

Hadronenspektroskopie

Invariante Masse, Histogramme, Filter

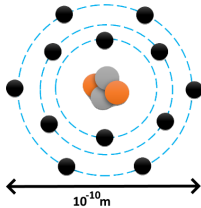
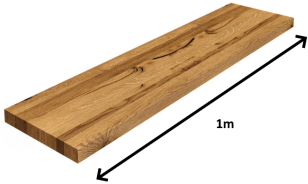
Liste der Referent*innen¹

¹Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Datumsangabe

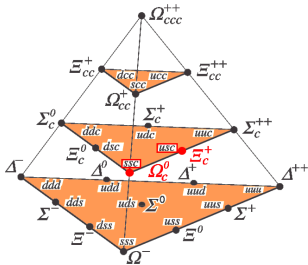
Was ist eigentlich Masse?

Masse



- Hart
 - Zum Anfassen
 - Langlebig
 - Ausgedehnt
 - "Da", Isolierbar
- ⇒ Leicht nachweisbar

[2]



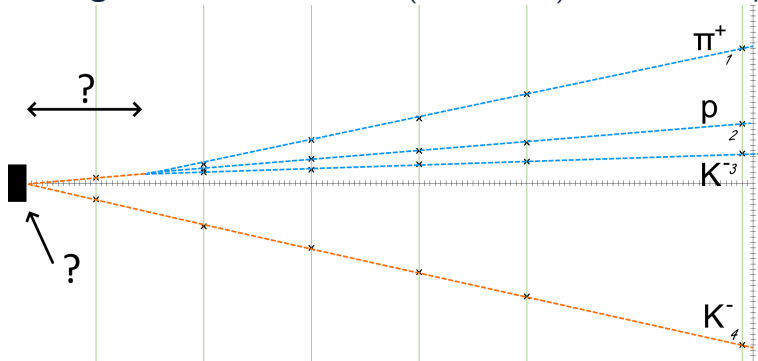
Schwere Baryonen [1]

- Instabil, zerfallen
 - Kurzlebig
($\Delta E \Delta t \geq \hbar \Rightarrow \tau \gtrsim 10^{-24} \text{ s}$)
 - Kurzreichweitig
($\tau \cdot c \sim 10^{-15} \text{ m}$)
 - Klein ($\sim 10^{-14} \text{ m}$)
 - Müssen erzeugt werden
- ⇒ Nicht direkt nachweisbar

☞ Ideen?

Invariante Masse

Strategie: Rekonstruktion über (hinreichend) stabile Zerfallsprodukte



"Physiker*innen gehen nun den umgekehrten Weg".

Invariante Masse

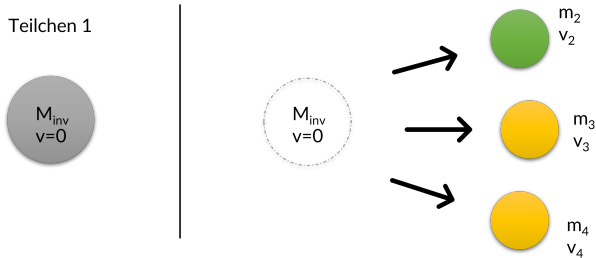
Man betrachte *Teilchen 1*. Es ruht und besitzt die Ruhemasse = Ruheenergie M_{inv}

Teilchen 1



Invariante Masse

Die Energie/Masse des *Teilchens 1* teilt sich vollständig in Impuls und Energie/Masse der drei Produkte auf.



⇒ Addiere Energie und Impuls-Vektoren und erhalte so die Masse des *Teilchens 1*!

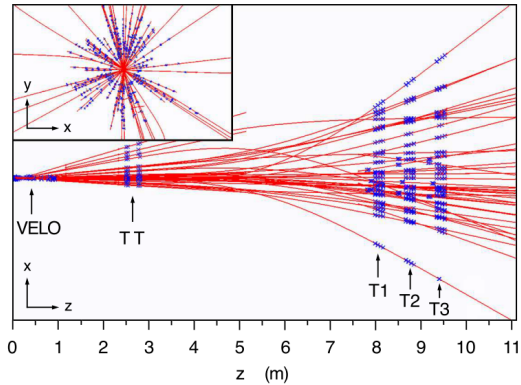
Eine einfache Aufgabe?

