

Spiegelwelten und Antimaterie am LHC

Science @ Sail 2018

Nis Meinert



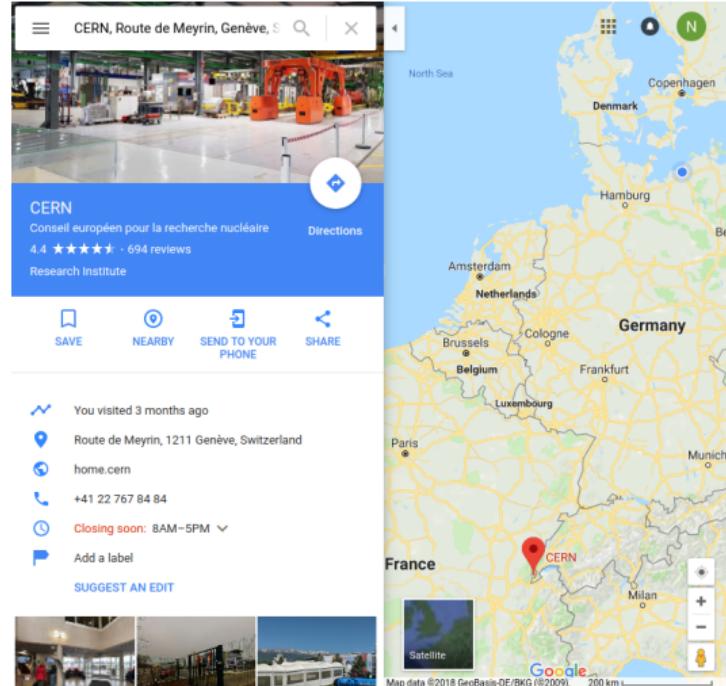
- LHCb Mitglied seit 2013
- 2016: Master of Science (Uni. Rostock)
 - Massenspektroskopie von schweren Baryonen
- Seit 2016: Doktorand am Institut für Physik
(Uni. Rostock)
- Mehrere kürzere Aufenthalte am CERN
- Forschungsschwerpunkt:
 - CP -Verletzung in Zerfällen von schweren Baryonen
 - Upgrade des LHCb Detektors



Was ist der LHC / Was ist CERN?

Der Large Hadron Collider (LHC)

- Wikipedia: „[...] the most complex experimental facility ever built and the largest single machine in the world.“
- Synchrotron (in einem 27 km langem unterirdischem Ringtunnel):
beschleunigt u.a. Protonen auf fast Lichtgeschwindigkeit und **kollidiert** diese an bestimmten Punkten (zum Beispiel beim LHCb Detektor)



Was wir nicht verstehen

- Ein Blick in unser Universum
 - (fast) ausschließlich Materie und keine Antimaterie
- Standard Modell der Kosmologie
 - Beim Urknall wurden exakt gleiche Mengen von Materie und Antimaterie produziert

Wo ist die Antimaterie?



(Logo: AMS-02, NASA/JSC)

1. Spiegelsymmetrie

2. Wu-Experiment

3. Antimaterie

4. CP-Verletzung

Spiegelsymmetrie

Spiegelsymmetrie

Eines der beiden Bilder wurde gespiegelt ...



... welches?

Spiegelsymmetrie

Eines der beiden Bilder wurde gespiegelt ...



(original)



(gespiegelt)

... welches?

Spiegelsymmetrie

Eines der beiden Bilder wurde gespiegelt ...



(Foto: Ingy The Wingy)

... welches?

Spiegelsymmetrie

Eines der beiden Bilder wurde gespiegelt ...



(gespiegelt)



(original)

(Foto: Ingy The Wingy)

... welches?

Spiegelsymmetrie

Eines der beiden Bilder wurde gespiegelt ...



... welches?

Spiegelsymmetrie

Eines der beiden Bilder wurde gespiegelt ...



(original)



(gespiegelt)

... welches?

Spiegelsymmetrie

Eines der beiden Bilder wurde gespiegelt ...



... welches?

Spiegelsymmetrie

Eines der beiden Bilder wurde gespiegelt ...



(original)



(gespiegelt)

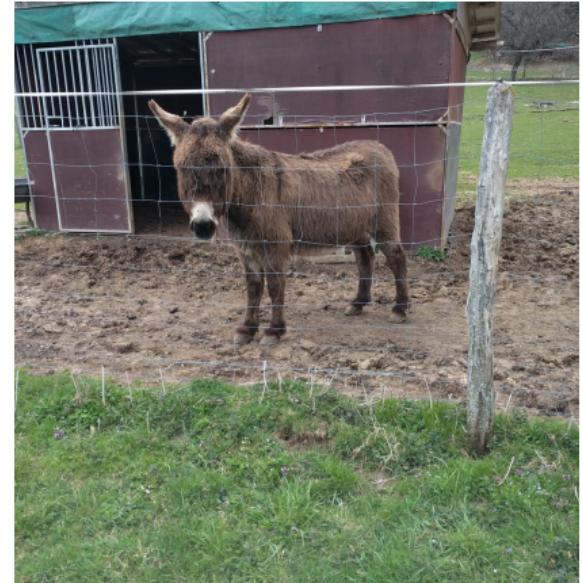
... welches?

Waren die Fotos spiegelsymmetrisch?

Von Spiegelsymmetrien zur Paritätsverletzung

Waren die Fotos spiegelsymmetrisch?

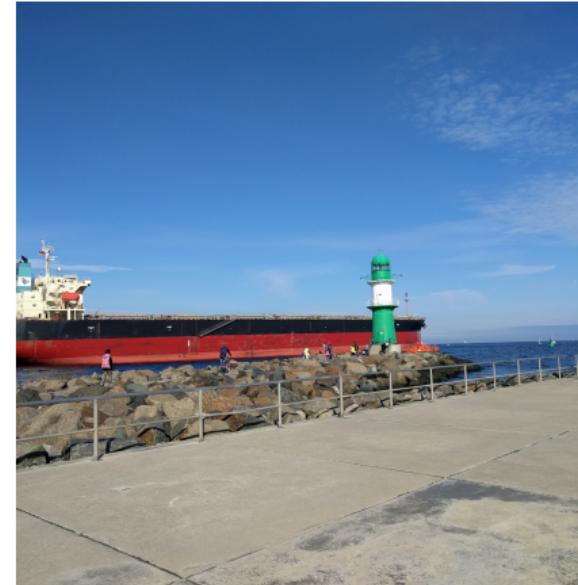
- Nein!
- Trotzdem waren wir bei einigen nicht in der Lage das Original und das Gespiegelte zu unterscheiden!?
- Checkliste:
 - Sieht das Bild *logisch* aus?
 - Gibt es Referenzpunkte?



Von Spiegelsymmetrien zur Paritätsverletzung

Beispiel

- Wir **wissen**, dass der grüne Leuchtturm **links** von der Hafenausfahrt steht.
- Hier steht er aber **rechts**!
- Also wurde das Bild gespiegelt!

