

Für Luft ergibt sich auf Meereshöhe $n - 1 \approx 3 \cdot 10^{-4}$ (diese Größe ist für Gase proportional zum Druck) und für Wasser und Eis ist $n \approx 1.33$ ($\lambda = 300 \dots 600$ nm). In Tabelle 3.3 sind die Brechungsindizes von Luft und Wasser/Eis und die Schwellenenergien (E_{th}) für Elektronen und Myonen angegeben.

Tabelle 3.3: Brechungsindizes und Schwellenenergien.

Medium	n	$\theta_C(\beta = 1)$ [°]	E_{th} (e^\pm)	E_{th} (μ^\pm)
Luft	$1 + 2.93 \cdot 10^{-4}$	1.4	21 MeV	4.3 GeV
Wasser, Eis	1.33	41.2	0.8 MeV	160 MeV

3.8 Experimente zum Nachweis Kosmischer Strahlung

Zum Nachweis der Kosmischen Strahlung werden unterschiedliche Ansätze verfolgt. Während der Fluss der Teilchen bei niedrigen Energien noch groß genug ist, um mit Ballon- und Satellitenexperimenten mit relativ kleinen Detektoren direkte Beobachtungen durchführen zu können, sind bei höheren Energien großflächige Detektorfelder zum Nachweis der ausgedehnten Luftschauer nötig. Bei der indirekten Messung der CR über Luftschauern, ist es allerdings sehr schwierig, eindeutig auf die physikalischen Parameter wie Ladung, Ladungsvorzeichen und Masse der primären Teilchen zu schließen.

3.8.1 Ballonexperimente

Ballone (Abb. 3.22) können Volumina bis zu eine Million m^3 haben, bringen Nutzlasten von bis zu 3 Tonnen in Höhen von etwa 40 km, bei einer typischen Flugdauer von 24 Stunden. Die verbleibende Restatmosphäre oberhalb des Experiments beträgt dann nur noch $3\text{-}5$ g/cm^2 . Vergleicht man diese Zahl mit den etwa 90 g/cm^2 an mittlerer freier Weglänge von Protonen in Luft, so erkennt man, dass die Ballonflughöhe der Weltraumbedingung sehr nahe kommt.

Die Abbildung 3.23 zeigt exemplarisch die typische Größe und Komplexität eines modernen Ballonexperiments am Beispiel des ISOMAX-Experiments. Es ist etwa 2.5 m hoch und hat eine Masse von 2000 kg. Im Zentrum dieses Experiments befindet sich ein starkes supraleitendes Magnetspektrometer, das den Impuls einfallender Protonen noch bei 100 GeV auf 6% genau zu messen gestattet. Zur Messung von Ladung und Geschwindigkeit der einfallenden Teilchen, und damit Teilchenidentifikation, wird das Spektrometer durch Szintillationszähler, Aerogel-Cherenkovzähler und eine Flugzeitmessung ergänzt.

Mit Ballonexperimenten wurde die Zusammensetzung der einfallenden kosmischen Teilchen (Hadronen, Leptonen, Kerne, Antimaterie) und deren Energiespektren bestimmt (Abschnitt 3.3, Abb. 3.7).



Abbildung 3.22: Start des Ballon-Experimentes ISOMAX (Kollaboration von Goddard Space Flight Center, California Institute of Technology und Universität Siegen).

