasen hajotessa uusiksi hiukkasiksi.

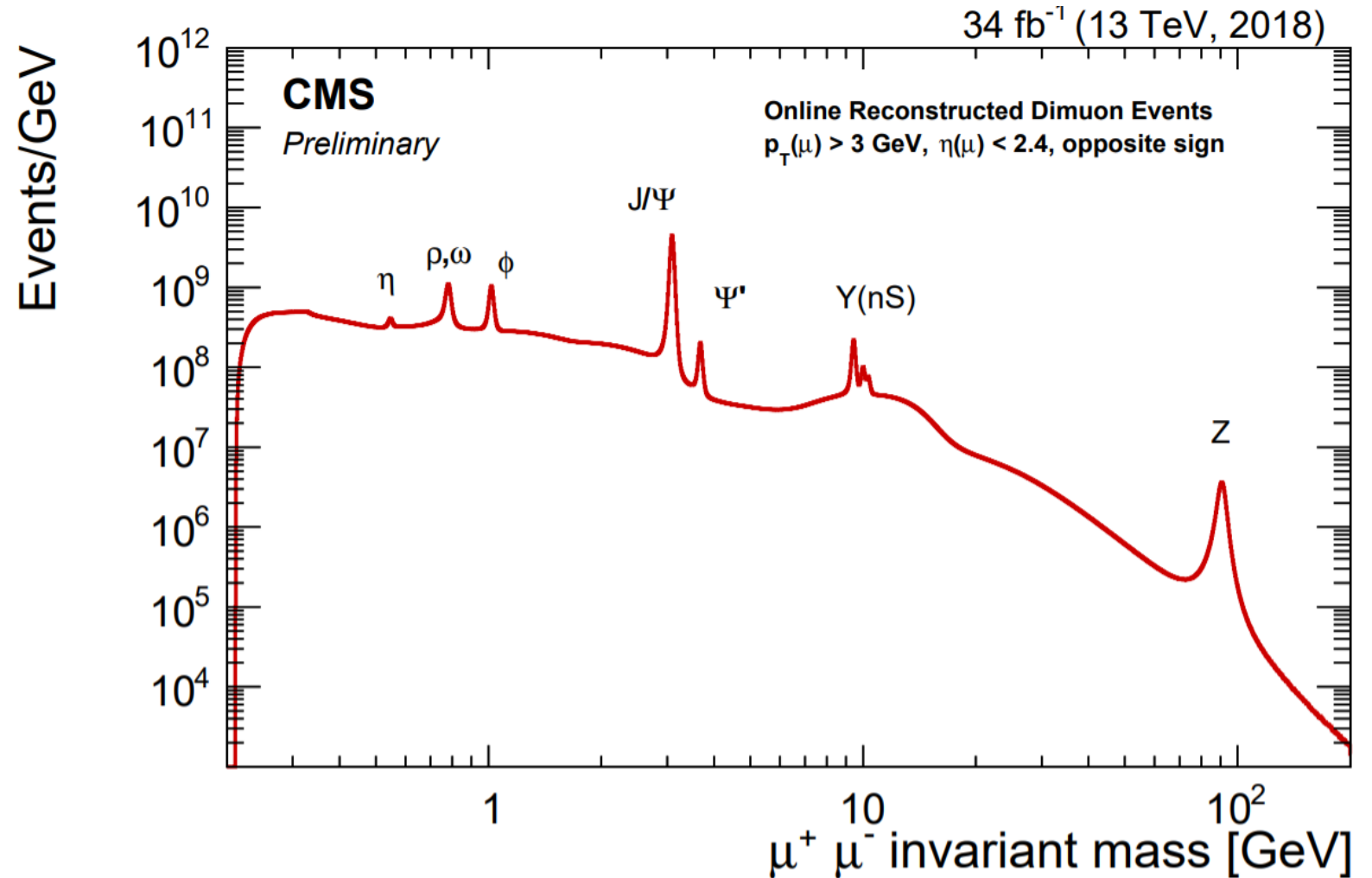
- Eli mikäli kahden hiukkasen törmäyksessä syntyy kuusi hiukkasta, on kahden törmäävän hiukkasen invariantin massan summa näiden tytärhiukkasten invariantin massan summa.
- Yhden havainnon tekeminen ei kuitenkaan ikinä riitä. On tärkeää tarkastella tuloksia kriittisesti ja saada mitattua tilastollisesti merkittävä määrä dataa, jotta todelliset ilmiöt erottuvat taustakohinasta.
- Kun dataa saadaan kerättyä tarpeeksi, voidaan käyttää esim. histogrammeja tulosten visualisoimiseksi.
 - Määrittääkseen minkä raskaamman hiukkasen hajoamisesta havaitut, vakaat hiukkaset ovat kotoisin, tutkijat tarkastelevat suuria määriä törmäysdataa.

