The background of the slide is a composite image of two galaxies. On the left is a blue and purple galaxy, and on the right is an orange and yellow galaxy. A semi-transparent dark grey rectangular box is overlaid in the center, containing the title and contact information.

Brennpunkte extragalaktischer Forschung

Silke Britzen

Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn

E-mail: sbritzen@mpifr-bonn.mpg.de

Web: www.mpifr-bonn.mpg.de/staff/sbritzen/

Heute ...



- 30.10. Gamma-Ray Bursts
- 13.11. GUT & TOE (Stringtheorie, etc.)
- 27.11. LHC & Higgs
- 11.12. Higgs & die Physik jenseits des Standardmodells

Winterferien: 23.12.-06.01.10

- 08.01.10 Das Puzzle: Dunkle Materie, der LHC und die Frühphasen des Universums

- **22.01.10 LHC: Materie & Antimaterie**

- 05.02.10 Zeitfragen

Heute im Detail

- **22.01. LHC: Materie & Antimaterie**

- Antimaterie
 - Kurze Einführung
 - Die Suche nach Antimaterie
- Die Suche nach Antimaterie (naher Weltraum)
 - ASM, ASM-02 auf der ISS
- Erzeugung von Antimaterie auf der Erde (Teilchenbeschleuniger)
 - Antiwasserstoff
- Das Materie/Antimaterie Problem
 - Der Urknall
- CP-Verletzung: Die Lösung des Problems?
- Experimente am LHCb



A central white box containing the word "Antimaterie" is surrounded by a starburst of green and blue lines radiating outwards. Several red spheres are positioned at the ends of these lines, and smaller white dots are scattered throughout the radiating pattern.

Antimaterie

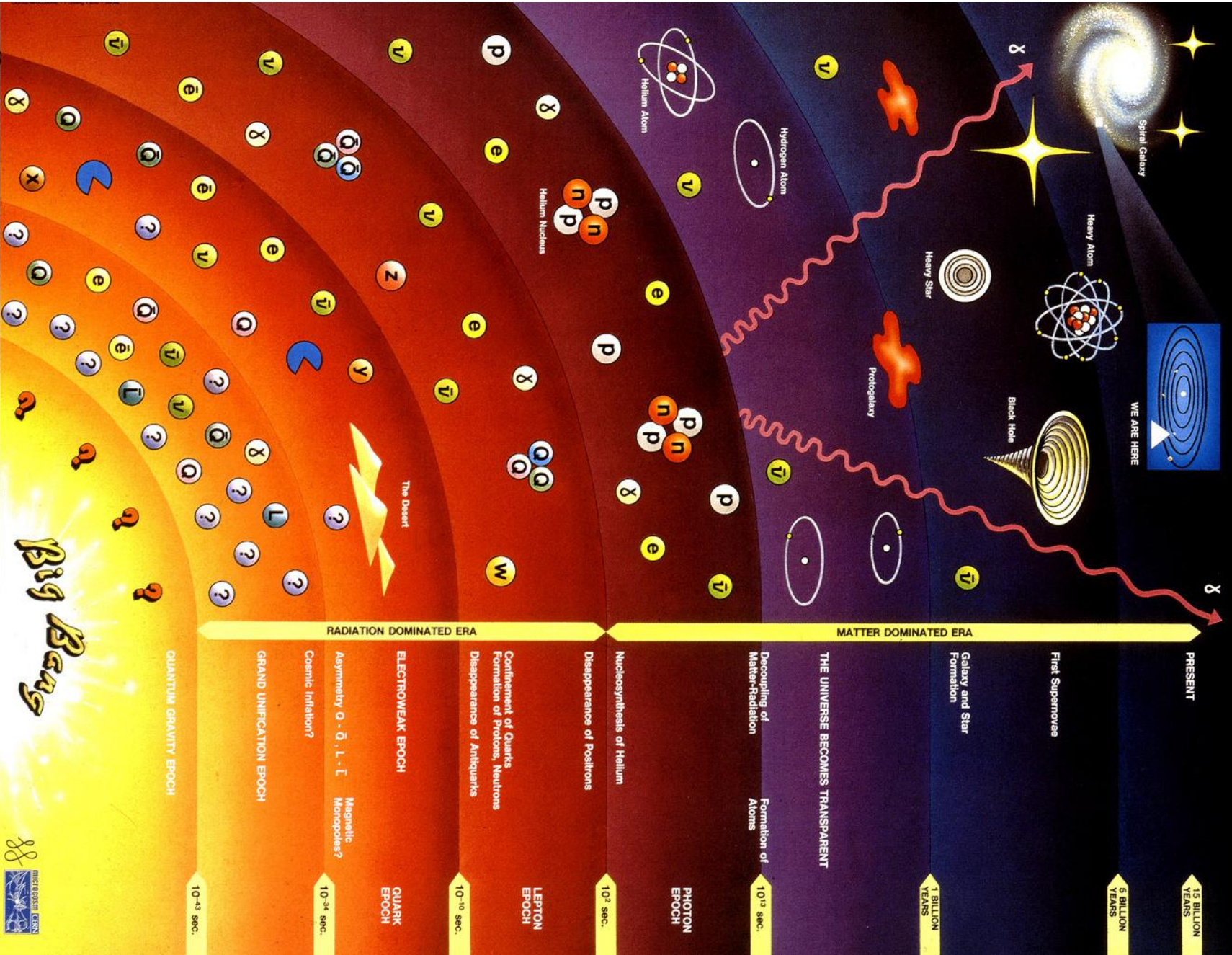
Antimaterie

- Antimaterie ist Materie, die aus Antiteilchen aufgebaut ist
- Besteht aus Atomen oder Molekülen, die Hülle aus Positronen und Kerne aus Antiprotonen und ggf. aus Antineutronen
- Schon einzelne dieser Antiteilchenarten, z.B. Positronen werden als Antimaterie bezeichnet
- Antimaterie ist sehr kurzlebig: beim Aufeinandertreffen eines Teilchen-Antiteilchen-Paares vernichten sie sich gegenseitig unter Energiefreisetzung
- **Einige leichte Antiteilchen (Positronen) finden sich in der Natur überall**
- **Antimaterie aus Atomen oder Molekülen kommen, soweit bekannt, nicht natürlich vor**



Wo ist die Antimaterie geblieben?

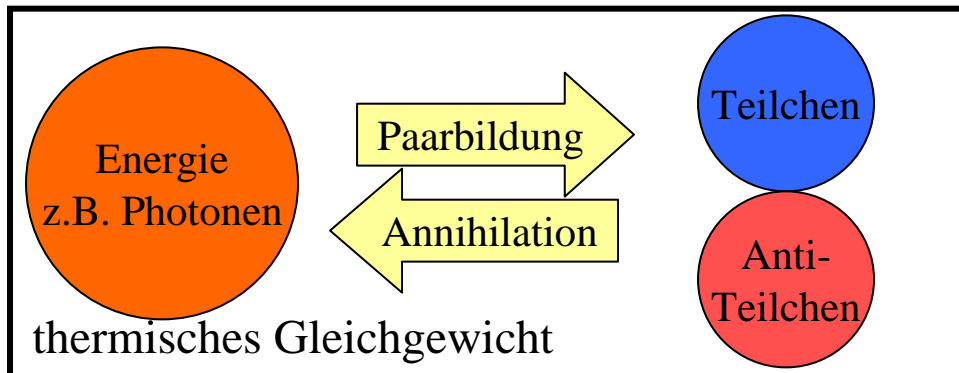
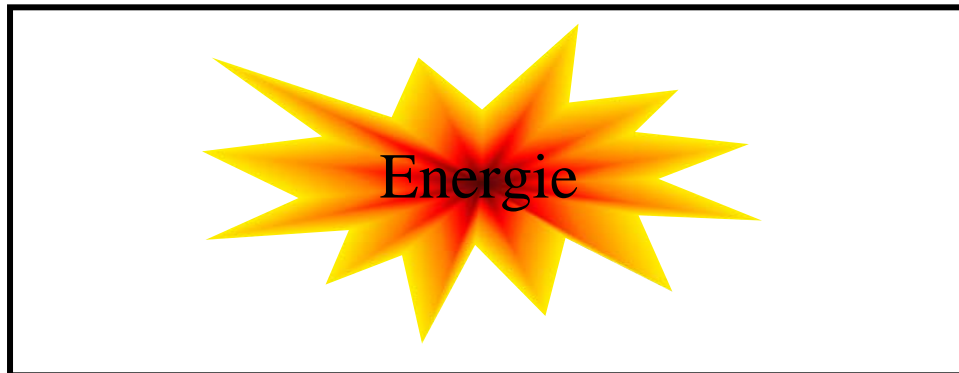
History of the Universe



Big Bang



Entstehung der Materie im naiven Urknall-Modell



Weltall entsteht durch Expansion aus einem sehr dichten, heißen Anfangszustand

$$\frac{n_b}{n_\lambda} = \frac{n_{\bar{b}}}{n_\lambda} \approx 1$$

- Teilchen und Antiteilchen entstehen in gleicher Zahl
- im thermischen Gleichgewicht:

$$\frac{n_b}{n_\lambda} = \frac{n_{\bar{b}}}{n_\lambda} \approx \left(\frac{m_b}{T} \right)^{3/2} \exp(-m_b / T)$$

- mit Ausdehnung des Alls hört die Annihilation auf: „Ausfrieren“
- für Nukleonen passiert das bei $T \sim 20 \text{ MeV}$:

$$\frac{n_b}{n_\lambda} = \frac{n_{\bar{b}}}{n_\lambda} \approx 10^{-18}$$

Wieviel Materie gibt es?

- **Dichte der Baryonen**
(Protonen, Neutronen, ...)
kann aus der Häufigkeitsverteilung der
leichten Elemente abgeleitet werden:

$$\eta \equiv \frac{n_b}{n_\gamma} \approx (2.6 \dots 6.2) \times 10^{-10}$$

- **Normierung** auf Photonendichte in
kosmischer 3K Hintergrundstrahlung

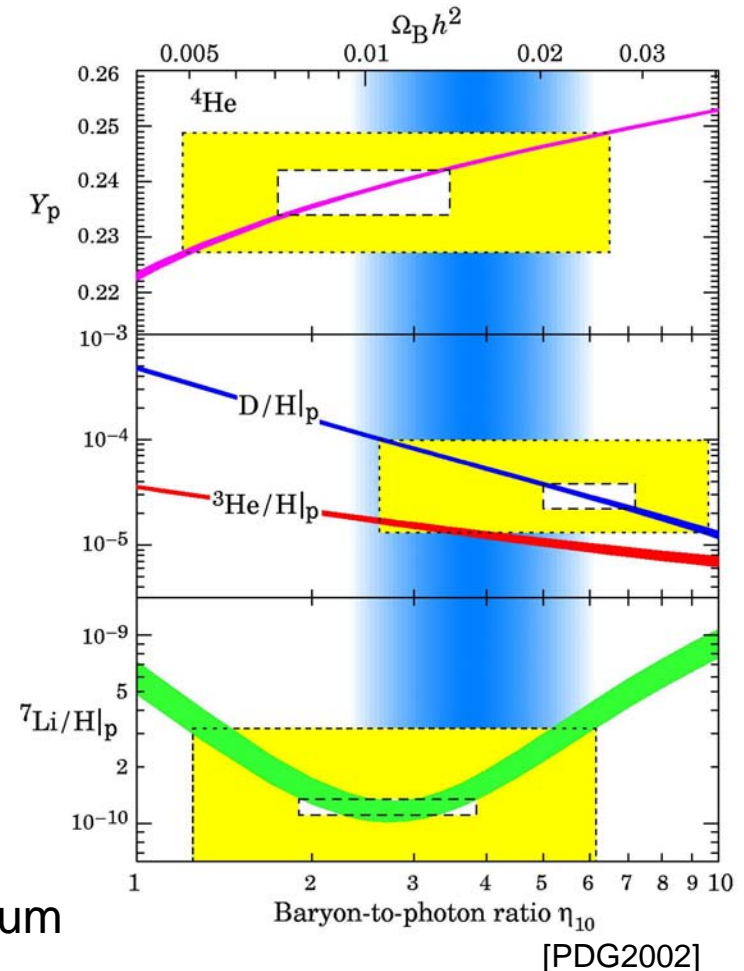
$$n_\gamma \approx 420 \text{ cm}^{-3}$$

- in anderen Einheiten:

$$\rho_B = (1.8 \dots 4.3) \times 10^{-31} \text{ g cm}^{-3}$$

oder: 1 Baryon in etwa 5 m^3

oder: 10^{78} Baryonen im sichtbaren Universum



- aus Anisotropie des Mikrowellenhintergrunds: $\eta = (6.0^{+0.8}_{-1.1}) \times 10^{-10}$

Entstehung der Materie im naiven Urknall-Modell

- $\frac{n_b}{n_\lambda} \approx 10^{-18}$ ist 8 Größenordnungen kleiner als der beobachtete Wert!

- bei $T \sim 40 \text{ MeV}$ (etwa 1 ms nach dem „Urknall“) war $\frac{n_b}{n_\lambda} \approx 10^{-10}$

Könnten Materie und Antimaterie räumlich getrennt worden sein?

Zu dieser Zeit enthielten kausal zusammenhängende Gebiete etwa 10^{-7} Sonnenmassen \rightarrow kann Beobachtung nicht erklären

- weder die Dominanz von Materie noch ihre Dichte können in diesem Modell verstanden werden

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?

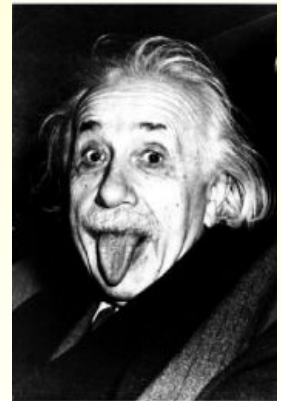
- Materie und Antimaterie vernichten einander!

⇒ 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 ✓

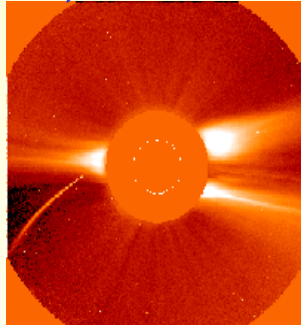


Materie - Antimaterie

➤ Antimaterie im Sonnensystem?

⇒ Besuch von Mond, Mars etc.. ✓

"Courtesy of SOHO/LASCO consortium"



⇒ Sonnenwind: Materie ✓

⇒ Keine Antimaterie im Sonnensystem ✓

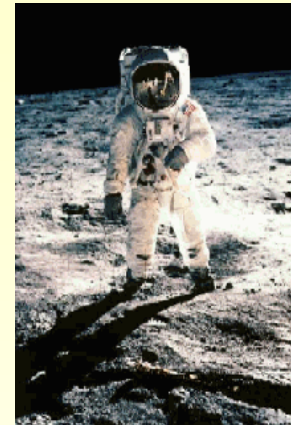
➤ Antimaterie in unserer Milchstraße?

⇒ Analyse von Meteoriten ✓

⇒ Kosmische Strahlung aus Milchstraße: Materie überwiegt ✓

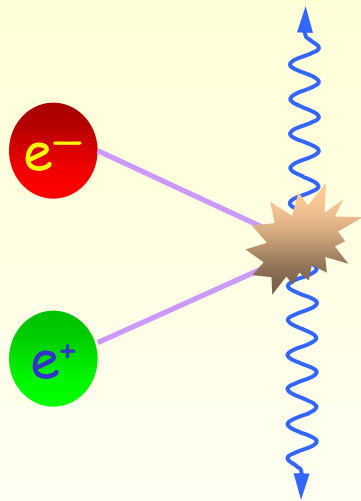
⇒ Materie überwiegt! ✓

☀ Was ist mit dem Rest des Universums?



Materie - Antimaterie

➤ Positron-Elektron Vernichtung



Photon = „Lichtblitz“ mit hoher Energie

Photonen haben charakteristische Energie:

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

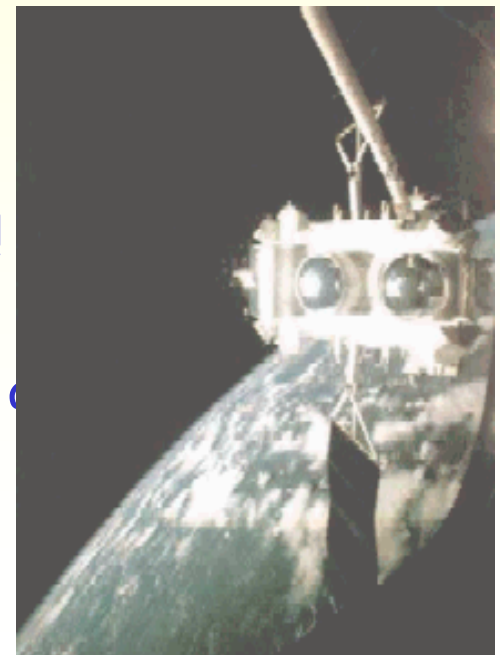
Photon

Photonen werden in Atmosphäre absorbiert!

⇒ Nachweis: Detektoren in Erdumlaufbahn

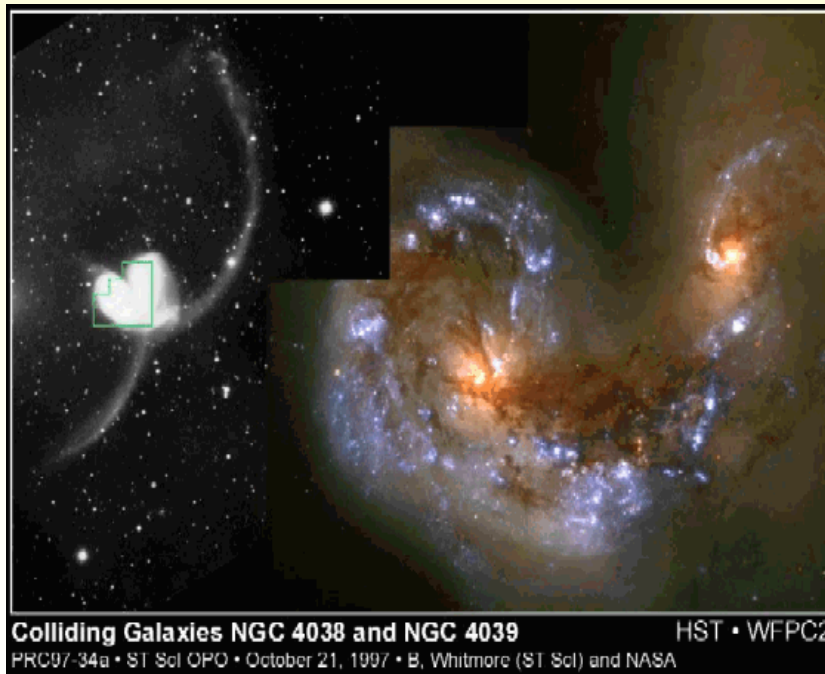
⇒ Keine Anzeichen für größere Mengen an
Antimaterie im Weltall !

(Hinweise auf Produktion von Antimaterie in unserer Galaxie)



Materie - Antimaterie

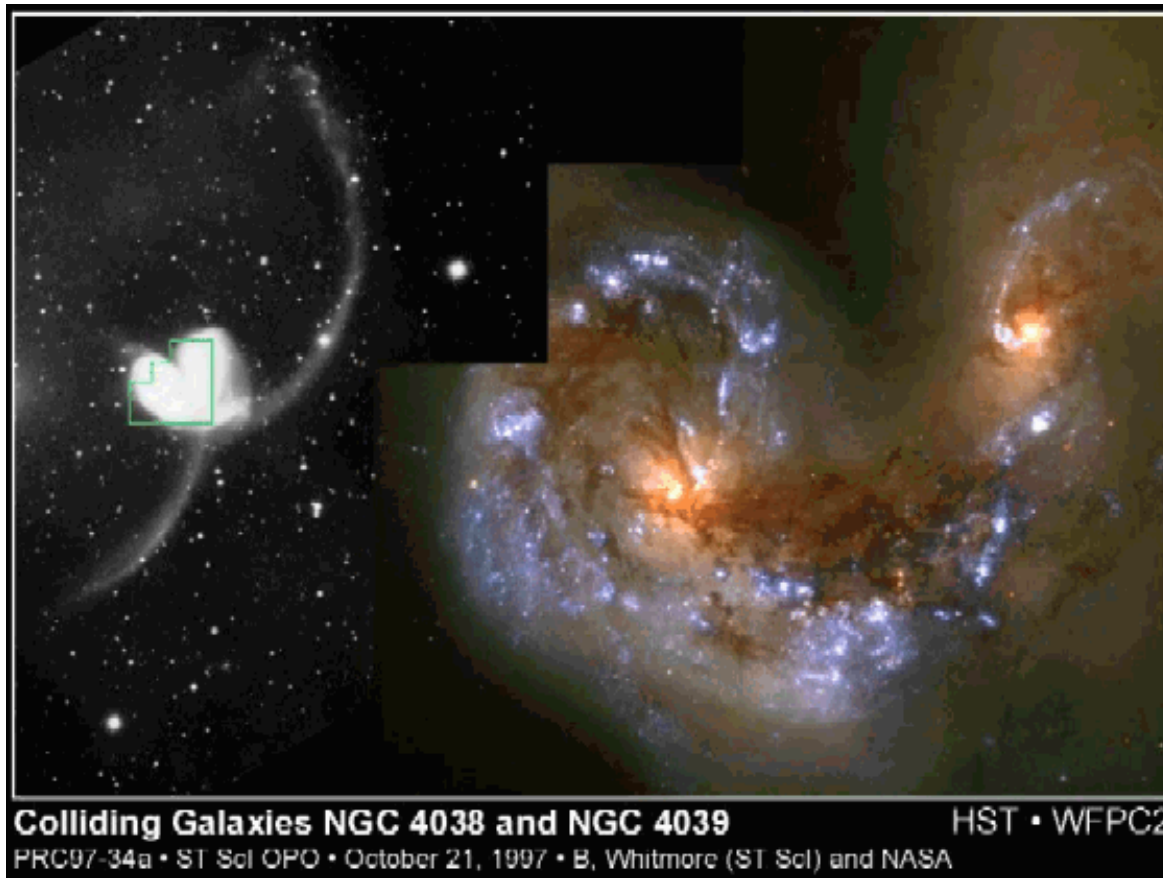
- Gibt es vielleicht Galaxien aus Antimaterie?
 - Beobachtung von Kollisionen von Galaxien!




⇒ Keine Hinweise auf Antimaterie

Unsere Welt besteht aus Materie

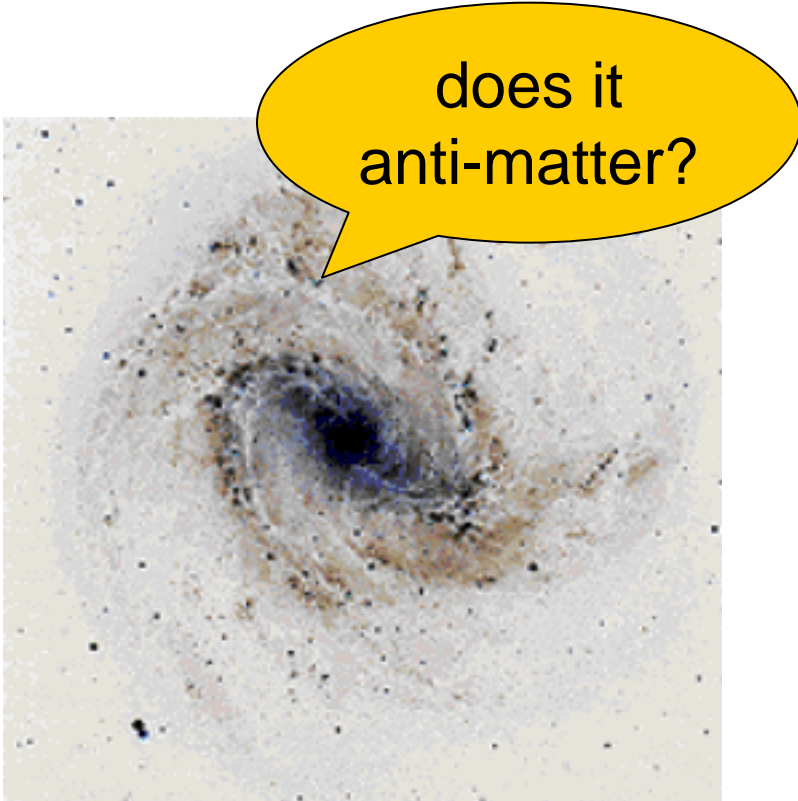
- es gibt keine astronomische Hinweise auf Antimaterie wie etwa Gamma-Strahlung aus Vernichtungsreaktionen



- Abschätzung: keine Antimaterie im Umkreis von ~1 Mrd. Lichtjahren

A photograph of a spiral galaxy with a bright yellow core and blue-tinted spiral arms, set against a black background with scattered white stars. A yellow speech bubble is overlaid on the upper right portion of the galaxy.

does it
matter?

A photograph of a spiral galaxy with a dark blue core and brownish-tan spiral arms, set against a light grey background with scattered dark blue and black specks. A yellow speech bubble is overlaid on the upper right portion of the galaxy.

