Warum werden nicht auch die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung immer stärker je mehr Teilchen beteiligt sind?

- **Elektromagnetische Wechselwirkung:**

Im Gegensatz zur Gravitation, die zwischen massiven Körpern stets anziehend wirkt, kann die elektromagnetische Kraft entweder anziehend (wenn eine der Ladungen positiv, die andere negativ ist) oder abstoßend (wenn beide Ladungen positiv oder negativ sind) wirken. Dieser fundamentale Unterschied der beiden Kräfte bewirkt, dass die Gravitationskraft mit der Zahl der beteiligten Teilchen stets anwächst, die elektromagnetische Kraft jedoch zum Teil oder sogar ganz kompensiert wird.

- **Schwache Wechselwirkung:**

Die Reichweiten der Gravitation und der elektromagnetischen Kraft sind unendlich. Die schwache Wechselwirkung wirkt auf Grund der großen Massen ihrer Austauschteilchen nur zwischen Teilchen, deren Abstand weniger als 10^{-18} Meter beträgt, sodass die Anzahl der beteiligten Teilchen (und damit auch die Stärke der schwachen Kraft) stets begrenzt ist.

Welchen Spin hat das Graviton?

Das Graviton, das hypothetische Austauschteilchen der Gravitation, wird auf Grund der unendlichen Reichweite der Gravitationskraft als masselos angenommen. Wie alle Austauschteilchen gehört es zur Gruppe der Bosonen und muss daher einen ganzzahligen Spin besitzen. Im Standardmodell der Elementarteilchen wird für das Graviton der Spin s = 2 angenommen, der experimentelle Beweis steht jedoch noch aus, da das Graviton bis heute nicht nachgewiesen werden konnte.

Name	Ladung	Masse	Reichweite	Spin
Graviton	0	0	∞	2

Eigenschaften des Gravitons

Literatur:
Physik, Atome – Atomkerne – Elementarteilchen: H. Hänsel, W. Neumann, Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg Berlin Oxford 1995

Kann man einen Stern, der sich von der Erde aus betrachtet hinter der Sonne befindet, sehen?

[1], die 1915 von ALBERT EINSTEIN aufgestellt wurde, beschreibt die Gravitation als Folge der Geometrie der „Raumzeit“. Anders als in der Newtonschen Physik wird der Raum hier nicht durch eine ebene, sondern durch eine gekrümmte Geometrie beschrieben, die durch die Verteilung von Masse und Energie im Universum beeinflusst wird.

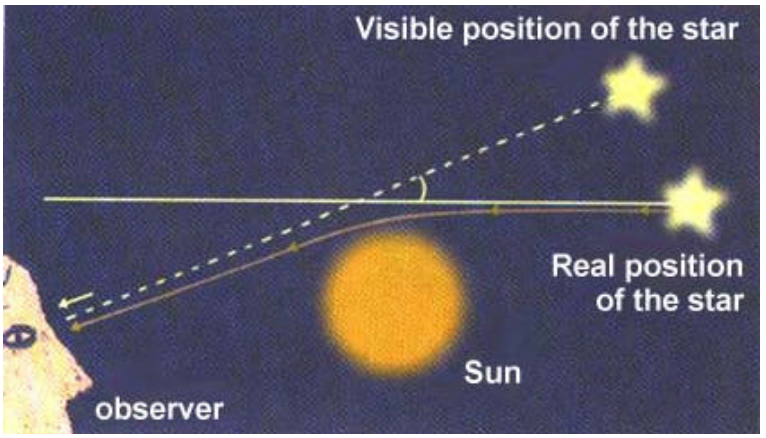

Abb. 40: Beobachtung eines Sterns, der sich von der Erde aus gesehen hinter der Sonne befindet.

Sterne wie unsere Sonne rufen eine Krümmung der Raumzeit hervor. Das Licht eines Sterns, der sich hinter der Sonne befindet, folgt dem kürzesten Weg, der jedoch in der durch die Sonnenmasse gekrümmten Raumzeit nicht mehr geradlinig verläuft. Das heißt, das Licht wird scheinbar von der Sonne angezogen. Unser Auge interpretiert die ankommenden Lichtstrahlen als gerade, daher sieht es für uns so aus, als ob der Stern nicht durch die Sonne verdeckt wird.

