

Hauptseminar Astroteilchenphysik und kosmische
Strahlung
Universität Karlsruhe

Direkte Messung kosmischer Strahlung

20.12.2006

Markus Helfrich

Contents

1	Geschichte	2
2	Einleitung	3
2.1	Das Spektrum der kosmischen Strahlung	3
2.2	Quellen	4
2.3	Kosmische Uhren und ihre Interpretation	5
3	Experimente	6
3.1	Balloon-born Experiment with Superconducting Spectrometer . .	6
3.2	Cosmic Ray Isotope Spectrometer	8
3.3	Alpha Magnetic Spectrometer	10
4	Literatur	13

1 Geschichte

Victor Hess unternahm 1912 an Bord eines Wasserstoff-Ballons Experimente mit einer damals neu entwickelten Ionisationskammer zur Bestimmung der Ionisation als Funktion der Höhe. Bis 2000 m wurde eine leichte Abnahme registriert (Bodenradioaktivität), die Ionisation stieg dann jedoch stark an. Hess erreichte eine maximale Höhe von 5300 m. In den beiden folgenden Jahren wurden seine Messungen von Wulf auf Ballonfahrten bis 9000 m bestätigt. Hess konnte damit den extraterrestrischen Ursprung der Strahlung (man glaubte an γ -Strahlung als Erklärung) nachweisen.

Durch vergleichende Messungen in Äquaturnähe und in höheren Breiten konnte in den 20er Jahren gezeigt werden, dass es sich um etwas handelt, das vom Erdmagnetfeld abgelenkt wird, also geladen ist. Lemaître schlug eine Ost-West-Messung vor; durch die Richtung der Ablenkung im Erdmagnetfeld konnte so das Vorzeichen der Ladung bestimmt werden. Somit kam man der Natur der kosmischen Strahlung auf die Spur.

Pierre Auger gelang 1927 in Koinzidenz-Messung (2 Geiger-Zählrohre am Boden im Abstand von 300 m) die Beobachtung von Luftschauern und somit der Nachweis ausgedehnter Luftschauer. Bei weiteren Experimenten dieser Art (Millikan 1935) gelang die Entdeckung des Myons, eines damals mysteriösen Teilchen, das wesentlich schwerer abzuschirmen war als Elektronen. Die μ -Masse konnte ebenfalls in Strahlungs-Experimenten mit Nebelkammern bestimmt werden. Die Natur des Myons (siehe die damalige Namensgebung "Mesotron", dann "My-Meson" und erst später Myon) wurde jedoch falsch gedeutet.

Weitere Teilchen wurden ebenfalls zuerst in der kosmischen Strahlung nachgewiesen (das Positron 1932, Pionen 1947), so daß die Untersuchung der Kosmischen Strahlung sehr bedeutsam für die Entwicklung der Teilchenphysik war, und sicher auch noch ist.

2 Einleitung

2.1 Das Spektrum der kosmischen Strahlung

Kosmische Strahlung ist eine ionisierende Teilchenstrahlung, überwiegend aus Protonen (85 Prozent) und Heliumkernen (12 Prozent) sowie schweren Kernen und Elektronen. Das Spektrum dieser Strahlung (siehe Fig. 1) folgt einem Potenzgesetz $\frac{dN}{dE} \propto E^\gamma$ mit dem spektralen Index γ und bricht bis zu Energien von mindestens 10^{20} eV nicht ab. Besonders markant im Spektrum und Gegenstand von Untersuchungen ist zum einen das sogenannte Knie des Energiespektrums bei 10^{15} eV, sowie der Knöchel bei 10^{19} eV. Vor dem Knie beträgt der Spektralindex $\gamma \approx 2,7$, hinter dem Knie ändert er sich zu $\gamma \approx 3,1$. Hinter dem Knöchel flacht der Verlauf des Spektrums wieder ab, der Spektralindex beträgt wieder etwa $\gamma \approx 2,7$.

