
Lexikon

der



Astrophysik

von



Andreas Müller

aus dem

Wissensportal für Astrophysik

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

April 2007

Abbildungsverzeichnis

24.1 Zwei Klassen Weißer Zwerge.	3
24.2 w -Parameter für verschiedene kosmische Materie- und Energieformen.	13

24 Lexikon W

24.1 Walker-Penrose-Theorem

Dieses Theorem nach *A.G. Walker* und *R. Penrose* aus dem Jahr 1970 besagt, dass in einer Typ-D Raumzeit ein symmetrischer, konformer Killing-Tensor zweiter Stufe existiert. Dies ist in der theoretischen Astrophysik deshalb von Belang, weil **alle** Typen Schwarzer Löcher Typ-D sind (siehe dazu Petrov-Klassifikation). Die zweifache Verzügelung des Killing-Tensors ist erhalten! Diese Erhaltungsgröße ist wiederum mit der Carter-Konstante assoziiert. *Brandon Carter* fand 1968 den kompletten Satz von Photonenimpulsen im ZAMO für die Kerr-Geometrie. Seine Arbeit ist die Grundlage von Ray Tracing bei rotierenden Schwarzen Löchern.

24.2 Weakonen

Eine nicht so häufig verwendete Bezeichnung für die **drei Eichbosonen** der schwachen Wechselwirkung: den beiden elektrisch positiv bzw. negativ geladenen W-Zeilchen \mathbf{W}^- sowie \mathbf{W}^+ und dem elektrisch neutralen Z-Teilchen \mathbf{Z}^0 .

24.3 Weinberg-Winkel

Der Weinberg-Winkel ist eine **elementare Naturkonstante** und verknüpft die elektrische Elementarladung e mit der schwachen Elementarladung g .

24.3.1 Weinberge sind doch recht steil...?

Das Quadrat vom Sinus des Weinberg-Winkels entspricht (ohne so genannte Strahlungskorrekturen, also dem Austausch virtueller Teilchen) gerade dem Quadrat des Verhältnisses von elektrischer zu schwacher Elementarladung

$$\sin^2 \theta_W = \left(\frac{e}{g}\right)^2 = 1 - \frac{m_W^2}{m_Z^2}.$$

Mithilfe der Massen der Austauscheteilchen der schwachen Kraft, dem Z-Teilchen und den W-Teilchen (Weakonen), folgt der Weinberg-Winkel experimentell. Er wird allerdings *nicht* vom Standardmodell der Teilchenphysik theoretisch vorhergesagt!

24.3.2 alternativer Zugang über elektroschwache Theorie

Der Weinberg-Winkel hängt auch mit der Feinstrukturkonstanten und der Fermi-Konstanten zusammen und kann so alternativ bestimmt werden. In der elektroschwachen Theorie, einer unifizierten Theorie aus und elektromagnetischer und schwacher Wechselwirkung gibt der Weinberg-Winkel die 'Mischung' zwischen Photon und Z-Teilchen an.

24.4 Weiße Löcher

Weißer Löcher sind salopp gesagt das Gegenteil von Schwarzen Löchern: eine sichtbare **Singularität**! Die Einsteinschen Feldgleichungen sind symmetrisch in der Zeit (*zeitumkehrinvariant*), d. h. eine Zeitumkehrtransformation einer Lösung der Feldgleichungen ist wieder eine Lösung! Ein nicht rotierendes Weißes Loch entspricht der avancierten Eddington-Finkelstein-Lösung eines Schwarzschild-Loches.

24.4.1 Klingt recht technisch. Wie sieht das Teil aus?

Eine zeitliche Umkehrung eines Schwarzen Loches sähe so aus, dass aus dieser Raumzeitregion ständig Materie und Strahlung herausfließen würde! Selbstverständlich wurden diese Objekte nie von Astronomen beobachtet, aber eine interessante Frage ist es doch, ob es mehr ist als eine 'mathematische Spielerei'.

24.4.2 Nackich is nich

Diese sichtbaren - Relativisten sagen auch *nackte* - Singularitäten (engl. *naked singularities*), sind nach der **kosmischen Zensur** (engl. *cosmic censorship*) von *Roger Penrose* verboten: Sie müssen nach diesem Theorem durch einen Ereignishorizont verhüllt sein. Wäre das nicht der Fall, würden Akausalitäten auftreten.

24.4.3 Tunnel in eine andere Welt?

Die Spekulation geht sogar noch weiter: Die Allgemeine Relativitätstheorie gestattet es, Raumzeiten 'aneinanderzukleben', weil die Topologie durch die Feldgleichung nicht festgelegt ist. So ist es möglich, ein System aus einem Schwarzen und einem Weißen Loch zu 'basteln'. Die Theoretiker nennen dieses Gebilde Einstein-Rosen-Brücke oder Wurmloch. Dieses Objekt würde auf der einen Seite der Raumzeit Materie und Strahlung verschlucken, durch einen engen Raumzeitkanal transportieren und auf der Seite des Weißen Loches wieder ausstoßen. Ein solch abenteuerliches Gebilde könnte als Kanal zwischen flachen Raumzeiten oder gar Universen dienen. Die Brücke besteht im Rahmen der Theorie zwischen den beiden punktförmigen, zentralen Singularitäten.

24.4.4 Wie im Flugzeug: Reise durch's Wurmloch wird eng

Die enormen Gezeitenkräfte würden jedoch alles, was den Kanal passieren würde zerreißen, weshalb eine Reise durch Wurmlöcher, wie sie in SF-Romanen geschildert werden, alles andere als angenehm wäre. Die Gezeitenkräfte sind zwar bei supermassereichen Schwarzen Löchern wesentlich geringer als bei den stellaren Schwarzen Löchern, doch spätestens, wenn das einfallende Objekt die punktförmige Singularität passiert, wird es zerquetscht. Darüber hinaus zeigen Berechnungen, dass diese Brücken äußerst instabil wären und nach kurzer Zeit verschwinden würden. Eine Reise durch ein Wurmloch wäre nach allem, was die Theorie an halbwegs wissenschaftlichen Spekulationen erlaubt, eine Reise ins Ungewisse - vermutlich in den Tod.

