
Lexikon

der



Astrophysik

von



Andreas Müller

aus dem

Wissensportal für Astrophysik

<http://www.mpe.mpg.de/~amueller>

April 2007

Abbildungsverzeichnis

27.1 Zeitdilatation in der Speziellen Relativitätstheorie.	4
27.2 kosmologische Zeitdilatation in Supernova-Lichtkurven.	6
27.3 Mathematische Form von Zustandsgleichungen und ideales Gas.	8
27.4 Superstern im Pistolennebel.	11
27.5 Stadien im Zyklischen Universum.	15

27 Lexikon Z

27.1 ZAMO

ZAMO steht für *Zero Angular Momentum Observer* und bezeichnet einen ausgezeichneten Beobachter, der besonders geeignet ist, um die Vorgänge in rotierenden Raumzeiten im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) zu beschreiben. Der ZAMO ist lokal mitbewegter Beobachter und besitzt daher relativ zu seiner lokalen Umgebung keinen Drehimpuls (engl. *zero angular momentum*). Dieser Beobachter wurde von *James Bardeen* (1970) eingeführt. Daher wird der ZAMO bisweilen auch *Bardeen-Beobachter* genannt. Er selbst nannte das System *local non-rotating frame* (LNRF), also lokales, nicht-rotierendes System.

27.1.1 anschauliche Bedeutung des ZAMOs

Der ZAMO eignet sich besonders, wenn man die direkte Umgebung beispielsweise von rotierenden Neutronensternen relativistisch studieren möchte. Insbesondere eignet sich das LNRF bei rotierenden Schwarzen Löchern, die mit der Kerr-Metrik oder allgemeiner Kerr-Newman-Lösung beschrieben werden.

Bardeen führte den ZAMO durch folgendes **Gedankenexperiment** ein: Auf einem Kreis mit konstantem Radius und konstantem Poloidalwinkel, den man sich um die rotierende Gravitationsquelle vorstelle (Symmetrieachse des Systems senkrecht auf Kreisfläche), seien ein Beobachter und viele Spiegel lokalisiert. Die Spiegel habe die Funktion einen Lichtstrahl, den der Beobachter aussendet entlang der Kreislinie zu reflektieren, so dass er nach einiger Zeit wieder beim Beobachter ankomme. Nun kann der Beobachter den Strahl nach links oder nach rechts aussenden. Die Frage ist nun: Für welche Geschwindigkeit des Beobachters kommen linker und rechter Strahl *gleichzeitig* wieder bei ihm an? Antwort: Sie kommen genau dann gleichzeitig an, wenn die lokale Geschwindigkeit des Beobachters relativ zu seiner direkten Umgebung verschwindet, wenn der Beobachter also *mit* der rotierenden Raumzeit rotiert, also wenn er ein ZAMO ist. Alle anderen Beobachter werden unterschiedliche Ankunftszeiten messen.

Der ZAMO hat also eine lokal verschwindende Geschwindigkeit. Seine Weltlinie ist senkrecht auf den raumartigen Hyperflächen mit $t = \text{konstant}$. Aus diesem Grund verschwindet sein Drehimpuls. Man kann das nachrechnen, indem man das Geschwindigkeitsfeld auf das Killing-Vektorfeld projiziert. Dieses System bietet sich für Studium von rotierendem Plasma in axialsymmetrischen und stationären Raumzeiten wie der Kerr-Metrik an. In Boyer-Lindquist-Koordinaten rotiert der ZAMO mit der Winkelfrequenz, die man **Frame-Dragging-Frequenz** nennt (symbolisiert durch ω). Diese Frame-Dragging-Frequenz ist gerade ein Maß dafür, wie schnell die Raumzeit rotiert. Ein Beobachter im Unendlichen (dort wo die Raumzeit asymptotisch flach ist und nicht mehr rotiert) misst die Frame-Dragging-Frequenz als diejenige Winkelgeschwindigkeit, die der ZAMO hat. D.h. lokal rotiert der ZAMO nicht, aus dem Unendlichen betrachtet schon! Jedes Objekt, vorausgesetzt es hat

verschwindenden Bahndrehimpuls, z. B. bestimmte Teilchen oder manche Photonen, rotiert aus dem Unendlichen betrachtet mit dieser Frame-Dragging-Frequenz um die stationäre Gravitationsquelle. Den Radius des Kreises aus dem Gedankenexperiment identifiziert man gerade mit dem **Zylinderradius** (in Boyer-Lindquist-Koordinaten symbolisiert durch ω mit Schlange darüber). Bardeen nannte diese Größe *proper circumferential radius*, also soviel wie 'Umfangseigenradius' (der zum Umfang des Kreises gehört).

Damit ist der ZAMO in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) eine Verallgemeinerung der **Minkowski-Beobachter** der Speziellen Relativitätstheorie (SRT). Auf diese Weise konstruiert man in der ART ein lokales Lorentzsystem aus vier Einheitsvektoren, die so genannte **Tetrade**.

Der ZAMO ist gewissermaßen das Pendant zur **geostationären Bahn** von Satelliten: sie stehen über einem festen Punkt der Erdoberfläche, weil sie sich exakt mit der Erde drehen. In sphärischen Koordinaten sind also Radius (r) und Polarwinkel (θ) konstant; nur der Azimutalwinkel (Φ) variiert.

27.2 Zeit

Zeit gehört zu den großen Rätseln der Natur. Es ist ein elementarer Begriff, der sicher nicht leicht zu erklären ist. Eine adäquate Behandlung des Themas 'Zeit' vermag viele Bücher zu füllen. Dieser Lexikoneintrag wird daher nicht einem vollem Verständnis des Zeitbegriffs gerecht werden, aber ein paar Aspekte der **Zeit in der Physik** anreißen.

27.2.1 Zeit in der Physik

In der historischen Retrospektive aus der Sicht des Physikers lässt sich der Zeitbegriff in drei Kategorien fassen, die wir im Folgenden betrachten wollen:

- ◇ **absolute Zeit**,
- ◇ **relative Zeit**,
- ◇ **quantisierte Zeit**.

27.2.2 absolute Zeit

Mit jeder großen physikalischen Theorie erfuhr der Zeitbegriff einen fulminanten und radikalen Bedeutungswandel. Die Ausgangssituation blieb über Jahrtausende bestehen: Zeit wurde als etwas Unveränderliches, Unbeeinflussbares, Stetiges wahrgenommen. **Zeit sei absolut**. *Aristoteles* (384 - 322 v.Chr.) prägte bereits die metaphorische Bezeichnung des **Zeitflusses**.