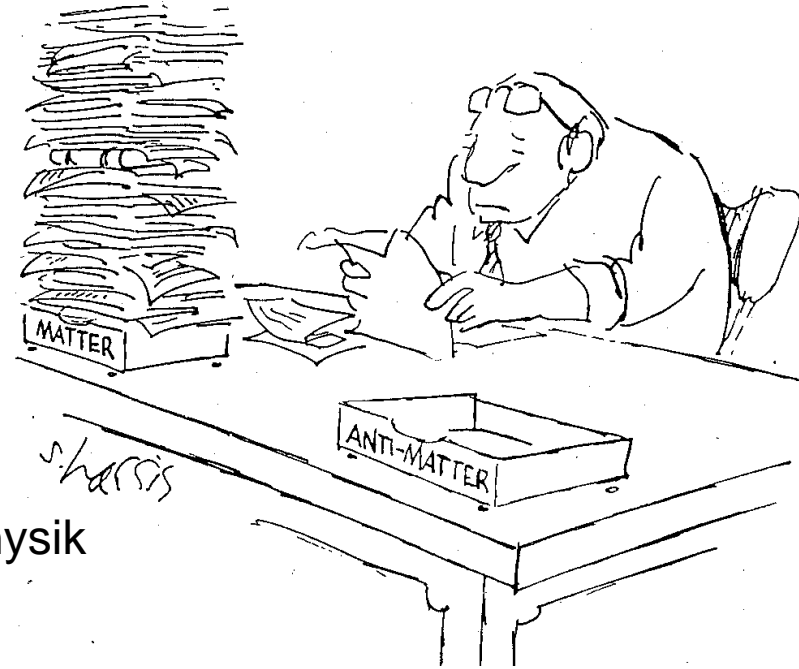
does it
anti-matter?

Unsere Welt besteht aus Materie

... und nicht Antimaterie

auf der Erde finden wir Antimaterie nur

- in Experimenten der Kern- und Teilchenphysik
- in der (sekundären) Höhenstrahlung
- in der kosmischen Strahlung
(konsistent mit pp -Kollisionen im interstellaren Gas)

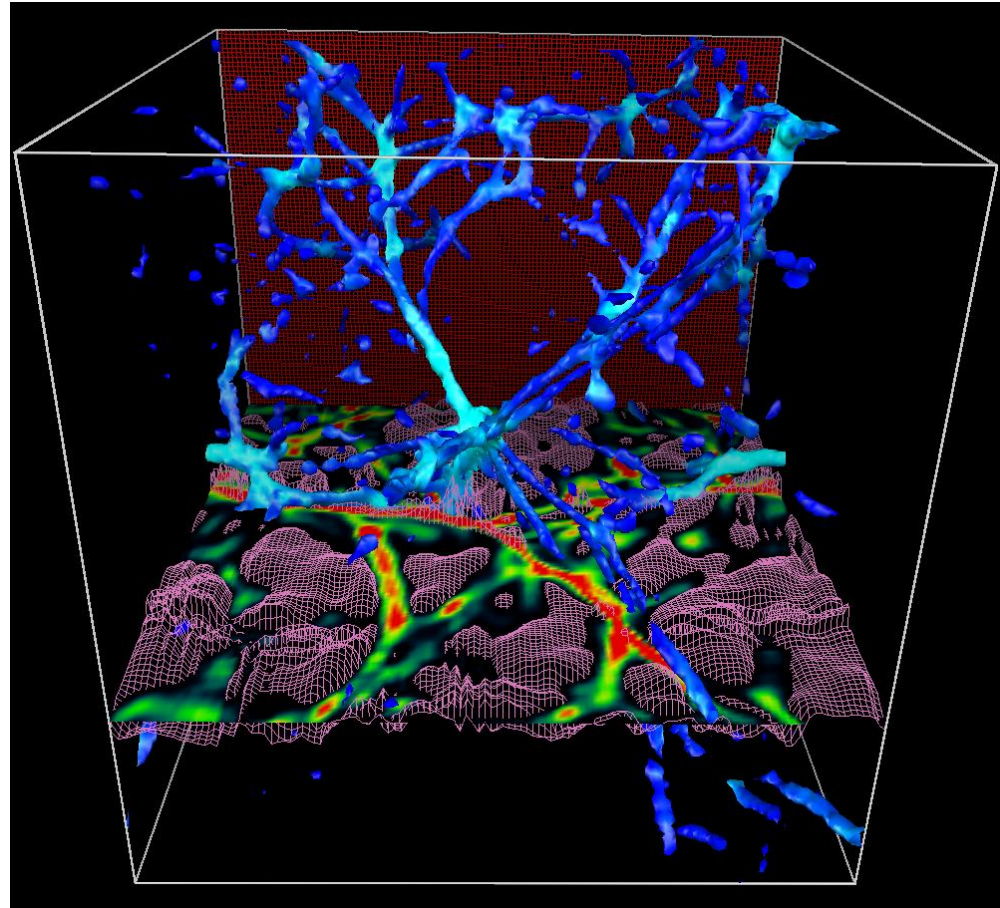


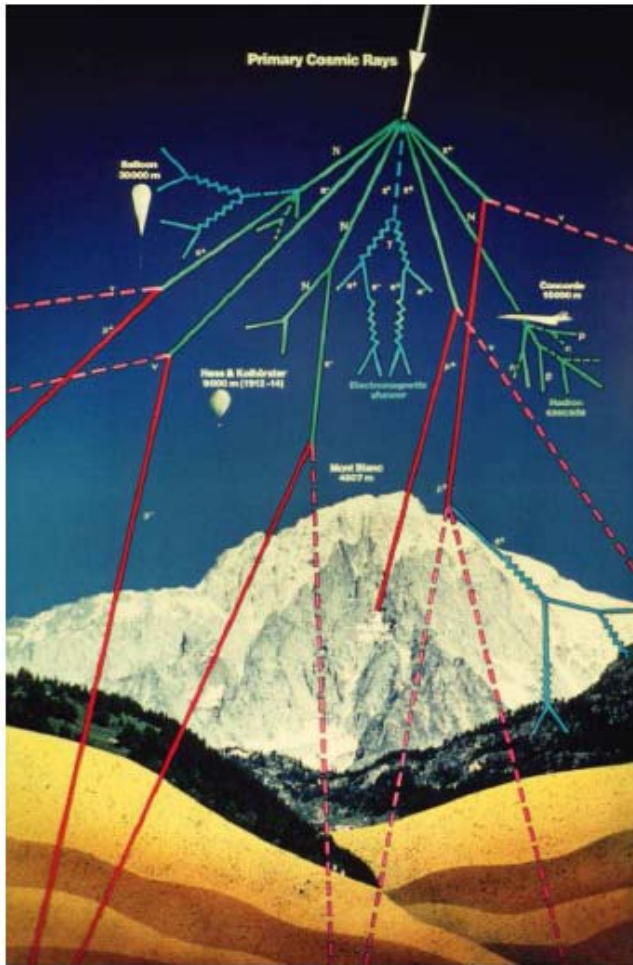


Die Suche nach Antimaterie im Weltraum

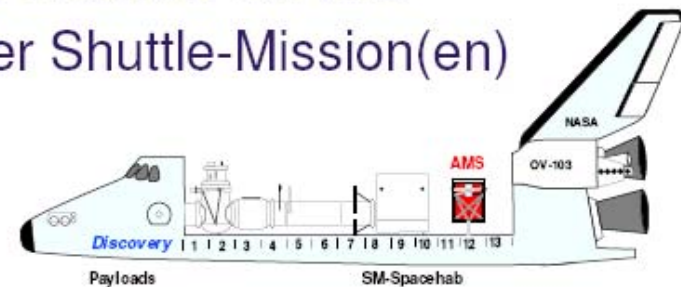
Was ist mit der Anti-Materie nach dem Urknall passiert ?

1. Es gibt eine Asymmetrie zwischen Materie und Anti-Materie die wir noch nicht kennen.
2. Es gibt Bereiche im Universum die aus Anti-Materie bestehen.
=> AMS Experiment





- Im Labor kennt man Antimaterie aus Sekundärreaktionen
- Suche nach primordialer Antimaterie, **Anti-Helium**, aus dem Weltall
 - Überreste vom Urknall
 - zu komplex für spätere Erzeugung
 - AMS-Detektor für ISS
 - bisher Shuttle-Mission(en)

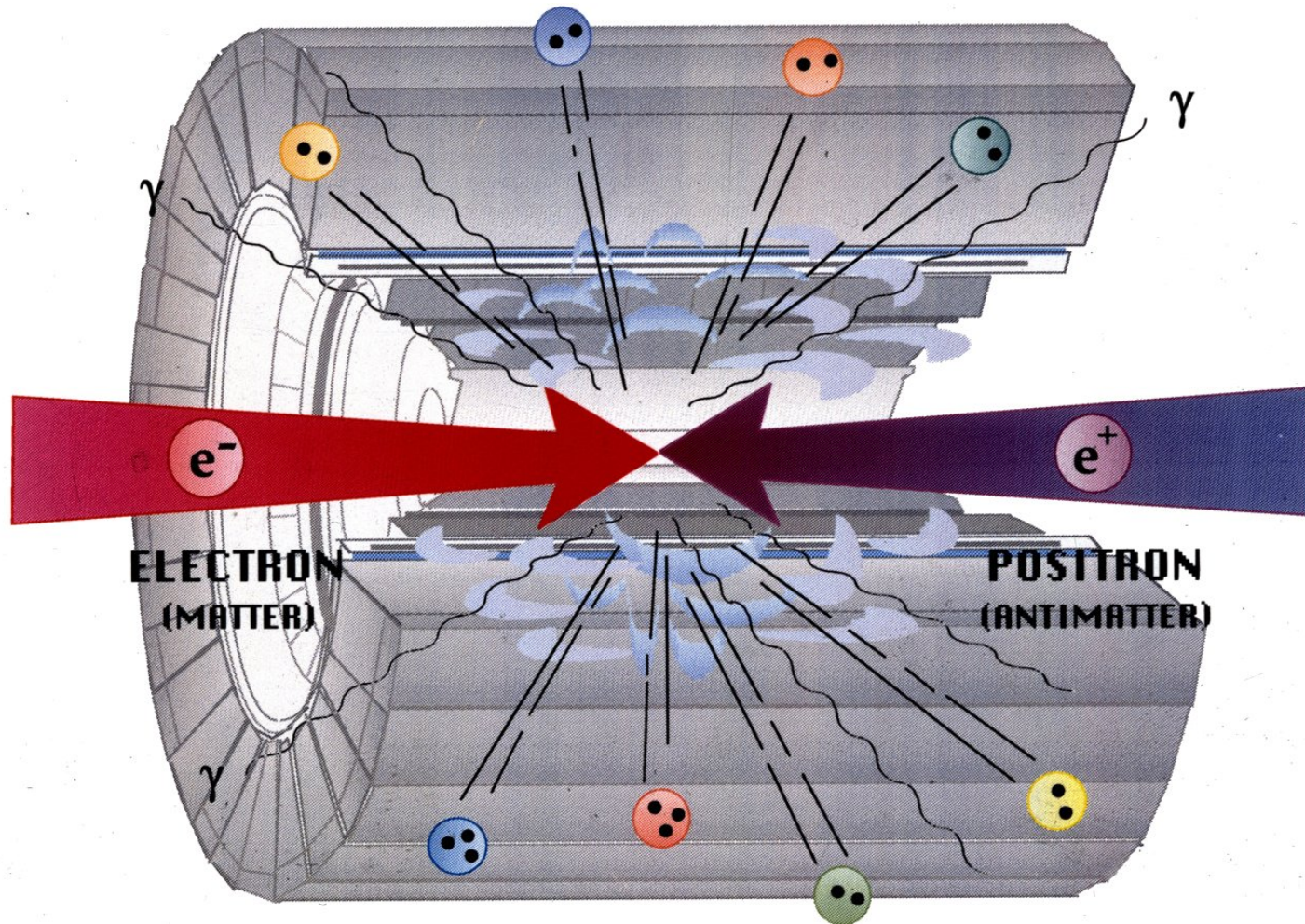


- keine Evidenz für Anti-Helium in der kosmischen Strahlung

ASM

- ASM= Alpha Magnetic Spectrometer
- Messung der Häufigkeit bestimmter Elemente und Isotope und deren Energiespektrum lassen sich Fragen nach der Herkunft der **kosmischen Teilchenstrahlung**, zu ihrem Einschluss durch das galaktische Magnetfeld und zu deren astrophysikalischen Prozessen, die die Teilchen auf extrem hohe Energien beschleunigen, beantworten.
- Gesucht werden: dunkle Materie, **Antimaterie**
- **Gesuchte Antimaterie: Anti-Helium, Anti-Kohlenstoff, andere Anti-Kerne**
- Ein einziges **Anti-Helium** würde reichen

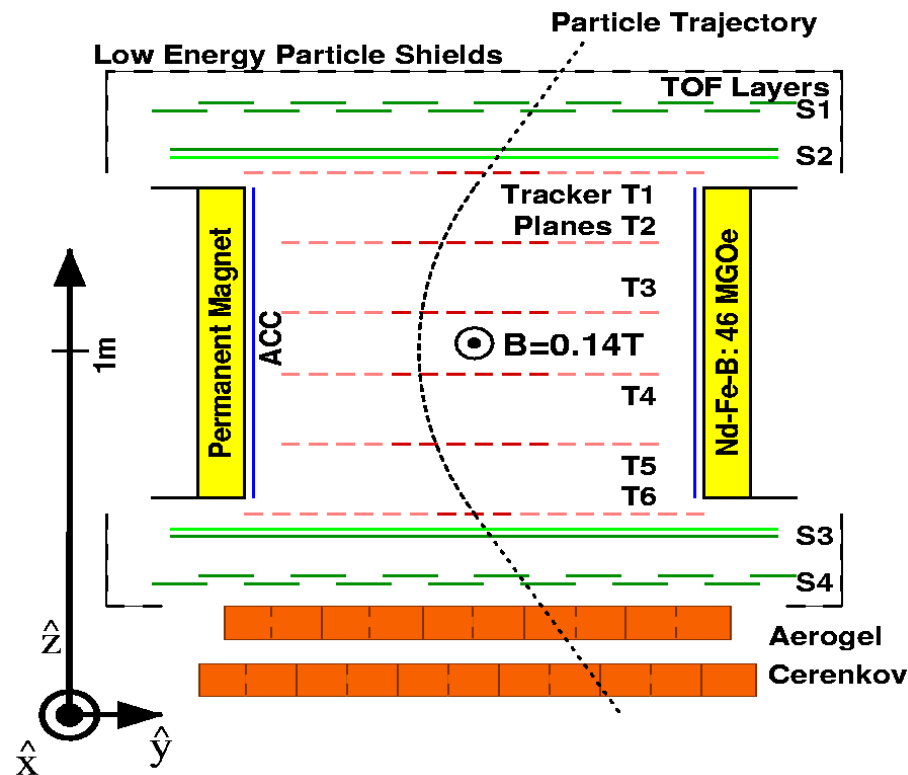
Materie \Leftrightarrow Anti-Materie



$$|m_T - m_{\bar{T}}| / m_T < 1 \cdot 10^{-18}$$

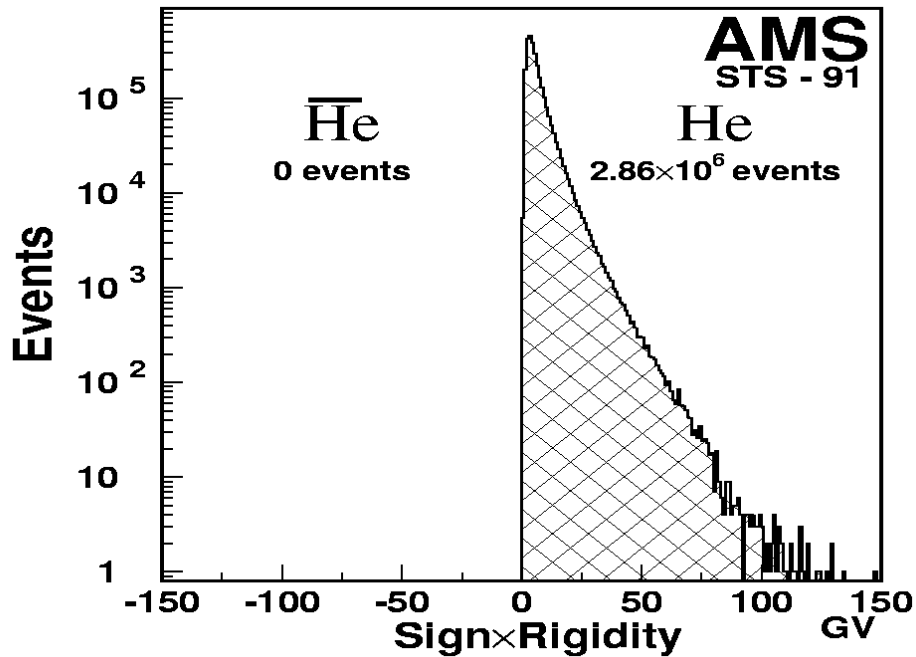
AMS-01 Configuration on STS-91 Flight

STS-91 Flight, June 2-12th, 1998



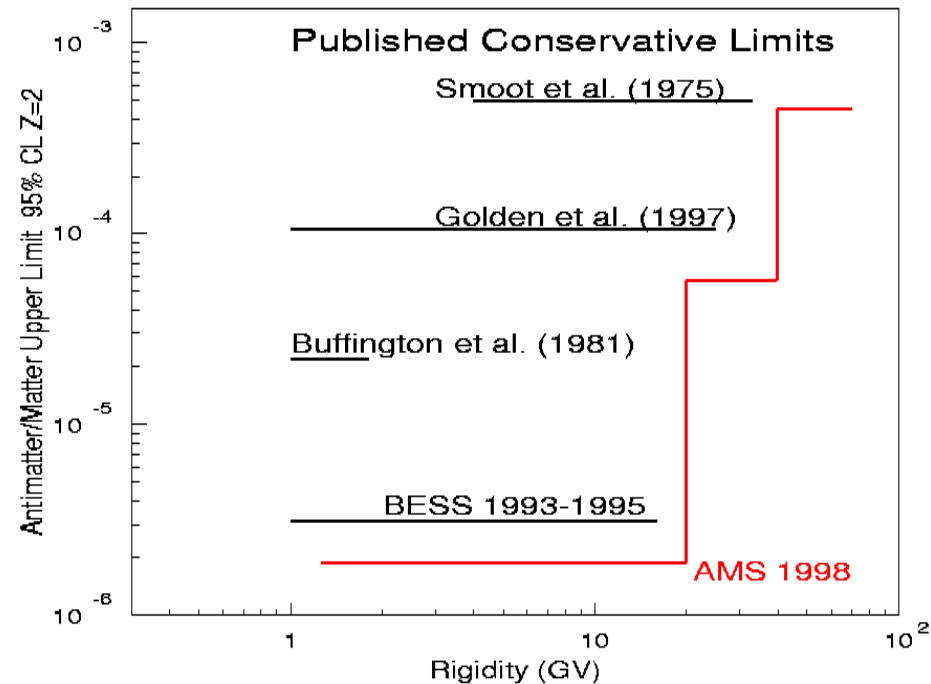
- Magnet: $Nd_2Fe_{14}B$, $BL^2 = 0.15 \text{ TM}^2$
- T.o.F: Four planes of scintillators;
 - β and Z measurements, up/down separation
- Tracker: Six planes of ds silicon detectors;
 - Charge sign, dE/dX up to $Z=8$, Rigidity (p/Z)
- Anticounters:
 - Veto stray trajectories and bckgnd particles from magnet walls
- Aerogel Threshold Čerenkov:
 - β measurements (1÷3 GeV/c) for better e/p separation
- Low Energy Particle Shielding (LEPS):
 - Carbon fibre, shield from low energy (<5MeV) particles

Suche nach Anti-Materie mit AMS-01



$$\frac{N_{\bar{\text{He}}}}{N_{\text{He}}} < 1.8 \cdot 10^{-6} \quad (@ 95\% \text{ CL})$$

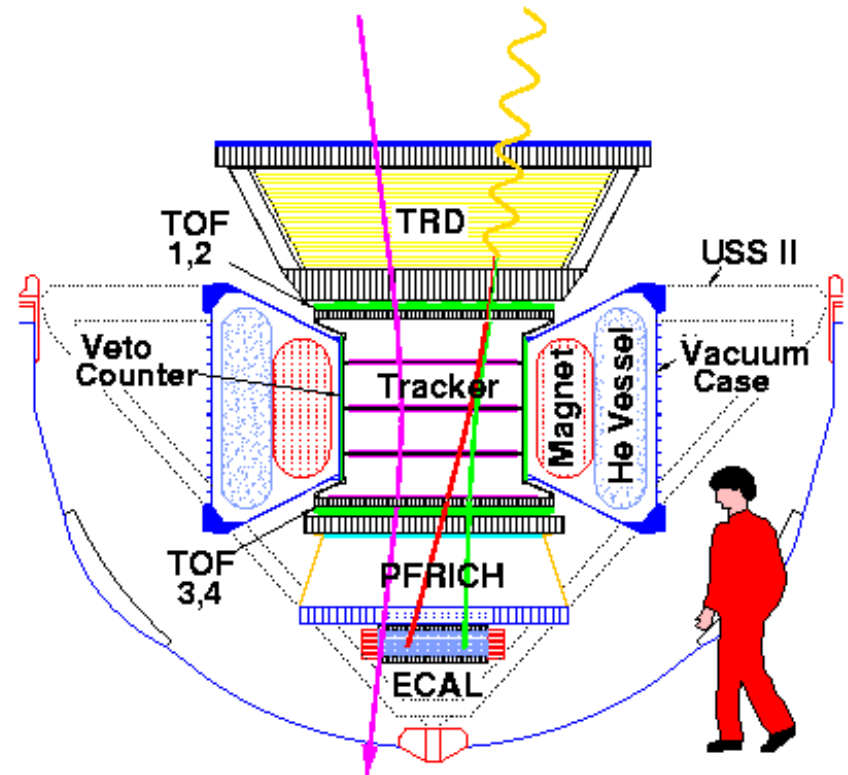
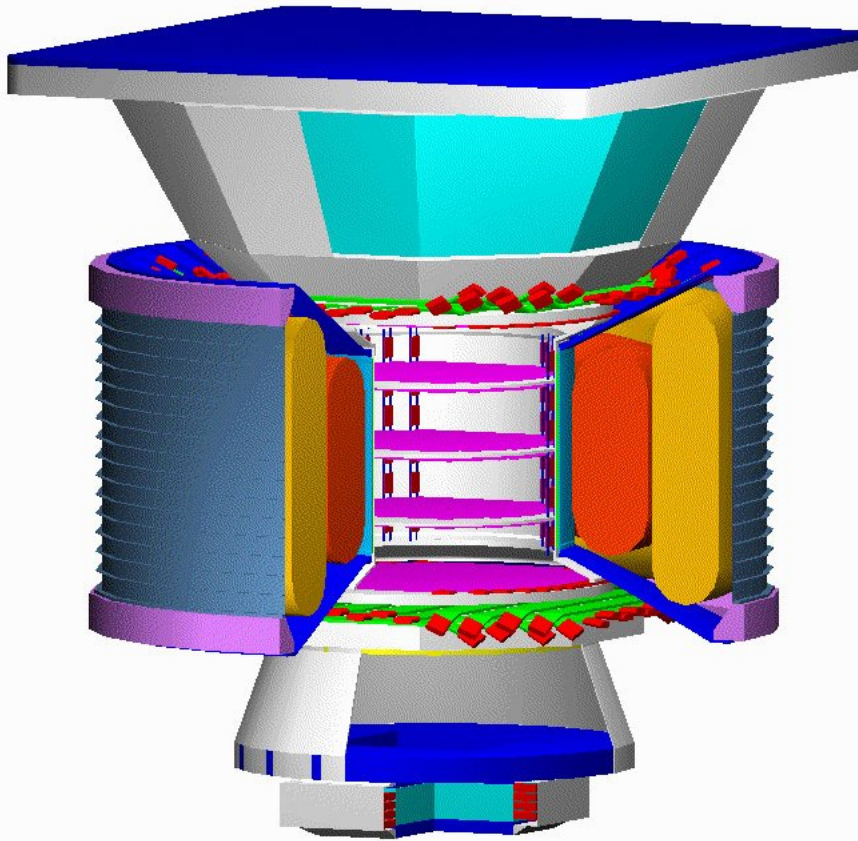
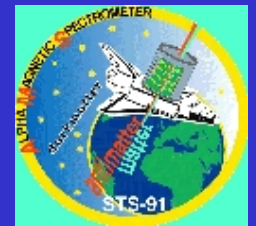
$$\text{Rigidity} : R = \frac{p \cdot c}{|Z|e} [\text{GV}]$$

