

Direkte Messung der kosmischen Strahlung

Seminarvortrag 03.Juli 2009, Abdelghani Mariani
Betreuerin Dr. Bianca Keilhauer.

1. Historische Einleitung.

Das Phänomen (die kosmische Strahlungen) wurde 1912 vom österreichischen Physiker Viktor Franz Hess im Wiener Prater entdeckt, als er an Bord eines Wasserstoff-Ballons Experimente mit einer damals neu entwickelten Ionisationskammer zur Bestimmung der Ionisation als Funktion der Höhe durchführte.

Bis 2000 m wurde eine leichte Abnahme der Rate registriert (Bodenradioaktivität), die Ionisation stieg dann jedoch stark an. Hess erreichte eine maximale Höhe von 5300 m. Zwei Jahre später wurden seine Messungen von Wulf auf Ballonfahrten bis 9000 m bestätigt. Hess konnte damit den extraterrestrischen Ursprung der Strahlung (man glaubte an Gamma-Strahlung als Erklärung) nachweisen.

Für seine Untersuchungen wurde er 1936 mit dem Nobelpreis in Physik ausgezeichnet.

Weitere Wissenschaftler folgten Viktor Hess, mit einer Nebelkammer konnte Dimitry Skobelzyn 1927 zum ersten Mal Sekundärteilchen, die von der kosmischen Strahlung in der Erdatmosphäre erzeugt werden, photographieren. Lemaitre 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 (Milikan 1935) gelang die Entdeckung des Myons, eines damals mysteriösen Teilchens, das wesentlich schwerer abzuschirmen war als Elektronen. Die μ -Masse konnte ebenfalls in Strahlungs-Experimenten mit Nebelkammern bestimmt werden. Die Natur des Myons (damals "Mesotron" genannt, 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.

Ab etwa 1950 können solche Teilchen auch an künstlichen Beschleunigern in großen Forschungseinrichtungen erzeugt werden, davor stellte die kosmische Strahlung die einzige Möglichkeit dar, die Eigenschaften von Elementarteilchen bei hohen Energien zu untersuchen.

Unter kosmischer Strahlung versteht man heute geladene Teilchen, die die Erde aus dem Weltall treffen. Anders gesagt: die kosmische Strahlung ist nichts anders als eine ionisierende Teilchenstrahlung, die überwiegend aus Protonen (85 %), Heliumkernen (12 %) sowie schweren Kernen und Elektronen besteht, dabei wurden alle Elemente des Periodensystemes von Wasserstoff bis zu den Aktiniden nachgewiesen. Die in der kosmischen Strahlung vorkommenden Energien

überstreichen einen Bereich von einigen 1000 eV bis zu über 10^{20} eV (1 eV= $1,6 \cdot 10^{-19}$ Joule).

2. Analyse des Spektrums der kosmischen Strahlung:

Das Spektrum der kosmischen Strahlung (Fig. 1) folgt einem Potenzgesetz dN

proportional zu $\frac{dE}{E}$ 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^{18} eV. Vor dem Knie beträgt der Spektralindex $\gamma = 2,7$, hinter dem Knie ändert er sich zu $\gamma = 3,1$.

Hinter dem Knöchel flacht der Verlauf des Spektrums wieder ab, der Spektralindex beträgt wieder etwa $\gamma = 2,7$.

Die Zusammensetzung der kosmischen Strahlung und ihr Energiespektrum wird zum einen durch direkte Experimente wie Satellitenexperimente (z.B. AMS-01, AMS-02, und PAMELA) und diverse Ballonexperimente (z.B. BESS) untersucht und zum anderen durch indirekte Experimente (z.B. KASCADE, Pierre Auger Observatory). Das Ziel der Experimente zur direkten Messung ist die Suche nach kosmischer Antimaterie, dunkler Materie und der Untersuchung bzw. der Zusammensetzung des interstellaren Mediums.

Generell soll der Fluss der KS und dabei auch der Fluss der einzelnen Elemente vermessen werden.

