

Untersuchung der CP Verletzung beim Zerfall von B^0 und \bar{B}^0 Mesonen im Belle II Detektor

Besondere Lernleistung im Fach Physik

Fachlehrer : Herr Steffen Einhorn

externer Betreuer : Herr Jan-Eric Nitschke

vorgelegt von : Julien Kaden

Abgabedatum : 20.12.2019

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	KEK Forschungszentrum	4
2.1	Geschichte	5
2.1.1	KEK-PS	5
2.1.2	Photon Factory	6
2.1.3	TRISTAN	6
2.1.4	KEKB	7
2.2	SuperKEKB	8
2.2.1	Elektronen-Positronen Quelle	8
2.2.2	Beschleunigungsverfahren	9
2.3	Physik Programm/Forschung	11
2.3.1	theoretische Grundlagen	12
2.3.1.1	Standardmodell	12
2.3.1.1.1	geschichtlicher Hintergrund	12
2.3.1.1.2	Elementarteilchen	12
2.3.1.1.3	Wechselwirkungen/Austauschteilchen	12
2.3.1.1.4	ungeklärte Fragen	13
2.3.1.2	Antimaterie	14
2.3.1.2.1	geschichtlicher Hintergrund	14
2.3.1.2.2	Antimaterie	15
2.3.1.3	Antimaterie- Materie Asymmetrie	15
2.3.1.3.1	CP-Verletzung	16
3	Belle II Detektor/Experiment	17
3.1	Detektoraufbau und Teilchenidentifikation	17
3.1.1	Vertex Detector	17
3.1.2	zentrale Driftkammer	19
3.1.3	Time-Of-Propagation Zähler und ARICH	19
3.1.4	elektromagnetisches Kalorimeter ECAL	20
3.1.5	Kaonen-Myonen Detektor KLM	21
3.2	Datenanalyse	22
3.2.1	Trigger- und Datenerfassungssystem DAQ	22
3.2.2	Computing	23
4	eigene Datenanalyse	23
4.1	Belle II Masterclass	23
4.1.1	Daten von Belle II	23

4.1.2	Aufbau der Anwendung	24
4.1.2.1	Kombination der Blöcke	27
4.1.3	Analyse der Zerfälle der B Mesonenpaare	29
4.1.3.1	Mesonen	29
4.1.3.2	B Mesonen - Entstehung und Zerfälle	29
5	Ergebnisse der letzten Jahre	40
6	Prognose	40
7	Quellen	41
7.1	Fachliteratur	41
7.2	Internetquellen	41
A	Anhang	51

1 Einleitung

Wir existieren. Nach bisherigem Kenntnisstand ist diese Aussage widersprüchlich. Wir nehmen an, dass beim Urknall Materie und Antimaterie zu exakt gleichen Teilen entstanden sind. Da sich Antiteilchen und Teilchen anihilieren, wenn sie zusammentreffen, hätten sich die Mengen gegenseitig auslöschen müssen. Da wir nun aber leben und unsere Welt beobachten können, wissen wir auch, dass alles in unserem Universum aus Materie aufgebaut ist. Das bedeutet, dass es etwas geben muss, was uns den Symmetriebruch erklärt.

Die Motivation in dieser BeLL liegt in meinem großen Interesse an Teilchenphysik. Mein damaliger Physiklehrer Herr Einhorn, weckte dieses Interesse und stieß mich auf das NETZWERK TEILCHENWELT. Eine Organisation, die es Schülern ermöglicht, mehr über Kern- und Teilchenphysik zu erfahren. Daraufhin besuchte ich eine sogenannte Masterclass in Dresden zum Thema *hands on particle physics*. Dort wurde mir das Netzwerk Teilchenwelt mit seinen vielfältigen Möglichkeiten direkt vorgestellt. Später habe ich selber bei solchen Veranstaltungen mitgeholfen, Praktika im Institut für Kern- und Teilchenphysik durchgeführt und in meiner Schule eine Präsentation zum Standardmodell gehalten. Weiterhin wurde mir im Rahmen der CERN-Workshops eine dreitägige Exkursion zum CERN ermöglicht. Ich wollte mich nun weiterhin damit auseinandersetzen, indem ich eine Besondere Lernleistung schreibe, über das Thema, welches ich am spannendsten finde: Die Asymmetrie zwischen Antimaterie und Materie. In dieser Besonderen Lernleistung werde ich auf das japanische KEK Forschungszentrum und den Teilchenbeschleuniger SUPERKEKB eingehen. Das dortige BELLE II Experiment beschäftigt sich mit der oben erwähnten Frage, indem man nach bestimmten Phänomenen der Teilchenphysik sucht, die möglicherweise auf einen kleinen Unterschied zwischen Materie und Antimaterie zurückzuführen sind. Dazu durfte ich eine BELLE II Masterclass durchführen. Diese wird jedoch noch nicht in Deutschland durchgeführt, deshalb bekam ich von tschechischen Wissenschaftlern die Instruktionen, Datenpakete von BELLE II und das Programm für die Analyse. Damit suche ich nach bestimmten Zerfällen von Teilchen, die die CP Symmetrie verletzen und eine Teilerklärung für diese Asymmetrie von Antimaterie und Materie liefern können.

2 KEK Forschungszentrum

KEK (kou enerugi kasokuki kenkyu kikou) ist das japanische Forschungszentrum für Hochenergiephysik in Tsukuba, circa 60 km nördlich von Tokio. Dort beschäftigen sich Physiker mit grundlegenden Fragen der Kern- und Teilchenphysik, der Forschung im Bereich der Material- und Biowissenschaften und der Entwicklung von

Beschleunigerkomponenten wie beispielsweise Hohlraumresonatoren.¹

2.1 Geschichte

Ab 1945 wurde Japan die Forschung in Kern- und Teilchenphysik von den Alliierten bis 1950 verboten, um die Entwicklung von Atomwaffen zu verhindern. Dieser Beschluss hatte die Demontage jedes Zyklotrons in Japan zur Folge. Mit der Unabhängigkeit 1952 wurde die Arbeit und die Forschung in der Teilchenphysik wieder aufgenommen. 1955 wurde der erste Teilchenbeschleuniger, der Electron Synchrotron (ES), unter dem neu gegründeten INS (INSTITUTE OF NUCLEAR STUDY) an der Universität Tokio gebaut, welcher Kollisionsenergien bis zu 1,3 GeV erreichte. Aus der 1964 gegründeten Arbeitsgruppe zur Gründung eines neuen Forschungsinstituts für Elementarteilchenphysik ging erst 1971 das von der japanischen Regierung genehmigte NATIONAL LABORATORY FOR HIGH ENERGY PHYSICS (KEK) hervor.

2.1.1 KEK-PS

Der erste dortige Beschleuniger wurde 1966 gebaut. Der Proton Synchrotron (PS) wurde 1977 fertiggestellt. Ursprünglich sollte der KEK-PS eine Energie von 40 GeV erreichen, doch die japanische Regierung konnte nicht die dafür benötigten 30 Billionen Yen zur Verfügung stellen, deshalb erreichte er nur eine Energie von bis zu 12 GeV. Mit drei Vorbeschleunigern wurde diese Energie stufenweise erhöht. An erster Stelle stand ein COCKCROFT-WALTON Beschleuniger², der die Protonen auf 40 MeV brachte, bevor sie in einen Linearbeschleuniger LINAC und dem letzten Vorbeschleuniger, dem Booster Synchrotron, eingespeist wurden, der die Protonen auf 500 MeV führte. Die Endenergie von 12 GeV erreichten die Protonen im 339 m langen Hauptring KEK-PS. Der KEK-PS, bis dahin der einzige Beschleuniger in Japan mit dieser Energie, diente zur Untersuchung seltsamer Materie. Seltsame Materie enthält ein strange Quark oder ein antistrange Quark und wird aufgrund seiner Eigenschaften als seltsam bezeichnet. Sein Nachfolger ist der 2001 gebaute Protonenbeschleuniger J-PARC, der bis heute in Kooperation mit dem japanischen Atomenergieministerium Protonen bis zu 50 GeV beschleunigt. Dabei erzeugt er Sekundärstrahlen, die für die dortige Material- und Biowissenschaften genutzt wird.

¹Hohlraumresonatoren sind spezielle Bauteile, in denen eine stehende elektromagnetische Welle ausgebildet wird. Es kommt zur Resonanz und Teilchen, die das elektrische Feld in der richtigen Mode durchlaufen, werden beschleunigt

²Cockcroft-Walton-Beschleuniger sind Beschleuniger, die in einem vakuumierten Rohr zwischen zwei Potentialringen ein zeitlich konstantes elektromagnetisches Feld in Längsrichtung aufbauen und damit ein Teilchen beschleunigen können. In heutigen Beschleunigern spielen sie kaum noch eine Rolle.

2.1.2 Photon Factory

Die Photon Factory (PF) betreibt einen 187 m langer Speicherring, welcher 1982 fertiggestellt wurde. Er beschleunigt Elektronen bis zu einer Energie von 2,5 GeV. Und einen zweiten Speicherring (PF-AR), der Elektronen bis zu 6,5 GeV beschleunigt und damit Synchrotronstrahlung des breiten Spektrums von Vakuum-UV Strahlen mit einer Wellenlänge von 315nm bis Röntgenstrahlung mit einer Wellenlänge von 10pm [1] erzeugen kann. Synchrotronstrahlung besteht aus hochenergetischen Photonen, die tangential zur Bewegungsrichtung emittiert werden, wenn sich geladene Teilchen auf einer Kreisbahn nahe der Lichtgeschwindigkeit bewegen. Mit 40 Experimentstationen rund um den PF und PF-AR wird diese Synchrotronstrahlung untersucht, indem sie auf bestimmte Targets gelenkt wird. Diese können Proteine oder bestimmte Verbindungen sein, bei denen die Kristallstruktur, Spinzustände, Valenzzustände oder chemische Bindungen dieser verändert und damit untersucht werden sollen. Auch heute noch ist die Photon Factory in Betrieb und forscht weiterhin an den Auswirkungen der Synchrotronstrahlung auf lebende und nichtlebende Objekte. In Abbildung 30 im Anhang sieht man die schematische Darstellung der Targets der Synchrotron-Experimente.

2.1.3 TRISTAN

Zeitgleich mit der Photon Factory plante man den Elektronen-Positronen Beschleuniger TRISTAN. Ein LINAC beschleunigte Elektronen auf 200 MeV und leitete sie auf ein Tantal-Target. Die daraus resultierenden Positronen wurden zusammen mit den verbliebenen Elektronen mittels einem weiteren LINAC Beschleuniger auf 2,5 GeV gebracht, bevor sie in den TRISTAN ACCUMULATION RING weiter auf 8 GeV gebracht wurden. Der 377 m lange TRISTAN-AR diente zur Vorbeschleunigung für den 3 km langen TRISTAN MAIN-RING, in dem die Elektronen und Positronen in entgegengesetzten Richtungen ihre Endenergie von je 32 GeV erreichten. Nachdem 1973 Makoto Kobayashi und Toshihide Maskawa ihre Arbeit zur CP-Verletzung veröffentlichten, musste man zur Bestätigung dieser Theorie die beiden letzten fehlenden Quarks der dritten Generation - das Top Quark und Bottom Quark nachweisen. Dies geschah 1977 am Fermilab in den USA. Die Arbeiten zum Nachweis des fehlenden Top Quarks begannen mit dem Bau des TRISTAN-Komplexes, der eine Energie von 32 GeV + 32 GeV erreichen sollte. Obwohl der zur Verfügung stehende Baugrund nicht groß genug erschien, begann man 1981 mit den Bauarbeiten. Fünf Jahre später, nach der Fertigstellung und Inbetriebnahme führte man die Experimente zum Nachweis des Top Quarks durch. Ende der 1980er Jahre stellte sich heraus, dass die erst angenommene Masse des Top Quark viel zu klein war und weit über dem Energiebereich des TRISTAN Beschleunigers lag. Daher stellte man 1995 nach der Entdeckung des

Top Quark mit einer Masse von $173,1 \frac{\text{GeV}}{c^2}$ am Tevatron Beschleuniger die Suche ein. Eine schematische Darstellung des KEKB ist dem Anhang in Abbildung 31 beigefügt.

2.1.4 KEKB

Das Nachfolgeprojekt des TRISTAN Komplexes war ein Beschleuniger asymmetrischer Energien. Schon 1994 begannen die Umbauarbeiten des TRISTAN Beschleunigers. Das Besondere an diesem Projekt war nicht höhere Energien zu erzielen, sondern die Spezialisierung von Beschleuniger und Detektor auf die Produktion einer bestimmten Teilchenart, den B-Mesonen. Dazu wurden die beiden LINAC Beschleuniger, die vorher als Vorbeschleuniger für den TRISTAN-MR dienten, so umgerüstet, dass sowohl Elektronen als auch die Positronen schon in diesem ihre Endenergien erreichten und in den 3 km langen Speicherring eingespeist werden konnten. Dabei wurden die Elektronen, die auf 8 GeV beschleunigt wurden, in den HIGH ENERGY RING (HER) eingespeist, während die Positronen mit nur 3,5 GeV in den LOW ENERGY RING (LER) geleitet wurden. Diese zwei Ringe wurden 1998 fertiggestellt. Eine technische Besonderheit bieten die Linerbeschleuniger am Anfang des Komplexes. Aus Platzmangel musste man einen Teil des LINAC um 180° drehen. Daher mussten die Elektronen bei einer Energie von 1,7 GeV umgelenkt werden.

Aufgrund der Seltenheit der CP-Verletzung im B-Mesonen System muss eine hohe Luminosität³ gegeben sein, damit man genug Zerfälle dieser Art beobachten, dokumentieren und analysieren kann. Mit $2,108 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (2009) besaß der KEKB die höchste Luminosität seiner Zeit. Die Vermessung und Beobachtung der CP-Verletzung wurde durch den BELLE DETEKTOR realisiert.

Noch bevor der KEKB offiziell in Betrieb genommen wurde, bemerkte man eine Instabilität des Elektronen Strahls im HER, der auf entstehende Synchrotronstrahlung zurückzuführen war. Diese ionisierte die Oberfläche des Strahlrohrs, wodurch eine Elektronengaswolke entstand. Sie interagierte mit dem Strahl und brachte ihn so in eine Instabilität.

Mittels einer bestimmten Anordnung von Magnetspulen an jedem freien Stück des HER konnte die Synchrotronstrahlung unterdrückt werden. Der schematische Aufbau des KEKB ist in Abbildung 32 im Anhang dargestellt.

Mit dem Fortschreiten der Technologie konnte man eine noch höhere Luminosität erreichen, die zu einem besseren Verständnis der CP-Verletzung verhelfen kann. Deshalb wurde der Betrieb des KEKB-Beschleuniger Komplexes 2009 eingestellt. Ein Jahr

³“Luminosität gibt in der Beschleunigerphysik die Anzahl von Teilchenzusammenstößen in einer bestimmten Zeit pro Fläche an. Sie berechnet sich aus N_1 und N_2 (der jeweiligen Anzahl der Teilchen in einem Paket), der Wiederholrate der Kollisionen f pro Querschnittsfläche A des Überlapps der sich treffenden Pakete” [2]

$$L = \frac{N_1 \cdot N_2 \cdot f}{A}$$

vorher wurde mit der Aufrüstung begonnen, 2014 wurde das Projekt fertiggestellt und 2016 starteten die ersten Experimente mit dem SUPERKEKB-Beschleuniger.

2.2 SuperKEKB

Der SUPERKEKB Beschleuniger besitzt mit $8 \cdot 10^{35} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ die weltweit aktuell höchste Luminosität. Der Beschleunigerumfang beider Röhren beträgt ca. 3km. Damit kann man die CP-Verletzung im B-Mesonen System genauer beobachten, als es vorher der Fall war. Außerdem wurden Veränderungen an den zwei Ringen vorgenommen, sodass die Positronen auf eine Energie von 4 GeV und die Elektronen auf 7,007 GeV gebracht werden. So erreicht man in der Experimentierhalle in Tsukuba, an dem Ort wo sich die beiden Teilchenstrahlen überschneiden, eine Kollisionsenergie von $10,58 \frac{\text{GeV}}{c^2}$. Die ersten Teilchenkollisionen fanden am 26. April 2018 statt.

2.2.1 Elektronen-Positronen Quelle

Die Elektronen die zur Beschleunigung verwendet werden, erhält man durch Beschuss eines Metalls mit hochenergetischen Photonen, die mittels eines Hochfrequenzgenerators erzeugt werden. Hier bewirkt der photoelektrische Effekt das Herauslösen von Elektronen aus einer Metalloberfläche. Je höher die Energie der Photonen ist, desto größer ist die weitergegebene Energie und umso mehr Elektronen können das Atom verlassen. Neben diesen Verfahren wird gleichzeitig der glühelektrische Effekt ausgenutzt um freie Elektronen zu produzieren. Eine Glühkathode in einem Vakuum emittiert Elektronen bei einer bestimmten Temperatur (materialabhängig). Aufgrund der steigenden thermischen Energie, wird den gebundenen Elektronen kinetische Energie zugeführt. Wenn diese hoch genug ist können die Elektronen das Metall verlassen. Die Richardson Gleichung beschreibt diesen Effekt. Beim Verlassen werden sie mittels eines elektrischen Feldes in den LINAC injiziert.

Für die Gewinnung von Positronen wird ein Teil des bereits isolierten Elektronenstrahls, auf die Energie von 3,5 GeV beschleunigt und auf einen 14mm langen Wolfram Zylinder gelenkt. Der Elektronenstrahl hat eine Intensität von 10 nC , muss jedoch mithilfe eines *beam spoilers* (Graphit), 3m davor, auf 0,7 mm vergößert werden, weil sonst die von den Elektronen an den Wolfram Zylinder abgegebene Energie mit $35 \frac{\text{J}}{\text{g}}$ zu groß würde (siehe Diagramm Lagerungsdichte) und das Target zerstören könnte.

