
Lexikon

der



Astrophysik

von



Andreas Müller

aus dem

Wissensportal für Astrophysik

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

April 2007

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schema eines Akkretionsflusses aus Standardscheibe und ADAF.	2
2.2	System aus Bulk und 2 Branen	3
2.3	Kernaussage des Äquivalenzprinzips anschaulich.	9
2.4	Vereinheitlichtes Schema der Akkretionsphysik.	15
2.5	Tomographie eines Aktiven Galaktischen Kerns bis zur pc-Skala.	22
2.6	Multiwellenlängenspektrum eines AGN Typ-1.	25
2.7	Die Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie in tensorieller Form.	30
2.8	Entfernungsskala der Planeten im Sonnensystem.	49
2.9	Pluto und seine drei Monde.	50
2.10	Weltraumteleskop Hubble, kurz HST.	51
2.11	Auflösungsvermögen: Pluto, der Herr der Unterwelt, mit seinem Diener, Charon.	53

2 Lexikon A

2.1 Abbremsparameter

Der Abbremsparameter q_0 ist ein wichtiger Modellparameter der Kosmologie, der ein **Maß für die Abbremsung oder Beschleunigung der Expansion des Universums** ist. Zusammen mit der Hubble-Konstanten bzw. allgemeiner gesprochen des Hubble-Parameters ist der Abbremsparameter einer der fundamentalen Parameter der Kosmodynamik. Näheres dazu unter den Einträgen Hubble-Gesetz und Friedmann-Weltmodelle.

2.2 ADAF

Das Akronym ADAF steht für *advection-dominated accretion flow*, was man gleichwohl als **advektionsdominierter Akkretionsfluss** übersetzen kann. Vereinfacht gesagt, verbirgt sich hinter ADAF eine aufgeblähte Materieströmung aus heißem, dünnem Gas, die eine etwa kugelige Gestalt um das Materie aufsammelnde Zentralobjekt annimmt. Die Astronomie ist auf die Existenz solch heißer Akkretionsflüsse um kosmische Objekte wie Neutronensternen oder Schwarzer Löcher angewiesen, um erklären zu können, wie die hochenergetischen Röntgenspektren zustande kommen.

2.2.1 Beschreibung der Akkretionslösung

Zunächst soll es jedoch um die Charakterisierung des ADAFs gehen, auch wenn die Beschreibungen recht technisch sind: Ein ADAF ist eine spezielle, analytische Lösung, die sehr bekannt in der Akkretionsphysik ist. Es ist eine selbstähnliche Akkretionslösung, die auf dem theoretischen Zweig der dissipativen Hydrodynamik beruht. Der ADAF wurde 1994 entdeckt (*Narayan & Yi 1994*) und weist ein paar klare Unterschiede zur Standardscheibe (SSD), einer anderen, berühmten Akkretionslösung, auf. Im Wesentlichen liegt das darin begründet, dass die akkretierte Materie **nicht effizient durch Strahlung gekühlt** wird. Das ist eine so markante Eigenschaft, dass sich für solche Akkretionsflüsse der Oberbegriff **RIAF** für *radiatively-inefficient accretion flow* (dt.: durch Strahlung ineffizient gekühlter Akkretionsfluss) etabliert hat. Jeder ADAF ist demnach ein RIAF - aber nicht umgekehrt! Das Unterbleiben der Kühlung führt zur Aufheizung des Akkretionsflusses: Wie kochendes Wasser in einem Topf dehnt sich der heiße Fluss aus. Dabei wird der Akkretionsfluss ausgedünnt, das Gas wird demnach weniger dicht. Ein dünnes Gas kann durch Strahlung kaum gekühlt werden, weil es kaum Wechselwirkungen zwischen Gas und Strahlung gibt. Die mittlere, freie Weglänge ist recht groß. Im Gegensatz zur Standardscheibe wird die thermische Energie nicht als elektromagnetische Wellen abgestrahlt, sondern im Gas als innere Energie und Entropie gespeichert. Der radiale Entropiegradient ist eine geeignete Größe, um den Unterschied der beiden wichtigsten analytischen Akkretionslösungen zu beschreiben: Der Entropiegradient verschwindet bei SSDs und nicht bei ADAFs. Die somit im ADAF gespeicherte Energie verschwindet im aufsammelnden Objekt - dem so genannten *Akkretor*. Die Akkretionsphysiker

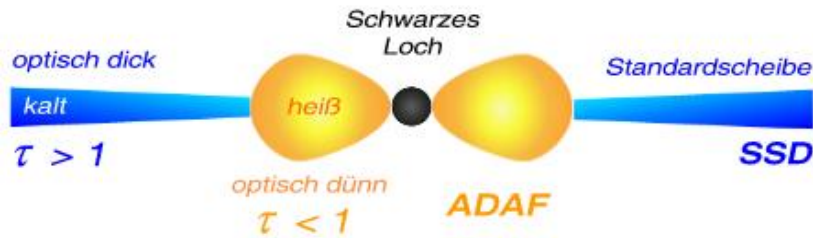


Abbildung 2.1: Schema eines Akkretionsflusses aus Standardscheibe und ADAF.

sagen: *Die Energie wird advektiert*. Die Bezeichnung *advektions-dominiert* bezieht sich nun darauf, dass die Kühlung sehr ineffizient ist.

2.2.2 Teilchenbewegungen im ADAF

Das **Geschwindigkeitsfeld im ADAF** ist *sub-Keplersch*, d. h. dass bei einem vorgegebenen Radius die Rotation nur etwa 40% der Keplerschen Umlaufgeschwindigkeit an diesem Radius ist. Die radiale Geschwindigkeit, also die Einfallgeschwindigkeit in Richtung auf das Zentralobjekt ist vergleichbar mit dieser sub-Keplerschen Rotationsgeschwindigkeit. ADAFs bilden sich typischerweise bei **kleinen Akkretionsraten** aus. Pro Zeiteinheit fällt verhältnismäßig wenig Materie auf den Akkretor. Bei hohen Akkretionsraten dominieren andere Akkretionslösungen, wie die Standardscheibe oder die so genannten **schlanke Scheiben** (engl. *slim disks*).

2.2.3 Warum ist der ADAF von allgemeiner Bedeutung?

Im Gegensatz zum ADAF findet man die Standardscheibe in unterschiedlicher Ausprägung in allen Akkretionsflüssen - unabhängig von der Akkretionsrate. Diese Aussage deutet sich zumindest in einem vereinheitlichenden Akkretionsmodell (engl. *accretion unification scheme*) an, das unter dem Lexikoneintrag Akkretion illustriert ist. In Abbildung 2.1 ist der Schnitt durch einen Akkretionsfluss (hier ein SSD-ADAF-Übergang) entlang der Symmetrieachse dargestellt. Schematisch sind die Unterschiede von kalter, geometrisch dünner, optisch dicker Standardscheibe und heißem, geometrisch dickem, optisch dünnem ADAF illustriert; als Akkretor wurde ein Schwarzes Loch angenommen, was jedoch nicht zwingend ist.

Das heiße Material im ADAF ist so heiß, dass die Plancksche Strahlungsverteilung viel Intensität im Röntgenbereich abgibt. Außerdem wird im heißen, optisch dünnen Gas die energiearme Strahlung Comptonisiert. Beide Komponenten zusammen - thermische Röntgenstrahlung und Comptonisierter Teil - erklären sehr gut die beobachteten Röntgenspektren von Akkretoren, in denen man den ADAF vermutet.

