

Zeitumkehr

Science @ Sail 2019

Nis Meinert



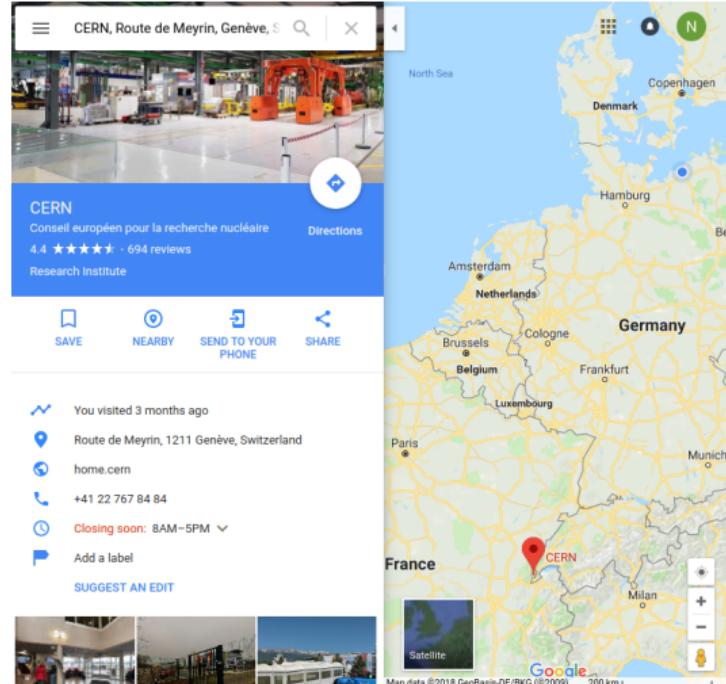
- LHCb Mitglied seit 2013
- 2016: Master of Science (Uni. Rostock)
 - Massenspektroskopie von schweren Baryonen
- Seit 2016: Doktorand am Institut für Physik
(Uni. Rostock)
- Mehrere kürzere Aufenthalte am CERN
- Forschungsschwerpunkt:
 - CP-Verletzung in Zerfällen von schweren Baryonen
 - Upgrade des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



Des Large Hadron Collider (LHC)

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)



1. Was ist Zeit?

2. Makro- vs. Mikroskopische Zeit

3. Zeitumkehr(in)varianz

Was ist Zeit?

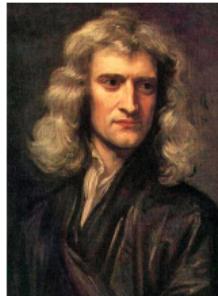
Was ist Zeit?

Aristoteles (300 BC.)

*Die Zeit ist nichts Seiendes. Sie ist die **Wahrnehmung** des Davor und Danach an der **Bewegung**.*



(After Lysippos [CC BY-SA 2.5])



(After Godfrey Kneller [Public domain])

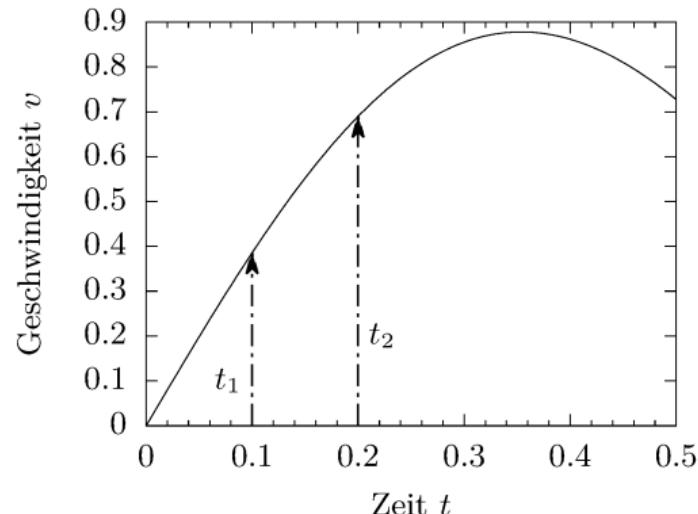
Newton (1700 AD.)