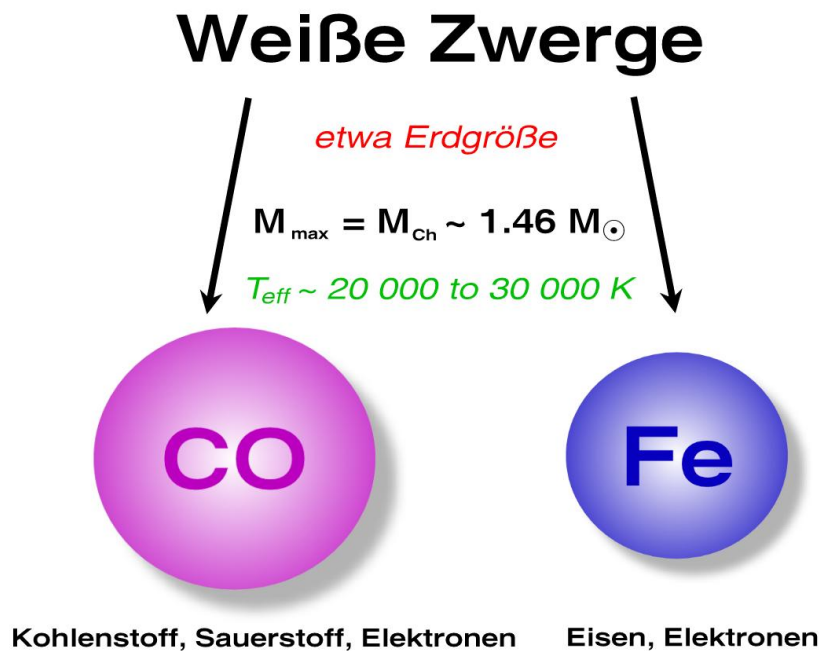


Abbildung 24.1: Zwei Klassen Weißer Zwerge.

24.4.5 Bisläng Fehlanzeige

Bisher wurde von keinem beobachteten kosmischen Objekt die Vermutung geäußert, dass es sich dabei um ein Weißes Loch handeln könnte. Immerhin sollten diese 'umgekehrten Schwarzen Löcher' viel deutlicher in Erscheinung treten als ihre dunklen Zwillingbrüder. Daher gelten sie nach wie vor als hochgradig spekulativ!

24.5 Weiße Zwerge

Weiße Zwerge (engl. *white dwarfs*, WD) sind kompakte Objekte, die sich am Ende der Entwicklung von Sternen mit etwa einer Sonnenmasse bilden.

24.5.1 Eigenschaften

Sie haben in etwa die Größe der Erde (Größenordnung 5000 km), vereinigen aber eine gesamte Sonnenmasse in sich! Daher ist ihre mittlere Dichte mit etwa 10^6 g/cm^3 beträchtlich. Ihre Oberflächentemperatur (siehe auch Effektivtemperatur) beträgt etwa 20000 bis 30000 Kelvin, weshalb sie maximal im Ultraviolett strahlen (zu sehen anhand Gleichung im *Wienschen Verschiebungsgesetz* in den Einträgen Planckscher Strahler sowie Spektraltyp).

24.5.2 Entstehung Weißer Zwerge

Weiße Zwerge bilden sich, wenn der Vorläuferstern seine äußeren Hüllen nach dem Rote-Riesen-Stadium als **planetarischen Nebel** abgestoßen hat, aus der Restmasse. Die kritische Obergrenze ist die **Chandrasekhar-Masse** von 1.46 Sonnenmassen (*Chandrasekhar*, 1930).

Diese Grenzmasse ist *unabhängig* von Zentraldichte und Radius und hängt nur von der Zusammensetzung des Weißen Zwergs ab. Rechnerisch gewinnt man die Massengrenze aus der **Masse-Radius-Beziehung eines Polytropen** und der numerischen Lösung der so genannten **Lane-Emden-Gleichung**. In diese Gleichung gehen lediglich die Zustandsgleichung des Polytropen, Annahme hydrostatischen Gleichgewichts und die Poisson-Gleichung des Gravitationsfeldes ein.

24.5.3 Was bewahrt den Zwerg vor dem Kollaps?

Stabilität erhalten die Weißen Zwerge vom fermionischen **Entartungsdruck der Elektronen**, die dem Pauli-Prinzip unterliegen und sich daher nicht beliebig nahe kommen können. Der Entartungsdruck skaliert nur mit der Massendichte (Potenzgesetz mit Potenz $5/3$, nicht relativistisch, oder $4/3$, relativistisch) und wird daher besonders relevant bei hohen Dichten. Doch bei zu starken Gravitationsdrücken kann auch der Entartungsdruck nichts mehr stabilisieren.

24.5.4 Eine 1a Supernova

Das geschieht, wenn der Zwerg zuviel Masse bekommt, z. B. von einem nahen Begleitstern. In der Natur beobachten Astronomen den Fall in Doppelsternsystemen, dass Materie eines Sterns zum benachbarten Weißen Zwerg überfließt. Der Zwerg nimmt durch Akkretion immer mehr Sternplasma des Begleiters auf. Oberhalb der Chandrasekhar-Masse werden Weiße Zwerge instabil. Die katastrophale Folge ist die Explosion des Weißen Zwergs in einer Supernova vom Typ Ia (thermonukleare Supernova) - **von ihm bleibt nichts übrig!** Anmerkung: Schwerere Sterne hingegen kollabieren zu einem Neutronenstern, Quarkstern oder stellaren Schwarzen Loch. Die damit verbundene Explosion ist eine Supernova Typ II bzw eine Hypernova.

24.5.5 zwei Zwergtypen: CO & Fe

Die Daten des Astrometrie-Satelliten *Hipparcos* belegen, dass man unter den Weißen Zwergen zwei Typen nach ihrer Zusammensetzung unterscheiden kann: **CO-Weiße Zwerge** und **Fe-Weiße Zwerge**. Letztere sind noch kleiner (siehe Grafik 24.1). CO-Weiße Zwerge gehen aus massearmen Sternen hervor und enthalten Kohlenstoff (C) und Sauerstoff (O). Fe-Weiße Zwerge dagegen sind Relikte massereicher Sterne. Massereiche Sterne erzeugen in nuklearen Fusionsprozessen schwerere Elemente bis Eisen (Fe).

24.5.6 Hier 'brennt' nichts mehr

In Weißen Zwergen läuft **keine thermonukleare Fusion mehr** ab, so dass sie lediglich nur noch auskühlen. Bei angenommenen 20 Millionen Kelvin im Innern strahlen sie immer noch 10 Milliarden Jahre lang, also der Zeitskala des Alters des Universums! Oder wie es die Astrophysiker gerne formulieren:

Die Kelvin-Helmholtz-Zeitskala liegt in der Größenordnung der Hubble-Zeit.

Danach werden sie zunächst **Rote Zwerge** (Oberflächentemperatur etwa 3000 K) und schließlich **Schwarze Zwerge** und somit Form baryonischer Dunkler Materie. Die geringe Leuchtkraft decken Weiße Zwerge aus noch gespeicherter thermischer Energie.

