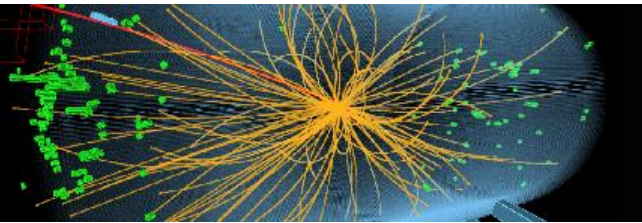


Hiukkasfysiikka & avointa dataa



Ilmiöpohjainen oppimiskokonaisuus - Ohje opettajalle

Tervetuloa tutustumaan hiukkasfysiikkaa ja avointa dataa käsittelevään ilmiöpohjaiseen oppimiskokonaisuuteen. Oppimiskokonaisuuden aikana oppilaasi tulevat muun muassa:

- Tutustumaan maailmankaikkeuden pienimpiin rakennneosasiin.
- Tutkimaan aitoa hiukkasfysiikan dataa, joka on kerätty CMS-kokeessa CERNissä.
- Oppimaan data-analyysissa tarvittavia taitoja, kuten tulkitsemaan histogrammeja.
- Analysoimaan omavalintaista avointa dataa.
- Luomaan tekstiä, ohjelmointikoodia ja kuvia yhdisteleviä asiakirjoja Jupyter Notebook -ohjelman avulla.

Oppimiskokonaisuus on suunnattu yläkoulun yhdeksäsluokkalaisille. Taustatietoina oppilailta vaaditaan matematiikasta muuttujan käsite. Tilastot ja todennäköisyys -aihepiiri sopii hyvin oppimiskokonaisuuden oheen. Ohjelmointitaustaa ei tarvita.

Tästä dokumentista löytyy tarvittavat tiedot oppimiskokonaisuuden vetämiseksi. Oppimiskokonaisuus on jaettu kuuteen osioon. Ensin tutustutaan Jupyter Notebook -ohjelman käyttöön ja hiukkasfysiikkaan. Näiden pohjalta perehdytään histogrammeihin ja CERNin CMS-kokeen avoimen datan analysointiin. Lopuksi oppilaat pääsevät soveltamaan oppimiaan taitoja tutkiessaan vapaavalintaista avointa dataa. Esimerkkituntisuunnitelmat on tehty kuudelle 45 minuutin oppitunnille, mutta aihepiiri on helposti laajennettavissa vaikkapa kymmenen oppitunnin pituiseksi.

Linkitys opetussuunnitelmaan

Oppimiskokonaisuus on vastaus vuoden 2014 Perusopetuksen opetussuunnitelman perusteissa (POPS 2014) esitettyyn vaatimukseen järjestää vähintään yksi monialainen oppimiskokonaisuus lukuvuodessa. Kokonaisuudessa yhdistyy fysiikan, matematiikan ja tietotekniikan oppiaineet. Lisäksi oppilaalla on tilaisuus perehtyä omavalintaiseen avoimeen dataan, jolloin edellisiin yhdistetään myös oppilaan mielenkiinnon mukainen aihe. Kokonaisuus perustuu todellisen maailman ilmiöihin, joita lähestytään luonnontieteellistä tutkimusta vastaavin toiminnallisin tavoin. Oppimiskokonaisuus sopii erinomaisesti POPS:n luvun *Laaja-alainen osaaminen vuosiluokilla 7-9* osioon *Ajattelu ja oppimaan oppiminen (L1)*. Linkkejä löytyy myös muihin luvun osioihin (L2-L7) sekä POPS:n oppiainekohtaisiin tavoitteisiin ja sisältöihin.

Opintokokonaisuus soveltuu halutessa laajemmaksi teemaksi ilmiöviikolle, sillä siihen on helppo yhdistää vielä useampia oppiaineita. Äidinkielen tunnilla voitaisiin esimerkiksi tutustua Dan Brownin kirjaan *Enkelit ja Demonit* ja pohtia todellisuuden vastaavuutta fiktion.

