4. Dezember 2023

Bachelor-Arbeiten 2024 in experimenteller Elementarteilchenphysik

am Lehrstuhl für experimentelle Teilchenphysik und in der Arbeitsgruppe Kuhr

New Small Wheel Detektor vor Installation im ATLAS-Experiment

A Ausbildungsprogramm

Wir bieten im Sommersemester 2024 in der experimentellen Elementarteilchenphysik ein integriertes Programm, das Ihnen einen vielseitigen Einblick in unsere Forschungsarbeiten gibt. Im Zentrum des Programms stehen Bachelorarbeiten mit engem Bezug zu Forschungsthemen des ATLAS-Experiments am Large Hadron Collider am Forschungszentrum CERN in Genf und des Belle II-Experiments am Beschleunigerzentrum KEK in Japan. Wir möchten Ihnen hierbei Einblicke vermitteln in die physikalischen Ziele und Analysemethoden der Experimente, in Detektorkonzepte und die Entwicklung neuer Detektorkomponenten und in Grid-Computing als innovative Technologie der Datenverarbeitung in der Teilchenphysik.
Elemente unseres Programms sind

- Wahlpflichtlehrveranstaltung des Moduls V für Bachelor-Studenten (3+1 SWS, 6 ECTS Punkte): 'Advanced Course in Particle Physics for Bachelor Students'

  Teil I: Datenanalyse in der Teilchenphysik
  Dieser Kurs ist eine grundlegende Einführung zur Darstellung und statistischen Auswertung experimenteller Daten, zur Modellierung elementarer Teilchenreaktionen, zur Simulation von Detektoren und des Teilchennachweises und zur Rekonstruktion der Primärreaktion aus einem komplexen Ereignismuster.
  Die Teilnahme am Teil I dieses Kurses (**15.4.-19.4.2024** ganztägig) ist **empfohlen** für alle Bachelor-Studenten in der Experimentellen Elementarteilchenphysik

  Teil II: Vertiefungsvorlesung Teilchenphysik
  Teil II vertieft die Konzepte der Elementarteilchenphysik und des experimentellen Nachweises spezieller Ereignistopologien. Vorlesung und Übungen finden begleitend zur 10-wöchigen Bachelor-Arbeit statt. Die Teilnahme am Teil II dieses Kurses wird allen Bachelor-Studenten in der Experimentellen Elementarteilchenphysik **empfohlen**.

  Die Teilnahme an einer Klausur zu Teil I und Teil II des Kurses ist Voraussetzung für den Erwerb von 3+3 ECTS Punkten.

- Physikalisches Seminar: Moderne Aspekte der Teilchenphysik
  Dieses Seminar soll nach momentaner Planung begleitend zur Bachelor-Arbeit stattfinden. Die Teilnahme am Seminar wird allen Bachelor-Studenten in der experimentellen Elementarteilchenphysik **empfohlen**, Voraussetzung für den Erwerb von 3 ECTS Punkten ist die aktive Teilnahme und ein Referat.

- Eine betreute Bachelor-Arbeit (12 ECTS Punkte, **22.4.-5.7.2024**; die Zeitspanne entspricht einer Bearbeitungszeit von 10 Wochen (unter Berücksichtigung von Feiertagen und einem vorlesungsfreien Tag), mit aktuellem Bezug zu unseren Forschungsarbeiten zu einem der nachfolgend aufgeführten Themen.

Ansprechpersonen: Wenn Sie Fragen zum Programm haben, oder wenn Sie sich bei der Auswahl der angebotenen Themenbereiche beraten lassen wollen, wenden Sie sich bitte an
Prof. Dr. Otmar Biebel (Otmar.Biebel@lmu.de)
Prof. Dr. Thomas Kuhr (Thomas.Kuhr@lmu.de)
Wenn Sie Interesse an oder Fragen zu einem spezifischen Thema haben, können Sie sich auch direkt an die angegebenen **Kontaktpersonen** wenden.

