Kapitel 1

Einführung

Die Astroteilchenphysik hat sich als eigenständiges Gebiet erst in jüngster Zeit, im wesentlichen etwa in den letzten 20 Jahren, etabliert. Seine Wurzeln hat das Gebiet in der Beobachtung der hochenergetischen **kosmischen Strahlung** (Abb. 1.1, entdeckt 1912 von Viktor Hess; Nobelpreis 1936), die einerseits auf ihre Eigenschaften untersucht wird und andererseits auch, spätestens seit der Entdeckung des Positrons in der kosmischen Strahlung (Abb. 1.1; C.D. Anderson Nobelpreis 1936), für teilchenphysikalische Experimente genutzt wird. Die Physik der kosmischen Strahlung steht auch wegen der angewandten Nachweis- und Analysemethoden der Teilchenphysik nahe.

Die Astronomie, wenngleich eine der ältesten Wissenschaften, hat in der letzten Zeit einen gewaltigen Fortschritt erfahren, vor allem durch die Öffnung neuer Beobachtungsfenster durch satellitengestützte Teleskope oberhalb der Atmosphäre. Inzwischen decken die astronomischen Beobachtungen, die sich noch vor weniger als 50 Jahren auf den optischen Wellenlängenbereich beschränkt haben (Abb. 1.2), viele Dekaden im elektromagnetischen Spektrum ab, von Radiowellen über Mikrowellen und Infrarotstrahlung bis zu Röntgenstrahlung.

In einer willkürlichen - und wohl auch nicht strikt definierten - Trennung wird der jenseits der Röntgenstrahlung liegende Bereich im elektromagnetischen Spektrum von der Astroteilchenphysik abgedeckt, von MeV-Photonen bis zu den bisher erreichten Photonenergien von etwa 100 TeV. Die traditionell als "kosmische Strahlung" bezeichnete geladene Komponente hat durch Ablenkung in (inter-)galaktischen Magnetfeldern und im Erdfeld alle Richtungsinformation verloren (außer bei den höchsten, aber äußerst seltenen Energien). Photonen haben diese Einschränkung nicht, so dass nun auch Astronomie "im Lichte von TeV-Photonen" betrieben werden kann, dass heißt, es können Richtung, Ausdehnung und Strahlungsspektren von Objekten im Weltall untersucht werden. Andere neutrale Teilchen, die ihre Richtungsinformation behalten, sind Neutrinos. Nachdem zunächst die Sonne im "Neutrinolicht" beobachtet werden konnte, versucht man jetzt auch galaktische und extragalaktische Objekte durch Nachweis hochenergetischer Neutrinos, zum Beispiel im Eis der Antarktis, zu untersuchen.

Die neuen Beobachtungen in der Astronomie haben auch einen außergewöhnlichen Aufschwung in den angrenzenden Gebieten, wie Astrophysik und Kosmologie, bewirkt. In der Astrophysik, die sich mit der physikalischen Interpretation der astronomischen Beobachtungen, insbesondere auch der Energieerzeugung in astronomischen

