

---

# Lexikon

der



**Astrophysik**

von



**Andreas Müller**

aus dem

Wissensportal für Astrophysik

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

*April 2007*

---



## Abbildungsverzeichnis

15.1 QCD-Phasendiagramm. . . . .	12
15.2 Innere Struktur eines Neutronensterns: Schalenbau und Konstituenten. . .	13
15.3 Innere Struktur eines Neutronensterns: Schalenradien und Dichtedomänen. .	15
15.4 Nova T Pyxidis, beobachtet 1997 mit HST. . . . .	20



# 15 Lexikon N

## 15.1 Neutrino

Neutrinos sind extrem leichte, elektrisch neutrale, schwach wechselwirkende Elementarteilchen.

### 15.1.1 Das rempelfreie Leben der Neutrinos

Die schwache Wechselwirkung manifestiert sich darin, dass die mittlere freie Weglänge eines Neutrinos bei etwa 1000 Lichtjahren liegt! Jede Sekunde durchströmen 70 Milliarden Neutrinos allein den menschlichen Daumennagel - ohne dass es irgendwelche Auswirkungen gäbe! Weil der Wirkungsquerschnitt sehr gering ist, werden die Neutrinos kaum von Atomkernen eingefangen. Und selbst wenn es bei einem Nukleon im Atomkern geschehen sollte, so wandelt sich nur das Proton in ein Neutron um, und es entsteht ein Positron oder Elektron, wie die Zerfallsgleichungen des  $\beta$ -Zerfalls zeigen. Die Folgen sind nicht gravierend. Bei den 70 Milliarden Neutrinos pro Sekunde und pro Quadratzentimeter sind sogar nur die Neutrinos berücksichtigt, die von der Sonne kommen - aus den Tiefen des Alls erreichen und noch viel mehr!

### 15.1.2 Leicht, aber oho!

So unscheinbar diese Teilchen auch sein mögen, sie haben eine ungeheure Relevanz für die Astrophysik! So tangieren sie Kosmologie (Missing-Mass-Problem), die Entwicklung der Sterne (Supernova-Kollaps), die Physik der Sonne (*solares Neutrinoproblem*) und die Hochenergiephysik (kosmische Strahlung).

### 15.1.3 Einordnung ins Standardmodell

Die Neutrinos gehören nach dem **Standardmodell der Elementarteilchen** zur Teilchengruppe der Leptonen. Das heißt auch, dass sie punktförmig sind. Mithilfe des **schwachen Isospins** gelingt eine Klassifikation in eine *Trichotomie* (Dreiheit) dieser Familie: Genauso wie es Elektron, Myon und Tauon gibt, gibt es das Elektron-Neutrino  $\nu_e$ , Myon-Neutrino  $\nu_\mu$  und Tau-Neutrino  $\nu_\tau$ .

### 15.1.4 Paulis Erfindung

Erstmals prognostiziert wurde das Neutrino als leichtes und neutrales Teilchen 1930 durch den österreichischen Quantenphysiker *Wolfgang Pauli* (1900 - 1958). Er war so kühn dieses Teilchen zu 'erfinden', um die fundamentalen Sätze von Energie-, Impuls- und Drehimpulserhaltung aufrechterhalten zu können. Dieser Schritt war deshalb sehr kühn, weil zu dieser Zeit nur Proton und Elektron bekannt waren! Das Spektrum der entstehenden Teilchen (Elektron und Proton im  $\beta^-$ -Zerfall bzw. Positron und Neutron im  $\beta^+$ -Zerfall)

sind *kontinuierlich*. Aus diesem Grund muss es sich um einen Drei-Körper- oder **Dalitz-Zerfall** handeln; ein drittes Teilchen muss existieren, das kinetische Energie aufnehmen kann: **das Neutrino**. Den Namen bekam das neue Teilchen 1933 von dem italienischen Quantenphysiker *Enrico Fermi* (1901 - 1954) verliehen. Übersetzt aus dem Italienischen heißt Neutrino so viel wie 'das kleine Neutrale'. Im Jahre 1949 konnte das Neutrino durch *Chalmers Sherwin* in simultanen Impulsmessungen von  $\beta$ -Teilchen und emittierenden Kern experimentell nachgewiesen werden. Das bestätigte Paulis Hypothese bravourös.

### 15.1.5 Neutrinos aus der Sonne

Lange Zeit hat es den Physikern Kopfzerbrechen bereitet, doch nun ist es gelöst: das so genannte *solare Neutrino-Problem*. Durch die Kenntnis der thermonuklearen Prozesse im Sonneninnern und möglicher Sekundärreaktionen, kennen die Sonnenphysiker ziemlich genau die **Bildungsrate von Neutrinos**. Sie erwarten aufgrund der Reaktionsgleichungen die bevorzugte Produktion von nur einem Neutrinotyp aus der Familie, nämlich **Elektron-Neutrinos**  $\nu_e$ . Der **solare Neutrinofluss** beträgt auf der Erde etwa 70 Milliarden Neutrinos pro Quadratzentimeter und Sekunde.

In zahlreichen Experimenten (Gallex, Chlor-Sonnenneutrino-Experiment, Kamiokande und Superkamiokande) haben die Neutrinojäger versucht die Rate der solaren Neutrinos zu messen. Beim Experiment *Gallex* verwendete man das Element Gallium (*Ga*), das sich bei sehr seltenen (wegen schwacher Wechselwirkung) Einfängen von Neutrinos in das andere chemische Element Germanium (*Ge*) umwandelt. Das liegt daran, weil ein Neutron im Atomkern von Gallium sich nach dem Einfang eines Anti-Elektronneutrinos in ein Proton und ein Elektron umwandelt. Die Ordnungszahl erhöht sich dabei um eins, so dass Germanium entsteht. Die Experimentatoren umspülten die Anordnung mit Chlor, so dass sich bei einem Ereignis das leicht flüchtige (und damit gut detektierbare) Germaniumchlorid bildete. Für eine signifikante Ereignisrate (ein bis drei Ereignisse pro Monat) benötigten die Forscher fast die Weltjahresproduktion von Gallium, etwa 30 Tonnen! Trotzdem erbrachte die Messung **immer weniger Sonnen-Neutrinos als erwartet**. Nun waren sich die Experimentatoren jedoch ganz sicher, dass sie alle Elektronneutrinos detektieren könnten. Also wo zum Kuckuck war der fehlende Rest?

### 15.1.6 Des Rätsels Lösung: Neutrino-Oszillationen

Er hat sich umgezogen, würde man in der Modebranche sagen. Die Teilchenphysiker sagen: klarer Fall von **Neutrino-Oszillation**. Die Elektronneutrinos hat es demnach in eine andere Leptonenfamilie gezogen: auf dem Weg vom Sonneninnern zum irdischen Detektor wurden aus Elektronneutrinos Myonneutrinos und Tauneutrinos (oder entsprechende Antineutrinos). Weil diese Möglichkeit des Typenwechsels nicht in Betracht gezogen wurde und weil nur wenige Experimente für alle drei Neutrinotypen  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  und  $\nu_\tau$  empfindlich waren, war das diese Umwandlung lange Zeit nicht aufgefallen. Die Super-Kamiokande-Messungen in der Kamioka-Mine in Japan bewiesen, dass dieser Prozess geschieht.

### 15.1.7 Durchbruch mit Super-Kamiokande

Das Experiment begann im April 1996 und machte die spektakuläre Entdeckung im Juni 1998: Die Neutrinos verändern ihren Typus, wenn sie sich durch Materie oder Vakuum bewegen. Die Forschungsanlage **Super-Kamiokande** (*Kamioka Neutrino Detection Experiment*)

befindet sich 1000 m im Untergrund, in der Kamioka-Mine in Japan. In der Tiefe der Mine, unter Tonnen von Gestein, werden störende Strahlung und andere Elementarteilchen effektiv abgeschirmt. Das Messprinzip beruht darauf, dass durch elastische Elektronen-Neutrino-Streuung Cerenkov-Strahlung vom zurückgestoßenen Elektron emittiert wird, die durch Photomultiplier (*photo multiplier tubes*, PMTs) detektiert werden kann. PMTs sind extrem, lichtempfindliche Detektoren. Um eine signifikant hohe Anzahl von Messereignissen zu erhalten, verwenden die Physiker 50 000 Tonnen Wasser und 13000 PMTs! Die Anordnung ist für zwei Typen von Neutrinos, nämlich Elektron- und Myon-Neutrinos, empfindlich. Die schwersten Neutrinos, die Tau-Neutrinos, können nicht detektiert werden.

Wesentliches Resultat der Messungen war, dass Neutrinos eine **Ruhemasse** haben (*Y. Fukuda and the Super-Kamiokande collaboration*, hep-ex/9807003 bzw. Phys. Rev. Lett. 81, 1562-1567, 1998). Damit gehören Neutrinos zu den Tardyonen, und es muss sie als **links- und rechtshändige Neutrinos** geben (siehe Helizität). Neuere Messungen besagen, dass das Quadrat der Differenzmasse von Elektron- und Myon-Neutrino zwischen  $1.6 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$  und  $4.0 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$  liegt (*T. Toshiro and the Super-Kamiokande collaboration*, hep-ex/0105023). Von großem Interesse sind die **absoluten Neutrinomassen**. Derzeit wird hier der **Massenbereich zwischen 0.05 und 3 eV** diskutiert. Genaue Erkenntnisse werden mit dem *Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment* (KATRIN) möglich werden, das voraussichtlich 2008 startet.

### 15.1.8 Feuern mit Neutrinostrahlen

2001 starteten japanische Physiker ein spektakuläres Experiment: Sie schossen einen im Kernreaktor KEK *künstlich* erzeugten Neutrinostrahl 250 Kilometer durch das japanische Festland, um ihn dort mit einem Detektor in der Kamioka-Mine zu registrieren! Das Experiment mit der Bezeichnung **K2K** für *KEK to Kamioka-Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment* gelang: Myon-Neutrinos mit der Energie von etwa 100 GeV trafen tatsächlich bei der Mine nachweislich ein - jedoch fehlten ein paar der ursprünglich abgefeuerten Myon-Neutrinos, weil sie sich verwandelt hatten. Auch das Neutrinospektrum hatte sich beim Durchgang durch Materie verändert. Neutrino-Oszillation wurde so mit künstlich erzeugten Neutrinos bewiesen (*K2K collaboration, Ahn et al.*, hep-ex/0606032 bzw. Phys. Rev. D74, 072003, 2006).