Auch die Physik *Isaac Newtons* (1643 - 1727) ist noch dominiert von einer absoluten Zeit. Zeit wird als zusätzlicher, aber unbeeinflussbarer Freiheitsgrad neben den räumlichen als **Dimension** akzeptiert. Bewegungsgleichungen diktieren die Dynamik von Körpern. Sie entwickeln sich in der Zeit, die einen äußeren, fixen Bezugsrahmen in der Entwicklung und Veränderung vorgibt. Die **Newtonsche Gravitationstheorie**, die die Bewegung der Planeten, von Gasen und Flüssigkeiten zu beschreiben vermag, war ein denkwürdiger Schritt in der Geschichte der Physik. Zudem stellte Newton und unabhängig von Leibniz den richtigen mathematischen Apparat zur Verfügung, um die Bewegungen zu beschreiben: die *Infinitesimalrechnung*, also Differential- und Integralrechnung.

Die Newtonsche Physik genügt der **Galilei-Invarianz**. Die Newtonschen Gleichungen stimmen deshalb in ihrer Form überein, wenn man sie in gegeneinander gleichförmig geradlinig bewegten Systemen betrachtet. Die Zeit ist dabei *in beiden Systemen dieselbe*. Hierin spiegelt sich ihr absoluter Charakter.

27.2.3 relative Zeit

Im 19. Jahrhundert wurde die Gesetze der Elektrodynamik, des Elektromagnetismus von *James Clerk Maxwell* (1831 - 1879) gefunden. Elektrische und magnetische Phänomene wurden als wesensgleich erkannt. Nun fiel einem damals 16jährigen Jungen auf, dass sich die Gesetze Newtons und die Gesetze Maxwells nicht vertragen. Es kostete ihn noch ein paar weitere Jahre seines Lebens, dieses Missverhältnis aufzudecken. Im Jahr 1905 veröffentlichte er mit 26 Jahren die Spezielle Relativitätstheorie. Er hieß *Albert Einstein* (1879 - 1955). Das Missverhältnis bestand darin, dass die klassische Elektrodynamik Maxwells lorentzinvariant ist, eine wesensverschiedene Invarianz von der Galilei-Invarianz. In verschiedenen Bezugssystemen, die über eine Galilei-Transformation miteinander in Beziehung stehen, resultieren *unterschiedliche* Formen der Maxwell-Gleichungen. Dies leitete Einstein zu der Überzeugung, nicht die Zeit, sondern die **Vakuumllichtgeschwindigkeit als absolut** anzusehen. Ihre Konstanz wurde auch von dem legendären Michelson-Morley-Experiment (1881/87) nahe gelegt. In diesem Experiment versuchen die Physiker vergeblich einen *Weltäther* nachzuweisen, auf dem die Lichtwelle 'schwimmen' solle. Die Konsequenzen des Postulats konstanter Lichtgeschwindigkeit sind dramatisch: Die **Zeit erhält einen relativen Charakter** und kann infolge der Zeitdilatation in unterschiedlichen Bezugssystemen verschieden sein. Ebenso wird die **Länge relativ** und unterliegt der Lorentz-Kontraktion. Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie (publiziert 1916) stellt eine völlig neue Gravitationstheorie dar, die die Newtonsche Theorie ablöste. Mit der neuen Theorie, tauchten auch völlig neue Effekte auf: Zeitdilatation und Lorentz-Kontraktion, die aus der Beschreibung der Welt als **Raumzeit** resultieren. Das dynamische Raum-Zeit-Kontinuum ersetzte den Begriff des Gravitationsfeldes. Die relative Zeit ist also ein **relativistischer Effekt**. Ein Beobachter wird ihren relativen Charakter erst entdecken, wenn die betrachteten Relativgeschwindigkeiten vergleichbar mit der Lichtgeschwindigkeit werden bzw. wenn der Zeitverlauf nahe hoher, kompakter Massen betrachtet wird. Ansonsten sind die relativistischen Effekte zwar vorhanden, aber geradezu unmessbar klein. Die Relativitätstheorie darf aus wissenschaftstheoretischer Sicht als *bewährte Theorie* bezeichnet werden, weil sie sich in zahlreichen Experimenten als erfolgreiche Beschreibung erwiesen hat.

27.2.4 quantisierte Zeit

Fast zeitgleich wurde mit der Relativitätstheorie eine andere Säule der Physik errichtet: die Quantentheorie. Diese Theorie revolutionierte viele wohl etablierte Begriffe der Physik: Determinismus, Messprozess, Teilchen, Welle und Energie erhielten eine neue Definition und Interpretation. Viele physikalische Eigenschaften erwiesen sich als diskontinuierlich, diskret. Sie bestehen aus Quanten. In der speziell relativistischen Erweiterung der Quantenmechanik *Paul Diracs* findet man eine neue Teilcheneigenschaft, die den Bau und die Erscheinung der Materie dominiert: Spin. Ganzzahliger oder halbzahliger Spin teilt den Teilchenzoo in die zwei großen Gruppen Bosonen und Fermionen. Sie haben grundsätzlich unterschiedliches Verhalten in der Quantenstatistik, was sich im Spin-Statistik-Theorem niederschlägt. Die Bedeutung der



The image shows the text 'Zeitdilatation' in a black sans-serif font at the top. Below it, the equation $\Delta t = \gamma \Delta \tau$ is displayed in a white serif font. The background is a horizontal rainbow gradient from purple on the left to yellow on the right.

Abbildung 27.1: Zeitdilatation in der Speziellen Relativitätstheorie.

Quantentheorie für den Zeitbegriff ist marginaler Natur. An sich impliziert die Quantentheorie selbst keine neuen Zeitbegriffe.

Erst eine Vereinigung der Konzepte der Allgemeinen Relativitätstheorie mit denjenigen der Quantenmechanik führt auf eine neue Natur der Zeit: die **quantisierte Zeit**. Die Theorie, die sich an der 'Verschmelzung beider Säulen der Physik' versucht, heißt Loop-Quantengravitation. In der bildhaften Sprache kann sie als 'Dach der Physik' angesehen werden. Sie nimmt Gesetze der Quantenwelt - wie die *Heisenbergsche Unschärfe* und das Pauli-Prinzip - ebenso ernst, wie die Gesetze der relativistischen Welt - wie Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und Diffeomorphismusinvarianz. Dann *resultiert zwingend*, dass die Zeit in diskrete Portionen auf der Planck-Skala eingeteilt ist. Es gebe **Zeitquanten** einer Länge von 10^{-43} Sekunden. Die Verwendung des Konjunktivs im letzten Satz wurde mit Bedacht gewählt, denn die **Loop-Quantengravitation ist keine bewährte Theorie**. Die Gesetzmäßigkeiten der Wissenschaftstheorie erfordern nun sorgfältige *Hypothesentests*, die die neuen Loop-Konzepte auf eine Bewährungsprobe stellen. Sie kann sich nur bewähren, indem sie *nicht falsifiziert* werden kann. Gelingt dies, darf man von einer quantisierten Zeit sprechen - bislang ist das nur eine elegante Spekulation.