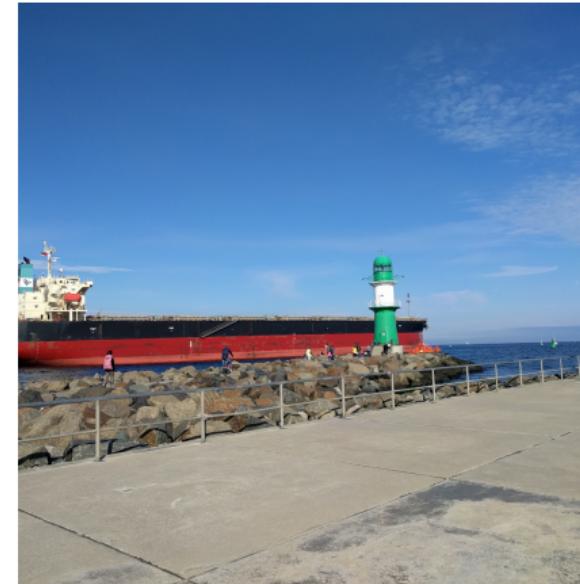


Von Spiegelsymmetrien zur Paritätsverletzung

Beispiel

- Wir **wissen**, dass der grüne Leuchtturm **links** von der Hafenausfahrt steht.
- Hier steht er aber **rechts**!
- Also wurde das Bild gespiegelt!

... und der Esel?



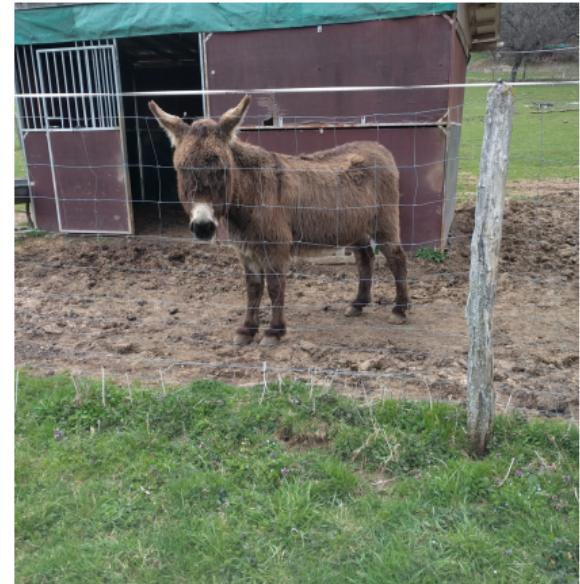
Von Spiegelsymmetrien zur Paritätsverletzung

Beispiel

- Wir **wissen**, dass der grüne Leuchtturm **links** von der Hafenausfahrt steht.
- Hier steht er aber **rechts!**
- Also wurde das Bild gespiegelt!

... und der Esel?

- Hier fehlt ein Referenzpunkt!



Offenbar gibt es einen Unterschied zwischen:

- etw. sieht im Spiegel exakt **gleich** aus: *Spiegelsymmetrisch*
- etw. sieht im Spiegel **logisch** aus: *Paritätserhaltend*

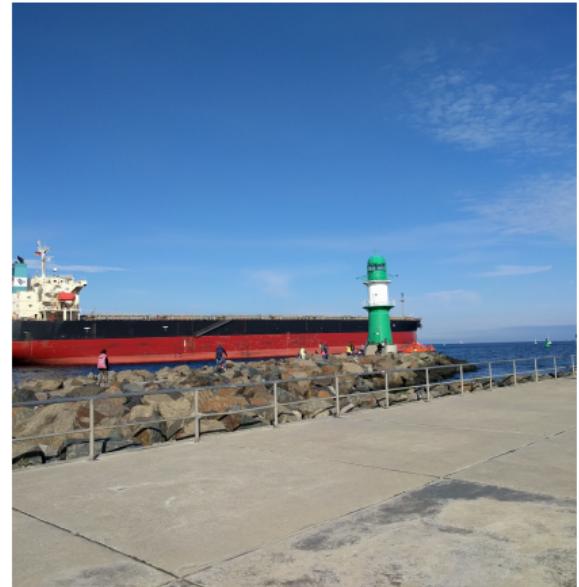
Gibt es Bilder / Prozesse, die gespiegelt **unlogisch** aussehen?

Von Spiegelsymmetrien zur Paritätsverletzung

Gibt es Bilder / Prozesse, die gespiegelt **unlogisch** aussehen?

Sieht das Bild unlogisch aus?

- wäre es eine beliebige Hafeneinfahrt: **nein!**
- ... wir **wissen** bloß, dass der grüne Leuchtturm in Rostock **links** von der Hafenausfahrt steht.

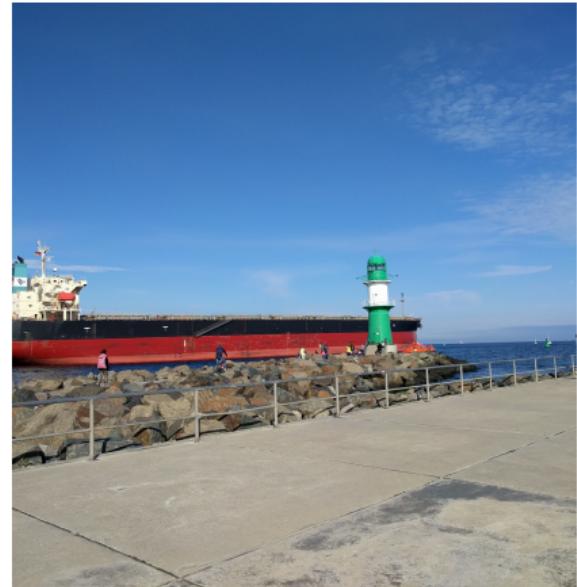


Von Spiegelsymmetrien zur Paritätsverletzung

Gibt es Bilder / Prozesse, die gespiegelt **unlogisch** aussehen?

Sieht das Bild unlogisch aus?

- wäre es eine beliebige Hafeneinfahrt: **nein!**
- ... wir **wissen** bloß, dass der grüne Leuchtturm in Rostock **links** von der Hafenausfahrt steht.
- Könnte man denn (theoretisch) die Hafenausfahrt genauso bauen, wie wir sie im gespiegelten Bild sehen? **ja!**

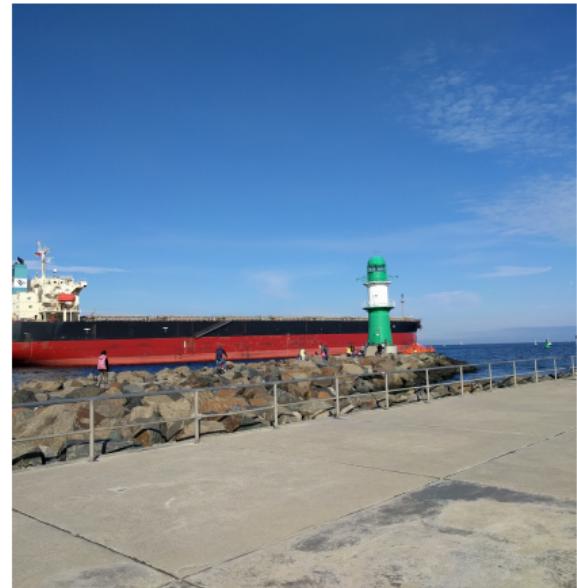


Von Spiegelsymmetrien zur Paritätsverletzung

Gibt es Bilder / Prozesse, die gespiegelt **unlogisch** aussehen?