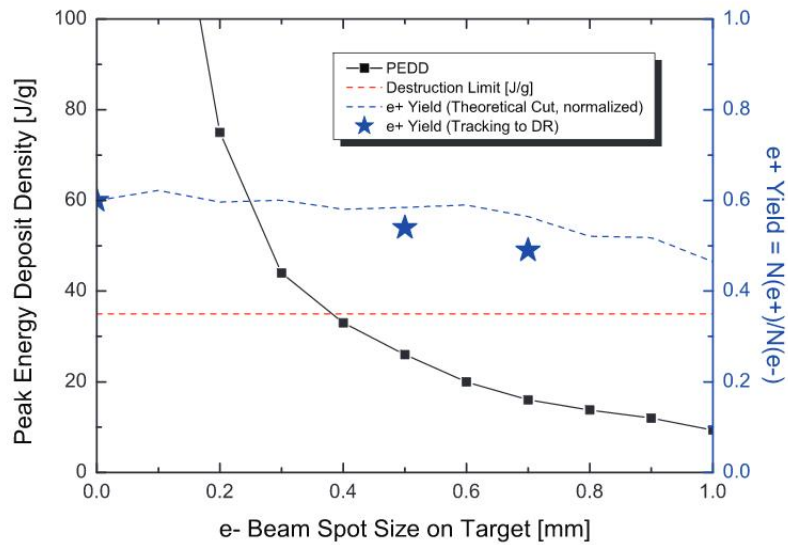


Abbildung 1: Diagramm Lagerunsdichte

Elektronen und Positronen werden ca. 30mm von der Strahlachse weggeführt um Anihilationen der beiden Teilchen zu vermeiden. Der Positronenstrahl wird in den *Large Aperture Capture Section* geleitet, wo die transversale Ausdehnung des Strahls reduziert wird und zuletzt in den *Positron damping ring*, wo die Emittanz des Strahles verringert wird. Der verbliebene Teil des Elektronenstrahls und die Positronen werden weiter im 600m langen LINAC beschleunigt. [3]

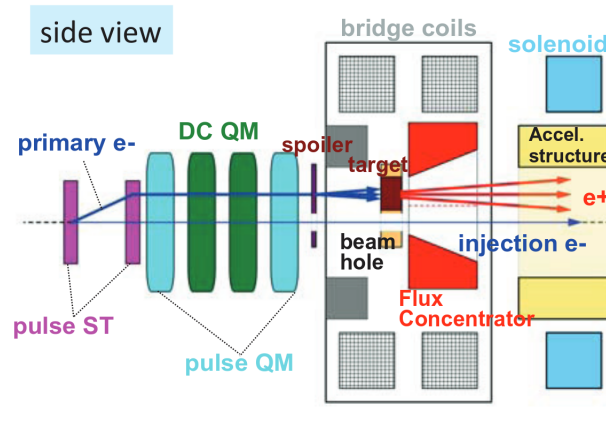


Abbildung 2: Positronenquelle

2.2.2 Beschleunigungsverfahren

Nachdem beide Teilchenstrahlen isoliert und fokussiert wurden, beschleunigt der LINAC-Beschleuniger die Positronen und Elektronen auf ihre jeweiligen Endenergien, mit denen sie dann in den LER beziehungsweise in den HER eingespeist werden. Bei einem LINAC-Beschleuniger gibt es unterschiedlich lange Driftröhren. Mit größerer Entfernung der Teilchenquelle nimmt die Länge dieser Driftröhren aufgrund der höher

werdenden Geschwindigkeit zu. Dabei liegt an diesen Röhren ein sich ständig änderndes elektrisches Feld an. Sobald ein Teilchen aus seiner Quelle in den LINAC kommt, liegt an der ersten Elektrode ein der Ladung des Teilchens entgegengesetztes elektrisches Feld an. Das Coulombsche Gesetz besagt, dass eine Kraft \vec{F} existiert, die auf zwei Punktladungen entweder abstoßend oder anziehend wirkt. In dem Fall ist diese Kraft anziehend, weil Teilchen und Potential der Driftröhre entgegengesetzt geladen sind. Sobald das Teilchen diese Elektrode passiert hat, wird mittels eines Hochfrequenzgenerators sofort das Potential der passierten Driftröhre umgepolt. So wirkt wieder eine Kraft \vec{F} . Weil Elektrode und Teilchen nun die gleiche Ladung haben, muss die Kraft abstoßend sein. Die Driftröhre vor dem Teilchen hat wieder die entgegengesetzte Ladung. So wird das Teilchen, auch mit kleinen Spannungen beschleunigt. Durch das Abstoßen der bereits passierten Elektrode und das Anziehen der kommenden Elektrode erreichen leichte Teilchen wie Elektronen oder Positronen schon nach geringer Zeit annähernd Lichtgeschwindigkeit. Im Falle des LINAC-Beschleunigers am SUPERKEKB nutzt man Klystrone und Mehrkammerklystrone (siehe Abbildung 33) zur Beschleunigung elektrisch geladener Teilchen. Sie erzeugen hochfrequente elektromagnetische Wellen, wie Mikrowellen, verstärken sie und halten sie in einem Hohlraumresonator gespeichert. So wird ein Teilchen, was die Mikrowellen in der richtigen Phase durchläuft, aufgrund des starken elektromagnetischen Wechselfeldes beschleunigt. Mit der Gesamtenergie der beiden Teilchen kurz vor der Kollision kann man die Geschwindigkeit errechnen, auf die sie gebracht werden. Die Energien wurden auf 4,0 GeV und 7,007 GeV bemessen. Die Gesamtenergie eines Teilchens setzt sich aus Ruheenergie und kinetischer Energie zusammen.

$$E = E_0 + E_{kin} \quad (1)$$

$$E_{Ges} = m \cdot c^2 + E_{kin} \quad (2)$$

Dabei ist die kinetische Energie die Differenz aus relativistischer Gesamtenergie und Ruheenergie.

$$E_{kin} = E_{Ges} - E_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot c^2 - m_0 \cdot c^2 \quad (3)$$

Durch Einsetzen der Formel (3) in Formel (2) entsteht die Gesamtenergie eines

Teilchens E_{Ges}

$$E_{Ges} = m \cdot c^2 + \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot c^2 - m_0 \cdot c^2 = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4)$$

Durch umstellen nach v erhält man

$$v = \sqrt{c^2 - \frac{(m_0 \cdot c^4)^2}{E_{ges}^2}} \quad (5)$$

Die Ruhemasse des Elektrons, sowie des Positrons beträgt $510,998 \cdot 10^3 \text{ eV}$. Elektronen werden auf $7,007 \text{ GeV}$ beschleunigt und Positronen auf $4,0 \text{ GeV}$. Somit erhält man für die jeweiligen Geschwindigkeiten:

$$v_{e^-} = \sqrt{1^2 - \frac{(510 \cdot 10^3 \text{ eV} \cdot 1^4)^2}{(7,007 \cdot 10^9 \text{ eV})^2}} = \underline{\underline{0.9999999974c}} \quad (6)$$

$$v_{e^+} = \sqrt{1^2 - \frac{(510 \cdot 10^3 \text{ eV} \cdot 1^4)^2}{(4,0 \cdot 10^9 \text{ eV})^2}} = \underline{\underline{0.9999999919c}} \quad (7)$$

Das zeigt die asymmetrischen Geschwindigkeiten, auf die die Teilchen gebracht werden, um die B^0 Mesonen zu produzieren. Wie genau der SUPERKEKB diese Teilchen produziert, erkläre ich im Punkt 4.1.3.2, wo ich auf die sogenannte B-Fabrik eingehe. Während des Ausbaus des KEKB - Beschleuniger wurde die Ausbreitung des Kollisionspunkt der Positronen und Elektronen extrem verkleinert, um die hohe Luminosität zu erreichen. Der jetzige *interaction point* hat eine Ausdehnung von 83 mrad . [4]

2.3 Physik Programm/Forschung

Die Forschung, die am SUPERKEKB betrieben wird, bezieht sich hauptsächlich auf Phänomene, die man mit dem Standardmodell nicht erklären kann. Die CP-Verletzung, die Suche nach exotischer Materie mit mehr als fünf Quarks und die Suche nach Dunkler Materie sind Teil des Physik Programmes des japanischen Forschungszentrum. Um diese Phänomene zu beobachten und zu untersuchen wurde der BELLE II DETEKTOR gebaut. Außerdem wird am KEK in der Material- und Biowissenschaft und Medizin geforscht.

2.3.1 theoretische Grundlagen

2.3.1.1 Standardmodell

2.3.1.1.1 geschichtlicher Hintergrund

Unser Universum besteht aus Elementarteilchen, die Atome bilden, die sich zu Molekülen verbinden. Moleküle verbinden sich zu Makromolekülen, welche schlussendlich Zellen zusammensetzen. Zellen sind dabei nach Definition die kleinste Einheit des Lebens. Sie schließen sich zu Gewebe zusammen, die Grundlage unserer Organe, die unseren Körper aufbauen. Schon in der Antike war die Vorstellung einer Baueinheit, die all die Materie zusammensetzt bekannt: Das Atom (lat. *átomus*-unteilbar). Letztere kam vom Philosophen Demokrit, der im 5. Jahrhundert v.Chr. lebte. In der Geschichte wurde diese Überlegung oft aufgegriffen und weiterentwickelt. Das Atom galt als unteilbar, doch Thompson stellte die Theorie einer weiteren Baueinheit auf, die das Atom aufbaut. Sein Atommodell der positive Masse und negative Elektronen, die frei und gleichmäßig verteilt sind, wurde von Rutherford, Dalton, Boltzmann und Bohr weiter entwickelt. Heute findet meistens das Bohr'sche Atommodell seine Anwendung. Im weiteren Verlauf der Geschichte wurden immer mehr Teilchen und Elementarteilchen entdeckt. So wurde das Standardmodell, in dem die Elementarteilchen mit ihren Ladungen und die Wechselwirkungen zusammengefasst wurden, immer weiter ergänzt und vervollständigt.

2.3.1.1.2 Elementarteilchen

Im Standardmodell gibt es 12 verschiedene Materieteilchen, genannt Fermionen mit ihren jeweiligen Antiteilchen. Das sind die Elementarteilchen, die nach heutigem Stand aus keinen weiteren Bestandteilen aufgebaut sind. Sie sind in drei Generationen aufgeteilt, wobei sich die Teilchen einer Teilchenart zwischen den drei Generationen nur in ihrer Masse unterscheiden. Es gibt 6 Quarks und 6 Leptonen. Up-Quarks, down-Quarks und Elektronen bauen die uns bekannte Materie auf. Ein Proton besteht aus zwei *u*-Quarks und einem *d*-Quark. Neutronen dagegen sind aus zwei *d*-Quarks und einem *u*-Quark aufgebaut. Sie bilden den Atomkern und mit der von Elektronen besetzten Atomhülle, bilden sie ein Atom auf. Jedes Fermion besitzt einen halbzahligen Spin⁴.

2.3.1.1.3 Wechselwirkungen/Austauschteilchen

In unserem Universum gibt es vier Grundkräfte, mit denen sich alle Phänomene erklären lassen. Gravitation ist beispielsweise Ursache der Planetenbewegungen, die elektromagnetische Wechselwirkung beschreibt die Anziehungs- und Abstoßungskräfte von elektrisch geladenen Teilchen und Körpern, die schwache Wechselwirkung erklärt

⁴Spin ist eine quantenmechanische Eigenschaft. Man findet keinen funktionierenden Vergleich aus dem Alltag, doch man kann sich den Spin als Art der Rotation um die eigene Achse des Teilchens vorstellen.

radioaktive Zerfälle und die starke Wechselwirkung ist Grund dafür, dass Protonen im Kern zusammenhalten, obwohl sie sich eigentlich elektromagnetisch abstoßen müssten, weil sie die gleiche elektrische Ladung tragen. Das Standardmodell erklärt aber nur die drei Wechselwirkungen der starken, schwachen und elektromagnetischen Kraft. Die Gravitation ist im Vergleich zu den anderen Grundkräften extrem schwach und hat daher keine signifikante Rolle im Größen- und Massenbereich der Teilchen und kann daher nicht mit dem Standardmodell beschrieben werden. Außerdem wurde das hypothetische Austauschteilchen des Gravitons noch nicht experimentell bestätigt und passt deshalb noch nicht ins Standardmodell.

Jedes Teilchen in dieser Theorie besitzt mehrere Ladungen: Elektromagnetische, schwache und starke Farbladung. Quarks besitzen alle drei Ladungen und Neutrinos tragen nur eine schwache Ladung von $-\frac{1}{2}$. Die Ladung der Teilchen gibt dabei die Möglichkeit der Wechselwirkung mit anderen Teilchen an. Neutrinos, die nur die schwache Ladung tragen, können auch nur über die schwache Wechselwirkung mit anderen Teilchen interagieren. Die Interaktion erfolgt über das Emittieren beziehungsweise Absorbieren von Austauschteilchen zwischen beispielsweise Fermionen. Die Grundkräfte sind nach der Quantenfeldtheorie quantenmechanische Felder. Die Energie des Feldes kann in sogenannten Quanten abgegeben oder aufgenommen werden. Das heißt, die elektromagnetische Wechselwirkung, die elektroschwache Wechselwirkung und die starke Wechselwirkung sind Felder im Raum die in kleinen Energiepaketen mit anderen Teilchen wechselwirken können. Diese Austauschteilchen treten dabei als Quanten ihrer jeweiligen Wechselwirkung auf. Dabei gibt es vier Austauschteilchen oder Bosonen genannt. Gluonen vermitteln die starke Wechselwirkung, Photonen die elektromagnetische Wechselwirkung und W und Z Bosonen die elektroschwache Wechselwirkung. Das Higgs-Teilchen fungiert dabei als Ursache der Masse der Fermionen und Bosonen. Je stärker die Teilchen mit dem Higgs Feld interagieren, desto massereicher sind sie. Das Higgs Teilchen ist die Anregung im Higgsfeld. Alle im Standardmodell vorkommenden Teilchen werden in Abbildung 38 im Anhang grafisch zusammengefasst.

2.3.1.1.4 ungeklärte Fragen

Vielfach experimentell bestätigt, ist das Standardmodell die bisher beste Beschreibung und Erklärung unserer Realität. Trotzdem existieren viele ungelösten Fragen, auf die diese Theorie keine Antwort findet. Beispielsweise gibt es im Universum Prozesse, die auf eine weitere Art von massereicher Materie hindeutet: In den 1930er Jahren beobachtete man Galaxien, die eine viel zu hohe Rotationsgeschwindigkeit hatten, sodass die Gravitation der sichtbaren Materie die Galaxie oder den Galaxienhaufen theoretisch nicht zusammenhalten konnte. Daher postulierte man die sogenannte Dunkle Materie. Dunkel deshalb, weil sie nicht mit anderen Teilchen interagiert oder

wechselwirkt, sodass sie irgendeine Art der Strahlung abgeben würde. Jedoch können wir diese Art von Materie nicht mit dem Standardmodell beschreiben, obwohl sie nach Berechnungen ca. 26,8% des Universums aufbaut. Nur ca. 4,9% sind auf unsere bekannte baryonische Materie zurückzuführen. Der Rest besteht aus Dunkler Energie, ebenfalls noch nicht erklärbar.

Außerdem berücksichtigt diese Theorie die Gravitation nicht, da sie extrem schwach ist und im Bereich des Mikrokosmos einen vernachlässigbaren Einfluss hat.

Es gibt zwar Theorien und Weiterentwicklungen des Standardmodells, wie die Supersymmetrie, welche eine Erklärung für solche offenen Fragen finden sollen. Jedoch sind all diese Theorien unbestätigt und das Standardmodell bleibt unser bestes Vorhersagemodell und beste Beschreibung unserer Welt.

2.3.1.2 Antimaterie

2.3.1.2.1 geschichtlicher Hintergrund

Schon im 19. Jahrhundert wurde über eine Möglichkeit von negativer Energie diskutiert. Die Physiker ARTHUR SCHUSTER, KARL PEARSON und WILLIAM MITCHINSON HICKS hielten diese Antimaterie für möglich, jedoch spekulierte man damals nur darüber.

1928 wurde von Paul Dirac die bestehende Theorie der Quantenmechanik von Fermionen erweitert. Als erster Physiker vereinte er die damals bestehende Quantentheorie von PLANCK, DE BROGLIE, HEISENBERG und SCHRÖDINGER mit Einsteins spezieller Relativitätstheorie, indem er relativistische Effekte mit einbezog wie die relativistische Massenzunahme und daraus folgend die relativistische kinetische Energie eines Teilchens. Er kam dabei auf eine Lösung mit positiven und eine Lösung mit negativen Vorzeichen. So postulierte er, anhand der Lösung der Dirac Gleichung für ein freies Elektron, ein Teilchen mit der gleichen Masse aber positiver Ladung.

Das aufgrund seiner positiven Ladung genannte Positron wurde 1932 von Carl D. Anderson nachgewiesen, indem er kosmische Strahlung mit einer selbst gebauten Nebelkammer nachwies. Die Originalaufnahme der Nebelspur des Positrons ist im Anhang in Abbildung 34 beigelegt. Die Krümmungsrichtung des sich in einem angelegten Magnetfeld bewegenden Teilchens gibt Auskunft über Ladung des Teilchens. In den weiteren Jahren wurden immer mehr Antiteilchen entdeckt, wie das Antimyon oder Antiproton. 1955 wurden sogar Antiwasserstoff Atome in einer magnetischen Falle eingefangen. Für Untersuchungen jedoch war die Anzahl der gefangenen Atome zu gering. 2009 wies man Positronen in der Erdatmosphäre nach, die bei einem Gewitter entstanden sind. Heute stellt man Antimaterie problemlos her und versucht, sie so lange wie möglich zu speichern, damit Untersuchungen vorgenommen werden können.

2.3.1.2.2 Antimaterie

Zu jedem Teilchen existiert ein Antiteilchen, welches die gleichen Eigenschaften, ausgenommen der Ladung besitzt. Es gibt in der Teilchenphysik, wie oben bereits erwähnt, drei verschiedene Ladungsarten: die schwache, starke und elektromagnetische Ladung. Antiteilchen besitzen den gleichen Betrag der Ladung wie ihr dazugehöriges Materieteilchen, nur mit entgegengesetzten Vorzeichen beziehungsweise mit entgegengesetztem Farbladungsvektor. Das Standardmodell zeigt uns, dass Photonen und Z-Bosonen keine Antiteilchen haben, beziehungsweise, dass sie ihre eigenen Antiteilchen sind. Neutrinos, die ebenfalls keine elektrische Ladung haben, könnten auch ihre eigenen Antiteilchen sein. Das ist jedoch noch nicht geklärt und im Standardmodell sind es noch zwei verschiedene Teilchen.

Wenn sich Antiteilchen und passendes Materieteilchen treffen, vernichten sie sich gegenseitig. Das Ergebnis dieser auch Anihilation genannten Vernichtung ist das Abstrahlen eines Photons, das aufgrund der Energieerhaltung die gleiche Energie besitzt wie das Antiteilchen und Materieteilchen zusammen. Umgekehrt ist es auch möglich, dass ein Photon sich spontan in ein Teilchen-Antiteilchen Paar umwandelt. Dieser Prozess wird Paarbildung genannt. Paarbildung und Paarvernichtung als Feynmandiagramme werden im Anhang in Abbildung 35 und Abbildung 36 dargestellt.

2.3.1.3 Antimaterie- Materie Asymmetrie

Beim Urknall entstanden Antimaterie und Materie zu gleichen Teilen. Sie vernichteten sich gegenseitig, strahlen ein energiereiches Photon ab, was sich irgendwann wieder zu einem Antimaterie-Materie Paar umwandelt. Somit herrschte ein thermisches Gleichgewicht. Doch was wir heute im Universum beobachten, ist nur Materie, keine Antimaterie. Die von Dirac vorgeschlagenen Antimateriegalaxien sind bis jetzt nie gefunden worden, da man keine Quelle im Universum beobachtet, welche übermäßig viel Photonen abstrahlt. Diese würden aus der Anihilation der Antimateriegalaxie mit anderen Materiegalaxien kommen. Also stellt sich die Frage, wo die Antimaterie ist. Die Tatsache, dass wir existieren und uns diese Frage stellen können, beweist eine kleine Asymmetrie bei der Mengenverteilung beim Urknall. Physiker berechneten den benötigten Überschuss mit $1.000.000.000 : 1.000.000.001$, das heißt auf eine Milliarde Antimaterieteilchen kam eine Milliarde und ein Materieteilchen. Man vermutet den Ursprung in diesem Ungleichgewicht bei 10^{-34} s nach dem Urknall, denn bei weiterem Abkühlen des Universums, hätte sich, wenn es gleiche Mengen gewesen wären, die Antimaterie und Materie vollständig vernichtet. Die GRAND UNIFIED THEORY beschreibt diese Zeit, liefert aber keine Erklärung für diese ungleichmäßige Verteilung. Nach Andrei Sakharov muss es drei Bedingungen gegeben haben oder geben, die uns die Materie-Antimaterie Asymmetrie erklären können. Die CP-Verletzung ist nur eine der sogenannten *Sakharov'schen Bedingungen* und wäre auch viel zu klein um den heutigen

Materieüberschuss alleine erklären zu können. Einerseits müsste es noch eine Verletzung der Baryonenzahl geben und ein thermisches Nichtgleichgewicht vorhanden gewesen sein. Die Baryonenzahl ist wie die Energie oder Ladung eine Erhaltungsgröße. Sie ist definiert als:

$$B = \frac{n_q - n_{\bar{q}}}{3} \quad (8)$$

Eine Verletzung der Baryonenzahlerhaltung passiert beim Zerfall eines X Bosons. Dieses Teilchen kann wie folgt zerfallen:

$$\begin{array}{ll} X \longrightarrow u + u & 0,51\% \\ X \longrightarrow \bar{d} + e^+ & 0,49\% \end{array}$$

Dabei sollte die Baryonenzahl erhalten werden. Das heißt, vorher und nachher existiert die gleiche Anzahl von Quarks und Antiquarks. Was bei diesem Zerfall nicht der Fall ist. Die dritte Voraussetzung ist ein thermisches Nichtgleichgewicht, welches zur Änderungen des stationären Zustandes des Universum führt, indem Materie- und Energieflüsse vorhanden sind. Da das Universum expandiert ist es denkbar, dass dieses Nichtgleichgewicht durch die Expansion zu erklären ist.