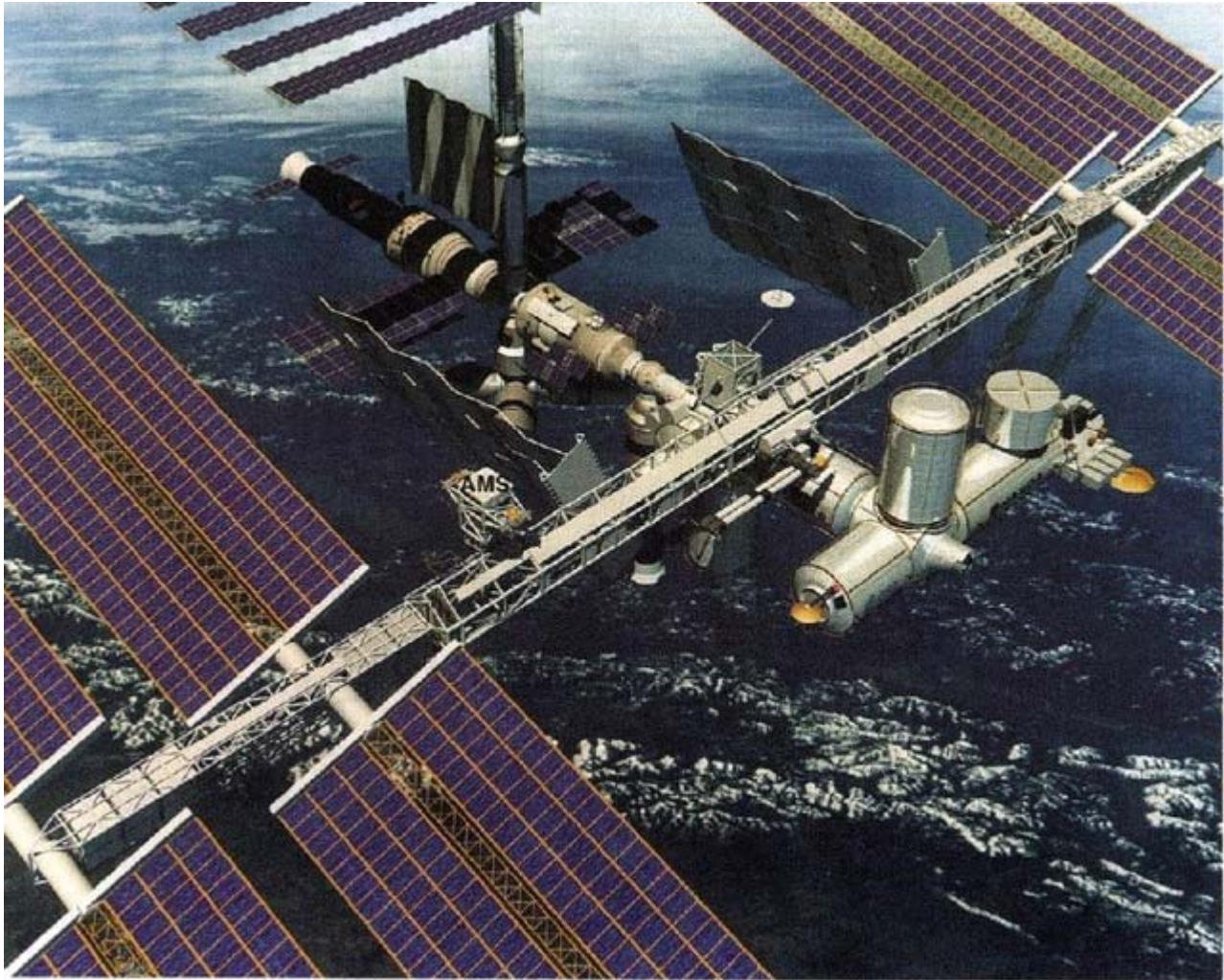


100 Mio geladene kosmische Teilchen – kein Hinweis auf Antimaterie



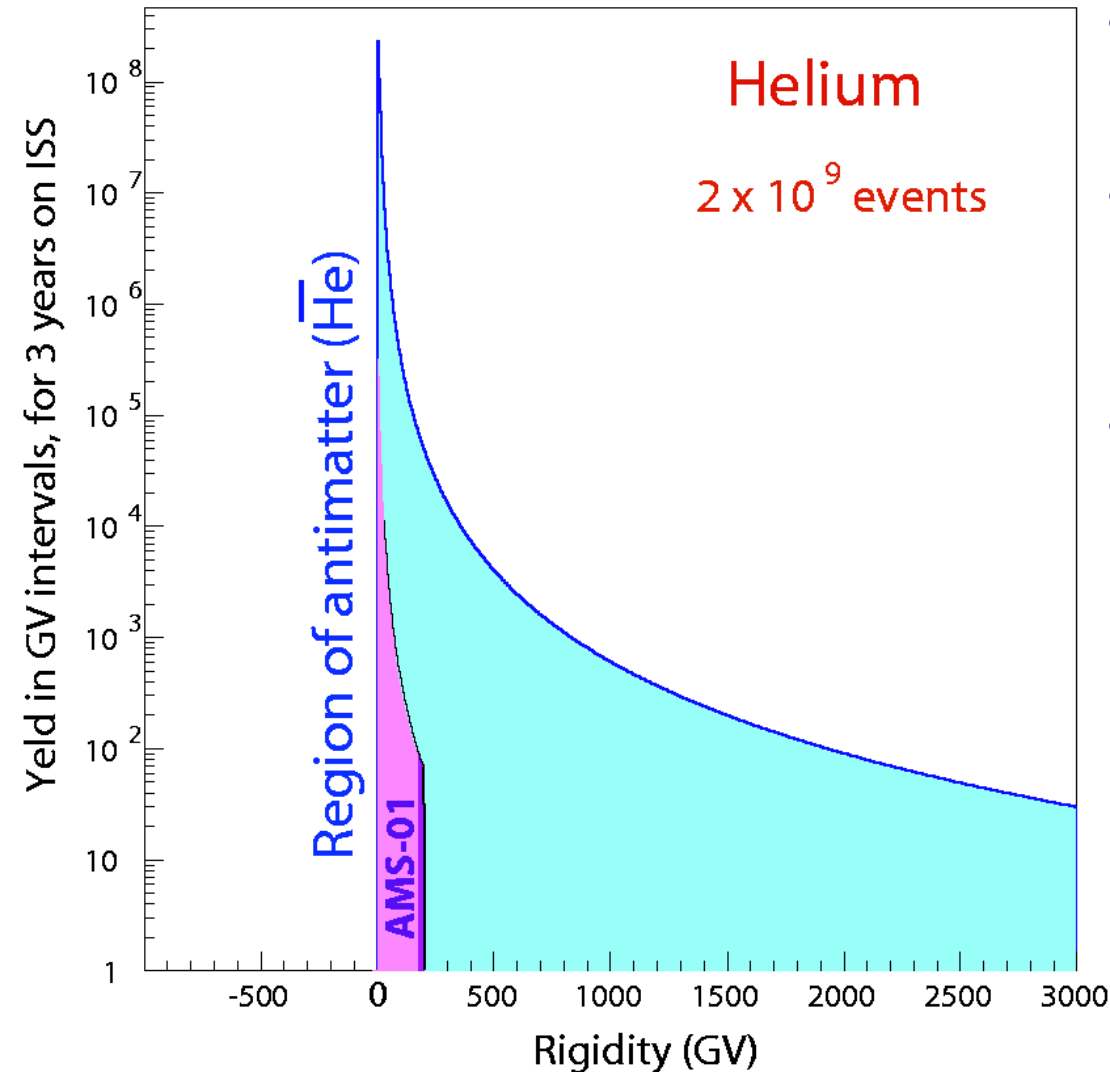
AMS-02



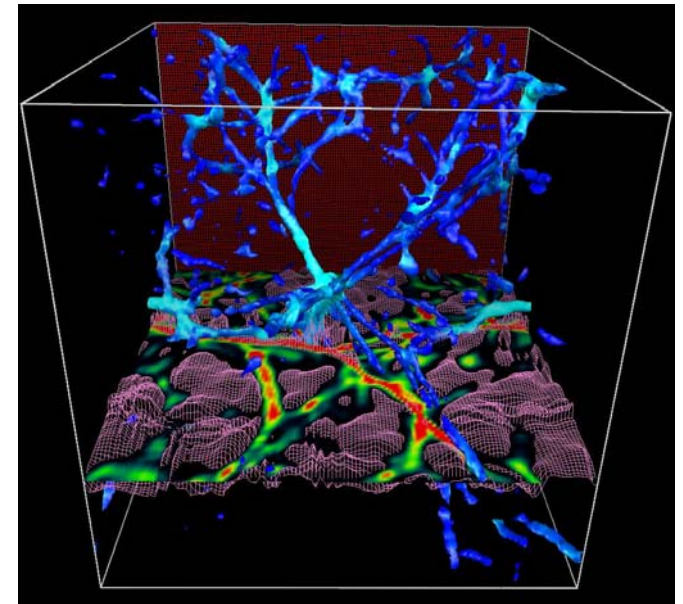


Modell der internationalen Raumstation ISS mit dem Alpha-Magnetischen Spektrometer AMS, das im All nach schweren Antielementen suchen soll.

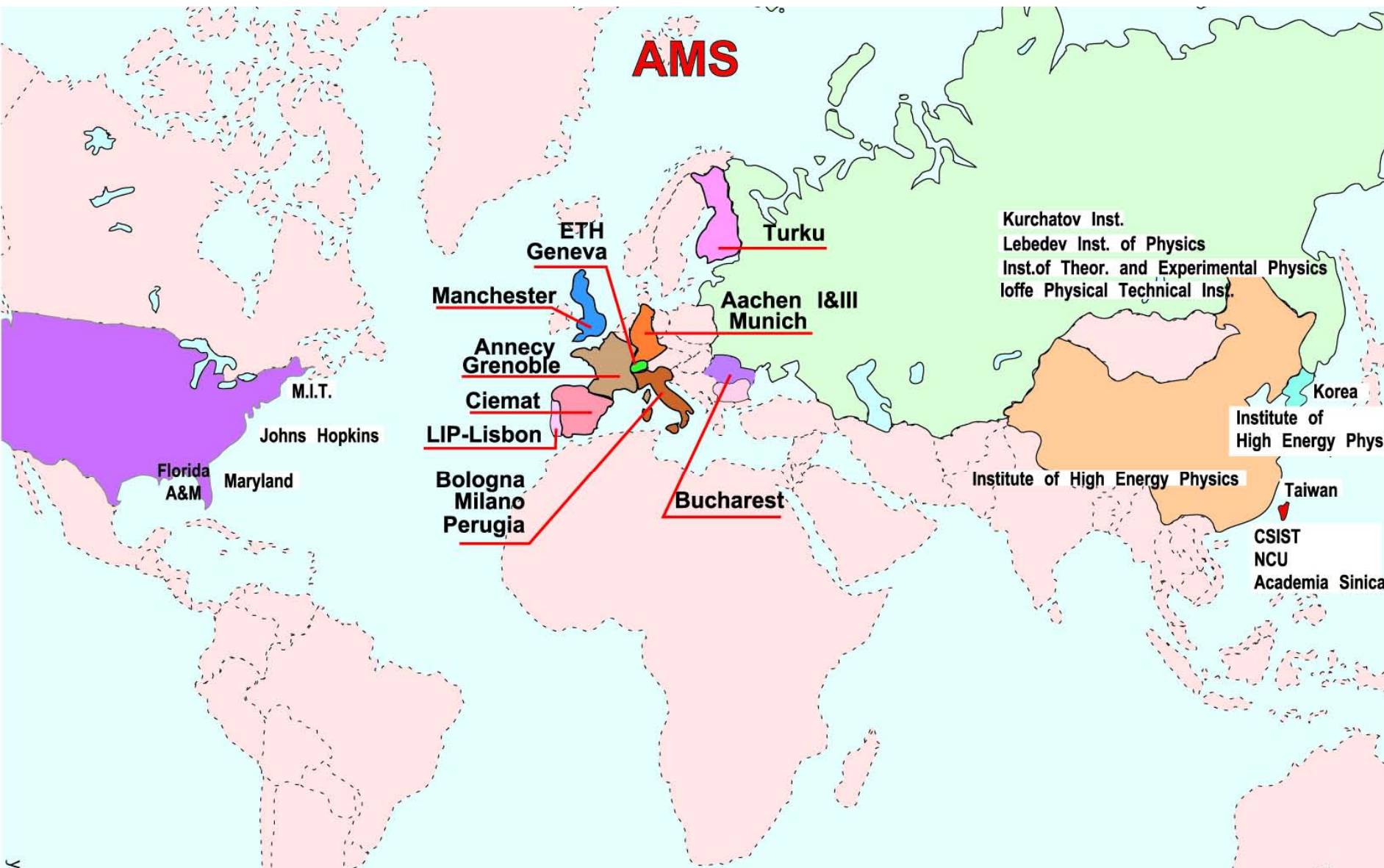
Search for Anti-Matter with AMS-02



- Time on ISS: 3 years
 - ↳ AMS02 statistics 10^3 AMS01
- superconductivity magnet
 - ↳ B-field: 0.15 T * 0.9 T
 - ↳ momentum reach x 6
- exclude a sphere of 1000 Mpc



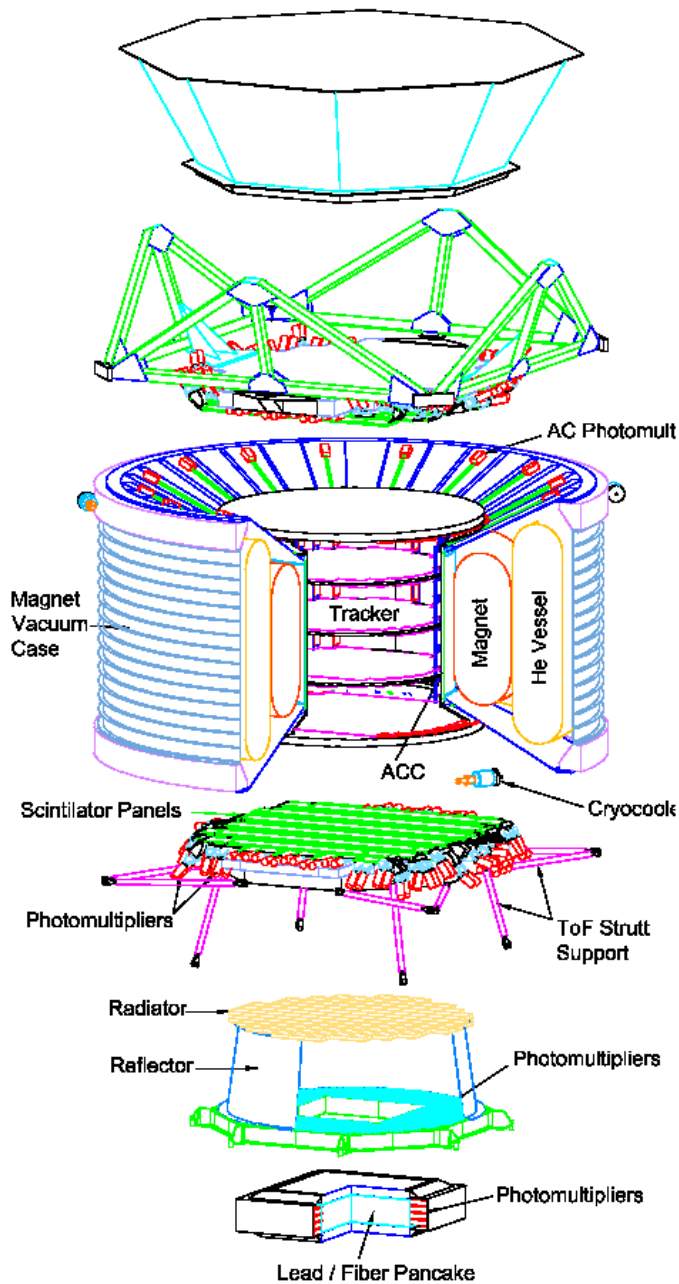
AMS



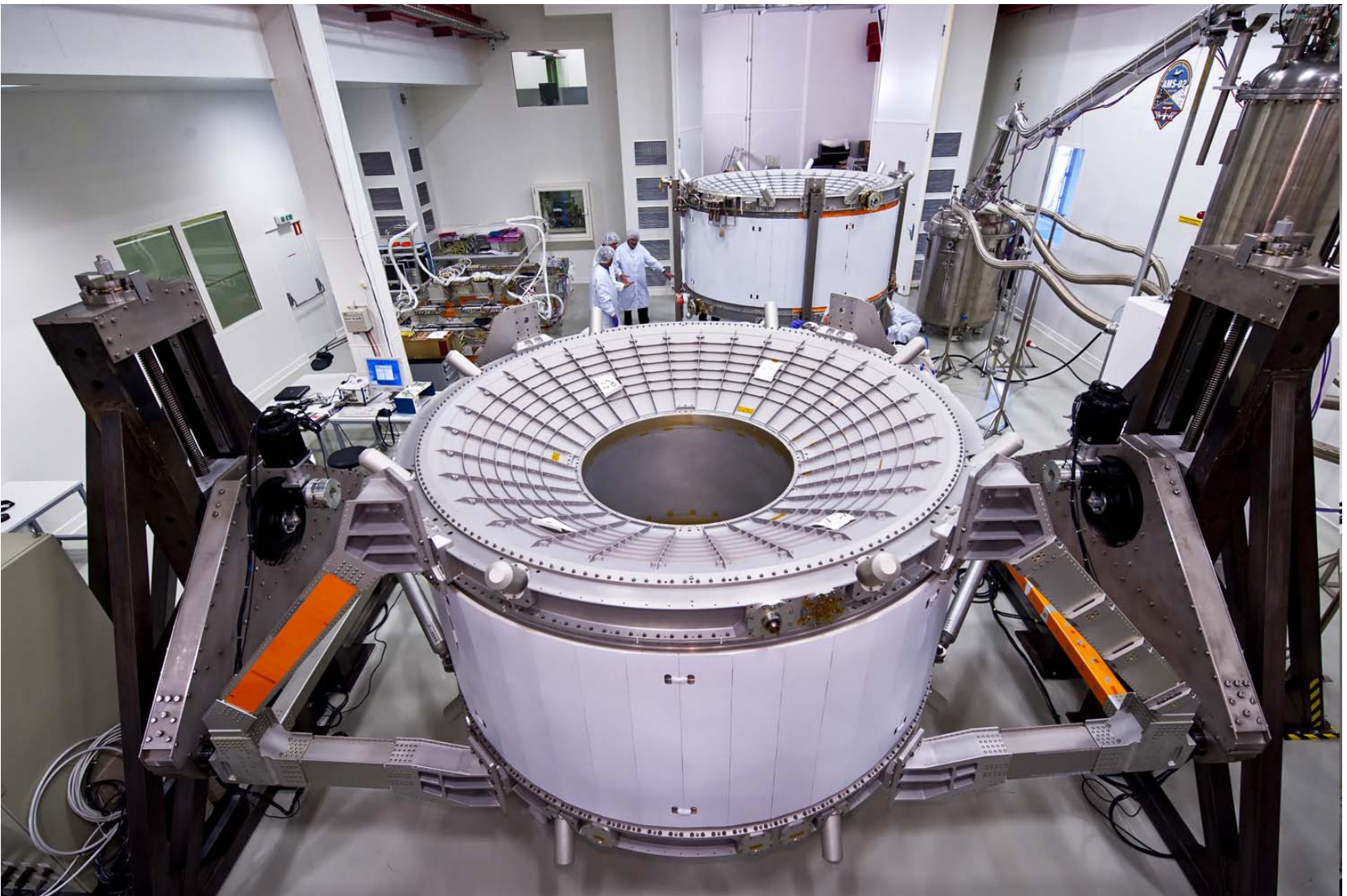
y96673k

DOE particle physics Magnetic Spectrometer in Space

500 Wissenschaftler aus 13 Ländern, RWTH Aachen, Uni Karlsruhe



- **TRD: Particle ID & 3D tracking**
 20 layers fleece + Xe/CO₂ gas
 5248 channels, 6mm straw tubes
 $p^+/e^+ < 10^{-2}$ from 10 – 300 GeV
- Upper TOF, 2 layers, Trigger, $\sigma_t \approx 125$ ps
- **Anticoincidence (VETO) counter**
- **Double sided Si-strip tracker with internal laser alignment system, CFC support structure**
 6 m² in 3 double and 2 single layers
 1 σ charge separation up to 1 TeV
- **Super conducting magnet (ETH)**
 B=0.9T, V=0.6m³, 2000 l He
- Lower TOF, 2 layers, 1.3 m distance
 $p^+/e^+ > 3 \sigma$ below 2 GeV
- **RICH AGL+NaF Radiator**
 for A<28 and Z<29 separation $> 3 \sigma$ from 1-12 GeV
- **ECAL 3D sampling lead/scint.-fibre**
 $p^+/e^+ < 10^{-4}$ from 10 – 300 GeV



Der supraleitende Magnet des "Alpha Magnetic Spectrometer" in der Integrationshalle des CERN.



Missionsdaten und technische Parameter



29. Juli 2010 vom Kennedy Space Center, Cape Canaveral, Florida, USA

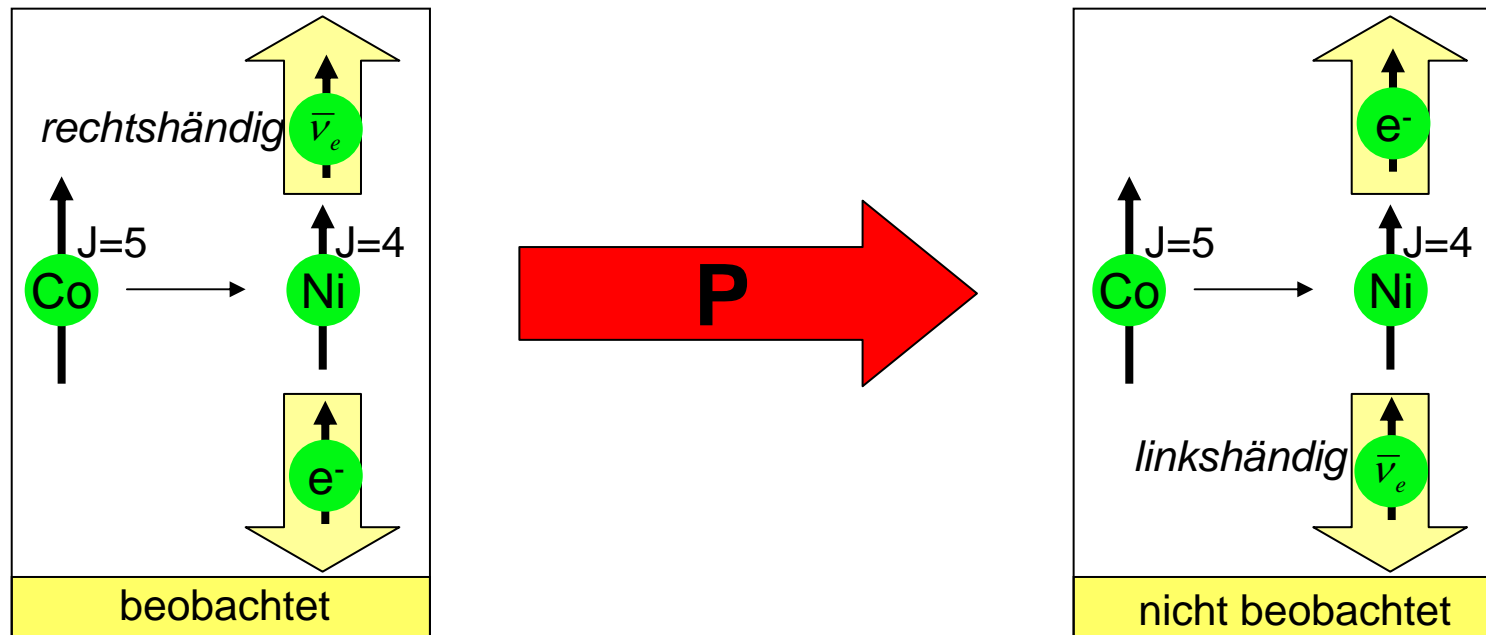
Trägerrakete:	Space Shuttle Mission STS-134
Orbit:	auf Raumstation ISS, d.h. Bahnhöhe ca. 350 km, Inklination 51,6°
Bodenempfangsstation:	White Sands Ground Center (WSGC), New Mexico, USA
Datenrate:	22 GByte/Tag (Anmerkung: Die wissenschaftlichen Daten werden sowohl auf der ISS zwischengespeichert und dann bei Service-Flügen zur Erde gebracht als auch direkt zum Boden übertragen.)
Bodenkontrollstation:	Payload Operations and Control Center (POCC) am CERN, Schweiz
Telemetrie und Telecommand:	über "Low Rate Data Link" (LRDL) TM: bis zu 20 kBit/s, TC: 1 kBit/s
Wissenschaftliches Betriebszentrum:	Science Operations Center (SOC) am CERN, Schweiz
Nominelle Missionsdauer:	3 Jahre
Masse des Experiments:	6.780 kg gesamt, davon 2.600 kg für Detektorkomponenten inkl. Elektronik, 2.460 kg für den Magneten, 1.450 kg für die Strukturkomponenten zur Installation auf dem Space Shuttle und 270 kg für die Struktur zur Installation auf der ISS
Abmessungen:	387 cm x 490 cm x 276 cm (H x B x T)
Energiebedarf:	2 kW

A visualization of particle tracks on a dark blue background. Numerous thin, light green lines radiate from a central point, representing the paths of particles. Several of these tracks terminate in small, solid red spheres, which likely represent the production or detection of specific particles. The overall effect is that of a starburst or a complex particle interaction event.

