

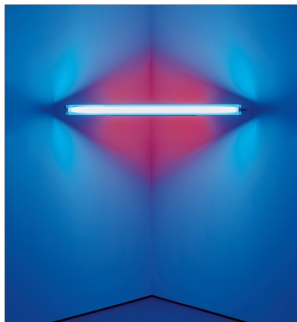
Symmetrie, Asymmetrie
und die Existenz unseres Universums:
das Belle II-Experiment in Japan.

Dr. Daniel Greenwald
Institut für Hadronische Struktur und fundamentale Symmetrien
Technische Universität München

19. September 2022
München

Was ist eine Symmetrie?

Sie kennen das Konzept vielleicht aus der Geometrie:



Dieses Foto von einem Kunstwerk von Dan Flavin ist symmetrisch.

Aber was genau meine ich damit?

Was ist eine Symmetrie?



Das Foto sieht vor und nach Spiegelung gleich aus.
(Quantitativ: Kein Pixel ändert seine Farbe.)

Aber das gilt nur für horizontale Spiegelung, nicht für vertikale.



Symmetrie = Operation + invarianter Wert

Was ist eine Asymmetrie?

Symmetrie = Operation + invarianter Wert

Normalerweise beschreiben wir etwas als

- **symmetrisch** oder
- **nicht symmetrisch** („asymmetrisch“).

Aber in der Physik quantifizieren wir beide Möglichkeiten in einer Variable, den wir „**Asymmetrie**“ nennen:

$$\mathcal{A} \equiv \frac{\text{Wert vor der Operation} - \text{Wert nach der Operation}}{\text{Wert vor der Operation} + \text{Wert nach der Operation}}$$

Warum ist *das* eine „Asymmetrie“?

$$\mathcal{A} \equiv \frac{\text{Wert vor der Operation} - \text{Wert nach der Operation}}{\text{Wert vor der Operation} + \text{Wert nach der Operation}}$$

- Wenn der Wert **symmetrisch** unter der Operation ist,
Wert vor der Operation = Wert nach der Operation:

$$\mathcal{A} = 0$$

- Wenn der Wert **asymmetrisch** unter der Operation ist,
Wert vor der Operation \neq Wert nach der Operation:

$$\mathcal{A} \neq 0$$

Und Wenn

Wert vor der Operation \gg Wert nach der Operation:

$$\mathcal{A} \rightarrow +1$$

Wert vor der Operation \ll Wert nach der Operation:

$$\mathcal{A} \rightarrow -1$$

\mathcal{A} beschreibt die Wertveränderung als eine leicht verständliche Variable,

die immer zwischen -1 und $+1$ liegt.

Asymmetrie-Beispiel: Tintenfarbwechsel

Auf rotes Papier schreibe ich meinen Namen mit ...

Blauer Tinte:



Roter Tinte:



Frage: Ist die Lesbarkeit symmetrisch unter Tintenfarbwechsel?

$$\mathcal{A} = \frac{\text{Lesbarkeit der blauen Tinte} - \text{Lesbarkeit der roten Tinte}}{\text{Lesbarkeit der blauen Tinte} + \text{Lesbarkeit der roten Tinte}}$$

Mein Name ist unleserlich, wenn er mit roter Tinte geschrieben ist:

Lesbarkeit in roter Tinte = 0

Also

$$\mathcal{A} = \frac{\text{Lesbarkeit in blauer Tinte}}{\text{Lesbarkeit in blauer Tinte}}$$

$$\boxed{\mathcal{A} = 1}$$

Die Lesbarkeit ist völlig asymmetrisch unter dem Tintenfarbwechsel.

Asymmetrie-Beispiel: Papierfarbwechsel

Jetzt schreibe ich nur mit blauer Tinte meinen Namen auf ...

blauem Papier:



rotem Papier:



Die Asymmetrie ist jetzt

$$\mathcal{A} = \frac{\text{Lesbarkeit auf blauem Papier} - \text{Lesbarkeit auf rotem Papier}}{\text{Lesbarkeit auf blauem Papier} + \text{Lesbarkeit auf rotem Papier}}$$

Mein Name ist unleserlich, wenn er auf blauem Papier geschrieben ist:

$$\text{Lesbarkeit auf blauem Papier} = 0$$

Also

$$\mathcal{A} = - \frac{\text{Lesbarkeit auf rotem Papier}}{\text{Lesbarkeit auf rotem Papier}}$$

$$\boxed{\mathcal{A} = -1}$$

Die Lesbarkeit ist auch unter dem Tintenfarbwechsel völlig asymmetrisch.