Das ausgedünnte Material des ADAF bietet gute Transparenzeigenschaften (auch Transmissionseigenschaften genannt) für elektromagnetische Wellen. Die Akkretionsphysiker sagen, ein ADAF sei *optisch dünn* (siehe dazu optische Tiefe). Die dominierende Strahlungsform, die zur Kühlung ausgedünnter Gase beiträgt, ist **Bremsstrahlung**. Der Energieverlust von Bremsstrahlung skaliert mit dem Quadrat der Dichte und der Wurzel der Gastemperatur, so dass extrem ausgedünntes Material kaum effizient durch Emission von

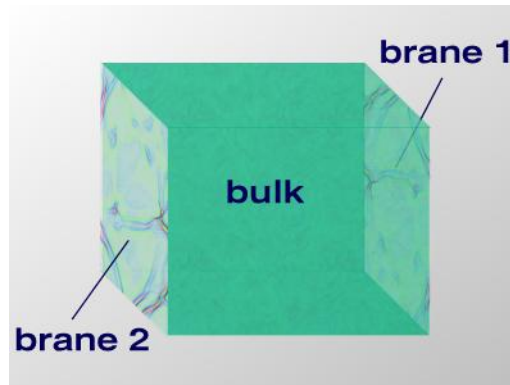


Abbildung 2.2: System aus Bulk und 2 Branen

Bremsstrahlung abkühlt.

2.3 ADD-Szenario

Das ADD-Szenario ist benannt nach den Forschern *Arkani-Hamed, Dimopoulos & Dvali*, die es 1998 vorstellten (*Arkani-Hamed et al.* 1998). Es greift einen Aspekt der Kaluza-Klein-Theorie aus den 1920er Jahren auf, der 1990 von *Antoniadis* wiederbelebt wurde: die Existenz von räumlichen Extradimensionen. Motiviert war dieses Modell durch das **Hierarchieproblem**. Physiker beobachten einen deutlichen Unterschied, wenn sie die Stärken der vier Wechselwirkungen, die so genannten Kopplungskonstanten, miteinander vergleichen: die Gravitation ist deutlich schwächer als die anderen drei Wechselwirkungen (starke, schwache und elektromagnetische Kraft). Anders gesagt: die Planck-Skala, diejenige Skala, wo Quanteneffekte der Gravitation wichtig werden, liegt mit 10^{19} GeV deutlich über der Energieskala der elektroschwachen Theorie, 100 GeV. Warum?

2.3.1 Ansatz: Gravitation wirkt in allen Raumdimensionen

Der Ansatz im ADD-Szenario ist, dass die Gravitation in Gestalt des (hypothetischen) Gravitons in räumliche Extradimensionen vorzudringen vermag, wohingegen alle anderen Teilchen und Felder des Standardmodells der Teilchenphysik auf einen Unterraum, der so genannten **Bran** (genauer: *3-Bran*), beschränkt sind. Anschaulich gesprochen trägt die Gravitation Energie in eine andere Dimension, was in ihrer Schwäche resultiert, wie es ein Beobachter wahrnimmt, der auf einen Raum niedrigerer Dimension beschränkt ist.

2.3.2 Von Bulk und Branen

Den übergeordneten Raum höherer Dimension nennen die Hochenergiephysiker **Bulk** (gesprochen 'balk'), in dem die Branen *Hyperflächen* (eine Dimension weniger) repräsentieren. Die Grundidee ist in Abbildung 2.2 skizziert. Im ADD-Szenario ist der Bulk fünfdimensional und weist eine **flache** Metrik auf, die 5D-Verallgemeinerung der vierdimensionalen Minkowski-Metrik der Speziellen Relativitätstheorie. Die Extradimensionen sind auf einen bestimmten Radius, dem *Kompaktifizierungsradius*, beschränkt sein (das ist ein Unterschied

zum DGP-Modell). Kommt dieser Radius in den makroskopischen Bereich, so spricht man von großen Extradimensionen (engl. *large extra dimensions*, LED oder LXD). Im ADD-Szenario lässt sich nachrechnen, dass sich die Extradimensionen physikalisch darin bemerkbar machen, dass bei Erreichen des Kompaktifizierungsradius **Abweichungen vom klassischen Newtonschen Gravitationsgesetz** auftreten. Bisher ist es nicht gelungen, diese Abweichungen im Experiment bis zu einer Längenskala von einem Millimeter zu bestätigen. Die Extradimensionen müssen also - wenn sie denn existieren - auf kleinere Abstände kompaktifiziert sein.

2.3.3 reduzierte Planck-Skala

Eine natürliche Konsequenz des ADD-Modells ist eine modifizierte Planck-Skala. Die zusätzlichen Raumdimensionen bewirken, dass die klassisch sehr hohe Planck-Skala von der Größenordnung $M_{\text{Pl}} \sim 10^{19}$ GeV herabgesetzt wird auf der Bran - also unserer niedrigdimensionalen Welt. Die **reduzierte Planck-Skala** $M_{\text{Pl,D}}$ berechnet sich gemäß dieser Gleichung:

$$M_{\text{Pl,D}} = M_{\text{Pl}}^{2/(2+n)} \left(\frac{\hbar}{Rc} \right)^{n/(2+n)}$$

Dabei geht die Anzahl der Extradimensionen n ein, der Kompaktifizierungsradius R und ansonsten nur fundamentale Naturkonstanten.

2.3.4 Abenteuerliches Experiment: Schwarzes Loch im Teilchenbeschleuniger

Die reduzierte Planck-Skala hat den wesentlichen Aspekt, dass es möglich sein könnte, eine Miniversion von Schwarzen Löchern in Teilchenbeschleunigern herzustellen, die eine Masse von etwa 1 TeV hätten. Das Konzept läuft unter dem Stichwort TeV-Quantengravitation. Eine Laborphysik Schwarzer Löcher rückt damit in experimentell greifbare Nähe und könnte vielleicht schon am neuen LHC-Beschleuniger am CERN umgesetzt werden. Diese Forschung ist auch für Astrophysiker aufregend und von großem Interesse. Ab Ende 2007 beginnen die Messungen am LHC.

2.3.5 Ein realistisches Szenario?

Bislang ist das ADD-Szenario **eine Hypothese**, weil Extradimensionen nicht nachgewiesen werden konnten, auch nicht indirekt. Allerdings erfordern die Stringtheorien zwingend die Existenz von mehr Raumdimensionen als die klassischen drei: Länge, Breite und Höhe. Sollten die Stringtheorien zunehmend mehr Erscheinungen in der Natur erklären können, so würde auch das ADD-Szenario realistischer werden. Schwierig wird sich eine Auswahl gestalten, da es eine Vielzahl solcher höherdimensionalen Branenmodellen gibt, so u. a. auch die **Randall-Sundrum-Modelle** und das **DGP-Szenario** (mit nicht kompaktifizierter Extradimension).

2.3.6 Originalveröffentlichung

- ◇ *Arkani-Hamed, N., Dimopoulos, S. & Dvali, G.:* The Hierarchy Problem and New Dimensions at a Millimeter, *Phys. Lett. B* **429**, 263, 1998; als Preprint hep-ph/9803315

2.4 ADM-Formalismus

Es handelt sich um eine spezielle mathematische Methode, die in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) mit Erfolg eingesetzt wird. Diese Technik wurde von *Arnowitt, Deser* und *Misner* 1962 entwickelt und ist außerordentlich nützlich für die **Numerische Relativitätstheorie**.

2.4.1 Motivation zu dieser Methode

Wenn man physikalische, dynamische Prozesse in einer gekrümmten Raumzeit untersuchen möchte, ergibt sich das Problem, dass die Zeit in jedem Punkt der vierdimensionalen Mannigfaltigkeit anders ablaufen kann: hier schneller, da langsamer, sie kann sogar - für einen Außenbeobachter - stillstehen! Dies ist besonders problematisch, wenn man zeitabhängige Prozesse simulieren möchte, weil man nicht weiß, welcher Beobachter (FIDO, FFO, ZAMO) der geeignete ist und eine 'richtige Physik' beschreibt. Generell erlaubt die ART von einem auf den anderen Beobachter zu transformieren. Dies geschieht mittels Lorentz-Transformationen und Poincaré-Transformationen.

