

# Spiegelwelten und Antimaterie am LHC

Science @ Sail 2018

Nis Meinert



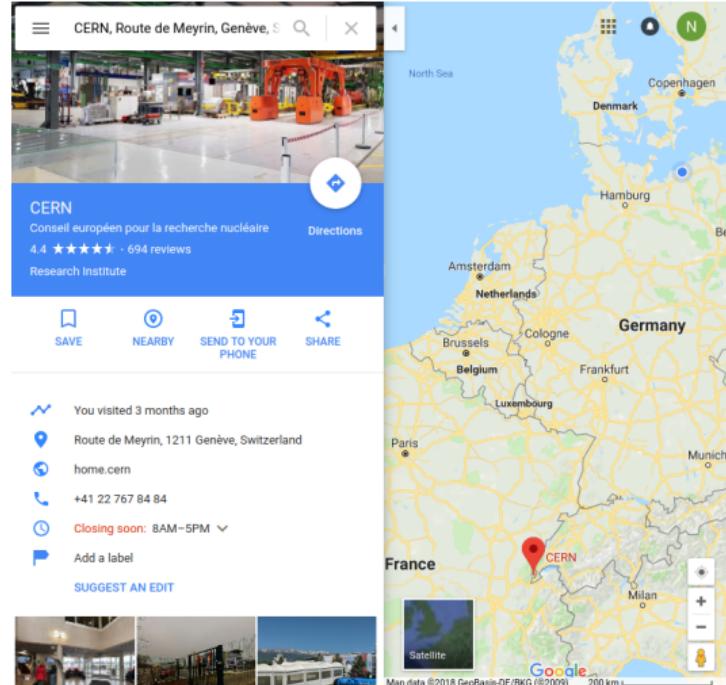
- LHCb Mitglied seit 2013
- 2016: Master of Science (Uni. Rostock)
  - Massenspektroskopie von schweren Baryonen
- Seit 2016: Doktorand am Institut für Physik  
(Uni. Rostock)
- Mehrere kürzere Aufenthalte am CERN
- Forschungsschwerpunkt:
  - $CP$ -Verletzung in Zerfällen von schweren Baryonen
  - Upgrade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

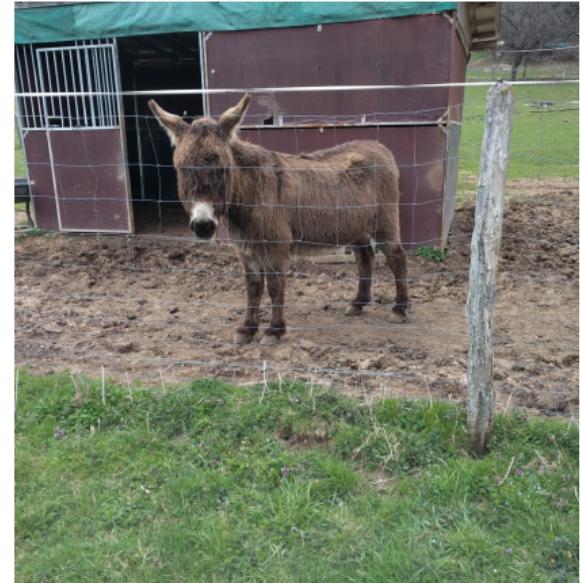
... welches?