Valmistelut

Oppimiskokonaisuuden pitämiseksi tarvitset yhden tietokoneen kutakin työparia kohti. Lataa tietokoneille tai jaettuun kansioon seuraava GitHub-hakemisto:

<https://github.com/cms-opendata-education/cms-jupyter-materials-finnish>

Tämä ohje ja esimerkkitehtävät löytyvät hakemiston kansioista *Ilmiopohjainen-oppimiskokonaisuus..* Esimerkeissä käytettävä data löytyy kansioista *Data* ja kuvat kansioista *kuvat*. Mikäli muutat tiedostorakennetta, voit joutua muokkaamaan esimerkeissä käytettyjä polkuja aineiston tuomiseen. Tämä opettajan ohje kannattaa poistaa oppilaiden käyttämillä koneilla.

Ennen oppimiskokonaisuuden alkua jokaisessa tietokoneessa tulisi olla asennettuna Jupyter Notebook. Asennus onnistuu helpoiten asentamalla tietokoneille Anaconda (ks. ohjeet hakemiston kansioista *Johdatus-jupyteriin* → *Jupyter-aloitus.ipynb*).

Tuntijako

Nro	Sisältö
1	<i>Johdatus Jupyteriin</i> - lyhyt esittely - oman Jupyter notebookin teko pareittain harrastuksesta tai muusta mielenkiinnon kohteesta
2	<i>Kohti hiukkasfysiikkaa</i> - edellisellä tunnilla aloitetut Jupyter notebookit valmiiksi - tietopläjäys hiukkasfysiikasta
3	<i>Histogrammit</i> - histogrammiin tutustuminen: syntymäpäivähistogrammi - CMS:n avointa dataa hyödyntävien Jupyter notebook -esimerkkien tutkiminen
4	<i>Hiukkasten metsästyks avoimesta datasta</i> - oppilaille annetaan datasetti ja heidän tulee selvittää ryhmissä, mikä hiukkanen kussakin datassa esiintyy
5	<i>Avoin data</i> - Oppilaat hakevat omaavalintaista avointa dataa ja tutkivat sitä Jupyterilla
6	<i>Avoin data</i> - Oppilaat jatkavat loppuun edellisellä tunnilla aloitetun avoimen datan tutkimisen

Esimerkkituntisuunnitelmat (6 x 45 min)

Voit käyttää hyödyksi seuraavaksi esiteltäviä tuntisuunnitelmarunkoja. Tuntisuunnitelmat on muodostettu siten, että tunnit voidaan halutessa pitää kolmena kaksoistuntina.

Tunti 1: Johdatus Jupyteriin

- 15 min Opettaja esittelee oppimiskokonaisuuden valmiiksi tehdyn Jupyter Notebookin (*Esittely-luokalle.ipynb*) avulla. Tiedosto löytyy samasta [kansioista](#) kuin tämä ohje ja sitä voidaan muokata luokan tarpeita vastaavaksi. Oppilaille näytetään ensimmäisen harjoituksen tehtävänanto, joka on annettu tiedoston lopussa.
- 30 min Oppilaat lähtevät tekemään harjoitusta. Harjoituksessa oppilaat luovat oman notebookin yksin tai pareittain esitelläkseen jonkin itselleen valmiiksi tutun aiheen. Harjoituksen tarkoituksena on antaa oppilaiden tutustua Jupyterin ominaisuuksiin omatahtisesti kokeillen. Harjoituksen työstämistä jatketaan seuraavan tunnin alussa.

