

Symmetrie: Das Urprinzip der Schöpfung

„Reise zum Urknall“, Urania, Berlin 9.4.2000

Bernhard Spaan, TU Dresden



Symmetrie:

Griechisch: Συμμετρία (Summetria) = Ebenmaß

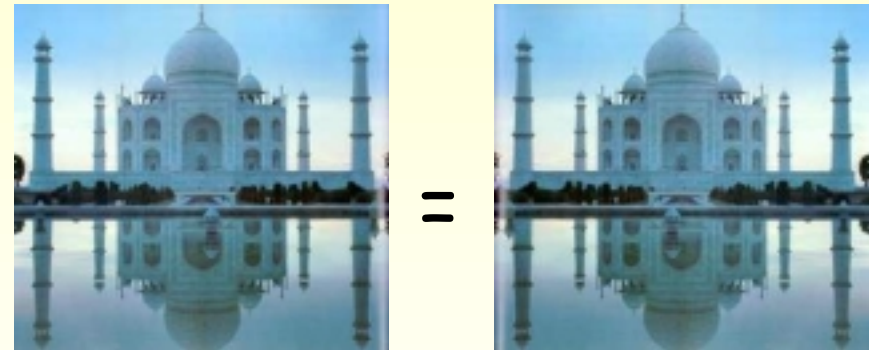
Was ist Symmetrie?

Definition der Symmetrie:

„Nach **(bestimmten)** Änderungen an einem System sieht dieses exakt so aus wie zuvor“

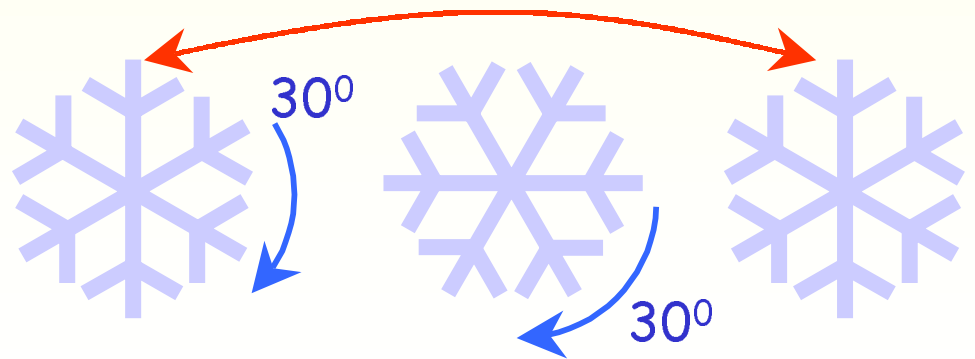
Beispiele:

- Reflexionen (Spiegelsymmetrie)



⇒ Taj Mahal: symmetrisch gegenüber Spiegelungen

- Rotationen (Drehungen)

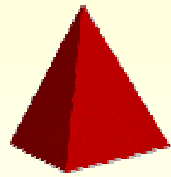


⇒ Schneeflocke: symmetrisch gegenüber Drehungen um 60°

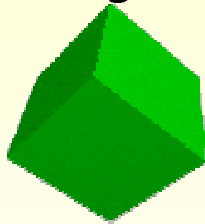
Zur Geschichte

➤ Plato (427-347 v. Chr.)

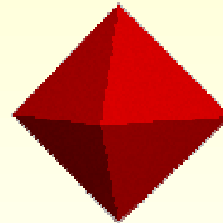
- Weltall: 4 Grundelemente (Feuer, Erde, Luft und Wasser)
- Grundelemente $\Leftrightarrow$ geometrische Formen



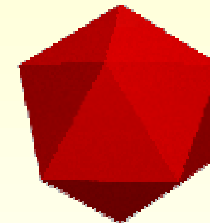
Feuer



Erde



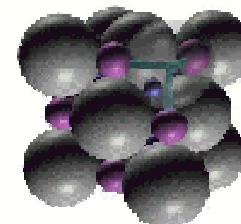
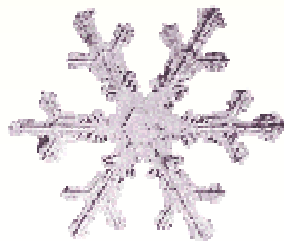
Luft



Wasser

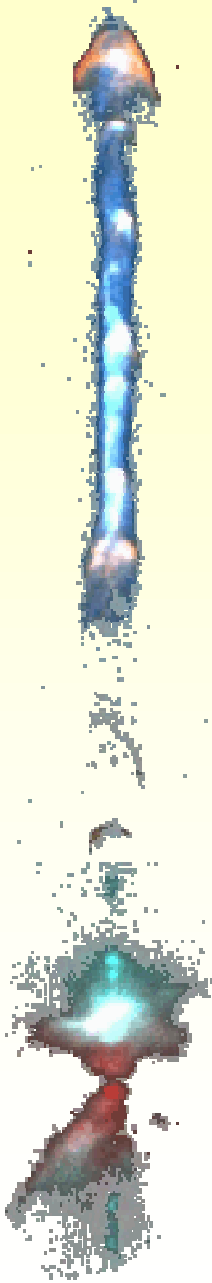
➤ Arbeiten zur Kristallsymmetrie und -struktur

- z.B. 1611: Kepler (Schneeflocke), 1849: Bravais (Raumgitter), 1912: v. Laue (Nachweis der Gitterstruktur)

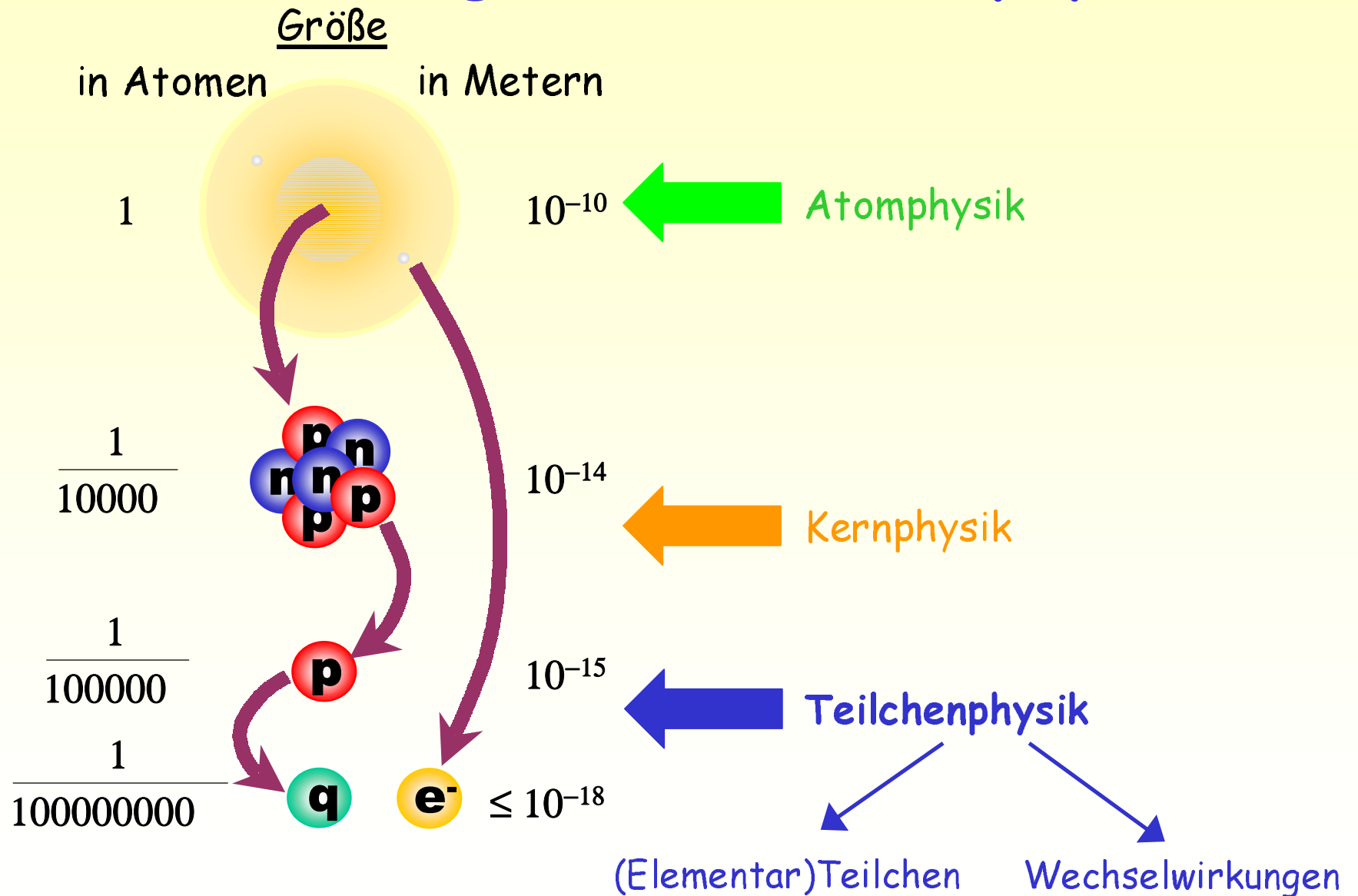


Symmetrien in der (Teilchen)physik

- Klassifizierung: Periodensystem der Elemente, Elementarteilchen
- Erhaltungssätze
 - Emmy Noether (1917)
 - Symmetrie $\Rightarrow$ Erhaltungssatz
 - Energie, Impuls, Drehimpuls, Ladung etc...
- Eichsymmetrien
- Diskrete Symmetrien
- Permutationssymmetrie
- Symmetriebrechung
 - Wie bekommen Teilchen Masse?
-



Einführung in die Teilchenphysik



Elementare Bausteine der Materie

Teilchen

Antiteilchen

Leptonen:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$$

Ladung

$$\begin{pmatrix} \bar{\nu}_e \\ e^+ \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \bar{\nu}_\mu \\ \mu^+ \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \bar{\nu}_\tau \\ \tau^+ \end{pmatrix}$$

Quarks:

$$\begin{pmatrix} u^{\frac{2}{3}} \\ d^{-\frac{1}{3}} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c^{\frac{2}{3}} \\ s^{-\frac{1}{3}} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} t^{\frac{2}{3}} \\ b^{-\frac{1}{3}} \end{pmatrix}$$

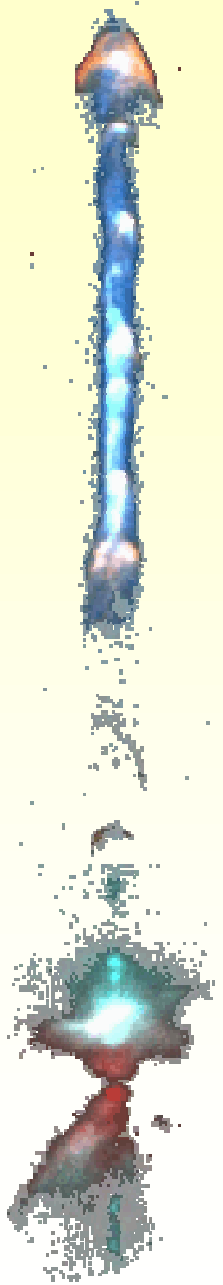
$$\begin{pmatrix} \bar{u}^{-\frac{2}{3}} \\ \bar{d}^{+\frac{1}{3}} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \bar{c}^{-\frac{2}{3}} \\ \bar{s}^{+\frac{1}{3}} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \bar{t}^{-\frac{2}{3}} \\ \bar{b}^{+\frac{1}{3}} \end{pmatrix}$$

Symmetrie:

- Ordnung in **jeweils** 3 Familien (vergl. Periodensystem)
- Zu jedem Teilchen existiert ein Antiteilchen
 - mit: ➤ gleicher Masse
 - entgegengesetzter Ladung



Weitere Eigenschaften der Teilchen

Elektronen:

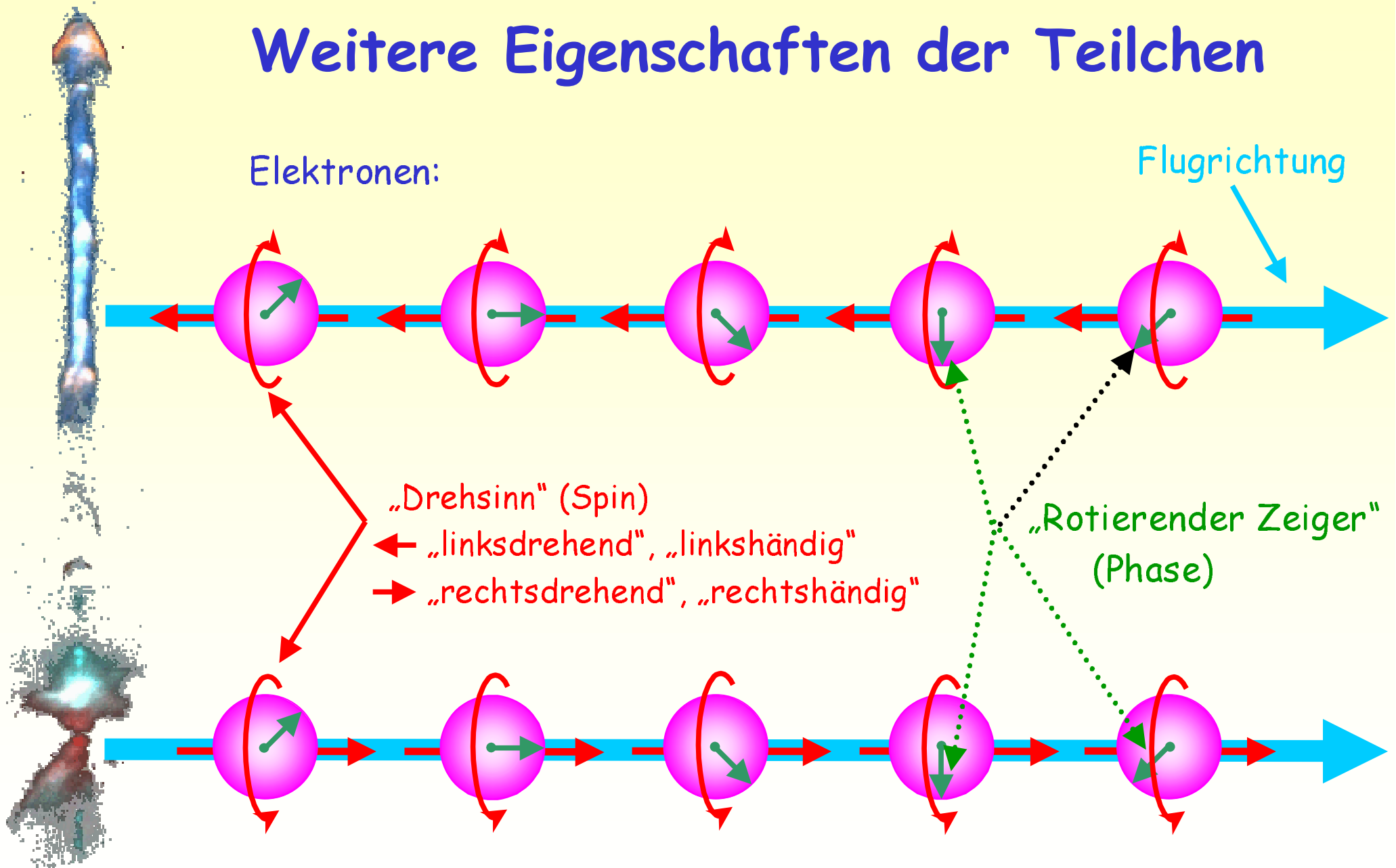
Flugrichtung

„Drehsinn“ (Spin)

← „linksdrehend“, „linkshändig“

→ „rechtsdrehend“, „rechtshändig“

„Rotierender Zeiger“
(Phase)



Wechselwirkungen

➤ Wechselwirkungen

- Kraftwirkung zwischen Teilchen
- Verantwortlich für Teilchen-Zerfälle und Vernichtungen

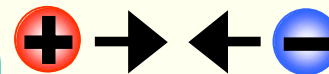
➤ Es gibt 4 fundamentale Wechselwirkungen

- Gravitation (Schwerkraft)

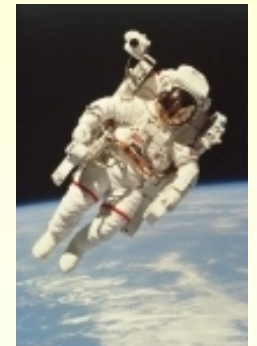
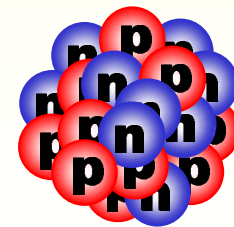
- Elektromagnetismus

- Schwache Wechselwirkung

- Starke Wechselwirkung



Elektroschwache Wechselwirkung

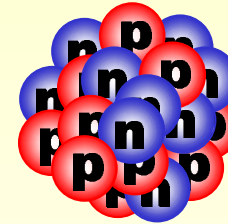


⇒ Ursprung aller bekannten Kräfte!