24.5.7 berühmte Weiße Zwerge

Bekannte Vertreter sind der Begleiter von *Sirius* im Sternbild *Großer Hund* (internat. *Canis Major*), **Sirius B**, der 1914 entdeckt wurde. Er hat etwa eine Sonnenmasse, eine Oberflächentemperatur von 27000 K (Vergleich Sonne: ca. 6000 K), eine Leuchtkraft von nur 0.002 Sonnenleuchtkräften und umläuft den Hauptstern Sirius A in 50 Jahren. 1844 hat *Bessel* Sirius B aufgrund periodisch schwankender Eigenbewegungen von Sirius A vorhergesagt. *Clark* hat ihn 1862 zufällig entdeckt!

Astronomen kennen derzeit etwa 600 Weiße Zwerge. Weitere sind **Procyon B** im Sternbild *Kleiner Hund* (internat.: *Canis Minor*), **40 Eri B** im Sternbild *Eridanus*, **EG 50**, **GD 140** und **Stein 2051**.

24.5.8 CVs

Eine spezielle Form von Doppelsternen, die immer einen Weißen Zwerg als kompakte Komponente haben, sind die kataklysmischen Veränderliche.

24.5.9 Sonne wird zum Weißen Zwerg werden

Nach dem Stadium eines Roten Riesen in einigen Milliarden Jahren wird unsere Sonne das Schicksal ereilen, dass sie zum Weißen Zwerg von etwa einer halben Sonnenmasse wird, eingebettet in einen farbenprächtigen Planetarischen Nebel. Die Erde wird also keinen Kältetod erleiden, sondern die Ozeane werden durch die enorme Hitze des aufgeblähten Roten Riesen verdampfen!

24.6 Wellenfunktion

Die Wellenfunktion, üblicherweise symbolisiert durch den griechischen Buchstaben Ψ , beschreibt in der Quantentheorie ein mikroskopisches Teilchen.

24.6.1 Von der klassischen Mechanik zur Quantenmechanik

In der klassischen Mechanik bestimmt man Teilchenbahnen, indem man das Bewegungsproblem, nämlich die *Bewegungsgleichung*, löst. Das Resultat ist eine Teilchenbahn, die von bestimmten Einstellparametern abhängen mag, aber wohl definiert und diskret ist.

In der Quantenmechanik löst nun die Wellenfunktion das Konzept der Teilchenbahn ab (sie muss aber noch geeignet interpretiert werden, dazu später) und löst ebenfalls eine quantenmechanische Bewegungsgleichung: die berühmte *Schrödinger-Gleichung*. Wie wir sehen werden ist dann die Bahn des quantenmechanischen Teilchens, des Quants, nicht mehr so gut bestimmt.

24.6.2 Eigenschaften der Wellenfunktion

Da die Wellenfunktionen quantenmechanische Teilchen beschreiben, müssen sie auch alle Eigenschaften von Teilchen enthalten können. Die Quantenphysiker nennen diese Eigenschaften Quantenzahlen und meinen damit z. B. die Masse des Teilchens, die

elektrische Ladung, den Spin und den Isospin. Weiterhin hängt die Wellenfunktion von den Raumkoordinaten und der Zeit ab:

$$\Psi = \Psi(\vec{r}, t).$$

24.6.3 Wahrscheinlichkeitswelle

Die Wellenfunktion ist eine skalare Verteilungsfunktion bestimmter Amplitude (Wellenamplitude), die im Allgemeinen vom Ort und der Zeit abhängt und außerdem durch die Teilcheneigenschaften parametrisiert ist. Ein quantenmechanisches Problem gilt als gelöst, wenn der charakteristische Verlauf der Wellenfunktion in den Koordinaten bekannt ist. Das klassische Punktteilchen ist nicht mehr an einem bestimmten Punkt in Raum und Zeit lokalisiert, sondern in Form der Wellenfunktion 'verschmiert'. Dabei ist nicht die Wellenfunktion selbst von Bedeutung, sondern ihr **Absolutquadrat**. Denn die Wellenfunktion kann auch komplexwertig sein. Absolutquadrate sind reellwertig. Anmerkung: Ein Absolutquadrat berechnet man immer dadurch, dass man eine gegebene komplexe Größe mit der zugehörigen komplex konjugierten Größe (symbolisiert mit einem zusätzlichen Stern) multipliziert:

$$|\Psi|^2 = \Psi\Psi^*.$$

Diese Verteilung des Absolutquadrats (nicht der Wellenfunktion selbst!) wird als **Wahrscheinlichkeitsverteilung** interpretiert. Eine höhere Wahrscheinlichkeit das Quant anzutreffen wird dort erwartet, wo das Absolutquadrat größer ist.

24.6.4 Welle-Teilchen-Dualismus

In der Quantenphysik können sich Teilchen als Welle oder als Teilchen verhalten, d. h. in dem einen Experiment eignen sich die Welleneigenschaften zur Klärung der Beobachtung; in einem anderen eignen sich die Teilchen- oder Korpuskulareigenschaften. Dieses Phänomen heißt **Welle-Teilchen-Dualismus** und ist charakteristisch für Quanten. Dieser Dualismus gilt somit beispielsweise für Licht, genauer gesagt für Photonen, aber auch für Elektronen, für das Neutrino oder für den Atomkern.

24.6.5 Mikrowelt ist prinzipiell verschwommen

Hinzu kommt eine weitere Komplikation in der Quantenwelt: Es ist für quantenmechanische Beobachter nicht möglich, gewisse Eigenschaften eines Quants gleichzeitig zu messen: Ein Quantenbeobachter kann entweder den Ort oder den Impuls (die Geschwindigkeit) eines Quants messen. Ein Quantenbeobachter kann aber auch nur entweder die Energie oder die Zeit messen. Diese Unschärfen werden in der **Heisenbergschen Unschärferelation** zusammengefasst.

24.6.6 Zum quantenmechanischen Messprozess

Was mit der Wellenfunktion beim *quantenmechanischen Messprozess* geschieht, wird im Eintrag Kopenhagener Deutung erläutert. Die Interpretation birgt grundlegende Konsequenzen für unser Weltverständnis.

24.7 Weylsches Postulat

Dieses Postulat wurde 1923 von *H. Weyl* entworfen und besagt, dass sich die Galaxien im Universum wie 'Elementarteilchen' in einer Flüssigkeit bewegen sollen. Ein den Raum durchdringendes Substrat kann in diesem Sinne als eine ideale **Flüssigkeit** angesehen werden, weil sich die Geodäten nur einem singulären Punkt in der Vergangenheit (und evt. auch Zukunft) schneiden. Die Materie (Galaxien) besitzt daher in jedem Punkt der Raumzeit eine eindeutige Geschwindigkeit.