Tunti 2: Kohti hiukkasfysiikkaa

- 20 min Oppilaat viimeistelevät edellisen tunnin harjoituksen notebookit. Lopulliset versiot voidaan tallentaa yhteiseen kansioon, jotta oppilailla on mahdollisuus tutustua toistensa töihin.
- 10 min Siirtymä hiukkasfysiikkaan. Katsotaan video (7:25), joka esittelee hiukkasfysiikan tutkimusta ja erityisesti Compact Muon Solenoid (CMS) -koetta CERNissä. Myöhemmillä tunneilla tutustutaan nimenomaan CMS:llä mitattuun avoimeen dataan. Video löytyy osoitteesta: <https://www.youtube.com/watch?v=S99d9BQmGB0>. Suomenkieliset tekstitykset saa näkymään videon Asetukset-valikosta.
- 15 min Standardimalliin ja alkeishiukkasiin tutustuminen. Lähdetään liikkeelle mallin käsitteestä:
- Mikä on malli? Käsitettä voidaan lähestyä viittaamalla vanhaan intialaiseen tarinaan sokeista miehistä ja elefantista. Miehet päättivät selvittää, millainen otus elefantti on. Kukin mies tunnusteli jotakin elefantin ruumiinosaa ja teki johtopäätöksensä sen pohjalta: Jalkoja kokeillut totesi, että elefantti on kuin puu. Syöksyhampaita tunnustellut päätteli elefantin olevan kuin keihäs jne. (korva → viuhka, häntä → köysi, kärsä → käärme). Mallit ovat tapoja kuvata todellisuutta. Erilaiset mallit eivät välttämättä kumoa toisiaan, vaan voivat täydentää toisiaan. Fysiikassa käytetään erilaisia malleja eri tilanteissa ja mallien käyttökelpoisuutta ja paikkansapitävyyttä testataan kokeellisesti.
- Standardimalli ja alkeishiukkaset. Käsitellään standardimallin ja alkeishiukkasten perusteita Tieteen Kuvalehden artikkelista ”Kvanttimekaniikkaa viidessä minuutissa” (7.7.2015) poimittujen otteiden avulla (ks. liite 1). Hiukkasten nimien opetteluun sijaan olennaista on ymmärrys siitä, että aine muodostuu atomia ja protonia pienemmistä hiukkasista, jotka vuorovaikuttavat keskenään. Lisäksi on hyvä tuoda esiin, ettei malli ole absoluuttinen. Kaavio standardimallista löytyy liitteestä 2.

