

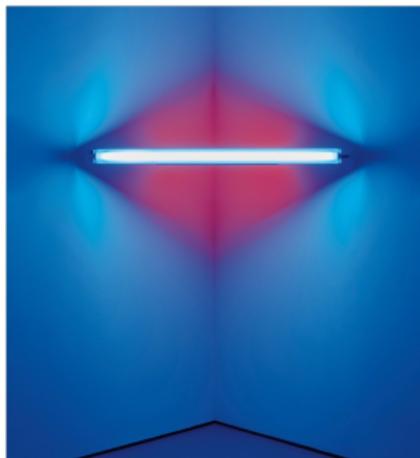
Symmetrie, Asymmetrie  
und die Existenz unseres Universums:  
das Belle II-Experiment in Japan.

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

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

Was passiert, wenn wir beide Operationen durchführen?

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

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?

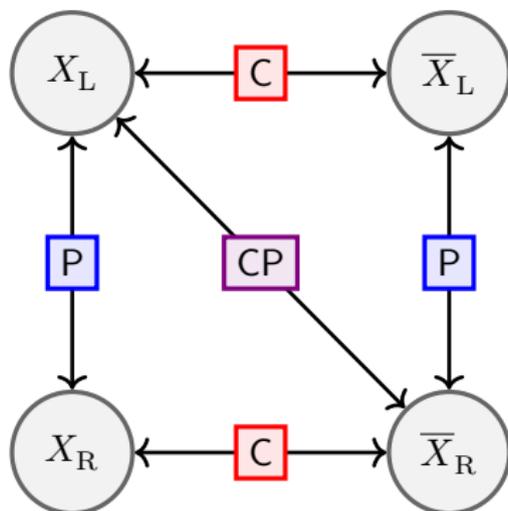
Es gibt **Teilchen und Antiteilchen**

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**:  $\bar{X}_L$  and  $\bar{X}_R$

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.

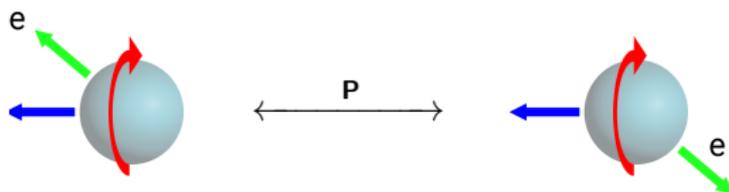
Sie haben ein Experiment zur Testung der schwachen Kraft vorgeschlagen, das 1957 ihre Kollegin **C.S. Wu** durchgeführt hat.

# 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.

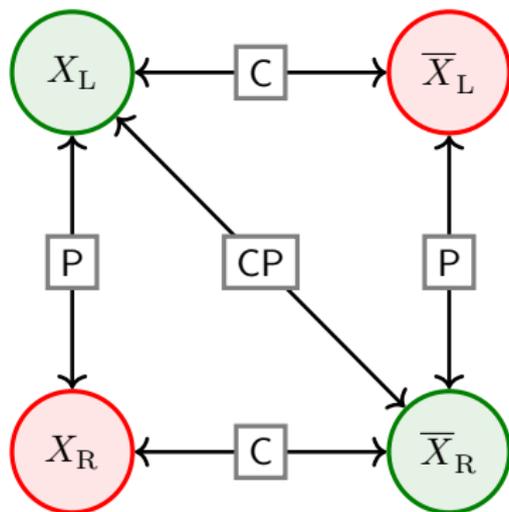
Wu und ihre Kollegen haben also gemessen

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

# 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.

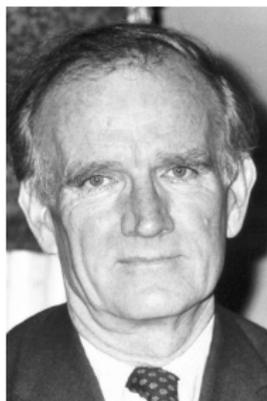
# Erstes Anzeichen für CP-Verletzung

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:

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

# 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.

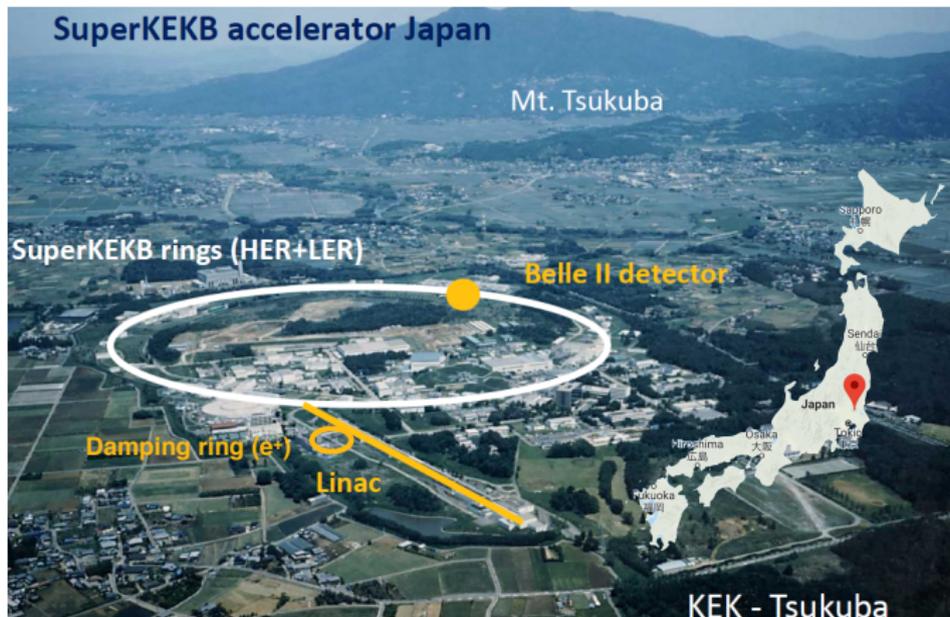
Deshalb haben wir das Belle-Experiment ein Jahrzehnt lang betrieben und seinen Nachfolger gebaut:

**das Belle II-Experiment.**

# Das Belle II-Experiment

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

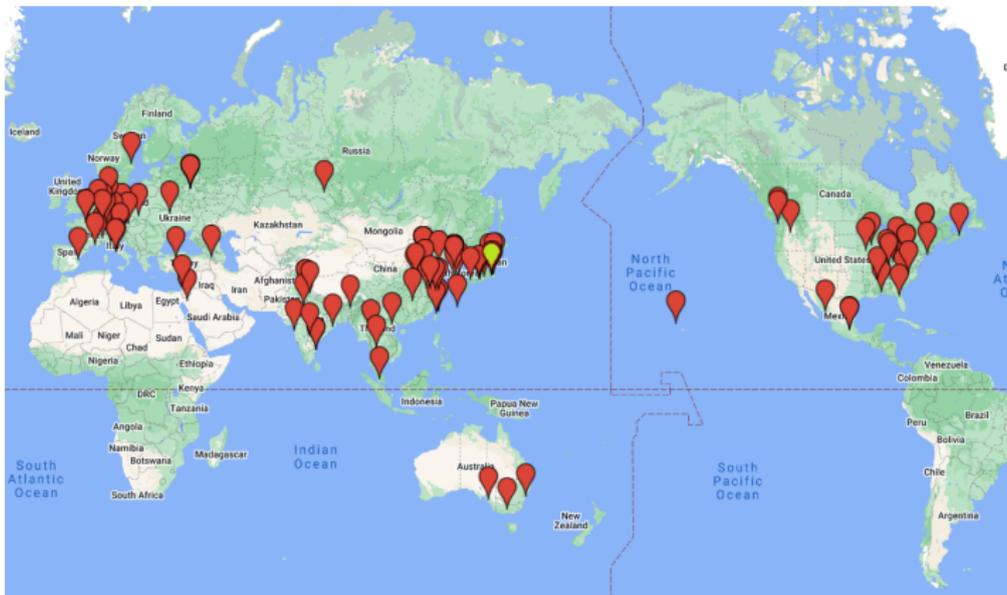
Es steht am Kollisionspunkt von Elektronen- und Antielektronenstrahlen, die von dem SuperKEKB-Beschleuniger erzeugt werden.



# Das Belle II-Experiment

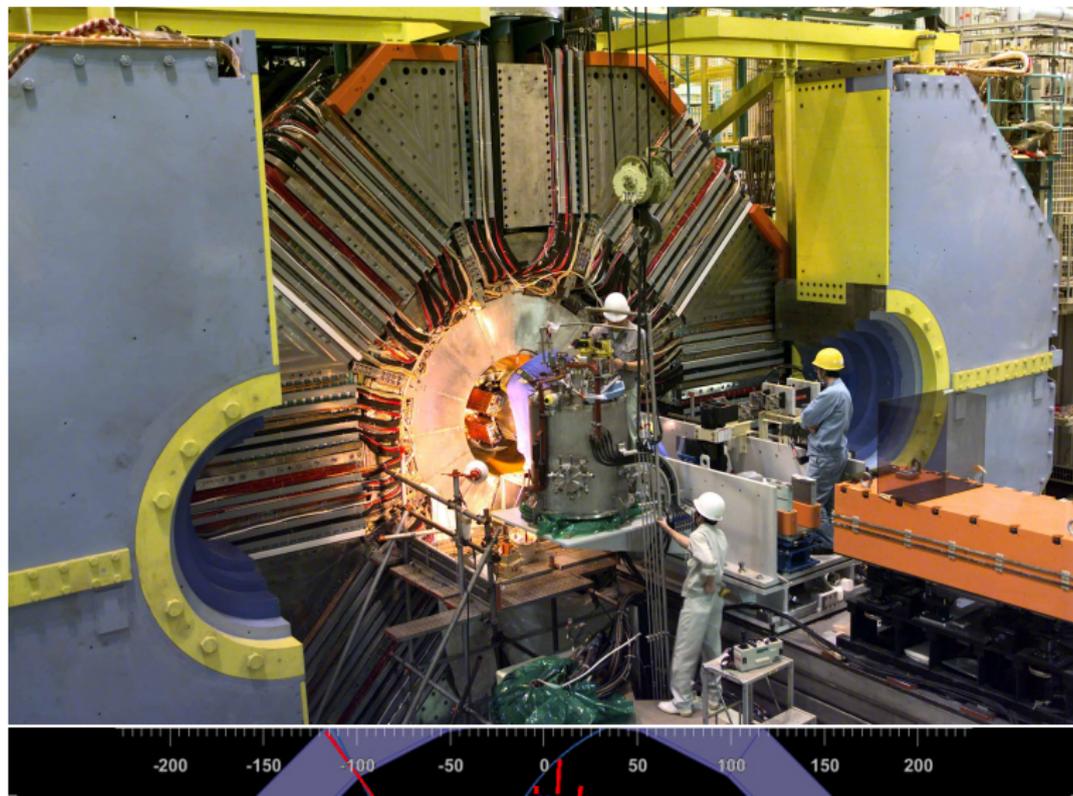
Es ist ein gemeinsame Projekt von 1151 Wissenschaftler\*innen  
an 123 Instituten in 27 Ländern.