### 15.1.9 Kosmisch gesehen doch unbedeutend

Anfangs wurde gemutmaßt, dass Neutrinos durch ihre Masse weitreichende, kosmologische Bedeutung haben könnten: Da sie im Universum sehr zahlreich sind, könnten sie damit zur Masse des Universums beitragen und entscheidend dessen Entwicklung beeinflussen. Die aktuellen Daten des Mikrowellensatelliten WMAP (*3<sup>rd</sup> year data*, 2006), der die kosmische Hintergrundstrahlung ausmisst, legen allerdings eher eine kosmologisch unbedeutende Rolle für die Neutrinos nahe. Die machen einen Teil der so genannten heißen Dunklen Materie (engl. *hot dark matter*, HDM) aus, der für die Dynamik des Universums irrelevant ist.

**WIMPs** (*Weakly Interacting Massive Particles*) sind die großen Brüder der Neutrinos. Die WIMPs wechselwirken ebenfalls schwach und sind deutlich schwerer als Neutrinos. Damit wären es interessantere Kandidaten für die Kosmologie.

### 15.1.10 Energiedieb bei Sternexplosionen

Eine entscheidende Rolle spielen Neutrinos bei den Supernovae (SN). Während des Gravitationskollapses eines alternden, schweren Sterns gibt es zahlreiche, kernphysikalische Reaktionen, die Neutrinos produzieren. Normalerweise verlassen sie daraufhin ungehindert die kollabierende Sternmaterie, weil sie ja der schwachen Wechselwirkung unterliegen. Auf diese Weise kühlen sie den Kollaps, weil sie Energie forttragen. Bei einer bestimmten, hohen Materiedichte, der so genannten **Einschlussdichte** (engl. *trapping density*), die bei etwa  $3 \times 10^{11} \text{ g/cm}^3$  liegt, wird die **Neutrino-Opazität** so groß, dass die Neutrinos von der kollabierenden Materie festgehalten, mitgerissen und eingefangen werden (engl. *trapping*). Dadurch bildet sich ein 'Fermi-See' aus Neutrinos. Dann wird der Mechanismus der **Neutrino-Heizung** im Prä-Neutronenstern wichtig. Die hydrodynamischen Simulationen zeigen jedoch, dass dieser Heizmechanismus nicht ausreicht, um die Supernovaexplosion selbst zu treiben. Insofern befindet sich die klassische Kernkollaps-Supernova des Typs II (engl. *core-collapse SN*) in einer Verständniskrise.

Die Neutrinos werden allerdings effektiv an den Atomkernen gestreut (**Neutrino-Diffusion**). Dieser Streuprozess ist gegenüber dem Streuakt am einzelnen Proton oder Neutron dominant, weil der Wirkungsquerschnitt mit der Massenzahl  $A$  quadratisch skaliert. Die Diffusionszeitskala der Neutrinos bestimmt daher die Kollapszeitskala, bis der Kollaps bei Erreichen der **Kernmateriedichte** von  $10^{14} \text{ g/cm}^3$  stoppt. Dann hat sich das Innere des Vorläufersterns in einen Neutronenstern verwandelt.

### 15.1.11 SN 1987a - Prototyp einer Sternexplosion

Die **Supernova 1987a** (Typ II) bot den Astronomen erstmals direkt die Möglichkeit **extragalaktische Neutrinos** (genau genommen 19 Anti-Elektronneutrinos) zu messen. Bis dato konnte man nur die **solaren Neutrinos** detektieren, die aus dem Inneren der Sonne kommen. Die SN 1987a fand in einer Begleitgalaxie der Milchstraße statt, der *Großen Magellanischen Wolke* (engl. *Large Magellanic Cloud*, LMC), die ebenfalls Mitglied der *Lokalen Gruppe* ist.

Die frei werdende Energie für eine Supernova liegt bei etwa 1 foe. Diese exotische, inoffizielle Einheit (keine SI-Einheit!) bezeichnet  $10^{51} \text{ erg}$  (engl. *10 to the power of fifty-one erg*). Die Energie stammt aus der Bindungsenergie der Kerne. Bei einer Sonnenmasse dieser Kerne wird gerade dieser Betrag an Bindungsenergie von 1 foe frei. Glücklicherweise gehen 99% der Supernovaenergie in die Neutrinos und nur 1% in die Bewegungsenergie (davon wiederum nur 1% Lichtenergie). Denn sonst könnten SN-Explosionen auch dem Leben auf der Erde gefährlich werden.

### 15.1.12 Darf's ein bisschen mehr sein?

Bei den Hypernovae sieht das schon ganz anders aus: Diese heftigere Form einer Supernova ist mit Strahlungsausbrüchen im höchsten Energiebereich assoziiert, den Gamma Ray Bursts (GRBs). Die freiwerdende Explosionsenergie ist nochmals um einen Faktor 100 bis 1000 größer als bei den Supernovae. In diesem Ereignis werden stellare, hoch relativistische Jets gebildet. Der sterbende, massereiche Stern sendet also gebündelte Materieströme aus, die Geschwindigkeiten nahe an der Lichtgeschwindigkeit haben. Dann werden die Gesetze der Speziellen Relativitätstheorie wesentlich. GRB-Jets sind in der Tat lebensbedrohlich, wenn sie in großer kosmischer Nähe stattfinden, besonders dann, wenn einer der Jets in Richtung



Erde zeigt. Der Superstern  $\eta$  Carinae in etwa 10000 Lichtjahren Entfernung ist ein Kandidat für eine Hypernova.

Die Darstellung zeigt - gerade wenn man die enormen Lichtintensitäten der SN berücksichtigt - welch ungeheure Energiereserven in der Materie stecken.

### 15.1.13 Neutrinos zerstrahlen mit sich selbst?

Es ist möglich, dass das Neutrino ein **Majorana-Teilchen** ist. So nennt man Teilchen, die ihr eigenes Antiteilchen sind. Die Ergebnisse der Heidelberg-Moskau-Kollaboration, die den doppelten Beta-Zerfall untersucht, legen dies nahe. Allerdings ist das Ergebnis in der wissenschaftlichen Welt umstritten. Gälte dieses Resultat, so wäre die Leptonenzahlerhaltung verletzt (*Klapdor-Kleingrothaus et al.*, hep-ph/0201231).

### 15.1.14 Neutrinoastronomie - ein neues Fenster ins Universum

Die Neutrinoastronomie ist mittlerweile ein etabliertes und wertvolles Beobachtungsfenster der Astronomen. Aktuell öffnet sich dieses Fenster weiter, denn zu den niederenergetischen Neutrinos sind die **ultra-hochenergetischen Neutrinos** hinzugetreten. Diese sehr energiereichen Neutrinos haben Energien bis in den PeV-Bereich, d. h.  $10^{15}$  Elektronenvolt!. Sie sind sekundäre Produkte und entstehen über viele Einzelreaktionen aus ultra-hochenergetischen (UHE) Protonen. Die UHE-Protonen wurden auf diese hohen Geschwindigkeiten durch Fermi-Beschleunigungsprozesse gebracht. Zunächst bilden sich aus Reaktionen zwischen Protonen untereinander oder Proton und Photon die Pionen (siehe dort für Details und Zerfallsgleichungen), die in optisch dünnen Umgebungsgasen wie in den Jets weiter zerfallen zu Myonen und Myon-Neutrinos. In einem letzten Schritt zerfallen schließlich auch die Myonen und bringen Elektronen, Positronen und vor allem UHE-Neutrinos der Elektron- und Myon-Familie hervor. Astronomen erwarten, dass eine Reihe kosmischer Quellen als **UHE-Neutrino-Emitter** in Frage kommen: es werden diverse Jetquellen diskutiert, wie Quasare und Blazare unter den Aktiven Galaktischen Kernen, Jets von GRB-Kollapsaren, Mikroquasare (wie SS 433, Cyg X-1, Cyg X-3), Supernovae und ebenso deren Relikte (engl. *remnants*) von GRBs und SN, die SNRs und GRBRs.

### 15.1.15 Neutrinojagd in Wasser und Eis

Die Detektoren verwenden dasselbe Messprinzip wie in Super-Kamiokande: die Neutrinos dringen in das Detektorvolumen ein und bilden Myonen, die man **neutrino-induzierte Myonen** nennt. Diese emittieren entlang ihrer Trajektorie Cerenkov-Strahlung, die mit einem aufwendigen Array einiger hundert Photo-Multiplier Tubes (PMTs) registriert wird. Die PMTs werden kettenförmig an Drahtseile gehängt. Diese lichtempfindliche Perlenschnuranordnung heißt *PMT-String*. Aus den PMT-Daten muss die Myonenspur und mit einigem Versatz die Neutrinospur rekonstruiert werden, damit man die Neutrinoquelle am Himmel lokalisieren kann. Die Genauigkeit der Positionsmessung ist etwa bis auf ein halbes Grad genau. Man kann als Detektormedium flüssiges Wasser oder Wassereis verwenden.

Es gibt schon einige solcher **Neutrinodektoren** auf der Welt, wie NT-200 (im Wasser des Baikalsees), NESTOR im Mittelmeer vor der griechischen Küste, DUMAND vor der Küste Hawaiis und besonders exponiert am Südpol AMANDA und zukünftig ICECUBE (mit einem Detektorvolumen von einem Kubikkilometer antarktischen Eises!). Die letzten beiden Experimente verwenden das Eisschild der Antarktis, um 2.1 bis 2.3 Kilometer tief mit einer

zylindrischen Anordnung vieler PMT-Strings die Teilchenbahnen zu registrieren. In beiden Fällen muss der Hintergrund atmosphärischer Myonen (als Komponente der kosmischen Strahlung) abgezogen werden. Diese Myonen weisen jedoch ein anderes Spektrum. Zudem misst man die Neutrinos kosmischer Quellen paradoxerweise *durch* die Erde hindurch, weil sie beim Durchgang kaum beeinflusst werden (aufgrund der Schwachen Wechselwirkung). Die atmosphärischen Myonen kommen also im Detektor 'von hinten' und können so leichter identifiziert und rausgerechnet werden: Neutrinooteleskope schauen auf den Boden!