Sieht das Bild unlogisch aus?

- wäre es eine beliebige Hafeneinfahrt: **nein!**
- ... wir **wissen** bloß, dass der grüne Leuchtturm in Rostock **links** von der Hafenausfahrt steht.
- Könnte man denn (theoretisch) die Hafenausfahrt genauso bauen, wie wir sie im gespiegelten Bild sehen? **ja!**
- Die Hafenausfahrt von Rostock ist damit **paritätserhaltend**



Gibt es paritätsverletzende Prozesse?

Gibt es paritätsverletzende Prozesse?

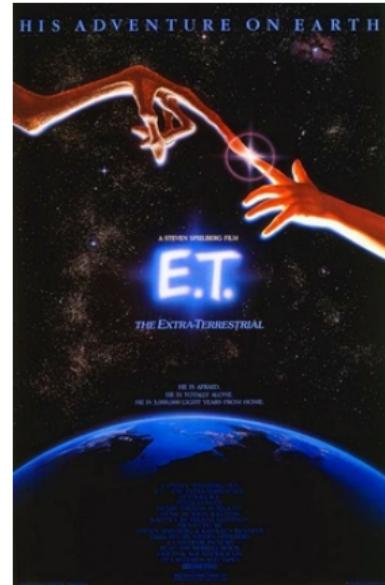


(Bild: <https://www.lego.com/low-resolution>)

Suche nach Paritätsverletzung

Gedankenspiel: Kommunikation mit einem Alien

- Wir wollen herausfinden ob sein Universum gespiegelt ist ...
- ... **ohne** vorbei fliegen zu müssen.



(Poster: John Alvin. (c) 1982 Universal Studios / low-resolution)

Suche nach Paritätsverletzung

Gedankenspiel: Kommunikation mit einem Alien

- Wir wollen herausfinden ob sein Universum gespiegelt ist ...
- ... **ohne** vorbei fliegen zu müssen.
- Können wir ihm ein Experiment vorschlagen mit dem wir unsere beiden Definitionen von **links** und **rechts** vergleichen können?
 - ja: **Paritätsverletzung!**
 - nein: Natur / Universum ist paritätserhaltend



(Poster: John Alvin. (c) 1982 Universal Studios / low-resolution)

Suche nach Paritätsverletzung

Ein Beispiel aus der Literatur

„Movements of the Lower Jaw of Cattle during Mastication.“

P. Jordan and R. de L. Kronig. *Nature* **120**, 809 (1927):

- „[...] we shall denote as right- and left-circular cows those of which the chewing motion, viewed from the front, turns clockwise and counterclockwise respectively.“
 - „Statistical investigations on cows distributed over the northern part of Sælland, Denmark, led to the result that about **fifty-five per cent.** **were right-circular**, the rest left-circular animals.“

December 3, 1927] NATURE [Vol. 120]

obstruction but he also uses language on anaphora that it is scarcely possible to pass over the meant. The author's treatment of the word "adverb" is "admirable." This review very briefly. That is all I can say to the article.

John W. BROWN
University of Michigan

that, unfortunately, not in a position to bring before the reader the whole of his paper, but believe that those here presented will give some idea of its value. It may be given as an extract.

D. JONATHAN
R. D. L. KLEMM
University Institute for
Teaching and
Research,
Copenhagen.

Polarization Effects in Measuring Electrical Fields.

In listening to Prof. Dr. A. Janzen, which was mentioned above, described, the writer was struck by the fact that the polarization effect observed during the determination of the electric field intensity in the vicinity of the source which made it an extremely useful means to reduce measurements in determining the field intensity in the vicinity of the source by picking up the field.

The writer has been interested in the polarization or double layer effects in connection with the theory of the ionosphere and has learned the reduced influence of the electrical fields on the ionosphere by the use of the polarization effect to reduce the influence of the electric fields on the electrons reaching the target. It is remarkable how much influence the polarization effect has on the electrons reaching the target. It is remarkable

Movements of the Lower Jaw of Cattle during Mastication.

Among the biological phenomena exhibiting a definite sense of rotation, as, for example, the growth of certain crops and the shells of snails, sea urchins, etc., that have been mentioned, it is of interest to us to turn our chief attention here, to the orientation of the animals of castle. Close investigation shows that the lower jaw of the animal is displaced with respect to the upper jaw, so that a nearly horizontal or a nearly vertical displacement of the head is associated with such a phase difference, that is, a nearly

Manchester, Nov. 12.

Biology and Birth-Control.

It would interest me, and possibly some readers, if the writer of the review of my

This nomenclature is based on the tacit assumption that one and the same cow always maintains its sense of rotation. We could confirm this by a limited examination of the cow's behavior, but we prefer to leave this question to the "Unborn Child" in NATURE of Nov. 5, the sentences in which, according to him, I made tempestuous remarks about God." KARL F.

The answer to Prof. Pearson's question quoted with approval, as expressive of his views, by Mr. G. H. Hardy, F.R.S., in a letter to the *Times* of December 20, 1923.

J. C. Squier's knee, including "Good Wood," "I've got my task cut out," This was conæptacious, and even blasphemous.
E. W. M.

The fact that both senses of rotation are realized raises the question if single laws govern the hereditary transmission of the property referred to. Concerning the seals mentioned above, one knows that Mendel's

laws in their simplest form apply, while in most cases the actual occurrence of only one sense of rotation makes such investigations impossible. Particularly it would be interesting to ascertain which of the two modifications is the dominating one. We shall however, be waitingly physiological; (it can be called swing) a momentary when I switch off a bright lamp, with metals suspended above my bed.

Suche nach Paritätsverletzung

Sind Kühe also paritätsverletzend?

- Kauen gespiegelte Kühe dominant in die entgegengesetzte Richtung?
 - Ja: Kühe sind **nicht paritätsverletzend**
 - Nein: **definiere links** als dominante Kaurichtung von Kühen und bitte Alien das selbe Experiment durchzuführen*



*das Alien muss natürlich seine eigenen Kühe verwenden!

Suche nach Paritätsverletzung

Sind Kühe also paritätsverletzend?