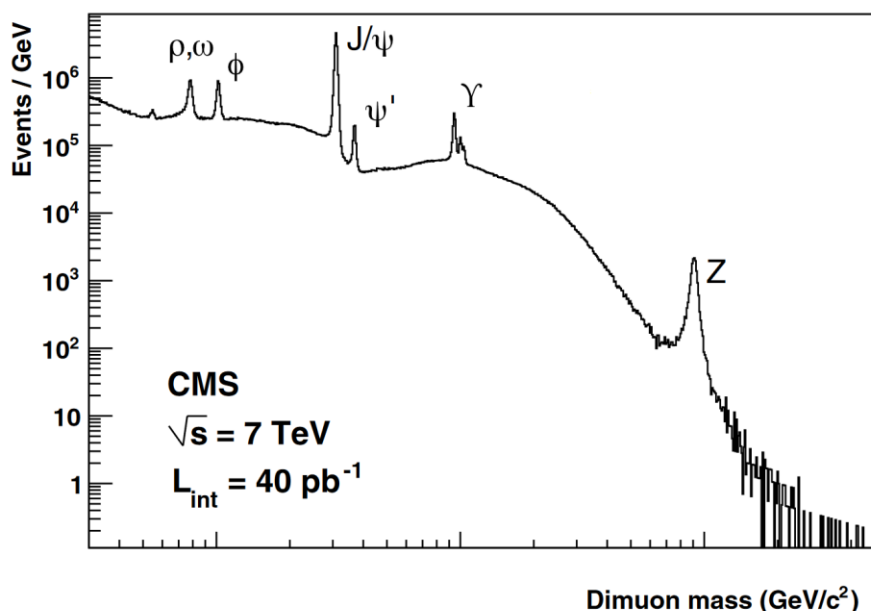
Tunti 3: Histogrammit

- 15 min Johdatus histogrammeihin. Opettaja piirtää taululle histogrammin akselit: x-akselille kuukaudet tammikuusta joulukuuhun ja y-akselille tapahtumien lukumäärä. Oppilaille jaetaan taralapat ja jokainen oppilas käy vuorollaan laittamassa lappunsa syntymäkuukautensa kohdalle. Keskustellaan luokkana, mitä muodostuvat pylväät tarkoittavat ja miten histogrammia luetaan. Miten histogrammi muuttuisi, jos x-akselin pylväät olisivatkin päivän tarkkuudella? Histogrammin esittelyssä voidaan hyödyntää myös Phet-simulaatiota *Plinko Probability* https://phet.colorado.edu/sims/html/plinko-probability/latest/plinko-probability_en.html.
- 30 min Oppilaat tutustuvat itsenäisesti Jupyterilla CMS:n avointa dataa käsitteleviin esimerkkeihin *Esim1-histogrammin-piirto* ja *Esim2-histogrammi-valitusta-datamäärästä*. Esimerkit löytyvät samasta [kansista](#) kuin tämä ohje. Esimerkkeihin on sisällytetty harjoituksia siten, että oppilaat tulevat tutuksi tavallisimpien kommentojen ja data-analyysivaiheiden kanssa. Liitteestä 3 löytyy taustatietoa opettajalle sekä vastaukset esimerkeissä esitettyihin kysymyksiin.

Tunti 4: Hiukkasten metsästys avoimesta datasta

35 min

Luokka jaetaan pareihin ja kullekin parille annetaan oma hiukkasdatasetti analysoitavaksi. Datasetit (*piikkidataX.csv*, 6 kpl) löytyvät hakemiston *cms-jupyter-materials-finnish* kansioista [Data](#). Sama datasetti voidaan tarvittaessa antaa useammalle parille erilailla nimettyinä. Oppilaiden tehtävänä on selvittää, esiintyykö heidän datasetissään hiukkanen ja mikä hiukkanen se on. Onnistuakseen tehtävässä oppilaiden on piirrettävä datasetistä invariantin massan histogrammi Jupyterilla ja määritettävä histogrammiin muodostuvan piikin perusteella datassa esiintyneen hiukkasen massa. Tämän jälkeen oppilaat vertaavat määrittämänsä invariantin massan arvoa muiden parien löytämien hiukkasten invariantin massan arvoihin. Vertailun pohjalta oppilaat asettavat hiukkaset suuruusjärjestykseen ja päättävät alla olevan kuvaajan avulla, mikä hiukkanen kunkin parin datasetissä esiintyi. Kuvaaja voidaan heijastaa luokan taululle tai jakaa paperisena.



Kuvaajassa on esitetty invariantin massan spektri tilanteessa, jossa CMS-ilmaisimella on havaittu kaksi myonia. Kuvaaja on piirretty logaritmisella asteikolla, joten piikit eivät luultavasti näytä identtisiltä oppilaiden piirtämien kuvaajien kanssa. Tutkimustyössä asiantuntijoiden välinen yhteistyö on välttämätöntä luotettavien tulosten saamiseksi. Harjoituksessa olennaista onkin hiukkasten asettaminen yhteistyön tuloksena oikeaan suuruusjärjestykseen, ei yksittäisten piikkien lukuarvotarkastelu. Tästä syystä x-akselin lukuarvot on pyyhitty kokonaan pois kuvaajasta. Alkuperäinen kuvaaja löytyy liitteestä 4.

10 min

Tulosten läpikäyminen. Oppilaille jaettavat datasetit vastaavat hiukkasia alla olevan taulukon mukaisesti. Järjestys on tarkoituksella eri kuin piikkien järjestys kuvaajassa.