#### 15.1.16 Vortrag

- ◇ Mehr Details zu ultrahochenergetischen Neutrinos in Cosmic Jets as Sources for ultra-high energetic Neutrinos (Stand Januar 2003).

#### 15.1.17 Weblinks - Neutrinoastronomie am Südpol

- ◇ AMANDA
- ◇ ICECUBE

### 15.2 Neutronenreaktionen

Ganz allgemein Kern- oder Teilchenreaktionen unter Beteiligung von Neutronen. Neutronen sind Baryonen, und liegen zusammen mit den Protonen als Nukleonen in Atomkernen vor.

Man könnte zwar in dieser Allgemeinheit auch den Beta-Zerfall zu den Neutronenreaktionen rechnen, im Speziellen meint man jedoch damit den r-Prozess und den s-Prozess, die wichtig sind, um schwere Elemente (Metalle) aus leichten zu erzeugen.

Dieselben Konsequenzen ergeben sich im p-Prozess, der jedoch ein **Protonenprozess** ist. Dabei entstehen protonenreiche Kerne, die **p-Kerne**, durch den Einfang von Protonen bei hohen Temperaturen im Bereich einiger Milliarden Kelvin.

### 15.3 Neutronenstern

Neutronensterne sind stabile Endkonfigurationen, die aus dem Gravitationskollaps massereicher Sterne entstehen. Massereiche Sterne durchlaufen alle Brennstoffzyklen thermonuklearer Fusion bis sie im Innern einen **Eisenkern** (vergleiche Nife-Kern der Erde) gebildet haben. Dieser Vorläufer des Neutronensterns (engl. *neutron star progenitor*) weist typische Massen von 1.2 bis 1.6 Sonnenmassen auf.

#### 15.3.1 Zusammenfall & Explosion

Da weitere exotherme Reaktionen im Innern nach der Phase des Siliziumbrennens unterbleiben, ist das hydrostatische Gleichgewicht des Sterns gestört: der Strahlungsdruck (ebenso der Gasdruck, der über Strahlungstransport an den Strahlungsdruck koppelt) verringert sich im Sterninnern rapide, was zugunsten des Gravitationsdrucks geht. Die Konsequenz ist katastrophal: Der innere Teil des sterbenden Sterns fällt im Gravitationskollaps in sich zusammen. Durch die einlaufende Schockwelle wird die Sternmaterie stark komprimiert. Irgendwann ist die Materie so dicht, dass die Schockwelle

daran reflektiert wird (*rebound*). Als Folge dessen läuft eine etwa kugelförmige Schockfront wieder nach außen, reißt die äußeren Sternschichten mit sich und produziert eine spektakuläre Supernova-Explosion (Typ II). In diesem letzten Aufflammen wird der sterbende Stern gleißend hell und überstrahlt sogar das Licht seiner Heimatgalaxie. Erstaunlicherweise geht die meiste freigesetzte Energie dieser Explosion gar nicht in elektromagnetische Strahlung, sondern in die Neutrinos.

### 15.3.2 kosmische Häufigkeit

Allein in der Milchstraße gibt es mehr als 100 Millionen Neutronensterne - bei insgesamt einigen hundert Milliarden Sternen also anteilig im Promillebereich.

### 15.3.3 Pulsare: kosmische Leuchttürme

Zahlreiche Neutronensterne können die Astronomen beobachten und als Pulsare identifizieren. Von ihnen nahm man zunächst an, dass es sich um pulsierende Sterne handelt (daher der Name). Die scheinbar gepulste Strahlung kommt jedoch durch **Rotation** eines Neutronensterns zustande. Dabei sitzt die Strahlungsquelle an einem der magnetischen Pole des Neutronensterns. Differieren nun Rotations- und Magnetfeldachse, so dreht sich der Strahlungskegel um den Neutronenstern im Raum wie bei einem Leuchtturm. Diese geometrische Restriktion macht klar, dass Astronomen bei weitem nicht alle Neutronensterne in Form von Pulsaren beobachten können. Denn in der Regel wird der enge Strahlungskegel an der Erde vorbei schwenken.

### 15.3.4 Neutronensternjagd mit Röntgenteleskopen

In kompakten Röntgendoppelsternen (engl. Akronym XRBs für *X-ray binaries*) kann man aus den Kepler-Gesetzen indirekt auf die Existenz von Neutronensternen schließen, auch wenn man keine Pulsarstrahlung misst. Hier verraten sich die Neutronensterne durch die gemessene Sternmasse, die in einem bestimmten Massenbereich liegt (dazu im nächsten Absatz mehr). Eine weitere Methode des indirekten Nachweises sind charakteristische Strahlungssignaturen wie Strahlungsausbrüche. Diese können Folge eines Sternbebens (engl. *star quake*) in der Neutronensternkruste sein oder durch Akkretion der Materie eines Begleiters auf die Neutronensternoberfläche hervorgerufen werden.

### 15.3.5 Was wiegen die schwersten Neutronensterne?

Eine strittige Frage aus theoretischer Sicht ist, wie schwer Neutronensterne werden können. Die Astrophysiker wissen, dass sie schwerer werden können als Weiße Zwerge, aber ab einer bestimmten Massengrenze nicht mehr stabil sind. Denn dann kollabiert ein Neutronenstern zu einem stellaren Schwarzen Loch.

Die klassische Massengrenze von Neutronenmaterie ist die **Oppenheimer-Volkoff-Grenze von 0.7 Sonnenmassen**, die bereits 1939 berechnet wurde. Dieses Neutronensternmodell ist jedoch nicht wirklichkeitsnah, weil Neutronensterne viel komplexer aufgebaut sind, wie die Kernphysiker mittlerweile wissen. Ein anderer konservativer Zahlenwert für die Maximalmasse eines Neutronensterns resultiert aus sehr allgemeinen Überlegungen auf der Basis von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie und beträgt **3.2 Sonnenmassen** (*Rhoades & Ruffini*, PRL 1974). Neuere Arbeiten setzen dieses Limit

deutlich herab: So wird ein Massenbereich für Neutronensterne wird **zwischen 1.5 und 1.8 Sonnenmassen** diskutiert (*Burgio 2004, nucl-th/0410040*). Andere Autoren finden kleinere Maximalmassen, z. B. kleiner als 1.4 Sonnenmassen, wenn nur baryonische Materie im Neutronensterninnern angenommen wird; sobald jedoch eine Komponente nicht-baryonischer Materie, nämlich Quarkmaterie dazukommt, kann ebenfalls eine Maximalmasse von **etwa 1.8 Sonnenmassen** abgeleitet werden (*Schulze et al., Phys. Rev. C 2006*). Die neueren Zahlenwerte folgen im Rahmen der theoretischen Kernphysik.

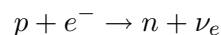
Nach wie vor, ist dieser Massenbereich unsicher und Gegenstand der Forschung, weil das Innere der Neutronensterne nicht vollständig geklärt ist. In üblichen Modellen besteht das Innere des Neutronensterns in den äußeren Zonen aus Neutronen und Hyperonen (als hadronische Phase), und der Sternkern besteht aus Quarks (Quarkphase). Die größte Unsicherheit steckt in der Zustandsgleichung und in der Frage, wie Hadronen in Quarks bei hohen Dichten übergehen. Wertvolle Hinweise für das richtige Massenregime kommen aus der astronomischen Beobachtung. Entdecken Astronomen z. B. einen Neutronenstern mit mehr als 1.8 Sonnenmassen, so müssen die letztgenannten Modelle korrigiert werden. Leider ist auch die astronomische Messung schwierig und fehleranfällig.

### 15.3.6 Zweige theoretischer Kernphysik

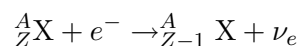
Ein Neutronenstern besteht aus verschiedenen Materieformen, die in seinem Innern in etwa kugelförmigen Schalen angeordnet sind. Die physikalische Beschreibung dieser Materie unter extrem hohen Dichten ist besonders anspruchsvoll und erfordert Konzepte der Kernphysik und der Quantenfeldtheorien. Ein wesentlicher Zweig aus der Theorie ist dabei die **Brückner-Vielteilchentheorie** (nicht-relativistisch: Brückner-Hartree-Fock Theorie; relativistisch: Dirac-Brückner-Theorie). Welche Theorie am besten geeignet ist, ist ebenfalls Gegenstand aktueller Forschung.

### 15.3.7 Neutronisierung

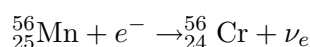
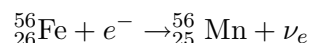
Die Ursache für das Überwiegen der Neutronen ist die ungleich höhere Dichte der Prä-Neutronensterne. Überschreitet die Zentraldichte des Eisenkerns im Gravitationskollaps den kritischen Wert von etwa  $1.14 \times 10^9 \text{ g cm}^{-3}$ , setzt der **inverse  $\beta^-$ -Zerfall** ein, der die Materie nach und nach **neutronisiert**.