24.8 Weyl-Tensor

Der Weyl-Tensor oder auch konforme Tensor genannt wurde benannt nach dem deutschen Mathematiker *Hermann Klaus Hugo Weyl* (1885 - 1955). Dieser Tensor 4. Stufe ist relativ kompliziert und kann zunächst für beliebige Dimensionen n allgemein notiert werden. In der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) gilt $n = 4$, weil Raumzeiten durch eine Zeitdimension und drei Raumdimensionen charakterisiert sind.

24.8.1 Berechnung des Weyl-Tensors

Anhand der Definitionsgleichung sieht man unmittelbar, dass der Weyl-Tensor ein recht kompliziertes Gebilde ist, das schon bei einfachen Raumzeiten nur mit einigem Aufwand zu berechnen ist

$$\begin{aligned} C_{\kappa\lambda\mu\nu} &= R_{\kappa\lambda\mu\nu} - g_{\kappa[\mu}R_{\nu]\lambda} + g_{\lambda[\mu}R_{\nu]\kappa} - \frac{1}{3}g_{\kappa[\nu}g_{\mu]\lambda}R \\ &= R_{\kappa\lambda\mu\nu} + \frac{1}{2}(g_{\kappa\nu}R_{\mu\lambda} - g_{\kappa\mu}R_{\nu\lambda} + g_{\lambda\mu}R_{\nu\kappa} - g_{\lambda\nu}R_{\mu\kappa}) + \frac{1}{6}(g_{\kappa\mu}g_{\nu\lambda} - g_{\kappa\nu}g_{\mu\lambda})R. \end{aligned}$$

Es sei denn man nutzt so genannte computer-algebraische Systeme, die Tensorrechnungen am Computer bequem und schnell erlauben.

Die Gleichung zeigt auch, dass sich der Weyl-Tensor aus dem Riemann-Tensor (Krümmungstensor; R mit vier Indizes), dem Ricci-Tensor (R mit zwei Indizes) und dem Ricci-Skalar (R ohne Indizes) berechnen lässt.

24.8.2 Symmetrien

Neben den Symmetrien des Riemann-Tensors besitzt der Weyl-Tensor eine zusätzliche Symmetrie: er ist **spurfrei**, das heißt die Summe seiner Diagonalelemente verschwindet. Die Diskussion seiner Symmetrieeigenschaften lässt eine Klassifikation der Vakuum-Raumzeiten zu, die unter der Petrov-Klassifikation bekannt ist.

24.8.3 Indikator der Krümmungseigenschaften

Physikalisch ist der Weyl-Tensor besonders von Bedeutung, weil er sich zur Untersuchung der Krümmungseigenschaften von Raumzeiten eignet. Aus Riemann-Tensor und Weyl-Tensor lassen sich **Riemannsche und Weylsche Invarianten** bestimmen, die *nicht* vom Koordinatensystem abhängen. Dazu gehört auch der Kretschmann-Skalar. Eine Diskussion solcher Größen macht klar, wo die Krümmung besonders stark oder besonders schwach ist. Das erleichtert das Auffinden von Krümmungssingularitäten und die Charakterisierung als asymptotisch flache Raumzeit.

24.9 Wheeler-DeWitt-Gleichung

Die zeitabhängige Schrödinger-Gleichung der Quantentheorie beschreibt eindeutig die Dynamik der Wellenfunktion, also deren zeitliche Entwicklung. Lösungen der Schrödinger-Gleichung verraten also den Zustand des Quantensystems zu einem Zeitpunkt t und an einem Ort \mathbf{r} (Vektor).

24.9.1 von Schrödinger zu Wheeler-DeWitt

Eine relativistische Formulierung der stationären Schrödinger-Gleichung kennt man als die **Wheeler-DeWitt-Gleichung**. Sie ist Gegenstand der **Quantenkosmologie**. Man erhält diese Gleichung, wenn man die Relativitätstheorie in *Hamiltonsche Form* umschreibt. Sie lautet:

$$\hat{\mathcal{H}} \left({}^3\hat{\gamma}_{ij}, {}^3\hat{\pi}, \hat{F}, \hat{\pi}_F \right) \Psi \left({}^3\gamma_{ij}, F \right) = 0.$$

Dieser Zugang ist bereits in der klassischen Mechanik bekannt, besitzt jedoch eine so allgemeine Formulierung, dass man ihn auch auf andere Theorien übertragen kann. Wichtig ist die Anmerkung, dass die Wheeler-DeWitt-Gleichung *nicht* kovariant ist. Das verwundert an sich nicht, wenn man berücksichtigt, dass die Schrödinger-Gleichung im Rahmen der **nicht-relativistischen** Quantenmechanik abgeleitet wird. Die Verletzung der Kovarianz manifestiert sich darin, dass bestimmte raumartige Hyperflächen ausgezeichnet sind. Außerdem gilt die Wheeler-DeWitt-Gleichung nur punktweise. Deshalb sind etwaige Renormierungsverfahren erforderlich.

Technisch muss man die Raum-Zeit-Symmetrie der Allgemeinen Relativitätstheorie wieder aufbrechen und in Raum und Zeit separieren. Diese als ADM-Formalismus (nach den Relativisten *Arnowitz*, *Deser* und *Misner*) bekannte Technik zeichnet raumartige Hyperflächen aus, deren Blätterung (*Foliation*) den Ablauf der Zeit darstellt: von einer Hyperfläche auf die andere ändert sich der kanonische Zeitparameter. Im üblichen Hamiltonschen Formalismus berechnet man nun die generalisierten kanonischen Impulse und die kanonisch konjugierte Variable aus den Ableitungen der Lagrange-Dichte. Integration liefert schließlich die Hamilton-Funktion. Sie ist der wesentliche Operator der Wheeler-DeWitt-Gleichung, die formal der (stationären) Schrödinger-Gleichung (zum Energieeigenwert null) sehr ähnelt. Die Wellenfunktion wird nun allerdings als die '**Wellenfunktion des Universums**' bezeichnet. Sie ist auf einem unendlich-dimensionalen **Superraum** der Raumzeit-Geometrien und aller Materiefelder definiert.

24.9.2 So geht's weiter: Randbedingungen fixieren

An diese hyperbolische, partielle Differentialgleichung muss man nun Randbedingungen stellen, wie beispielsweise *Vilenkin* und *Linde* vorschlugen. Sie leiteten eine Analogie zum quantenmechanischen Tunneleffekt ab, das man '*Quantentunneln aus dem (bzw. in das) Nichts*' nannte. Dies erklärte sich daraus, weil ein Wahrscheinlichkeitsstrom (mit der üblichen quantenmechanischen Definition) aus dem (bzw. in den) Superraum hinaus fließt.