*Die absolute, wahre und mathematische Zeit fließt an sich und ihrer Natur nach gleichmäßig, **ohne Beziehung auf äußere Gegenstände**. (Insbesondere **unabhängig von einem Beobachter**.)*

2. Newtonsche Gesetz

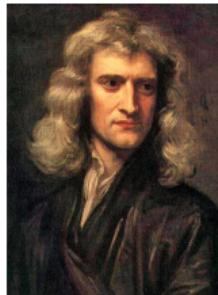
Um einen Körper (Masse m) zu beschleunigen ($v(t_1) \rightarrow v(t_2)$) braucht man Kraft F !

$$F(t) \approx m \cdot \underbrace{\frac{v(t_2) - v(t_1)}{t_2 - t_1}}_{\text{Ableitung}}$$



In **Bewegungsgleichungen** verknüpfen Ableitungen Zeitpunkt t mit **Vergangenheit** (t_1) und **Zukunft** (t_2)!

Was ist Zeit?



Newton

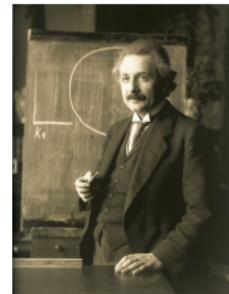
Physik beschreibt Natur im Raum (3D) und **unabhängig** davon in der absoluten Zeit.

(After Godfrey Kneller [Public domain])

Einstein

Physik beschreibt Natur in **vierdimensionaler** Raumzeit.

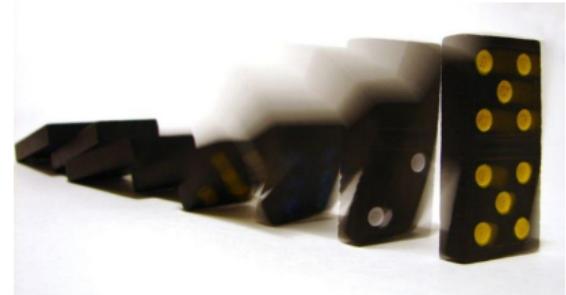
- Zeit vergeht an verschiedenen Orten unterschiedlich schnell



(Ferdinand Schmutzler [Public domain])

(Spezielle) Relativitätstheorie

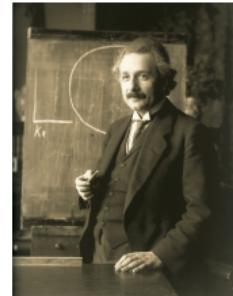
- In Bewegung vergeht die Zeit langsamer (Zwillingsparadoxon!)
- Gleichzeitigkeit ist subjektiv
- **Aber:** Kausalität bleibt stets gewahrt! (untere Grenzen für Zeitreisen)



(aussiegall [CC BY 2.0])

Relativitätstheorie

- Zeit vergeht an verschiedenen Orten unterschiedlich schnell
- Es gibt keine globale Gleichzeitigkeit
- Kausalität ist eine Invariante und gilt in allen Bezugssystemen gleichermaßen



(Ferdinand Schmutzler [Public domain])

&

Quantenphysik: Materie und Raumzeit sind untrennbar (es gibt keinen leeren Raum!)

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$$

Makro- vs. Mikroskopische Zeit

Staubsimulation

Einfache Staubsimulation

- Zu Beginn: 25 Staubkörner, in der Mitte des Raumes
- Jedes Staubkorn kann sich zufällig in eine beliebige Richtung bewegen
- **Aufgabe:** Bilder zeitlich ordnen!



$t = 0 \text{ h}$



$t = ???$



$t = ???$



$t = ???$

Staubsimulation

Einfache Staubsimulation

- Zu Beginn: 25 Staubkörner, in der Mitte des Raumes
- Jedes Staubkorn kann sich zufällig in eine beliebige Richtung bewegen
- **Aufgabe:** Bilder zeitlich ordnen!



Ist das Zeit?



$t = 0 \text{ h}$



$t = 1 \text{ h}$

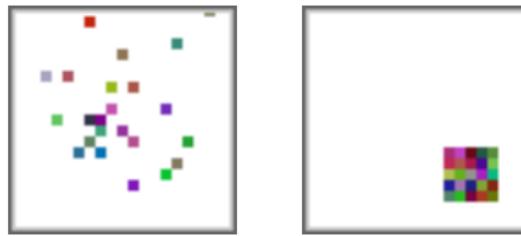


$t = 2 \text{ h}$



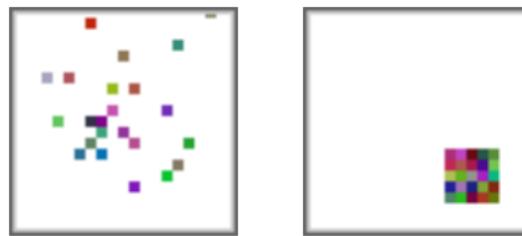
$t = 4 \text{ h}$

Welcher Zustand ist nach 4 h wahrscheinlicher?