2.4.2 Und so geht's

Im ADM-Formalismus spaltet man nun die von der Relativitätstheorie geschaffene Symmetrie zwischen Raum und Zeit (daher Raumzeit) wieder auf. Deshalb nennt man diese Methode auch den **3+1 Split**, weil man in die *drei Raumkoordinaten* einerseits und die *eine Zeitkoordinate* andererseits aufspaltet. Dies gelingt dadurch, dass man die vierdimensionale Raumzeit aus **dreidimensionalen raumartigen Hyperflächen** zusammensetzt, auf denen der Zeitparameter jeweils konstant ist. Der Ablauf der Zeit geschieht nun durch 'Springen' von einer Hyperfläche zur nächsten in dieser **Foliation** (*Blätterung*) aus Hyperflächen. Jede Hyperfläche hat ihre eigene **Drei-Metrik**, h_{ij} , die man aus der kovarianten, vierdimensionalen (also übergeordneten) Metrik gewinnt: es sind gerade die Elemente der unteren, rechten 3×3 -Matrix, die in die 4×4 -Matrix des so dargestellten metrischen Tensors (in einem bestimmten Koordinatensystem) eingebettet sind. Die folgende Gleichung zeigt das Linienelement der ART, das die Eigenschaften einer Raumzeit charakterisiert im 3+1 Split:

$$ds^2 = \alpha^2 dt^2 - h_{ij} (dx^i + \beta^i dt) (dx^j + \beta^j dt); \quad i, j = 1, 2, 3$$

Der linke Term enthält die Zeitdimension, der rechte die drei Raumdimensionen. Jede (nicht pathologische) Raumzeit kann in diese Form gebracht werden, so dass man die Größen α und β identifizieren kann. Aber was sagen uns nun diese Größen?

2.4.3 Wer α sagt, muss auch β sagen

Von einer Hyperfläche zur nächsten vermittelt die **Lapse-Funktion** (übliche Bezeichnung mit α) die Veränderung des Zeitablaufs. Physikalisch betrachtet ist die Lapse-Funktion gerade das Differential der Eigenzeit über dem der Beobachterzeit, also die Gravitationsrotverschiebung. Die Lapse-Funktion misst gerade diejenige Zeit, die für den lokalen Beobachter - FIDO genannt - vergangen ist, wenn für den unendlich entfernten Außenbeobachter gerade eine Einheit seiner 'universellen' Zeit vergangen ist.

Auf einer Hyperfläche selbst vermittelt der **Shift-Vektor** (β) eine Verschiebung im 3D-Raum innerhalb einer Hyperfläche. Es handelt sich um eine Verschiebung des räumlichen

Koordinatengitters gegenüber dem des FIDOs. Der Begriff *Shift-Vektor* geht auf den Relativisten *John A. Wheeler* zurück (1964). Im Frame-Dragging-Effekt der Kerr-Metrik wird diese Verschiebung anschaulich klar. Das 3D-Koordinatengitter in Boyer-Lindquist-Koordinaten wandert im 3+1 Split der Kerr-Geometrie entlang der azimuthalen Richtung: der Raum selbst wird um die Rotationsachse des sich drehenden Schwarzen Loches gedreht.

2.4.4 Vorteil: Studie dynamischer Prozesse in der ART

Lapse, Shift und 3-Metrik sind alle zeitunabhängig und legen dann eindeutig eine neue Formulierung der Metrik im 3+1 Split fest! Auf diese Art und Weise hat man sich eine **globale Zeit** konstruiert, kann zeitabhängige Prozesse allgemein relativistisch beschreiben und numerisch studieren. Entsprechend kann man bei der Untersuchung magnetohydrodynamischer Prozesse einen 3+1 Split des Maxwell-Tensors vornehmen, der dabei in elektrisches und magnetisches Feld zerfällt. Aber auch in der allgemein relativistischen Hydrodynamik muss der 3+1 Split verwendet werden.

Eine Verallgemeinerung des soeben beschriebenen In-Scheiben-Schneidens der Raumzeit, des *ADM-Slicings*, gelingt in der Loop-Quantengravitation, einer Quantengravitation, die ihre fundamentalen Quanten in Loops bzw. in neuerer Formulierung in Spin-Netzwerken sieht. Ihre Zeitentwicklung bildet den Spinschaum auf der Planck-Skala. Slicing des Spinschaums liefert gerade Momentaufnahmen von Spin-Netzwerken.

2.5 AdS/CFT-Korrespondenz

Die AdS/CFT-Korrespondenz, AdS-CFT-Dualität oder Maldacena-Dualität gehört zu den wichtigsten Entdeckungen in der theoretischen Physik in den 1990er Jahren. Sehr salopp umschrieben handelt es sich um eine Art Verwandtschaft zwischen der Gravitation und Theorien für Teilchenphysik. Um konkreter zu erklären, was gemeint ist, müssen zunächst einige Begrifflichkeiten und Grundlagen geklärt werden.

2.5.1 Was ist AdS?

AdS ist die Abkürzung für **Anti-de-Sitter** und meint eine gekrümmte Raumzeit, die mit dem de-Sitter-Kosmos zusammenhängt. Diese Raumzeit ist durchsetzt von einer Energieform, die als kosmologische Konstante Λ bezeichnet wird. *Albert Einstein* hat diese Größe 1917 erfunden, um mit seiner Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) Fragen der Kosmologie zu lösen.

Das 'Anti' bedeutet, dass die Raumzeit von einer kosmologischen Konstante mit *negativem* Vorzeichen gekrümmt wird. In der AdS/CFT-Korrespondenz geht es aber nicht um vierdimensionale Raumzeiten wie in der ART, sondern um eine **fünfdimensionale** Anti-de-Sitter-Raumzeit. Diese wird abgekürzt mit AdS_5 . Auf dieser gekrümmten 5D-Raumzeit wird nun eine Stringtheorie aufgebaut, d. h. AdS_5 fungiert als Hintergrundmetrik einer Theorie für Elementarteilchen. Es ist eine Stringtheorie, die die Gravitation berücksichtigt.

An dieser Stelle sollten Sie als Leser stutzig werden und einwenden: '*Moment, die Stringtheorien sind doch zehndimensional - wo sind die anderen fünf Dimensionen in dieser Betrachtung geblieben?*' Völlig richtig! Die verbleibenden fünf Dimensionen sind auf einer kompakten Mannigfaltigkeit kompaktifiziert. So kann man die Stringtheorie Typ IIB auf dem Produkt der Räume $\text{AdS}_5 \times S^5$ bewerkstelligen, wobei S^5 die kompakte 5D-Sphäre ist.

2.5.2 Was ist CFT?

CFT steht für **C**onformal **F**ield **T**heory, also übersetzt konforme Feldtheorie. Eine Feldtheorie beschreibt Kräfte in der Natur entweder klassisch (wie bei der ART oder bei der Maxwell'schen Elektrodynamik) oder quantisiert (siehe Quantenfeldtheorie).

Das Attribut 'konform' bedeutet, dass eine bestimmte Symmetrie bei dieser Feldtheorie vorliegt, nämlich die *konforme Symmetrie*. Was das genau bedeutet, ist nur mit einigen Kenntnissen der Gruppentheorie zu verstehen. Im Folgenden wird versucht, die konforme Symmetrie zu erklären: Mathematisch assoziiert man Symmetrien mit Gruppen. In diesem Fall betrachten wir also die konforme Gruppe. Sie setzt sich aus verschiedenen Transformationen (**Generatoren**) zusammen, die gerade die Gruppeneigenschaften erfüllen. Im Falle der konformen Gruppe sind das die Generatoren der Poincarègruppe (d. h. die Lorentz-Generatoren, die zur Lorentzgruppe gehören, plus Translationen), der Generator für Dilatationen sowie spezielle konforme Transformation. Dilatationen sind Transformationen, die die Längen- oder Energieskala verändern. Die zugehörige Symmetrie heißt **Skaleninvarianz**. Eine skaleninvariante Theorie hängt demnach nicht von der Längen- oder Energieskala ab.

Ein Beispiel für eine konforme Feldtheorie ist die vierdimensionale, supersymmetrische Yang-Mills-Theorie, die die starke Kraft beschreibt und die die Supersymmetrie beinhaltet.

2.5.3 Entdecker und Mitbegründer

Juan M. Maldacena, damals an der Harvard University in Cambridge (USA), veröffentlichte 1997 eine wissenschaftliche Arbeit, die in der Fachwelt für viel Aufsehen und Inspiration gesorgt hat. Er entdeckte die AdS/CFT-Korrespondenz, die in der Folgezeit klarer ausgearbeitet wurde, u. a. von dem bekannten Stringtheoretiker *Edward Witten*.