Datasetti	Hiukkanen	Datasetti	Hiukkanen
piikkidata1	J/ψ (J/psii)	piikkidata4	φ (fii)
piikkidata2	Z-bosoni	piikkidata5	ρ, ω (rhoo, oomega)
piikkidata3	Υ (ypsilon)	piikkidata6	ψ' (psii)

Tunti 5: Avoin data

45 min Oppilaat hakevat avointa dataa Avoindata.fi -palvelusta oman mielenkiintonsa mukaan. HUOM. Aineiston on oltava csv-muodossa. Riippuen luokasta oppilaat voivat toimia pareittain tai ryhmissä. Oppilaat miettivät löytämänsä materiaalin pohjalta tutkimuskysymyksen, johon haluavat selvittää vastauksen. He kirjoittavat kysymyksen ylös samoin kuin oman ennustuksensa (hypoteesi) tutkimustuloksesta. Oppilaat analysoivat avointa dataa tuomalla sen csv-muodossa Jupyteriin. Tavoitteena on luoda Jupyter Notebook, jossa on esitetty tutkimuskysymys, hypoteesi, selvitetty vastaus sekä vähintään yksi kuvaaja, jolla vastausta voidaan perustella.

Avointa dataa käytettäessä on hyvä varautua siihen, että aineistot eivät ole välttämättä yhtä nättiä strukturoituja kuin käyttämämme esimerkkitiedot. Datan tuomiseksi Jupyteriin voi ensin olla tarpeen muokata csv.-tiedostoa, mikäli esimerkiksi taulukon sarakkeiden otsikot eivät ole tiedoston ensimmäisellä rivillä.

Tunti 6: Avoin data

45 min Oppilaat jatkavat loppuun edellisellä tunnilla aloitetun avoimen datan tutkimisen. Mikäli aikaa vain löytyy, aikaansaannokset olisi hyvä esittää muulle luokalle (esitys / posterit / tiedosto yhteiselle verkkolevyllä).

Liite 1

Kvanttimekaniikkaa viidessä minuutissa

Otteita Tieteen Kuvalehden artikkelista 7.7.2015.

--

Kvanttimekaniikka on fysiikan osa-alue, joka käsittelee atomeja pienempiä hiukkasia. Kun liikutaan näin pienten osasten maailmassa, fysiikan lait muuttuvat ja siksi tarvitaan erityinen tieteenala selittämään, miten kaikki liittyy yhteen.

--

Standardimalli esittää, mistä atomit muodostuvat, ja siten se kokoaa kuvan atomin yksittäisistä osista, joita kvanttimekaniikka puolestaan käsittelee.

Tutkijat ovat osoittaneet oikeaksi suurimman osan standardimallista, mutta vielä he eivät ole päässeet aivan päämääräänsä saakka. Standardimalli selittää kaiken universumin tunnetun aineen, olipa kyse sitten kaukaisista galakseista tai ihmiskehon aminohapoista. Siihen ei kuitenkaan ole vielä onnistuttu yhdistämään painovoimaa, joten sitä ei voida vielä kutsua "kaiken teoriaksi", joka on fyysikoiden toivelistalla.

Kaikki universumin aine koostuu 12 alkeishiukkasesta, neljästä voimaa välittävästä hiukkasesta sekä Higgsin hiukkasesta.

Kvarkit, myonit ja Higgsin hiukkaset

Alkeishiukkaset ovat ne fysikaaliset rakennuskivet, joista kaikki universumin atomit koostuvat. Niitä on kahtatoista eri tyyppiä, mutta luonnollisissa oloissa niistä esiintyy nykyään vain neljää – elektroneja, elektronin neutriinoja, ylöskvarkkeja ja alaskvarkkeja. Muita oli luonnossa vain heti alkuräjähdyksen jälkeen, mutta sittemmin niitä on luotu uudelleen hiukkaskiihdyttimissä.