Dabei fangen die Atomkerne Elektronen ein, und es bilden sich Neutronen, gemäß der allgemeinen Reaktionsgleichung (Element  $X$  habe die Ordnungszahl  $Z$  und eine Atommasse  $A$ ):

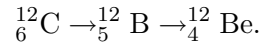


Bezogen auf das schwerste Element, das sich im Sternkern gebildet hat, Eisen-56 ( ${}^{56}\text{Fe}$ ), ergibt sich diese Reaktionskette:



Es wandelt sich in Mangan ( $Mn$ ) um, dieses wiederum wird zu Chrom ( $Cr$ ). Chrom bleibt stabil, bis im Zuge des anhaltenden Kollapses noch höhere Zentraldichten erreicht werden. Ab

einer Dichte von  $1.5 \times 10^{10} \text{ g cm}^{-3}$  zerfällt auch Chrom. Bei noch höheren Dichten, ab  $3.9 \times 10^{10} \text{ g cm}^{-3}$  kann sich sogar Kohlenstoff zu Elementen kleinerer Ordnungszahl umwandeln



Die Neutronisierung ist demnach ein sukzessiver Vorgang, der die Atomkerne nach und nach mit immer mehr Neutronen anreichert: Sie werden zu **neutronenreichen Atomkernen** (engl. *neutron-rich atomic nuclei*). Wie die Reaktionen zeigen, werden aufgrund der *Leptonenzahlerhaltung* immer **Elektron-Neutrinos  $\nu_e$  frei**. Diese wechselwirken nur schwach mit der Umgebung und können (unterhalb der Neutrino-Trapping-Dichte, s. u.) das Sterninnere verlassen, Energie und Wärme wegtragen und damit den Kollaps kühlen. Unter normalen, irdischen Bedingungen würden die neutronenreichen Atomkerne schnell zerfallen und zum Betastrahler werden. Dies geschieht im Neutronenstern jedoch nicht, weil sich die Neutronen bei diesen hohen Plasmadichten *im Gleichgewicht* mit Protonen und Elektronen befinden. Physikalisch formuliert liegt das daran, weil die **Fermienergie** des entarteten Elektronengases in der Größenordnung der Zerfallsenergie der Neutronen ist (etwa 780 keV).

### 15.3.8 Nehmen wir ein Neutrinoabad

Es gibt weitere Prozesse, bei denen Neutrinos unterschiedlichen Typs emittiert werden können. So kommt es zur **Paarvernichtung** (*Paarannihilation*) von Elektron und Positron (Austausch von W- und Z-Teilchen der schwachen Wechselwirkung). Dies zeigt diese Reaktionsgleichung

$$e^- + e^+ \rightarrow \nu_l + \bar{\nu}_l, \quad l = e, \mu, \tau.$$

Es handelt sich hierbei um den so genannten **Plasmon-Zerfall**, wobei  $l$  ein Platzhalter für alle drei Typen der Leptonenfamilie ist: Elektron, Myon und Tauon. D.h. *alle* möglichen Neutrinos können dabei entstehen! Im Gegensatz zur Sonne, die nur Elektroneneutrinos aussendet (die jedoch danach in andere Typen oszillieren), emittieren sterbende, massereiche Sterne von Anfang an Neutrinos aller drei Familien. Außerdem entstehen Neutrinos in der **Photo-Annihilation**:

$$e^- + \gamma \rightarrow e^- + \nu_l + \bar{\nu}_l.$$

Auch bei der Emission von **Bremsstrahlung** werden weitere Neutrinos freigesetzt:

$$e^- + {}^A_Z\text{X} \rightarrow e^- + {}^A_Z\text{X} + \nu_l + \bar{\nu}_l.$$

Insgesamt bildet sich ein **Neutrinoabad** aus.

### 15.3.9 Neutronisierungsgegner

Es gibt zur Neutronisierung auch konkurrierende Prozesse, so genannte **pyknonukleare Reaktionen** (grch. *pyknos*: dicht), die bei sehr hohen Dichten ablaufen können. *Cameron* (1959) sowie *Van Horn* und *Salpeter* (1969) konnten zeigen, dass sich auf einer typischen Zeitskala von etwa 100 000 Jahren

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

umwandeln können. Je nach Verhältnis von Hin- und Rückreaktionen findet so allmählich eine Neutronisierung statt. Da die Zeitskala des Gravitationskollapses weit kürzer ist, als diejenige der pyknonuklearen Reaktionen, gewinnt schließlich die Neutronisierung: ein *Neutronenstern* ist entstanden!

### 15.3.10 Quantendruck stabilisiert

Innerhalb der Sternrestmassen von etwa 1.2 bis 3.2 Sonnenmassen (nehmen wir mal die konservative Maximalmasse an) bildet sich eine stabile Konfiguration aus, die vor allem durch den **Entartungsdruck der Neutronen** stabilisiert und so vom Kollaps im freien Fall aufgehalten wird. Dieser Quantendruck hat dieselbe Natur wie bei Weißen Zwergen, nur dass das Fermionengas großteils aus Neutronen besteht und nicht aus Elektronen - sie sind nur eine Beimischung im Innern von Neutronensternen. Fermionen unterliegen dem Pauli-Prinzip und können nicht in allen Quantenzahlen übereinstimmen. Sie können nur dann denselben Zustand besetzen, wenn ein Neutron Spin 'nach oben' (engl. *spin-up*) und das andere im gleichen Zustand Spin 'nach unten' (engl. *spin-down*) hat. Anschaulich gesprochen, können sich die Neutronen nicht (wie die Bosonen) beliebig nahe kommen, was einem Druck, dem Entartungsdruck, entspricht. Das ist die tiefe, physikalische Ursache für die Existenz von Neutronensternen. Die Berechnung des Entartungsdruckes erfolgt im Rahmen der statistischen Physik: Die Theoretiker setzen eine Phasenraumbeschreibung an. Hier integrieren sie über alle möglichen Impulszustände der Neutronen, von Impuls null bis zum Fermi-Impuls ('Integration über die Fermi-Kugel'). Daraus resultiert der Entartungsdruck, der dann die Gestalt einer polytropischen Zustandsgleichung hat und nur in einer Potenz von der Massendichte abhängt. Anschaulich bedeutet dies: je dichter das Material (die Neutronen) gepackt ist, umso entscheidender wird der Einfluss des Pauli-Prinzips, das dann bei hoher Kompression eine neue Druckkomponente bereitstellt.

In einer Abschätzung des Verhältnisses der Massen von Neutronen zu Elektronen, was einen Faktor von etwa 1840 liefert, wird unmittelbar klar, weshalb die Neutronensterne notwendigerweise sehr viel kleiner sein müssen, als Weiße Zwerge.

### 15.3.11 Die 4-Parameter-Raumzeit von Neutronensternen

Die Raumzeit oder **Metrik** außerhalb der Oberfläche eines Neutronensterns ist ebenso wie die eines rotierenden Schwarzen Loches (der so genannten Kerr-Lösung) stationär und axialsymmetrisch. Vor wenigen Jahren wurde eine exakte Formulierung dieser Metrik in gebrochenrationalen Polynomen gefunden (*Manko et al., 2000, gr-qc/0001081*), die mathematisch etwas komplizierter ist als für Kerr-Löcher. Der entscheidende Unterschied ist, dass Neutronensterne - im Gegensatz zu Schwarzen Löchern, die 'keine Haare' haben (Keine-Haare-Theorem) - mehr Eigenschaften aufweisen. Neutronensterne werden durch ihre **Masse**, ihren **Drehimpuls** sowie durch ihr **Massen-Quadrupolmoment** und ihr **magnetisches Moment** charakterisiert. Daraus resultiert eine 4-Parameter-Klasse von Lösungen für die **Einstein-Maxwell-Gleichungen** (siehe dazu Maxwell-Tensor) der Allgemeinen Relativitätstheorie.

### 15.3.12 Ganz schön dicht!

Neutronensterne gehören zu den **kompakten Objekten**: sie haben nur **Radien von etwa 15 km**, aber Massen von etwa 1.5 Sonnenmassen! Beide Wertebereiche werden

durch astronomische Beobachtungen gestützt. Die Kernmateriedichte liegt - wie aus der Kernphysik bekannt - bei  $0.17 \text{ fm}^{-3}$ ,  $140 \text{ MeV fm}^{-3}$  oder  $2.5 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$  im cgs-System. Aus diesen bekannten, typischen Werten für Masse und Radius kann eine mittlere Dichte der Neutronensterne von etwa  $2 \times 10^{15} \text{ g cm}^{-3}$  abgeleitet werden. Das entspricht demgemäß **mehrfacher Kernmateriedichte** (*supranukleare Dichten*), genau genommen knapp zehnfache.

Das **Innere eines Neutronensterns** muss daher mit einer Physik der hohen Dichten beschrieben werden. Es stellt sich heraus, dass eine konsistente Beschreibung des Innern *mit einer einzigen* Theorie nicht möglich ist, sondern man in verschiedenen Dichteregimes unterschiedliche Theorien verwenden muss. Dies ist im Wesentlichen der Grund dafür, dass man **keinen festen Grenzwert für die Maximalmasse** eines Neutronensterns angeben kann. Es ist allenfalls möglich ein unteres und ein oberes Limit aus einer Synopsis der Theorien anzugeben.

### 15.3.13 Wir schneiden einen Neutronenstern auf

Im Folgenden sind die Dichtebereiche und assoziierte, physikalische Modelle kurz skizziert. Neutronensterne sind - wie obige Kalkulation der mittleren Dichte nahe legt - wesentlich dichter als die Weißen Zwerge. Zunächst kann man das Innere der Neutronensterne in **Kruste** und **Kern** unterteilen. Die Kruste besteht, wie mit der Sternentwicklung nachzuvollziehen ist, aus einem *Coulomb-Gitter von Eisen-56-Atomkernen* und einem *Fermigas entarteter Elektronen*. Die **Festkörperphysik** liefert den theoretischen Rahmen einer Beschreibung. Der Kern setzt sich aus einer *Neutronenflüssigkeit*, einigen *Elementarteilchen* und einer *Quark-Phase* zusammen. Hier muss man auf Methoden der **Kernphysik**, **Quantenchromodynamik** (QCD) und **Teilchenphysik** zurückgreifen.