2.5.4 Was ist eine Korrespondenz zwischen AdS und CFT?

Diese Korrespondenz besteht zwischen der Supergravitation oder einer Stringtheorie (Typ IIB) auf einer 5D Anti-de-Sitter-Raumzeit **mit** Gravitation und einer 4D konformen Feldtheorie **ohne** Gravitation. Man sagt auch, die Feldtheorie operiere nur auf dem 4D Rand der 5D AdS-Raumzeit. Wie muss man sich das vorstellen?

Nun, die 5D-Strings vermögen eine Reihe der Eigenschaften der 4D-Yang-Mills-Theorie zu beschreiben. Die Yang-Mills-Theorie ist gerade ein mathematisches Konzept für die starke Kraft. Mathematisch lassen sich nun aus Rechnungen mit Strings in 5D Eigenschaften der 4D-Welt ableiten, die mit der Quantenchromodynamik zusammenhängen. Diese verblüffende Analogie legt eine tief sinnige Einsicht in die Gravitation und Teilchenphysik frei.

2.5.5 Dualität mit viel allgemeinerem Charakter

Es ist sogar in der weiteren Erforschung der Korrespondenz gelungen, die Dualität auch für andere Raumzeiten als AdS zu verallgemeinern. Ähnlich ist es bei den Feldtheorien, die letztlich Eichtheorien sind. In der Verallgemeinerung sprechen die Theoretiker daher von einer **fundamentalen Dualität von Eichung und Gravitation** (engl. *gauge/gravity dual*, *gauge/string duality*). Dualität meint in diesem Zusammenhang, dass es zwei gleichwertige Beschreibungen der Natur gibt - sozusagen zwei Seiten einer Medaille.

AdS/CFT ist eine konkrete Realisierung des **holographischen Prinzips** (siehe auch Hologstern), das 't Hooft und Süsskind 1993/94 entdeckt haben.

AdS/CFT ist zwar eine **unbewiesene Vermutung**, wurde aber in einigen konkreten Fällen getestet, bei denen **Übereinstimmung** gefunden wurde!

2.5.6 wissenschaftliche Papiere und Links

- ◇ *Maldacena, Juan M.*: The Large N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity, hep-th/9711200
- ◇ *Witten, Edward*: Anti De Sitter Space And Holography, hep-th/9802150
- ◇ Website von Juan M. Maldacena (Princeton, USA)

2.6 AGB-Stern

AGB-Stern kennzeichnet einen Stern, der eine bestimmte Entwicklungsphase im Hertzsprung-Russell-Diagramm durchläuft: er befindet sich auf dem **asymptotischen Riesenast** (engl. *asymptotic giant branch*, kurz **AGB**). Der Stern ist in der AGB-Phase stark aufgebläht zu einem Roten Riesen. AGB-Sterne erzeugen in s-Prozessen Elemente, die *schwerer* sind als Eisen. Damit sind diese Sterne wichtig für die Anreicherung des interstellaren Mediums mit Metallen. Genauer und im Zusammenhang wird die AGB-Phase unter dem Eintrag Sonne beschrieben.

2.7 Äquivalenzprinzip

Das Äquivalenzprinzip ist das wichtigste Prinzip, auf dem *Albert Einsteins* Allgemeine Relativitätstheorie (ART) beruht. Andere wichtige Prinzipien der ART sind das Machsche Prinzip, das Kovarianzprinzip, das Korrespondenzprinzip und das Prinzip minimaler gravitativer Kopplung.

2.7.1 Kernaussage dieses Prinzips

In seiner knappen Formulierung besagt das Äquivalenzprinzip:

Schwere Masse und träge Masse sind gleichwertig.

Das bedeutet, dass es für einen Beobachter in einem abgeschlossenen Kasten nicht möglich ist zu unterscheiden, ob der Kasten auf der Oberfläche einer Masse in dessen Gravitationsfeld steht oder ob er gleichmäßig durch eine konstant wirkende Kraft ohne Gravitationsfeld im freien Raum beschleunigt wird. Diese beiden Fälle werden in der Abbildung 2.3 veranschaulicht: Wie man sieht, wirkt die Beschleunigung durch die Gravitation links genau entgegengesetzt zur Beschleunigung rechts; Testmassen innerhalb des Kastens - hier eine Kugel - zeigen dennoch in beiden Fällen das gleiche Verhalten und werden durch die gleiche Kraft (grüner Pfeil) nach unten gezogen.

Eine etwas andere Formulierung des Äquivalenzprinzips ist, dass man durch lokale Experimente nicht entscheiden kann, ob sich ein System im freien Fall in einer gekrümmten Raumzeit befindet oder ob es kräftefrei eine gleichförmig geradlinige Bewegung in flacher

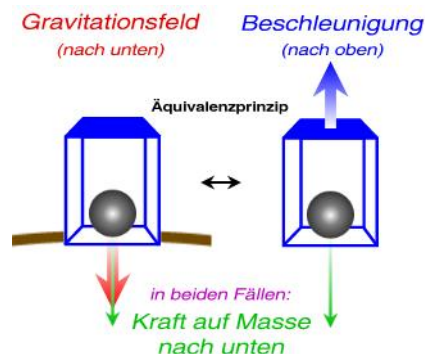


Abbildung 2.3: Kernaussage des Äquivalenzprinzips anschaulich.

Raumzeit ausführt. Beide Systeme führen zu äquivalenten Beobachtungsphänomenen. Diese Eigenschaft heißt **lokale Lorentzinvarianz**: Man kann in der ART immer ein lokales Lorentzsystem konstruieren.

Bisweilen unterscheidet man die schwere Masse in *passive schwere Masse*, wenn ein Körper passiv in einem Gravitationsfeld fällt und in *aktive schwere Masse*, wenn ein Körper aktiv ein Gravitationsfeld erzeugt.

2.7.2 Historische Wegbereiter des Einsteinschen Äquivalenzprinzips

Galilei

Die berühmten **Fall-Experimente Galileo Galileis** (1564 - 1642) am Schiefen Turm von Pisa belegten, dass verschiedene Körper im freien Fall die gleiche Beschleunigung erfahren, also zum gleichen Zeitpunkt am Boden ankommen, *unabhängig von ihrer Masse und Zusammensetzung*. Diese Beobachtung Galileis wird als **schwaches Äquivalenzprinzip** bezeichnet. Gegensätzliche Beobachtungen sind meist die Folge des Luftwiderstandes und können in evakuierten Fallanordnungen eliminiert werden.

Eötvös

Im Jahr 1891 entwarf der ungarische Naturwissenschaftler *Loránd Eötvös* (1848 - 1919) - der übrigens auch in Heidelberg studierte - das erste **Drehwaagen-Experiment**. Mit dieser Anordnung konnte er die Gravitationskonstante G mit einer erstaunlichen Genauigkeit ermitteln. Das Messprinzip beruht darauf, dass zwei Massen unterschiedlicher Dichte starr miteinander durch einen Stab bekannter Länge verbunden sind und dieses hantelförmige Gebilde an einem Draht aufgehängt wird. Durch die Wirkung äußerer Gravitationskräfte werden die Massen aufgrund verschiedener Dichten unterschiedlich stark ausgelenkt: der Draht wird durch ein Drehmoment verdrillt (*Torsion*). Rückstellkräfte im Draht versuchen nun diesem Einfluss entgegenzuwirken, und es entsteht eine *Torsionsschwingung*. Die Methode ist dynamisch, weil sich die Massen zwischen massiven Wänden bewegen.

Mit diesem experimentellen Aufbau kann der Experimentator entweder bei sehr exakt bekannten Massen die Gravitationskonstante ermitteln, was von Interesse für die Physik ist, oder er kann unter Zugrundelegung der Gravitationskonstante das irdische Gravitationsfeld vermessen, was Eötvös im Dienste der Geologie anwandte.

