

Ein Satellitenexperiment zur Suche nach kosmischer Antimaterie

Ulrich F. Katz

Rheinische Friedrich–Wilhelms–Universität
zu Bonn



Habilitationskolloquium
1. Juli 1998

- Das Materie–Antimaterie–Rätsel
- Kosmische Strahlung
- Das *Alpha Magnetic Spectrometer* (AMS)
- Zusammenfassung

Das Materie–Antimaterie–Rätsel

Makroskopische Welt:

Unsere Umgebung ist Materie–dominiert

- Gibt es Anti–Sonnen, Anti–Galaxien, ... ?
- Nicht in ~ 30 Millionen Lichtjahren Umgebung!
Durchmesser unserer Galaxis ~ 50000 Lichtjahre

Teilchenphysik:

Zu allen Teilchen gibt es Antiteilchen

Elementare
Fermionen:

$$\begin{aligned}e^- &\leftrightarrow e^+ \\ \nu &\leftrightarrow \bar{\nu} \\ q &\leftrightarrow \bar{q} \\ &\dots\end{aligned}$$

Hadronen:

$$\begin{aligned}p &\leftrightarrow \bar{p} \\ n &\leftrightarrow \bar{n} \\ \pi^+ &\leftrightarrow \pi^- \\ &\dots\end{aligned}$$

Atome:

Antiwasserstoff kürzlich
erstmals im Labor
hergestellt.

Entstehung des Kosmos:

Urknall–Theorie

- Standardmodell der Kosmologie
- Erklärt u.a. kosmische Hintergrundstrahlung
- Unmittelbar nach Urknall ($t < 10^{-36}$ s):
gleiche Mengen Materie und Antimaterie

Kosmologische Modelle

Universum ohne Antimaterie:

- Globale Symmetriebrechung zwischen Materie und Antimaterie ($t \sim 10^{-36} \text{ s}$)
- Nach Materie–Antimaterie–Vernichtung verbleibt **Materie-dominiertes Universum**

Lokal asymmetrisches Universum mit Antimaterie:

- Globale Symmetrie erhalten, aber ...
- lokale Domänen (z.B. Galaxien–Cluster)
- lokale Variation der Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie
- Materie– und Antimaterie–Bereiche

Widerspruch
zwischen Materie–Antimaterie–Symmetrie
im Anfangszustand und heutiger Asymmetrie
ist mit dem Standardmodell der Teilchenphysik
nicht zu erklären!

Kosmische Strahlung

Strahlung und Teilchen aus dem Weltall:
einziges experimentelles Fenster ins Universum

Welche Teilchen kommen aus dem Kosmos?

Geladene Komponenten:

- Zusammensetzung:
 - 2% Elektronen und Positronen
 - 98% Kerne
 - davon (für $E_{\text{kin}} > 0.1 \text{ GeV}$): 87% Protonen
 - 12% Helium-Kerne
 - 1% schwerere Kerne
 - $\lesssim 0.01\%$ Antiprotonen
 - $10^{-?}\%$ andere Anti-Kerne
- Ablenkung in interstellaren Magnetfeldern:
 - isotroper Einfall
- Teilchen-Energien bis $\sim 10^{20} \text{ eV}$
 - ($\sim$ kinetische Energie eines Tennisballs beim Aufschlag)

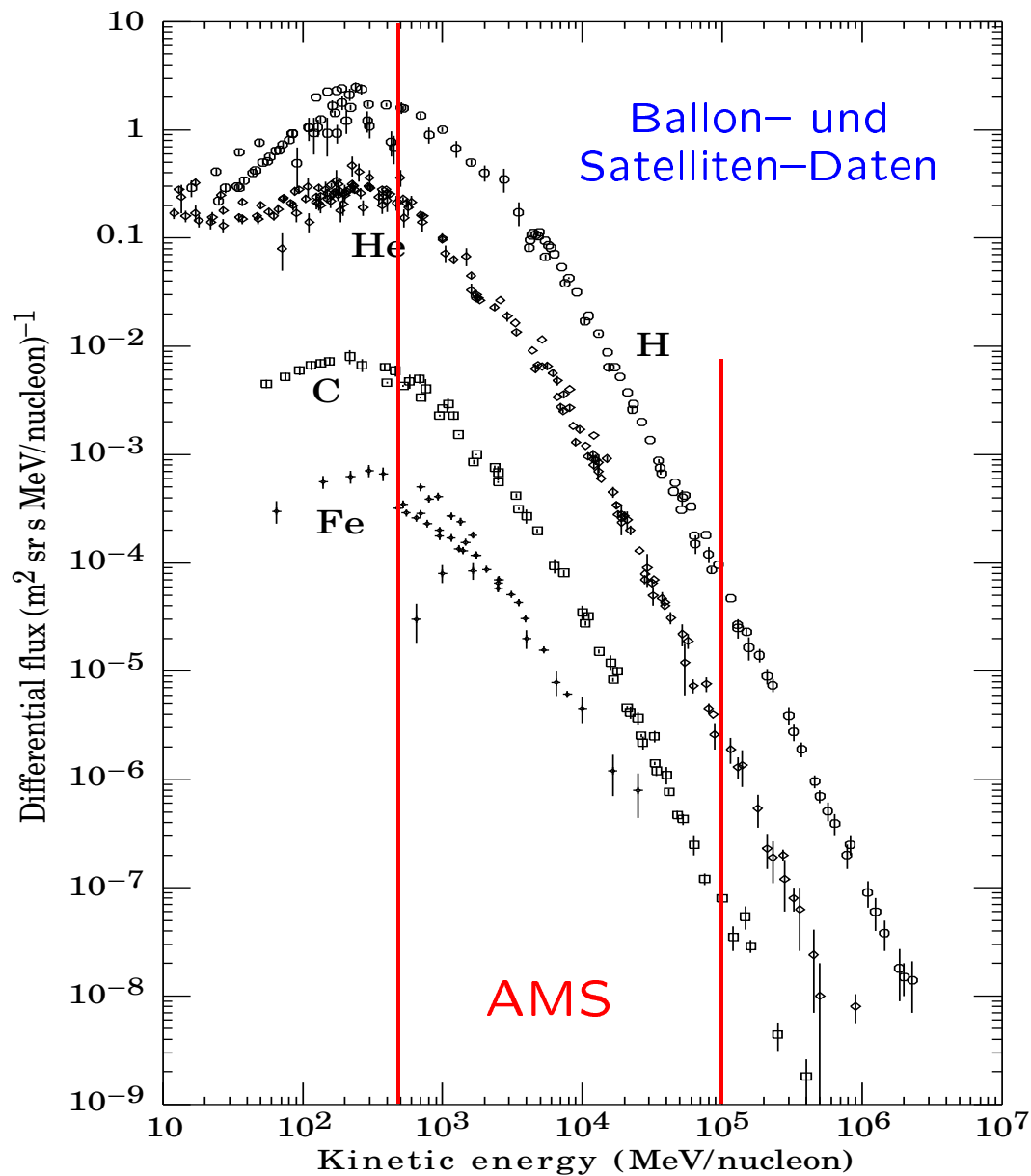
Neutrale Komponenten:

- Photonen und Neutrinos
- Keine Ablenkung im interstellaren Raum

Nachweis kosmischer Strahlung

Höhe [km]		Bisher: vorwiegend Nachweis von γ 's (COBE, ROSAT, CGRO u.a.) und von Kernen
~ 400	<u>Satelliten</u> Restatmosphäre vernachlässigbar	AMS: $p, \bar{p}, A, \bar{A}, e^+, e^-, \gamma$ Erste Datennahme: Juni '98 auf Flug mit Space Shuttle
~ 40	<u>Ballone</u> Restatmosphäre $\sim 5 \text{ g/cm}^2$	Bisherige Hauptquelle für Antimaterie–Messungen (BESS, CAPRICE u.a.) ⊖ Kurze Flugzeiten (Tage) ⊖ Restatmosphäre
0	<u>Boden</u> Atmosphäre $\sim 1 \text{ kg/cm}^2$	Nachweis von Luft–Schauern und (Anti)neutrinos Keine Möglichkeit zur Unterscheidung von Materie und Antimaterie Ermöglicht Beobachtung höchstenergetischer Strahlung

Energiespektrum kosmischer Kerne



~ 3000 Protonen und schwerere Kerne
pro $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sterad}$
mit kinetischer Energie pro Nukleon $> 0.5 \text{ GeV}$

Herkunft kosmischer Antimaterie (dominante Quellen)

Positronen und Antineutrinos:

- π -Zerfälle (z.B. $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \nu_\mu$)
- Radioaktive Kern-Zerfälle
- Paarerzeugung: $\gamma + A \rightarrow e^+ e^- + A$

Antiprotonen:

- Hadronische Reaktionen kosmischer Protonen mit interstellarer Materie

Antikerne mit $Z \geq 2$:

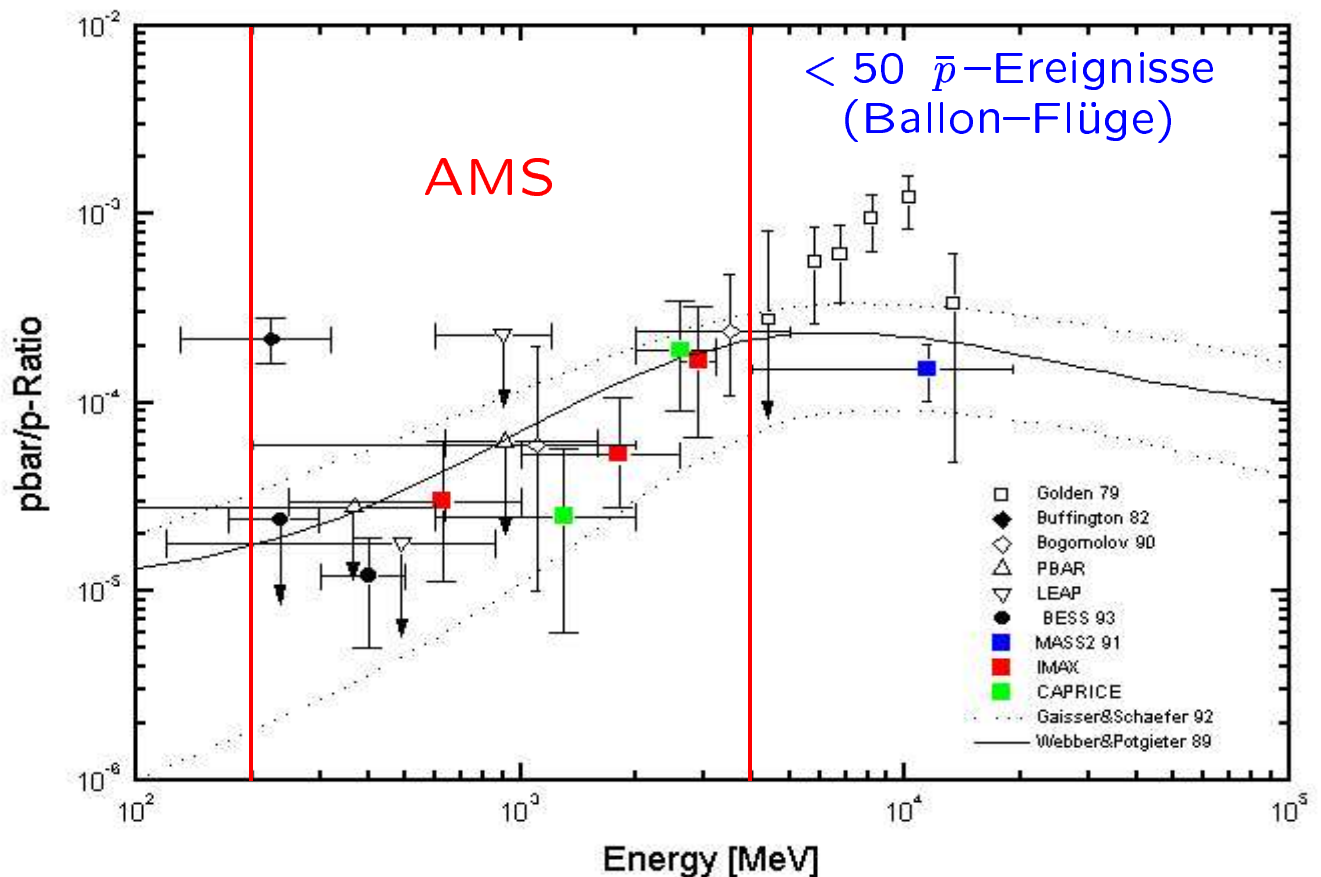
- In Teilchenreaktionen (z.B. $p + p \rightarrow \bar{\text{He}} + X$)

extrem unterdrückt: Verhältnis $\bar{\text{He}}/\bar{p} \sim 10^{-10}$
Verhältnis $\bar{\text{C}}/\bar{p} \sim 10^{-56}$

- Antikerne können entstehen:
 - in Anti-Sternen
 - in abkühlendem Antimaterie-Plasma (Baryogenese)

Nachweis von Antikernen wäre starkes Indiz
für Antimaterie-Domänen im Kosmos

Messungen zum $\bar{p}/p$ -Verhältnis



Theoretische Modelle:

$\bar{p}$ -Aufenthaltsdauer in unserer Galaxis $\mathcal{O}(10^6)$ Jahre
 Reaktionsmechanismen mit interstellarer Materie bekannt
 $\bar{p}/p$ -Verhältnis berechenbar (z.B. "leaky box"-Modell)

$\bar{p}$ -Überschuß bei Energien $E \lesssim 2 \text{ GeV}$
 könnte Hinweis sein auf

Dunkle Materie als primäre $\bar{p}$ -Quelle

(z.B. Neutralino-Vernichtung: $\chi + \bar{\chi} \rightarrow \bar{p} + X$)