Staubsimulation

Welcher Zustand ist nach 4 h wahrscheinlicher?



Beide Zustände sind gleich wahrscheinlich!

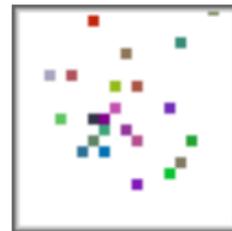
Entropie

Welcher Zustand ist nach 4 h wahrscheinlicher?

- (a) und (b) sind **gleich wahrscheinlich** ...
- ...aber es gibt viel mehr Konfigurationen die (a) ähnlicher sehen als (b)



Makroskopische Zeit: Übergang in einen wahrscheinlicheren Zustand (**Entropie**)



(a)



(b)

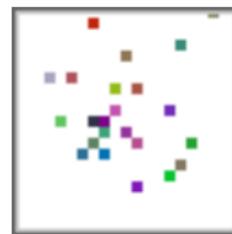
Entropiezunahme

- Physik: Entropie nimmt (global) immer zu
- Seit dem Urknall entwickeln wir uns also in immer wahrscheinlichere Klassen von Zuständen (*morgen ist wahrscheinlicher als gestern*) ...
- ...ähnlich wie Staub in unserer Wohnung



Entropiezunahme

- Physik: Entropie nimmt (global) immer zu
- Seit dem Urknall entwickeln wir uns also in immer wahrscheinlichere Klassen von Zuständen (*morgen ist wahrscheinlicher als gestern*) ...
- ...ähnlich wie Staub in unserer Wohnung
- Dieser Prozess ist **rein statistisch und würde auch zeitgespiegelt genauso ablaufen!**



Makro- vs. Mikroskopische Zeit

Makro- vs. Mikroskopische Zeit

- Makroskopisch: Entropie oktroyiert Richtung des Zeitflusses (Statistik)
 - Entwicklung zur wahrscheinlichsten Zustandsklasse
- Mikroskopisch: Zeitentwicklung innerhalb einer Zustandsklasse mit gleicher Entropie (physikalische Zeit t)



(Low resolution: Salvador Dalí 1931 *The Persistence of Memory*)

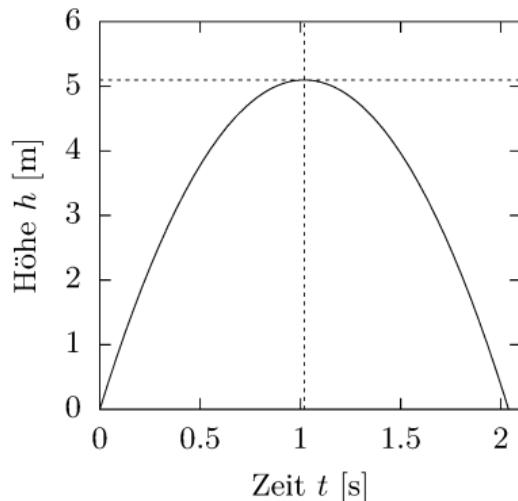
Physikalische Zeit t (Mikroskopische Zeit)

Beispiel: Steinwurf

- Werfe Stein mit 36 km/h in die Luft
- Stein fliegt 1 s hoch
- 1 s runter
- und landet mit 36 km/h

Dieser Prozess ist Zeitsymmetrisch!*

* sofern der Stein einen Grund findet von alleine abzuheben (\rightarrow Entropie)



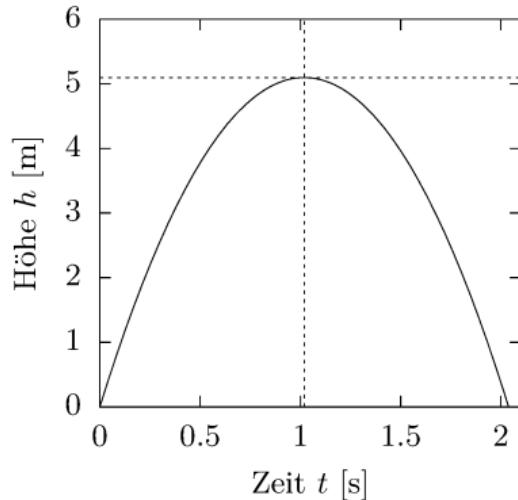
Physikalische Zeit t (Mikroskopische Zeit)