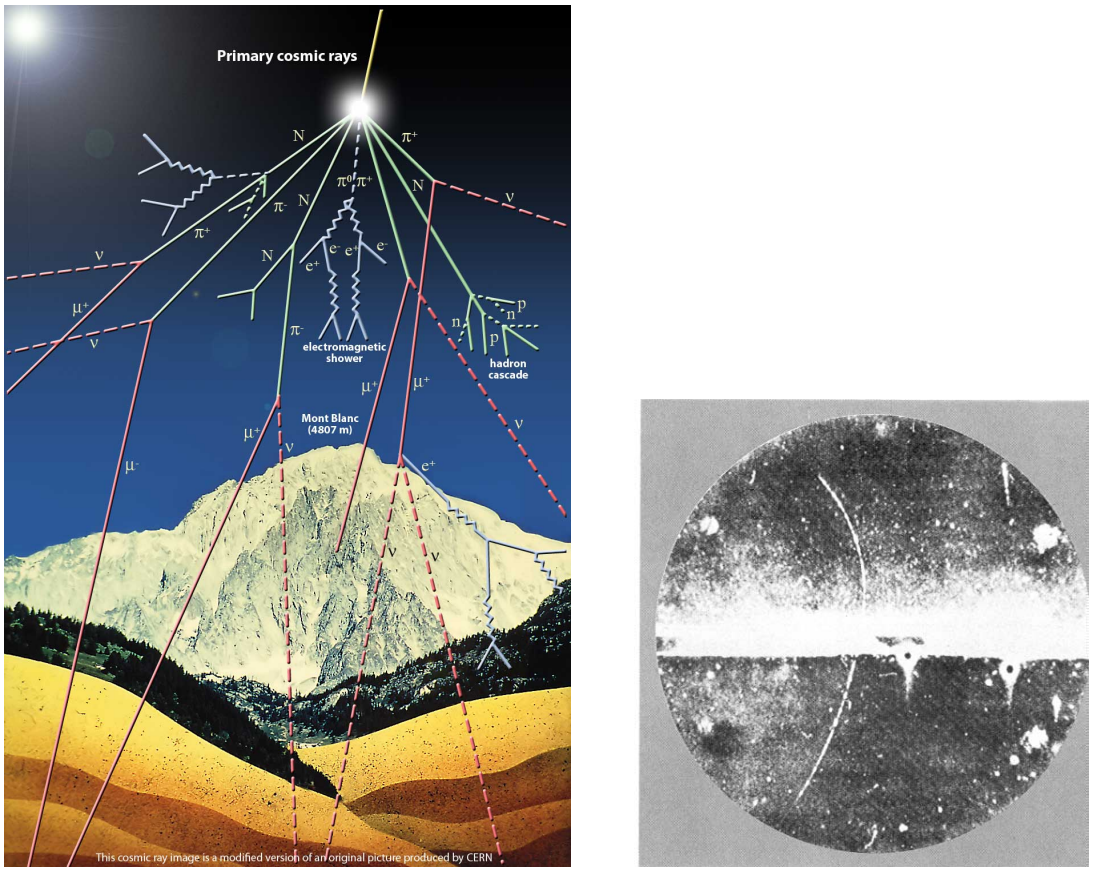

Abbildung 1.1: Kosmische Strahlung (auch "Höhenstrahlung"): Links: künstlerische Darstellung eines Luftschauers, der von einem hochenergetischen primären Teilchen der kosmischen Strahlung ausgelöst wurde. Rechts: Spur eines Positrons in einer Nebelkammer.