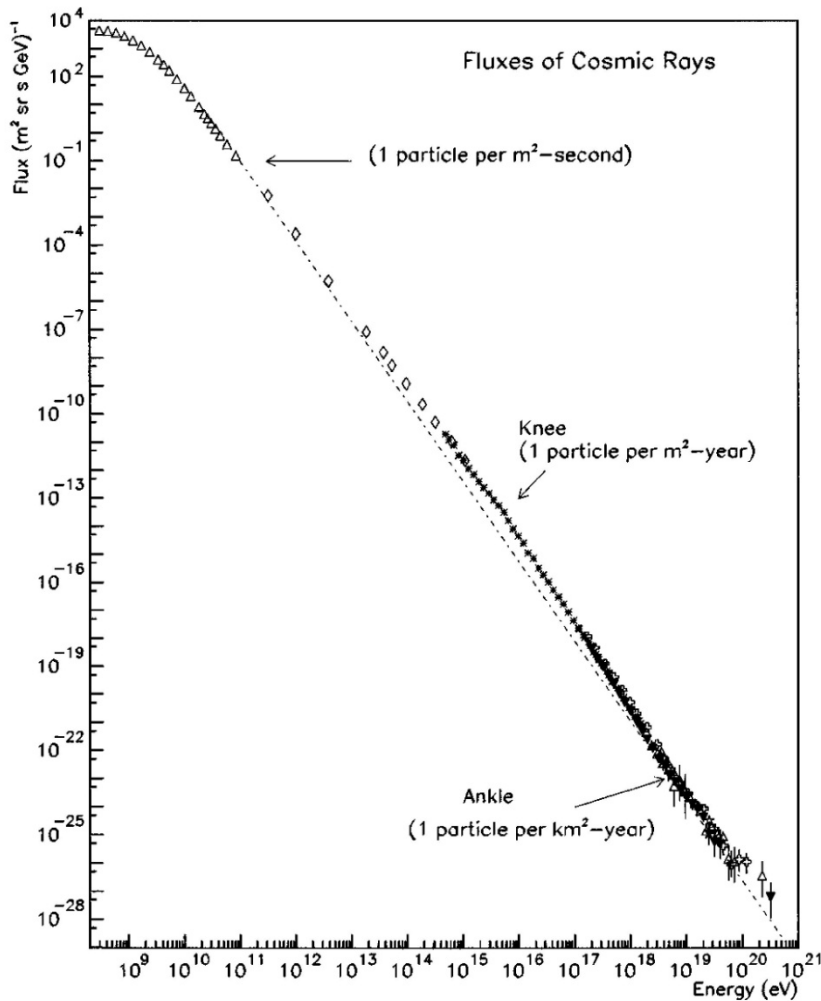


Abb1. Energiespektrum der Kosmischen Strahlung.

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.

Man geht heute davon aus, dass die Quellen der kosmischen Strahlung im mittleren Energiebereich Supernova-Überreste sind. Für sehr hohe Energien kennt man die Quellen noch nicht.

3.Quellen der kosmischen Strahlung

Die Bestimmung der Quellen der KS ist nicht direkt möglich: Da die Teilchen geladen sind, werden sie im interstellaren Magnetfeld abgelenkt und zeigen (im Gegensatz zu Photonen) nicht auf ihre Quellen zurück. Die beobachtete Verteilung der KS am Himmel ist völlig isotrop. Verschiedene Überlegungen zeigen jedoch, dass die KS galaktischen Ursprungs sein muss.

Eine Methode, mögliche Quellen zu ermitteln, ist die Abschätzung über die Leuchtkraft, d.h. man überprüft, welche Quellen überhaupt in der Lage sind, die beobachtete Leuchtkraft der KS zu liefern. Hier gelangt man zu folgenden Quellen der CR:

- Unsere Sonne, allerdings nur bis zu Energien von 10^9 eV
- Supernovae, allerdings nur bis zu Energien von 10^{14} eV
- Pulsare, allerdings nur bis zu Energien von ca. 10^{19} eV

- Doppelsternsysteme, allerdings ebenfalls nur bis zu Energien von ca. 10^{19} eV

4.kosmische Uhren und ihre Interpretation

Um das Alter und die Zeit zwischen Produktion und Beschleunigung der kosmischen Strahlung zu beschreiben, stellen die sog. kosmischen Uhren einen sehr eleganten Ansatz dar. Besonderes Augenmerk gilt dabei den Verhältnissen zwischen sekundären Spallationsprodukten und besonders dominanten primären Isotopen (z.B. B/C, $^{10}\text{Be}/^{12}\text{C}$, $^{36}\text{Cl}/^{54}\text{Fe}$), sowie dem Verhältnis zwischen radioaktiven und nicht-radioaktiven Spallationsprodukten (z.B. $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$, $^{54}\text{Mn}/^{56}\text{Fe}$) 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 Elektronen- Einfang zerfallen und somit Informationen über die verstrichene Zeit zwischen Produktion und Beschleunigung der Partikel enthalten.