- **Elektroni** Elektroneilla on negatiivinen sähkövaraus. Niitä esiintyy vapaana tai atomeihin sitoutuneena.
- **Elektronin neutriino** Elektronin neutriinoilla ei ole sähkövarausta ja niillä on hyvin pieni massa. Niitä esiintyy radioaktiivisuuden yhteydessä.
- **Ylöskvarkki** Tavallinen aine koostuu ylös- ja alaskvarkkeista sekä elektroneista. Kvarkki ei koskaan esiinny yksinään.
- **Alaskvarkki** Protonit koostuvat yhdestä alas- ja kahdesta ylöskvarkista. Neutroneissa taas on kaksi alaskvarkkia ja yksi ylöskvarkki.
- **Myoni** Myoni muistuttaa elektronia, mutta se on 300 kertaa niin raskas kuin elektroni ja radioaktiivisesti epävaka.

- **Myonin neutriino** Myonin neutriino muistuttaa elektronin neutriinoa, mutta on sitä hieman raskaampi, vaikkakin silti vielä erittäin kevyt.
- **Lumokvarkki** Lumokvarkki painaa kolme kertaa niin paljon kuin protoni, ja sillä on positiivinen varaus.
- **Outokvarkki** Outokvarkki on negatiivisesti varautunut.
- **Tau** Tau on 3500 kertaa niin raskas kuin elektroni ja sen elinaika on äärimmäisen lyhyt.
- **Taun neutriino** Taun neutriino on varaukseton. Se on hyvin kevyt, vaikkakin hieman muita neutriinoja raskaampi.
- **Pohjakvarkki** Pohjakvarkki on neljä kertaa niin raskas kuin protoni. Pohjakvarkkeja syntyy muun muassa huippukvarkkien hajotessa.
- **Huippukvarkki** Huippukvarkki on raskain alkeishiukkanen. Se painaa lähes yhtä paljon kuin kulta-atomi.

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

- **Fotonit** Fotonit ovat massattomia valohiukkasia, jotka välittävät sähkömagneettista voimaa.
- **Gluonit** Gluonit liimaavat kvarkit yhteen alkeishiukkasissa ja välittävät vahvaa ydinvoimaa.
- **W- ja Z-hiukkaset** W- ja Z-hiukkaset eli -bosonit välittävät heikkoa ydinvoimaa. Ne liittyvät tietynlaisiin radioaktiivisuuden muotoihin.
- **Gravitoni** Gravitonien arvellaan välittävän painovoimaa. Hiukkasten olemassaoloa ei ole vielä onnistuttu todistamaan, mutta niitä etsitään kiivaasti CERNissä Sveitsissä.

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

Liite 2

massa→	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
varaus→	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u ylös	c lumo	t huippu	g gluoni	H Higgsin bosoni
KVARKIT	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ -1/3 1/2	0 0 1	
	d alas	s outo	b pohja	γ fotoni	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 1/2	0 1	
	e elektroni	μ myoni	τ tau	Z Z-bosoni	
LEPTONIT	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 1/2	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ ±1 1	
	ν_e elektronin neutriino	ν_μ myonin neutriino	ν_τ taun neutriino	W W-bosoni	MITTABOSONIT

Kuvalähde: https://fi.wikipedia.org/wiki/Hiukkasfysiikan_standardimalli#/media/File:Standardimalli.svg.
Viitattu (18.8.2017)

Liite 3

Taustatietoa opettajalle: Hiukkasfysiikkojen tavallisimpia työkaluja datan analysoimisessa (hiukkasten löytämisessä ja niiden tutkimisessa) ovat histogrammit. Suhteellisuusteorian mukaisesti hiukkasten kokoluokassa energian ja massan välillä on yhteys $E=mc^2$. Koska energia on massaa ja massa energiaa, hiukastörmäyksissä ei voida hyödyntää makrotason energiansäilymlakeja sellaisenaan. Tutkijat käyttävätkin hiukkasten määrittämisessä matemaattista suuretta nimeltään invariantti massa, joka nimensä mukaisesti säilyy vakiona hajoamistapahtumassa. Kahden hiukkasen törmäyksessä invariantti massa määritellään energian ja liikemäärän avulla