27.2.5 Web-Essay

- ◇ Was ist Zeit?

27.3 Zeitdilatation

Zeitdilatation bezeichnet einen Effekt in Einsteins Relativitätstheorie, bei dem das Zeitmaß gedehnt wird.

27.3.1 Zeitdilatation in der SRT

Dieser Effekt beschreibt in der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) das Phänomen, dass die Zeit in schnell bewegten Systemen langsamer verstreicht als in langsamer bewegten. Anders gesagt: **Bewegte Uhren gehen langsamer**. Ein Zeitintervall wird für bewegte Beobachter gedehnt (*dilatiert*). Dieser Sachverhalt lässt sich rechnerisch mithilfe der Speziellen Lorentz-Transformation nachvollziehen.

Zeitdilatation hängt vom **Lorentz-Faktor** (üblicherweise mit dem griechischen γ , γ oder Γ , abgekürzt) ab und wird für Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit c besonders groß und für c selbst sogar unendlich!

Mathematisch ist der Lorentz-Faktor das Verhältnis von Koordinatenzeit t zu Eigenzeit τ . Die Gleichung in Abbildung 27.1 beschreibt gerade, dass eine Zeitspanne im Ruhesystem der Bewegung, dem **Eigenzeitintervall**, um den Lorentz-Faktorgedehnt wird (rechte Seite)

und dieses Zeitintervall somit ein äußerer Beobachter als ein längeres misst (linke Seite). Man sagt: der Ablauf der Zeit ist im bewegten System langsamer, Zeitintervalle werden gedehnt.

27.3.2 Achtung, Bewegung ist relativ!

Dabei ist es wichtig darauf hinzuweisen, dass die Bewegung eines Systems *relativ* ist. Betrachten wir als ein einfaches Beispiel einen Zug, der immer geradeaus mit konstanter Geschwindigkeit fährt. Physiker sprechen in diesem Fall von einer *gleichförmig geradlinigen Bewegung*. Unter diesen Voraussetzungen ist der Zug ein Inertialsystem in der SRT. Ein Beobachter, der am Gleis stehen möge und den Zug an sich vorbeifahren sieht, bewegt sich gegenüber dem Zug mit der Relativgeschwindigkeit. Es ist nun nicht entscheidbar, ob sich der Zug bewegt (Sicht des Beobachters am Gleis) oder ob sich der Beobachter am Gleis bewegt (Sicht der Zugreisenden). Folglich betrachtet der Beobachter am Gleis Uhren im Zug als dilatiert, und Zugreisende betrachten die Uhr am Gleis als dilatiert! Das ist kein Paradoxon, sondern das **Wesen der Relativitätstheorie**. Im Alltag bemerken wir diesen Effekt nicht, weil er viel zu klein ist. Erst wenn die Relativgeschwindigkeiten vergleichbar sind mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit, wird der Zeitdilatationseffekt der SRT groß.

27.3.3 Längenkontraktion in der SRT

Ein weiterer relativistischer Effekt, der sich allerdings auf die **Länge** auswirkt, ist die **Längenkontraktion** oder Lorentz-Kontraktion. Hier misst der äußere Beobachter oder Laborbeobachter kürzere Längen bewegter Objekte. Anders gesagt: **Bewegte Uhren werden gestaucht**.

27.3.4 Zeitdilatation in der ART

In der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) gibt es die Zeitdilatation auch. Es wird nur etwas komplizierter in der Beschreibung, weil die Raumzeit nicht mehr flach (Minkowski-Metrik), sondern gekrümmt ist. An diesen Dellen in der Raumzeit wird der Zeitablauf verlangsamt. Die Physiker nennen das die **gravitative Zeitdilatation**. Diese hängt mit der Gravitationsrotverschiebung zusammen: es handelt sich lediglich um zwei verschiedene Betrachtungsweisen eines identischen Effekts (Zeit versus Frequenz). Uhren gehen also nahe einer die Raumzeit krümmenden Masse **für einen Außenbeobachter** langsamer als weiter entfernt.

Mathematisch formulieren das die Relativisten mit der Lapse-Funktion, die gerade das Verhältnis von Eigenzeit und Koordinatenzeit ist. Bei der Behandlung rotierender Schwarzer Löcher in Boyer-Lindquist-Koordinaten heißt die Lapse-Funktion α . Direkt am Ereignishorizont des Loches bleibt für einen außenstehenden Beobachter die Koordinatenzeit sogar stehen! Dies liegt daran, dass die Lapse-Funktion dort verschwindet. Dieser Effekt ist recht bekannt bei Schwarzen Löchern und heißt auch *freezing effect*, weil durch das Stehenbleiben der Zeit (nur für einen außenstehenden Beobachter!) jede Bewegung 'eingefroren' wird. Anders gesagt: die Rotverschiebung z wird unendlich! Oder: Der Rotverschiebungsfaktor g verschwindet. Ein Beobachter, der hingegen mit einer Uhr in ein Schwarzes Loch hinein fällt, wird sie in seinem System weiterticken sehen. Ein einfallender Beobachter (FFO) wird in **endlicher Zeit** die intrinsische Singularität treffen - falls er nicht zuvor von Gezeitenkräften zerrissen oder Opfer der unendlichen Blauverschiebung am Cauchy-Horizont wird. Innen- und Außenbeobachter erfahren deshalb voneinander abweichende

Zeitdilatation bei Supernovae Ia

B-Helligkeit

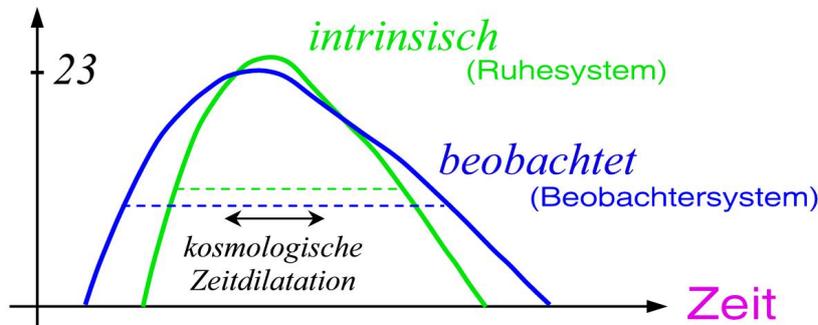


Abbildung 27.2: kosmologische Zeitdilatation in Supernova-Lichtkurven.