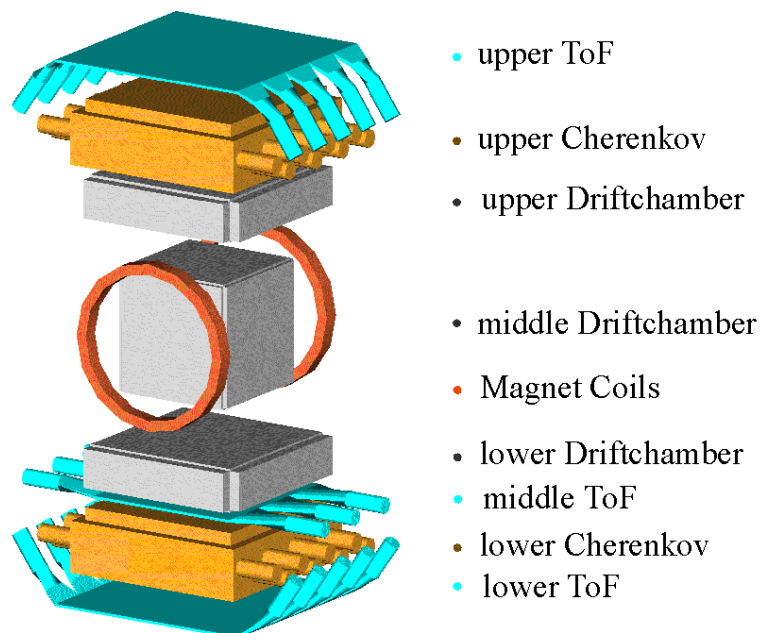


Abbildung 3.23: Schematische 3-D-Ansicht der ISOMAX-Apparatur.

3.8.2 Satellitenexperimente

Ballonexperimente finden dann ihre Grenze, wenn die Flüsse der einfallenden Teilchen so gering werden, dass mit den erreichbaren Flugdauern nicht ausreichend viele Teilchen registriert werden können.

Zur Zeit gibt es zwei Satellitenexperimente, an denen sich deutsche Universitäten und Institute beteiligen: PAMELA und AMS. Beide Experimente sind als Magnetspektrometer ausgelegt, und erlauben damit, als wesentliche Verbesserung gegenüber früheren Experimenten, eine bessere Impulsbestimmung und vor allem die Ladungstrennung und damit die Suche nach Antimaterie.

Pamela: PAMELA steht für Payload for AntiMatter Exploration and Light-nuclei Astrophysics. Das wissenschaftliche Ziel des PAMELA-Experiments ist vor allem die Messung von Antiprotonen und Positronen und die Bestimmung von Flußgrenzen für Antikerne. Insbesondere die Messung der Antiprotonen und Positronen leiden bisher unter geringer Statistik und dem Einfluß der Erdatmosphäre, da bisher alle Messungen mit Ballonexperimenten durchgeführt wurden. Die Verbesserungen, die mit PAMELA möglich sein werden, sind in Abb. 3.24 dargestellt.

An Bord des dem russischen Satelliten Resurs-DK1 kreist PAMELA in einem nahezu polaren Orbit mit einer Inklination von 70.4° und einer Höhe zwischen 350 und 600 km. Dieser Orbit erlaubt eine Messung der niederenergetischen galaktischen kosmischen Teilchenstrahlung in der Nähe der Pole, wo der Einfluß des Erdmagnetfeldes gering ist. Das Experiment ist im Juni 2006 gestartet worden und hat bereits erste Daten genommen.

Abbildung 3.25 zeigt schematisch den experimentellen Aufbau von PAMELA: Das Experiment besteht aus einem Magnetspektrometer mit einem Permanentmagneten, Siliziumstreifenzählern zur Auslese, einem Übergangstrahlungsdetektor, einem Silizium-Wolfram-Kalorimeter, einem Flugzeitzähler und einem Anti-Koinzidenz-System. Das gesamte Experiment ist nur etwa 120 cm hoch und wiegt etwa 400 kg. Das Magnetspektrometer im Zentrum ist kompakt und hat nur eine Höhe von 450 mm und eine Öffnung für den Teilchendurchgang von $132 \times 162 \text{ mm}^2$. Kombiniert mit der Winkelöffnung des Experimentes ergibt sich daraus eine geometrische Akzeptanz von $A = 20.5 \text{ cm}^2 \text{ ster}$, was auf dem polaren Orbit ausreicht, um genügend Teilchen in der vorgesehenen Meßzeit von einigen Jahren zu registrieren.