Beispiel: Steinwurf

- Werfe Stein mit 36 km/h in die Luft
- Stein fliegt 1 s hoch
- 1 s runter
- und landet mit 36 km/h

Dieser Prozess ist Zeitsymmetrisch!*

* sofern der Stein einen Grund findet von alleine abzuheben (\rightarrow Entropie)



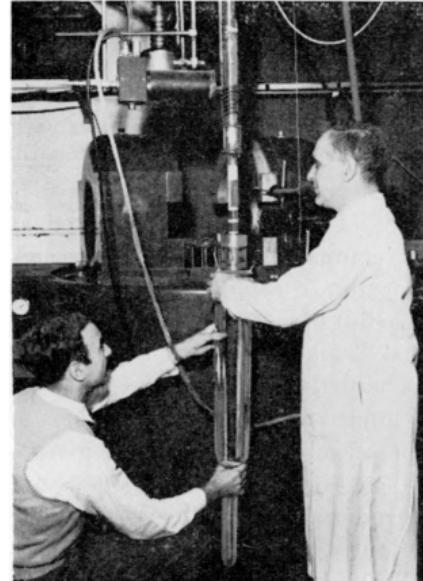
Sind alle physikalischen Prozesse zeitsymmetrisch?

Sind alle physikalischen Prozesse zeitsymmetrisch?

Antwort bis 1963: **ja!**

CPT Theorem (gilt bis heute!)

- Jede physikalische Theorie ist invariant unter
 - Raumspiegelung &
 - Ladungsspiegelung &
 - Zeitumkehr
- Seit 1957: Natur ist **nicht** invariant unter (alleiniger) Raumspiegelung
 - Wu-Experiment: Radioaktive Kernzerfälle erscheinen im Spiegel unphysikalisch
 - Invarianz wird wieder hergestellt durch zusätzliche Ladungsspiegelung



(Wu Experiment [Public domain])

Ist unser Universum invariant unter Raum- & Ladungsspiegelung \Leftrightarrow Zeitumkehr?

Einschub: Antimaterie und Spiegelwelten

Antimaterie und Spiegelwelten

- Zu jedem Materie Baustein existiert ein dazugehöriger Antimaterie Baustein
- Zusammenhang Materie & Antimaterie:
Ladungsspiegelung (das „C“ in CPT)
- Wu Experiment zeigt:
 - Schwache Kernzerfälle unterscheiden fundamental zwischen Ladung
 - Unterscheidung wird kompensiert durch Raumspiegelung (das „P“ in CPT)
 - **Wu-Experiment ist invariant unter Raum- & Ladungsspiegelung (CP)**



Esel



Anti-Esel

Einschub: Antimaterie und Spiegelwelten

Antimaterie und Spiegelwelten

- Zu jedem Materie Baustein existiert ein dazugehöriger Antimaterie Baustein
- Zusammenhang Materie & Antimaterie:
Ladungsspiegelung (das „C“ in CPT)
- Makroskopisch sind alle Zustände ladungsneutral:
 - Antimaterie verhält sich wie räumlich gespiegelte Materie
 - CPT: Antimaterie verhält sich wie zeitlich rückwärts laufende Materie
 - **im Spiegel läuft die Zeit rückwärts*** (Entropie lässt uns altern)



Esel



Anti-Esel

* Korrekter: Das Spiegelbild verhält sich wie ein (ladungsneutrales) Universum mit gespiegelter (mikroskopischer) Zeit

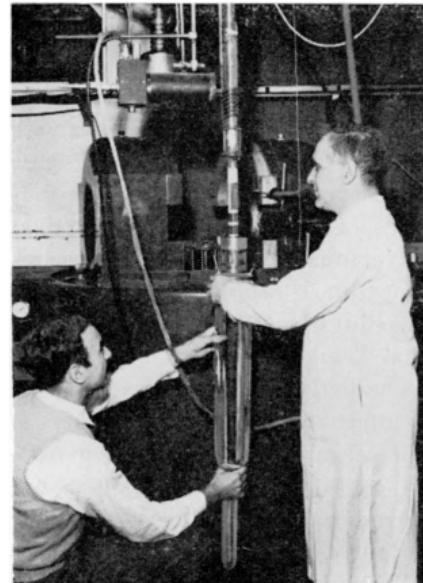
Ist unser Universum invariant unter Raum- & Ladungsspiegelung \Leftrightarrow Zeitumkehr?

