
Lexikon

der



Astrophysik

von



Andreas Müller

aus dem

Wissensportal für Astrophysik

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

April 2007

Abbildungsverzeichnis

17.1 Penrose-Diagramm der Minkowski-Raumzeit.	7
17.2 Penrose-Diagramm eines kugelsymmetrischen Gravitationskollapses.	8
17.3 Penrose Paarbildung in der Ergosphäre.	8
17.4 charakteristische Radien eines Schwarzen Loches.	10
17.5 Hierarchie der Petrov-Typen.	15
17.6 Lichtquantenhypothese.	19
17.7 Pioneer 10 kurz vor dem Start.	27
17.8 Plancksche Strahlungsverteilung in Abhängigkeit der Wellenlänge für verschiedene Temperaturen.	34
17.9 Plancksche Strahlungsverteilung in Abhängigkeit der Strahlungsenergie für verschiedene Temperaturen.	36
17.10Katzenaugennebel NGC 6543.	42
17.11Planetarischer Nebel NGC 2440.	43
17.12HST-Bild des Adlernebels.	52
17.13Pulsar mit Magnetosphäre und Ausfluss.	55
17.14Crab-Nebel fotografiert mit HST 2005.	57

17 Lexikon P

17.1 Paradoxon

Paradox ist, wenn Herr Braun - um dem grauen Alltag zu entfliehen - blau macht um ins Grüne zu fahren. Sein Chef sieht rot, weil er nicht zur Arbeit erscheint, daher sieht Herr Braun die Welt nicht mehr durch eine rosa Brille, sondern für seine berufliche Zukunft schwarz. Jetzt weiß er's.

17.1.1 Jetzt mal im Ernst...

Paradoxa in der Physik sind Aussagen, die auf einen Widerspruch hinauslaufen, der nicht ohne weiteres auflösbar scheint.

Olbers-Paradoxon

So beschreibt das Olbers-Paradoxon in der Astronomie die Problematik, dass der Nachthimmel schwarz ist, obwohl doch das Licht sämtlicher Sterne, die dicht beieinander und hintereinander stehen, in der Summe einen hellen Himmel auch in der Nacht hervorrufen sollten. Dieses Paradoxon löst sich, wenn man berücksichtigt, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes zwar sehr hoch, aber doch endlich ist, so dass das Licht einiger Quellen **noch nicht** die Erde erreicht hat. Die **interstellare Extinktion** ruft durch das interstellare Medium (ISM) eine *Rötung* des Sternenlichts hervor. Beim Durchgang durch besonders dichte, fast opake **Dunkelwolken** ist die Extinktion zwar besonders hoch und kann zehn bis zwanzig Magnituden betragen! Das allein würde allerdings das Olbers-Paradoxon jedoch nicht lösen, weil in der Bilanz dennoch die Strahlung - bei anderen Farben - ankommen würde.

Zwillingsparadoxon

Ein anderes Paradox, das Zwillingsparadoxon, wird gerne in der Science-Fiction bemüht und hängt damit zusammen, dass aufgrund relativistischer Effekte der Zeitablauf verändert werden kann. Der Effekt heißt Zeitdilatation und kann mit den Methoden der Relativitätstheorie betrachtet werden. Das Paradoxe ist, dass die Zwillinge scheinbar austauschbar sind - aber wer ist dann der Ältere? Bei genauer Betrachtung zeigt sich jedoch, dass die Zwillinge bzw. ihre Bezugssysteme **nicht** austauschbar sind: das System des reisenden Zwillings ist nicht immer ein Inertialsystem. Einzelheiten werden unter dem Eintrag Zwillingsparadoxon beschrieben.

Informationsverlustparadoxon

In der Physik Schwarzer Löcher taucht das Informationsverlustparadoxon oder auch Entropie-Paradox auf. Es behandelt die Frage, was eigentlich mit der **Information** geschieht, die in ein Schwarzes Loch fällt. Denn was nach dem Einfall bleibt, sind nur maximal die Parameter:

Masse, Rotation und elektrische Ladung. Was ist mit der großen Informationsmenge passiert, die ins Loch fiel? Wurde sie vernichtet oder bleibt die Information in irgendeiner Form im Loch erhalten oder wird beispielsweise kodiert in der Hawking-Strahlung abgestrahlt? Die Lösung ist, dass Information aufgrund des Entropiesatzes der Thermodynamik nicht vernichtet werden kann; Information bleibt erhalten, so wie es die Quantentheorie fordert. Allerdings ist die Rekonstruktion aller Information erschwert. Dieses Paradoxon wird im Detail im Eintrag Bekenstein-Hawking-Entropie geklärt.

17.2 Paralleluniversum

Dieser schon oft in der Science-Fiction-Literatur bemühte Begriff, meint ein Universum oder viele Universen, die neben dem Unsrigen koexistieren könnten. Die sich ergebende Ansammlung von Universen nennt man auch **Multiversum**. Natürlich ist diese Hypothese sehr spekulativ, aber es gibt einige Szenarien in der modernen Kosmologie, die diese Möglichkeit in Erwägung ziehen.

17.2.1 Anregung durch die Quantentheorie

Die Vorstellung von Paralleluniversen ist schon älter und geht auf die **Wahrscheinlichkeitsaussagen der Quantentheorie** ('Schrödingers Katze') zurück: Quantenphysikalische Zustände werden mit der Wellenfunktion (Ψ , 'Psi') beschrieben. Das Betragsquadrat dieser Wellenfunktion kann gerade so interpretiert werden, dass sie eine Aufenthaltswahrscheinlichkeit für einen Zustand angibt. Beschreibt die Wellenfunktion ein Teilchen, so ist das Absolutquadrat der Wellenfunktion eine Wahrscheinlichkeitsverteilung dafür, das Teilchen an einem bestimmten Ort anzutreffen. Dort, wo die Wahrscheinlichkeitsverteilung ihr Maximum annimmt, besteht die höchste Wahrscheinlichkeit, das assoziierte Teilchen anzutreffen. Im *Orbital-Atommodell* sind die Orbitale gerade dreidimensionale Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Elektronen, die in der Atomschale den Kern umhüllen.

17.2.2 Rolle des quantenmechanischen Messprozesses

Der Zusammenhang zwischen **Wellenfunktion und Messprozess** wurde mit der Kopenhagener Deutung erklärt (*Max Born* 1925/26): Im Moment der Messung 'kollabiert' die Wellenfunktion auf einen bestimmten Zustand, derjenige der in Form der *Observable* beobachtet wird. 'Schrödingers Katze' wird tot oder lebendig aufgefunden.

17.2.3 Viele Welten

Die Viele-Welten-Theorie (*H. Everett* 1957) erweitert diese Sichtweise: Alle möglichen Zustände seien auch realisiert. Jede Realisierung existiere in ihrer eigenen Welt, ihrem eigenen Universum. In dem einen Universum ist 'Schrödingers Katze' tot, in dem anderen lebt sie.

Beflügelt durch diese Vorstellungen des '*Alles ist möglich, wahrscheinlich und irgendwo auch realisiert.*', gipfelte dies in einer nicht verschwindenden Wahrscheinlichkeit für ein koexistentes Paralleluniversum.

Eine präzisere Formulierung erhielt das Auftreten von Paralleluniversen in der Quantenkosmologie. In dieser Theorie wurde der Quantisierungsapparat, der bisher auf

Teilchen angewendet wurde, auf das Universum als Ganzes übertragen. Dieser Formalismus mündet in Wellenfunktionen für ein Universum und in der Möglichkeit ganze Universen mit Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren zu erzeugen bzw. zu vernichten. Der Vakuumzustand - 'kein Universum' - wird **void** genannt. Angeregte Zustände sind **Baby-Universen**. In Form eines Quantenschaums könnten viele Baby-Universen koexistieren. Auf der Quantenskala könnten sich einzelne **makroskopische Universen** gebildet haben, weil sie durch Inflation aus den Baby-Universen hervor gingen.

17.2.4 andere Branenwelten

Eine zweite Vorstellung, die den Terminus *Paralleluniversum* rechtfertigen würde, ist das Ekpyrotische Szenario von *Steinhardt & Turok* (2001). Sie verwenden den Branenformalismus der Stringtheorien und hatten die Idee, dass das durch Beobachtung nahe gelegte Urknall-Modell die Folge einer **Kollision zweier Universen** gewesen sei - nämlich unseres Universums und eines Paralleluniversums. In dieser 'Weltenkollision' (*Branenkollision*) hätten sich beide Universen komplett reorganisiert und restrukturiert. Die Stringtheorien erlauben bei einer Existenz von Extradimensionen neben den klassischen vier Dimensionen, dass die beiden Universen sogar in einer Extradimension sehr nah beieinander sind: Der 'kosmische Nachbar' könnte auf der Planck-Skala entfernt sein, also nur etwa 10^{-35} m!

Die avantgardistischen Kosmologie von *Steinhardt et al.* geht noch weiter und spekuliert über eine zyklische Wiederholung des Ekpyrotischen Szenarios. Dieses Zyklische Universum wird durch ein fluktuierendes Skalarfeld, das Radion, geleistet. Dieses Feld solle sich im Universum als Dunkle Energie manifestieren. Die Existenz Dunkler Energie wird von der Beobachtung (WMAP) gestützt. Sie macht sogar nach den aktuellen Messungen 74% aller Energieformen im Universum aus. Damit dominiert sie die Kosmodynamik zu späten Entwicklungsphasen des Universums und treibt die Expansion des Universums. Aktuell erhärten Permanenzmessungen der Dunklen Energie an Supernovae vom Typ Ia eher die kosmologische Konstante (Λ) als das Radion-Feld: die Beobachtungsdaten bevorzugen Λ als zeitlich konstante Form Dunkler Energie gegenüber zeitlich variablen Dunklen Energien - und das Radion ist zeitlich variabel. Andere solche als Quintessenzen bezeichnete Arten variabler Dunkler Energie sind topologische Defekte oder auch die Phantom-Energie.

17.2.5 Gibt es ein oder mehrere Paralleluniversen?

Abschließend lässt sich zum Thema *Paralleluniversum* sagen: Die Richtigkeit solcher Spekulationen, den Sprung vom Reißbrett der Theorie in die Natur, muss das Experiment bzw. die Beobachtung erweisen. Bislange ist es nicht gelungen Paralleluniversen nachzuweisen. Bis das geschieht müssen diese Szenarien unter dem Etikett **hypothetische, avantgardistische Kosmologie** laufen. Zumindest haben Kosmologen eine theoretische Vorstellung vom **Multiversum**, eine Hypothese, die geprüft werden kann.

17.3 Parsec

Dies ist eine äußerst gebräuchliche Entfernungseinheit in der Astronomie. Parsec ist die Kurzform von Parallaxensekunde und wird mit *pc* abgekürzt. *Parsec* ist ein zusammengesetztes Wort aus *Parallaxe* und *Sekunde*. Sie ist definiert als der Abstand, unter dem der Abstand von der Erde zur Sonne im Winkel von *einer* Bogensekunde erscheint.

Dabei beträgt der mittlere Abstand Erde-Sonne im Mittel etwa 150 Millionen Kilometern - das ist gerade eine Astronomische Einheit (engl. *astronomical unit*, **AU**). Rechnet man diese geometrische Definition mittels Trigonometrie nach, so erhält man:

$$1 \text{ pc} = 3.09 \times 10^{16} \text{ m} = 206264.8 \text{ AU} = 3.26 \text{ Lichtjahre} \quad (17.1)$$

Parsec ist gerade in der Profi-Astronomie sehr gebräuchlich und wird dort sogar häufiger verwendet, als das bekanntere Entfernungsmaß Lichtjahr. Die Einheit *pc* bekommt oft folgende Präfixe, um Zehnerpotenzen von Parsec auszudrücken:

- ◇ 1 kpc = 1000 pc,
- ◇ 1 Mpc = 10^6 pc,
- ◇ 1 Gpc = 10^9 pc.

17.4 partielle Ableitung

Eine Differentialoperation, die es in der Mathematik in der Infinitesimalrechnung mehrerer Veränderlicher gibt und die auch in der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) und Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) auf Tensoren angewendet wird.

$$\partial_\nu X^\mu \equiv X^\mu_{,\nu} = \frac{\partial X^\mu}{\partial x^\nu}$$

17.4.1 Anwendung auf Tensoren

Das Ergebnis der partiellen Ableitung eines Tensors ist kein Tensor mehr, wie man anhand der Transformationsgesetze eines Tensors nachweist! Man sagt daher:

*Die partielle Ableitung ist nicht **tensoriell**.*

17.4.2 Unterschied zur kovarianten Ableitung

Die partielle Ableitung ist immer mindestens in einem Term bei der kovarianten Ableitung enthalten. Die kovariante Ableitung eines Skalars (Tensor mit Typ (0,0)) ist identisch mit seiner partiellen Ableitung.

17.4.3 konkrete Berechnung

Praktisch geht man bei der partiellen Ableitung so vor, dass man die betreffende Größe wie gewohnt nach der Variable im Nenner ableitet, wobei *alle anderen Variablen konstant* gehalten werden.

17.4.4 Von der SRT zur ART: $\partial_\mu \rightarrow \nabla_\mu$

Die Gleichungen der SRT enthalten vielfach partielle Ableitungen. In der Regel kann man formal den Übergang zur ART vollziehen, indem man die partiellen Ableitungen (symbolisiert mit ∂) durch kovariante Ableitungen (symbolisiert mit ∇) ersetzt. Anhand der Definition der kovarianten Ableitung (siehe unter dem Eintrag dort) wird klar, warum das so ist: die

kovariante Ableitung enthält neben der partiellen Ableitung einen weiteren Term, der von den Christoffel-Symbolen ('Ableitungen der Metrik') abhängt. In der SRT, die auf einer flachen Raumzeit, der Minkowski-Metrik, basiert, verschwinden gerade diese Christoffel-Symbole. In der gekrümmten Raumzeit der ART verschwinden sie nicht mehr und müssen berücksichtigt werden.

17.5 Pauli-Prinzip

Ein nach dem österreichischen Quantenphysiker *Wolfgang Pauli* benanntes Verbot, das exklusiv für Fermionen (aber nicht für Bosonen) gilt. Es besagt, dass Fermionen nicht in allen Quantenzahlen übereinstimmen dürfen, also nicht denselben quantenmechanischen Zustand besetzen dürfen. Dieses Prinzip ist von hoher Relevanz für den Aufbau der Materie und erklärt quantentheoretisch das **Periodensystem der Elemente**, also die Quantenphysik der Elektronenhülle im Atom.

17.5.1 kein Verbot für Bosonen

Weil Bosonen diesem Verbot nicht unterliegen, können sie bei tiefen Temperaturen denselben Zustand besetzen: Es bildet sich dann ein **Bose-Einstein-Kondensat**. Siehe dazu auch Spin sowie Spin-Statistik-Theorem.

17.6 Penrose-Diagramm

Penrose-Diagramme, die in kompletter Bezeichnung eigentlich *Carter-Penrose-Diagramme* heißen sind unerlässliche Werkzeuge, um in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) die **Struktur einer Raumzeit im Unendlichen**, insbesondere ihre **kausale Struktur**, zu untersuchen.

17.6.1 Die Grundidee

Diese Technik wurde vom brillanten Mathematiker und Relativisten *Roger Penrose* 1964/65 entwickelt. Dabei dient eine spezielle mathematische Operation, die konforme Transformation, dazu, um sich eine konforme Metrik aus der zu untersuchenden Raumzeit zu beschaffen. Die Eigenschaften der Metriken sind aufgrund der Konformität übertragbar.

17.6.2 konforme Transformation

Das Penrose-Diagramm ist dann im Prinzip ein *Raumzeit-Diagramm* der **konform kompaktifizierten Raumzeit**. Das klingt komplizierter, als es ist: Kompaktifizierung bedeutet in diesem Zusammenhang, dass eine unendlich ausgedehnte, physikalische Raumzeit auf eine 'unphysikalische' Raumzeit in ein endliches Gebiet transformiert wird. Bei der Transformation bildet man vereinfacht gesagt unendliche Intervalle auf endliche Intervalle ab.

17.6.3 Wie geht's weiter?

Penrose-Diagramme werden studiert, indem man den Verlauf von Teilchenbahnen verfolgt: wo beginnen sie, wo enden sie? Diese Bahnen nennt man in der ART **Geodäten**. Die Relativitätstheoretiker unterscheiden *zeitartige Geodäten*, denen Teilchen und Beobachter mit endlicher Ruhemasse folgen; Nullgeodäten, die von elektromagnetischer Strahlung (Photonen, die Lichtquanten, haben verschwindende Ruhemasse) genommen werden und *raumartige Geodäten*, die 'unphysikalisch' bzw. tachyonisch sind, weil sie die Kausalität verletzen. Diese Geodäten werden in das Penrose-Diagramm eingezeichnet, um zu verstehen, wie sich die Teilchen in der Raumzeit bewegen.

17.6.4 verschiedene Unendlichkeiten

Die *Nomenklatur in Penrose-Diagrammen* ordnet bestimmten Punkten und Flächen im Diagramm ein Symbol zu. Sie sind assoziiert mit unterschiedlichen *Typen von Unendlichkeiten*:

- ◇ Die *vergangene zeitartige Unendlichkeit* ist ein Gebiet, wo die Zeitkoordinate gegen negativ unendlich geht, während die Raumkoordinate endlich bleibt. Hier beginnen zeitartige Geodäten. In der Symbolik wird dies mit einem großen oder kleinen Buchstaben i mit Index $-$ gekennzeichnet.
- ◇ Die *zukünftige zeitartige Unendlichkeit* ist ein Gebiet, wo die Zeitkoordinate gegen positiv unendlich geht, während die Raumkoordinate endlich bleibt. Hier enden zeitartige Geodäten. In der Symbolik wird dies mit einem großen oder kleinen Buchstaben i mit Index $+$ gekennzeichnet.
- ◇ Die *raumartige Unendlichkeit* ist ein Gebiet, wo die Raumkoordinate gegen positiv unendlich geht, während die Zeitkoordinate endlich bleibt. Bis hier erstrecken sich raumartige Flächen. In der Symbolik wird dies mit einem großen oder kleinen Buchstaben i mit Index 0 gekennzeichnet.

Diese bisher genannten Unendlichkeiten treten typischerweise als **Punkte** in Penrose-Diagrammen in Erscheinung, weil höhere Dimensionen oft aus Gründen der Überschaubarkeit unterdrückt werden.

Daneben gibt es auch Gebiete, die in Penrose-Diagrammen wie **Kanten** aussehen und an sich Flächen sind. Sie werden mit einem besonderem Symbol versehen: dem großen **Skript-I**. Relativisten sprechen es wie 'skrai' aus, was ein Neologismus ist, der aus der phonetischen Verkürzung für die englische Bezeichnung 'script i' folgt.

17.6.5 Noch mehr Unendlichkeiten

- ◇ Die *vergangene Nullunendlichkeit* ist ein Gebiet, wo die Differenz $t - r$ gegen negativ unendlich geht, aber die Summe $t + r$ endlich bleibt. Von hier aus kommen Nullgeodäten. In der Symbolik wird dies mit einem großen Skript-I mit Index $-$ (gesprochen 'skrai minus') gekennzeichnet.
- ◇ Die *zukünftige Nullunendlichkeit* ist ein Gebiet, wo die Summe $t + r$ gegen positiv unendlich geht, aber die Differenz $t - r$ endlich bleibt. In diese Gebiete erstrecken sich

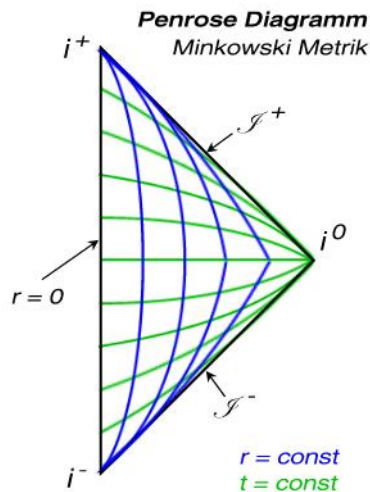


Abbildung 17.1: Penrose-Diagramm der Minkowski-Raumzeit.

auslaufende Nullgeodäten. In der Symbolik wird dies mit einem großen Skript-I mit Index + (gesprochen 'skrai plus') gekennzeichnet.

17.6.6 Transformation mit Tangens

Die konforme Transformation wird häufig mit der trigonometrischen Tangensfunktion umgesetzt. Der Tangens bildet endliche auf unendliche Intervalle ab, seine Umkehrfunktion macht entsprechend die inverse Transformation.

17.6.7 Beispiel 1: Minkowski-Metrik

Ein einfaches Beispiel für ein Penrose-Diagramm ist die flache Minkowski-Metrik der Speziellen Relativitätstheorie (Abbildung 17.1, zwei Dimensionen wurden unterdrückt!). Man kann das Minkowski-Linienelement sowohl in kartesischen, als auch in sphärischen Koordinaten ausdrücken. Auf der linken Kante, der Zeitachse, verschwindet die Radialkoordinate, $r = 0$. Man muss sich das Penrose-Diagramm um diese Achse rotiert vorstellen, um die beiden anderen, unterdrückten Dimensionen (ϕ , θ) zu erhalten. In der Abbildung sind außerdem Linien konstanten Radius und konstanter Zeit eingetragen. Die zeitartigen Geodäten verlaufen von unten, i^- , nach oben, i^+ . Die raumartige Unendlichkeit befindet sich rechts, i^0 . Radiale Nullgeodäten bilden einen Winkel von 45° mit der Vertikalen (einlaufend -45° , oben; auslaufend $+45^\circ$, unten).

*An dieser Winkelstellung von 45° kann man **immer** Nullgeodäten in Penrose-Diagrammen erkennen.*

17.6.8 Beispiel 2: kollabierender Kugelstern

Ein weiteres Beispiel ist ein (idealisierter) sphärisch symmetrischer Gravitationskollaps eines massereichen Sterns zu einem stellaren Schwarzen Loch – gezeigt in Penrose-Diagramm 17.2.

Penrose Diagramm
sphärischer Gravitationskollaps

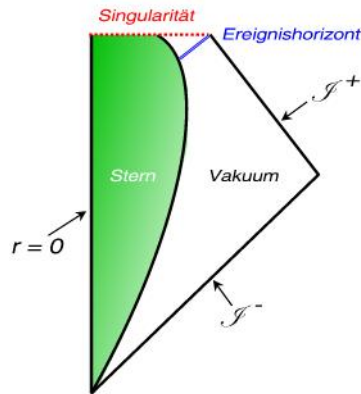


Abbildung 17.2: Penrose-Diagramm eines kugelsymmetrischen Gravitationskollapses.

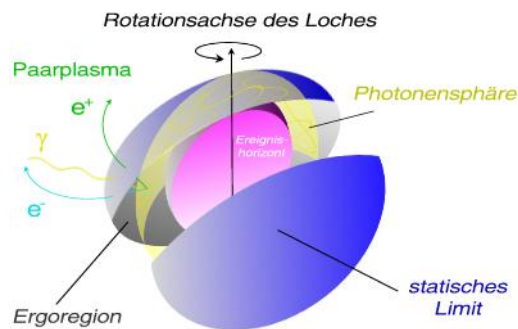


Abbildung 17.3: Penrose Paarbildung in der Ergosphäre.

Wiederum schließen die Nullgeodäten einen halben rechten Winkel mit der Vertikalen ein und markieren die Kanten der vergangenen (unten) und zukünftigen (oben) Nullunendlichkeit. Der Stern kollabiert und schrumpft immer mehr, bis sich der Ereignishorizont (blau) abschnürt. Er umschließt die intrinsische Singularität (rot), hier vom Schwarzschild-Typ. Das Gebiet zwischen roter und blauer Linie heißt *eingefangene Fläche* (engl. *trapped surface*).

17.6.9 Beispiel 3: Wurmloch

Das Penrose-Diagramm der Schwarzschild-Geometrie folgt durch Transformation auf *Kruskal-Szekeres-Koordinaten*. In diesem Diagramm (hier nicht gezeigt) erkennt man sehr gut die beiden Seiten des Wurmlochs, die durch die Einstein-Rosen-Brücke miteinander verbunden sind.