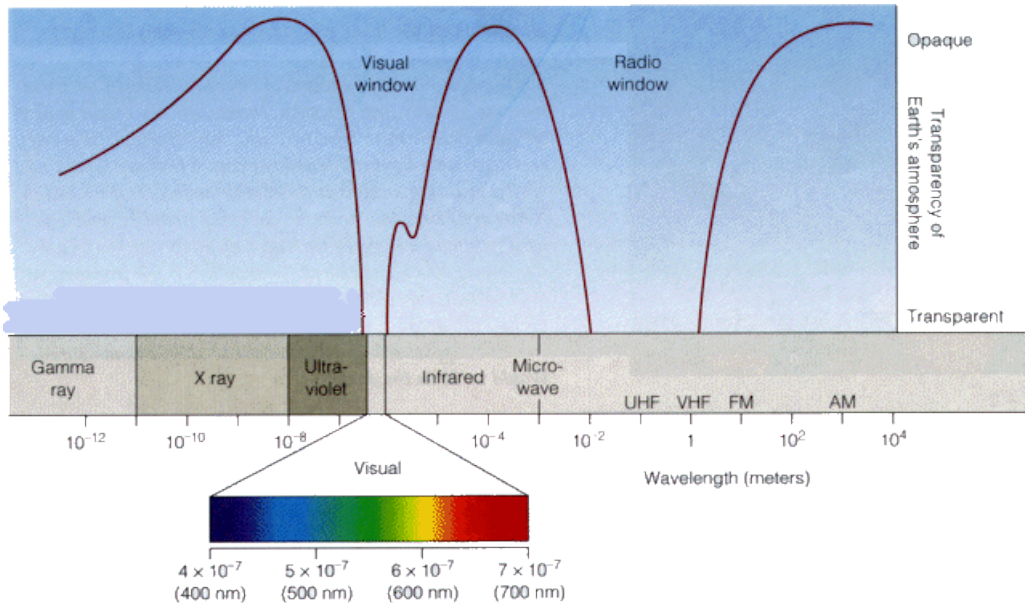

Abbildung 1.2: Transparenz der Erdatmosphäre für elektromagnetische Strahlung. Für astronomische Beobachtungen von der Erde stehen nur die Fenster im Optischen und im Radiowellenbereich zur Verfügung.

Objekten, beschäftigt, haben die Beobachtungen der TeV-Gamma-Strahlung neue Hinweise auf die Herkunft hochenergetischer kosmischer Strahlung gegeben. Auch die Kosmologie hat einen gewaltigen Sprung im Verständnis der Entwicklung des Universums gemacht. Es gibt heute ein 'Standardmodell der Kosmologie', das die Entwicklung des Universums vom Urknall bis heute - und vielleicht darüber hinaus - beschreibt. Für die frühe Phase nach dem Urknall sind teilchenphysikalische Prozesse relevant, deren Verständnis ebenfalls in jüngster Zeit wesentlich verbessert werden konnte.

Wir sprechen heute von einem **"goldenen Zeitalter der Astrophysik"**. Dabei kann man "Astrophysik" als die Verbindung zwischen Astronomie, Astrophysik, Astroteilchenphysik und Kosmologie ansehen. Die Fülle neuer Erkenntnisse ist durch eine neue Wechselwirkung zwischen den verschiedenen Gebieten, die zu einer wechselseitigen Befruchtung durch Informations- und Erfahrungsaustausch geführt hat, möglich geworden.

Geschichte und Entwicklung der Astroteilchenphysik: Die Geburtsstunde der Astroteilchenphysik ist die Entdeckung der kosmischen Strahlung durch Viktor Hess im Jahr 1912: In Ballonflügen stellte er fest, dass es neben einer Strahlung, die aus der Erde kommt, eine ionisierende Strahlung gibt, die mit der Höhe zunimmt. Im weiteren Verlauf hatte man herausgefunden, dass diese Strahlung von hochenergetischen, positiv geladenen Teilchen erzeugt wird, die aus dem Weltall kommen und in Wechselwirkungen mit unserer Atmosphäre Teilchenschauer erzeugen (Pierre Auger 1938). Bis in die 1950iger Jahre wurden in dieser Teilchenstrahlung immer neue Teilchen entdeckt, beginnend bei der bereits erwähnten Entdeckung des Positrons 1932, folgten die Myonen 1937, die geladenen Pionen und das neutrale K-Meson 1947, das neutrale Pion 1950 und schließlich die "seltsamen" Baryonen Λ, Ξ und Σ zwischen 1951 und 1953. Damit haben die Experimente mit der kosmischen Strahlung die Entwicklung der Teilchenphysik angestoßen. Beginnend in den 1950iger Jahren wurden Teilchenbeschleuniger, die kontrollierbare Experimente und hohe Raten bei stetig wachsenden Energien boten, für diese Suchen eingesetzt (das Antiproton wurde an dem eigens dafür gebauten Bevatron 1955 entdeckt). Erst in jüngster Zeit sucht man wieder in der Strahlung aus dem Kosmos nach - meistens exotischen - Teilchen mit Namen wie Wimps, Axionen oder magnetische Monopole. Die kosmische Strahlung wird aber nicht nur für teilchenphysikalische Experimente genutzt, sondern ist auch ein eigenständiger Forschungsgegenstand. Untersucht werden zum Beispiel die Zusammensetzung und das Energiespektrum der primären Strahlung. Teilchen mit Energien von 10^{20} eV und höher werden mit einem Fluß von weniger als einem Teilchen pro 200 km^2 und pro Jahr erwartet (Abb. 1.3). Die Detektoren, die solche Flüsse messen sollen, müssen sehr große Flächen haben. Das AUGER-Experiment in Argentinien deckt eine Fläche von etwa 3000 km^2 ab.