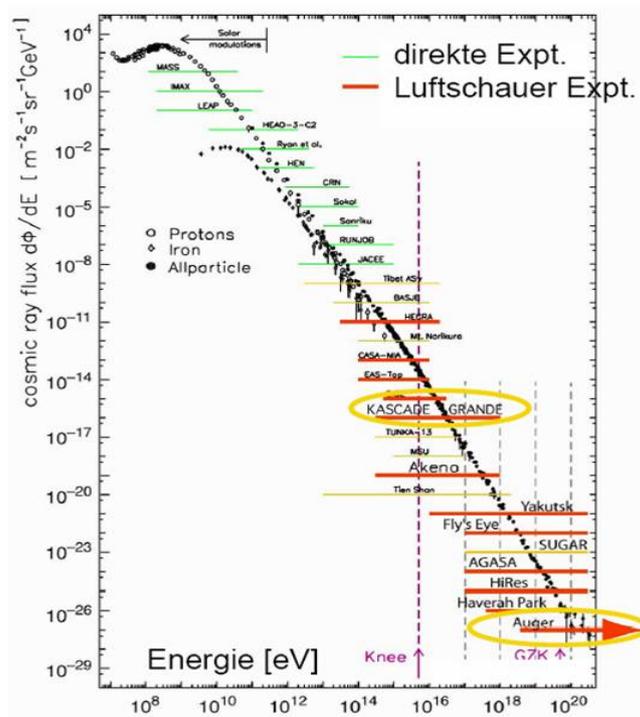


Figure 1: Spektrum der kosmischen Strahlung

Die Zusammensetzung der kosmischen Strahlung und ihr Energiespektrum wird zum einen durch direkte Experimente wie Satellitenexperimente (z.B. AMS) und diverse Ballonexperimente (z.B. BESS) untersucht und zum anderen durch indirekte Experimente (z.B. KASCADE, Auger). Großes Interesse besteht dabei in der Suche nach kosmischer Antimaterie, dunkler Materie und der Untersuchung bzw. der Zusammensetzung des interstellaren Mediums.

Diese Ausarbeitung beschränkt sich auf den Energiebereich bis zu 10^{15} eV, der durch direkte Messungen erreichbar ist. Zu höheren Energien werden die Flüsse zu klein, so dass sich die langen Laufzeiten oder die größeren Detektorflächen durch Ballon- oder Satellitenexperimente nicht realisieren lassen.

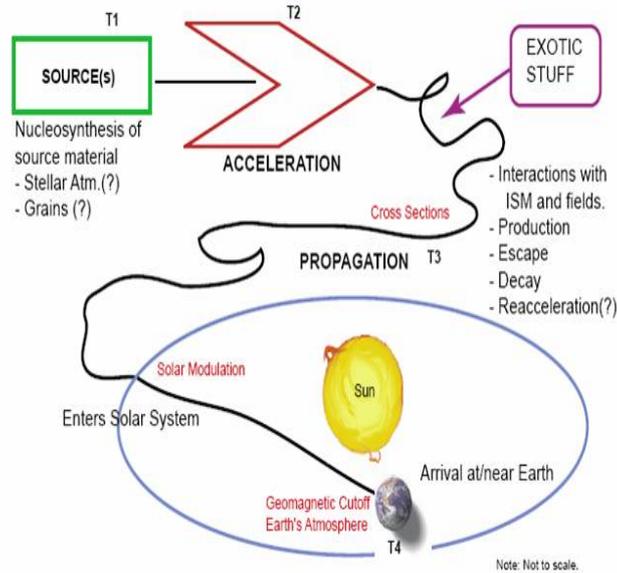


Figure 2: mögliche Quellen und der Weg durch das ISM

2.2 Quellen

Um Quellen der kosmischen Strahlung lokalisieren und lokale Komposition interpretieren zu können, ist es entscheidend zu verstehen, welchen Gesetzen der Transport der kosmischen Strahlung bis zu uns unterliegt. Von offensichtlicher Bedeutung ist dabei das galaktische Magnetfeld, das eine Feldstärke B im mikro Gauss-Bereich hat und geladene kosmische Teilchen ablenkt. Der Bahnradius r eines Teilchens in einem Magnetfeld folgt $r = pc/qB$ und wächst also mit dem Impuls p . Demzufolge gibt es einen Grenzipuls p_{gal} für den kosmische Teilchen mit $p < p_{gal}$ mit großer Wahrscheinlichkeit galaktischen Ursprungs sind, da ihr Bahnradius sonst größer wäre als der Radius der Milchstraße, während Teilchen mit $p > p_{gal}$ vorwiegend extragalaktischen Ursprungs sein müssen. Bislang sind weder theoretische Modelle noch experimentelle Daten hinreichend, um diesen Grenzipuls genau zu bestimmen.