AMS-Experiment Das Magnetspektrometer AMS wurde zur Suche nach Antikernen entwickelt. Obwohl Gamma-Beobachtungen darauf hindeuten, dass es keine primordiale Antimaterie bis hoch zu Skalen von Superhaufen von Galaxien im Universum gibt, wurde auch in der kosmischen Strahlung nach galaktischen Antikernen gesucht, allerdings bisher erfolglos: die obere Grenze für Antihelium liegt bei etwa $\text{Antihelium/Helium} < 10^{-6}$.

Basierend auf den Ergebnissen einer Testmission (AMS-01) soll ein erweitertes AMS-Spektrometer (AMS-02) auf der Internationalen Raumstation ISS für einen Zeitraum von drei bis fünf Jahren eingesetzt werden. Der Startzeitpunkt ist jetzt auf 2009 festgelegt. Das Kernstück von AMS-02 soll dann ein Magnetspektrometer mit supraleitendem Magneten und Siliziumstreifenzählern zur Auslese sein. Zur

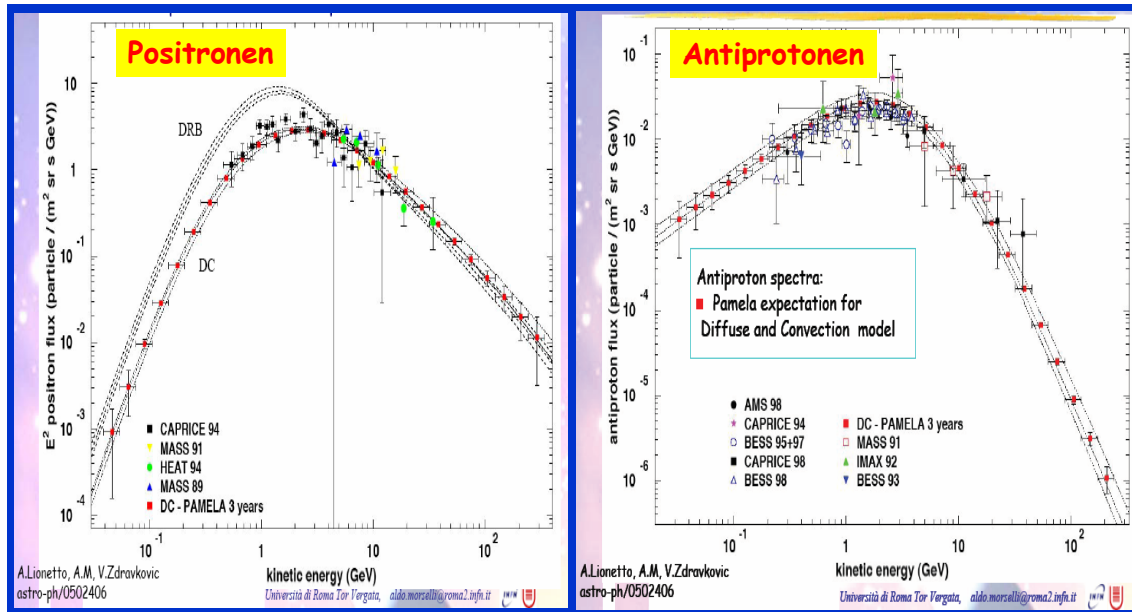


Abbildung 3.24: Darstellung des Potentials von PAMELA für die Verbesserung der Messungen von Positronen und Antiprotonen: Die mit 'DC PAMELA 3 years' bezeichneten Symbole zeigen, dass die Spektren mit hoher Genauigkeit zwischen etwa 30 MeV und 300 GeV gemessen werden können.