Mit der Beobachtung von **Neutrinos** von der Sonne seit 1967 (Experiment von R. Davis in der Homestake Mine, USA), mit Richtungsinformation seit 1987 (Kamiokande-Experiment), wurden erstmalig astronomische Beobachtungen mit nichtelektromagnetischer Strahlung durchgeführt. Das beobachtete Defizit an solaren Neutrinos relativ zu der theoretischen Vorhersage löste eine "Neutrino-Industrie" aus. Durch eine genaue Vermessung der Flüsse von Sonnenneutrinos, von Neutrinos, die durch kosmische Strahlung in der Atmosphäre erzeugt werden, und von

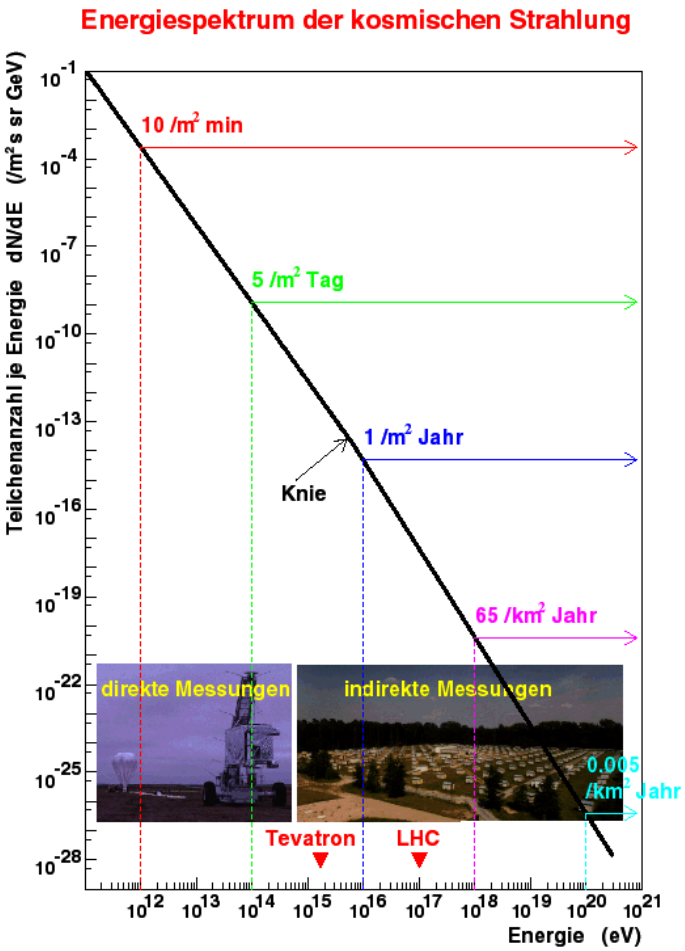

Abbildung 1.3: Energiespektrum der kosmischen Strahlung. Bei niedrigeren Energien können die Teilchen direkt mit Ballon- oder Satellitenflügen gemessen werden. Bei den höheren Energien werden die Luftschauer durch erdgebundene Detektoren nachgewiesen. Die Proton-Antiproton- beziehungsweise Proton-Proton-Kollisionen im Tevatron oder Large Hadron Collider haben Schwerpunktenergien (2 TeV und 14 TeV), die gleich der eines kosmischen Protons der angegebenen Energie im Zusammenstoß mit einem ruhenden Nukleon sind.

Reaktor(anti-)neutrinos ist nunmehr sicher, dass die drei Neutrinoarten miteinander mischen und auf ihrem Wege durch den Raum zwischen den verschiedenen Zuständen oszillieren (R. Davis und M. Koshiba Nobelpreis 2002). Ein nächster Schritt sollte die Beobachtung hochenergetischer Neutrinos von kosmischen Quellen sein, was wegen der geringen Neutrino-Wirkungsquerschnitte und den geringen erwarteten Flüssen eine sehr grosse Detektormasse voraussetzt. Als Detektorenmaterial bietet sich Wasser (Experiment im Baikalsee seit etwa 1993, Experiment im Mittelmeer in Vorbereitung) und Eis (Experimente in der Antarktis seit 1997) an.