17.7 Penrose-Prozess

Der Relativist *Roger Penrose* hat darauf hingewiesen, dass es möglich sein könnte, aus einem rotierenden Schwarzen Loch Energie, genauer gesagt *Rotationsenergie*, zu gewinnen. Dieser Vorgang wird *Penrose-Prozess* genannt.

17.7.1 Wie kann das gehen?

Rotierende Schwarze Löcher werden in Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie durch die Kerr-Metrik beschrieben. Diese Raumzeit hat eine einzigartige Eigenschaft: sie besitzt eine Ergosphäre, die eine besonders schnelle Rotation des Raumes markiert. Penrose hatte sich nun das Gedankenexperiment ausgedacht, dass Teilchen in die Ergosphäre geschossen werden. Dort sollte jedes Teilchen in zwei Teile zerfallen, z. B. infolge eines radioaktiven Zerfalls: ein Teil fällt in das Schwarze Loch, der andere entweicht aus der Ergosphäre in den Außenraum. Die Situation zeigt Grafik 17.3.

Die Rechnungen zeigen nun, dass die ausströmende Materie **mehr Energie** haben kann als die eingefallene! Dies geschieht dadurch, dass das rotierende Schwarze Loch Drehimpuls verlieren kann, um ihn auf das entkommene Teilchen zu übertragen. Anders gesagt: **Das Loch verliert Rotationsenergie**. Die Energiegewinnung aus Kerr-Löchern scheint damit theoretisch möglich zu sein.

17.7.2 klassischer Penrose-Prozess

Im **klassischen Penrose-Prozess** (*Penrose et al.*, 1969) nehmen retrograd rotierende Teilchen (gegenläufige Rotation im Vergleich zum Kerr-Loch) in der Ergosphäre Zustände **negativer Energie** an, gemessen von einem Beobachter im Unendlichen. Allerdings können diese Teilchen nicht direkt ins Unendliche entkommen und dem System Energie entnehmen. Jedoch kann durch Streuprozesse zwischen zwei Teilchen in der Ergosphäre eines einen retrograden Orbit und damit negative Energie erhalten, während das andere seine Energie bekommt und forttragen kann.

17.7.3 PPP: Penrose-Paarbildung

Ein besonderes Szenario unter den Penrose-Prozessen ist die *Penrose-Paarbildung* (engl. *Penrose pair production*, **PPP**). Hier geht man davon aus, dass Photonen, die in der Photonensphäre gefangen sind, mit Photonen, die auf radialen Geodäten einlaufen kollidieren. Wie diese Reaktionsgleichung darstellt

$$\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-,$$

kann bei dieser Kollision ein Paarplasma aus Elektronen und Positronen erzeugt werden. Typischerweise wird angenommen, dass die Photonen im Orbit Energien im Bereich von MeV bis GeV haben, während das einlaufende Photon nur etwa 10 keV haben muss. Das würde nach $E = mc^2$ ausreichen, um aus hochenergetischem Licht leptonische Materie zu erzeugen.

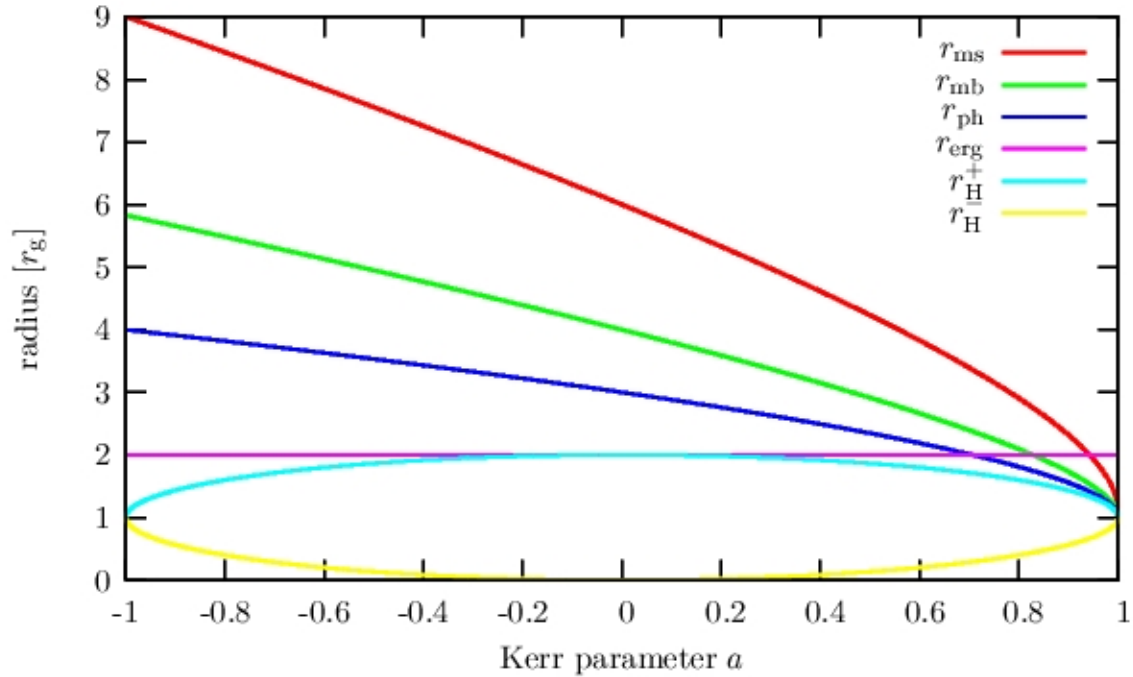


Abbildung 17.4: charakteristische Radien eines Schwarzen Loches.

17.7.4 Jetentstehung durch Gravitomagnetismus

Die Ergosphäre als Gebiet zwischen statischem Limit, r_{stat} , und Ereignishorizont erlangt erst bei hohen Rotationen eine signifikante Größe. Im Schwarzschild-Fall gibt es keine Ergosphäre und keine rotierende Raumzeit: diese Raumzeit ist statisch. Eine Darstellung aller charakteristischer Radien (siehe Diagramm 17.4) bei Schwarzen Löchern zeigt, dass der Photonenorbit erst bei einer Rotation von $a \sim 0.7M$ in die Ergosphäre eintaucht. In der Ergosphäre gibt es dann allgemein relativistische Effekte wie Frame-Dragging bzw. Lense-Thirring-Effekt - dort werden sie besonders stark. Das *gravitomagnetische Feld* stellt eine **gravitomagnetische Kraft** (als Pendant zur Lorentz-Kraft im magnetischen Feld) bereit, die vor allem nicht-äquatoriale Teilchenbahnen beeinflusst: sie werden zur *Lense-Thirring-Präzession* veranlasst. Insbesondere kann diese gravitomagnetische Wechselwirkung zu **einseitigen Jets** führen, wie man sie in vielen Quasaren und anderen Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) beobachtet. Denn die gravitomagnetische Kraft zieht vorzugsweise die Teilchen mit der Rotationsrichtung des Kerr-Loches mit. Dies bricht also die Reflexionssymmetrie zwischen oberer und unterer Hemisphäre. Damit kann die Einseitigkeit von Jets nicht nur auf Beaming infolge des Doppler-Effekts bei entsprechender Orientierung zurückgeführt werden, sondern auch gravitomagnetische Effekte. Eine gute Darstellung dieses Modells findet sich bei *R.K. Williams* 2002/2003, astro-ph/0203421 sowie in Anwendung auf die Quasare 3C 279 und 3C 273, astro-ph/0306135.

17.7.5 Blandford-Znajek-Mechanismus

Ein weiterer Prozess, der dem rotierenden Schwarzen Loch Rotationsenergie zu entziehen vermag, ist der so genannte Blandford-Znajek-Mechanismus. Im Unterschied zum Penrose-Prozess sind hier elektrische und vor allem magnetische Felder beteiligt. Die Extraktion der Rotationsenergie geschieht auf **elektromagnetischem Wege**.

17.7.6 Motor aktiver Galaxien

Penrose-Prozess und Blandford-Znajek-Mechanismus sind besonders wichtig für die Physik der AGN und das AGN-Paradigma, wonach die enorme Leuchtkraft aus der Akkretion von interstellarem Gas und Sternen auf ein supermassereiches Schwarzes Loch erzeugt wird ('AGN-Motor').

17.8 Pentaquark

Das Pentaquark ist ein völlig neues Quarksystem, das aus **fünf Quarks** besteht.

17.8.1 Vorlage aus der Theorie

Prinzipiell gestattet das Standardmodell der Teilchenphysik im Rahmen der Quantenchromodynamik (QCD) Teilchen, die aus mehr als nur zwei Quarks (Mesonen) oder drei Quarks (Baryonen) zusammengesetzt sind. Allerdings beobachteten die Experimentatoren jahrzehntelang nicht derartige 'Quarkbälle'.

Auf theoretischer Seite entwickelten *Diakonov, Petrov & Polyakov* 1997 im Rahmen des **chiralen Soliton-Modells** weitere Realisierungen von Teilchen (Papier hep-ph/9703373). Wesentlicher Ausfluss dieser Überlegungen war ein Schema von zehn baryonischen Teilchen (*Anti-Dekuplett*). Darunter befand sich ein Teilchen namens $Z^+(1530)$, einem Pentaquark.

17.8.2 Fund im Experiment: Θ^+

Motiviert durch diese theoretische Grundlage gelang schließlich im Jahr 2003 der japanischen LEPS-Kollaboration der Nachweis dieses Pentaquarks (Papier von *Nakano et al.*, hep-ex/0301020). LEPS (*Laser Electron Photon beamline at SPring-8*) produziert Photonen mit GeV-Energien (!) aus der inversen Compton-Streuung von UV-Laserphotonen an hochrelativistischen Elektronen der Energie 8 GeV. Die Elektronen erreichen diese Energien bzw. Geschwindigkeiten nach mehrmaligem Durchlaufen der ringförmigen Beschleunigungsstrecke im Teilchenbeschleuniger. Beim nachgewiesenen Pentaquark handelt es sich um das **leichteste Pentaquark**, das seither nicht Z^+ , sondern Θ^+ heißt. Im Experiment ging man so vor, dass man Gammastrahlen, also noch energiereichere, elektromagnetische Strahlung als Röntgenstrahlung, auf ein Kohlenstoff-Target (C-12) schoss. Ein Zerfallskanal dieser Reaktion besteht darin, dass die Gammastrahlen auf Neutronen (engl. *photo-production from neutron*) in den Atomkernen des Kohlenstoffs treffen und dabei Kaonen (*K-Mesonen*), eine bestimmte Form von Mesonen, erzeugen. In Vorwärtsrichtung, also wenn man von vorne in den Teilchenstrahl schaut, beobachteten die Experimentatoren eine **scharfe, baryonische Resonanz** bei 1.54 GeV. Eine Resonanz bezeichnet in diesem Zusammenhang einen molekulartigen Verbund aus Meson und Baryon. Dies wurde als ein neues Teilchen, das Pentaquark interpretiert. Es hat als Quarkgehalt zwei up-Quarks, zwei down-Quarks und

ein anti-strange-Quark. Die Quantenzahl *Seltsamkeit* ist also +1. Dieses Quarkkonglomerat zerfällt schließlich nach kurzer Zeit in ein Neutron (udd) und ein positiv geladenes Kaon (u anti-s).

17.8.3 noch eine Pentaquark gefunden: $\Xi(1860)$

Am CERN wurde bei der NA49-Kollaboration Evidenz für ein weiteres Pentaquark namens $\Xi(1860)$ gefunden (Alt et al. 2003, hep-ex/0310014). Es soll aus zwei d-Quarks, zwei s-Quarks und einem anti-u-Quark bestehen. Diese Entdeckung wurde kritisch hinterfragt (Fischer & Wenig 2004, hep-ex/0401014). Am US-amerikanischen Jefferson Lab konnten in Experimenten, die denjenigen der japanischen LEPS-Kollaboration vergleichbar waren, **keine Pentaquarks** hergestellt werden. Die Erforschung dieses neuen Gebiets der Teilchenphysik bleibt deshalb spannend.

17.8.4 Tetraquark auch gefunden: $X(3872)$

Wenige Monate nach der Entdeckung des ersten Pentaquarks gelang der Belle-Kollaboration um Choi et al. der Nachweis eines Tetraquarks (Papier hep-ex/0309032). Diese Teilchen bestehen aus vier Quarks. Der spezielle Name dieser baryonischen Resonanz ist $X(3872)$.

17.9 Periastron

Dies ist ein typischer Begriff aus der Himmelsmechanik, einer klassischen Disziplin der Astronomie. Das Periastron (grch. *apo*: entfernt von; grch. *astron*: Stern) ist der **nächste Punkt auf einer Bahn um einen Stern**.

Zur Beschreibung dieser Bewegung kommen die Kepler-Gesetze zum Einsatz, die mit der Newtonschen Gravitation mathematisch hergeleitet werden können. Bei engen Bewegungen um kompakte Objekte muss die Einsteinsche Gravitation, d. h. die Allgemeine Relativitätstheorie verwendet werden.

Zusammen mit dem Begriff Apastron ist Periastron besonders bei der Diskussion von *Doppel- und Mehrfachsternsystemen* gebräuchlich.

17.10 Perigäum

Dies ist ein typischer Begriff aus der Himmelsmechanik, einer klassischen Disziplin der Astronomie. Das Perigäum (grch. *peri*: ringsum; grch. *geo*: Erde) ist der **nächste Punkt auf einer Bahn um die Erde**.

Zur Beschreibung dieser Bewegung kommen die Kepler-Gesetze zum Einsatz, die mit der Newtonschen Gravitation mathematisch hergeleitet werden können. Bei engen Bewegungen um kompakte Objekte oder auch bei sehr präzise bestimmten Bahnen um die Erde (z. B. bei der Satellitennavigation oder **GPS**) muss die Einsteinsche Gravitation, d. h. die Allgemeine Relativitätstheorie verwendet werden.

Siehe auch Apogäum.

17.11 Perihel

Dies ist ein typischer Begriff aus der Himmelsmechanik, einer klassischen Disziplin der Astronomie. Das Perihel (grch. *peri*: ringsum; grch. *helios*: Sonne) ist der **nächste Punkt auf einer Bahn um die Sonne**.

Zur Beschreibung dieser Bewegung kommen die Kepler-Gesetze zum Einsatz, die mit der Newtonschen Gravitation mathematisch hergeleitet werden können. Bei engen Bewegungen um kompakte Objekte muss die Einsteinsche Gravitation, d. h. die hyperlinkartAllgemeine Relativitätstheorie verwendet werden. Einsteins Theorie kam historisch z. B. bei der *Periheldrehung des Merkurs* zum Einsatz: der innerste Planet im Sonnensystem ist der Gravitation der Sonne am stärksten ausgesetzt, so dass hier relativistische Effekte wichtig werden. Zwar gibt es eine Periheldrehung (genauer: eine Drehung der *Apsidenlinie*, also der Verbindungslinie von Perihel und Aphel, im Raum) auch in der Newtonschen Physik. Doch nur die Vorhersage von Einsteins Theorie stimmte exakt mit der Beobachtung überein. Dies war einer der ersten bestandenen Bewährungstests von Einsteins Relativitätstheorie.

17.12 periodisch

In der Astronomie verwendet man einige Eigenschaftswörter, um das zeitliche Verhalten der Strahlungsemission oder der Helligkeit einer kosmischen Quelle zu charakterisieren.

17.12.1 Definition von periodisch

Das Attribut *periodisch* bezeichnet eine Helligkeitsvariation, die **zeitlich regelmäßig wiederkehrt**. Dieser periodischen Helligkeitsvariation ist eine **Periodendauer** zugeordnet, die angibt, in welchem Zyklus sich die Variation wiederholt.

17.12.2 Eine Frage der Perspektive

Die Beurteilung, welchen Charakter die Helligkeitsvariation hat, ist **abhängig vom Beobachter**. Die Ursache dafür ist die Relativität des Zeitbegriffs, denn die Relativitätstheorie führt zu Effekten wie der Zeitdilatation. Das kann dazu führen, dass beispielsweise ein Helligkeitsvariation so stark zeitlich gedehnt wird, dass die Periode verschwindet.

Die Klassifikation ist ebenfalls eine **Frage der Zeitskala**. So können Phänomene periodisch auf einer Zeitskala von Millionen oder gar Milliarden Jahren sein - diese Periode würde nicht auffallen, wenn der Beobachter nur auf einer Zeitskala von Jahren oder tausend Jahren beobachtet.

17.12.3 Beispiele

In der Astronomie sind z. B. die Helligkeitsvariationen eines Pulsars, von einigen Veränderlichen sowie Novae, von Röntgendoppelsternen und von bestimmten X-ray burstern periodisch.

17.12.4 weitere Bezeichnungen

Andere Bezeichnungen für die Charakterisierung des zeitlichen Verhaltens sind quasi-periodisch, persistent und transient.

17.13 persistent

In der Astronomie verwendet man einige Eigenschaftswörter, um das zeitliche Verhalten der Strahlungsemission oder der Helligkeit einer kosmischen Quelle zu charakterisieren.

17.13.1 Definition von persistent

Das Attribut *persistent* bezeichnet eine **zeitlich konstante Helligkeit**.

17.13.2 Eine Frage der Perspektive

Die Beurteilung, welchen Charakter die Helligkeitsvariation hat, ist **abhängig vom Beobachter**. Die Ursache dafür ist die Relativität des Zeitbegriffs, denn die Relativitätstheorie führt zu Effekten wie der Zeitdilatation. So kann ein stark ausgeprägter Zeitdehnungseffekt die Ursache für die Persistenz der Quelle sein. Das ist jedoch sicher die Ausnahme. Von persistenten Quellen sprechen die Astronomen oft in der Stellarphysik und meinen damit einen Stern, der recht beständig Strahlung emittiert.

Die Klassifikation ist ebenfalls eine **Frage der Zeitskala**. So können Phänomene persistent auf einer Zeitskala von Jahren sein, aber eventuell nach Jahrzehnten völlig verschwinden.

17.13.3 Beispiele

In der Astronomie könnte man z. B. die Sonne als persistent bezeichnen - allerdings weist auch unser Heimatgestirn Helligkeitsvariationen (*Sonnenflecken*, *Sonnenflares*). Die Röntgenastronomen verwenden den Begriff persistent häufig, um eine länger andauernde Röntgenemission zu beschreiben.

17.13.4 weitere Bezeichnungen

Andere Bezeichnungen für die Charakterisierung des zeitlichen Verhaltens sind periodisch, quasi-periodisch und transient.

17.14 Petrov-Klassifikation

Die Petrov-Klassifikation ist ein Schema, um Raumzeiten nach unterschiedlichen Typen einzuordnen. Das Kriterium zur Klassifikation hängt mit einem bestimmten Tensor in der Allgemeinen Relativitätstheorie zusammen.

17.14.1 Präzise Definition

Diese Klassifikation basiert auf den Symmetrieeigenschaften des Weyl-Tensors. Die Theoretiker verwenden bei dieser Diskussion den so genannten Newman-Penrose-Tetraden-Formalismus, der fünf komplexe, skalare Größen, die **Weyl-Skalare**, liefert. Diese legen den

Hierarchie der Petrov-Typen

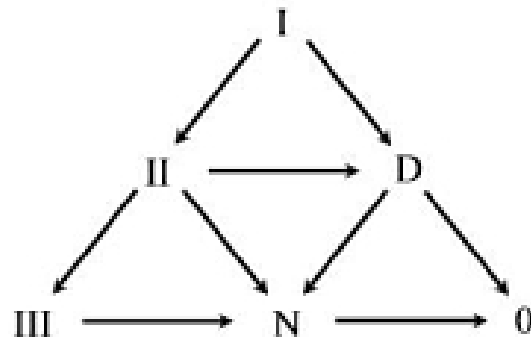


Abbildung 17.5: Hierarchie der Petrov-Typen.

Weyl-Tensor eindeutig fest. Die Weyl-Skalare sind wiederum Wurzeln der Petrov-Gleichung. Je nachdem, welche verschwinden, legt dies den **Petrov-Typ** fest. Die Relativitätstheoretiker unterscheiden

Typ I, II, D, III und N.

17.14.2 Dreieckshierarchie der Petrov-Typen

Roger Penrose schlug eine Dreieckshierarchie der Petrov-Typen vor, die die Raumzeiten in ihren Spezialisierungen unterscheidet (siehe Abbildung 17.5): In der Spitze des Dreiecks ist die Spezialisierung minimal, unten rechts ist sie maximal. Beispiel: Alle ungeladenen Schwarzen Löcher sind Vakuum-Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen. Dabei sind alle Schwarzen Löcher unabhängig davon, ob elektrisch geladen oder neutral, **Petrov-Typ D**.

17.14.3 Ordnung im Zoo der Raumzeiten

Ähnliche Schemata existieren für andere Nicht-Vakuum-Raumzeiten, die *Plebanski-Typologie* und *Karlhede-Klassifikation* heißen. Ziel dieser Klassifikationen ist eine Systematisierung der Raumzeiten der Allgemeinen Relativitätstheorie, um den Lösungsraum der Einsteinschen Feldgleichungen übersichtlicher zu machen und eventuell tiefere Einsichten in die Gravitationsphysik und Geometrie zu bekommen.

17.15 PG1159-Sterne

PG1159-Sterne bezeichnet eine spezielle Klasse veränderlicher Sterne, die nach dem Prototyp *PG 1159-035* benannt wurde. Dabei steht PG für den *Palomar Green Survey*, einer Beoberkungskampagne, in der diverse Himmelsobjekte entdeckt, beobachtet und katalogisiert wurden.

PG 1159-035 ist auch der Prototyp der *GW-Virginis-Veränderlichen*. Das sind Pulsationsveränderliche, die nicht-radiale Pulsationen aufweisen. Der Antrieb für die Pulsationen ist der so genannte κ - γ -Mechanismus (*Starrfield et al.* 1983).

17.15.1 Eigenschaften dieser Sterne

PG1159-Sterne sind an sich **extrem heiße, wasserstoffarme Post-AGB-Sterne** - oder aus der anderen Perspektive betrachtet, Vorläufersterne der Weißen Zwerge. PG1159-Sterne befinden sich im Übergangsstadium von Rotem Riesen nach Weißem Zwerg. Es ist für die Astronomen nicht einfach, die PG1159-Sterne zu finden, weil diese charakteristische Sternphase recht kurz ist. Als Konsequenz der Kurzlebigkeit sind diese Sterne selten anzutreffen. Derzeit sind nur knapp 50 PG1159-Sterne bekannt.

Die Effektivtemperaturen der PG1159-Sterne sind mit 75000 bis 200000 Kelvin extrem hoch. Die thermische Strahlung liegt bei diesen Oberflächentemperaturen im UV-Bereich (siehe auch Spektraltyp).

17.15.2 Weiter geht's mit...

... den **Roten Riesen**, denn in diesem Eintrag werden die PG1159-Sterne und ihre Sternentwicklung in vielen interessanten Einzelheiten vorgestellt. Ihre Rolle ist im Zusammenhang mit der **stellaren Nukleosynthese** von großer Bedeutung.

17.16 Phantom-Energie

Es lohnt sich, in der Klärung des Begriffs *Phantom-Energie* etwas weiter auszuholen und diese Form einer Dunklen Energie in einem allgemeineren Kontext zu beschreiben.

17.16.1 Erfindung, Niedergang und Renaissance von Λ

Die moderne Kosmologie ist ein besonders aufregender Forschungszweig der Astronomie. Das Universum als Ganzes konnte erst mit den mathematischen Werkzeugen der Allgemeinen Relativitätstheorie seit 1916 befriedigend beschrieben werden. Ein zunächst fixer Parameter, die kosmologische Konstante Λ , wurde von *Albert Einstein* 1917 eingeführt, um die Palette von Modell-Universen zu erweitern und insbesondere sein favorisiertes statisches Universum theoretisch erklären zu können. Nach der experimentellen Entdeckung der **Kosmodynamik** durch *Edwin Hubble* wurde die Lambda-Kosmologie zunächst verworfen. Die dynamischen Friedmann-Weltmodelle erlebten fortan eine Blütezeit. Im Zuge neuer Beobachtungsdaten, die 1998 eine **beschleunigte Expansion** des Universums belegten, bekam die Lambda-Kosmologie wieder Zulauf. Mehr noch: der Λ -Term wurde ein freier Parameter und 'kosmische Stellschraube' für die Kosmologie.