Als sicher gilt jedoch, dass Teilchen mit Energien unterhalb von 10^{17} eV galaktischen Ursprungs sind und Protonen mit Energien oberhalb von 10^{18} eV bis 10^{19} eV vorwiegend extragalaktischen Ursprungs sind. Der Transport kosmischer Strahlung wird weiterhin durch ihre Wechselwirkung mit dem interstellaren Medium (ISM) beeinflusst. Es kommt zu Spallationsprozessen bei Stößen zwischen Kernen aus der kosmischen Strahlung mit Protonen im interstellaren Medium, bei denen leichtere, teilweise radioaktive Kerne, Antiprotonen und Positronen produziert werden. Aus der Isotopenzusammensetzung der kosmischen Strahlung versucht man nun, Propagationsmodelle abzuleiten (siehe Fig. 2).

Aus den existierenden Propagationsmodellen, der Untersuchung des galaktischen Magnetfeldes und des Energiespektrums der kosmischen Strahlung bes-

timmt man auch mögliche Quellen für kosmische Strahlung. Niederenergetische kosmische Strahlung bis zu Energien von 10^9 eV stammt vorwiegend von unserer eigenen Sonne, bis zu Teilchenenergien von 10^{15} eV scheinen Supernova Überreste (SNR) Ursprung für kosmische Strahlung zu sein. Aus welchen Quellen die kosmische Strahlung mit den höchsten Energien stammt, ist bislang nicht klar zu beantworten, mögliche Kandidaten sind z.B. Pulsare, schwarze Löcher und Radiogalaxien.

2.3 Kosmische Uhren und ihre Interpretation

Ein besonders eleganter Ansatz, um das Alter und die Zeit zwischen Produktion und Beschleunigung der kosmischen Strahlung zu beschreiben, stellen die sog. Uhren dar. Besonderes Augenmerk gilt dabei den Verhältnissen zwischen sekundären Spallationsprodukten und besonders dominanten primären Isotopen (z.B. B/C , $^{10}Be/^{12}C$, $^{36}Cl/^{54}Fe$), sowie dem Verhältnis zwischen radioaktiven und nicht-radioaktiven Spallationsprodukten (z.B. $^{26}Al/^{27}Al$, $^{54}Mn/^{56}Fe$) in der beobachteten kosmischen Strahlung. Dabei nutzt man die bekannten Halbwertszeiten und Zerfallsarten der jeweiligen Elemente zur Interpretation.

Man unterscheidet zwischen den primären Isotopen, den Beschleunigungs-Uhren und den Propagations-Uhren. Durch die primären Isotope erhält man Aufschluss über die Nukleosynthese in der Quelle der kosmischen Strahlung. Bei Beschleunigungs-Uhren handelt es sich um primäre Isotope, die unter Elektroneneinfang zerfallen und somit Informationen über die verstrichene Zeit zwischen Produktion und Beschleunigung der Partikel enthalten. Propagations-Uhren hingegen sind sekundäre Isotope, bei welchen ein β^\pm -Zerfall Aufschluss über die Zeit zwischen Entstehung und Flucht aus der Galaxie gibt. Zum besseren Verständnis siehe Fig. 3

Am Beispiel des ^{10}Be folgt eine Erklärung des Modells: Die charakteristische Halbwertszeit von ^{10}Be beträgt $3,9 \cdot 10^6$ Jahre, es geht durch β -Zerfall in ^{10}B über. Aus dem Verhältnis von Be zu B kann man auf das Alter der beobachteten Strahlung rückschließen. Kombiniert man nun dieses Alter mit der durchquerten Wegstrecke von $50kg/m^{-2}$, kommt man auf die durchquerte Dichte des Mediums. Nach Simpson(1983) bekommt man ein Alter der beobachteten kosmischen Strahlung von 10^7 Jahren und somit eine Dichte von $3 \cdot 10^5 m^{-3}$.