Literatur:
[1] Basiswissen 4, Seite 32

Mit welchen „Antennen“ will man Gravitationswellen messen?

Gravitationswellen werden nach ALBERT EINSTEIN von allen beschleunigt bewegten Körpern abgestrahlt (ebenso wie eine beschleunigte Bewegung von elektrischen Ladungen elektromagnetische Strahlung erzeugt). Die abgestrahlten Gravitationswellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit in alle Richtungen des Raumes aus und verursachen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung periodische Dehnungen und Stauchungen der Raumzeit – das heißt eine periodische Abstandsänderung zwischen benachbarten Probemassen. Allerdings ist dieser Effekt auf Grund der geringen Stärke der Gravitationskraft nur sehr klein: Typische kosmische Quellen von Gravitationswellen (z. B. Doppelsternsysteme, Supernovae) führen auf der Erde zu relativen Längenänderungen in der Größenordnung von 10^{-22}. Zur Messung derartig kleiner Abstandsänderungen werden heute zwei verschiedene Arten von Detektoren eingesetzt:

- **Zylinderantennen**

Diese in den Sechzigerjahren von JOSEPH WEBER entwickelten „Gravitationsantennen“ bestanden aus 1,5 Tonnen schweren Aluminiumzylindern. Eine durchlaufende Gravitationswelle sollte die Länge dieses Zylinders ändern und ihn in Schwingungen versetzen. Mit hochempfindlichen Verstärkern wollte Weber dann den Nachhall der Wellen messen. Um durch Bodenerschütterungen verursachte Signale erkennen zu können, errichtete Weber zwei solche Antennen im Abstand von 1000 Kilometern, deren Ergebnisse er dann miteinander verglich. 1969 behauptete er, fast täglich starke Signale aus dem Zentrum der Milchstraße zu empfangen. Diese Ergebnisse konnten jedoch nicht bestätigt werden.

- **Laserinterferometer**

Anfang der Siebzigerjahre erkannte man, dass die durch die Gravitationswellen verursachten Längenänderungen am einfachsten durch ein adaptiertes Michelson-Interferometer gemessen werden können. In einem solchen Interferometer teilt ein halbdurchlässiger Spiegel einen Laserstrahl in zwei senkrecht zueinander verlaufende Teilstrahlen gleicher Intensität. Die beiden Teilstrahlen durchlaufen zwei etwa gleich lange Messstrecken, werden jeweils am Ende reflektiert und wieder überlagert. Die Anlage ist dabei so eingestellt, dass sich die interferierenden Laserstrahlen gegenseitig auslöschen. Verändert nun eine auftreffende Gravitationswelle die Längen der beiden Messstrecken, so löschen sich die Teilstrahlen nicht mehr vollständig aus und am Ausgang erscheint ein Lichtsignal.

Dieses Prinzip soll in mehreren, noch im Bau bzw. Planung befindlichen Gravitationswellendetektoren zum Einsatz kommen. So konnte z.B. GEO600[1] (Hannover), ein aus zwei 600 Meter langen Rohren bestehendes Laserinterferometer im Jahre 2002 den Probebetrieb aufnehmen.

Ein weiteres noch in Planung befindliches Projekt ist LISA[2] (Laser Interferometer Space Antenna), ein Interferometer im Weltraum, das aus drei identischen, in Form eines gleichseitigen Dreiecks angeordneten Satelliten bestehen wird.

Abb. 41: Drehbar aufgehängtes Vakuumrohr im GEO600-Tunnel in der Nähe von Hannover.