- Kauen gespiegelte Kühe dominant in die entgegengesetzte Richtung?
 - Ja: Kühe sind **nicht paritätsverletzend**
 - Nein: **definiere links** als dominante Kaurichtung von Kühen und bitte Alien das selbe Experiment durchzuführen*
- Technisch schwierig umsetzbar: Kuh muss vollständig (mind. molekular) gespiegelt werden ...



*das Alien muss natürlich seine eigenen Kühe verwenden!

Suche nach Paritätsverletzung

Ein praktikablerer Ansatz:

- Betrachte experimentellen Aufbau im Spiegel
- Baue jenes Spiegelbild exakt nach
- Damit sieht man jetzt **3** experimentelle Aufbauten:
 1. Original
 2. Spiegelbild
 3. Nachbau des Spiegelbildes
- Test: Verhalten sich (2.) und (3.) gleich?

Suche nach Paritätsverletzung

Beispiel 1: Apfel fällt vom Baum

Original (1), Spiegelbild (2), Nachbau (3)

1. Apfel fällt vom Baum
 2. Apfel fällt vom Baum
 3. Apfel fällt (immer noch) vom Baum
- **keine Paritätsverletzung!***



(Bild: LadyofHats)

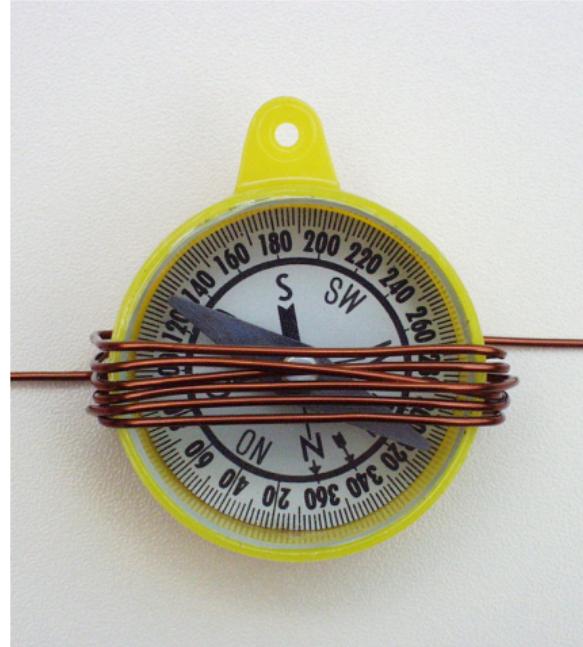
*tatsächlich lässt sich allgemein zeigen, dass Gravitation nie paritätsverletzend wirkt

Suche nach Paritätsverletzung

Beispiel 2: Kompass in magnetischer Spule

Original (1), Spiegelbild (2), Nachbau (3)

1. Nadel zeigt nach oben
 2. Nadel zeigt nach **oben** (aber Windungsrichtung der Spule ist jetzt umgekehrt!)
 3. Nadel zeigt nach **unten** (Windungsrichtung entspricht Stromrichtung)
- **Paritätsverletzung?**



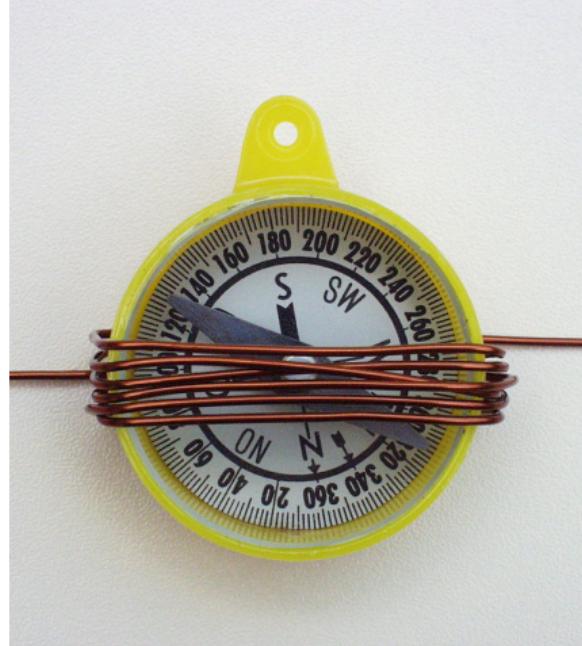
(Foto: Zátonyi Sándor)

Suche nach Paritätsverletzung

Beispiel 2: Kompass in magnetischer Spule

Original (1), Spiegelbild (2), Nachbau (3)

- **Paritätsverletzung?**
- ist die Nadel wirklich sensitiv auf die Magnetfeldrichtung?
 - **Ja**: eine Magnetfeldnadel hat zwei entgegengesetzte Pole. Welcher davon *Nord*- und *Südpol* genannt wird **ist willkürlich!**
 - Nach einmaliger (willkürlichen) Definition, können alle anderen Nadeln an ersterer **geeicht** werden.
 - Im Spiegel sind *Nord*- und *Südpol* **vertauscht!**



(Foto: Zátonyi Sándor)

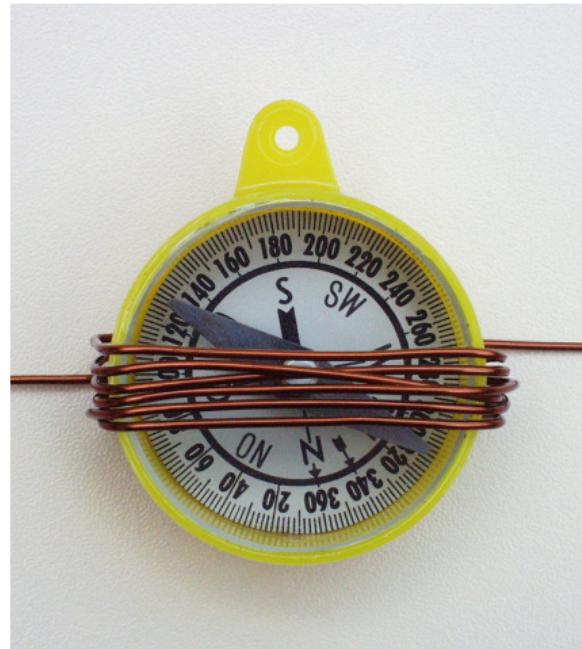
Suche nach Paritätsverletzung

Beispiel 2: Kompass in magnetischer Spule

Original (1), Spiegelbild (2), Nachbau (3)

→ Zusammenfassung

- **keine Paritätsverletzung** messbar*
- Die Richtung der Magnetfeldlinien sind tatsächlich paritätsverletzend, wir können aber ihre absolute Richtung nicht messen!
- Es reicht nicht im Spiegel *etwas anderes* zu sehen als im Labor, sofern es konsistent ist!