Haasteita...

- **Liipaisuhaaste:** Kuinka valita 400 tapahtumaa 20M tapahtumasta joka sekunti, säilyttäen kuitenkin samalla kiinnostavat ja uuden fysiikan tapahtumat?
- **Tietojenkäsittelyhaaste:** kuinka varastoida 400 tapahtumaa sekunnissa joka sekunti? Kuinka varastoida loppujen lopuksi yli sata petatavua dataa jokaista koetta kohti? Kuinka analysoida tuo datamäärä?
- **Analyysihaaste:** hyvän hiukkasrekonstruktio- ja tunnistustehokkuuden ylläpitäminen samanaikaisista tapahtumista huolimatta.

Hiukkasfysiikka

- Piikit invariantin massan histogrammissa voivat viitata tietyn energiseen emohiukkaseen.
- Histogrammien tekemiseksi tarvitaan valtavasti dataa, hiukkasfysiikassa miljardeja datapisteitä
- Oheisessa kuvaajassa on logaritminen asteikko
 - Hyvä esittämään suhteellista muutosta absoluuttisen muutoksen sijaan



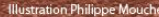
Törmäyksestä syntyneiden kahden myonin invariantin massan jakauma vuosilta 2017 ja 2018. Jakaumasta erottaa selvästi niiden hiukkasten piikit jotka voivat hajota kahdeksi myoniksi.

Tehtävät

Jos hiukkanen pyörii myötäpäivään LHC:ssä, mihin suuntaan magneettikentän tulisi osoittaa?

- A: ylöspäin**
B: alaspäin
C: myötäpäivään
D: vastapäivään

Vinkki: Oikean käden sääntö



Kysymys 2: Elektronivoltti

Vetyatomin ionisaatioenergia on $2.195 \times 10^{-18} \text{ J}$.

- a) Mikä on tämä energia elektronivolteina?
- b) Laske tämän ionisaation hypoteettinen massa. (Vinkki: $E = mc^2$)

Kiitos!
Olet nyt valmis siirtymään
osaan 2.

Vastaukset kysymys 1: Hiukkaskiihdytin

Jos hiukkanen pyörii myötäpäivään LHC:ssä, mihin suuntaan magneettikentän tulisi osoittaa?