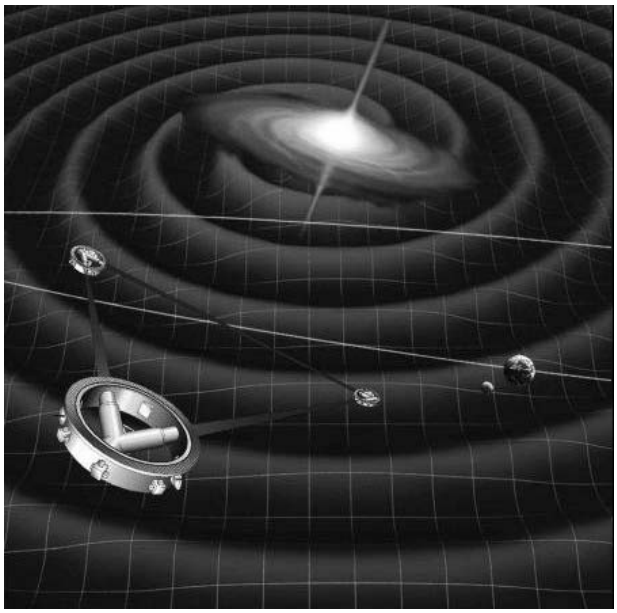

Abb. 42: Schema des Drei-Satelliten-Interferometers LISA, das ab 2009 Gravitationswellen im All vermessen soll.

[1] http://www.geo600.uni-hannover.de/
[2] http://lisa.jpl.nasa.gov/

Literatur:

Sterne und Weltraum: Sonderheft Special 6: Gravitation, Urkraft des Kosmos
Teilchenphysik und Kosmologie: Eine Einführung in Grundlagen und Zusammenhänge: Michael Treichel, Springer-Verlag 2000
Teilchenastrophysik: Klapdor-Kleingrothhaus, Zuber, Stuttgart, Teubner 1997

Bis auf welche Temperatur ist der Kosmos bis heute abgekühlt?

Die kosmische Hintergrundstrahlung wird interpretiert als der Rest der Strahlung, die beim Urknall entstanden ist. Sie verrät uns, auf welche Temperatur das Universums durch adiabatische Expansion bis heute abgekühlt ist:

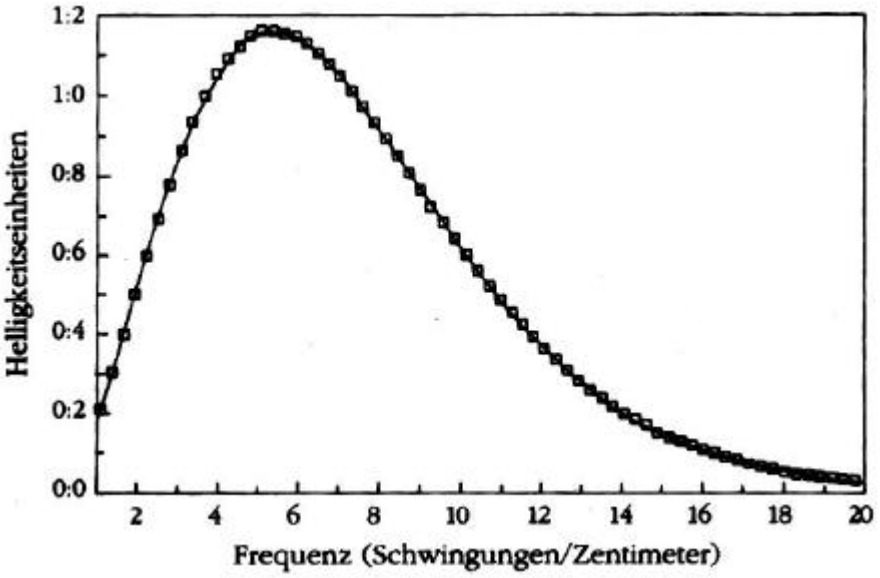

Abb.43: Intensitätsverteilung der 3K-Strahllung (Schwarzkörperkurve)

Die gemessene Strahlung im Mikrowellenbereich (von etwa 1 mm bis 21 cm Wellenlänge) entspricht der Planck‘schen Strahlungsverteilung eines schwarzen Körpers mit einer Temperatur von –270,42 Grad bzw. 2,73 Kelvin. Die kosmische Hintergrundstrahlung wird daher auch als **3K-Strahlung** bezeichnet.

Literatur:
Structure formation in the universe: T.Padmanabhan, Cambridge University Press New York 1993
Kosmologie: I. Apperzeller, Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg, 1988

Wie haben A. Penzias und R. Wilson 1965 die sogenannte „Hintergrundstrahlung“ entdeckt?