(Foto: Zátonyi Sándor)

*zumindest nicht mit el.-magn. Effekten (Magnetischen Monopole ausgeschlossen)

Wu-Experiment

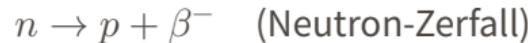
Physik im Jahre 1956

- Parität ist erhalten in 3 der 4 bekannten Wechselwirkungen:
 - *Gravitation*
 - *Elektromagnetische Wechselwirkung*
 - *Starke Wechselwirkung*
- ... wie sieht es mit der **Schwachen Wechselwirkung** aus?
 - Präpariere Kernzerfall: Cobalt-60 → Nickel-60 (β -Zerfall)
 - Richte alle Kerne im **magnetischen** Feld gleich aus*
 - Untersuche die **räumliche Verteilung** der β -Strahlung

*als Auszeichnungsrichtung dient hier der sog. *Kern-Spin*. Magn. Feld und *Kern-Spin* sind nach Ausrichtung parallel.

Einschub: Beta-Zerfall

- **Atome** bestehen aus einem **Atomkern** und Elektronen
- **Atomkerne** sind aufgebaut aus **Protonen** und **Neutronen**
- Beim radioaktiven Zerfall wandelt sich ein Neutron in ein Proton & Beta-Strahlung um (oder umgekehrt)



- **Beta-Strahlung** besteht aus zwei Teilchen: einem **Elektron** und einem **Anti-Elektron-Neutrino**

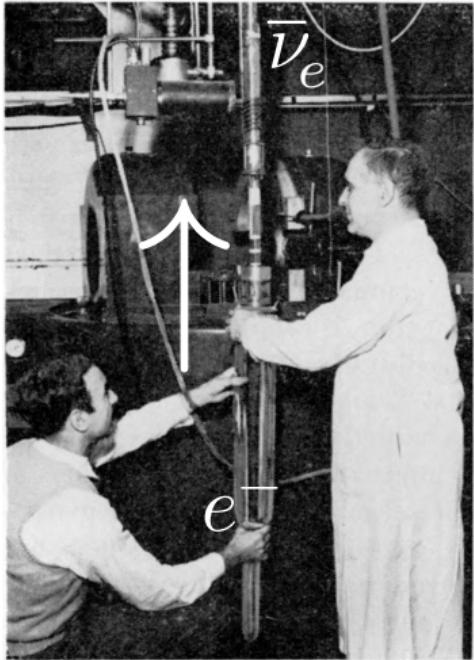
$$\beta^- \hat{=} e^- + \bar{\nu}_e \quad (\text{Elektron} + \text{Anti-Elektron-Neutrino})$$

$$\beta^+ \hat{=} e^+ + \nu_e \quad (\text{Positron} + \text{Elektron-Neutrino})$$

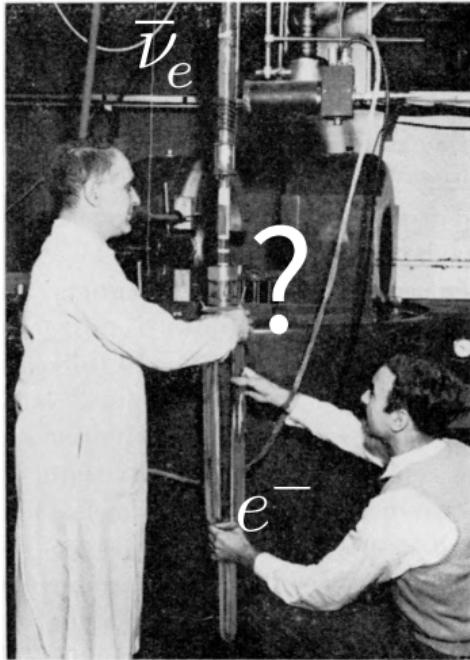
Cobalt-60 Zerfall (nach Nickel-60)

- Cobalt-60: 27 Protonen, 33 Neutronen
- Nickel-60: 28 Protonen, 32 Neutronen
- Also offenbar: Neutron → Proton (β^- Strahlung, $\beta^- \hat{=} e^- + \bar{\nu}_e$)
- Das neue Proton nimmt den Platz vom zerfallenen Neutron ein. Das Elektron und das Anti-Elektron-Neutrino fliegen als β^- Strahlung in **entgegengesetzte** Richtungen (Impulserhaltung).

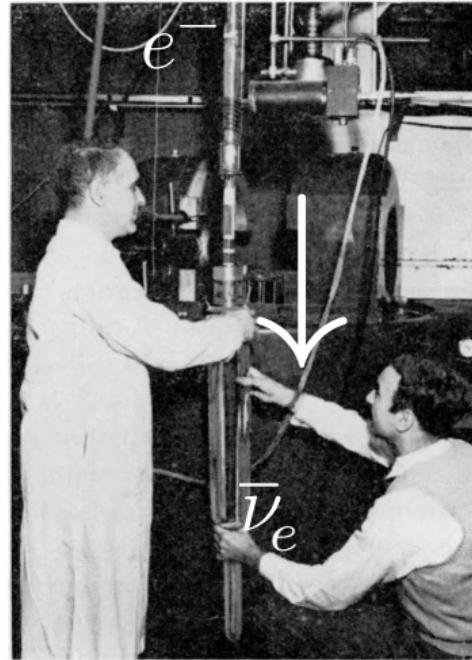
Das Wu Experiment



(Original)



(Spiegelbild)



(Nachbau)

(Foto: Annual Report of the National Bureau of Standards for 1957, miscellaneous publication 227)

Das Wu-Experiment

Das ist Paritätsverletzung!

- Experimenteller Aufbau im Spiegel zeigt Elektronen Detektion **unten** (demnach müsste das magn. Feld nach **oben** zeigen)
- Nachbau des Spiegelbildes detektiert aber Elektronen **oben** (demnach müsste das magn. Feld nach **unten** zeigen)
- Warum?
 - Im Vergleich zum Experiment mit dem Kompass sind das Elektron und das Anti-Elektron-Neutrino der Nord- und der Südpol des Kompasses. Diesmal aber **eindeutig bestimmt!**

Das Wu-Experiment - Implikationen

Wir haben jetzt die Möglichkeit eine gespiegelte Welt **eindeutig zu definieren**:

Definition

Man lebt in einer gespiegelten Welt, wenn die Richtung der emittierten Elektronen im Cobalt-60 Kernzerfällen **parallel** (nicht anti-parallel) zu der Spin-Ausrichtung der Atomkerne ist.