2.3.1.3.1 CP-Verletzung

Die CP-Symmetrie ist eine grundlegende Eigenschaft der Teilchenphysik. Sie sagt, dass sich Teilchenprozesse nicht ändern, wenn die Raumkoordinaten gespiegelt und alle beteiligten Teilchen durch ihre Antiteilchen ersetzt werden. Nun beobachteten Physiker allerdings einige Vorgänge, die diese Symmetrie verletzen, indem der CP-Eigenwert nicht erhalten wird.

Eine Paritätsverletzung⁵ wurde schon im Jahr 1956 bei Neutrinos entdeckt. Sie hatten öfter eine Linkshändigkeit des Spins, als eine Rechtshändigkeit. Da Antimaterie damals schon bekannt war, konnte die P-Verletzung mit einem Austausch der Teilchen in seine Antiteilchen kompensiert werden. Damit war die CP-Invarianz die Größe, die nicht verletzt werden durfte. 1964 entdeckten Physiker jedoch genau eine solche Verletzung im K Mesonen System. 9 Jahre zuvor haben Wolfgang Pauli und Gerhart Lüders ein Theorem aufgestellt, dass bei Teilchenreaktionen die CPT-Invarianz gelten muss. Hier wird dazu die T-Transformation mit einbezogen. Das heißt auch unter Spiegelung der Raum- und Zeitkoordinaten und unter Austausch der Teilchen durch ihre Antiteilchen bleibt der Prozess einer Teilchenreaktion der Gleiche. Eine Verletzung der CPT-Invarianz wurde noch nicht beobachtet. Es gibt mehrere Arten der CP-Verletzung. Die indirekte CP-Verletzung tritt dann auf, wenn sich Teilchen und Antiteilchen

⁵“Parität im physikalischen Sinne, ist die Symmetrie eines Systems bei einer räumlichen Spiegelung” [5]

ineinander oszillieren. Wie beispielsweise das K^0 Meson, dass sich in sein Antiteilchen umwandelt. Im Anhang in Abbildung 37 ist ein Feynman-Diagramm dieser Oszillation abgebildet. Dieses Mischen der Teilchen basiert auf dem Superpositionsprinzip. Die Superposition wäre in dem Fall die Existenz beider Teilchen gleichzeitig. Wird nun eine Messung durchgeführt, wird dieser Zustand aufgehoben und eines der beiden Teilchen wird detektiert. Wenn diese Messung sehr lang und mit vielen Messungen dieser Art wiederholt wird sollte man die gleiche Anzahl K^0 Meson wie \bar{K}^0 Meson registrieren. Doch das beobachtet man nicht.

Die direkte Form der CP-Verletzung ist in Form des Zerfalls einiger Teilchen. Dabei können zum Beispiel Formen der Kaonen (K_S^0 und K_L^0) in zwei beziehungsweise drei Pionen zerfallen. Ist CP erhalten wird das K_L^0 nie in zwei Pionen zerfallen, sondern nur in drei. In der Praxis hat man aber festgestellt, dass das (K_L^0) Meson zu einer geringen Wahrscheinlichkeit auch in zwei Pionen zerfallen kann. Damit ist CP nicht erhalten.

3 Belle II Detektor/Experiment

Das BELLE EXPERIMENT ist eine internationale Kollaboration von 560 Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen an 94 verschiedenen Instituten in 25 Ländern. Die Forscher beschäftigen sich mit Verbesserungen des BELLE II Detektors, Entwicklung neuer Technologien oder tragen zur Datenanalyse bei. Deutschland beteiligt sich mit 12 Forschungszentren an der Entwicklung und Weiterentwicklung des Pixel Vertex Detectors und dem Ausbau der Auswertungssoftware. Dafür stellte das Bundesministerium für Bildung und Forschung insgesamt ca. 16,7 Millionen Euro zur Verfügung.

3.1 Detektoraufbau und Teilchenidentifikation

Die hohe Luminosität ist zwar einerseits von Vorteil, wenn wir die CP-Verletzung beobachten wollen, allerdings muss dafür der Detektor noch genauer, widerstandsfähiger sein und generell mehr leisten, als es beim Vorgängermodell: BELLE Detektor der Fall war. Für die hohe Anzahl an erzeugten B Mesonenpaaren pro Sekunde benötigt man schnellere, leistungsfähigere und genauere Detektoren, die die Zerfallsprodukte detektieren können. Ein grober Aufbau des Detektors ist im Anhang in Abbildung 39 dargestellt.

3.1.1 Vertex Detector

Der Vertex Detektor besteht aus zwei Pixel Vertex Detektoren (PXD) und vier Silicon Vertex Detektoren (SVD). Beide befinden sich in einem Magnetfeld von $1,5 T$, um Krümmungsradien von Teilchenbahnen zu registrieren. Der Pixel Vertex Detector

besteht aus 40 Silizium Sensormodulen, die zylinderförmig um das Strahlrohr angeordnet werden. Ein Pixel auf einem Silizium-Sensormodul ist $50\mu\text{m} \times 75\mu\text{m}$ groß. Eines dieser Module wird in Abbildung 40 im Anhang dargestellt. Insgesamt besitzt ein Modul 250×1536 Pixel und somit der ganze Detektor ca. 15 Millionen Pixel. Sobald ein Teilchen durch die Siliziumschicht eines Pixels hin durchfliegt, gibt es Energie an einige Elektronen in den Atomen ab, die dann herausgelöst werden. Die Folge ist ein kleiner Strom, der in das *internal gate* wandert. Durch Anlegen einer Spannung von bis zu 20 V wird der vorhandene Elektronenstrom im *internal gate* moduliert und verstärkt. Das hat den Vorteil, dass der Signalstrom an der Stelle seiner Erzeugung verstärkt wird. In anderen Detektor-Modulen musste dieser erst in einen außerhalb des eigentlichen Moduls liegenden Verstärker übertragen werden. Dadurch wird das elektrische Rauschen und die damit verbundenen Verluste des Signals erhöht. Der verstärkte Transistorstrom wird durch ADC Chips digitalisiert, durch viele *Data Handling Processor* ausgelesen und mittels *zero-suppressing*⁶ komprimiert werden. Bevor das jedoch ablaufen kann, müssen sogenannte *SWITCHER*-Chips die Transistoren in den Modulen kurzzeitig abschalten, damit die Auslese ungestört funktionieren kann. Eine schematische Darstellung der *SWITCHER*-Chips ist dem Anhang in Abbildung 41 beigelegt. Danach entscheidet ein Programm über die Nützlichkeit der einzelnen Daten und sortiert Untergrund und Treffer-Ereignis. Die Untergrundereignisse werden gelöscht und die brauchbaren Ereignisse mittels einer Gigabit-Verbindung an die Front Elektronik geleitet. Von dort aus werden sie zum Computerzentrum des BELLE II DETEKTORS gesendet. Die Entfernung des Ladungsüberschusses in einem Pixel, nach der Ionisation des Materials aufgrund eines hin durchgeflogenen Teilchens, wird durch den *Clear* realisiert. Thermisch erzeugte Elektronen werden mittels *SWITCHER*-Chips Kontakten, an denen Hochspannungen anliegen, wieder in das Material hineingebracht. Dadurch wird der Ladungsüberschuss ausgeglichen und die Module sind bereit für neue Signale. Ein weiterer Vorteil des Pixel Vertex Detector ist die Blindschaltung der einzelnen Pixel. Bei Kollisionen von Teilchen, die sehr viel Untergrund erzeugen, würden die einzelnen Sensormodule der PXD überlastet und damit dauerhaft blind werden. Deshalb kann man ihn für 100 Nanosekunden blind schalten. Die darauffolgenden Silicon Vertex Detektoren sind aus zwei Schichten Silizium aufgebaut. Das Prinzip ist das Gleiche wie bei den Pixel Vertex Detektoren. Mittels des Vertex Detektor kann man den exakten Zerfallsort der B-Mesonen bestimmen, da diese schon nach 10^{-12} s zerfallen und den Detektor nicht mehr erreichen.

⁶*zero-suppressing* ist das Entfernen redundanter Nullen aus einer Zahl. Damit wird Speicherplatz eingespart und die Effizienz der Speicherkapazität erhöht

3.1.2 zentrale Driftkammer

Die zentrale Driftkammer oder *Central Drift Chamber (CDC)* registriert die Trajektorie, misst Impulse und $\frac{dE}{dx}$ Informationen⁷ eines Teilchens.

Die Kammer ist mit einem Gasgemisch aus Helium und Ethan gefüllt. Sobald ein Teilchen dieses Gasgemisch durchläuft, werden die Gasatome ionisiert. Die Driftkammer enthält 8 Felldrähte an denen eine Spannung anliegt. Sobald ein Teilchen die Gasatome bzw. Gasmoleküle ionisiert hat, werden die herausgelösten Elektronen durch das elektrische Feld der Felldrähte zu den einzelnen Messdrähten beschleunigt. Die Zeit, die die herausgelösten Elektronen zum Draht brauchen, ist relativ groß und muss mit in die Auswertung einbezogen werden.

Die CDC ist von einem Magnetfeld durchdrungen. Wenn ein geladenes Teilchen diesen Detektor passiert, wirkt die Lorentzkraft auf das Teilchen, welche es auf eine Kreisbahn ablenkt.

So erhält man eine genaue Ortsauflösung des passierten Teilchens und kann damit seine Trajektorie berechnen. Mithilfe des Krümmungsradius r kann man den Impuls p berechnen.

$$F_{Lorentz} = F_{Zentripetal} \quad (9)$$

$$B \cdot e \cdot v_0 = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (10)$$

$$r = \frac{m_e \cdot v_0}{B \cdot e} = \frac{p}{B \cdot e} \quad (11)$$

$$p = r \cdot B \cdot e \quad (12)$$

Dieses Kräftegleichgewicht ist eine Vereinfachung. Da sich die Teilchen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit bewegen, muss man relativistische Phänomene mit einbeziehen, das würde jedoch den Rahmen dieses Abschnittes sprengen.

3.1.3 Time-Of-Propagation Zähler und ARICH

Um der CDC sind 16 Quarz Stäbe angebracht wurden, die die Raum und Zeitkoordinaten bestimmen. Dort kommen sogenannte *Time of Propagation counter (TOP)* zum Einsatz, die den Cherenkov-Effekt messen. Eine sehr gute Methode zur Energiebestimmung des Teilchens ist die Messung des Cherenkov Winkel unter dem die Cherenkov Strahlung⁸ abgestrahlt wird. Passiert ein solches geladenes Teilchen den

⁷ $\frac{dE}{dx}$ ist der Energieverlust des Teilchens durch Ionisation und Atomanregung der Atome des Detektormaterials während seiner Passage.

⁸Der Cherenkov Effekt ist ein Phänomen bei dem Cherenkov Strahlung, die beim Durchgang eines Teilchens durch ein Medium, in dem die Geschwindigkeit elektromagnetischer Wellen niedriger ist als die Geschwindigkeit des Teilchens selber, die Emmision von Licht beobachtet wird.

Quarzdetektor, polarisiert es auf dem Weg die Atome des Materials. Dadurch werden an jedem polarisierten Atom Elementarwellen ausgesendet, die miteinander interferieren. Es kommt zur konstruktiven Interferenz (siehe Abbildung 3), die makroskopische Wirkung sind beobachtbare elektromagnetische Wellen. Der Kosinus des Winkel θ zwischen Ausbreitungsrichtung dieser elektromagnetischen Wellen und der Flugbahn des Teilchens, unter dem die Photonen emittiert werden kann berechnet werden mit der Phasengeschwindigkeit des Lichts in diesem Medium c und der Teilchengeschwindigkeit v .

$$\cos(\theta) = \frac{c}{v} \quad (13)$$

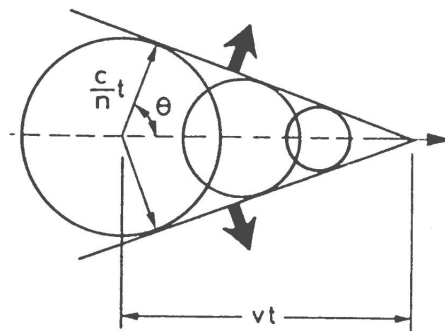


Abbildung 3: Cherenkov-Effekt

Die emittierten Photonen werden zum Ende der Quarz-Stäbe reflektiert und von Photon Detektoren gemessen. Somit können genaue Zeit und genauer Ort des hindurchfliegenden Teilchens rekonstruiert werden. Außerdem erhält man mithilfe des gemessenen Cherenkov Winkels aus Formel (13) die genaue Energie des Teilchens. ARICH ist ein Detektor an den Endkappen des CDC, der aus Aerogelen⁹ bestehen. Trifft ein Teilchen wieder auf den ARICH, so wird ebenfalls Cherenkov Strahlung emittiert, die dann von hochauflösenden Photon Detektoren, die den photoelektrischen Effekt ausnutzen, registriert werden.

3.1.4 elektromagnetisches Kalorimeter ECAL

In Kalorimetern sollen die im Kollisionspunkt entstandenen Teilchen ihre Energie vollständig abgeben bis man eine Aussage über dessen Energie machen kann. Dieser Detektor identifiziert Elektronen, Positronen und Photonen und Myonen. Wobei Myonen nicht vom ECAL gestoppt werden können. Diese Teilchen unterliegen alle der elektromagnetischen Wechselwirkung, die bewirkt, dass diese Teilchen überhaupt mit

⁹“Aerogele sind hochporöse Feststoffe, die über 90% aus luftgefüllten Poren bestehen.” [6]

dem Detektormaterial interagieren. Der ganze Detektor ist mit einem Magnetfeld der Stärke $1,5\text{ T}$ durchströmt. Wenn ein Teilchen den Detektor durchfliegt, so wirkt die Lorentzkraft $F_{Lorentz}$ auf das Teilchen und zwingt es auf eine Kreisbahn. Dazu kommt das physikalische Phänomen, dass beschleunigte Ladungen Strahlung aussenden. Das heißt, ändert man den Geschwindigkeitsbetrag oder Bewegungsrichtung von geladenen Teilchen, so emittiert dieses Teilchen elektromagnetische Wellen. Positronen oder Elektronen werden durch das Magnetfeld auf eine Kreisbahn gezwungen. Daraufhin wird sogenannte Bremsstrahlung frei. Diese hochenergetischen Photonen bilden Teilchen-Antiteilchen Paare die den gleichen Prozess wieder durchlaufen: Aufgrund der elektromagnetischen Ladung, werden auch sie wieder abgelenkt. Die Folge ist wieder die Emission von Bremsstrahlung, solange die Energie des ursprünglichen Teilchens noch nicht auf einen kritischen Wert gesunken ist. Dann ist der Energieverlust des Teilchens durch Anregung/Ionisation der Atome des Detektormaterials größer als der Energieverlust durch Bremsstrahlung. Photonen durchlaufen den gleichen Prozess. Hier beginnt die Energieabgabe allerdings mit einer Paarbildung. So wird die Energie des ursprünglichen Teilchens in einen Teilchenschauer (siehe Abbildung 4) abgeben. Der Detektor besteht aus 8736 Thallium-dotiertem Cäsiumiodid-Kristallen. Die im Szintillationsmaterial entstandenen Photonen können mithilfe von Photomultipliern in ein elektrisches Signal umgewandelt und letztendlich ausgelesen werden.

3.1.5 Kaonen-Myonen Detektor KLM

Belle II besitzt kein hadronisches Kalorimeter (HCAL), da die Schwerpunktsenergie zu niedrig ist um in einem HCAL eine registrierbare Energieauflösung zu erreichen. Untergrundereignisse oder Rauschen würden die Messwerte in einem HCAL extrem verfälschen. Daher versucht man, diese fehlende Komponente mit einem KLM Detektor zu kompensieren. Dieser kann zwar nicht die Energie der entstandenen Hadronen messen, jedoch kann es die Teilchen registrieren, die einen Teilchenschauer hinterlassen. Myonen und Kaonen haben eine vergleichsweise lange Lebensdauer. Myonen sind 207 mal schwerer als Elektronen. Sobald sie entstanden sind, durchlaufen sie alle Komponenten des BELLE II Detektors. Alle anderen Teilchenarten werden in einem vorherigen Detektorteil gestoppt. Myonen und Kaonen fliegen trotzdem weiter. Das K_L^0 Meson, ist ein schwacher Eigenzustand des Kaons, welches beim Zerfall der B-Mesonenpaare entstehen kann. Genau wie das Myon kann es, aufgrund einer langen Lebensdauer, weite Strecken im Detektor zurücklegen. Beide werden nicht von den vorherigen Detektorkomponenten gestoppt. Sobald also ein Signal im KLM Detektor registriert wird, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass es eines dieser Teilchen gewesen ist. Der KLM besteht aus drei Einzelkomponenten, zwei Endkappen (EKLM) und einer Hauptkomponente (BKLM). Diese besteht aus 14 Lagen 5 cm dicken Eisenplatten, zwischen diesen befinden sich je 2 RPCs.

RPC sind *Resistive Plate Chamber*, in denen sich ein Gas befindet. Wenn ein Teilchen durch dieses Gas strömt, ionisiert es die Gasteilchen. Daraufhin werden die herausgelösten Elektronen in einem außerhalb der Gaskammer angelegten elektrischen Feld beschleunigt. Gleichzeitig wird dieses elektrische Signal sofort verstärkt (Gasverstärkung) und zu einer Graphit-Elektrode hin beschleunigt. Dieser Strom kann dann als Signal ausgelesen werden.

Das EKLM besteht aus Kunststoff-Polyesteren-Szintillatoren, die mit Silizium-Photomultipliern gekoppelt sind. Im Inneren eines dieser Module befindet sich ein Kunststoffkabel, welches die durch Szintillation entstandenen Photonen zu den Photomultipliern reflektiert (siehe Abbildung 5).

Wenn aber ein K_L^0 Meson den KLM erreicht, kollidiert es mit einem Eisen-Kern der Eisenplatten und hinterlässt einen Teilchenschauer, der dann in den RPCs oder in den Kunststoff-Polyesteren-Szintillatoren registriert werden.

3.2 Datenanalyse

3.2.1 Trigger- und Datenerfassungssystem DAQ

Aufgrund der hohen Luminosität des SUPERKEKB Beschleuniger ist ein leistungsfähiges Trigger¹⁰ System notwendig, um die potenziell nützlichen Daten von Hintergrundereignissen zu trennen. Allein der verbesserte PXD liefert 30 GB an Daten in einer Sekunde. Die restlichen sechs Detektorkomponenten liefern insgesamt nur 3 GB pro Sekunde [8]. Die vorhandenen Datenmengen sind enorm groß, sodass man Daten, auch wenn sie nützliche physikalische Phänomene aufweisen, löschen muss. Die einzelnen Detektoren haben teilweise ihre eigene Trigger, wie bereits erwähnt den Pixel Vertex Detector, der *zero-suppressing* ausnutzt um Speicherplatz zu sparen. So werden schon vorher Datenmengen verkleinert, teilweise auch gelöscht, bevor die Daten in das Rechenzentrum des KEK weitergeleitet werden.