Kombinationen

Wir haben herausgefunden, dass

$$\mathcal{A}_{\text{Tinte}} = \frac{\boxed{\text{Daniel}} - \boxed{\phantom{\text{Daniel}}}}{\boxed{\text{Daniel}} + \boxed{\phantom{\text{Daniel}}}} = +1 \quad \mathcal{A}_{\text{Papier}} = \frac{\boxed{\phantom{\text{Daniel}}} - \boxed{\text{Daniel}}}{\boxed{\phantom{\text{Daniel}}} + \boxed{\text{Daniel}}} = -1$$

Was passiert, wenn wir beide Operationen durchführen?

$$\mathcal{A}_{\text{Tinte, Papier}} = \frac{\boxed{\text{Daniel}} - \boxed{\text{Daniel}}}{\boxed{\text{Daniel}} + \boxed{\text{Daniel}}}$$

Beide sind gut lesbar:

$$\mathcal{A}_{\text{Tinte, Papier}} = 0.$$

**Selbst wenn zwei einzelne Operationen asymmetrisch sind,
kann ihre Kombination symmetrisch sein.**

Symmetrie-Algebra

Das Anfügen einer **symmetrischen Operation** ändert eine Asymmetrie nicht:

$$\begin{array}{l} \text{sym. Op. A} \times \text{sym. Op. B} \longrightarrow \text{sym. Op. AB} \\ \text{asym. Op. A} \times \text{sym. Op. B} \longrightarrow \text{asym. Op. AB} \end{array}$$

Wir haben aus den Beispielen gelernt:

$$\text{asym. Op. A} \times \text{sym. Op. B} \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{sym. Op. AB} \\ \text{oder} \\ \text{asym. Op. AB} \end{array} \right.$$

Drehen wir diese Ergebnisse um:

Wenn die kombinierte Operation AB symmetrisch ist,
dann sind entweder

- Operationen A und B beide symmetrisch oder
- Operationen A und B beide asymmetrisch.

OK ... was hat das alles mit Physik zu tun?

Es gibt drei wichtige **fundamentale Symmetrie-Operationen** in der Welt, die Physiker untersuchen:

- **Ladungsspiegelung**: der Austausch von positiv und negativ.

Wir bezeichnen diese Operation mit dem Symbol „**C**“ (für „Charge“).

- **Raumspiegelung**: der Austausch von links und rechts.

Wir bezeichnen diese Operation mit dem Symbol „**P**“ (für „Parity“).

- **Zeitspiegelung**: der Austausch von vorwärts und rückwärts.

Wir bezeichnen diese Operation mit dem Symbol „**T**“ (für „Time“).

CPT Symmetrie

Die Vollständiger Spiegelung der Welt in

Ladung (C), Raum (P) und Zeit (T)

ist eine besondere Operation.

Eine Konsequenz der Relativitätstheorie ist:

Die Welt ist CPT-symmetrisch.

Denn aus der Symmetrie-Algebra wissen wir:

- Wenn die Welt **C-symmetrisch** ist, muss sie auch PT-symmetrisch sein.
Wenn die Welt **C-asyymmetrisch** ist, muss sie auch PT-asyymmetrisch sein.
- Wenn die Welt **P-symmetrisch** ist, muss sie auch CT-symmetrisch sein.
Wenn die Welt **P-asyymmetrisch** ist, muss sie auch CT-asyymmetrisch sein.
- Wenn die Welt T-symmetrisch ist, muss sie auch **CP-symmetrisch** sein.
Wenn die Welt T-asyymmetrisch ist, muss sie auch **CP-asyymmetrisch** sein.

Es reicht aus, nur **C**, **P** und **CP** zu diskutieren.

Was sind C, P und CP in der Teilchenphysik?