- Damit können wir zwischen beiden Welten **unterscheiden** und ...
- ... wir können **eindeutig bestimmen** in welcher Welt wir leben.
- Also ist unser Universum **nicht paritätsinvariant!**

Das Wu-Experiment

Zusammenfassung

- Schwache Wechselwirkung verletzt (als einzige) die Paritäts Invarianz
- Erstmals beobachtet mit dem *Wu-Experiment*
- Paritäts Invarianz ist gebrochen, weil Beta-Strahlung parallel zur Magnetfeldrichtung emittiert wird
- Nobel Preis 1957



(Photo: Acc. 90-105 - Science Service Records, 1920s-1970s, Smithsonian Institution Archives)

Antimaterie

Dirac-Gleichung

Dirac-Gleichung

- 1928 entdeckt Paul Dirac die *Dirac-Gleichung*:

$$(i\cancel{\partial} - m)\psi = 0$$

- ... mit **2** (unabhängigen) Lösungen
- Diese Lösungen lassen sich *physikalisch* als **Teilchen** und **Anti-Teilchen** interpretieren mit:
 - gleicher Masse
 - paarweise gespiegelter Ladung
- Beispiel (Elektron / Positron):
 - Elektron mit Ladung: **-1** (*Teilchen*)
 - Positron mit Ladung: **+1** (*Anti-Teilchen*)



(Foto: <http://nobelprize.org>)

Zusätzliche Eigenschaft der Lösungen

- Ein *Elektron* ist das Gleiche wie ein *Positron*, wenn es sich
 - in **gespiegelter** Richtung
 - mit **gespiegelter** Ladung bewegt
- Mathematisch bewerkstelligt man die Umwandlung

Teilchen \leftrightarrow Anti-Teilchen

durch Anwendung des sog. *CP*-Operators
(Engl.: charge-parity)



(Foto: <http://nobelprize.org>)

Materie und Antimaterie

- Jedes elementare Materienteilchen gehorcht seiner eigenen Dirac-Gleichung
 - Zu jedem Materienteilchen gehört ein Materieantiteilchen (mit gleicher Masse und gespiegelter Ladung)
- Ein Teilchen wird zum Anti-Teilchen durch Raum- und Ladungsspiegelung



(Esel)



(CP -Esel)

Einschub: Zusammensetzung unseres Universums

Zusammensetzung unseres Universums

- 5 % Materie
- 25 % Dunkle Materie (grav. Hinweise)
- 70 % Dunkle Energie (Ausdehnung v. Universum)

... Antimaterie!?



(Bild: Uwe Kils und Wiska Bodo)

Einschub: Zusammensetzung unseres Universums

Antimaterie

- Antimaterie ist weder Dunkle Materie noch Dunkle Energie. Sie bildet eine eigene Kategorie und ist **sehr selten** in unserem Universum (später dazu mehr).
- Produktion:
 - Höhenstrahlung
 - Teilchenbeschleuniger



Ist CP eine perfekte Symmetrie?

Das Wu-Experiment mit Antimaterie

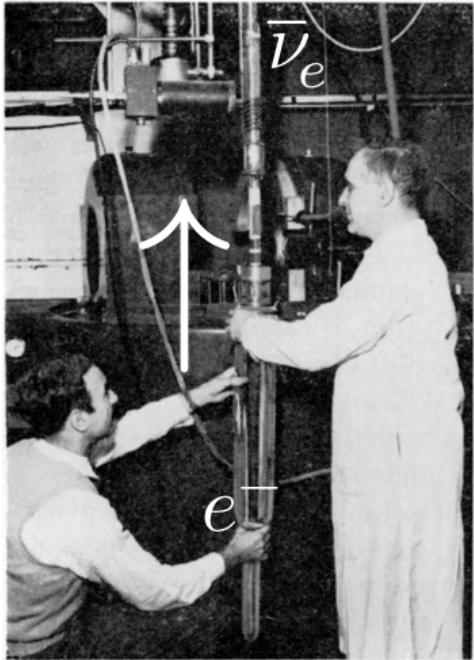
Das Experiment im *CP*-Spiegel

- Magnetische Spule
 - Windungsrichtung **und** Ladung werden gespiegelt
 - Magnetfeld ändert seine Richtung nicht
- Ausrichtung der Atome im magn. Feld:
 - hängt von elektrischer Ladung (inkl. Vorzeichen) ab
 - Magnetfeld und Atome sind jetzt also **antiparallel**

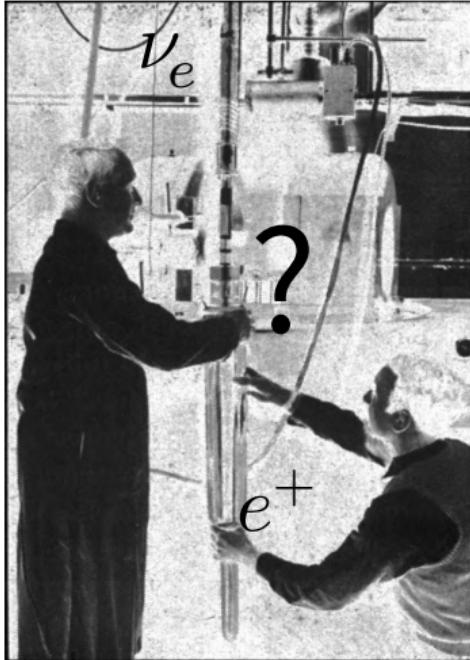


(Photo: Acc. 90-105 - Science Service, Records, 1920s-1970s, Smithsonian Institution Archives)

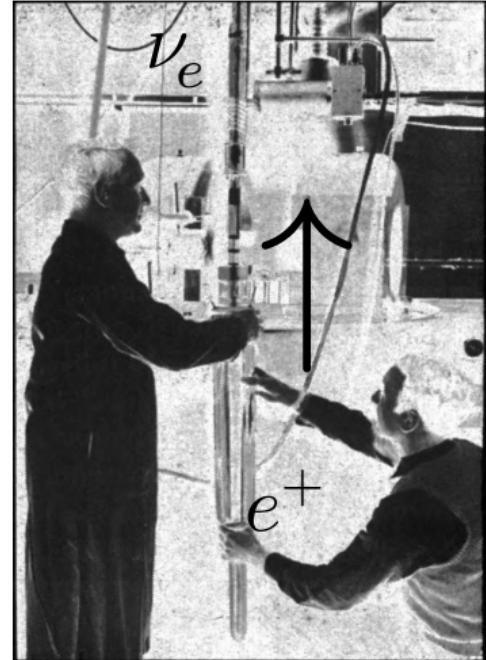
Das Wu-Experiment mit Antimaterie



(Original)



(CP -Spiegelbild)



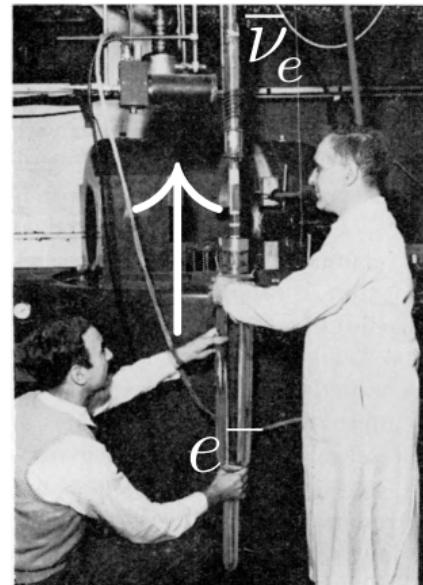
(Nachbau)