Wechselwirkungen

Starke Wechselwirkung????? Wofür?

Was hält den Atomkern zusammen?



Neutronen: keine Ladung

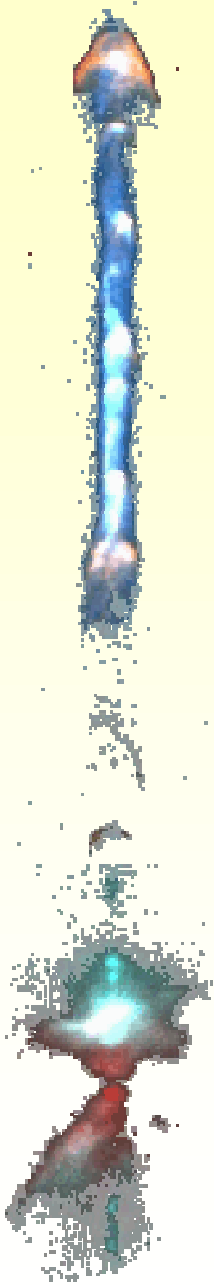
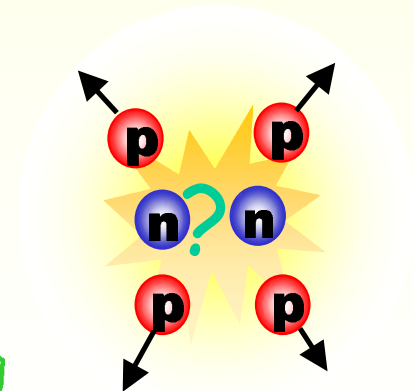
Protonen: positive Ladung - stoßen sich ab

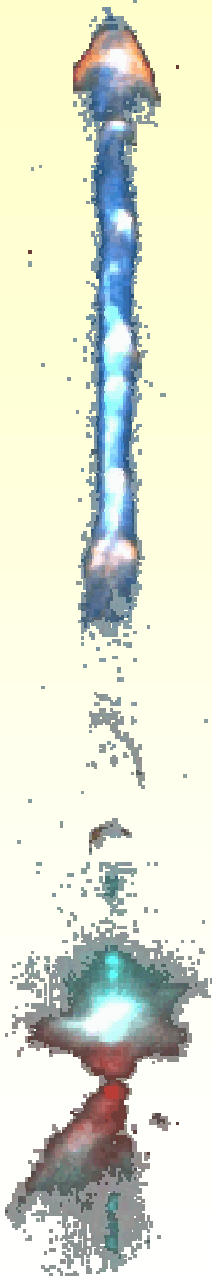


Es gibt eine weitere Kraft:

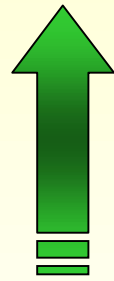
- überwindet die elektrische Abstoßung
- wirkt nicht auf Elektronen

⇒starke Wechselwirkung





Wechselwirkung

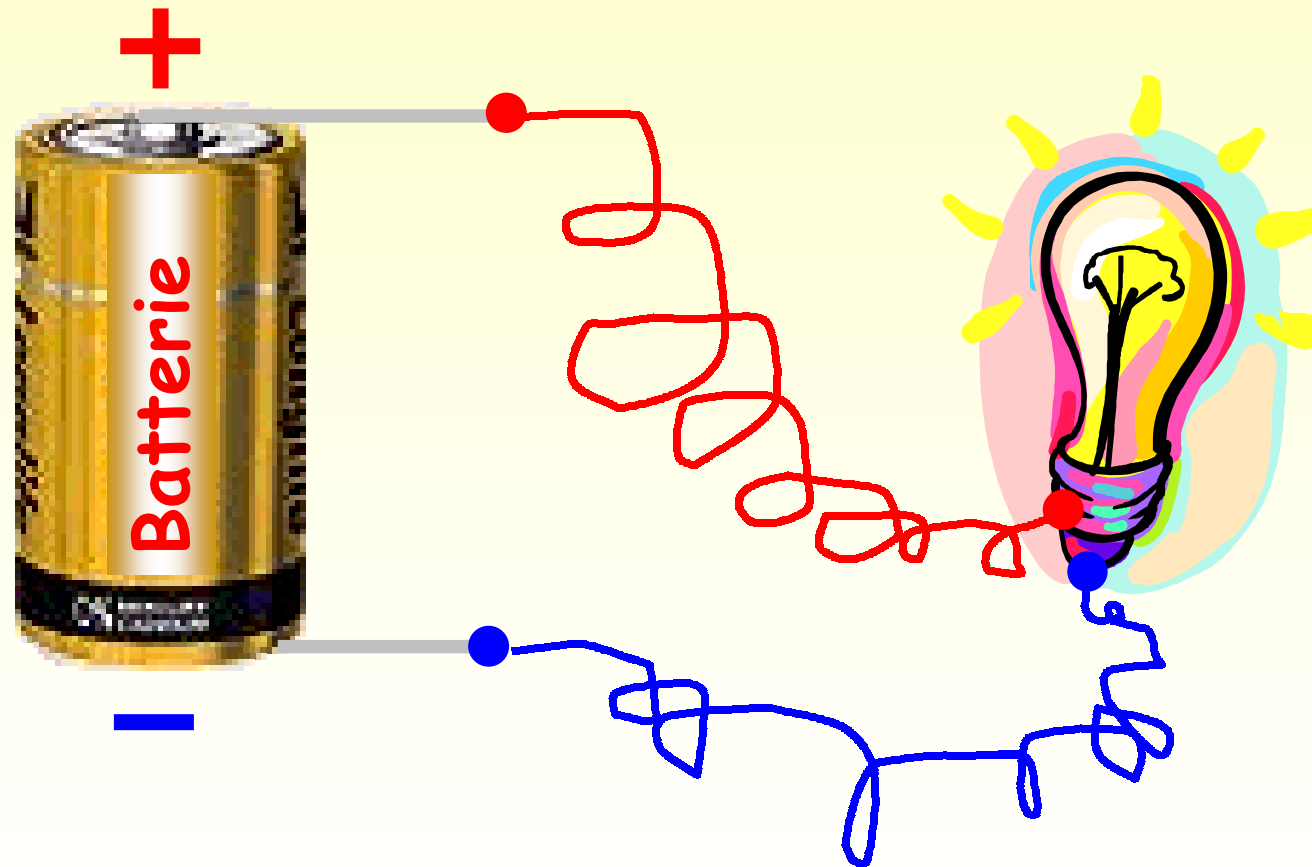


Lokale Eichsymmetrie

(hier: Gravitation wird nicht betrachtet)

Globale Eichsymmetrie

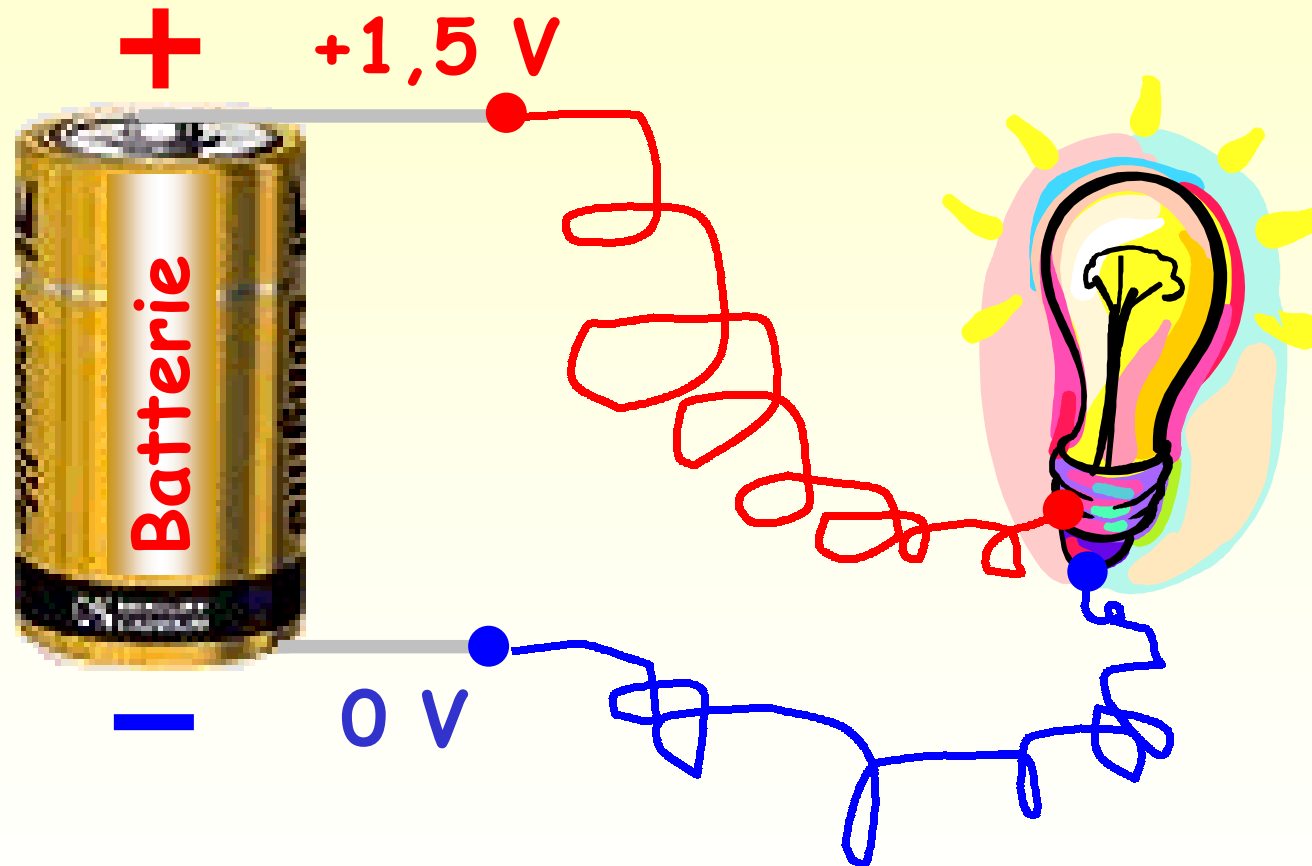
Betrachten: 1,5 Volt Batterie



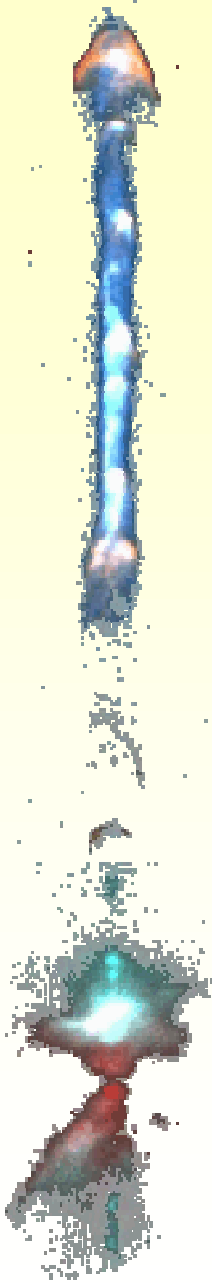
⇒ Spannung = Potenzialdifferenz zwischen den Polen : 1,5 V

Globale Eichsymmetrie

Betrachten: 1,5 Volt Batterie

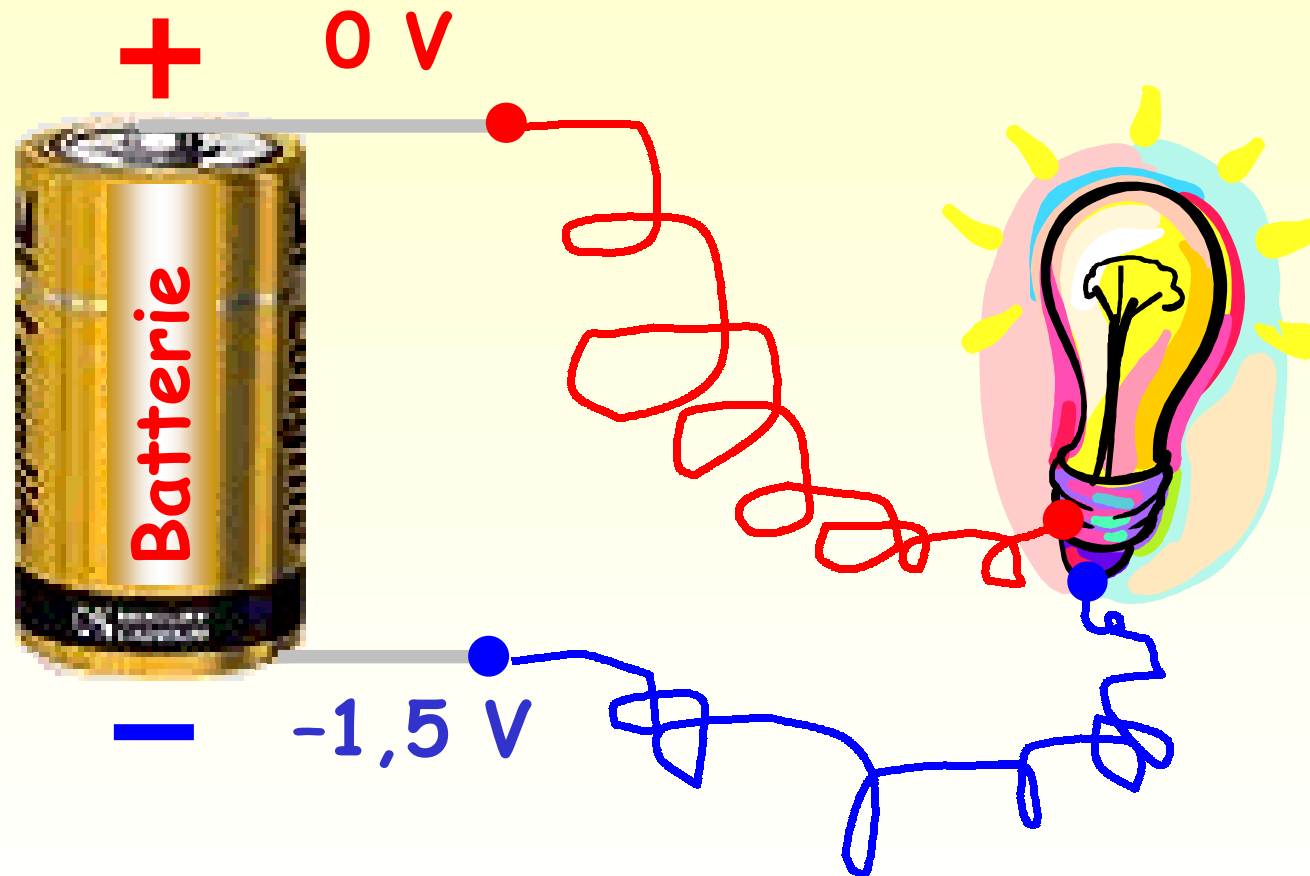


⇒ Spannung = Potenzialdifferenz zwischen den Polen : 1,5 V



Globale Eichsymmetrie

Umeichen des Potenzialnullpunktes - gleichartig für + und - Pol !