**Waren die Fotos spiegelsymmetrisch?**

# Von Spiegelsymmetrien zur Paritätsverletzung

## Waren die Fotos spiegelsymmetrisch?

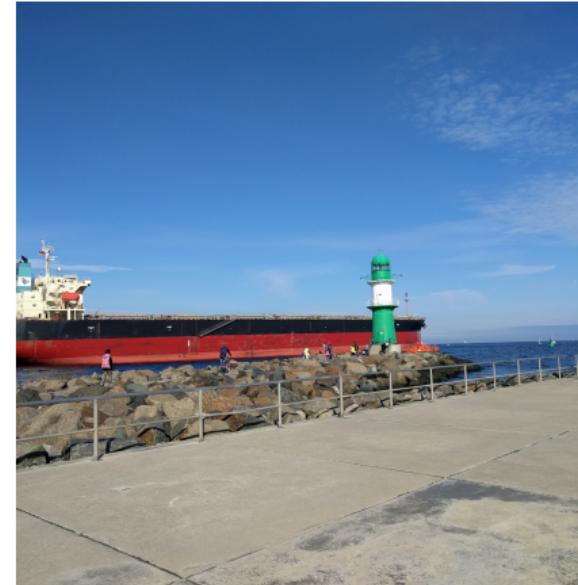
- Nein!
- Trotzdem waren wir bei einigen nicht in der Lage das Original und das Gespiegelte zu unterscheiden!?
- Checkliste:
  - Sieht das Bild *logisch* aus?
  - Gibt es Referenzpunkte?



# 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!

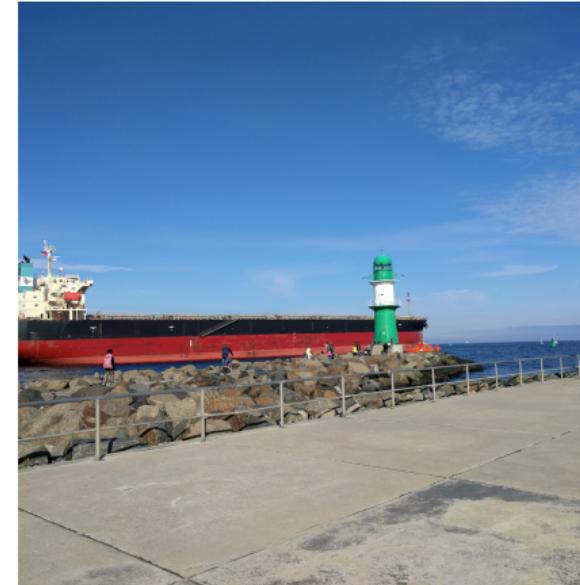


# Von Spiegelsymmetrien zur Paritätsverletzung

## 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?**



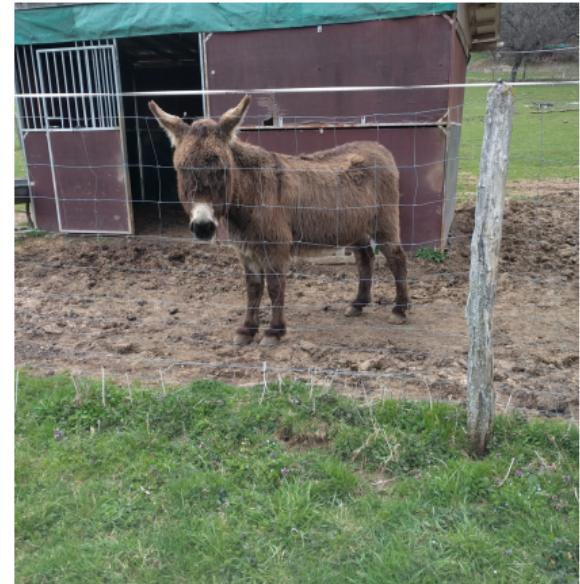
# Von Spiegelsymmetrien zur Paritätsverletzung

## 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!



# Von Spiegelsymmetrien zur Paritätsverletzung

Offenbar gibt es einen Unterschied zwischen:

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

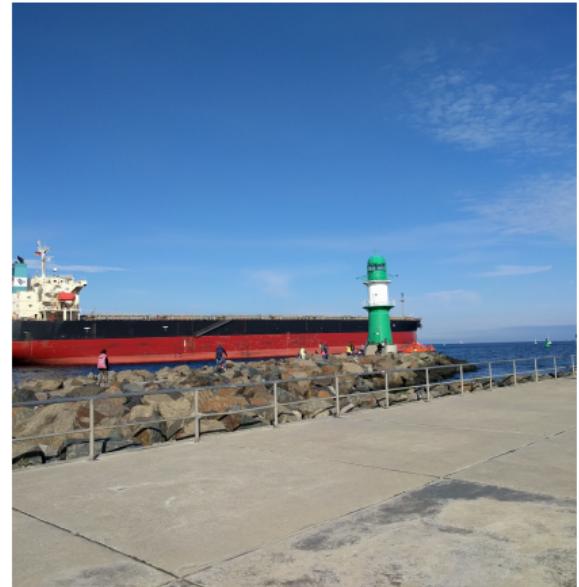
Gibt es Bilder / Prozesse, die gespiegelt **unlogisch** aussehen?