(Foto: Annual Report of the National Bureau of Standards for 1957, miscellaneous publication 227)

Das Wu-Experiment mit Antimaterie

Auswertung

- Problem im (Paritäts-)Spiegel
 - die Atomausrichtung kehrt sich um
(umgekehrte Magnetfeldrichtung)
 - e^- -Emission **entgegen** der Atomausrichtung,
sowohl im Original, als auch im Nachbau

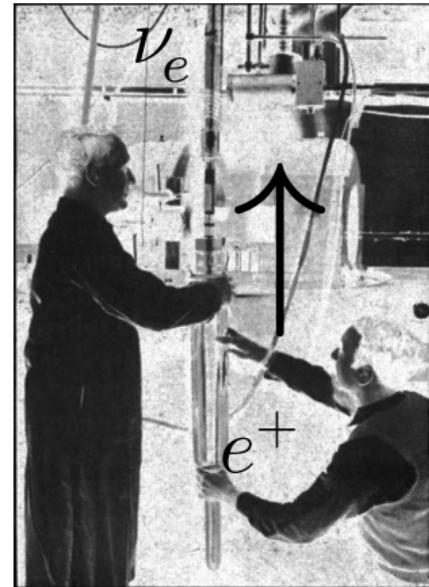


(Original)

Das Wu-Experiment mit Antimaterie

Auswertung

- Problem im (Paritäts-)Spiegel
 - die Atomausrichtung kehrt sich um
(umgekehrte Magnetfeldrichtung)
 - e^- -Emission **entgegen** der Atomausrichtung,
sowohl im Original, als auch im Nachbau
- ... im *CP*-Spiegel
 - die (Anti-)Atomausrichtung kehrt sich um
(gleiche Magnetfeldrichtung)
 - e^+ -Emission **entlang** der
Anti-Atomausrichtung



(Nachbau)

Das Wu-Experiment mit Antimaterie

Gedankenspiel: Kommunikation mit einem Alien

- Wir wollen herausfinden ob sein Universum *gespiegelt aus Antimaterie aufgebaut* ist ...
- ... **ohne** vorbei fliegen zu müssen.
- Können wir ihm ein Experiment vorschlagen mit dem wir unsere beiden Definitionen von **links Materie und rechts Antimaterie** vergleichen können?
 - Offenbar nicht mit dem Wu-Experiment (mit Antimaterie)!
 - Ist unsere Definition von Materie und Antimaterie als **willkürlich**?



(Poster: John Alvin. (c) 1982 Universal Studios / low-resolution)

CP-Verletzung

- Ein Blick in unser Universum
 - (fast) ausschließlich Materie und keine Antimaterie
- Standard Modell der Kosmologie
 - Beim Urknall wurden exakt gleiche Mengen von Materie und Antimaterie produziert

Wo ist die Antimaterie?



(Logo: AMS-02, NASA/JSC)

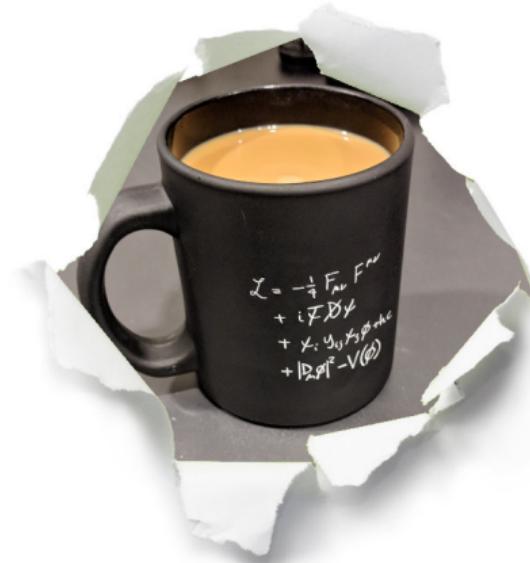
Wo ist die Antimaterie?

- da wir sie im Universum nicht finden, muss sie bereits zerfallen sein!
- ***CP*-Verletzung!**
- ... nur wo?

CP-Verletzung

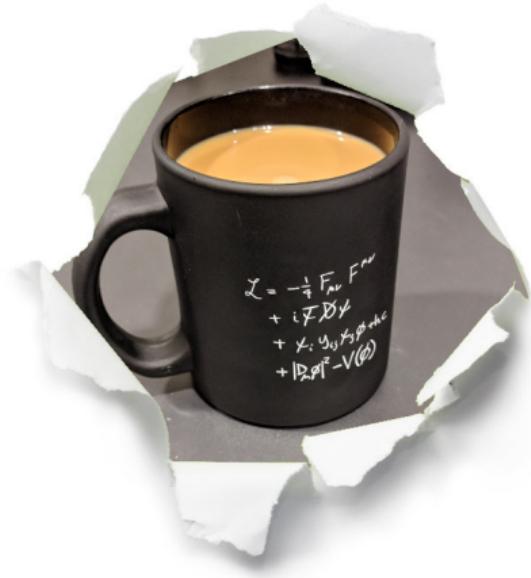
Wo ist die Antimaterie?

- da wir sie im Universum nicht finden, muss sie bereits zerfallen sein!
- ***CP*-Verletzung!**
- ... nur wo?
- Standard-Modell der Teilchenphysik (SM)
 - beste bestätigte Theorie für 3/4 fundamentalen Wechselwirkungen
(Gravitation nicht enthalten)
 - enthält einen Sektor mit *CP*-Verletzung



CP-Verletzung - das Problem

- CP-Verletzung ist im SM um **viele Größenordnungen zu klein** um die Asymmetrie im Universum erklären zu können
- Dennoch: bis heute **einige** Erklärung für CP-Verletzung
- ... ist die Theorie richtig?
 - keine (signifikanten) Abweichungen bis zu erreichbaren Energien bekannt
 - vermutlich falsch für sehr große Energien (keiner weiß genau was in diesem Kontext „groß“ bedeutet)



CP-Verletzung

CP-Verletzung - ein Lösungsansatz

- Präzisionsmessungen
 - Vorhersagen vom SM werden verbessert
 - finden wir Abweichungen / Hinweise auf *neue Physik*?
- Zur Zeit beste^{*} Experiment: **LHCb** (CERN)
 - Detektor am LHC-Speicherring