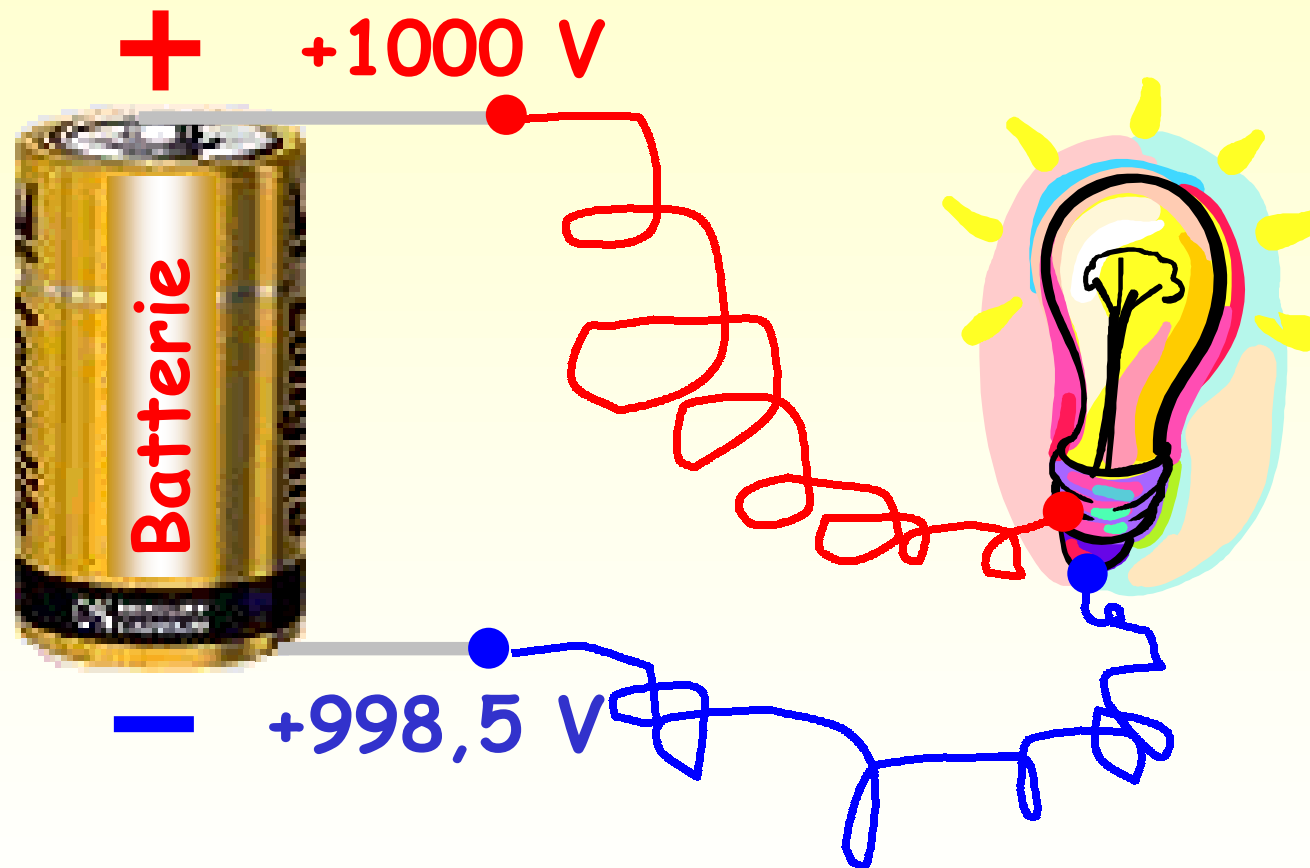


⇒ Spannung = Potenzialdifferenz zwischen den Polen : 1,5 V

Nichts ist passiert!

Globale Eichsymmetrie

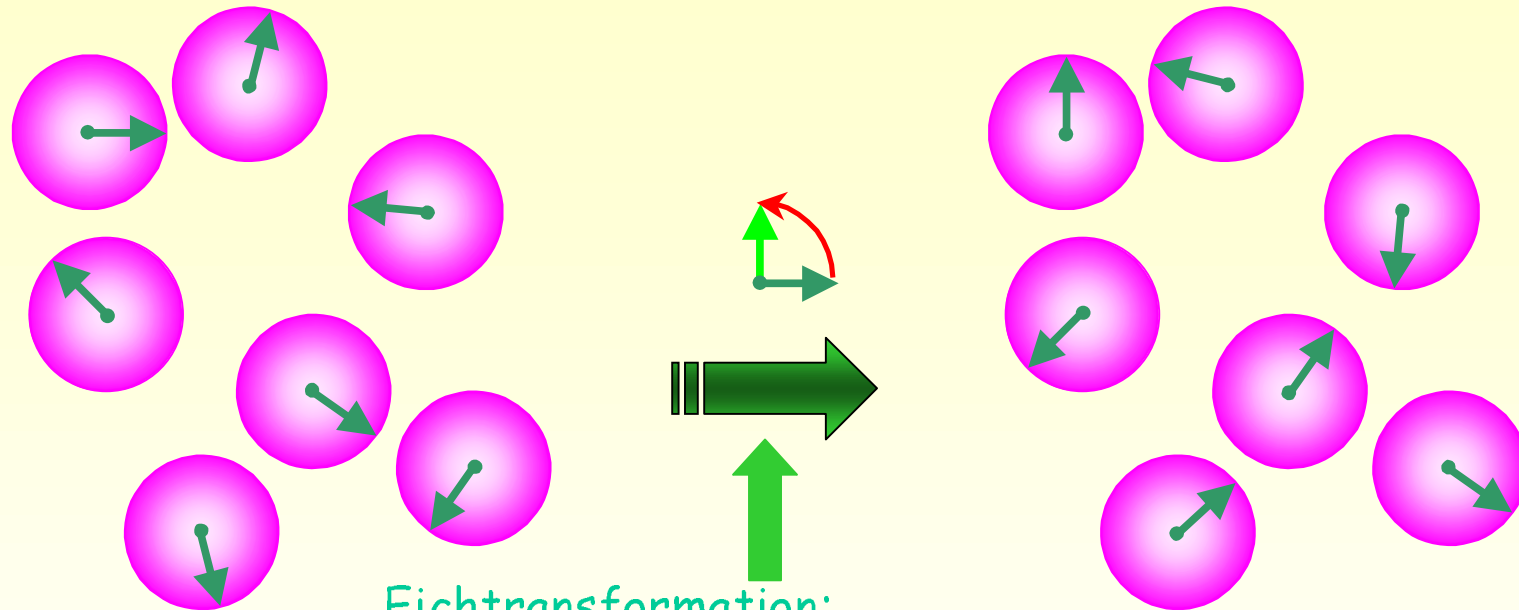
Umeichen des Potenzialnullpunktes - gleichartig für + und - Pol !



⇒ Spannung = Potenzialdifferenz zwischen den Polen : 1,5 V

Nichts ist passiert!

Globale Eichsymmetrie



Eichtransformation:

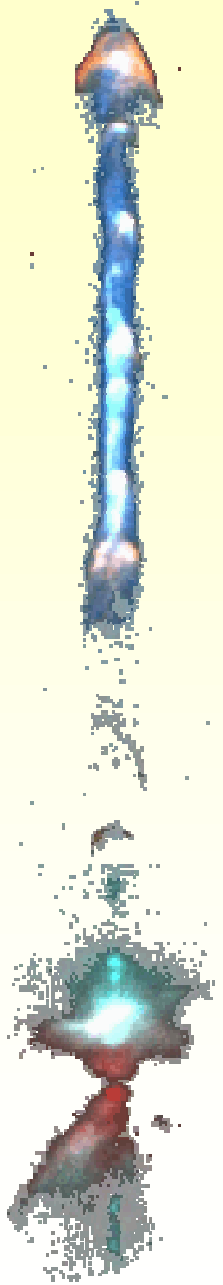
Die Zeiger werden überall um gleichen Winkel gedreht
(Nullpunktverschiebung)

Nichts passiert: Das System ist unabhängig von der Lage
des gemeinsamen Nullpunktes

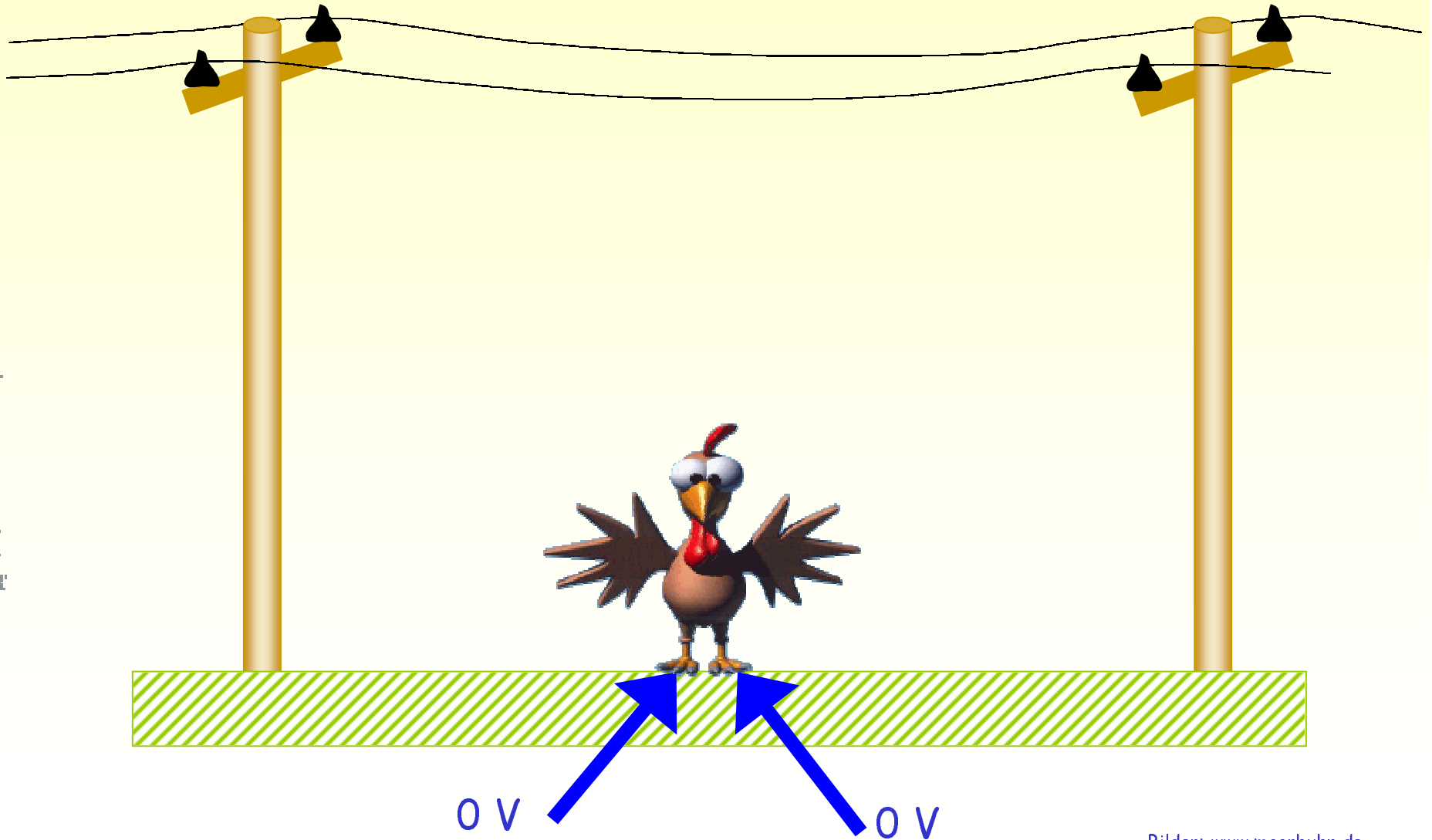
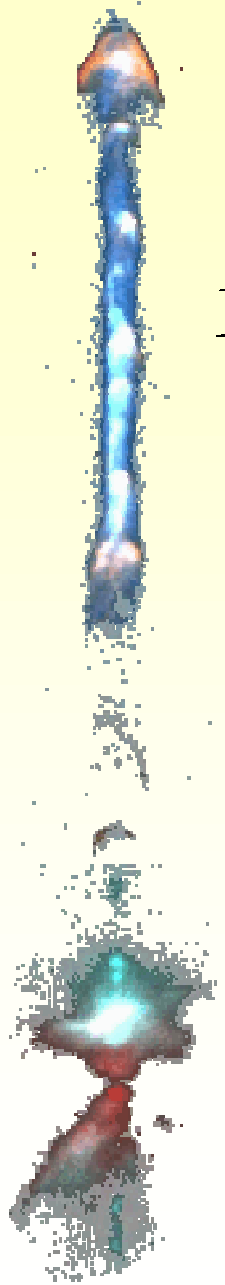
Symmetrie

Elektronen: Zeiger ist verknüpft mit Ladung:

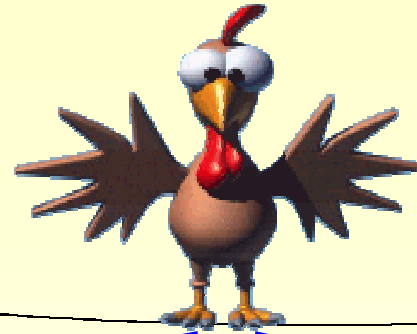
Globale Eichsymmetrie $\Rightarrow$ Ladungserhaltung



