

Pohja-kvarkillisen mesonin hajoaminen ja standardimalli

Nimi: Milla Leppänen
Opiskelijanumero: Y57893541
Huhtikuu, 2022
LuK-tutkielma
Ohjaaja: Minna Patanen

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Tutkimuksen tausta	2
2.1	Kvarkit	3
2.2	Leptonit	3
2.3	Mittabosonit	4
2.4	Yhdistelmähiukkaset	4
3	CERN ja LHCb-koe	6
3.1	CERN	6
3.1.1	Törmäyksessä vapautuva energia	7
3.2	LHCb-koe	9
4	Vertailukokeet elektroni-positroni-törmäyttimillä	13
4.1	BaBar-koe	13
4.1.1	BaBar-kokeen ja -havaitsimen rakenne	14
4.2	Belle-koe	15
4.2.1	KEK B-törmäyttimen ja Belle-havaitsimen rakenne	16
5	Tutkimustulokset	18
6	Johtopäätelmät ja yhteenveto	20
	Lähdeluettelo	22

1 Johdanto

The LHCb collaboration on julkaissut 23.3.2021 tutkimuksen B^+ -mesonin hajoamisesta.[1] B^+ -mesonin eli pohja-kvarkillisen mesonin odotetaan hajoavan samalla todennäköisyydellä leptonipariksi, myoni-antimyoni- tai elektroni-positronipariksi. Tämä todennäköisyys johtuu B^+ -mesonin rakenneosasen pohja-kvarkin massasta, mikä on suurempi kuin myoneilla tai elektroneilla. [1]

Hiukkasfysiikan standardimalli käsittelee elektronia (e^-), myonia (μ^-) ja tau (τ^-) leptonia samoin, mutta ei niiden massojen suhteen. Tätä kutsutaan leptonien yleislajisuudeksi. Myoni on alkeishiukkanen elektronin tavoin, mutta myoni on 200 kertaa painavampi kuin elektroni. LHCb-havaintojen keräämän datan pohjalta ollaan tehty havainto siitä, että B^+ -mesonin hajoamisessa on tapahtunut poikkeavuuksia leptonien yleislajisuudessa, joita standardimalli ei tue merkittäväällä todennäköisyydellä. Tätä havaintoa tukee tärkeä tulos suhteesta R_k , mikä kuvaa eri leptoniparien syntymistä sekä niiden suhdetta. Tämän suhteen odotetaan olevan arvoltaan 1, mutta näin ei ole. Leptonien yleislajisuuden poikkeavuudessa sekä yllättävän R_k arvon suuruudet eivät ole selitettävissä nykyisen standardimallin avulla. Toisin sanoen LHCb:ssä tehty koe pohja-kvarkillisen mesonin hajoamisesta osoittaa merkittäviä puutoksia nykyisessä hiukkasfysiikan standardimallissa. [1], [2]

Olemassa olevan standardimallin avulla ei pystytä vastaamaan kaikkiin universumiimme liittyviin kysymyksiin. Näitä kysymyksiä ovat esimerkiksi, miksi neutriinoilla on massa, mitä pimeä aine on, miksi universumissamme on niin paljon materiaa, miksi universumin laajeneminen kiihtyy, selittääkö jokin hiukkanen gravitaatiovuorovaikutuksen sekä monia muita kysymyksiä. [3] Nämä kysymykset sekä niihin puuttuvat vastaukset osoittavat sen, että nykyisessä standardimallissa on puutoksia. Voisiko kuitenkin pohja-kvarkillisen mesonin yllättävä tapa hajota vastata joihinkin näihin kysymyksiin sekä auttaa standardimallin täydennyksessä?

2 Tutkimuksen tausta

	massa → varaus → spin →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$	0 0 1	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$ 0 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 $1/2$	± 1 1	
		ν_e elektronin neutriino	ν_μ myonin neutriino	ν_τ taun neutriino	W W-bosoni	MITTABOSONIT

Kuva 2.1. Alkeishiukkastaulukko [4].

Standardimalliin kuuluvien hiukkasten avulla eli kvarkkien, leptonien, mittabosonien sekä Higgsin bosonin avulla voidaan selittää kaikki näkyvä materia meidän ympärillämme. Lisäksi nämä standardimallin muodostavat hiukkaset selittävät heikon, vahvan ja sähkömagneettisen vuorovaikutuksen. [5] Nämä hiukkaset ovat kuvattu Kuvaan 2.1.

Standardimallissa leptonit ja kvarkit voidaan jakaa sukupolviin (1.-3.) tai perheisiin (I-III). 1. sukupolveen kuuluu kevyempiä hiukkasia eli elektroni ja sen neutriino sekä ylös- ja alas-kvarkit. Sukupolvet 2. ja 3. edustavat järjestelmällisesti aina edellistä sukupolvea raskaampia hiukkasia ja niiden sisältämät hiukkaset ovat nähtävissä Kuvasta 2.1. [5] Siis 2. sukupolveen kuuluvat hiukkaset ovat 1. sukupolveen kuuluvia hiukkasia painavampia ja vastaavasti 3. sukupolven hiukkaset ovat painavampia kuin 2. sukupolveen kuuluvat hiukkaset.

2.1 Kvarkit

Kvarkit ovat baryonien ja mesonien rakenneosasia. Kvarkkeja on yhteensä $6 \cdot 3 \cdot 2 = 36$ kappaletta. Toisin sanoen niillä on kuusi makua ja jokainen maku voi olla joku kolmesta väristä. Näitä värejä ovat punainen, vihreä ja sininen. Jokaisella kvarkillä on antihiukkaset ja niiden kvanttiluvut ovat vastakkaismerkkiset. Lisäksi värivarauksen merkki on vastakkaismerkkinen, esimerkiksi antikvarkki voi olla anti-vihreä. Tulee kuitenkin huomata, ettei värivarauksilla ole mitään tekemistä konkreettisten värien kanssa, vaan vahva vuorovaikutus vaikuttaa värivarauksellisiin hiukkasiin. Analogiana värivaraukselle voidaan käyttää sähkövarausta. Toisin sanoen sähkömagneettinen vuorovaikutus vaikuttaa hiukkasiin, joilla on sähkövaraus. Samalla tavoin vahva vuorovaikutus vaikuttaa värivarauksellisiin hiukkasiin, kuten aikaisemmin on mainittu. [5]

Elektronin sekä elektronin neutriinon kanssa samaan sukupolveen kuuluu ylös- ja alaskvarkit (up ja down). 2. sukupolveen kuuluu myoni sekä sen neutriino ja lumo- (charm) sekä outo-kvarkit (strange). 3. sukupolveen puolestaan kuuluu tau sekä sen neutriino ja huippu- (top) sekä pohja-kvarkit (bottom). Tarkastellaan nyt ainoastaan jokaisen sukupolven kvarkkeja. Kuvasta 2.1. nähdään, että kaikilla kvarkeilla ”normaali” spin on $\frac{1}{2}$. Eli toisin sanoen nämä ovat fermioneja, sillä niiden spin on puoliluku. Näillä fermioneilla ei ole sähkövarauksena kokonaislukuvarauksia, kuten kuvasta 2.1. nähdään, vaan kolmasosa varauksia $\pm\frac{1}{3}$ tai $\pm\frac{2}{3}$. [5]

Heikko isospin T_3 on $\frac{1}{2}$ ylös-, lumo- ja huippu-kvarkeilla, mutta alas-, outo-, sekä pohja-kvarkeilla heikko isospin on $-\frac{1}{2}$. Tämä kyseinen spin T_3 on kvanttiluku, mikä liittyy makuun. Maku puolestaan ei ole mitään konkreettista makua vaan siihen liittyy tiettyjä kvanttilukuja. [5]

2.2 Leptonit

Leptoneihin kuuluvat seuraavat standardimallin hiukkaset: elektroni e , myoni μ , tau τ , näiden neutriinot $\nu_{e,\mu,\tau}$ sekä näitä vastaavia antihiukkasia että antineutriinoja. Leptoneita on olemassa kuutta eri makua. Maun käsite on selitetty kappaleessa 2.1. Lisäksi kappaleessa 2 on kerrottu leptonien ja kvarkkien sukupolvijako. Tämä on tärkeä leptonien yleislajisuuden (lepton universality) käsitteen ymmärtämisen kannalta. Leptonien yleislajisuuden nojalla standardimalli käsittelee elektronia, myonia ja tautaa samalla tavalla, mutta ei niiden massojen suhteen. Tämä johtuu siitä, että nämä kolme leptonia ovat eri sukupolvissa ja sukupolvien määritelmän mukaan jokaisessa sukupolvessa on aina edellistä sukupolvea painavampia hiukkasia, kuten kappaleessa 2 on määritetty. [5] Koska hiukkasten massojen vaikutukset ovat suuria hiukkasfysiikassa, on tärkeä huomata sukupolvijako erityisesti leptoneita sekä niiden yleislajisuutta tarkasteltaessa.