Propagations-Uhren hingegen sind sekundäre Isotope, bei welchen ein $\text{Beta}\pm$ -Zerfall Aufschluss über die Zeit zwischen Entstehung und Flucht aus der Galaxie gibt.

5.Die direkte Messung und ihr Ziel

Messungen der primären Teilchen der kosmischen Strahlung am oberen Rand der Atmosphäre nennt man „Direkte Messungen“, man führt Experimente im Weltraum (Schuttle,Satelliten) oder mit Ballons in 35-40 km Höhe , oberhalb von rund 95% der Atmosphäre.

Wie bereits erwähnt, sind direkte Messungen nur bis 100 TeV praktikable, und zwar aufgrund der niedrigen Flüsse. für höhere Energien verwendet man indirekte Messungen, die die Sekundären Teilchen nachweisen, wie bei „KASCADE“ und dem „Pierre Auger Observatorium“.

Element und Isotopenhäufigkeit.

Jedes Element hat einen eigenen Spektralen Index, der mit der Entweichzeit

“ Escape-Zeit“ (Parameter im Leaky-Box-Modell) zusammenhängt.

- Man kann die Elemente und Isotopenhäufigkeit mit den Beschleunigungs- und Propagationsmodellen theoretisch berechnen.
- Somit lassen sich die Modellparameter(bzw. Modelle bestätigen) anpassen.

Nachweis von Antimaterie.

- Im Fall, dass die Antimaterie in unsere Galaxie vorhanden wäre, dann sollte sie in Kosmischen Strahlung vorkommen.
- Bis jetzt ist die Messung der primäre Antiteilchen noch nicht gelungen, daher wird eine obere Nachweisgrenze angegeben. Man nimmt das Verhältnis von Antiheliums zu Helium(liegt jetzt bei 10^{-7}).
- Nachweise der Anti-materie würde uns drauf hinweisen, ob es die dunkle Materie gibt oder nicht.

Untersuchung des Knies

- Von 10^{15} bis 10^{17} eV ist die ungefähre Grenze für direkte Messungen, weil die Teilchenflüsse so klein sind, dass die Nachweiswahrscheinlichkeit zu Null tendiert. In diesem Energiebereich ist ein starker Abfall des Flusses zu erwarten, weil die maximale Beschleunigungsenergie erreicht ist.
- Hier sind indirekte Messungen sinnvoller.

6. Detektoren

6.1 Ionisationsdetektoren.

Das Prinzip der meisten Detektoren ist die Messung der Ionisationsverlust der Teilchen. Hier wird als Beispiel eine Proportionalkammer erklärt. Die Teilchen erzeugen beim Durchfliegen im Füllgas(meistens Ar/Xe) Elektron-Ion-Paare erzeugt. Die erzeugten Paare driften mittels einer angelegten Spannung an die Elektroden(positive Teilchen driften zur Kathode (dem Minuspol) und die negative Teilchen zur Anode), und erzeugen auf ihrem Weg Lawinen. Am Ausgang erhält man dadurch ein messbares Ladungssignal, das proportional zum Energieverlust des durchlaufenden Teilchens ist.

6.2 Der Magnetspektrometer.

Magnetspektrometer werden eingesetzt, um den Impuls zu messen.

Das Feld sorgt dafür, die Teilchenbahnen zu krümmen, dann werden sie von den Spurdetektoren sichtbar gemacht. Der Krümmungsradius ist direkt proportional zum Impuls.

6.3 Szintillator

Zur Zeit- bzw. Geschwindigkeitsmessung und als Auslöser (Trigger) werden die Szintillatoren eingesetzt. Die Photonen werden in Photomultipliern gemessen. Die Geschwindigkeit wird in Time-of-flight-Detektoren gemessen, indem man 2

Detektoroberschicht (1 oberhalb und die andere unterhalb) des Gesamtaufbaus platziert.

6.4 Kalorimeter

Diese Art von Detektoren verwendet man, um die Energie zu messen. Dabei wird möglichst die gesamte Energie des einlaufenden Teilchen absorbiert, daher benötigt man sehr schwere Materialien wie Blei oder Wolfram.

6.5 Detektoren zur Teilchenidentifikation

Schwellwertdetektoren: für sehr hochenergetische Teilchen; solche Detektoren benutzen den sog. Cherenkov-Effekt. Übergangsdetektoren (Transition Radiation Detector, TRD) nutzen den Effekt, dass Teilchen bei Übergängen zwischen verschiedenen Dielektrika abstrahlen.