Es erweist sich als sinnvoll Kruste und Kern weiter zu unterteilen, weil die Zustandsgleichungen und die zugehörigen Teilchenspezies und Teilchenphasen in den unterschiedlichen Dichteschalen stark differieren. Unterhalb der dünnen, nur etwa einen Kilometer durchmessenden Neutronensternkruste vermutet man **drei wesentliche Phasen von Materie**, die miteinander im Gleichgewicht stehen:

- ◇ eine normale **hadronische Phase**, bestehend aus neutronenreichen Atomkernen und einer Neutronenflüssigkeit,
- ◇ eine Phase aus **kondensierten Kaonen** (eine bestimmte Form von Mesonen, bestehend aus einem Quark und einem Antiquark)
- ◇ und eine **Quark-Phase** (QP) oder auch **Quark-Gluonen-Plasma** (QGP) genannt.

In der theoretischen Kernphysik gilt die Hadronenphase als gut etabliert. Für dessen Beschreibung verwendet man die **relativistische Mean-field-Theorie** (RMF). Im Speziellen handelt es sich um den *Brueckner-Bethe-Goldstone-Formalismus*, wo man die Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung mit dem *Paris-Potential* und Drei-Körper-Kräfte mit dem *Urbana-Modell* beschreibt. Als Additiv berücksichtigt man die Hyperon-Nukleon-Wechselwirkung.

Die Quark-Kondensation und die Existenz von Kaonen sind eine Folge der **spontanen Brechung der chiralen Symmetrie** (einer bestimmten Symmetrie des QCD-Lagrangian). Dann treten nämlich fast masselose, so genannte *Goldstone-Bosonen* auf, wie Pionen, das

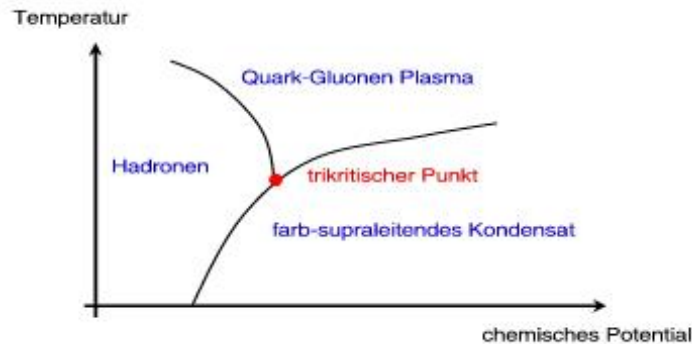
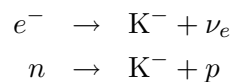


Abbildung 15.1: QCD-Phasendiagramm.

$\eta$ -Teilchen oder eben Kaonen. So gibt es im Innern der Neutronensterne Prozesse, wo ein Bose-Kondensat aus Kaonen entsteht, wie diese beiden Reaktionsgleichungen demonstrieren:



### 15.3.14 Rolle der Kaonen

Neben den Nukleon-Nukleon-Wechselwirkungen werden dann auch Kaon-Nukleon-Wechselwirkungen relevant. Dies beeinflusst maßgeblich **Transport- und Kühlungsprozesse** im Innern. In der Zustandsgleichung gibt es somit für die Energiedichte der Neutronensternmaterie einen Beitrag von den Kaonen; für den Gesamtdruck gibt es *keinen* Beitrag von Kaonen, weil sie Bosonen sind und somit *kein Partialdruck* entsteht. Kaonen **'weichen die EoS auf'**, so dass eine **Maximalmasse für Neutronensterne** durch ihren Einfluss *reduziert wird*. Außerdem erwartet man einen Einfluss der Kaonen auf die Entwicklung des Prä-Neutronensterns während des Supernova-Kollapses.

### 15.3.15 Quarkmaterie

Bei mehrfacher Kernmateriedichte erwartet man einen Übergang zu Quarkmaterie, die einerseits aus **Quarkpaaren** und andererseits aus dem **Quark-Gluonen-Plasma** besteht. Die Beschreibung der ersten Komponente, den so genannten *Diquarks*, ist analog zur BCS-Theorie der Supraleitung in Festkörpern, nur dass die *Cooper-Paare* nicht aus Elektronen, sondern aus Quarks bestehen. Daher rührt die Bezeichnung Farbsupraleitung. Vermutlich spielt sie neben Neutronensternen auch im Innern so genannter Quarksternen eine Rolle. Die Beschreibung der Quarkphase gestaltet sich weit schwieriger. Hier nutzt man ein eher phänomenologisches Modell (darin liegt eine Schwäche) und beschreibt sie mit dem **MIT Bag-Modell** (Näheres dazu bei den Quarksternen). Abbildung 15.1 zeigt schematisch in einem **QCD-Phasendiagramm**, wie die drei Phasen voneinander abgrenzen. Aus diesen Überlegungen ergibt sich insgesamt folgende **Schalenstruktur eines Neutronensterns**, wie sie in Abbildung 15.2 dargestellt wird.



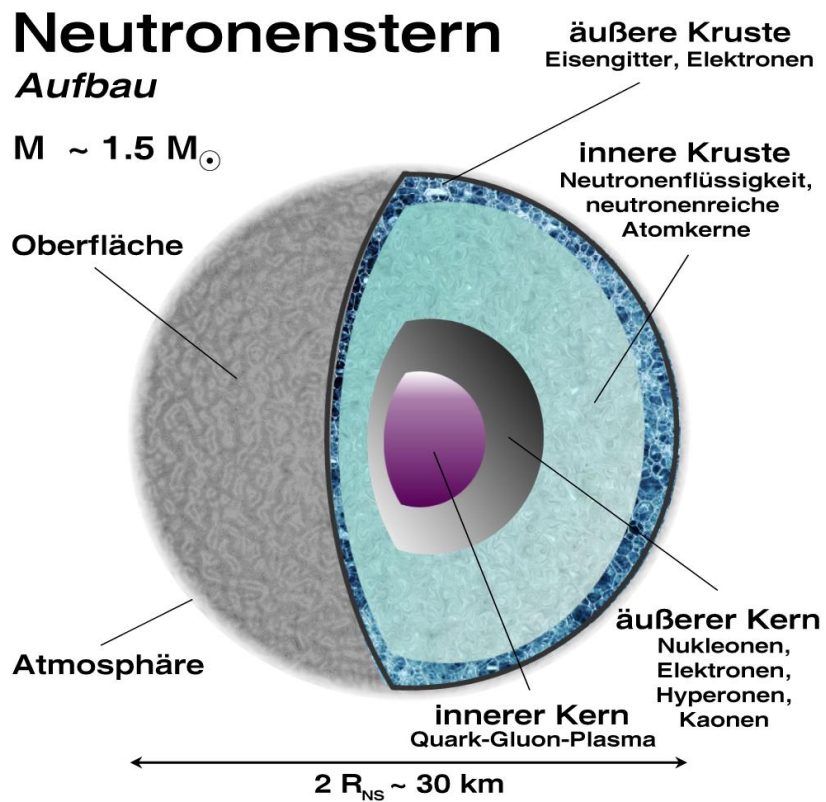


Abbildung 15.2: Innere Struktur eines Neutronensterns: Schichtenaufbau und Konstituenten.

- ◇ Um den Neutronenstern herum befindet sich eine *nur wenige Zentimeter* durchmessende **Atmosphäre**.
- ◇ Der eigentliche Neutronenstern hat am Rand eine **äußere Kruste**, die aus einem Gitter von Atomkernen, vor allem **Fe-56**, und einem Fermigas relativistischer entarteter Elektronen besteht. Nach innen setzt die Neutronisierung ein, die zunächst nur die Atomkerne mit Neutronen anreichert.
- ◇ Dann schließt sich eine **innere Kruste** an, die aus einer *warmen Neutronenflüssigkeit* und einem Gitter neutronenreicher Atomkerne besteht. Diese Zone wird außen durch diejenige Dichte definiert, bei der die Neutronen aus den mit Neutronen stark übersättigten Atomkernen 'austropfen'. Bei einer Dichte von etwa  $4 \times 10^{11} \text{ g cm}^{-3}$ , der so genannten *neutron drip density*, ist die Bindungsenergie der Neutronen an den Atomkern so gering, dass sie in 'Tropfen' den Kernverbund verlassen können. Daher nennt man diese Phase auch **Neutronenflüssigkeit**. Inwärts schließt die innere Kruste bei der Übergangsdichte von  $1.7 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$  ab: bei diesen Dichten ist die **Neutronisierung abgeschlossen** und kein Atomkern mehr vorhanden.
- ◇ Nun schließt sich der **äußere Kern** an, wo alle Atomkerne in ihre Bestandteile zerlegt wurden: den **Nukleonen**, also den Protonen und den Neutronen. Daneben existieren immer noch Elektronen als entartetes Fermigas. Der äußere Kern enthält neben diesen Spezies auch besonders massive Baryonen, die **Hyperonen** und auch die Kaonen. Die *Hyperonisierung* setzt bei typischen Dichten im Bereich von **zwei- bis dreifacher Kernmateriedichte** ein. In Überlappungsbereich zwischen äußerem und innerem Kern sollten bereits Beimischungen der farbsupraleitenden Phase, also **Diquarks**, existieren.
- ◇ Tief im Innersten, dem **inneren Kern**, wurden auch die Nukleonen aufgebrochen. Hier erwartet man, dass der Einschluss (*confinement*) der Quarks aufgehoben wird und sie in **freier** Form im Gleichgewicht mit ihren ebenfalls Farbe tragenden Austauschpartnern, den Gluonen, existieren: dies ist die Domäne des **QGP**. Quarks und Gluonen bewegen sich *quasi-frei* und bilden eine plasmaartige Phase. Dieser besonders exotische Materiezustand wird unter ultrahohen Dichten (fünf- bis zehnfache Kernmateriedichte) und enormen Temperaturen von einer Billion Grad (entsprechend 150 MeV) erreicht. Das QGP ist noch Physik innerhalb des Standardmodells der Teilchenphysik und im Rahmen der QCD ableitbar.