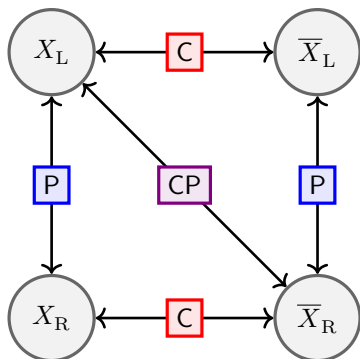
Es gibt **Teilchen und Antiteilchen**

und beide haben **Händigkeit**: vielleicht ein neues Konzept für Sie.

Händigkeit, wie Ladung, ist eine intrinsische Eigenschaft. Es gibt

- **linkshändige** und **rechtshändige Teilchen**: X_L und X_R
- **linkshändige** und **rechtshändige Antiteilchen**: \bar{X}_L und \bar{X}_R

Was bewirken dann **Ladungsspiegelung (C)** und **Raumspiegelung (P)**?



Na? Und? Was hat das mit unserem Universum zu tun?

OK ... Machen wir jetzt einen Abstecher in die Frühzeit nach dem Urknall:

Nach Pikosekunden (10^{-12} Sekunden)

formten sich Teilchen und Antiteilchen in genau gleichen Mengen.

Zu dieser Zeit war das Universum ein sehr aktiver Ort:

- Teilchen und Antiteilchen vernichteten einander und erzeugen Lichtstrahlen.
- Lichtstrahlen treffen einander und erzeugen Teilchen und Antiteilchen.

Innerhalb von Minuten

vernichteten sich ALLE Teilchen und Antiteilchen gegenseitig.

Das Universum war so groß,
dass Strahlen keine Teilchen und Antiteilchen mehr formten.

**Und jetzt leben wir in einem Universum,
das nur aus Licht besteht, ohne jegliche feste Materie.**

Die **Nicht**existenz des Universums?

**Und jetzt leben wir in einem Universum,
das nur aus Licht besteht, ohne jegliche feste Materie.**

Häääää???

Das stimmt nicht ... etwas ist schief gelaufen ...

„Nach ps **formten sich Teilchen und Antiteilchen in genau gleichen Mengen.**“

Hier nahmen wir an, dass die Welt unter Ladungsspiegelung symmetrisch ist.

Damit wir aus Materie existieren können,

müssen sich mehr Teilchen als Antiteilchen geformt haben:

Die Gesetze der Physik müssen irgendwie C-Symmetrie verletzen.

(C = Ladungsspiegelung)

Wie testen wir die Gesetze der Physik?

Wir messen, wie oft ein **Prozess** passiert
und wie oft sein **C-, P- oder CP-gespiegelter Prozess** passiert

und berechnen

$$\mathcal{A} = \frac{\text{Häufigkeit}[\text{Prozess}] - \text{Häufigkeit}[\text{gespiegelter Prozess}]}{\text{Häufigkeit}[\text{Prozess}] + \text{Häufigkeit}[\text{gespiegelter Prozess}]}$$

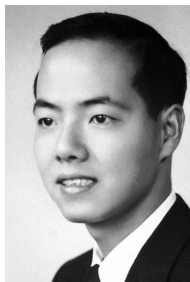
- Wenn wir $\mathcal{A} \neq 0$ messen, sind die Gesetze der Physik **asymmetrisch**.
- Wenn wir nie $\mathcal{A} \neq 0$ messen, sind die Gesetze der Physik **symmetrisch**.

Wir messen für Prozesse, die jeweils durch eine bekannte Naturkraft ablaufen:

- **Elektromagnetismus**, der Atome in Molekülen zusammenhält,
- die **starke Kraft**, die Atomkerne zusammenhält,
- die **schwache Kraft**, die Zerfall von Elementarteilchen ermöglicht,
- **Gravitation**, die uns an die Erde bindet.

Das Wu-Experiment

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts nahmen Physiker an, dass **die Welt vollständig C- und P-Symmetrisch ist**.



T.D. Lee



C.N. Yang



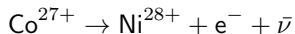
C.S. Wu

1956 haben **T.D. Lee** und **C.N. Yang** bemerkt, dass es damals keinen experimentellen Beweis für Symmetrie in der schwachen Kraft gibt.

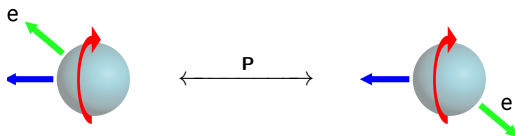
Sie haben ein Experiment zur Testung der schwachen Kraft vorgeschlagen, das 1957 ihre Kollegin **C.S. Wu** durchgeführt hat.