7. Wichtige Größen und Wechselwirkungen zum Nachweis.

7.1 Gyroradius oder Larmorradius.

Der Larmor-Radius (gyroradius oder cyclotron radius) bezeichnet den Radius, der Kreisbewegung eines geladenen Teilchens in einem homogenen Magnetfeld B .

$$\rho = \frac{Pc}{ZeB}$$

7.2 Magnetische Steifigkeit (Rigidity):

Ermöglicht eine Teilchenidentifikation, da sie nicht mehr vom Magnetfeld abhängt.

$$R = \rho B = \frac{Pc}{Ze}$$

7.3 Geometrischer Faktor.

Der geometrische Faktor ist eine Detektorkenngröße, die die wirksame Detektoroberfläche mal dem möglichen Raumwinkel angibt.

7.4 Exposure

der geometrische Faktor mal die Messdauer ergibt die Exposure. Ein Experiment soll eine möglichst hohe Exposure erzielen, besonders bei der Messung niedriger Flüsse (hochenergetischer Teilchen), um viele Ereignisse zu messen.

7.5 Atmosphärische Tiefe

Dieser Begriff wird in der Detektorphysik verwendet. Der Vorteil der atmosphärischen Tiefe ist, dass sie Material unabhängig ist. Die Einheit folgt aus der Definition:

$$x = \int_{h_0}^{\infty} \rho(h) dh$$

und ist g/cm².

7.6 Elektromagnetische Wechselwirkung.

Die Teilchen der kosmischen Strahlung werden über den Energieverlust im Detektor nachgewiesen.

Der Ionisationsverlust ist durch Bethe-Bloch-Gleichung berechnen:

$$-\frac{dE}{dX} \sim \left(\frac{Z}{A}\right) \frac{Z^2}{\beta^2} \left[\ln \frac{\beta^2 \gamma^2}{I} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right] \sim \frac{Z^2}{\beta^2}$$

Für Bremsstrahlung gilt:

$$-\frac{dE}{dX} \sim \frac{Z^2}{m^2} E = \frac{E}{X_0}$$

X_0 ist die Strahlungslänge.

7.7 Hadronische Wechselwirkungen.

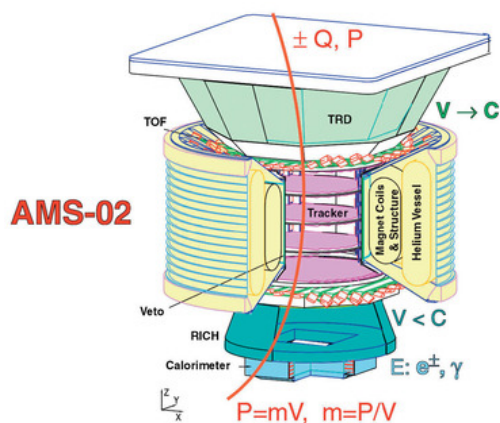
Diese Wechselwirkungen sind für direkte Messungen unbedeutend, weil sie zwischen hochenergetischen Kernen kommen.

8 Experimente: Weltraum- und Ballon-Experimente

Weltraumexperimente für die direkte Messung wurden erst seit den 70 er Jahren des 20. Jahrhunderts unternommen. Die Weltraumexperimente haben einen sehr großen Vorteil, sie haben Messdauern von mehreren Jahren, das erhöht automatisch die Exposure enorm. Die Messdauer ist nicht unbegrenzt, weil die Umlaufbahnen nicht ganz stabil sind, und der Brennstoff zu begrenzt ist. Heute hofft man eine Messdauer von 3-5 Jahren zu erreichen. Die Planungen der Weltraum-experimente sind sehr langwierig und teuer.

Hier nehmen wir hier ein paar Beispiele: AMS01, AMS-02 und PAMELA.