# 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.

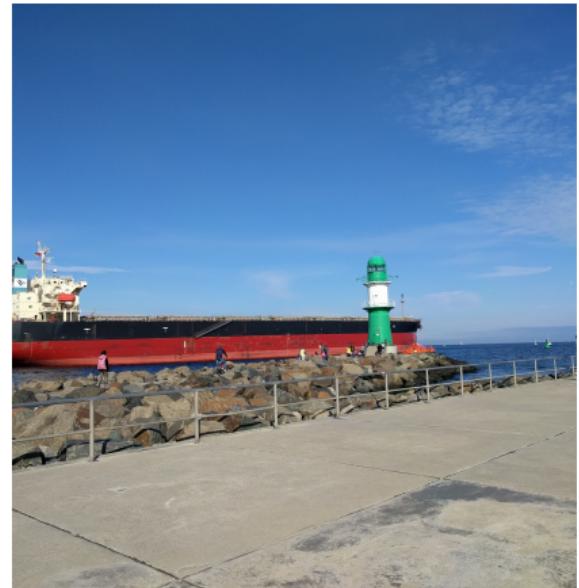


# Von Spiegelsymmetrien zur Paritätsverletzung

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!**

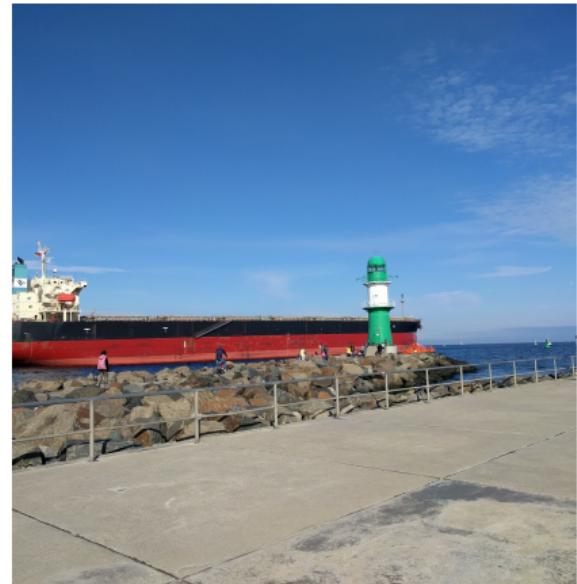


# Von Spiegelsymmetrien zur Paritätsverletzung

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

## 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)

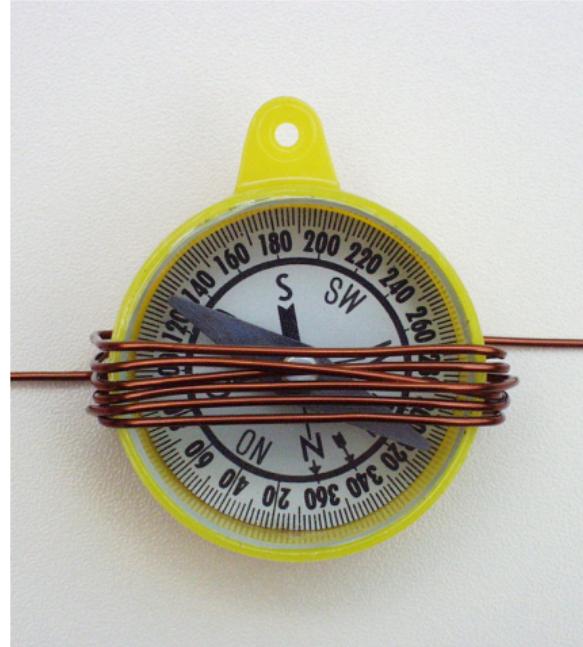
\*tatsächlich lässt sich allgemein zeigen, dass Gravitation nie paritätsverletzend wirkt