2.7.3 Hochpräzision in experimenteller Physik

Die Drehwaagen erlaubten schon damals im 19. Jahrhundert, die Äquivalenz von schwerer und träger Masse bis auf eine Genauigkeit von $1:10^8$ genau zu ermitteln. Mittlerweile wurde das Experiment mittels Laser verfeinert (**EötWash**-Experiment) und die Genauigkeit gehört zu den präzisesten Messungen der Physik: träge und schwere Masse sind bis auf $1:10^{13}$ genau gleich!

2.7.4 Ein Pendel genauer betrachtet

Die Äquivalenz von schwerer und träger Masse setzt man übrigens stillschweigend beim Lösen der Pendelgleichung in der Mechanik voraus. Denn hier kürzt man die Masse des Schwingers heraus: auf der einen Seite der Gleichung seine *schwere* Masse, auf der anderen Seite seine *träge* Masse. Umgekehrt kann man gerade aus exakten Messungen in solchen Pendelexperimenten auf die Äquivalenz der Massen schließen.

2.7.5 Bedeutung des Äquivalenzprinzips

Die Unabhängigkeit von der Masse beim Fall von Testkörpern im Gravitationsfeld ist bereits ein Hinweis darauf, dass Gravitation eine **geometrische Eigenschaft** ist. Denn gemäß der ART ist Gravitation eine **gekrümmte Raumzeit**, in der sich Licht und Materieteilchen auf Geodäten bewegen!

Einstein nutzte das Äquivalenzprinzip aus, um seine Spezielle Relativitätstheorie auf beschleunigte Bezugssysteme zu verallgemeinern. Am Ende dieser Jahre dauernden, theoretischen Ausarbeitungen stand die Allgemeine Relativitätstheorie, eine (unquantisierte) Gravitationstheorie, die sehr erfolgreich unzählige Phänomene, die mit der Gravitation zusammenhängen, beschreibt.

Das Äquivalenzprinzip führt auch zu der Äquivalenz von Hawking-Effekt (im Gravitationsfeld Schwarzer Löcher) und Unruh-Effekt (im Vakuum).

2.8 Akkretion

Akkretion bezeichnet den Prozess, bei dem Materie von einem kosmischen Objekt aufgesammelt wird. Der Begriff stammt aus dem Lateinischen *accretio*, dt. 'Anwachsen', 'Zunahme'. Das aufsammelnde Zentralobjekt wird *Akkretor* oder gravitierendes Objekt genannt. Es kann sich dabei z. B. um einen gewöhnlichen Stern handeln. Besonders junge Sterne wie die Protosterne sind bekannt dafür, dass sie von der Materiewolke, aus der sie entstanden sind, Material aufsammeln. Eine andere prominente und wichtige Gruppe von Akkretoren sind die kompakten Objekte. Dazu zählen die Weißen Zwerge, Neutronensterne, stellare Schwarze Löcher und supermassereiche Schwarze Löcher.

Den Materiestrom nennt man in der Akkretionsphysik den **Akkretionsfluss**. Der Name *Akkretionsfluss* ist gerechtfertigt durch die Tatsache, dass die Materieströmung fließt wie eine Flüssigkeit. Die Wechselwirkung der Teilchen im Materiestrom ist paarweise und verleiht dem Akkretionsfluss die typischen Fließeigenschaften eines Fluidums.

2.8.1 Ursachen der Akkretion

Letztendlich ist Akkretion darauf zurückzuführen, dass ein kosmisches Objekt mit seiner Umgebung wechselwirkt. Die Umgebung des Akkretors ist nicht leer, sondern angefüllt mit Material wie dem interstellaren Medium (ISM). Der Akkretor ist massiv (im Sinne von massebehaftet) und besitzt daher ein Gravitationsfeld, das andere Objekte in der Nähe anzuziehen vermag (Dies ist die 'Newtonsche Sprache'. In der Sprache von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie krümmt eine Masse die Raumzeit so sehr, dass die zeitartigen Geodäten am Akkretor enden. Akkretion ist somit eine geometrische Konsequenz.). Die **Gravitation** ist also die Ursache dafür, dass sich ein Akkretionsfluss ausbildet.

2.8.2 Vorsicht: Hier saugt keiner!

Es sei an dieser Stelle auf einen kleinen sprachlichen Aspekt zur Akkretion erläutert: Häufig liest man davon, dass die Akkretoren, insbesondere Schwarze Löcher, die Materie 'ansaugen', 'aufsaugen' oder 'einsaugen'. Diese Bezeichnungen sind nicht ganz korrekt: Saugen hat immer etwas mit einem Unterdruck zu tun (z. B. beim Staubsauger). Ein Unterdruck ist aber **nicht** die Ursache dafür, dass die Materie vom Loch aufgesammelt wird. Man kann allenfalls von Gravitationsdrücken sprechen. Ein Druck ist in der Physik eine Kraft auf eine Fläche, z. B. einer Masse auf eine Unterlage. Deshalb bietet sich an, von Gravitationskräften oder äquivalent Gravitationsdrücken zu sprechen.

2.8.3 Die effizienteste Strahlungsquelle im Kosmos!

Mit der Akkretion sind eine Reihe von **Strahlungsprozesse** verbunden: Das Material im Akkretionsfluss wird durch Reibungseffekte heiß und strahlt deshalb thermisch (Wärmestrahlung, Planckscher Strahler). In einem weniger dichten Akkretionsfluss wird Bremsstrahlung relevant. Sie entsteht dann, wenn elektrisch geladene Teilchen in einem elektromagnetischen Feld abgelenkt oder sogar gestoppt werden. Auch nichtthermische Strahlungsformen wie die Zyklotronstrahlung und die Synchrotronstrahlung spielen eine Rolle, wenn starke Magnetfelder und schnelle Elektronen (seltener auch von Protonen) im akkretierten Material vorkommen. Strahlung wechselwirkt mit Materie durch Streuung, Absorption und Emission. Allgemein sprechen Astronomen vom **Strahlungstransport**. In sehr heißen Materiereservoirs wird die Comptonisierung von niederenergetischer Strahlung wesentlich. Das erklärt die harten Spektren bis in den Bereich einiger 100 keV.

Ob und wie ausgeprägt die genannten Strahlungsprozesse vorkommen ist eine Frage des Akkretors: Generell kann man sagen, dass die Akkretionsflüsse bei kompakten Objekten sehr heiß und schnell werden. Deshalb wird das akkretierte Material ionisiert und in die Ladungsträger Ionen und Elektronen getrennt. Das involviert im Prinzip alle genannten Strahlungsformen. Bei weniger kompakten Objekten hingegen (normalen Sternen, Protosternen) ist der Akkretionsfluss kalt und langsam. Daher spielt hier die Atom- und Molekülphysik eine große Rolle.

Akkretion ist der **effizienteste Prozess**, um Gravitationsenergie in Strahlungsenergie umzuwandeln. Sie ist sogar effizienter als das nukleare Feuer in Sternen! Denn bis zu 42% der Ruheenergie der Materie kann bei der Akkretion in Strahlungsenergie verwandelt werden (rechnerische Details unter Eddington-Leuchtkraft). Demgegenüber weist die thermonukleare Fusion im Innern von Sternen nur eine Effizienz von 0.7% auf. Akkretion auf ein kompaktes Objekt erzeugt deshalb die größten bekannten Leuchtkräfte im Universum!