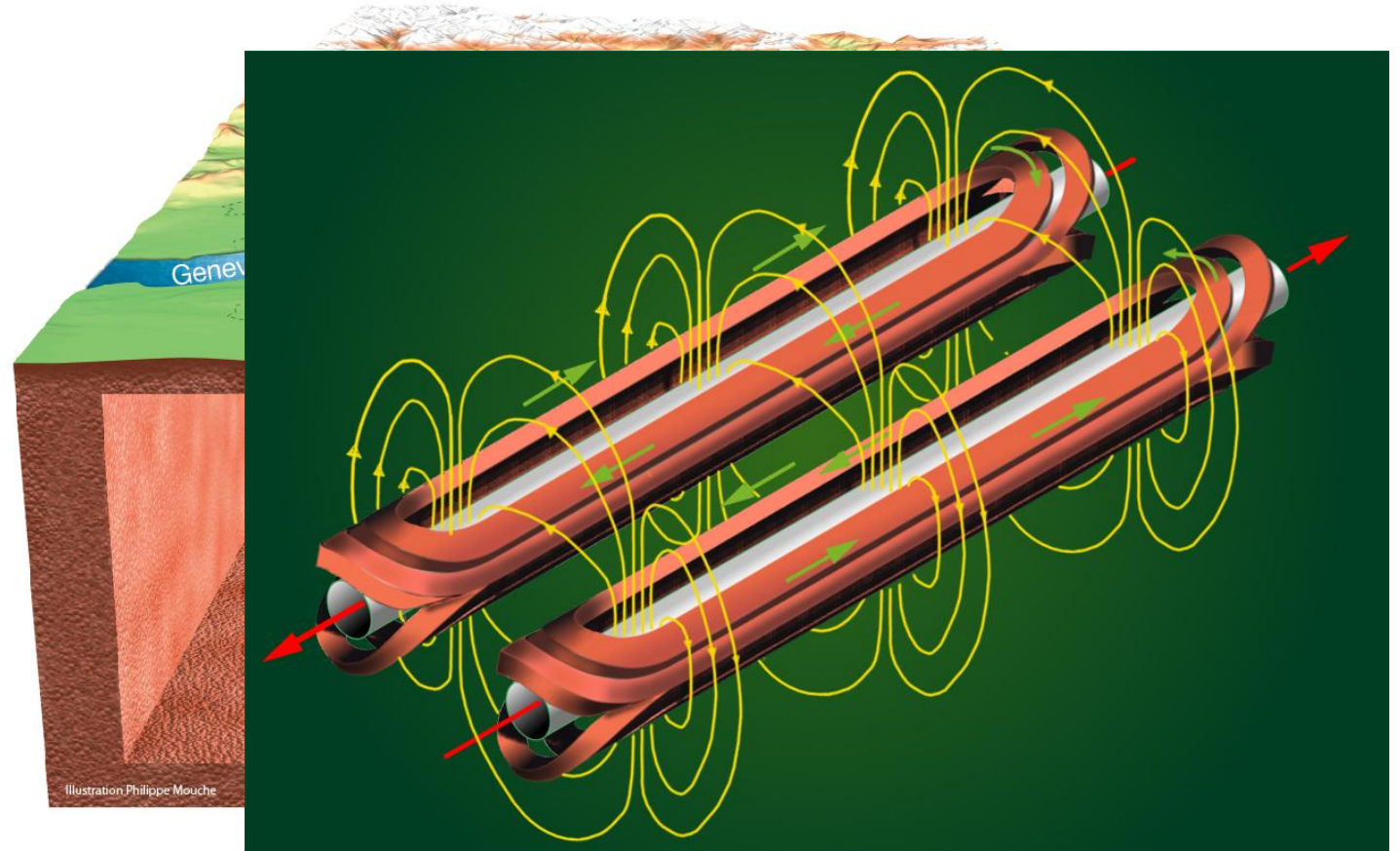
VASTAUS:

A: Magneettikentän tulee osoittaa ylöspäin, jotta sen aiheuttama voima pitää protonin ympyräradalla.