Wirklichkeiten. Die Relativität sorgt so nicht nur für zwei Zeitmaße, sondern auch für **zwei Realitäten!**

In der Kosmologie tritt ebenfalls der Zeitdilatationseffekt auf, und zwar weil die expandierende Raumzeit eine kosmologische Rotverschiebung bewirkt. Übersetzt man diesen Effekt auf Uhren, so ticken Uhren in der Tiefe des Weltraums langsamer. Das Ganze ist analog zur Gravitationsrotverschiebung zu behandeln, nur dass dieser Effekt der ART auf die Raumzeit des ganzen Universums zu beziehen ist, die durch die Dunkle Energie auseinander gezogen wird wie eine Gummihaut. Dieser Effekt kann als **kosmologische Zeitdilatation** bezeichnet werden.

27.3.5 Experimentell wurde die Zeitdilatation verifiziert

- ◇ Der kosmische Teilchenschauer von schnellen Myonen als Komponente der kosmischen Strahlung ist trotz ihrer kurzen Lebensdauer auf der Erde detektierbar, weil sich durch die Zeitdilatation der SRT ihre Lebensdauer um den Lorentz-Faktor dehnt.
- ◇ Messungen mit Atomuhren, die beispielsweise in Flugzeugen oder Satelliten (*Gravity Probe A*, 1976) mitgenommen wurden belegen, dass auf der Erde die Zeit im Tal (näher am Erdmittelpunkt bzw. Schwerpunkt, also der Quelle der Gravitation) um Sekundenbruchteile langsamer vergeht als auf Bergen. Es klingt bizarr ist aber relativistisch korrekt: Die Bevölkerung in den Bergen und die Besatzung in Flugzeugen altern schneller!
- ◇ Die zuletzt beschriebene kosmologische Zeitdilatation tritt bei den Lichtkurve von Supernovae Typ Ia auf. Eigentlich läuft die Physik dieser Sternexplosionen immer wieder gleich ab und folglich sollten die Lichtkurven mit der gleichen Zeitskala abklingen. Die Astronomen beobachten jedoch, dass die beobachtete Lichtkurve umso breiter ist, je weiter die Supernova entfernt ist (siehe Abbildung 27.2). Das ist gerade der kosmologische Zeitdilatationseffekt: weit entfernte Sternexplosionen benötigen aus der Sicht irdischer Astronomen mehr Zeit. Die Supernovaforscher müssen diesen

Effekt natürlich herausrechnen, um kosmologische Parameter zu bestimmen - das ist heutzutage Routine bei der Auswertung.

27.3.6 zeitlose Welt des Lichts

Besonders seltsam wird die Zeitdilatation im Falle der Photonen. Sie bewegen sich exakt mit der Lichtgeschwindigkeit, deshalb divergiert hier der Lorentz-Faktor ($v = c$). Er wird unendlich, d. h. Zeitintervalle werden im bewegten Photonensystem zu unendlichen Zeiträumen gestreckt. Anders gesagt: Die Photonen altern nicht, sie existieren in einer **zeitlosen Welt**.

27.4 Zodiakallicht

Das Zodiakallicht ist eine Leuchterscheinung, die in Verbindung mit dem **Tierkreis** (grch. *zodiakos kyklos*: Tierkreis) steht. Der Tierkreis besteht aus den zwölf Tierkreiszeichen, die man aus jedem Horoskop kennt. Es handelt sich um ausgezeichnete Sternbilder, die der irdische Beobachter sieht, wenn er mit seinem Blick nur in der Ebene umherschweift, in der die Planeten liegen. Diese Bahnebene ist die **Ekliptik**. Diese geometrische Orientierung ist auch der Grund dafür, weshalb man die Planeten nur in den Tierkreiszeichen und *nie in einem anderen* Sternbild findet.

27.4.1 Woher kommt die interplanetare Materie?

Die Planeten haben sich vor etwa 4.5 Milliarden Jahren aus einer **protoplanetaren Scheibe** entwickelt. Letztlich hat sich die Materie im Sonnensystem vor Urzeiten in einer Scheibe gesammelt, aus der sich auch die Sonne entwickelt hat. Diese stellaren Entwicklungsstadien beobachten Astronomen heute in anderen Systemen, beispielsweise den T Tauri-Sternen, besondere Vertreter von Protosternen.

Nachdem sich aus der protoplanetaren Scheibe auch die Planeten gebildet hatten, blieb ein Rest von interplanetarer Materie in der Ekliptik erhalten. Daneben wird dieses Materiereservoir durch Kometen aufgefüttert: einerseits verliert ihr Kometenkopf (*Koma*) durch *Sublimation* (Übergang von fest nach gasförmig) Materie; andererseits werden die Kometen durch Gezeitenkräfte vor allem vom riesigen Gasplaneten Jupiter zerrissen - ein Teil dieser Kometentrümmer endet als Sternschnuppe in der Erdatmosphäre.

27.4.2 Wie entsteht das Leuchten?

Im Wesentlichen besteht die interplanetare Materie aus Staub bis Korngrößen von etwa 100 Mikrometern Durchmesser, aber auch aus freien Elektronen. Dieser Staub macht sich durch Streuung elektromagnetischer Strahlung bemerkbar: Gerichtete Strahlung wird so diffuser und durch den Energieverlust im Streuakt röter (siehe auch Extinktion). Das Sonnenlicht wird von diesen ekliptikalen Streuzentren beeinflusst. Besonders in den Tropen beobachtet man deshalb kurz vor Sonnenaufgang oder kurz nach Sonnenuntergang eine **dreieckige Leuchterscheinung** in der Nähe des Horizonts: das **Zodiakallicht**.

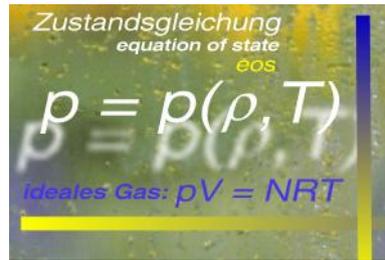


Abbildung 27.3: Mathematische Form von Zustandsgleichungen und ideales Gas.