Globale Eichsymmetrie



Globale Eichsymmetrie

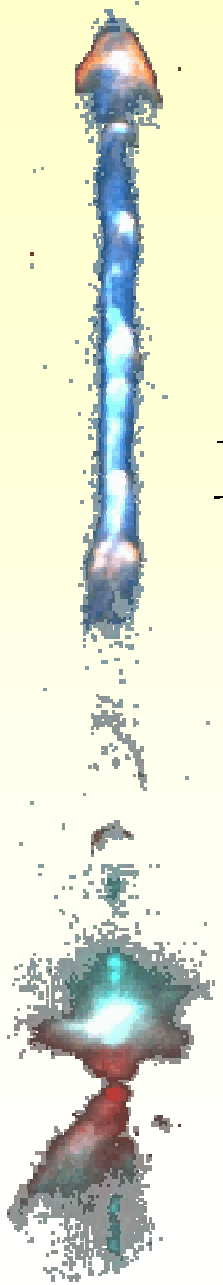


10000 V

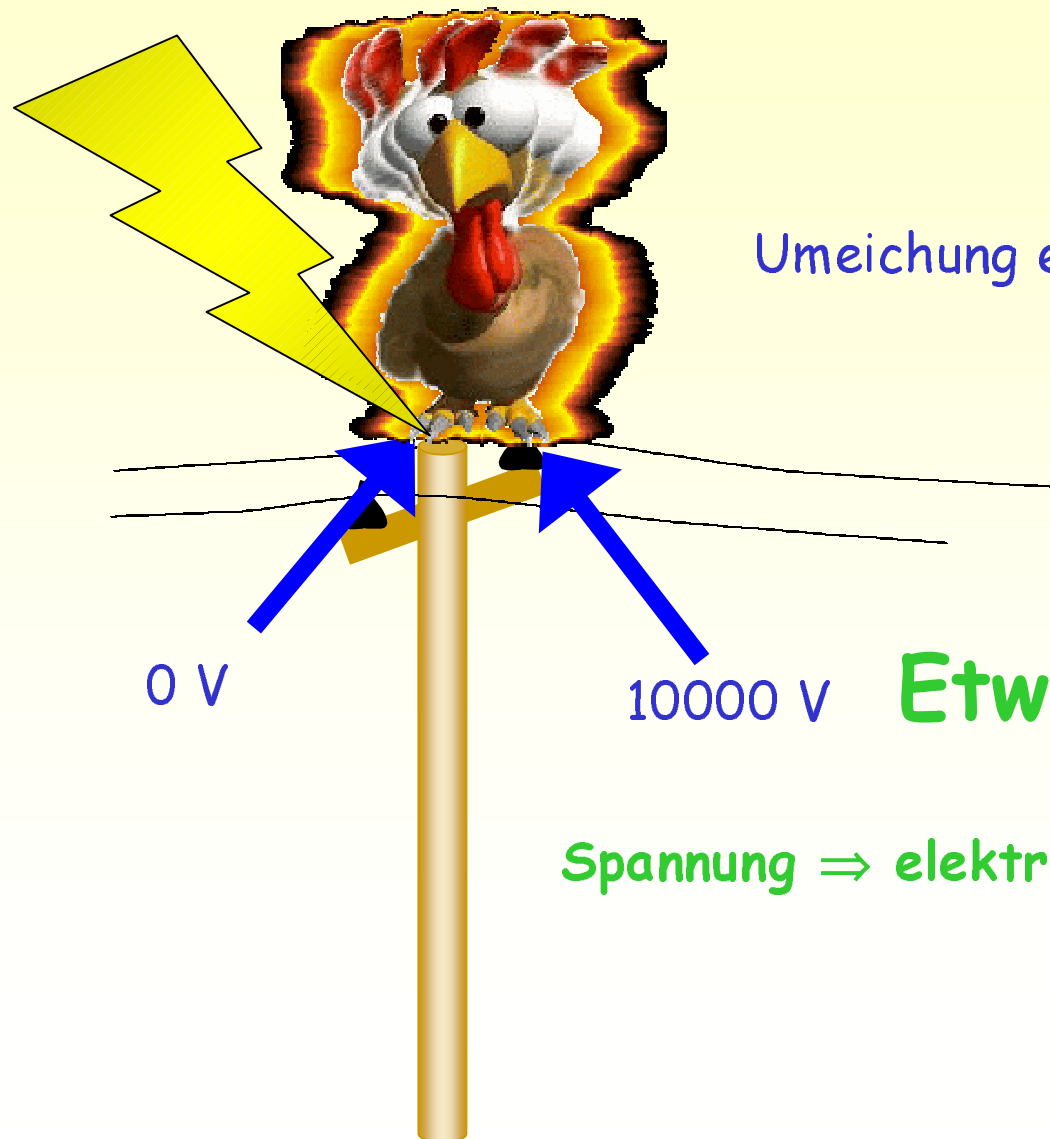
10000 V

Nichts passiert!

Umeichung erfolgte überall gleich



Lokale Eichsymmetrie



Umeichung erfolgte überall anders!

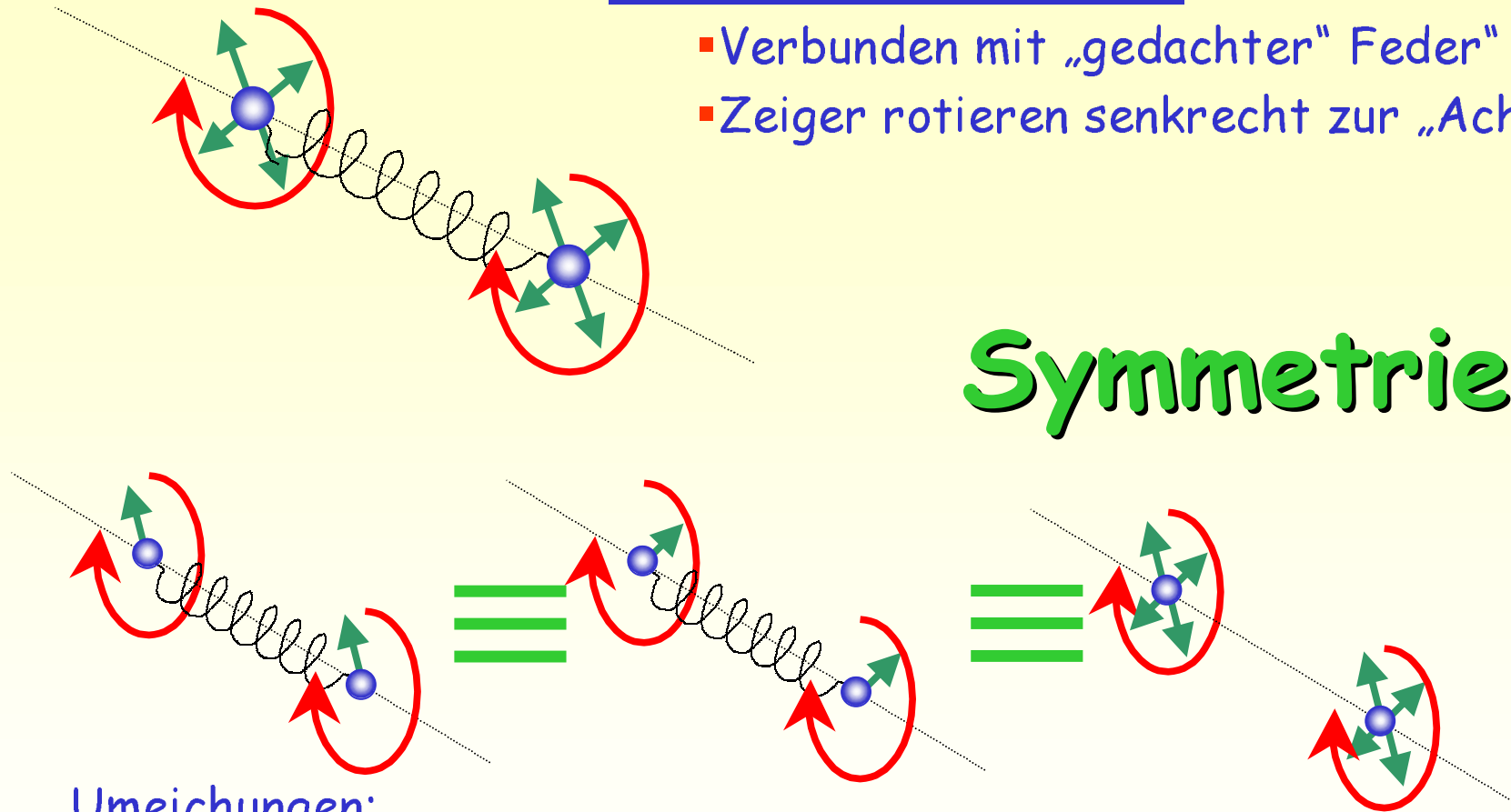
Etwas passiert!

Spannung $\Rightarrow$ elektrisches Feld $\Rightarrow$ Kraft!

Betrachten 2 Elektronen:

- Verbunden mit „gedachter“ Feder
- Zeiger rotieren senkrecht zur „Achse“

Symmetrie

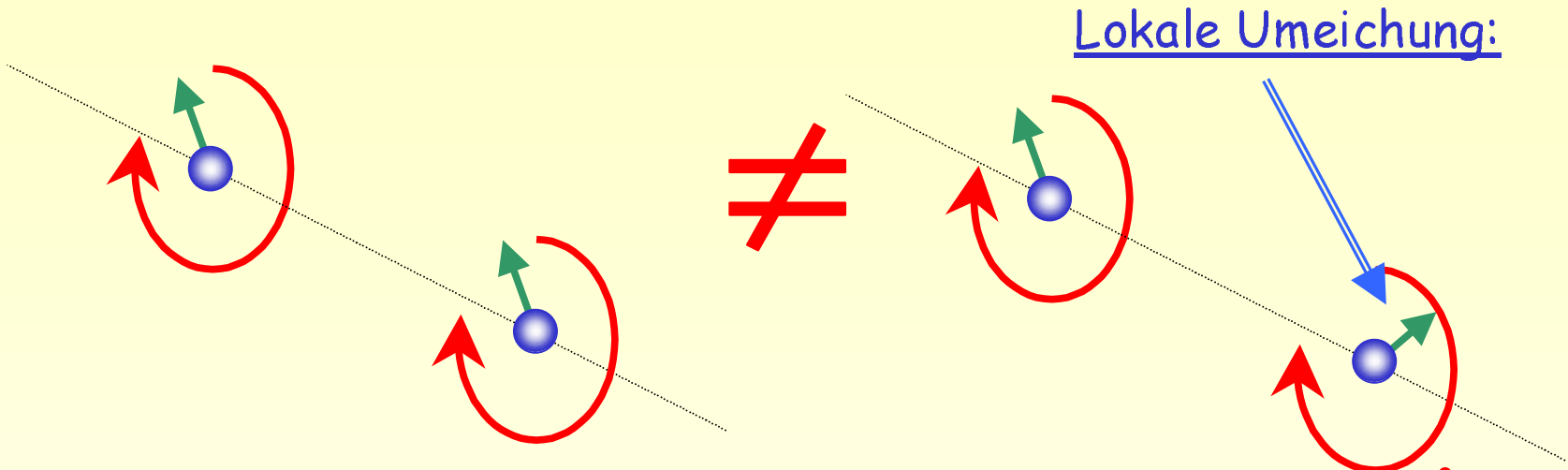
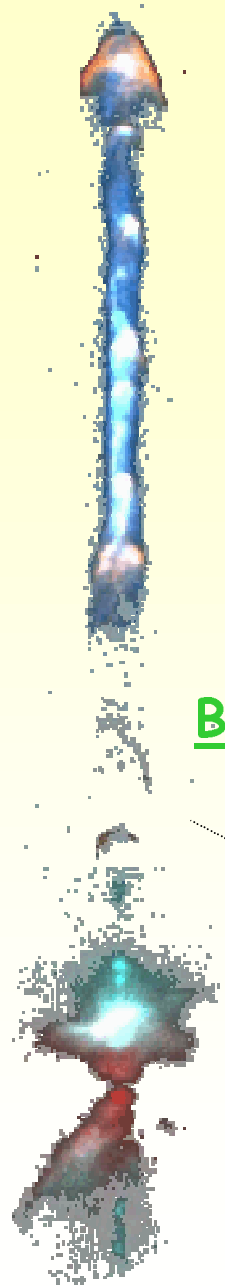


Umeichungen:

Gleichartige Veränderungen aller Zeiger:

⇒ Keine Kraft auf Feder

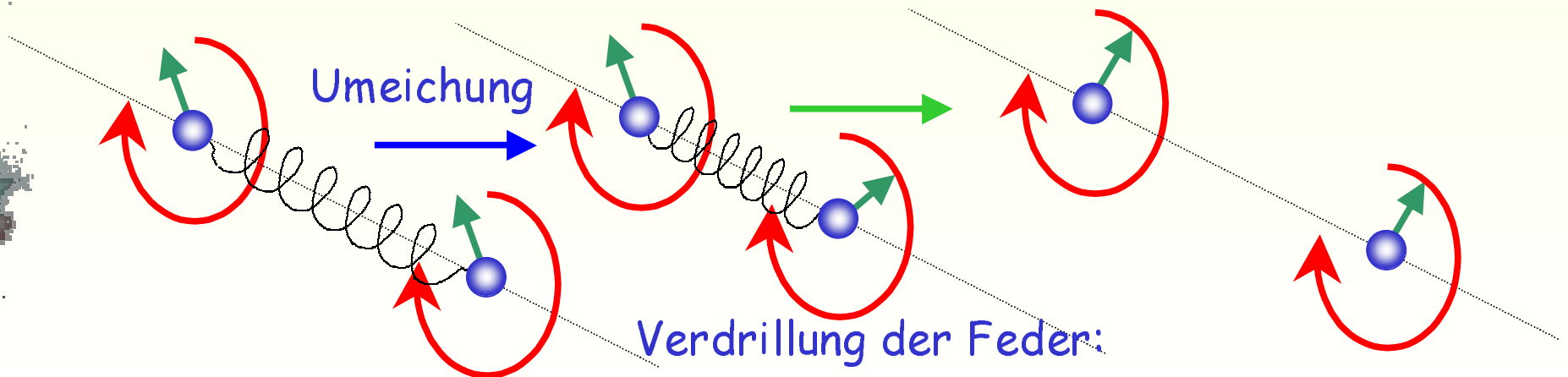
⇒ **Feder überflüssig**



$\neq$

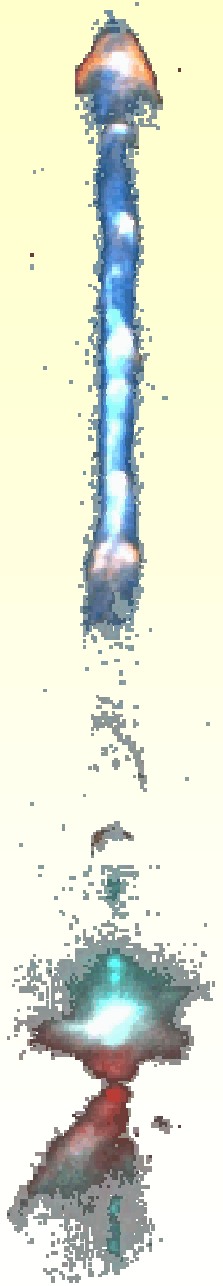
Symmetrie verletzt

Benötigen Feder zur Wiederherstellung der Symmetrie:



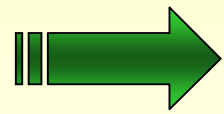
Verdrillung der Feder:

- ⇒ Es wirkt eine Kraft (anziehend oder abstoßend)
- ⇒ Wiederherstellung der Symmetrie



Je nach Richtung der Verdrillung sind die Kräfte anziehend oder abstoßend!

⇒ Der Zeiger muss mit der Ladung verknüpft sein!