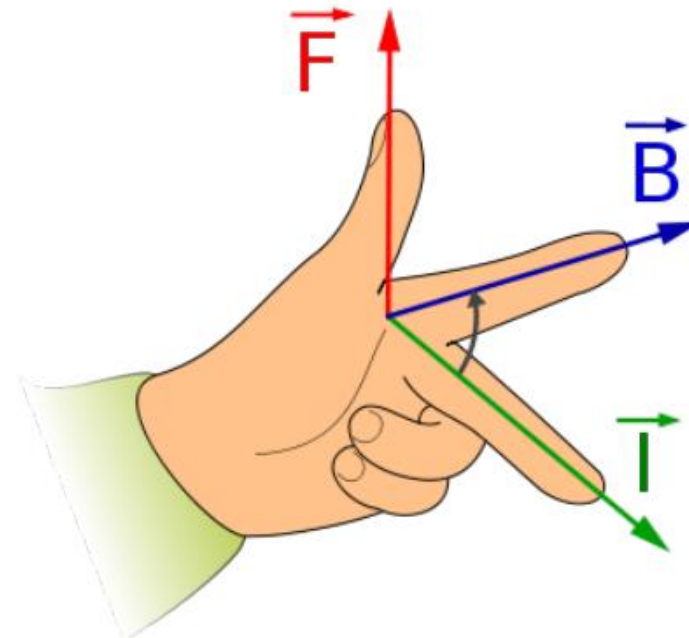
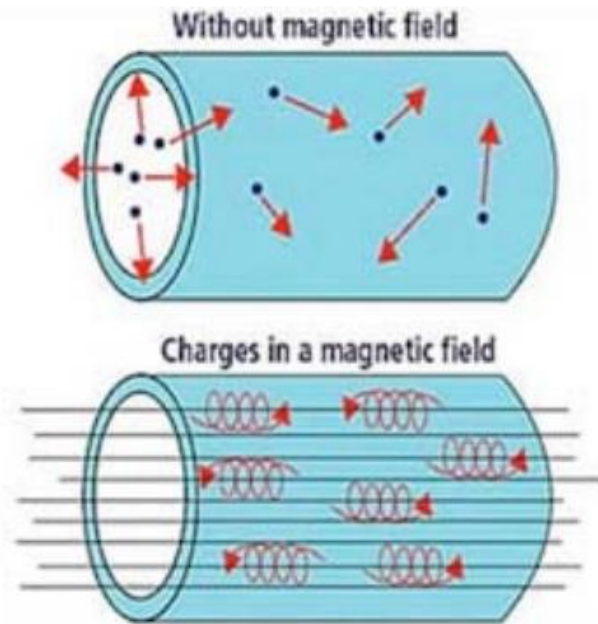
LHC kiihdyttimessä kiihdytetään kuitenkin protoneja molempiin suuntiin.

Magneettikenttä osoittaa alaspäin toisessa putkessa, jossa protonit viilettävät vastapäivään.

Vinkki: Oikean käden sääntö



- Varatun hiukkasen rata kaareutuu magneettikentässä:
 - $\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$
 - 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 $p = mv$:
 - $\mathbf{p} = q\mathbf{R}\mathbf{B}$ eli suurempi liikemäärä vastaa suurempaa kaarevuussädettä



Slide: Mikko
Voutilainen

Vastaukset kysymys 2: Elektronivoltti

Vetyatomin ionisaatioenergia on $2.195 \times 10^{-18} \text{ J}$.

- a) Mikä on tämä energia elektronivolteina?**
b) Laske tämän ionisaation hypoteettinen massa kilogrammoissa. (Vinkki: $E = mc^2$)

Ratkaisu a):

$$2.195 \times 10^{-18} \text{ J} * \frac{1 \text{ eV}}{1.602 \times 10^{-19} \text{ J}}$$

$$= 13.7 \text{ eV}$$

Vastaus:

Vetyatomin [ionisaatioenergia](#) on 13.7 eV

Ratkaisu b):

$$m = E/c^2$$

$$c = 2.99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$1 \text{ eV}/c^2 = \frac{(1.602 \ 176 \ 634 \times 10^{-19} \text{ C}) \times 1 \text{ V}}{(2.99 \ 792 \ 458 \times 10^8 \text{ m/s})^2} = 1.782 \ 661 \ 92 \times 10^{-36} \text{ kg.}$$