$$M = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - \| \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 \|^2},$$

missä E_1 on ensimmäisen hiukkasen energia, E_2 on toisen hiukkasen energia, \mathbf{p}_1 on ensimmäisen hiukkasen liikemäärä ja \mathbf{p}_2 on toisen hiukkasen liikemäärä. Koska yläkoululaiset eivät ole vielä tutustuneet liikemäärään tai vektoreihin, invariantti massa riittää esitellä ilman tarkempaa määrittelyä suureena, joka säilyy hiukkasten törmäyksessä.

Invarianttia massaa hyödynnetään sellaisten hiukkasten tunnistamiseen, joita ei voida mitata suoraan CMS-ilmaisimella. Protoni-protoni törmäyksessä voi esimerkiksi muodostua Z-bosoni ($M \approx 91,2 \text{ GeV}/c^2$), joka hajoaa edelleen myoniksi ja antimyoniksi. Myonit jättävät suoraan havaittavan signaalin CMS-ilmaisimeen, kun taas Z-bosonia ei voida suoraan havaita. Myoniparin invariantin massan arvosta voidaan kuitenkin päätellä, mistä hiukkasesta ne ovat todennäköisesti hajonneet. Esimerkitapauksessa myonille ja antimyonille lasketun yhteisen invariantin massan arvon tulisi siis vastata Z-bosonin fysikaalista massaa. Luotettavan tuloksen saamiseksi yksittäinen tapahtuma ei riitä, vaan tuhansien hajoamistapahtumien invariantin massan arvoista muodostetaan histogrammi ja histogrammiin muodostuvista piikeistä voidaan päätellä, mitä hiukkasia tapahtumissa on luultavasti esiintynyt.

Vastaukset esimerkkien kysymyksiin:

Esim1. 4) Analyysi

Mitä histogrammi kertoo? Histogrammi kertoo, kuinka monta törmäystapahtumaa on havaittu eri invariantin massan arvoilla. (Esimerkin tapauksessa data koostui törmäyksistä, joissa oli havaittu myoni ja antimyoni. Kuvaajan muodostamisessa on siis käytetty kunkin tapahtuman myoniparin invarianttia massaa.)

Mitä tapahtuu noin $9,45 \text{ GeV}/c^2$:n kohdalla? Histogrammissa on selkeä piikki. Tämä viittaisi siihen, että on ollut olemassa massaltaan noin $9,45 \text{ GeV}/c^2$:n suuruinen hiukkanen, joka on hajonnut myoniksi ja antimyoniksi. Kyseessä on mitä luultavimmin Ypsilon mesoni (Υ), sillä sen massa on noin $9,46 \text{ GeV}/c^2$ ja se voi hajota myonipariksi.

Esim 2. Tehtävä

Mitä luulet tapahtuvan, jos ...

...annat tapahtumien määräksi muun kuin kokonaisluvun? Ajo keskeytyy ja tulostuu error-viesti, sillä koodissa vaaditaan, että käyttäjäsyöte on kokonaisluku (integer, int).