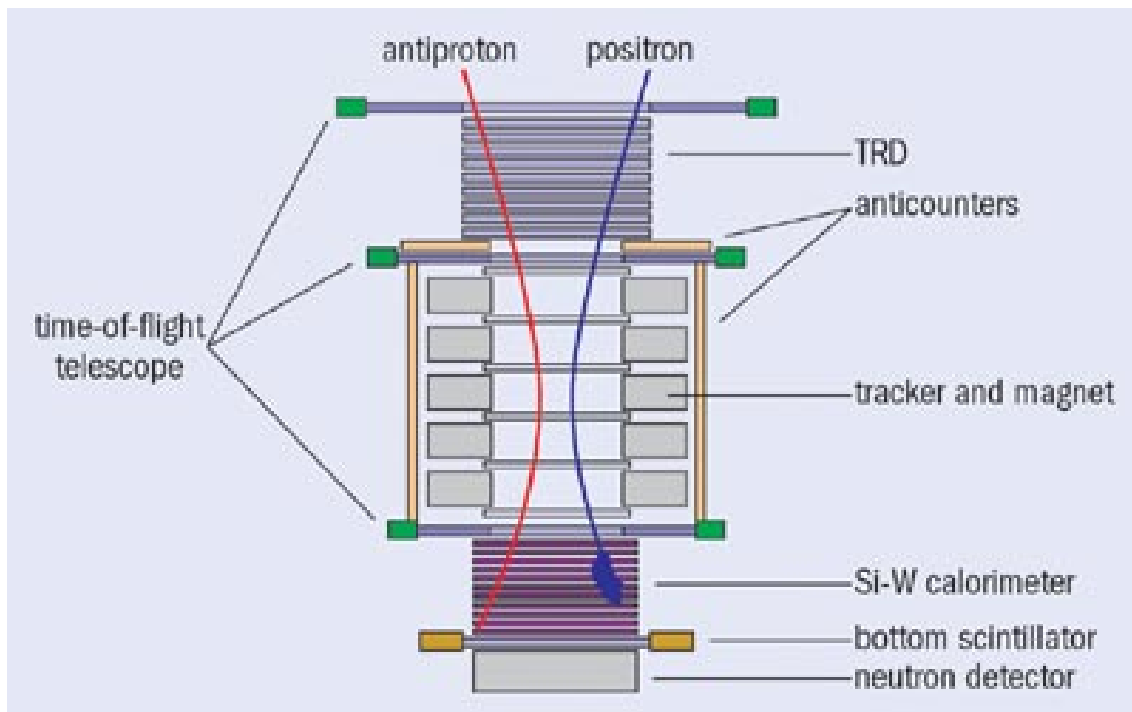


Abbildung 3.25: Schema der PAMELA-Apparatur.