B Themenkatalog für Bachelor-Arbeiten am Lehrstuhl für experimentelle Teilchenphysik

1 Higgs-Boson-Selbstwechselwirkung

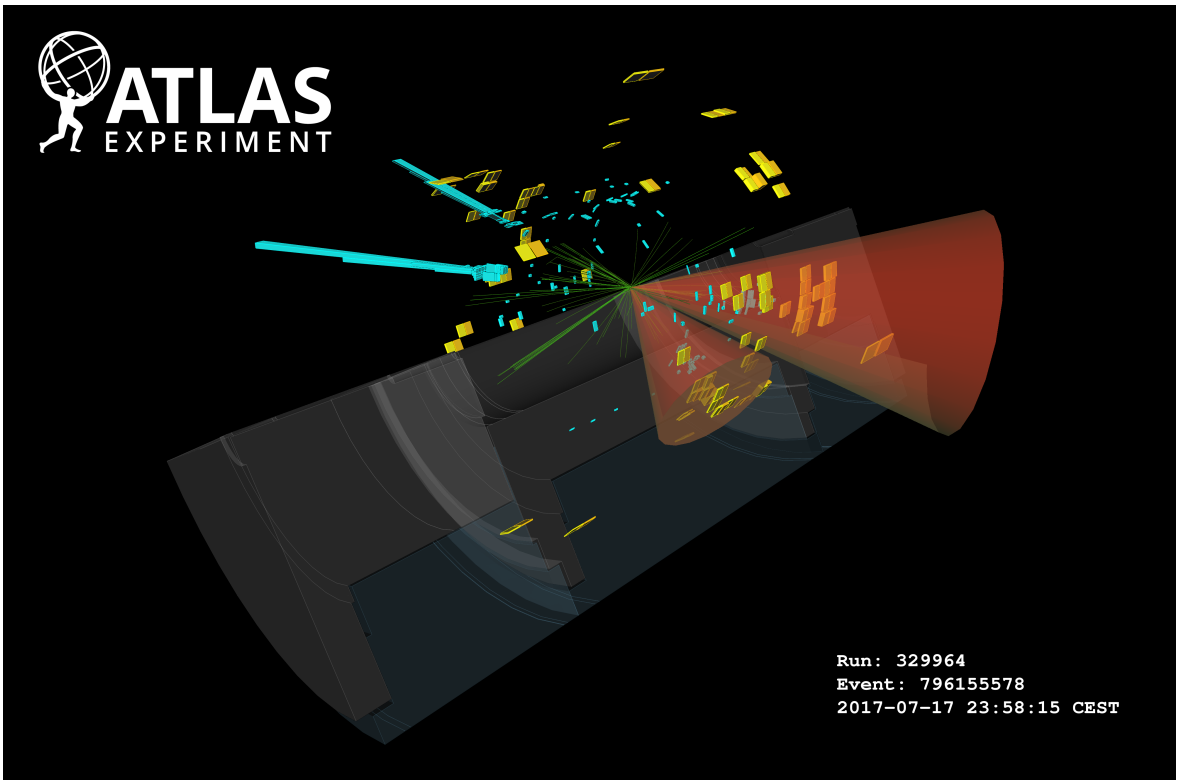


Abbildung 1: Kandidat für ein $HH \to b\bar{b}\gamma\gamma$ Ereignis.

Das Higgs-Boson ist ein Teilchen, das auch in der Kosmologie bedeutsam ist. Dies liegt daran, dass sich der sombrero-förmige Verlauf des Higgs-Potenzial aufgrund von Quanteneffekten v.a. durch das top-Quark mit zunehmender Energie aufweitet, möglicherweise bis zu einem Grad, bei dem kein stabiles Minimum im Potenzial mehr vorliegt. Dann gäbe es keinen stabilen Zustand des elektroschwachen Vakuums, was auf einen signifikanten Phasenübergang während der Frühphase des Universiums hindeuten würde, bei dem erst das heute beoabachtete stabile elektroschwache Vakuum entstanden ist.