- ☞ Man muss exakt die Produkte des Zerfalls treffen! Je nach Zerfall gibt es viele nachgelagerte Zerfälle, sodass es viele Kombinationsmöglichkeiten gibt.
- ☞ Daten müssen aufwändig gefiltert werden.

Indizien zur Kombinatorik:

- ① Ladungserhaltung
- ② Gemeinsamer Schnittpunkt der Spur

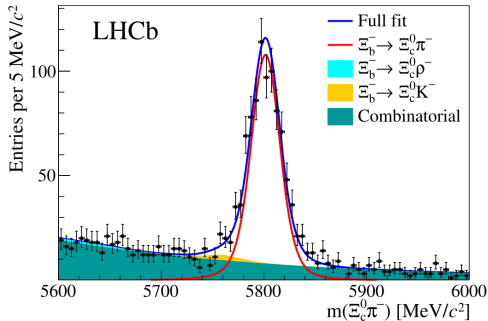
Invariante Masse



Typisches Eventdisplay [3]

Wie sieht das Ergebnis aus?

Ergebnis



$$\Xi_b^- \rightarrow \Xi_c^0 \pi^- [4]$$

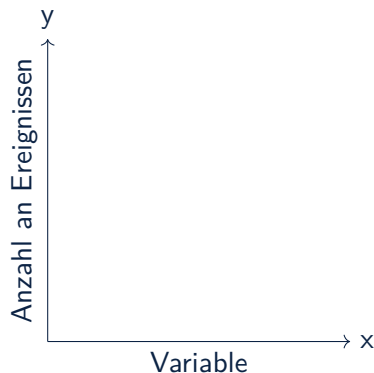
Erwartung:

☞ Auffällig viele Kombinationen "tummeln" sich und weisen auf Masse eines pot. unentdeckten Mutterteilchens ist.

⇒ Sog. Resonanzen

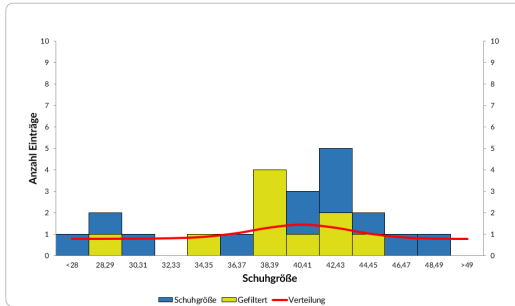
Wie stelle ich Ergebnisse dar?

Histogramme & Filter



- Gibt Häufigkeitsverteilung an
- Einteilung in Klassen, mit vorgegebener Breite

Beispiel: Klick



Die Reinheit P ist definiert über

$$P = \frac{\text{Signal im Signalbereich } \sigma}{\text{Gesamterträge in } \sigma}$$

Eure Aufgabe: **Entdeckung von Teilchen**

Sucht mittels Eures hier gewonnenen Wissens und Anwendung von Filtern ein möglichst reines Signal des bisher noch unentdeckten Teilchens Ω_c^0 .

⇒ Wie sehen aber Filter beim LHCb aus?

Motivation

Wir wollen ein neues Teilchen finden!



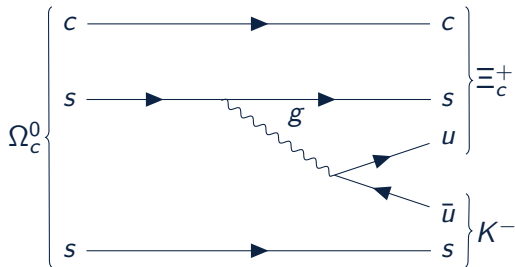
⇒ Wie können wir das Ω_c^0 suchen?

- Überlegen uns einen möglichen Zerfall
- Suchen nach den Zerfallsprodukten in den LHCb Daten
- Kombinieren die Zerfallsprodukte und schauen uns das Massenspektrum an

⇒ Finden wir einen Peak, haben wir eine neue Resonanz entdeckt !

