

Exotische Atome und Antimaterie

Rainer Hippler

Institut für Physik

Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald





Evangelium nach Johannes

- Im Anfang war das Wort
- und das Wort war bei Gott
- und das Wort war Gott.



Entstehung der Welt

- Im Anfang war Nichts
- und das Nichts war Alles
- und Alles war voller Kraft (Energie)

- Es folgte ein großer Knall: Urknall (**Big Bang**)



Urknall (Big Bang)

- Urknall (Big Bang) vor 13,7 Mrd. Jahren
- Seit dieser Zeit dehnt sich unser Universum aus
 - Rotverschiebung:
 - Hubble-Konstante: 71 km/s/Mparsec.



Phasen des Urknalls: Planck-Ära

- Am Anfang war Alles noch in einem winzigen Punkt vereint.
- Das Universum beginnt mit einem Zustand, bei dem zu Beginn
 - die Dichte etwa 10^{94} g/cm^3 und
 - die Temperatur etwa 10^{32} Kbetragen haben muss.

Unvorstellbar!



Phasen des Urknalls

In diesem ersten Moment sind auch die vier bekannten Grundkräfte der Natur,

- die Gravitation,
- die Starke Wechselwirkung,
- die Elektromagnetische Wechselwirkung
und
- die Schwache Wechselwirkung

noch zu einer einzigen Urkraft vereint.



Phasen des Urknalls

- Mit dem Beginn der Expansion spaltet sich zunächst die Gravitation als eigenständige Kraft ab.
- Die drei restlichen Kräfte werden als GUT-Kraft (*Grand Unified Theorie*) bezeichnet.
- Abspaltungen dieser Art ereigneten sich später noch zweimal und stehen in Zusammenhang mit so genannten Symmetriebrechungen.



Phasen des Urknalls

- Die hohe Temperatur hat zur Folge, dass sich ständig Teilchen und Energie in Form von Strahlung gemäß der Beziehung

$$E=mc^2$$

ineinander umwandeln.

- Materie und Strahlung befinden sich dabei im thermischen Gleichgewicht.
- Die Natur der meisten in dieser Ära vorliegenden Teilchen ist unbekannt.

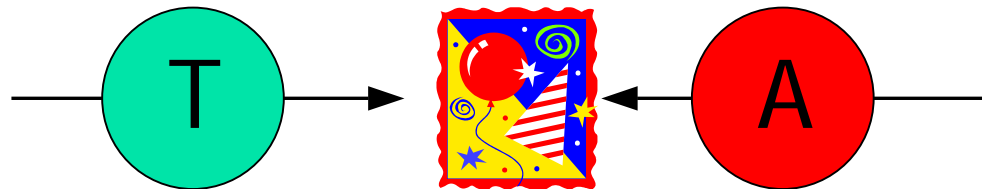
Phasen des Urknalls

Dabei kommt es zur

- paarweisen Erzeugung von Teilchen (**Paarerzeugung**) und zur



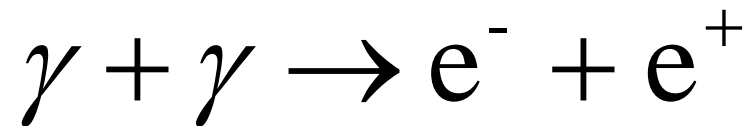
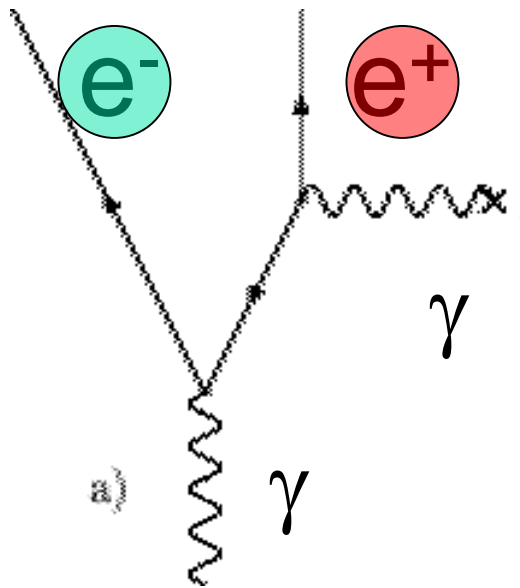
- wechselseitigen Vernichtung (**Annihilation**)



- daran beteiligt: **Teilchen und Anti-Teilchen**

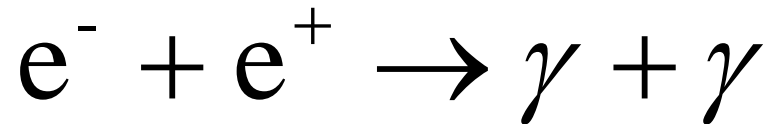
Paarerzeugung

Bei der Paarerzeugung wird energiereiche Strahlung in Materie umgewandelt:

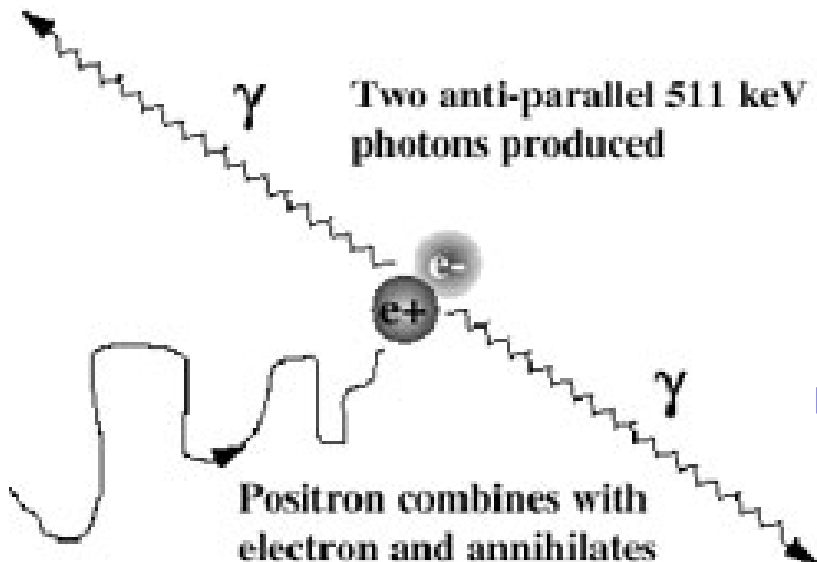


Annihilation

- Umkehrung der Paarerzeugung
- Teilchen (e^-) und Anti-Teilchen (e^+) vernichten sich gegenseitig



- Dabei entstehen 2 energiereiche Photonen (γ) in entgegengesetzten Richtungen





Quark-Ära

- Nach 10^{-33} s ist die Temperatur auf 10^{25} K abgesunken. Es bilden sich Quarks und Anti-Quarks.
- Die Temperatur ist noch so hoch, dass sich keine Protonen oder Neutronen bilden können.
- Schwerere Teilchen sterben bereits aus, da sie instabil sind, und die Temperatur für eine erneute Entstehung aus Strahlung nicht mehr ausreicht.