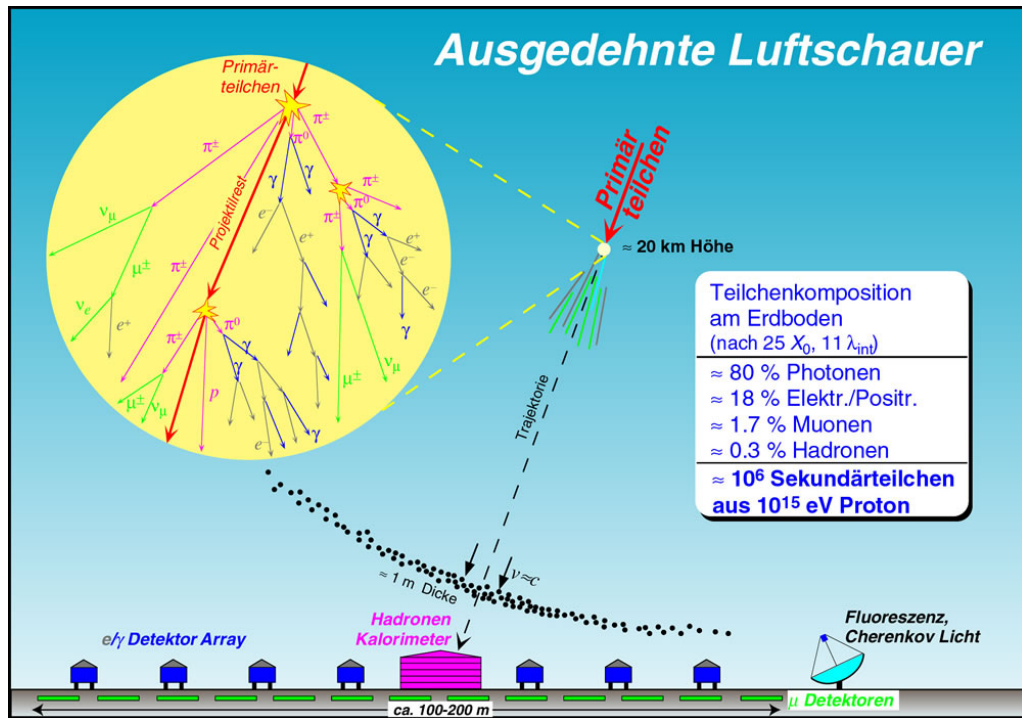


Abbildung 3.26: Das Prinzip der Entwicklung und des Nachweises eines ausgedehnten Luftschauers: Teilchenzusammensetzung eines von einem Proton erzeugten Luftschauers in der Nähe des Erdbodens und die Detektoren für die elektromagnetische, hadronische und myonische Komponente sowie Teleskope für den Nachweis von Cherenkov- und Fluoreszenz-Strahlung.

Teilchenidentifizierung dienen ein Übergangstrahlungsdetektor, ein RICH Cherenkovzähler, ein Kalorimeter, ein Flugzeitzähler und ein Anti-Koinzidenz-System.

3.8.3 Ausgedehnte Luftschauer

Wegen des steil abfallenden Energiespektrums kann Kosmische Strahlung bei hohen Energien nicht mehr mit Detektoren, die von Satelliten oder Ballons getragen werden, vermessen werden. Der Teilchenfluss für Energien oberhalb von 10^{15} eV ist etwa $1/(\text{m}^2 \cdot \text{Jahr})$ und oberhalb von 10^{20} eV etwa $1/(\text{km}^2 \cdot 100 \text{ Jahre})$. Der direkte Nachweis scheint für diese Energien ausgeschlossen zu sein.

Nachweismethoden:

Hochenergetische Kosmische Strahlung erzeugen ausgedehnte Luftschauer (EAS = Extended Air Shower), die mit relativ kostengünstigen, großflächig auf dem Erdboden verteilten Detektoren nachgewiesen werden können.

Abbildung 3.26 zeigt das Prinzip der Entwicklung und des Nachweises eines ausgedehnten Luftschauers. Die Schauerteilchen bilden eine weite Schauerfront, die sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit bewegt. Die Teilchenlawinen entwickeln sich entlang der Einfallsrichtung des Primärteilchens, so dass im Durchstoßpunkt der Einfallsrichtung durch die Erdoberfläche die höchste Teilchenintensität nachgewie-

sen wird. Aufgrund der hohen Multiplizitäten genügt es, die einzelnen Schauerkomponenten stichprobenartig mit weitläufig verteilten Detektoren zu registrieren. Ein primäres Proton einer Energie von 10^{15} eV (1 PeV) erzeugt zum Beispiel in der Nähe der Erdoberfläche im Mittel 10^6 Sekundärteilchen (80% Photonen, 18% Elektronen und Positronen, 1.7% Myonen und 0.3% Hadronen). Bei Energien oberhalb von 10^{17} eV läßt sich auch Fluoreszenzlicht im Wellenlängenbereich zwischen 300-400 nm effizient nachweisen. Es entsteht durch die Wechselwirkung geladener Teilchen mit Stickstoffmolekülen der Atmosphäre und kann bei solchen Energien mit abbildenden Spiegelsystemen in klaren Nächten in bis zu 30 km Entfernung beobachtet werden. Von dieser Nachweismethode machen die Experimente HiRes und AUGER Gebrauch (siehe unten).