Dieses Verhalten des Higgs-Potenzials kann experimentell durch eine Messung der Higgs-Selbstwechselwirkung überprüft werden. Eine solche Messung ist allerdings schwierig und benötigt die enorme Datenmenge des zukünftigen Hochluminositäts-LHC-Beschleunigers. Das Bachelorarbeitsthema ist dabei ein wichtiger Schritt zur erstmaligen Beobachtung der Higgs-Selbstwechselwirkung. Darauf wird später die genaue Messung der Energieabhängigkeit des Higgs-Potenzials aufbauen.

1.1 Trennung von HZ- und HH-Endzuständen mittels Spinkorrelation und Machine-Learning-Methoden

Die Higgs-Paarproduktion (HH-Endzustand) ist ein sehr seltener Prozess im LHC-Beschleuniger. Deshalb können auch andere Prozesse, auch wenn sie eigentlich völlig anderer Natur sind und in der Regel zu anderen Teilchenverteilungen im Detektor führen, in seltenen Fällen der Signatur

einer Higgs-Paarproduktion ähneln. Dies ist besonders für Prozesse bedeutsam, die sehr häufig im LHC-Beschleuniger erzeugt werden.

Zu einem solchen schwierigen Konkurrenzprozess gehört die Erzeugung eines Higgs-Z-Bosonpaars, bei dem das Z-Boson in bottom-antibottom Quarks und das Higgs-Boson in W^+W^- zerfällt. Dieser Prozess ist äußerst schwierig von Higgs-Paarerzeugung zu unterscheiden, wenn das eine Higgs-Boson ebenfalls in bottom-antibottom Quarks zerfällt. Denn die Massen von Higgs- und Z-Boson sind sehr ähnlich.

Allerdings ist das Z-Boson ein Teilchen mit Spin 1, während das Higgs-Boson Spin 0 hat. Daher unterscheidet sich die Winkelverteilung der bottom-antibottom Quarks im Z-Bosonzerfall vom Higgs-Bosonzerfall. Dieser Unterschied soll im Rahmen einer Bachelorarbeit untersucht und ausgenutzt werden, um als sensitive Messgröße für das überwachte Training eines Neuronalen Netzes zu dienen. Als weitere Hilfsmittel dienen dabei die Matrix Elemente der Higgs-Z- und Higgs-Higgs-Prozesse. Das Matrix Element bewertet die Übereinstimmung eines beobachteten Endzustandes von bottom-antibottom Quarks mit der Hypothese, dass dieser Endzustand aus einem Z- oder einem Higgs-Bosonzerfall stammt. Diese Wahrscheinlichkeiten werden von Berechnungsprogrammen ermittelt, die von alleine das Matrix Element mittels Feynman-Calculus berechnen können.

Kontakt: Prof. Dr. Otmar Biebel (Otmar.Biebel@lmu.de),
Celine Stauch, MSc (C.Stauch@physik.uni-muenchen.de)

1.2 Trennung von HZ- und HH-Endzuständen mittels Event Shape Observablen und Machine-Learning-Methoden

Im Schwerpunktssystem erwarten wir unterschiedliche räumliche Verteilungen der HH und HZ Endzuständen, wegen den unterschiedlichen Spins der beiden Bosonen. Für HH wäre die Erwartung eine eher gleichmäßige, isotrope Verteilung und HZ sollte eher eine Vorzugsrichtung haben. Dieser Umstand soll mithilfe der Thrust und Sphericity Event Shape Observablen untersucht und ein Neuronales Netz mit den Ergebnissen zur Klassifikation der Events trainiert werden.

Kontakt: Prof. Dr. Otmar Biebel (Otmar.Biebel@lmu.de),
Lars Linden, MSc (Lars.Linden@physik.uni-muenchen.de)

2 ATLAS Opendata Analyse

Das ATLAS Open Data-Projekt (http://opendata.atlas.cern/) macht Daten von Proton-Proton-Kollisionen, die vom ATLAS-Detektor am LHC aufgezeichnet wurden, öffentlich verfügbar und damit Teilchenphysik für Schüler und Studenten zugänglich. Derzeit wird daran gearbeitet, das Datenformat zu verbessern und die verfügbare Datenmenge sowie das Themenspektrum für die physikalische Analyse zu erweitern. Im Allgemeinen werden diese Analysebeispiele in Form von Jupyter-Notebooks präsentiert, die eine benutzerfreundliche interaktive Umgebung bieten und eine lehrreiche Darstellung des Physik-Themas sowie eine didaktische Schritt-für-Schritt-Demonstration der Analyse ermöglichen. Damit soll sowohl das physikalische Problem veranschaulicht werden als auch die Nutzung moderner Datenanalysetools demonstriert werden.