Hadronen-Ära

Nach 10^{-6} s liegt eine Temperatur von 10^{13} K vor. Quarks existieren nicht mehr als freie Teilchen, sondern vereinigen sich zu Hadronen. Mit weiter abnehmender Temperatur zerfallen die schweren Hadronen, und es bleiben schließlich

Protonen und Neutronen

und ihre Antiteilchen übrig. Aufgrund ihres geringen Massenunterschieds bildet sich dabei ein Verhältnis von Protonen zu Neutronen von 6:1 aus.



Beginn der Leptonen-Ära

Nach 10^{-4} s ist die Temperatur auf 10^{12} K und die Dichte auf 10^{13} g/cm³ gesunken. Die Temperatur reicht nun lediglich noch dazu aus

Leptonen-Paare,

z.B. Elektron (e^-) und sein Anti-Teilchen, das Positron (e^+),

zu bilden.



Positron

- Das Positron wurde 1928 von Paul A. M. Dirac vorhergesagt und 1932 von Carl David Anderson in der kosmischen Höhenstrahlung nachgewiesen.
- Das **Positron** (für **positives Elektron**) gehört zu den Leptonen. Es ist das Antiteilchen des Elektrons und unterscheidet sich von diesem durch seine (positive) elektrische Ladung und sein magnetisches Moment.
- Positron und eine Elektron vernichten sich gegenseitig (Annihilation). Die Energie der entstehenden Gammastrahlung entspricht exakt 1,022 MeV (2 x 511 keV; Energieäquivalent der Ruhemasse von Elektron und Positron).



Ende der Leptonen-Ära

Nach 1 s ist eine Temperatur von 10^{10} K erreicht. Die Temperatur ist nicht mehr ausreichend um

Teilchen-Anti-Teilchen-Paare

zu bilden. Damit ist die Bildung der Bausteine der Materie, aus denen sich der Kosmos auch heute noch zusammensetzt, weitgehend abgeschlossen.



Nukleosynthese

Nach 10 Sekunden, bei Temperaturen unterhalb von 10^9 K, vereinigen sich Protonen und Neutronen durch Kernfusion zu Atomkernen (primordiale Nukleosynthese). Dabei bilden sich

- 25 % Helium-4 und
- 0,001 % Deuterium
- Spuren von Helium-3, Lithium und Beryllium.

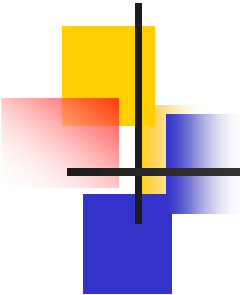
Die restlichen 75 % stellen Protonen, die späteren Wasserstoffatomkerne.



Nukleosynthese

Nach 5 Minuten hat die Dichte der Materie soweit abgenommen, dass auch die Nukleosynthese zum Erliegen kommt.

Alle schweren Elemente entstehen erst später im Inneren von Sternen.



Nach 397.000 Jahren sinkt die Temperatur unter 3.000 K. Erst jetzt können die Atomkerne und Elektronen zu neutralen Atomen rekombinieren.

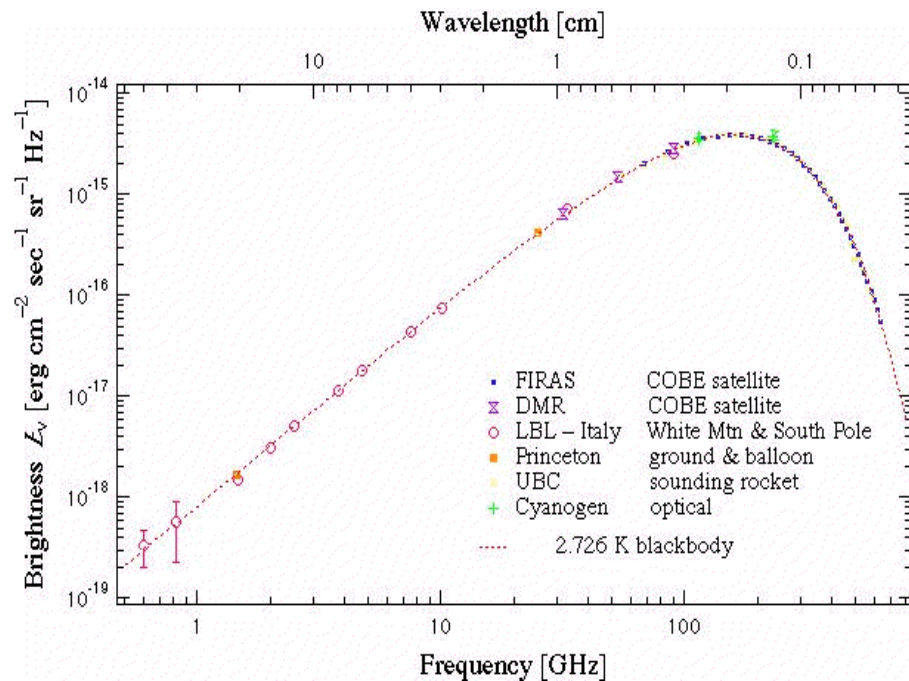
Zuvor stand die Strahlung in permanenter Wechselwirkung mit den freien Ladungen.

→ Das Universum war daher undurchsichtig.

Hintergrundstrahlung

Die Wechselwirkung von Licht mit neutralen Atomen ist jedoch sehr viel geringer, so dass Licht sich nun ungehindert ausbreiten kann.

→ Das Universum wird durchsichtig.



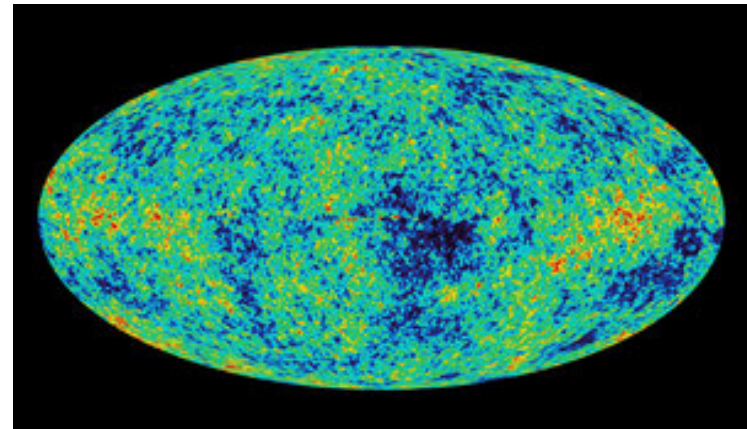
Die sich abkoppelnde Hintergrundstrahlung ist noch heute in Form von Radiowellen messbar, die einer Temperatur von 2,73 K entsprechen (3-Kelvin Strahlung).

Sternentstehung

- Bildung von großräumigen Strukturen
- Entstehung von Galaxien und Sternen
- Entstehung des Sonnensystems



Wichtige Informationen hierüber erhofft man sich aus der räumlichen Verteilung und den Fluktuationen der Hintergrundstrahlung (WMAP).