Das Wu-Experiment

Beim Zerfall von Kobalt in Nickel, ein Elektron (e^-) und ein Antineutrino ($\bar{\nu}$)



der durch die schwache Kraft bewirkt wird, kann das **Elektron** entweder **in Richtung** des **Kobaltdrehimpulses** oder **in die Gegenrichtung** fliegen.



Raumspiegelung kehrt die Elektronenrichtung um, aber nicht den Drehimpuls.

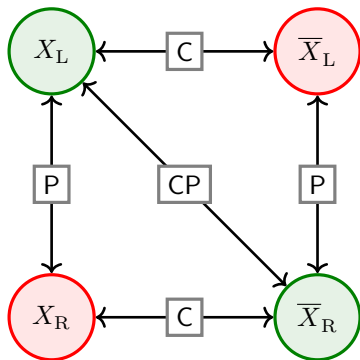
Wu und ihre Kollegen haben also gemessen

$$\frac{\text{Häufigkeit} \left[\begin{array}{c} e \\ \left[\begin{array}{c} \leftarrow \text{Kern} \end{array} \right] \end{array} \right] - \text{Häufigkeit} \left[\begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} \leftarrow \text{Kern} \end{array} \right] \\ e \end{array} \right]}{\text{Häufigkeit} \left[\begin{array}{c} e \\ \left[\begin{array}{c} \leftarrow \text{Kern} \end{array} \right] \end{array} \right] + \text{Häufigkeit} \left[\begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} \leftarrow \text{Kern} \end{array} \right] \\ e \end{array} \right]} = \mathcal{A}_P$$

Das Wu-Experiment

Wu *et al.* sahen, dass $\mathcal{A}_P \neq 0$, was sofort von vielen Kollegen bestätigt wurde.
Es wurde festgestellt:

**Die schwache Kraft wirkt nur auf
linkshändige Teilchen und rechtshändige Antiteilchen.**



Sie ist völlig asymmetrisch unter Ladungs- und Raumspiegelung.

Nobelpreis für Lee & Yang 1957.

Also ... unser Universum kann dann existieren, oder?

Wir haben schon festgestellt:

Damit wir aus Materie existieren können, müssen die Gesetze der Physik Ladungsspiegelung-Symmetrie (C) verletzen.

Und jetzt haben wir festgestellt:

Die C-Symmetrie ist verletzt.

Aber ... (und es gibt leider oft ein Aber in der Physik)

C-Verletzung reicht nicht aus.

Wenn die Welt noch **CP symmetrisch** ist:

Nach dem Urknall formten sich

linkshändige Teilchen und **rechtshändige Antiteilchen**
in **genau** gleichen Mengen.

Diese vernichteten sich **alle** gegenseitig.

Und wir leben in einem Universum, das nur aus Licht besteht ...

CP-Verletzung: unsere Rettung

OK ... (kein Aber mehr)

**Damit wir aus Materie existieren können,
müssen die Gesetze der Physik C und CP verletzen.**

Also drücken wir jetzt die Daumen für CP-Verletzungen.

Aber in den Jahren nach dem Wu-Experiment nahmen Physiker an,
die Welt sei CP-symmetrisch.

Sie wussten noch nicht, dass

die Existenz unseres Universums C- und CP-Verletzungen braucht,

und haben die Idee der Symmetrie als schön bewertet.

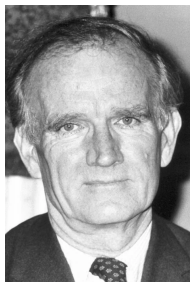
Erstes Anzeichen für CP-Verletzung

1964 haben J.W. Cronin und V.L. Fitch *et al.* entdeckt:

Die schwache Kraft verletzt auch CP.



J.W. Cronin



V.L. Fitch

Sie haben beim Zerfall eines Teilchens mit einem sogenannten „Strange“ Quark eine CP-Asymmetrie gemessen:

$$A_{CP} \approx 10^{-3}$$

Nobelpreis für Cronin & Fitch 1980

Die lange Geschichte der CP-Verletzung

1964 haben J.W. Cronin und V.L. Fitch *et al.* entdeckt, dass

$$\mathcal{A}_{CP} \approx 10^{-3}$$

beim schwachen Zerfall von Strange-Quarks.