Hartle und *Hawking* gaben eine alternative Randbedingung an, die '*no-boundary-condition*'. Hier ist der Rand der vierdimensionalen Mannigfaltigkeit de facto immer derselbe. Das Problem dieses Zugangs über Pfadintegrale liegt darin, dass die Wellenfunktion des Universums dann *nicht eindeutig* festgelegt werden kann, weil eine Auswertung des

Pfadintegrals in der komplexen Ebene zu verschiedenen Ergebnissen führt, je nachdem welchem Integrationsweg man folgt.

24.9.3 Erzeugung und Vernichtung ganzer Universen!

In der Quantenkosmologie gibt es auch den vertrauten Apparat der **kanonischen Quantisierung**. So kann man Vielteilchenzustände, **Baby-Universen** genannt, aus Vakuumzuständen, **voids** genannt, durch Anwendung von Erzeugungsoperatoren erzeugen. Allerdings wird die zugehörige Wheeler-DeWitt-Gleichung noch komplexer und sogar nicht-linear, weil Wechselwirkungen zwischen diesen Zuständen berücksichtigt werden müssen. Die quantenmechanische Teilchenerzeugung und -vernichtung entspricht in dieser Anwendung auf den Kosmos der **Erzeugung und Vernichtung von Universen!** Der erkenntnistheoretische Inhalt dieser Theorie ist immens.

24.9.4 Der zeitliche Aspekt

Die Wheeler-DeWitt-Gleichung ist in ihrer fundamentalen Formulierung **unabhängig vom Parameter Zeit!** Es gibt zwar einen Zeitparameter, der die Foliation der Raumzeit in Hyperflächen bestimmt. Die Foliation ist jedoch vollkommen willkürlich! Daher ist auch der resultierende Zeitbegriff nicht eindeutig. Es muss nun untersucht werden, ob die Quantentheorien verschiedener Foliationen ('Eichungen') **unitär äquivalent** sind. Träfe dies zu, wäre die gewählte Foliation irrelevant. Erst spezielle Lösungen der Wheeler-DeWitt-Gleichung (wenn man den lokalen Beobachter wieder einführen muss) leiten wieder auf einen Ordnungsparameter, den man mit der Zeit identifizieren kann. Dies führte in der Vergangenheit zu der Frage nach einer '**Physik ohne Zeit**'.

24.9.5 Lesehinweis

- ◇ Web-Essay: Was ist Zeit?

24.10 Wiensche Strahlungsformel

Siehe im Zusammenhang unter Planckscher Strahler.

24.11 Wilson-Loop

Die Wilson-Loops, verkürzt auch einfach *Loops* genannt, sind **Basiszustände**, die zur Beschreibung von beliebigen Quantenzuständen in der Quantenchromodynamik (*Yang-Mills-Theorie*, SU(2)-Gruppe) und der Loop-Quantengravitation verwendet werden. Sie konstituieren den Hilbert-Raum, der gerade der Zustandsraum der jeweiligen Theorie ist, um die Eigenschaften eines Quantensystems zu beschreiben.

24.11.1 Warum Loop?

Die Bezeichnung *Loop*, dt. Schleifen, rührt daher, weil man in der Theorie einen (Parallel-)Transport physikalischer Größen entlang einer schleifenförmigen, geschlossen Bahn auf einer

Metrik betrachtet. Der Operator, der diesen Transport bewerkstelligt, heißt **Holonomie-Operator** und erfüllt die Eigenschaften einer mathematischen Gruppe. Holonomie kennt man in der Teilchenphysik als *Wu-Yang-Phasenfaktor*, man kann dieses Konzept mit den Methoden der Mathematik (Funktionalanalysis, Differentialgeometrie, Gruppentheorie, Kategorietheorie) verallgemeinern.

Der Holonomie-Operator (wie die meisten Operatoren in der Quantentheorie) kann als Matrix dargestellt werden. Besonders relevant ist die **Spur** des Holonomie-Operators, also die Summe aller Werte auf der Matrixdiagonalen. Es zeigt sich, dass der Holonomie-Operator unverändert bleibt, wenn man **lokale Eichtransformationen** durchführt. Theoretiker stellen fest: Die Spur ist *eichinvariant*. Das führt zur Erhaltung der lokalen Eichsymmetrie. Hier gibt es den wesentlichen Anknüpfungspunkt zu den Eichtheorien: Denn die Eichtheorie kann dann durch ihre Holonomien dargestellt werden. Die Holonomien enthalten so die gesamte Information über die Dynamik der Theorie.

Es ist anzunehmen, dass alle Felder in der Natur (nicht nur Yang-Mills- und Gravitationsfeld) im Loop-Formalismus dargestellt werden können.

24.11.2 Geometrie als fundamentales Prinzip

Die Eichtheorien können so **geometrisch interpretiert** werden (*Gambini & Trias*, 1981 und 1986; Buch von *Gambini & Pullin* mit dem Titel *Loops, Knots, Gauge Theories and Quantum Gravity*, 2000).

In der Loop-Quantengravitation, die sogar nach den Loops benannt wurde, wurde später eine neue Basis gefunden, die mathematische Vorteile hat: die Spin-Netzwerke.

24.12 WIMP

WIMP ist ein Akronym und steht für *Weakly Interacting Massive Particle*, also ein *schwach wechselwirkendes, massereiches Teilchen*.

24.12.1 Fliegengewicht Neutrino ist kein WIMP

Das Neutrino zählt nicht zu den WIMPs, weil es zu leicht ist. Dennoch hat das Neutrino eine **endliche** Ruhemasse. Neutrinos werden typischerweise beim Beta-Zerfall von einem *Radionuklid* emittiert. Anfangs war man sich nicht sicher, ob sie Masse tragen oder nicht. Dies konnte jedoch experimentell mit *Superkamiokande* in Japan verifiziert werden.

24.12.2 Was sind die WIMPs?

WIMPs sind massereich und die Forscher kennen *in der Theorie* viele davon. Vor allem durch die Supersymmetrie (SUSY) wird der 'WIMP-Zoo' bereichert. Von den WIMPs erhoffen sich die Astronomen eine Lösung des Missing-mass-Problems, weil eine signifikante Anzahl WIMPs die Masse des Universums beträchtlich erhöhen könnte (supersymmetrische Dunkle Materie: **DM-SUSY**).