Heikko isospin T_3 on varatuille vasenkätisille leptoneille $-\frac{1}{2}$ ja näiden neutriinoille $\frac{1}{2}$. Käsitteiden määrittely liittyy hiukkasen kiraliteettiin, mikä neutriinoilla vastaa helisiteettiä. Toisin sanoen neutriinot ovat oikeakätisiä, mikäli niiden nopeusvektori sekä spin ovat samansuuntaiset. Jos hiukkasen nopeusvektori ja spin ovat erisuuntaiset, on se vasenkätinen. Kuitenkin massaisille leptoneille, kuten myonille, tämä määrittely ei ole niin suoraviivainen. Tulee kuitenkin huomata, että heikko vuorovaikutus vaikuttaa vain ja ainoastaan vasenkätisiin leptoneihin ja oikeakätisiin antileptoneihin eikä se vaikuta oikeakätisiin leptoneihin. [5]

2.3 Mittabosonit

Mittabosonit ovat perusvuorovaikutuksen välittäjähiukkasia. Niiden tuottamiseen tarvittiin vankka hiukkaskiihdytin niiden massiivisen kokonsa takia, jotta ne pystyttiin havaita. Mittabosonien olemassa olo oli ennustettu aiemmin, mutta ne todennettiin vasta vuonna 1983. Mittabosoneja havaittiin kolme kappaletta teoriaa vastaavasti: W^+ , W^- sekä Z eli varatut (\pm) heikot bosonit sekä neutraali heikko bosoni. Nämä kyseiset hiukkaset ovat heikon vuorovaikutuksen välittäjähiukkasia. Heikkojen bosonien lisäksi mittabosoneihin kuuluu gluoneja g , joita on kahdeksaa erilaista. Näitä ei kuitenkaan ole suoraan havaittu, mutta epäsuoria havaintoja niistä on. Gluonit ovat vahvan vuorovaikutuksen välittäjähiukkasia, joten niillä on myös värivaraus, kuten kvarkeilla. [5] Pohja-kvarkillisen mesonin hajoamisen kannalta tärkeimmät mittabosonit ovat W^+ sekä Z ja fotonit γ .

Mittabosonit välittävät heikkoa sekä vahvaa vuorovaikutusta. Lisäksi varatut mittabosonit reagoivat sähkömagneettiseen kenttään. Kuitenkaan mikään näistä hiukkasista ei välitä gravitaatiovuorovaikutusta. Tämä johtuu siitä, ettei gravitaatiovuorovaikutus kuulu standardimalliin, vaikka sen tiedetään olevan olemassa. Toisin sanoen ei ole vielä löydetty hiukkasta, joka tukisi standardimallia gravitaatiovuorovaikutuksen sellittämisessä. Eli ei ole löydetty hiukkasta, joka kuuluisi standardimalliin ja se välittäisi gravitaatiovuorovaikutusta.. [5]

Hiljattain on havaittu uusi mittabosoni eli Higgsin bosoni. Tämä kyseinen hiukkanen toimii todisteena Higgsin kentästä, joka antaisi joillekin hiukkasille massan. Higgsin kenttä siis vallitsisi kaikkialla, jolloin siinä vuorovaikuttavat hiukkaset näyttäisivät siltä, että niillä on massa. Tämä kyseinen hiukkanen on myös Higgsin kentän ”viritys” eli eksitaatio, jolloin se on myös todiste Higgsin kentän olemassaolosta. [5]

2.4 Yhdistelmähiukkaset

Yhdistelmähiukkaset eli hadronit koostuvat nimensä mukaan yhdistelmistä kvarkeista. Näitä hiukkasia ovat mesonit ja baryonit. Kvarkkimallin mukaan mesonit koostuvat kvarkista sekä antikvarkista ja baryonit koostuvat kolmesta kvarkista. [5] Esimerkiksi pohja-kvarkillinen mesoni B^+ koostuu ylös-kvarkista u ja pohja-antikvarkista \bar{b} . Muita pohja-kvarkillisia mesoneita ovat B^0 : $d\bar{b}$, B_s^0 : $s\bar{b}$ ja B_c^+ : $c\bar{b}$. [1], [6]

Hadronien tulee olla värittömiä. Toisin sanoen hadronit voivat koostua kvarkeista, joilla on värivaruksena vihreä, punainen, sininen tai antivihreä, antipunainen, antisininen varaus. Baryonit siis koostuvat vihreä-punainen-sininen-kvarkkikombinaatiosta ja mesonit puolestaan väri-antiväri kombinaatiosta. Näiden yhdistelmähiukkasten sähkövaraus on siitä koostuvien kvarkkien sähkövarausten summa. Hadroneita on varauksiltaan negatiivisia, positiivisia sekä neutraaleja. [5]

Hadronit (lukuun ottamatta protonia ja neutronia, kun ne ovat sitoutuneet atomiytimeen) ovat lyhytikäisiä, mutta ne ovat löydetty ja ne pystytään havaitsemaan hadronikalorimetrin sekä pii-ilmaisimen avulla. Neutraalit hadronit kulkevat hiukkasilmaisimessa hadronikalorimetriin saakka eli pidemmälle kuin pii-jäljittimeen. Ne eivät jätä kuitenkaan jälkiä kuin vasta hadronikalorimetrissä, johon ne absorpoituvat. Tämä johtuu siitä, että neutraalit hadronit eivät kaareudu magneetin aiheuttamassa magneettikentässä eivätkä siten saa aikaan reaktioita, jotka edesauttaisivat niiden havaitsemista pii-jäljittimessä, joka on hiukkasilmaisimessa ennen hadronikalorimetriä. Varatut hadronit puolestaan jättävät jäljet kulkiessaan pii-jäljittimeen. Tämä johtuu hadronien positiivisista ja negatiivisista varauk-

sista, jotka saavat niiden liikeradat kaartumaan magneettikentässä. Tällöin ne törmäävät pii-ilmaisimen piiliuskoihin, jotka sijaitsevat putken sisäpinnoilla. Törmäyksen seurauksena syntyy sähkövirta, jonka avulla saadaan selville hadronien kulkema polku. Tämän avulla voidaan tunnistaa jäljittimessä liikkunut hiukkanen yhdistelmähiukkaseksi, kuten hadroniksi. Pii-jäljittimen sekä hadronikalorimetrin toiminta ja rakenteet ovat selitetty kohdassa 3.2. LHCb-koe. [5]

Näkyvä aine koostuu kvarkeista ja leptoneista. [7] Jokaisella kvarkilla on baryoniluku $B = \frac{1}{3}$. Edellä on määritelty baryonien koostuvan kolmesta kvarkista, joten niiden baryoni luvut ovat $B = 3 \cdot \frac{1}{3} = 1$. Tiedetään, että aine on näkyvää, mikäli sen baryoniluku on positiivinen. Juuri määritellyn baryonien baryoniluvun B nojalla näkyvä materia koostuu kyseisistä yhdistelmähiukkasista, sillä niillä $B = 1 > 0$. Mesonit kuitenkin eivät ole osa näkyvää ainetta, sillä mesonien baryoniluku on 0. Tämä johtuu siitä, että mesonit koostuvat kvarkista ($B > 0$) ja antikvarkista ($B < 0$). Esimerkiksi pohja-kvarkillisen mesonin baryoniluku on $B = -\frac{1}{3} + \frac{1}{3} = 0$. [1], [5], [6], [7]

3 CERN ja LHCb-koe

3.1 CERN

Tutkimus pohja-kvarkillisen mesonin B^+ hajoamisesta on tehty Genevessä, Sveitsissä sijaitsevassa hiukkasfysiikan tutkimuskeskuksessa CERN:ssä (European Organization for Nuclear Research). Tarkasteltava tutkimus [1] on tarkemmin toteutettu CERN:n keskeisimmässä tutkimuslaitteistossa LHC:ssa (The Large Hadron Collider) yhdestä kuudesta koeasemasta LHCb:ssa.

LHC on 27 km pitkä ympyrän muotoinen hiukkaskiihdytin. Se sijaitsee noin 100 m maanpinnan alapuolella Genevessä, Sveitsissä [8]. LHC:ssa törmäytetään hiukkasia kiihdyttimen kohdissa, joissa sijaitsee hiukkahavaitsimia. Hiukkahavaitsimia LHC:ssa on neljä kappaletta, ATLAS, CMS, ALICE ja LHCb [8]. Tässä tutkielmassa keskitytään LHCb-hiukkahavaitsimeen.

LHC:ssa ensisijaisesti törmäytetään protoneja, jotka saadaan vetyatomeista. Vety säilytetään pullossa, josta otetaan vetytomeja ja ne riisutaan elektroneistaan, jolloin jäljelle jää protoneja [9]. Nämä protonit kiihdytetään suprajohtavien sähkömagneettien avulla. Koska kiihdyttämisessä protonien nopeus kasvaa, niin niiden energia myös kasvaa. Protoneja kiihdytetään 20 minuutin ajan ja niitä voidaan kiihdyttää niin paljon, että niiden energia voi saavuttaa jopa arvon 6,5 TeV. Nimenomaan protoneja kiihdytetään LHC:ssa, sillä niiden energiahäviö on pieni jokaisella kulkemallaan kierroksella hiukkaskiihdyttimessä. Protonien energiahäviö on pieni synkrotronisäteilyn vuoksi. Tämä puolestaan johtuu siitä, että protonit ovat hyvin painavia hiukkasia. Tällöin niillä on energiaa myös enemmän, sillä hiukkasfysiikassa voidaan suhteuttaa hiukkasen massa sitä vastaavaan energiaan. Toisin sanoen, koska protonin massa on suuri, niin sillä on myös paljon energiaa kulutettavana ennen hajoamista kiihdytyksen aikana. Kiihdytyksen aikana protonin energiaa kuluu hyvin vähän synkrotronisäteilyyn, kun säteilyyn kuluva energiaa verrataan siihen energiaan, johon protoni pystytään kiihdyttämään eli 6,5 TeV:iin. Elektronin massa on noin 2000 kertaa kevyempi kuin protonin massa. Tämän seurauksena elektronilla on huomattavasti suurempi energiahäviö kuin protonilla, kun sitä kiihdytetään. Toisin sanoen elektronin energia muuttuu synkrotronisäteilyksi nopeammin pienen massansa takia, sillä jokaisella kiihdytinkierroksella hiukkasen massaa kuluu kyseiseen säteilyyn. Siksi siis elektroneja on vaikea kiihdyttää suuriin energioihin, sillä niiden massa ”kuluu loppuun” synkrotronisäteilynä ennen tavoitteellisen energian saavuttamista. Tämä pätee myös muihin kevyihin hiukkasiin, kuten positroneihin. Edellä mainitun syyn takia elektroneja kiihdytetään erityisesti synkrotronisäteilyn tuottoon optimoiduissa kiihdytinlaitoksissa eikä LHC:ssa toteutettavien tutkimusten toteuttamisessa. [9]

LHC:ssa voidaan protonien lisäksi kiihdyttää lyijyioneja. Tämä tapahtuu siten, että lyijykaasu ionisoidaan sähkövirralla, jonka jälkeen ionisoituja lyijyatomeja kiihdytetään kokonaisenergiaan

$$E = 2,56 \text{ TeV/nukleoni} \cdot 208 = 532,48 \text{ TeV/lyijyioni} .$$

[9] Edellä mainitussa kokonaisenergian yhtälössä 2,56 TeV/nukleoni vastaa yhden nukleonin energiaa [9] ja 208 vastaa yleisimmän lyijyisotoopin ^{208}Pb massalukua [10].