Basierend auf den vorhandenen Beispielen und Tools ergeben sich mehrere Möglichkeiten zur Weiterentwicklung:

- Aktualisieren der vorhandenen Analysebeispiele auf das neue und erweiterte Datenformat sowie Transformation der Beispiele, die auf Legacy-Tools basieren, in das moderne Python-basierte Data-Science-Ökosystem.

- Ein wichtiges Thema ist die Behandlung systematischer Unsicherheiten. Das neue Datenformat ist wesentlich flexibler, solche Effekte in eine Analyse auf relativ einfache Weise einzubeziehen. Ziel ist es, bei ausgewählten Analysen solche systematischen Unsicherheiten zu berücksichtigen.

- Moderne Algorithmen des maschinellen Lernens werden in vielen modernen Analysen eingesetzt, um die Präzision oder Empfindlichkeit der Messng zu optimieren. Ziel ist es, eine geeignete Analysen zu entwickeln, um die Anwendung von ML-Algorithmen unterschiedlicher Komplexität zu demonstrieren.

Kontakt: Dr. Guenter Duckeck (GDuckeck@lmu.de),
Dr. Alexander Lory (a.lory@physik.uni-muenchen.de),
David Koch, MSc (david.koch@physik.lmu.de)

3 Detektor-R&D zum Teilchennachweis

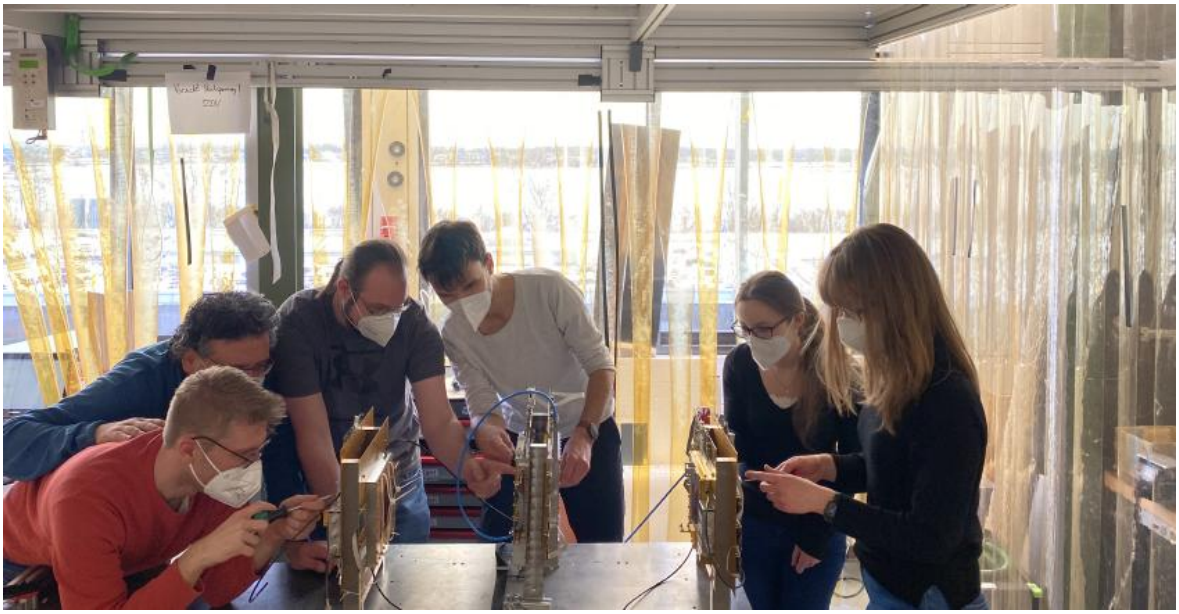


Abbildung 2: Aufbau und Vorbereitung einer Messapparatur mit neuartigen mikrostrukturierten Gasdetektoren für Testmessungen an einem Teilchenstrahl.