Primordiale schwarze Löcher

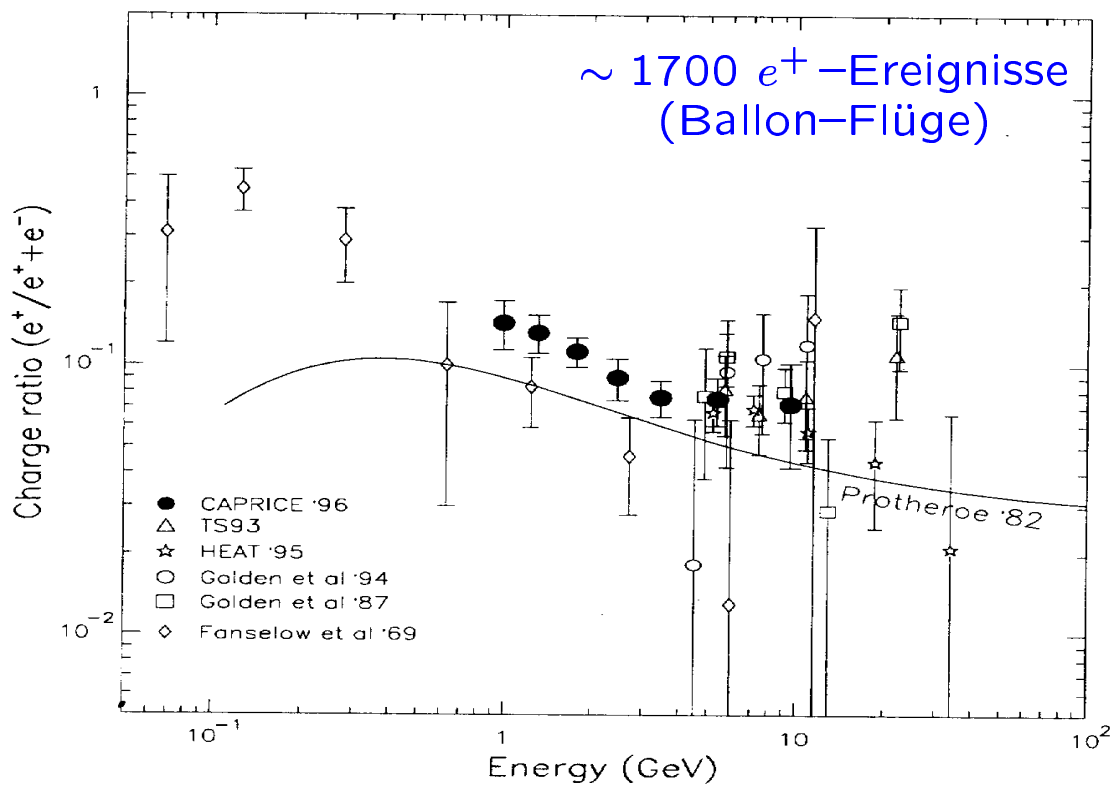
Andere Antimaterie–Messungen

Das $\bar{A}/A$ –Verhältnis:

- Noch kein Nachweis von Antikernen ($Z \geq 2$)
- Derzeitige Sensitivität:
 $\sim 10^{-5}$ für $\overline{\text{He}}/\text{He}$ und $\sim 10^{-4}$ für $\bar{A}/A$ ($Z > 2$)

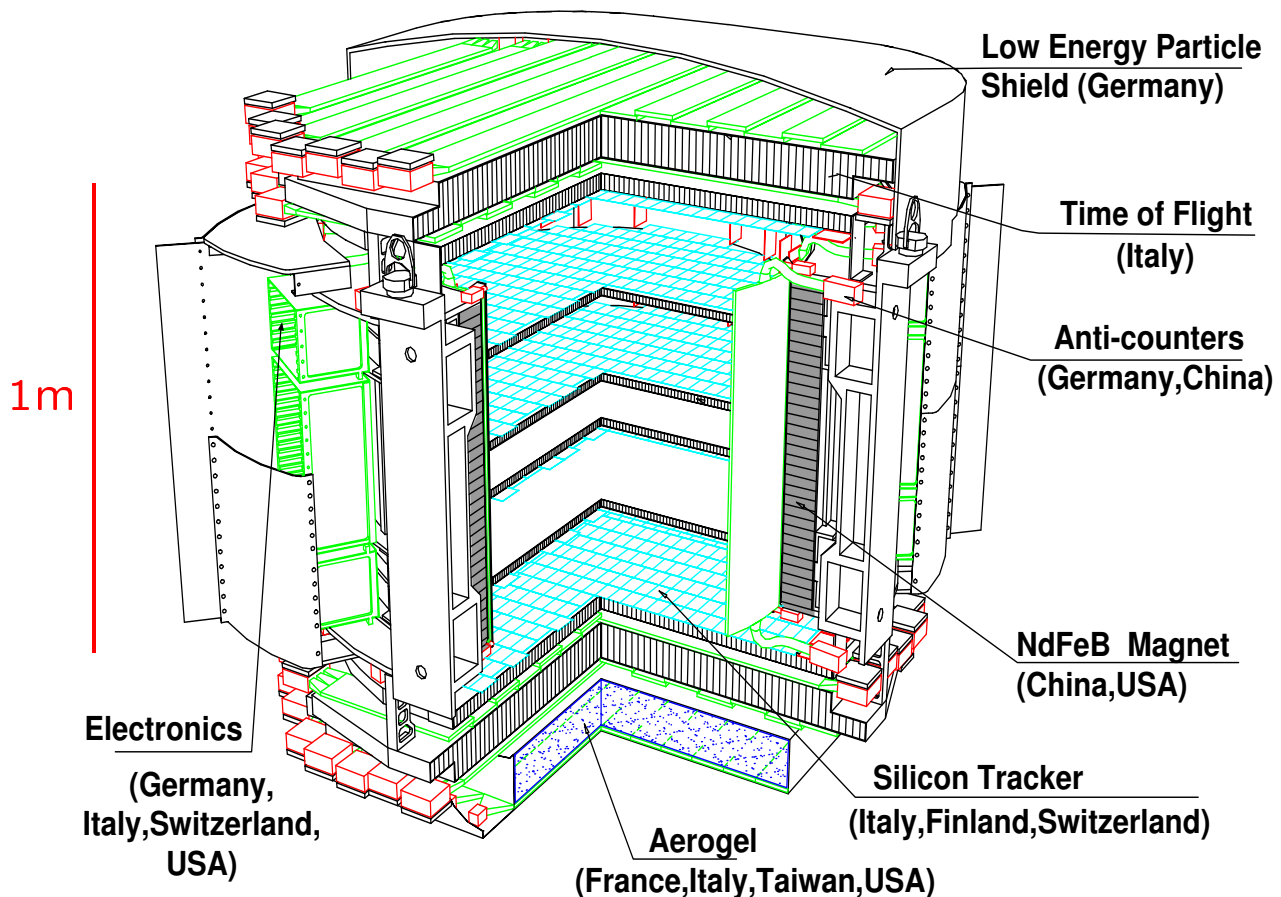
Erwarteter Antikern–Fluß von kosmischen Antimaterie–Domänen ist 2 – 3 Größenordnungen kleiner !