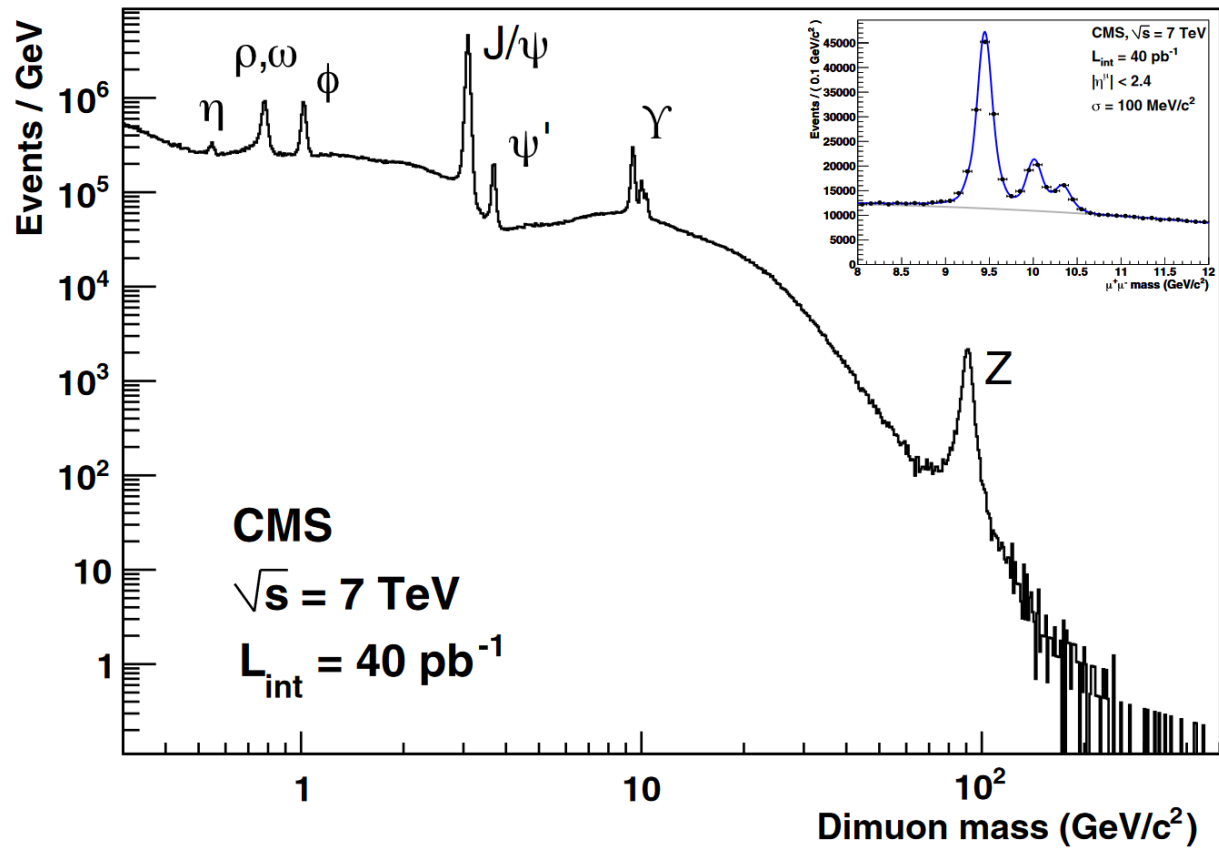
...annat datan määräksi suuremman arvon kuin mitä dataa on saatavilla? Koodi tulostaa kommentin sekä tyhjän kuvaajan, sillä if-rakenteen ehto täyttyy ja else-osa ohitetaan, jolloin mitään ei tallenneta muuttujaan *valitut*.

...tulosteiden alusta poistaa \n? Tulosteen alusta poistuu tyhjä rivi.

Mitä arvoa invariantin massan eri tulokset näyttäisivät lähestyvän? Noin $91 \text{ GeV}/c^2$

Mitä voit päätellä tästä arvosta? Törmäyksessä esiintynyt hiukkanen, jonka massa on noin $91 \text{ GeV}/c^2$. Tämä invariantin massan arvo viittaisi Z-bosoniin. Z-bosoni voi hajota kahdeksi myoniksi (myoni ja antimyoni), joten päätelmä on järkevä siltäkin osin.

Miten binien määrä vaikuttaa histogrammin tulkintaan? Mitä enemmän binejä on, sitä tarkempi histogrammi piirtyy.



Invariantin massan histogrammi tapahtumista, joissa CMS:llä on havaittu kaksi myonia. Oikeassa yläkulmassa on lähikuva Y-hiukkasen piikin alueelta.