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



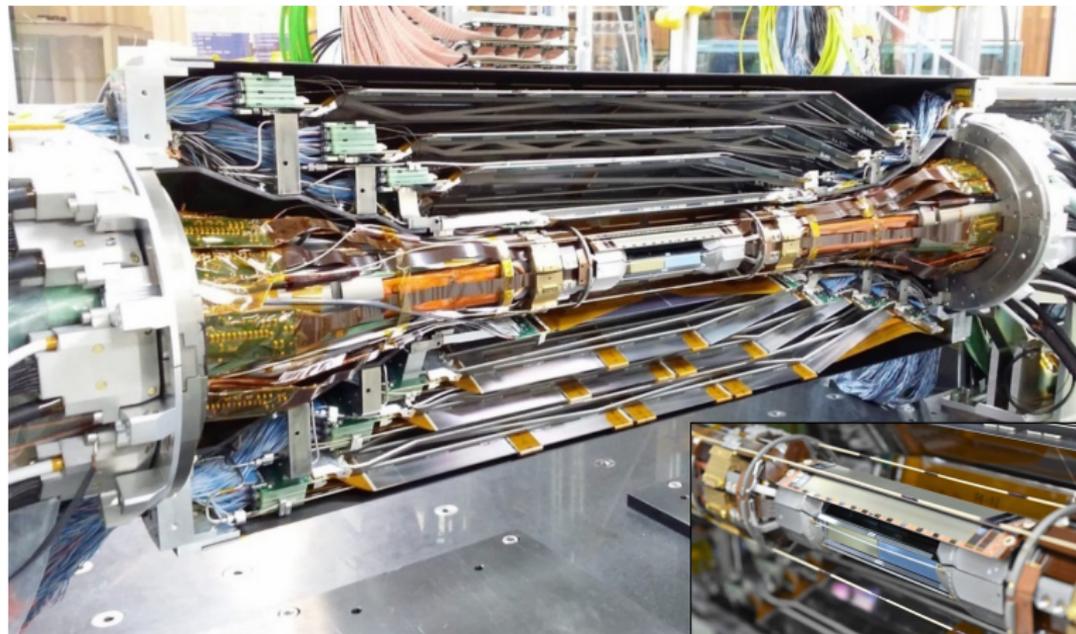
# Das Belle II-Experiment

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	<a href="https://arxiv.org/abs/2208.13189">https://arxiv.org/abs/2208.13189</a>
10	Measurement of the $\Omega_c$ lifetime at Belle II	Accepted by Physical Review D Letters	A. Di Canto, N. Nellikunnummel	<a href="https://arxiv.org/abs/2208.08573">https://arxiv.org/abs/2208.08573</a>
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	<a href="https://arxiv.org/abs/2207.00509">https://arxiv.org/abs/2207.00509</a>
8	Measurement of the $\Lambda_c^+$ lifetime	Accepted by Physical Review Letters	J. V. Bennett, A. Di Canto, N.K. Nisar	<a href="https://arxiv.org/abs/2206.15227">https://arxiv.org/abs/2206.15227</a>
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	<a href="https://arxiv.org/abs/2205.06372">https://arxiv.org/abs/2205.06372</a>
6	Combined analysis of Belle and Belle II data to determine the CKM angle $\phi_3$ 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, <a href="https://arxiv.org/abs/2110.12125">arxiv:2110.12125 (PDF)</a> , <a href="https://inspirehep.net/literature/2110125">inspirehep</a>
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, <a href="https://arxiv.org/abs/2108.03216">arxiv:2108.03216 (PDF)</a> , <a href="https://inspirehep.net/literature/2108032">inspirehep</a>

mehr unter [belle2.org](https://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.