Astronomie mit Gamma-Strahlung wurde durch Satellitenexperimente möglich. Schon seit Ende der 1960iger Jahre wurden so Beobachtungen von Röntgen- und Gammastrahlung gemacht. Für Photonen mit Energien oberhalb etwa 100 GeV wird der Fluß so klein, dass die Detektorflächen in satellitengestützten Experimenten nicht ausreichen. Hier lässt sich die Atmosphäre selbst als großvolumiger Detek-

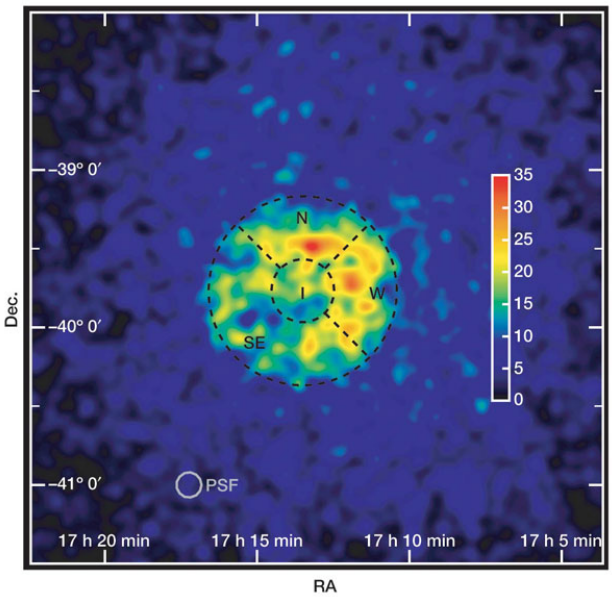

Abbildung 1.4: Karte der TeV-Gamma-Zählraten aufgenommen mit den HESS-Teleskopen im Bereich des Supernova-Restes RX J1713.7-3946. In der linken unteren Ecke ist die Telekopauflösung angegeben (PSF = point spread function). Die Energieschwelle war bei etwa 800 GeV.

tor nutzen: die durch hochenergetische Photonen ausgelösten elektromagnetischen Schauer werden über die Cherenkov-Strahlung der Elektronkomponente mit großen Teleskopen beobachtete. Als erstes astronomisches Objekt wurde der Krebsnebel im Lichte der TeV-Gammastrahlung mit dem Whibble-Teleskop 1989 beobachtet. Der Krebsnebel gilt jetzt als "Standardkerze", die mit der neuesten Generation von Teleskopen in Minuten beobachtet werden kann. Erst in jüngster Zeit ist es mit dem HESS-Teleskop gelungen, die räumliche Struktur von astronomischen Objekten, wie Supernova-Resten, zu bestimmen (Abb. 1.4).

Photonen im TeV-Bereich stellen damit die höchstenergetische Strahlung dar, von der wir bestimmen können, woher sie kommt. Das Studium der Quellen für diese Strahlung (hoffentlich demnächst auch mit Neutrinos), könnte Aufschluss über den Ursprung der hochenergetischen kosmischen Strahlung sein. Die Erzeugungsmechanismen für die höchsten Energien im Spektrum der kosmischen Strahlung, das sich bis 10^{21} eV ausdehnt, gehören zu den verbleibenden Rätseln, die die Astroteilchenphysik zu lösen hat.

Die moderne Kosmologie hatte ihren Ausgangspunkt in Hubble's Entdeckung, dass das Weltall expandiert (1929), der Grundlage der Urknall-Hypothese: danach hat sich das Universum aus einer heißen, dichten Ursuppe hin zu dem heutigen Zustand mit Sternen, Galaxien und Strahlung entwickelt. Die Dynamik des expandierenden Universums wird im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) durch die Massendichten als Lösungen der Einstein-Gleichungen beschrieben. Wichtige Bestätigungen hat das Urknallmodell durch die gemessenen Häufigkeiten der leichten Elemente im Universum und dem Nachweis der kosmischen Hintergrundstrahlung (1965) gefunden. Die Parameter dieses Modells, dem "Standardmodel der Kosmologie" wurden vor allem durch die satelliten-basierten Messungen der kosmi-