Die eigentlich interessierenden Größen, nämlich Richtung, Energie und Masse der Primärteilchen müssen jeweils aus den Eigenschaften der Luftschauber abgeleitet werden. Die Schwierigkeit der Messung steigt in Reihenfolge der genannten Messgrößen: während die Richtung unmittelbar aus den Messdaten abgelesen werden kann, erfordert die Bestimmung der Masse mehr oder minder aufwendige Luftschaubersimulationen, anhand derer man durch Vergleich auf des ursprünglich Teilchen schließen kann. Zu diesem Zweck wurde das inzwischen von vielen Gruppen weltweit verwendete Luftschaubersimulationsprogramm CORSIKA (COsmic Ray SIMulations for KAScade) entwickelt. Simulationen zeigen, dass hochenergetische Hadronen (Protonen, Neutronen, Pionen,...) relativ eng (~ 30 m) um die Schauerachse konzentriert sind, Elektronen, Positronen und Photonen den zahlenmäßig größten Anteil ausmachen, und Myonen noch einige 100 m (bei 10^{14} eV) bis zu mehreren km (bei 10^{19} eV) entfernt von der Schauerachse nachweisbar sind. Die Anzahl der Myonen steigt bei fester Gesamtenergie nur geringfügig mit der Masse des Primärteilchens und erlaubt daher eine erste Abschätzung seiner Energie. Die am Erdboden beobachtete Elektronen- und insbesondere auch die Hadronenzahl sinkt dagegen mit zunehmender Masse des Primärteilchens. Schwerere Atomkerne wechselwirken mit größerer Wahrscheinlichkeit mit den Luftmolekülen, dies führt zu einer früheren Entwicklung des Schauers und damit zu einer stärkeren Absorption der elektromagnetischen und hadronischen Komponente in der Atmosphäre. Das Verhältnis der Elektron- oder Hadronzahl relativ zur Myonzahl ermöglicht somit eine Abschätzung der Masse des Primärteilchens. Ergänzende Messgrößen sind die Formen der Lateralverteilungen der jeweiligen Teilchensorten, die Höhe des Schauermaximums, die rekonstruierten Myon-Produktionshöhen, die Struktur des hadronischen Schauerkerns, oder das Zeitprofil der Schauerfront.

KASKADE, IceTop:

Diese Detektoren sind Beispiele für Experimente, die den Bereich mittlerer Energien, um das 'Knie' herum, abdecken und die insbesondere die chemische Zusammensetzung bestimmen sollen (vergleiche Abschnitt 3.3).

KASKADE: Auf einer von Fläche von 200×200 m² sind schachbrettartig 252 Detektorstationen im Abstand von 13 m zueinander verteilt (Abb. 3.27). Die Stationen beinhalten Szintillationsdetektoren zum Nachweis der Elektronen und Photonen eines Luftschaubers, zusätzlich befindet sich unter einer 20 cm starken Blei-Eisen-



Abbildung 3.27: Das KASCADE-Experiment im Forschungszentrum Karlsruhe. Erkennbar sind neben den einzelnen Hütten des Detektorfelds auch der in der Mitte gelegene Zentraldetektor.