Die kosmische Hintergrundstrahlung[1] wurde 1965 durch Zufall von den zwei Amerikanern ARNO PENZIAS (*1933) und ROBERT WILSON (*1936) entdeckt. Die beiden Radiotechniker hatten versucht, die mit einem Radioteleskop empfangenen Wellen vom stets empfangenen Hintergrundrauschen zu befreien, das sie zunächst als Störgeräusch der Apparatur interpretierten. Trotz der peniblen Suche nach möglichen Fehlerquellen der Antenne konnte das aus allen Richtungen empfangene Rauschen nicht unterdrückt werde. Penzias und Wilson kamen daher zu dem Schluss, dass eine mysteriöse Strahlung aus dem Weltall die Störung verursacht.

Eine Gruppe von Kosmologen um ROBERT DICKE (1916-1997) konnte schließlich zeigen, dass die von Penzias und Wilson entdeckte Mikrowellenstrahlung mit der vom russisch-amerikanischen Physiker GEORGE GAMOW (1904-1968) [Gam48] bereits 1948 vorhergesagten **„kosmische Hintergrundstrahlung“** identisch ist.

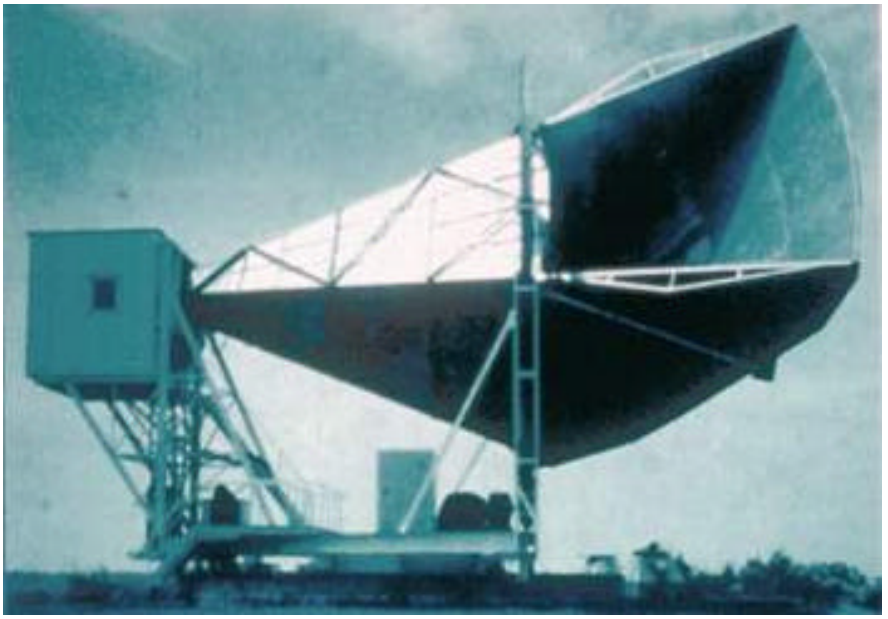

Abb.44: Hornantenne, mit der A. Penzias und R. Wilson 1965 die kosmische Hintergrundstrahlung nachweisen konnten.

Arno Penzias und Robert Wilson erhielten 1987 den Nobelpreis für Physik[2].

Literatur:

[1] Basiswissen 4, Seite 92

[Gam48] G. Gamow, The origin of the elements and the separation of galaxies. *Phys. Rev.* **74** 505 (1948)

[2] Übersetzte Begründung des Nobelpreiskomitees

Was sagt die Theorie der „kosmischen Inflation“ aus?

Im Jahre 1981 veröffentlichte der amerikanische Teilchenphysiker ALAN GUTH die Theorie eines „inflationären Universums“. Diese Theorie geht von der Annahme aus, dass sich das Universum in der Zeit zwischen 10^{-35} und 10^{-32} Sekunden nach dem Urknall sehr schnell („inflationär“) um viele Zehnerpotenzen aufgebläht hat – der Durchmesser des Universums vergrößerte sich während dieser Periode von 10^{-28} auf 10 Zentimeter. Danach expandierte das Universum mit einer viel langsameren Geschwindigkeit weiter.