3.1 Micropatterndetektoren

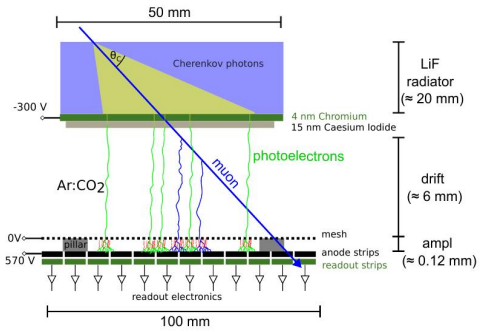
Micropatterndetektoren sind moderne gasgefüllte Detektoren mit mikrostrukturierter Anodenauslese und vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten in der fundamentalen oder interdisziplinären Forschung. Sie ermöglichen eine sehr gute Ortsauflösung von 50μm und besser, und können Teilchen auch bei sehr hohen Raten noch mit hoher Effizienz und Genauigkeit detektieren.

Am Lehrstuhl für experimentelle Teilchenphysik wurden vor kurzem 32 jeweils $2\,\mathrm{m}^2$ großen Micromegas-Detektoren (MICROMEsh GAseous Structures) gebaut, im ATLAS-Detektor am CERN installiert und nun für die Messung von Myon-Teilchen eingesetzt (siehe Titelbild). Nach dieser Serienproduktion werden baugleiche Referenzdetektoren regelmäßig in unserem Höhenstrahlungsmessstand in Garching untersucht, um die Leistungsfähigkeit der Detektoren weiter zu optimieren. Die Durchführung und Auswertung der Messungen ist eines von mehreren Themen für eine Bachelorarbeit.

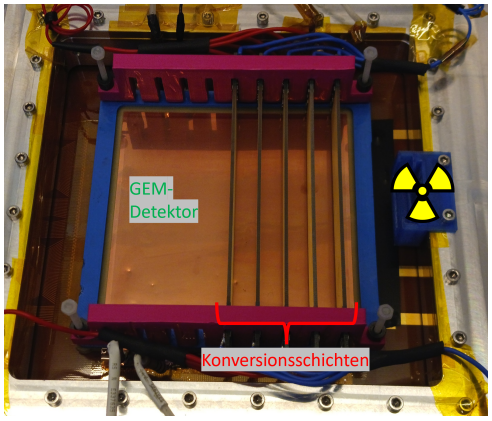
- Eine der spannenden Fragestellungen betrifft die Zusammensetzung des Detektorgases, das sich auf die Hochspannungsstabilität, die Strahlungsfestigkeit und auch die erreichbare Ortsauflösung für Myon-Spuren auswirkt. Hierbei ist von großem Interesse, ob die Ortsauflösung für geneigte Teilchenspuren unter Berücksichtigung der Zeitinformation des Teilchensignals verbessert werden kann.

Außerdem möchten wir die Einsatzgebiete von mikrostrukturierten Gasdetektoren ausweiten.

- Eine Detektion von UV-Photonen aus dem Čerenkov-Effekt würde die Messung des Abstrahlwinkels der Čerenkov-Photonen und damit eine Impulsbestimmung für hochenergetische geladene Teilchen ermöglichen. In Kombination mit der exzellenten Ortsauflösung des Micromegas-Detektors wird die gleichzeitige Orts- und Impulsmessung in einem kompakten System mit vielfachem Anwendungspotenzial, u.a. in der medizinischen Bildgebung erreicht.