8.1 AMS01, AMS-02 Experimente

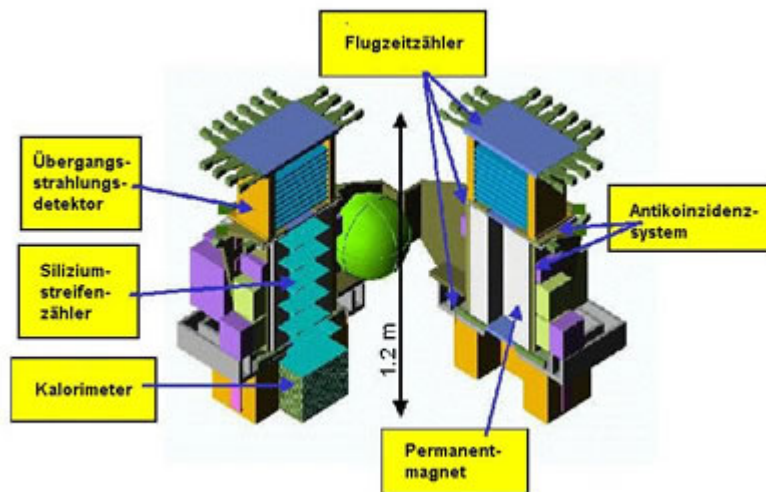


300 GeV	e^-	e^+	P	\bar{He}	γ	γ
TRD						
TOF						
Tracker						
RICH						
Calorimeter						

Abb.2 Oben: Querschnitt durch den etwa 3 m hohen AMS-02-Detektor. Unten: Symbolische Darstellung der mögliche Teilchenidentifikationssignale in den unterschiedlichen Subdetektoren.

Der Flug von AMS-01 mit dem Space Shuttle Discovery hat erstmals gezeigt, dass es möglich ist, moderne Detektoren der Teilchenphysik erfolgreich im Weltraum zu betreiben. Dabei gilt es eine Reihe von technischen Problemen zu lösen, die durch Start und Landung sowie den Betrieb im Weltraum auftreten. Mit dem AMS-02-Detektor sollen alle Komponenten der kosmischen Strahlung, inklusive einem möglichen Anteil von Antimaterie, genau vermessen und daraus Anzeichen für die Annihilation der Dunklen Materie gewonnen werden.

8.2 PAMELA



PAMELA steht für "Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics".

Das Detektor-Experiment zur Untersuchung der kosmischen Strahlung war am 15. Juni 2006 als Teil des russischen Forschungssatelliten Resurs-DK1 ins All gestartet und auf eine Umlaufbahn zwischen 350 und 610 Kilometern Höhe gebracht worden.

Zwischen Juli 2006 und Februar 2008, in diesem Zeitraum registrierte PAMELA insgesamt rund eine Milliarde Ereignisse, davon 151.672 Elektronen und 9430 Positronen im Energiebereich von 1,5 bis 100 GeV. Im unteren Energiebereich zeigen die PAMELA-Messungen signifikant weniger Positronen als frühere Messungen. Als Ursache dafür kommt eine Modulation der kosmischen Strahlung durch die Sonnenaktivität infrage. Insgesamt ist der Anteil der Positronen bis zu etwa 5 GeV aber in guter Übereinstimmung mit den Vorhersagen des Modells der sekundären Produktion der Antiteilchen.

Anders sieht es oberhalb von 10 GeV aus. Während bei einer sekundären Produktion eine Abnahme des Positronen-Anteils mit wachsender Energie zu erwarten wäre, zeigen die PAMELA-Daten im Gegensatz dazu einen deutlich Anstieg des Positronen-Anteils. Es muss also, so folgern die Wissenschaftler, entweder das Modell der sekundären Positronen-Erzeugung erheblich modifiziert werden - oder es gibt zusätzlich eine zweite, primäre Positronenquelle, aus der die zusätzlichen hochenergetischen Antiteilchen stammen. Für die Existenz einer zusätzlichen primären Quelle spricht auch, dass vor ein paar Jahren ein Ballon-Experiment auf einen Überschuss an hochenergetischen Elektronen im Bereich von 300 bis 800 GeV in der kosmischen Strahlung gestoßen ist.

Mögliche Kandidaten für die Produktion von hochenergetischen Elektronen und Positronen wären einerseits Pulsare und Mikroquasare in unserer näheren kosmologischen Umgebung. Andererseits könnten Elektronen und Positronen aber auch beim Zerfall von Teilchen der Dunklen Materie entstehen. Etwa 80 Prozent der Materie im Kosmos ist nach heutigen Erkenntnissen nichtbaryonisch und besteht aus

bislang unbekannten Elementarteilchen. Mögliche Kandidaten sind beispielsweise die von supersymmetrischen Theorien vorhergesagten Neutralinos.

Quellen:

www.astroteilchenphysik.de

PAMELA Homepage der Universität Siegen.

www.Weltderphysik.de

Einführung in Astronomie und Astrophysik von Arnold Hanslmeier.

Kosmologische Strukturbildung: Von der Quantenfluktuation zur Galaxie (Astrophysik Aktuell) von Helmut Hetznecker