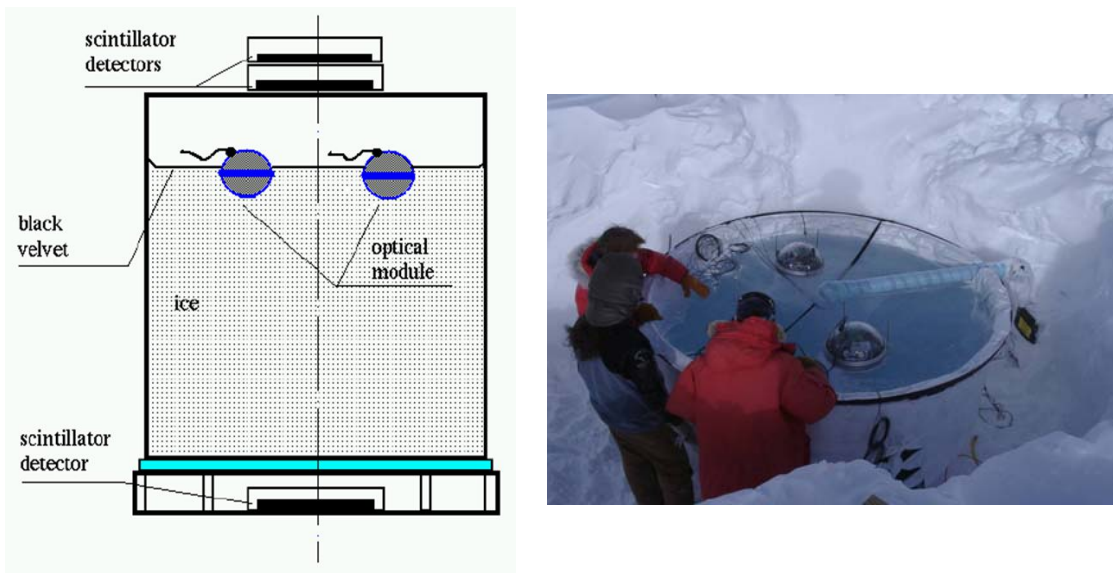


Abbildung 3.28: IceTop-Tank: Links eine schematische Zeichnung; rechts: Blick auf einen noch offenen Tank während der Installation am Südpole.

Abschirmung ein Szintillationsdetektor zum Nachweis von Myonen. Das Zentrum der Anlage ist ein $20 \times 16 \text{ m}^2$ großes Detektorsystem bestehend aus einem 4000 t Kalorimeter, zwei Ebenen aus Vieldraht-Proportionalkammern, eine weitere Ebene aus Streamertube-Detektoren sowie einer Triggerebene aus Szintillationszählern. Dieses System dient zur Vermessung der Hadronen, Myonen und Elektronen im Kernbereich des Luftschauers. Von diesem Zentraldetektor führt nach Norden ein 50 m langen Tunnel, in dem Myonen nachgewiesen werden.

IceTop: IceTop ist ein 1 km^2 großer Luftschauerdetektor, der auf der Eisoberfläche den IceCube-Detektor abdeckt (Abb. 1.8). Jedem der 80 IceCube-Strings sind zwei IceTop-Tanks zugeordnet. Diese Tanks ($2.7 \text{ m}^2 \times 0.9 \text{ m}$) sind mit Eis gefüllt, in dem jeweils zwei optische Module das von den Luftschauerteilchen im Tank erzeugte Cherenkovlicht registrieren (Abb. 3.28). Seit der Saison 2005/06 sind 16 Stationen