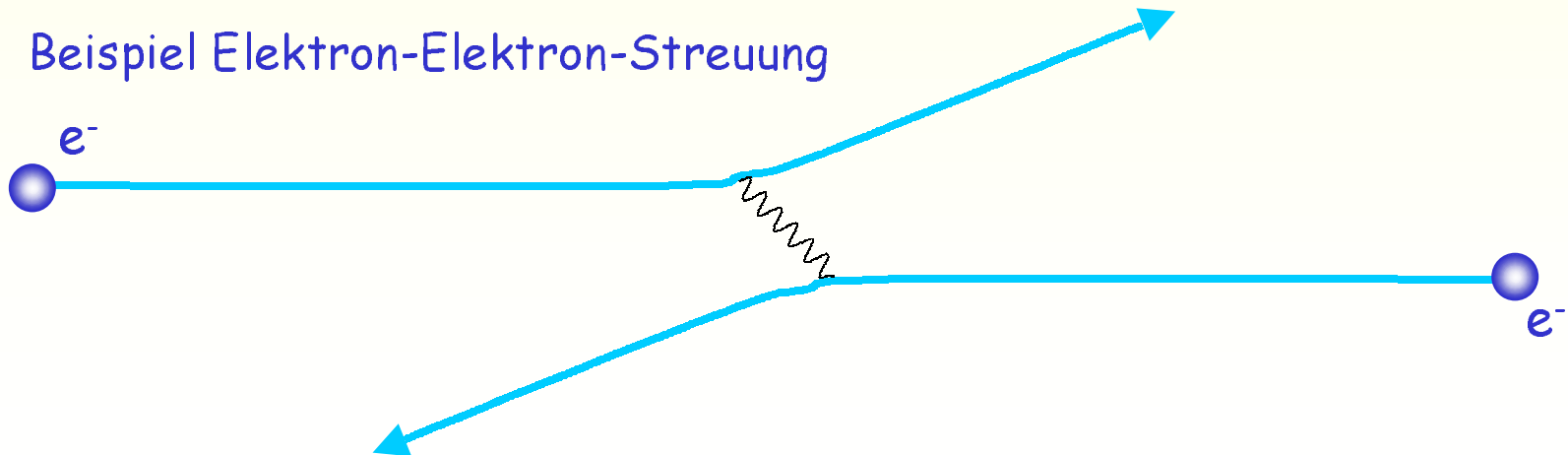
Quantenelektrodynamik (QED)

Theorie der elektromagnetischen Wechselwirkung

Die Rolle der **Feder** wird durch Austauschteilchen eingenommen!

⇒ Photon (Lichtquant) 

Beispiel Elektron-Elektron-Streuung



Wechselwirkungen

Ursache aller Wechselwirkungen ist

lokale Eichsymmetrie

Für jede der Wechselwirkungen ist eine entsprechende Symmetrie gefunden worden (QED: Zeiger)

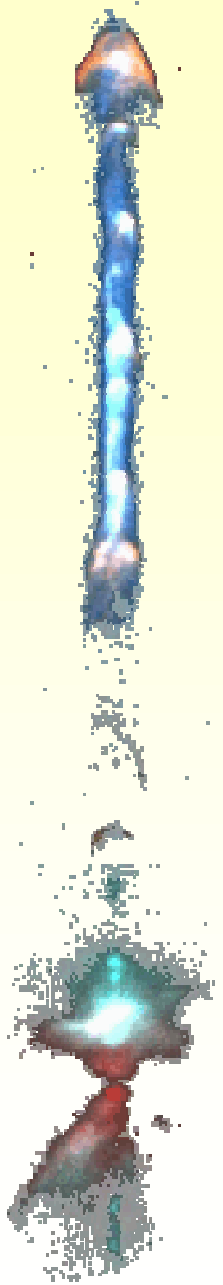
⇒ Zu jeder Symmetrie (Wechselwirkung) existieren Austauschteilchen:

1. Elektroschwache Wechselwirkung:

- ⇒ Photon (QED) (masselos)
- ⇒ Z^0 , W^+ , W^- (sehr schwer, ca. $90 \cdot m_p$)

2. Starke Wechselwirkung:

- ⇒ 8 verschiedene Gluonen (masselos)

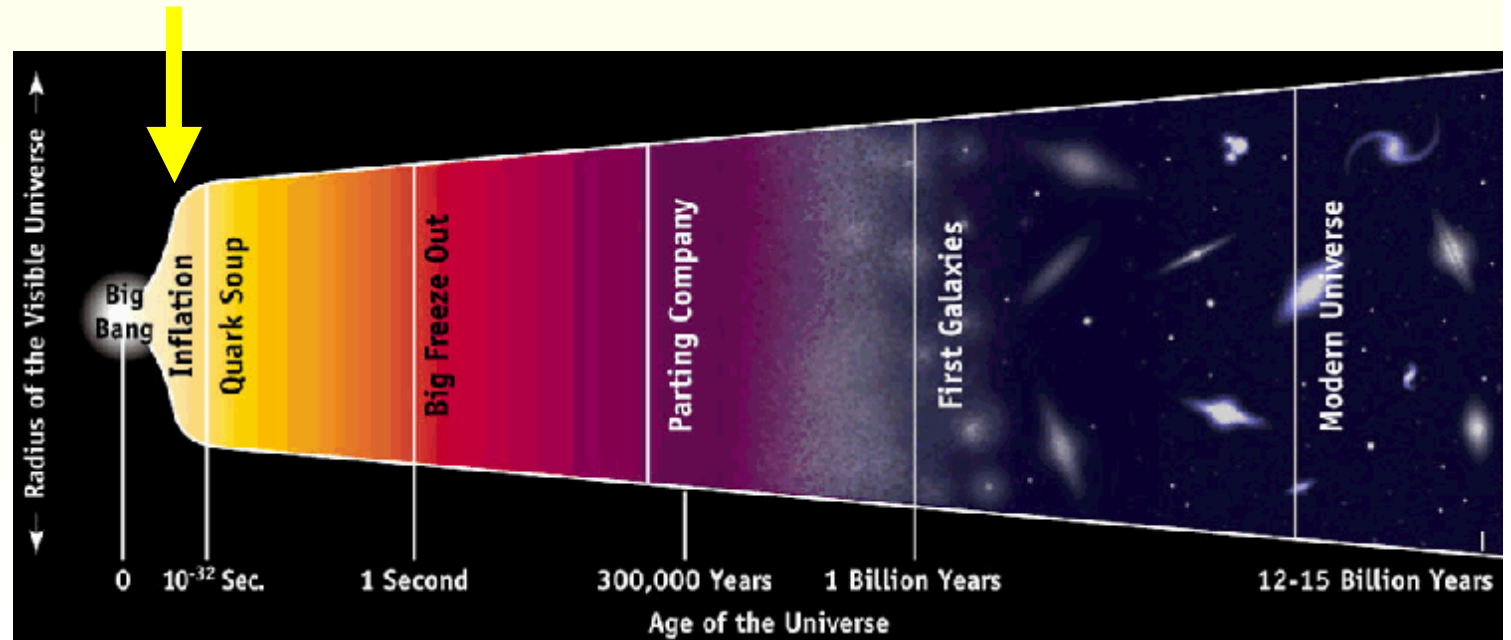


Ausblick

Frage: Gibt es eine gemeinsame Symmetrie für alle Wechselwirkungen?
⇒ Vereinheitlichung der Wechselwirkungen?

Ein erster Erfolg war die Vereinheitlichung von elektromagnetischer und schwacher Wechselwirkung zur elektroschwachen Wechselwirkung.

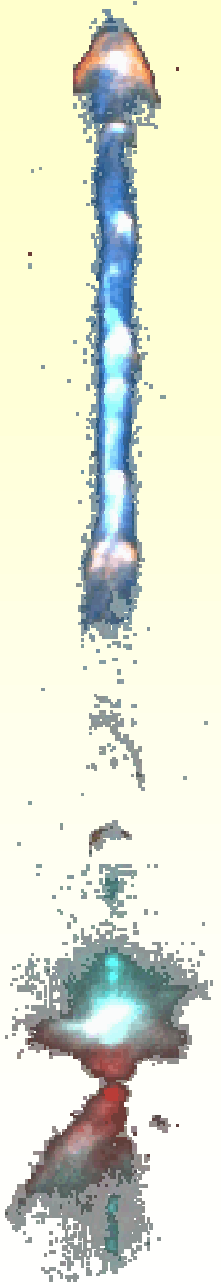
⇒ „Große“ Vereinheitlichung bei sehr hohen Energien?
⇒ Frühzeit des Universums



Materie - Antimaterie

Symmetrie

- Zu jedem Teilchen existiert ein Antiteilchen
- Teilchen und Antiteilchen haben gleiche Massen!
- Alle bekannten Wechselwirkungen liefern:
 - Paarweise Erzeugung von Materie und Antimaterie



Materie - Antimaterie

- Bei perfekter Symmetrie zwischen Materie und Antimaterie wären beide in gleichen Mengen vorhanden!
- Aber: Universum ist von Materie dominiert!

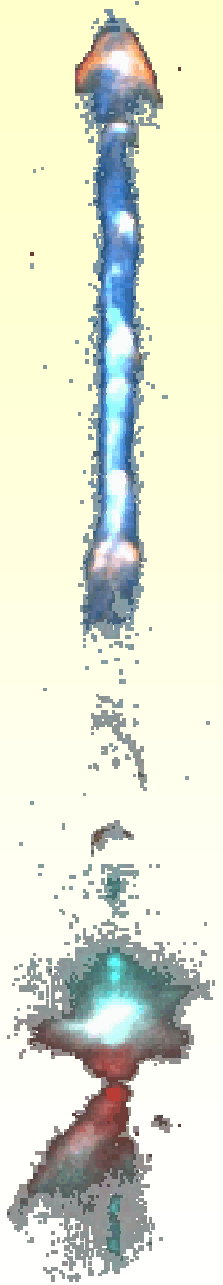
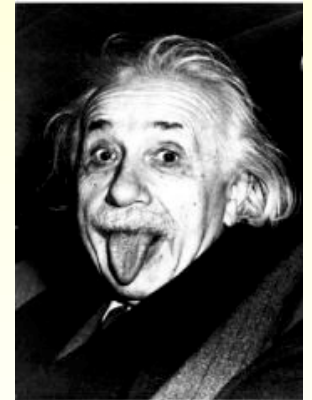
Woher wissen wir das?

- Materie und Antimaterie vernichten einander!

⇒ große Energiemenge wird frei: $E=m \cdot c^2$
ca. Faktor 1000 im Vergleich zur Atombombe!

Wenige kg ^{235}U (Uran)

⇒ Keine Antimaterie auf der Erde ✓

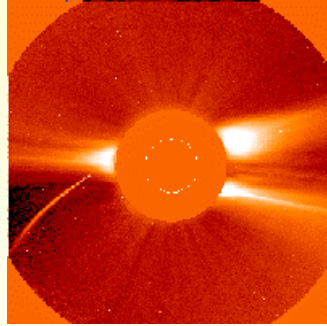


Materie - Antimaterie

➤ Antimaterie im Sonnensystem?

⇒ Besuch von Mond, Mars etc.. ✓

"Courtesy of SOHO/LASCO consortium"



⇒ Sonnenwind: Materie ✓

⇒ Keine Antimaterie im Sonnensystem ✓

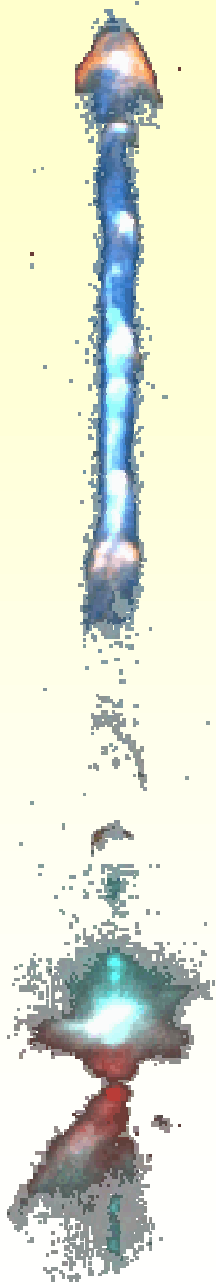
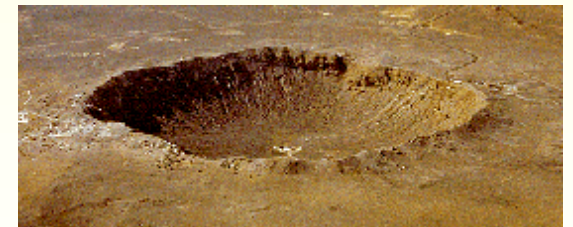
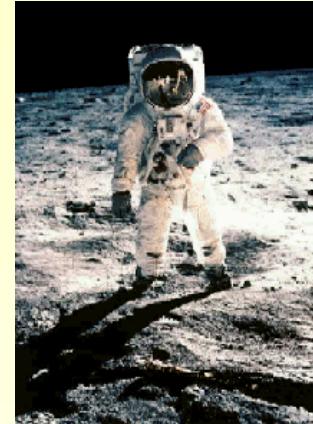
➤ Antimaterie in unserer Milchstraße?

⇒ Analyse von Meteoriten ✓

⇒ Kosmische Strahlung aus Milchstraße: Materie überwiegt ✓

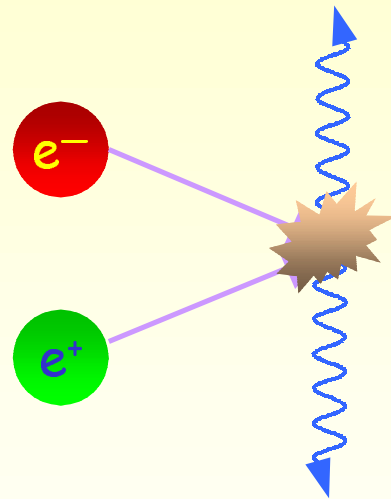
⇒ Materie überwiegt! ✓

☀ Was ist mit dem Rest des Universums?



Materie - Antimaterie

➤ Positron-Elektron Vernichtung



Photon = „Lichtblitz“ mit hoher Energie

Photonen haben charakteristische Energie:

$$E_\gamma = \frac{1}{2}m_e \cdot c^2 \quad (511 \text{ keV, Röntgenstrahlung: } E \cong 1 \text{ keV})$$

Photon

Photonen werden in Atmosphäre absorbiert!

⇒ Nachweis: Detektoren in Erdumlaufbahn

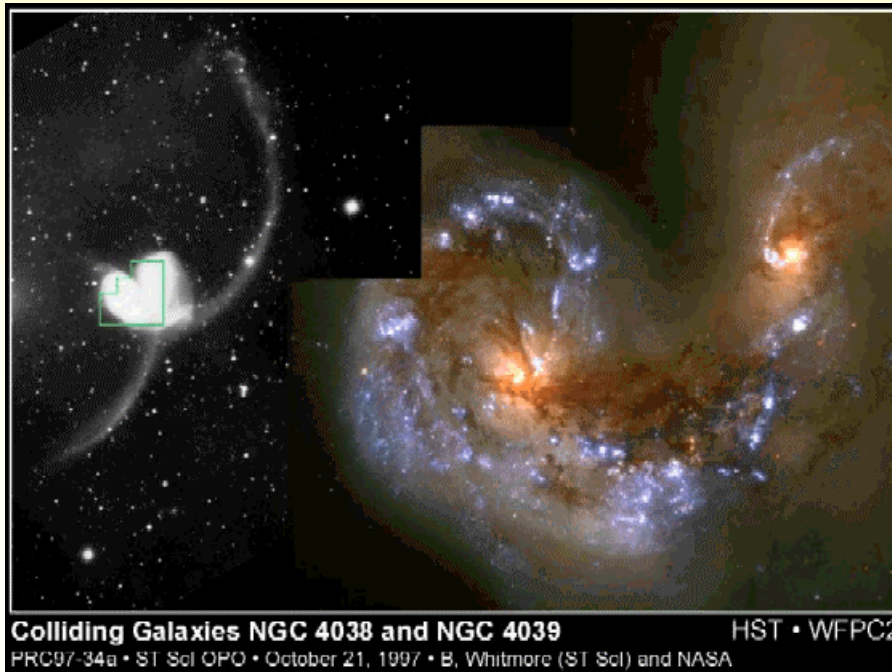
⇒ Keine Anzeichen für größere Mengen an Antimaterie im Weltall !