HUOM! Tämä tulos pitää vielä kertoa 13,7:llä,
 jäänyt kaavasta pois!
 Oikea vastaus -> $1.78 \times 10^{-36} \text{ kg} \times 13,7$

**Seuraavat diat eivät varsinaisesti kuulu
työpajan sisältöön, mutta voivat olla
mielenkiintoisia.**

Lisätietoa CMS:n eri kerroksien toiminnasta

Jälki-ilmaisimien havaitsee varattujen hiukkasten reitit, kun ne vuorovaikuttavat elektromagneettisesti ilmaisimen kanssa. Protonien törmäyskohdat ja syntyneiden raskaampien ydinten hajoamispaikat voidaan määrittää erittäin tarkan paikkadatan avulla. Hiukkasen momentti voidaan laskea hiukkasen radan kaarevuussäteen avulla.

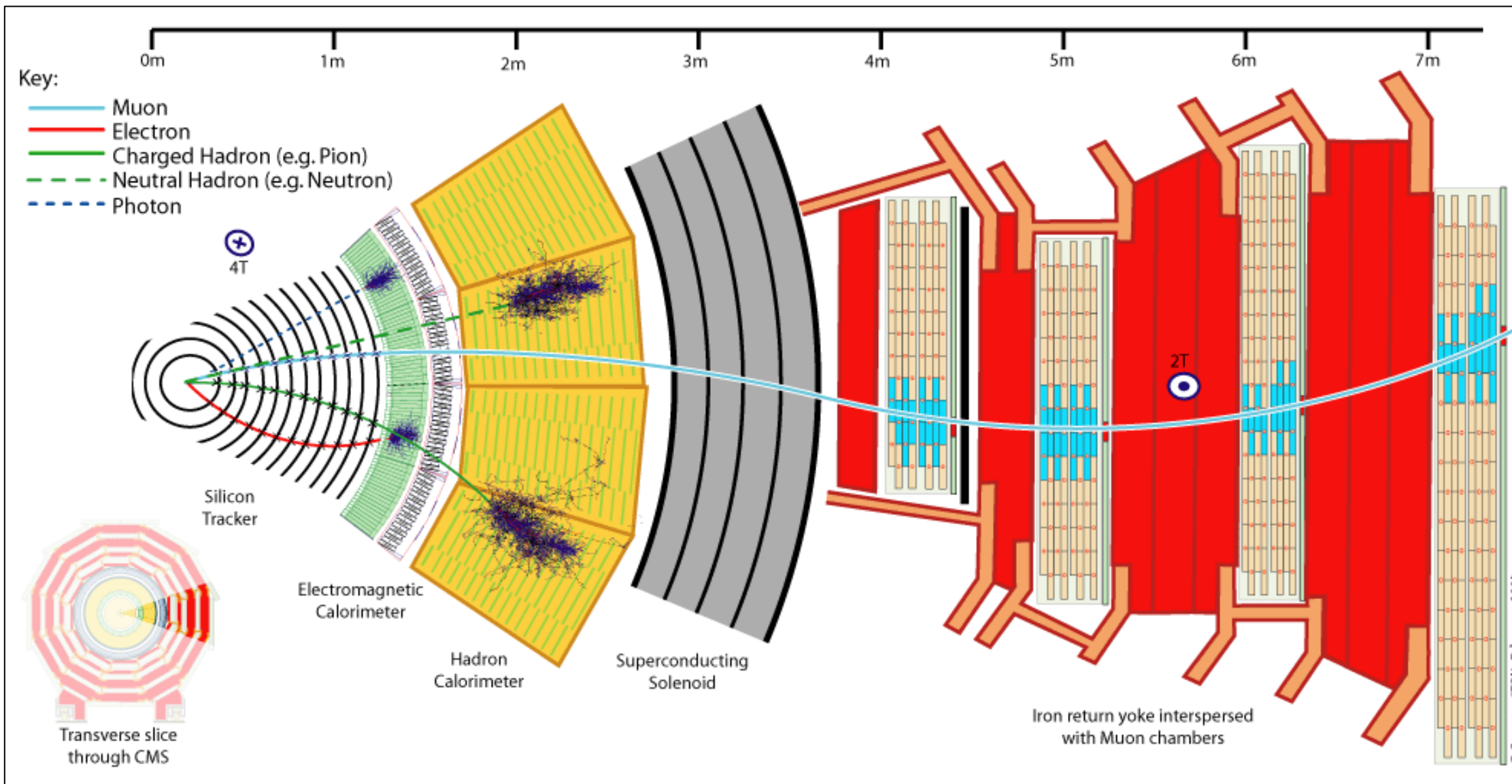
Sähkömagneettinen kalorimetri (ECAL) Elektronien ja fotonien energiat saadaan mitattua hyvin tarkasti, sillä niiden törmätessä ECAL-kerrokseen syntyy purskahdus sähkömagneettista säteilyä, joka mitataan tuikeilmaisimilla. Törmänneen elektronin tai fotonin energia on suoraan verrannollinen tuikeilmaisimien havaitsemaan valon määrään.