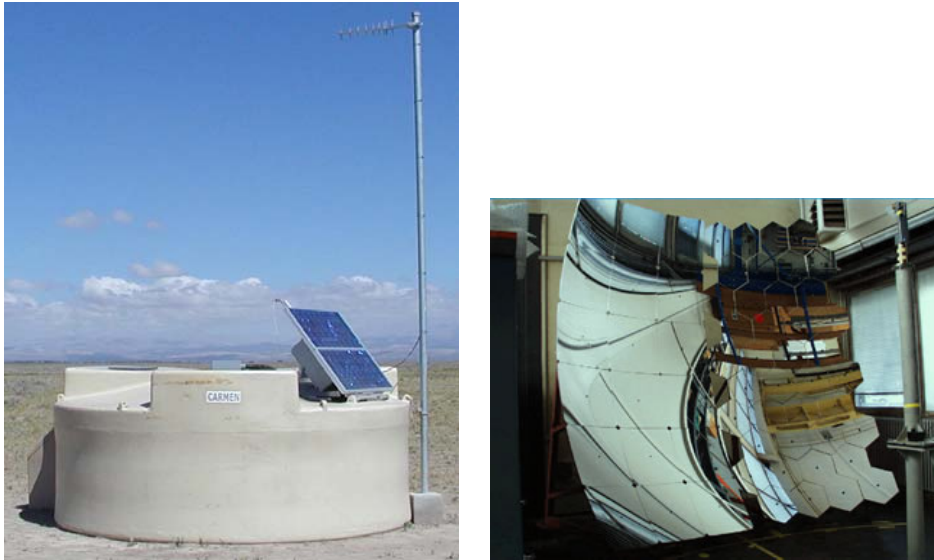


Abbildung 3.29: Auger-Experiment: Links: Detektor-Tank, rechts: Spiegel eines Floreszenz-Teleskops.)

(32 Tanks) installiert. Der Detektor soll 2011 komplett sein.

Wegen der Höhe von etwa 3200 m am Südpol hat IceTop den Vorteil gegenüber ähnlichen Detektoren (zum Beispiel auch KASCADE), näher am Schauermaximum zu sein, was eine bessere Bestimmung der Massen der Primärteilchen erwartet läßt.

3.8.4 Kosmische Strahlung am GZK-Limit

Durch Nachweis des Fluoreszenzlichtes von Teilchenschauern konnte 1991 das Flye's-Eye-Teleskop in Utah (USA) die bis dahin höchste gemessene Teilchen-Energie bei $3.2 \cdot 10^{20}$ eV. beobachten. Der Nachfolger ist der HiRes-Detektor, dessen Daten in Übereinstimmung mit dem erwarteten Abbruch des Energiespektrums bei etwa 10^{19} eV (GZK-Cutoff, Abschnitt 3.2) sind. Allerdings ist das im Widerspruch zu Ergebnissen des Experiments AGASA (Akeno Giant Air Shower Array), das Teilchen mit Energien oberhalb $0.5 \cdot 10^{20}$ eV beobachtet. Das AGASA-Experiment bedeckt eine Fläche von 100 km^2 mit 111 Oberflächendetektoren und 27 abgeschirmten Myondetektoren.

AUGER: Die Diskrepanz zwischen den Ergebnissen von HiRes und AGASA will das Auger-Experiment lösen. Das Experiment setzt auf den Nachweis von Schauerteilchen mit Bodendetektoren als auch gleichzeitig auf die Messung des Schauers über Fluoreszenzlicht. Mit der gegenseitigen Kontrolle der Energiemessung durch beide Methoden hofft man die Energiekalibration, die größte Schwierigkeit bei einem steilen Energiespektrum, besser in den Griff zu bekommen.

Das Auger-Experiment entsteht zur Zeit in der Provinz Mendoza in Argentinien auf einer Fläche von etwa 3000 km^2 (etwa Größe des Saarlandes) und ist damit das größte Experiment zur Beobachtung der kosmischen Strahlung. Es hat 1600 Detektoren von jeweils 11.3 m^2 Fläche im Abstand von 1.5 km, die mit reinstem Wasser gefüllt sind (Abb. 3.29 links). In Ergänzung zu den Wasserdetektoren überwachen 30

Fluoreszenz-Teleskope (Abb. 3.29 rechts) von vier verschiedenen Beobachtungsstationen aus die darüberliegende Atmosphäre. Jedes Teleskop hat eine Spiegelfläche von etwa 12 m^2 und ein Gesichtsfeld von $30^\circ \times 30^\circ$. Damit kann die komplette Entwicklung eines Luftschauers verfolgt werden.