(Hinweise auf Produktion von Antimaterie in unserer Galaxie)



Materie - Antimaterie

- Gibt es vielleicht Galaxien aus Antimaterie?
 - Beobachtung von Kollisionen von Galaxien!



⇒ Keine Hinweise auf Antimaterie

Bedingungen für Materie-Überschuss

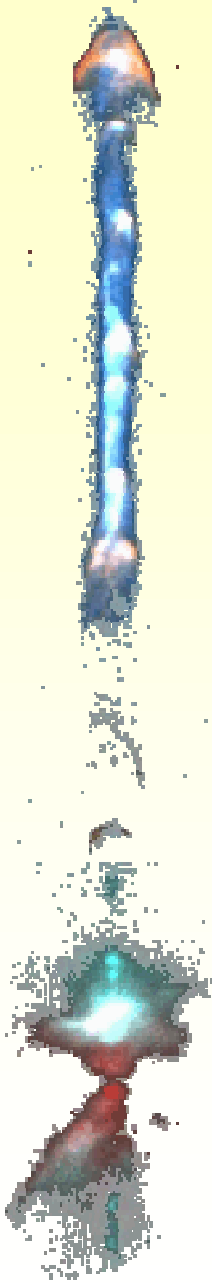
➤ Andrei Sacharow (1967):
formulierte 3 notwendige Bedingungen



1. Verletzung der Baryonenzahl
2. Verletzung der C und CP-Symmetrie
3. Abkehr vom thermodynamischen Gleichgewicht

CP-Symmetrie:

Bildet die Welt der Teilchen
auf die Welt der Antiteilchen ab



Diskrete Symmetrien

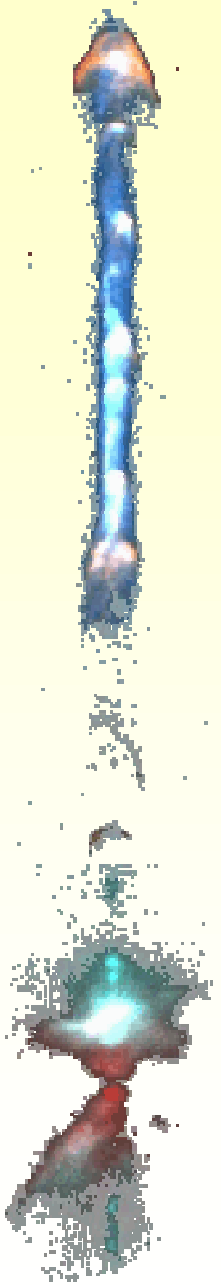
C: Ladungskonjugation Teilchen $\rightarrow$ Antiteilchen

P: Parität rechts $\rightarrow$ links „Spiegel“

T: Zeitumkehr vorwärts $\rightarrow$ rückwärts

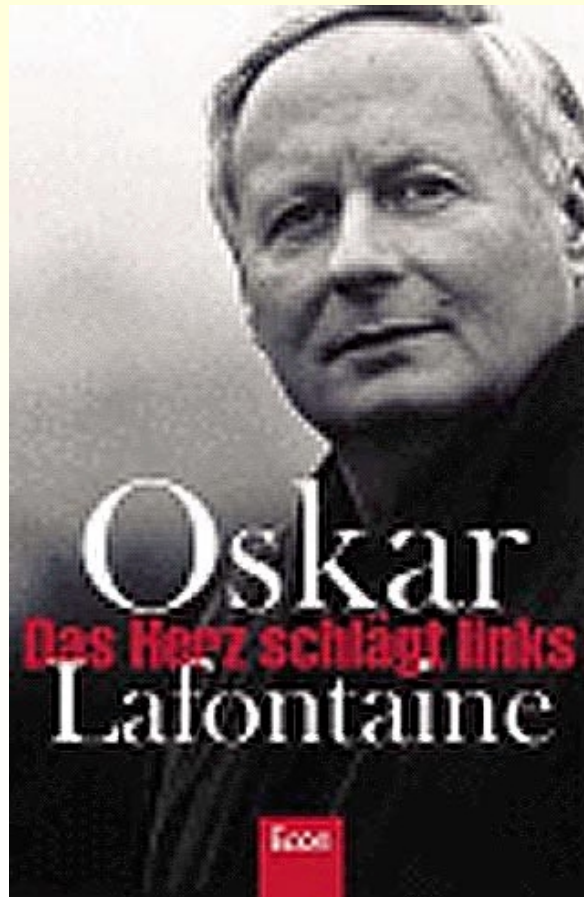
Hier: Unterscheidung von

- links- und rechts
- Materie - Antimaterie



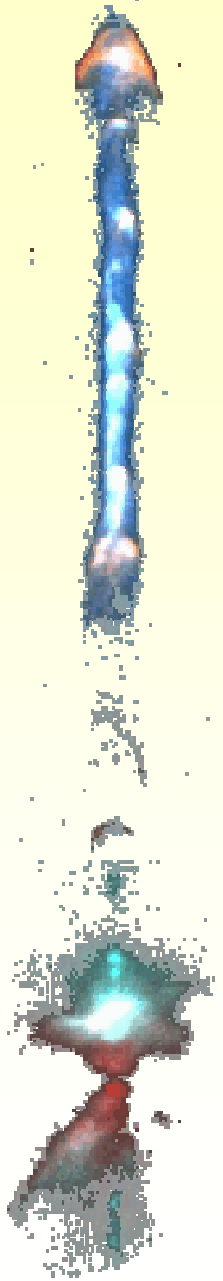
Links - Rechts im täglichen Leben

Brauchen Physik(er), um den Unterschied zu erklären:



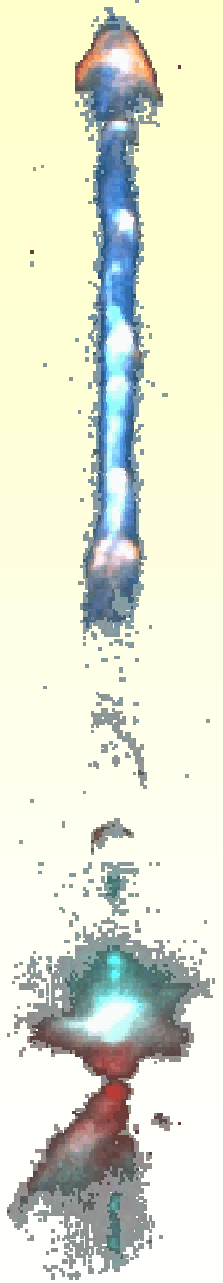
Ohne Verletzung der **Spiegelsymmetrie**
gibt es keine Unterscheidung von
Rechts - Links

Spiegelsymmetrie



Taj Mahal:
Natur und Spiegelbild identisch!

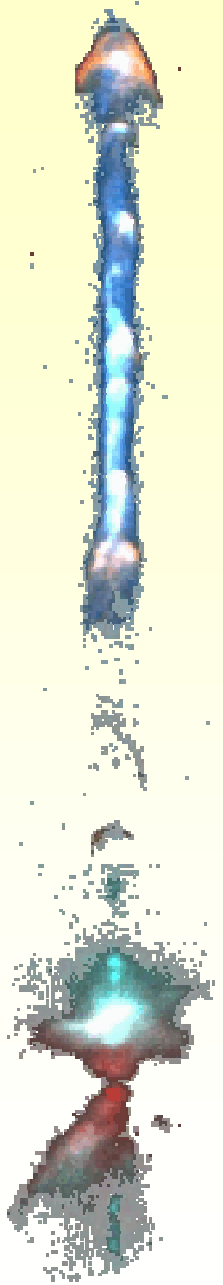
Spiegelsymmetrie-Verletzung



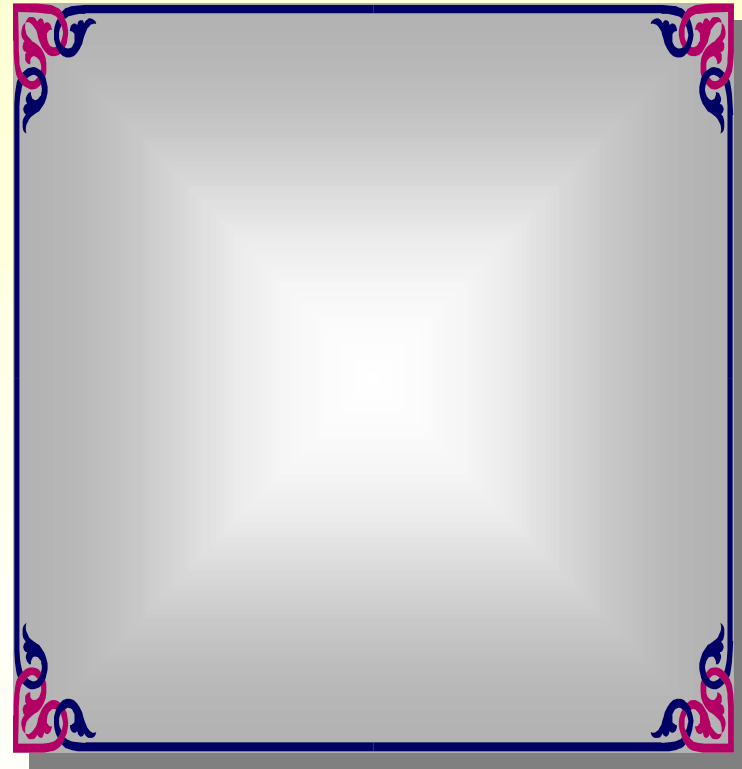
Menschen:
Natur und Spiegelbild
nahezu identisch!

Spiegelsymmetrie leicht verletzt!

Spiegelsymmetrie-Verletzung

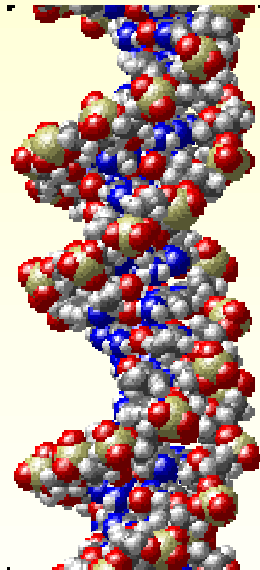
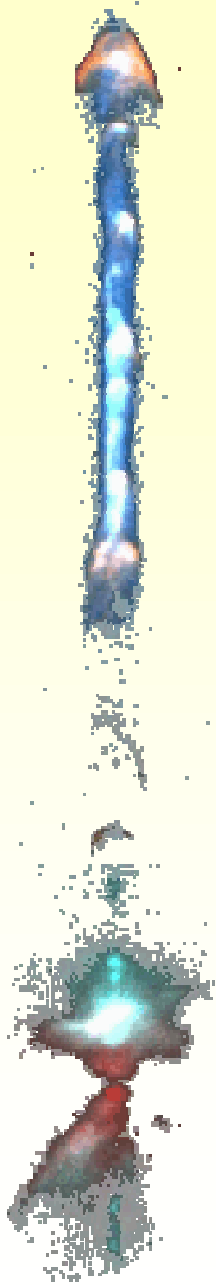


In Transsylvanien

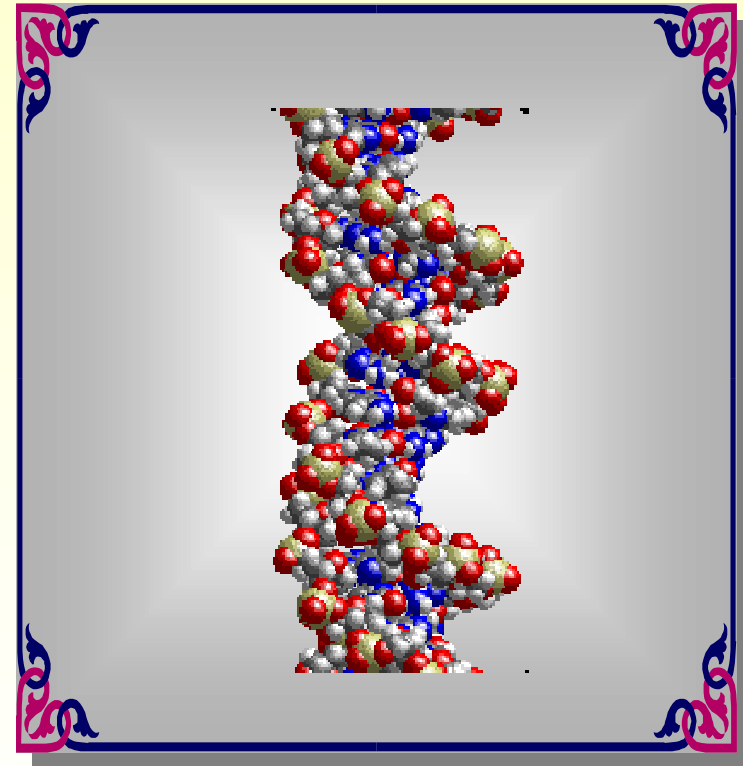


Im Spiegel

Spiegelsymmetrie-Verletzung

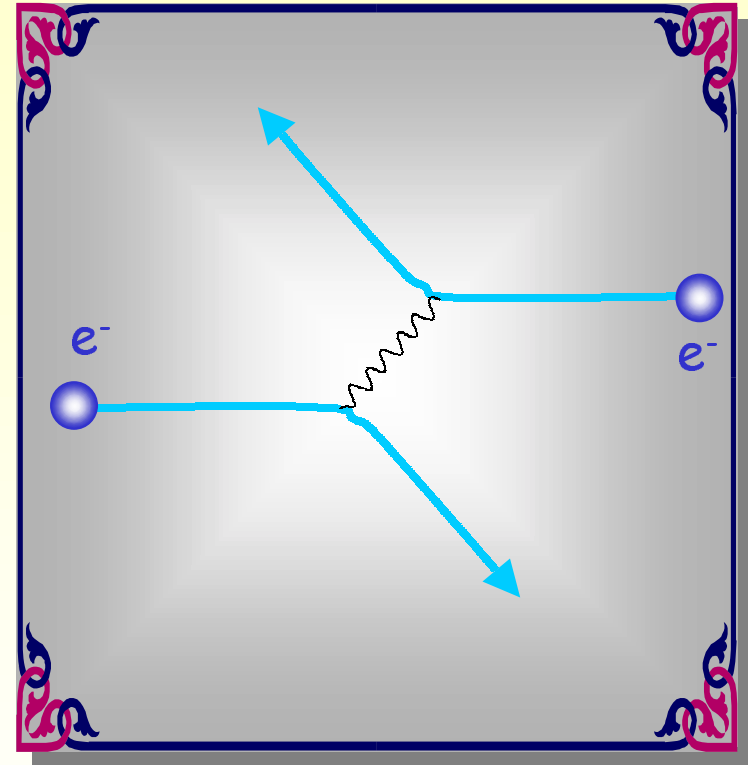
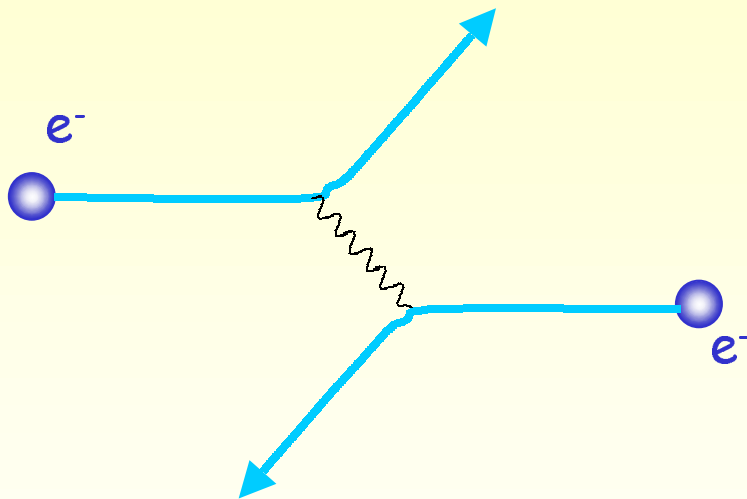


Natur:
DNS: Rechtsschraube



Im Spiegel:
DNS: Linksschraube
Kommt in der Natur nicht vor!