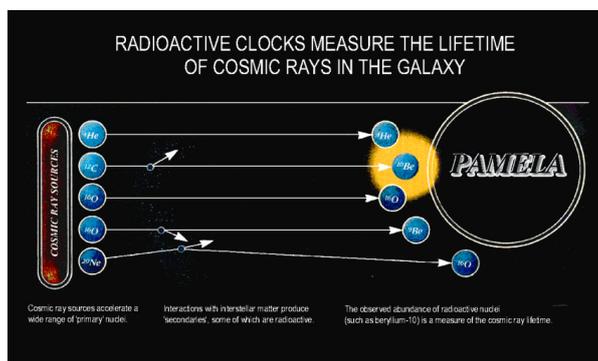


Figure 3: radioaktive Uhren geben das Alter der kosmischen Strahlung an

3 Experimente

3.1 Balloon-born Experiment with Superconducting Spectrometer

Ein typisches Ballonexperiment ist das BESS. BESS führte von 1993 bis 2004 neun Messreihen durch, zwischen denen der Detektor ständig verbessert wurde. Gemessen wurden die Energiespektren von Protonen und Antiprotonen sowie Helium und Antihelium.

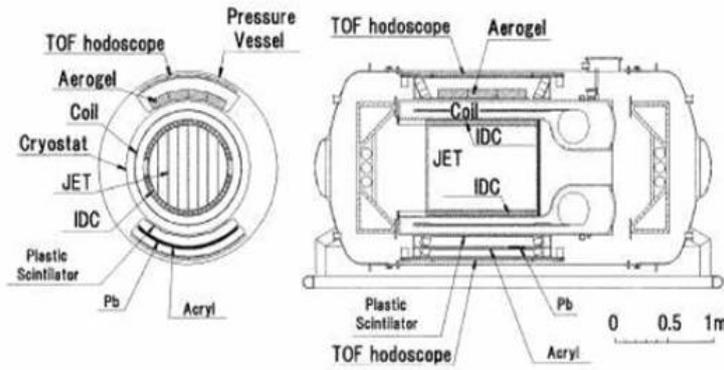


Figure 4: Aufbau von Bess

Der BESS-Detektor besteht aus einer dünnen, supraleitenden Solenoidspule, die ein Magnetfeld von 1T produziert (siehe Fig. 4). In der Spule befindet sich eine Vieldrahtproportionalkammer (JET), welche die Proton-Antiproton-Unterscheidungen für Energien zwischen 0,1GeV und 4,5GeV ermöglicht. Ein Time-Of-Flight-Detektor (TOF) zur β -Messung sowie Cherenkov-Zähler und Plastik-Szintillator zur Unterdrückung von Lepton- und Meson-Signalen vervollständigen den Detektor. Über die Geschwindigkeitsmessung im TOF und die Impulsmessung im JET-Detektor konnte BESS Protonen, Antiprotonen, Deuteriumkerne und Tritiumkerne bis 4.5GeV voneinander trennen. Das Energiespektrum der Antiprotonen wurde mit den bestehenden Propagationsmodellen verglichen und auf Signaturen dunkler Materie untersucht, die in Form eines Abflachens des Antiprotonenspektrums bei ca. 500MeV, beispielsweise durch Neutralino-Annihilation $\chi + \chi \rightarrow p + \bar{p}$ entstehen könnten.