- Gasdetektoren sind ineffizient im detektieren von elektrisch neutrale Teilchen (Photonen/Neutronen). Durch spezielle beschichtete Konversionsschichten als Kathodenersatz (siehe Bild) kann die Effizienz um fast eine Größenordnung verbessert werden. In unserer Arbeitsgruppe forschen wir daran diese Konversionsschichten weiter zu verbessern durch z.B. Materialoptimierung und ob es mit ihnen möglich ist die 3D-Position von neutralen Teilchen effizient zu rekonstruieren.



- Idealerweise sollten mikrostrukturierte Gasdetektoren die Teilchendurchgänge vergleichbar einer Digitalkamera festhalten. Dazu wird aber eine gepixelte Anodenstruktur benötigt. Dies ist zwar prinzipiell machbar, erfordert jedoch für eine gute Ortsauflösung eine enorme Anzahl von Pixeln, also auch von elektronischen Signalverarbeitungskanälen. Es gibt aber alternative Möglichkeiten, die Durchgangsorte mit guter räumlicher Auflösung zu bestimmen. Das Konzept orientiert sich dabei an den großflächigen Touch-Screens, bei denen die Position einer Fingerberührung durch geschickte Aufteilung der Signale durch wenige Signalverarbeitungskanäle mit hoher Genauigkeit bestimmt werden kann. Auf der Basis des zugrundeliegenden Ladungsteilungsprinzips soll ein mikrostrukturierter Gasdetektor mit hoher Messgenauigkeit der Flächenkoordinaten eines Teilchendurchgangs aufgebaut und getestet werden.

- Mit dem Höhenstrahlungmessstand können auch neue Methoden zur Rekonstruktion der Spuren der Myon-Teilchen entwickelt und untersucht werden. So sollte sich die Flugzeit des Myon-Teilchens in den gemessenen Signalzeiten der einzelnen Driftröhren in den Myon-Detektoren widerspiegeln. Damit könnte man allein durch eine Zeitordnung der Messsignale aus allen Driftröhren die Treffer identifizieren, aus denen man anschließend die Spur des Myon-Teilchens rekonstruiert. Mit einer Bachelorarbeit können diese und vergleichbare, so genannte “Seedless”-Spurrekonstruktionsalgorithmen entwickelt und untersucht werden. Solche Algorithmen ermöglichen eine sehr schnelle Spurrekonstruktion, die keine aufwändige Analyse der aller möglichen Kombinationen von Driftrohrtreffern erfordert.

- Mit einer Simulationsstudie soll untersucht werden, wie durch den Einbau einer dünnen Lage eines Coulomb-Vielfachstreuers, kosmische Myon-Strahlung so abgelenkt wird, dass der neue Myon-Triggerprozessor die Spuren dieser Teilchen im Höhenstrahlungsmessstand als gekrümmte Spuren rekonstruiert.

Die Bachelorarbeiten bieten Einblick in modernste Detektortechnologie und in modernste Ausleseelektronik. Sie können auch gerne in einem Team aus mehreren Studenten arbeiten. Am besten, Sie schauen auf ein persönliches Gespräch bei uns vorbei, dann finden wir bestimmt ein für Sie passendes Thema.

Kontakt: Prof. Dr. Otmar Biebel(Otmar.Biebel@lmu.de),
Stefanie Götz, MSc (Goetz.Stefanie@physik.uni-muenchen.de),
Dr. Ralf Hertenberger (R.Hertenberger@physik.uni-muenchen.de),
Nick Schneider, MSc (Nick.Schneider@physik.uni-muenchen.de),
Dr. Chrysostomos Valderanis (Ch.Valderanis@physik.uni-muenchen.de),
Fabian Vogel, MSc (Fabian.Vogel@physik.uni-muenchen.de)