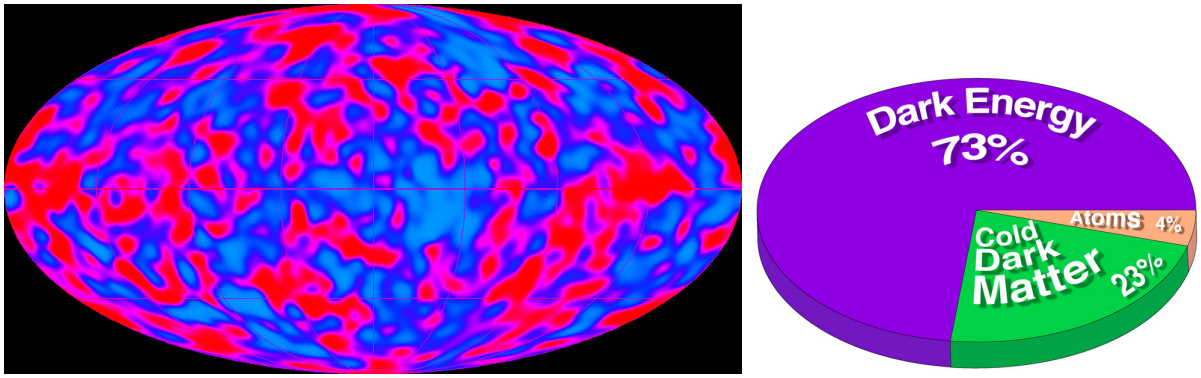

Abbildung 1.5: Links: Die von COBE gemessenen Fluktuationen der kosmischen Hintergrundstrahlung in der Größenordnung 10^{-5} K bei einer mittleren Temperatur von 2.73 K. Die Daten sind von dem COBE Satelliten mit einer Winkelauflösung von 7° aufgenommen worden, der Nachfolger WMAP (gestartet 2001) hat Auflösungen um 0.5° erreicht. Rechts: Die durch die CMB-Messungen bestimmten Anteile an der Energie- bzw. Massendichte des Universums.

schen Hintergrundstrahlung (CMB), begonnen mit dem COBE Satelliten (COBE = COsmic Background Explorer, gestartet 1989, erste Ergebnisse 1992, Nobelpreis 2006) mit hoher Präzision bestimmt (Abb. 1.5 links).

Eines der spannensten Resultate der CMB-Missionen ist die Erkenntnis, dass zu der Energie- bzw. Massendichte des Universums die uns vertraute "baryonische Materie" mit nur etwa 4 bis 5% beiträgt, wovon auch nur etwa 1/4 durch Leuchten sichtbar ist. Der Rest ist "Dunkle Materie" (etwa 25%) und "Dunkle Energie" (etwa 70%), siehe Abb. 1.5 rechts. Während die Teilchenphysik für die Dunkle Materie Erklärungen anbietet, ist die Dunkle Energie noch rätselhafter und hat sich bisher einer allgemein anerkannten theoretischen Beschreibung entzogen. Die Dunkle Energie übt einen negativen Druck, entsprechend einer "Anti-Gravitation", aus und führt deshalb zu einer beschleunigten Expansion des Weltalls. Diese beschleunigte Expansion wird durch Beobachtungen von Supernovae mit großer Rotverschiebung bestätigt.

Forschungsthemen der Astroteilchenphysik: Um nicht die schwierige Frage, was zur Astroteilchenphysik gehört und was zur Astronomie oder Teilchenphysik, orientieren wir uns daran, welche Projekte das Forschungsministerium (BMBF) unter dem Titel "Astroteilchenphysik" fördert (Abb. 1.6):

Seit 1999 findet alle zwei Jahre ein Treffen der deutschen Astroteilchenphysiker statt, das letzte 2005 unter der Überschrift "Astroteilchenphysik in Deutschland: Status und Perspektiven 2005". Die Themen auf dem Plakat in Abb. 1.6 geben an, was

- γ-Astronomie,
- kosmische Strahlung (geladene Komponente),
- Neutrino-Astrophysik,
- Neutrinomassen,

Abbildung 1.6: Plakat zu einem der regelmäßigen Treffen der Astroteilchenphysiker in Deutschland, bei dem die laufenden und geplanten Projekte, die vom BMBF unter dem Titel “Astroteilchenphysik” gefördert werden, vorgestellt und diskutiert werden [2].