17.16.2 Zoo Dunkler Energien

Warum war jedoch die Energiedichte der kosmologischen Konstante gerade vergleichbar groß, wie diejenige der Materie? Um dieses **Koinzidenz-Problem der Kosmologie** zu lösen, wurden neue Formen Dunkler Energie erfunden. Im Zuge moderner Entwicklungen verlor die kosmologische Konstante ihre Konstanz. Die Stringtheorien stellten dazu weitere

Methoden zur Verfügung, um mithilfe von Extradimensionen und Branenwelten eine **zeitlich veränderliche Dunkle Energie** zu etablieren.

Wichtig ist, dass es oft *Dunkle Energie* genannt wird, aber durch verschiedene physikalische Mechanismen generiert wird. Mit Λ CDM meinen die Forscher eine Λ -Kosmologie (Λ), die neben einer Dunklen Energie *ohne* zeitliche Veränderlichkeit auch einen signifikanten Anteil kalter Dunkler Materie (*cold dark matter*, CDM) enthält. Der w -Parameter bei Λ CDM ist exakt $w = -1$.

Eine *zeitlich veränderliche* Dunkle Energie nennen die Kosmologen Quintessenz. Oft hört man hier das Akronym **QCDM**, das sich auf ein Quintessenz-Modell (Q) ebenfalls mit Beimischung kalter Dunkler Materie bezieht (engl. *Quintessence Cold Dark Matter Cosmology*). Der w -Parameter bei QCDM ist exakt $w = -1/3$.

Gewöhnliche baryonische Materie hat in beiden Kosmologien keine Bedeutung für die Dynamik des Universums! Das belegen die Beobachtungsdaten mit ganz verschiedenen, sogar unabhängigen Methoden.

17.16.3 Physikalische Interpretation der Dunklen Energien

- ◇ Eine favorisierte Deutung involviert das Quantenvakuum: **virtuelle Teilchenpaare** dieses Vakuums sollen einen niederenergetischen, fein verteilten Untergrund beisteuern. Kosmologisch trete dieses 'Teilchengewusel' als ein konstanter Λ -Term in Erscheinung. Diese Deutung klingt viel versprechend, ist leider in einer detaillierten Rechnung problematisch.
- ◇ Der Ansatz einer zeitlich veränderlichen kosmologischen Konstante geht bereits auf *M.P. Bronstein* (1933) zurück. Im **Cosmon-Modell** (1987) von *C. Wetterich* (Institut für Theoretische Physik, Universität Heidelberg) wird diese Idee wiederbelebt (Papier hep-th/9408025). Die Gravitation koppelt hier an ein Skalarfeld mit exponentiellem Potential.
- ◇ Im Rahmen der Branenwelt wird ein Quintessenz-Szenario von *Steinhardt et al.* entworfen, das auf einem Skalarfeld namens **Radion** basiert. Das Radion führt einen dynamischen Kosmos herbei, der in einem *Big Crunch* endet. Die Autoren sprechen hier von einer Ekpyrosis und meinen in Anlehnung an die griechische Mythologie einen 'Weltenbrand', in dem sich die Welt reinigt und neu erschafft. Das Radionfeld erlaubt sogar, dass die Ekpyrosis wiederholt stattfindet - ein Szenario, das Steinhardt und Kollegen Zyklisches Universum genannt haben. Die Leistung dieses Modells ist, dass es *erstmal*s den Urknall (Big Bang) *erklärte* (Publikation von *P.J. Steinhardt & N. Turok*, 2001, hep-th/0111030). Dennoch ist es eine mögliche Spekulation von vielen, die bislang nicht durch astronomische Beobachtungen gestützt werden kann.
- ◇ Der Erfindungsreichtum der Kosmologen ist groß: Im **Spintessenz-Modell** wird die Quintessenz durch ein rotierendes, komplexwertiges Skalarfeld repräsentiert. Die Rotation nimmt hier mit der Expansion ab und führt über diesen *Spin-down*-Mechanismus zur Abnahme der Dunklen Energie (*L.A. Boyle, R.R. Caldwell & M. Kamionkowski*, 2001, astro-ph/0105318).
- ◇ *S.B. Giddings* deutet hingegen die Dunkle Energie als **kompaktifizierte Extradimensionen**, die plötzlich dekompaktifizieren könnten. Dieses Szenario

würde in einer vollständigen Zerstörung unserer vierdimensionalen Welt enden. Dieses ebenfalls spekulative Modell erfordert eine höherdimensionale Welt, wie sie beispielsweise in den Stringtheorien gefordert wird, allerdings **mit kosmologischer Konstante** (Papier: *The fate of four dimensions*, 2003, hep-th/0303031).

- ◇ Die neuste Variante stammt von *R.R. Caldwell, M. Kamionkowski & N.K. Weinberg*: die **Phantom-Energie** (Publikation: astro-ph/0302506). Der entscheidende Unterschied ist, dass die Expansionsrate des Universums in Lambda- und Quintessenz-Kosmologien *konstant* bleibt oder stetig *abnimmt*; in Phantom-Energie-Modellen *nimmt sie zu*! Die Folgen sind dramatisch: Weil in endlicher Zeit die Phantom-Energiedichte gegen unendlich geht, wird alles zerrissen! Diesen **Big Rip** kann nichts überstehen: weder Galaxienhaufen, noch Galaxien, weder die Milchstraße, noch Schwarze Löcher, das Sonnensystem oder die Erde, nicht einmal Atome, Atomkerne und Elementarteilchen überdauern dieses Ereignis. Der Grund liegt darin, dass die Phantom-Energie dann alle Naturkräfte übertrumpft. Auf der Planck-Skala mögen Effekte auftauchen, die dieses Szenario modifizieren. Bislang ist dieses weitere spekulative Modell noch konsistent mit den aktuellen Beobachtungsdaten (WMAP). Für das Verhältnis von Druck und Energiedichte der Phantom-Energie (Definition des w -Parameters) legen die Beobachtungen einen Wertebereich von -1.22 bis -0.78 nahe (*Krauss et al.*, astro-ph/0305556). Der Big Rip würde sich bei einem angenommenen w -Parameter von $w = -1.2$ in etwa 50 Milliarden Jahren ereignen.

17.16.4 Λ ja, Quintessenzen und Phantom nein

Bei aller 'Spekuliererei und Eselei': Die aktuellen Beobachtungsdaten (Februar 2004 und November 2006) des Weltraumteleskops *Hubble* verleihen Einsteins kosmologischer Konstante wieder hohes Gewicht. Denn die Messdaten hochrotverschobener Supernovae vom Typ Ia mit kosmologischen Rotverschiebungen zwischen 0.2 bis 1.6 belegen, dass die Dunkle Energie auf den betrachteten kosmologischen Distanzen zeitlich kaum variierte (*Riess et al.* 2004, astro-ph/0402512 und *Riess et al.* 2006, astro-ph/0611572). Sie hatte **schon vor etwa neun Milliarden Jahren den heutigen Wert**. Der w -Parameter liegt also sehr nahe bei -1. Das lässt nur den Schluss zu, dass, wenn überhaupt die Dunkle Energie zeitlich variiert, dann nur sehr langsam. Das macht den Big Crunch unwahrscheinlich und die ewige, beschleunigte Expansion des Universums wahrscheinlich. Wir werden also unsere Rentenprobleme in Deutschland lösen müssen.

17.17 Photon

Ein alternativer Begriff für Photon ist Lichtteilchen. Photonen sind demnach 'Lichtpakete' die Quantencharakter haben.

17.17.1 Der Wegbereiter Maxwell

Etwas präziser gesagt ist ein Photon das Austauschteilchen, Feldquant oder **Eichboson** der elektromagnetischen Wechselwirkung. Vor dieser Erkenntnis im 20. Jahrhundert war die Auffassung, dass Licht aus klassischen Wellen besteht. Diese klassische (unquantisierte) Beschreibung gelang in der Elektrodynamik, die der schottische Physiker *James Clerk Maxwell*

Lichtquantenhypothese

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

Nobelpreis für Physik 1921:

Albert Einstein

Abbildung 17.6: Lichtquantenhypothese.

(1831 - 1879) im 19. Jahrhundert begründet hat. Er fand vier Gleichungen, die elektrische Felder in Beziehung setzen zu Magnetfeldern: die **Maxwellschen Gleichungen**. Die Felder werden mathematisch als Dreiervektoren beschrieben. Die Maxwell-Gleichungen kann man entweder in integraler oder in differenzieller Form notieren.

Aus den vier Maxwell-Gleichungen kann man mit relativ wenig mathematischem Bemühen eine **Wellengleichung** ableiten. Das ist gerade die **Bewegungsgleichung der elektromagnetischen Welle** ist. Aus der Maxwell-Theorie folgt, dass sich diese Welle mit der Lichtgeschwindigkeit c fortpflanzt. In die Wellengleichung kann man die Komponenten des Magnetfeldes, des elektrischen Feldes und deren Potentiale (magnetisches Vektorpotential, elektrisches Potential) einsetzen. Im Rahmen der klassischen Elektrodynamik ist Licht eine unendlich ausgedehnte elektromagnetische Welle, die sich auch im Vakuum ausbreiten kann. Im strengen Sinne ist dies **noch kein Photon**, weil es nicht diskret, sondern kontinuierlich ist.

17.17.2 Von der klassischen Welle zum Lichtquant

Den nächsten entscheidenden Beitrag lieferte um 1900 der Physiker *Max Planck* (1858 - 1947). Er deutete - in einem 'Akt der Verzweiflung' wie er es umschrieb - die Wärmestrahlung von Körpern bestimmter Temperatur (Schwarze Körper) mit kleinen Oszillatoren, die diskrete Energiezustände einnehmen können. Daraus folgte die berühmte Plancksche Strahlungsformel.

Doch erst *Albert Einstein* (1879 - 1955), der Begründer der Relativitätstheorie, war mutig genug, Plancks Diskretisierung viel allgemeiner zu sehen: Einstein postulierte die **Lichtquanten**. Die elektromagnetische Strahlung solle für jede Strahlungsenergie quantisiert sein. Sie könne nur Vielfache des Planckschen Wirkungsquantums annehmen – dieser Gleichung folgend

$$E = h\nu = \hbar\omega = \frac{hc}{\lambda}.$$

Mit dieser Hypothese deutete Einstein in seinem Wunderjahr 1905 erfolgreich den **Photo-Effekt**, also die Fähigkeit von Licht Elektronen aus einer Oberfläche zu schlagen. Quantisierung war noch kein allgemein akzeptiertes Phänomen, weshalb die Deutung des *Franck-Hertz-Versuchs* mit Lichtquanten bahnbrechend war. Für diese Lichtquantenhypothese erhielt Einstein 1921 den Nobelpreis für Physik. In gewisser Weise muss Einstein deshalb als Mitbegründer (nicht als Gegner, wie fälschlicherweise oft zu lesen

ist!) der Quantentheorie angesehen werden. Das, was in später von der Quantentheorie abschreckte, war die Wahrscheinlichkeitsinterpretation und im Speziellen die Kopenhagener Deutung ('*Gott würfelt nicht!*').

17.17.3 Farbe gibt's nur in Häppchen

Je nach seiner *kinetischen Energie*, die man als **Strahlungsenergie** identifiziert, tritt das Photon (aufsteigend mit zunehmender Energie) als Radioquant, Mikrowellenquant, Infrarotquant, optisches Quant, Ultraviolettquant, Röntgenquant oder Gammaquant in Erscheinung. Die Lichtenergie ist gerade ein Maß für die **Farbe**. Die Energie des Quants E berechnet sich aus der Strahlungsfrequenz ν oder Wellenlänge λ , wobei h eine fundamentale Naturkonstante ist: das **Plancksche Wirkungsquantum**, mit der Einheit einer Wirkung (Energie \times Zeit, also Joulesekunden im SI):

$$h = 6.62608 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

An der Gleichung oben rechts sieht man also direkt die **Quantelung des Lichts**, also Portionierung in diskrete 'Energiepakete', nämlich in Vielfachen von h . Im modernen Sprachgebrauch sind solche Lichtpakete bereits **Photonen**.

17.17.4 Ursprung des Begriffs Photon

Die Bezeichnung *Photon* wurde erst 1926 von dem US-amerikanischen Chemiker *Gilbert Newton Lewis* (1875 - 1946) erfunden. Er schrieb (Nature **118**, 874, 1926):

I therefore take the liberty of proposing for this hypothetical new atom, which is not light but plays an essential part in every process of radiation, the name photon.

Wie aus dem Zitat hervorgeht, meinte Lewis mit Photon **zunächst nicht** das Lichtquant, sondern ein neues, hypothetisches Teilchen. Während sich seine neue Hypothese nicht durchsetzte, blieb der Begriff des Photons und setzte sich als Bezeichnung für das Lichtquant durch. Schon 1930 benutzt Lewis die Begriffe Photonen und Lichtquanten explizit synonym (siehe seine Veröffentlichung mit dem Titel *Quantum kinetics and the Planck equation*, Phys. Rev. **35**, 1533, 1930).

Der Begriff Photon passt wegen seiner griechischen Bedeutung, *phos*: 'Licht', hervorragend.

17.17.5 Quantenfeldtheorie des Lichts

Anfang des 20. Jahrhunderts war der Siegeszug der Quantentheorie nicht aufzuhalten: Viele Physiker trieben die neue quantisierte Theorie voran und fanden andere physikalische Größen (Teilchenspin etc.), die ebenfalls quantisiert sind. Schließlich wurde die Quantenelektrodynamik (QED) entwickelt. Sie war die erste erfolgreich formulierte Quantenfeldtheorie von allen. Die QED hat eine relativ einfache Gruppenstruktur und basiert auf der unitären Symmetriegruppe $U(1)$.

Anschaulich kann man sich den Austausch von Photonen in **Feynman-Diagrammen** vorstellen. Wenn elektrische Ladungen miteinander wechselwirken werden **virtuelle Photonen** ausgetauscht, die so kurzlebig sind, dass sie nicht direkt nachgewiesen werden können. Photonen koppeln immer an elektrische Ladungen: sie sind die 'Botenteilchen' oder **Austauschteilchen** der elektromagnetischen Wechselwirkung.

17.17.6 Eigenschaften des Photons

Eine wichtige Eigenschaft des Photons ist, dass es **Ruhemasse null** hat und deshalb überhaupt die Lichtgeschwindigkeit c erreichen kann. Teilchen mit endlicher Ruhemasse werden nämlich durch einen kinematischen Effekt der Spezielle Relativitätstheorie am Erreichen von c gehindert (siehe auch Tardyon). Dies wird häufig - auch in vielen Physik-Lehrbüchern - etwas unglücklich mit 'relativistischem Massenzuwachs' bezeichnet. Es ist jedoch nicht die Masse, die anwächst, sondern der Impuls! Treffender wäre also der Begriff 'relativistische Impulszunahme'. Die Konsequenz der Tatsache, dass sich Photonen mit c bewegen, ist faszinierend: Photonen altern nicht! Der **Lorentz-Faktor** (siehe dazu Lorentz-Transformation) divergiert im Falle $v = c$: die Zeitdilatation wird daher unendlich und die Längen- oder Lorentz-Kontraktion geht gegen null! Alle Luxonen unterliegen diesem Effekt 'ewiger Jugend'. Die Kosmetikindustrie hat leider noch keine Möglichkeit gefunden, sich dies zunutze zu machen. Die Photonen leben also in einer **zeitlosen Welt**.

Weiterhin besitzen Photonen **Spin 1** und gehören deshalb zur Teilchengruppe der Bosonen. Sie unterliegen nicht dem Pauli-Prinzip, d. h. beliebig viele Photonen können denselben quantenmechanischen Zustand bevölkern (siehe auch Spin-Statistik-Theorem). Das ermöglicht z. B. erst den **Laser**, weil sich hier viele Photonen im gleichen Zustand aufhalten. Photonen zählen wegen der Spin-1-Eigenschaft zu den **intermediären Vektorbosonen**: Vektorbosonen haben Spin 1; intermediär sind alle Austauschteilchen. Man sagt auch: Photonen sind die **Eichbosonen der elektromagnetischen Wechselwirkung**.

Außerdem ist das Photon selbst elektrisch neutral, farbungeladen und *punktförmig* wie die Quarks und Leptonen, d. h. es weist keine weitere Substruktur oder Zusammensetzung auf.

17.17.7 Boten aus der Tiefe des Weltraums

Die Photonen sind die **wesentlichen Informationsträger der Astronomie**, tragen sie doch über Milliarden von Lichtjahren hinweg die Informationen astrophysikalischer Objekte (verschlüsselt in ihrer Energie, Richtung, Anzahl, Polarisation) bis zu unseren Strahlungsdetektoren auf der Erde. Die Astronomie hat sich je nach Energiedomäne der Photonen verzweigt in Radioastronomie, Infrarotastronomie, dem Archetypus der optischen Astronomie, Röntgen- und Gammaastronomie. Jede Teildisziplin hat ihre besonderen Messtechniken. Die CCD-Kameras, im Prinzip eine riesige Digitalkamera mit einem metergroßen Teleskop als gigantisches Objektiv, sind für alle Spektralbereiche empfindlich. CCDs beruhen gerade auf dem erwähnten Photo-Effekt, weil die auf den Pixeln auftreffenden Photonen elektrische Ströme aus Elektronen in jedem Pixel produzieren; diese Ströme werden verstärkt und in ein Bild umgewandelt. Eine Synthese bzw. Synopsis der gewonnenen CCD-Daten liefert dem Astronomen eine puzzleartig zusammengesetzte Vorstellung von kosmischen Objekten, das der theoretische Astrophysiker mit physikalischen Gesetzen zu erklären versucht.

Selbstverständlich sind neben den Photonen auch andere Teilchen hinzugekommen, die das Fenster ins Universum beträchtlich vergrößert haben. So bildet die **Neutrinoastronomie** ein modernes Betätigungsfeld, dass uns sogar aus bisher verborgenen Bereichen Informationen zukommen lässt. Zu diesen verborgenen Stätten gehört das Innere von Sternen, Supernovae-Explosionen und Hypernovae. Es ist zu erwarten, dass bald Akkretionsflüsse nahe kompakter Objekte und relativistische Jets dazukommen werden.

Die hochenergetischen Teilchen der kosmischen Strahlung (Protonen, α -Teilchen,

Elektronen, Myonen etc.) erweitern die Palette der kosmischen Informationsboten.

Mit Spannung erwarten die Physiker, insbesondere die Relativisten, die experimentelle, *direkte* Messung von Gravitationswellen. Dabei handelt es sich um Störungen in den Krümmungen und Glättungen der Raumzeit, die sich ebenfalls gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten sollen. Sie würden wertvolle Informationsträger sein, weil man mit ihnen sogar tiefer ins Universum blicken kann, als mit elektromagnetischer Strahlung. Denn Gravitationswellen passieren die elektromagnetische Barriere der kosmologischen Rekombinationsepoche. Mit ihrer Hilfe könnten Astronomen vielleicht bis zum Urknall blicken!

Die **Staubastronomie** ist ein weiterer Bereich, in dem die Eigenschaften interstellaren und intergalaktischen Materials untersucht werden. Staub (engl. *dust*) bezeichnet in der Astronomie einfache bis komplexe Verbindungen mit Durchmessern von Bruchteilen eines Mikrometers bis etwa einem Mikrometer. In erdnahen Regionen (Sonnensystem) ist das direkte Studium von Staubteilchen möglich (siehe Zodiakallicht), in fernen Regionen wird indirekt auf den Staub mithilfe sekundärer Teilchen, wiederum den Photonen, geschlossen. Dies begründet sich durch die vielfältigen Reaktionen, die Photonen mit Staubteilchen eingehen (Streuung, Anregung zur Emission, Absorption, Extinktion).

17.17.8 Photonen verwandeln sich

Solange die Erhaltungssätze der Teilchenphysik erfüllt sind, können Photonen sich in andere Teilchen umwandeln. Ein bekanntes Beispiel ist die **Paarbildung**, wo aus Gammaphotonen Materie werden kann, nämlich z. B. Elektron und Positron. Welche Teilchenpaare materialisieren können, hängt von der Ausgangsenergie ab, die die Photonen mitbringen (siehe Reaktionsgleichung im Eintrag Penrose-Prozess).

Ein ähnlicher Vorgang bestünde in der **Oszillation von Photonen in die hypothetischen Axionen**. Axionen sind pseudoskalare Nambu-Goldstone-Bosonen, die die chirale Peccei-Quinn-Symmetrie der Quantenchromodynamik brechen. Dieser Primakoff-Mechanismus wäre von großem Belang für die Teilchenphysik und Kosmologie. Im Gegensatz zur Umwandlung in Leptonen, ist die Umwandlung in Axionen eine bisher nicht bestätigte Hypothese.

17.18 Photonenorbit

Es handelt sich um einen ausgezeichneten Orbit um Schwarze Löcher für Photonen (Lichtteilchen), der **instabil** ist. Die Photonen können auf diesem Orbit im Prinzip unendlich lange das Schwarze Loch umkreisen, jedoch müssen sie zuvor unter geeigneter Richtung in diesen Orbit injiziert werden.

17.18.1 Photonenorbit und Penrose-Prozess

Es gibt einen bestimmten Penrose-Prozess, bei dem im Photonenorbit eingefangene Photonen relevant sind, um mit radial einfallenden Photonen ein **Paarplasma** zu erzeugen. Das so erzeugte (leptonische) Paarplasma könnte die Jets speisen, die in unmittelbarer Umgebung von Schwarzen Löchern entstehen.

17.18.2 Berechnung des Photonenorbits

Die Definition des Photonenorbits ist

$$r_{\text{ph}} = 2M \left[1 + \cos \left(\frac{2}{3} \arccos(-a/M) \right) \right],$$

wobei a der Kerr-Parameter und M die Masse des Schwarzen Loches sind. Wie in der Allgemeinen Relativitätstheorie üblich, wurden geometrisierte Einheiten ($G = c = 1$) verwendet, so dass der Photonenorbit in Einheiten der Masse M angegeben wird.

Es ist leicht nachzurechnen der Photonenorbit für die Schwarzschild-Lösung ($a = 0$) bei 3 Gravitationsradien (oder 1.5 Schwarzschildradien) liegt. Für den maximalen Kerr-Fall ($a = M$) ist der Photonenorbit identisch mit dem Ereignishorizont und liegt bei nur einem Gravitationsradius.

17.18.3 Photonensphäre \neq Photosphäre

Als **Photonensphäre** bezeichnet man dementsprechend die Fläche um ein Schwarzes Loch, auf der alle instabilen Photonenorbits liegen. Dies ist bitte nicht zu verwechseln mit der Photosphäre von Sternen, wie der Oberfläche von der Sonne, aus der der Großteil der Strahlung stammt (s. u.).

17.19 Photosphäre

Die Photosphäre bezeichnet eine bestimmte Schicht in Sternen, und zwar diejenige, aus der der **größte Teil des Lichts** (grch. *phos*) kommt. Wenn wir Sternenlicht sehen, beobachten wir eigentlich die Photosphären der Sterne. Ein Verständnis von den Vorgängen in der Photosphäre ist daher von großer Bedeutung für die Astronomie.

17.19.1 Sternspektren

Wenn Astronomen die Sternspektren analysieren, können sie aus Vorhandensein und Breite der Spektrallinien auf die chemische Zusammensetzung der Photosphäre schließen. Das Element Helium (grch. *helios*: Sonne) wurde auf diese Weise in Sonnenspektren entdeckt. Helium ist die 'Asche' des Wasserstoffbrennens (siehe pp-Kette) und gelangt durch Konvektion auch in die Photosphäre. Dort absorbiert es Strahlung aus dem Sterninnern, was als bestimmte Absorptionslinien, den *Fraunhofer-Linien*, beobachtet werden kann. Die Sternfarbe ist ebenfalls ein Resultat der photosphärischen Vorgänge und führt auf wichtige Zustandsgrößen wie Effektivtemperatur und Spektraltyp. Auch die Leuchtkraft aus der Analyse der (photosphärischen) Sternspektren gewonnen.