Das e^+/e^- –Verhältnis:



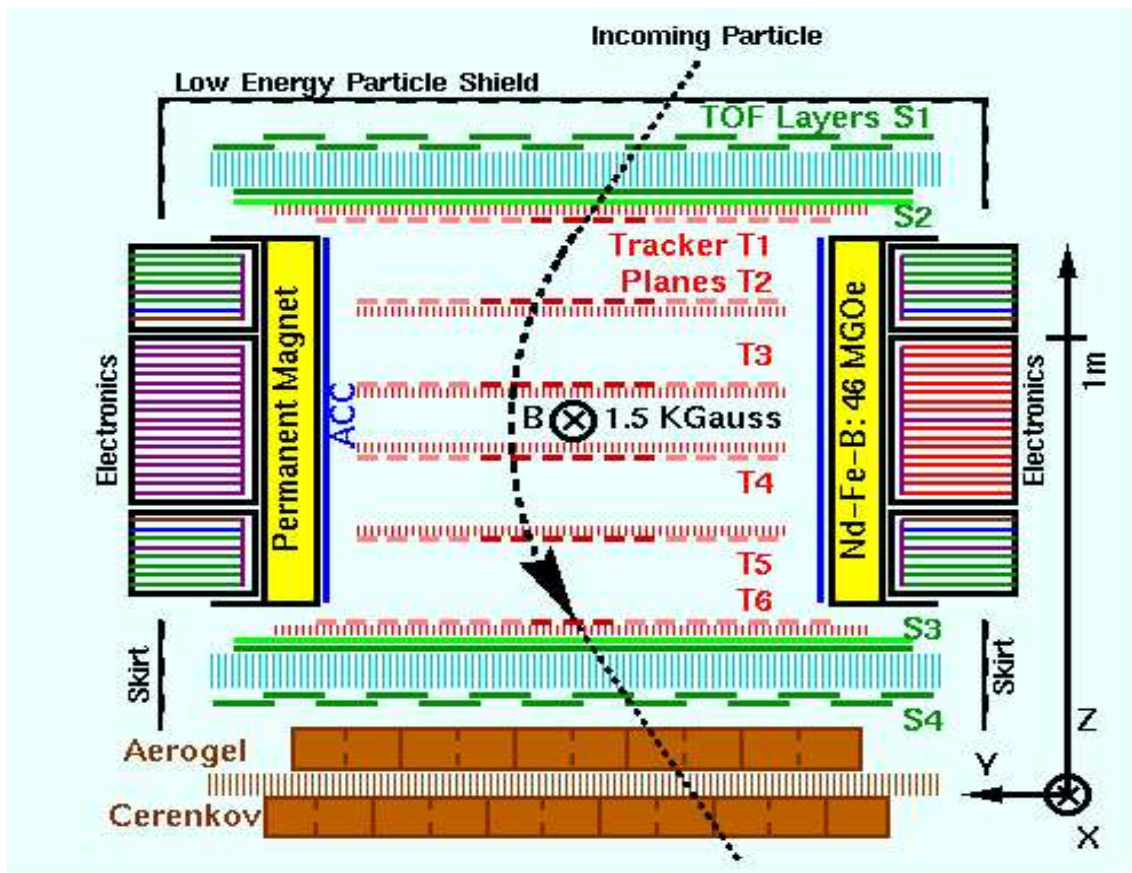
Das Alpha Magnetic Spectrometer (AMS)

Teilchenphysik-Experiment im Weltraum



- Extreme Anforderungen an Stabilität gegen Vibrationen und Temperatur-Schwankungen
- Erste Datennahme: **Anfang Juni 1998**
- Ziel: ab 2002 für **3 – 5** Jahre auf der internationalen Raumstation **Alpha**

AMS: Funktionsweise

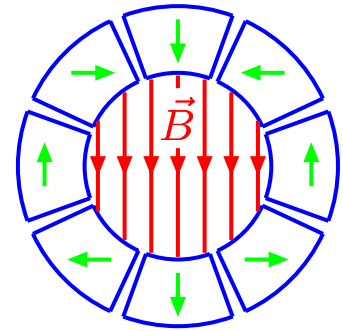


- **Impulsbestimmung:**
Krümmung der Spur im Magnetfeld aus Präzisionsmessung mit Silizium-Detektor
- **Geschwindigkeits-Messung:**
Flugzeit zwischen Szintillatorschichten
Cerenkov-Licht im Aerogel-Volumen
- **Ladungsbestimmung:**
Ionisation in Silizium und Szintillator

AMS: Impulsmessung

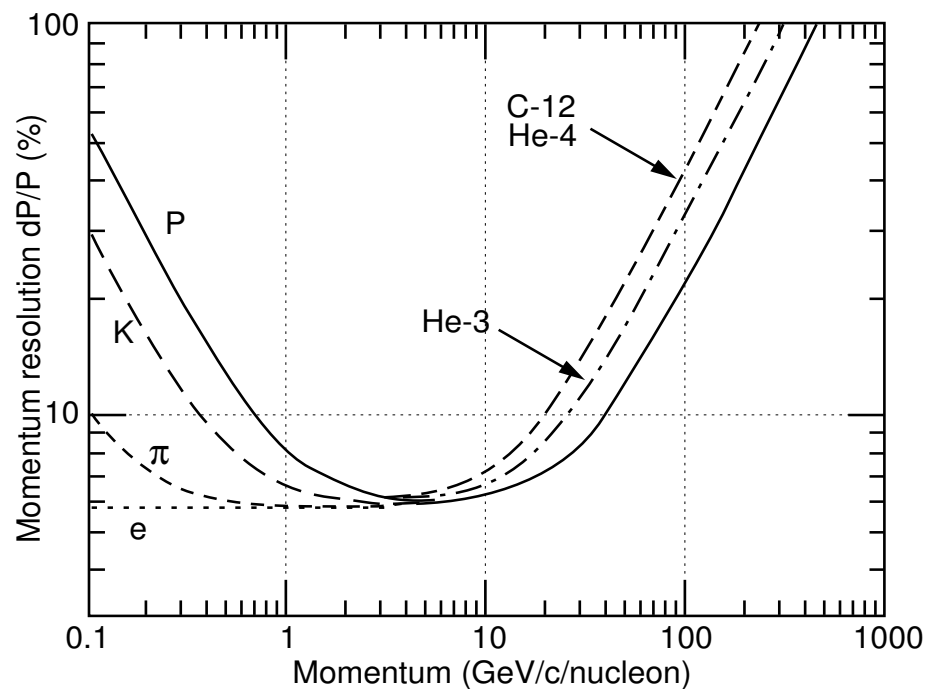
Der Magnet:

- Permanentmagnet (**Nd–B–Fe**)
- Mehr als **10 mal** größere magnetische Energiedichte als in Eisen
- $|\vec{B}| = 0.15 \text{ Tesla}$



Spurmessung:

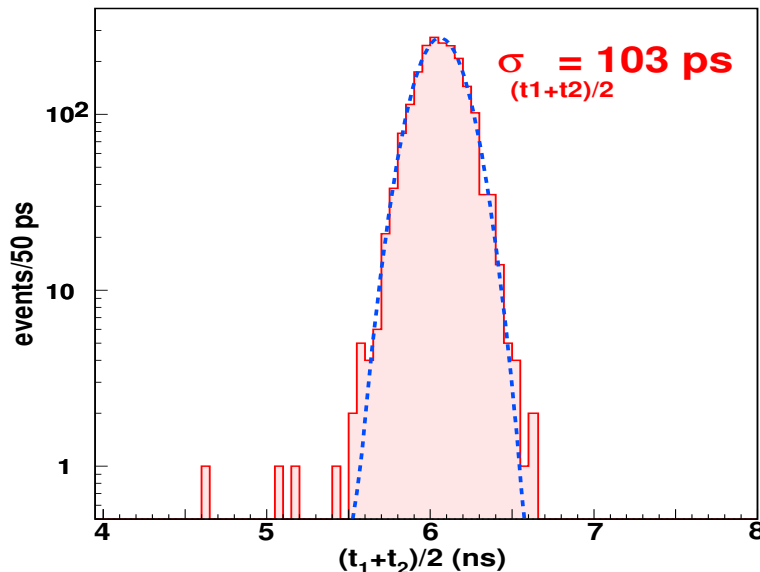
- **6 Lagen doppelseitige Si–Streifenzähler**
- Ortsauflösung: **10 μm in Krümmungsebene**
30 μm in Magnetfeldebene