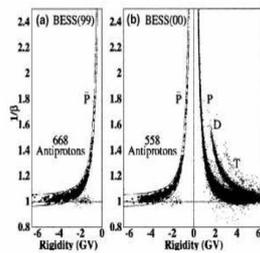


Figure 5: gemessenes Verhältnis von Antiprotonen zu Protonen

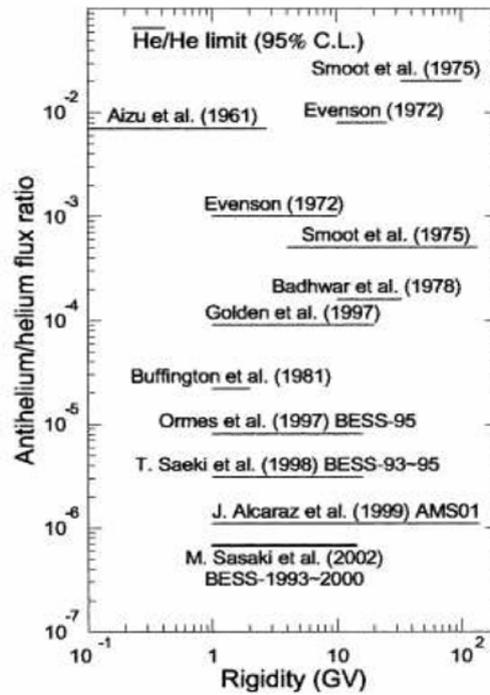


Figure 6: Vergleich mit anderen Experimenten

BESS zeigte wie andere Ballonexperimente (IMAX, CAPRICE, MASS) kein statistisch relevantes Ergebnis bezüglich der Existenz einer Quelle primärer Antiprotonen (siehe Fig. 5). Aus den gemessenen Heliumkernen und dem Fehlen von Antiheliumsignalen konnte eine neue untere Grenze für das Helium-Antihelium-Verhältnis bestimmt werden (siehe Fig. 6). Der Vergleich der BESS-Messungen über die Zeit mit Daten über die Sonnenaktivität ergab weitere Informationen über die Wechselwirkung von kosmischer Strahlung mit dem Sonnenwind, mit deren Hilfe man genauere Propagationsmodelle für sekundäre kosmische Strahlung entwickeln kann.

3.2 Cosmic Ray Isotope Spectrometer

CRIS wurde als Teil von ACE so konzipiert, um einen großen Schritt bei der Suche nach Quellen der kosmischen Strahlung zu machen. Dafür musste die Massenaufösung für Elemente zwischen Be und Ni deutlich verbessert werden. Dies ist durch folgenden Versuchsaufbau gewährleistet (siehe Fig. 7): Die Information über die Energie der ankommenden Partikel wird durch einen 4 Stapel starken Silizium-Detektor gemessen, wobei die Trajektorie durch das SOFT-System ermittelt wird; ein Szintillator-System, welches aus 2 mal 3 gekreuzten Lagen besteht, und deren Events durch 2 Kameras ausgewertet werden.

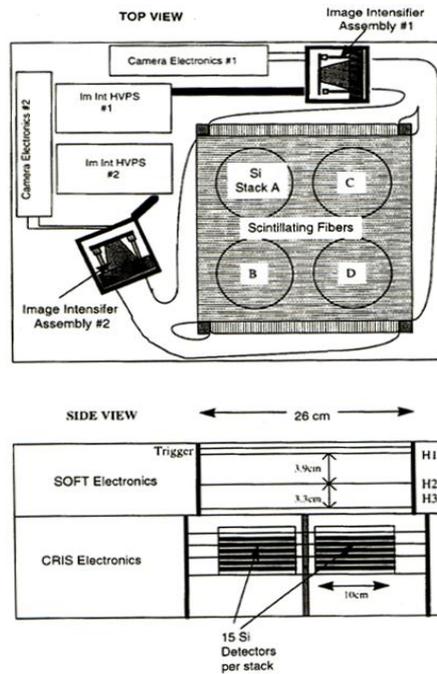


Figure 7: Aufbau von CRIS

Bei der Auswertung bedient man sich der Tatsache, dass man 2 Silizium-Detektoren mit bekannter Dicke vorliegen hat (siehe Fig. 8). Bei bekanntem Eintrittswinkel Θ verliert das Teilchen Energie im ersten (DE) und im zweiten (E') Detektor. Der Energieverlust pro Länge dE/dx kann durch $DE/(DL * \sec\Theta)$ abgeschätzt werden, wobei DL die dicke des ersten Detektors darstellt. Die Gesamt-Energie des Teilchens wird mit E' bestimmt - dabei nutzt man aus, dass geladene Teilchen ihre meiste Energie am Ende ihres Weges verlieren.

Beide Beträge addiert ergeben abgeschätzt einen Wert, der proportional zu Z^2M ist, wobei Z die Teilchenladung und M die Masse ist. Somit kann das Element genau bestimmt werden, da bei mehreren gemessenen Daten $dE/(DL \cdot \sec\Theta)$ gegen E' aufgetragen Elemente mit konstantem Z^2M auf gleichen Bahnen liegen.