CERN:ssä tutkitaan B^+ -mesonin hajoamisen lisäksi esimerkiksi lyijyionien törmäyksiä ALICE-tutkimusasemalla ja ATLAS-tutkimusasemalla tehdään tutkimusta liittyen Higgsin bosoniin. ALICE:ssa tehtävän tutkimuksen tarkoituksena on tarkastella kvarkki-gluoniplas-

maa eli aineen olomuotoa, jossa protonit ja neutronit ”sulavat” vapauttaen kvarkit niiden siteistä gluoneihin. Tämä tapahtuu hyvin korkeissa lämpötiloissa sekä tiheyksissä eli hyvin äärimmäisissä olosuhteissa, jotka tuotetaan ALICE:n laboratoriossa. Kyseiset olosuhteet muistuttavat juuri alkuräjähdyksen jälkeisiä olosuhteita. [9], [11] ATLAS:ssa puolestaan tehdään tarkkoja mittauksia liittyen Higgsin bosoniin, toivoen, että löydetään niin sanotusti uutta fysiikkaa standardimallin ulkopuolelta. Lisäksi ATLAS:ssa tutkitaan hiukkasia, jotka voisivat olla pimeän aineen rakennusosasia. [9], [12]

Syy, miksi hiukkasia kiihdytetään CERN:ssä, on hyvin yksinkertainen: halutaan ymmärtää universumia sekä sen toimintaa. Standardimallia, joka on esitelty kappaleessa 2, on testattu monilla kokeilla ja se on todettu päteväksi osittain. On olemassa esimerkiksi kysymyksiä, joihin ei ole löydetty vastausta. Esimerkiksi, mitä pimeä aine on tai miksi meidän universumi koostuu vain materiasta, vaikka alkuräjähdyksessä syntyi materiaa ja antimateriaa yhtä paljon. Näihin kysymyksiin voi löytyä vastaus hiukkaskiihdyttimien luomien törmäysten avulla. [9]

3.1.1 Törmäyksessä vapautuva energia

Kuten edellisessä kappaleessa on mainittu, LHC:ssä kiihdytetään ja törmäytetään protoneja. Protonisuihkut kulkevat LHC:ssä vastakkain suuntiin, mikä mahdollistaa niiden törmäyttämisen, kun se on tavoitteena. Tässä kappaleessa havainnollistetaan protoni-protoni törmäyksessä vapautuvan energian \sqrt{S} suuruutta. Kuitenkin tulee ensin ymmärtää, miksi protonien kiihdyttämisessä puhutaan protonien energioista eikä niiden nopeuksista.

Hiukkanen voi saavuttaa todella suuriakin energioita. Eli energia E lähestyy ääretöntä, kun nopeus v lähestyy valonnopeutta. Yksikään hiukkanen ei voi liikkua tyhjiössä valoa nopeammin. Kuitenkin hiukkaskiihdyttimien tyhjiöputkissa voidaan kiihdyttää hiukkasia, tässä tapauksessa protoneja, hyvin lähelle valonnopeutta. Esimerkiksi LHC:ssä hiukkasia ”ammutaan” tyhjiöputkeen nopeudella $v = 0,999997828c$ eli 0,999997828 kertaa valonnopeuteen, mikä vastaa energiaa $E = 450GeV$. LHC:ssä kiihdytetään hiukkasia jopa nopeuteen $v = 0,999999991c$ eli 0,999999991 kertaa valonnopeuteen. Tämä nopeus vastaa energiaa $E = 7000GeV$. Näissä olosuhteissa siis hiukkasten energiat kasvavat, mutta muutokset niiden nopeuksissa ovat minimaalisia. [9]

Törmäyksessä vapautuvan energian suuruudesta riippuen syntyy protonien eri hajoamistuotteita. Energia \sqrt{S} mahdollistaa leptoniparien, myoni-antimyoni- ja elektroni-positroniparien, syntymisen pohja-kvarkillisen mesonin hajoamisessa. Hajoamistuotteiden synty edellyttää liikemäärän säilymistä, johon kuluu osa energiasta \sqrt{S} . Voidaan siis käyttää parametria S vapautuvan energian \sqrt{S} määrittämiseksi. [9], [13]

Asetetaan valonnopeudeksi 1 luonnollisten yksiköiden nojalla. Tämä mahdollistaa törmäyksessä vapautuvan energian määrittämisen. Koska kyseisessä ilmiössä on kolme paikkaulottuvuutta sekä yksi aikaulottuvuus, jotka ovat tasa-arvoisia, voidaan vapautuvan energian määrittämisessä hyödyntää neliliikemäärää P . Neliliikemäärä koostuu hiukkasen energiasta E ja kolmesta liikeääräkomponentista: p_x , p_y ja p_z . Neliliikemäärä on muotoa

$$P = \begin{pmatrix} E/c \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = (E, \vec{p}).$$

Nyt massakeskipistekoordinaatistoa hyödyntäen $S = (P_1 + P_2)^2$, jossa P_1 ja P_2 vastaavat vastakkaisiin suuntiin kulkevien protonien liikemäärät.

Siis

$$S = (E_1 + E_2)^2 - (\bar{p}_1 + \bar{p}_2)^2 = (E_1 + E_2)^2 - \bar{p}_1^2 - \bar{p}_2^2 - (2|\bar{p}_1||\bar{p}_2|\cos(\theta))$$

Kun lasketaan protonien kokonaisenergioiden E_1 ja E_2 liikemäärien summan neliö auki, saadaan kytkettyä lepoenergioihin yksittäiset liikemäärät.

Nyt

$$\begin{aligned} S &= (E_1 + E_2)^2 - \bar{p}_1^2 - \bar{p}_2^2 - (2|\bar{p}_1||\bar{p}_2|\cos(\theta)) \\ &= -p_1^2 + E_1^2 - p_2^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - (2|\bar{p}_1||\bar{p}_2|\cos(\theta)), \end{aligned}$$

missä kokonaisenergioille E_1 ja E_2 pätee $E_1^2 = m_1^2c^4 + p_1^2c^2$ ja $E_2^2 = m_2^2c^4 + p_2^2c^2$.

Valonnopeus on $c = 1$, niin parametrin S yhtälöksi saadaan

$$S = m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2 - 2|p_1||p_2|\cos(\theta)$$

Muokataan vielä parametrin S yhtälöä. Asetetaan massat m_1 ja m_2 yhtäsuuriksi, sillä kyseessä on kaksi samaa hiukkasta, protonia. Toisin sanoen $m_1 = m_2 = m$. Sama voidaan tehdä protonien kokonaisenergioille E_1 ja E_2 eli $E_1 = E_2 = E$.

Tällöin

$$S = m^2 + 2E^2 - 2|p_1||p_2|\cos(\theta)$$

Lisäksi neliliikemäärä P saadaan muotoon

$$P = \begin{pmatrix} E/c \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = (E, \bar{p}),$$

sillä valonnopeudeksi on asetettu arvo $c = 1$, kuten edellä on mainittu.

Kulma θ kuvaa protonien liikemäärien välistä kulmaa. Koska protonien liikesuunnat ovat vastakkaiset, voidaan liikemäärien vektoreiden kulmaksi asettaa $\theta = 180^\circ$. Protonien kokonaisenergiat eivät riipu suunnasta, joten voidaan asettaa, että $E_1 = E_2 = E$. Lisäksi protonien massat $m_1 = m_2 = m \approx 1 \text{ GeV}$ ja liikemäärät ovat $|\bar{p}_1| = |\bar{p}_2| = p$.

Nyt

$$S = 2m^2 + 2E^2 + 2p^2$$

Tehdään approksimaatio, että energia $2E^2$ on suuruudeltaan teraelektronivoltteja, TeV. Tällöin voidaan tehdä ultrarelativistinen approksimaatio siitä, että massa $2m^2$ on häviävän pientä. Voidaan siis asettaa energia E yhtä suureksi liikemäärän p kanssa eli $E = p$.

Nyt

$$S = 2m^2 + 2E^2 + 2p^2 \approx 4E^2$$

Protonien törmäyksessä vapautuvan energian \sqrt{S} lausekkeeksi saadaan

$$\sqrt{S} = \sqrt{4E^2} = 2E,$$

jossa E on LHC:ssä kiihdytetyn protonin energia eli $E = 7,0 \text{ TeV}$.