Erste Erzeugung von Anti-Wasserstoff

P-Verletzung

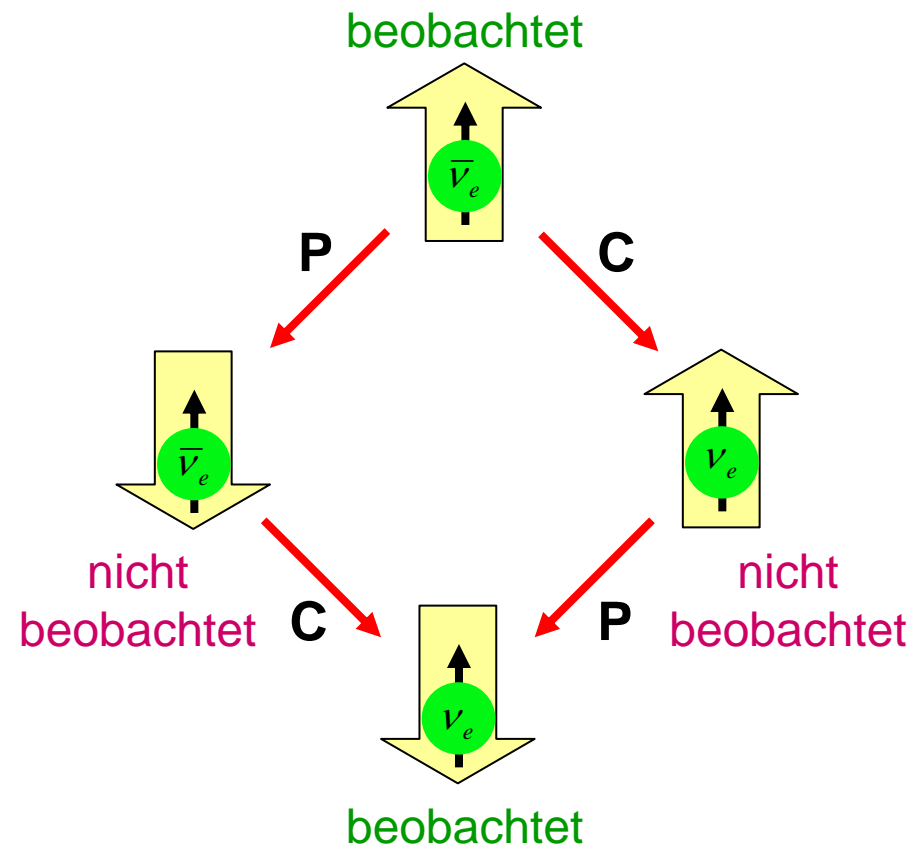
- Lee & Yang zeigten 1956: in der schwachen Wechselwirkung gibt es keine experimentelle Evidenz für **P**-Symmetrie
- **P**-Verletzung war für viele „undenkbar“
(R. Feynman wettete 50\$ dass P-Symmetrie nicht gebrochen ist)
- C.S.Wu et al. (Ende 1956): im Betazerfall ist **P** maximal verletzt



- \rightarrow Anti-Neutrino tritt nur rechtshändig auf
 \rightarrow damit ist auch **C** maximal verletzt

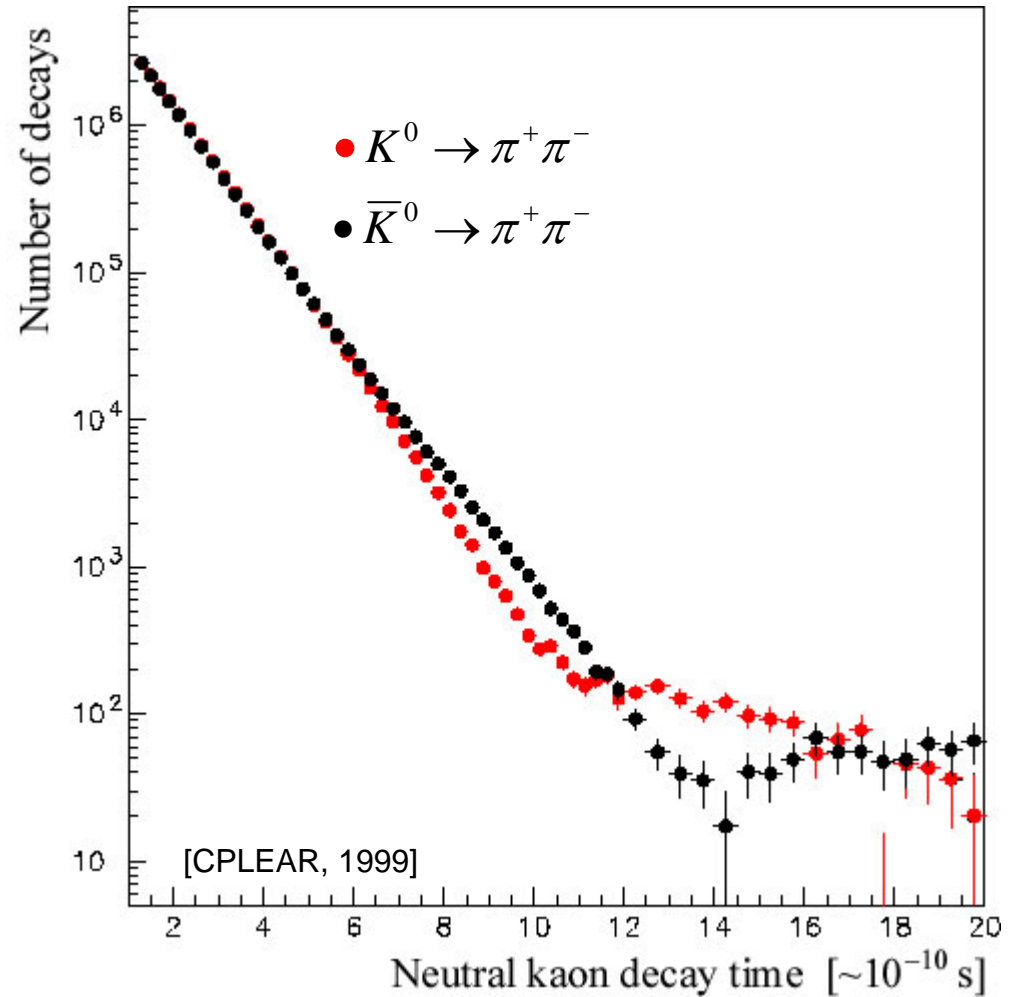
CP-Symmetrie

- **CP-Symmetrie** ist nicht maximal verletzt, sondern sehr gut erfüllt
- **CP** verknüpft die beobachteten Teilchen und Antiteilchen
- „links“ und „rechts“ sowie „Materie“ und „Antimaterie“ immer noch nicht absolut unterscheidbar
- via **CPT**-Theorem ist damit auch T-Symmetrie gegeben
- jedoch...



CP-Verletzung

- Materie und Antimaterie (K^0 und \bar{K}^0) verhalten sich verschieden



Geschichte der Antimaterie

1898

A.Schuster vermutet die Existenz von Antiatomen, die verglichen mit normalen Atomen exakt entgegengesetzte Eigenschaften haben sollen, sich untereinander gravitativ anziehen sollen, von normaler Materie aber abgestoßen werden könnten

1928

P.A.M.Dirac sagt die Existenz eines positiv geladenen Elektrons voraus, heute Antielektron oder Positron genannt

1932

C.D.Anderson entdeckt das 'positive Elektron' bei Höhenstrahlungsmessungen mit einer Wilson-Kammer

1955

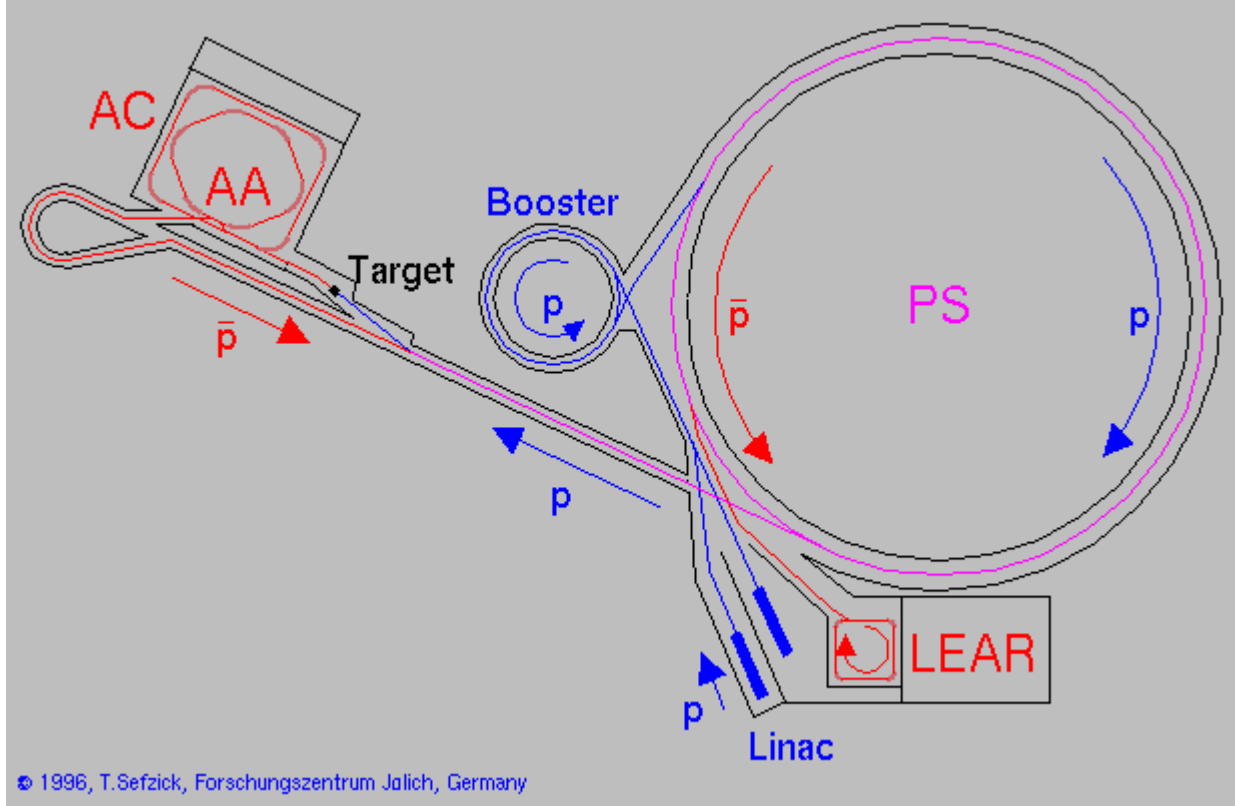
O.Chamberlain, E.Segrè, C.Wiegand, and T.Ypsilantis entdecken das Antiproton

1995

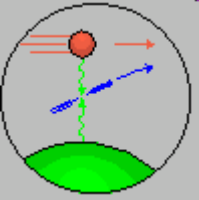
Antiproton und Positron werden erstmals zu **Antiwasserstoff** kombiniert



Low Energy Antiproton Ring LEAR (CERN)
(Erzeugung des ersten Antiwasserstoffs)

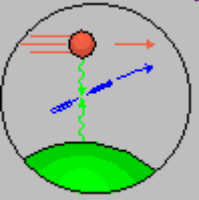


- Die Herstellung verlangt, daß mehrere der CERN-Beschleuniger exakt zusammenarbeiten.
- Zuerst werden Protonen in Linearbeschleuniger, Booster und Proton-Synchrotron (PS) auf 27 GeV beschleunigt. Diese Protonen treffen auf ein schweres Target (Be).
- In der Kollision der Protonen mit den Targetkernen werden viele Teilchen-Antiteilchen-Paare produziert, in bestimmten Fällen auch Proton-**Antiproton**-Paare.
- Einige der **Antiprotonen** werden im Antiproton-Cooler (AC) eingefangen und im Antiprotonen-Akkumulator gespeichert. Von dort werden sie von Zeit zu Zeit in den **Niederenergie-Antiprotonen-Ring (LEAR)** gespeist, wo sie für Experimente zur Verfügung stehen.

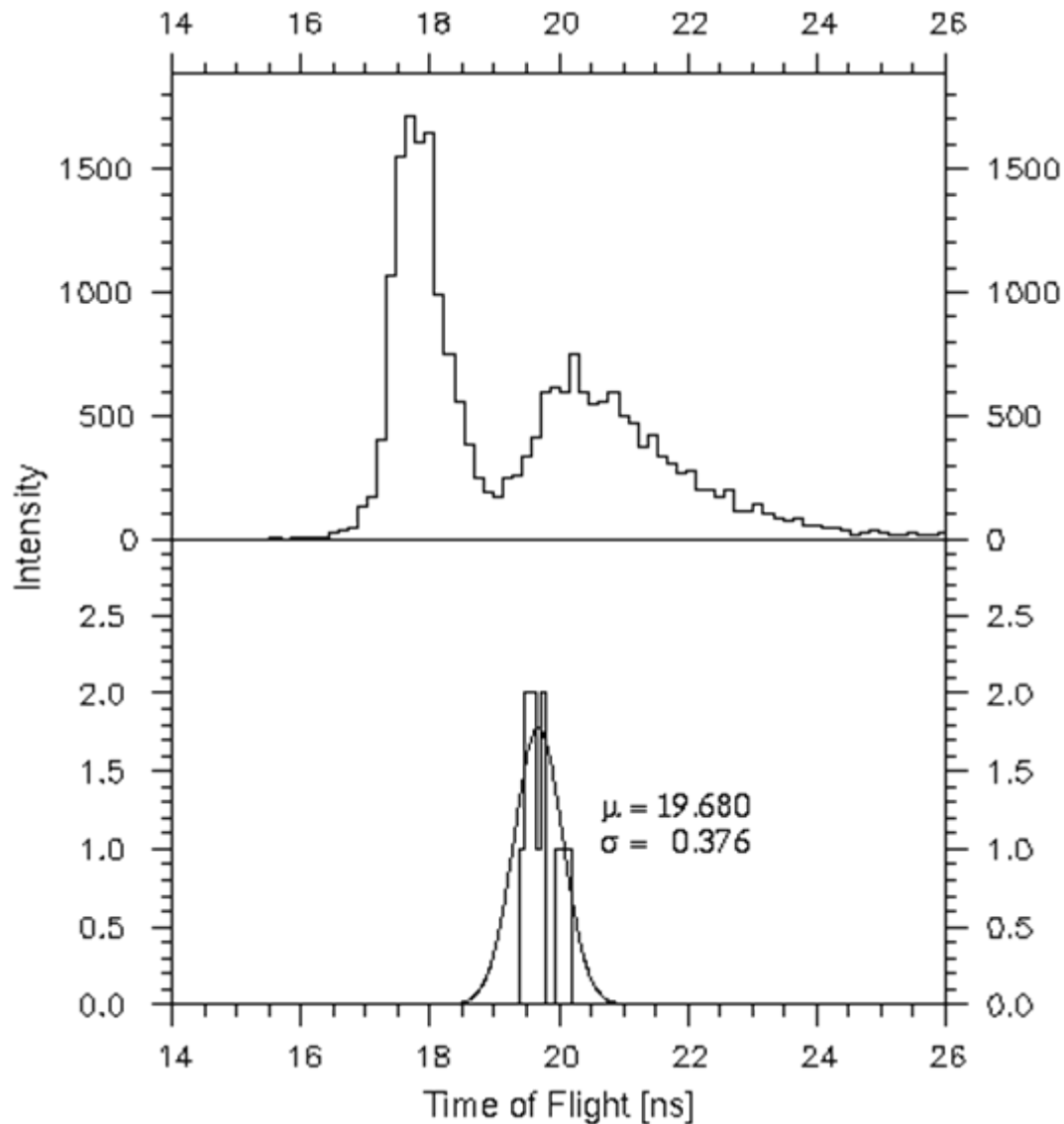


PS210

- Im PS210-Experiment: wenn ein im Beschleuniger zirkulierendes Antiproton (rot) ganz dicht an einem sog. Target-Kern (grün) - z.B. Xenon - vorbeifliegt, dann werden ab und zu Elektron-Positron-Paare (blau) erzeugt.
-
- Und wenn so ein Elektron-Positron-Paar erzeugt wurde - was wie gesagt sehr selten ist - dann kann es in noch selteneren Fällen passieren, daß das Antiproton das Positron einfängt.
->**Antiwasserstoff** ist erzeugt.
- Die Wahrscheinlichkeit dafür ist allerdings nur **0.000 000 000 000 000 01 %**



PS210



- Am Ende der Datenauswertung blieben 11 Ereignisse übrig, bei denen das Antiproton die richtige Flugzeit (19.7 nsec) hatte und die Positronvernichtung gemessen wurde. Nimmt man an, daß 2 ± 1 Ereignisse von anderen Reaktionen herrühren, lautet das entgültige Ergebnis

9 Antiwasserstoffatome

Antiwasserstoff

- Kinetische Energie der erzeugten Antiwasserstoff-Atome: 1.2 GeV, entspricht einer Geschwindigkeit von $0.9c$ oder einer Temperatur von 1.4×10^{13} Grad Celsius: „*heißer*“

Antiwasserstoff

- Mit **Antiwasserstoff** kann man das CPT-Theorem und die Antigravitation überprüfen – dafür werden größere Mengen und um mehrere Größenordnungen kältere Antiwasserstoffatome benötigt – mit PS210 nicht zu erreichen, Anlage wurde 1996 stillgelegt

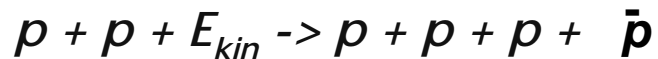
A visualization of particle tracks on a dark blue background. Numerous thin, light green lines radiate from a central point, representing the paths of particles. Several of these tracks terminate in small, solid red spheres, which likely represent the production or detection of specific particles. The overall effect is that of a starburst or a complex network of paths.

Heutige Erzeugung von Anti-Wasserstoff

Antiwasserstofferzeugung am Antiproton Decelerator

- Antiprotonenerzeugung:

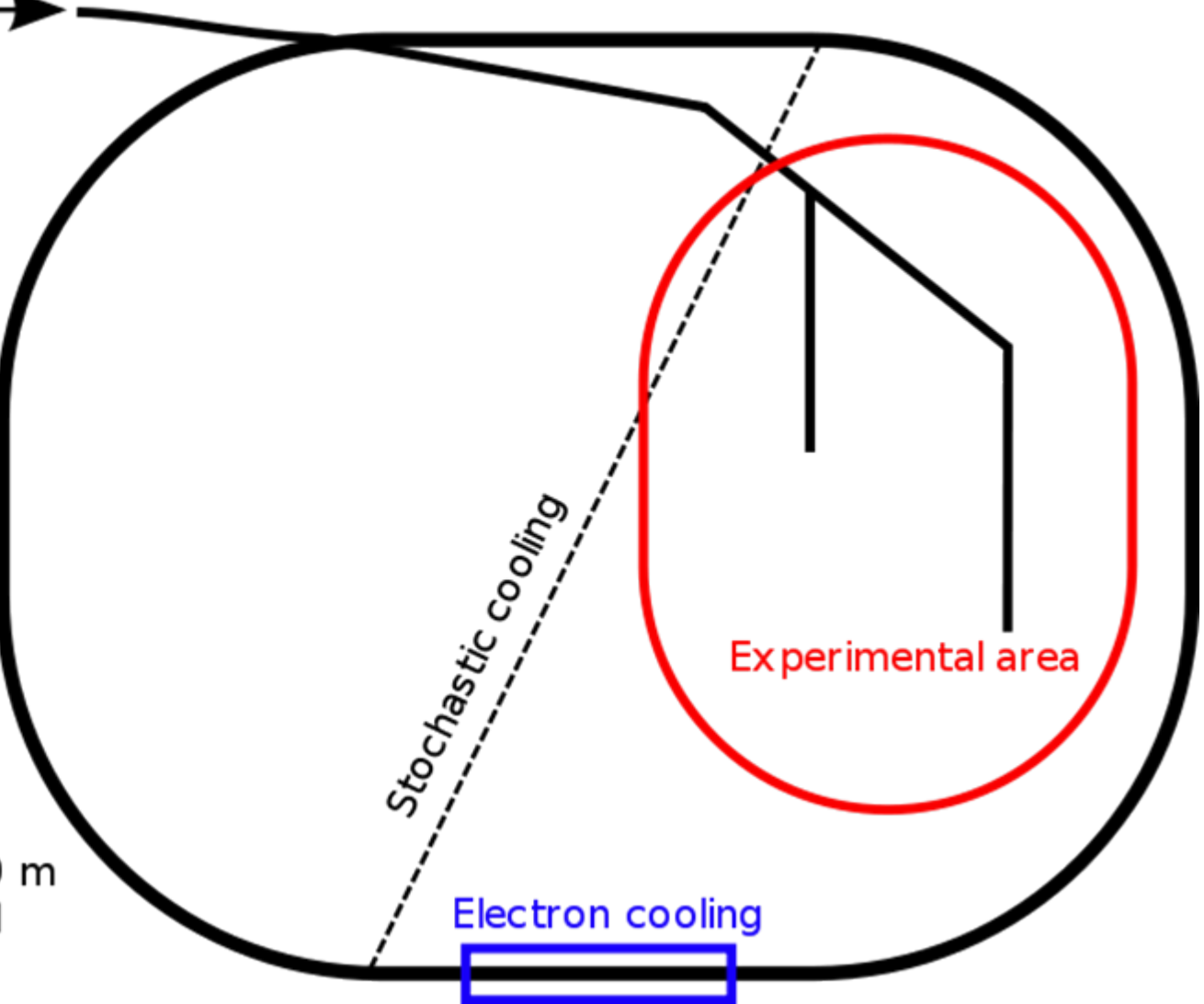
- Proton wird mit hoher kinetischer Energie auf ein Target geschossen
- Trifft das Teilchen einen Atomkern, wechselwirkt es mit einem Proton im Kern, so wird ein Teilchen-Antiteilchenpaar erzeugt



- Das so erzeugte Antiproton wird durch Massenspektrometer von den Protonen und den anderen erzeugten Teilchen-Antiteilchenpaaren getrennt, sodass nur noch Antiprotonen im Strahlrohr sind
- Da Antiprotonenbildung mit Protonenimpulsen höher als 6.5 GeV/c wesentlich wahrscheinlicher wird, verwendet man Protonen mit einer Energie von 25 GeV, dazu wird Teilchenbeschleuniger benötigt – ein Proton Synchrotron – wird auch als Vorbeschleuniger für den LHC verwendet