AMS: Geschwindigkeitsmessung

Meßgenauigkeit:

- 4 Szintillator-Lagen ermöglichen zwei unabhängige Messungen der Flugzeit



$$v = \frac{\Delta L}{\Delta t}$$

$$\Delta L = 1.4 \text{ m}$$

$$\Delta t \sim 4.7 \text{ ns} \quad (v = c)$$

$$\delta(\Delta t) \sim 0.1 \text{ ns}$$

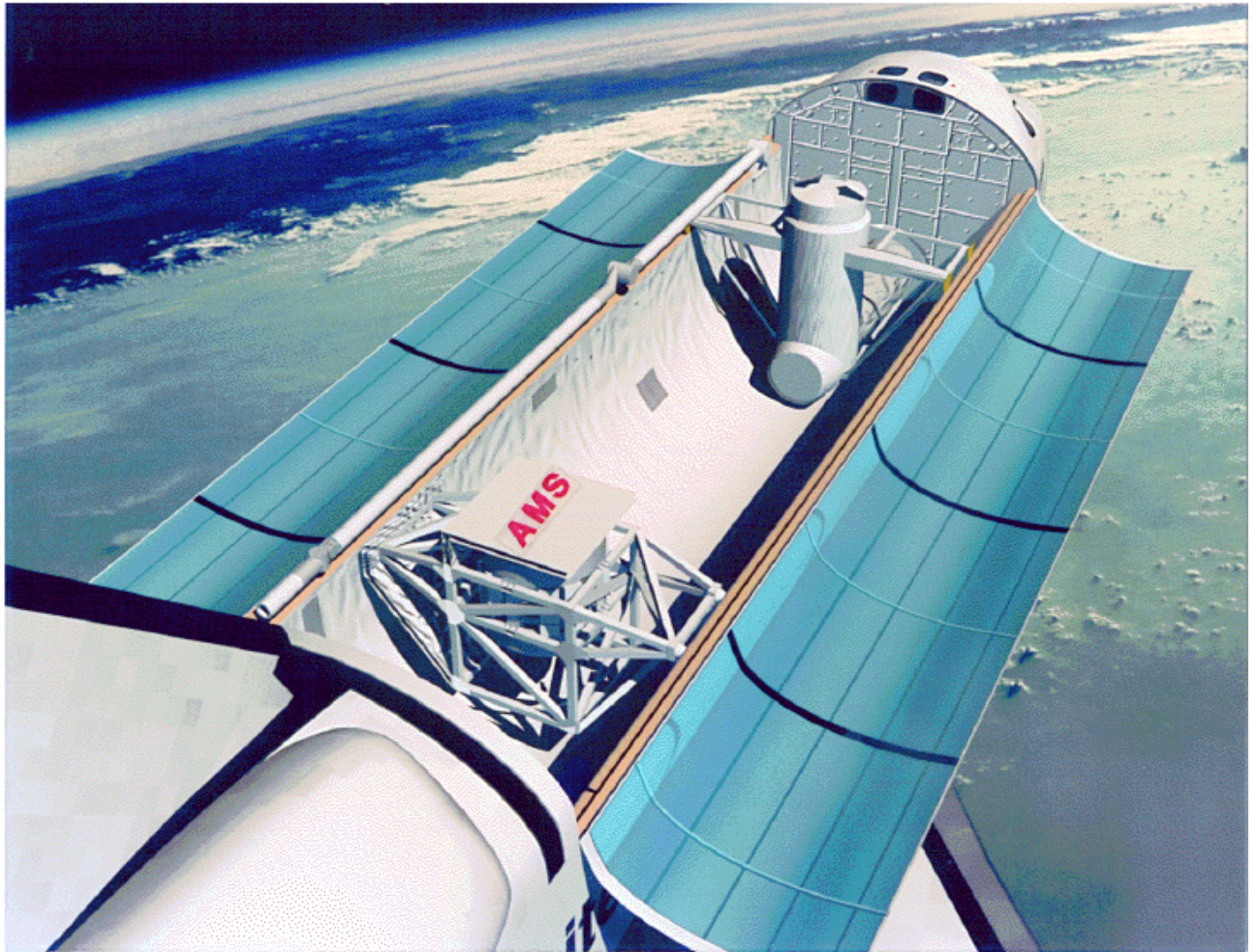
$$\delta\beta = \delta\left(\frac{v}{c}\right) = \beta^2 \frac{c}{\Delta L} \cdot \delta(\Delta t) = 0.02 \beta^2$$

Massenbestimmung:

$$p = \frac{\beta c}{\sqrt{1 - \beta^2}} \cdot m$$

- Für $p/mc \lesssim 2.5$ ist $\beta < 1$ nachweisbar
- Ermöglicht Unterscheidung von Teilchen gleicher Ladung (e^+/p , $e^-/\bar{p}$, Isotope eines Elements)