Eli vapautuva energia on

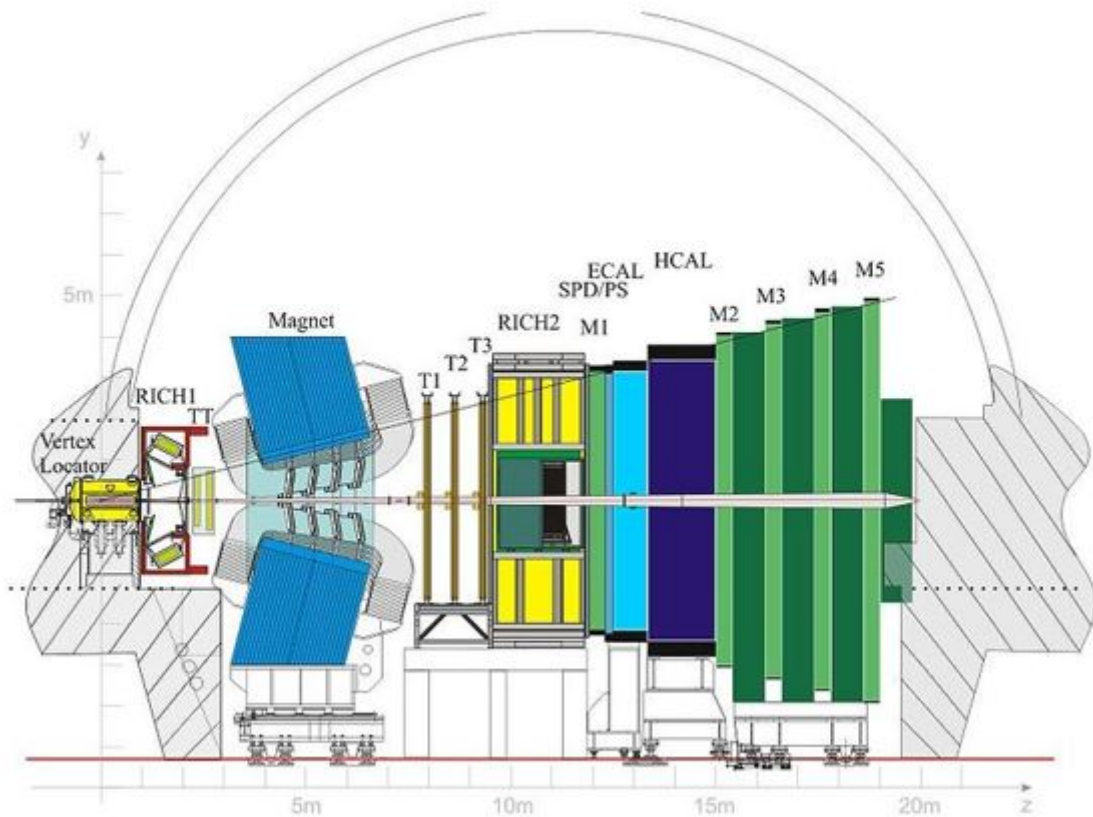
$$\sqrt{S} = 2E = 2 \cdot 7,0 \text{ TeV} = 14,0 \text{ TeV}.$$

[9], [13]

3.2 LHCb-koe

LHCb (Large Hadron Collider beauty) on erikoistunut tutkimaan eroja materian ja antimaterian välillä. Tämä tapahtuu tutkimalla b -kvarkkeja, joita kutsutaan myös nimillä pohjaitai kauneuskvarkeiksi (*engl.* bottom, beauty)[1], [14] sekä tutkimalla niiden hajoamista [15]. Pohja-kvarkillisen mesonin (B -mesoni) hajoamista on tutkittu tässä kyseisessä koeasemassa.

LHCb:n 4500 tonnin havaitsin on suunniteltu havaitsemaan ja suodattamaan B -mesonien hajoamisia sekä niiden lopputuotteita [15]. Havaitsin ulottuu jopa 20 m:n matkalle hiukkaskiihdytinputkessa. Havaitsimen rakenne muistuttaa kirjahyllyä, jossa on kirjoja rivissä. Muut LHC:n havaitsimien rakenteet muistuttavat sipulin rakennetta, joten LHCb:n rakenne on erityinen verrattuna muihin havaitsimiin. [15]



Kuva 3.2.1 LHCb-hiukkashavaitsimen rakenne (Tekijä: CERN, CC-BY-SA 3.0).

LHCb koostuu eri osista, jotka ovat hyvin tärkeitä siellä toteutettavan tutkimuksen kannalta. LHCb koostuu VELO:sta (VERTex LOCator), RICH-1:sta (Ring Imaging Cherenkov detector), magneetista, jäljitinsysteemistä, RICH-2:sta (Ring Imaging Cherenkov detector), sähkömagneettisesta kalorimetristä (Electromagnetic Calorimeter, ECAL), hadronikalorimetristä ja myonisysteemistä [15].

Protonit kiihdytetään ja stabiloidaan LHC-hiukkaskiihdyttimessä. Tämän jälkeen hiukaset ohjataan LHCb:n VELO:n, jossa protonit törmäävät. Jotta VELO pystyy havaitsemaan pohja-kvarkilliset mesonit, tulee sen 42 pii-ilmiasinta olla hyvin lähellä protonien törmäyskohtaa. Nämä havaitsinelementit ohjataan mekaanisesti protonien törmäyskohdan lähelle, noin viiden millimetrin etäisyydelle, kun protonit ovat kiihdytetty sekä stabiloitu LHC:ssä. Tällöin vältetään laitteiston vahingoittumiselta, sillä kyseisten hiukkasten energiat vastaavat nopean pikajunan energiaa. VELO:n tehtävänä on valita kaikista törmäyksessä syntyvistä hiukkasista pohja-kvarkilliset mesonit. Tämä on vaikeaa, sillä kyseisten hiukkasten elinikä on lyhyt. [15] Pohja-kvarkillisen mesonin kulkeman matkan pituutta l voidaan havainnollistaa esimerkkilaskulla.

Nyt

$$\begin{aligned}
 l &= \gamma l' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot l' = \frac{\tau_{B^+} v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\
 &= \frac{1,638 \cdot 20^{-12} s \cdot 0,9997 \cdot 2,99792458 \cdot 10^8 \frac{m}{s}}{\sqrt{1 - \frac{(0,9997 \cdot 2,99792458 \cdot 10^8 \frac{m}{s})^2}{(2,99792458 \cdot 10^8 \frac{m}{s})^2}}} \\
 &= 0,02004293148 m \approx 2 cm
 \end{aligned} \tag{1}$$

Yhtälössä 1 [13] on käytetty esimerkkinä B^+ -mesonia hiukkasen kulkeman matkan havainnollistamiseen. Tässä yhtälössä B^+ -mesonin hajoamisaika on $\tau_{B^+} = 1,638 \cdot 10^{-12} s$ [16] ja nopeus on $v = 0,9997c$, sillä kyseinen hiukkanen liikkuu lähes valonnopeudella. [13], [15] Valonnopeutena on käytetty arvoa $c = 2,99792458 \cdot 10^8 m/s$. [10]

VELO:n havaittua halutut hiukaset, se mittaa etäisyydet protonien törmäyskohdasta eli kohdasta, jossa pohja-kvarkilliset mesonit syntyvät, kohtaan, jossa kyseiset mesonit hajoavat. Toisin sanoen pohja-kvarkillisia mesoneja ei ikinä suoraan mitata vaan niiden ”läsnäolo” päätellään edellä kerrottujen pisteiden etäisyyden avulla. [15]

LHCb:n rakenteessa VELO:n jälkeen tulee RICH-havaitsimet RICH-1 ja RICH-2. Näiden välissä kuitenkin on hyvin vahva magneetti, jonka toiminnasta kerrotaan seuraavassa kappaleessa. Molemmat RICH-havaitsimet (RICH-1 ja RICH-2) ovat rakenteeltaan sekä toimintatavoiltaan identtiset. Lisäksi havaitsimet asettuvat LHCb:n rakenteessa magneetin molemmin puolin. Nämä havaitsimet ovat rakennettu havaitsemaan hiukkasia, kuten VELO, ja ne toimivat mittaamalla Cherenkovin säteilyn emissiivisyyttä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, kun varatut hiukaset läpäisevät väliaineen, kuten kaasun, nopeudella, joka on suurempi kuin valonnopeus tässä väliaineessa, hiukaset jättävät jälkeensä kartion muotoisen vallin. Varatun hiukkasen kulkiessa väliaineessa se emittoi kyseisen niin sanotun ”vallin verran valoa”, jonka RICH-havaitsin heijastaa peilien avulla sensoreihin. Sensoreihin tulevan tiedon sekä magneettikentän avulla voidaan laskea tarkasteltavan hiukkasen varaus ja massa, jolloin kyseinen hiukkanen voidaan tunnistaa. Kuten pohja-kvarkillisen mesonin tutkimisessa, RICH-havaitsimet ovat vastuussa pohja-kvarkillisen mesonin hajoamisen lopputuotteiden havaitsemisesta. Erityisesti tässä tutkimuksessa on keskitytty havaitsemaan hajoamistuotteina elektroni-positroni-pareja sekä myoni-antimyoni-pareja. [1], [15]

Kuten edellisessä kappaleessa mainittiin, RICH-havaitsimien välissä on hyvin vahva magneetti. LHCb:n magneetti koostuu kahdesta 27 tonnin kelasta, jotka ovat 1450 tonnin rautakehyksen sisällä. Jokainen kela koostuu kymmenestä bifilarkkäämistä ja nämä ovat tehty 3 km:stä alumiinikaapelia. Yleensä hiukkaset kulkevat suorassa linjassa, mutta niiden saapuesssa magneettiin niiden liike muuttuu kyseisen magneetin aiheuttamassa magneettikentässä niiden varausten mukaisesti. Toisin sanoen negatiivisesti ja positiivisesti varautuneet hiukkaset liikkuvat vastakkaisiin suuntiin. Tutkimalla kaartunutta liikerataa, saadaan selville tutkittavien hiukkasten liikemäärä ja siten voidaan tunnistaa kyseiset hiukkaset. [15]