- Dunkle Materie,
- Gravitationswellen,
- Kosmologie.

Deutschland ist mit diesem Themenkatalog an den wichtigsten Fragestellungen und Entwicklungen in der Astroteilchenphysik beteiligt, zum Teil auch in führender Rolle. Außer den Gravitationswellen wurden alle Themen in dieser Einleitung bereits angesprochen. Der Nachweis von Gravitationswellen wäre ein weiterer wichtiger Beleg, dass wir mit unseren theoretischen Grundannahmen über die Dynamik des Universum, basierend auf der Allgemeinen Relativitätstheorie, richtig liegen. Der Astroteilchenphysik wird das Forschungsgebiet wahrscheinlich weniger wegen der möglichen Teilchennatur der Gravitationswellen (Gravitonen) zugeordnet, sondern eher, weil die Detektoren für Gravitationswellen eine Größenordnung haben, die zu den anderen Experimenten der Astroteilchenphysik gut passt.

Die Humboldt-Universität beteiligt sich zur Zeit an zwei Experimenten der Astroteilchenphysik: Auf dem Gebiet der γ-Astronomie beteiligt sich die Gruppe von Prof. Lohse an dem Experiment HESS in Namibia (Abb. 1.7). Ich selbst beteilige mich, zusammen mit einer Gruppe des DESY, an dem Experiment IceCube, das zur Zeit im antarktischen Eis installiert wird und mit dem insbesondere nach Neutrino-

Abbildung 1.7: Die HESS-Teleskope in Namibia.