Ω_c^0 Zerfall

Quark Inhalt : $\Omega_c^0(css)$



Das Ξ_c^+ ist allerdings nicht stabil und zerfällt weiter in $\Xi_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$

Wir wollen aus den riesigen Mengen an Daten, nur die Ereignisse auswählen, die für unsere Analyse interessant sind

⇒ Wir müssen uns Kriterien überlegen, anhand deren wir den Signalzerfall $\Omega_c^0 \rightarrow \Xi_c^+ K^-$ gegenüber Untergrund erkennen können Potenzielle

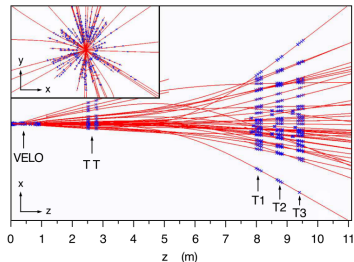
Untergründe:

- ein Ξ_c^+ und ein K^- werden in der Kollision erzeugt, stammen aber **nicht** aus dem Zerfall eines neuen Teilchens
- Wir haben ein Teilchen **falsch identifiziert**, z.B. ein π^- für ein K^- gehalten

Teilchenidentifikation

Um ein Teilchen zu identifizieren spielen mehrere Komponenten des Detektors zusammen

- Tracking : Impuls und Ladung von geladenen Teilchen
- Kalorimeter : Energie
- RICH : Winkel der Cherenkov Strahlung



Um den Physiker*innen die Arbeit zu erleichtern, werden die einzelnen Messdaten (Krümmungsradius, Cherenkov-Winkel, etc.) zu einer Variablen verarbeitet



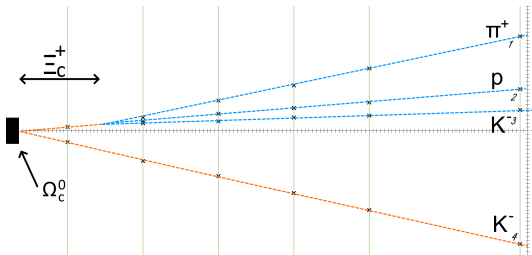
Variable "ProbNNp": Wie wahrscheinlich, handelt es sich um ein Proton

Der Ξ_c^+ Zerfall

Wir suchen nach :

$$\Omega_c^0 \rightarrow \Xi_c^+ (\rightarrow p K^- \pi^+) K^-$$

Wir kennen das Ξ_c^+ und seine Lebensdauer $\tau_{\Xi_c^+} \approx 4.5 \times 10^{-13} \text{s}$



Dank der sehr präzisen Vertex-Rekonstruktion, können wir die **Flugdistanz** des Ξ_c^+ (im mm bis cm Bereich) als Filter verwenden!

Der Ξ_c^+ Zerfall

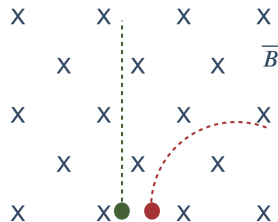
Wir betrachten hier den Zerfall

$$\Xi_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$$

⇒ Warum gerade dieser Zerfall?

Andere Optionen wären z.B.

- $\Xi_c^+ \rightarrow \Xi^0 \pi^+$
- $\Xi_c^+ \rightarrow p K^0$



Filter für das Ω_c^0 ?

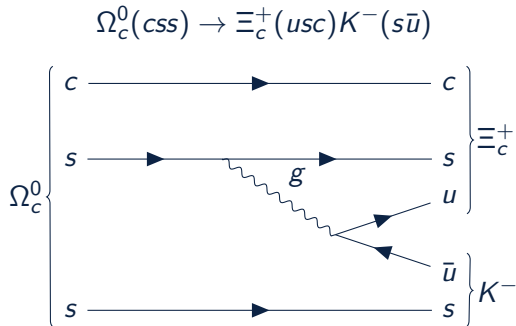
Problem: Wir kennen das Ω_c^0 noch nicht



⇒ Können aber trotzdem Kriterien durch unser Wissen über Hadronen und das Standard Modell aufstellen!