# 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?**



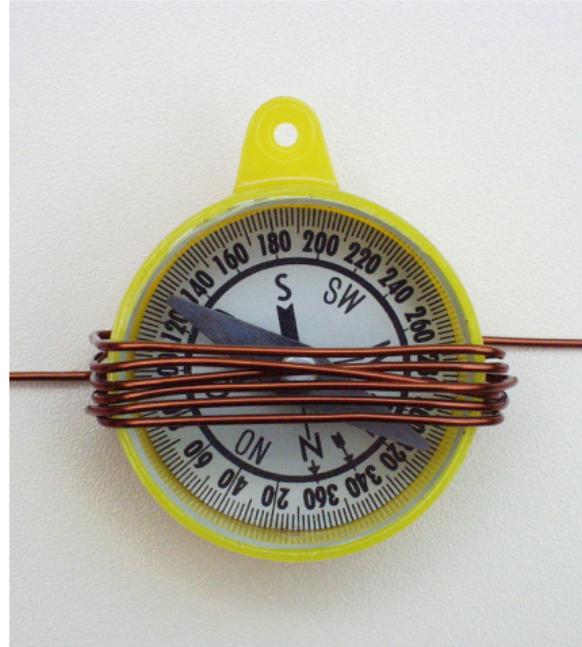
(Foto: Zátonyi Sándor)

# 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)

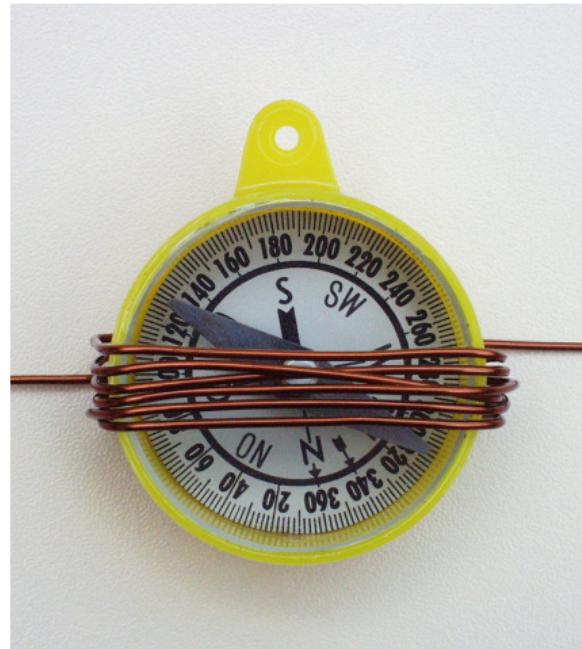
# Suche nach Paritätsverletzung

## 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 ( $\beta$ -Zerfall)
  - Richte alle Kerne im **magnetischen** Feld gleich aus\*
  - Untersuche die **räumliche Verteilung** der  $\beta$ -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)



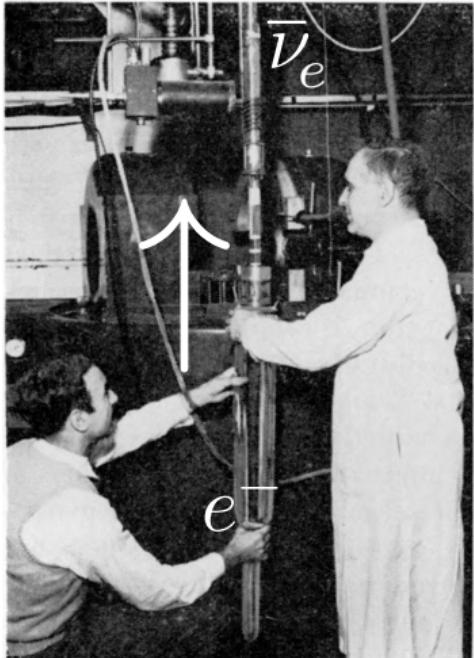
- **Beta-Strahlung** besteht aus zwei Teilchen: einem **Elektron** und einem **Anti-Elektron-Neutrino**