Dass **die Welt nicht CP-symmetrisch ist**, hat alle überrascht.

Aber auch, dass **die CP-Asymmetrie so gering ist**, hat alle überrascht.

Physiker haben sich sehr bemüht, andere CP-verletzende Prozesse zu finden.

Es hat **über 30 Jahre** gedauert, andere zu finden:

- 90er: CP-Verletzung wurde in anderen Strange-Quark-Zerfällen beobachtet.
- 2004: CP-Verletzung wurde in Bottom-Quark-Zerfällen beobachtet, bei den Experimenten Belle (Japan) & Babar (USA).
- 2019: CP-Verletzung wurde in Charm-Quark-Zerfällen beobachtet, beim LHCb-Experiment (Europa).

Also ... unser Universum kann dann existieren, oder?

Wir haben schon festgestellt:

Die Existenz unseres Universums braucht C- und CP-Verletzungen.

Und *jetzt* haben wir festgestellt:

Die C- and CP-Symmetrien sind verletzt.

Aber es ist eine sehr geringe CP-Verletzung.

Ist sie groß genug, um die Existenz unseres Universums zu erklären?

Wie berechnen wir das?

Wir schauen die CP-Asymmetrie des Universums an:

$$\mathcal{A}_{\text{CP}}(\text{Universum}) \equiv \frac{\text{Ursprüngliche Teilchenmenge} - \text{Ursprüngliche Antiteilchenmenge}}{\text{Ursprüngliche Teilchenmenge} + \text{Ursprüngliche Antiteilchenmenge}}$$

Die CP-Asymmetrie des Universums

$$\mathcal{A}_{\text{CP}}(\text{Universum}) \equiv \frac{\text{Ursprüngliche Teilchenmenge} - \text{Ursprüngliche Antiteilchenmenge}}{\text{Ursprüngliche Teilchenmenge} + \text{Ursprüngliche Antiteilchenmenge}}$$

Teilchen und Antiteilchen vernichten sich gegenseitig und erzeugen Lichtstrahlen:

- $\text{Ursprüngliche Teilchenmenge} - \text{Ursprüngliche Antiteilchenmenge} = \text{Jetzige Teilchenmenge}$
- $\text{Ursprüngliche Teilchenmenge} + \text{Ursprüngliche Antiteilchenmenge} = \text{Jetzige Lichtstrahlenmenge}$

$$\mathcal{A}_{\text{CP}}(\text{Universum}) \equiv \frac{\text{Jetzige Teilchendichte}}{\text{Jetzige Lichtstrahlendichte}}$$

Das ist etwas, das wir messen können:

$$\mathcal{A}_{\text{CP}}(\text{Universum}) \approx 10^{-10}$$

Nach dem Urknall,

formte sich für jede 10 Milliarden Teilchen-Antiteilchen-Paare, die sich formten, ein zusätzliches Teilchen.

Also ... unser Universum kann dann *jetzt* existieren, oder?

Die Existenz unseres Universums braucht C- und CP-Verletzungen.

Die C- und CP-Symmetrien sind verletzt.

Es ist eine sehr geringe CP-Verletzung.

Aber unser Universum ist nur leicht CP-asyymmetrisch:

$$\mathcal{A}_{\text{CP}}(\text{Universum}) \approx 10^{-10}$$

Aber ... (OK, OK: ein allerletztes Aber. Sorry.)

Nur mit der geringen CP-Verletzung der schwachen Kraft
wäre die Asymmetrie des Universums

$$\mathcal{A}_{\text{CP}}(\text{Universum}) < 10^{-20}$$

Wir können die CP-Asymmetrie des Universums noch nicht erklären!

Aber unser Universum existiert!

Wir können die CP-Asymmetrie des Universums noch nicht erklären!

Wir suchen also nach neuen Quellen für CP-Verletzungen:

- neue Naturkräfte und
- neue Arten von Teilchen.