Spricht man von den hellsten Objekten im Kosmos, so bezieht man sich auf zwei Objektklassen:

- ◇ Die Gamma Ray Bursts (GRBs) und die Aktiven Galaktischen Kerne (AGN). GRBs sind Strahlungsausbrüche im höchsten Energiebereich elektromagnetischer Wellen. Strahlungsenergien liegen im Bereich von einigen 10 keV bis GeV. GRBs sind mit der Bildung eines stellaren Schwarzen Loches verbunden, das Materie des/der Vorläufersterns/-sterne akkretiert. Dabei treibt es einen hochrelativistischen Jet an, der sehr große Lorentz-Faktoren von 100 bis 1000 aufweist! Ein Lorentzfaktor von 1000 entspricht 99.99995% der Vakuumlichtgeschwindigkeit. Der Burst ist eine Folge davon, dass der Plasmastrom mit der Umgebung wechselwirkt und Synchrotronstrahlung im Bereich der Gammastrahlung erzeugt. In diesem **anisotropen Feuerball-Szenario** (*Meszaros & Rees 1997*) verlangsamt sich der Jet und erzeugt dann entsprechend niederenergetische Strahlung, das so genannte Nachleuchten des GRB (engl. *GRB afterglow*). Typische Leuchtkräfte eines GRBs liegen bei 10^{19} Sonnenleuchtkräften.
- ◇ Akkretion auf ein supermassereiches Schwarzes Loch ist gerade der 'Motor', der die hohe Leuchtkraft der AGN erzeugt. Dieses AGN-Paradigma geht auf eine Idee von *Yakov Borisovich Zel'dovich, Igor Dmitrievich Novikov* und *Edwin E. Salpeter* aus dem Jahre 1964 zurück und wurde in den Siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts etabliert. In diesen Akkretionsflüssen spielen alle genannten Strahlungsprozesse eine Rolle, haben jedoch von Quelle zu Quelle unterschiedliche Ausprägung. In vielen AGN kommt es auch zur Erzeugung von Jets, die auch relativistisch sind, aber nicht so sehr wie die GRB-Jets. Dafür übertreffen die AGN-Jets die GRB-Jets in der Größe, denn es sind Makro-Jets, die sogar in der Ausdehnung ihre Heimatgalaxie überschreiten können (kpc bis Mpc Skala)! Leuchtkräftige AGN erreichen bis zu 10^{14} Sonnenleuchtkräfte.

2.8.4 Staubtorus & Cooling Flows

Ganz allgemein gesprochen existieren in AGN ganz unterschiedliche Strukturen des Akkretionsflusses. Welche Gestalt der Akkretionsfluss hat, hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Nähert man sich von außen dem zentralen, supermassereichen Schwarzen Loch, so kann man unterschiedliche Formen von Akkretionsflüssen charakterisieren: Weit außen, bei einigen 10^4 Gravitationsradien bzw. auf der Parsec-Skala befindet sich vermutlich ein ausgedehnter Staubtorus. In vielen Quellen finden die Astronomen Hinweise auf dieses gigantische Materiereservoir, das über einen Orientierungseffekt für die **Zweiteilung der AGN in zwei Klassen, AGN Typ 1 und 2**, sorgt (Fachbegriff *Dichotomie*). Der Staubtorus hat je nach AGN-Typus und Wirtsgalaxie des AGN typische Massen von etwa 10^8 Sonnenmassen.

Neben dem Staubtors gibt es noch Materieströme, die aus größerer Entfernung auf das Zentrum der Galaxie einströmen. Sie heißen *cooling flows*. Die Umgebung einer Galaxie ist nicht leer, sondern sie sind eingebettet in das intergalaktische Medium (IGM). Insbesondere bei Galaxien, die in Galaxienhaufen eingebettet sind - den Haufengalaxien - gibt es das **Intraclustergas**, also fein verteilte Materie und Staub, die sich zwischen den einzelnen Galaxien des Haufens befinden. Feldgalaxien sind hingegen nicht eingebettet in einen Galaxienhaufen. Dennoch findet sich in ihrer Nähe ebenfalls Materie, das **Interclustergas**. Beide Gasformen kommen von den ersten Generationen von Sternen, z. B. der Population III. Das Umgebungsgas kann nun auf eine Galaxie stürzen, wenn sie die Gravitationskräfte

aus dem Zentrum der Galaxie 'spürt'. Die Wechselwirkungen können auch zu 'galaktischen Ausflüssen' führen. Nun ist der Oberbegriff dieser Ströme ist *cooling flows*.

2.8.5 Die Akkretionsscheibe

Staubtorus und *cooling flows* sind die Massereservoirs, die die galaktische Scheibe und das zentrale supermassereiche Schwarze Loch 'füttern'. Innerhalb des Staubtorus gibt es eine kleine Materielücke, dann schließt sich nach innen eine Gasscheibe an. Woher kommt die Scheibengestalt? Materie besitzt im Allgemeinen Drehimpuls ('sie rotiert'), daher sammelt sie sich in einem abgeflachten Gebilde an, der **Akkretionsscheibe**. Neben der Rotation sind auch Strahlungsprozesse für diese Scheibengeometrie verantwortlich. Bei der Standardscheibe, einem wohl definierten Akkretionsfluss, ist Strahlung sehr effizient, um die akkretierte Materie zu kühlen. Das ist ein weiterer Grund für den vertikalen Kollaps des Akkretionsflusses. 1973 wurde die Standardscheibe als Akkretionslösung von *Nikolai Shakura* und *Rashid Sunyaev* entdeckt. Sie heißt in Fachkreisen auch **SSD** für *Shakura-Sunyaev Disk*. Dieses nichtrelativistische Modell wurde kurze Zeit später *Igor Novikov* und *Kip S. Thorne* relativistisch verallgemeinert. Von AGN zu AGN variiert der Innenrand der Standardscheibe und reicht einige zehn bis hundert Gravitationsradien an das zentrale Loch heran.

2.8.6 Akkretion unmittelbar vor dem Schwarzen Loch

Spätestens bei der marginal stabilen Bahn, also wenige Gravitationsradien vor dem Ereignishorizont des Schwarzen Loches, wird die Scheibe abgeschnitten. Hier bricht die stabile Kepler-Rotation zusammen, denn so nahe am Akkretor sind keine stabilen, gebunden Bahnen mehr möglich. Jetzt heißt es: reinfallen oder rausfliegen. Für ein maximal rotierendes Schwarzes Loch von 100 Mio. Sonnenmassen im Zentrum des AGN liegt die marginal stabile Bahn beim Ereignishorizont, bei etwa 150 Mio. Kilometern oder einer Astronomischen Einheit (dem mittleren Abstand von Erde und Sonne).

Weiter innen bewegt sich der Akkretionsfluss instabil, z. B. im freien Fall. Diese Bewegungen heißen *geodätisch*. Es kann sich dort aber auch eine andere Akkretionslösung ausbilden, für die es verschiedene Vorschläge gibt. Die prominenteste heißt ADAF: Ineffiziente Strahlungskühlung bewirkt eine starke Aufheizung des Materials im Akkretionsstrom. Als Konsequenz bläht sich der Akkretionsfluss auf und *evaporiert* an den Berandungszonen. Es bildet sich ein **advektionsdominierter** Akkretionsfluss aus, der mit dem Akronym ADAF (*advection-dominated accretion flow*) bezeichnet wird. Die Gestalt dieser akkretierten Materie ist eher kugelförmig (*sphäroid*) um das akkretierende Zentralobjekt. Eine mögliche Geometrie ist, dass die Standardscheibe von außen in den ADAF übergeht (*SSD-ADAF transition*). Der Übergangsradius kann bei unterschiedlichen Radien liegen. So legen viele Quellen nahe, dass der ADAF deutlich ausgedehnter ist und bis einigen 100 Gravitationsradien reichen kann (das hängt von der Akkretionsrate ab, wie in einem Absatz unten erläutert wird).

2.8.7 Weitere Akkretionsflüsse

Eine Alternative zum SSD-ADAF-Szenario heißt **TDAT**, was für *truncated disk - advective tori*, also trunkeerte (abgeschnittene) Scheiben - advective Tori, steht. Das TDAT-Modell (*Hujeirat & Camenzind* 2000) ist dadurch charakterisiert, dass eine flache Akkretionsscheibe bereits bei deutlich größeren Radien als der marginal stabilen Bahn endet. Innen schließt sich ein heißer, advektionsdominierter Torus an.

Es wurden viele advektionsdominierte Modelle in den letzten Jahren vorgeschlagen. So kennt man Modelle wie die **ADIOS** (engl. *advection-dominated inflow/outflow solutions*), wo auch signifikante Ausflüsse (Winde) berücksichtigt werden. Beim **CDAF** (engl. *convection-dominated accretion flow*) spielt die Konvektion des akkretierten Plasmas eine wichtige Rolle. Die wesentlichen und zentralen analytischen Lösungen der Akkretionsphysik sind nach wie vor SSD und ADAF.