17.19.2 Ganz schön dünn!

Die Photosphäre beginnt an der Materieoberfläche der Sterne und reicht **nur einige hundert Kilometer** tief in das Sterninnere hinein - das ist verglichen mit typischen Sternradien sehr wenig. Betrachten wir als Beispiel die Sonne: sie hat einen Radius von knapp 700000 km; die Schichtdicke der Photosphäre beträgt nur etwa 200 km. Der Volumenanteil der Photosphäre beträgt nur knapp 0.1%, doch fast alle Photonen kommen von dort.

17.19.3 Warum schafft es das Licht aus dem Sterninnern nicht direkt zu uns?

Von außen nach innen kommend wird ein Stern immer heißer. Als Konsequenz wird das Sternplasma inwärts immer stärker ionisiert. Ein Plasma ist undurchsichtig, wie jede Kerzenflamme demonstriert, weil man durch Kerzenflammen nicht schauen kann. Die Astrophysiker nennen diese Eigenschaft von Plasma *optisch dick*. Die optische Tiefe ist in dem Sternplasma so groß, dass die Lichtteilchen aus dem Sternkern nicht direkt aus dem Stern austreten können. Sie werden im Sternplasma gestreut, absorbiert und reemittiert und finden erst nach einiger Zeit den Weg in die Photosphäre. Bis sie dort ankommen, haben sie sich jedoch auch verändert: Die hochenergetischen Gammaphotonen, die tief im Sterninnern aus thermonuklearer Fusion erzeugt wurden, sind nun **Ultraviolett- und optische Photonen** geworden, die vergleichsweise weniger Energie haben (Anmerkung: Die Röntgenstrahlung der Sonne kommt aus der extrem heißen Korona, also nicht von der Sonnenoberfläche.).

Dennoch können Astronomen tief ins Innere von Sternen schauen. Sie verwenden dazu allerdings nicht Licht, sondern **Neutrinos**. Diese sehr leichten, schwach wechselwirkenden Teilchen können fast ungehindert das Sternplasma passieren. Das macht ihre Detektion auch sehr schwierig; dennoch ist das gelungen. Ihre Eigenschaften (kinetische Energie und Leptonenfamilie) geben den Astronomen direkt Auskunft über das Milieu im Sternkern und über die Art der Fusionsprozesse, die dort ablaufen. Auch bei Supernovae tragen Neutrinos Informationen direkt aus dem dichten Explosionsgebiet zum irdischen Beobachter.

17.19.4 Photosphäre als Sternrand?

Es wäre falsch zu behaupten, dass die Photosphäre die äußerste Schicht eines Stern wäre, weil sich außerhalb der Photosphäre noch die *Chromosphäre* und die Korona anschließen. Die Ausdehnung der Korona ist verglichen mit der Photosphäre immens: im Fall der Sonne reicht die Korona bis 0.13 AU - das sind rund 28 Sonnenradien!

Die Materiedichte macht einen großen Sprung von der Korona zur Photosphäre, so dass man die Photosphäre mit der **Sternoberfläche** assoziieren kann.

17.19.5 körnige Sonnenoberfläche

Mit geeigneten Sonnenfiltern (z. B. $H\alpha$) können die Astronomen sehr viel Struktur in der Photosphäre der Sonne sichtbar machen. Über die ganze Sonnenscheibe ist so die **Granulation** beobachtbar. Das ist ein körniges Muster, das durch die Umwälzung des Sternplasmas (*Konvektion*) im Innern zustande kommt. Die Sonne kocht. Heißes Plasma aus dem Innern steigt auf, kühlt sich ab und sinkt wieder nach unten. Bei der Konvektion findet ein Wärme- und Materietransport statt, der den Energiehaushalt des Sterns reguliert. Die Granulation ist die 'Spitze des Eisbergs' dieser Konvektion: Astronomen sehen kleine Konvektionszellen (*Granulen*), die bei der Sonne mehr als tausend Kilometer durchmessen können und mit bis zu zehn Minuten erstaunlich kurzlebig sind. Im Eintrag Sonne werden weitere photosphärische Erscheinungen wie Supergranulation, Sonnenflecken, Sonnenflares, Protuberanzen etc. erläutert. Auch ein Blick in den Eintrag **Randverdunklung** lohnt sich.

17.20 Pion

Pionen ist eine abkürzende Bezeichnung der π -Mesonen (die also aus Quark und Antiquark bestehen). Die Teilchenphysiker kennen drei verschiedene Pionen: ein neutrales Pion π^0 , ein

positiv geladenes Pion π^+ und ein negativ geladenes Pion π^- . Die Zahl 3 ist kein Zufall, weil die Pionen ein **Isospintriplett** (Isospin 1) bilden.

17.20.1 Pionenzerfall

Pionen wurden 1947 in der Höhenstrahlung entdeckt. Sind die Pionen elektrisch geladen, so reichern sie die Höhenstrahlung durch ihren Zerfall mit Myonen an. Ist es das neutrale Pion, so können aus dem Zerfall Photonen erzeugt werden. Diese Zerfallsreaktionen fassen diese Gleichungen zusammen:

$$\begin{aligned}\pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \\ \pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^0 &\rightarrow \gamma + \gamma\end{aligned}$$

17.20.2 Pion aus Protonenunfall

Pionen entstehen vornehmlich bei Kollisionen von Atomkernen und werden in gigantischer Zahl bei Schwerionenstößen in Teilchenbeschleunigern erzeugt. Wenn Protonen (geladenes Nukleon im Atomkern) kollidieren (Dinukleonen-Mode), gibt es ab einer Energieschwelle von 300 MeV drei verschiedene Möglichkeiten (*Zerfallskanäle*), was daraus entstehen kann:

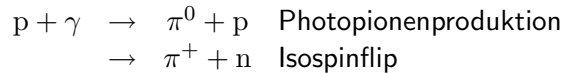
$$\begin{aligned}p + p &\rightarrow \pi^+ + X && \text{geladene Ströme (CC)} \\ &\rightarrow \pi^- + X && \text{geladene Ströme (CC)} \\ &\rightarrow \pi^0 + X && \text{neutrale Ströme (NC)}\end{aligned}$$

Wie diese Reaktionsgleichungen belegen, können alle drei verschiedenen Pionen entstehen. Die Teilchenphysiker bezeichnen positiv oder negativ geladenen Pionen als geladene Ströme (engl. *charged currents*, CC) und das neutrale Pion als neutralen Strom (engl. *neutral current*, NC). Neben dem jeweiligen Pion, bildet sich irgendein Kern X . Die entstandenen geladenen Pionen können in einem genügend dünnen Medium weiter zerfallen und Myonen und Neutrinos erzeugen (s. o.). Diese Reaktionskette ist wesentlich in den Jets von AGN und GRBs, weil sie favorisierte Kandidaten sind, für die Emission **ultrahochenergetischer Neutrinos**.

17.20.3 Photopionenproduktion

In Stößen, wo Protonen und Photonen beteiligt sind, kann in einem inelastischen Streuprozess ein neutrales Pion entstehen, das Proton bleibt erhalten. Diesen Mechanismus nennt man **Photopionenproduktion**. Bei den AGN-Jets kommen als Photonenquelle der Jet selbst (Synchrotronemission) oder auch Photonen des kosmischen Hintergrunds (engl. *cosmic microwave background*, CMB) in Frage. Eine zweite Möglichkeit besteht in der so genannten **Isospin-Flip**. Der Isospin ist eine Quanteneigenschaft (Quantenzahl), die zwischen Protonen und Neutronen unterscheidet. Diese Eigenschaft wurde von *Werner Heisenberg* eingeführt. Wenn der Isospin 'flippt', also umklappt, wird aus einem Proton ein Neutron (oder umgekehrt). Genau dieser Fall kann eintreten und positive Pionen hervorbringen. Aus Gründen der Quantenzahlerhaltung muss daneben ein Neutron entstehen. Da es neutral ist, wird es von Magnetfeldern nicht beeinflusst, so dass - falls dieser Prozess in Jets geschieht - dieses Teilchen entkommen kann und nicht von den Magnetfeldern des Jets eingeschlossen wird. Es ist anzunehmen, dass sich ein **Neutronen-Halo** um die Quelle bildet und Neutronen

über den β -Zerfall zerfallen, was weitere Protonen und Leptonen (Elektronen, Neutrinos) hervorbringt. Diese Verhältnisse fassen die folgenden Reaktionsgleichungen zusammen:



17.20.4 Eigenschaften der Pionen

Die Massen betragen 134.9766 MeV für das neutrale Pion bzw. 139.57018 MeV für die geladenen Spezies (Quelle: *Particle Physics Booklet*, Juli 2002). Alle Pionen sind - wie alle Mesonen aufgrund ihres Quarkgehalts - recht kurzlebig. Das neutrale Pion hat nur eine mittlere Lebensdauer von nur 84 as (Präfix *a*, atto: 10^{-18}) und hat als dominanten Zerfallskanal zwei Gammaquanten (fast 99%) oder ein Gammaquant und ein Elektron-Positron-Paar (etwa 1%). Die geladenen Pionen zerfallen mit einer mittleren Lebensdauer von 26.033 ns ausschließlich in ein Myon und ein Myon-Neutrino, das derselben Leptonenfamilie (μ) angehören muss - der Grund dafür ist die **Leptonenzahlerhaltung**.

Die kürzere Lebensdauer des neutralen Pions erklärt sich aus seinem Quarkgehalt: es besteht aus einem *up*- und einem *anti-up*-Quark, während das negative Pion aus einem *down*- und einem *anti-up*-Quark und das positive Pion aus einem *up*- und einem *anti-down*-Quark bestehen. Quark und zugehöriges Antiquark zerfallen leichter.

17.20.5 Pionen vermitteln Kernkräfte

Pionen sind von besonderer Wichtigkeit für die starke Wechselwirkung, weil sie die **Kernkräfte** vermitteln. *Hideki Yukawa* konnte 1935 zeigen, dass der **Ein-Pion-Austausch** (*One Pion Exchange*, OPE) die langreichweitige, anziehende Komponente der Kernkraft ist. Dagegen ist der **Zwei-Pionen-Austausch** (*Sigma-Meson*) verantwortlich für die Potentialmulde und das *Omega-Meson* für die kurzreichweitige, anziehende Komponente der Kernkräfte. Diese Beiträge zur resultierenden Gesamtkernkraft kann man durch die **Yukawa-Potentiale** der einzelnen Teilchen unterschiedlicher Masse ableiten.

17.20.6 eine hypothetische Umwandlungsart

Pionen könnten in die hypothetischen Axionen konvertieren, pseudoskalare Nambu-Goldstone-Bosonen, die die chirale Peccei-Quinn-Symmetrie brechen. Dieser Mechanismus wäre von großem Interesse für Teilchenphysiker und Kosmologen.

17.21 Pioneer-Anomalie

Die Pioneer-Anomalie ist ein bisher nicht verstandener Beschleunigungseffekt der US-amerikanischen Raumsonden *Pioneer 10* und *Pioneer 11*.

17.21.1 Das Pioneer-Forschungsprogramm

Die Pioneer-Missionen der NASA zielten auf eine Erforschung des interplanetaren Raumes und insbesondere der Planeten im Sonnensystem. Pioneer 1 startete bereits am 11. Oktober 1958. Die Sonden Pioneer 10 und 11 wurden am 03. März 1972 bzw. am 05. April 1973 gestartet und sollten die Gasplaneten Jupiter und Saturn erforschen. Pioneer 10 (siehe Foto



Abbildung 17.7: Pioneer 10 kurz vor dem Start.

links; Credit: NASA/Ames Research Center) durchquerte als erste Raumsonde überhaupt den Planetoidengürtel zwischen Mars und Jupiter. Sie passierte Jupiter, den größten Planeten im Sonnensystem, am 03. Dezember 1973 in nur 130000 km Entfernung; Pioneer 11 erreichte am 01. September 1979 auch Saturn. Nach diesen Rendezvous mit den Gasplaneten verließen die Sonden durch ein Swing-by-Manöver am Gasgiganten Jupiter das Sonnensystem in entgegengesetzten Richtungen: Pioneer 10 wird in etwa zwei Millionen Jahren den Stern *Aldebaran*, ein Roter Riese und Hauptstern im Sternbild *Stier*, erreichen; Pioneer 11 steuert auf das Sternbild *Adler* zu und wird in etwa vier Millionen Jahren beim nächsten Stern ankommen. Die Kommunikation mit Pioneer 11 riss am 30. September 1995 ab. Pioneer 10 bewegte sich mit etwa 40000 km/h im Jahr 2001 von Erde weg. Diese Sonde funkte am 23. Januar 2003 das letzte Signal - derzeit dürfte Pioneer 10 etwa 90 Astronomische Einheiten entfernt sein. Kommunikationsversuche am 07. Februar 2003 und 03.-05. März 2006 schlugen fehl, vermutlich weil die Sendeleistung der Sonde nun zu schwach ist. An Bord von Pioneer 10 befindet sich auch die berühmte Goldplatte, in die Gestalten einer nackten Frau und eines nackten Mannes, das Sonnensystem, die Ziffer 8 als Binärzahl, der Hyperfeinstrukturübergang von neutralem Wasserstoff (21cm-Linie), die Silhouette der Sonde und die Position der Sonne relativ zu 14 Pulsaren und des galaktischen Zentrums eingraviert sind.

17.21.2 Kommunikation mit den Pioneer-Sonden

Die interplanetare Kommunikation mit Raumsonden ist ein äußerst raffiniertes Verfahren: Im Fall der Pioneer-Sonden wurde von der Erde aus ein Radiosignal mit der Frequenz ν_{em} zu den Sonden gesendet. Es handelte sich um ein S-Band-Signal der Frequenz 2.11 GHz. Die Sonden bewegen sich relativ zur Erde mit einer Geschwindigkeit, so dass durch den speziell relativistischen Doppler-Effekt eine Frequenzverschiebung stattfindet. Genauer gesagt handelt es sich wegen der zunehmenden Entfernung der Sonden von der Erde um eine Doppler-Rotverschiebung (zweite Gleichung im Eintrag Doppler-Effekt), so dass die Sonde eine kleinere Frequenz des von der Erde kommenden Radiosignals misst. Die Sonde schickt mit der gleichen Radiofrequenz, mit der sie das irdische Signal *empfängt*, ein Signal zurück zur Erde. Dieses SONDENSIGNAL wird nun wiederum Doppler-rotverschoben, so dass bei der Erde eine neue Empfangsfrequenz ν_{rec} gemessen wird. Rechnerisch folgt diese Frequenz durch zweimaliges Anwenden der Doppler-Formel. Eliminiert man in diesen Gleichungen Sendefrequenz der Sonde durch Einsetzen, so resultiert eine Relation zwischen ν_{em} und ν_{rec} . Man schreibt diese Relation so um, dass man eine (dimensionslose) *relative Frequenzänderung* erhält:

$$\frac{\nu_{\text{rec}} - \nu_{\text{em}}}{\nu_{\text{em}}} = -2 \frac{v/c}{1 + v/c},$$

mit Vakuumlichtgeschwindigkeit c . Auf der Erde sind beide Frequenzen ν_{em} und ν_{rec} bekannt, so dass aus dieser Gleichung sofort die **Sondengeschwindigkeit** v folgt. Das Pioneer-Team hat über Jahrzehnte diese Dopplergeschwindigkeit der Sonden gemessen. Unabhängig davon wurde die Signallaufzeit Δt gemessen, die nach $2D = c \Delta t$ die Entfernung D der Sonden liefert.

17.21.3 Was ist so ungewöhnlich?

Schon 1979 wurde eine **anomale Blauverschiebung** des Doppler-Signals gemessen. Mit anderen Worten unterliegen die Pioneer-Sonden einer **unerklärlichen Beschleunigung in**

Richtung Sonne. Eine Analyse der Messdaten zwischen 1987 und 1998 ergab eine konstante Zunahme dieser Blauverschiebung um etwa 6×10^{-9} Hz/s. Rechnet man dies auf Distanzen um, so folgt, dass sich die Sonden nach 15 Jahren um etwa eine Million Kilometer von der vorhergesagten Position entfernt befinden! Die Blauverschiebungsrate kann in eine konstante Abbremsung (negative Beschleunigung) umgerechnet werden, und man erhält etwa -8.74×10^{-8} cm/s² (Anderson *et al.* 1998; 2002). Das hört sich nach einem sehr kleinen Wert an, aber diese Zahl bereitet den Physikern großes Kopferbrechen.

17.21.4 Messfehler oder neue Physik?

Woher kommt die Abbremsung der Pioneer-Sonden? Kann man allen Messdaten trauen oder beweist die Pioneer-Anomalie einen neuen, physikalischen Effekt? Nach bekannt werden der rätselhaften Abbremsung wurde eine Fülle von wissenschaftlichen Artikeln publiziert, die die Anomalie zu erklären versuchten. Im Folgenden werden mögliche Ursachen vorgestellt, von denen in der Literatur fast alle als Erklärung ausgeschlossen werden:

Ursachen bei der Sonde

- ◇ Es kann sich nicht um den zufälligen Mess- oder Baufehler bei einer Sonde handeln, weil diese anomale Beschleunigung sogar von beiden Sonden *unabhängig* bestätigt wurde (Abweichung von 3%).
- ◇ Ein Rückstoß der Sonden durch Senden des Radiosignals ist viel kleiner als die anomale Beschleunigung.
- ◇ Ebenso ist eine Beschleunigung durch Emission von Wärmestrahlung ausgeschlossen, weil sie wegen des Leistungsabfalls der Sonde zeitlich variieren würde, aber die anomale Beschleunigung konstant ist.
- ◇ Interplanetare Magnetfelder können nicht die möglicherweise elektrisch aufgeladenen Sonden so sehr beeinflusst haben.
- ◇ Die radioaktive Energiequelle der Sonde ist Plutonium (Pu-238), ein Alpha-Strahler, der Helium erzeugt. Das Ausdampfen des Heliums führt zwar zu einem Rückstoß, kann aber als Ursache aufgrund der Kleinheit des Effekts und der speziellen Anordnung der thermoelektrischen Generatoren ausgeschlossen werden. Falls Variationszeitskalen bei der Anomalie auftreten würden, die vergleichbar mit der Halbwertszeit von Pu-238 (87.74 Jahre) sind, wäre das ein Hinweis auf die Energiequelle als Ursache (Nieto 2007).
- ◇ Die Sonden verlieren Treibstoff und werden dadurch beschleunigt - auch das ist ein zu kleiner Effekt verglichen mit der Anomalie.

Ursachen bei der Auswertung

- ◇ Ein Fehler in der Software zur Auswertung der Pioneer-Daten kann es auch nicht sein, weil drei verschiedene Programmpakete zum gleichen Ergebnis kamen.
- ◇ Unsicherheiten in Parametern zur Bahnberechnung gibt es zwar, aber sie erklären nur Tages- und Jahresschwankungen der Pioneer-Daten - jedoch nicht die Jahrzehnte andauernde konstante Beschleunigung.

- ◇ Probleme bei der Umrechnung in den verschiedenen Koordinatensystemen werden ebenfalls ausgeschlossen.

Ursachen durch bekannte Physik

- ◇ Die Radiosignale werden durch interplanetares Gas und Plasma beeinflusst, aber auch dieser Effekt ist deutlich kleiner als die Anomalie.
- ◇ Die Gravitationswirkungen der Körper im Sonnensystem, wie Sonne, Planeten, Monde, Kometen und Planetoiden wurden in aufwendigen numerischen Simulationen berücksichtigt und ergaben keine Erkenntnisse über den Ursprung der Anomalie.
- ◇ Die relativistische Zeitdilatation (*Shapiro-Effekt*) der Radiosignale wurde berechnet und kann als Fehlerquelle ausgeschlossen werden.
- ◇ Interplanetarer und interstellarer Staub bremst tatsächlich die Sonden in ihrer Bewegung in die Tiefen des Alls ab. Allerdings zeigen Berechnungen, dass dieses Material etwa 300000-mal dichter sein müsste, um die Anomalie erklären zu können. Das widerspricht Dichtemessungen, die z. B. mit der Sonde Ulysses durchgeführt wurden.
- ◇ Der Sonnenwind beschleunigt die Sonden nach außen, würde also der Anomalie *entgegenwirken*. Der solare Strahlungsdruck nimmt außerdem jenseits von 15 Astronomischen Einheiten stark ab. Auch dieser Einfluss wird ausgeschlossen.
- ◇ Die Rotation von Sender und Empfänger hat Einfluss auf die Doppler-Verschiebung der Radiosignale (*Anderson & Mashhoon 2003*). Allerdings ist auch diese so genannte Spin-Rotations-Kopplung viel zu klein.
- ◇ Die Bewegung der Sonne senkrecht zur Ekliptik erzeugt zwar auch einen Effekt, der jedoch zu klein ist, als dass er Ursache der anomalen Beschleunigung sein könnte.
- ◇ Die Expansion des Universum klingt nach einer reizvollen Erklärung für die Anomalie ist aber vernachlässigbar, wie schon Arbeiten von Einstein gezeigt haben (*Einstein & Straus 1945*).

Ursachen durch neue Physik

- ◇ Ein Vorschlag nimmt Bezug auf die kosmologische Konstante, die nach der aktuellen Datenlage der experimentellen Kosmologie die favorisierte Form der Dunkle Energie im Kosmos ist. *Laurent Nottale* hat vorgeschlagen, dass die kosmologische Konstante zu einer Trägheitskraft führt, die die Pioneer-Sonden und andere freie Testkörper (aber nicht die Planeten!) zusätzlich beschleunige (gr-qc/0307042). Diese Zusatzbeschleunigung sei gerade die beobachtete, anomale Pioneer-Beschleunigung. Um den beobachteten Zahlenwert vollständig erklären zu können, sind allerdings weitere Effekte erforderlich.
- ◇ Höherdimensionale Branenmodelle würden die Gravitationsgesetze modifizieren. Eine entsprechende Modifikation bei großen Abständen, wie im DGP-Szenario, könnte neue Einblicke in das Pioneer-Rätsel liefern.

- ◇ Milgroms MOND-Theorie erklärt recht gut die Dynamik innerhalb von Spiralgalaxien und Galaxienhaufen, *ohne* dass die Existenz Dunkler Materie gefordert werden müsste. Es ist ein komischer Zufall, dass die empirisch bestimmte Beschleunigungskonstante a_0 die gleiche Größenordnung hat, wie die konstante Beschleunigung bei der Pioneer-Anomalie. Es ist unklar, ob MOND das Pioneer-Problem löst.
- ◇ Viele exotische und spekulative Vorschläge zur Lösung des Pioneer-Problems wurden gemacht, die alternative Gravitationstheorien involvieren, wie sie unter dem Eintrag Gravitation vorgestellt werden. Dennoch ist nicht klar, inwiefern das überzeugende Lösungen darstellen. Klare Hinweise durch weitere Beobachtungen müssen diese Alternativen erst festigen.

Bislang gibt es keine überzeugende Erklärung für die Pioneer-Anomalie. Sehr wahrscheinlich ist eine physikalische Ursache.

17.21.5 Deep Space Gravity Probe

Die Rätsel um die Pioneer-Anomalie haben zu dem Plan geführt, eine neue, speziell zur Untersuchung der Anomalie designte Mission zu starten. Das ESA-Missionsszenario *Deep Space Gravity Probe* soll Klärung verschaffen. Dies gehört jedoch zum *Cosmic Vision Program* der ESA, das erst Starttermine für 2015 - 2025 vorsieht. Eventuell geben auch andere, laufende Missionen wie die Pluto-Mission *New Horizons* Aufschluss über das Pioneer-Problem.

17.21.6 Literatur, Datenquellen & Weblinks

- ◇ Dittus, H. & Lämmerzahl, C.: Die Pioneer-Anomalie, Physik Journal 5, 25, 2006
- ◇ Anderson, J.D. et al.: Indication, from Pioneer 10/11, Galileo, and Ulysses Data, of an Apparent Anomalous, Weak, Long-Range Acceleration, Phys. Rev. Lett. 81, 2858, 1998
- ◇ Anderson, J.D. et al.: Study of the anomalous acceleration of Pioneer 10 and 11, Phys. Rev. D 65, 2004, 2002
- ◇ Nieto, M.M.: The Quest to understand the Pioneer Anomaly, 2007, Preprint: gr-qc/0702017
- ◇ Pioneer Website, NASA

17.22 Planck-Ära

Die Planck-Ära kennzeichnet die erste Phase in der Entwicklung des Universums nach dem Urknall.