*persönliche Meinung des Referenten

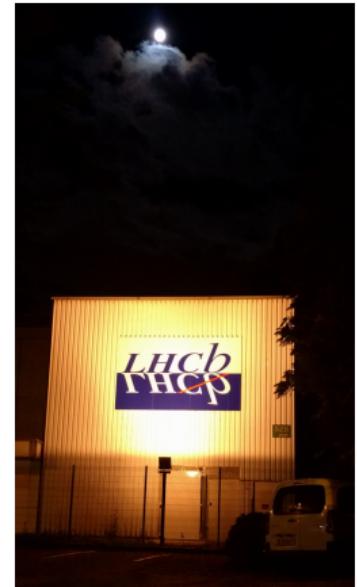


Das LHCb-Experiment

„LHCb is an experiment set up to explore what happened after the Big Bang that allowed matter to survive and build the Universe we inhabit today“

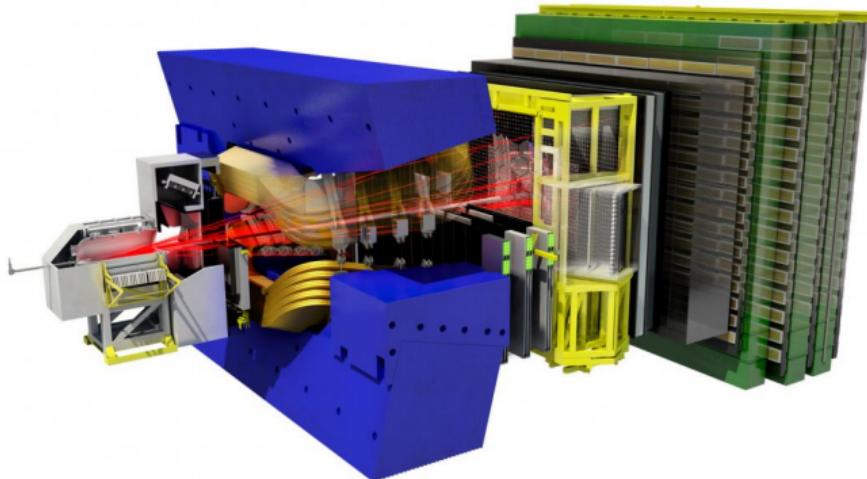
(<http://lhcb-public.web.cern.ch>)

- u.a.: Spezialisiert auf die Messung von CP -Verletzung in b -Hadron Zerfällen
- >442 Papers und >23 281 Zitationen*
- ... bis jetzt (leider?) noch keine signifikante Abweichung vom SM gefunden



*Stand 08.06.2018

Das LHCb-Experiment

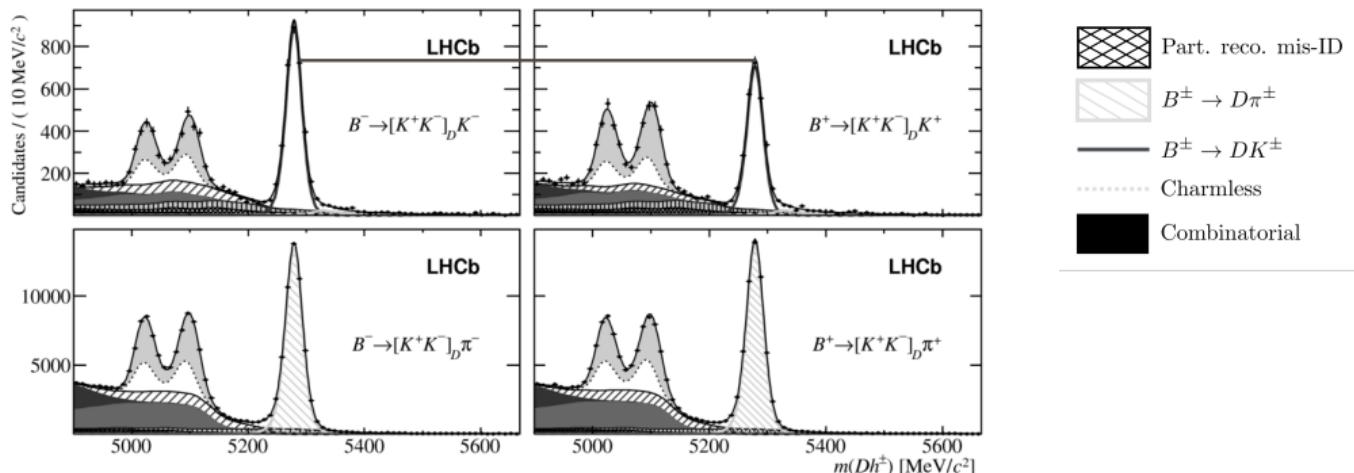


- Im deutschen Wikipedia Artikel zum *Large Hadron Collider** werden zwei Ergebnisse des LHCb-Experimentes noch vor der Entdeckung des Higgs-Bosons aufgelistet (Nobelpreis 2013)
 - darunter: erstmalige Messung von CP -Verletzung bei B_s^0 -Meson Zerfällen

Das LHCb-Experiment

Beispiel: Messung von CP -Verletzung in Zerfällen schwerer b -Mesonen

(Phys. Lett. **B777** (2018) 16-30)

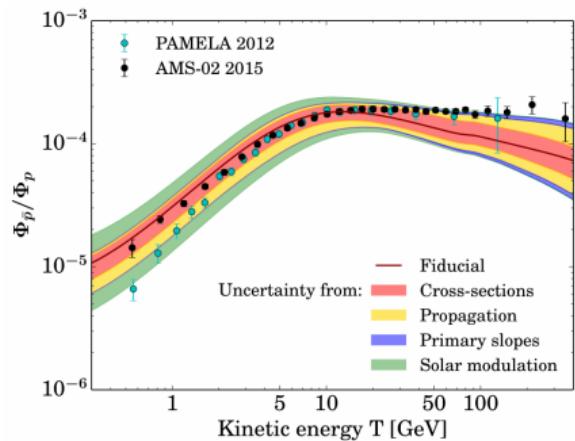


- Aug. 2017: CP-Verletzung in den Zerfällen $B^\pm \rightarrow D^0 h^\pm$. Der Unterschied kann mit bloßem Auge gesehen werden ...

Das LHCb-Experiment

Beispiel: System for Measuring Overlap with Gas (SMOG)

- AMS-02: misst unerwartet viele \bar{p} bei hohen Energien ($\gtrsim 50$ GeV)
- LHCb: SMOG sensitiv für Energien 10-100 GeV (in p He-Kollisionen) und kann damit die Ergebnisse von AMS-02 bestätigen / verbessern



(Plot: JCAP09 (2015) 023)

Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Materie und Antimaterie verhalten sich minimal unterschiedlich. Dieses Phänomen heißt *CP*-Verletzung.
- Dieser kleiner Unterschied ist extrem aufwendig zu vermessen ...
- ... könnte aber helfen zu verstehen warum wir überhaupt noch existieren.
- Am LHCb-Experiment (CERN) vermessen wir (unteranderem) diese Materie-Antimaterie-Asymmetrie mit noch nie da gewesener Präzision.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



(Bild: <https://www.lego.com/low-resolution>)