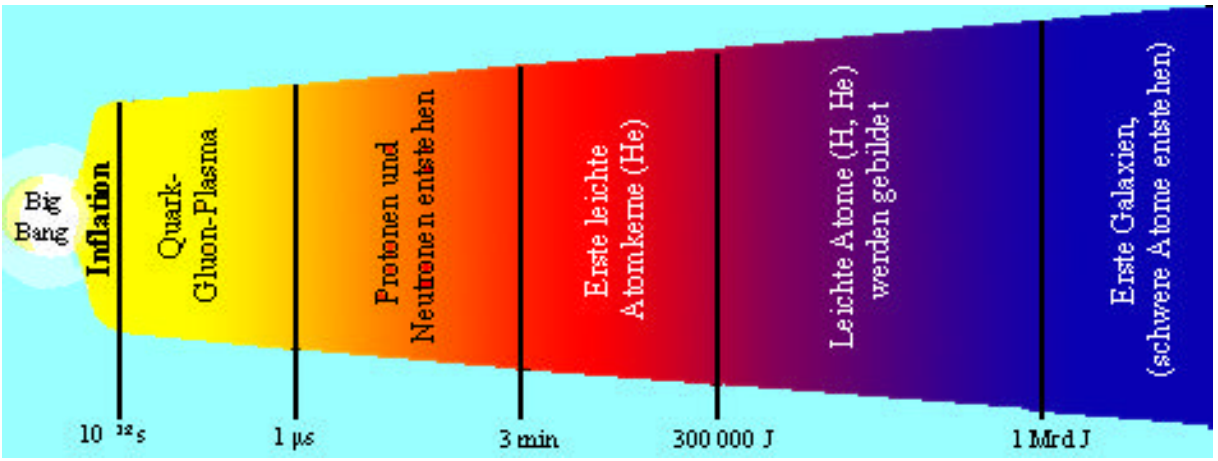

Abb.45: Schema der Ausdehnung des Universums nach dem Urknall

Die Inflation löst einige Probleme der Urknalltheorie: Sie kann erklären, warum das Universum so groß und homogen ist, und warum es darin heute wenigstens vier verschiedene Kräfte gibt. Sie liefert außerdem eine Erklärung für die Erzeugung der großen Mengen Materie, die das heutige Universum enthält, ohne den Energieerhaltungssatz zu verletzen.

Literatur:

Cosmological Inflation and Large-Scale Structure: A.R.Liddle and D.H.Lyth, Cambridge University Press New York 2000

Die Schatten der Schöpfung. Dunkle Materie und die Struktur des Universums (Original: The Shadows of Creation. Dark Matter and the Structure of the Universe): M. Riordan, D.N. Schramm, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin New York 1992

Die Geburt des Kosmos aus dem Nichts. Die Theorie des inflationären Universums: Alan Guth, Droemer Knaur, München 1999

Was sind rote Riesen?

Rote Riesen sind Sterne mit geringerer Oberflächentemperatur als unsere Sonne, aber einem vielfach größeren Durchmesser. Sie entstehen, wenn der Wasserstoff in den Zentralkernen der Sterne aufgebraucht ist. Während sich der Kern, der fast ausschließlich aus Helium besteht, immer mehr zusammenzieht und aufheizt, dehnen sich die äußeren Schichten immer weiter aus. Der Stern wird an der Oberfläche kühler, seine Leuchtkraft nimmt aber zu. Beispiele hierfür sind unter anderem: Arktur, Aldebaran, Antares, Beteigeuze und Mira. Auch unsere Sonne wird sich etwa fünf Milliarden Jahren zu einem roten Riesen aufblähen und dabei die inneren Planeten Merkur und Venus verschlucken.

Das Entwicklungsstadium eines Sterns als Roter Riese ist jedoch nicht von allzu langer Dauer. Hat der Stern den Großteil des Heliums zu Kohlenstoff verbrannt, setzt eine neue Entwicklung ein, die entscheidend von der Masse des Sterns abhängt: Rote Riesen bis maximal 1,4facher Sonnenmasse stoßen ihre äußeren Schichten als Planetarische Nebel ab - zurück bleibt ein stark komprimierter und daher sehr heißer, aus Kohlenstoff und Sauerstoff bestehender weißer Zwerg. Rote Riesen mit noch größeren Massen enden als Neutronensterne oder schwarze Löcher.