Der AMS–Flug mit Space Shuttle

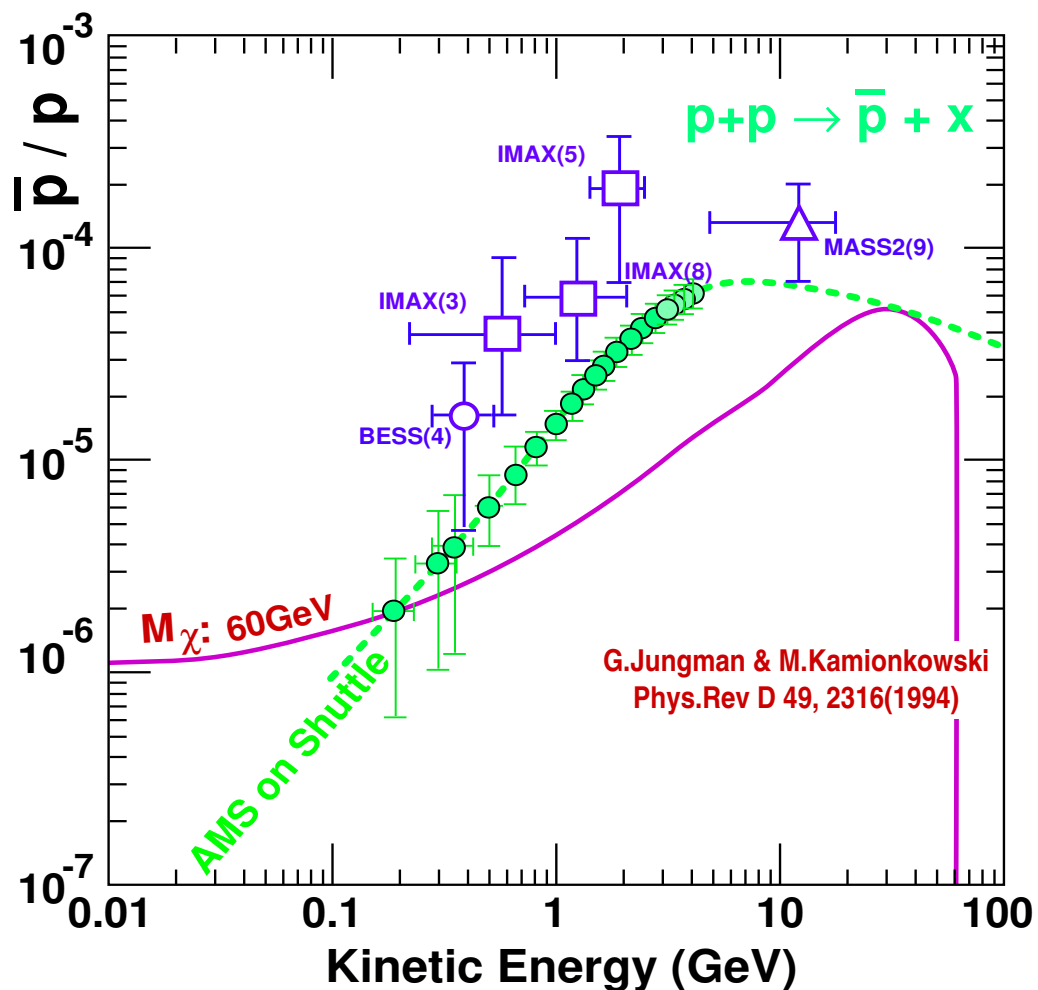


- Flug **STS–91** mit *Discovery*, 2.–12. Juni 1998
- Höhe: ~ 300 km
- Ziele: **Test von AMS**
Messung des $\bar{p}/p$ –Verhältnisses

Alle AMS–Komponenten funktionieren
und erfüllen die Spezifikationen

Erhoffte $\bar{p}/p$ -Ergebnisse

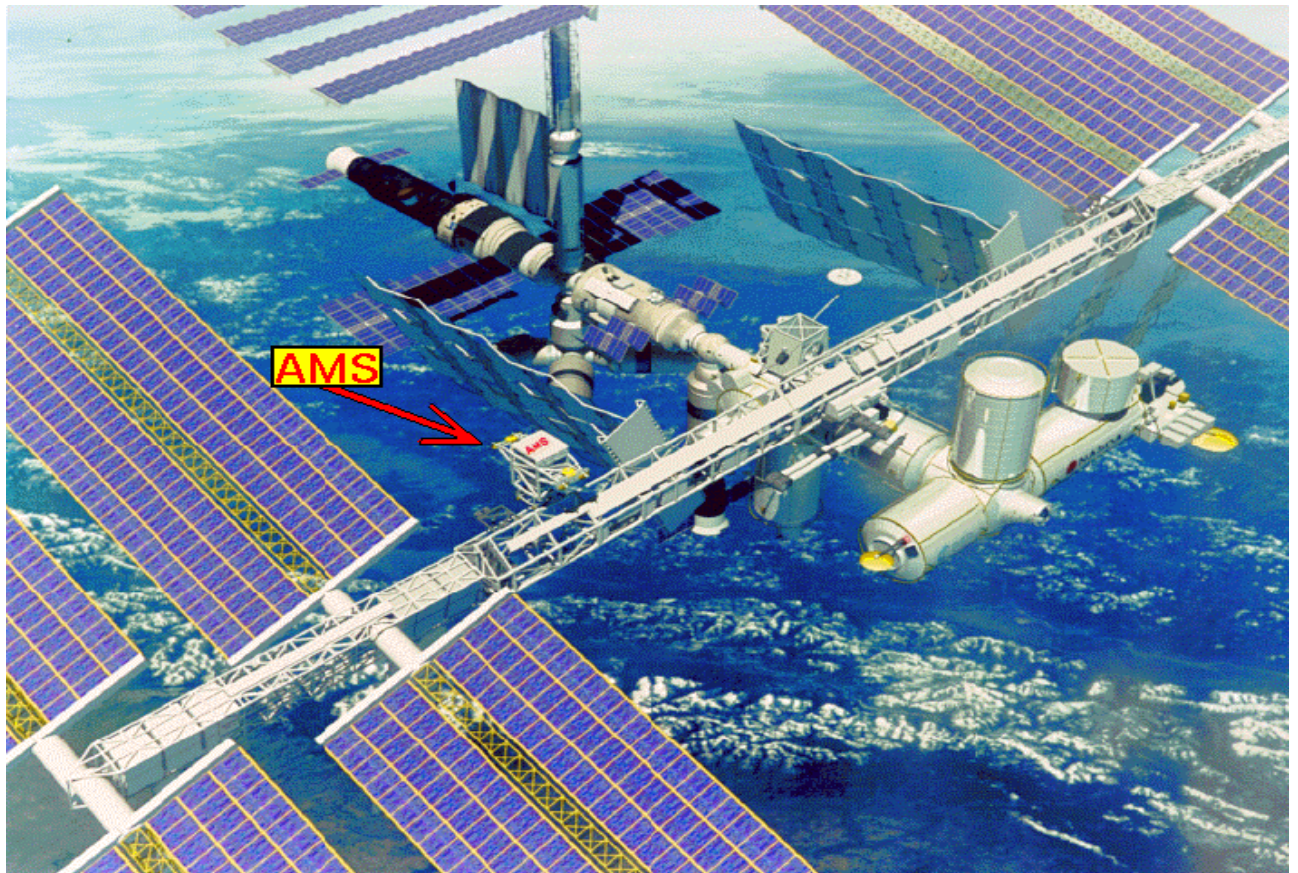
- Etwa 500 identifizierte $\bar{p}$ -Ereignisse
(bisher weltweit insgesamt < 50 Ereignisse)
- Vorläufige Ergebnisse in einigen Wochen
- Erwartete Präzision:



- Test der Modellvorhersagen für kosmische $\bar{p}$
- Noch marginale Sensitivität auf Neutralinos im Bereich kleiner $\bar{p}$ -Impulse