Wir suchen:



→Starke Wechselwirkung!

Filter für das Ω_c^0 ?

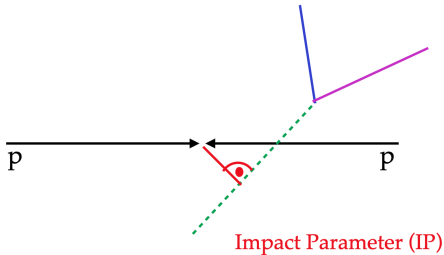
Typische Lebensdauer für einen starken Zerfall: $\tau \approx 10^{-24}$ s

- Nochmal um einen Faktor 10^{11} kleiner als die Lebensdauer des Ξ_c^+ !
- Das Ω_c^0 sollte sofort noch im pp -Kollisionspunkt zerfallen

⇒ Die Tochterteilchen des Ω_c^0 sollen direkt aus dem pp -Kollisionspunkt kommen!

Filter für das Ω_c^0 ?

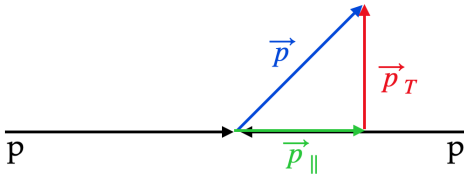
Impact Parameter: Minimaler Abstand zwischen Kollisionspunkt und rekonstruiertem Teilchen



\Rightarrow Kleiner IP = große Wahrscheinlichkeit, dass das Teilchen aus dem Kollisionspunkt kommt

Filter für das Ω_c^0 ?

Wissen aus der Theorie, dass schwere Teilchen, meistens mit einem hohen **transversalen Impuls** erzeugt werden



Wir suchen nach:

- 3 Tracks, als p, K^-, π^+ identifiziert
- Diese Tracks stammen aus einem sekundären Vertex, da das Ξ_c^+ eine kurze Strecke im Detektor fliegt
- Das gesuchte Ω_c^0 zerfällt noch im pp -Kollisionspunkt (kleiner IP)
- Das gesuchte Ω_c^0 hat einen hohen transversalen Impuls



Claude Amsler.

The Quark Structure of Hadrons: An Introduction to the Phenomenology and Spectroscopy.

Lecture Notes in Physics ; 949. Springer International Publishing, Cham, 2018.



<https://www.wohnholzdesign.de/regalbrett-wildeiche-massiv-nach-mass/> .



LHCb Collaboration.

The LHCb detector at the LHC.

Journal of instrumentation, 2008.

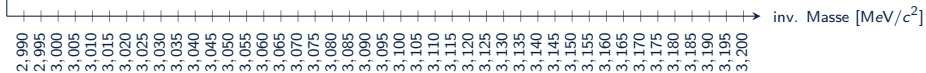


LHCb Collaboration.

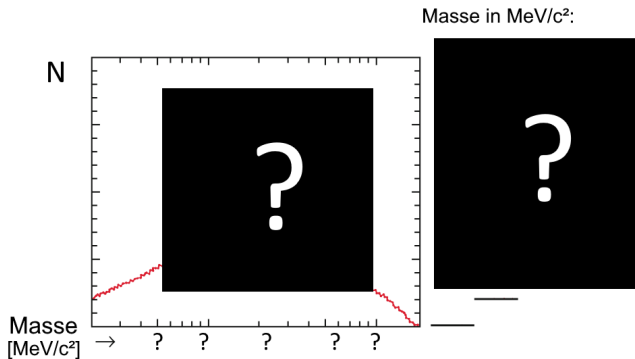
Measurement of the properties of the Ξ_b^{*0} baryon.