Was sind weiße Zwerge?

Weiße Zwerge sind sehr heiße, dabei aber sehr schwach leuchtende Sterne. Ihre Größe entspricht in etwa der unserer Erde, manche sind sogar kleiner. Der weiße Zwerg kann ein stabiles Endstadium in der Geschichte eines Sterns sein: Wenn ein Stern seinen Kernbrennstoff verbraucht hat, stürzt er auf Grund der Gravitation zu einem sehr dichten Objekt zusammen – ein Kubikzentimeter Materie eines weißen Zwerges kann mehrere Tonnen wiegen. Der Kollaps lässt diesen Sterntyp für eine Weile sehr heiß werden, doch mit der Zeit kühlen die weißen Zwerge wieder ab und beenden dann ihr Dasein als kalte feste Körper.

Es sind bislang ungefähr 1000 weiße Zwerge entdeckt worden. Der bekannteste ist Sirius B, der Begleiter von Sirius, dem hellsten Stern am Himmel. Sirius B hat ungefähr die gleiche Masse wie unsere Sonne, jedoch nur etwa doppelten Erddurchmesser. Seine Leuchtkraft ist etwa 10 000 mal geringer als die von Sirius.

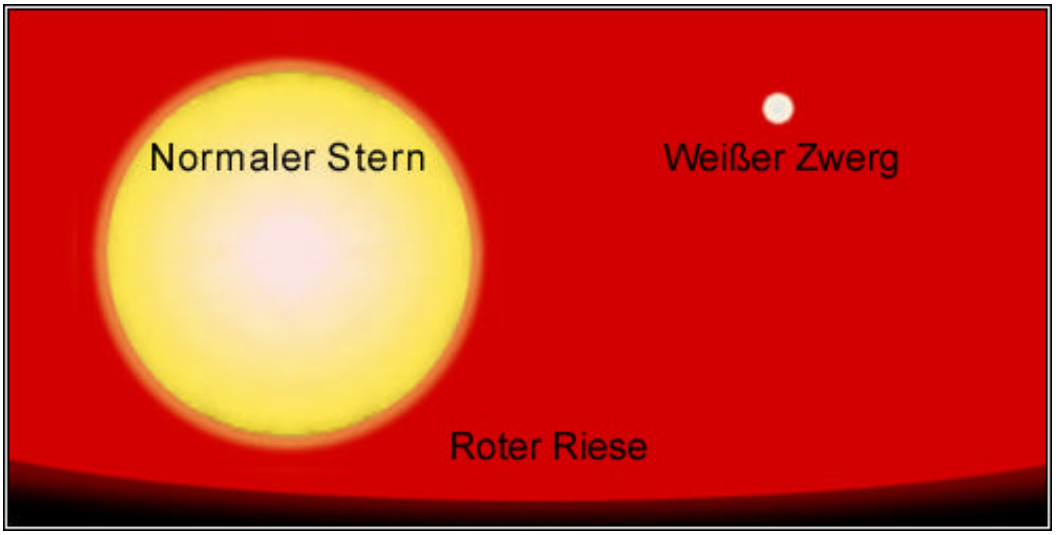

Abb. 46: Größenvergleich der drei Entwicklungsstufen eines Sterns mit einfacher Sonnenmasse

Was sind schwarze Löcher?

Ein schwarzes Loch kann entstehen, wenn ein Stern mit mehr als dreißigfacher Sonnenmasse als Supernova explodiert und seine Überreste schließlich unter ihrer eigenen Schwerkraft zusammenstürzen. Die Materie verdichtet sich dadurch immer mehr und mehr, weit über das Stadium eines Neutronensterns hinaus. Ist der zusammengestürzte Stern dicht genug, dann wird die Gravitation an seiner Oberfläche so stark, dass von dort nicht einmal mehr Licht oder Strahlung in die Außenwelt entweichen kann. Der Körper wird unsichtbar – ein schwarzes Loch ist entstanden.

Die Größe eines schwarzen Lochs hängt davon ab, wie viel Materie sich in seinem Inneren befindet. Sobald der zusammenstürzende Stern ein schwarzes Loch bildet, kann die Materie des Sterns immer größere Dichten erreichen, während die Größe des schwarzen Lochs konstant bleibt. Auch wenn schwarze Löcher nicht direkt beobachtet werden können, besteht heute eigentlich kein berechtigter Zweifel mehr an der Existenz dieser exotischen Objekte.