Jäljitinsysteemin tehtävä LHCb:ssä on tutkia hiukkasten liikeratoja sekä tallentaa ne. Tämä on erityisen tärkeää pohja-kvarkillisten mesonien hajoamisen määrittämisessä. Jäljitinsysteemi koostuu neljästä noin 40 m² kokoisesta suorakaiteen muotoisesta asemasta, joissa käytetään kahta erilaista havaitsinteknologiaa. Niitä on pii-jäljittimet ja ulkoiset jäljittimet. Pii-jäljittimet ovat lähellä hiukkassuihkua toisin kuin ulkoiset jäljittimet, jotka sijaitsevat kauempana hiukkassuihkusta. Pii-jäljittimissä käytetään hiukkasten havaitsemiseen piistä tehtyjä mikroliuskajohtoja. Varatut hiukkaset törmäävät piiatomeihin, jolloin törmäyksestä vapautuu elektroneja. Tämän myötä syntyy sähkövirta, joka ilmaisee alkuperäisen hiukkasen kulkeman polun. Pii-jäljittimen toiminta eroaa ulkoisen jäljittimen toiminnasta, sillä ulkoinen jäljitin jäljittää hiukkasia tuhansien ohuiden putkien avulla. Nämä putket ovat täytetty kaasulla ja kaasumolekyylit ionisoituvat varatun hiukkasen kulkiessa putken läpi. Tällöin tässä prosessissa vapautuu elektroneja, kuten pii-jäljittimien tapauksessa, ja paikka radalla saadaan määriteltyä ottamalla aikaa siitä, kuinka kauan jokaisella elektronilla kestää saapua anodijohdolle, joka on sijoitettu jokaisen putken keskelle. Mikäli hiukkasen rata on kulkenut anodijohdtimeen läheltä, niin elektronien saapumisajoilla on suuri jakauma. Toisin sanoen osa elektroneista tulee putken laidalta ja matkaavat koko putken säteen matkan anodijohdolle. Jolloin vastaavasti osa elektroneista syntyy anodijohdon vieressä, jolloin ne saavuttavat kyseisen johdon heti. Jos hiukkanen kuitenkin kulki kaukana johtimesta, niin kaikilla elektroneilla kesti lähes yhtä kauan saapua johtimelle. Tällöin niiden radan määrittämisessä oleellista on hiukkasten saapumisaikojen jakauma. [15]

Sähkömagneettinen kalorimetri mittaa kevyiden hiukkasten, kuten fotonien ja elektronien, energioita. Hadronikalorimetri on puolestaan vastuussa hiukkasten, jotka sisältävät kvarkkeja, energioiden mittaamisesta. Esimerkiksi näitä hiukkasia voi olla protonit, neutronit ja tutkimuksen [1] kannalta mielenkiintoinen pohja-kvarkillinen mesoni. Tämän mesonin elinaika on noin 10⁻¹² s luokkaa, jolloin se ei itse ehdi päästä sähkömagneettisesta kalorimetristä hadronikalorimetriin, kts. esimerkkilasku 1, lyhyen elinikänsä takia [16]. Kuitenkin pohja-kvarkillisen mesonin hajoamistuotteet pääsevät hadronikalorimetriin. Energiat voidaan mitata, kun hiukkaset saapuvat kalorimetrin pintaan, joka koostuu vuorotellen asetetuista kerroksista metalli- sekä muovilevyjä, ja törmäävät siihen. Kun hiukkaset osuvat metallilevyyn, niin ne hajoavat ja tuottavat hajoamistuotteenaan uusia hiukkasia. Nämä hajoamistuotteet etenevät muovilevyyn, joka emittoi ultraviolettisäteilyä. Syntynyt UV-säteily on verrannollien hiukkasten energiaan niiden saapuessa kalorimetriin. UV-säteilyn antaman tiedon avulla voidaan määrittää hiukkaset, jotka saapuvat kalorimetriin. Nämä kalorimetrit ovat hyvin tarkeitä pohja-kvarkillisen mesonin tutkimisessa, sillä niiden avulla päästään analysoimaan eri hajoamistuotteita kyseiselle hiukkaselle. [15]

Sähkömagneettinen kalorimetri tunnistaa elektronit yhdistämällä niiden radat sekä niiden mitatut liikemäärät, jotka on saatu jäljitinsysteemillä. Tämän perusteella sähkömagneettinen kalorimetri erottelee elektronit ja fotonit. [1]

Myonit ovat ”läsnä” pohja-kvarkillisen mesonin hajoamisen loppuvaiheissa, joten myonisysteemi on erityisen tärkeä tutkimuksen [1] tutkimustulosten sekä syntyvien leptoniparien tunnistamisen kannalta. Myonisysteemi sijaitsee LHCb:n sylinterisymmetrisen laitteiston rakenteessa ulkokehällä ja se koostuu viidestä kolmion muotoisesta asemasta, jotka kasvavat kooltaan pikku hiljaa. Jokainen asema sisältää kammion, joka puolestaan sisältää kaasua. Tämä kaasu on yhdistelmä kolmea eri kaasua ja ne ovat argon, hiilidioksidi sekä tetrafluorimetaani. [15] Pohja-kvarkillisen mesonin hajoamisen loppuvaiheessa syntyy leptonipari, joka voi olla myoni-antimyoni-pari [1]. Toisin sanoen tässä kohtaa syntyvät myonit sekä niiden antihukkaset kulkevat edellä mainittujen kaasukammioiden läpi ja reagoivat siellä kaasuseoksen kanssa. Tällöin elektrodilanka havaitsee tulokset eli kaasukammioon tulleet myonit ja näiden tulosten pohjalta voidaan määrittää se, syntyikö B^+ -mesonin hajoamisessa leptonipariksi myoni-antimyonipari. [15]

4 Vertailukokeet elektroni-positroni-törmäyttimillä

Elektroni-positroni-törmäyksien energiat voidaan säätää törmäyttimessä jonkin uuden löydetyn hiukkasen massaa vastaavaan energiaan. BaBar- ja Belle-kokeissa törmäyttimien energiat vastaavat Ypsilon-mesonin massaa. Tämä mesoni hajoaa hyvin todennäköisesti pohja-kvarkki-mesonilliseksi hiukkas-antihhiukkaspariksi. Elektroni-positroni-törmäyksissä ei synny, joka törmäyksellä uusia hiukkasia toisin kuin protoni-protoni-törmäyksissä. Tämä johtuu siitä, että protonitörmäyttimissä energia jakautuu kvarkkien kesken, sillä ne ovat yhdistelmähiukkasia ja niiden energian jakautuminen on hyvin satunnaista. [3], [17]

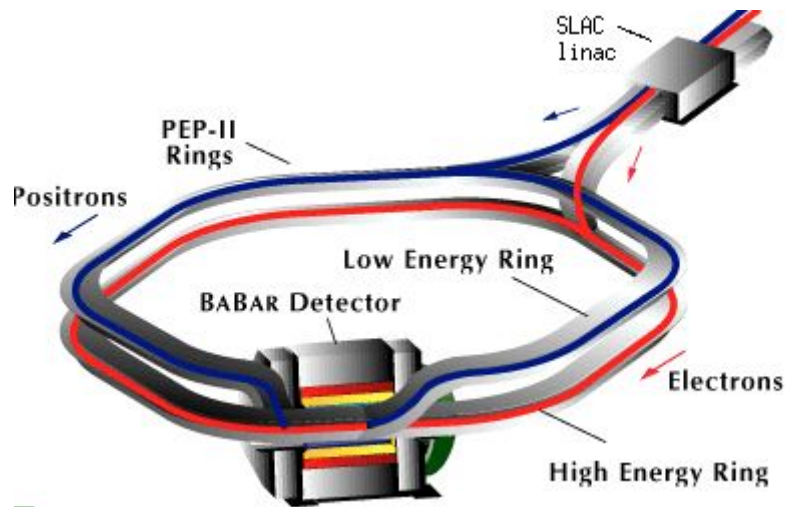
Jotta saadaan tarpeeksi dataa elektroni-positroni-törmäyksistä, tarvitaan hiukkasten törmäämisiä. Kuitenkin törmäyksien lukumäärä voi olla hieman vaikea määrittää eikä niistä välttämättä saa tarpeeksi tietoa. Tämän takia hiukkastörmäyksien yhteyksissä käytetään luminositeettia. Luminositeetti kertoo, kuinka tiheästi hiukkaset ovat kiihdytettävässä hiukassuihkussa. Mitä tiheämmin hiukkaset ovat hiukassuihkussa, sitä todennäköisemmin useammat hiukkaset törmäävät ja tuottavat hajoamistuotteinaan uusia hiukkasia. Hiukassuihkuja voidaan tihentää keskittämällä ne juuri ennen törmäystä. [17]

4.1 BaBar-koe

BaBar-kokeen mittaukset on toteutettu BaBar-detektorilla, jonka rakenne on kuvattu Kuvassa 4.1.1. Tämä detektori on ollut toiminnassa vuosina 1999-2008. [20] Detektori toimii varastorenkaalla Positron Electron Project (PEP) II SLAC:ssa, Yhdysvalloissa. BaBar-mittauksissa törmäytettiin elektroneja ja positroneja. Kyseisten hiukkasten törmäyttämisen alkuperäinen tavoite oli tutkia B -mesonillisten hiukkasten sekä antihhiukkasten hajomista. Mikäli elektroni-positroni-törmäyksissä hiukkanen ja antihhiukkanen hajoaisivat eri tavoin, hajoaminen rikkoisi varauskonjugaatio-pariteetti-symmetriaa eli CP-symmetriaa. [18], [19]

BaBar-kokeen avulla oltaisiin haluttu ymmärtää syitä, miksi maailmankaikkeudessa on ainetta enemmän kuin antiainetta. [19] Kokeen sekä mittauksien rinnalla saatiin arvokasta tietoa muistakin ilmiöistä, kuten leptonien yleislajisuudesta, mikä on tärkeää pohja-kvarkillisen mesonin hajoamisessa. [1], [19] BaBar on lopettanut kuitenkin toimintansa jo vuonna 2008, kun siihen hiukkasia syöttänyt lineaarikiihdytin otettiin uuteen käyttöön vapaaelektronilaserina. [20]