27.4.3 Wann kann ich das Zodiakallicht beobachten?

In gemäßigten Breiten sieht man es nur unter sehr guten Bedingungen als **Abendhauptlicht** im Frühjahr und als **Morgenhauptlicht** im Herbst. Die visuelle Helligkeit des Zodiakallichts ist vergleichbar mit der des Bandes der Milchstraße.

27.5 Zustandsgleichung

Eine Zustandsgleichung (in der Fachliteratur oft abgekürzt mit *eos* für *equation of state*) ist ein **thermodynamischer Zusammenhang** zwischen thermodynamischen Zustandsgrößen, wie Temperatur T , Druck p und Dichte ρ .

27.5.1 phänomenologische Thermodynamik

In der Thermodynamik (Wärmelehre) untersuchen Physiker und Chemiker unter anderem den Zusammenhang zwischen Zustandsgrößen, indem sie sie in charakteristischen Diagrammen gegeneinander auftragen. Dies geschieht in p - V -, p - T -Diagrammen oder sogar p - V - T -Diagrammen, in denen bestimmte thermodynamische Fixpunkte (**Tripelpunkt**, **kritischer Punkt**) auszumachen oder **Phasenübergänge** abzulesen sind.

Als simple Beispiele mögen die Zustandsgleichung eines **idealen Gases** (dünnes Gas, bei dem die Konstituenten nicht miteinander wechselwirken) oder eines **Van-der-Waals-Gases** (reales Gas mit Berücksichtigung des Eigenvolumens) dienen.

27.5.2 Bezug zur Astrophysik

Ein unmittelbar einsichtiges Beispiel ist die **Stellarphysik**. Die Astronomen beschreiben das Innere eines normalen Sterns oft mit der Zustandsgleichung idealer Gase. Das ist eine Vereinfachung, aber in vielen Fällen funktioniert das sehr gut.

Bei hohen Dichten der Sternmaterie, also bei kompakten Objekten, werden Effekte der Quantentheorie relevant. Astrophysiker benutzen dann Zustandsgleichungen von **Quantengasen**, je nach Zusammensetzung beispielsweise diejenigen eines *Fermigases*, das nur aus Fermionen besteht (z. B. Neutrinogas) oder eines *Bosegases*, das nur aus Bosonen besteht (z. B. Photonengas). Im Innern kompakter Objekte wie Weißen Zwergen, Neutronensternen oder Quarksternen werden die Quanteneffekte wichtig, weil sie die Materie stabilisieren können (*Entartungsdruck* von Elektronen bzw. Neutronen; siehe dazu auch Chandrasekhar-Grenze).

27.5.3 barotrope, polytrope und extreme Zustandsgleichungen

Weiterhin werden in der Astrophysik häufig *barotrope* und *polytrope* Zustandsgleichungen verwendet. Beides sind vereinfachte Zustandsgleichungen: die barotrope Form ist dadurch gekennzeichnet, dass der **Druck nur von der Dichte abhängt**, während ein Polytrop folgende Form hat (K : Polytropenkonstante, n : Polytropenindex):

$$pV^n = K.$$

Besonders interessant, aber sehr schwierig zu bestimmen, sind Zustandsgleichungen unter extremen Bedingungen, wie beispielsweise bei Materie unter extrem hohen Dichten oder bei sehr hohen bzw. sehr tiefen Temperaturen. Ein Beispiel dafür ist das Quark-Gluonen-Plasma. Mit ultrarelativistischen Zustandsgleichungen sind solche gemeint, bei denen die Schallgeschwindigkeit im Medium gleich der Vakuumlichtgeschwindigkeit wird. Das passiert z. B. in der dünnen Materieschale von (hypothetischen) Gravasternen.

Die Bestimmung dieser extremen Zustandsgleichungen und die Phasenübergänge der extremen Materie sind Gegenstand der aktuellen Forschung.

27.5.4 Zustandsgleichungen in der Kosmologie

Zustandsgleichungen sind auch von Bedeutung für die Kosmologie, nämlich dann, wenn der Astrophysiker die **Zusammensetzung des Universums** untersuchen und beschreiben will. Die Zustandsgleichung der Dunklen Energie hat sehr seltsame Eigenschaften: ihr negativer Druck klingt 'unphysikalisch', doch er beschreibt gut den antigravitativen Charakter der Dunklen Energie. Die Kosmologen unterscheiden mittlerweile eine Vielzahl verschiedener Formen Dunkler Energie und ordnen sie mithilfe des w -Parameters. Aktuell diskutierte kosmologische Energieformen sind kosmologische Konstante, Quintessenz, topologische Defekte (beispielsweise kosmische Strings), das Cosmon, Phantom-Energie, Spintessenz und Chaplygin-Gas.

27.6 Zustandsgröße

Ursprünglich ein Begriff der Thermodynamik. In der Astronomie sollte man präziser von *stellaren Zustandsgrößen* sprechen. Es handelt sich dabei um Kenngrößen, die einen Stern charakterisieren und ihn - analog zu den Quantenzahlen in der Klassifikation von Teilchen - einer bestimmten Gruppe zuordnen.

27.6.1 Unter welchen Namen werden Sterne eingruppiert?

Die Sterne werden so beispielsweise in Gruppen eingeteilt, die folgende Namen tragen: AGB-Sterne, Bosonensterne, B-Sterne, Braune Zwerge, Cepheiden, Gravastern, Hauptreihensterne, Herbig-Haro-Objekte, Holosterne, kataklysmische Veränderliche, kompakte Objekte, Leuchtkräftige Blaue Veränderliche, Magnetare, Mikroquasare, Neutronensterne, O-Sterne, Protosterne, Pulsare, Quarksterne, Röntgendoppelsterne, Rote Riesen, Rote Zwerge, RR Lyrae-Sterne, Seltsame Sterne, stellare Schwarze Löcher, Symbiotische Sterne, T Tauri-Sterne, Überriesen, Vakuumsterne, Veränderliche, Weiße Zwerge, Wolf-Rayet-Sterne, Zwerge.

27.6.2 Die wichtigsten stellaren Zustandsgrößen sind:

- ◇ Masse,
- ◇ Leuchtkraft,
- ◇ Spektraltyp,
- ◇ Radius,
- ◇ Effektivtemperatur,
- ◇ Zentraltemperatur,
- ◇ Rotation,
- ◇ mittleres Magnetfeld,
- ◇ mittlere Dichte,
- ◇ Zentraldichte,
- ◇ chemische Zusammensetzung,
- ◇ Helligkeit,
- ◇ Farbe,
- ◇ Alter (Alter null beispielsweise bei Erreichen der Hauptreihe, ZAMS),
- ◇ Variabilität,
- ◇ Maximalgeschwindigkeiten von Sternwinden,
- ◇ Besonderheiten,
- ◇ etc.