Literatur:
Der Neue Kosmos:A. Unsöld, B. Baschek, *Der Neue Kosmos*, Springer-Verlag 1999
Stellar Structure and Evolution: R. Kippenhahn, A. Weigert, Springer-Verlag 1991
Stellar Interiors: C. J. Hansen, S.D. Kawaler, Springer-Verlag 1994

Wie sucht man nach WIMPs?

WIMPs sind Teilchenkandidaten für die „dunkle Materie“ im Universum. Sie sollten kurz nach dem Urknall vor rund 15 Milliarden Jahren entstanden sein, die 10- bis 1000fache Masse eines Protons besitzen und nur außerordentlich schwach mit normaler Materie wechselwirken. Bislang reicht die Energie der Beschleunigungsanlagen nicht aus, um WIMPs künstlich zu erzeugen. Man versucht daher kosmische WIMPs mit speziellen Detektoren einzufangen.

Eines dieser Experimente, CRESST[1] (**C**ryogenic **R**are **E**vent **S**earch with **S**uperconducting **T**hermometers), ist derzeit im Gran Sasso-Untergrundlaboratorium in Italien aufgebaut. Die WIMPs sollen in diesem Detektor durch Messungen der Rückstoßenergien, die sie bei einer elastischen Streuung auf die Nukleonen des Detektormaterials übertragen, nachgewiesen werden.

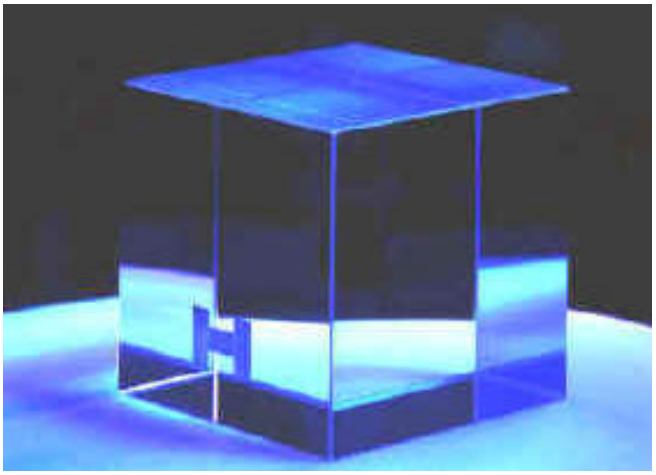

Abb. 47: CRESST-Saphir-Tieftemperatur-Kalorimeter

Der CRESST-Detektor besteht derzeit aus vier, je 262 Gramm schweren Kalorimetern aus Saphir, die mit Hilfe von Kryostaten auf eine Temperatur von etwa 0,02 Kelvin abgekühlt werden. Diese äußerst niedrige Betriebstemperatur ist notwendig, um die geringen Temperaturerhöhungen, die durch den Energieübertrag auf das Detektormaterial entstehen,

[1] http://wwwvms.mppmu.mpg.de/cresst/

Literatur:
Die Suche nach dem Wimps: GEO Magazin Nr. 05/Mai 1998
Dossier Kosmologie: Spektrum der Wissenschaft, Februar 2000
Teilchenastrophysik: Klapdor-Kleingrothhaus, Zuber, Teubner-Verlag Stuttgart 1997

Mit welchen Experimenten wird nach SUSY-Teilchen gesucht?

In den **su**per**sy**mmetrischen Theorien (**SUSY**) treten Fermionen und Bosonen immer paarweise auf. Eine dieser Theorien, die minimale supersymmetrische Erweiterung des Standardmodells **MSSM** (**M**inimal **S**upersymmetric **S**tandard **M**odel), sagt für jedes Teilchen im Standardmodell genau einen supersymmetrischen Partner (Susy-Teilchen) voraus, der bis auf Spin und Masse dieselben Quantenzahlen wie das Teilchen besitzt.

