

Teilchenidentifikationsmethoden anhand des AMS-Detektors

Patrik Schönfeldt

18. November 2011

1 Motivation

Das *Alpha-Magnet-Spektrometer* (kurz *AMS*) ist ein Teilchendetektor, der am 19. Mai 2011 an der Internationalen Raumstation *ISS* angebracht wurde, um die Zusammensetzung der kosmischen Höhenstrahlung zu vermessen. Zu diesem Zweck werden die Teilchen direkt und indirekt mittels (zum Teil redundanter) Messungen in verschiedenen Subdetektoren charakterisiert. Aus der Zusammenschau der identifizierten Eigenschaften lassen sich die Teilchen der kosmischen Höhenstrahlung mit sehr großer Sicherheit identifizieren. Das in internationaler Zusammenarbeit entstandene AMS wiegt 8.5t, hat Abmessungen von 3.1-3.4-4.5 m³ und schätzungsweise 1.5 Milliarden US-Dollar gekostet. Die Messungen werden insgesamt 18 Jahre lang (Lebensdauer der *ISS*) durchgeführt.

Primäre kosmische Strahlung kann das AMS bis zu einer Energie von 1 TeV pro Teilchen direkt detektieren, durch die Akzeptanz von 0,45 m²sr und die lange Messdauer sind zudem gute statistische Eigenschaften gewährleistet[5]. Dieser Aufwand soll vor allem Erkenntnisgewinn in drei Bereichen gewährleisten:

- Identifikation dunkler Materie
- Altersbestimmung der kosmischen Strahlung
- Hinweise auf Antimaterie aus dem Urknall

1.1 Rätselhafte Rotation der Galaxien

Jedes Sternensystem einer Galaxie rotiert um ihr Zentrum. Nimmt man hierbei – wie in den Sternensystemen und aufgrund der Helligkeitsverteilung nahaliegend – eine Massenkonzentration auf der Rotationsachse an, so ergibt sich gemäß den keplerschen Gesetzen folgende (bekannte) Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Entfernung zum Zentrum:

$$v(r) = \sqrt{GM/r} \quad (1)$$

In Wirklichkeit jedoch sieht die Verteilung ganz anders aus (siehe Vortrag), sie lässt darauf schließen, dass sich die Scheibe aus sichtbarer in einer einbettenden Kugel aus nicht

sichtbarer Materie befindet. Da diese *dunkle Materie* nicht direkt beobachtet werden kann, kommen hierfür nur Teilchen in Frage, die neben der Gravitation nur der schwachen Wechselwirkung unterliegen, sogenannte *WIMPs*. Aus diesem Grund galten lange Zeit schnelle Neutrinos als heiße Kandidaten, was jedoch zur Folge hätte, dass sich erst Galaxienhaufen, dann Galaxien, Sterne usw. gebildet haben müssten, weshalb auf kalte dunkle Materie geschlossen wird. Hier wird das supersymmetrische Neutralino (\tilde{N}_1 oder $\tilde{\chi}_1^0$) favorisiert, welches mit einer Masse von mindestens $46 \text{ GeV}/c^2$ das *leichteste supersymmetrische Teilchen* (*LSP*) sein könnte. Im AMS ließen sich die Existenz dieses Teilchens durch die Identifikation von auf Neutralino-Anihilation zurückgehenden Signaturen nachweisen. Diese könnten z.B. aus einer γ -Linie, Antideuterium oder Positronen[2] bestehen.

1.2 Entstehung des Universums

Die beiden anderen Fragen haben mit dem Urknall zu tun. So will man mit über die Altersbestimmung der kosmischen Strahlung auf das Alter des Universums schließen. Hierzu wird das Verhältnis verschiedener Beryllium-Isotope betrachtet: ^{10}Be zerfällt mit einer Halbwertszeit von $t_{1/2} = 1,51 \cdot 10^6 \text{ a}$ zu ^9Be . Wird nur wenig des leichteren Isotops detektiert, lässt sich also schließen, dass die Strahlung jüngerem Datums ist[3].

Da sich Materie und Antimaterie weitgehend identisch verhalten, müsste beides beim Urknall etwa gleich viel von beidem entstanden sein. Hieraus leitet sich die Überlegung ab, es könnte Antimaterie-Galaxien geben. Bisher wurden jedoch keine konkreten Hinweise auf deren Existenz gefunden, was aber unter anderem dadurch erschwert wird, dass das γ -Spektrum nicht von normalen Galaxien zu unterscheiden ist und Antiteilchen nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit auf die Erdoberfläche gelangen würden. Da schwere Elemente nicht während der kurzen Zeit des Urknalls entstehen konnten, würde ein einziger detektierter Antikohlenstoffkern ausreichen, um die Existenz eines Antimaterie-Sterns nachzuweisen.

2 Detektion

2.1 Eigenschaften der Strahlung

Die zu detektierenden Teilchen lassen sich durch ihre jeweils einzigartige Kombination aus Ladung und Masse identifizieren. Da letztere durch relativistische Effekte beeinflusst wird, ist zusätzlich die Geschwindigkeit von Interesse. Für die Ermittlung werden beim AMS folgende Effekte[4] genutzt:

2.1.1 Ablenkung geladener Teilchen im Magnetfeld

Geladene Teilchen werden im Magnetfeld gemäß der Drei-Finger-Regel abgelenkt. Auf diese Weise kann der Quozient aus Impuls und Ladung (samt Vorzeichen) ermittelt werden. (Zum Thema Spurrekonstruktion wird es in diesem Seminar einen eigenen Vortrag

geben.)

$$\varrho \propto \frac{p}{z} = \frac{\gamma m_0 \beta c}{z} \quad (2)$$

Der Tracker des AMS besitzt eine Genauigkeit von $\sigma(\varrho)/\varrho = 1,5\%$ und funktioniert bis $Z = 26$ (Eisen)[5].