Erste Ereignisse in AMS

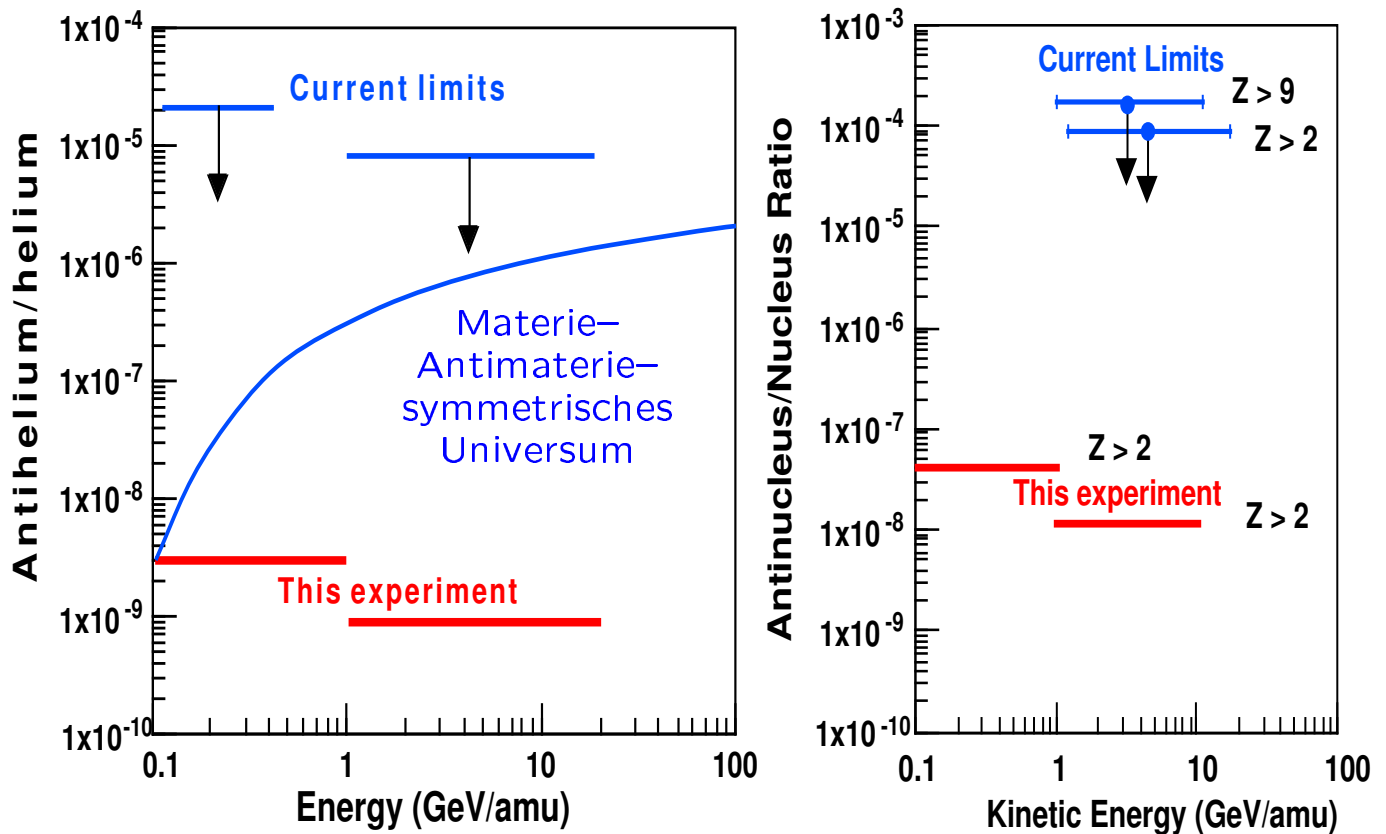
AMS auf der Raumstation Alpha



- Geplanter Start im **Jahr 2002**
- Modifikationen von AMS:
 - Vervollständigter Spurdetektor
 - Übergangsstrahlungs-Detektor ($e/\bar{p}$ -Trennung)
 - Elektromagnetisches Kalorimeter (BGO)
 - Ring Image Cerenkov Counter (RICH) (?)
- Langzeitmessung über **3–5 Jahre**. Meßziele:
 - Fluß kosmischer Antikerne
 - Verhältnis e^+/e^-
 - γ -Spektrum im Energiebereich 30 – 300 GeV
 - Isotopenverhältnisse

Erwartete Antikern–Sensitivität

- Nach 3 Jahren Datennahme auf Alpha:



- Sensitivität auf Antikern/Kern–Verhältnisse von $\mathcal{O}(10^{-9})$ erfordert:

$\mathcal{O}(10^{10})$ identifizierte Kerne

Untergrundunterdrückung besser als 10^{-10}

- Reichweite: $\mathcal{O}(500)$ Millionen Lichtjahre)

Streuung im interstellaren Raum

Alter des Universums

Zusammenfassung

Das Materie–Antimaterie–Ungleichgewicht
ist ein Hinweis auf Physik
jenseits des Standardmodells der
Teilchenphysik

Mit dem Alpha Magnetic Spectrometer
wird es möglich sein,
den Fluß von Antikernen aus dem Kosmos
um 3 – 4 Größenordnungen genauer
als bisher zu messen.

- Erster Testflug verlief erfolgreich
- Geplante Datennahme ab 2002

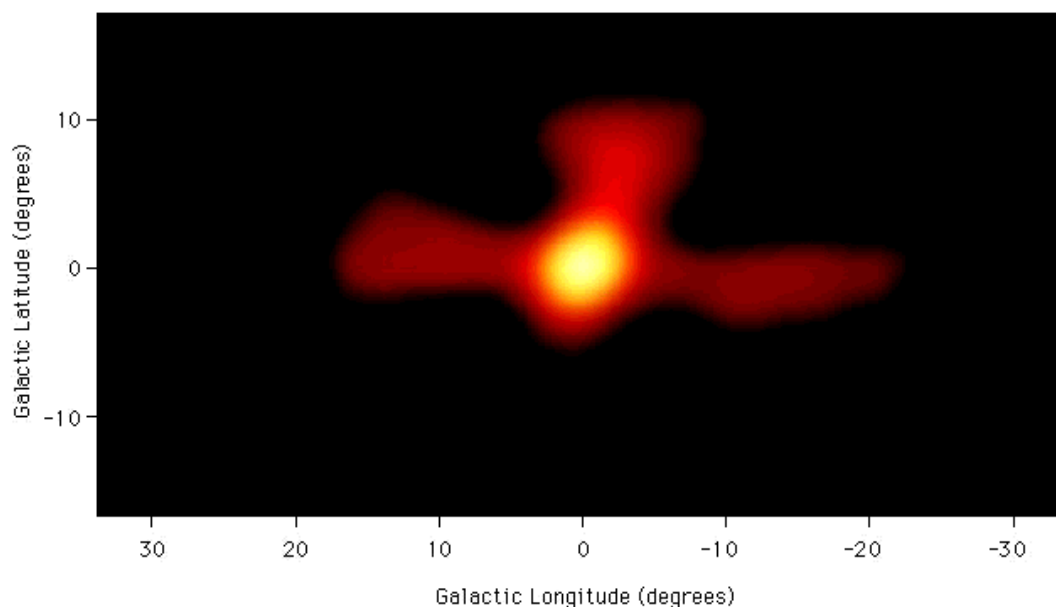
In etwa sieben Jahren werden AMS–Messungen
die Frage nach Antimaterie–Ansammlungen
im Umkreis von ~ 500 Millionen Lichtjahren
beantworten

Experimentelle Grenzen für Existenz von kosmischer Antimaterie

In Grenzregionen zwischen Materie- und Antimaterie-Domänen gibt es Vernichtungsreaktionen, deren Produkte nachweisbar sind.

e^+e^- -Vernichtung ($e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$):