Alle erhaltenen Daten von PXD, SVD, CDC, ECAL, KLM werden dann für $5\mu s$ im Datenpuffer beibehalten. Alle $8ns$ werden die ältesten Einträge wieder verworfen. In dieser Zeit ist ein Level 1 Trigger dafür zuständig einen Teil der physikalischen Daten aus dem Datenfluss zu extrahieren. Mittels zwei verschiedener Schaltungen (*Global Reconstruction Logic* und *Global Decision Logic*) werden die Daten reduziert - mit einer Ausnahme: der PXD. Die gemessenen Signale des PXD müssen aufgrund der Größe der Daten über ein extra Triggersystem laufen, bevor sie weitergeleitet werden können. Danach kommen viele weitere Sub-Trigger zum Einsatz, die jene Datenmengen für den *High Level Trigger* vorbereiten.

Ein *High Level Trigger HLT* besteht aus unzähligen softwarebasierten Komponenten, die potentiell physikalisch nützliche Ereignisse von Untergundereignissen trennen. DAQ,

¹⁰“Ein Trigger ist in der Physik ein System, das die Datensammlung eines Experiments kontrolliert.” [7]

das Datenerfassungssystem des BELLE II DETEKTORS, ist, nachdem die Daten selektiert und ausgewählt wurden, zuständig für die Speicherung.

Nachdem alle Triggersysteme die Daten bearbeitet haben, kann so ein Kollisionsbild wie in 42 im Anhang entstehen. Das waren die ersten Kollisionen am 25.03.2019.

3.2.2 Computing

Mehrere Rechenzentren auf der ganzen Welt verarbeiten und speichern die realen und simulierten Petabytes an Daten. Zur Verteilung greift man auf ähnliche Computertechnologien wie GRID¹¹ zurück. Damit Physiker jederzeit auf diese Daten zugreifen können verbindet man Computerressourcen auf der ganzen Welt über Hochgeschwindigkeitsnetzwerke.

4 eigene Datenanalyse

4.1 Belle II Masterclass

Masterclasses sind Schülerforschungstage, die von aktuell 225 Forschungszentren und Universitäten in 55 Ländern angeboten werden. Das Programm wurde 1996 gegründet und gibt Schülern die Möglichkeit Teilchenphysik zu erleben und mit Forschern ins Gespräch zu kommen.

Netzwerk Teilchenwelt, eine deutsche Organisation bietet noch mehr Möglichkeiten, indem Wissenschaftler aus den Universitäten an die Schulen kommen und den Schülern die mikroskopische Welt erklären.

Dafür verleiht das Netzwerk auch Experimente mit COSMO-Detektoren oder Kamio-Kannen und gibt die Möglichkeit Nebelkammern selber zu bauen.

Der Gründer dieses Programms ist Herr Prof. Dr. Michael Kobel, ein Physiker an der TU Dresden.

Da die BELLE II Masterclass dieses Jahr noch nicht in Deutschland durchgeführt wird, haben mir tschechische Wissenschaftler die BELLE II Daten zugeschickt. Sie sind selber an der Kollaboration beteiligt und sendeten mir auch Informationsmaterial und eine Analysesoftware.

4.1.1 Daten von Belle II

Die Datenpakete werden durch das Computernetzwerk von BELLE II auf der ganzen Welt verteilt. Die Masterclass nutzt natürlich aufbereitete Daten. Zur Vereinfachung der Analyse werden solche Events ausgewählt, wo es am wahrscheinlichsten ist, dass man

¹¹GRID ist das Computernetz vom LHC am CERN und verbindet Tausende Wissenschaftler an den Instituten, um an Verarbeitung, Auswertung und Speicherung der jährlich 15 Petabytes an Daten mitzuwirken.

genau das Teilchen detektiert hat, was man erwartet hat. Bei der Teilchenhypothese gibt es immer Unsicherheiten bezüglich Massenbestimmung, Untergrund oder elektronischem Rauschen. Würde man diese Daten nicht schon vorher auswählen, würde man viel mehr Events in den Masterclasses brauchen, um überhaupt etwas erkennen zu können.

4.1.2 Aufbau der Anwendung

Die Anwendung ist eine freie Software, die von tschechischen Wissenschaftlern entwickelt wurde. Die Masterclass Teilnehmer sollen die Daten von BELLE II selber analysieren können. Dazu gibt es in der Anwendung fünf verschiedene Blöcke, die unterschiedliche Funktionen erfüllen und unterschiedlich kombinierbar sind.

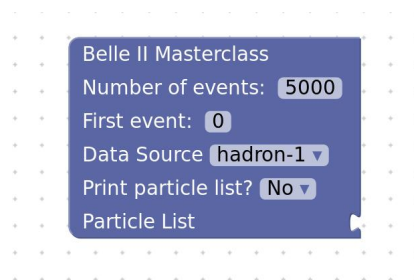


Abbildung 4: Block A

Mit diesem Block, kann man unter *Data Source* als erstes die Quelle auswählen, aus der man die Daten analysieren lässt. In der Masterclass gibt es zwei verschiedene Datensätze. *hadron-1* enthält 629000 Events und *hadron-2* 5600000 Events. *Number of Events* bestimmt die Anzahl der Events, die analysiert werden sollen.

Particle list zeigt die beim Event entstandenen Teilchen. Ausgegeben werden die Impulse p_x , p_y und p_z ,

px(GeV/c)	py(GeV/c)	pz(GeV/c)
-1.37483	0.802468	0.624061
-1.28178	0.0991122	0.0666331
0.728901	-0.451686	-0.231714
0.542872	-0.00576376	-0.0244249
-0.259249	0.0212167	-0.118574
0.0891187	-0.0365819	-0.0180832
0.23442	-0.0771934	0.113554
1.14474	-0.176826	0.274438
0.24725	-0.196006	-0.500915
0.24851	-0.0588004	0.1945
1.37173	-0.255983	0.388518

Abbildung 5: *particle list* Teil 1

sowie der Betrag des Impulses p , die Energie E und die Ladungen der Teilchen.

p(GeV/c)	Energy(GeV)	Charge
1.70984	1.71553	-1
1.28733	1.59298	1
0.888261	0.899159	-1
0.543452	0.561088	1
0.285867	0.318119	1
0.0980172	0.17055	-1
0.271673	0.271673	0
1.19038	1.19038	0
0.592002	0.592002	0
0.321006	0.348228	0
1.44849	1.45477	0

Abbildung 6: *particle list* Teil 2

Daraus wird das bestimmte Teilchen identifiziert.

Block B zeichnet Histogramme. Dafür müssen zuerst Variablen und die gewünschte Verteilung dieser definiert werden. Die Variable ist von dem Teilchen oder der Eigenschaft abhängig, was im Histogramm iwedergegeben werden soll.



Abbildung 7: Block B

Number of Bins ist die Anzahl der senkrechten Balken-Einteilungen des Diagramms beim Eintragen der Messwerte. Eine zu große oder zu kleine Anzahl der Bins können zu sinnlosen Graphenverläufen und Fehlinterpretationen führen. Die nachfolgenden Histogramme zeigen die Verteilung der Masse von zwei Photonen die beim Zerfall des Pions entstanden sind. Zur Veranschaulichung habe ich diesen Zerfall in drei unterschiedlichen Histogrammen dargestellt. Variiert wird dabei dei Anzahl der Bins und Events.

In Diagramm 1 habe ich 50000 events und 5 bins verwendet.

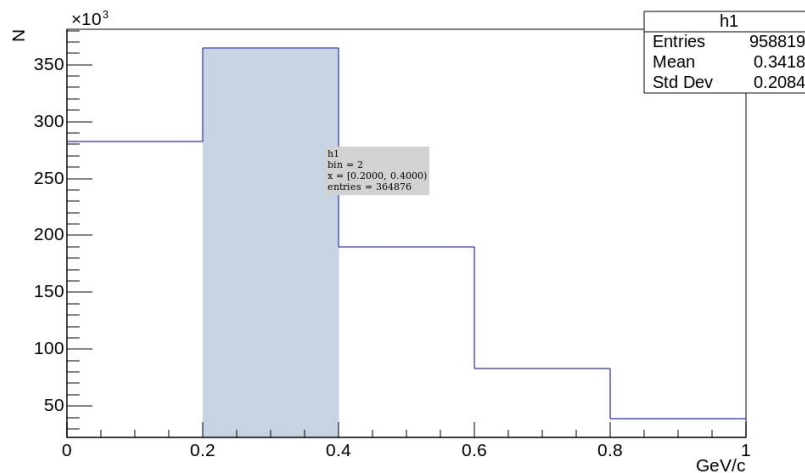


Abbildung 8: Diagramm 1

Das Ergebnis ist ein Histogramm, welches keine vernünftige Aussage über die Masse des Pions macht, weil zu viele Einträge pro Bin vorhanden, sodass nicht mehr differenziert werden kann.

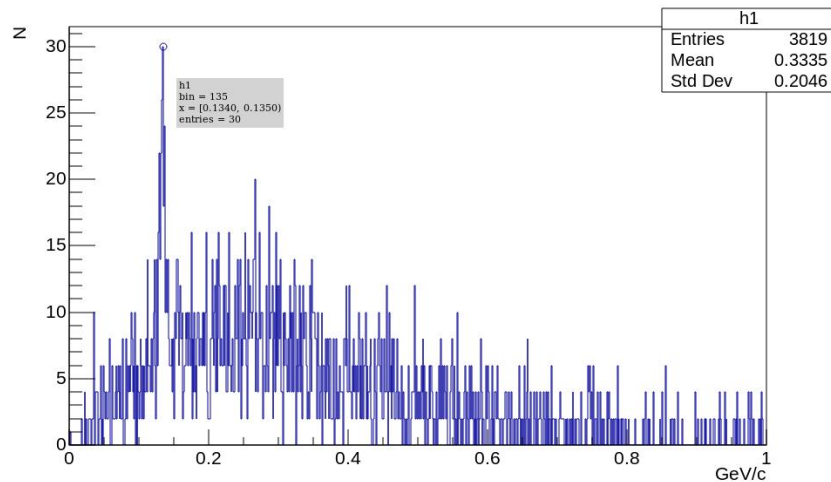


Abbildung 9: Diagramm 2

Jedoch bringen viele Bins, bei wenigen Events auch keine effiziente Verteilung. Hier sind 250 events in 1000 bins eingetragen. Es sind zu wenige Events pro Bin, sodass die Standardabweichung immer größer wird.

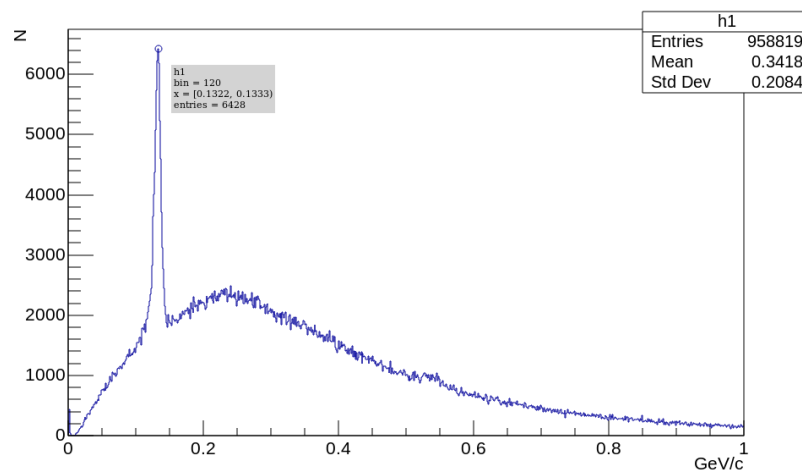


Abbildung 10: Diagramm 3

Letzendlich ist das Zusammenspiel von Bin und Anzahl der Events entscheidend für ein sinnvolles Histogramm, wo man einen Peak vom Rest unterscheiden kann. In dem Histogramm sind 50000 Events in 900 Bins eingetragen. Man sieht eindeutig einen Peak bei $0,13 \text{ GeV}$, was genau der Masse eines Pions entspricht.

Die Aufgabe eines Histogramms ist die Häufigkeitsverteilung einer bestimmten invarianten Masse darzulegen. Wenn eine Auffälligkeit, ein sogenannter Peak zu sehen ist, dann hat man eine bestimmte invariante Masse sehr oft gemessen. Dieser Peak könnte eben von einem Teilchenzerfall sein, welcher sehr oft passiert, weil eben genau das Teilchen, welches zerfallen ist, häufig entstanden ist.

Mit Block C der Software werden zwei Teilchen eines Events zu einem anderen kombiniert. So kann man der Software die Information geben, dass das kombinierte Teilchen in die zwei zu kombinierenden Teilchen zerfallen ist.

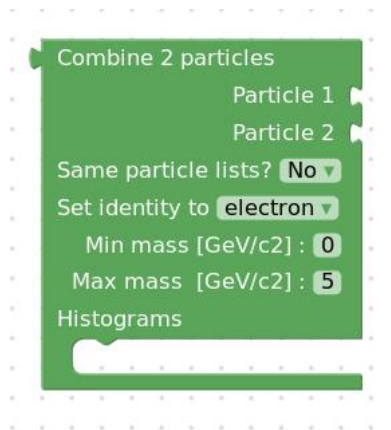


Abbildung 11: Block C

Particle 1 und *Particle 2* sind sozusagen zwei Zerfallsprodukte vom vorherigen Teilchen. Dieses wird bei *Set identity to* ausgewählt. Dazu kann man die Suche noch durch einen bestimmten Energiebereich einschränken. zuletzt wird wieder das Histogramm gezeichnet, welches aus den Events besteht, die jene Auswahlkriterien erfüllen. Das Kombinieren der Zerfallsprodukte funktioniert auch mit drei Teilchen. Dazu wird lediglich ein weiteres Kombiniertfeld (*Particle 3*) eingefügt.

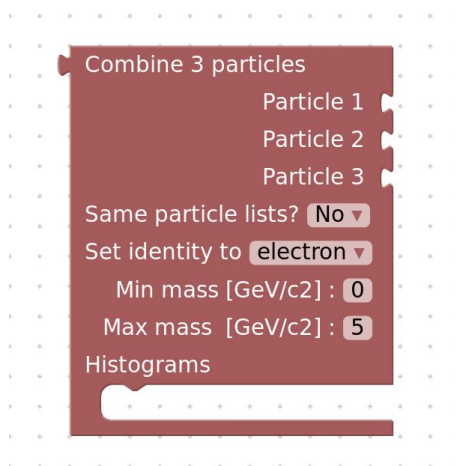


Abbildung 12: Block D

4.1.2.1 Kombination der Blöcke

Mit dem Kombinieren der einzelnen Blöcke gibt man der Software genaue Auswahlkriterien, nach der sie suchen soll. Events, die diese erfüllen werden in einem Histogramm eingetragen. Diese Schleife läuft solange, bis alle Events, je nach Quelle (*hadron-1* oder *hadron-2*), durchgelaufen sind.

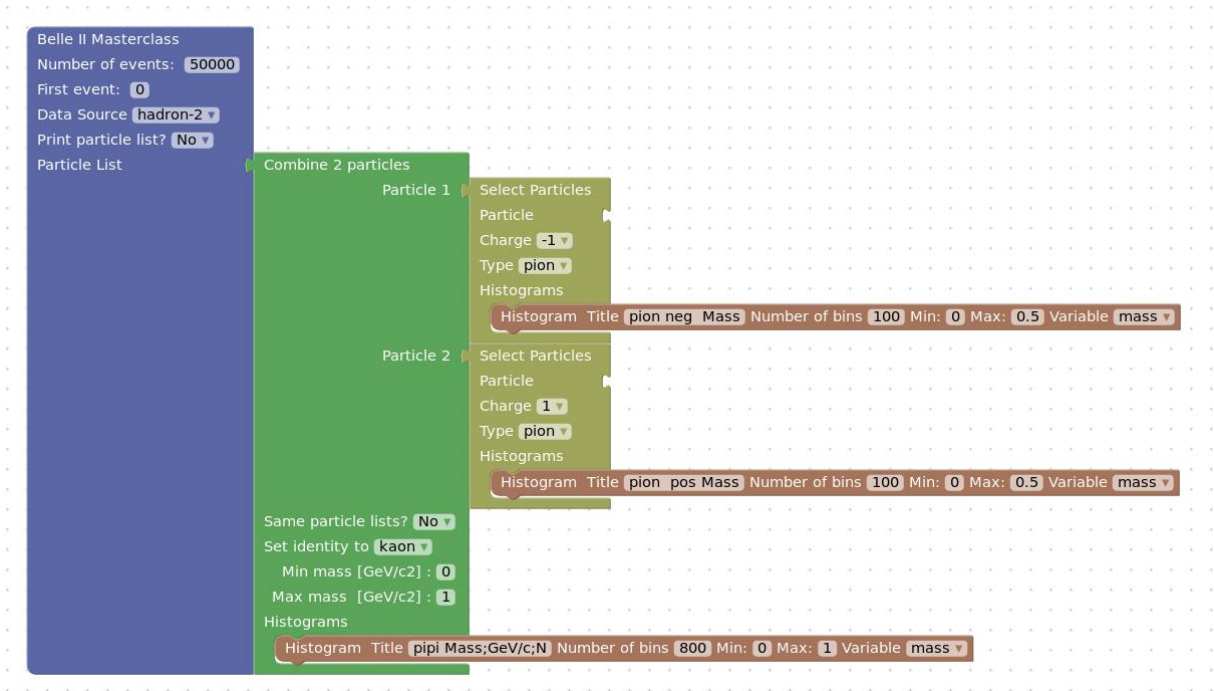


Abbildung 13: Blockkombination

Hier sucht man nach der invarianten Masse¹² des *short-lived* K_S^0 Mesons, welches in ein Pion und ein Antipion zerfallen ist.

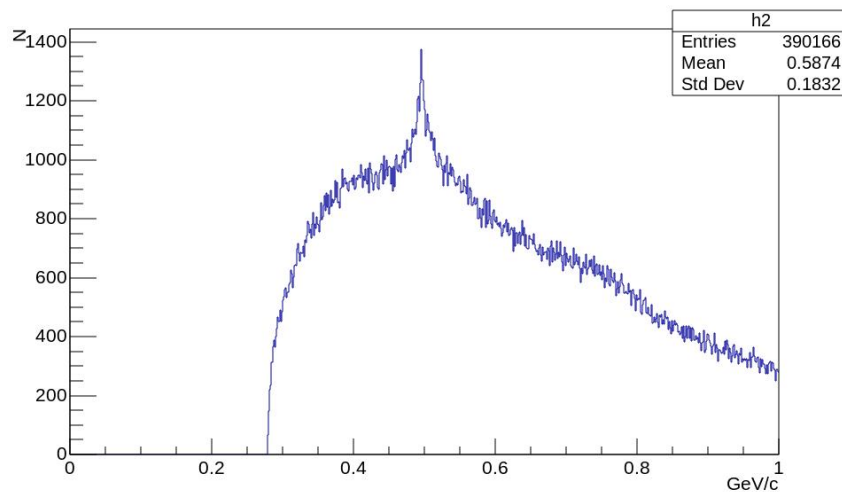


Abbildung 14: Diagramm K_S^0 Meson

Aus den Ergebnissen der Schleife wird ein Histogramm erstellt, bei dem man die invariante Masse des gesuchten Teilchens ablesen kann. Der Peak ist bei ca. $0,49 \text{ GeV}$. Das entspricht genau der Ruheenergie des Kaons.