Hadronikalorimetri (HCAL) pysäyttää hadroneiksi kutsutut hiukkaset, kuten protonit ja neutronit. HCAL-kerrokseen saapuvat hadronit menettävät liike-energiaansa hiukkasryöppyihin, joiden synnyttämien tuikevalojen avulla voidaan laskea hadronin alkuperäinen energia.

Myonijärjestelmä Myonit ovat vaikeasti havaittavia ja ne kulkevatkin ECAL ja HCAL kerrosten läpi pysähtymättä. Ne ovat kuitenkin positiivisia hiukkasia, joten niiden kulkiessa kaasulla täytettyjen kammioiden läpi (drift tubes), kammiossa oleva kaasu ionisoituu. Ionisaatiossa vapautuneet elektronit sekä positiiviset ionit kulkeutuvat anodeille ja katodeille (cathode strip chambers). Kerätyn signaalin avulla voidaan laskea myonin paikka tietyllä ajanhetkellä.

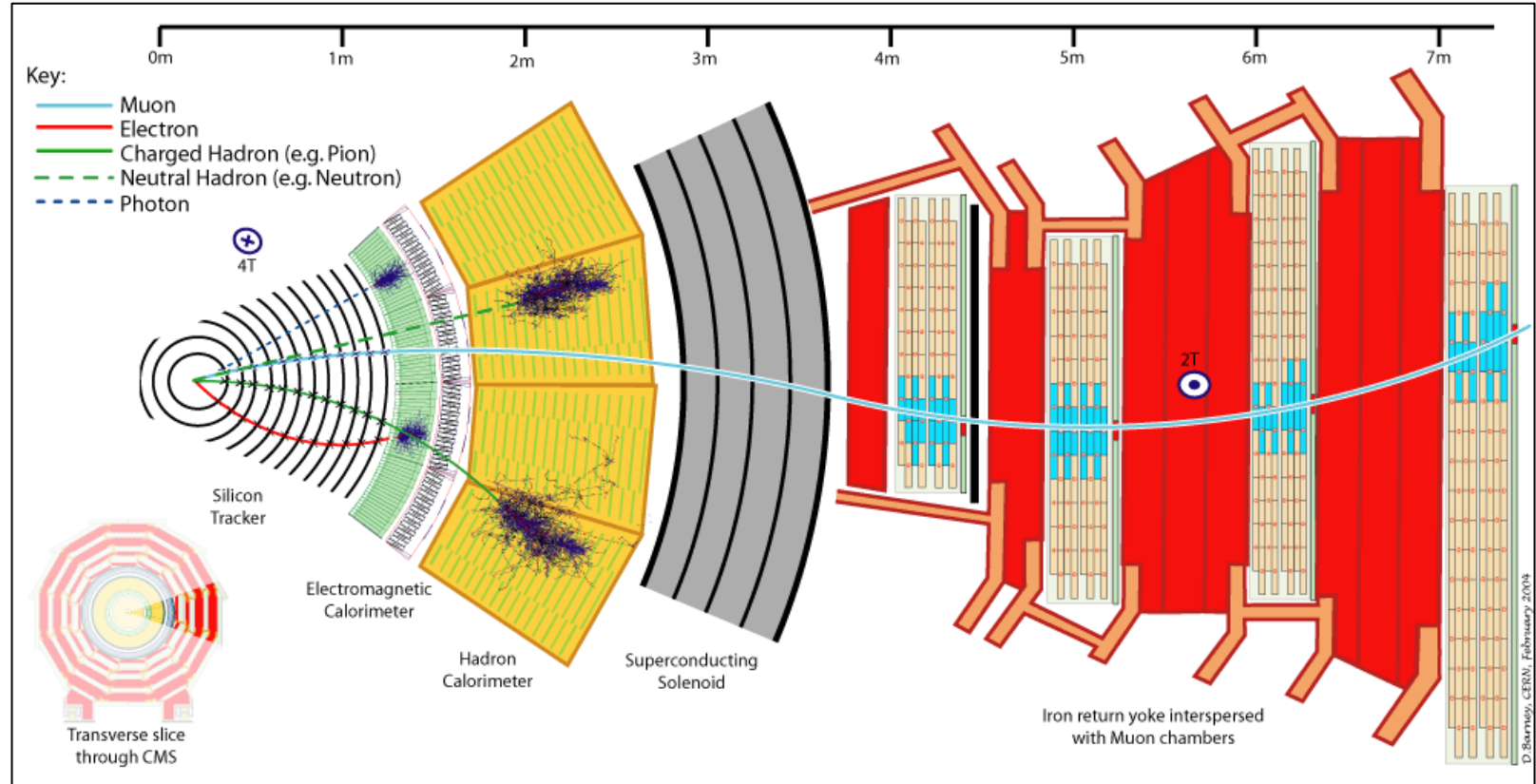
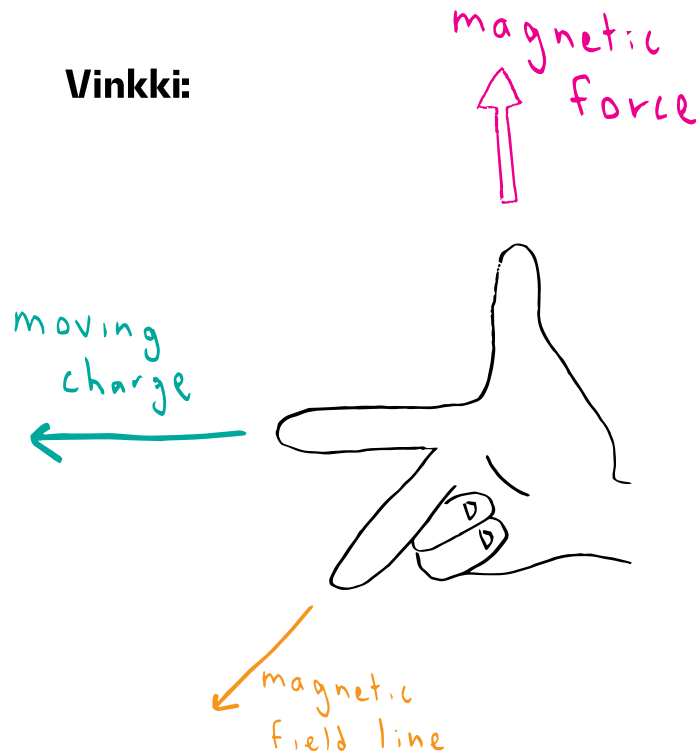
Kaikkia hiukkasia ei voida CMS:n avulla havaita. Esimerkiksi neutriinot havaitaan epäsuorasti liikemäärän säilymisen kautta.