24.12.3 Wo sind die WIMPs?

Offensichtlich ist das gemäß WMAP-Daten nicht in der Natur realisiert. Das **Neutralino**, ein SUSY-Teilchen, ist mit anderen Teilchen ein solcher Kandidat. Weil WIMPs neben der gravitativen nur an der schwachen Wechselwirkung teilnehmen, gestaltet sich ihr Nachweis und damit die Abschätzung ihrer Gesamtzahl im Universum außerordentlich schwierig! In unterirdischen Experimenten (Minen, Tunnel etc.) versucht man Störeinflüsse wie die kosmische Strahlung abzuschirmen.

Alternativ lassen sich diese Teilchen indirekt nachweisen: Sollten die WIMPs der SUSY irgendwo im Universum existieren, so könnten sie sich dadurch bemerkbar machen, dass sie mit ihrem Antiteilchen zerstrahlen. Bei diesem **Annihilationsprozess** wird die Ruheenergie von WIMP und Anti-WIMP in Form eines Photons frei. Bei den hohen Massen der WIMPs liegt die Strahlung im energiereichsten Bereich des elektromagnetischen Spektrums: im **TeV-Bereich**, also bei einigen Billionen Elektronenvolt! Für diesen Spektralbereich gibt es auch Beobachtungsteleskope, z. B. **HESS** (*High Energy Stereoscopic System*) in Namibia.

24.13 Wolf-Rayet-Stern

24.13.1 Charakteristika

Die WR-Sterne sind besonders massereiche Sterne und sind auf der Massenskala im Bereich zwischen 20 und 100 Sonnenmassen zu finden. Diese Sterne sind sehr heiß (einige 10 000 K an der Oberfläche) und in der Regel vom Spektraltyp O oder B (OB-Sterne). WR-Sterne wurden nach den französischen Astronomen *Charles Joseph Etienne Wolf* (1827 - 1918) und *Georges-Antoine-Pons Rayet* (1839 - 1906) benannt. Solche Riesensterne verraten sich in den Spektren von Galaxien beispielsweise durch eine starke Helium-II-Linie bei 164 nm (FUV, fernes Ultraviolett).

24.13.2 Windige Typen

Außerdem zeigen WR-Sterne breite Emissionslinien, was auf hohe Geschwindigkeiten in den Sternatmosphären schließen lässt: Von der Oberfläche dieser Stern Giganten strömen große Mengen Sternmaterie mit hoher Geschwindigkeit in die Weite des Alls: WR-Sterne produzieren heftige **Sternwinde**, die strahlungsgetrieben sind. Das Licht des Sterns bläst sozusagen die Hülle weg. Die dabei erreichten Windgeschwindigkeiten sind sehr hoch und betragen (in großer Entfernung) je nach Stern 400-5500 km/s, also fast bis zu 20 Mio. Stundenkilometern! Die Sternwinde treten im UV als charakteristische, so genannte *P-Cygni-Profile* in Erscheinung. WR-Sterne werden immer leichter, dadurch dass der Sternwind Materie wegträgt. Die durchschnittlichen Massenverlustraten betragen etwa $1 \text{ bis } 5 \times 10^{-5}$ Sonnenmassen pro Jahr (*Abbott et al. 1986*). Die 'stärksten Bläser' haben demnach in nur 20000 Jahren eine Masse so groß wie die unseres Heimatgestirns verloren!

24.13.3 Unterklassen der WR-Sterne

Astronomen unterteilen Wolf-Rayet-Sterne nach ihren spektralen Eigenschaften in zwei wichtige Klassen:

- ◇ **WN-Sterne** sind mit starken Linien von Stickstoff (Elementsymbol *N*) ausgestattet. Außerdem enthalten sie große Mengen Helium (*He*), aber wenig Wasserstoff (*H*).

- ◊ **WC-Sterne** zeigen hingegen kräftige Emissionslinien von Kohlenstoff (chemisches Elementsymbol *C*) und von Sauerstoff (*O*), aber keinen Wasserstoff mehr.

Die Existenz dieser schweren Elemente (N, O) in der Sternatmosphäre legt nahe, dass sich WR-Sterne in einem fortgeschrittenen Stadium der Sternentwicklung befinden, weil die fusionierten Elemente aus der Zentralregion nun bereits in der Sternhülle zu finden sind. Im Rahmen der Sternentwicklung ist bekannt, dass WR-Sterne Nachkommen von massereichen O-Sternen (siehe Spektraltyp O) mit Anfangsmassen ab etwa 20 Sonnenmassen sind (z. B. *Cappa et al. 2004*, astro-ph/0401571). Weiterhin wird angenommen, dass WR-Sterne durch das Stadium eines WN-Sterns laufen, um dann WC-Sterne zu werden (*Woosley et al. 2002*). Die WC-Sterne enden schließlich im Gravitationskollaps und sind favorisierte Kandidaten für besonders spektakuläre Sternexplosionen. Es können dabei unterschiedliche Formen von Sternexplosionen auftreten: WR-Sterne können in Supernovae Typ Ib oder Typ Ic explodieren oder sogar als Hypernova, die sogar die Supernovae in der Energiefreisetzung übertreffen. Bei der Explosion als Hypernova sind kollabierende Wolf-Rayet-Sterne mit den langzeitigen Gamma Ray Bursts assoziiert.

Es gibt - wie bei allen Sternen - zahlreiche weitere Terminologien bei WR-Sternen, die mit besonderen Eigenschaften des Sterns (beispielsweise *e*: starke Emissionslinien) oder der Einordnung innerhalb des Spektraltyps zusammenhängen, z. B. WN2, WC8, etc. Bekannte Vertreter von WR-Sternen sind die Objekte WR 98a, WR 104, WR 105, WR 134 und WR 135. Der Vertreter WR 135 ist beispielsweise sehr variabel und weist einen 'klumpigen' Wind auf. Weitere individuelle Eigenschaften einiger WR-Sterne werden in oben erwähnten Cappa-Papier beschrieben.

24.13.4 WR-Galaxien

In der Astronomie gibt es Galaxien mit einer besonders starken Sternentstehungsrate, die so genannten *Starburst-Galaxien*. In kurzer Zeit entstehen hier besonders viele Sterne, die typischerweise besonders massereich und leuchtkräftig sind. Wie bereits beschreiben entwickeln sich diese OB-Sterne zu WR-Sternen. Eine besondere Klasse der Starburst-Galaxien sind nun die **Wolf-Rayet-Galaxien** (WR-Galaxien). Astronomen erkennen sie anhand eines breiten Emissionsbuckels bei 464 bis 469 nm im Spektrum (s. z. B. *Leitherer 2004*, astro-ph/0408485). Einige Vertreter dieser Starburst-Galaxien sind: NGC 1614, NGC 2798 und NGC 3125.