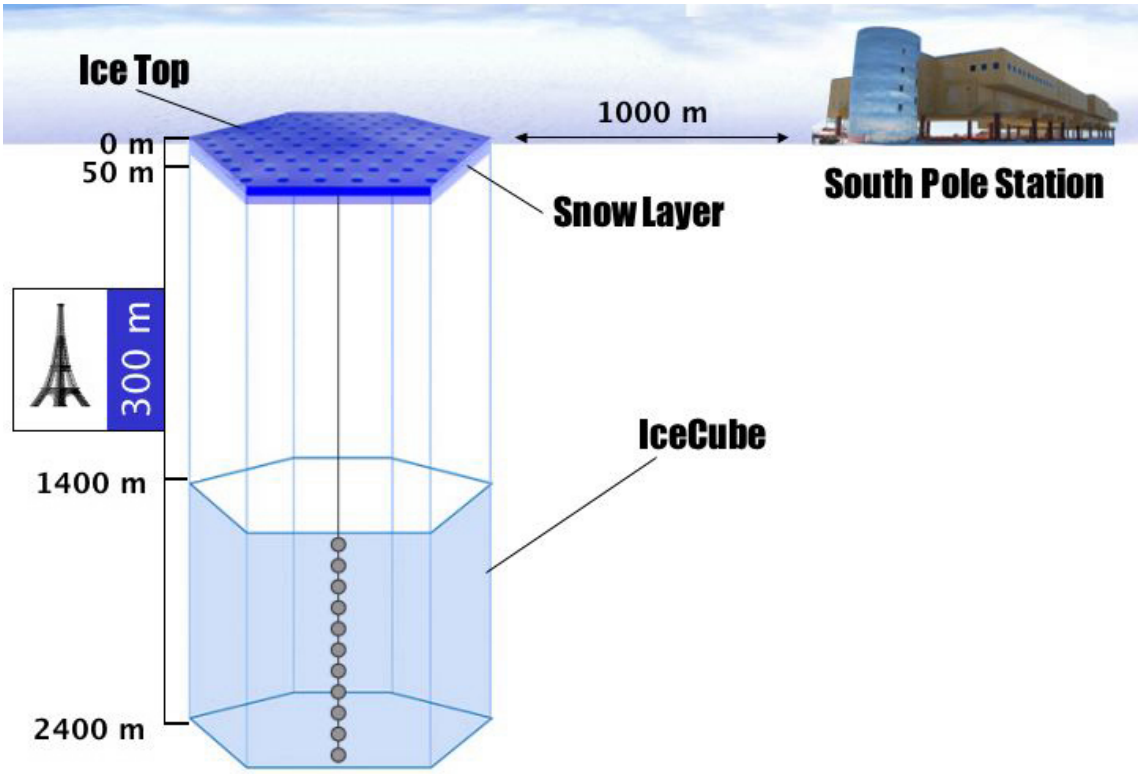

Abbildung 1.8: Schematische Darstellung des IceCube-Detektors im antarktischen Eis. Der 'InIce'-Detektor auf der Eisoberfläche wird von dem Luftschauerdetektor IceTop abgedeckt.

Punktquellen gesucht werden soll (Abb. 1.8). Auf die physikalischen Fragestellungen der Experimente, an denen die Humboldt-Universität beteiligt ist, werde ich naturgemäß genauer eingehen.

Gliederung der Vorlesung: Die Vorlesung beginnt mit einer Einführung in unser heutiges Wissen über die **Entwicklung des Universums**. Im Folgenden wird dann die **kosmische Strahlung** als Grundlage der experimentellen Astroteilchenphysik und der Nachweis der verschiedenen Komponenten ausführlich besprochen. Bevor dann die Herkunft der Strahlung und mögliche kosmische **Beschleunigungsmechanismen** diskutiert werden, wird ein Überblick über die **Entwicklungsstadien von Sternen** gegeben, die in ihren Endstadien Quellen hochenergetischer Strahlung sein können. Abschließend soll dann noch der Stand der Suche nach **Dunkler Materie** besprochen werden.

Literatur zur Vorlesung: Einen guten Überblick über das Gebiet der Astroteilchenphysik gibt das Buch von C. Grupen [3], eines der wenigen auf dem Gebiet in Deutsch und zudem vielleicht das preisgünstigste. Die neuere Ausgabe in Englisch [4] scheint dem Inhalt dieser Vorlesung etwas näher zu kommen, insbesondere enthält sie auch zusätzliche Kapitel über Kosmologie und das frühe Universum. Einen Überblick bekommt man durch die Vorträge bei den Treffen der Astroteilchenphysiker (zum Beispiel [2]). Ein Klassiker der Astroteilchenphysik ist das Buch von T. Gaisser [1], mit dem Schwerpunkt auf der kosmischen Strahlung. Eine ähnliche Zielrichtung haben die Bücher von T. Stanev [5] und R. Schlickeiser [14], insbesondere letzeres theoretisch etwas anspruchsvoller. Für die theoretischen Modelle der Beschleunigungsmechanismen werden wir uns an den Büchern von M.S. Longair [6] und P. Schneider [13] orientieren. Astrophysikalische Grundkenntnisse findet man in [7, 8]. Sterne und andere kosmischen Objekte, die als Teilchenbeschleuniger in Farge kommen, werden in [12] behandelt. Die mehr teilchenphysikalischen Aspekte werden in [9, 10] betont (eventuell soll das durch die Titel "Teilchenastrophysik" zum Ausdruck gebracht werden). Die kosmologischen Fragen werden in [11, 13] behandelt und popolär-wissenschaftlich auch in den bekannten Büchern von Weinberg [15] und Fritzsch [16]. Im "Review of Particle Physics" schließlich findet man eine Sammlung relevanter astrophysikalischer und kosmologischer Größen, sowie auch Material über Teilchendetektoren.

Es gibt zu der Vorlesung ein Skript, das auf der Web-Seite [18] zu finden ist. Allerdings werde ich das Skript parallel zu der laufenden Vorlesung bearbeiten. Die jeweils fertig überarbeiteten Teile werde ich entsprechend markieren. Es ist deshalb ratsam, immer nur für die nächste Vorlesung den entsprechenden Teil des Skripts auszudrucken.