17.22.1 Was passierte in der Planck-Epoche?

Es gab nach gegenwärtiger Meinung der Wissenschaftler in dieser Phase nur eine fundamentale Kraft, die **Urkraft**. Die vier fundamentalen Kräfte der Physik, die Gravitation, die elektromagnetische, die schwache und die starke Wechselwirkung waren ununterscheidbar. Dies bezeichnet man auch als Unifikation der Kräfte. Die Planck-Ära leitet ihren Namen

von der Planck-Skala ab, denn das Milieu war bestimmt durch die Planck-Größen: Das Universum war so 'alt' wie die **Planck-Zeit**, also etwa 10^{-43} Sekunden und hatte eine **Planck-Temperatur** von 10^{32} Kelvin oder 10^{19} GeV.

17.22.2 keine Physik in der Planck-Ära

Die physikalische Beschreibung versagt in dieser Phase. Es ist nicht gelungen, eine physikalische Theorie zu entwickeln, die die Physik der Planck-Ära fassen kann. Als Kandidat werden die Stringtheorien gehandelt. Die M-Theorie ist eine Hypothese, die man aus der Verwandtschaft unterschiedlicher Stringtheorien und der Supergravitation ableitet. Vielleicht bietet sie die Werkzeuge, um der Planck-Ära Herr zu werden. Im Kern besteht die Herausforderung darin, die Gravitation mit Quanteneffekten beschreiben zu können. An einer solchen Quantengravitation wird aktuell geforscht, doch sind die Physiker noch weit davon entfernt verlässliche Aussagen machen zu können. In der Loop-Quantengravitation, einer weiteren Variante einer Quantengravitation, versuchen die Forscher die Allgemeine Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik zu verknüpfen. Dabei werden allerdings die anderen Quantenfeldtheorien, wie schwache und starke Kraft zunächst außen vor gelassen.

17.22.3 Die Weltformel

Eine Theorie, die die Urkraft zu beschreiben vermag, wird weithin als **Vereinheitlichte Theorie** (engl. *Unified Theory*, **UT**) oder '**Theorie von Allem**' (engl. *Theory Of Everything*, **TOE**) bezeichnet. Populärwissenschaftlich wurde auch der Begriff von der **Weltformel** geprägt. Es bestehen allerdings berechnete Zweifel daran, dass man aus einer solchen Weltformel unmittelbar den Facettenreichtum der Natur und beispielsweise die Entstehung von Leben ableiten kann.

In der Kosmologie wird allgemein angenommen, dass sich an die Planck-Ära die GUT-Ära bzw. Baryogenese nach einer spontanen Symmetriebrechung anschloss. Dabei spaltete sich die Urkraft in die Gravitation und die X-Kraft auf. Dieses Phänomen kennzeichnet den ersten Phasenübergang im Universum, der sich auf 10^{-43} Sekunden nach dem Urknall datieren lässt.

17.23 Planckscher Strahler

Der Plancksche Strahler ist vermutlich das wichtigste **Strahlungsgesetz** in der Astronomie. Das liegt daran, weil sehr viele Quellen elektromagnetischer Strahlung im Universum durch ein solches Strahlungsgesetz beschrieben werden. Es handelt sich dabei um **Wärmestrahlung**, d. h. die elektromagnetische Emission wird von elektrischen Ladungen (in der Regel Elektronen, Protonen, Ionen) abgegeben, die sich aufgrund von Wärme bewegen.

17.23.1 Terminologie

Plancksche Strahler werden auch als Hohlraumstrahler, Schwarze Strahler oder Schwarze Körper (engl. *black body*, **BB**) bezeichnet. Der etwas allgemeine Name Wärmestrahler oder **thermischer Strahler** ist ebenfalls verbreitet.

17.23.2 Beispiele

Beispiele für Planck-Strahler aus dem Alltag sind eine Kerzenflamme, unsere Haut, ein Eiswürfel, eine Tasse Kaffee - eigentlich strahlt **alles** Wärmestrahlung ab, weil jeder Gegenstand eine endliche Temperatur hat. Einen Zustand endlicher Temperatur verlangt gerade der **dritte Hauptsatz der Thermodynamik**. Bei welcher Strahlungsenergie (*Farbe*) die höchste Strahlungsintensität liegt, bestimmt gerade die **Temperatur** des Strahlers.

Die kosmischen Planck-Strahler sind beispielsweise die kosmische Hintergrundstrahlung, fein verteilter, interplanetar Staub im Sonnensystem (siehe auch Zodiakallicht), das relativ kühle interstellare Medium in der Milchstraße, heißes intergalaktisches Gas, das zwischen den Galaxien in Galaxienhaufen zu finden ist, natürlich auch die Oberflächen von Sternen (siehe Effektivtemperatur und Spektraltyp) oder auch die Standardscheiben, die um diverse kosmische Objekte (Protosterne, Weiße Zwerge, Schwarze Löcher) rotieren.

17.23.3 Geschichtliches

Der Plancksche Strahler wurde nach dem deutschen Physiker *Max Planck* (1858 - 1947) benannt. Er ist ein Pionier der Quantentheorie, weil er die **Quanten der Wärmestrahlung** im Jahr 1900 entdeckt hat (Nobelpreis für Physik 1918). Erst später wurde klar, dass Licht und elektromagnetische Strahlung *generell* quantisiert sind (Einsteins Lichtquantenhypothese 1905, siehe auch Photon).

17.23.4 Das Planck-Spektrum

Ein Planck-Strahler gibt Wärmestrahlung als **kontinuierliches Spektrum** über einen theoretisch beliebig großen Spektralbereich ab. Die *Plancksche Strahlungsverteilung* ist jedoch nicht konstant über alle Wellenlängen oder extrem schmal wie eine Spektrallinie: es ist eine recht breite Verteilung, die ein Maximum bei einer bestimmten Wellenlänge der Strahlung (Strahlungsfrequenz, -energie) annimmt. Die Position dieses Maximums und das Profil der Verteilung diktiert **einzig die Temperatur** als wichtigster Parameter eines Planck-Strahlers.

Die Gestalt einer Planckschen Strahlungsverteilung in Abhängigkeit von der Temperatur zeigt Abbildung 17.8. Dabei entsprechen 0 Kelvin gleich -273.16° Celsius, so sind z. B. 1000 Kelvin gleich 726.84° Celsius. In der Horizontalen ist die Wellenlänge der Strahlung in Mikrometern (10^{-6} Metern) angegeben. Die Größe in der Vertikalen heißt *spektrale Strahlungsdichte* und ist ein Maß für die Strahlungsintensität des Planckschen Strahlers. Wie man in den Beispielen gut erkennen kann, verschiebt sich das Maximum der Verteilung zu kleineren Wellenlängen, wenn die Temperatur des Strahlers anwächst. Deshalb kann ein besonders heißer Körper auch optische Planck-Strahlung abgeben. Der linke Rand im Diagramm entspricht gerade $0.5 \mu\text{m} = 500 \text{ nm}$, also grünem Licht. Der rechte Rand ist der Bereich der Infrarotstrahlung.

17.23.5 Wo liegt das Strahlungsmaximum?

Das Maximum der Planckschen Strahlungsverteilung kann mit dem **Wienschen Verschiebungsgesetz** berechnet werden

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2\,880\,000}{T_{\text{eff}} [K]} \text{ nm.}$$

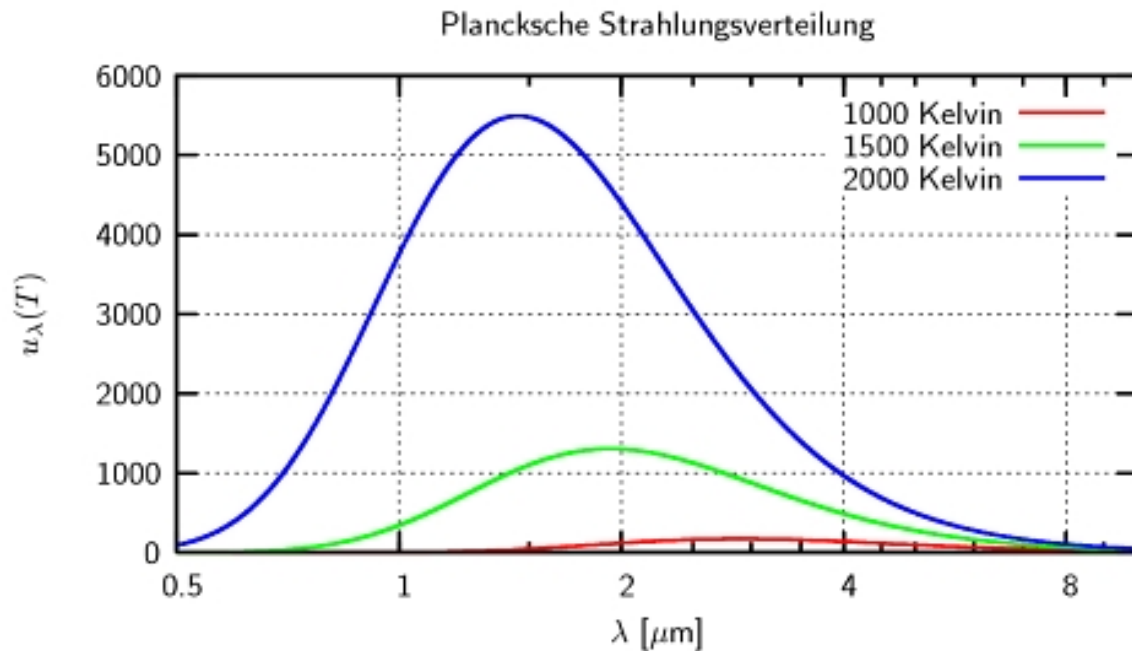


Abbildung 17.8: Plancksche Strahlungsverteilung in Abhängigkeit der Wellenlänge für verschiedene Temperaturen.

(Dies ist nachzurechnen mittels Kurvendiskussion der unten notierten Strahlungsformel). Dieser Zusammenhang wurde 1893 von dem deutschen Physiker *Wilhelm Karl Werner Wien* (1864 - 1928) gefunden. Einsetzen der Temperatur liefert die Wellenlänge am Strahlungsmaximum. Dieses Maximum bestimmt, bei welcher Strahlungsenergie (=Farbe) der Plancksche Strahler die höchste Strahlungsintensität erreicht. Einfacher gesagt: Die Temperatur bestimmt, wie uns ein Körper erscheint und welche Strahlungsdetektoren man verwenden sollte, um die thermische Strahlung zu messen.

Unsere Haut leuchtet deshalb bei etwa $10\text{ }\mu\text{m}$ im Nahinfrarot. Die einige hundert Grad heiße Glut im Feuer erscheint uns daher rot. Die Sonne mit etwa 6000 Grad Oberflächentemperatur sehen wir als gelben Stern. Ein an der Oberfläche extrem heißer Weißer Zwerg erscheint blau-weiß.

17.23.6 Die Strahlungsformel

Für diejenigen, die es ganz genau wissen wollen, wird im Folgenden die **Plancksche Strahlungsformel** vorgestellt, um die Planck-Spektren berechnen zu können. Dabei wird vereinfachend **Isotropie** der Strahlung vorausgesetzt, was mit einem Faktor 4π in den Strahlungsformeln beiträgt. Was bei der Berechnung Schwierigkeiten bereiten kann, ist die korrekte Umrechnung, je nachdem ob man die Planck-Verteilung als Funktion der Wellenlänge, der Strahlungsfrequenz oder der Strahlungsenergie ausdrückt.

Generell berechnet sich die **totale Energiedichte der Strahlung** $u = U/V$ aus einem Integral über die spektrale Energiedichte u_ν . Je nachdem, ob man über Wellenlänge λ , Frequenz ν bzw. $\omega = 2\pi\nu$ oder Energie E integriert, entscheidet man sich für eines der

folgenden vier Integrale:

$$u = \int u_\lambda(T) d\lambda = \int u_\nu(T) d\nu = \int u_E(T) dE = \int u_\omega(T) d\omega$$

$$u_\lambda(T) = \frac{8\pi hc}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1} \frac{1}{\lambda^5}$$

$$u_\nu(T) = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1} \nu^3$$

$$u_E(T) = \frac{8\pi}{(hc)^3} \frac{1}{e^{E/k_B T} - 1} E^3$$

$$u_\omega(T) = \frac{\hbar}{\pi^2 c^3} \frac{1}{e^{\hbar\omega/k_B T} - 1} \omega^3$$

$$\frac{8\pi hc}{\lambda^5} d\lambda = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} d\nu = \frac{8\pi E^3}{(hc)^3} dE = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} d\omega$$

Hier muss man auf die Vorfaktoren aufpassen. Substitution der Wellenlänge durch eine Frequenz involviert andere Vorfaktoren, damit u bzw. alles unter dem Integral immer die Dimension Energie pro Volumen haben. Als Rechenhilfe zeigt die letzte Zeile die Umrechnungen, die sich aus den Substitutionen im Integral ergeben.

17.23.7 Stefan-Boltzmann-Gesetz

Das oben gezeigte Integral für die gesamte Energiedichte u lässt sich explizit ausführen (Verwendung von Gamma- und Zeta-Funktion) und führt auf das berühmte **Stefan-Boltzmann-Gesetz** oder T^4 -Gesetz. Es besagt, dass die Energiedichte eines Photonengases (ebenso wie dessen Druck und innere Energie) proportional zur vierten Potenz in der Temperatur ist. Die Proportionalitätskonstante heißt **Stefan-Boltzmann-Konstante** mit dem Zahlenwert $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$. Diese Relation wurde 1879 empirisch von dem österreichischen Physiker *Josef Stefan* (1835 - 1893) gefunden und fünf Jahre später von seinem Landsmann *Ludwig Boltzmann* (1844 - 1906) theoretisch hergeleitet.

Dass der Druck eines Photonengases (*radiativer Druck*) so stark mit der Temperatur ansteigt, ist bedeutsam für die Stabilität von Sternen in der Astrophysik (siehe auch hydrostatisches Gleichgewicht).

17.23.8 Rayleigh-Jeans- und Wien-Ast

Es ist auch interessant sich zu überlegen, was mit der Planckschen Strahlungsverteilung im Grenzwert großer Wellenlängen (kleiner Frequenzen) bzw. kleiner Wellenlängen (großer Frequenzen) geschieht. Mit den Reihenentwicklungen der Exponentialfunktion folgen dann die beiden wichtigen Grenzfälle, die bei kleinen Frequenzen **Rayleigh-Jeans-Ast** und bei großen Frequenzen **Wien-Ast** heißen:

$$u_\nu^{\text{Rayleigh}}(T) \simeq \frac{4k_B T}{c^3} \nu^2; h\nu \ll k_B T$$

$$u_\nu^{\text{Wien}}(T) \simeq \frac{8\pi h}{c^3} \nu^3 e^{-h\nu/k_B T}; h\nu \gg k_B T$$

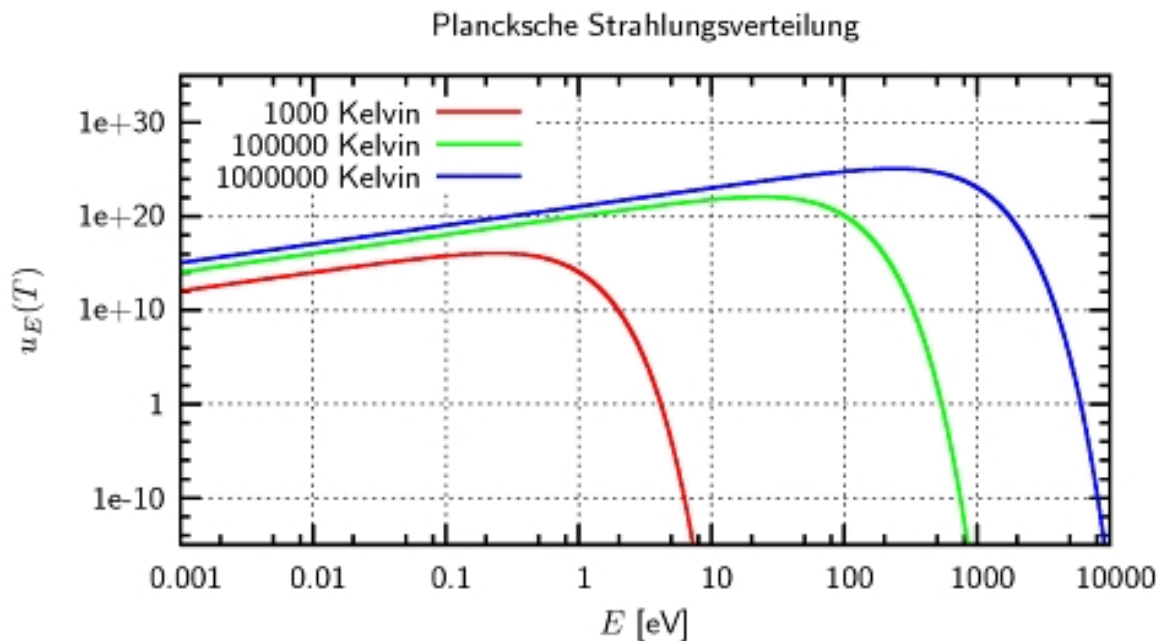


Abbildung 17.9: Plancksche Strahlungsverteilung in Abhängigkeit der Strahlungsenergie für verschiedene Temperaturen.

Rayleigh-Jeans-Formel und *Wiensche Strahlungsformel* sind demnach verschiedene Limites der Planckschen Strahlungsformel. Historisch war gerade das Rayleigh-Jeans-Gesetz (erste Gleichung) der Ausgangspunkt für Max Plancks bahnbrechende Entdeckung. Die Gleichung macht Probleme bei hohen Frequenzen, weil sie dann gegen unendlich strebt. Dieses Verhalten bezeichnen Physiker als **Ultraviolett katastrophe** oder **Ultraviolett divergenz**.

Plancks Quantisierungsansatz der Wärmestrahlung bereinigte diese UV-Divergenz. Anhand der zweiten Gleichung für den Wien-Ast sieht man wieso: der Exponentialterm dominiert bei großen Frequenzen und 'dämpft' damit die Divergenz ab.

Die Forderung nach Quantisierung läutete eine Vielzahl wichtiger Entdeckungen und Anwendungen in der modernen Physik des 20. Jahrhunderts ein, von der wir heute noch profitieren.

17.23.9 Hochenergetische Wärmestrahlung

Abschließend betrachten wir noch ein Beispiel, das demonstriert, dass Wärmestrahlung nicht immer Infrarotstrahlung sein muss. Dazu verwenden wir die Gleichung der spektralen Energiedichte in Abhängigkeit von der Energie und stellen die Verteilung für verschiedene recht hohe Temperaturen von tausend bis eine Million Kelvin dar – das Ergebnis zeigt Diagramm 17.9.

Wie beim Strahlungsmaximum besprochen, bestimmt die Temperatur die Position des Maximums. Ist es denkbar, dass ein Körper so heiß ist, dass seine Plancksche Strahlungsverteilung vor allem im hochenergetischen Röntgenbereich emittiert? Ja, das zeigt uns ein Blick auf die Energieachse im Diagramm: einige keV sind gerade typische Energien der Röntgenstrahlung. Solche Planck-Strahler sind wichtig in der **Röntgenastronomie**. So ist

das intergalaktische Medium (IGM) in Galaxienhaufen so heiß, dass seine thermische Emission typischerweise mit Röntgenteleskopen beobachtet wird.

17.24 Planck-Skala

Eine fundamentale Skala in der Physik, die den Gültigkeitsbereich von Quantentheorie und Allgemeiner Relativitätstheorie absteckt und den Bereich neuer physikalischer Theorien wie der Quantengravitation markiert.

17.24.1 Herleitung der Planck-Skala

Der deutsche Physiker und 'Vater der Quantentheorie' *Max Planck* (1858 - 1947) wies bereits darauf hin, dass eine kritische Masse existiere, ab der eine Beschreibung mit Relativitätstheorie und Quantentheorie versagen müsse. Seither nennt man diese kritische Masse die **Planck-Masse** (oder äquivalent Planck-Energie). Formal folgt sie aus der Gleichsetzung der Gleichungen für den Gravitationsradius und der Compton-Wellenlänge:

$$r_g = \frac{GM}{c^2}, \quad \lambda_C = \frac{\hbar}{Mc}.$$

Auflösen nach der Masse M ergibt:

$$M_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \quad (17.2)$$

$$\approx 2.2 \times 10^{-5} \text{ g} \quad (17.3)$$

$$\approx 1.2 \times 10^{19} \text{ GeV}. \quad (17.4)$$

Anschaulich wird bei diesem kritischen Wert die Gravitation so stark wie die starke Wechselwirkung, und es werden Quanteneffekte bei der Gravitation wichtig. Allgemeine Relativitätstheorie und Quantentheorie sind für sich genommen ab diesen Energien nicht mehr ein adäquates Konzept zur Beschreibung der Vorgänge und eine Quantengravitation - eine quantisierte Gravitationstheorie - muss angewendet werden.

17.24.2 Planck-Temperatur, -Länge, -Zeit, -Dichte

Zur Planck-Masse von $1.2 \times 10^{19} \text{ GeV}$ lassen sich entsprechende Werte für andere physikalische Größen ableiten:

◇ **Planck-Temperatur:** $1.4 \times 10^{32} \text{ K}$ (verwende Gleichung $E = kT$)

◇ **Planck-Länge:** $1.6 \times 10^{-35} \text{ m}$

◇ **Planck-Zeit:** $5.4 \times 10^{-44} \text{ s}$ (Der Zeit, die das Licht für das Zurücklegen der Planck-Länge benötigt.)

◇ **Planck-Dichte:** $1.3 \times 10^{93} \text{ g/cm}^{-3}$ (Planck-Masse in einer Kugel mit Radius der Planck-Länge).

17.24.3 Sub-Planck-Physik vs. Super-Planck-Physik

Anmerkung: Es gibt bisweilen unterschiedliche Konventionen, die h oder $h/2\pi$ verwenden (\hbar , 'h quer'), je nach Einheitensystem (SI, cgs, Heaviside).

Werden Planck-Masse, Planck-Dichte und Planck-Temperatur überschritten bzw. Planck-Länge und Planck-Zeit unterschritten beginnt die Domäne der Quantengravitation. Der Planck-Wert teilt die Welt in **Sub-Planck-Physik** und **Super-Planck-Physik**.

17.24.4 Hoffnung auf eine reduzierte Planck-Skala?

Die Stringtheorien postulieren die Existenz weiterer Dimensionen, den so genannten Extradimensionen, um das **Hierarchieproblem** der vier fundamentalen Wechselwirkungen zu lösen. Die Extradimensionen sind - sollten sie tatsächlich existieren - kompaktifiziert und treten auf großen Raumskalen daher nicht in Erscheinung. Die Gravitation breite sich jedoch nach einer Idee in allen Dimensionen aus: den gewöhnlichen, nicht-kompaktifizierten und den kompaktifizierten. Dabei zeigt sich, dass zusätzliche Dimensionen die Planck-Masse herabsetzen. Dies nennt man **reduzierte Planck-Skala**.

Eine aufregende Möglichkeit besteht darin, dass man diese reduzierte Skala in modernen Teilchenbeschleunigern überprüfen könnte - und vielleicht sogar die Anzahl der Extradimensionen zählen könnte. Die klassische Planck-Masse bei den üblichen vier Dimensionen (siehe auch Raumzeit) liegt in oben genannten gigantischen Energiebereichen von 10^{19} Protonenmassen. Schon bei zehn Extradimensionen reduziert sich die Planck-Skala bis auf etwa 1 TeV (Stichwort: *TeV quantum gravity*). Die modernsten Teilchenbeschleuniger wie der Tevatron oder der noch im Bau befindliche LHC (*Large Hadron Collider*, Start 2007) am CERN stoßen in dieses Energieregime vor, so dass hier die Extradimensionen in Erscheinung treten könnten.