### 15.3.16 So nimmt die Dichte nach innen zu

Die letzte Abbildung 15.3 dieses Lexikoneintrages zeigt den Verlauf des *Dichtegradienten* im Innern eines Neutronensterns. Man erkennt, dass die supranuklearen Dichten vor allem im inneren Kern angenommen werden und das Quark-Gluonen-Plasma bilden. Natürlich sind die numerischen Werte für die Dichten, ebenso wie die Radien der Schalen modellabhängig, und es gibt noch keine Formulierung, die bis auf die Nachkommastelle einheitlich ist. Ebenso ist die Einteilung in Schalen relativ willkürlich, weil man auch noch mehr Substrukturen einbauen könnte (Hyperonenschale o.ä.).

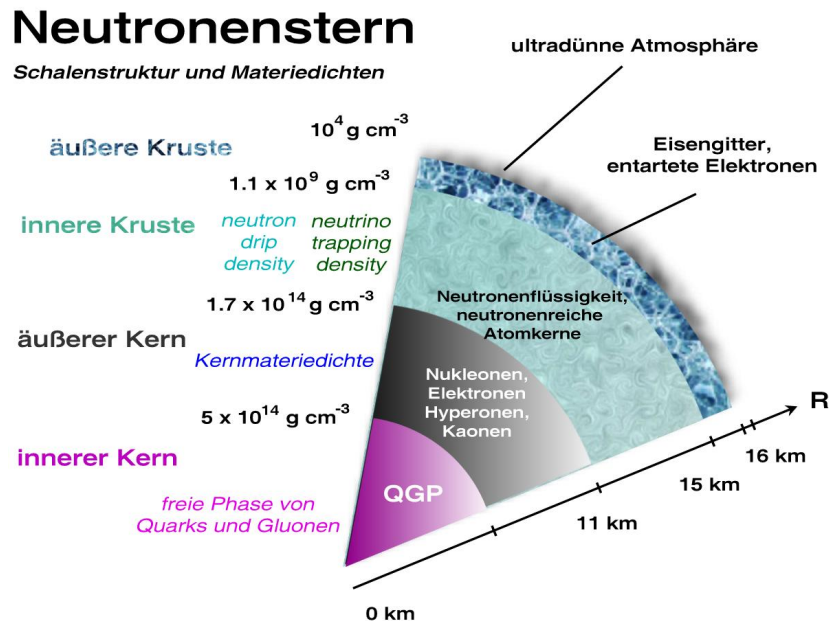


Abbildung 15.3: Innere Struktur eines Neutronensterns: Schalenradien und Dichtedomänen.

### 15.3.17 Ein Neutronensternschicksal

Nach Kenntnis dieser Ingredienzien für die **Zustandsgleichungen eines Neutronensterns** bestimmt man über die klassische **Tolman-Oppenheimer-Volkoff-Gleichung** die Obergrenze für die Masse eines Neutronensterns. Oberhalb dieser Grenzmasse muss auch der Neutronenstern kollabieren und wird aller Wahrscheinlichkeit nach ein stellares Schwarzes Loch. Dieses Szenario ist denkbar, wenn beispielsweise in einem Doppelsternsystem eine der beiden Komponenten im Rahmen der Sternentwicklung zu einem Neutronenstern wurde. Ist die andere Komponente ein Riesenstern, der sein Roche-Volumen überschreitet, kann Materie des Riesen durch den inneren Lagrange-Punkt des Systems auf die kompakte Komponente überfließen. Durch Akkretion kann somit ein Neutronenstern an das Limit seiner Stabilitätsgrenze getrieben werden und bei Überschreitung des Limits weiter kollabieren.

Die Unfähigkeit, eine klare Grenzmasse analog zur Chandrasekhar-Grenze Weißer Zwerge angeben zu können, resultiert aus einer Unsicherheit in den Zustandsgleichungen. Die Theorie des Neutronensterninnern ist noch nicht eindeutig und die Kern- und Elementarteilchenphysik lässt noch Spielraum für die Massengrenze. Die Forschung engt diesen jedoch sukzessive ein und führt sogar auf mögliche Unterklassifikationen von Neutronensternen.

### 15.3.18 Masse-Radius-Relationen

Hinzu kommt, dass selbst bei eindeutiger theoretischer Kenntnis der Zustandsgleichung, diese nur äußerst schwierig in der Beobachtung verifiziert werden kann. Die Astronomen können natürlich nicht ins Innere der Neutronensterne hineinblicken und müssen indirekt - beispielsweise über die äußere Gestalt des Sterns (Radiusmessungen) oder hochenergetischen Strahlungsausbrüchen - auf das Innere und die Richtigkeit von Zustandsgleichungen schließen. Über Messungen der **Masse-Radius-Relationen** aus Pulsardaten versuchen Astronomen

diese Kenntnis zu erlangen. Die typische Masse-Radius-Relation eines Neutronensterns lautet  $M \sim R^{-3}$ , was in starkem Gegensatz zu den kompakteren Strange Stars steht,  $M \sim R^{+3}$ ! Astronomische Messungen von Masse (Kepler-Gesetze) und Radius (Fluss messen bei bekannter Distanz) an verschiedenen Kompakten Objekten, sollten Vertreter der jeweiligen Klasse enthüllen oder wenigstens einen schwachen Hinweis zur Unterscheidung geben.

### 15.3.19 Irdische Neutronensterne

Die Frage, ob im tiefsten Innern von Neutronensternen tatsächlich **neue Physik** vorgefunden werden kann, ist Gegenstand aktueller Forschung. Die extremen Materiebedingungen versuchen die Physiker im Labor nachzustellen. Die Forschung wird u. a. mit dem **Teilchenbeschleuniger** RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider*) und an der GSI (*Gesellschaft für Schwerionenforschung*) Darmstadt und bald auch am LHC (*Large Hadron Collider*) am CERN betrieben. Extreme Materiezustände wie das extrem kurzlebige QGP können aus den Stößen sehr schwerer Ionen wie Gold- oder Bleiatomkerne erzeugt werden. Denn bei solchen Zusammenstößen werden kurzfristig auf sehr kleinen Raumskalen Dichten wie im Innern von Neutronensternen erreicht. Tatsächlich gelang den RHIC-Physikern die Erzeugung eines QGPs im Jahr 2004, wie unter dem Eintrag Quark-Gluonen-Plasma beschrieben wird.

Teilchenphysiker untersuchen auch die Produktion von Kaonen. Die messtechnischen Anforderungen solcher Experimente sind außerordentlich hoch! Die Physiker hoffen, dass irdische Teilchenbeschleuniger den Bereich hoher Dichte und hoher Temperatur ausloten, während astronomische Beobachtungen von Neutronensternen den Bereich hoher Dichten und niedriger Temperaturen liefern. In dieser Forschung zeigt sich abermals eine Annäherung von Teilchenphysik und Astrophysik, wie in der Kosmologie.

### 15.3.20 Magnetare: stark magnetisierte Neutronensterne

Stark magnetisierte Neutronensterne nennt man Magnetare, die Pulsare haben sich als rotierende Neutronensterne erwiesen.

### 15.3.21 Neutronensterne im Doppelpack

Ein Binärsystem aus Neutronensternen, der **Hulse-Taylor-Pulsar** mit der Katalogbezeichnung PSR 1913+16, erlangte Berühmtheit, weil es bei diesem System gelang, indirekt die Abstrahlung von Gravitationswellen nachzuweisen. Dies war ein weiterer, gewichtiger Beleg für die Existenz von Gravitationswellen und die Richtigkeit der Allgemeinen Relativitätstheorie *Albert Einsteins*.

## 15.4 Newtonsche Gravitation

Die Newtonsche Gravitation ist die historisch gesehen **erste Gravitationstheorie**, die von dem englischen Mathematiker und Physiker *Sir Isaac Newton* (1643 - 1727) erfunden wurde. Newtons Theorie beschreibt, wie **Massen** miteinander wechselwirken: sie tauschen nämlich eine Kraft, die *Gravitationskraft*, aus. Es gibt nur positive Massen und keine negativen, so dass die Gravitationskraft **immer anziehend** (*attraktiv*) wirkt. Newton entdeckte, dass die Gravitationskraft **überall im Kosmos wirkt** und beschrieb erfolgreich rein theoretisch

die Bahnbewegungen von Planeten und Kometen im Sonnensystem. Sein Monumentalwerk *Principia* ist eines der wertvollsten Bücher der Wissenschaft und erschien 1687. Mit diesem ersten Lehrbuch der theoretischen Physik konnte Newton die empirisch gefundenen Kepler-Gesetze *mathematisch* ableiten. Um dazu in der Lage zu sein, erfand er (etwa zeitgleich, aber unabhängig voneinander mit dem Deutschen Leibniz) 'nebenbei' die Differential- und Integralrechnung!

### 15.4.1 Newtons Gravitation als Formel

Die quantitative Berechnung der Gravitationskraft funktioniert gemäß Gleichung:

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

Zwischen zwei Massen  $M$  und  $m$ , die sich im Abstand  $r$  voneinander befinden mögen, wirkt die Gravitationskraft  $\mathbf{F}$ . Dabei ist  $G$  eine **fundamentale Naturkonstante**, die Newtonsche Gravitationskonstante mit dem Zahlenwert  $6.672 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$  in SI-Einheiten. In der modernen Sprache der Eichtheorien ist  $G$  die **Kopplungskonstante der Gravitation**. Die Daten  $G$ ,  $M$ ,  $m$  und  $r$  müssen rechts eingesetzt werden, um die Gravitationskraft  $\mathbf{F}$  links auszurechnen. Anmerkung: Diese Kraft ist ein *Vektor*, weil sie Betrag und Richtung hat;  $r$  ist also eigentlich der Betrag des Differenzvektors der beiden Ortsvektoren, die die Positionen der beiden Massen angeben). Wie man sieht, hat die Gravitationskraft eine berühmte Eigenschaft:

*Die Gravitationskraft fällt mit dem dem Abstandskadrat ab.*

Anders gesagt: Je weiter die beiden Massen  $M$  und  $m$  voneinander entfernt sind, umso schwächer ist die Gravitation. Diese Eigenschaft hat die Gravitation mit der *Coulombkraft* aus der Elektrostatik gemein.