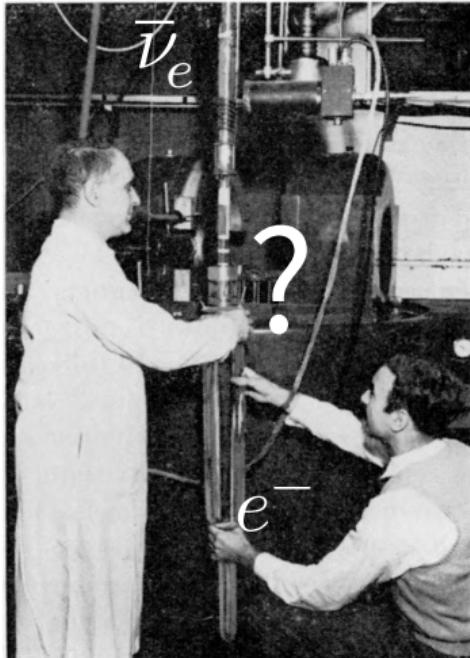
## Cobalt-60 Zerfall (nach Nickel-60)

- Cobalt-60: 27 Protonen, 33 Neutronen
- Nickel-60: 28 Protonen, 32 Neutronen
- Also offenbar: Neutron → Proton ( $\beta^-$  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  $\beta^-$  Strahlung in **entgegengesetzte** Richtungen (Impulserhaltung).