¹²“Die invariante Masse ist die die Summe aus den Energien der einzelnen Teilchen.” [9]

4.1.3 Analyse der Zerfälle der B Mesonenpaare

4.1.3.1 Mesonen

Mesonen sind Teilchen, die aus zwei Quarks aufgebaut sind. Ein Meson enthält dabei immer ein Quark-Antiquark Paar. Sie sind sehr instabil und zerfallen nach wenigen Mikrosekunden oder sogar noch schneller in andere Teilchen. B^0 Mesonen setzen sich aus einem $d - \bar{b}$ Paar zusammen, während sein Antiteilchen, das \bar{B}^0 , aus einem $\bar{d} - b$ Paar besteht. $u - \bar{b}$ Quarks bilden das B^+ Meson und $\bar{u} - b$ das B^- . Das B^- Meson stellt das Antiteilchen zum B^+ dar.

4.1.3.2 B Mesonen - Entstehung und Zerfälle

Ich untersuche die B^0 Mesonen im BELLE II Detektor. Zuerst muss ich sie dafür im Detektor nachweisen können. B^0 Mesonen sind elektrisch neutral, haben eine Ruheenergie von $5,279 \text{ GeV}$ und bestehen aus einem d Quark und einem \bar{b} Quark. Nach der Relativitätstheorie ist Energie äquivalent zur Masse, das heißt Energie kann sich in Masseenergie umwandeln und umgekehrt. Da Energie - und Ladungserhaltung gelten muss, kann man sich ausrechnen, welches oder welche Teilchen im Kollisionspunkt entstehen können. Bei einer Kollisionsenergie von ca. $10,58 \text{ GeV}$ können genau die Teilchen entstehen, die eine gleiche Ruheenergie haben.

Da die Endenergien der Positronen und Elektronen nicht gleich sind, kann man sie nicht addieren, um die Kollisionsenergie auszurechnen. Das Elektron hat einen größeren Impuls als das Positron. Da auch in der Teilchenphysik Impulserhaltung gelten muss, bewegen sich beide Teilchen nach der Kollision weiter in die vorherige Bewegungsrichtung des Elektrons. Diese restliche kinetische Energie bei der Kollision, kann sich nicht in Masse umwandeln. Die Schwerpunktenenergie oder Kollisionsenergie \sqrt{s} wird mit Vierimpuls-Vektoren berechnet:

$$\sqrt{s} = \sqrt{\left(\begin{pmatrix} E_1 \\ p_{x1} \\ p_{y1} \\ p_{z1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E_2 \\ -p_{x2} \\ -p_{y2} \\ -p_{z2} \end{pmatrix} \right)^2} \quad (14)$$

In diesem Fall haben die Positronen eine Energie von $4,0 \text{ GeV}$ und die Elektronen eine Energie von $7,007 \text{ GeV}$. Da sich die Flugbahnen der beiden Teilchen nahezu auf einer Achse befinden, kann man p_y und p_z bei beiden gleich null setzen. p_x ist der Impuls in Bewegungsrichtung. Der Impuls ist bei der hohen Geschwindigkeit gleich der Energie, da die Ruheenergie beider Teilchen, im Vergleich zum Impuls eine vernachlässigbare Rolle spielt. Dann ergibt sich für die Schwerpunktenenergie \sqrt{s} :

$$\sqrt{s} = \sqrt{\left(\begin{pmatrix} 7,007 \text{ GeV} \\ 7,007 \text{ GeV} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 4,0 \text{ GeV} \\ -4,0 \text{ GeV} \\ -0 \\ -0 \end{pmatrix} \right)^2} \quad (15)$$

$$\sqrt{s} = \sqrt{\left(\begin{pmatrix} 7,007 \text{ GeV} + 4,0 \text{ GeV} \\ 7,007 \text{ GeV} - 4,0 \text{ GeV} \\ 0 - 0 \\ 0 - 0 \end{pmatrix} \right)^2} \quad (16)$$

$$\sqrt{s} = \sqrt{(7,007 \text{ GeV} + 4,0 \text{ GeV})^2 - (7,007 \text{ GeV} - 4,0 \text{ GeV})^2} \quad (17)$$

$$\sqrt{s} = \underline{\underline{10,58 \text{ GeV}}} \quad (18)$$

Aus dieser Kollisionsenergie kann sich wie erwähnt Masse bilden - die invariante Masse \sqrt{s} . Zur Entstehung der B Mesonen wird genau diese Energie von $10,58 \text{ GeV}$ benötigt. Denn bei dieser Energie ist der Wirkungsquerschnitt¹³ σ relativ groß, dass bei der Kollisionen Hadronen gebildet werden. (siehe Diagramm)

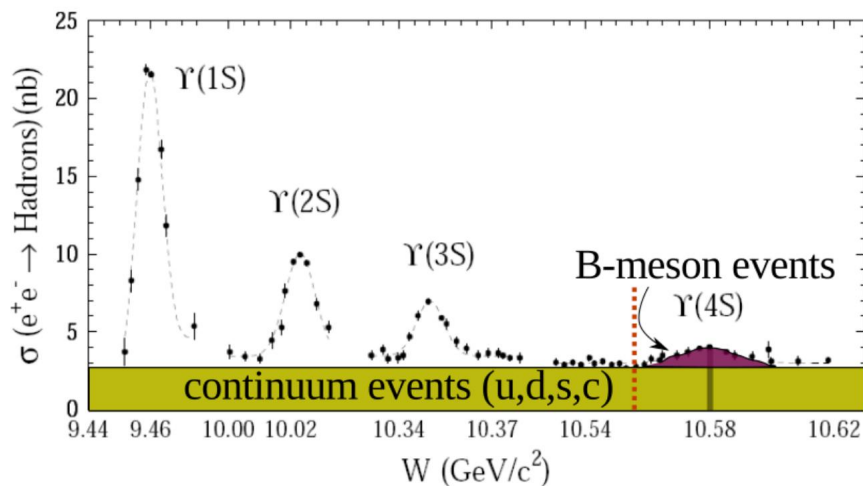


Abbildung 15: Diagramm Wirkungsquerschnitt

Man erhält zu einer bestimmten Wahrscheinlichkeit genau das Hadron, welches in 96%

¹³Wirkungsquerschnitt ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass zwischen Teilchen eine Reaktion stattfindet.

der Fälle in ein B Mesonenpaar zerfällt, das $Y(4S)$ Meson. Dies ist ein angeregter Zustand des Y-Mesonens, mit einer weitaus höheren Energie als der im Grundzustand. Es besteht aus einem b Quark und ein \bar{b} Quark. Ein mögliches Feynman Diagramm für die Entstehung des $Y(4S)$ Mesons aus der Anihilation von Elektron und Positron wäre das Abstrahlen eines Photons, welches wieder ein Quark-Antiquark Paar bildet:

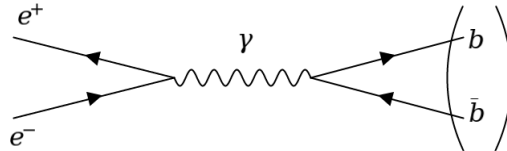


Abbildung 16: $e^+ + e^- \longrightarrow b + \bar{b}$

Das abgestrahlte Photon, welches wieder ein Quark-Antiquark Paar bildet, hat genau die Energie die bei der Kollision zur Verfügung steht, die Schwerpunktsenergie \sqrt{s} . Damit ist zu einer bestimmten Wahrscheinlichkeit immer das $Y(4S)$ Meson entstanden. Es muss nicht zwangsweise ein Photon (γ) nach der Anihilation entstehen. Es ist genauso möglich, dass ein Z^0 Boson entsteht, welches dann wieder in zwei Quarks zerfällt. Jedoch ist dieses Ereignis, aufgrund der höheren Energie des Z^0 Bosons als seine Ruheenergie, nach der Breit-Wigner-Funktion¹⁴ weniger wahrscheinlich, als die Entstehung eines Photon.

Gleichzeitig ist es möglich, dass nicht sofort das $Y(4S)$ entsteht, sondern das Photon gleich wieder in Elektron und Positron, Myon und Antimyon oder Tau und Antitau zerfällt.

Das $Y(4S)$ Meson zerfällt nach $1,218 \cdot 10^{-20}$ s mit einer Wahrscheinlichkeit von 96 % in ein B Mesonenpaar.

$$Y(4S) \longrightarrow B + \bar{B}$$

Ein möglicher Zerfall durch die starke Wechselwirkung, indem das \bar{b} Quark des $Y(4S)$ Mesons ein Gluon abstrahlt wird in dieser Abbildung dargestellt.

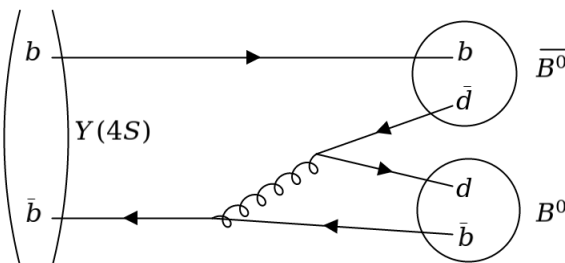


Abbildung 17: $Y(4S) \longrightarrow B^0 + \bar{B}^0$

¹⁴Die *Breit-Wigner-Funktion* ist eine mathematische Funktion, die den Zusammenhang des Wirkungsquerschnitts einer Teilchenreaktion und seiner Energie innerhalb einer Resonanz wiedergibt.

Wie im vorherigen Feynman Diagramm abgebildet, ist es möglich, dass beide Teilchen elektrisch neutral sind. Es gibt aber auch die Möglichkeit, dass sie eine elektrische Ladung tragen.

$$Y(4S) \longrightarrow B^+ + B^-$$

$$Y(4S) \longrightarrow B^0 + \bar{B}^0$$

Die Wahrscheinlichkeit für geladene B - Mesonenpaare liegt bei $51,4 \pm 0,6 \%$ und für neutrale B Mesonenpaare bei $48,6 \pm 0,6 \%$.

In 4 % der Fälle wird das $Y(4S)$, wie bereits erwähnt, sofort wieder in ein Elektron und Positron, Myon und Antimyon oder Tau und Antitau zerfallen. Es gibt noch andere Zerfallskanäle. Jedoch sind diese mit teilweise unter $0,000006 \%$ Zerfallswahrscheinlichkeit relativ unwahrscheinlich.

Was ich untersuchen werde, sind Zerfälle von B Mesonenpaaren. Die häufigsten Zerfälle von B Mesonen sind von der "*Particle Data Group*"¹⁵ publiziert worden. Die zwei häufigsten Zerfallskanäle von B^0 Mesonen sind:

$$B^0 \longrightarrow l^+ + \nu_l + anything \quad (10,33 \pm 0,28)\%$$

$$B^0 \longrightarrow K^\pm + anything \quad (78 \pm 8)\%$$

anything bedeutet in dem Fall, dass das Teilchen in irgend ein anderes Teilchen zerfallen kann. Dabei muss man Ladungserhaltung und Energieerhaltung beachten.

Die CP-Verletzung bei B^0 Mesonen tritt nicht in jedem Zerfall auf. Die nachfolgenden Zerfälle sind einige Beispiele für CP-verletzende Zerfälle:

$$B^0 \longrightarrow K^- + \pi^+ \quad 1,94 \cdot 10^{-5} \pm 0,06 \cdot 10^{-5}$$

$$B^0 \longrightarrow K^+ + \pi^- \quad 1,96 \cdot 10^{-5} \pm 0,05 \cdot 10^{-5}$$

$$B^0 \longrightarrow K^+ + K^- \quad 2,52 \cdot 10^{-5} \pm 0,17 \cdot 10^{-5}$$

$$B^0 \longrightarrow \pi^- + \pi^+ \quad 5,515 \cdot 10^{-6} \pm 0,22 \cdot 10^{-6}$$

$$B^0 \longrightarrow \pi^0 + \pi^0 \quad 1,62 \cdot 10^{-6} \pm 0,31 \cdot 10^{-6}$$

Diese Zerfallskanäle versuchte ich mit der Belle II Masterclass zu rekonstruieren. Ich habe mit dem Zerfall $B^0 \longrightarrow K^- + \pi^+$ begonnen. Dabei habe ich die Zerfallsprodukte in das Programm eingesetzt. Das Ergebnis war ein Histogramm. Das ist eine Darstellung der Häufigkeitsverteilung einer physikalischen Größe. In diesem Fall ist die x-Achse die invariante Masse \sqrt{s} in $\frac{GeV}{c^2}$ und die y-Achse die Anzahl der Zerfälle, bei denen diese bestimmte invariante Masse \sqrt{s} aufgetreten ist.

¹⁵Die *Particle Data Group* ist eine internationale Kollaboration von Teilchenphysikern, die publizierte Resultate, die Eigenschaften von Elementarteilchen zusammenstellt" [10]

Die Anordnung der in Punkt 4.1.2.1 genannten Blöcke sieht für den Zerfallskanal $B^0 \rightarrow K^- + \pi^+$ so aus:

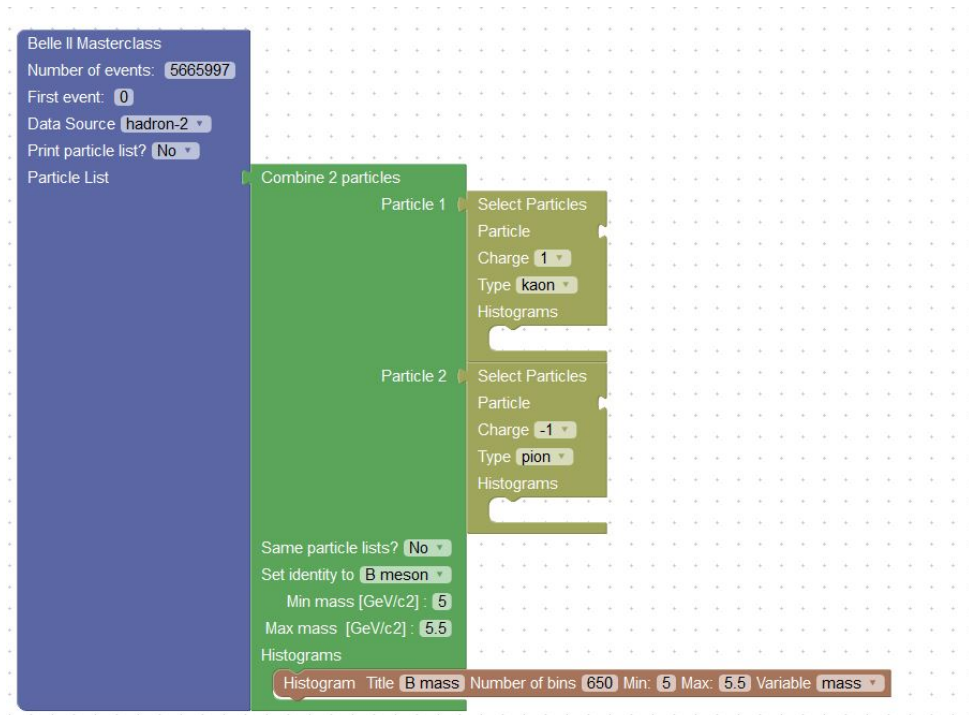


Abbildung 18

Bei dem entstandenen Histogramm sieht man einen Peak bei $1,86 \text{ GeV}$ (siehe Histogramm). Eigentlich erwartete ich einen Peak, der bei $5,28 \text{ GeV}$ lag - genau der Ruhemasse des B^0 Mesons. Damit hätte ich eine Rekonstruktion dieses Teilchens erreicht. Jedoch ist kein Peak bei diesem Wert vorhanden gewesen, sondern nur einer bei $1,86 \text{ GeV}$:

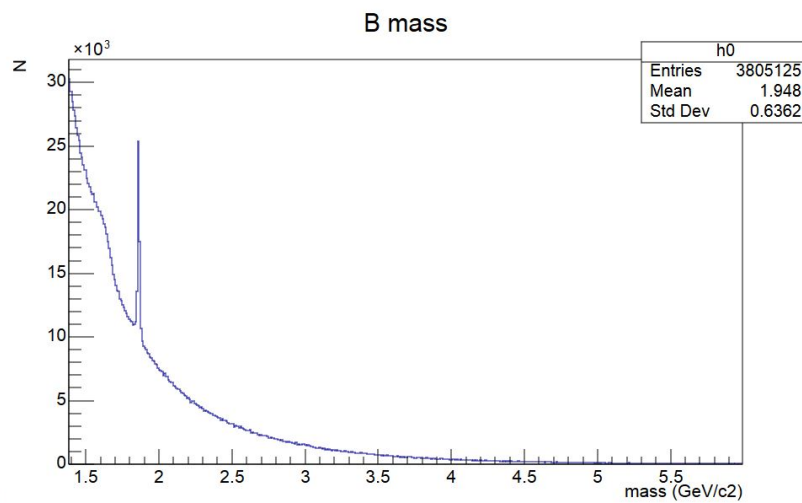


Abbildung 19: $D^0 \rightarrow K^- + \pi^+$

Das allerdings sind rekonstruierte D^0 Mesonen gewesen, die ebenfalls in $K^- + \pi^+$ zerfallen können:

$$D^0 \longrightarrow K^- + \pi^+ \quad (3,93 \pm 0,04)\%$$

Die D^0 Mesonen haben eine Ruhemasse von $1,86 \text{ GeV}$ - genau bei der invarianten Masse, wo der Peak zu sehen ist. Das heißt man muss den Energiebereich weiter einschränken, um B^0 Mesonen beobachten zu können. Indem man den Energiebereich, in dem das Masterclass Programm Zerfälle suchen soll, ändert, sollte nun ein Peak zu sehen sein. Ich schränkte ihn auf $5 \text{ GeV} - 5.5 \text{ GeV}$ ein. Das entstandene Histogramm lieferte allerdings keine vielversprechende Ergebnisse:

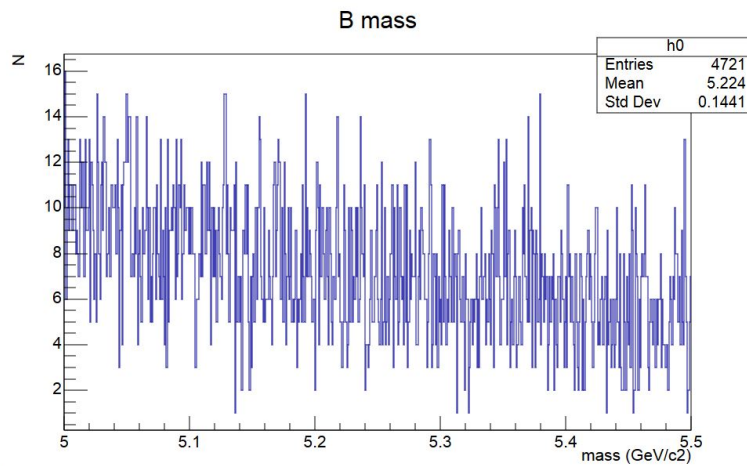


Abbildung 20: $B^0 \longrightarrow K^- + \pi^+$

Unabhängig der Anzahl der Bins ist kein eindeutiger Peak mehr zu erkennen. Die anderen Zerfallskanäle habe ich ebenfalls versucht zu rekonstruieren:

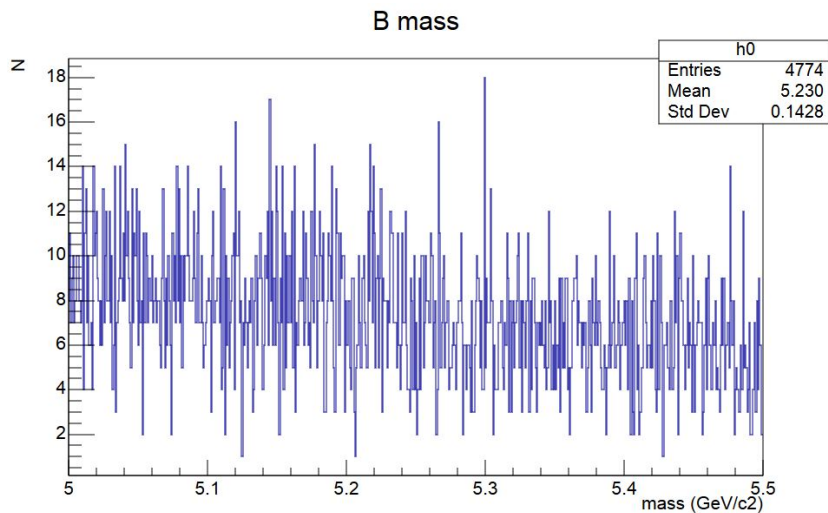


Abbildung 21: $B^0 \longrightarrow K^+ + \pi^-$

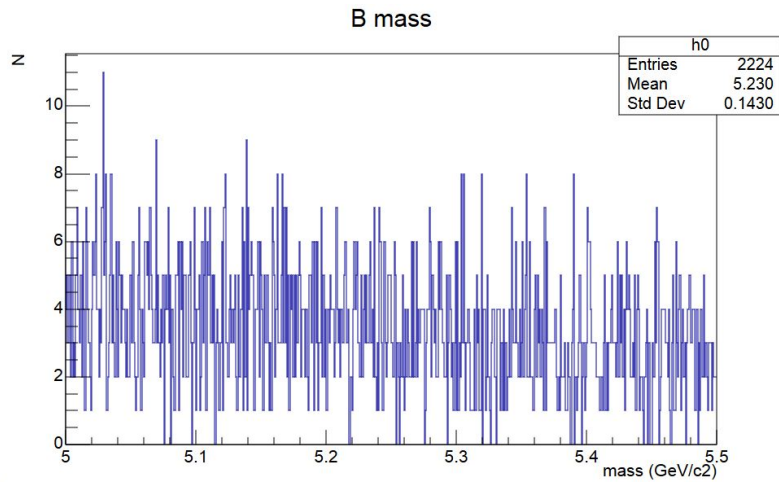


Abbildung 22: $B^0 \rightarrow K^+ + K^-$

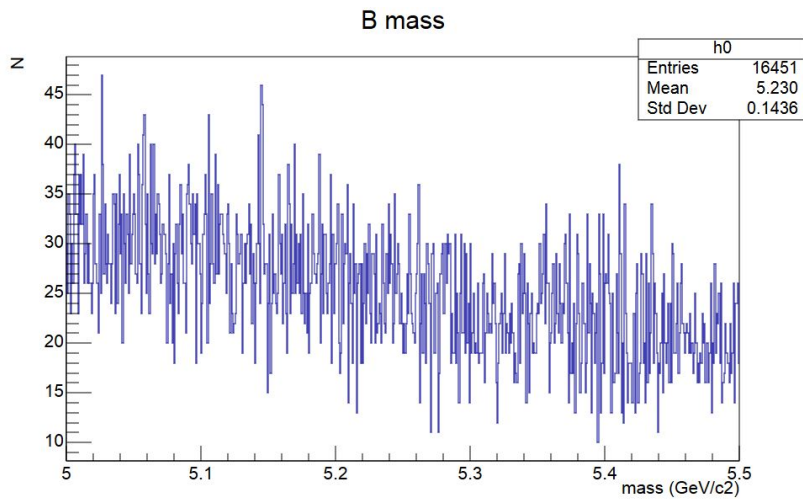


Abbildung 23: $B^0 \rightarrow \pi^- + \pi^+$

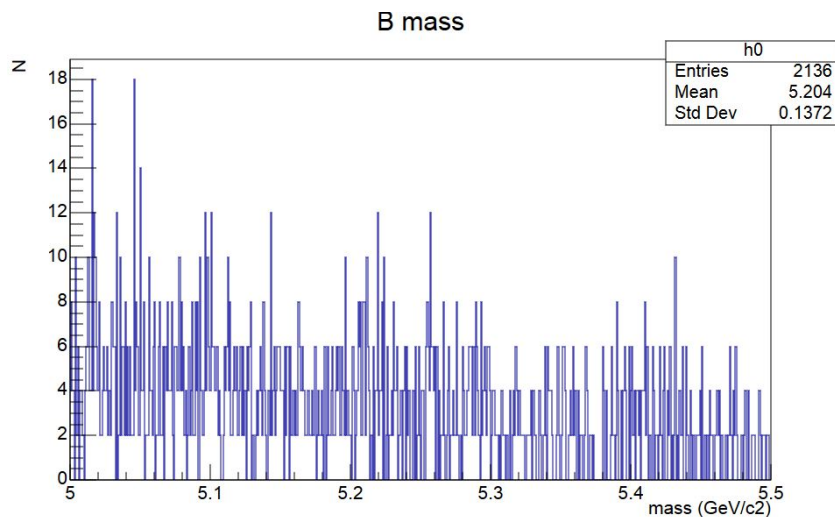


Abbildung 24: $B^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0$

Bei allen Histogrammen ist die Anzahl der eingetragenen Events zu gering, sodass eine Auffälligkeit, ein Peak nicht mehr von Untergrundprozessen und anderen ähnlichen

Teilchenzerfällen unterscheidbar wird. Deshalb untersuchte ich ebenfalls die Zerfallskanäle mit D Mesonen, die selber wiederum schnell zerfallen. Untersucht habe ich den Zerfallskanal $B^0 \rightarrow D^- + \pi^+$. Jedoch zerfallen D^- Mesonen ebenfalls schnell wieder in andere Teilchen. Daher entfällt für mich diese Analyse, da bei wahrscheinlichen Zerfällen ein Neutrino mit frei wird. Neutrinos berücksichtigt dieses Programm allerdings nicht. Außerdem sind viele Zerfallskanäle von D^- Mesonen für mich nicht rekonstruierbar, da die Wahrscheinlichkeit der funktionierenden Zerfälle extrem gering ist. Diese Analyse bringt also ebenfalls keine verwertbaren Ergebnisse.

Als letztes untersuchte ich Zerfallskanäle mit $J\psi$ Mesonen, wie beispielsweise $B^0 \rightarrow J\psi + K^+ + \pi^-$ mit einer Wahrscheinlichkeit von $1,15 \cdot 10^{-3} \pm 0,05 \cdot 10^{-3}$. Da das $J\psi$ Meson selber schnell zerfällt und vom Detektor nicht detektiert werden kann, muss erst gezeigt werden, dass es überhaupt entstanden ist. Indem ich in dieser Blockkombination dieses Zerfalls einen zweiten Block B bei *combined particles* ($J\psi$ Meson) einfüge,

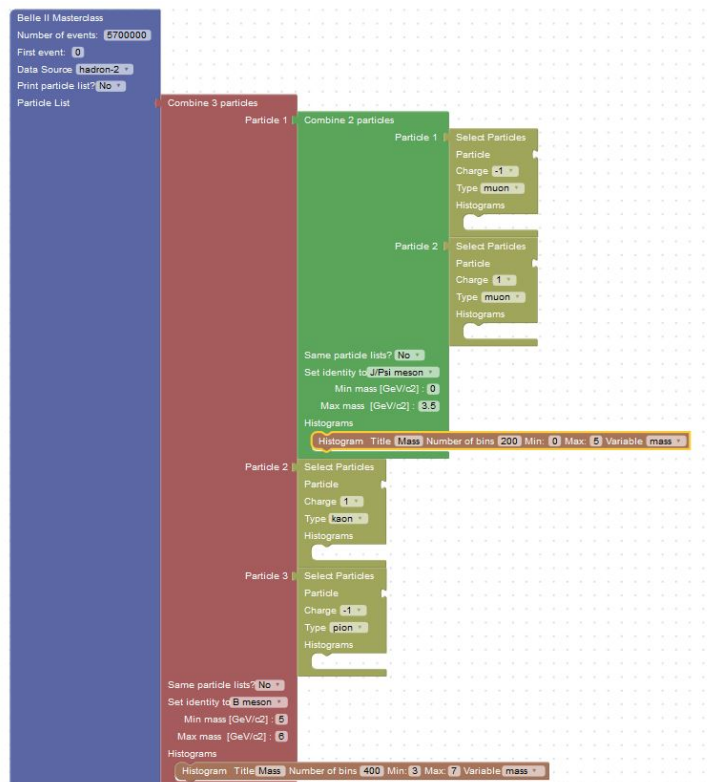


Abbildung 25

wird ein extra Histogramm erstellt, welches die Anzahl der beobachteten Zerfallsprodukte des $J\psi$ Mesons zeigt:

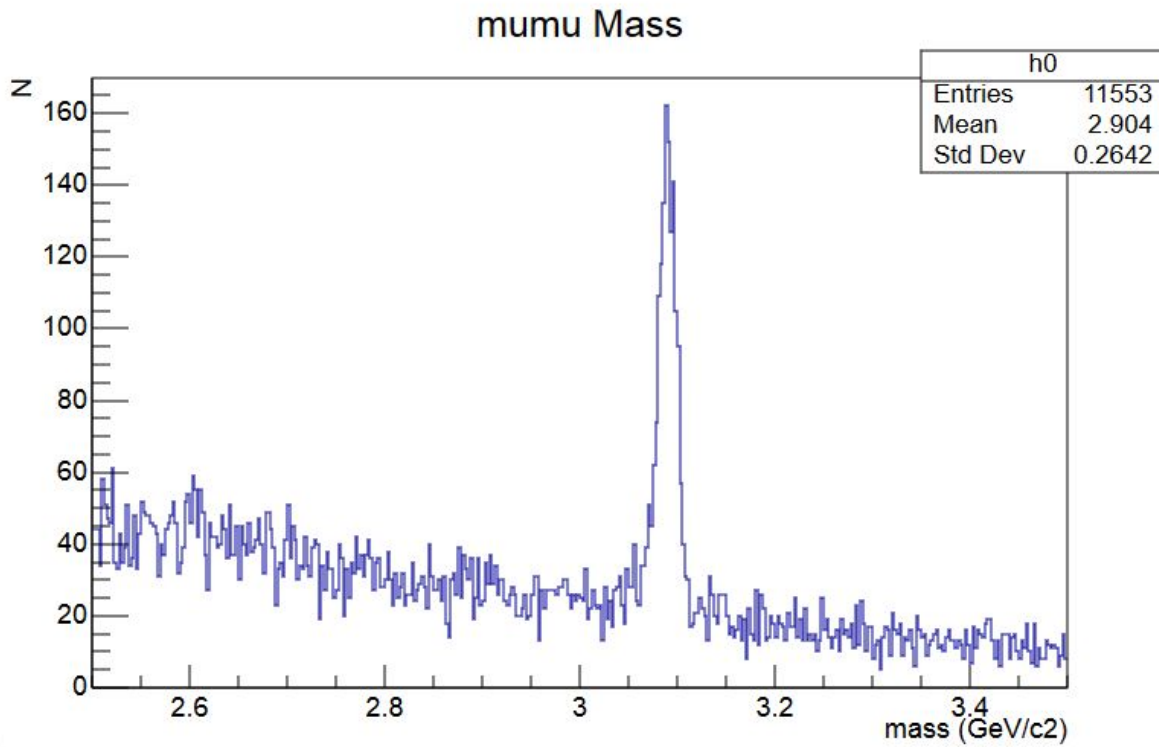


Abbildung 26: $J\psi \longrightarrow \mu^+ + \mu^-$

Es ist ein Peak bei $3,096 \text{ GeV}$ zu erkennen. Das bedeutet bei ca. 160 Events wurde ein Myon und Antimyon Paar beobachtet, welches zusammen eine invariante Masse von ca. $3,096 \text{ GeV}$ hatte. Diese Myonen Paare kommen aus dem Zerfall eines $J\psi$ Meson. Der Zerfall des B^0 Mesons kann nun auch in ein Histogramm eingetragen werden:

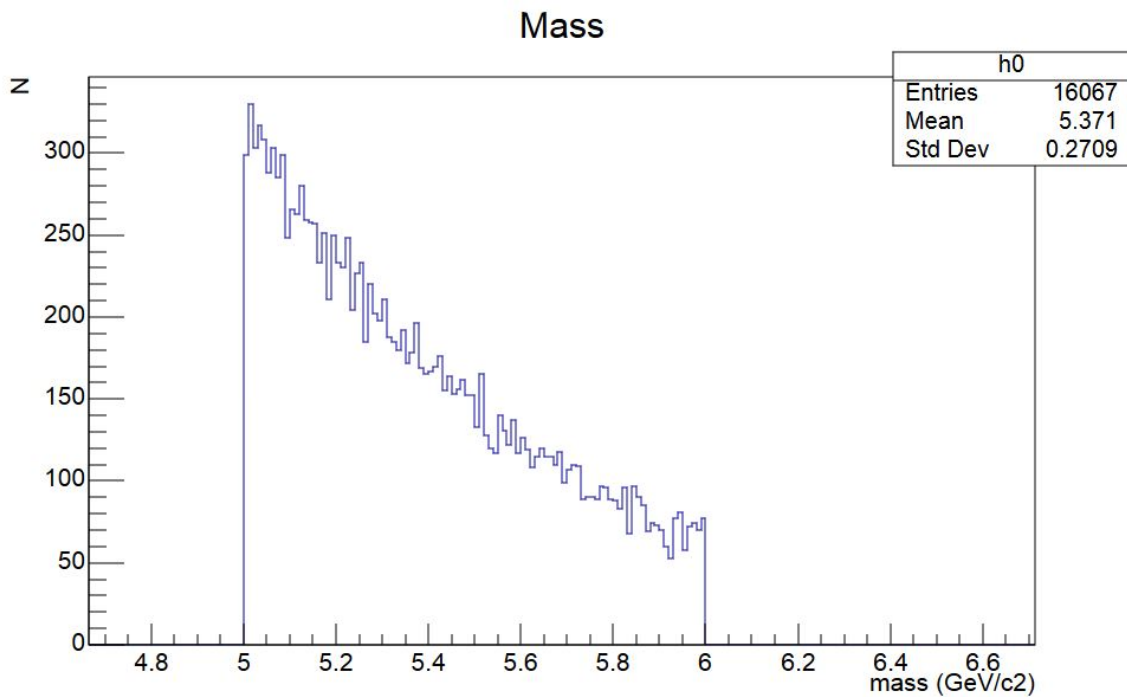


Abbildung 27: $B^0 \longrightarrow J\psi + K^+ + \pi^-$

Das entstandene Histogramm ist ebenfalls nicht für eine vernünftige Aussage verwertbar. Daraufhin untersuchte ich einen anderen Fall mit einer anderen Teilchenart. Ich versuche B^+ Mesonen zu rekonstruieren. Der Zerfallskanal $B^+ \rightarrow J\psi + K^+$ konnte mit der nachfolgenden Blockkombination rekonstruiert werden. Wie oben schon, erwähnt muss zuerst gezeigt werden, dass das $J\psi$ Meson wirklich aus dem Zerfall des B^0 Mesons entstanden ist. Dazu wird ein extra Histogramm erstellt, welches das Gleiche wie in Abbildung 26 ist. Zu diesem untersuchten Zerfallskanal wird nachfolgendes Histogramm erstellt.

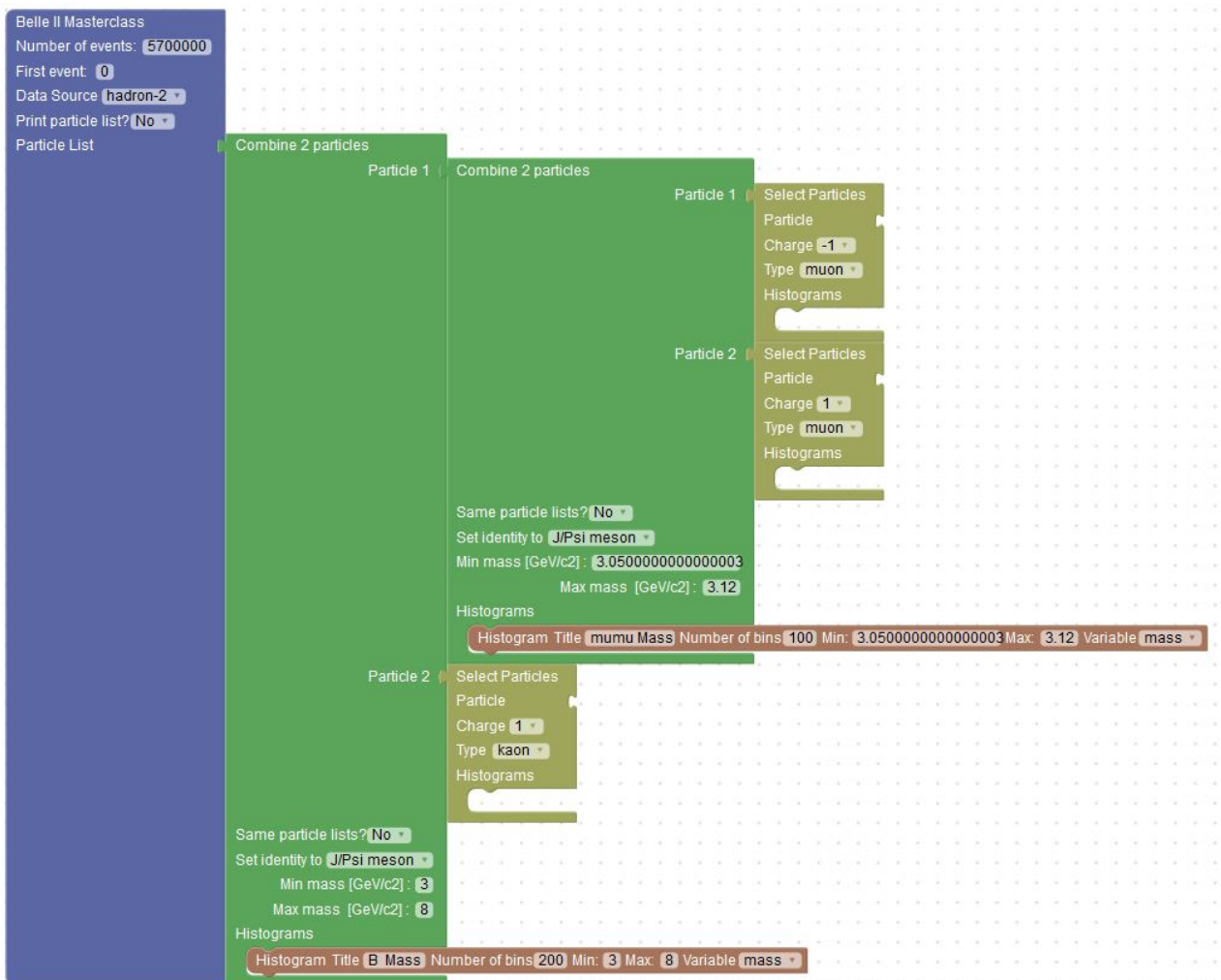


Abbildung 28: Blockkombination

Tatsächlich entsteht ein kleiner Peak bei 5,28 GeV:

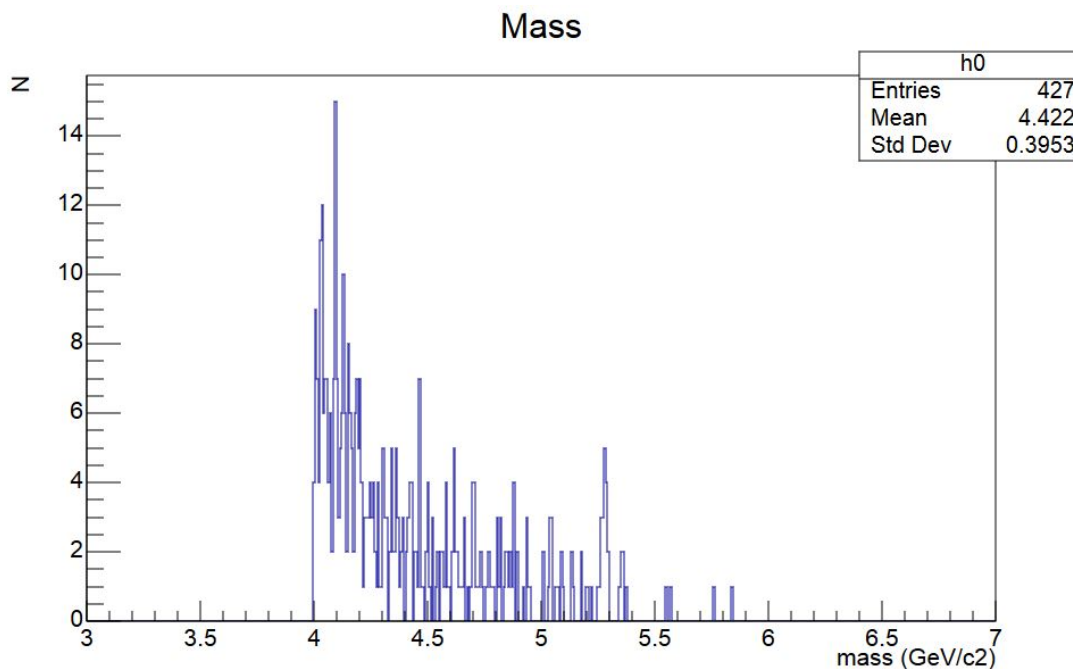


Abbildung 29: $B^+ \rightarrow J\psi + K^+$

Zwar kann man sagen, dass bei ca. 5600000 Events genau fünf B^+ Mesonen entstanden sind, die in positiv geladene Kaonen und neutrale $J\psi$ Mesonen zerfallen sind. Trotzdem lässt sich mit 5 Einträgen keine beweisbare Aussage machen. Das ist der geringen Zerfallswahrscheinlichkeit dieses Zerfallskanals von $1.016 \cdot 10^{-3} \pm 0.033 \cdot 10^{-3}$ geschuldet.