- Definition von Materie und Antimaterie willkürlich?
 - Würden wir es bemerken, wenn über Nacht alle Materie zu Antimaterie wird?
- Definition der Zeitrichtung willkürlich?
 - Würden wir es bemerken, wenn sich über Nacht die Zeit umkehrt?

Antwort bis 1963: **nein!**

Experimentelle Herausforderung

- Raum-, Ladungs- und Zeitspiegelungen sind diskrete Transformationen
 - ein Experiment kann nicht langsam und kontinuierlich in sein Spiegelbild überführt werden
- Ansatz Wu-Experiment (Raumspiegelung)
 1. experimenteller Aufbau im Labor
 2. betrachte Aufbau im Spiegel
 3. baue Spiegelbild nach
 4. vergleiche (2.) und (3.)
- Zeitspiegelung?



(Wu Experiment [Public domain])

1964: Beobachtung von CP Verletzung

- James Cronin und Val Fitch (Brookhaven) entdecken, dass sich das Materienteilchen K^0 und sein Antiteilchen \bar{K}^0 in Zerfällen unterschiedlich verhalten
- Materie und Antimaterie lassen sich damit **eindeutig** definieren
- Nobelpreis: 1980
- Schlußfolgerung CPT: Zeitumkehr ist (auch) keine Invariante!

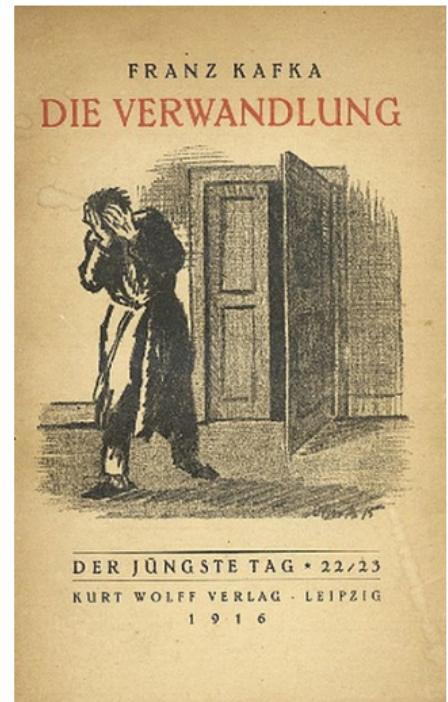


(Noble Prize [Public domain])

Direkter Nachweis von Zeitsymmetrie Verletzung

Oszillation

- Manche Teilchen können in ihr eigenes Antiteilchen oszillieren, z.B $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$
- K^0 (Teilchen) wandelt sich sporadisch in \bar{K}^0 (Antiteilchen) und umgekehrt
- Wenn Symmetrie zwischen Materie und Antimaterie perfekt
 - $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$ genauso häufig wie $\bar{K}^0 \rightarrow K^0$
- Alternativ: Wenn Zeitumkehrsymmetrie perfekt
 - $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$ genauso häufig wie $K^0 \leftarrow \bar{K}^0$



Direkter Nachweis von Zeitsymmetrie Verletzung

CLEAR Experiment (CERN)

- Betrachtet symmetrische K^0 und \bar{K}^0 Produktion (in $p\bar{p}$ Kollisionen)
- Zählt (zeitaufgelöst) Anzahlen
 - $N(K^0 \rightarrow \bar{K}^0)$
 - $N(\bar{K}^0 \rightarrow K^0)$



CLEAR Experiment (CERN)

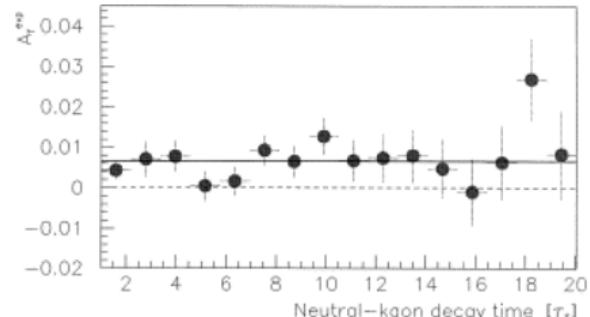
$$\text{Messgröße}^\star: N(\bar{K}^0 \rightarrow K^0) - N(K^0 \rightarrow \bar{K}^0)$$

★ Rekonstruktion: via $K^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu_e / \bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}_e$

Direkter Nachweis von Zeitsymmetrie Verletzung

CPLEAR Experiment (CERN)

- $\bar{K}^0 \rightarrow K^0$ ist **1.3 % häufiger*** als $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$
- liefere die Zeit rückwärts, wäre $\bar{K}^0 \leftarrow K^0$ **1.3 % häufiger*** als $K^0 \leftarrow \bar{K}^0$
- Die Natur unterscheidet die Zeitrichtung, auch mikroskopisch!