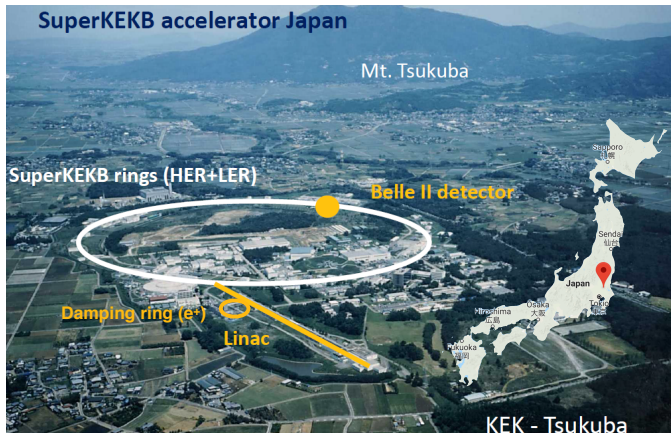
Deshalb haben wir das Belle-Experiment ein Jahrzehnt lang betrieben und seinen Nachfolger gebaut:

das Belle II-Experiment.

Das Belle II-Experiment

Das Belle II-Experiment befindet sich im KEK-Forschungslabor in Tsukuba, Japan—dem Garching von Tokio.

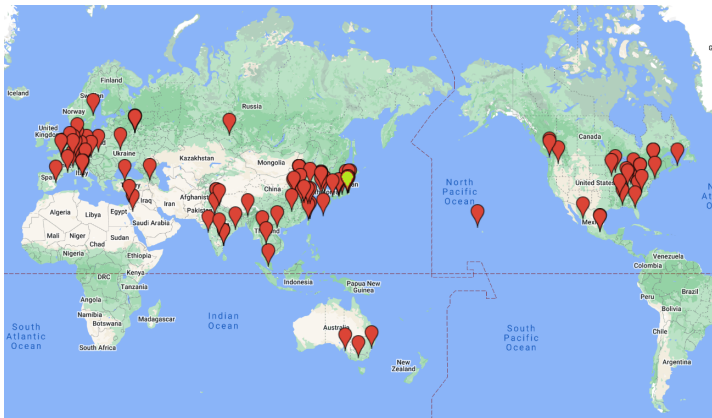
Es steht am Kollisionspunkt von Elektronen- und Antielektronenstrahlen, die von dem SuperKEKB-Beschleuniger erzeugt werden.



Das Belle II-Experiment

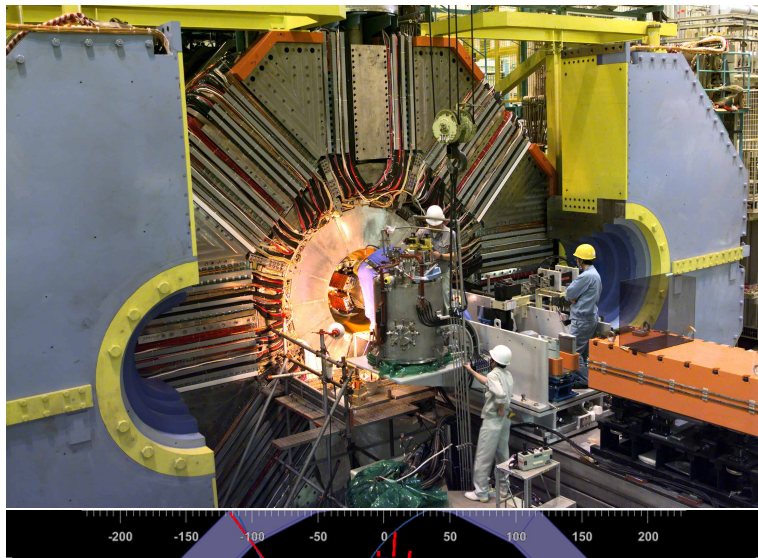
Es ist ein gemeinsame Projekt von 1151 Wissenschaftler*innen
an 123 Instituten in 27 Ländern.

Dazu gehören 243 Wissenschaftler*innen und Student*innen
aus 11 deutschen Instituten.