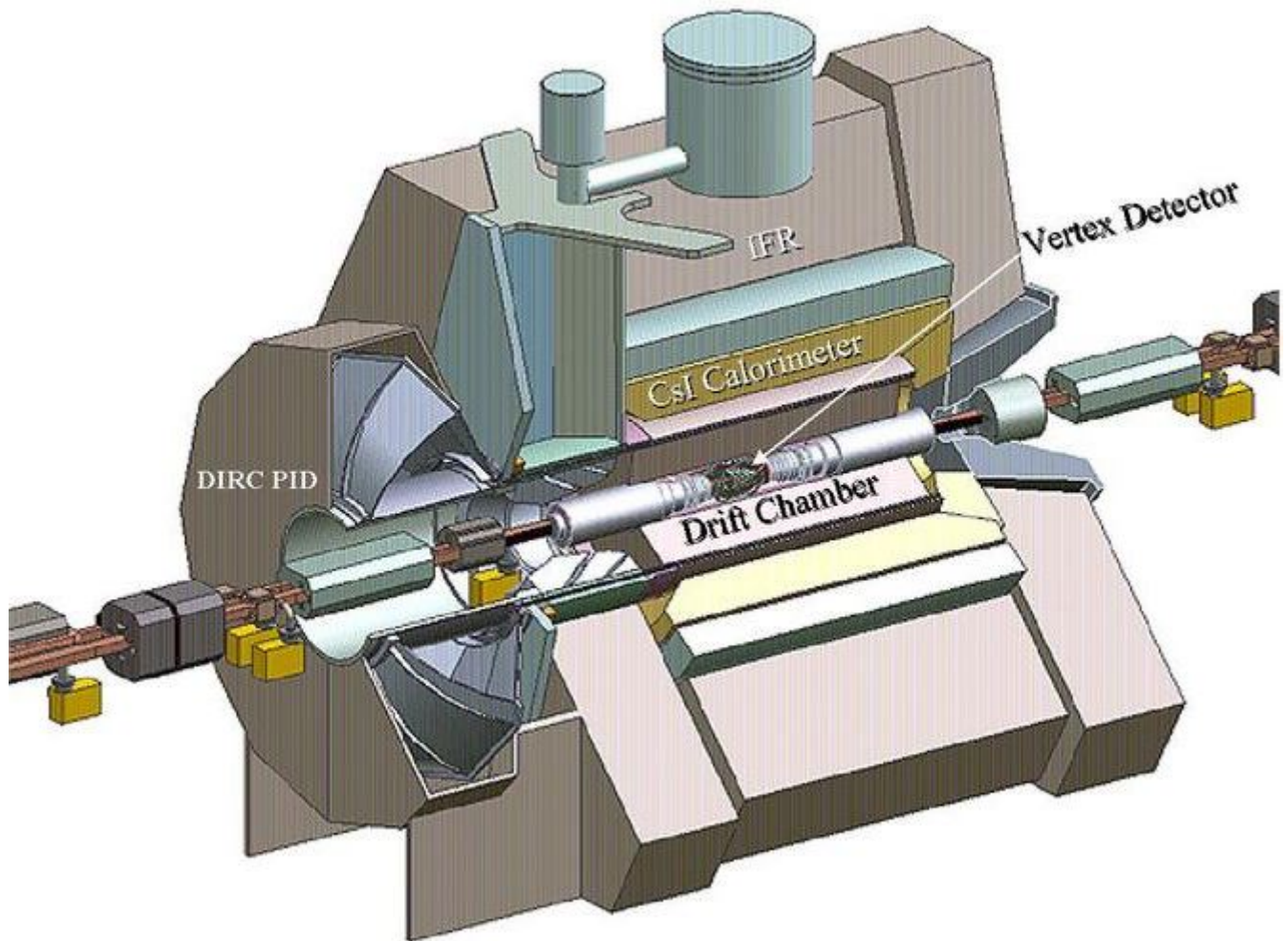
4.1.1 BaBar-kokeen ja -havaittimen rakenne



Kuva 4.1.1. BaBar-kokeen järjestelyt. [19]

BaBar yksinkertaisuudessaan koostuu kiihdyttimestä sekä havaitsimesta. BaBar-koe käytti kahta kiihdytintä: SLAC linac (lineaarikiihdytin) ja PEP-II varastorengasta. Lineaarikiihdytin SLAC linac kiihdyttää elektroni- tai positroni-suihkun vaadittaviin energioihin. Elektronisuihkulle vaadittava energia on $9,0 \text{ GeV}$ ja positronisuihkulle $3,1 \text{ GeV}$. Tämän jälkeen kiihdytetyt hiukkassuihkut varastorengaseseen PEP-II. [19]

PEP-II koostuu kahdesta varastorengasta, High Energy Ring (HER), johon elektroni-suihku ohjataan, ja Low Energy Ring (LER), johon positronisuihku ohjataan. Näissä varastorengasissa elektroni- ja positronisuihkua kiihdytetään vastakkaisiin suuntiin. Hiukkassuihkujen törmäyskohta on BaBar-detektorissa. [19]



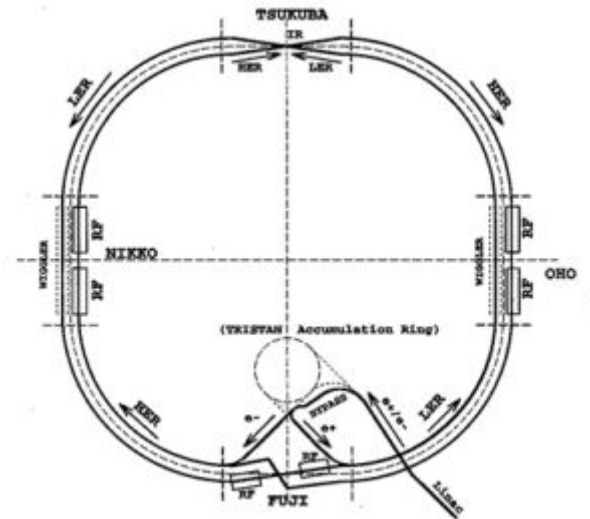
Kuva 4.1.2. BaBar-havaintsimen rakenne. [19]

Kiihdytetyt hiukkaset törmäävät hiukcashavaintsimessa, jolloin SVT (Silicon Vertex Tracker), joka sijaitsee detektorin keskellä, pystyy kertomaan tarkan tiedon hiukkasten paikasta. Lisäksi SVT on detektorin ainoa jäljitin hiukkasille, joilla on matala energia. Tämän jälkeen DCH (Drift Chamber) toteuttaa päämittaukset varattujen hiukkasten liikemäärästä ja auttaa hiukkasten tunnistamisessa. DIRC (Detector of Internally Reflected Cherenkov radiation) tunnistaa varatut hadronit Cherenkovin säteilyn avulla, kuten LHCb:ssä. EMC (Electromagnetic Calorimeter) eli sähkömagneettinen kalorimetri tunnistaa elektronit, neutraalit sähkömagneettiset hiukkaset sekä hadronit. Solenoidi tuottaa magneettikentän, jonka voimakkuus on $1,5 T$. Magneettikenttä vaaditaan varauksien sekä liikemäärien tunnistamiseksi. Myonien ja neutraalien hadronien tunnistamisesta vastaa IFR (Instrumented Flux Return). BaBar-havaintsimen rakenne on kuvattu Kuvassa 4.1.2. [19]

4.2 Belle-koe

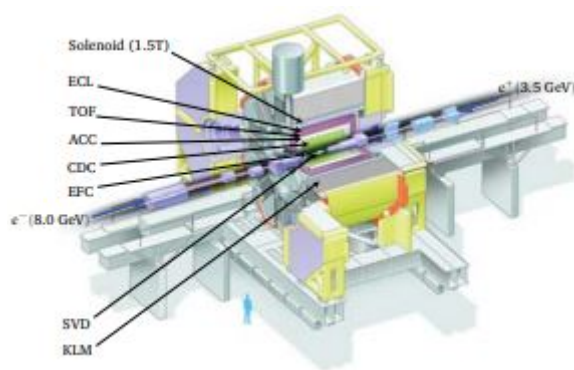
Belle-kokeessa törmäytettiin myös elektroneja ja positroneja, kuten BaBar-kokeessa. Belle-koe toteutettiin KEK B-laitoksessa, Japanissa. [21] Belle-kokeen tarkoitus on tuottaa suuri määrä $B^0\bar{B}^0$ - ja B^+B^- -mesoneja eli kyseessä oli niin sanottu B tehdas, mesonitehdas. Belle-koe koostuu KEK B-törmäyttimestä sekä Belle-havaintsimesta.