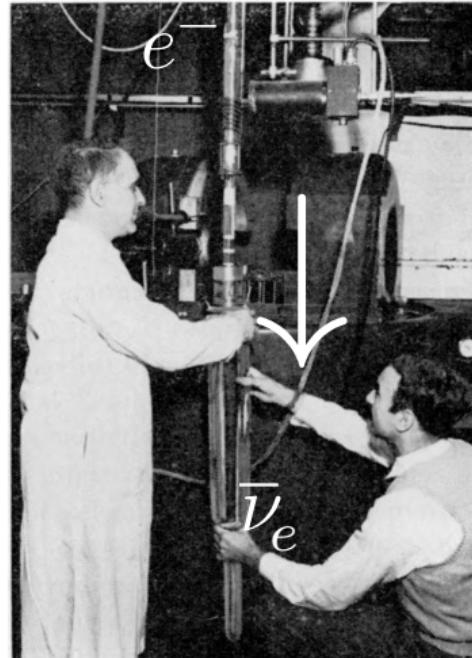
# Das Wu Experiment



(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

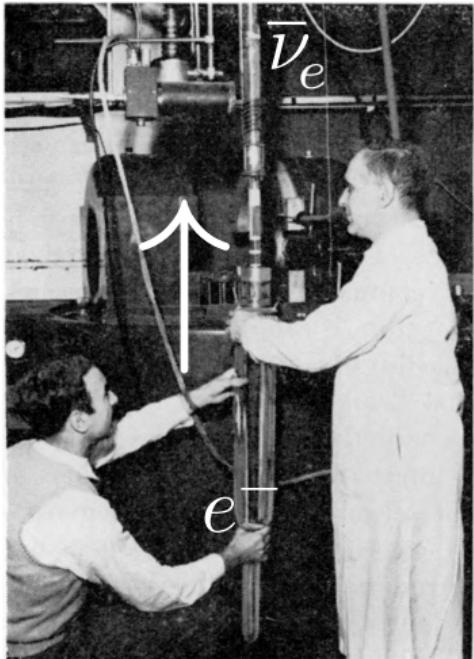
## Das Experiment im *CP*-Spiegel

- 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**

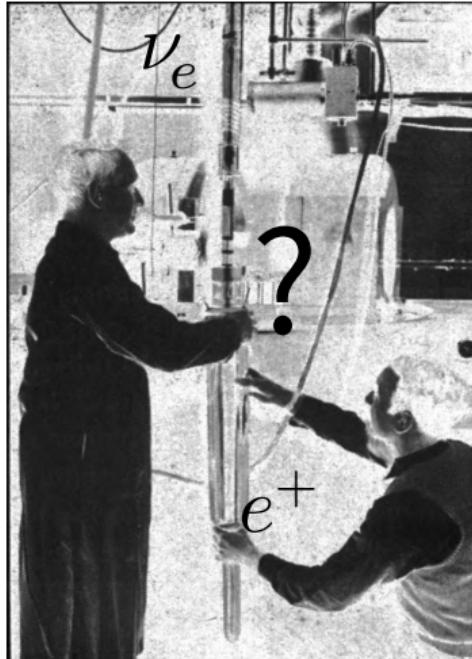


(Photo: Acc. 90-105 - Science Service, Records, 1920s-1970s, Smithsonian Institution Archives)

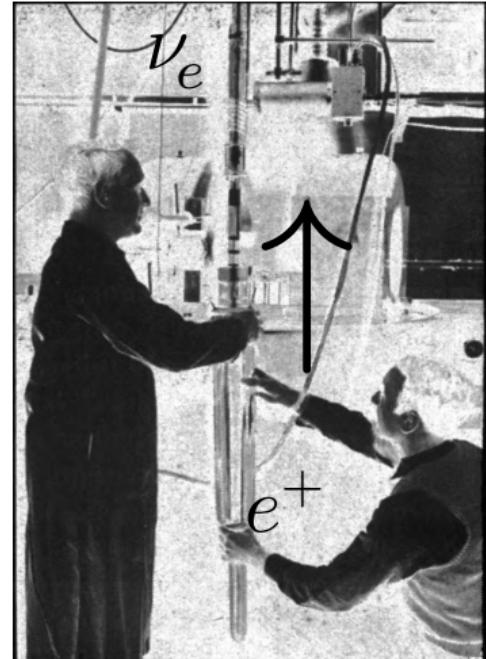
# Das Wu-Experiment mit Antimaterie



(Original)



( $CP$ -Spiegelbild)



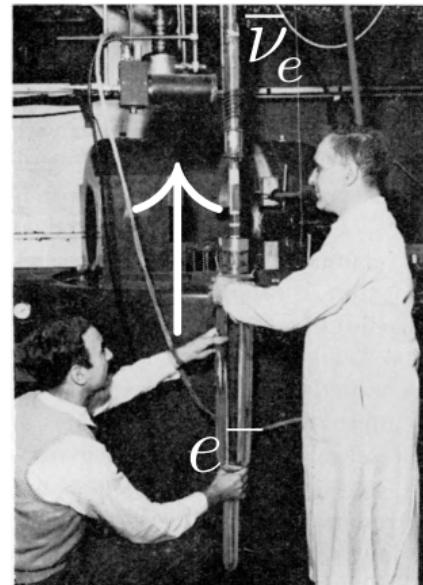
(Nachbau)

(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

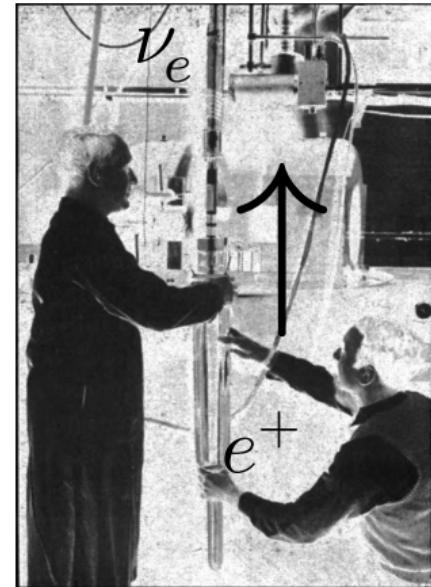


(Original)