17.24.5 Produktion Schwarzer Mini-Löcher?

Es ist noch dramatischer: Superbeschleuniger wie der LHC könnten im Kollisionsereignis ein - für kosmische Verhältnisse kleines - Schwarzes Loch erzeugen! Diese Minilöcher sind um Größenordnungen kleiner als die primordialen Schwarzen Löcher und würden in Sekundenbruchteilen (einige hundert fm/c, also etwa 10^{-22} Sekunden) durch Emission von Hawking-Strahlung zerfallen. Wegen dieser kurzen Lebensdauer wären sie nicht direkt, sondern nur indirekt nachweisbar. So nehmen die Hochenergiephysiker an, dass die Minilöcher ein recht kugelsymmetrisches Ereignis im Detektor produzieren würden.

Das klingt schon faszinierend und wäre ein Fenster in aufregende, neue Physik. Natürlich müssen diese Erkenntnismöglichkeiten mit den Risiken abgewogen werden. Die Betriebssicherheit der Teilchenbeschleuniger hat immer Vorrang! Darüber sind sich natürlich die Experimentatoren im Klaren. Es steht eine **Laborphysik mit Schwarzen Löchern** in Aussicht, die erstmals die Detektion von Hawking-Strahlung ermöglichen, den Nachweis von Extradimensionen erbringen und eine neue Quantengravitation experimentell greifbar machen würde!

17.25 Planet

Das Wort Planet kommt aus dem Griechischen: $\pi\lambda\alpha\nu\eta\tau\omicron\upsilon$, *planetos*, 'Umherschweifender'. Ein Planet ist ein kugelförmiges Himmelsobjekt, in dessen Innern im Gegensatz zu einem

Stern wie unserer Sonne keine thermonuklearen Fusionsprozesse ablaufen. Planeten kreisen um einen zentralen Stern und bewegen sich auf elliptischen oder kreisförmigen Bahnen. Aber Planeten sind keine Monde, denn Monde sind kleine Himmelskörper, die ihrerseits um einen Planeten kreisen.

Die Bewegungen dieser Massen im Sonnensystem können mit den Kepler-Gesetzen beschrieben werden. Sie folgen aus Rechnungen, die auf der Newtonsche Gravitation basieren.

Astronomen unterscheiden Gasplaneten von erdähnlichen Planeten mit fester Oberfläche. Sie unterscheiden weiterhin innere Planeten (innerhalb der Erdbahn: Merkur und Venus) von äußeren Planeten (außerhalb der Erdbahn: Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun).

17.25.1 Die Vorgeschichte zum neuen Planetenbegriff

Im August 2006 trafen sich mehr als 2500 Astronomen in Prag zu einer Konferenz der Internationalen Astronomischen Union (*International Astronomical Union*, **IAU**). Im Zuge der immer besseren Beobachtungstechnologien wurden in den letzten Jahren viele neue Objekte im Sonnensystem jenseits der Bahn von Pluto entdeckt. Um nicht eine Fülle von Planeten im Sonnensystem zu haben, die aus einer sehr inhomogenen Gruppe bestehen, sahen sich die Astronomen gezwungen, den Planetenbegriff zu überdenken. Sie stimmten bei der IAU-Konferenz über neue Definitionen ab, die seither offiziell festlegen, was Planet ist und was nicht.

17.25.2 Definitionen: Planet

Ein *Planet* ist nach der neuen Definition seit August 2006 ein Himmelskörper, der...

- ◇ ... um die Sonne kreist,
- ◇ ... ein Gravitationsfeld hat, das stark genug ist, dass der Himmelskörper nahezu rund ist
- ◇ ... und eine um seinen unmittelbaren Orbit freie Nachbarschaft hat.

Somit gibt es nun **acht Planeten im Sonnensystem**: Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun.

17.25.3 Definitionen: Zwergplanet

Weiterhin wurde eine zweite Objektklasse *Zwergplanet* definiert. Ein Zwergplanet...

- ◇ ... kreist um die Sonne,
- ◇ ... besitzt ein Gravitationsfeld, das stark genug ist, dass der Himmelskörper nahezu rund ist,
- ◇ ... hat **keine** freie Nachbarschaft in der Nähe seines Orbits
- ◇ ... und ist kein Satellit.

(Quelle: IAU-Website)

Der letzte Zusatz schließt die zahlreichen Monde im Sonnensystem von den Zwergplaneten aus. Daher gibt es **drei Zwergplaneten**: Ceres (ein ehemaliger Planetoid), Pluto (ein ehemaliger Planet) und 2003 UB₃₁₃ (ein neu entdecktes Objekt jenseits der Plutobahn). Pluto wurde außerdem zum Prototypen einer neuen Kategorie gemacht: den **Trans-Neptunischen Objekten** (engl. *trans-Neptunian objects*, **TNOs**). Der unschöne Katalogname 2003 UB₃₁₃ wurde bereits im September 2006 durch **Eris** ersetzt. Dieser Name wurde von den Entdeckern *M.E. Brown, C.A. Trujillo* und *D. Rabinowitz* vorgeschlagen, die Eris am 05. Januar 2005 entdeckten. Eris ist in der griechischen Mythologie die Göttin der Zwietracht - die Namensgebung darf sicherlich als ironische Anspielung auf den Streit um den Status von Pluto angesehen werden. Denn die 'Degradierung von Pluto' vom Planeten zum Zwergplaneten hatte heftige Diskussionen ausgelöst. Der Mond dieses Zwergplaneten Eris, der vorläufig S/2005 (2003 UB₃₁₃) 1 hieß, heißt fortan offiziell **Dysnomia**. Die Fachbezeichnung des Monds lautet (136199) Eris I. Dysnomia ist in der Mythologie der Dämon der Gesetzlosigkeit und die Tochter von Eris.

Außerdem gibt es bereits eine Kandidatenliste für weitere Zwergplaneten, weil jenseits der Plutobahn weitere Himmelskörper des Sonnensystems entdeckt wurden, die in diese Kategorie passen. Eine diagrammatische Übersicht der mittleren Entfernungen im Sonnensystem befindet sich im Eintrag Astronomische Einheit.

17.25.4 extrasolare Planeten

Diese Planeten kreisen um Sterne außerhalb unseres Sonnensystems und sind äußerst schwer zu entdecken. Sie leuchten im Vergleich zu einem Stern sehr schwach und werden vom Hauptstern überstrahlt. Es gibt im Wesentlichen zwei Methoden, um sie aufzuspüren:

1) Eine indirekte Methode heißt **Doppler-Whobbling-Methode** (siehe auch Doppler-Effekt). Durch sie kann man feststellen, dass sich der Hauptstern minimal hin- und herbewegt, weil Planet/en und Hauptstern um den gemeinsamen Schwerpunkt kreisen. Mithilfe dieser Methode können Astronomen sogar Planetenmassen bestimmen. Aufgrund der Unempfindlichkeit der Methode muss der Planet schon sehr massereich sein und sich im Bereich von Jupitermassen bewegen, um detektiert zu werden.

2) Eine alternative Methode zur Entdeckung von Planeten heißt **Bedeckungsmethode**. Bei geeigneter Orientierung kann es passieren, dass ein Planet vor der Sternscheibe des Hauptgestirns vorüberzieht und für eine gewisse Zeit das Sternlicht verdunkelt. Dieses Phänomen heißt in der Fachsprache Transit. Mithilfe photometrischer Methoden messen Astronomen die Helligkeiten des Sterns und können aus der Lichtkurve auf den Planeten schließen.

17.25.5 Zahl der extrasolaren Planeten

Mittlerweile kennt man etwa 200 solcher extrasolaren Planeten.

17.26 Planetarische Nebel

Planetarische Nebel (engl. *planetary nebula*) haben nichts mit Planeten zu tun. Die Bezeichnung ist historisch bedingt, weil die Astronomen die ausgedehnten, im Fernrohr flächenhaft erscheinenden Nebel mit Planetenscheiben in Verbindung brachten. Heute wissen wir, dass das ein Irrtum war.

Denn die farbenprächtigen Planetarischen Nebel sind das Überbleibsel einer sehr aktiven Phase einer bestimmten Klasse von Sternen: den **Roten Riesen**.

17.26.1 Relikte eines Sternenlebens

Rote Riesen geben **starke Sternwinde** ab und blasen damit Sternmaterie ins interstellare Medium. Die Sonne wird ebenfalls diese Rote-Riesen-Phase in etwa 6.5 Mrd. Jahren durchlaufen und durch den

Sonnenwind fast die Hälfte ihrer Masse verlieren! Nach der Riesensternphase bleiben zwei Relikte: ein ausgedehnter Planetarischer Nebel und in dessen Zentrum ein **Weißer Zwerg**.

17.26.2 Warum sehen wir den Nebel?

In diesem Zwerg laufen keine thermonuklearen Fusionsprozesse mehr ab. Aber der Weiße Zwerg ist extrem heiß und gibt Wärmestrahlung sogar im Ultravioletten ab. Diese energiereiche Strahlung regt die abgestreifte Sternmaterie in der Umgebung zum Leuchten an: der Planetarische Nebel erstrahlt und präsentiert sich dem entzückten Beobachter.

17.26.3 attraktives Beispiel: Der Katzenaugennebel NGC 6543

Das Beobachtungsfoto 17.10 zeigt den farben- und formenprächtigen Planetarischen Nebel NGC 6543, auch Katzenaugennebel (engl. *Cat's Eye nebula*) genannt, aufgenommen mit dem Weltraumteleskop Hubble (Credit: STScI/ACS/ESA *Corradi et al.*, April 2004). Der Nebel ist etwa 3000 Lichtjahre entfernt und liegt im Sternbild *Draco* (dt. Drachen) am Nordhimmel. Etwa alle 1500 Jahre wirft der Stern Materie in kugelartigen Blasen aus. Die konzentrischen Ringe sind Relikte dieser Sternwinde und entstehen durch Projektion an die Himmelssphäre. Entlang einer Achse befinden sich stellare Jets und Gasknoten, die die Ringstrukturen durchstoßen (gut zu sehen oben rechts und unten links). Die komplexe Struktur im Innern ist noch nicht genau verstanden und rührt vermutlich von der Überlagerung nicht-kugelförmiger Winde sowie vom Einfluss durch Magnetfelder.

17.26.4 aktuelles Beispiel: NGC 2440, ein ganz heißes Teil

Das Beobachtungsfoto 17.11 stammt ebenfalls vom Weltraumteleskop Hubble und zeigt den Planetarischen Nebel NGC 2440, der dem Katzenaugennebel kaum in Schönheit nachsteht (Credit: NASA/ESA *Noll et al.*, STScI, Februar 2007). NGC 2440 ist etwa 3600 Lichtjahre entfernt (und gehört damit zur Milchstraße) und befindet sich am Südhimmel im Sternbild *Puppis* (dt. Hinterdeck). Im Zentrum des Nebels befindet sich wie erwartet ein Weißer Zwerg, der mit **200000 Kelvin** Oberflächentemperatur (präzise: Effektivtemperatur) zu den heißesten überhaupt gehört!

Die Kompositaufnahme entstand nach dem verhängnisvollen Defekt der Kamera ACS und wurde mit der noch voll funktionsfähigen Kamera WFPC2 aufgenommen.

17.27 Poincarégruppe

Die Poincarégruppe bzw. Poincaré-Transformation ist benannt nach dem Mathematiker *Jules Henri Poincaré* (1854 - 1912). Es handelt sich um eine bestimmte, mathematische Gruppe, die wesentlich ist für die Allgemeine Relativitätstheorie.

17.27.1 Eigenschaften der Poincarégruppe

Im Gegensatz zur Lorentzgruppe ist die Poincarégruppe eine *lineare, inhomogene Transformation*, denn sie entspricht gerade der Lorentzgruppe **erweitert um die endlichen Translationen**. Dies sieht man direkt an der Transformationsvorschrift

$$x^\mu \rightarrow x'^\mu = \Lambda^\mu{}_\nu x^\nu + b^\mu,$$

wo ein zusätzlicher Term auftritt, der eine Verschiebung in Raum und/oder Zeit sein kann (der Vierervektor b^μ).



Abbildung 17.10: Katzenaugennebel NGC 6543.



Abbildung 17.11: Planetarischer Nebel NGC 2440.

17.27.2 Vergleich von Lorentzgruppe mit Poincarégruppe

Weil die Lorentz-Transformation eine *lineare, homogene Transformation* ist, leuchtet unmittelbar ein, dass die Lorentzgruppe eine (eigentliche) **Untergruppe** der Poincarégruppe ist. Die Translationen, ebenfalls lineare Transformationen, bilden eine (invariante) Untergruppe der Poincarégruppe. So kann man schnell ableiten, dass die Poincarégruppe eine **zehnparametrische Gruppe** ist: Sechs Lorentzparameter, die sie von der sechsparametrischen Lorentzgruppe erhält und vier Translationsparameter, die gerade die Einträge im translatierenden Vierervektor \mathbf{b}^μ sind.

17.27.3 Bezug zur Symmetrie und Physik

Die Poincarégruppe konstituiert sämtliche Transformationen, die die Minkowski-Metrik invariant lassen, also die komplette Menge ihrer Isometrien.

Die physikalische Relevanz der Poincarégruppe rührt daher, weil sie unterschiedliche, ausgezeichnete Bezugssysteme eines physikalischen Beobachters (**Inertialsysteme**) ineinander überführt!

17.28 Poincaré-Transformation

Die Poincaré-Transformation entspricht einer erweiterten Lorentz-Transformation, weil sie zusätzlich die Translationen enthält. Daher ist es eine inhomogene, lineare Transformation. Die Poincaré-Transformation bilden eine Gruppe: die Poincarégruppe. Die Lorentzgruppe der Relativitätstheorie ist eine **Untergruppe** der Poincarégruppe. Das erklärt die Relevanz der Poincaré-Transformationen für die Relativitätstheorie. Die Transformationsvorschrift und weitere Erläuterungen finden sich unter dem Eintrag Poincarégruppe.

17.29 Polytrop

Polytrop ist die Fachbezeichnung für eine ganz bestimmte Zustandsgleichung. Zum Verständnis sind einige Grundkenntnisse in der Thermodynamik (Wärmelehre) nötig. Eine Zustandsgleichung stellt eine Beziehung zwischen thermodynamischen Zustandsgrößen wie Temperatur, Druck und Materiedichte her. In der Astronomie werden polytropische Zustandsgleichungen zur Beschreibung von Sternmaterie und Gas benutzt.

17.29.1 barotrope und polytrope Zustandsgleichungen

In der Astrophysik werden 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 die Form hat, wie sie die Gleichung links zeigt (K : Polytropenkonstante, n : Polytropenindex).

17.29.2 zwei wesentliche Polytrope

Die beiden wichtigsten Spezialfälle sind $n = 3/2$ ($\Gamma = 5/3$), was ein **nicht-relativistisches** Gas beschreibt und $n = 3$ ($\Gamma = 4/3$), was ein **relativistisches** Gas (z. B. relativistische Elektronen) beschreibt.

17.29.3 Weiße Zwerge sind polytropisch

Ein Paradebeispiel aus der Astrophysik sind die Weißen Zwerge. Die kompakte Sternmaterie im Innern dieses kompakten Objekts besteht vor allem aus Elektronen, die sich infolge des Pauli-Prinzips nicht beliebig nahe kommen können. Das baut einen Druck auf, der den kompakten, kleinen Stern stabilisiert, den so genannten *Entartungsdruck*.

Diese Form eines 'Quantendrucks' kann jedoch nicht beliebig lange den Zwerg stabilisieren: Wird der Weiße Zwerg zu schwer und überschreitet eine charakteristische Grenzmasse, die Chandrasekhar-Grenze, so explodiert der Zwerg in einer Supernova Typ Ia. Diese thermonukleare Supernova lässt kein kompaktes Relikt übrig.

17.29.4 Buchtipp: Standardwerk von Chandrasekhar

- ◇ *Chandrasekhar, Subrahmanyan*: An introduction to the study of stellar structure, The University of Chicago press (1939)

17.30 Population

In der Astronomie unterscheidet man unterschiedliche Generationen von Sternen. Diese Sternpopulationen heißen **Population I**, **II** und **III** und werden bei dem Begriff des Metalls im Detail beschrieben.

17.31 Post-Newtonsche Approximation

Eine approximatives Gravitationsmodell zwischen Einsteinscher Allgemeiner Relativitätstheorie und Newtonscher Gravitation - siehe Gravitation für weitere Erläuterungen.

17.32 Poynting-Fluss

Der Poynting-Fluss ist ein elektromagnetischer Energie-Fluss, der durch Magnetfelder getrieben wird. Die Astrophysiker rechnen in der Theorie Poynting-Flüsse aus, um die Plasmaphysik diverser kosmischer Objekte zu verstehen.

17.32.1 Wozu braucht man das?

Generell hängen Poynting-Flüsse mit einer physikalischen Disziplin zusammen, die **Magnetohydrodynamik (MHD)** heißt. Hier werden die physikalischen Gesetze der Fluidodynamik und Elektrodynamik verknüpft - das klingt kompliziert, und das ist es leider auch. Zur Lösung der MHD-Differentialgleichungen sind die Physiker fast ausnahmslos auf Computer angewiesen.

17.32.2 Beispiele: Plasmaphysik der Sonne und der Schwarzen Löcher

Wesentliche Anwendungen sind die Sonnenphysik, genauer gesagt die **solare MHD**, sowie die Physik Schwarzen Löchern, hier die **allgemein relativistische MHD auf der Kerr-Geometrie**. Der Poynting-Fluss wird im Falle der Sonne von der Photosphäre emittiert. Bei rotierenden Schwarzen Löchern gibt es um den Ereignishorizont den Bereich der Ergoregion, den nach außen durch die Ergosphäre begrenzt ist. Ragt die innere Akkretionsscheibe bis in die Ergoregion herein, sprechen Astrophysiker von *ergosphärischen Akkretionsscheiben*. Der Poynting-Fluss kann unter dieser Voraussetzung von der inneren Scheibenoberfläche abgestrahlt werden. In beiden Fällen - Sonne und Kerr-Loch - betrachten Astrophysiker **magnetische Flussröhren** (engl. *flux tubes*). Im Prinzip sind das Magnetfeldlinien, die von den elektrischen Ladungen im Plasma erzeugt (*induziert*) werden. Die Dynamik und Wechselwirkung der Flussröhren bestimmt gerade, wie Plasma aus der Oberfläche der Sonne bzw. Akkretionsscheibe gerissen wird.

17.32.3 magnetische Energie wird Bewegungsenergie

Nun kommt ein Mechanismus ins Spiel, der in der MHD **Rekonnexion** genannt wird. Dies meint gerade den Vorgang, bei dem Magnetfeldlinien entgegengesetzter Polarität vernichtet werden. Dabei wird magnetische Energie frei, die in den Feldlinien gespeichert ist: sie wird in kinetische Energie des Plasmas umgewandelt. Die Magnetfeldlinien durchstoßen die Oberfläche des Plasmas. Bei der Sonne bilden sich an diesen Stellen gerade die Sonnenflecken aus. Das Plasma wird entlang der Magnetfeldlinien aus der Oberfläche extrahiert und durch magnetische Wellen, so genannte Alfvén-Wellen, weiter getrieben (siehe auch Alfvén-Geschwindigkeit). Dadurch entsteht ein ausfließender Partikelstrom. Bei der Sonne nennen das die Astrophysiker den *Sonnenwind*, ansonsten sprechen sie generell von einem *Teilchenwind*.

Die Beschreibung der Flussröhren mit sieben Erhaltungsgrößen führt schließlich über die Betrachtung der Vierer-Geschwindigkeiten auf die **Wind-Gleichungen**, die in der solaren MHD den Sonnenwind beschreiben und in der MHD magnetisierter Akkretionsscheiben einen Teilchenwind liefern (siehe dazu auch Blandford-Payne-Szenario).

17.32.4 MHD bei aktiven Galaxien

Solche Winde sind wichtig bei besonders aktiven Zentren von Galaxien, den Aktiven Galaktischen Kernen (AGN), z. B. bei Quasaren oder Radiogalaxien. Denn allgemein nehmen Astrophysiker an, dass die Scheibenwinde und Poynting-Flüsse das Jetplasma speisen. Ein weiterer Effekt, der dabei eine Rolle zu spielen scheint, ist der Blandford-Znajek-Mechanismus. Die zentralen Ausflüsse des AGN werden auf der großen Längenskala in Anwesenheit von Magnetfeldern durch Lorentzkräfte zu den relativistischen Jets der AGN gebündelt. Diese Bündelung breiter Plasmaausflüsse nennen die Physiker *Kollimation*. Sie vollzieht sich erst bei viel größeren Abständen zum Schwarzen Loch, typischerweise ab 100 Schwarzschildradien.

17.32.5 generelle Bedeutung

Das mag sich nun insgesamt sehr theoretisch und kompliziert anhören, aber diese magnetischen Prozesse sind von Bedeutung - für den **kosmischen Materiekreislauf** und letzten Endes auch für Menschen. Weshalb? Nun, die Materiestrahlen, die von Akkretionsscheibe und Schwarzen Loch herausgeschossen werden, können sich unglaublich weit von ihrem Entstehungsort entfernen: bis zu kpc und Mpc! Auf einer ganz großen Längenskala, die vergleichbar ist mit dem Durchmesser ganzer Galaxien und Galaxienhaufen, finden hier Umwälzungsprozesse von Materie statt. Die verschiedenen Elemente, die sich im Materiekonglomerat befinden, werden durchmischt. Die Metallizität verteilt sich gleichmäßig. Das ist aber gerade die unabdingbare Voraussetzung für die Bildung komplexer Moleküle, die aus verschiedenen Elementen bestehen - und damit für **Leben**. Aus der Vogelperspektive betrachtet wird klar, das aktive, supermassereiche Schwarze Löcher entscheidend an unserer Existenz beteiligt waren.

17.33 pp-Kette

Der wichtigste Mechanismus zur Energieumwandlung aus thermonuklearer Fusion (siehe diesen Link für Details) in massearmen Sternen wie der Sonne.

17.33.1 'Brennen' in der Astrophysik

Geläufiger ist der Name **Wasserstoffbrennen**, wenn er auch physikalisch nicht ganz korrekt ist. *Brennen* hat im Jargon der Astrophysiker nichts mit einer chemischen Reaktion mit Sauerstoff zu tun, sondern meint ausschließlich (auch bei Helium-, Kohlenstoff-, Sauerstoff-, Siliziumbrennen) die **Fusion** (Verschmelzung) von leichten Atomkernen zu schweren Atomkernen. Der Oberbegriff für diese Fusionsreaktionen im Sterninnern heißt **stellare Nukleosynthese**.

17.33.2 stabile Lichtquelle ist gut für Leben

Die pp-Kette ist von wesentlicher Bedeutung für die Entstehung und Aufrechterhaltung von Leben auf der Erde. Die langfristige, externe Versorgung mit Strahlungsenergie eines einigermaßen stabil strahlenden Sterns ist unbedingte Voraussetzung für die Entstehung des Lebens überhaupt - wenn man mit gewohnt irdischen Maßstäben urteilt.

17.34 p-Prozess

Der p-Prozess ist neben dem r-Prozess und dem s-Prozess diejenige Kernreaktion, die für die Existenz von Metallen (Astrophysikerjargon: chemische Elemente schwerer als Helium) in der Natur verantwortlich ist.

17.34.1 Ursprung der p-Kerne

Der p-Prozess wurde von *Burbidge, Fowler & Hoyle* 1957 postuliert, weil man einige Kerne mit sehr geringer Isotopenhäufigkeit identifizierte, die weder durch den s-Prozess, noch durch r-Prozess entstanden sein konnten. Auf der Nuklidkarte sind dies 32 stabile Kerne, die sehr protonenreich sind und **p-Kerne** genannt werden. Die p-Kerne entstehen nicht durch Neutronen-, sondern durch **Protoneneinfang**. Im Speziellen sind es 32 stabile Nuklide zwischen den Elementen Selen (*Se-74*) und Quecksilber (*Hg-196*). Sie entstehen aus zuvor in s- und r-Prozessen gebildeten Kernen.