2.1.2 Freigewordene Energie bei kompletter Abbremsung

Elektronen, Positronen und Photonen werden in einem elektromagnetischen Calorimeter (ECAL) durch Bremsstrahlung und Aufschauierung gestoppt (AMS: $\sigma(E)/E < 3\%$ [5]). Massereichere Strahlung hingegen durchquert den Detektor und verliert nur einen Teil seiner kinetischen Energie. Für komplett gestoppte Teilchen gilt:

$$E_{kin} = (\gamma - 1)m_0c^2 \quad (3)$$

(Calorimetern wird in diesem Seminar ein eigener Vortrag gewidmet.)

2.1.3 Messung der Flugzeit durch den Detektor

Der Time-of-Flight-Detektor (ToF) dient im AMS vor allem der Triggerung, da seine Genauigkeit von $\sigma(\beta) = 0,035\beta$ [5] für die vielen relativistischen Teilchen bei Weitem nicht ausreicht.

$$\tau = \frac{s \cdot c}{\beta} \quad (4)$$

2.1.4 Cherenkovstrahlung

Zur genauen Bestimmung der Geschwindigkeit wird der Effekt der Cherenkovstrahlung genutzt. Dieser entsteht dadurch, dass sich ein geladenes Teilchen mit höherer Geschwindigkeit durch ein Medium bewegt als Licht ($v > c/n$). Dadurch entsteht ein nichtverschwindendes Dipolmoment, welches zu einer Art „Überlichtblitz“ führt, dessen Kegel einen Öffnungswinkel mit

$$\cos \Theta_c = \frac{c'}{v} = \frac{1}{n\beta} \quad (5)$$

besitzt[4]. Es wird erkennbar, dass sich durch geeignete Wahl des Mediums die Messgenauigkeit auf einen bestimmten Bereich optimiert werden kann. Im AMS kommen *silicium aerogel* mit $1,025 < n < 1,075$ und *NaF* mit $n = 1,336$ zum Einsatz, die Genauigkeit liegt für Protonen bei $\sigma(\beta) = 0,001\beta$ [5]. Aus der Intensität der Strahlung kann zudem auf die Ladung geschlossen werden.

2.1.5 Übergangsstrahlung

Auch unterhalb der Cherenkov-Grenze können Teilchen elektromagnetische Strahlung emittieren. Diese Übergangsstrahlung entsteht durch den Dipol, der zwischen der Ladung und ihrer Spiegelladung hinter einer dielektrischen Grenzfläche entsteht. Das Feld zwischen den beiden Ladungen verändert sich mit dem Abstand des Teilchens von der

Oberfläche und verschwindet beim Durchqueren. Die abgestrahlte Energie ist proportional zum Lorentzfaktor

$$S = \frac{1}{3}\alpha z^2 \hbar \omega_p \gamma, \text{ mit } \hbar \omega_p = \sqrt{4\pi N_e r_e^3 m_e c^2} / \alpha \quad (6)$$

des Partikels[4].

Man sieht, dass die Übergangsstrahlung vor allem bei $\gamma \gg 1$ zum Tragen kommt. Aus diesem Grund besitzt sie für die Geschwindigkeitsbestimmung ultrarelativistischer Teilchen große Bedeutung. Am *Transition Radiation Detector (TRD)* des AMS wurde am KIT mitentwickelt.

2.2 Aussehen der Strahlung im AMS

Um nun die Ruhemasse eines geladenen Teilchens zu bestimmen, kann man die gemessenen Größen für Ladung z , Ablenkung im Magnetfeld ϱ und Geschwindigkeit β kombinieren. Aus Gleichung 2 ergibt sich mit der vom Ablenkmagneten abhängigen Konstanten k folgender Zusammenhang:

$$m_0 = \frac{\varrho z}{\gamma \beta c} \cdot k \quad (7)$$

Entsprechend lässt sich auch die Energie paarbildender Photonen ermitteln. Photonen als solche durchlaufen dagegen den kompletten Detektor unbemerkt und machen erst durch Aufschauern im Calorimeter die Information über ihre Energie zugänglich. Eine Übersicht, welche Spuren verschiedene Teilchen im AMS hinterlassen, wurde im Vortrag gegeben. Man sieht also, dass jede der Strahlungsarten beim Durchschreiten des AMS aufgrund der Kombination der verschiedenen Subdetektoren einen einzigartigen „Fußabdruck“ hinterlässt.

Literatur

- [1] K. G. Begeman, A. H. Broeils, R. H. Sanders. Expected Rotation Curves of Spiral Galaxies – Dark Haloes and Modified Dynamics. *Royal Astronomical Society, Monthly Notes* (April 1991)
- [2] Alberto Olivia. High Charge Cosmic Rays Measurement with the AMS-02 Silicon Tracker. *Università degli studi di Perugia* (2006)
- [3] K. U. Gassmann. Entwicklung und Test der raumfahrtqualifizierten Datenakquisition für den Übergangsstrahlungsdetektor des AMS-02 Experiments auf der Internationalen Raumstation ISS (Diplomarbeit). *Universität Karlsruhe* (2007)
- [4] C. Grupen. Particle Detectors – Second Edition. *Cambridge University Press* (2008)
- [5] C. Palomares. Search for Dark Matter with the AMS experiment (Vortrag). *CIEMAT (Madrid)* (2006)
- [6] B. Bertucci. The AMS-02 experiment on the ISS (Vortrag). *University Perugia*