24.14 w-Parameter

In der modernen Kosmologie führt man den w-Parameter (auch eos-Parameter genannt) ein, um Zustandsgleichungen (engl. *equation of state*, eos) unterschiedlicher Materie- und Energieformen zu vergleichen. Der w-Parameter ist gerade der Quotient aus Druck und Energiedichte (siehe Gleichung in Grafik 24.2).

24.14.1 Zahlenbeispiele

Die Abbildung 24.2 stellt außerdem den w-Parameter von verschiedenen Energieformen vergleichend gegenüber. Generell gilt, dass ein Parameter *w* kleiner als $-1/3$ eine **kosmische**

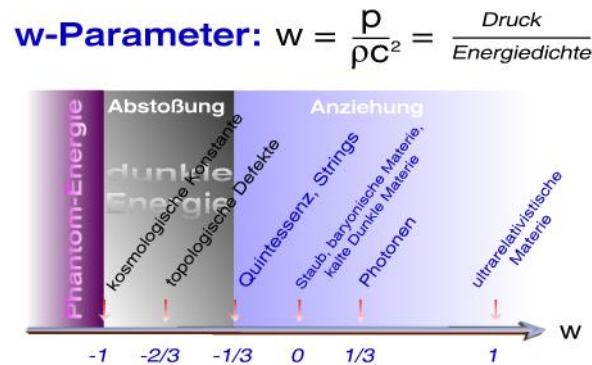


Abbildung 24.2: w-Parameter für verschiedene kosmische Materie- und Energieformen.

Beschleunigung hervorruft. Solche Zustandsgleichungen erfüllen alle Formen Dunkler Energie.

Die ultrarelativistische Materie befindet sich ganz rechts im Diagramm und hat den höchsten w-Parameter, $w = 1$. Bei einer solch exotischen Materieform entspricht die Schallgeschwindigkeit der Vakuumlichtgeschwindigkeit. Diese Materie gibt es z. B. in der Schale des Gravasternmodells. Die elektromagnetische Strahlung hat ebenfalls einen positiven w-Parameter, $w = 1/3$, und wirkt damit anziehend für den Kosmos. Die Photonen liefern kosmologisch betrachtet nur einen marginalen Beitrag im lokalen Kosmos. Gewöhnliche Materie, Staub und kalte Dunkle Materie haben einen verschwindenden w-Parameter, $w = 0$. Wie die Messdaten des Mikrowellensatelliten WMAP belegen ist die gewöhnliche Materie kosmologisch unerheblich, weil sie viel seltener ist als andere Energieformen ($\sim 4\%$). Den bei weitem größten Anteil hat die **Dunkle Energie**, die für 'kosmische Abstoßung' (*Repulsion*) sorgt: sie treibt das Universum auseinander und wirkt gewissermaßen antigravitativ. Als zeitlich unveränderliche kosmologische Konstante hat sie den *fixen* Wert von $w = -1$.

24.14.2 Tücken der Vakuuminterpretation

Was ist die physikalische Ursache dieser kosmologischen Konstante? Eine nahe liegende Interpretation ist, dass das Vakuum des Weltalls sich auf ganz großen Skalen als Lambda bemerkbar macht, weil aufgrund der Quantentheorie das Vakuum ja nie ganz leer ist. Diese Vakuuminterpretation der kosmologischen Konstante stellt die Physiker jedoch vor das schwerwiegendste Skalenproblem der Physik: die berechnete Energiedichte des kosmischen Vakuums weicht von dem beobachteten Wert um **120 Größenordnungen** ab! In dieser Diskrepanz sehen viele Kosmologen einen klaren Modifikationsbedarf in dieser Interpretation.

24.14.3 Ausweg Quintessenz?

Aus diesen Gründen verlor die kosmologische Konstante ihre Konstanz und wurde dynamisch: die Quintessenz-Modelle kamen zum Zuge. Hier hatten erste Modelle einen w-Parameter von $w = -1/3$. Für die kosmischen topologischen Defekte, die sich im frühen Universum in der Inflationsära bei einer spontanen Symmetriebrechung ausgebildet haben sollen, kann man ableiten, dass sie $w = -2/3$ haben. Auch sie treiben das Universum auseinander.

24.14.4 Extremes Phantom

Die Phantom-Energie unterschreitet den kritischen Wert von $w = -1$. Solche Energieformen verletzen die starke Energiebedingung (engl. *strong energy condition*, SEC). Man spricht auch von einer **super-negativen EOS**. Sie führt dazu, dass die Energiedichte über alle Grenzen mit der Zeit anwachsen kann, was das Universum in endlicher Zeit im Big Rip zerreißen würde! In der Zukunft wartet eine Singularität - keine rosigen Aussichten.

24.14.5 War w immer gleich?

Der w -Parameter kann auch einer zeitlichen Entwicklung unterliegen. Kosmologisch gesehen würde sich dann der w -Parameter von Epoche zu Epoche, von einem zu einem anderen Wert der kosmologischen Rotverschiebung verändern. Mathematisch drückt man das durch die Ableitung von w nach der kosmologischen Rotverschiebung aus und nennt diese Größe w' . Der triviale Fall $w' = 0$ bedeutet demnach eine Konstanz des w -Parameters, weil die Funktion $w(z)$ sich nicht mit z ändert.

Aktuell sprechen die Beobachtungsdaten, wie die Permanenzmessungen an extrem weit entfernten, explodierenden Weißen Zwergen (Supernovae Typ Ia) für eine zeitlich konstante Form von Dunkler Energie (*Riess et al. 2004*). Das verleiht zurzeit Einsteins Lambda die Favoritenrolle - dennoch werden sämtliche Varianten intensiv erforscht.

24.14.6 w -Parameter und Entwicklung mit Rotverschiebung

Phantomenergie, z.B. $w = -1.2$:	$\rho_P \propto a^{0.6} \propto (1+z)^{-0.6}$
kosmologische Konstante, $w = -1$:	$\rho_\Lambda \propto a^0 = \text{const}$
topologische Defekte, $w = -2/3$:	$\rho_D \propto a^{-1} \propto (1+z)$
Quintessenz, Strings, $w = -1/3$:	$\rho_Q \propto a^{-2} \propto (1+z)^2$
Baryonen, kalte Dunkle Materie, $w = 0$:	$\rho_S \propto a^{-3} \propto (1+z)^3$
Photonen, $w = 1/3$:	$\rho_\gamma \propto a^{-4} \propto (1+z)^4$
ultrarelativistische Materie, $w = 1$:	$\rho_b \propto a^{-6} \propto (1+z)^6$

Diese Übersicht oben zeigt die Energiedichten ρ der unterschiedlichen Materie- und Energieformen im Kosmos und deren Entwicklung mit der kosmologischen Rotverschiebung z . Das ist nichts anderes, als die **zeitliche Entwicklung der Energiedichten**. Dabei ist $a(z)$ der Skalenfaktor der Kosmologie (auch Weltradius $R(t)$). Technische Anmerkung: Die ganz oben notierte allgemeine Relation folgt aus der Definition des w -Parameters und der thermodynamischen Gleichung für Volumenarbeit $dE = -pdV$ durch Integration. Die Beziehung gilt nur, falls die einzelnen Komponenten *nicht miteinander wechselwirken*. Denn falls sich eine Energieform in die andere umwandelt, werden auch die Partialdrücke voneinander abhängig und die Berechnung wird komplizierter.