Schließen wir nun die Reise der Materie aus den Außenbereichen in das zentrale Schwarze Loch ab: Kurz vor dem Ereignishorizont fällt schließlich die Materie im **freien Fall** fast mit Lichtgeschwindigkeit ins Schwarze Loch. Diese Bewegungen im freien Fall heißen geodätisch - es wirken keine weiteren Kräfte als die Gravitation. Man kann in der Theorie Schwarzer Löcher mit den Mitteln der Allgemeinen Relativitätstheorie *Albert Einsteins* zeigen, dass in radialer Richtung die Materie **immer** mit exakt der Vakuumlichtgeschwindigkeit c den Ereignishorizont passiert (z. B. ist die Rechnung im Papier von mir und *Max Camenzind* enthalten, A&A 413, 861, 2004; ePrint: astro-ph/0309832

2.8.8 Die Korona: Heißes Gas als Quelle hochenergetischer Strahlung

Der heiße Akkretionsfluss in der unmittelbaren Umgebung des Schwarzen Loches ist ein guter Kandidat für die Korona - die nicht mit der Sonnenkorona verwechselt werden sollte. Korona meint in der Akkretionsphysik eine heiße, dynamische Plasmablase, die irgendwo in der Nähe des Loches existiert. Die Astronomen weisen sie mittels harter Röntgenspektren nach, jedoch ist sie nicht bei allen Schwarzen Löchern gleichermaßen ausgeprägt. Die räumliche Nähe von kalter Materie in der Standardscheibe und sehr heißer, koronaler Materie begünstigt die Entstehung charakteristischer **Fluoreszenzlinien**. Dazu gehört die prominente Eisenlinie im Bereich der Röntgenstrahlung. Röntgenastronomen finden, dass diese starke Fluoreszenzlinie besonders von Eisen abgestrahlt wird, weil dieses Element im interstellaren Medium recht häufig vorkommt und weil der Übergang bei Eisen sehr effizient ist. Die Linie liegt für neutrales Eisen (FeI) bei einer Ruheenergie von 6.4 keV. Es gibt allerdings einen ganzen Zoo von Fluoreszenzlinien, deren Stärke und Ruheenergie vom Ionisierungsgrad und vom jeweiligen Element abhängen (*Kaastra & Mewe 1993*). Die Anzahl der Elektronen in den Atomschalen beeinflusst entscheidend, welche Eisenlinie angeregt wird. Die Eisen-K-Linien sind wichtige diagnostische Werkzeuge in der Analyse von Systemen aus Schwarzen Loch und Akkretionsfluss. Denn sie entstehen in so großer Nähe zum Loch, dass allgemein relativistische Effekte das Linienprofil beeinflussen. Die Korona liefert die 'Zündstrahlung' für Fluoreszenzlinien. Jedoch ist die **Geometrie der Korona** nicht vollständig geklärt und Gegenstand aktueller Forschung. Vermutlich hängt die Gestalt von der Fütterungsrate auf das Loch ab. Die Korona hat eine besondere Bedeutung bei der **Comptonisierung**, wo weiche Strahlung der Umgebung (z. B. kosmische Hintergrundstrahlung oder Schwarzkörperstrahlung der kalten Standardscheibe) durch inverse Compton-Streuung zu hochenergetischer Strahlung umgewandelt wird. Das charakteristische Comptonisierungskontinuum mit exponentiellem Abfall (engl. *exponential cutoff*) beobachtet man bei zahlreichen Quellen im Bereich der Röntgenstrahlung (Strahlungsenergie bei wenigen bis etwa hundert keV). Das ist das bereits angesprochene harte Spektrum der AGN.

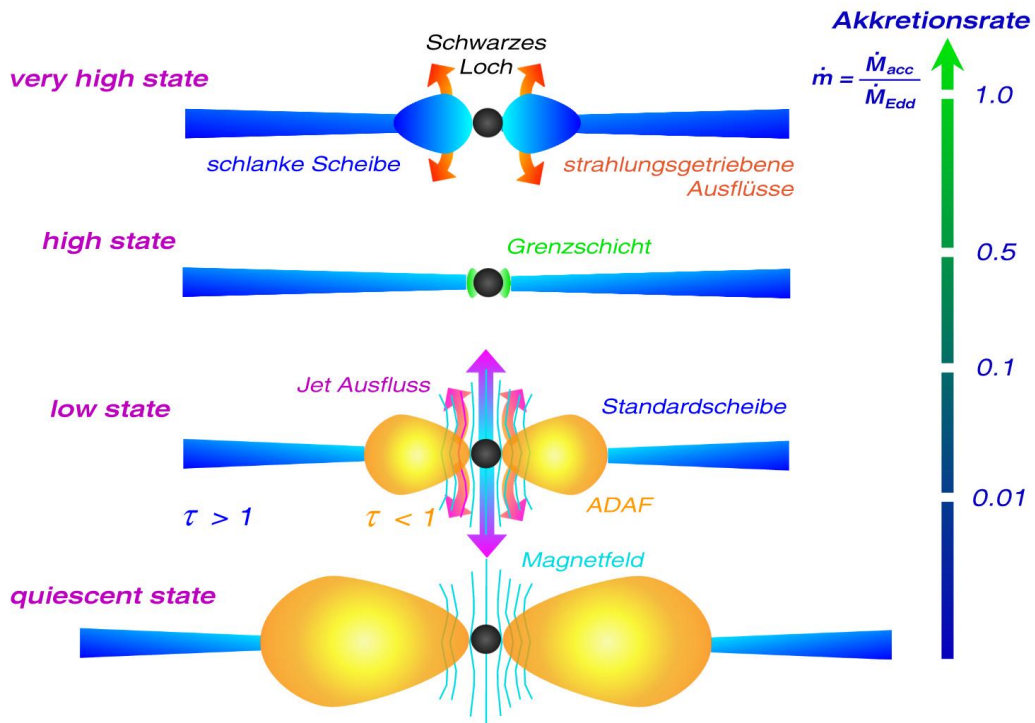


Abbildung 2.4: Vereinheitlichtes Schema der Akkretionsphysik.

2.8.9 Vereinheitlichte Akkretion

Die Akkretionsphysik in unmittelbarer Nähe zu einem Schwarzen Loch ist bei stellaren und supermassereichen Schwarzen Löchern gut vergleichbar, weil die Masse des Schwarzen Loches bei vielen Betrachtungen herauskaliert. Allerdings weichen andere Parameter ab, so beispielsweise die Akkretionsrate oder die Stärke vorhandener Magnetfelder. Die Röntgendoppelsterne mit stellarem Loch besitzen zwar keine Staubtori wie die AGN. Das Materiereservoir ist deutlich kleiner und ist in der Regel ein Begleitstern, der entweder sein Roche-Volumen überschreitet oder einen so starken Teilchenwind abgibt, dass dieser akkretiert werden kann (Wind-Akkretion). Wie die Materie aus dem Materiereservoir nach innen einfällt, ist jedoch durchaus vergleichbar: Sowohl bei den AGN, als auch bei den Röntgendoppelsternen bilden sich SSD und ADAF aus. Bezogen auf konkrete Quellen kann man das salopp so formulieren, dass die Akkretionsphysik eines Quasars derjenigen von Mikroquasaren ähnelt.