17.34.2 Extrem heiß muss es sein

Die erforderlichen Temperaturen sind sehr hoch, damit der p-Prozess abläuft, etwa **eine Milliarde Kelvin**. Dieses Milieu wird in Supernovae Typ II erzeugt, wenn die auslaufende Schockfront das Sternplasma stark aufheizt. Anschaulich führen die hohen Plasmatemperaturen zu hohen mittleren Geschwindigkeiten der Protonen, die nötig sind, um den abstoßenden Coulomb-Wall des Einfangkerns zu überwinden (vergleiche aber auch Tunneleffekt). Mit dem Protoneneinfang ist die Emission von Gammaquanten (hochenergetischen Photonen aus dem Atomkern) verbunden. Diese können ihrerseits von den Kernen reabsorbiert werden und zur Emission von Protonen führen. Es stellt sich ein **Gleichgewicht** zwischen Hin- und Rückreaktion ein. In diesem *Photonenbad* hat auch der Mechanismus der **Photodisintegration** eine Relevanz. Hierbei werden die Gammaphotonen von den Kernen absorbiert und enden in unterschiedlichen Zerfällen zu Fragmenten (Kerne und Nukleonen).

17.34.3 p-Prozess ist selten

Die protonenübersättigten Kerne zerfallen bei tieferen Temperaturen über β^+ -Zerfall in protonenärmere Kerne bis sie das Stabilitätstal erreichen (**Gamma-Prozess**). So bewirkt der p-Prozess, dass für den s- und r-Prozess unerreichbare stabile Kerne **doch gebildet** werden können. Wie die geringe Isotopenhäufigkeit der p-Kerne verrät, ist der p-Prozess *relativ selten in der Natur* und funktioniert nur unter den beschriebenen, kurzzeitig vorherrschenden Bedingungen in Supernovae.

17.34.4 Empfohlene Literatur

◇ Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Kernphysik, Arbeitsgruppe Nukleare Astrophysik

17.35 Prandtl-Zahl

Dies ist eine der charakteristischen, dimensionslosen Zahlen der Hydrodynamik und Magnetohydrodynamik, benannt nach dem deutschen Physiker *Ludwig Prandtl* (1875 - 1953), der als Mitbegründer der Aero- und Hydrodynamik gilt.

Die Prandtl-Zahl Pr ist definiert als Produkt aus Wärmekapazität bei konstantem Druck mit der dynamischen Viskosität, geteilt durch die thermische Konduktivität.

17.36 primordiale Schwarze Löcher

Bei den primordialen Schwarzen Löchern (engl. *primordial black holes*, PHB) handelt es sich um eine besonders leichte Form Schwarzer Löcher, die sich möglicherweise im frühen Universum entwickelt haben. Auf diese frühe Entstehung nimmt auch das Attribut *primordial* Bezug. Der Begriff stammt aus dem Lateinischen für *primordium*, dt.: Anfang, Ursprung.

17.36.1 Herkunft primordialer Löcher - nach der Inflation

Primordiale Schwarze Löcher sind **nicht** durch den Gravitationskollaps eines Sterns entstanden, denn die gab es im frühen Kosmos noch nicht. Darin unterscheiden sich entwicklungsgeschichtlich die PBHs von ihren 'großen Brüdern', den stellaren Schwarzen Löchern und auch von daraus gewachsenen supermassereichen Schwarzen Löchern. Vielmehr nehmen die Kosmologen an, dass hoch komprimierte Gebiete im heißen, dichten 'Urbrei' des frühen Universums in sich zusammenfielen. Das sollte sich kurz nach dem Urknall (engl. *big bang*) ereignet haben. Denn auch primordiale Schwarze Löcher benötigen überdichte Massenansammlungen, um sich bilden zu können. Der dichte Kosmos kurz nach dem Urknall hat eine Zeit lang dafür gute Bedingungen geliefert. Eine wesentliche Einschränkung kommt dabei von der Inflation: Falls primordiale Löcher *vor* der Inflationsära entstünden, so würde die danach stattfindende exponentielle Ausdehnung in der Inflationsepoche die PBHs ausgedünnt haben. Wenn also PBHs überhaupt eine Rolle spielen, dann nur diejenigen, die in einer Epoche **nach** der Inflation entstanden sind. Die Kosmologen nennen das die so genannte *post-inflationäre Ära*.

17.36.2 Schwups & weg

Seit den 1970er Jahren wird angenommen, dass Schwarze Löcher nicht für alle Zeiten stabil sein können. Mittels Rechnungen, die sowohl die Quantentheorie, als auch die Allgemeine Relativitätstheorie und Thermodynamik berücksichtigen, fand der bekannte Physiker *Stephen Hawking* 1974, dass von Schwarzen Löchern immer eine diffuse Strahlung ausgeht. Diese Hawking-Strahlung kann als Wärmestrahlung interpretiert werden. Hawkings bisher *unbestätigte Hypothese* besagt, dass Schwarze Löcher durch diesen ständigen Strahlungsverlust Energie und Masse verlieren. Besonders dramatisch ist dieser Masseverlust bei den leichten Mini-Löchern: Sie verschwinden durch Hawking-Emission nach relativ kurzer Zeit und überdauern deshalb nicht bis ins lokale Universum.

17.36.3 Massen primordialer Löcher

Bereits 1967 konnten *Zel'dovich & Novikov* eine Gleichung ableiten, die die Lochmasse M in Beziehung setzt zur kosmologischen Epoche, also der kosmischen Zeit t nach dem Urknall, in der sie sich gebildet haben. Sie lautet:

$$M(t) \sim 10^{15} \text{ g} \left(\frac{t}{10^{-23} \text{ s}} \right)$$

Nehmen wir an, das PBH habe sich bereits in der Planck-Ära gebildet, so hätte es eine Masse von 10^{-5} Gramm, also gerade die Planck-Masse. Diese PBHs sollten jedoch die Inflationsära nicht überlebt haben.

Nehmen wir stattdessen eine Zeit von einer Sekunde nach dem Urknall an, so resultiert bereits eine Masse von 10^5 Sonnenmassen - an der Schwelle von supermassereichen Schwarzen Löchern!

Nehmen wir an, dass die primordialen Löcher kurz nach der Inflation in der Strahlungsära, also 5×10^{-24} Sekunden nach dem Urknall, entstanden. Dann ist die Masse der primordialen Löcher aus dieser Epoche vergleichbar mit derjenigen eines irdischen Berges ist, etwa eine Milliarde Tonnen oder 10^{15} g. Das ist die kanonische Masse der primordialen Schwarzen Löcher (*Bekenstein* 2004).

17.36.4 Teilchenspektrum primordialer Löcher

Ein Schwarzes Loch, das eine Milliarde Tonnen wiegt, hätte einen Schwarzschild-Radius von nur 10^{-13} Zentimetern oder einem Femtometer (Kernphysikerjargon: 'ein Fermi'). Eine so winzige Länge ist typisch für den subatomaren Bereich und unterhalb der klassischen Größen von Neutron oder Proton! Aufgrund der kleinen Massen ist die Hawking-Temperatur der PBHs relativ hoch, etwa 100 Milliarden Kelvin! Das entspricht einer thermischen Energie von nur 10 MeV, so dass ein primordiales Loch nur Photonen und Neutrinos, aber keine Nukleonen, die mit etwa 1000 MeV Masse viel schwerer sind, im Spektrum der Hawking-Strahlung emittieren könnte.

17.36.5 Lebensdauer primordialer Löcher

Die Lebensdauer der PBHs lässt sich somit abschätzen, indem man annimmt, dass das Loch gegebener Masse beständig Energie und Masse durch die Emission leichter Teilchen verliert. Mathematisch folgt die Lebensdauer aus der Strahlungsleistung eines Wärmestrahlers, wenn man als Oberfläche des Strahlers die Horizontfläche des Loches (siehe dazu Eintrag Bekenstein-Hawking-Entropie) und als Temperatur des Strahlers die Hawking-Temperatur annimmt. Die Lebensdauer als Funktion der Lochmasse ist dann gegeben durch:

$$\tau(M) \sim 10^{64} \text{ Jahre} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^3,$$

wobei M_{\odot} die Sonnenmasse von 1.99×10^{30} kg ist.

Das führt auf eine Lebenszeit von etwa 1.3 Mrd. Jahren für die eine Milliarde Tonne wiegenden PBHs. Die **Lebensdauer steigt allerdings mit der dritten Potenz der Lochmasse**. Ein deutlich leichteres Loch wäre damit schon früher zerstrahlt. An diesen Rechnungen sieht man, dass PBHs von maximal der Masse eines Bergs schon innerhalb des Alters unseres Universums vollständig zerstrahlt wären.

17.36.6 Nachweis primordialer Löcher schwierig

Das Verdampfen vollzieht sich in der letzten Phase explosionsartig, so dass primordiale Schwarze Löcher Signaturen im Muster der kosmischen Hintergrundstrahlung und kosmischen Strahlung hinterlassen haben sollten. Primordiale Schwarze Löcher, die gerade in unserer gegenwärtigen Epoche zerstrahlen, sollten zum Hintergrund der Gammastrahlung beitragen. Es wurde auch diskutiert, dass vielleicht einige Gammastrahlenausbrüche auf explodierende, primordiale Löcher zurückgingen (*Cline et al. 1997*, *Belyanin et al. 1997*). Für all diese Szenarien gibt es bislang keine Bestätigungen aus astronomischen Beobachtungen, sondern weitaus bessere, konventionelle Erklärungen. In der *scientific community* gelten primordiale Schwarze Löcher als **sehr hypothetisch**.

17.36.7 kosmologische Rolle primordialer Löcher?

Ihre Rolle in der Entwicklung des Kosmos im Rahmen der Kosmologie ist nach wie vor nicht klar. Sie könnten eine **Rolle bei der Strukturbildung**, also der Entstehung von Sternen und Galaxien gespielt haben. Es ist zumindest denkbar, dass die primordialen Schwarzen Löcher die 'Saatkörner' von Sternen und Galaxien waren. Freilich wären die Details zu klären, wie aus subatomaren Löchern makroskopische Objekte wie die Sterne werden. Die kosmologische Rolle Schwarzer Löcher wäre in diesem Szenario allerdings gewichtig, sorgten sie doch für die Entstehung der Welteninseln, in denen sich schließlich Planeten und das Leben bildete. Aber die Kosmologen wissen bislang nicht, ob es sich so abgespielt hat.

17.36.8 Das Potenzial theoretischer Forschung

Nach der Lektüre dieses Eintrags könnte man stutzig werden und sich fragen, was es überhaupt bringt, sich mit so etwas Spekulativem wie primordialen Schwarzen Löchern zu beschäftigen. Immerhin könnte

sich irgendwann herausstellen, dass primordiale Schwarze Löcher definitiv nie existiert haben!

Dieser berechtigten Kritik kann man etwas entgegenstellen, dass für alle Theorien Gültigkeit hat: **fundamentale Erkenntnis**. Der theoretische Astrophysiker *Bernard Carr* von der Universität London nennt die 1974 entdeckte Hawking-Strahlung als eine der wichtigsten Entdeckungen in der Physik des 20. Jahrhunderts. Er begründet dies damit, dass es Hawking gelang drei bis dato getrennte Bereiche der Physik - Quantentheorie, Allgemeine Relativitätstheorie und Thermodynamik - zu verknüpfen, was mit profunden, neuen Erkenntnissen über die Natur verbunden war. Carr rechtfertigt deshalb Grundlagenforschung und formuliert in u.g. Papier pointiert:

Thus the discovery illustrates that studying something may be useful even it does not exist!

17.36.9 Literaturtipps

- ◇ Publikation: *Jacob D. Bekenstein*, Black Holes: Physics and Astrophysics - Stellar-mass, supermassive and primordial black holes, 2004
- ◇ Publikation: *Bernard J. Carr*, Primordial Black Holes as a Probe of Cosmology and High Energy Physics, 2003
- ◇ Web-Essays von *Andreas Müller*: Alles graue Theorie? sowie Brauchen wir Grundlagenforschung?

17.37 Prinzip minimaler gravitativer Kopplung

Das ist eines der wesentlichen Prinzipien, das *Albert Einstein* zu seiner Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) inspirierte. Daneben sind das Äquivalenzprinzip, das Kovarianzprinzip, das Korrespondenzprinzip und das Machsche Prinzip zu nennen.

17.37.1 Warum schwer machen, wenn's einfach geht?

Das Prinzip minimaler, gravitativer Kopplung dürfte dasjenige unter den fünf sein, das am wenigsten bekannt ist. Letztendlich ist es ein Leitprinzip, das in allgemeiner Form fast alle Physiker und Mathematiker verfolgen: ein **Prinzip der Einfachheit**. Die meisten physikalischen (aber auch andere wissenschaftliche) Modelle sind dadurch geprägt, das zunächst der simpelste Zugang zu einer Problemstellung gewählt wird. Das gilt besonders dann, wenn es sich um die 'ersten Schritte' auf wissenschaftlichem Neuland handelt. Es geht darum, ein prinzipielles Verhalten eines Systems unter einfachsten Bedingungen zu erforschen. Erst danach wird das Modell komplexer, kompliziertere Wechselwirkungen werden miteinbezogen oder höhere Ordnungen werden betrachtet. Im Kern ist es wohl gerade das, was man mit **analytischem Denken** in der Naturwissenschaft meint. Eine naturwissenschaftliche Problem wird analysiert, also in Bestandteile zerlegt. Die Komponenten werden in einem logischen Zusammenhang zueinander gebracht und deren Wechselwirkung erörtert. In der Regel beschreibt eine mathematische Gleichung oder ein System gekoppelter Gleichungen (häufig Differentialgleichungen) die Dynamik des Systems. Diese Gleichungen werden mit wohl bekannten (in der Regel numerischen, nicht analytischen) Techniken gelöst. D.h. das Problem ist in dem Sinne gelöst, dass der Naturwissenschaftler ein Verhalten in Vergangenheit oder Zukunft **vorhersagen** kann bzw. ein in der Natur beobachtetes Phänomen **erklären** kann. Erklären heißt wiederum, dass er die komplexe, wechselseitige Beeinflussung der Systemteile logisch und plausibel verknüpfen kann.

17.37.2 Was bringt's Einstein?

Der simplifizierende Ansatz in der Modellbildung lässt auf die Relativitätstheorie folgendermaßen anwenden: angenommen die Gleichungen der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) seien bereits bekannt. So folgen die Gleichungen der ART - die dann erst eine Gravitationstheorie darstellt - unter anderem dann, wenn unnötig komplizierte Terme beim Übergang von SRT nach ART weggelassen

werden. Diese vage Formulierung wird konkret, wenn also beispielsweise partielle Ableitungen lediglich in kovariante Ableitungen verwandelt werden, **ohne zusätzliche Terme**, die beispielsweise den Krümmungstensor enthalten. Minimale gravitative Kopplung ist so zu verstehen, dass so wenig neue Terme mit dem Krümmungstensor wie möglich auftreten, wenn man den Übergang von SRT nach ART vollzieht.

17.37.3 Beispiel: der Einstein-Tensor

Der Einstein-Tensor $G_{\mu\nu}$ stellt gerade die linke Seite der Einsteinschen Feldgleichungen dar. Es ist die 'geometrische Seite', die den Riemannschen Krümmungstensor in verschiedenen Verjüngungen (als Ricci-Tensor und Ricci-Skalar) enthält. Als Tensorgleichung genügt der Einstein-Tensor

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R.$$

Aber wie kommt man gerade darauf, dass der Einstein-Tensor so aussehen muss? Das ist nicht-trivial! Der Tensor wurde nicht umsonst nach Einstein benannt: Es hat ihn und seinen Freund *Marcel Grossmann* mehrere Jahre gekostet, um diese Gestalt abzuleiten! Das Prinzip minimaler gravitativer Kopplung hat bei der Bestimmung dieser Gleichung sicher eine Rolle gespielt, denn es sind auch kompliziertere Einstein-Tensoren denkbar.

17.38 Protostern

Protosterne (wörtlich übersetzt *Vorläufer eines Sterns*) sind junge Sterne, die gerade im Begriff sind zu entstehen. Eine detaillierte Darstellung gibt es auch im Eintrag Sternentstehung.

17.38.1 Wir beginnen im Kühltank...

Objekte der **Sternbildungsphase** sind meistens eingebettet in eine dichte Wolke aus interstellarem Material, wie kalten Riesenmolekülwolken (engl. *giant molecular clouds*, GMCs) mit etwa 10^4 bis 10^6 Sonnenmassen oder Dunkelwolken. Dieses Material kollabiert durch gravitative Instabilitäten zu lokalen Verdichtungen (*Überdichten*), wenn genügend Materie vorhanden ist und die so genannte Jeans-Masse erreicht ist. Allerdings kann Rotation der GMC und Magnetfelder (MHD-Turbulenz) dem Gravitationskollaps entgegenwirken. Doch elektrisch neutralen Teilchen (in großer Zahl) kann es gelingen, durch so genannte **ambipolare Diffusion** trotzdem gravitativ zu kollabieren, weil sie *nicht magnetisch* gekoppelt sind wie geladene Teilchen. Die Zeitskalen dieses Prozesses sind jedoch sehr hoch.

17.38.2 ...dann bröckelt es...

Fragmentation produziert ultradichte Subkerne der GMC von Massen typischerweise zwischen 1000 Sonnenmassen und einer Sonnenmasse bei ambipolarer Diffusion. Aus den kollabierten Massen können Sterncluster und Einzelsterne entstehen. Der dichte Staub schluckt sehr viel Strahlung - besonders im optischen Spektralbereich. Die Fachwelt nennt die Abschwächung der Helligkeit eines kosmischen Strahlers durch Staub Extinktion. Die Strahlung geht allerdings nicht verloren, sondern verliert Energie durch mehrmalige Streuprozesse an den winzigen, etwa einen Mikrometer durchmessenden Staubteilchen. Die Strahlung wird also **gerötet** - ein Effekt der durchaus mit der Rötung des Sonnenlichts bei Sonnenauf- und -untergang verglichen werden darf (da sind es allerdings die Gasteilchen und Aerosolpartikel der Erdatmosphäre, die die Rötung hervorrufen: Rayleigh-Jeans Streuung, Mie-Streuung).



Abbildung 17.12: HST-Bild des Adlernebels.

17.38.3 ...noch bleibt es verborgen...

Die Extinktionen von Dunkelwolken sind besonders hoch. Die Dunkelwolken wie der *Kohlensack* oder der *Pferdekopfnebel* (Foto unter Extinktion) in der Milchstraße verschieben damit die Strahlung optischer Wellenlängen ins Infrarote und schwächen die scheinbare Helligkeit um einige 20 Magnituden! Die Protosterne, die typischerweise in Dunkelwolken eingebettet sind, sind deshalb naturgemäß im Optischen schwierig zu beobachten. Die Astronomen weichen aus diesem Grund auf Infrarotteleskope aus, wie das Very Large Telescope, die Keck-Teleskope (die beide noch im Nahinfrarot beobachten können) oder das weltraumgestützte Spitzer-Teleskop.

17.38.4 ...und endlich zündet der Stern!

Sobald jedoch die thermonuklearen Kernfusionprozesse im Innern eines Protosterns ausreichender Masse zünden, bläst der kräftige Strahlungsdruck der Photonen und der Sternenwind aus verschiedenen Teilchenspezies die dichte Wolke nach und nach weg: Der junge Stern bahnt sich den Weg durch dichten Staub und erscheint schließlich auch optisch als hell leuchtender Stern. Diese Verhältnisse belegen eindrucksvolle, farbenprächtige Aufnahmen des Hubble Weltraumteleskops, wie das optische Foto des Adlernebels 17.12 (Credit: NASA/ESA/STScI/AURA 2005). Urteilen Sie selbst: Es gehört sicherlich zu den schönsten Bildern, die Astronomen jemals von der Natur gemacht haben. Man erkennt darauf Wolken aus kaltem Staub, atomaren und molekularen Wasserstoff, in die bizarre Strukturen durch die hydrodynamische Wechselwirkung unterschiedlicher Gase und vom UV-Licht junger Sterne geschliffen werden. Die Natur zeigt sich hier von ihrer kreativen Seite: Als Bildhauer einer etwa zehn Lichtjahre hohen, farbenprächtigen Skulptur, deren Haupt ein Lichtschein krönt. Der aufmerksame Betrachter entdeckt längliche Strukturen, die sich am Kopf in das interstellare Medium bohren. Vermutlich handelt es sich dabei um protostellare Jets. Der Adlernebel ist eine Sternentstehungsregion - eine von vielen Wiegen der Sterne in der Milchstraße. Viele andere Sterne verbergen sich noch in der Dunkelwolke.

17.38.5 Typen junger Sterne

Protosterne werden in der Astronomie auch etwas verallgemeinernd Junge stellare Objekte genannt (engl. *Young Stellar Objects*, YSOs). Dabei unterscheidet man folgende Typen:

- ◊ Die **Braunen Zwerge** sind 'verhinderte Sterne', die eher riesigen Gasplaneten ähneln ('Jupiters'). Sie haben zuwenig Masse (kleiner als 0.08 Sonnenmassen), als dass sie das thermonukleare Feuer im Innern zünden könnten. Sie gewinnen ihre Strahlungsenergie eher aus der **Kontraktion** und strahlen im Infraroten und Radiobereich. Deshalb suchen die Astronomen sie mit Infrarotteleskopen. Das ist schwierig, weil die Braunen Zwerge einerseits sehr leuchtschwach und andererseits sehr klein sind.
- ◊ **Herbig-Haro-Objekte** sind kompakte, helle Nebel in der Nähe von Dunkelwolken, die im Lichte des atomaren Wasserstoffs HI und einiger Molekülspezies (H_2 , CO, CS etc.) leuchten. Sie zeigen außerdem auffällige, knotige Strukturen. Dies wird mit Schockanregungen erklärt, und es sind gerade die protostellaren Jets der jungen Sterne, in denen Gas, das kurz zuvor auf einen entstehenden Stern akkretiert wurde, wieder gerichtet ausfließt. Dabei bilden sich im Jetplasma innere Schocks und der prominente Bugschock am Kopfende aus. Diese Jets sind atomar und molekular **strahlungsgekühlt**. Der Massenverlust ist verglichen mit den extragalaktischen Makro-Jets sehr gering: nur im Bereich von 10^{-7} Sonnenmassen pro Jahr. Die Ausflüsse sind beidseitig (*bipolar*) und senkrecht zur **akkretierenden Staubscheibe**. Je nach Orientierung zum Beobachter treten sie ein- oder zweiseitig auf. Im Zentrum zwischen den bipolaren Ausflüssen befindet sich ein junger Stern, meist vom *T Tauri-Typus*.
- ◊ **T Tauri-Sterne** sind mit einem Alter von nur 10^5 bis 10^7 Jahren sehr junge Sterne, die sich im weiteren Verlauf zu 'normalen Sternen' auf der Hauptreihe des Hertzsprung-Russell-Diagramms entwickeln. Sie bewegen sich noch senkrecht zur Hauptreihe, d. h. variieren in der Leuchtkraft bzw. Helligkeit, was durch den Akkretionsprozess verursacht wird. Durch Akkretion

können sie einen protostellaren Jet speisen, so dass die Umgebung des T Tauri-Sterns als *Herbig-Haro-Objekt* (s. o.) in Erscheinung tritt. T Tauri-Sterne beginnen gerade durch hohe Sternwindaktivität Gas und Staub ihrer unmittelbaren Umgebung 'wegzublasen'.