Interessant ist nun die Betrachtung der Skalierung der jeweiligen Energieform mit der Rotverschiebung z . Wir schauen uns Zeile für Zeile an und erkennen, dass w von oben nach unten größer wird. Entsprechend steigt die Potenz der Rotverschiebung in der Energiedichte an. Das bedeutet: Je größer w , desto größer die Energiedichte im frühen Universum bzw. desto schneller 'dünnt' die Energiedichte mit der kosmologischen Entwicklung aus.

Offensichtlich spielen Energieformen mit einem **kleinen und negativen w -Parameter** in frühen Epochen des Universums (kleines a bzw. großes z) keine wesentliche Rolle: ihre

Energiedichten sind zu Beginn der kosmologischen Entwicklung vernachlässigbar. Das ändert sich mit der Ausdehnung des Kosmos, wenn a anwächst bzw. z kleiner wird: Dann dominieren plötzlich die Formen Dunkler Energie (Phantomenergie, Λ oder Quintessenzen).

Ganz anders bei Energieformen mit **großem und positivem w -Parameter**: sie dominieren klar im frühen Universum, weil ihre Energiedichten bei großem z durch die hohe Potenz groß werden. Das macht klar, weshalb die materiedominierte Ära (Baryonen) und die Strahlungsära (Photonen) im frühen Kosmos angesiedelt sind. Viel später, bei kleinen z -Werten, werden Materie und Strahlung 'ausgedünnt' und dynamisch irrelevant für das expandierende Universum. Das ist direkt an der geringen Energiedichte der kosmischen Hintergrundstrahlung im lokalen Universum ablesbar. Anders formuliert: die kosmische Hintergrundstrahlung (und auch die baryonische Materie) hat in unserer Epoche keinen großen Einfluss mehr auf die Expansion.

Diese kleine Rechnung zeigt auch sehr schön, dass die Energiedichte, die mit der kosmologischen Konstante assoziiert ist, *unabhängig von der kosmologischen Rotverschiebung*, also **zeitlich konstant**, ist.

Die oben genannten Energieformen sind auch diskussionswert unter dem Gesichtspunkt so genannter **Energiebedingungen**. So verletzt beispielsweise die kosmologische Konstante ($w = -1$) die *starke* Energiebedingung ($w \geq -1/3$).

24.15 WurmLöcher

WurmLöcher sind Systeme aus einem Schwarzen und einem Weißen Loch und sehr spekulativ. Nichtsdestotrotz erlaubt die Theorie die Existenz dieser Gebilde, die jedoch noch nie astronomisch beobachtet wurden. Das eine Ende des Wurmlochs, das Weiße Loch, sollte sehr auffällig in Erscheinung treten, weil aus ihm Materie und Strahlung austritt! Es handelt sich um eine **sichtbare Singularität**, die eigentlich nach dem Prinzip der Kosmischen Zensur (*Roger Penrose*) verboten ist. Insofern kollidieren die Objekte mit Theoremen, die die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) vorsieht. Aus diesem Grund und auch in Ermangelung einer astronomischen Beobachtung, die ein Weißes Loch nahe legt, gelten WurmLöcher eher als gedankliches Konstrukt.

24.15.1 schicker Name in Einsteins Theorie

In der ART heißen WurmLöcher auch Einstein-Rosen-Brücke und können - falls sie verwandt sind mit der Schwarzschild-Geometrie - mit der Kruskal-Lösung dargestellt werden. Im Allgemeinen beschreiben Theoretiker WurmLöcher mit dem Ansatz einer sphärisch symmetrischen, statischen Metrik (vergleiche Birkhoff-Theorem). Es ist allerdings nicht klar, wie sinnvoll dieser Zugang ist. Zunächst ist er nur durch seine Einfachheit motiviert.

24.15.2 Exot hält die Tür auf

Um den schmalen Raumzeit-Kanal (engl. *throat*) zwischen Schwarzem und Weißem Loch passieren zu können, ist eine Form '**exotischer Materie**' erforderlich, die betrachtet von bestimmten Beobachtern eine *negative Energiedichte* aufweist (*Morris & Thorne*, 1988). Deshalb sind WurmLöcher keine Vakuumraumzeiten, sondern bedingen einen nicht verschwindenden Energie-Impuls-Tensor, nämlich denjenigen der exotischen Materie. Exotische Materie verletzt die so genannte gemittelte Null-Energie-Bedingung (engl. *averaged*

null energy condition, ANEC). Die Theorie zeigt, dass es Wurmloch-Lösungen gibt, die nur eine minimale Menge exotischer Materie erfordern, um passierbar (z. B. für einen Menschen) zu sein (Visser *et al.*, 2003). Möglicherweise bringen schon Quantenfelder (bisher nutzte man Skalarfelder) lokal diese Menge auf (Hochberg *et al.*, 1997).

24.15.3 Topologisches

Die **Topologien der Wurmlöcher** können je nach Lösung sehr unterschiedlich sein. Verschiedene Raumzeiten (Minkowski-Metrik, Robertson-Walker-Metrik etc.) lassen sich 'ankoppeln'.

Bisher lassen sich Wurmlöcher zumindest als interessante Objekte ansehen, die man mit den Mitteln der ART und auch Quantentheorie studieren kann. Ob sie in der Natur existieren ist fragwürdig. Vor allem verwundert, dass man **keinerlei kosmische Kandidaten** beobachtet hat, die nur durch Wurmloch-Lösungen erklärt werden könnten.

24.15.4 Auswahl wissenschaftlicher Veröffentlichungen

- ◇ Hochberg *et al.*, gr-qc/9701064
- ◇ Hochberg & Visser, gr-qc/9704082
- ◇ Visser & Hochberg, gr-qc/9710001
- ◇ Visser *et al.*, gr-qc/0301003
- ◇ Kuhfittig, gr-qc/0401048
- ◇ Kardashev *et al.*, astro-ph/0610441

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