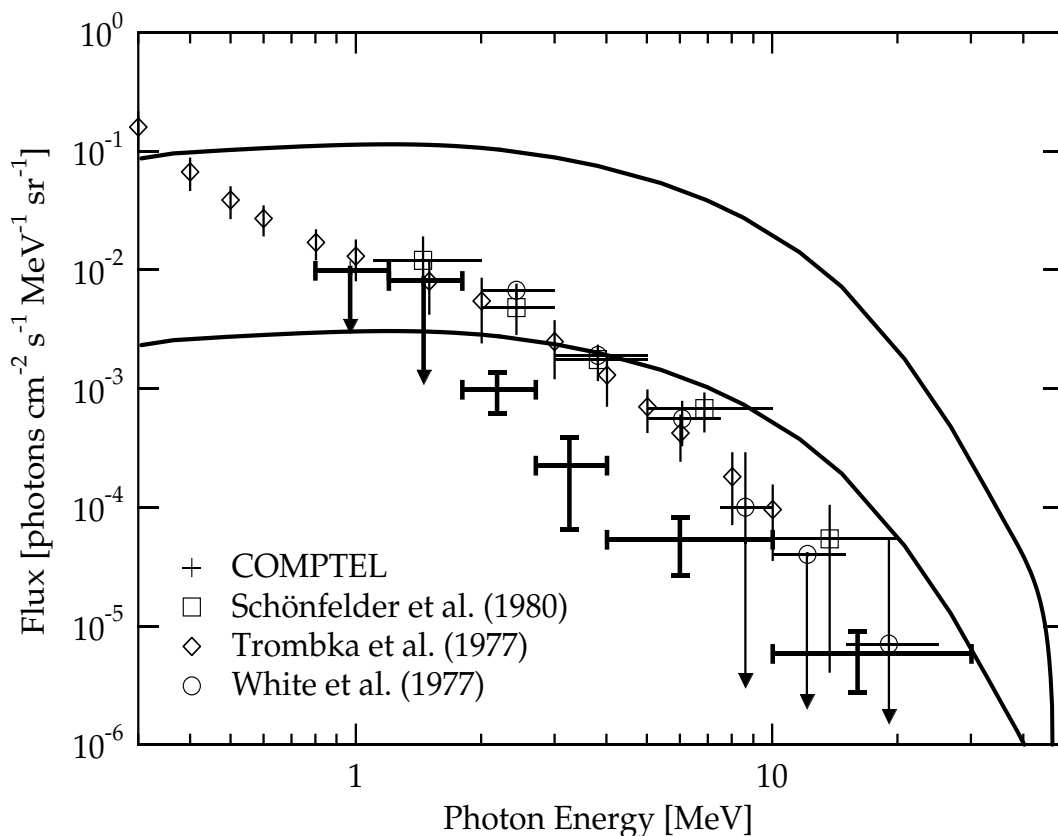
- Monoenergetische γ 's: $E_\gamma = 511 \text{ keV}$
(rotverschoben, wenn Quelle nahe massivem Objekt)
- Gemessen für unsere und benachbarte Galaxien
- Beispiel: Messung der 511 keV-Intensität in der Milchstraße (OSSE auf CGRO-Satellit)



Experimentelle Grenzen ... (Fortsetzung)

$\bar{p}p$ -Vernichtung ($\bar{p} + p \rightarrow$ Pionen):

- Kinetische Energie der Pionen: $\mathcal{O}(200 \text{ MeV})$
- Photonen von $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$
- Typische Photonenergie: $E_\gamma = \mathcal{O}(\text{einige MeV})$
(Energieverlust durch Rotverschiebung und Streuung)
- Vergleich gemessener Spektren mit Vorhersage
(A.G.Cohen, A.De Rujula, S.L.Glashow, Ast.J.495(98)539)



Die Operatoren P , C und T

- Paritätsoperation (P)

Raumspiegelung: $\vec{x} \rightarrow -\vec{x}, t \rightarrow t$

Starke und elektromagn. Wechselwirkung invariant,

P -Invarianz von der schwachen Kraft maximal verletzt

- Ladungskonjugation (C)

Führt Teilchen in ihre Antiteilchen über

- CP -Operation (CP)

Hintereinanderausführung von C und P

CP -Verletzung bisher nur im K^0 - $\bar{K}^0$ -System

Im Standardmodell erlaubt (CKM-Matrix)

CP -Verletzung jenseits des Standardmodells ?

- Zeitspiegelungs-Operation (T)

- CPT -Operation (CPT)

Theorem: alle Wechselwirkungen invariant unter CPT

Weitere AMS–Komponenten

Derzeitige Konfiguration:

- Die Anti–Koinzidenzzähler

Szintillator–Zähler an Magnet–Innenwand

Veto gegen Teilchen, die durch Magnet eindringen
und gegen Reaktionen in Magnetvolumen

- Der Cerenkov–Zähler

Richtungssensitives Signal → Untergrundunterdrückung

- Niederenergie–Abschirmung

Passiver Schild gegen e bis $p \lesssim 5 \text{ MeV}/c$

Unterdrückt Zufallskoinzidenzen

Zusätzlich ab 2002:

- Übergangsstrahlungs–Detektor

$e/\bar{p}$ –Trennung mit Fehlerrate $\lesssim 10^{-3} \dots 10^{-2}$

- Elektromagnetisches BGO–Kalorimeter

Energiemessung für $e^\pm$ und γ 's

$e/\bar{p}$ –Trennung mit Fehlerrate $\lesssim 10^{-3} \dots 10^{-2}$

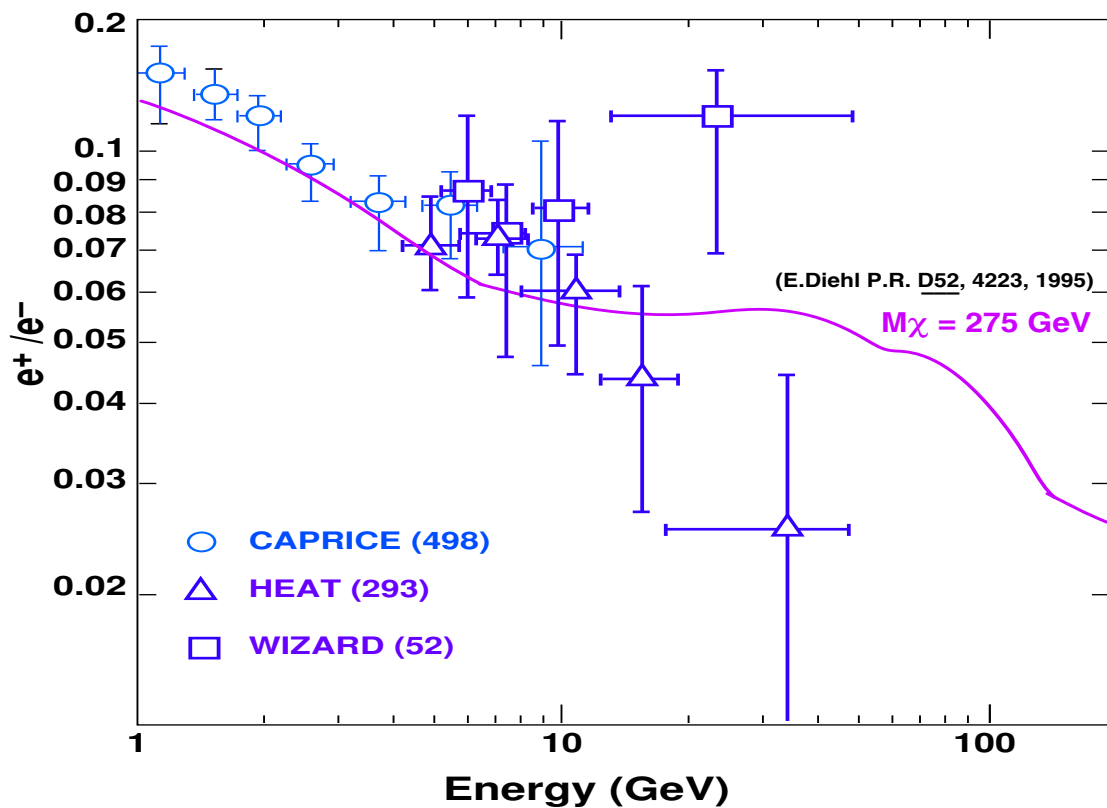
- *Ring Image Cerenkov Counter (RICH) ?*

Impulsmessung

Teilchenidentifikation

Erwartete e^+/e^- – Sensitivität

- Nach 3 Jahren Datennahme auf Alpha:



- Datenpunkte:
bisherige Messungen (Ballon-Experimente)
- Violette Punkte:
Spektrum mit Beitrag von Neutralino-Vernichtung
Meßfehler kleiner als Punkte
- Sensitivität auf dunkle Materie