- ◇ **rho Ophiuchi-Sterne** sind nach dem Prototyp in einer anderen prominenten Sternentstehungsregion benannt, dem Ophiuchus-Nebel IC 4604 im Sternbild *Ophiuchus* (dt. *Schlangenträger*, dem bekannten Äskulap der Medizin). In dieser riesigen Dunkelwolke sind wie im Adlernebel auch viele junge Sterne eingebettet, die von der Erde nur etwa 500 Lj entfernt sind. Damit ist rho Ophiuchi die uns nächste Sternentstehungsregion.
- ◇ **FU Orionis-Sterne** sind eine Unterklasse der T Tauri-Sterne, die mit dem 100 bis 1000fachen typischer Massenverlusten viel größere Verlusten durch Sternwinde aufweisen. Die Akkretionsrate scheint entsprechend größer zu sein.
Die akkretierenden Staubscheiben der Protosterne sind die Vorläufer der planetaren Scheiben, aus denen also **Planeten** fragmentieren können. Man nennt sie daher auch protoplanetare Scheiben (engl. *protoplanetary disks*, kurz **Proplyds**).
- ◇ **ZAMS-Sterne** sind Sterne die gerade die Hauptreihe im Hertzsprung-Russell-Diagramm erreichen. Das Akronym ZAMS steht für **Z**ero-**A**ge **M**ain **S**equ**S**tance **S**tars, also Alter-Null-Hauptreihensterne, die nur ein Alter von etwa 10 bis 100 Millionen Jahre haben. Unsere Sonne war im Alter von 40 Millionen Jahren ein ZAMS. Der Strahlungsfluss hat sich - verglichen mit dem der T Tauri-Veränderlichen - stabilisiert und hat nur noch eine moderate Variabilität. Zeitlich schließen sich die ZAMS an entwickelte T Tauri-Sterne an und haben ein vollständig ausgebildetes Planetensystem, wie wir es vom Sonnensystem her kennen. Die Staubscheibe ist nahezu verschwunden, als Relikt bleibt wenig interplanetares Gas übrig. Im Sonnensystem macht sich dieser Gasrest als Zodiakallicht bemerkbar macht. Typische ZAMS findet man gleich als Sternhaufen in den *Plejaden* (M45).

17.38.6 YSO-Klassen

Bei den Protosternen bzw. YSOs unterscheiden die Astronomen in chronologischer Entwicklung eines Sterns folgende Klassen:

- ◇ **Klasse 0 YSOs** sind die frühesten Formen. Da dieser Zustand kurzlebig (Maximalalter 100 000 Jahre) ist, entdeckt man sie auch sehr selten. Die Beobachtbarkeit ist nur unterhalb 10 Mikrometer möglich, was thermischen Spektren eines etwa 30 Kelvin kalten Gases entspricht. Auch hier kann man schon die Propagation von Ausflüssen und Schocks beobachten. Eine mögliche Quelle ist: IRAS 03282+3035
- ◇ **Klasse 1 YSOs** sind schon einige 100 000 Jahre alt und können bereits bei Mittelinfrarot (MIR) und Ferninfrarot (FIR) beobachtet werden. Sie zeigen manchmal Variabilitäten wie *FU Orionis*-Sterne. Erstaunlicherweise sieht man nicht nur Emission im langwelligen Bereich, sondern auch in der **Röntgenstrahlung**! So konnte mit dem Röntgensatelliten *Chandra* im Objekt HH2 Röntgenstrahlung detektiert werden, die wohl eine Signatur für sehr heißes Gas (10^6 Kelvin) ist. Es ist also thermische Röntgenstrahlung. Das heiße Gas entsteht, wenn der schnelle, protostellare Jet auf langsames Material trifft.
In den Proplyds beobachtet man Jupiter-artige Kerne und kleinere Planetesimale. Klasse 1 - Quellen sind besonders zahlreich in der *Serpens-Wolke* (Sternbild *Schlange*). Eine Klasse 1 - Quelle ist: HH 30.
- ◇ **Klasse 2 YSOs** sind die klassischen T Tauri-Sterne. Sie zeigen prominente Wasserstoff- und Kalziumlinien und sind optisch variabel. Die 'Proto-Jupiters' sammeln das Wasserstoff- und Heliumgas des Proplyds auf, um einen Gasplaneten zu bilden. Auch erdähnliche Planeten können entstehen.

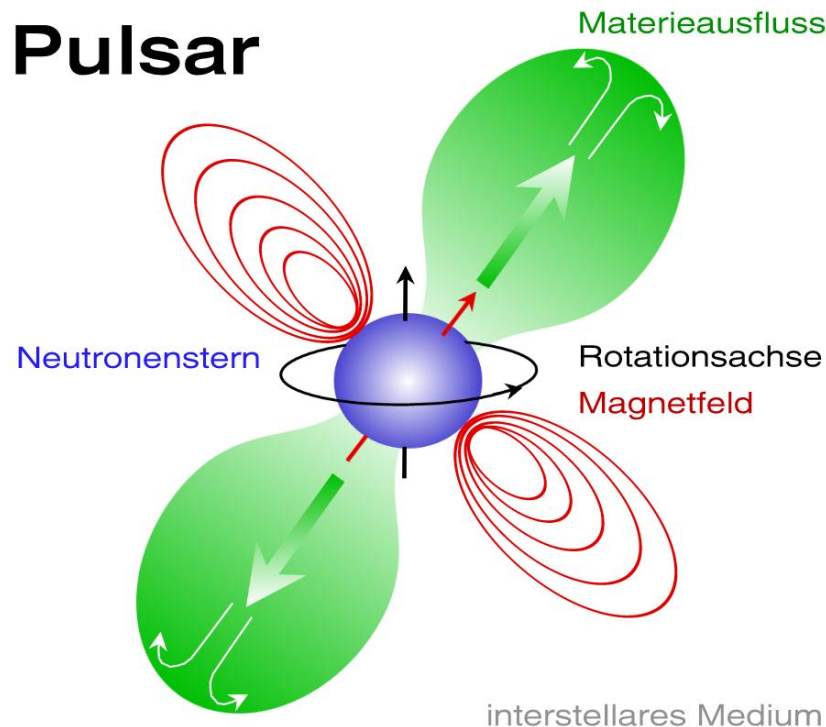


Abbildung 17.13: Pulsar mit Magnetosphäre und Ausfluss.

- ◇ **Klasse 3 YSOs** sind ebenfalls T Tauri-Sterne, allerdings mit schwach ausgeprägten Emissionslinien (Fachbegriff: *weak-lined T Tauri stars*). Durch die nachhaltige Aktivität des Sternwinds und weiterlaufende Planetenbildung ist die Staubscheibe stark ausgedünnt und kaum nachweisbar. Die großen Gasplaneten sind fertig, während erdähnliche Planeten weiterhin akkretieren.

17.39 Pseudo-Newtonsche Gravitation

Eine approximatives Gravitationsmodell, in dem versucht wird, einige Effekte der Einsteinschen Allgemeinen Relativitätstheorie nachzuahmen, die jedoch viele Züge der mathematisch einfacheren Newtonschen Gravitation trägt. Das Herzstück der Pseudo-Newtonschen Gravitation ist ein neues Potential, das nach den Erfindern des Konzepts benannt wurde: das **Paczynski-Wiita-Potential** (1980) - siehe dazu auch Gravitation für weitere Erläuterungen.

17.40 Pulsar

Ein Pulsar ist ein **rotierender Neutronenstern**, dessen Rotationsachse **nicht** mit der Magnetfeldachse übereinstimmt, so dass ein Doppelkegel (*Bikonus*) emittierter Strahlung wie bei einem Leuchtturm mit der Rotationsperiode des Sterns mitrotiert. In besonderen Fällen kann diese Strahlung die Erde treffen, was beim Beobachter den Eindruck gepulster Strahlung vermittelt. In Abbildung 17.13 ist die Rotationsachse des Pulsars schwarz, während die Magnetfeldachse rot dargestellt ist. Die roten Linien illustrieren die **Pulsarmagnetosphäre** in Form von Isokonturlinien des Magnetfeldes: Man erkennt eine dominant toroidale (schlauchartige) Magnetfeldstruktur, die aus

der hohen Rotation und den gravitomagnetischen Kräften resultiert (*gravitomagnetischer Dynamo*). Die grünen Gebilde veranschaulichen die Strahlungskeulen, die immer wieder infolge der Rotation einen geeignet orientierten Beobachter treffen.

17.40.1 Ursprung des Pulsarlichts

Die Strahlung ist Synchrotronstrahlung, die von relativistisch schnellen Elementarteilchen (Elektronen und Positronen, auch Protonen und Ionen) in den hohen Magnetfeldern der Pulsarmagnetosphäre entsteht.

17.40.2 schnelle Rotation...

Da der Drehimpuls auch im Gravitationskollaps nahezu erhalten bleibt, übernimmt der Neutronenstern den Drehimpuls des Vorläufersterns (engl. *progenitor*). Dabei muss berücksichtigt werden, dass der Sternkern typischerweise entkoppelt von äußeren Sternhüllen rotiert und sich 'unter der Sternoberfläche weg dreht'. Demnach überträgt sich nur der Drehimpuls des Sternkerns auf den entstehenden Neutronenstern. Der Neutronenstern als ein Vertreter der Klasse **kompakter Objekte** ist jedoch viel kompakter, so dass die Rotationsgeschwindigkeit um ein Vielfaches höher ist, als beim Vorläuferstern ('Pirouetteneffekt'). Die schnellsten Pulsare drehen sich daher in der Größenordnung von Millisekunden (ms) einmal um sich selbst! Sie heißen **Millisekundenpulsare**.

17.40.3 ...wird abgebremst

Die Rotationsenergie des sich schnell drehenden Pulsars wird aber mit der Zeit abgebaut. Sie speist die Magnetfelder und die elektromagnetische Strahlung, die der Pulsar abgibt. Die Magnetfelder werden durch den gravitomagnetischen Dynamo verstärkt, was auf Kosten der Rotation geht. Aus diesem Grund gibt die gemessene Rotationsperiode bzw. die Abbremsrate des Pulsars eine Information über die Stärke des Magnetfelds und das Pulsaralter. Millisekundenpulsare sind also junge Pulsare.

17.40.4 Entdeckung, Häufigkeit, Magnetfeld

Der erste Pulsar wurde 1967 entdeckt und war ein Radiopulsar. Die Astronomen kennen derzeit mehr als **1700 Pulsare**. Davon sind etwa 170 Millisekundenpulsare, ca. 130 befinden sich in Doppelsternsystemen. Hat der Pulsar ein besonders hohes Magnetfeld ab etwa 10^{14} Gauß, so nennt man ihn **Magnetar**.

17.40.5 Crab - ein optischer Pulsar

Der **Crab-Pulsar** befindet sich im Krebsnebel im Sternbild *Stier* (siehe Beobachtungsfoto 17.14; Credit: NASA/ESA/HST, *Hester & Loll* 2005). Es handelt sich um einen **Supernovaüberrest** (Supernovaremnant, SNR) in ca. 6500 Lichtjahren Entfernung. Das Bild zeigt einen einzigartigen Strukturreichtum des Explosionsgebietes. Im Zentrum leuchten blau und diffus die relativistischen Elektronen, die im Crab-Nebel beschleunigt wurden. Die Supernova (Typ II), die zu diesem Neutronenstern führte, wurde 1054 von chinesischen Astronomen beobachtet. Damals war die Lichtkurve der Supernova mehrere Wochen oder sogar Monate mit bloßem Auge sichtbar! Der Nebel bildete sich durch ausgestoßenes Gas, das von der Supernovaexplosion nach außen getragen wurde. Heute beobachten die Astronomen immer noch eine Gasexpansion mit einer Geschwindigkeit von etwa 1000 km/s. Im Zentrum des Crab-Nebels wurde ein **optischer Millisekundenpulsar** entdeckt! Die Rotationszeit beträgt nur 33 ms, weshalb der assoziierte Neutronenstern mit der Bezeichnung NP 0532 zu den schnellsten Pulsaren gehört, die entdeckt wurden.

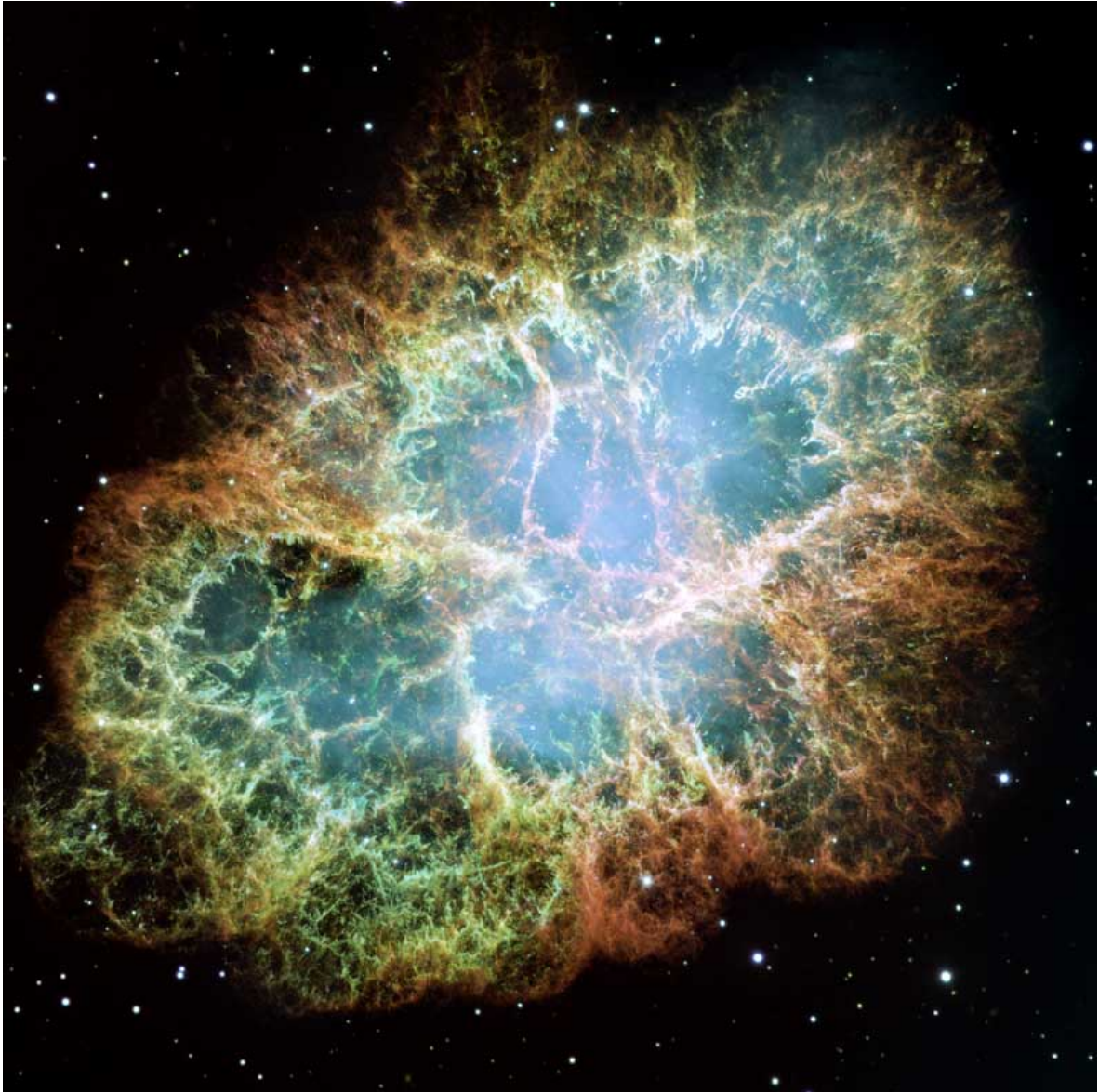


Abbildung 17.14: Crab-Nebel fotografiert mit HST 2005.

17.40.6 Pulsare im Doppelpack

Besonders erwähnenswert ist die Existenz von Doppel-Pulsaren: Das Objekt PSR1913+16 ist ein solcher **Bipulsar**, der sehr berühmt wurde. Die Forscher *Joseph H. Taylor Jr.* und *Russel A. Hulse* bekamen 1993 den Nobelpreis für den **indirekten Beweis der Emission von Gravitationswellen**, die dieses Objekt aussendet. Sie konnten anhand langfristiger Messungen (seit 1974) der Umlaufperioden beider Neutronensterne über die Beobachtung der gepulsten Strahlung nachweisen, dass sie sich infolge des Verlustes an Gesamtenergie des Systems durch Emission von Gravitationswellen sukzessive annähern! Irgendwann werden die beiden Neutronensterne verschmelzen und zu einem stellaren Schwarzen Loch kollabieren. Dieses Ereignis wird mit einem kurzzeitigen Gammastrahlenausbruch (*Gamma Ray Burst*, GRB) einhergehen. Einige Daten zum *Hulse-Taylor-Pulsar*: Die Pulsarperiode beträgt 59 ms, beide Neutronensterne haben etwa 1.4 Sonnenmassen, das System ist zum Beobachter um 14° geneigt, im Periastron beträgt ihr Abstand nur 1.1 Sonnenradien und im Apastron 4.8 Sonnenradien.

In Simulationen konnte gezeigt werden, dass beim Verschmelzen von Neutronensternen (engl. *NS merging*) sehr schwere Elemente wie Gold (chem. Symbol *Au*) und Platin (*Pt*) gebildet werden können. Dies ist also eine Alternative zu den s-Prozessen in AGB-Sternen und r-Prozessen sowie p-Prozessen in Supernovae, die zur Bildung von Elementen schwerer als Eisen beitragen.

17.40.7 RRATs - eine neue Pulsar-Klasse

Bei Beobachtungen von transienten Radioquellen wurde eine neue Population von Neutronensternen entdeckt, die Radiobursts abgeben. Sie wurden als rotierende Radiotransienten bezeichnet (engl. *Rotating RAdio Transients*, **RRATs**) bezeichnet. Sie unterscheiden sich von normalen Radiopulsaren und geben Radiostrahlung nur für etwa eine Sekunde pro Tag ab. Der Pulsar PSR B1931+24 ist ein Vertreter dieser neuen Klasse. Es wurde in diesem Fall vorgeschlagen, dass die Radiostrahlung von der Wechselwirkung einer präzedierenden Materiescheibe und der Magnetosphäre des Pulsars kommt.

17.40.8 Pulsare im Gamma- und TeV-Bereich

Im höchsten Energiebereich der elektromagnetischen Strahlung konnten nur wenige Pulsare nachgewiesen werden. Im hochenergetischen Gammabereich wurden vor allem die **Pulsarwindnebel** (engl. *pulsar wind nebulae*, PWN) beobachtet. In diesen magnetohydrodynamisch beschleunigten Strukturen wurden die **höchsten Lorentz-Faktoren** im ganzen Universum gemessen! PWNs strahlen Synchrotronstrahlung vom Radio- bis in den TeV-Bereich ab. Dieses leuchtende Plasma besteht vornehmlich aus relativistischen Elektronen und Positronen. Die zur Beschleunigung nötige Energie stammt von zusammenbrechenden Magnetfeldern (*Rekonnexion*). Die Feldenergie wird wiederum gespeist von der schnellen Rotation des Neutronensterns bzw. seiner Raumzeit (siehe auch Frame-Dragging).

Die Wechselwirkung zwischen dem relativistischen Wind und dem interstellaren Medium, beschleunigt Teilchen in der Schockregion durch Fermi-Prozesse erster Ordnung und produziert **Röntgenstrahlung**, wie sie z. B. im Fall von PSR B1957+20 beobachtet wird.

Als Teil des Pulsarwinds treten auch **stellare Jets** auf, z. B. beim Crab-Pulsar.

17.40.9 Übersichtspapiere

- ◇ *Becker et al.*: On the Present and Future of Pulsar Astronomy, IAU General Assembly, Prag, 2006; Preprint: astro-ph/0702254
- ◇ *Kirk et al.*: The theory of pulsar winds and nebulae, Heraeus Seminar, Bad Honnef, 2006; Preprint: astro-ph/0703116

17.41 Pulsierendes Universum

Diese Idee mit ästhetischem Reiz von ewiger Weltenwiederkehr in einem natürlichen Zyklus stammt von dem Astrophysiker *Richard C. Tolman* (dem Fachmann bekannt von der Tolman-Oppenheimer-Volkoff-Gleichung aus der Theorie relativistischer Sterne). Das Universum **oszilliert** in folgendem Szenario:

- ◊ Seit dem Urknall expandiert es durch den antigravitativen (negativen) Druck der Dunklen Energie (experimentell verifiziert durch Hubble-Effekt, die kosmische Hintergrundstrahlung, Supernova Typ Ia und die großräumige Struktur der Galaxien).
- ◊ Dann erreicht es eine **kritische Dichte**, wo die Gravitation die Expansion aufhalten kann (siehe auch Missing-Mass-Problem).
- ◊ Schließlich kollabiert das Universum wieder, bis ein weiterer Urknall folgt.

17.41.1 zwei Probleme des Szenarios

1) Der erste Haken dieser an sich hübschen Idee hängt mit dem **Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik** zusammen. Nach diesem fundamentalen Satz kann die **Entropie** in einem abgeschlossenen System (wie dem Universum) nicht abnehmen. Anders gesagt: der Zustand der Unordnung im System nimmt zu. Dies manifestiert sich darin, dass nach jedem Zyklus der Pulsation des Universums der Anteil der Strahlung gegenüber der der Materie zunehmen muss. Irgendwann entsteht so ein materiefreies Universum, das nicht mehr kollabieren könnte: Der Zyklus wäre unterbrochen.

2) Der zweite Haken ist, dass das Szenario den aktuellen Beobachtungsdaten (o.g. Methoden) widerspricht: Nach den aktuellen Messungen der kosmologischen Parameter wird der Kosmos ewig und sogar beschleunigt expandieren.

17.41.2 Zyklisches Universum

In der avantgardistischen Idee des Zyklischen Universums von *Steinhardt et al.* wird die Entropie-Problematik dadurch beseitigt, dass die Entropie zwar zunimmt (wie es sich gehört), aber die *Entropiedichte konstant* bleibt. Das Zyklische Universum pulsiert auch, involviert die Kosmologie mit Branen, ist aber insgesamt sehr spekulativ und schwierig zu testen.

17.42 Pyknonukleare Reaktionen

Es handelt sich um eine besondere Form von **Kernreaktionen**, die nur bei **extrem hohen Massendichten** ablaufen (grch. *pyknos*: dicht). Die Stellarphysiker *Cameron* (1959), *Van Horn* und *Salpeter* (1969) sind die Pioniere auf diesem Gebiet. Auf typischen Zeitskalen von 100000 Jahren ereignen sich folgende pyknonukleare Reaktionen:

- ◊ Wasserstoff verwandelt sich in Helium (oberhalb etwa 10^6 g/cm^3),
- ◊ Helium-4 in Kohlenstoff-12 (oberhalb etwa $8 \times 10^8 \text{ g/cm}^3$),
- ◊ und Kohlenstoff-12 in Magnesium-24 (oberhalb etwa 10^{10} g/cm^3).

17.42.1 pykno vs. β

Es werden also aus leichteren Elementen durch diese Reaktionen schwerere Elemente. Damit handelt es sich um konkurrierende Prozesse zu den inversen β -Zerfällen, die gerade die **Neutronisierung** von Neutronensternen herbeiführen.

17.42.2 Was passiert mikrophysikalisch?

Die Behandlung fällt in den Bereich der Kernphysik und Festkörperphysik. Eine mikrophysikalische Erklärung für pyknonukleare Reaktionen gestaltet sich wie folgt: die Atomkerne sind bei diesen hohen Dichten in ein **Gitter** eingebaut, wie bei einem Festkörper. Gemäß der Quantentheorie weisen sie eine *endliche Nullpunktsenergie* auf (siehe auch Quantenvakuum). Normalerweise stoßen sich die positiven Atomkerne ab, aber wenn die Dichte zunimmt, kann ihre Nullpunktsenergie ausreichen, um diesen **Coulomb-Wall** zu überwinden. Auch der quantenmechanische Tunneleffekt gewährleistet eine Überwindung des Walls, auch wenn die Energie klassisch nicht ausreichen würde (analog dem radioaktiven α -Zerfall). Die so genannte WKB-Methode (nach *Wentzel, Kramers, Brillouin*, 1926) liefert dann quantenmechanisch konsistent einen **Transmissionskoeffizienten**, der gerade die Wahrscheinlichkeit für die pyknonukleare Reaktion angibt. Diese Reaktionsrate wird allerdings maßgeblich von **Verunreinigungen im Gitter** (*Defekte*) und von endlichen Temperaturen beeinflusst.

Die neueren Berechnungen von *Van Horn* und *Salpeter* nahmen *realistischere Gitterpotentiale* an und berücksichtigten außerdem *Gitteranisotropien*. Dies korrigierte die kritischen Dichten der einzelnen Spezies nach oben und senkte die Reaktionsraten ab.

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