### 15.4.2 Voraussetzungen und Grenzen von Newtons Theorie

Die Newtonsche Physik beruht auf drei Axiomen, die auch als *Newtonsche Gesetze* bezeichnet werden.

- ◇ **1)** Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmig geradlinigen Bewegung, falls keine Kräfte auf ihn wirken (**Trägheitsgesetz**).
- ◇ **2)** Die Beschleunigung eines Körpers ist proportional zu der Kraft, die sie verursacht (**dynamisches Grundgesetz**).
- ◇ **3)** Kräfte, die zwei Körper aufeinander ausüben, sind vom Betrag her immer gleich groß, aber von der Richtung her genau entgegengesetzt (**Reaktionsprinzip**; *actio = reactio*).

Auf der Grundlage dieser Axiome formulierte Newton seine Gravitationsphysik. Seine Theorie ist nach wie vor in der zeitgenössischen Physik wichtig und gehört zum Standardlehrstoff eines jeden Physikstudenten in der *klassischen Mechanik* am Anfang des Studiums. Viele Probleme der Physik können *Newtonsch gelöst* werden, z. B. alltägliche Gravitationsphänomene wie der Fall einer Masse im Gravitationsfeld der Erde. Das funktioniert mit **Punktmassen**, aber selbstverständlich auch mit ausgedehnten Massen; dann muss man nur den **Schwerpunkt** der ausgedehnten Masse als Positionsangabe verwenden. Newtons Theorie eignet sich dann zur Berechnung von Gravitationseffekten, wenn

- ◇ auftretende Geschwindigkeiten deutlich kleiner als die Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c$  sind;
- ◇ beteiligte Massen nicht allzu kompakt sind.

### 15.4.3 Was passiert, wenn diese Voraussetzungen nicht gelten?

Falls die genannten Bedingungen nicht erfüllt sind, muss eine Theorie verwendet werden, die der Newtonschen Gravitationsphysik übergeordnet ist. Das ist die Relativitätstheorie, genauer gesagt die **Allgemeine Relativitätstheorie** (ART) von *Albert Einstein*, die 229 Jahre nach Newtons Veröffentlichung der *Principia* publiziert wurde.

### 15.4.4 Newtons geisteswissenschaftliche Leistung

In Newtons Denken ist eine damals nicht selbstverständliche Annahme eingegangen: **Er vereinheitlichte den Kosmos und die Erde**. Das ist deshalb nicht selbstverständlich, weil die (insbesondere katholische) Kirche eine strikte Trennung von Himmel und Erde proklamierte. Aus der Retrospektive kann dieser erkenntnistheoretische Schritt Newtons daher als **erste Stufe der Unifikation** in der Physik angesehen werden. Dieses Bestreben dauert in der modernen Physik noch an und zeichnet sich als sehr erfolgreich, um die Natur zu beschreiben (siehe dazu elektroschwache Theorie und GUT).

### 15.4.5 wichtiger Lesehinweis

Ausführliche Informationen zur Newtonschen und anderen Gravitationstheorien gibt es in einem der bedeutenden Begriffe in diesem Lexikon der Astrophysik, nämlich **Gravitation**.

## 15.5 No-Hair-Theorem

Dieses Keine-Haare-Theorem beruht auf einem Zitat des Relativitätstheoretikers *John A. Wheeler*:

*Schwarze Löcher haben keine Haare.*

Diese Aussage bezieht sich darauf, dass Schwarze Löcher erstaunlich wenig Eigenschaften bzw. physikalische Parameter aufweisen verglichen mit anderen physikalischen Objekten. Maximal sind es drei Parameter, nämlich bei der Kerr-Newman-Lösung: Masse, Drehimpuls und elektrische Ladung. Gegenstände mit komplexen Eigenschaften, die in das Schwarze Loch fallen, werden auf das Einfachste reduziert (**Verlust an Information**), so dass dieser Einfall nur etwas an den Parametern Masse, Drehimpuls und Ladung ändern kann.

## 15.6 Nova

Eine Nova bezeichnet in der Astronomie eine Eruption, einen Helligkeitsausbruch eines Sterns. Somit zählen die Novae zu den Veränderlichen.

### 15.6.1 irreführende Etymologie

Die Wortbedeutung *nova* kommt aus dem Lateinischen für *neu*. Das Phänomen Nova hielt man ursprünglich für einen neuen Stern, weil der Helligkeitsausbruch dort auftauchte, wo Astronomen zuvor keinen Stern sahen. Tatsächlich ist es kein neuer Stern (im Sinne eines Protosterns, YSOs), sondern ein leuchtschwacher Stern, der plötzlich hell in Erscheinung tritt.

### 15.6.2 soziale Sterne: Riese gibt Zwerg Materie

Die physikalische Erklärung für Novae ist, dass ein **Materietransfer in einem Doppelsternsystem** von einer Komponente auf die andere stattfindet. Diesen Mechanismus gibt es auch bei Röntgendoppelsternen. Die heiße Komponente ist in der Regel ein Weißer Zwerg, die andere, kühlere meist ein Roter Riese oder seltener ein Roter Zwerg. Kommen sich die beiden Sterne recht nahe, so kann durch Akkretion Materie auf die heiße Komponente übertreten. Was sich dann ereignet, ist vergleichbar mit einer Fusionsbombe: Bei Erreichen einer kritischen Temperatur zündet eine Explosion. Im Speziellen wird Wasserstoff auf der Oberfläche des Weißen Zwergs akkretiert. Diese Wasserstoffhülle durchmischt sich mit der Atmosphäre des Weißen Zwergs. Bei hohen Temperaturen kann dann der CNO-Zyklus ablaufen, der thermonukleare Fusionsenergie freisetzt. Die Konsequenzen gleichen einem Inferno: die freigesetzte Energie treibt die Gashülle um den Weißen Zwerg auf Geschwindigkeiten von einigen tausend km/s. Die Gashülle strahlt dabei vor allem thermisch (Planckscher Strahler) und kühlt sich mit der Ausdehnung ab. Die elektromagnetische Emission ist anfangs hochenergetisch und im Bereich der Röntgen- und Ultraviolettstrahlung und kommt infolge Abkühlung in den optischen und infraroten Spektralbereich.

### 15.6.3 Beobachtungsbeispiel: Nova T Pyxidis

Novae wurden bereits vielfach astronomisch beobachtet. Besonders eindrucksvoll sind Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop Hubble, wo die Auflösung der expandierenden Gashülle dokumentiert werden konnte. Ein solches Beispiel zeigt das optische Beobachtungsfoto 15.4: die Nova *T Pyxidis* (Credits: *Shara et al.* STScI/NASA 1997). Diese Nova geschieht etwa alle 20 Jahre und zählt daher zu den rekurrierenden Novae. *T Pyxidis* hat eine Entfernung von 6000 Lichtjahren und befindet sich im Sternbild *Pyxis* (dt. *Schiffskompass*) am Südhimmel. Im Foto festgehalten sind nun Myriaden von Explosionstrümmern, die sich in einer Explosionswolke von etwa einem Lichtjahr Durchmesser um den Weißen Zwerg (oben) scharen. Auch der spendable Begleitstern ist zu sehen (unten). Die Trümmer zeugen von einer verheerenden Nuklearexplosion auf der Oberfläche des Zwergs, die einer Wasserstoffbombenexplosion ähnelte.

### 15.6.4 Novatypen

In der Analyse von Novae spielen **Lichtkurven** die herausragende Rolle. Der zeitliche Abfall der beobachteten Helligkeit verrät viele Eigenschaften des Binärs, in dem die Nova stattfand. Typische Helligkeitsanstiege bei Novae liegen zwischen 7 und 20 Größenklassen oder Magnituden. Die Astronomen unterscheiden je nach Geschwindigkeit, mit der die Helligkeit zunimmt

- ◊ **sehr langsame** (geringe Erhöhung der Helligkeit),

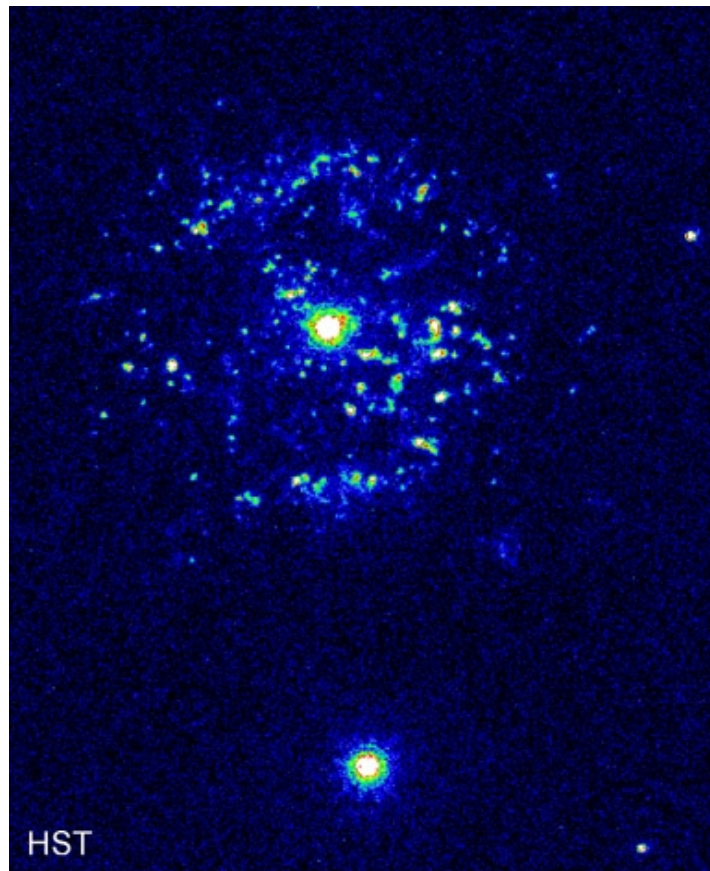


Abbildung 15.4: Nova T Pyxidis, beobachtet 1997 mit HST.