Tarkastelkaa miten eri hiukkaset käyttäytyvät CMS ilmaisimen kerroksissa.
Selvitä millainen varaus kuvan hiukkasilla on.



Tarkastelkaa miten eri hiukkaset käyttäytyvät CMS ilmaisimen kerroksissa.
Selvitä millainen varaus kuvan hiukkasilla on.

Vinkki:



Tarkastelkaa miten eri hiukkaset käyttäytyvät CMS ilmaisimen kerroksissa. Selvitä millainen varaus kuvan hiukkasilla on.

VASTAUS:

Myoneita on vaikea havaita mutta CMS on nimensä (Compact Muon Solenoid) mukaisesti erittäin hyvä myös siinä. Myonit kulkevat kaikkien kerrosten läpi pysähtymättä jättäen kuitenkin signaaleja pii-ilmaisimiin ja myoni kammioihin. Kuvassa myonin rata kääntyy ensin alaspäin ja sitten vahvan solenoid magneetin ohitettuaan alkaa kaartua ylöspäin. Oikean käden säännön mukaan myoni on siis negatiivinen hiukkanen. Huomion arvoista on että solenoidi magneetin sisällä magneettikenttä on vastakkais suuntainen magneetin ulkopuoliseen magneettikenttään verrattuna.

'Elektronin' rata kääntyy kuvassa ylöspäin. Tarkastellessamme tilannetta oikean käden säännön avulla päädyimme ristiriitaan. Hiukkanen käyttäytyy, kuin positiivinen hiukkanen, mutta jo yläasteelta on tuttua, että elektronit ovat negatiivisesti varautuneita. Kyseessä onkin positroni eli elektronin antihiiukkanen joka muistuttaa paljon elektronia, mutta onkin positiivisesti varautunut. Fyysikot saattavat käyttää välillä termejä hajamielisesti sekaisin, kunhan asiayhteydestä on selvää mistä puhutaan ;)

Hadronit: Kuvassa on kaksi hadronia toinen merkittynä vihreällä viivalla ja toinen vihreällä katkoviivalla. Hadronit ovat vähintään kahden kvarkin muodostamia hiukkasia.

- Katkoviivalla merkityn hiukkasen rata ei taivu ollenkaan 4 Teslan, eli vahvuudeltaan noin 100,000 kertaa maan magneettikentän vahvuudessa 5 magneettikentässä. Tämä tarkoittanee sitä, että hadroni on varaukseton. Kyseessä voi olla esimerkiksi neutroni. Neutronin vauhti hidastuu hadronikalorimetrissä, kun se on vuorovaikutuksessa aineen kanssa ja aiheuttaa signaalin.
- Jatkuvalla viivalla kuvatun hadronin rata kaartuu kuvassa alaspäin. Voimme siis päätellä hiukkasen olevan varaukseltaan negatiivinen. Tällainen hadroni on esimerkiksi Pion (π^- : $d\mu$ —), hadronin liike-energia voidaan mitata sen aiheuttamasta hiukkasryöpystä hadronikalorimetrissä.

Fotonin kulku CMS:n sisällä on piirretty tummansinisellä katkoviivalla. Viiva on suora ja päättyy elektrokalo- rimetrissä syntyvään hiukkasryöpöpyyn. Fotoni on siis varaukseton.

Työpaja materiaalit

Työpajan kehittäjä: Linda Hemmann

Lähteet:

<https://github.com/AaltoJunior/Hiukkaset-Hukassa>

A BRIEF INTRODUCTION TO PARTICLE PHYSICS
by Nari Mistry, Laboratory for Elementary
Particle Physics, Cornell University

https://www.classe.cornell.edu/rsrc/Home/Outreach/TeachingResources/Brief_Intro_to_HEP1.pdf

Muokkaajat

- Petra Ekroos, 2022
- Heidi Sillanpää ja Jussi Roos 2025

MULTIMEDIAALINEN