Aufbau der Materie

- Schwere Teilchen, diese bestehen aus **Quarks**
- Leichte Teilchen (**Leptonen**)
- Von jeder Teilchensorte gibt es jeweils 6
- 2 mal (Materie und Anti-Materie)



Elementare Bausteine der Materie:

Leptonen und Quarks

6 Leptonen

- Elektron
- Myon
- Tau
- 3 Neutrinos

6 Anti-Leptonen

6 Quarks

- up und down
- charm und strange
- top und bottom

6 Anti-Quarks

Elementare Bausteine der Materie

	Teilchen	Antiteilchen
Leptonen:	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \bar{\nu}_e \\ e^+ \end{pmatrix}$
	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \bar{\nu}_\mu \\ \mu^+ \end{pmatrix}$
	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \bar{\nu}_\tau \\ \tau^+ \end{pmatrix}$
Quarks:	$\begin{pmatrix} u^{+\frac{2}{3}} \\ d^{-\frac{1}{3}} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \bar{u}^{-\frac{2}{3}} \\ \bar{d}^{+\frac{1}{3}} \end{pmatrix}$
	$\begin{pmatrix} c^{+\frac{2}{3}} \\ s^{-\frac{1}{3}} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \bar{c}^{-\frac{2}{3}} \\ \bar{s}^{+\frac{1}{3}} \end{pmatrix}$
	$\begin{pmatrix} t^{+\frac{2}{3}} \\ b^{-\frac{1}{3}} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \bar{t}^{-\frac{2}{3}} \\ \bar{b}^{+\frac{1}{3}} \end{pmatrix}$

Ladung



???

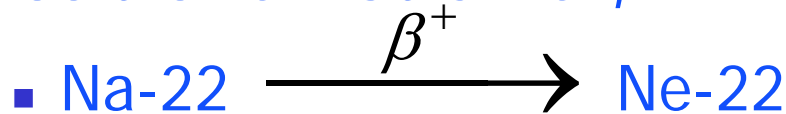
- Warum gibt es Materie?
- Warum gibt es 6 Quarks?
- Warum gibt es 6 Leptonen?
- Wo ist die Anti-Materie?
 - Denn: Materie und Anti-Materie entstehen immer gleichzeitig!

Wir kennen die Antwort nicht!

Wo ist die Anti-Materie?

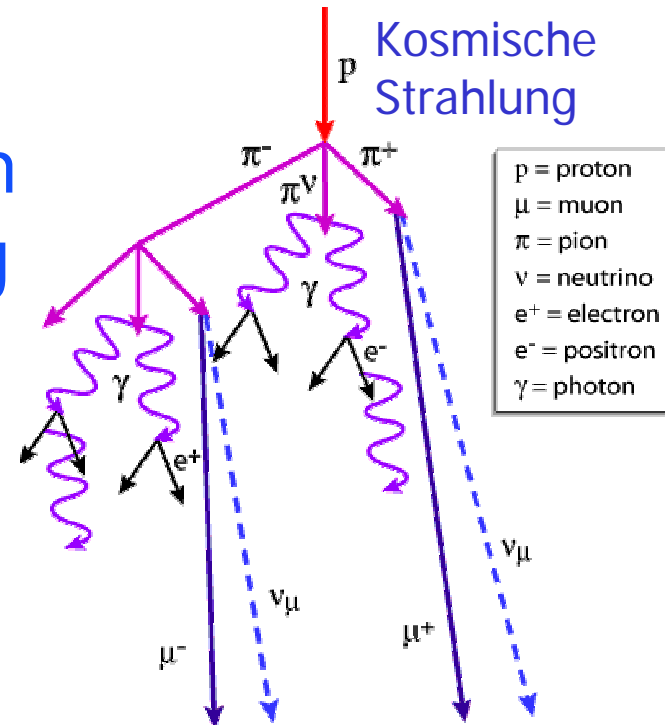
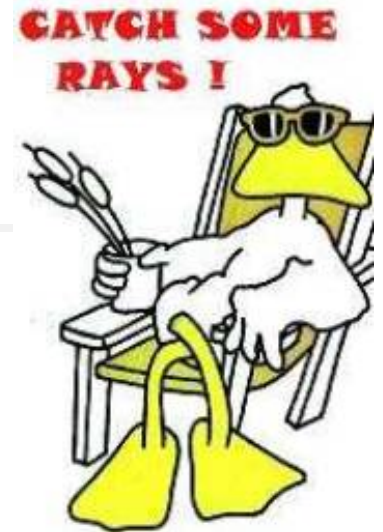
- Auf der Erde?

- Positronen-Strahler, z.B. Na-22



- Positronen und Myonen in der kosmischen Strahlung (Höhenstrahlung)

- → Viel zuwenig!



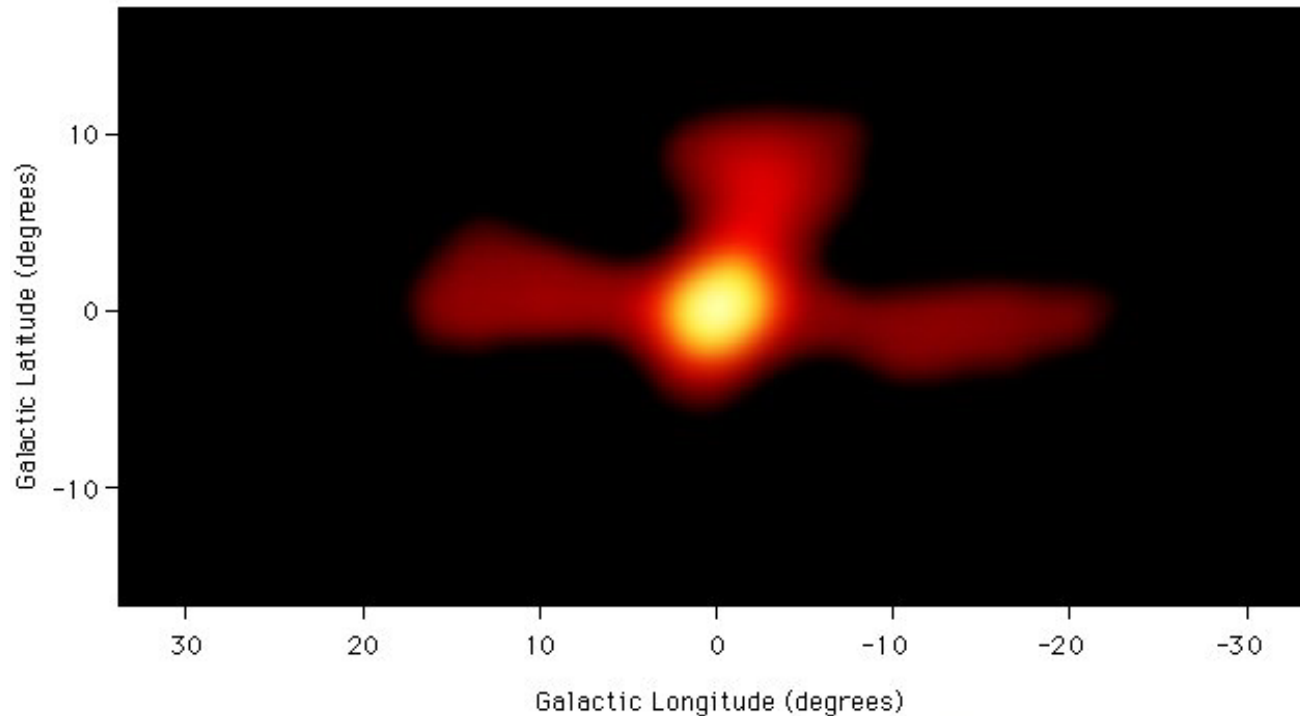
Anti-Materie auf der Sonne?