- ◇ **langsame** (Helligkeitsabnahme von drei Magnituden innerhalb von 100 Tagen),
- ◇ **schnelle** (Helligkeitsabnahme von mehr als drei Magnituden innerhalb von 100 Tagen)
- ◇ und **rekurrierende** (dt. *wiederkehrende*) Novae (einige Helligkeitsausbrüche pro Jahrhundert).

Der Energieoutput liegt bei etwa  $10^{38}$  Joule oder  $10^{45}$  erg. Dies ist deutlich kleiner (etwa um einen Faktor von einer Million) als bei Supernovae (Typ II), die typische Energien von  $10^{51}$  erg ('1 foe') oder  $10^{44}$  Joule freisetzen.

### 15.6.5 Ein Zwergenschicksal

Der Weiße Zwerg kann nicht beliebig viel Masse von seinem Begleiter aufnehmen. Überschreitet er durch den Massentransfer seine Chandrasekhar-Grenze (etwa 1.46 Sonnenmassen), so findet keine Nova, sondern eine **Supernova vom Typ Ia** statt. Der heiße Zwergstern überdauert dann nicht die heftige Explosion, sondern wird vollständig zerrissen.

### 15.6.6 Was unterscheidet Nova von Supernova?

Genau das ist der entscheidende Unterschied zwischen Nova und Supernova: Eine Nova kann von einem Stern mehrmals durchlaufen werden, weil der Stern die Explosionen, den Abstoß der Gashüllen überlebt. Eine Supernova löscht den Vorläuferstern aus (Typ Ia) oder bildet ein neues kompaktes Objekt (Typ II). Welches kompakte Objekt resultiert ist eine Frage der Restmasse des kollabierenden Sterns: Unterhalb von etwa 1.5 bis 1.8 Sonnenmassen (konservatives Limit bei 3 Sonnenmassen) bleibt ein Neutronenstern, oberhalb davon ein stellares Schwarzes Loch übrig. Es ist auch denkbar, dass nach der Supernova Typ II kein Relikt bleibt.

Der Unterschied von Nova zu Supernova erklärt auch die Beobachtungen: Novae sind mit etwa 50 Stück pro Jahr und Galaxie deutlich häufiger als Supernovae, die nur ein- bis viermal pro Jahr und Galaxie stattfinden.

## 15.7 Nukleon

Ein geeigneter deutscher Begriff für Nukleon ist Kernteilchen (lat. *nucleus*, dt. eigentlich '[Nuss-]Kern'). Protonen und Neutronen sind die Teilchen, die sich im Atomkern befinden. Daher heißen sie *Nukleonen*. Das Proton unterscheidet sich vom Neutron durch die elektrische Ladung: das Proton hat die Elementarladung  $+e$ ; das Neutron ist hingegen elektrisch neutral. Beide Nukleonen haben eine Substruktur und bestehen aus jeweils drei elektrisch geladenen Quarks. Durch deren drittelzahlige Ladungen ist es nun möglich Teilchen der Gesamtladung 0,  $+e$ , etc. zu kombinieren.

### 15.7.1 So verschieden sind Proton und Neutron nicht

Der Quantenphysiker Werner Heisenberg hat den Isospin als Quantenzahl vorgeschlagen, um Proton und Neutron einheitlich als Zustände eines Nukleons aufzufassen. Ist die dritte Komponente dieses Nukleons  $-1/2$ , so spricht man vom Neutron; ist er  $+1/2$ , so handelt es sich um das Proton (Vorzeichen können je nach Konvention auch umgekehrt zugeordnet werden). Siehe auch Kaonen.

## 15.8 Nukleosynthese

Allgemein bezeichnet Nukleosynthese die Bildung von Atomkernen (*Nuklei*) aus Kernteilchen (*Nukleonen*), also die Bindung von Protonen und Neutronen zu einem Kern eines bestimmten Elements im Periodensystem (PSE). Ein chemisches Element wird dabei ausschließlich von der Anzahl der Protonen bestimmt. Diese Anzahl heißt daher auch *Ordnungszahl* (weil sie die Elemente aufsteigend im PSE ordnet) oder *Kernladungszahl*  $Z$ . Unterschiedlich schwere Kerne desselben Elements heißen Isotope.

### 15.8.1 Was bindet Teilchen gleichnamiger Ladung zu einem Kern?

Die Protonen stoßen sich aufgrund ihrer gleichen elektrisch positiven Ladung untereinander durch elektromagnetische Kräfte (*Coulomb-Kraft*) ab. Dennoch können sie durch noch größere Kräfte gebunden werden: das sind gerade die Yukawa-Kraft und die starke Kraft. Diese Wechselwirkungen ermöglichen die Existenz von Atomkernen und Nukleonen und sind unabdingbare Voraussetzung für unsere facettenreiche Welt - für komplexe Moleküle, für Leben und letztendlich für Intelligenzen, die über Nukleosynthese nachdenken können.

### 15.8.2 Zwei Arten der Nukleosynthese

Generell unterscheidet man in der Astrophysik die **stellare Nukleosynthese** von der **primordialen Nukleosynthese**. Die stellare Nukleosynthese ist die Fusion von Atomkernen im Innern von Sternen; die primordiale Nukleosynthese ist die Fusion in einer Frühphase des heißen Universums. Beides soll nachfolgend kurz erläutert werden.

#### stellare Nukleosynthese

In der thermonuklearen Fusion im **Innern von Sternen** werden aus leichten schwere Atomkerne 'verschmolzen'. Genauer gesagt handelt es sich um physikalische Kernreaktionen, bei denen verschiedene Erhaltungssätze (für Energie, Impuls, Drehimpuls, Leptonenzahl tc.) gelten. So bilden sich aus leichten Elementen die schweren Elemente, was im Innern von Sternen bis zum Element Eisen (*Fe*) funktioniert. Elemente, die schwerer als Eisen sind, werden in Einfangprozessen von Protonen oder Neutronen und nicht mehr durch Fusionsprozesse erzeugt. Darunter fallen der s-Prozess, r-Prozess (beide Neutroneneinfang) und p-Prozess (Protoneneinfang). Die r- und p-Prozesse laufen in Sternexplosionen ab, den Supernovae. Der s-Prozess findet in schweren Sternen, den Roten Riesen und AGB-Sternen statt. Der Facettenreichtum an schweren Elementen (schwerer als Eisen), wie Silber, Gold, Platin, Quecksilber und Blei geht allein auf diese Mechanismen zurück.

#### primordiale Nukleosynthese

Nukleosynthese in der Kosmologie - die primordiale Nukleosynthese - meint eine Epoche in der Evolution des Kosmos, wo die ersten leichten Elemente erzeugt wurden. Es gab bis dato nur die Grundbausteine für Atomkerne und den einfachsten Atomkern, Wasserstoff, der einem einzelnen Proton entspricht. Das Universum war so klein und heiß, dass es selbst als **gigantischer Fusionsreaktor** fungierte. Die Zutaten zum Fusionsprozess, das primordiale Gas, bestand zunächst aus Hadronen, die in der Hadronen-Ära erzeugt wurden. Im frühen Universum war das Materiekonglomerat aus Leptonen, Hadronen und Photonen

allerdings deutlich weniger dicht als im Innern von Sternen. Deshalb erforderte die primordiale Nukleosynthese auch deutlich höhere Temperaturen, um effizient zu sein: Typischerweise liegen sie im Bereich von etwa  $10^9$  Kelvin, während im dichten Sterninneren bereits etwa 15 Millionen Kelvin ausreichen. Zeitlich ist die Nukleosynthese-Ära etwa **drei Minuten** nach dem Urknall einzuordnen.

Die thermonuklearen Fusionsprozesse im frühen Universum erzeugten nun die **primordialen Häufigkeiten** der Elemente. Es konnten nur die leichten Elemente (Atommassenzahlen  $A = 2, 3, 4, 7$ ) fusioniert werden: schwerer Wasserstoff (*Deuterium* oder  $H-2$ ), der im Atomkern ein Proton und ein Neutron hat; Helium ( $He-3$  und  $He-4$ ) und Spuren von Lithium ( $Li-7$ ). Wasserstoffatomkerne in Form von Protonen lagen wie gesagt bereits vor der Fusion vor. Deshalb stellt Wasserstoff den größten Anteil am Urgas am Ende der Nukleosynthese-Ära. Bereits im Jahr 1946 hatte der Physiker *George Gamow* (1904 - 1968) theoretisch gezeigt, dass die primordiale Nukleosynthese im frühen Kosmos so stattgefunden haben muss, wie sie hier dargestellt wurde. Gamow war ein brillanter Vordenker: Er war es auch, der bereits 1948 die Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung aus rein theoretischen Überlegungen heraus auf 5 Kelvin bezifferte; wie wir heute auf der Grundlage gesicherter Beobachtungen wissen, ist es eine Drei-Kelvin-Strahlung!

### 15.8.3 primordiale Nukleosynthese konsistent mit Hintergrundstrahlung

Die Anteile an baryonischer Materie, wie sie u. a. von Mikrowellendaten der kosmischen Hintergrundstrahlung (besonders von den Satelliten COBE, WMAP) gemessen werden, dienen als zu reproduzierende Größe in Simulationen, die von primordialen Häufigkeiten und einem umfangreichen Reaktionsnetzwerk ausgehen (z. B. *Coc et al.* 2004, astro-ph/0401008).

### 15.8.4 Buchempfehlung

- ◇ **Die ersten drei Minuten** von Teilchenphysiker und Nobelpreisträger *Steven Weinberg*

## 15.9 Nullgeodäte

Nullgeodäten sind die Bahnen des Lichts in der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die Berechnung von Nullgeodäten ist erforderlich, wenn man daran interessiert ist, wie sich Photonen in einer gekrümmten Raumzeit ausbreiten. Damit sind z. B. Gravitationslinseneffekte zu berechnen. Eine numerische Methode, um die Bahnen vieler Lichtteilchen zu berechnen, heißt Ray Tracing. Siehe auch Geodäten.

# 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](mailto:andreas.mueller@universe-cluster.de)

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