Natürlich hängen diese Zustandsgrößen miteinander physikalisch zusammen. Einen engen Zusammenhang gibt es zwischen Effektivtemperatur, Spektraltyp und Farbe. Diese Zustandsgrößen sind mehr oder weniger äquivalent und daher austauschbar. Das erklärt die unterschiedlichen Möglichkeiten, das **Hertzsprung-Russell-Diagramm** der Sterne zu zeichnen.

Leuchtkraft, Effektivtemperatur und Radius haben eine Abhängigkeit voneinander (siehe Gleichung unter Eintrag Effektivtemperatur) und führen auf eine Einteilung in **Yerkes-Leuchtkraftklassen**.



Abbildung 27.4: Superstern im Pistolennebel.

27.6.3 eine tolle Sache: Relationen zwischen Zustandsgrößen

Von besonderer Relevanz in der Stellarphysik sind **Masse-Radius-Relationen**, die man in Sternmodellen unter der Annahme spezieller Zustandsgleichungen für die Sternmaterie ableitet.

Von vergleichbarer Relevanz sind die **Masse-Leuchtkraft-Relationen**. Die schwierig zu bestimmende Sternmasse kann mit dieser Beziehung direkt aus der Leuchtkraft gewonnen werden. Gelingt es einem Astronomen umgekehrt, die Masse eines Sterns durch indirekte Methoden z. B. mittels Kepler-Gesetzen in einem Doppelsternsystem zu bestimmen, so kann er auf der Grundlage dieser Relation sofort angeben, wie hoch seine Leuchtkraft ist. Jüngst wurde dieses Forschungsfeld erschüttert, weil sich herausgestellt hat, dass die übliche Masse-Leuchtkraft-Relation für massearme Sterne nicht mehr gilt (*Close et al.*, Nature 433, 286, 2005). Massearm meint einen Massebereich knapp oberhalb von 0.08 Sonnenmassen, also denjenigen an der 'Schwelle zum Stern'. Diese neuen Messungen wurden mittels hochpräzisen Beobachtungsmethoden der Adaptiven Optik (AO) ermöglicht. Sie besagen, dass bislang die Masse substellarer Objekte wie von Braunen Zwergen und massearmen Sternen unterschätzt wurde (vorausgesetzt die Masse wurde aus der Masse-Leuchtkraft-Relation abgeleitet): In Wahrheit sind sie massereicher.

27.6.4 Wie schwer werden Sterne?

Am massereichen Ende der Sterne gibt es auch neue Messdaten, die den theoretischen Stellarphysikern Kopferbrechen bereiten. Hintergrund ist die Frage, wie schwer ein Stern überhaupt werden kann. In der Theorie wurden durchaus Sterne mit bis zu 1000 Sonnenmassen diskutiert. Beobachtet wurden dagegen maximale Massen zwischen 100 und 150 Sonnenmassen. Es gibt bislang keine Einigkeit über einen exakten, theoretischen Wert.

Supersterne wie η Carinae oder der *Pistolenstern* (siehe Foto 27.4, aufgenommen mit dem Weltraumteleskop Hubble, Credit: *Don F. Figer*, UCLA, NASA, 1997) - beides Leuchtkräftige

Blaue Veränderliche (LBVs) mit enormen Sternwinden - belegen, dass es 'Stern Giganten vom Kaliber 100 Sonnenmassen' auch im nahen Universum gibt.

Aktuell gibt es neue Beobachtungsdaten aus einem jungen Sternhaufen, dem *Arches-Cluster* (*Figier*, Nature 434, 192, 2005; auch als ePrint erhältlich: astro-ph/0503193). Das Resultat ist, dass in dieser dichten Ansammlung von Sternen kein Stern schwerer als 130 Sonnenmassen ist. Daraus folgt allgemein für Sterne, dass ihre **empirische Obergrenze nicht 150 Sonnenmassen überschreitet**. Das zwingt die Theoretiker, die obere Grenzmasse für Sterne genauer anzugeben.

27.6.5 kurze Anmerkungen zu einigen Zustandsgrößen

- ◇ Eine hohe **Rotation** kann starke **Magnetfelder** in Dynamo-Prozessen 'aufziehen'. Dieses Phänomen ist prominent bei schnell rotierenden Neutronensternen (*Pulsar-Magnetosphäre*).
- ◇ Die **mittlere Dichte** ist bei kleinen Objekten (kleinen Radien) oft größer, weil sie kompakter sind.
- ◇ **Sternwinde** können durchaus stark von der Kugel- oder Axialsymmetrie abweichen und sogar 'klumpig' sein.
- ◇ Die **chemische Zusammensetzung** von Sternen kann sehr leicht aus den Sternspektren abgeleitet werden. Dies ist ein Aufgabengebiet der klassischen Astronomie.
- ◇ **Helligkeit** und **Leuchtkraft** müssen klar differenziert werden. Das Entfernungsmodul setzt dabei absolute und scheinbare Helligkeit über die Entfernung miteinander in Beziehung.

27.6.6 Stellarphysik bündelt viele Facetten der Physik

Das Betätigungsfeld der Stellarphysik kann weiterhin in Sternentstehung und Sternentwicklung untergliedert werden. Die stellaren Zustandsgrößen dienen hierbei als wesentliche Charakterisierungs- und Klassifizierungsmerkmale. Wie die Diskussion in diesem Eintrag zeigt, ist der Sternenzoo sehr vielfältig. Die Sternenphysik berührt so sehr unterschiedliche Bereiche der Physik, wie klassische Gasdynamik, Thermodynamik, Atom- und Molekülphysik, Hydrodynamik, Magnetohydrodynamik, Kernphysik, Quantenfeldtheorien und Relativitätstheorie.

27.7 Zwerge

Zwerge (engl *dwarfs*) sind in der Astronomie sehr zahlreich, und es gibt sie in vielen Farben. Schneewittchen hätte seine wahre Freude gehabt! Normalerweise sind mit Zwergen Sterne gemeint. Manchmal sagt man auch *Zwergsterne*, um sie klar von *Zwerggalaxien*, also recht kleinen Galaxien, abzuheben.