- **Direkter Nachweis von Susy-Teilchen**

In vielen Experimenten, vor allem am LEP am CERN[1] in der Schweiz und am TEVATRON am FERMILAB[2] in den USA, hat man versucht Susy-Teilchen nachzuweisen, bisher jedoch ohne Erfolg. Es konnten allerdings untere Massengrenzen bestimmt werden, z. B. $m > 23$ GeV/c² für das leichteste erwartete Susy-Teilchen. Die momentan im Bau befindlichen Beschleunigeranlagen LHC[3] am CERN und der Elektron-Positron-Linearbeschleuniger TESLA[4] am DESY in Deutschland werden genügend Energie zur Verfügung stellen können, um solch massive Teilchen zu erzeugen. Eine der vorrangigen Aufgaben dieser großen Beschleuniger wird daher die Suche nach neuen supersymmetrischen Teilchen sein.

- **Indirekter Nachweis von Susy-Teilchen**

Einen möglichen indirekten Beweis für die Existenz von Susy-Teilchen liefert derzeit das magnetische Moment des Myons: Genaueste Messungen haben gezeigt, dass das magnetische Moment des Myons in der achten Nachkommerstelle nicht mit dem berechneten Wert übereinstimmt. Die Existenz von weiteren heute noch nicht bekannten Teilchen (z. B. Susy-Teilchen) liefert eine mögliche Erklärung für die Diskrepanz zwischen den theoretisch und experimentell bestimmten Werten.

[1] http://public.web.cern.ch/Public/
[2] http://www.fnal.gov/
[3] http://lhc-new-homepage.web.cern.ch/lhc-new-homepage/
[4] http://tesla.desy.de/

Literatur:
Teilchenphysik und Kosmologie: Eine Einführung in Grundlagen und Zusammenhänge: Michael Treichel, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2000
Supersymmetry and Supergravity: J. Wess, J. Bagger, Princeton University Press, Princton 1992

Mit welchen Experimenten sucht man nach eingerollten Dimensionen?

Die verschiedenen Stringtheorien fordern neben den beobachteten drei Raumdimensionen und der Zeit, die Existenz von mindestens sechs weiteren Dimensionen. Diese zusätzlichen Dimensionen sind laut Berechnungen zu einem internen Raum von der Größenordnung der Planckschen Länge* (10^{-35} m) „eingerollt“, sodass sie nicht direkt nachgewiesen werden

Die beiden amerikanischen Physiker JONATHAN L. FENG und ALFRED D. SHAPERE vom MIT (Massachusetts Institute of Technology) haben jedoch berechnet, dass als Folge dieser zusätzlichen Dimensionen winzige Schwarze Löcher in der Erdatmosphäre entstehen und unter Aussendung von Teilchenschauern wieder zerfallen könnten [Fen02].
Diese winzigen Schwarzen Löcher sollten ab dem Jahr 2004 mit Hilfe des Pierre Auger-Observatoriums[1], das derzeit in der argentinischen Pampa aufgebaut wird, beobachtbar sein. Das Pierre Auger-Observatorium wird sich über eine Fläche von 6000 Quadratkilometern erstrecken, auf der 1600 Detektoren für Höhenstrahlung verteilt sein werden.

Abb. 48: Eine der 1600 Detektorstationen, die derzeit in der argentinischen Pampa aufgebaut werden.

Man erwartet, dass ab dem Jahr 2004 jährlich hunderte Schwarze Löcher anhand ihrer Zerfallsprodukte nachgewiesen werden können – immer vorausgesetzt, dass tatsächlich zusätzliche Dimensionen existieren.

Literatur:

[Fen02] J.L. Feng, A.D. Shapere, Phys. Rev. Lett. **88** 021303 (2002)
Die Physik und das Jenseits: Spurensuche zwischen Philosophie und Naturwissenschaft: G. Ewald, Pattloch Verlag Augsburg 1998
The Elegant Universe: B. Greene, Vintage Books Vancouver 1999
Lectures on String Theory: D. Lüst, S. Theisen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1989
[1] http://www.auger.org/

---

* Die Planck‘sche Länge ist die kleinste sinnvoll beschreibbare Länge. Unterhalb von 10^{-35} Metern können auf Grund der Heisenbergschen Unschärferelation keine Raumstrukturen mehr festgelegt werden.