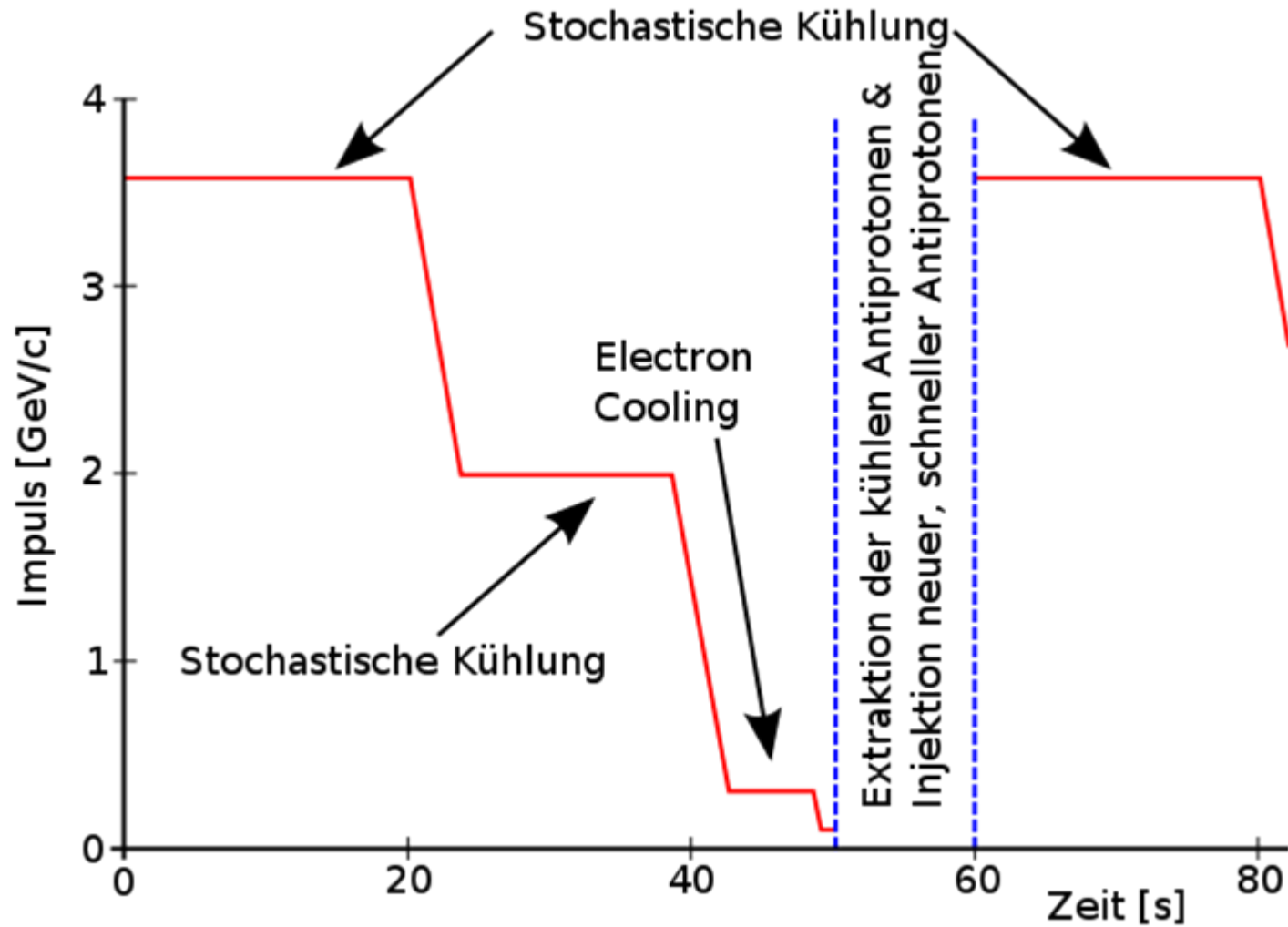
Antiproton Decelerator

\bar{p} from Target



- Speicherring mit 188m Umfang

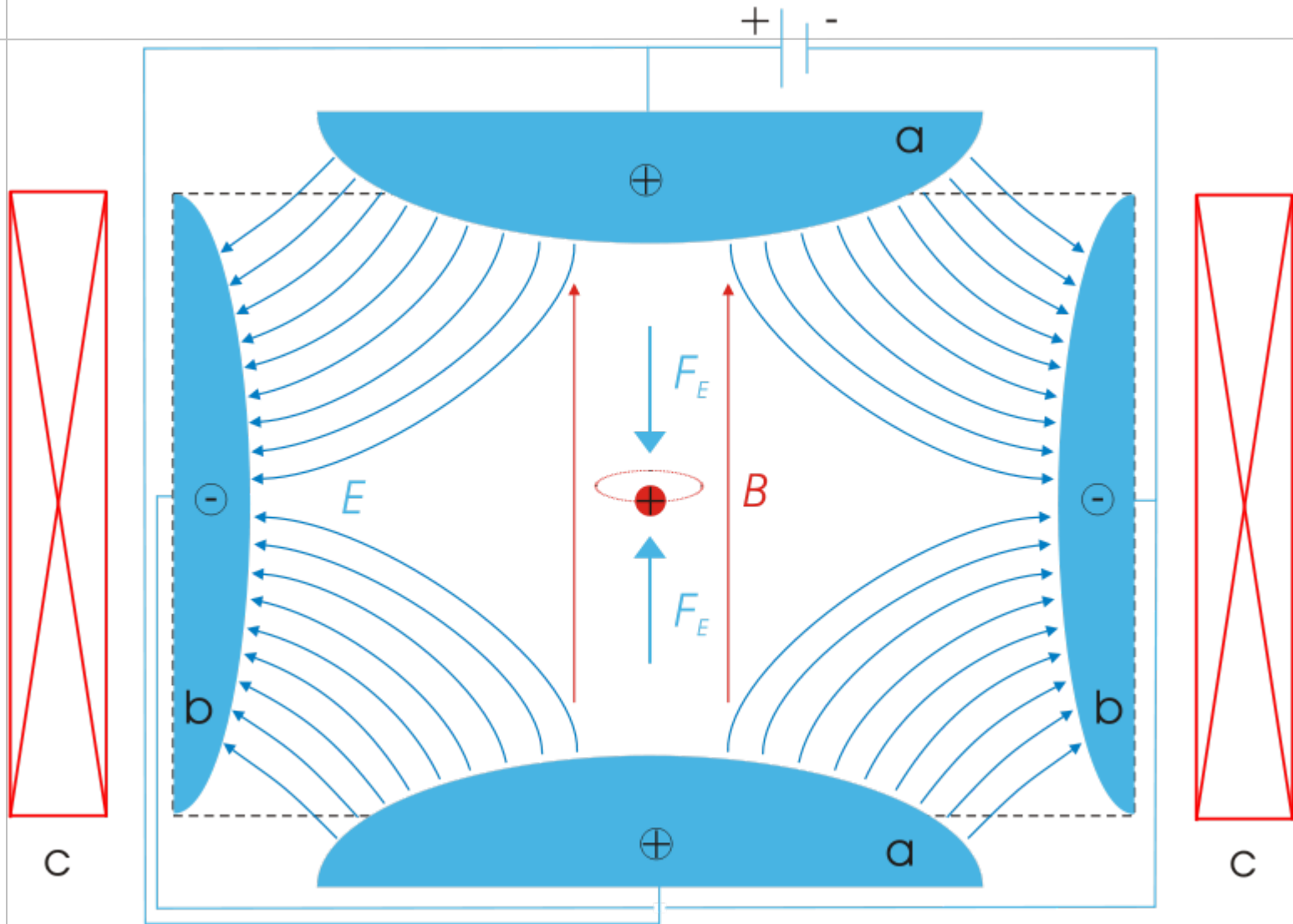
Abbrems- und Kühlvorgänge



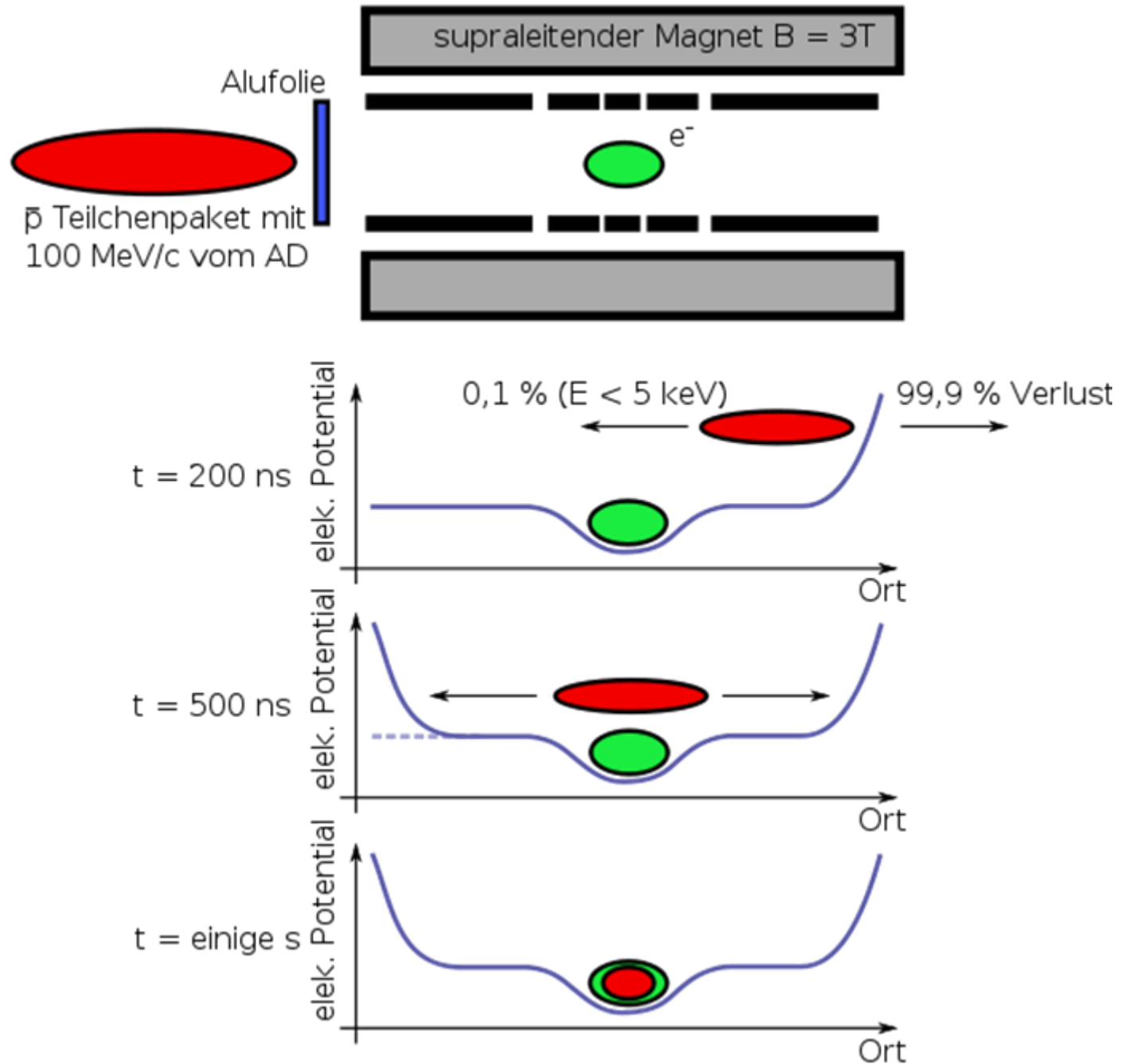
Antiwasserstoffherzeugung am Antiproton Decelerator

- Antiprotonenfalle:
 - Antiprotonen aus dem AD Ring besitzen Temperatur von 6.2×10^{10} Grad Celsius
 - müssen weiter abgekühlt werden: geladene Teilchen verlieren Energie, wenn sie einen Festkörper durchdringen (Bethe-Formel), Aluminiumfolie
 - Anihilieren die Antiprotonen beim Kontakt mit den Protonen? Geringe Wechselwirkungszeit
 - Antiprotonen gelangen in die Sammelfalle (zylindrische Penning-Falle) segmentierte Zylinderelektroden, jeder Ring weist ein anderes Potential auf – Potentialtopf wird gebildet, in dem geladene Teilchen gefangen werden können, Antiprotonen pendeln zwischen den beiden Potentialwänden der Falle hin und her
 - Weitere Kühlung durch kältere Elektronen, werden beide in derselben Falle gefangen, Antiprotonen geben Temperatur an die kälteren Elektronen ab und verlieren an Energie, die aufgeheizten Elektronen geben ihrerseits Energie durch Synchrotronstrahlung im Magnetfeld der Falle ab
 - Nach wenigen Sekunden haben die Antiprotonen ihre thermische Energie komplett an die Elektronen abgegeben – die gefangenen Teilchen stehen bei ca. 15 K mit den sie umgebenden gekühlten supraleitenden Magneten im thermischen Gleichgewicht und können in die Mischfalle transferiert werden

Penning-Falle



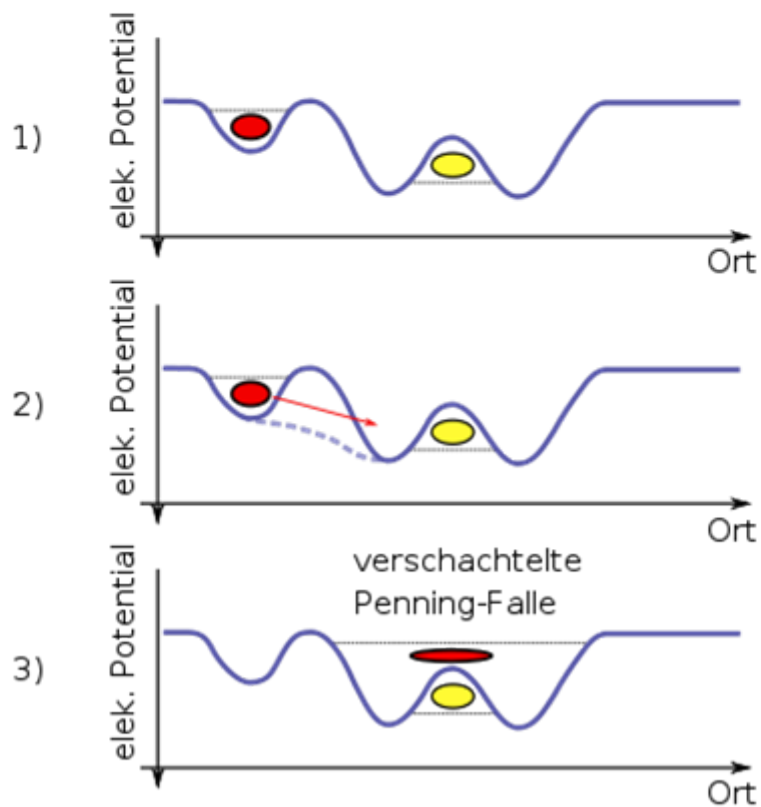
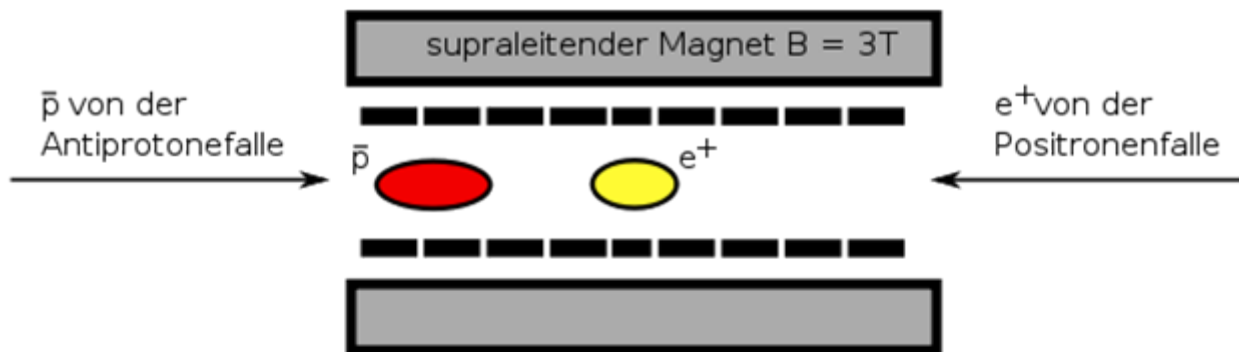
Zylindrische Penningfalle



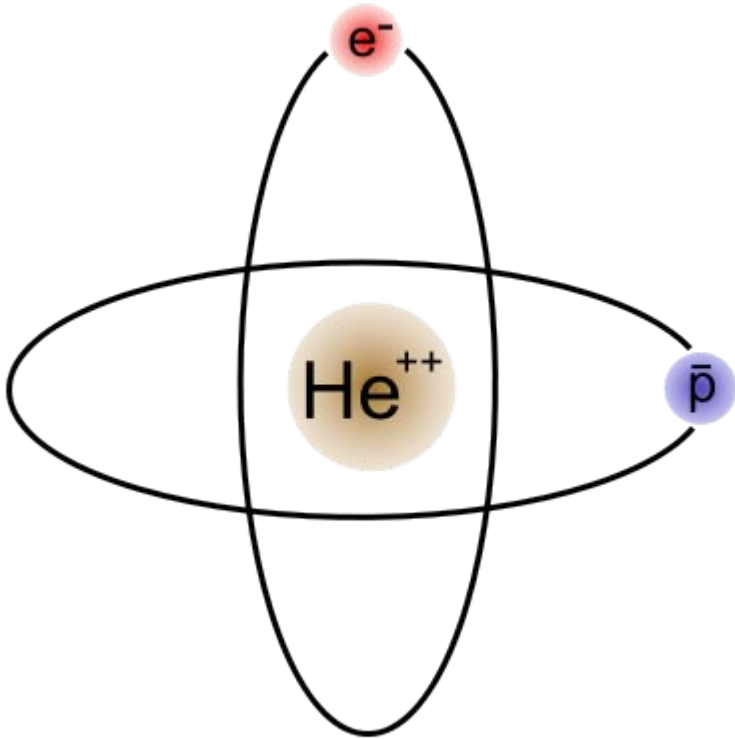
Antiwasserstoffherzeugung am Antiproton Decelerator

- Positronen-Erzeugung:
 - Radiaktives Isotop ^{22}Na zerfällt mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% in ^{22}Ne , ein Positron, ein Elektroneneutrino und ein hoch energisches Photon
 - Schnelles Positron wird in Penning-Falle gefangen und runtergekühlt (mit Stickstoffgas)
- Mischfalle:
 - Penning-Falle dient dazu, die beiden Bestandteile in den gleichen Raumbereich zu bringen
 - Potential auf der Seite der Positronenfalle auf Null setzen – die Positronen strömen aufgrund kleiner Eigengeschwindigkeit aus der Positronenfalle heraus, dann wird das Potential auf der anderen Seite der Mischfalle hochgefahren, Positronenwolke wird axial komprimiert
 - Um negative Antiprotonen und positive Positronen zusammenzubringen muß das Potential verändert werden – Antiprotonen rutschen in die Mischfalle, dann das alte Potential anlegen: verschachtelte Penning-Falle, vereint 2 Penning-Fallen
 - Entsteht Antiwasserstoff, ist dieser neutral und wird von dem Fallenpotential und dem Magnetfeld nicht mehr gehalten und kann sich frei bewegen bis es auf die Ringelektroden der Penning-Falle trifft. Dort annihilieren die beiden Teilchen mit ihrem jeweiligen Materiepartner aus dem Elektrodenmaterial – charakteristische Vernichtungsstrahlung wird ausgesandt, kann im Detektor nachgewiesen werden und daraus läßt sich bestimmen, wieviele Antwasserstoffatome hergestellt wurden
 - 2002: 500 000 kalte Antiwasserstoffatome am ATHENA, Temperatur von 2000 Grad Celsius

Zylindrische Penningfalle



ASACUSA – antiprotonisches Helium



- Antiprotonisches Helium: Heliumatom, bei dem ein Hüllenelektron durch ein Antiproton ersetzt wurde
- CPT-Theorem kann getestet werden: Masse von Proton und Antiproton sollten identisch sein: durch Messen der Wellenlänge die Antiprotonenmasse präzise bestimmen und mit der Masse des Protons vergleichen
- Bislang keine Abweichungen gefunden

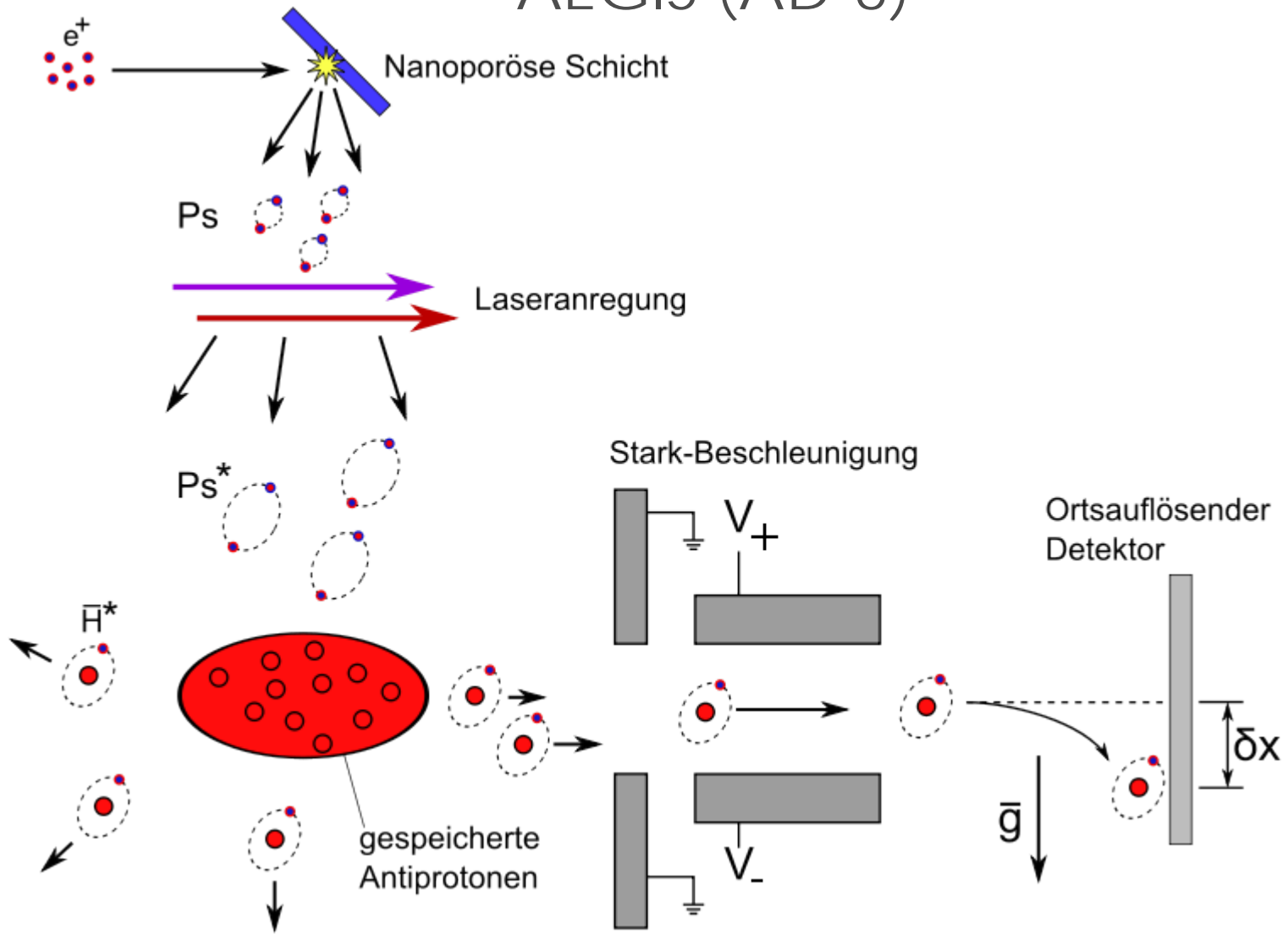
AEGIS (AD-6)

- Verschiedene quantentheoretische Beschreibungen der Gravitation, die nicht ausschließen, daß Antimaterie im Gravitationsfeld der Erde eine andere Fallbeschleunigung erfährt wie normale Materie
- AEGIS – noch in der Planungsphase
- Probekörper: Antiwasserstoff – da neutral (ansonsten bei Antiprotonen ist die Gravitation 4.2×10^{42} schwächer als die elektrische Kraft
 - Positronen mit kinetischer Energie von 100eV bis einige keV werden auf einen nanoporösen (Porengröße zw. 0.3 und 30 nm), nichtleitenden Festkörper geschossen
 - Positron wird abgebremst und kann Bindung mit Hüllenelektron aus dem Isolator eingehen: Positronium
 - Sammelt sich bevorzugt in den Freiräumen, prallt gegen die Wand und verliert so immer mehr kinetische Energie, bis diese schließlich so groß ist wie die thermische Energie des Targetmaterials – Positronium kann aus dem Isolator heraus diffundieren

AEGIS (AD-6)

- Positronium mit den zuvor in einer Penning-Falle akkumulierten und gekühlten Antiprotonen zusammenbringen: Antiwasserstoff entsteht
- Problem: das im Grundzustand befindliche Positronium hat das Positron sehr stark und das Elektron gebunden, um die Bindungsenergie zu reduzieren, kann man das Positronium mit Hilfe von Lasern zu hohen Hauptquantenzahlen anregen – die beiden Teilchen entfernen sich quasi voneinander und spüren die gegenseitige Anziehung weniger. Im Fall von hoch angeregten Zuständen (Rydberg-Zustände) steigt die Wahrscheinlichkeit für die Antiwasserstoffbildung mit der 4. Potenz der Hauptquantenzahl
- Antiwasserstoff weist el. Dipolmoment auf und kann in einem el. Gradientenfeld beschleunigt werden (400m/s)
- Antiwasserstoffatome fallen im Gravitationsfeld der Erde (waagerechter Wurf)
- Fallbeschleunigung für Antimaterie bestimmen
- FAIR Beschleunigerzentrum ab 2013 in Deutschland

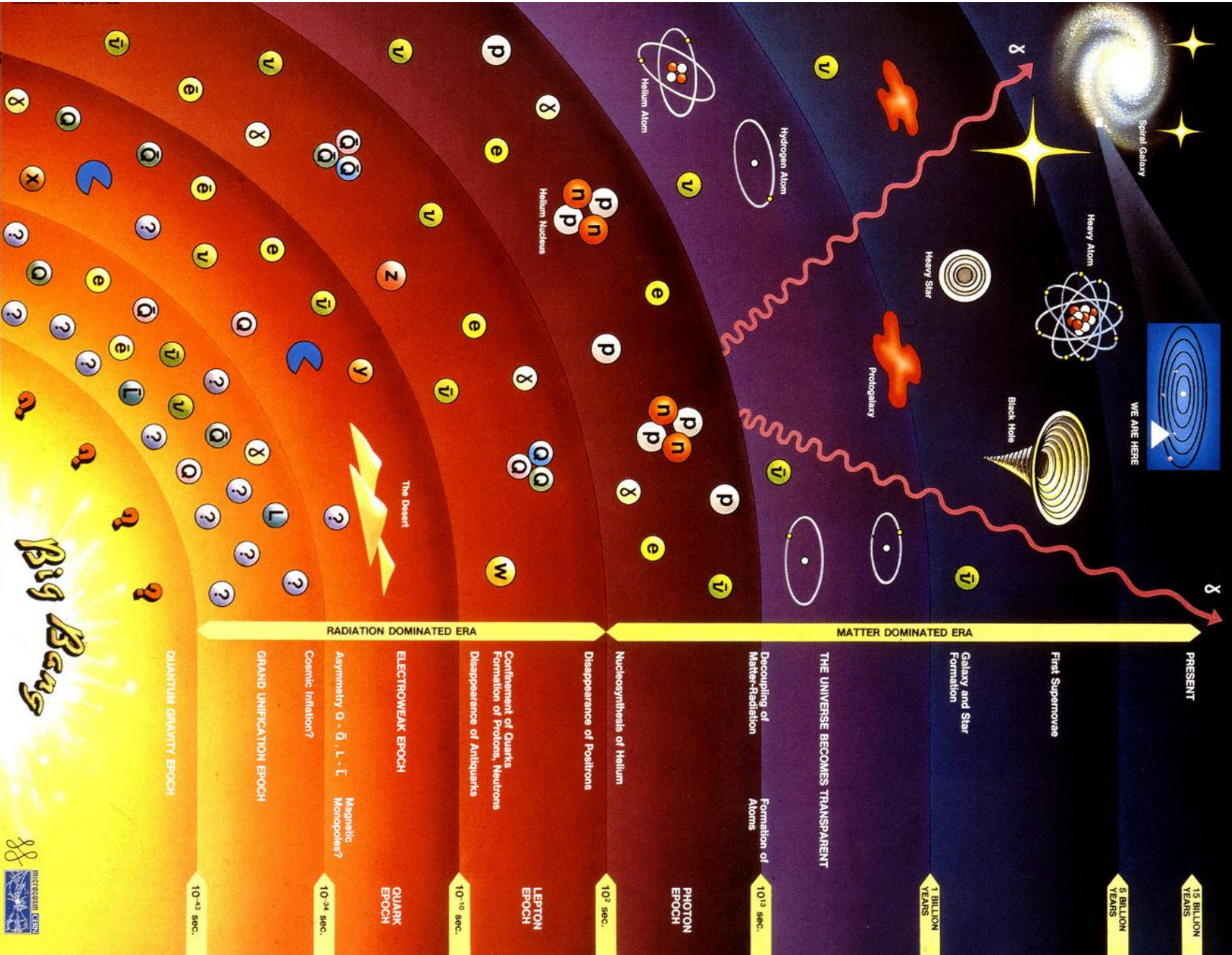
AEGIS (AD-6)





Antimaterie & Spiegelsymmetrie

History of the Universe



PRESENT

15 BILLION YEARS

WE ARE HERE

Spiral Galaxy

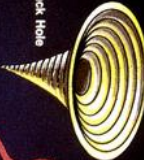
First Supernovae

5 BILLION YEARS

Heavy Atom



Black Hole



Galaxy and Star Formation

1 BILLION YEARS

Heavy Star



Protogalaxy



THE UNIVERSE BECOMES TRANSPARENT

Decoupling of Matter-Radiation

Formation of Atoms

10¹³ sec.