27.7.1 Zwergsterne

Die Bezeichnung geht darauf zurück, dass alle stellaren Zwerge in ihrer Ausdehnung viel kleiner sind als andere Sterne. Sie können allerdings recht heiß sein. Trotzdem bleibt ihre Leuchtkraft aufgrund ihrer kleinen physischen Größe eher gering, weshalb sie im fundamentalen Hertzsprung-Russell-Diagramm der Sterne im unteren Bereich zu finden sind. In der Terminologie der Yerkes-Leuchtkraftklassen haben Zwerge die römische Ziffer VI.

27.7.2 bunte Zwergenschar!

Astronomen unterscheiden verschiedene Zwerge anhand ihrer **Sternfarben**, die tatsächlich mit den **Emissionscharakteristika** zusammenhängen:

- ◇ Braune Zwerge,
- ◇ Gelbe Zwerge, wie beispielsweise die Sonne,
- ◇ Rote Zwerge,
- ◇ die dunkelste Form, die Schwarzen Zwerge
- ◇ und schließlich die Weißen Zwerge.

27.8 Zwergplanet

Zwergplaneten ist ein neu definierter Begriff für kleine Planeten, wie z. B. Pluto.

27.9 Zwillingsparadoxon

Das Zwillingsparadoxon ist ein Paradoxon, das in der Physik der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) auftritt. Es wird gerne in der *Science-Fiction*-Literatur verwendet.

27.9.1 Worum geht's?

Das Zwillingsparadoxon beschreibt, ein **Gedankenexperiment**, bei dem Zwillinge nach ihrer Geburt getrennt werden und unterschiedliche Wege gehen. Einer verbleibt auf der Erde, während der andere eine Reise in die Tiefen des Universums mit einem Superraumschiff antritt. Das Superraumschiff ermögliche es dem abenteuerlustigen Probanden fast mit Lichtgeschwindigkeit zu fliegen, so dass aufgrund der (speziell relativistischen) Zeitdilatation bei seiner Rückkunft auf der Erde eine um den Lorentz-Faktor (Gamma-Faktor Γ oder γ) gedehnte Zeitspanne vergangen sein müsste. Der auf der Erde verbliebene Zwilling müsste also weit älter sein als sein gereister Zwilling!

Umgekehrt kann mit der gleichen Berechtigung (aufgrund des Relativitätsprinzips) der auf der Erde verbliebene Zwilling behaupten, *er* habe sich fast mit Lichtgeschwindigkeit bewegt, während sein Pendant im Raumschiff in Ruhe verharrte. Somit wäre demzufolge der im Raumschiff gereiste Zwilling wesentlich älter als der auf der Erde!

27.9.2 Das Paradoxon...

Diese scheinbare Austauschbarkeit (Symmetrie) beider Zwillinge ist das Widersinnige am Paradoxon.

27.9.3 ...und seine Auflösung

Das Paradoxon löst sich auf, wenn man berücksichtigt, dass eine wichtige Voraussetzung der SRT verletzt wurde: das Raumschiff war, weil es sich **beschleunigt** bewegt hat, nicht während der gesamten Reise ein Inertialsystem. Die Rollen der Zwillinge sind **nicht** austauschbar, weil der eine auf der Erde relativ in Ruhe verharrte, aber der andere Zwilling bei seinem Raumflug beschleunigen, abbremsen und wieder beschleunigen musste, um zur Erde zurückzukehren.

27.10 Zyklisches Universum

Dieses kosmologische Modell (engl. *Cyclic Universe*) von der Entstehung und Entwicklung des Universums stellt eine Alternative zur Inflation dar, die ihrerseits das klassische Urknall-Modell ergänzt. Die Physiker *Paul Steinhardt* und *Neil Turok* wenden dabei den Formalismus der Stringtheorien an, was aber nicht zwingend ist: eine **vierdimensionale Feldtheorie** würde ebenso die Rechnungen ermöglichen. Sie behaupten, dass unser Universum aus dem **Zusammenprall zweier Universen**, einer **Branen-Kollision**, hervorgegangen sei!

27.10.1 Was ist daran zyklisch?

Diese Kollision soll einen **Urknall** bewirken, so dass das Phänomen Urknall erstmals in kosmologischen Modellen **erklärbar** wird. Die beiden Theoretiker haben das Modell *einer einzelnen* Kollision **Ekpyrotisches Szenario** getauft - in Analogie zum Weltenbrand (*ekpyrosis*) in der Stoischen Lehre der Antike. Die Erweiterung dieses Szenarios ist, dass diese Kollisionen nicht nur einmal, sondern immer wieder im Verlauf von Äonen auftreten. Dann heißt es **Zyklisches Universum**.

27.10.2 Universum & Paralleluniversum

Die String-Kosmologie wird folgendermaßen angewendet: die Raumzeit dieser kosmischen Bühne, auf der sich die Kollision ereigne, sei **fünfdimensional** (5D). Die Stringtheoretiker nennen dieses 5D-Gebilde in der Fachsprache den **Bulk**. Nun gibt es zwei begrenzende **vierdimensionale** (4D) 'Wände' dieser 5D-Raumzeit: sie heißen die **Branen** (eine Zeit-, drei Raumdimensionen: 3-Bran). Jede dieser Wände repräsentiere ein Universum: das eine sei das Vorläuferuniversum unseres heutigen Universums, das andere sei ein **Paralleluniversum**. Es sei nun denkbar, dass die beiden Universen nur auf der Planck-Skala voneinander entfernt wären, jedoch wären sie über eine weitere, höhere Raumdimension, einer **Extradimensionen**, getrennt!

Nur die Gravitation könne zwischen den Universen vermitteln und durch die fünfdimensionale Raumzeit gelangen. Auf diese Weise könne sich Dunkle Materie des Nachbaruniversums im Unsrigen bemerkbar machen. Materie und Strahlung blieben auf ihr jeweiliges Universum beschränkt.