Ungeachtet dessen wird zur Beobachtung der CP-Verletzung immer der gleiche Zerfall des Antiteilchens verglichen. Denn die direkte CP-Verletzung ist definiert als Unterschied der Anzahl der Endzustände n des Teilchens von der Anzahl der Endzustände n_2 seines Antiteilchens:

$$A = \frac{n_{\text{Teilchen}} - n_{\text{Antiteilchen}}}{n_{\text{Teilchen}} + n_{\text{Antiteilchen}}} \quad (19)$$

Wäre diese Welt symmetrisch und keine CP-Verletzung existent, würde die Anzahl der Endzustände für Teilchen und Antiteilchen gleich sein und A würde für jeden Zerfall 0 ergeben. Das beobachtet man allerdings nicht. Denn in manchen Zerfällen von Teilchen, hier in dieser BeLL das B^0 Meson und \bar{B}^0 Mesonen, sind die Zerfallsbreiten der Endzustände ungleich. Und solange dies der Fall ist: $n_{\text{Teilchen}} \neq n_{\text{Antiteilchen}}$, wird das Ergebnis der Formel 18 nie 0 sein. Somit hat man eine direkte CP-Verletzung beim Zerfall nachgewiesen.

Da man bis jetzt davon ausgeht, dass Antiteilchen und Teilchen zu 100% identisch sind, ausschließlich den Ladungen, erwartet man gleiches Verhalten beider Teilchen. Das heißt beim Zerfall sollten auch gleiche Zerfallsbreiten der Endzustände erreicht werden. Da

dies aber nicht der Fall ist, muss es einen Unterschied zwischen beiden geben. Dieser Unterschied könnte das Ungleichgewicht von Materie und Antimaterie im Universum zumindest teilweise erklären.

Da ich aber keine B^0 Mesonen rekonstruieren konnte, entfällt für mich der Vergleich mit dem \bar{B}^0 Meson. So komme ich zu der Schlussfolgerung, dass die Masterclass Daten, die auf ca. 5600000 Events begrenzt sind eine zu geringe Anzahl an Events darstellt um B^0 Mesonen oder B^+ zu beobachten. Bei einer Zerfallswahrscheinlichkeit des B^0 Mesons in ein $K^+ + \pi^-$ von $1.94 \cdot 10^{-5}$ ist die Anzahl treffender Events zu gering, um im Histogramm rekonstruiert zu werden. Da ich keine B^0 Mesonen rekonstruieren konnte, konnte ich auch keine CP-Verletzung beobachten.

5 Ergebnisse der letzten Jahre

Makoto Kobayashi und Toshihide Maskawa erklärten die 1964 festgestellte Symmetrieverletzung beim Zerfall des neutralen Kaons. Sie nahmen an, dass das Kaon ständig in sein Antiteilchen oszilliert. Für diese Annahme musste es allerdings drei Generationen von Quarks geben und nicht wie damals angenommen nur zwei. Für die Vorhersage einer dritten Quark Generation und die Erklärung des Symmetriebruchs, mittels der CKM Matrix, erhielten die Physiker 2008 den Nobelpreis.

6 Prognose

2014 wurde das Projekt des SUPERKEKB fertiggestellt. Zwei Jahre später startete Phase 1 und erst in diesem Jahr fing man an, alle Detektorkomponenten zu kalibrieren. Der *Pixel Vertex Detector* ist beispielsweise nur zur Hälfte eingebaut.

Im Laufe der nächsten Monate wird BELLE II anfangen, Kollisiondaten zu sammeln. Das Physik Programm ist auf vorrausichtlich 10 Jahre begrenzt. Danach wird er entweder umgebaut, verbessert oder für andere Zwecke genutzt. Es ist von unserem Physik Verständnis abhängig. Ob und was sich daran ändert, bestimmt die Zukunft des SUPERKEKB und des BELLE II Experiments. Es bleibt also abzuwarten, was der Detektor in den nächsten Jahren erreicht und ob er eine Lösung für die widersprüchliche Aussage vom Anfang finden kann: Wir existieren.

7 Quellen

7.1 Fachliteratur

- Netzwerk Teilchenwelt - Unterrichtsmaterial ab Klasse 10 - Kosmische Strahlung
- Netzwerk Teilchenwelt - Unterrichtsmaterial ab Klasse 10 - Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen
- Netzwerk Teilchenwelt - Unterrichtsmaterial ab Klasse 10 - Forschungsmethoden
- Netzwerk Teilchenwelt - Unterrichtsmaterial ab Klasse 10 - Mikrokurse
- Stephen Hawking - Eine kurze Geschichte der Zeit
- Stephen Hawking - Der große Entwurf
- Paul Fischer - Das große Buch der Physik
- Particle Data Group 2016

7.2 Internetquellen

Photon Factory

- <https://lightsources.org/lightsources-of-the-world/asia-oceania/photon-factory/>
Zugriff: 14.10.2019
- https://www2.kek.jp/imss/pf/eng/about/sr/lightspectrum_e.png
Zugriff: 14.10.2019
- <https://www.kek.jp/en/Facility/IMSS/PF/PFAR/>
Zugriff: 14.10.2019
- <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/ipac2016/papers/wepow020.pdf>
Zugriff: 14.10.2019
- http://pfwww.kek.jp/acr2011pdf/part_a/partA_full_text.pdf#page=89&zoom=180,-100,577
Zugriff: 14.10.2019
- <https://www2.kek.jp/imss/pf/eng/about/sr/>
Zugriff: 14.10.2019

KEK-PS

- [https://de.wikipedia.org/wiki/KEK_\(Forschungszentrum\)](https://de.wikipedia.org/wiki/KEK_(Forschungszentrum))
Zugriff: 15.10.2019
- <http://research.kek.jp/group/www-ps/kekps/index.html>
Zugriff: 15.10.2019
- <https://www.kek.jp/en/About/History/>
Zugriff: 15.10.2019

TRISTAN

- http://www.nishina.riken.go.jp/researcher/seminar_past/nishina120/kimura.pdf
Zugriff: 14.10.2019
- <http://www-superkekb.kek.jp/>
Zugriff: 14.10.2019
- <https://de.wikipedia.org/wiki/TRISTAN>
Zugriff: 14.10.2019
- <https://www.ph.tum.de/academics/org/labs/fopra/docs/userguide-86.de.pdf>
Zugriff: 16.10.2019
- http://physik.uni-graz.at/~uxh/teaching/moderne_kapitel09/topquark.pdf
Zugriff: 16.10.2019

KEKB

- http://www.nishina.riken.go.jp/researcher/seminar_past/nishina120/kimura.pdf
Zugriff: 16.10.2019
- <https://de.wikipedia.org/wiki/KEKB>
Zugriff: 16.10.2019
- <https://arxiv.org/pdf/1809.01958.pdf>
Zugriff: 16.10.2019

Elektronen-Positronenquelle

- <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2017/papers/tupab004.pdf>
Zugriff: 15.10.2019
- <https://arxiv.org/pdf/1809.01958.pdf>
Zugriff: 15.10.2019

- <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/1556>
Zugriff: 17.10.2019
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Edison-Richardson-Effekt>
Zugriff: 17.10.2019
- <http://www.iap.tu-darmstadt.de/fileadmin/iap/fp/a/austr.pdf>
Zugriff: 17.10.2019
- https://www-zeuthen.desy.de/~kolanosk/research_seminar/talks/Han.pdf
Zugriff: 17.10.2019
- accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC10/papers/mozra01.pdf
Zugriff: 18.10.2019
- <http://inspirehep.net/record/1314134/files/mopri004.pdf>
Zugriff: 18.10.2019
- <http://accelconf.web.cern.ch/Accelconf/IPAC2013/papers/mopfi017.pdf>
Zugriff: 18.10.2019

Pixel Vertex Detector

- https://www.hep1.physik.uni-bonn.de/research/index/copy_of_depfet-active-pixel/pxd-pixel-vertex-detector-for-belle-ii
Zugriff: 25.11.2019
- <https://web.physik.rwth-aachen.de/~klein/MariaLaach/LarsReuen.pdf>
Zugriff: 25.11.2019
- http://www-old.mpi-halle.mpg.de/mpi/publi/pdf/5718_03.pdf
Zugriff: 25.11.2019
- <https://sus.ziti.uni-heidelberg.de/Forschung/FGDetektoren/?lang=de>
Zugriff: 25.11.2019
- <https://www.mpp.mpg.de/forschung/aufbau-der-materie/belle-ii-detektor/belle-ii-das-auge-fuer-antimaterie/>
Zugriff: 25.11.2019
- <https://www.kek.jp/en/newsroom/2018/04/26/0700/>
Zugriff: 25.11.2019
- <http://desy.de/~jkrohn/thesis.pdf>
Zugriff: 25.11.2019
- <http://www-superkekb.kek.jp/documents/B2TDR.pdf>
Zugriff: 25.11.2019

- <https://www.mpp.mpg.de/aktuelles/meldungen/detail/belle-ii-erfolgreicher-einbau-des-beast-detektors>
Zugriff: 25.11.2019

Central Drift Chamber

- <https://de.wikipedia.org/wiki/Drahtkammer>
Zugriff: 25.11.2019
- <https://www.semanticscholar.org/paper/Calibration-for-Belle-II-Central-Drift-Chamber-Thanh-Uno/31398b508886efbe178f9b93450504b8e2104fed>
Zugriff: 25.11.2019
- <http://belle2.kek.jp/detector.html>
Zugriff: 26.11.2019
- <https://www.physi.uni-heidelberg.de/~fschney/detektoren/detector3.pdf>
Zugriff: 26.11.2019
- https://www.phenix.bnl.gov/WWW/tracking/dc/experts/Drift_Chamber_Principle_of_operation.html
Zugriff: 26.11.2019
- <https://www.youtube.com/watch?v=nGCrrgXSE0k>
Zugriff: 26.11.2019

TOP-ARICH

- https://indico.cern.ch/event/716539/contributions/3245933/attachments/1798876/2933886/20.02.2019_VCI2019_ARICH_burmist.pdf_prepress.pdf
Zugriff: 27.11.2019
- https://www.thphys.uni-heidelberg.de/~wolschin/eds15_3s.pdf
Zugriff: 27.11.2019
- <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Tscherenkow-Strahlung>
Zugriff: 27.11.2019
- <https://www.slac.stanford.edu/pubs/icfa/spring00/paper2/paper2.pdf>
Zugriff: 27.11.2019
- <https://ieeexplore.ieee.org/document/6881730>
Zugriff: 27.11.2019
- <https://www-zeuthen.desy.de/~kolanosk/astro0910/skripte/cosmics02.pdf>
Zugriff: 27.11.2019

- <http://desy.de/~jkrohn/thesis.pdf>
Zugriff: 27.11.2019
- <http://www-superkekb.kek.jp/documents/B2TDR.pdf>
Zugriff: 27.11.2019

ECAL

- <https://de.wikipedia.org/wiki/Caesiumiodid>
Zugriff: 28.11.2019
- <https://www.crystals.saint-gobain.com/products/csitl-cesium-iodide-thallium>
Zugriff: 28.11.2019
- https://indico.cern.ch/event/391665/contributions/1827392/attachments/1229657/1801936/manoni_vci_021716_v1.pdf
Zugriff: 28.11.2019
- <https://indico.inp.nsk.su/event/13/session/10/contribution/16/material/slides/0.pdf>
Zugriff: 28.11.2019
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Bremsstrahlung>
Zugriff: 25.10.2019
- <http://www.maria-laach.tp.nt.uni-siegen.de/downloads/files/2003/H%C3%B6pfner-2003-4.pdf>
Zugriff: 28.11.2019
- <https://web-docs.gsi.de/~wolle/Schuelerlabor/TALKS/DETEKTOREN/V0-6-Kalorimeter.pdf>
Zugriff: 28.11.2019
- <https://www.belle2.org/research/detector/>
Zugriff: 28.11.2019
- https://indico.in2p3.fr/event/18845/contributions/73189/attachments/54347/71096/MBorsato_eReco_LHCbBelle2.pdf
Zugriff: 28.11.2019
- [http://ekpwww.physik.uni-karlsruhe.de/~tkuhr/HauptseminarWS1112/Senger\\$_\\$handout.pdf](http://ekpwww.physik.uni-karlsruhe.de/~tkuhr/HauptseminarWS1112/Senger$_$handout.pdf)
Zugriff: 28.11.2019
- <http://desy.de/~jkrohn/thesis.pdf>
Zugriff: 28.11.2019
- <http://www-superkekb.kek.jp/documents/B2TDR.pdf>

Zugriff: 28.11.2019

KLM

- http://flc.desy.de/lcnotes/notes/localfsExplorer_read?currentPath=/afs/desy.de/group/flc/lcnotes/LC-DET-2004-028.pdf
Zugriff: 29.11.2019
- <https://indico.cern.ch/event/361123/contributions/856620/attachments/1135126/1625995/KLM-Piilonen.pdf>
Zugriff: 29.11.2019
- <https://www.physi.uni-heidelberg.de/Forschung/he/LHCb/workshop/neckarzimmern17/Kuhr.pdf>
Zugriff: 29.11.2019
- <https://indico.inp.nsk.su/event/8/session/8/contribution/145/material/slides/0.pdf>
Zugriff: 29.11.2019
- <http://inspirehep.net/record/875348/files/arXiv%3A1011.0352.pdf>
Zugriff: 29.11.2019
- <http://desy.de/~jkrohn/thesis.pdf>
Zugriff: 29.11.2019
- <https://belle2.jp/muon-detection/>
Zugriff: 29.11.2019

DAQ und Trigger

- <https://docs.belle2.org/record/305/files/BELLE2-TALK-CONF-2015-029.pdf>
Zugriff: 29.11.2019
- <https://belle2.jp/trigger-and-data-acquisition/>
Zugriff: 29.11.2019
- <https://belle2.jp/computing/>
Zugriff: 29.11.2019
- <https://indico.ihep.ac.cn/event/6387/session/7/contribution/220/material/slides/0.pdf>
Zugriff: 29.11.2019
- <https://docs.belle2.org/record/305/files/BELLE2-TALK-CONF-2015-029.pdf>
Zugriff: 29.11.2019

Sonstige

- <https://www.belle2.org/>
Zugriff: 18.12.2019
- <https://arxiv.org/pdf/1809.01958.pdf/>
Zugriff: 18.12.2019
- <https://de.wikipedia.org/wiki/KEKB>
Zugriff: 18.12.2019
- <https://www.kek.jp/en/Facility/ACCL/KEKBRing/>
Zugriff: 18.12.2019
- <https://de.wikipedia.org/wiki/KEKB>
Zugriff: 18.12.2019
- <https://arxiv.org/abs/1109.4780>
Zugriff: 18.12.2019
- [http://wwa1.kph.uni-mainz.de/Vorlesungen/WS07/FP-Seminar/handouts/
Gloeckner_CP-Verletzung.pdf](http://wwa1.kph.uni-mainz.de/Vorlesungen/WS07/FP-Seminar/handouts/Gloeckner_CP-Verletzung.pdf)
Zugriff: 18.12.2019
- <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3422684/>
Zugriff: 18.12.2019
- [https://indico.cern.ch/event/760693/attachments/1726549/2823630/
FullEventInterpretation_WSutcliffe.pdf](https://indico.cern.ch/event/760693/attachments/1726549/2823630/FullEventInterpretation_WSutcliffe.pdf)
Zugriff: 18.12.2019

Bildquellen

Abbildung 1:

<http://accelconf.web.cern.ch/Accelconf/IPAC2013/papers/mopfi017.pdf>,
Seite 2

Abbildung 2:

<http://accelconf.web.cern.ch/Accelconf/IPAC2013/papers/mopfi017.pdf>,
Seite 1

Abbildung 3: <https://www-zeuthen.desy.de/~kolanosk/astro0910/skripte/cosmics02.pdf>, Seite

2

Abbildung 4-14:

aus der Belle II Masterclass: <https://belle2.ijs.si/masterclass/>

Abbildung 15:

[https://indico.cern.ch/event/760693/attachments/1726549/2823630/
FullEventInterpretation_WSutcliffe.pdf](https://indico.cern.ch/event/760693/attachments/1726549/2823630/FullEventInterpretation_WSutcliffe.pdf), Seite 9

Abbildung 16, 17:

selbst entworfen mit <https://www.aidansean.com/feynman/>

Abbildung 18-30:

Screenshots von erstellten Histogrammen der Belle II Masterclass:

<https://belle2.ijs.si/masterclass/> **Abbildung 30:**

[http://pfwww.kek.jp/acr2011pdf/part_a/partA_full_text.pdf#page=89&
zoom=180,-100,577](http://pfwww.kek.jp/acr2011pdf/part_a/partA_full_text.pdf#page=89&zoom=180,-100,577), Seite 89

Abbildung 31: [http://www.nishina.riken.go.jp/researcher/seminar_
past/nishina120/kimura.pdf](http://www.nishina.riken.go.jp/researcher/seminar_past/nishina120/kimura.pdf), Seite 1

Abbildung 32:

<https://docs.belle2.org/record/601/files/BELLE2-TALK-CONF-2017-059.pdf>,

Seite 8

Abbildung 33:

<https://arxiv.org/pdf/1809.01958.pdf>, Seite 10

Abbildung 34:

[https://www.cosmics4school.physik.uni-bonn.de/geschichte/
meilensteine-der-hoehenstrahlungsforschung](https://www.cosmics4school.physik.uni-bonn.de/geschichte/meilensteine-der-hoehenstrahlungsforschung)

Abbildung 35 und 36: selbst entworfen mit

<https://www.aidansean.com/feynman/>

Abbildung 37 <https://de.wikipedia.org/wiki/Kaon#/media/Datei:>

Kaon-box-diagram-with-bar.svg

Abbildung 38:

http://scienceblogs.de/astrodicticum-simplex/files/2013/07/Standard_Model_of_Elementary_Particles-de.svg_.png,

Abbildung 39:

<https://www.belle2.org/e21596/e21620/e21799/infoboxContent21801/rotate3ss.gif>,

Abbildung 40:

<https://www.mpp.mpg.de/forschung/aufbau-der-materie/belle-ii-detektor/belle-ii-das-auge-fuer-antimaterie/>,

Abbildung 41:

https://indico.mpp.mpg.de/event/1249/contributions/485/attachments/503/565/DHP02_Ringberg2011.pdf, Seite 2

Abbildung 42:

<https://www.oeaw.ac.at/detail/news/neues-teilchenbeschleuniger-experiment-in-japan-gestartet/>

Literatur

- [1] (KEK), © HIGH ENERGY ACCELERATOR RESEARCH ORGANIZATION: *PHOTON FACTORY ACTIVITY REPORT PART A : HIGHLIGHT AND FACILITY REPORT.* , http://pfwww.kek.jp/acr2011pdf/part_a/partA_full_ext.pdf, 2012.
- [2] OLIVER POOTH, PRIVATDOZENT DER RWTH AACHEN UND MITGLIED DER CMS KOLLABORATION: *Was ist eigentlich Luminosität?* , https://www.weltmaschine.de/neuigkeiten/ask_an_expert/luminositaet/ , 2011.
- [3] KAZUNORI AKAI, KAZURO FURUKAWA, HARUYO KOISOON BEHALF OF THE SUPERKEKB ACCELERATOR TEAM: *SuperKEKB Collider.* , <https://arxiv.org/pdf/1809.01958.pdf>, unbekannt.
- [4] SANGRO, RICCARDO DE: *SuperKEKB Belle II Status.* , <https://docs.belle2.org/record/601/files/BELLE2-TALK-CONF-2017-059.pdf>, 2017.
- [5] UNBEKANNT: *Parität (Physik).* , <https://de.wikipedia.org/wiki/Parit>
- [6] UNBEKANNT: *Aerogel.* , <https://de.wikipedia.org/wiki/Aerogel>, 2019.
- [7] UNBEKANNT: *Trigger (Physik).* , [https://de.wikipedia.org/wiki/Trigger\(Physik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Trigger(Physik)), 2019.
- [8] KONNO, TOMOYUKI: *Integration of readout of the vertex detector in the belle ii daq system.* , <https://indico.ihep.ac.cn/event/6387/session/7/contribution/220/material/slides/0.pdf>, 2017.
- [9] SPEKTRUM AKADEMISCHER VERLAG, HEIDELBERG: *invariante masse.* , <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/invariante-masse/7393>, 1998.
- [10] UNBEKANNT: *Particle data group.* , https://de.wikipedia.org/wiki/Particle_Data_Group, 2019.