Während eines solaren Massenauswurfs kann etwa ein halbes Kilogramm an Anti-Materie (insbesondere Positronen) produziert werden.

→ Viel zu wenig im Vergleich zu den Millionen Tonnen normaler Materie!

Anti-Materie-Wolke



Bild, aufgenommen vom **INTE**rnational **G**amma-**R**ay **A**strophysics **L**aboratory (INTEGRAL) Satelliten der ESA, zeigt die Verteilung der Positronen-Anti-Materie im Zentrum der Milchstraße. → Viel zu wenig!

Neutronenstern im Krebs-Nebel



Überlagerte Aufnahmen von Chandra (blau) und Hubble (rot). Bei den „Jets“ soll es sich um einen Strom von **Elektronen und Positronen** handeln, die sich mit etwa halber Lichtgeschwindigkeit bewegen.

➔ Viel zu wenig!



Diskriminierung

Offensichtlich gibt es mehr Materie als Antimaterie.

Materie und Anti-Materie entstehen aber gleichzeitig und im gleichen Verhältnis. Dies sollte auch beim Urknall der Fall gewesen sein. Damals - vor rund 14 Milliarden Jahren - entstand Materie und Antimaterie im Verhältnis 1:1.

Umgekehrt gilt auch: Materie und Antimaterie vernichten sich beide zu reiner Energie. Dies hätte irgendwann nach dem Urknall passieren müssen, so dass unser Universum jetzt nur aus Energie bestehen dürfte und ansonsten leer sein müsste.



Diskriminierung

Ganz offensichtlich gibt es mindestens einen Prozess der Materie gegenüber Anti-Materie bevorzugt.

Rechnet man nach, so würde es genügen wenn auf **10.000.000.000 Antiteilchen** **10.000.000.001 Teilchen** gekommen wären.

Diese schwache Diskriminierung

→ **Materie/Anti-Materie Asymmetrie**

könnte die Ursache dafür sein, dass es uns überhaupt gibt.



Symmetrie in der Natur

Symmetrien spielen in der Physik und auch in der belebten Natur eine grundlegende Rolle:

Menschen sind **rechts-links-symmetrisch**: wir haben auf jeder Seite je ein Ohr, ein Auge, einen Arm und so weiter.



Symmetrie?

Definition:

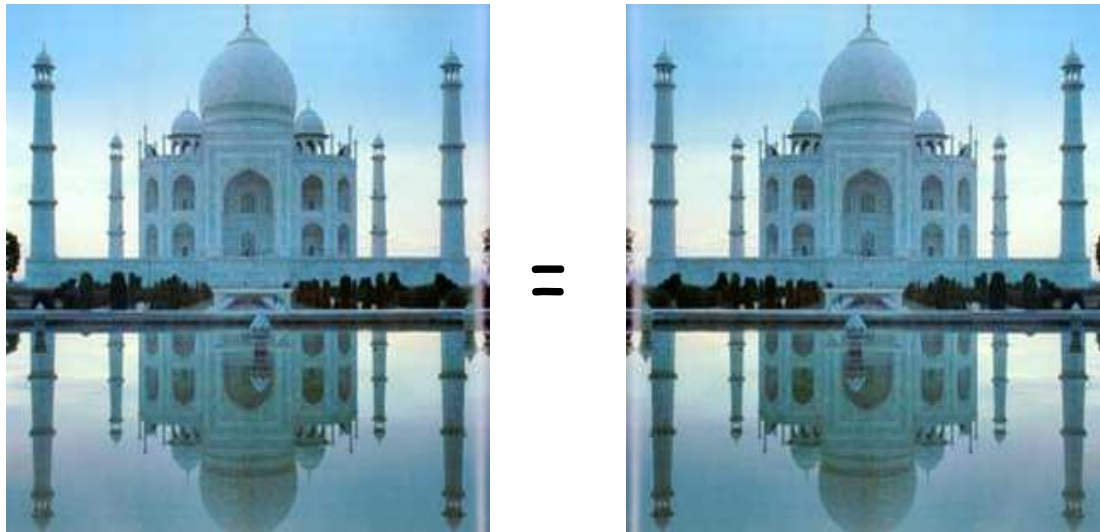
„Nach einer bestimmten Änderung an einem System sieht dieses exakt so aus wie zuvor.“

Beispiele:

- Spiegelsymmetrie
- Drehsymmetrie

Symmetrie-Beispiel

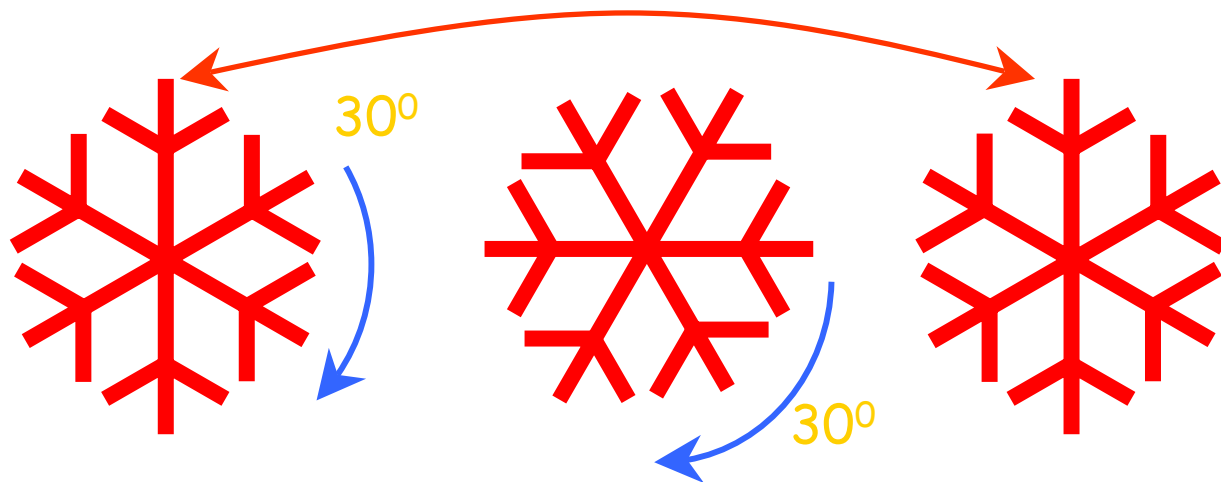
- Reflexionen (Spiegelsymmetrie)



⇒ Taj Mahal: symmetrisch gegenüber Spiegelungen

Symmetrie-Beispiel

- Rotation (Drehung)



⇒ Schneeflocke: symmetrisch gegenüber Drehungen um 60°

Bild oder Spiegelbild?