# 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)

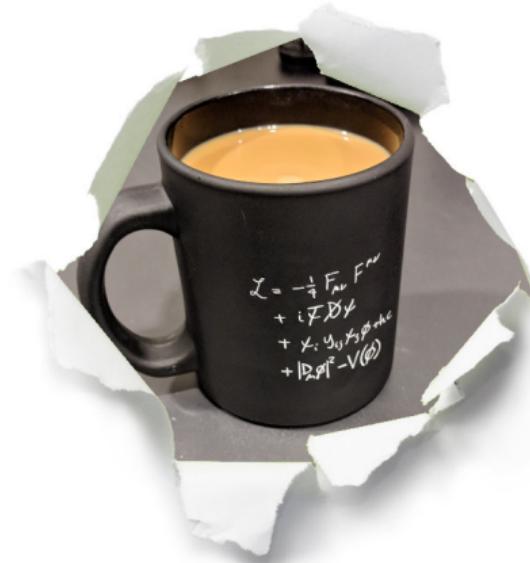
## Wo ist die Antimaterie?

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

# *CP*-Verletzung

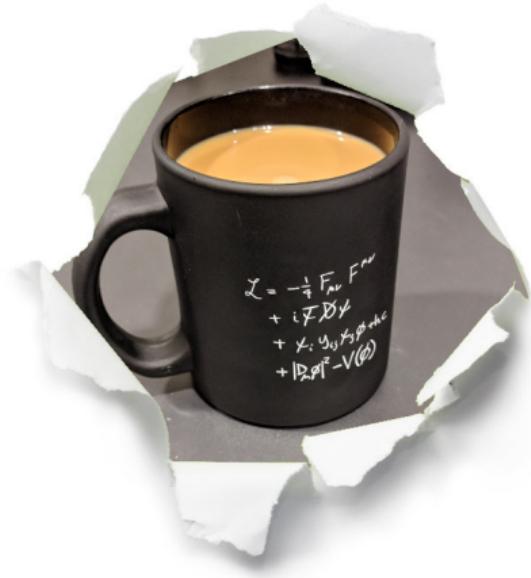
## Wo ist die Antimaterie?

- 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<sup>\*</sup> Experiment: **LHCb** (CERN)
  - Detektor am LHC-Speicherring

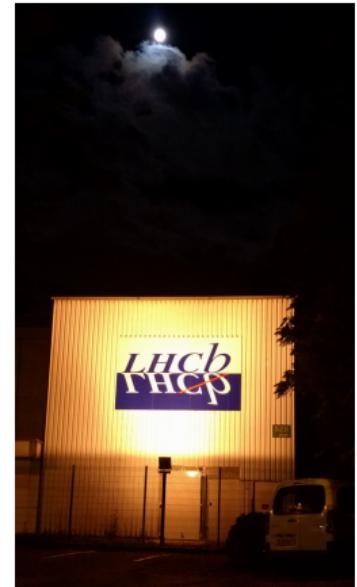


\*persönliche Meinung des Referenten

# Das LHCb-Experiment

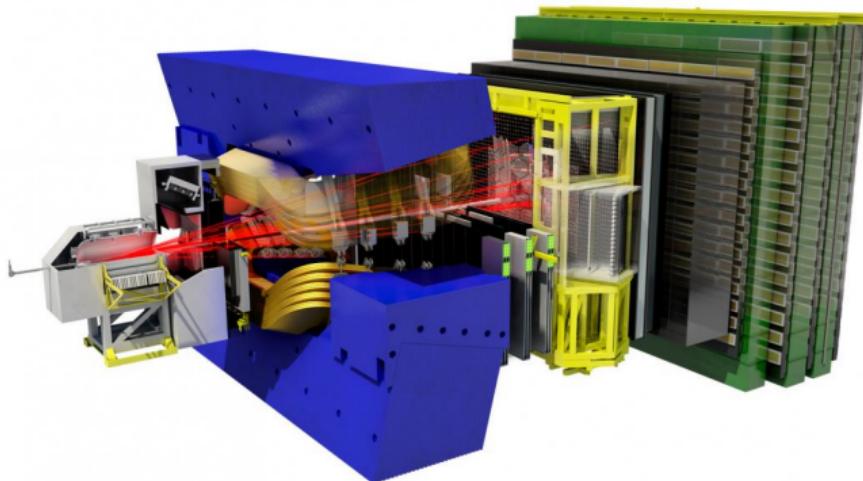
„LHCb is an experiment set up to explore what happened after the Big Bang that allowed matter to survive and build the Universe we inhabit today“  
(<http://lhcb-public.web.cern.ch>)