CPLEAR Ergebnis 1998 (CERN)

Asymmetrie: $A = \frac{N(\bar{K}^0 \rightarrow K^0) - N(K^0 \rightarrow \bar{K}^0)}{N(\bar{K}^0 \rightarrow K^0) + N(K^0 \rightarrow \bar{K}^0)} = 0.0066 \pm 0.0013 > 0$

* Umrechnung: $N(\bar{K}^0 \rightarrow K^0)/N(K^0 \rightarrow \bar{K}^0) = (1 + A)/(1 - A) = 1 + (1.33 \pm 0.26)\%$

Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Warum die Zeit nicht gespiegelt abläuft wissen wir nicht
- **Aber:** Die beiden Zeitrichtungen sind unterscheidbar (z.B durch Asymmetrie von $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$) ...
- ...eine (eventuelle) Zeitspiegelung wäre nachweisbar



(Low resolution: Salvador Dalí 1931 *The Persistence of Memory*)

Ausblick

- CPT-Theorem: Zeitumkehrsymmetrie sehr eng mit Asymmetrie von Materie und Antimaterie (CP) verknüpft
- 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)

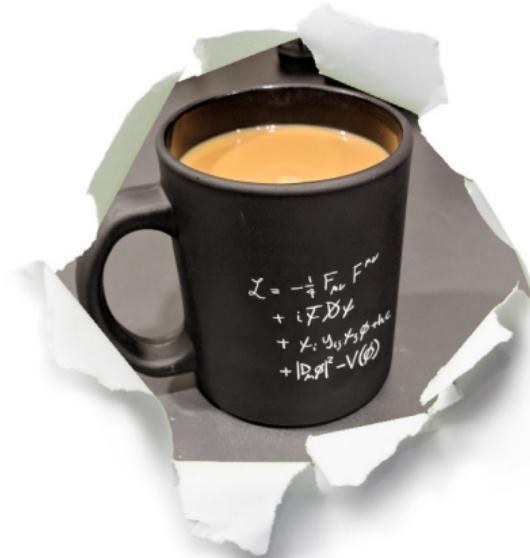
Wo ist die Antimaterie?

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

CP-Verletzung

Wo ist die Antimaterie?

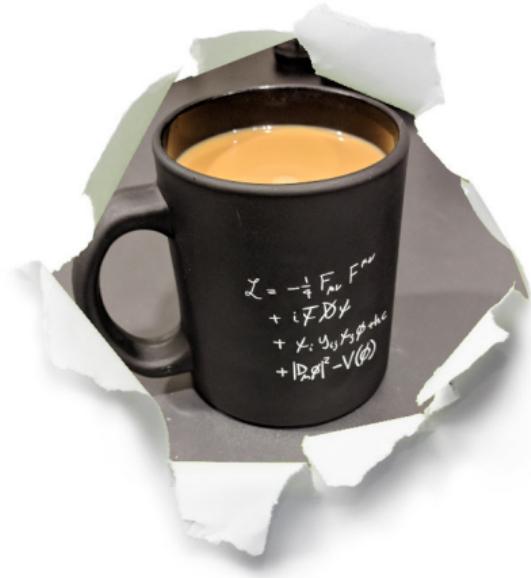
- da wir sie im Universum nicht finden, muss sie bereits zerfallen sein!
- **CP-Verletzung!**
- ... nur wo?
- Standard-Modell der Teilchenphysik (SM)
 - beste bestätigte Theorie für 3/4 fundamentalen Wechselwirkungen
(Gravitation nicht enthalten)
 - enthält einen Sektor mit CP-Verletzung



CP-Verletzung

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*?
- **LHCb**-Experiment (CERN)
 - Detektor am LHC-Speicherring



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>)

- ... bis jetzt (leider?) noch keine signifikante Abweichung vom SM gefunden
- Die Suche geht weiter - es bleibt spannend!

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