Verletzung der Spiegelsymmetrie = Symmetriebrechung



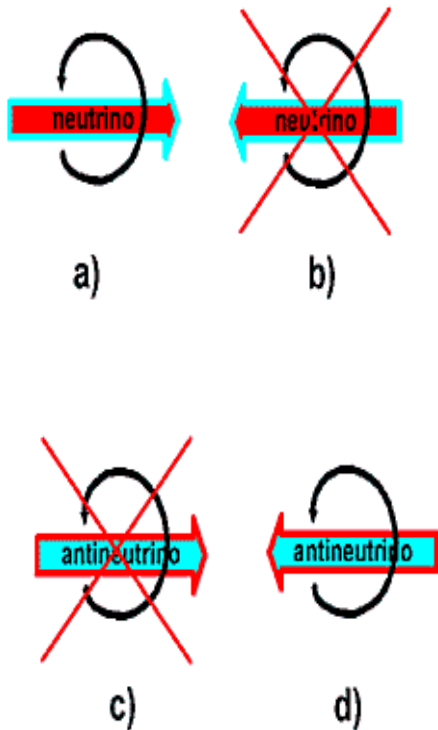
Verletzung der Symmetrie

Oft sind Symmetrien nur teilweise erfüllt:

- Die Rechts-Links-Symmetrie beim Menschen gilt nur teilweise: schneidet man einen Menschen auf, so sieht man, dass die linke Herzhälfte größer als die rechte ist, die Anzahl der Lungenlappen rechts und links unterscheiden sich, die Leber befindet sich rechts, und so weiter.
- Eine scheinbar vorhandene Symmetrie ist bei näherem Hinsehen in mancher Hinsicht verletzt.

→ **Verletzung der Symmetrie**

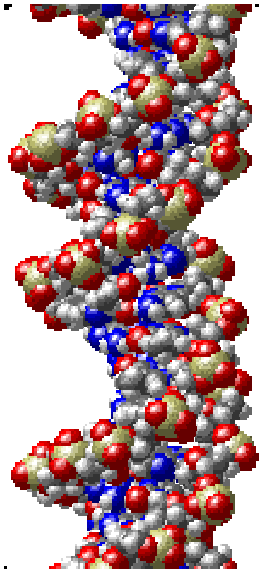
Verletzung der Spiegelsymmetrie



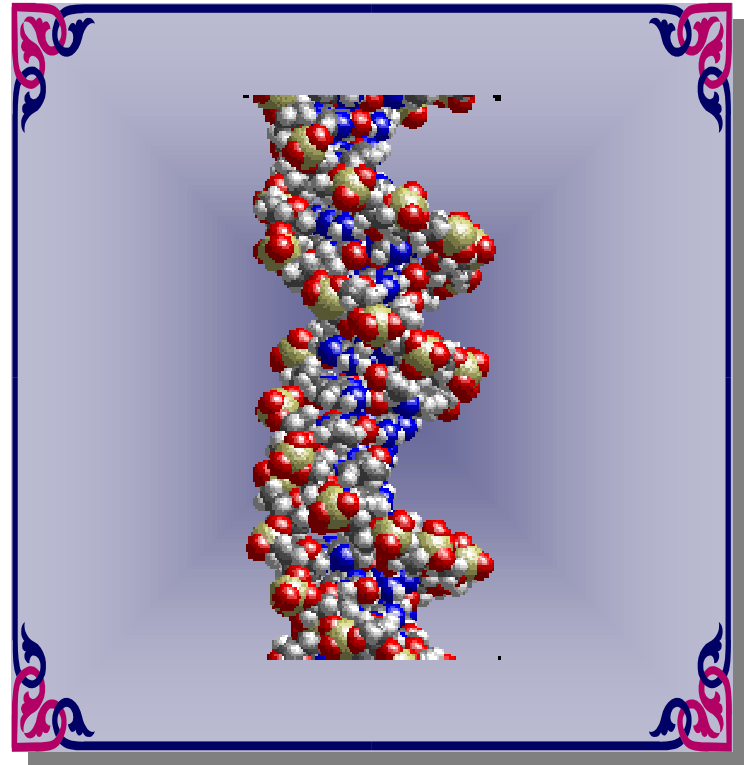
- (a) Neutrinos drehen sich, in Flugrichtung betrachtet, immer nach links.
- (b) Durch Spiegelung eines Neutrinos erhält man ein rechtsdrehendes Neutrino (das es nicht gibt).
- (c) Auch linksdrehende Anti-Neutrinos gibt es nicht.
- (d) Antineutrinos, drehen sich immer nach rechts.

➔ Paritätsverletzung (Ursache: schwache Wechselwirkung)

Symmetriebrechung

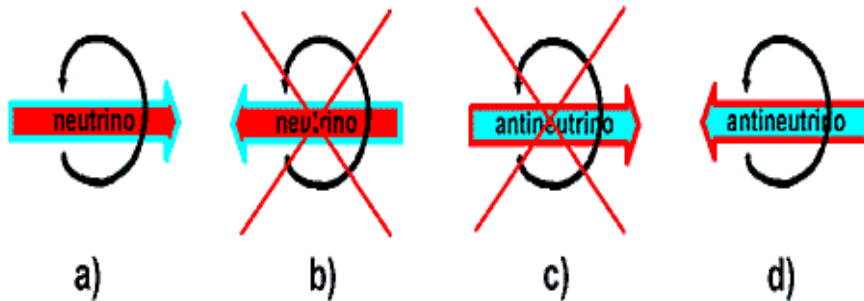


DNA-Rechtsschraube
→ existiert!



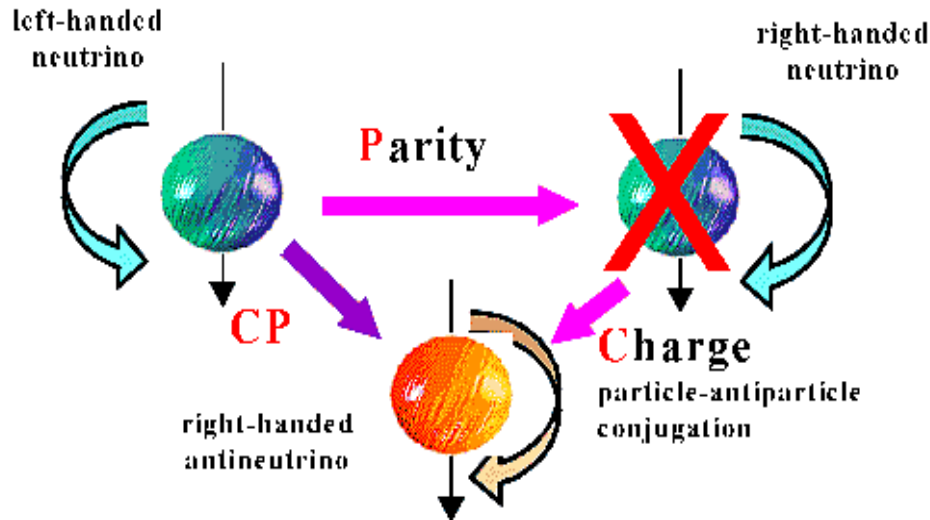
DNA-Linksschraube
→ existiert nicht!