Teilchenphysik im Spiegel



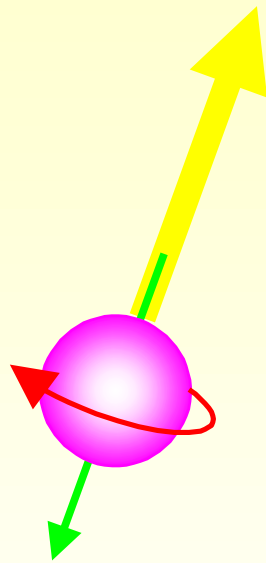
Elektromagnetische & starke Wechselwirkung:

Die gespiegelten Reaktionen sind in der Natur gleich häufig!

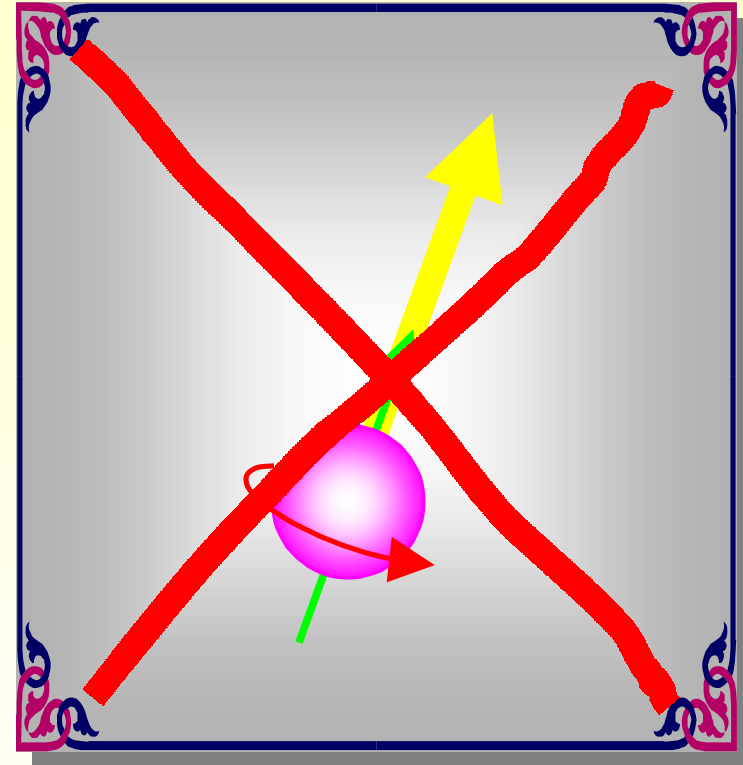
⇒ Spiegelsymmetrie = Paritätserhaltung

Schwache Wechselwirkung: Verletzung der Spiegelsymmetrie
koppelt an linkshändige Teilchen und rechtshändige Antiteilchen

Neutrinos im Spiegel



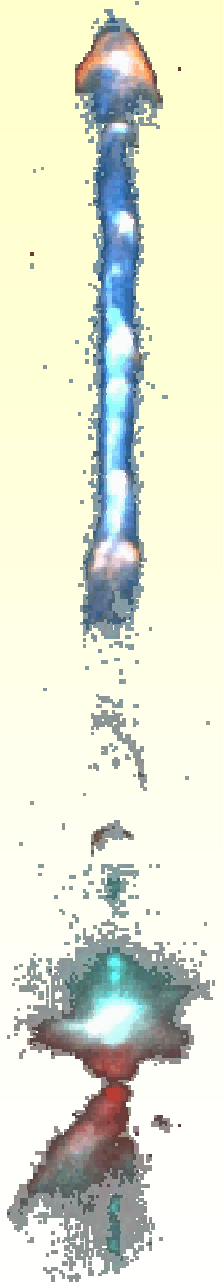
linkshändig



rechtshändig

Natur: linkshändige Neutrinos
rechtshändige Antineutrinos }

Paritätsverletzung
(gibt es nur in der schwachen
Wechselwirkung)



Raumschiffe auf Kollisionskurs

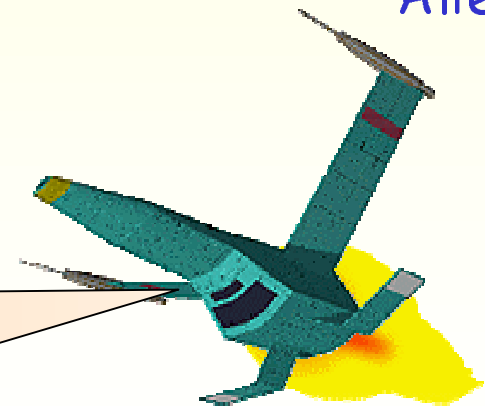
Abbiegen im
Neutrino-Drehsinn!



Ausweichmanöver:
Links- und Rechts müssen einander bekannt sein!

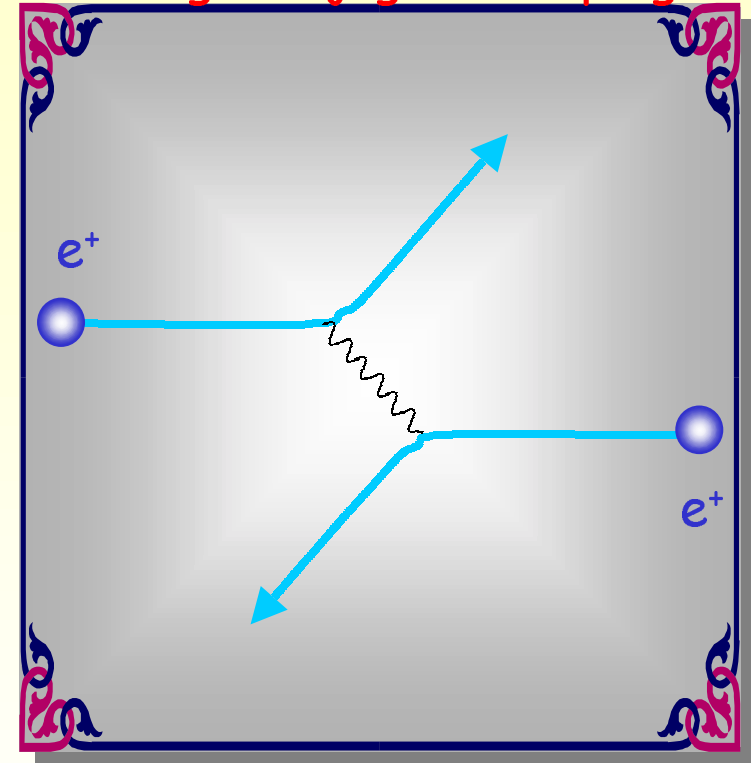
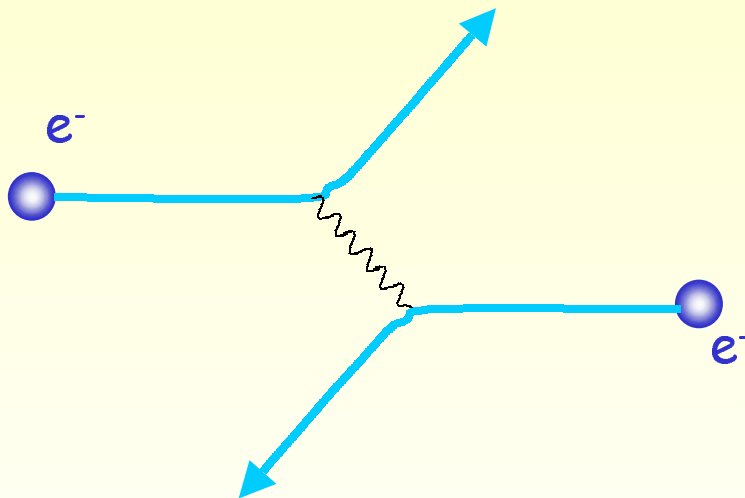
Alien

Materie
Oder
Antimaterie???



Teilchenphysik im C-Spiegel

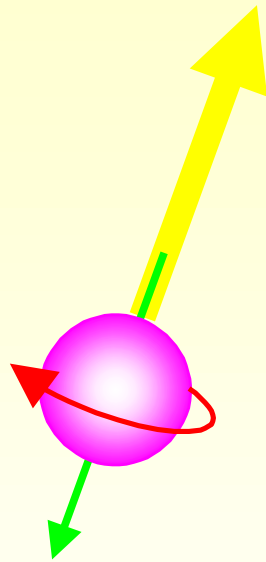
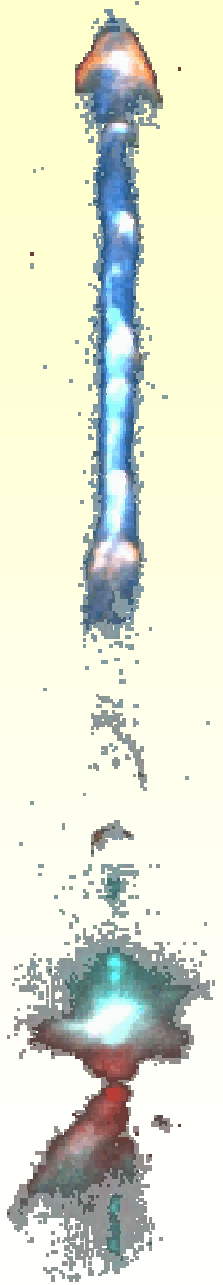
Ladungskonjugationsspiegel



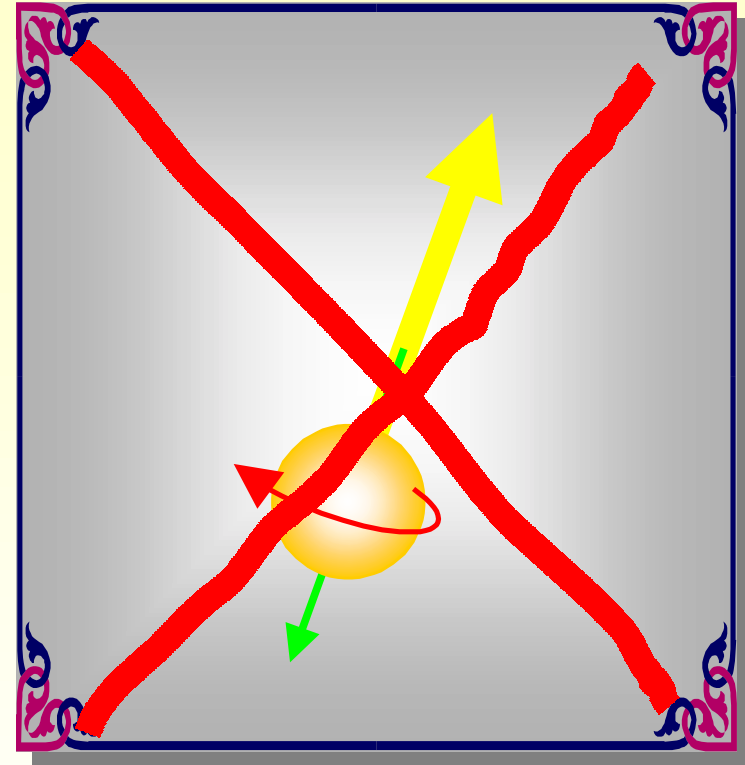
Elektromagnetische & starke Wechselwirkung:
Reaktionen sind in der Welt der Antiteilchen gleich häufig!
 $\Rightarrow$ C-Symmetrie ist erhalten

Schwache Wechselwirkung: Verletzung der C-Symmetrie
koppelt an linkshändige Teilchen und rechtshändige Antiteilchen

Neutrinos im C-Spiegel



Linkshändiges Neutrino



Linkshändiges Antineutrino

Natur: linkshändige Neutrinos
rechtshändige Antineutrinos }

C-Symmetrie ist verletzt
(gibt es nur in der schwachen
Wechselwirkung)

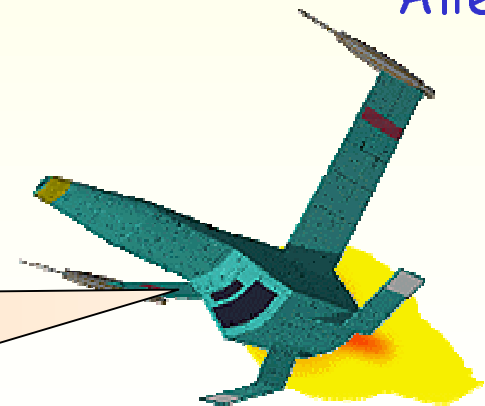
Raumschiffe auf Kollisionskurs

Ooops
Was sagen Eure Experimente
zur CP-Verletzung?



Ausweichmanöver:
Links- und Rechts müssen einander bekannt sein!

Alien

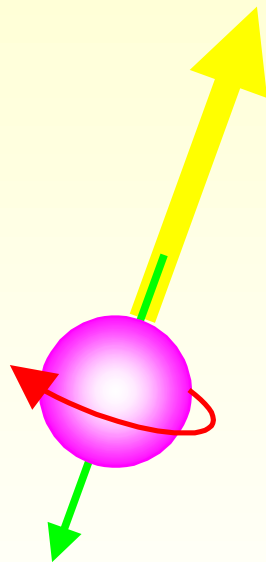


Materie
Oder
Antimaterie???

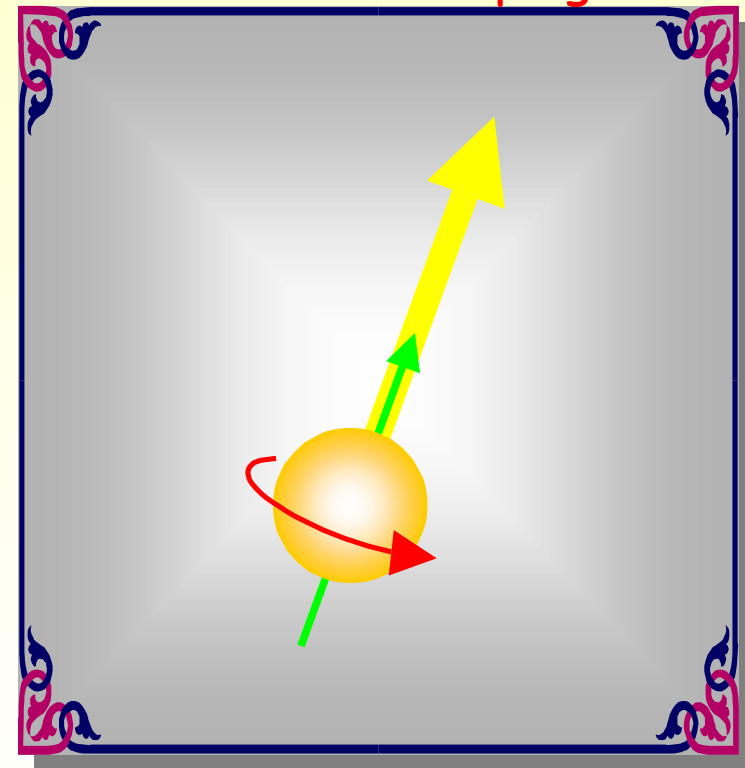


Neutrinos im CP-Spiegel

Ladungskonjugation
und normaler Spiegel

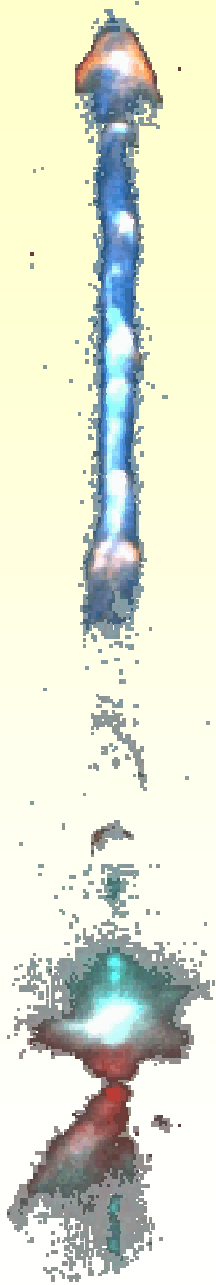


Linkshändiges Neutrino



Rechtshändiges Antineutrino

CP-Symmetrie erhalten?