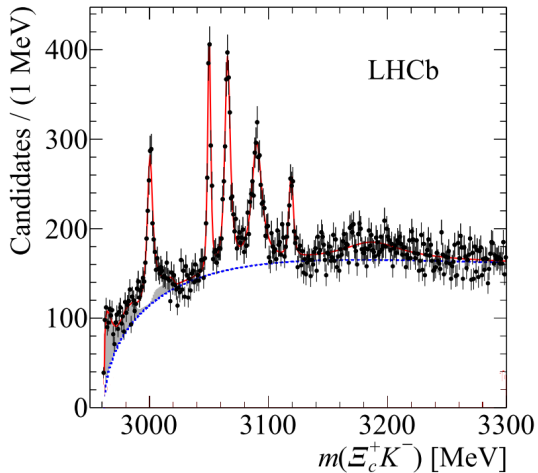
Journal of high energy physics, 2016.

#



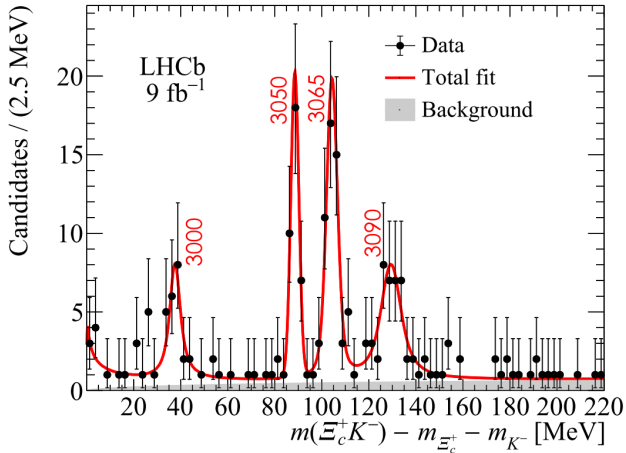
Was sagt uns jetzt das Ergebnis?





Ω_c^0 -Resonanzen, rekonstruiert vom LHCb [1]

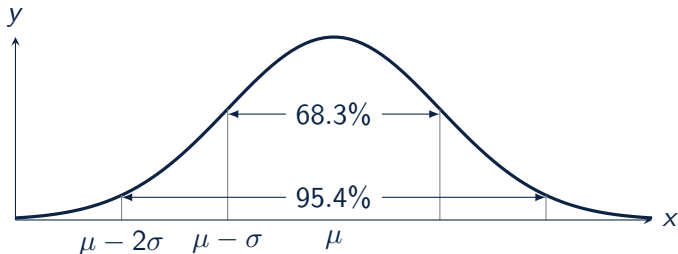
Befund LHCb



Ω_c^0 -Resonanzen, rekonstruiert vom LHCb [2]

Zustand	Signifikanz	Masse in MeV/c^2
$\Omega_c(3000)^0$	6.2σ	$2999.2 \pm 0.9 \pm 0.9^{+0.19}_{-0.22}$
$\Omega_c(3050)^0$	9.9σ	$3050.1 \pm 0.3 \pm 0.2^{+0.19}_{-0.22}$
$\Omega_c(3065)^0$	11.9σ	$3065.9 \pm 0.4 \pm 0.4^{+0.19}_{-0.22}$
$\Omega_c(3090)^0$	7.8σ	$3091.0 \pm 1.1 \pm 1.0^{+0.19}_{-0.22}$

Sigma-Umgebungen



Damit ein physikalischer Befund als Entdeckung gilt, muss er eine Standardabweichung von min. 5σ besitzen, i.e. innerhalb 0.00003% oder $1 : 3.3 \cdot 10^6$.

- ❶ Der Natur ein Stück näher gekommen
 - ❷ Wir erwarten noch mehr Resonanzen!
- ⇒ Die Suche geht weiter!
- ❸ Wir brauchen Nachwuchs

Vielen Dank!

Es gibt noch einen Evaluationsbogen!



LHCb Collaboration.

Observation of five new narrow Ω_c^0 states decaying to $\Xi_c^+ K^-$.
Phys. Rev. Lett., 2017.



LHCb Collaboration.

Observation of excited Ω_c^0 baryons in $\Omega_b^- \rightarrow \Xi_c^+ K^- \pi^-$ decays.
Physical review. D, 2021.