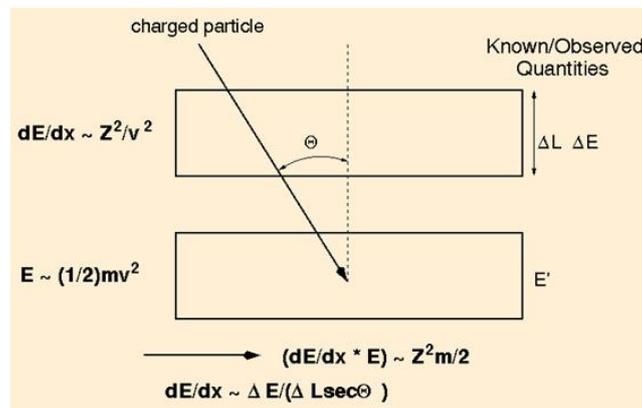


Figure 8: Schema der Teilchenidentifikation bei CRIS

Als gutes Beispiel (siehe Fig. 9) für die gute Auflösung von CRIS und die daraus gewonnenen Daten kann man die folgende Grafik betrachten, bei der man Information über die Propagations-Uhren durch Vergleich der vorkommenden Elemente ${}^7\text{Be}$, ${}^9\text{Be}$ und ${}^{10}\text{Be}$ erhält. Anhand der vorliegenden Daten hat man das Alter der kosmischen Strahlung (oder auch die Zeit von der Quelle bis zur Detektion) auf $15 \pm 1,6$ Mio. Jahre abgeschätzt.

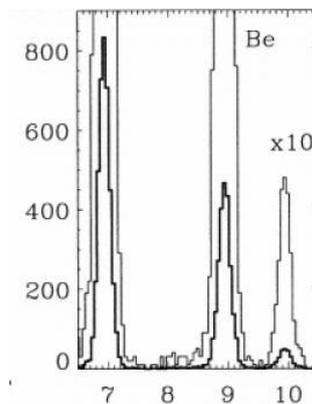


Figure 9: gemessene Ereignisse ${}^7\text{Be}$, ${}^9\text{Be}$ und ${}^{10}\text{Be}$; Propagationsuhren

3.3 Alpha Magnetic Spectrometer

Das Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) ist ein Satellitenexperiment, das nach gegenwärtiger Planung 2008 mit einem Space-Shuttle zur internationalen Raumstation ISS gebracht werden soll. Dort soll es drei Jahre lang die Energiespektren von kosmischer Strahlung im Bereich $10^8 eV - 10^{15} eV$ untersuchen und nach kosmischer Antimaterie suchen.

Ein Prototyp für AMS, der AMS-01 Detektor absolvierte bereits 1998 einen zehntägigen Testflug auf der Raumfähre Discovery. Dabei konnte man innerhalb von ca. 100 Messstunden 108 geladene Teilchen im Bereich zwischen 100MeV und 100GeV detektieren und Erfahrungen mit dem Detektor und den Anforderungen für Experimente im Weltall sammeln.