CP-Transformation



Neutrinos drehen sich immer nach links. Antineutrinos drehen sich dagegen immer nach rechts.

Die Spiegelung eines Neutrinos (Transformation "P") ergibt ein rechtsdrehendes Neutrino (das es nicht gibt).



Ersetzt man dieses nun aber zusätzlich durch ein Antineutrino (Transformation "C") erhält man ein rechtsdrehendes Antineutrino. Beide Operationen hintereinander ausgeführt (CP-Transformation) ergeben wieder einen existierenden Zustand.

Materie/Anti-Materie-Asymmetrie

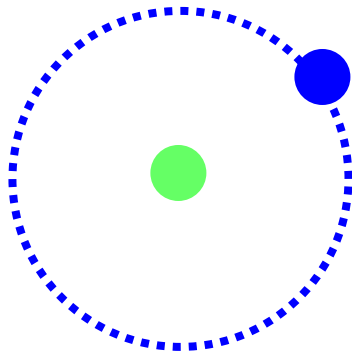
- Offensichtlich existierte im frühen Universum eine Materie/Anti-Materie-Asymmetrie.
- Vermutung: Verletzung der CP-Symmetrie



Erzeugung von Anti-Materie gelingt mit großen Beschleunigern, z.B. am CERN (LHC).

Dort wurde auch bereits eine Verletzung der CP Symmetrie beobachtet.

Exotische Atome: Positronium und Antiwasserstoff



Das einfachste Atome besteht aus 2 entgegengesetzt geladenen Teilchen, z.B.:

Wasserstoff:	$p^+ e^-$	$E=13,6\text{eV}$	$r=0,053 \text{ nm}$
Positronium:	$e^+ e^-$	$E= 6.8\text{eV}$	$r=0,106 \text{ nm}$
Antiwasserstoff:	$p^- e^+$	$E=13,6\text{eV}$	$r=0,053 \text{ nm}$

Positronium: 1951 von Deutsch entdeckt

Antiwasserstoff: 1995 CERN: 9 (!!!) Atome im Flug erzeugt
2002 ATHENA (CERN): 50000 Antiwasserstoffatome in einer Falle



Positronium

Ein wasserstoffähnliches exotisches Atom aus einem Elektron und einem Positron bestehend, das heißt das Proton im Kern des Wasserstoffatoms ist durch ein Positron ersetzt.

Es wird zwischen dem Ortho-Positronium und dem Para-Positronium unterschieden.

- Orthopositronium: die Drehimpulse (Spin) von Elektron und Positron sind gleich gerichtet, der Gesamtspin beträgt 1.
- Parapositronium: die Drehimpulse von Elektron und Positron sind entgegengesetzt gerichtet, der Gesamtspin beträgt 0.

Da sich Elektron und Positron annihilieren, hat das Positronium nur eine endliche Lebensdauer: Diese beträgt 10^{-7} s (Ortho-Positronium) bzw. 10^{-10} s (Para-Positronium).



Anti-Wasserstoff

- Normale Wasserstoffatome bestehen aus einem Proton als Kern und einem Elektron. Ersetzt man das Proton (+) durch ein Anti-Proton (-) und das Elektron (-) durch ein Positron (+), so erhält man Anti-Wasserstoff.
- Trotz der unterschiedlichen Zusammensetzung sind die Eigenschaften von Wasserstoff und Anti-Wasserstoff vermutlich identisch. Ob das genau zutrifft, muss noch untersucht werden.
- Anti-Wasserstoff wurde vor wenigen Jahren erstmals künstlich am Europäischen Kernforschungszentrum CERN (Schweiz) in kleinen Mengen erzeugt.



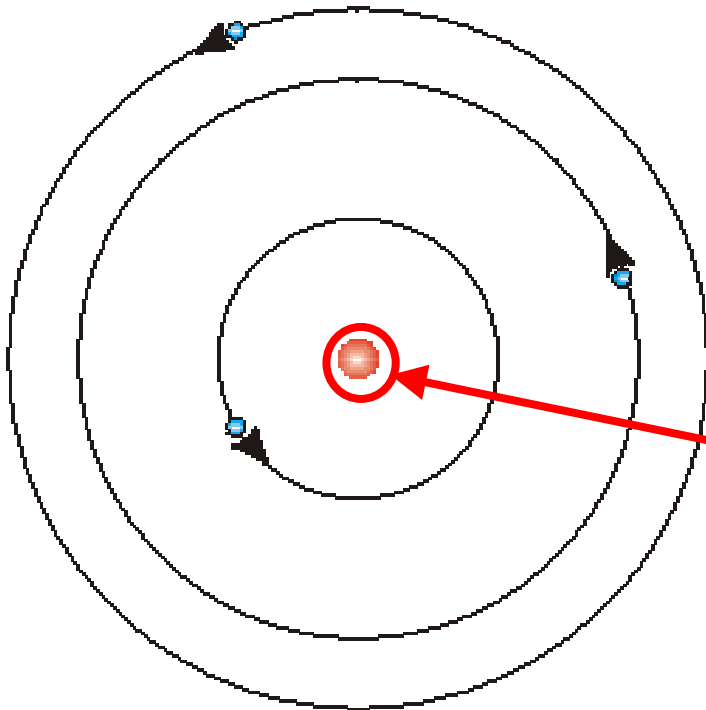
Positronisches Wasser

Positronisches Wasser ist ein wasserähnliches Molekül, das aus Sauerstoffatomen und Positroniumatomen besteht. Es wurde erstmals 1998 von amerikanische Physiker erschaffen.

Myonische Atome

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2 4\pi\epsilon_0}{Ze^2 m_0}$$