A Anhang

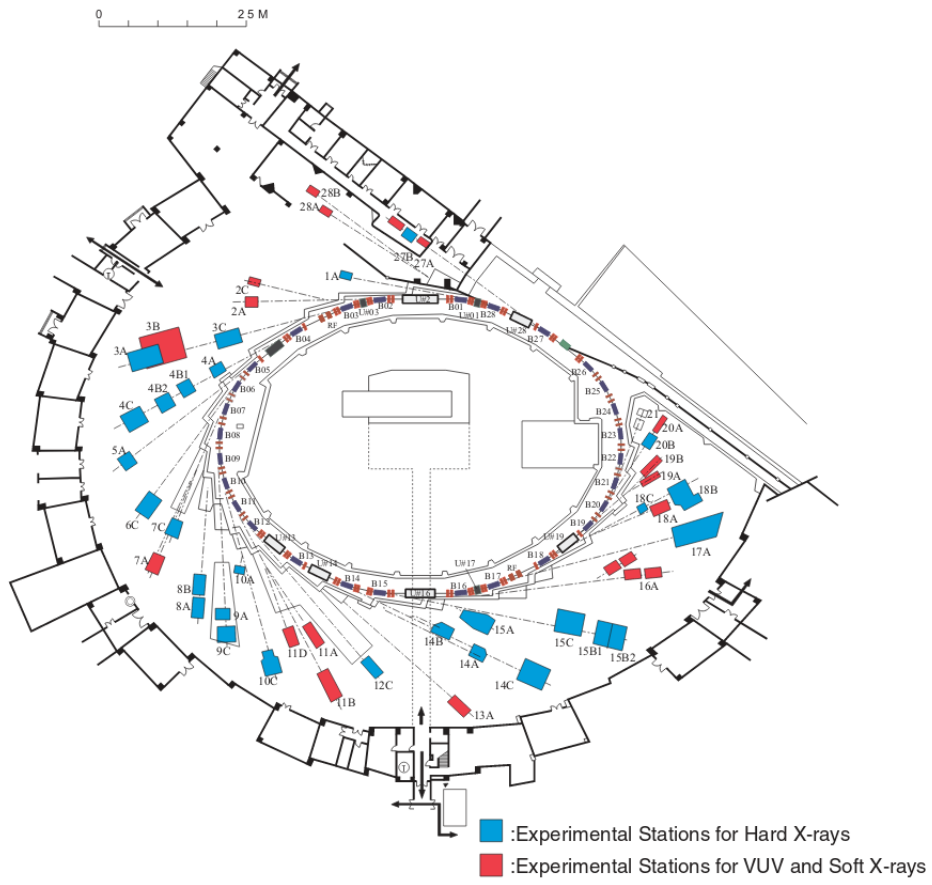


Abbildung 30

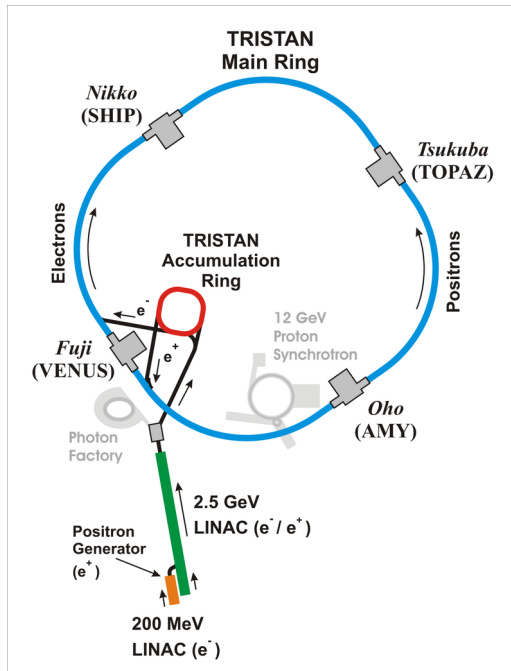


Abbildung 31

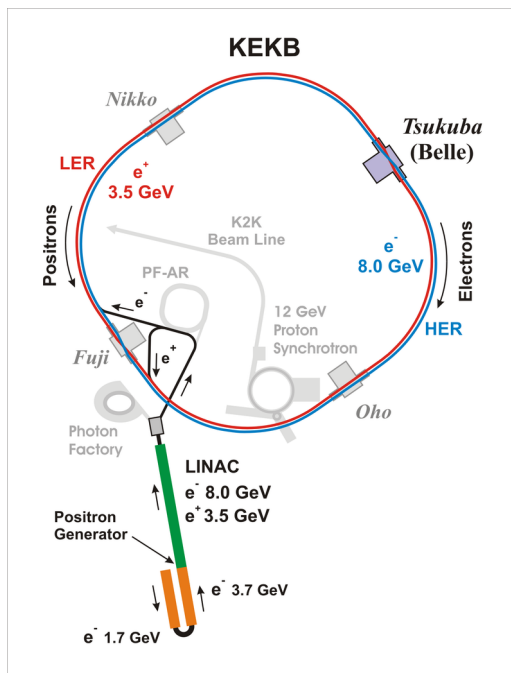


Abbildung 32

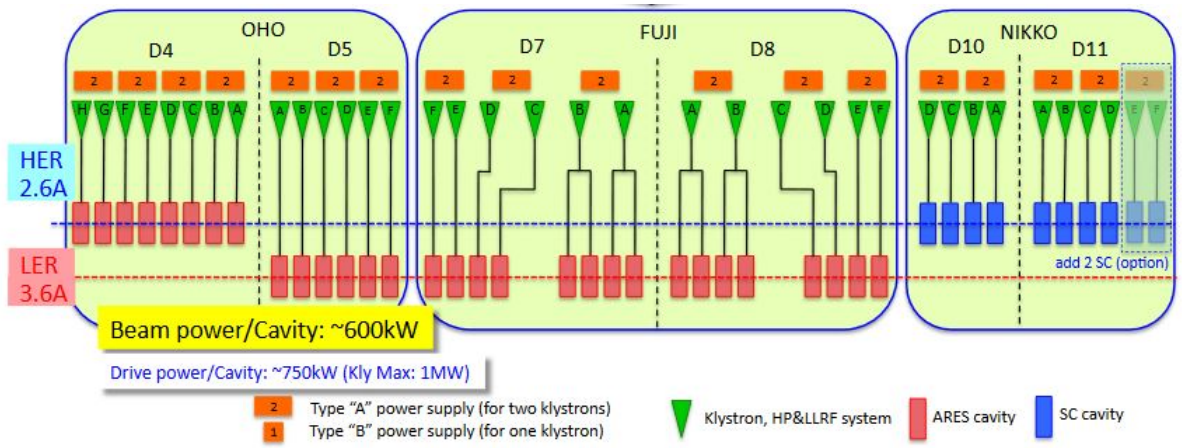


Abbildung 33

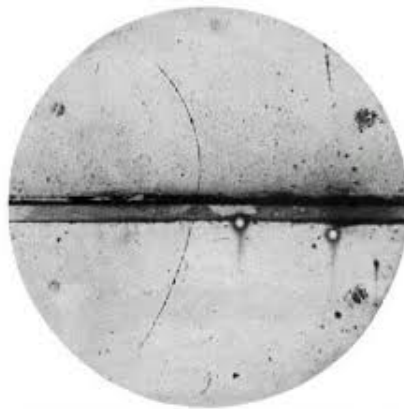


Abbildung 34

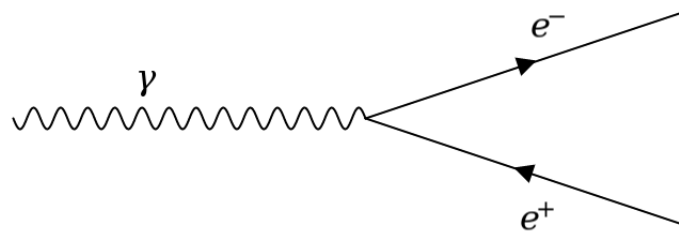


Abbildung 35

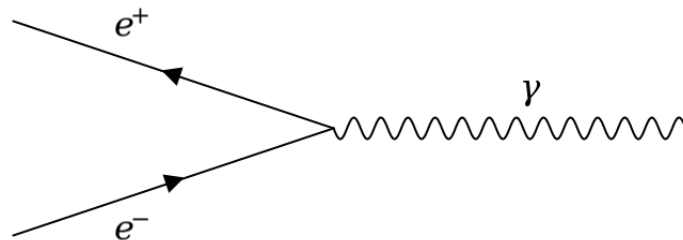


Abbildung 36

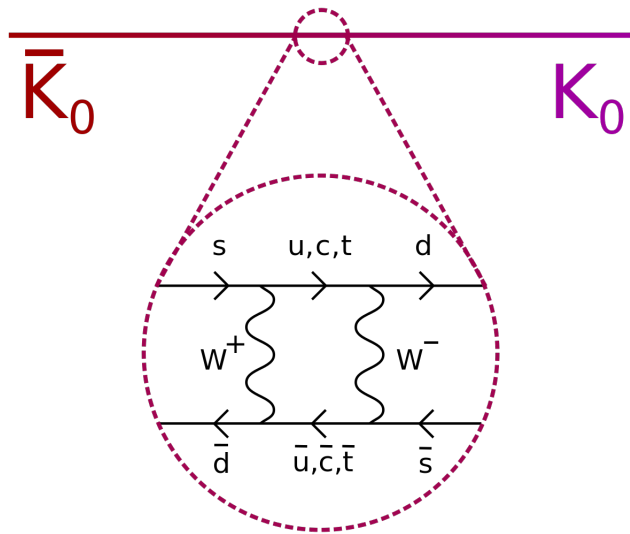


Abbildung 37

Drei Generationen
der Materie (Fermionen)

	I	II	III		
Masse →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0	? GeV
Ladung →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
Name →	u up	c charm	t top	γ Photon	H Higgs Boson
Quarks	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g Gluon	
	<2,2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron- Neutrino	<0,17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon- Neutrino	<15,5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tau- Neutrino	91,2 GeV 0 1 Z⁰ Z Boson	
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau	80,4 GeV ±1 1 W[±] W Boson	Eichbosonen

Abbildung 38

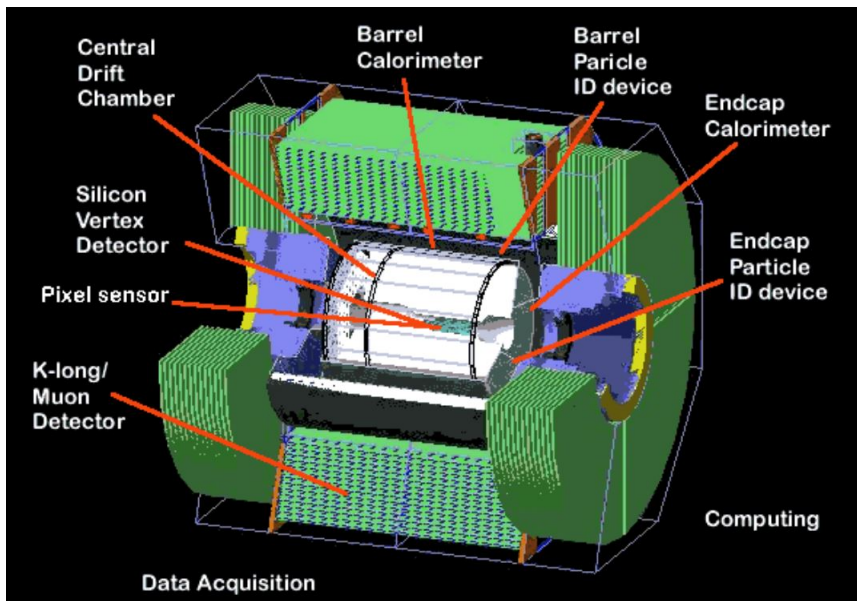


Abbildung 39

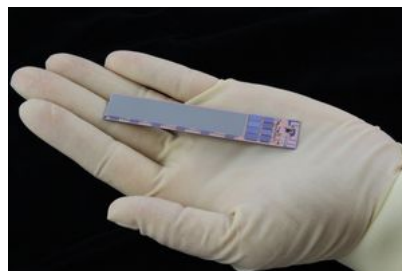


Abbildung 40

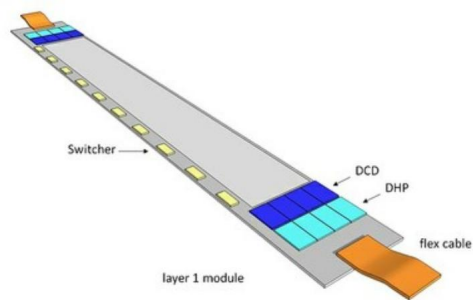


Abbildung 41

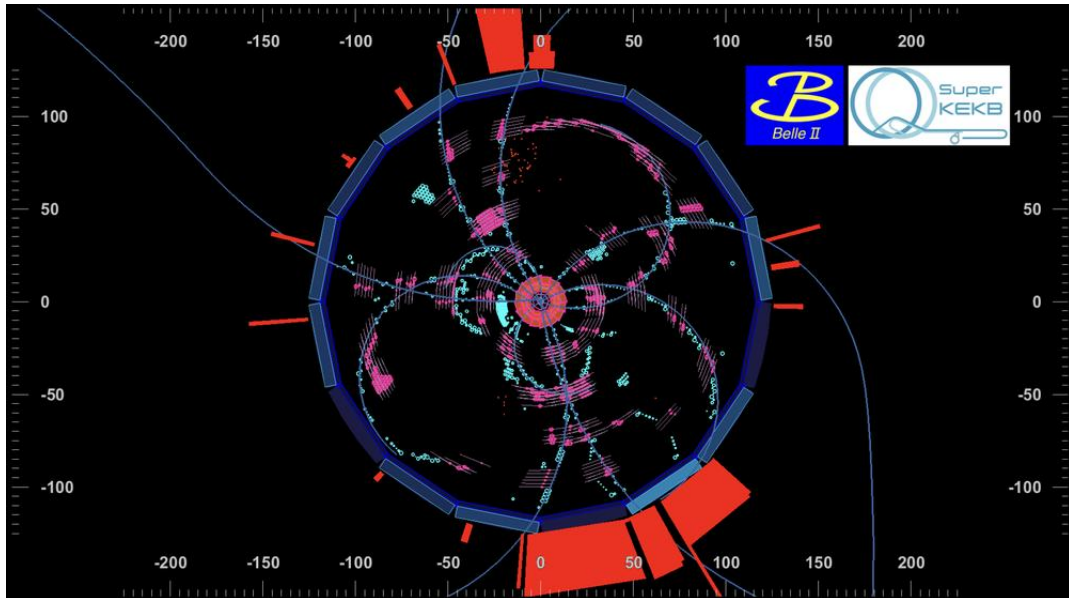


Abbildung 42

Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und alle Formulierungen, die wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Quellen entnommen wurden, kenntlich gemacht habe.

Sofern sich – auch zu einem späterem Zeitpunkt – herausstellt, dass die Arbeit oder Teile davon nicht selbstständig verfasst wurden, die Zitationshinweise fehlen oder Teile ohne Quellennachweis aus dem Internet entnommen wurden, so wird die Arbeit abgewertet oder auch nachträglich mit null Punkten bzw. Note sechs gewertet.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die vorliegende Arbeit für schulische Zwecke benutzt werden kann.

Danksagung

Ich danke allen, die mir bei dieser Besonderen Lernleistung behilflich waren. Besonders danken möchte ich meinem externen Betreuer Herr Jan-Eric Nitschke, der sich bereit erklärt hat mich bei meiner BeLL zu unterstützen und zu betreuen. Und mir immer half wenn es Probleme gab, ein offenes Ohr für meine Fragen hatte und auch immer kurzfristig zu erreichen war. Ein großer Dank geht auch an meinen schulischen Betreuer Herr Steffen Einhorn. Er weckte das Interesse an der Teilchenphysik und gab mir sehr viele Ratschläge und Hilfestellungen bei Problemen egal welcher Art.

Netzwerk Teilchenwelt danke ich, dass ich das Programm mit CERN-Workshop und Teilchenphysik-Vorträgen und Veranstaltungen durchführen durfte. Dadurch wurde mein Interesse noch größer.

Meiner Schule, dem Schulleiter Herr Uwe Harzer und Herr Roy König möchte ich ebenfalls danken, bei denen ich Hilfe bei \LaTeX erhielt. Außerdem konnte man sich immer gut miteinander unterhalten. Genauso danken möchte ich Frau Lehmann, meiner Tutorin, die mir das jetzige Physik Verständnis nahe brachte.

Ich möchte mich auch herzlich bei Herrn Rok Pestotnik bedanken, der mir die Masterclass Daten und die Software zugeschickt hat.

Natürlich geht mein Dank auch an meine Familie und meine Freunde. Besonders erwähnen möchte ich Amy, die mir jeden Tag wieder neue Kraft gibt.

Ich danke Gott, dass er mich auf diesem Weg begleitet hat.