C Themenkatalog für Bachelor-Arbeiten in der AG Kuhr

4 Flavor-Physik beim Belle II-Experiment

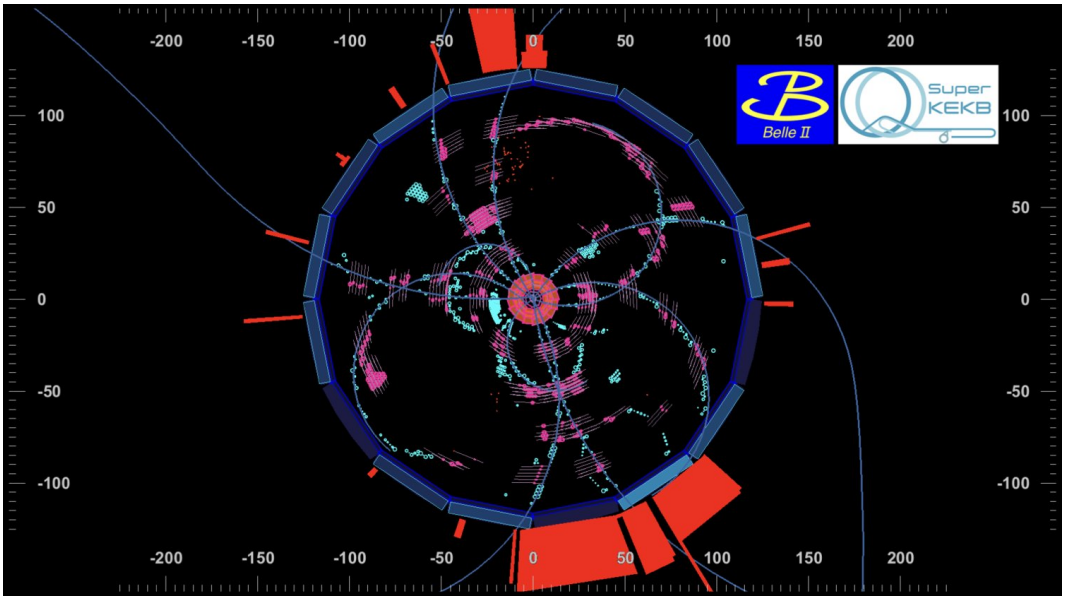


Abbildung 3: Ein Ereignis im Belle II-Detektor.

Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt bisherige experimentelle Resultate erstaunlich gut. Trotzdem muss es eine allgemeinere Theorie geben, um zum Beispiel die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie im Universum zu erklären. Deshalb wurde in Tsukuba, Japan eine sogenannte Super-B-Fabrik in Betrieb genommen, an der Paare von B- und Anti-B-Mesonen in einer bisher unerreichten Rate erzeugt und analysiert werden. Im Vergleich zum Vorgängerexperiment, das zur Zeit den weltweit größten Datensatz solcher Ereignisse besitzt, soll mit dem Belle II-Experiment eine 50 mal größere Datenmenge aufgezeichnet werden. Damit wird es möglich sein, viele Messungen mit bisher unerreichter Präzision durchzuführen und somit nach neuer Physik in bisher unerforschten Bereichen zu suchen.

4.1 Suche nach bisher nicht gemessenen Zerfällen bei Belle II

Semileptonische B-Mesonenzerfälle sind Zerfälle, bei denen ein B-Meson in ein Neutrino, ein Lepton und am häufigsten in ein Charm-Meson zerfällt. Obwohl diese Zerfälle schon seit Jahrzehnten bekannt sind, gibt es immer noch offene Fragen bezüglich dieser Zerfälle.

Eine dieser Fragen ist das sogenannte "Gap-Problem". Das Problem ist eine Diskrepanz zwischen der inklusiven Messung, bei der das Charm-Meson nicht rekonstruiert wird, und exklusiven Messungen, bei denen das Charm-Meson vollständig rekonstruiert wird. Die gemessenen exklusiven Verzweigungsverhältnisse addieren sich nicht zu dem gemessenen inklusiven Verzweigungsverhältnis auf. Eine möglich Lösung dieses Problems ist die Existenz von bisher nicht gemessenen Zerfallsmoden des B.Mesons oder der beteiligten Charm-Mesonen. Der Zerfall von schweren Charm-Mesonen (hier D^{**} genannt) in ein η- und entweder ein D- oder D^*-Meson ($D^{**} \to D^{(*)}\eta$) sind vielversprechende Kandidaten dafür. Diese Zerfälle wurden bisher nicht gemessen.