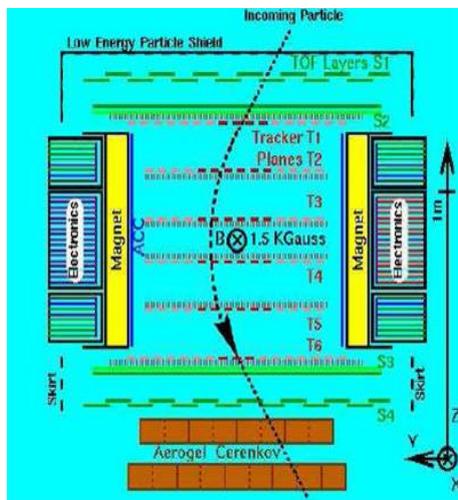


Figure 10: Schema von AMS01

Der AMS-01 Detektor (siehe Fig. 10) bestand aus einem Permanentmagneten, der einen 6-lagigen Siliziumstreifendetektor (T1 .. T6) umschloss. Ein Time-Of-Flight Zähler (TOF S1 .. S4) aus Szintillatoren zur β -Messung und zur Bestimmung des Energieverlustes dE/dX war in je zwei Lagen oberhalb und unterhalb des Siliziumstreifendetektors angeordnet. Ein Anti-Koinzidenz-Zähler (ACC) an der Innenseite des Magneten gab ein Veto für Teilchen, die durch den Magneten in den Detektor fliegen. Ein Aerogel-Cherenkov-Zähler zur Proton-Lepton-Unterscheidung schloss den Detektor ab. Der Detektor bestand damit aus Komponenten, wie man sie von Beschleunigerexperimenten kennt, es fällt jedoch auf, dass auf ein Kalorimeter verzichtet wurde, das um Teilchen mit Energien bis zu 100GeV zu messen ein erhebliches Gewicht gehabt hätte. Anders als für Detektoren für Beschleunigerexperimente ist die Masse des Detektors stark begrenzt.

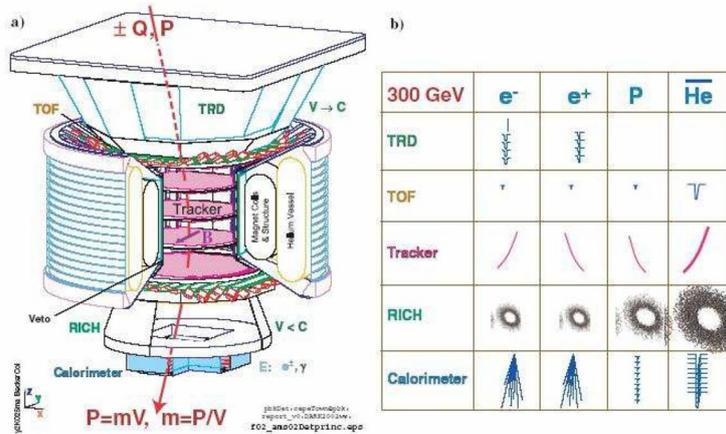


Figure 11: Schema von AMS02

Der AMS-02 Detektor (siehe Fig. 10) unterscheidet sich von dem AMS-01 Prototypen vor allem durch den supraleitenden Magneten ($B = 0,8\text{T}$), der den schwächeren Permanentmagneten ersetzt und eine Impulsauflösung von $\sigma p/p \approx 1,5\text{Prozent}$ für Impulse bis 1T eV erlaubt. Weiterhin ermöglicht ein Transition Radiation Detektor (TRD) eine stark verbesserte Elektron-Proton-Separation, die β -Messung des TOF wird durch einen Ring-Imaging-Cherenkov Detektor (RICH) verbessert und ein kleines elektromagnetisches Kalorimeter (EMC) ermöglicht eine Energiemessung von e und γ und eine noch bessere Separation von Elektronen und Hadronen. Für AMS-02 ist die Masse durch die zur Verfügung stehenden Kapazitäten des Space Shuttles auf 7t begrenzt, die maximale Leistungsaufnahme ist über die Leistung der Solar-Panels der ISS auf 2kW begrenzt. Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass auf den Detektor während seiner Betriebszeit kein physischer Zugriff besteht. Den Heliumvorrat, um den supraleitenden Solenoid- Magneten um den Silizium-Tracker drei Jahre lang zu kühlen, muss der Detektor selbst zur Verfügung stellen. Desweiteren muss der AMS-02 Detektor ausreichend stabil sein um Vibrationen und Beschleunigungen beim Start des Space Shuttles zu verkraften.

Von AMS-02 werden sehr viel genauere Messungen als von allen bisherigen direkten Experimenten erwartet (siehe Fig. 12). Im Positronenspektrum der kosmischen Strahlung, das nach Messungen des HEAT 94-95 Experimentes Hinweise auf das Signal von Positronen aus der Neutralinoannihilation enthält, soll mit AMS-02 ein Signal dunkler Materie statistisch relevant nachgewiesen oder ausgeschlossen werden (siehe Fig. 13) Gleichmaßen soll AMS-02 mit einer genauen Messung des Antiprotonenspektrums der kosmischen Strahlung zwischen 100MeV und 1T eV das von den Ballonexperimenten BESS, IMAX, CAPRICE und MASS nicht ausgeschlossene Signal einer primären Antiprotonenquelle entweder bestätigen oder widerlegen. Überdies wird AMS-02 mit der Messung der Spektren sekundärer und primärer kosmischer Teilchen einen Test für die etablierten Propagationsmodelle kosmischer Strahlung liefern, beispielsweise durch die Messung des Verhältnisses von Borkernen zu Kohlenstoffkernen.