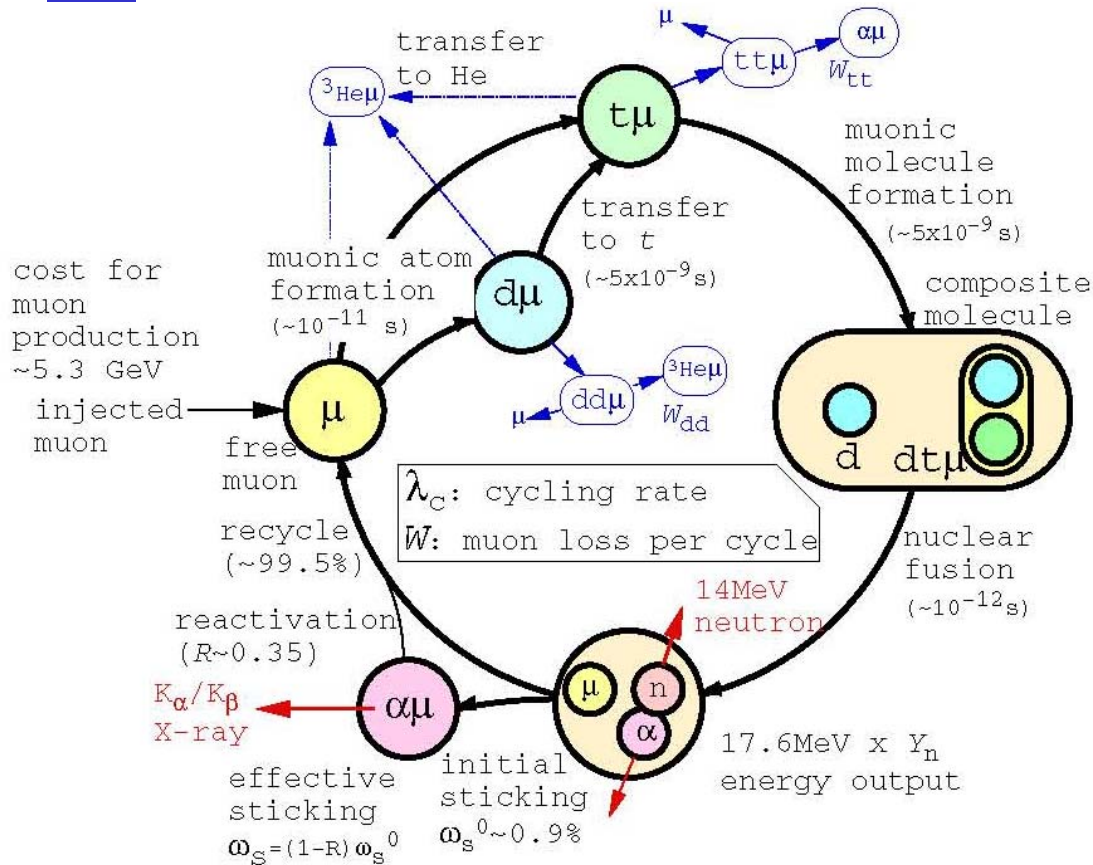
$$E_n = \frac{m_0 e^4}{8\epsilon_0 h^2} \frac{1}{n^2}$$



Elektronenmasse!

μ -Meson $m_\mu = 207 m_e$

Myon-Katalysierte Fusion



- Freies Myon
- Einfang und Bildung eines $d\mu$ Moleküls
- dt -Fusionsreaktion
- Freies Myon
- Problem: Myon müsste ca. 50 mal wiederverwendet werden



Anwendungen

- Fiction
 - Anti-Materie-Antrieb
 - Antimaterie-Werfer (Stanislaw Lem)
- Myon-Katalysierte Fusion
- Materialforschung
- Medizin, da Positronen sind einfach nachzuweisen
- MuSTAnG (Spaceweather Telescope for Anisotropies Greifswald)



Anwendung: Raumantrieb

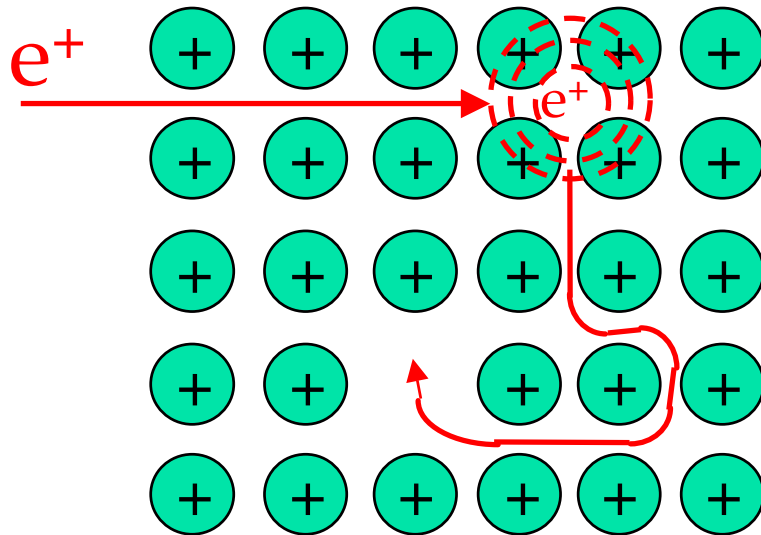
Nicht völlig abwegig, da Anti-Materie wegen

$$E=mc^2 \text{ mit } c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

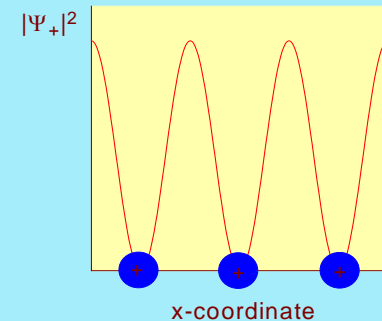
die höchste Energiedichte besitzt:

- Anti-Materie: 930 MeV pro Proton
- Fusion: 4 MeV pro Proton
- Chemische Reaktion: 0,1 eV pro Proton
- Faktor $\cong 10^{10}$