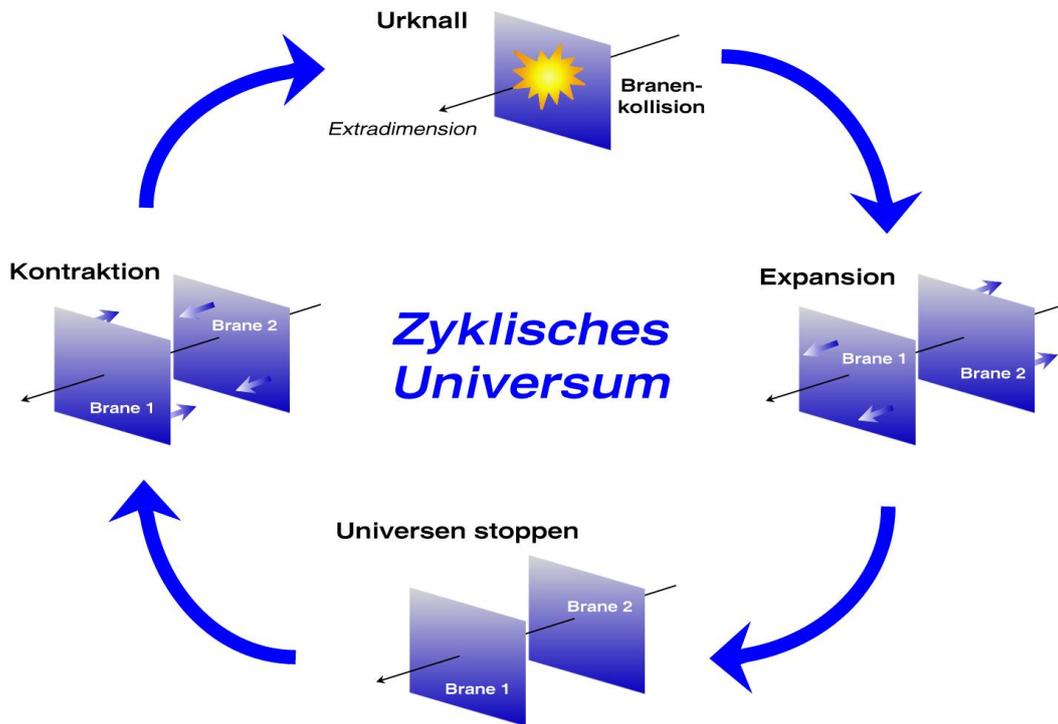


Abbildung 27.5: Stadien im Zyklischen Universum.

27.10.3 Radion-Feld lässt Universen schwingen

Die Ursache für die Kollision der Welten (*ekpyrosis*) wird in einem Kraftfeld gesehen, das ohnehin eine entscheidende Rolle im Kosmos zu spielen scheint: **Dunkle Energie**. Diese Energieform ist vorherrschend im beobachteten, späten Universum, wie Messungen (Experimente: BOOMERANG, MAXIMA, COBE, WMAP etc.) nahe legen. Sie übertrumpft sogar die uns vertraute sichtbare, baryonische Materie plus heiße und kalte Dunkle Materie um einen Faktor 2! *Steinhardt* postuliert ein Kraftfeld, das er **Radion** nennt. Es manifestiere sich als **zeitliche variable Dunkle Energie**, also eine neue Form von Quintessenz. Das Radion-Feld existiere in allen Bereichen der 5D-Raumzeit zwischen den beiden 3-Brannen. Da das Radionfeld fluktuiert, induziere es Abstandsänderungen der berandenden Universen: Die Brannen seien dynamisch, und es bilde sich durch die spezielle Potentialform des Feldes ein Zyklus aus Annäherung, Kollision und Entfernung aus. Diesen zyklischen Ablauf identifiziert man mit dem Begriff des Zyklischen Modells (illustriert im Schema 27.5). Mit jedem Urknall, der einen Anfang eines Universums bedeute, sei damit ein vorangegangener 'Endknall' assoziiert, der ein bislang existierendes Universum auslösche. Mit der Krümmungssingularität im Urknall sei daher ein verschwindender Abstand der Universen in der fünften Dimension verbunden: **Der Raum kollabiere nur in einer Extradimension!**

27.10.4 immer wählender Zyklus?

Dies ist eine ganz wichtige Folgerung des Zyklischen Modells und ein entscheidender Unterschied zur bisherigen Sichtweise des Urknalls, wo der Raum **in allen** Dimensionen

kollabiert. Denn das bedeutet für die wesentlichen physikalischen Parameter Temperatur und Dichte, dass sie **endlich blieben** und nicht divergieren. Im Kollaps wurde eine Temperatur von 10^{23} Kelvin abgeleitet. Nach der Kollision laufen die Branen in der fünften Dimension wieder auseinander. *Steinhardt* und *Turok* fanden eine so genannte **Attraktor-Lösung**, die es ermöglichte, dass sich die Zyklen beliebig häufig wiederholen.

27.10.5 Bewertung des Modells

Das Zyklische Universum ist ein reizvoller Vorschlag in der modernen, theoretischen Kosmologie. Attraktiv daran ist, dass es die Verhältnisse **vor dem Urknall** modelliert. Die scheinbar naive Frage '*Was war vor dem Urknall?*', die früher mit dem Etikett '*Frage nicht erlaubt.*' abgewiesen wurde, könnte nun mit einem **dynamischen Bulk-Branen-System** beantwortet werden. Wer besonders pfiffig ist, mag dann jedoch weiter fragen: '*Und woher kommt das Bulk-Branen-System?*'

Ähnlich wie bei den Quintessenzen gestattet das Radion-Feld als *dynamische Form* der Dunklen Energie die Lösung der Frage, weshalb die kosmologische Konstante so klein, aber nicht null ist - auch das ist ein Vorteil des Modells.

Aber das Modell ist auch sehr spekulativ: Extradimensionen, die im Zyklischen Modell unbedingt erforderlich sind, wurden bislang nicht experimentell nachgewiesen. Selbst wenn die Forscher sich irgendwann einmal von der Existenz der Extradimensionen überzeugt haben, bleibt die Frage, wie ein solch abenteuerliches Modell getestet werden soll. Denn für einen experimentellen Test müsste Information aus dem Vorläuferzustand in unser jetztiges Universum gelangen. Laut Zyklischem Modell käme dafür als einziger Überträger nur die Gravitation in Frage. Man darf wohl sehr skeptisch sein, wie das im Detail funktionieren soll.

27.10.6 Weitere Informationen

- ◇ Vortrag: *An introduction to Brane World Cosmology* (Stand März 2004).
- ◇ Homepage von Paul J. Steinhardt
- ◇ Veröffentlichungen *Steinhardt*, *Turok* und Kollegen: astro-ph/0112537, astro-ph/0204479, hep-th/0111030, hep-th/0103239, astro-ph/0605173, hep-th/0607164.

27.11 Zyklotron

Der Fachausdruck für einen Teilchenbeschleuniger mit kreisförmiger Beschleunigungsstrecke. Die deutsche Bezeichnung ist Kreisbeschleuniger.

Kontakt

Dr. Andreas Müller

Technische Universität München (TUM)
Exzellenzcluster Universe
Boltzmannstraße 2
D-85748 Garching
Germany

<http://www.universe-cluster.de>

andreas.mueller@universe-cluster.de

+49 (0)89 - 35831 - 71 - 04