Hydrogen Atom



PROTON EPOCH

Nucleosynthesis of Helium

Disappearance of Positrons

10² sec.

Helium Atom



Helium Nucleus



LEPTON EPOCH

Confinement of Quarks, Formation of Protons, Neutrons

Disappearance of Antiquarks

10⁻¹⁰ sec.

ELECTROWEAK EPOCH

QUARK EPOCH

Asymmetry Q - \bar{Q} , L - \bar{L}

Cosmic Inflation?

Magnetic Monopoles?

10⁻³⁴ sec.

GRAND UNIFICATION EPOCH

QUANTUM GRAVITY EPOCH

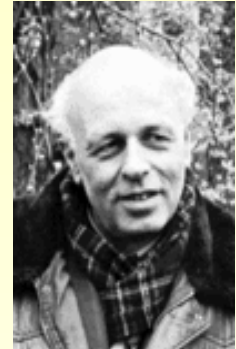
10⁻⁴³ sec.

Big Bang



Bedingungen für Materie-Überschuss

- Andrei Sacharow (1967):
formulierte 3 notwendige Bedingungen



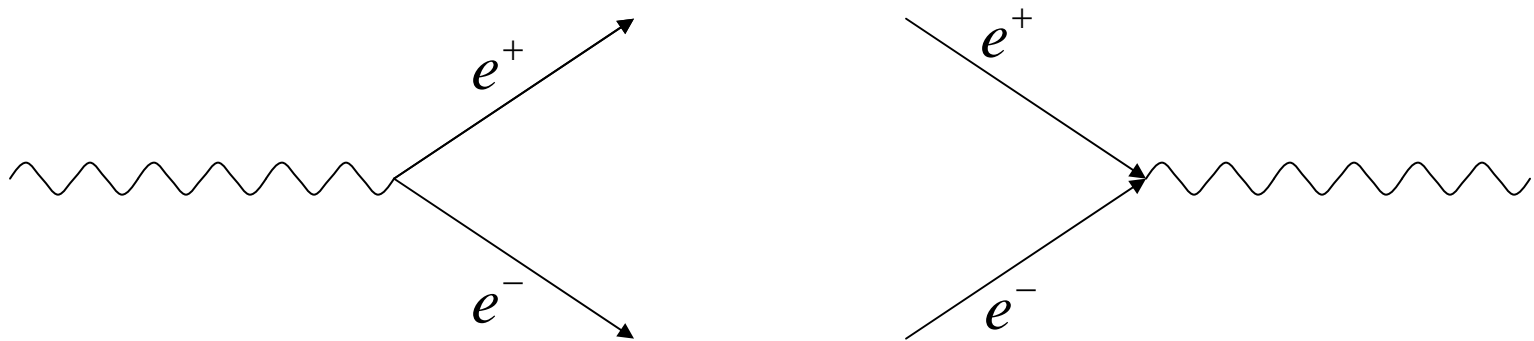
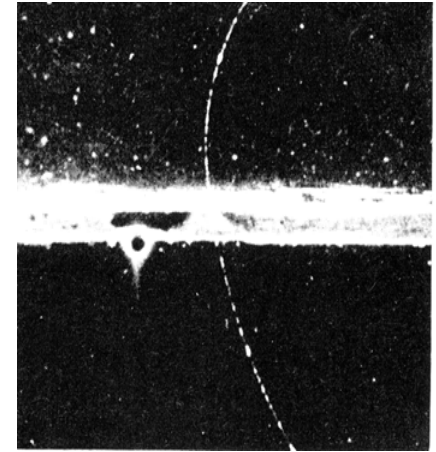
1. Verletzung der Baryonenzahl
2. Verletzung der C und CP-Symmetrie
3. Abkehr vom thermodynamischen Gleichgewicht

CP-Symmetrie:

Bildet die Welt der Teilchen
auf die Welt der Antiteilchen ab

Materie - Antimaterie

- 1931/32: Vorhersage (Dirac) und Entdeckung (Anderson) des Anti-Elektrons = Positron
- alle Teilchen haben ein Anti-Teilchen mit umgedrehten Vorzeichen der Ladungsquantenzahlen (manchmal ist Teilchen=Anti-Teilchen)
- Teilchen und Anti-Teilchen werden paarweise erzeugt und vernichtet



$$E = mc^2 \Rightarrow \text{Energiedichte} \approx 10^{17} \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Teilchen im Standardmodell

Teilchen			
Quarks	u	c	t
B = 1/3	d	s	b
Leptonen	ν_e	ν_μ	ν_τ
B = 0	e	μ	τ

Anti-Teilchen			
\bar{t}	\bar{c}	\bar{u}	Anti-Quarks
B = -1/3	\bar{b}	\bar{s}	\bar{d}
Anti-Leptonen	$\bar{\nu}_\tau$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_e$
B = 0	$\bar{\tau}$	$\bar{\mu}$	\bar{e}

Baryonen **B = 1** $(q q q)$

Anti-Baryonen **B = -1** $(\bar{q} \bar{q} \bar{q})$

Mesonen **B = 0** $(q \bar{q})$

Baryonenzahl B

Diskrete Symmetrien

C: Ladungskonjugation Teilchen → Antiteilchen

P: Parität rechts → links „Spiegel“

T: Zeitumkehr vorwärts → rückwärts

Hier: Unterscheidung von

- links- und rechts
- Materie - Antimaterie

Spiegelsymmetrie



Taj Mahal:
Natur und Spiegelbild identisch!

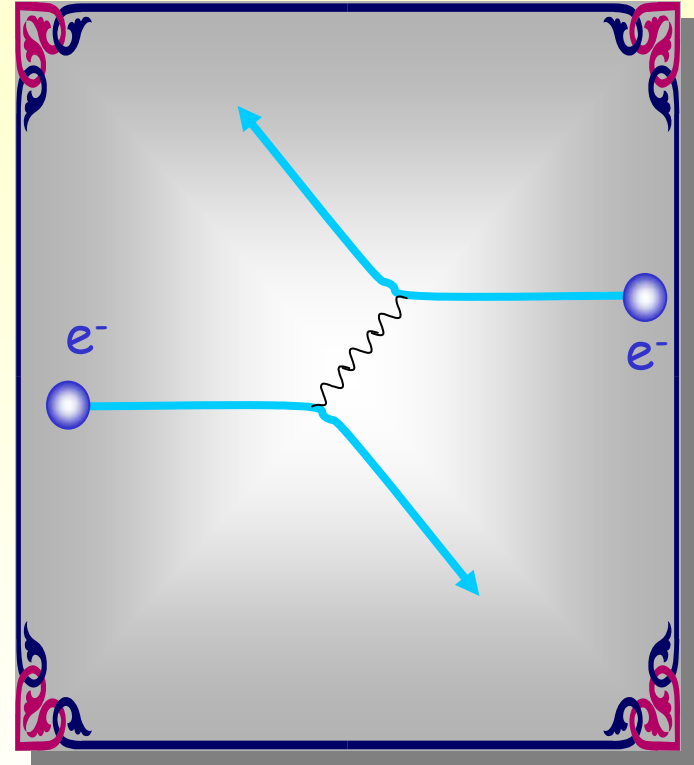
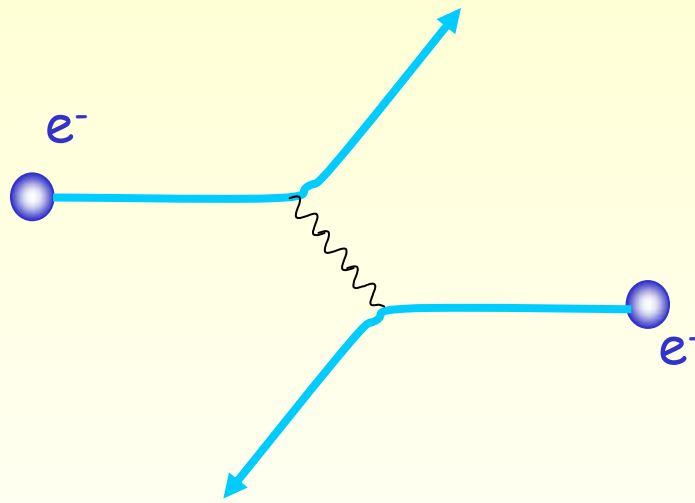
Spiegelsymmetrie-Verletzung



Menschen:
Natur und Spiegelbild
nahezu identisch!

Spiegelsymmetrie leicht verletzt!

Teilchenphysik im Spiegel



Elektromagnetische & starke Wechselwirkung:

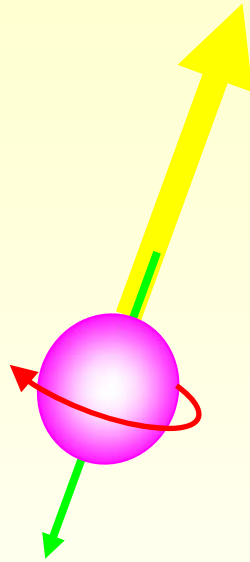
Die gespiegelten Reaktionen sind in der Natur gleich häufig!

⇒ Spiegelsymmetrie = Paritätserhaltung

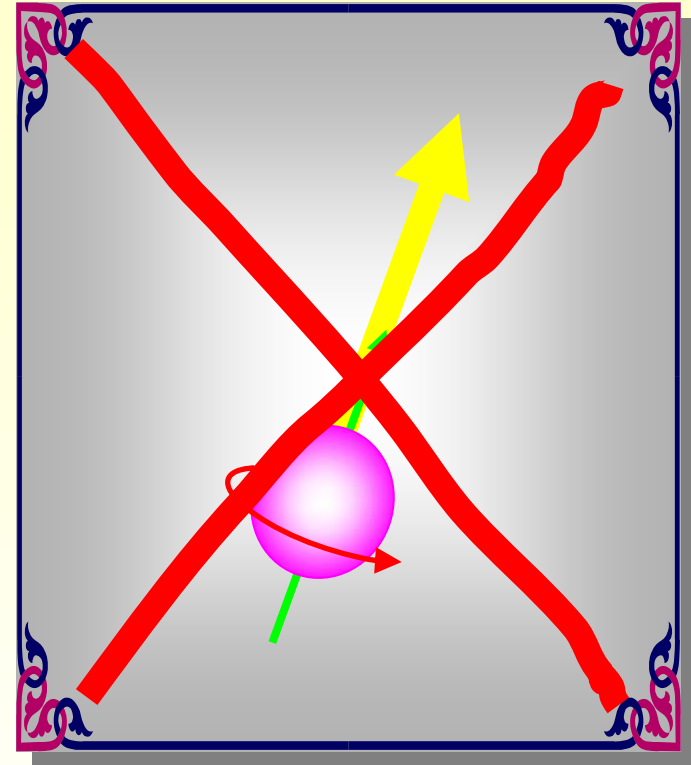
Schwache Wechselwirkung: Verletzung der Spiegelsymmetrie

koppelt an linkshändige Teilchen und rechtshändige Antiteilchen

Neutrinos im Spiegel



linkshändig

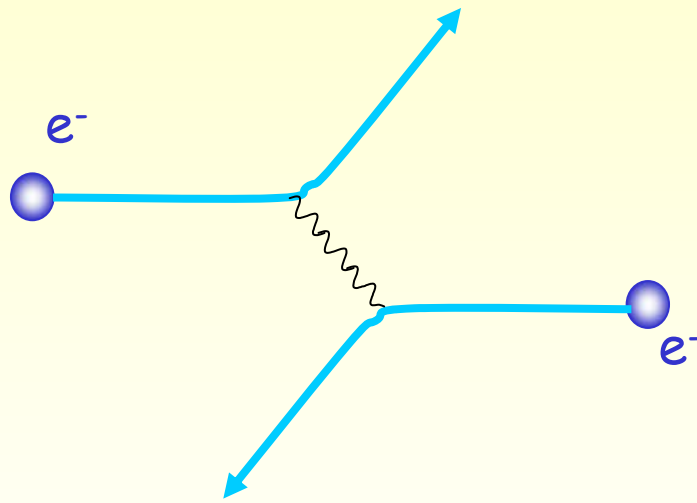


rechtshändig

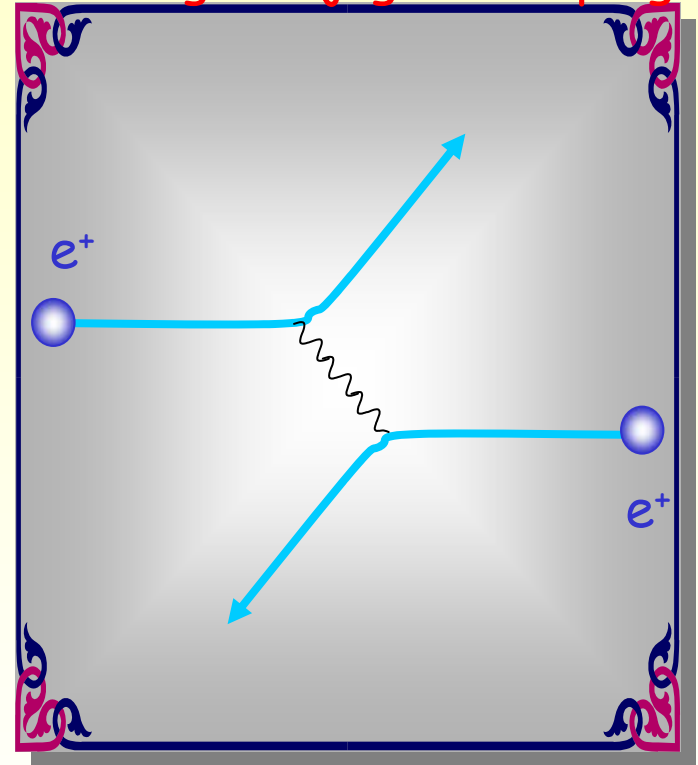
Natur: linkshändige Neutrinos
rechtshändige Antineutrinos }

Paritätsverletzung
(gibt es nur in der
schwachen
Wechselwirkung)

Teilchenphysik im C-Spiegel



Ladungskonjugationsspiegel



Elektromagnetische & starke Wechselwirkung:

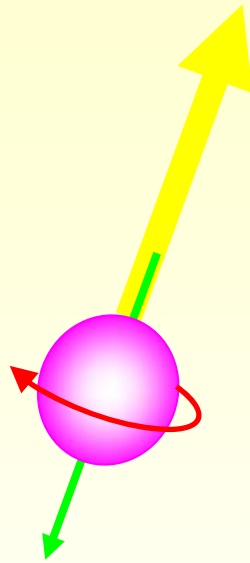
Reaktionen sind in der Welt der Antiteilchen gleich häufig!

⇒ C-Symmetrie ist erhalten

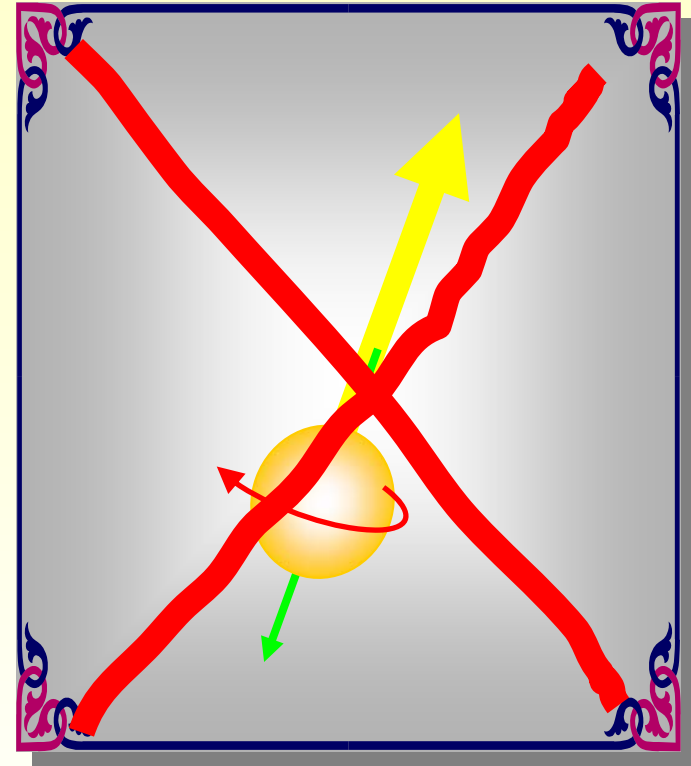
Schwache Wechselwirkung: Verletzung der C-Symmetrie

koppelt an linkshändige Teilchen und rechtshändige Antiteilchen

Neutrinos im C-Spiegel



Linkshändiges Neutrino



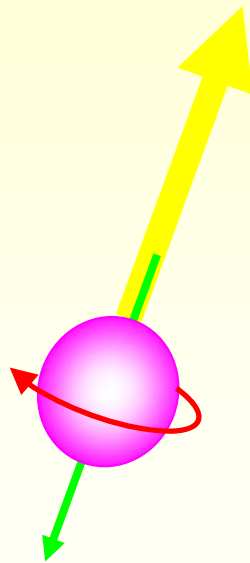
Linkshändiges Antineutrino

Natur: linkshändige Neutrinos
rechtshändige Antineutrinos

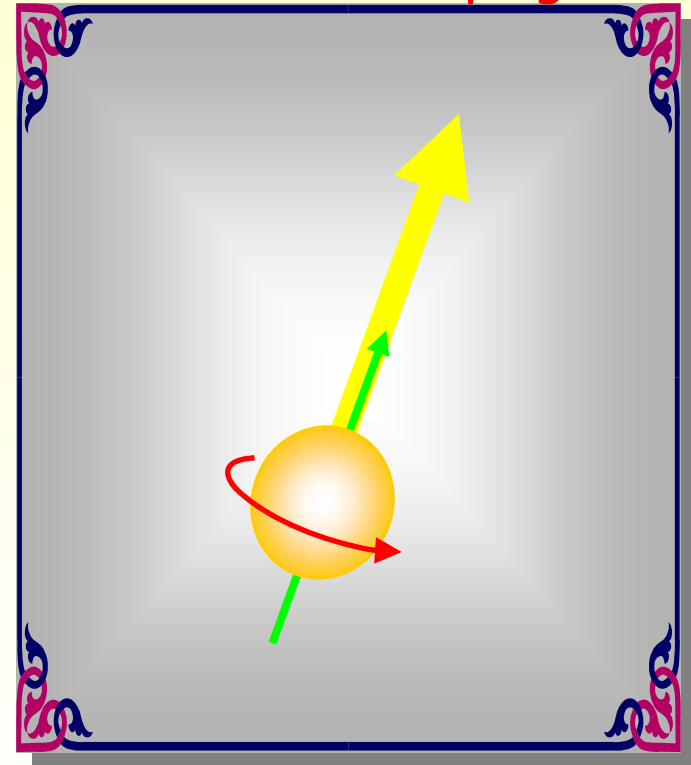
C-Symmetrie ist verletzt
(gibt es nur in der
schwachen
Wechselwirkung)

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!