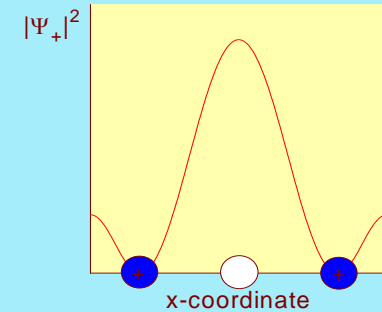
Anwendung: Materialforschung



Non-localized positron wavefunction

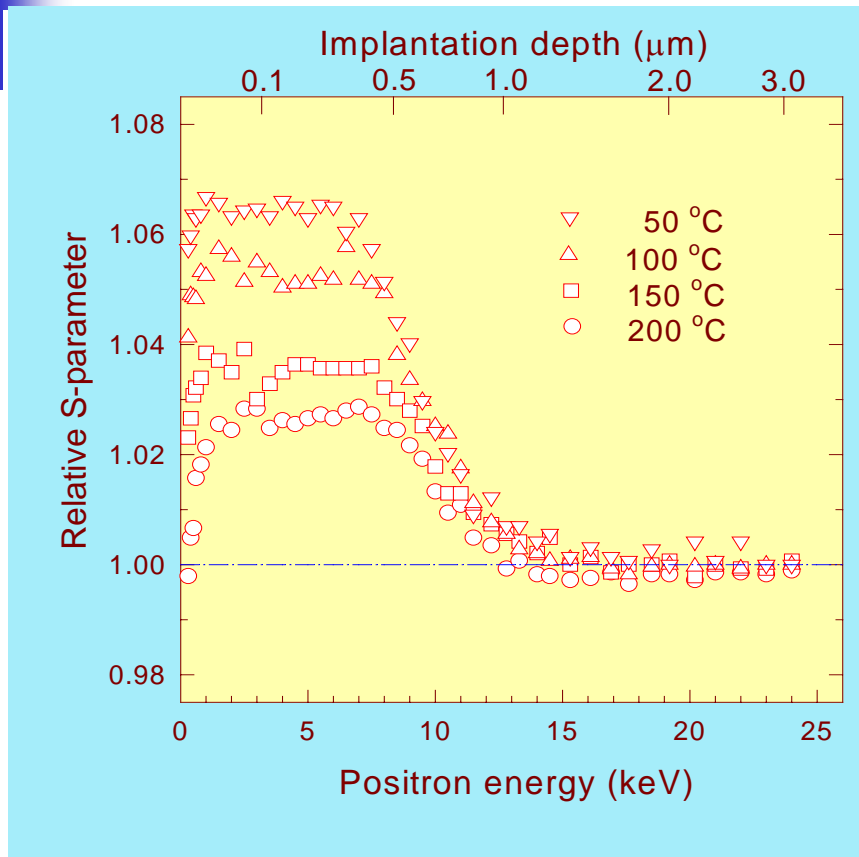


Trapped positron wave function



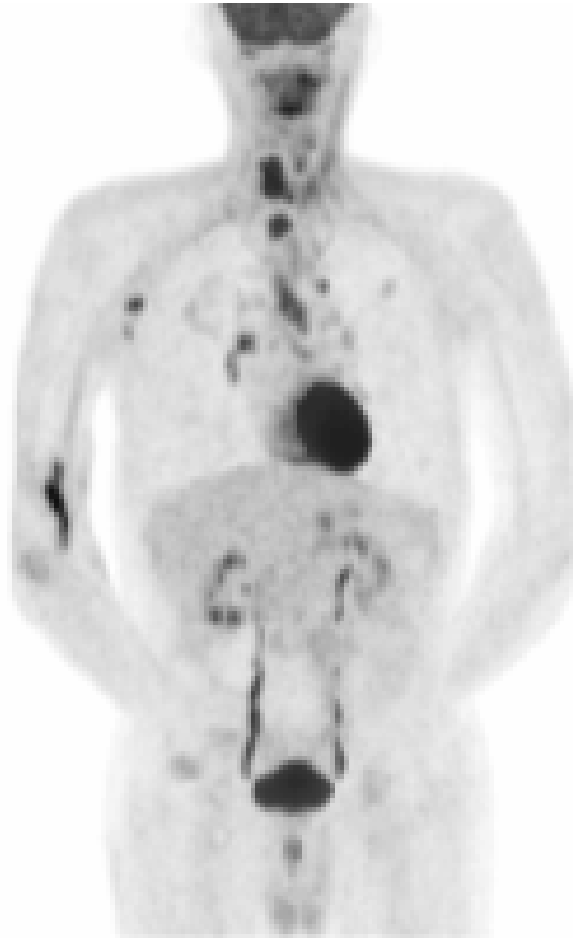
- Positronen können im Festkörper frei diffundieren, oder
- werden in Fehlstellen eingefangen (lokalisiert).
- Eingefangene Positronen können zur Untersuchung von Fehlstellen benutzt werden.

Positron annihilation depth profiling



Tiefenverteilung von Defekten in einer 1 μm dicken amorphen Si:H Schicht auf einem Si Substrat abgeschieden mittels PECVD bei verschiedenen Temperaturen.

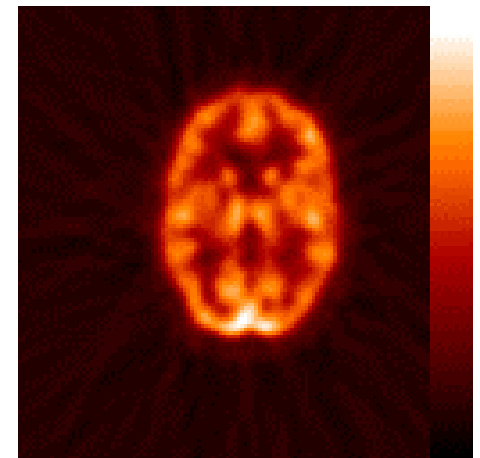
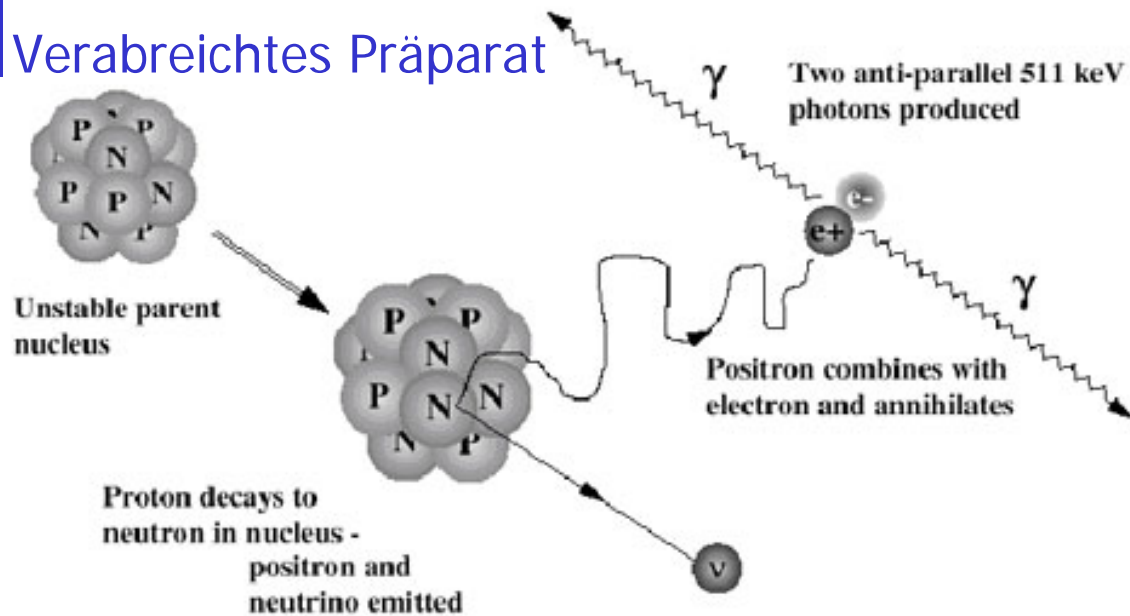
Positronen-Emissions-Tomographie



Mit Hilfe der Positronen-Emission-Tomographie (PET) kann der Arzt abnormale Zell-Aktivitäten in biologischen (menschlichen) Zellen untersuchen und beispielsweise Krebs (z.B. Brust-, Lungen- oder Darmkrebs) nachweisen. Hierzu wird ein kurzlebiger Positronenstrahler intravenös verabreicht und die emittierte Strahlung in PET/CT Scanner aufgenommen. PET Aufnahmen sind einfach, schnell, schmerzlos und offerieren den Patienten lebenswichtige und akkurate Informationen in wichtigen Gesundheitsfragen.

Positronen-Emissions-Tomographie

Verabreichtes Präparat



PET-Aufnahme eines menschlichen Gehirns

Physik in Greifswald



Vielen Dank
für Ihr Interesse





Literaturhinweise

- Zahlreiche Informationen und Bilder sind im Internet erhältlich, u.a. von
 - Wikipedia, <http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia>
 - NASA
 - ESA
 - CERN
- Besonders hervorzuheben:
 - Bernhard Spaan, TU Dresden, Powerpoint-Präsentation „Symmetrie: Das Urprinzip der Schöpfung“ (2000)