- 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

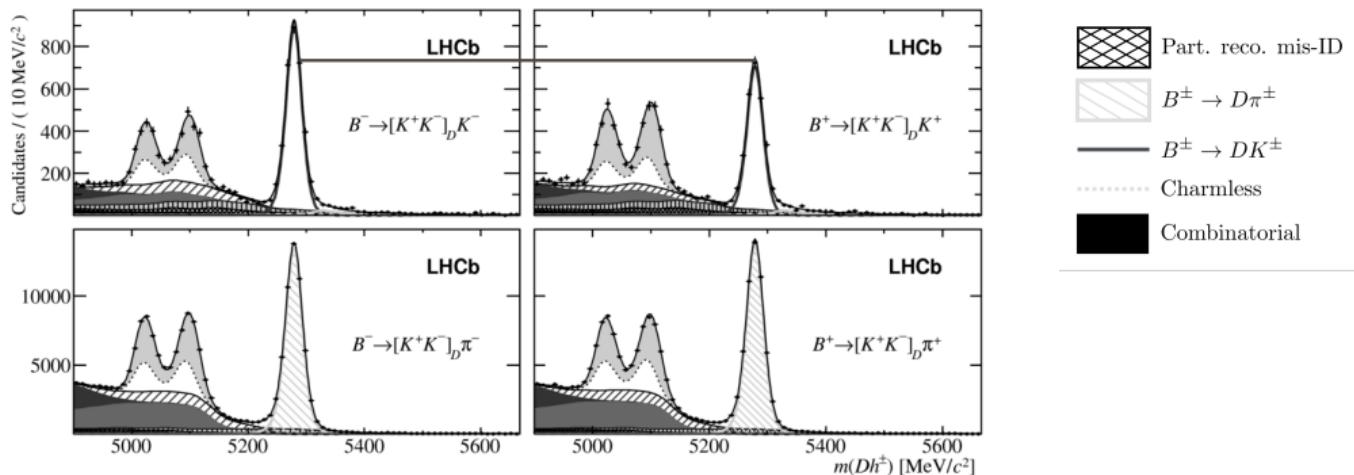


- Im deutschen Wikipedia Artikel zum *Large Hadron Collider\** werden zwei Ergebnisse des LHCb-Experimentes noch vor der Entdeckung des Higgs-Bosons aufgelistet (Nobelpreis 2013)
  - darunter: erstmalige Messung von  $CP$ -Verletzung bei  $B_s^0$ -Meson Zerfällen

# Das LHCb-Experiment

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

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

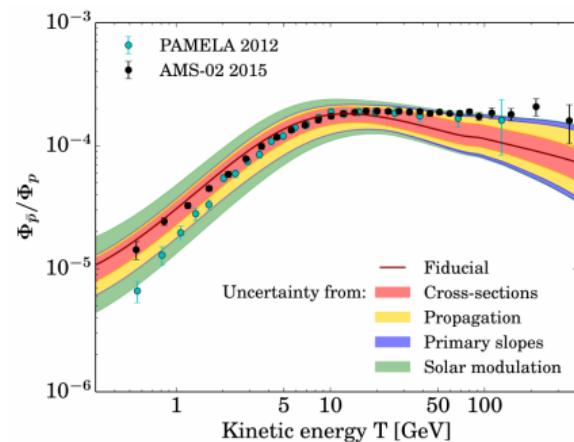


- Aug. 2017: CP-Verletzung in den Zerfällen  $B^\pm \rightarrow D^0 h^\pm$ . Der Unterschied kann mit bloßem Auge gesehen werden ...

# 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  $p\text{He}$ -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>)