4.2.1 KEK B-törmäyttimen ja Belle-havaintsimen rakenne



Kuva 4.2.1. KEK B-törmäyttimen rakenne. [22]

KEK B-törmäytin koostuu kahdesta varastorenkaasta, Low Energy Ring (LER) ja High Energy Ring (HER), BaBarin tavoin. Tämä voidaan havaita Kuvasta 4.2.1. Positronisuihkulla on LER-varastorenkaassa energia $3,5 \text{ GeV}$, joka on hieman suurempi kuin BaBar-kokeessa. Elektronisuihkun energia HER-varastorenkaassa on $8,0 \text{ GeV}$, mikä on puolestaan noin 1 GeV matalampi energia kuin elektronisuihkulla on BaBar-kokeessa. BaBar-kokeen sekä KEK B:n rakenne muistuttavat toisiaan. [19], [22]



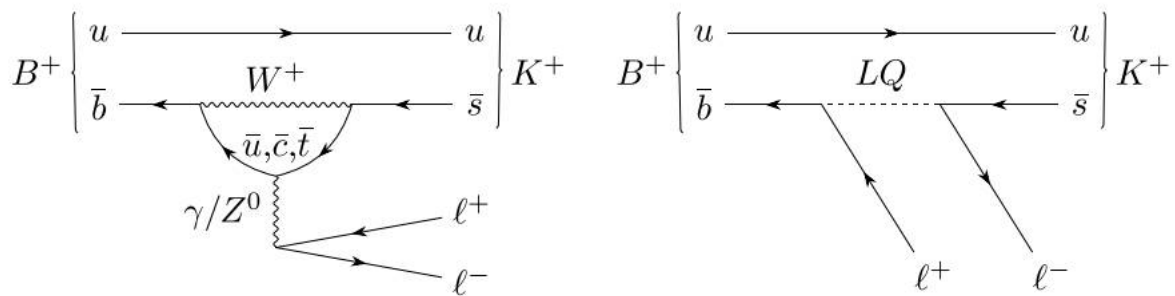
Kuva 4.2.1. Belle-havaintsimen rakenne. [22]

KEK B:llä on yksi kohta, jossa kiihdytetyillä hiukkasilla on mahdollista törmätä. Tähän kohtaan on sijoitettu Belle-havaintsin. Belle-havaintsin koostuu pienemmistä havaintsimista sekä suprajohtavasta solenoidimagneetista, joka tuottaa $1,5 \text{ T}$ suuruisen magneettikentän. Nämä sekä muut pienemmät havaintsimet ovat kuvattu Kuvassa 4.2.1. Pienempiä havaintsimia Belle:ssä ovat siis SVD (Silicon Vertex Detector), CDC (Central Drift Chamber), ACC CC (Aerogel Cerenkov Counter), TOF (Time Of Flight), ECL (Electromagnetic Calorimeter), EFC (Extreme Forward Calorimeter), EFC (Extreme Forward Calorimeter) ja KLM (K-long and Muon). SVT sijaitsee lähimpänä hiukkasten törmäyskohtaa, mikä takaa sen, että

CDC pystyy suorittamaan mittauksia hiukkasten eri ominaisuuksista. CDC mittaa varattujen hiukkasten ratoja, liikemääriä sekä energiahäviötä törmäyksessä syntyvien hiukkasten tunnistamiseksi. Törmäyksessä syntyvistä hiukkasista ACC pystyy erottaamaan kaonit pioneista. TOF puolestaan mittaa aikaa, mikä hiukkasilla on kulunut törmäyskohdasta muovis-kintillaattoriin. TOF:lla mitattua aikaa käytetään myös hiukkasten tunnistamiseen CDC:n tavoin. Sähkömagneettinen kalorimetri ECL koostuu CsI(Tl) kiteistä ja se mittaa fotoneja sekä joskus elektronejakin. EFC on ECL:n tavoin sähkömagneettinen kalorimetri, mutta se on sijoitettu hyvin lähelle tyhjiöputkea. EFC:tä käytetään fotonien sekä elektronien havaitsemiseen. KLM sijaitsee Belle-havaintsimien ulkosyrjällä. Sen tarkoitus on havaita K_L - ja μ -hiukkasia, jotka liikkuvat havaintsimessa aikaisemmin mainittujen pienempien havaintsimien läpi. [22]

5 Tutkimustulokset

Jotta päästään käsittelemään tutkimustuloksia tulee ensin ymmärtää, miten käsiteltäviä diagrammeja luetaan sekä mitä pohja-kvarkillisen mesonin hajoamisessa tapahtuu. Nämä voidaan selittää alla olevan kuvan 5.1. avulla, joka koostuu kahdesta Feynmanin diagrammistä. Näissä diagrammeissa aika kulkee vasemmalta oikealle. Siis materian nuoli kulkee ajan suuntaisesti, jolloin antimaterian nuoli kulkee aikaa vasten eli oikealta vasemmalle. Vasemmanpuoleinen diagrammi kuvaa B^+ -mesonin hajoamisen sekä sen vaiheet ja oikeanpuoleinen diagrammi selittää mahdolliset poikkeavuudet tarkasteltavan mesonin tutkimustuloksissa.



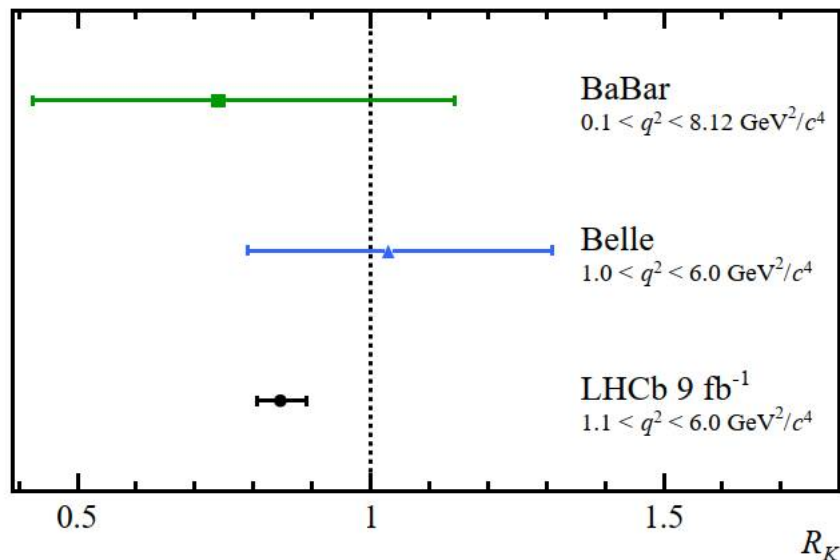
Kuva 5.1. Feynmannin diagrammi B^+ -mesonille. [1]

Käsitellään ensin vasemmanpuoleinen diagrammi. Kyseisestä Feynmanin diagrammista nähdään, että B^+ -mesoni koostuu anti-pohja-kvarkista (\bar{b}) sekä ylös-kvarkista (u). Nämä hajoavat leptonipariksi ja positiiviseksi kaoniksi (K^+), joka koostuu anti-ou-to-kvarkista (\bar{s}) sekä ylös-kvarkista. Leptonipariin hajoaminen tapahtuu siten, että B^+ -mesonin anti-pohja-kvarkki muuttuu joko anti-huippu- (\bar{t}), anti-lumo- (\bar{c}) tai anti-ylös-kvarkiksi (\bar{u}). Samaan aikaan, kun joku kolmesta edellä mainitusta anti-kvarkista syntyy, niin syntyy heikko mittabosoni W^+ , jonka syntynyt anti-kvarkki absorboi välittömästi. Absorption myötä syntyy anti-ou-to-kvarkki \bar{s} . Tämän jälkeen emittoituu joko neutraali heikko mittabosoni Z^0 tai foton γ , joka materialisoituu leptonipariksi (l^+l^-). Syntyvä leptonipari voi olla joko elektroni-positroni-pari (e^-e^+) tai myoni-antimyoni-pari ($\mu^-\mu^+$). Mahdollisia leptonipareja, joiksi pohja-kvarkillinen mesoni voi hajota, on siis kaksi. Tämä johtuu siitä, että emittoituva foton tai neutraali mittabosoni ei välitä leptoniparin laadusta neutraalin varauksensa takia. [1], [2]

Pohja-kvarkillisen mesonin hajoamisen tutkimisessa on huomattu kuitenkin poikkeavuus leptonien yleislajisuudessa. Toisin sanoen elektroni-positroni- sekä myoni-antimyoni-parien esiintymistodennäköisyyksissä ja esiintymisissä. Tämä tarkoittaa sitä, leptonien yleislajisuudessa on siis havaittu poikkeama. Koska standardimalli tukee sekä on perustana leptonien yleislajisuudelle, mutta tässä yleislajisuudessa on havaittu poikkeama, voidaan tehdä päätelmä, että standardimalli ei tue kyseistä poikkeamaa.[1] Tämä pitää paikkaansa, sillä saatujen tutkimustuloksien yhteensopivuus standardimallin kanssa on todennäköisyydeltään vain 0,1%. [2]

Oikeanpuoleisessa diagrammissa B^+ -mesonin ylös-kvarkki muuttuu positiivisen kaonin ylös-kvarkiksi. Kuitenkin vasemmanpuoleisen diagrammin niin sanottu pingviinidiagrammi, joka sisältää anti-kvarkkien \bar{u} , \bar{c} , \bar{t} , positiivisen mittabosonin absorbtion sekä fotonin tai neutraalin mittabosonin emittoitumisen ja materialisoitumisen, on oikeanpuoleisessa diagrammissa ”korvattu” hiukkasella LQ eli leptokvarkilla. Leptokvarkki on hypoteettinen hiukkanen, joka ei kuulu standardimalliin. Teoriassa tämä kyseinen hiukkanen käyttäytyisi eri tavalla riippuen siitä, onko kyseessä elektronit vai myonit. Toisin sanoen leptokvarkki käyttäytyisi eri tavalla silloin, kun pohja-kvarkillisen mesonin hajoamisessa syntyy leptonipariksi elektroni-positroni-pari tai myoni-antimyoni-pari. Tämä hypoteettinen hiukkanen voisi mahdollisesti selittää havaitun poikkeman leptonien yleislajisuudessa. [1]

Eri leptoniparien syntymistä ja niiden suhdetta voidaan havainnollistaa suhteella R_K . [2] Mikäli suhde R_K on arvoltaan 1, tarkoittaisi tämä sitä, että elektroni-positroni- ja myoni-antimyoni-pareja syntyy yhtä paljon. Suhde R_K on määritelty siis siten, että sen ollessa < 1 myoni-antimyoni-pareja syntyy vähemmän kuin elektroni-positroni-pareja. Kuitenkin ollaan havaittu ettei näin ole ja tämä voidaan selvästi huomata alla olevasta kuvasta. [1]



Kuva 5.2. R_K -mittausten vertailukaavio, jossa q^2 kuvaa leptoniparin invariantin massan neliötä. [1]

Kuvassa 5.2. on LHCb:n tutkimustuloksien lisäksi vertaukseksi laitettu BaBar-mittaukset sekä Belle-koee. [1] Belle-kokeessa leptoniparien, elektroni-positroni- ja myoni-antimyoni-parien, syntymiselle ollaan saatu lähelle standardimallin arvoa eli suhde R_K on lähes yksi. [21]