Wir bieten Messungen verschiedener Zerfallskanäle mit dem Belle II Experiment als Themen für Bachelorarbeiten an, bei denen das Gap-Problem untersucht wird. Hierbei werden drei verschiedene Ansätze betrachtet, die im Folgenden näher erläutert werden. Jeder dieser Ansätze ist Thema einer Bachelorarbeit:

- Direkte Messung des Zerfalls $B \to D^{(*)}\eta\ell\nu$: Hier wird das $D^{(*)}\eta\ell$ -System rekonstruiert. Signalzerfälle werden mit Hilfe der Signatur des nicht rekonstruierten Neutrinos identifiziert.

- Messung des Zerfalls $B \to D^{**}\pi$ gefolgt von $D^{**} \to D^{(*)}\eta$: Da das B-Meson vollständig rekonstruiert wird, bietet dieser Zerfall stringente Selektionskriterien, um Untergrundzerfälle zu unterdrücken. Dies führt einerseits zu einer geringen Anzahl an selektierten Kandidaten, hat andererseits aber den Vorteil eines voraussichtlich kleinen Untergrunds.

- Direkte Messung von $D^{**} \to D^{(*)}\eta$ in der Fragmentation von $e^+e^- \to c\bar{c}$ Ereignissen: Die Idee dieser Analyse ist es, nach Auffälligkeiten in der invarianten Masse des rekonstruierten $D^{(*)}\eta$ Systems zu suchen. Dieser Kanal sollte eine hohe Anzahl an Kandidaten liefern, dürfte aber auch einen hohen Untergrund aufweisen.

Kontakt: Prof. Dr. Thomas Kuhr (Thomas.Kuhr@lmu.de),
Dr. Thomas Lück (Thomas.Lueck@lmu.de)

4.2 Adaptive Intelligente Untergrundsimulation

Suchen nach seltenen Zerfällen erfordern ein gutes Verständnis von Untergründen. Oft werden dafür riesige Mengen an simulierten Daten aufwendig produziert. Ein Aspekt, der dies besonders ineffizient macht, ist, dass Ereignisse, die nicht als Signalkandidat selektiert werden, trotzdem die ganze Simulationskette durchlaufen, weil die Selektionsgrößen nur danach bekannt sind. Ein Ansatz dies beim Belle II-Experiment zu verbessern basiert darauf, mit einem Maschine Learning Modell vorherzusagen, welche Ereignisse die Selektionskriterien erfüllen, bevor die aufwendige Simulation und Rekonstruktion durchgeführt wird. Um solch ein Modell zu trainieren, muss jedoch zunächst ein ausreichend großer Datensatz mit Labeln ineffizient produziert werden, was insbesondere bei kleinen Selektionseffizienzen problematisch ist. Deshalb soll die Möglichkeit untersucht werden, das Modell während der Produktion der Daten zu trainieren und somit kontinuierlich die Effizienz der Produktion zu erhöhen.
Kontakt: Prof. Dr. Thomas Kuhr (Thomas.Kuhr@lmu.de),
Dr. Nikolai Hartmann (Nikolai.Hartmann@physik.uni-muenchen.de)

4.3 Belle II Detektor mit Augmented Reality

Ein 3D-gedrucktes Modell des Belle II Detektors wurde erstellt, um der allgemeinen Öffentlichkeit zu erklären, wie er funktioniert. Um die Nutzererfahrung weiter zu verbessern und das Verstehen des Detektorkonzepts zu fördern, soll eine Augmented-Reality-Anwendung für Handys entwickelt werden, die simulierte Ereignisse zeigt und weitere Erklärungen liefert. Kenntnisse in Web-Programmierung sind erforderlich, Erfahrung mit WebAR wären vorteilhaft.
Kontakt: Prof. Dr. Thomas Kuhr (Thomas.Kuhr@lmu.de),
Dr. Nikolai Hartmann (Nikolai.Hartmann@physik.uni-muenchen.de)