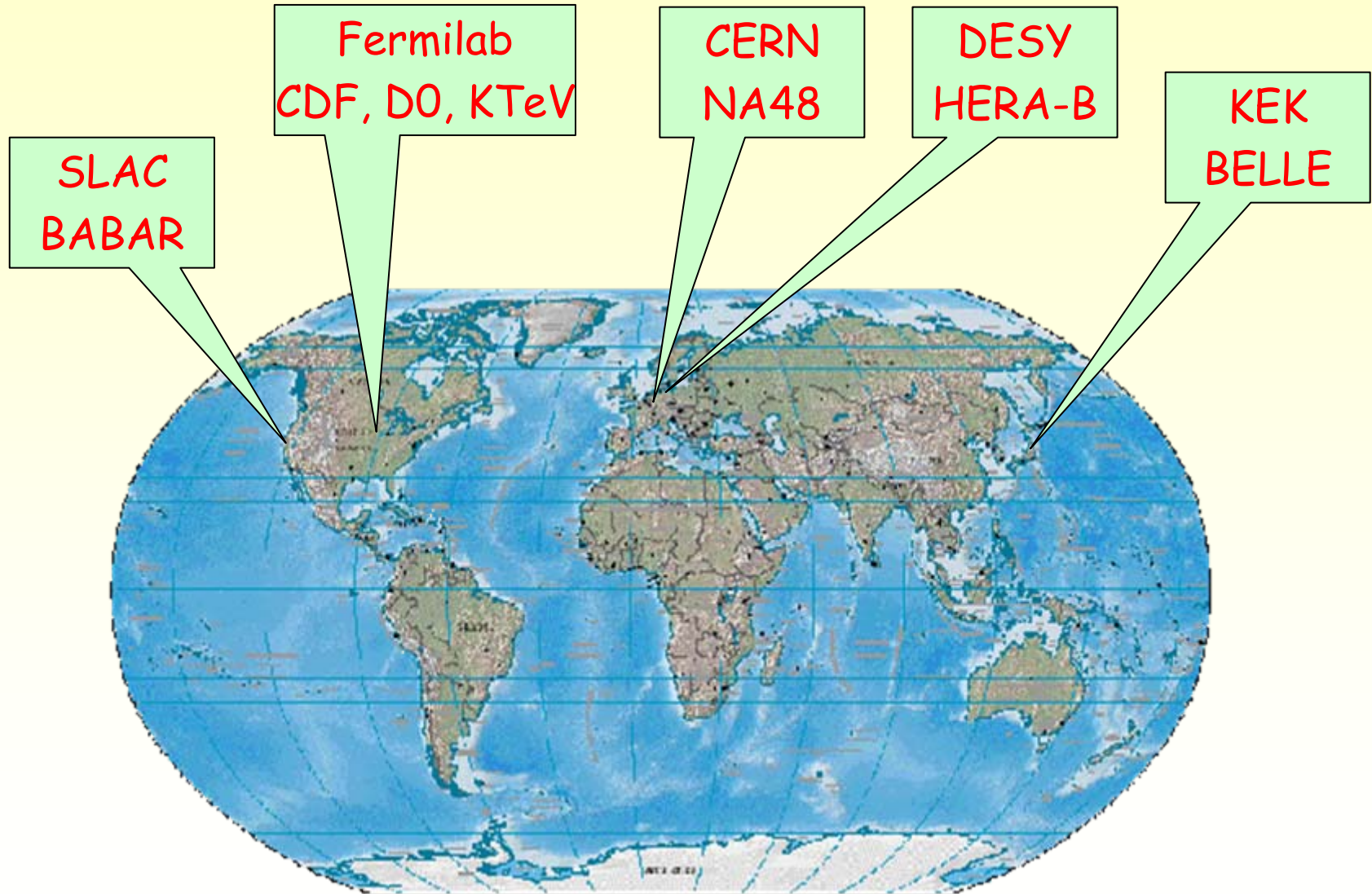
⇒ CP-Symmetrie ist erhalten

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

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

- Teilchenphysik:
 - Sucht nach dem Ursprung der **CP**-Verletzung

Experimente zur CP-Verletzung

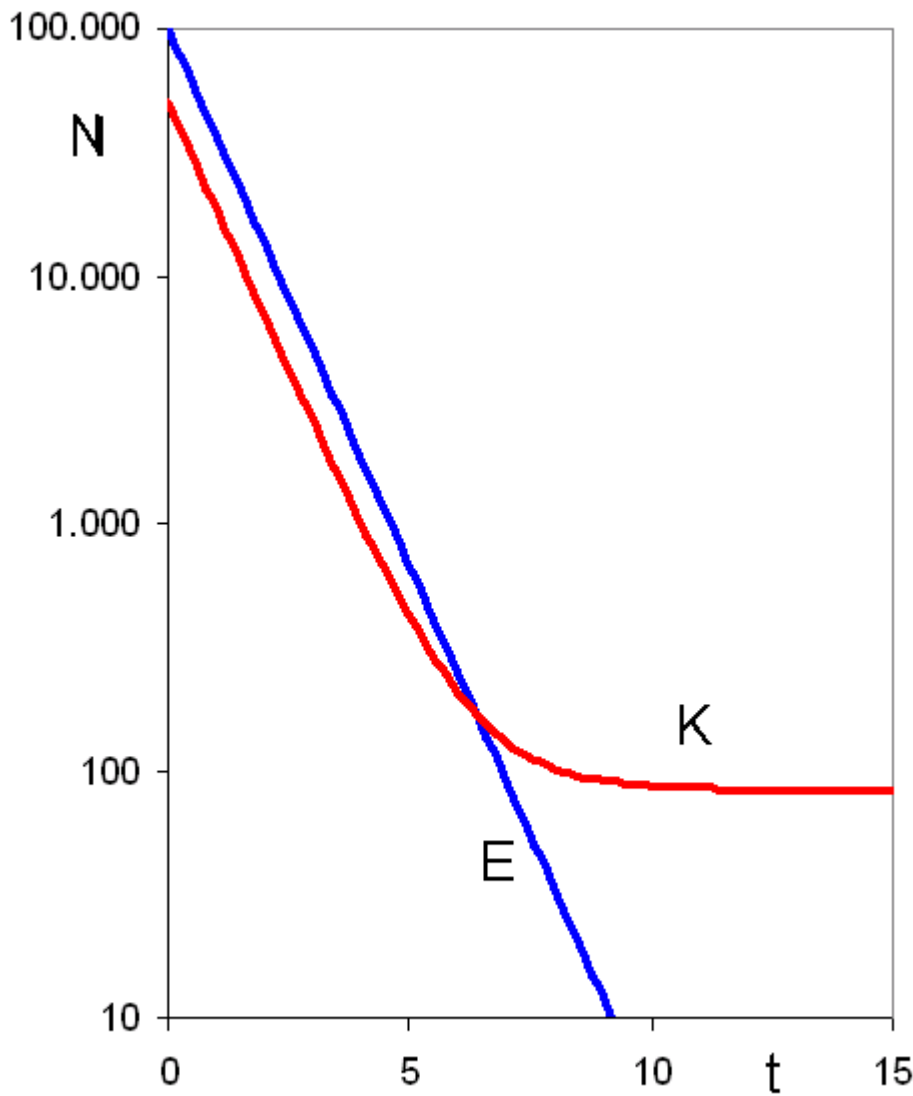




Verletzung der CP-Symmetrie

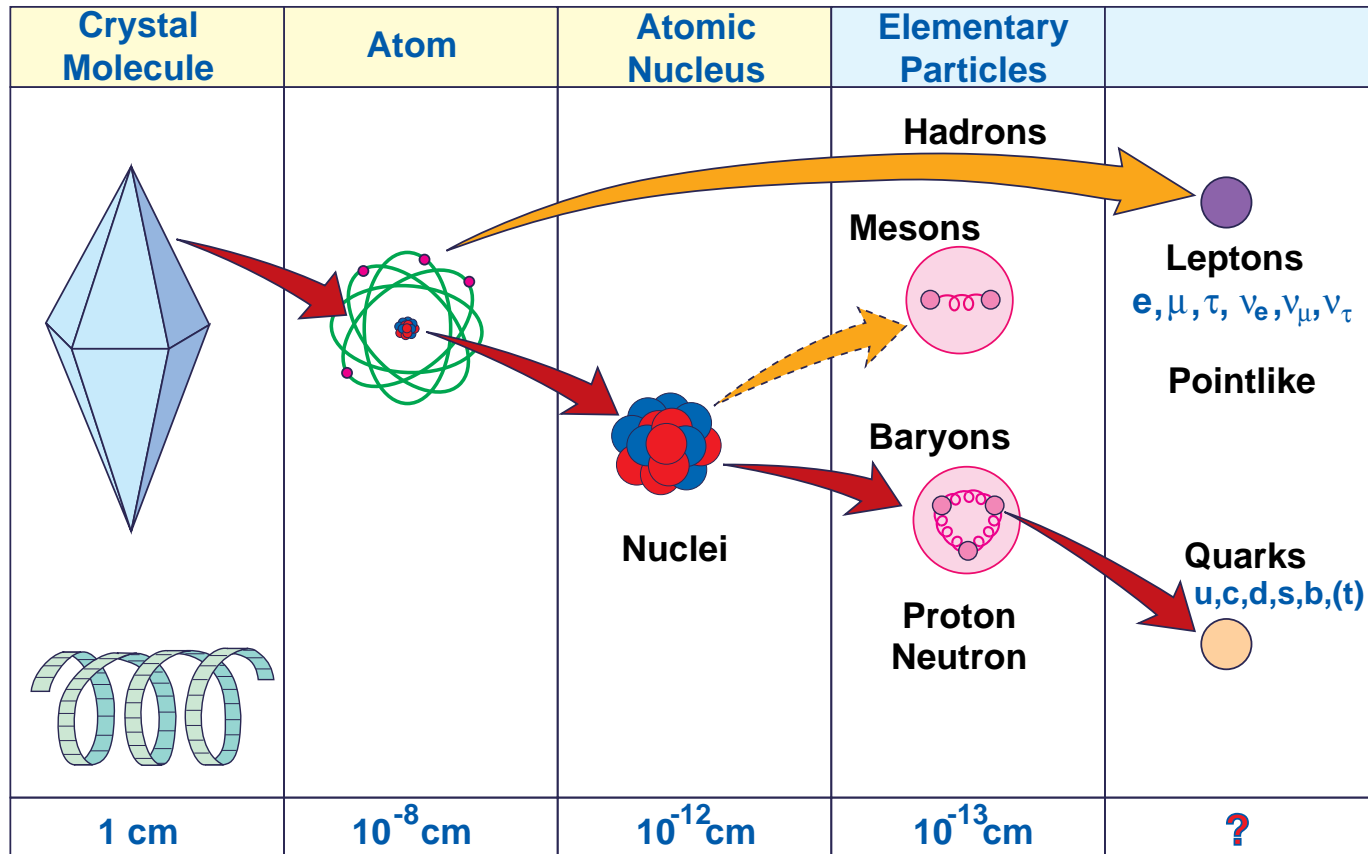
Die Idee

- Eigentlich sollten sich Materie und Antimaterie exakt spiegelbildlich verhalten!!
- Die negative Ladung eines Elektrons sollte genau so groß sein wie die positive seines Anti-Teilchens, des Positrons
- ABER ... aus Experimenten gibt es Hinweise, daß einige dieser Symmetrien gebrochen sind
- Dies bewirkt winzige Unterschiede im Verhalten von Anti-Teilchen
- Dies könnte den Überschuss an normaler Materie erklären ...

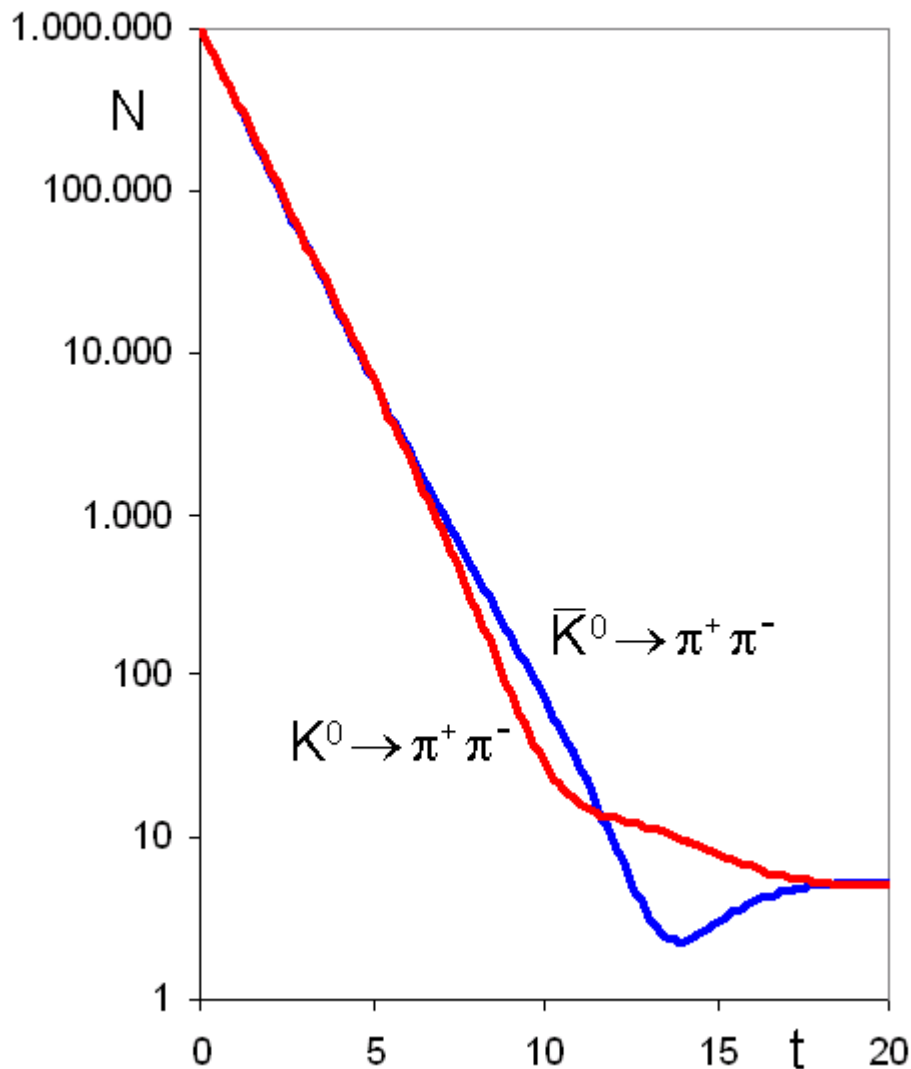


Die meisten Elementarteilchen zerfallen wie radioaktive Atomkerne nach dem exponentiellen Zerfallsgesetz E. Die blaue Kurve E gibt an, welche Anzahl N von ursprünglich 100.000 Teilchen nach der Zeit t noch unzerfallen vorhanden sind. Die rote Kurve K zeigt das davon abweichende Zerfallsgesetz von K^0 - und \bar{K}^0 -Mesonen; dieses ist für beide Teilchensorten gleich.

Der Aufbau der Materie

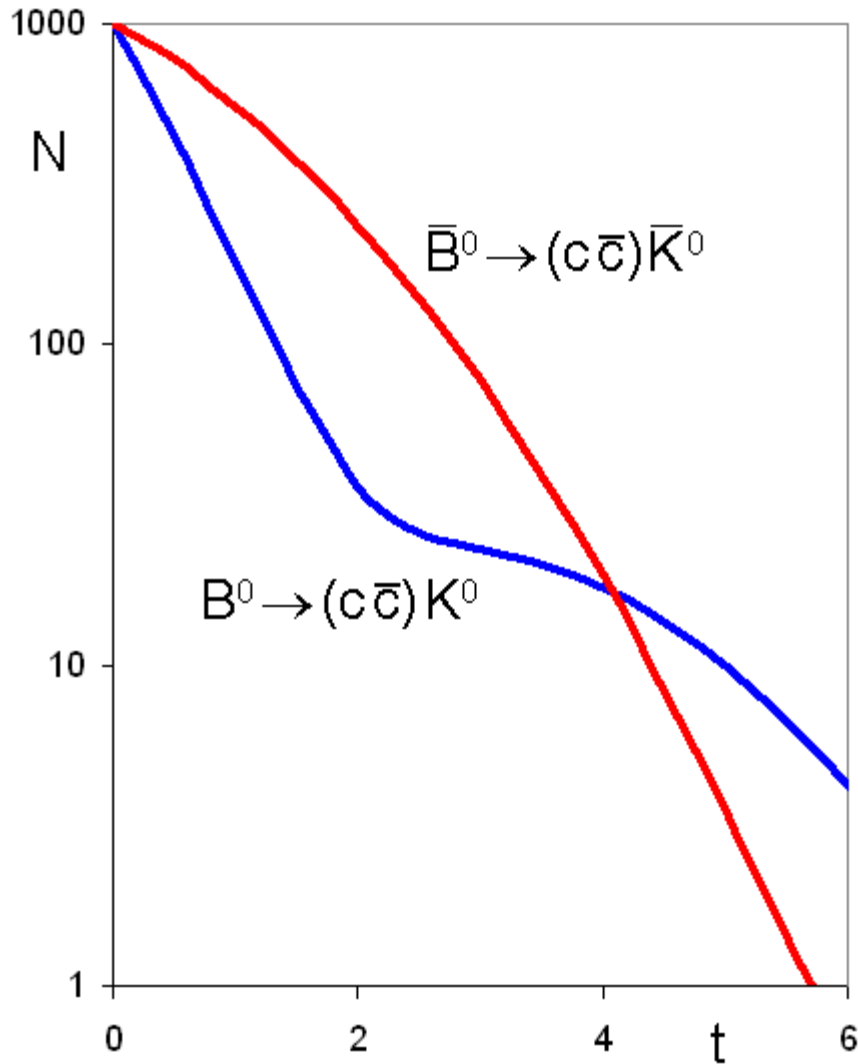


Mesonen: 140 verschiedene Arten



Die Zerfallsgesetze für die ausgewählten Zerfälle $K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ (rote Kurve) und $\bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ (blaue Kurve) sind verschieden und verletzen damit die CP-Symmetrie. Um dies zu beobachten, muss eine sehr große Zahl N von K^0 - und \bar{K}^0 -Mesonen produziert werden, weit über eine Million.

CP-Verletzung



Die Kurven sind drastisch verschieden; CP-Verletzung zeigt sich schon ganz kurz nach dem Beginn der Zerfälle, und wenige im Detektor registrierte Zerfälle (weniger als 1000) reichen schon aus, um den Effekt zu sehen.

Definition von „Materie“

- weiterer Zerfallskanal mit CP-Verletzung:

$$K_L \rightarrow \pi^- e^+ \nu_e \approx 0.3\% \text{ häufiger}$$

\updownarrow **CP**

$$K_L \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}_e$$

- das im Zerfall der langlebigen neutralen Kaonen seltener vorkommende geladene Lepton ist nach unserer Konvention
 - Materie
 - elektrisch negativ geladen
 - das assoziierte Anti-Neutrino ist rechtshändig

A graphic for the Nobel Prize 2008. It features a central white rectangular box containing the text "Nobelpreis 2008" in a blue, sans-serif font. The background is a dark blue gradient. Radiating from the center of the box are numerous thin, light green lines that fan out in all directions, resembling a starburst or a fireworks display. Interspersed among these lines are several small, solid red spheres, some of which are positioned at the ends of the lines, giving the impression of stars or particles in space.

Nobelpreis 2008



- The Kobayashi-Maskawa Timeline:
- **1964:**
- **Val Fitch and Jim Cronin discover that there is CP violation** at the 10^{-3} level in the decays of K_L mesons (Nobel prize in 1980)
- **1967:**
- **Andrei Sakharov proposes a set of three necessary conditions to explain the matter-antimatter asymmetry of the universe.** One of the critical ingredients is CP violation in fundamental interactions. (Nobel Peace prize in 1975)
- **1972:**
- **Makoto Kobayashi and Toshihide Maskawa propose a new scheme of weak interaction quark couplings.** This scheme requires three families of quarks and permits a CP violating phase in the quark mixing matrix. At the time only three quarks (u,d and s) were known, although there was some preliminary evidence from Kiyoshi Niu's group at Nagoya of the fourth quark (the c).

- **1974:**
- Teams led by Sam Ting at Brookhaven and by Burt Richter at SLAC discover the J/ψ , which turns out to be a bound state of c and c_{bar} quarks. Soon the "naked" c in D mesons is also detected by Gerson Goldhaber et al. (Nobel Prize for Ting and Richter in 1976).
- **1976:**
- Sandip Pakvasa and Hirotaka Sugawara point out that the **KM proposal can be used to account for the observed CP violation in K decays with appropriate choice of the mixing parameters** (more detailed analysis followed almost immediately in papers by Luciano Maiani and by John Ellis, Dimitri Nanopoulos and Mary K. Gaillard).
- **1977:**
- Leon Lederman and collaborators discover the bound state of the fifth quark b , as the Upsilon, the bound state of b and b_{bar} . Later, B mesons containing single b quarks are observed at CESR and at DESY. (Nobel Prize for Lederman in 1988).
- **1981:**
- Ikaros Bigi and A. Ichiro Sanda show that in the KM picture CP violating effects are observable in the B^0 - B^0_{bar} system if the B lifetime is long and B^0 - \bar{B}^0 mixing is large. They propose specific ways to measure them. (Sakurai Prize 2004).
- **1983:**
- The lifetime of mesons containing b quarks is found to be unexpectedly long ($\sim 10^{-12}$ sec) by the MAC and MarkII collaborations at SLAC. (Panofsky prize 2006 for Bill Ford, John Jaros and Nigel Lockyer)

- **1987:**
- Large B^0 -anti B^0 mixing discovered by ARGUS at DESY in Hamburg, West Germany. (Panofsky Prize 1997 for Henning Schroder and Yuri M. Zaitsev)
- **1993:**
- CLEO at Cornell finds that the weak coupling of b to u quarks ($|V_{ub}|$) is non-zero. This is a necessary but not sufficient condition for CP violation in the KM scheme.
- **1994:**
- Start of Belle and KEKB construction at KEK in Tsukuba, Japan
- **1995:**
- The sixth and final quark (the top quark) is observed at Fermilab by both the CDF and D0 collaborations. All six quarks anticipated in the KM paper are now at hand.
- **1998:**
- Beginning of KEKB accelerator operation. KEKB produces large samples of B mesons and will become the world's highest luminosity accelerator. (Katsunobu Oide, Wilson Prize 2004)
- **1999:**
- Beginning of Belle experimental operation.
- **2001:**
- Observation of large CP violation in $B \rightarrow J/\psi K^0$ at Belle and BaBar. The first clear and unambiguous verification of the complex phase in the KM proposal.

– **2008:**

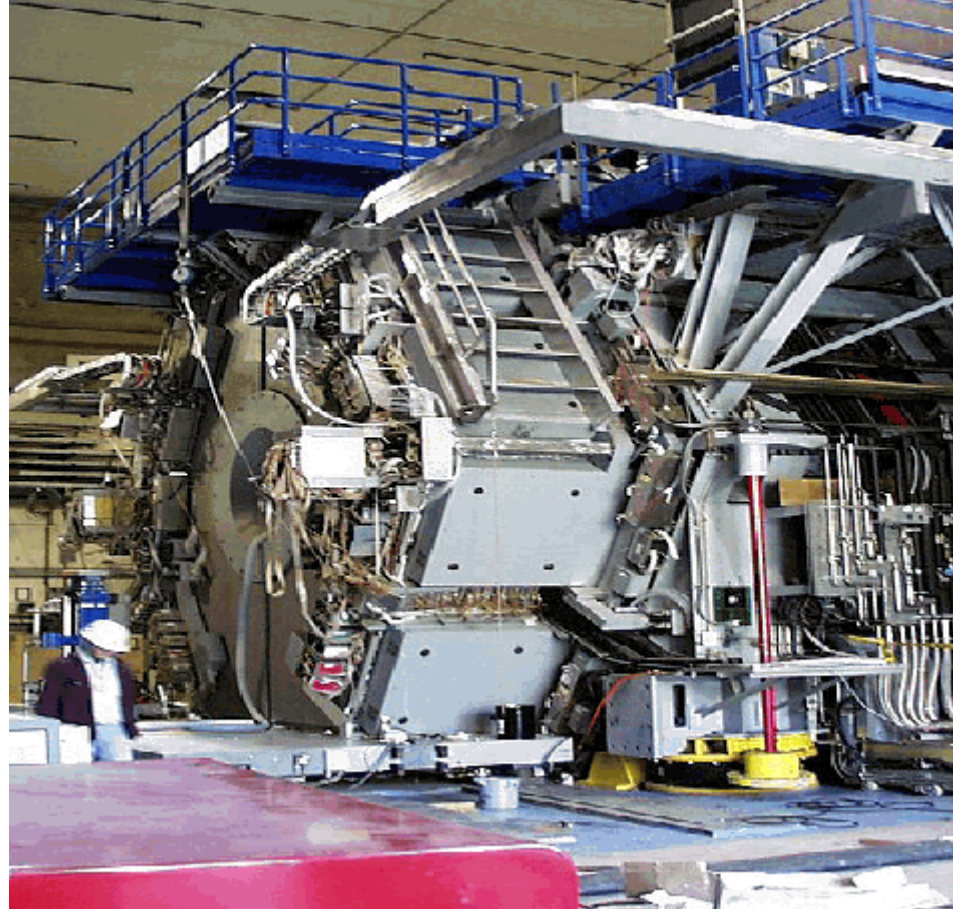
– Many new results from Belle and BaBar provide additional supporting evidence for the KM scheme.

2008:

– Nobel Prize for Makoto Kobayashi and Toshihide Maskawa for the theory to explain the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature

A visualization of particle tracks on a dark blue background. Numerous thin, light green lines radiate from a central point, representing particle paths. Several of these tracks terminate in small, solid red spheres, which likely represent decay products or specific particles of interest. The overall effect is that of a starburst or a complex particle event.

Spiegelsymmetrie-Experimente:
BaBar & BELLE



Blick auf den 1999 fertig gestellten BABAR-Detektor vor seinem Einbau in die Kollisionszone des PEP-II-Speicherrings. Der Detektor wurde von 1993 an von etwa 500 Physikern aus USA, Kanada, Russland, China, Italien, Großbritannien, Frankreich, Norwegen und Deutschland aufgebaut. 2006 beteiligten sich am Betrieb von BABAR und an der Auswertung der Daten etwa 600 Physiker, davon etwa 40 aus den Universitäten Bochum, Dresden, Dortmund, Heidelberg, Karlsruhe und Rostock.