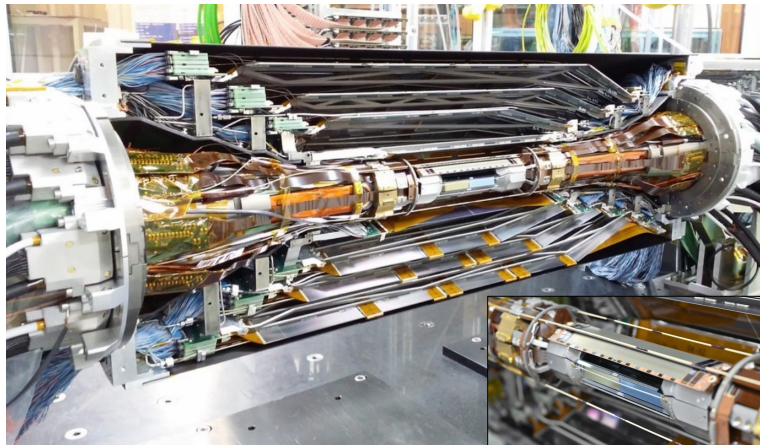
Das Belle II-Experiment

Es ist wie eine riesige Digitalkamera, die Schnappschüsse von Teilchen und Antiteilchen und ihren Wechselwirkungen macht.



Das Belle II-Experiment

Das Herzstück des Detektors, der so genannte „Belle II Pixel Detector“, wurde größtenteils in Deutschland entwickelt.



Das Belle II-Experiment

Wir sind sehr aktiv und analysieren die Daten, die wir seit 2018 sammeln:

Doc #	Title	Journal	Principal authors	Preprints
11	Observation of $e^+e^- \rightarrow \omega \chi_{bJ}$ and search for $X_B \rightarrow \omega \chi_{bJ}$ at \sqrt{s} near 10.75 GeV	submitted to Physical Review Letters	S. Jia, C. P. Shen	https://arxiv.org/abs/2208.13189
10	Measurement of the Ω_c lifetime at Belle II	Accepted by Physical Review D Letters	A. Di Canto, N. Nellikunnummel	https://arxiv.org/abs/2208.08573
9	Search for a dark photon and an invisible dark Higgs boson in $\mu^+\mu^-$ and missing energy final states with the Belle II experiment	submitted to Physical Review Letters	M. Bertemes, M. Campajola, G. De Pietro, E. Graziani, G. Inguglia	https://arxiv.org/abs/2207.00509
8	Measurement of the Λ_c^+ lifetime	Accepted by Physical Review Letters	J. V. Bennett, A. Di Canto, N.K. Nisar	https://arxiv.org/abs/2206.15227
7	Measurement of Lepton Mass Squared Moments in $B \rightarrow X_c \ell \nu_\ell$ Decays with the Belle II Experiment	submitted to Physical Review D	M. Welsch, F. Bernlocher	https://arxiv.org/abs/2205.06372
6	Combined analysis of Belle and Belle II data to determine the CKM angle ϕ_3 using $B^+ \rightarrow D(K_S^0 h^+ h^-)h^+$ decays	JHEP 02 (2022) 063 DOI: 10.1007/JHEP02(2022)063	N. Rout, J. Libby, K. Trabelsi	Belle II Preprint 2021-003, KEK Preprint 2021-28, arxiv:2110.12125 (PDF) , inspirehep
5	Precise measurement of the D^0 and D^+ lifetimes at Belle II	Phys. Rev. Lett. 127, 211801 (2021) DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.211801	T. Bilka, G. Casarosa, A. Di Canto, M. Dorigo, N. K. Nisar, R. Žlebčík	Belle II Preprint 2021-002, KEK Preprint 2021-12, arxiv:2108.03216 (PDF) , inspirehep

mehr unter belle2.org

Zusammenfassung

- Dass wir aus der Materie existieren, bedeutet, dass
**die Welt
unter Austausch von Teilchen und Antiteilchen
und links und rechts
asymmetrisch ist .**
- Wir existieren aufgrund einer 10^{-10} -Asymmetrie.
- Aber wir können noch nicht erklären, warum die Welt so asymmetrisch ist.
- Deshalb **suchen wir nach neuen Quellen der Asymmetrie:**
 - **neue Naturkräfte** und
 - **neue Arten von Teilchen.**
- **Diese erforschen wir beim Belle II-Experiment**
mit dem SuperKEKB-Teilchenbeschleuniger in Tsukuba, Japan.
- In den ersten Jahren unserer Aktivität haben wir bewiesen, dass
 - das Belle II-Experiment gut läuft und
 - unsere Ergebnisse zu den besten der Welt gehören.