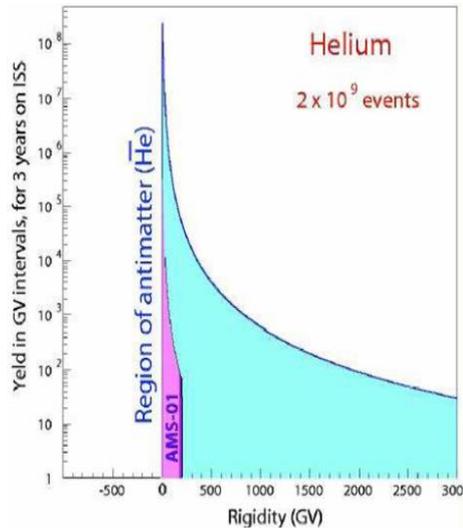


Figure 12: Vergleich der Messgenauigkeit von AMS01 und AMS02

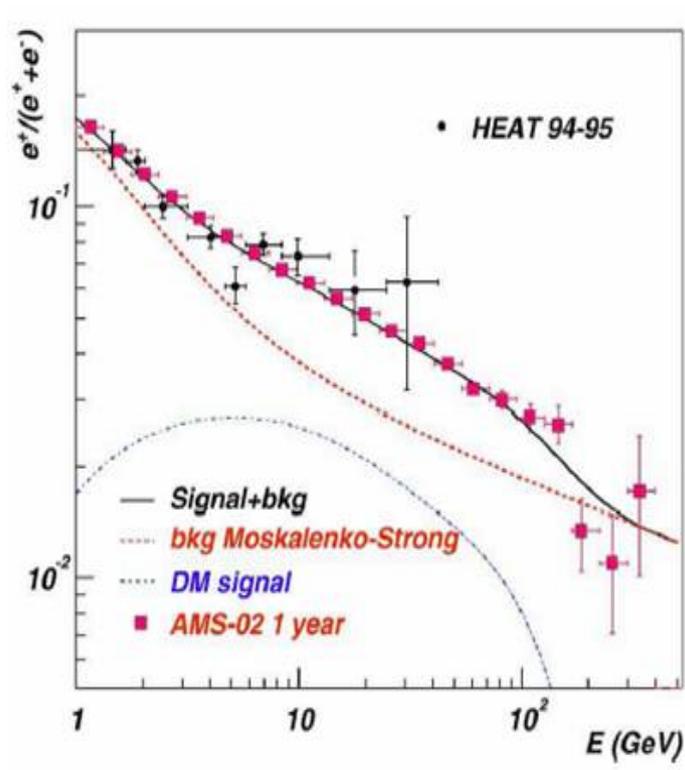


Figure 13: Vergleich von einem theoretischen Modell, HEAT und AMS02

4 Literatur

Longair, High Energy Astrophysics

Stochaj, Direct measurements of cosmic rays, International Cosmic Ray Conference (2001)

Hörandel, Overview on Direct and Indirect Measurements of Cosmic Rays International Journal of Modern Physics (2005)

Battiston, Rapporteur talk on direct measurements and origin of cosmic rays (2003)

Stone, The Cosmic-Ray Isotope Spectrometer for the Advanced Composition Explorer, Space Science Reviews (1998)

Wiedenbeck, The Origin of Primary Cosmic Rays: Constraints from ACE Elemental and Isotopic Composition Observations, Space Science Reviews (2001)

de Nolfo, Cosmic Ray Lithium, Beryllium, and Boron Isotopes from ACE/CRIS, International Cosmic Ray Conference (2001)

Barwick, Measurements of the Cosmic-Ray Positron Fraction from 1 to 50 GeV, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL (1997)

Gast, Indirect Dark Matter Search: Cosmic Positron Fraction Measurement from 1 to 50 GeV with AMS-01, abstract Astrophysics (2006)

[http : //www.srl.caltech.edu/ACE/CRIS_IS/index.html](http://www.srl.caltech.edu/ACE/CRIS_IS/index.html)