BaBar-Experiment

- Experiment der Hochenergiephysik
- am Stanford Linear Accelerator Center
- Ziel: das fast völlige Fehlen von Antimaterie im Universum zu erklären

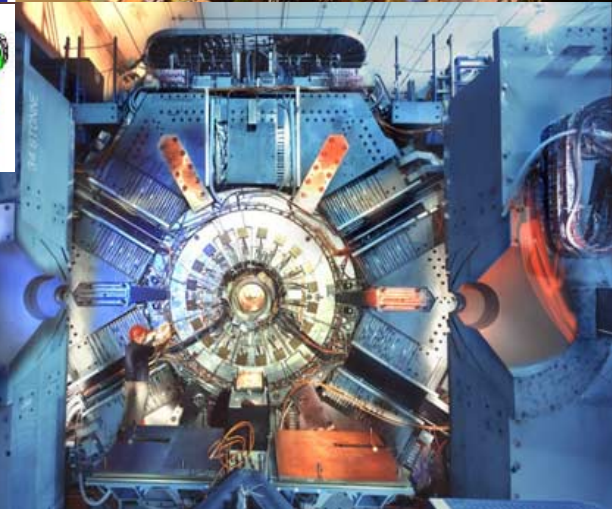
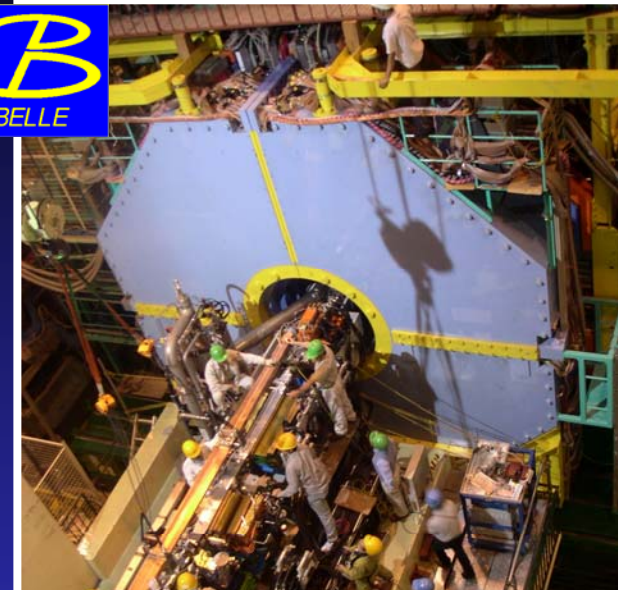
- Verletzung der Symmetrie von Ladung und Parität (CP-Verletzung) beim Zerfall von B-Mesonen untersuchen (im Standardmodell der Teilchenphysik vorhergesagt); **CP-Verletzung zeigt sich hierbei im unterschiedlichen Verhalten von B- und Anti-B-Mesonen**

- 459 Physiker aus 10 Ländern, Experiment nach B and B-bar
- Konkurrenzexperiment Belle in Japan
- Bereits 2002 CP-Verletzung im System neutraler B-Mesonen nachgewiesen

- BaBar-Detektor ist ein (fast) 4π Teilchendetektor mit abbildendem Tscherenkow-Detektor, der sehr wenig Material im aktiven Bereich des Detektors benötigt, Pionen und Kaonen können so sehr effizient in allen Impulsbereichen voneinander unterschieden werden, außen rekonstruiert ein Kalorimeter die Energie der neutralen Teilchen, umschlossen von Muon-Kammern

- Untypisch: asymmetrische Energie der beiden Elektron (9.1 GeV) und Positron-Strahlen (3.4 GeV) die im Innern des Detektors zur Kollision gebracht werden. Dadurch bewegt sich das Schwerpunktsystem relativ zum Detektor – Rekonstruktion des B-Zerfallsvertices wird möglich

Results from BELLE and BaBar



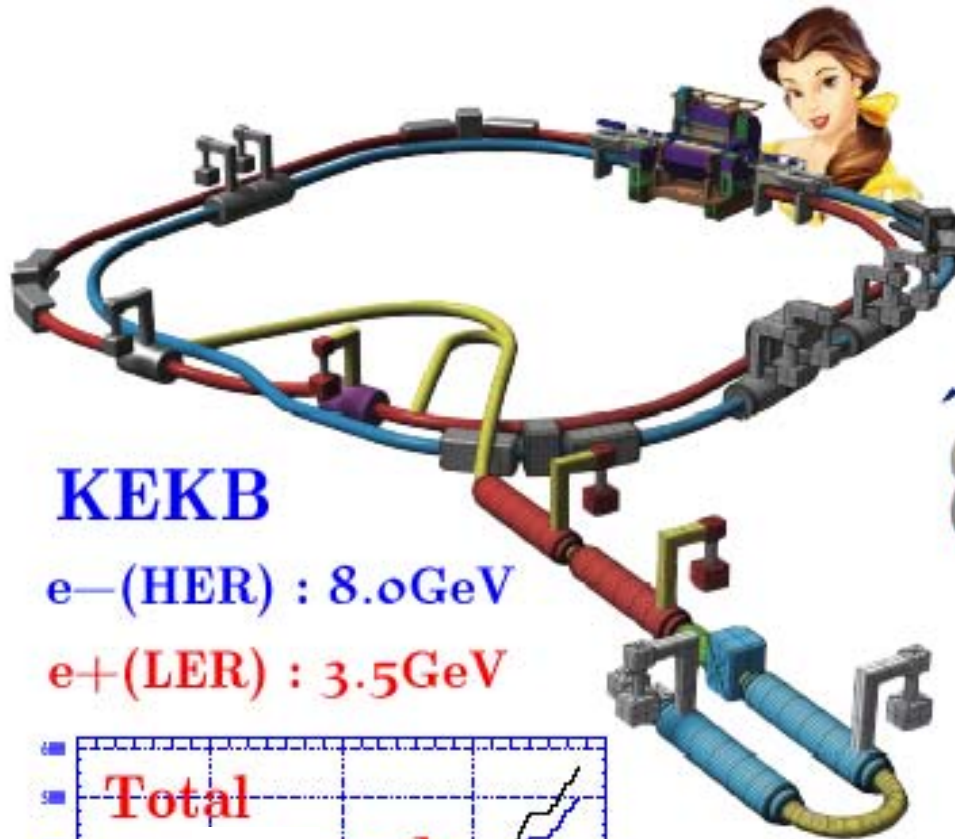
- Experiments/Tools
- B-Physics
- Selected topics of new Results

Resultate vom BELLE und BaBar Experiment

PDA-06 G.Leder 7.Juni 2006



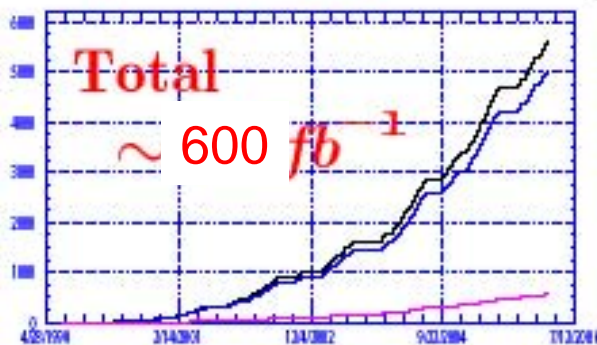
Asymmetric Energy e+e- Collider



KEKB

e^- (HER) : 8.0 GeV

e^+ (LER) : 3.5 GeV

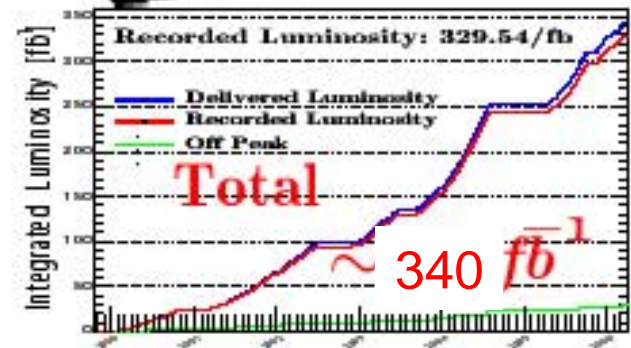
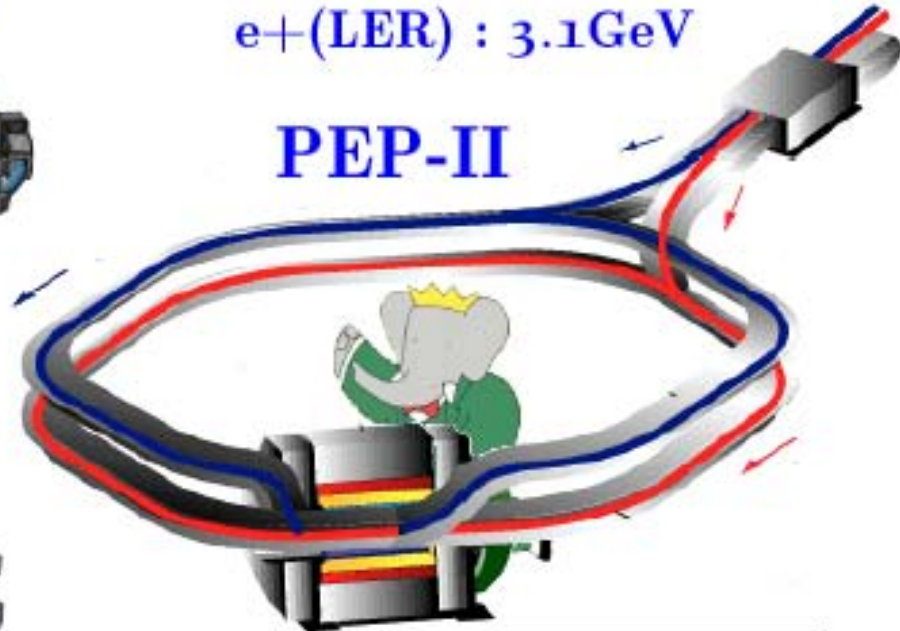


$$E_{\text{cm}} = 10.58 \text{ GeV} \quad (= @ \Upsilon(4S))$$

e^- (HER) : 9.0 GeV

e^+ (LER) : 3.1 GeV

PEP-II



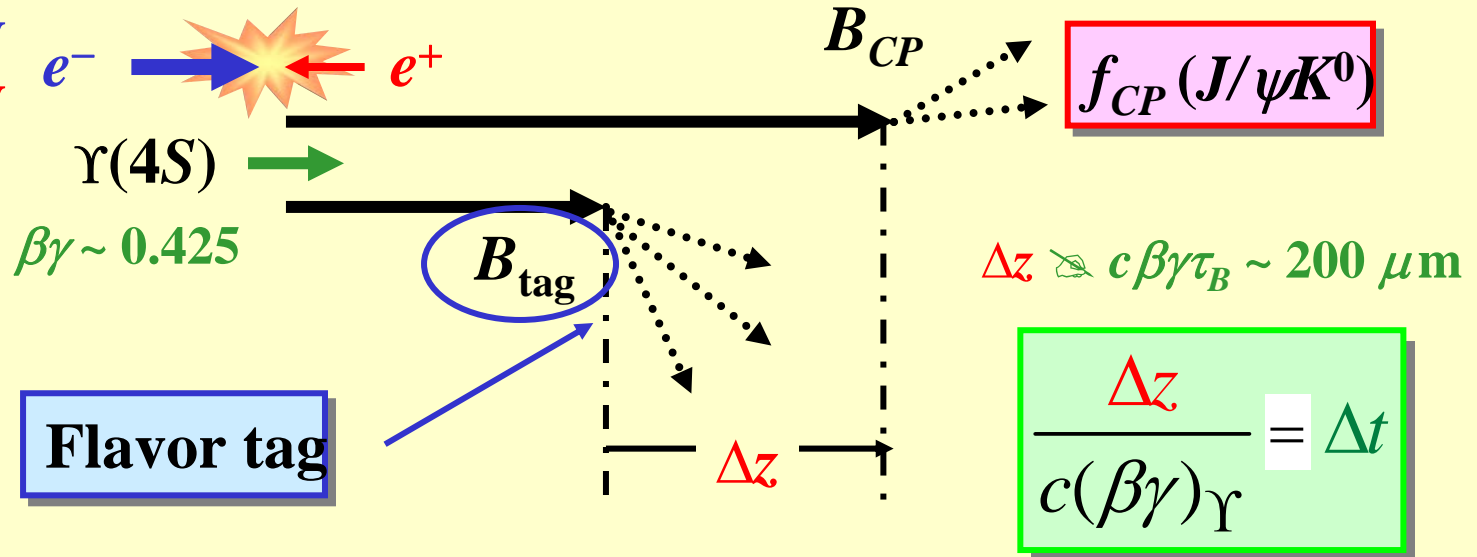
Resultate vom BELLE und BaBar Experiment

PDA-06 G.Leder 7.Juni 2006



Principle of Measurement

e^- : 8.0 GeV
 e^+ : 3.5 GeV



- Reconstruct $B \rightarrow J/\psi K^0$ Decays
proper-time difference: Δt
- Get flavor from B_{tag}
- Calculate CP Asymmetry from both Δt Distributions

Detectors

Belle



tracking/vertexing

Silicon Strip Detector
Drift Chamber

1.5T Solenoid

e/γ detection

CsI calorimeter

$\pi/K/p$ identification

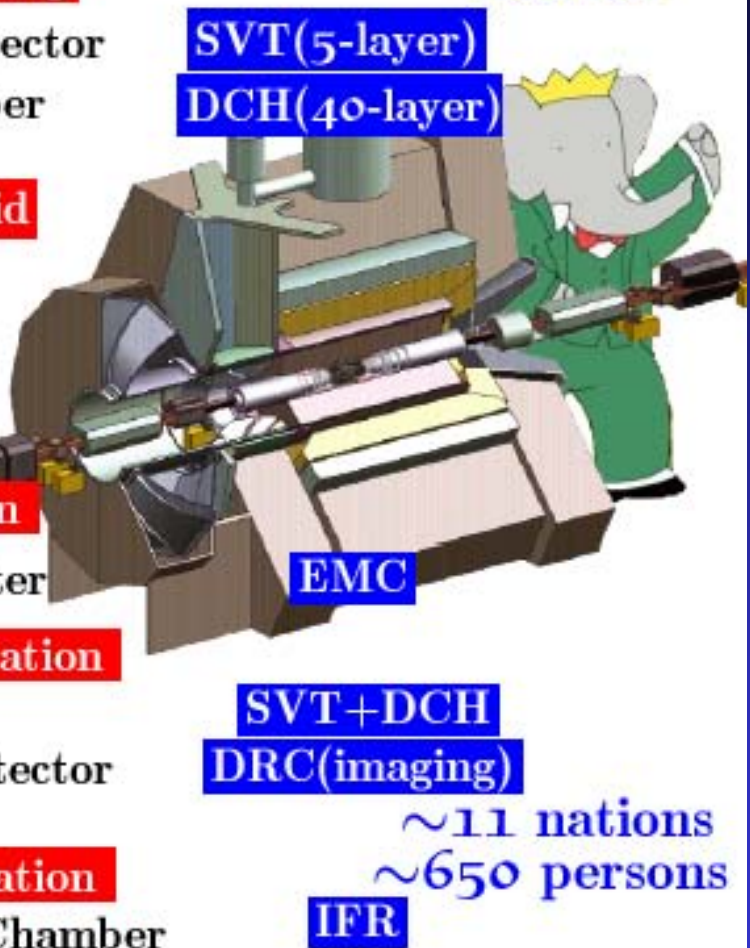
dE/dx

Cherenkov detector

μ/K_L identification

Resistive Plate Chamber

BaBar



Resultate vom BELLE und BaBar Experiment

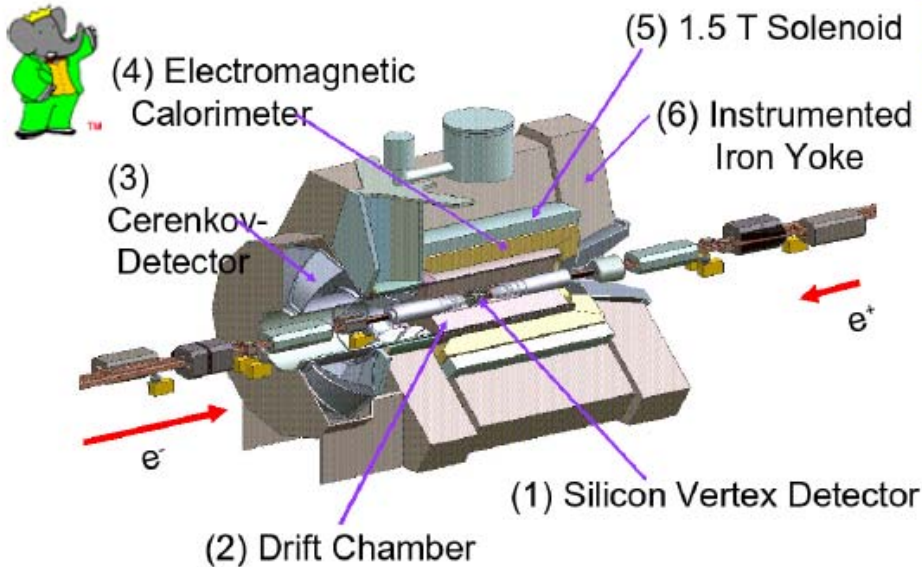
PDA-06 G.Leder 7.Juni 2006



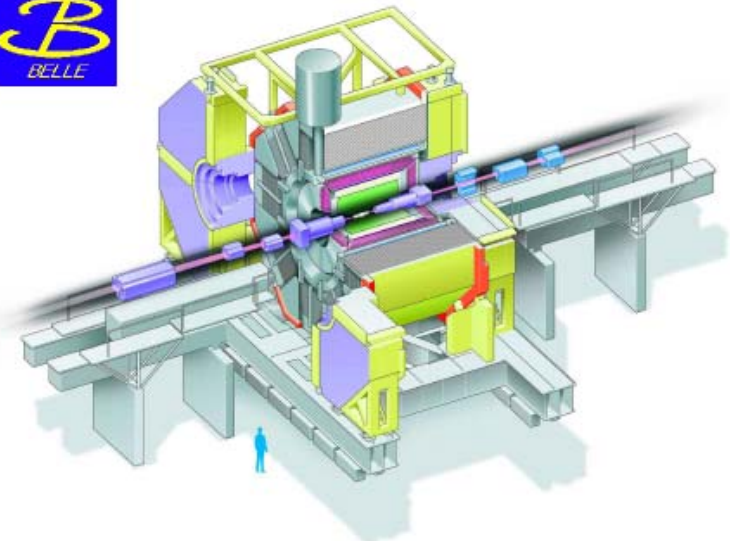


❖ B-Physik mit B_d -Mesonen aus $\Upsilon(4s)$ -Zerfällen

BaBar



Belle



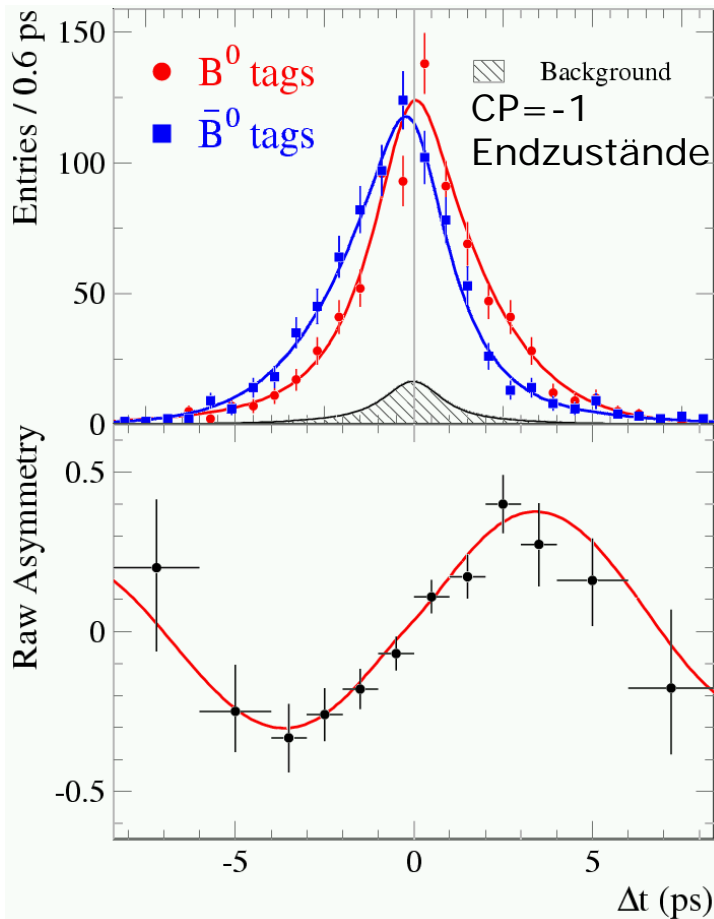
- ✗ $L_{\max} = 1.21 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- ✗ integrierte Luminosität 531 fb^{-1}
- ✗ 480 Millionen BB-Paare

- ✗ $L_{\max} = 1.71 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- ✗ integrierte Luminosität 840 fb^{-1}
- ✗ 840 Millionen BB-Paare

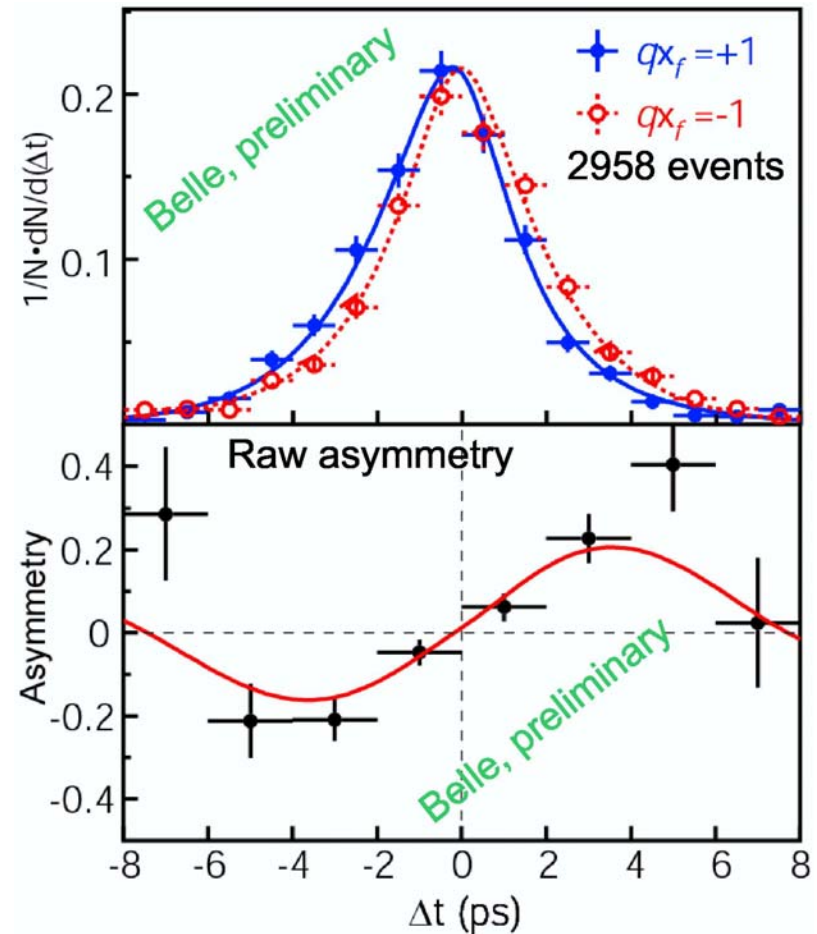
zahlreiche Messungen von CP Verletzung und seltenen Zerfällen

Messung von CP-Verletzung im B-System

BaBar



Belle



BaBar: $\sin 2\beta = 0.741 \pm 0.067$ (stat) ± 0.033 (sys)

Belle: $\sin 2\beta = 0.719 \pm 0.074$ (stat) ± 0.035 (sys)

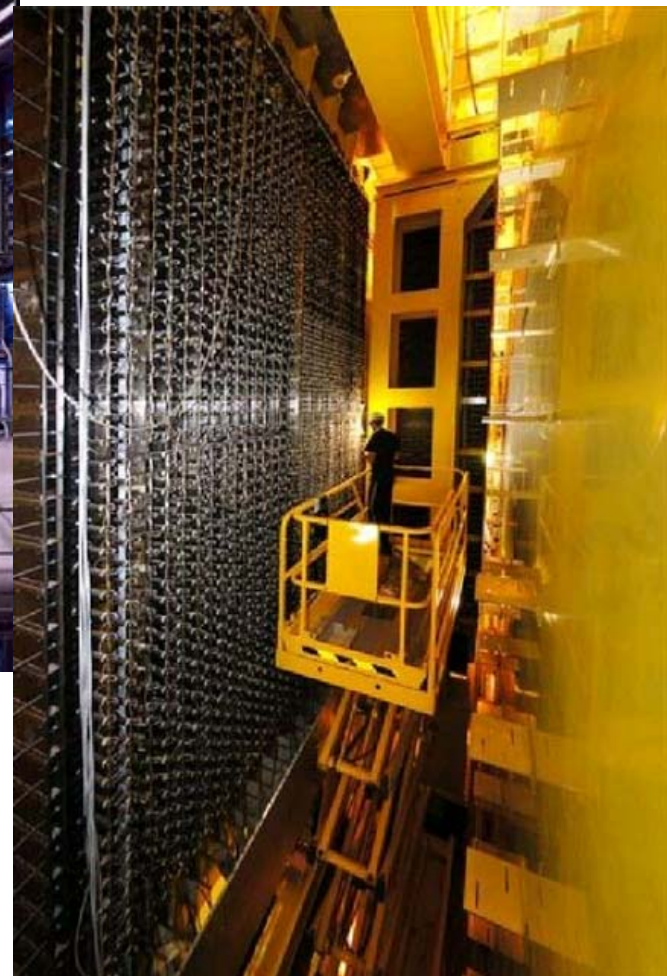
[ICHEP2002]

A visualization of a particle detector, likely a calorimeter or tracking chamber, showing a central point of interaction from which numerous green and blue lines radiate outwards. Several red spheres are positioned along these lines, representing particle tracks or interaction points. The background is a dark blue gradient.

Die Antimaterie-Experimente am LHC



Das LHCb-Experiment im Frühjahr 2008



Arbeiten am Kalorimeter von LHCb



Blick auf die
Myonkammern des LHCb

In 14 Tagen



- 30.10. Gamma-Ray Bursts
- 13.11. GUT & TOE (Stringtheorie, etc.)
- 27.11. LHC & Higgs
- 11.12. Higgs & die Physik jenseits des Standardmodells

Winterferien: 23.12.-06.01.10

- 08.01.10 Das Puzzle: Dunkle Materie, der LHC und die Frühphasen des Universums
- 22.01.10 LHC: Materie & Antimaterie

- **05.02.10 Zeitfragen**