Kuitenkin kuvasta 5.2. nähdään, että Belle:llä saadulla arvolla on suuret virherajat. Toisin sanoen suhteen R_k arvo ei ole kovin luotettava. [1], [22] Kuvasta 5.2. nähdään myös se, että BaBar-kokeessa suhde $R_k < 1$, joten leptonipareja ei synny yhtä paljon. Leptonien yleislajisuudessa on havaittu siis poikkeamia myös BaBar-kokeessa. [1]

6 Johtopäätelmät ja yhteenveto

Pohja-kvarkillisen mesonin hajoaminen on monivaiheinen prosessi, jonka odotetaan hajoavan kahdeksi leptonipariksi standardimallin sekä leptonien yleislajisuuden nojalla. Kuitenkin tutkimuksessa [1] on havaittu poikkeama edellä mainitussa leptonien yleislajisuudessa. Tämä poikkeama on merkittävän suuri. Toisin sanoen todennäköisyys sille, että standardimalli tukee saatuja tutkimustuloksia on vain 0,1%. Tämä viittaisi siihen, että olisi olemassa jokin uusi perusvuorovaikutus jo tunnettujen gravitaation, sähkömagneettisen, heikon sekä vahvan vuorovaikutuksen lisäksi. Tämä uusi perusvuorovaikutus voisi mahdollisesti mullistaa nykyisen standardimallin, mikäli se ei pystyisi vastaamaan uuteen mahdolliseen vuorovaikutukseen. [1], [2] Tuntuu kuitenkin oudolta, ettei jotain uutta perusvuorovaikutusta oltaisi havaittu ennen pohja-kvarkillisen mesonin hajomiseen liittyvää tutkimusta. Fysiikassa on kuitenkin tehty hyvin monipuolisesti erilaisia tutkimuksia, joiden yhteydessä oltaisi voitu havaita viitteitä tästä mahdollisesta uudesta perusvuorovaikutuksesta. Toisaalta Johdanto-kappaleessa kerrottiin, ettei standardimalli osaa vastata kaikkiin kysymyksiin, joita meillä on universumista. Poikkeukset pohja-kvarkillisen mesonin hajoamisessa voitaisiin perustella siis standardimallin puutoksilla. Voitaisiin siis päätellä, että mikäli olisi jokin uusi perusvuorovaikutus, joka johtuu leptonien yleislajisuuden laiminlyönnistä, niin sitä ei voida selittää nykyisellä standardimallilla. Tämä tarkoittaisi sitä, että standardimallia tulisi laajentaa, muokata jotenkin muuten tai fysiikan näkökulmasta erityisesti mielenkiintoiselta kannalta, laittaa koko standardimalli uusiksi.

Johdanto-kappaleessa pohdittiin, voisiko pohja-kvarkillisen mesonin hajoamisessa havaitut poikkeavuudet vastata, esimerkiksi seuraaviin kysymyksiin: mitä on pimeä aine, miksi universumin laajeneminen kiihtyy ja selittääkö jokin hiukkanen gravitaatiovuorovaikutuksen. Tutkimuksen [1] pohjalta on vaikea antaa, mitään vastausta edellä mainittuihin kysymyksiin. Tämä johtuu siitä, että tarkasteltavan tutkimuksen päämäärä ei ollut selvittää tai vastata kyseisiin kysymyksiin. Kuitenkaan mikään ei sulje pois sitä mahdollisuutta, että pohja-kvarkillisen mesonin tutkimuksen tuloksien avulla saataisiin vastauksia, kysymyksiin joihin standardimalli ei osaa vielä vastata.

Standardimalli koostuu eri hiukkasista, jotka voidaan jakaa kvarkkeihin, leptoneihin, mittabosoneihin sekä Higgsin bosoniin. Pohja-kvarkillisen mesonin B^+ kannalta tärkeimmät standardimallin hiukkaset ovat myoni, antimyoni, elektroni, positroni sekä alas-, outo-, antiylös-, antihuippu-, antilumo- antipohja-kvarkki, positiivinen sekä neutraali mittabosoni ja fotoni. Pohja-kvarkillisen mesonin odotetaan hajoavan samalla todennäköisyydellä kahdeksi eri leptonipariksi, myoni-antimyoni- ja elektroni-positroni-pariksi. Näin ei kuitenkaan ole ja tämä havaittiin suhteen R_k avulla sekä poikkeuksena leptonien yleislajisuudessa. Saadut tulokset viittaavat uuteen löytämättömään perusvuorovaikutukseen tai leptokvarkin olemassaoloon. [1], [5] Edellisessä kappaleessa pohdittiin uuden perusvuorovaikutuksen vaikutuksia standardimalliin. Nyt voidaan pohtia siis leptokvarkin vaikutuksia. Kuten Tutkimustulokset-kappaleessa mainittiin, leptokvarkki on hypoteettinen hiukkanen, mikä ei sisälly standardi-

malliin. Voidaan kuitenkin pohtia, että selittäisikö leptonien yleislajisuuden poikkeavuudet pohja-kvarkillisen mesonin hajoamisessa leptokvarkin olemassa olon. Mikäli poikkeavuudet leptonien yleislajisuudessa selittäisivät leptokvarkin olemassa olon, voisi tämä ilmiö sisällyttää myös kyseisen hiukkasen standardimalliin. Tämä kuitenkin vaatisi mahdollisesti standardimallin muokkaamista sekä useita lisätutkimuksia. Lisätutkimuksia vaaditaan useita, sillä kyseessä on mahdollisesti suuria muutoksia fysiikassa, jotka voivat muokata nykyistä fysiikan tietämystämme radikaalisti.

Lähdeluettelo

- [1] Collaboration; Lhcb: *EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH (CERN) Test of lepton universality in beauty-quark decays*, arXiv:2103.11769, 1-36 (2021)
- [2] SCNAT. 23.3.2021. *Recent Results from LHCb Challenge Leading Theory in Physics*. https://scnat.ch/de/uuid/i/32d1743f-ef31-5b14-aa4f-43e491e36e8d-Recent_Results_from_LHCb_Challenge_Leading_Theory_in_Physics
- [3] Oscar Miyamoto Gomez. 18.10.2018. *Five mysteries the Standard Model can't explain*. Symmetry Magazine. <https://www.symmetrymagazine.org/article/five-mysteries-the-standard-model-cant-explain>
- [4] Minna Patanen: *Ydin- ja hiukkasfysiikka (766344A) luentomateriaalit; Lisämateriaalit*, 2021
- [5] Minna Patanen: *Ydin- ja hiukkasfysiikka (766344A), Luentomuistiinpanoja*, 67-79 (17.3.2020)
- [6] P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2020, 083C01 (2020).
- [7] U.C. Tsan.: *What is a matter particle ?*, International Journal of Modern Physics E, World Scientific Publishing, 2006, 15, pp.259-272. [ff10.1142/S0218301306003916](https://doi.org/10.1142/S0218301306003916). [ffin2p3-00025093f](https://doi.org/10.1142/S0218301306003916)
- [8] CERN. n.d. *The Large Hadron Collider*. (Viitattu 2.3.2022). <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>
- [9] Education; Communications and Outreach Group. February 2017. *LHC the guide*. CERN-Brochure-2017-002-Eng. https://home.cern/sites/home.web.cern.ch/files/2018-07/CERN-Brochure-2017-002-Eng_0.pdf
- [10] R. Seppänen, L. Mannila, M. Kervinen, I. Parkkila, P. Konttinen, L. Karkela, T. Ylikokko: *MAOL taulukot* Otava. (2015)
- [11] CERN. n.d. (Viitattu 4.3.2022). *ALICE*. <https://home.cern/science/experiments/alice>
- [12] CERN. (Viitattu 4.3.2022). *ATLAS*. <https://home.cern/science/experiments/atlas>
- [13] Minna Patanen: *Ydin- ja hiukkasfysiikka (766344A), Luentodiat; Luento 9* (2021)
- [14] CERN. 2022. *LHCb*, <https://home.cern/science/experiments/lhcb>
- [15] CERN, LHCb Experiment. 2008. *The LHCb Detector*, <https://lhcb-public.web.cern.ch/en/detector/Detector-en.html>
- [16] The LHCb collaboration: *EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH (CERN) Measurement of the lifetime of the B_c^+ meson using the $B_c^+ \rightarrow J/\psi\pi^+$ decay mode*, *Phys. Lett. B* 742, 29-37 (2015)

-
- [17] Sarah Charley. 02.02.2021. *What is luminosity?*. Symmetry Magazine. <https://www.symmetrymagazine.org/article/what-is-luminosity>
- [18] The BaBar Collaboration: *Evidence for an excess of $\bar{B} \rightarrow D^{(*)}\tau^-\bar{\nu}_\tau$ decays*, Phys. Rev. Lett. 109, 101802 (2012)
- [19] SLAC. (Viitattu 24.02.2022) *The BABAR Detector*. https://www-public.slac.stanford.edu/babar/The_BaBar_Detector.htm
- [20] B. Aubert, R. Barate, D. Boutigny ym.: *The BaBar detector: Upgrades, operation and performance*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 729, 615-701 (2013)
- [21] The Belle Collaboration: *Test of lepton-flavor universality in $B \rightarrow K^+l^+l^-$ decays at Belle*, Phys. Rev. Lett. 126, 161801 (2021)
- [22] Remi Louvot. January 2008 *Study of the Decay $B_s \rightarrow D_s\pi$ and Search for $B_s \rightarrow D_sK$ in e^+e^- Annihilation at $\sqrt{s} \sim 10.87$ GeV with the Belle Detector*. Viitattu 04.03.2022. <https://belle.kek.jp/belle/theses/master/2008/dipl.rl.pdf>