Teilchenphysik im CP-Spiegel

Elektromagnetische & starke Wechselwirkung:

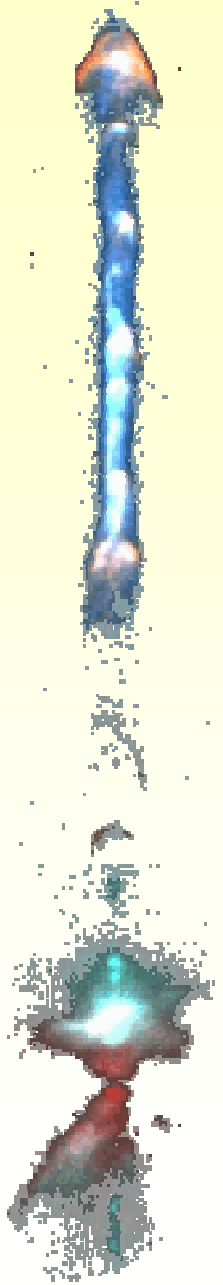
Reaktionen sind in der gespiegelten Welt der Antiteilchen gleich häufig!

⇒ CP-Symmetrie ist erhalten

Schwache Wechselwirkung: CP-Symmetrie ist **fast** erhalten

In bestimmten, sehr seltenen Fällen tritt eine Reaktion mit **unterschiedlicher** Häufigkeit in beiden Welten auf!

- Die Raumschiffe können sich über ein Ausweichmanöver verständigen
- Teilchenphysik:
 - Sucht nach dem Ursprung der CP-Verletzung



Experimente zur CP-Verletzung

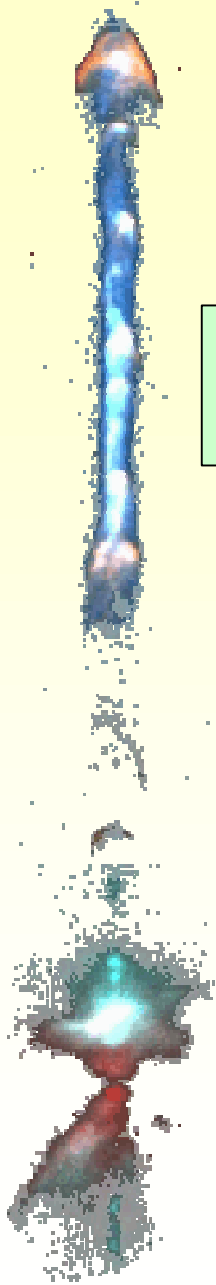
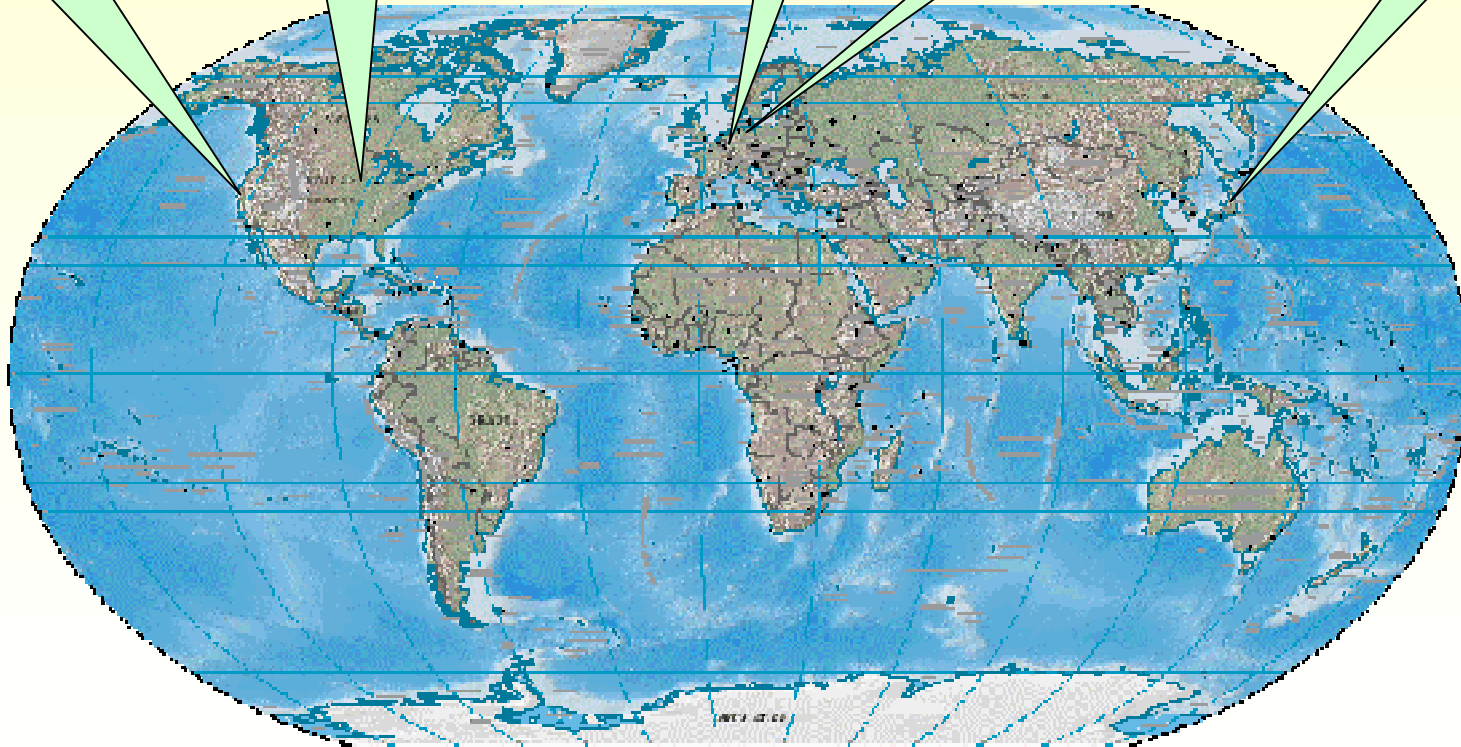
SLAC
BABAR

Fermilab
CDF, D0, KTeV

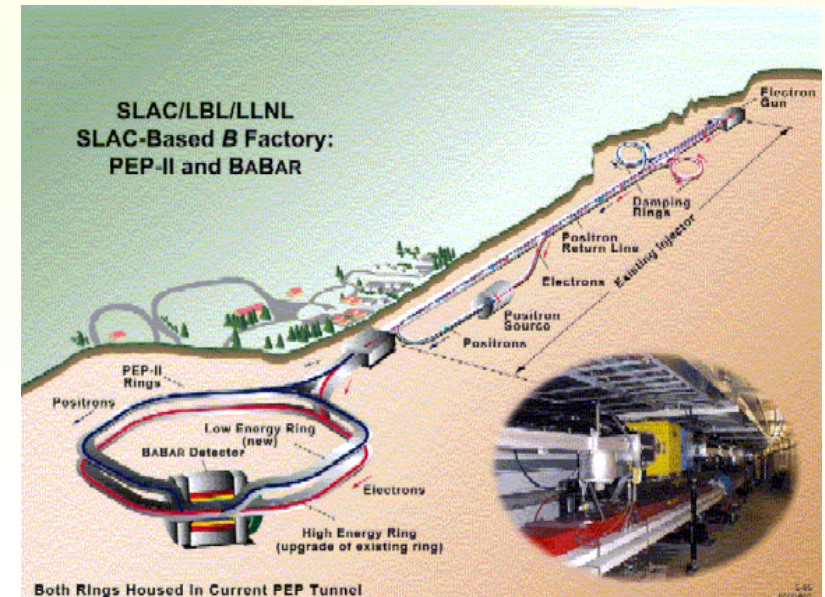
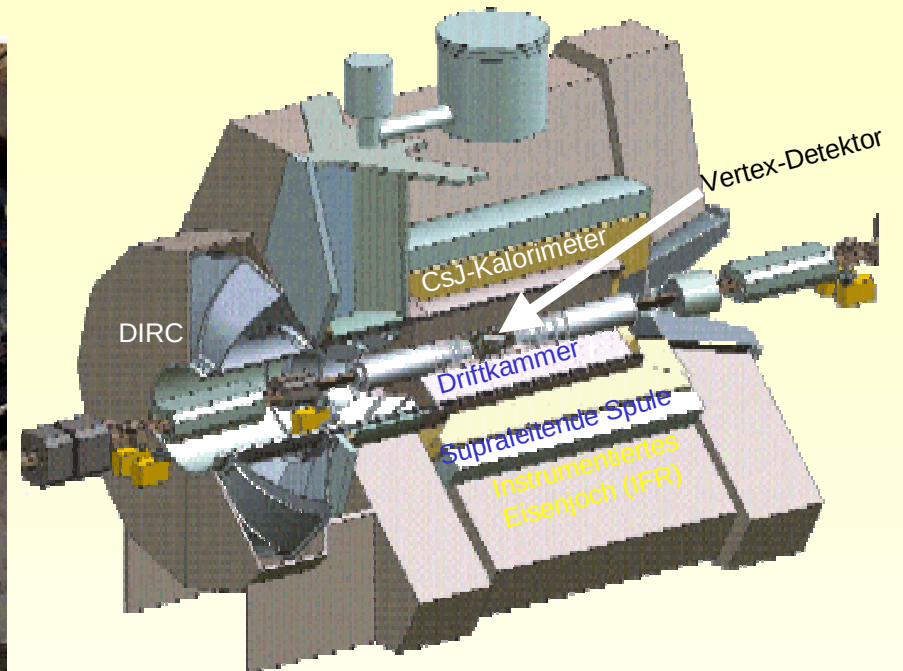
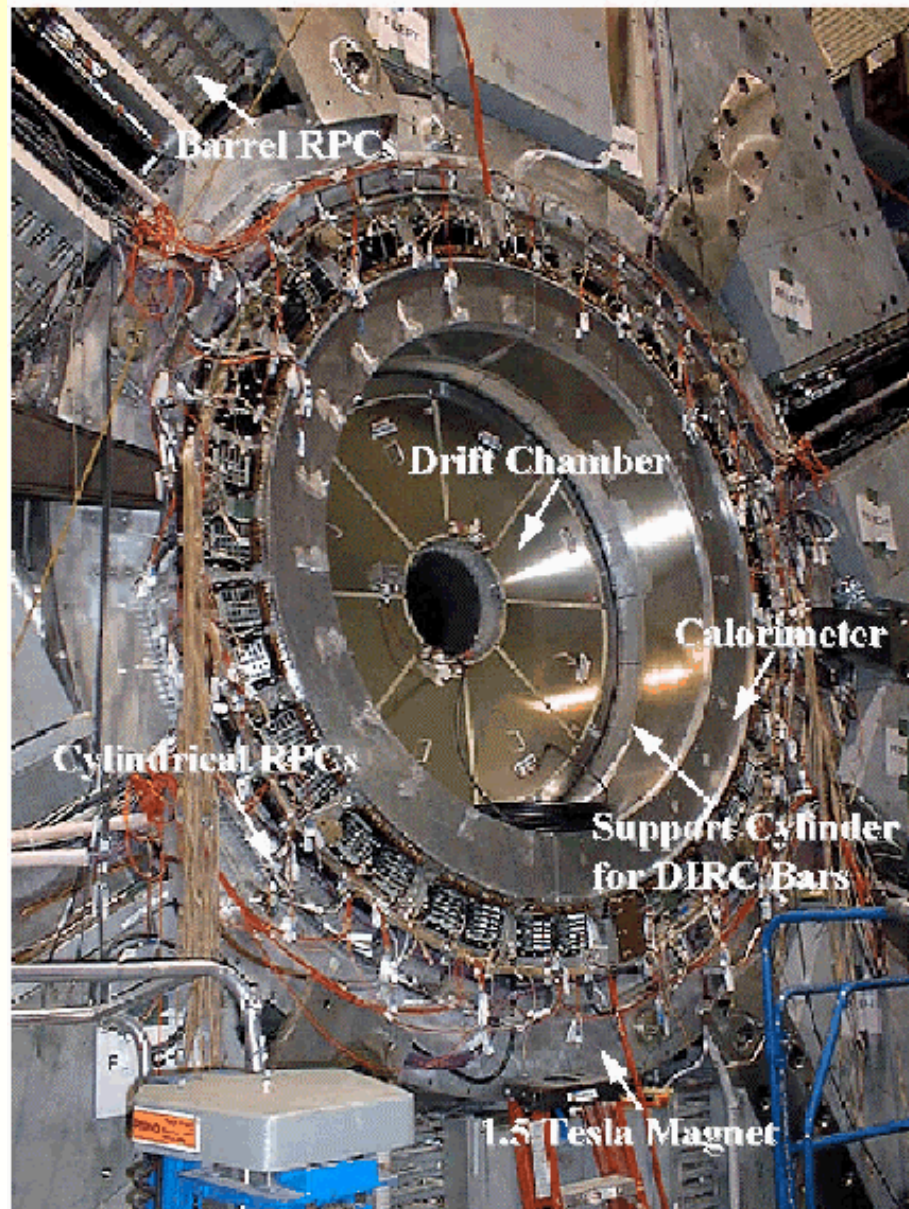
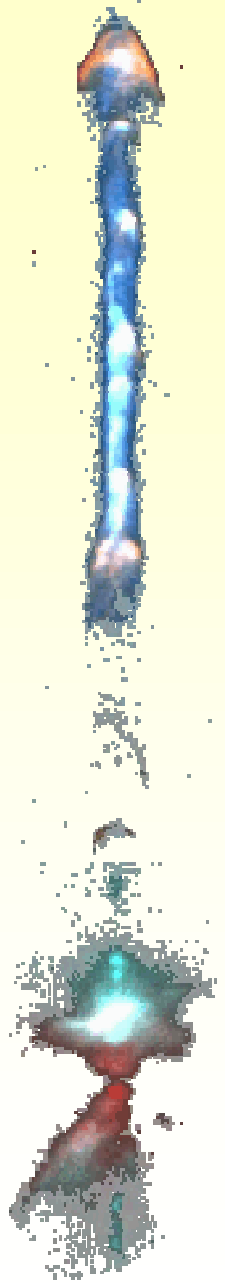
CERN
NA48

DESY
HERA-B

KEK
BELLE



Das BABAR-Experiment am SLAC



Zusammenfassung

Symmetrie: Das Urprinzip der Schöpfung

- Beschreibung von Wechselwirkungen (Kräften)
- Klassifizierung
- Symmetrieverletzung (CP,.....)
- Symmetriebrechung (Massen der Teilchen)
-