Aus den Beobachtungen und Vergleichen von Röntgendoppelsternen, in denen man als eine Komponente ein Schwarzes Loch vermutet (so genannten *black hole X-ray binaries*, **BHXBs**) erwuchs die Idee, die recht unterschiedlichen Quellen in einem vereinheitlichendem Schema zu beschreiben (*Esin* 1997). Das Resultat ist das **vereinheitlichte Akkretionsschema** (engl. *accretion unification scheme*). Die wesentliche Aussage ist, dass im Prinzip nur die **Akkretionsrate**, also der Materiezustrom auf den Akkretor pro Zeit, über die Gestalt des Akkretionsflusses und die daraus resultierenden Spektren entscheidet. Dies wird aus Abbildung 2.4 unmittelbar ersichtlich, die Querschnitte durch Akkretionsflüsse auf ein Schwarzes Loch (schwarz ausgefüllter Kreis in der Bildmitte) illustriert:

Am rechten Bildrand wird die Akkretionsrate in Einheiten der so genannten Eddington-Akkretionsrate dargestellt. Links sind die Zustände der Quellen in der spektroskopischen Nomenklatur genannt (*quiescent*, *low high*, *very high*). Historisch sind die Astronomen so vorgegangen, dass sie eine Reihe sehr unterschiedlicher Spektren von Röntgendoppelsternen beobachtet haben - manchmal sogar nach gewisser Zeit bei ein und derselben Quelle. Manche wie Cyg X-1 schienen zyklisch zwischen zwei Zuständen (*high* und Sgr A* blieben immer im gleichen leuchtschwachen Zustand (*quiescent*).

Die Theoretiker versuchten das zu modellieren und zu verstehen. Das Schema zeigt, dass sich abhängig von der Akkretionsrate offenbar unterschiedliche Akkretionslösungen ausbilden. Häufig anzutreffen ist die Standardscheibe (blau dargestellt) - mehr oder weniger unabhängig von der Akkretionsrate. Der ADAF (gelb) hingegen kommt nur bei kleinen Akkretionsraten unterhalb von 10% der Eddington-Akkretionsrate vor. Gerichtete, signifikante Materieausflüsse in Form von Jets (violette Pfeile) entstehen laut Schema vorzugsweise bei etwa 5% der Eddington-Akkretionsrate. Doch diese Aussage ist mit einer großen Unsicherheit behaftet. Entsprechend der Strukturen des Akkretionsflusses werden typische Spektren erzeugt, die mit den Bezeichnungen *quiescent*, *low*, *high* und *very high* versehen wurden.

Neben der Akkretionsrate spielen vermutlich nur wenige Parameter eine Rolle, um Akkretionsflüsse von Schwarzen Löchern einheitlich beschreiben zu können. Ein Vorschlag für einen Parametersatz ist (*Camenzind 2002*):

- ◇ Masse des Schwarzen Loches
- ◇ Rotationsparameter des Loches
- ◇ Akkretionsrate (wie vorweggenommen)
- ◇ Neigung der Akkretionsscheibe
- ◇ Masse des Materiereservoirs (z. B. des Staubtorus)
- ◇ Stärke der umgebenden Magnetfelder ('Saat-Felder')

Das unifizierte Bild der Akkretion ist noch nicht etabliert und Gegenstand der aktuellen Forschung der Akkretionsphysik. Nichtsdestotrotz ist es ein reizvoller Vorschlag, um die Vielfalt der Quellen in ein gemeinsames, globales Schema einzuordnen. Für Einzelheiten dieser Thematik verweise ich auf meine Dissertation (S.71f), die am Ende dieses Eintrags heruntergeladen werden kann.

2.8.10 Ohne Einfall, kein Ausstoß - Verbindung von Akkretion und Jet

Besonders wichtig ist in der Astrophysik der Zusammenhang von Akkretion und den Jets. Jets sind Materieausflüsse, die in einer **sympiotischen Beziehung** zur Akkretion stehen (*Falcke & Biermann 1994*). Kein Jet entsteht ohne Akkretion! Ein geringer Anteil der akkretierten Materie kann nämlich, dem Bereich des Akkretors entkommen und ausfließen. Vereinfacht gesagt: Schwarze Löcher schlucken nicht alles. Anfangs ist dieser Ausfluss weit aufgefächert und könnte eher als Teilchenwind bezeichnet werden. In aktuellen Arbeiten wird von *trichterförmigen Jets* (engl. *funnel jets*) gesprochen (*Krolik 2004*). Dieses Phänomen ist morphologisch und entstehungsgeschichtlich verwandt mit dem Sonnenwind. Jets sind an sich erst die **kollimierten Ausflüsse**, die sich in einigem Abstand zum Loch bilden.

Magnetfelder um den Plasmastrom sorgen dabei über Lorentzkräfte für die Bündelung (*magnetische Kollimation*) des Materieflusses in Bewegungsrichtung. Ohne Kollimation sind die Ausflüsse ohne Vorzugsrichtung, also eher isotrop, und strömen radial in alle Richtungen.

Die physikalischen Ursachen für den Ausfluss sind unterschiedlich: Bei **zentrifugal getriebenen** Jets wird Materie mit zuviel Drehimpuls am Drehimpulswall des Akkretorpotentials reflektiert. Das bedeutet, dass die Materie zu schnell rotiert, als dass sie ins Zentrum einfallen kann. Sie muss erst Drehimpuls nach außen abführen, rotiert dann langsamer und kann akkretiert werden. Bei **magnetisch getriebenen** Jets folgen die geladenen Teilchen im Akkretionsfluss den magnetischen Feldlinien (siehe dazu auch Blandford-Znajek Mechanismus). In der Regel beobachtet man beide Effekte bei einem Objekt. Die Magnetosphäre des Akkretors kann unterschiedliche Eigenschaften haben: dipolar, quadrupolar, toroidal etc. Die Einzelheiten hängen vom 'Saatmagnetfeld' ab. So heißt das Magnetfeld, das von außen an das akkretierende Objekt 'geschwemmt' wird. Durch den Einfluss des Akkretors wird das Saatfeld deformiert und beispielsweise in Dynamos sogar verstärkt.

2.8.11 Schnell rotierendes Loch als effektives Katapult

Rotierende Schwarze Löcher spielen höchstwahrscheinlich die Schlüsselrolle bei der Erzeugung der relativistischen GRB- und AGN-Jets. Für sie wurde die Bezeichnung **relativistische Magneto-Rotatoren** (engl. *relativistic magneto-rotators*, **RMRs**; *Gammie* 2003) geprägt. Dieser Begriff soll klar machen, dass allgemein relativistische und magnetische Effekte für die schnellsten Jets verantwortlich ist.

Die Magnetfelder, die von außen - eingebettet im Akkretionsfluss - an das rotierende Loch herangetragen werden, werden von der rotierenden Raumzeit des Kerr-Lochs verdrillt. Dieses Phänomen ist schon seit längerem bekannt, und konnte vor kurzem mit eindrucksvollen Simulationen belegt werden (*Semenov et al.*, *Science*, 2004). Dass die rotierende Raumzeit alles mit sich zieht wird als frame-dragging ('Ziehen der Bezugssysteme') bezeichnet. Rotierende Raumzeiten können auf sehr elegante Weise mit Wheelers Gravitomagnetismus gedeutet werden (nähere Beschreibungen unter Lense-Thirring Effekt). Frame-dragging bewirkt in dieser Interpretation einen **gravitomagnetischen Dynamo-Effekt**, der dominant toroidale Magnetfelder in der Gegend der marginal stabilen Bahn erzeugt (*Khanna* 1999).

2.8.12 Junge Sterne

Jets treten aber auch bei nicht-kompakten Objekten, wie den Protosternen auf (siehe auch YSOs). Insbesondere T Tauri Sterne und Herbig-Haro Objekte bilden **protostellare, magnetisch getriebene Jets**. Das bedeutet, dass junge Sterne ebenfalls an ihrer Sternoberfläche (Sternwind) oder in deren Nähe (aus der protostellaren Akkretionsscheibe) Ausflüsse erzeugen können. Die Jets zeigen jedoch deutlich geringere Ausflussgeschwindigkeiten. Protostellare Jets emittieren typische Spektrallinien (auch einen Zoo verbotener Linien), über die der Jet gekühlt wird.

2.8.13 Flüssigkeitsmodelle aus der Theorie

Wie eingangs erwähnt, verhält sich ein Akkretionsfluss wie eine strömende Flüssigkeit. Einen theoretischen Zugang zur Akkretionsphysik verschafft man sich aus diesem Grund

mit Simulationen, die auf der Hydrodynamik (HD) beruhen. Der Akkretionsfluss besitzt wie jede Flüssigkeit eine gewisse Zähigkeit, die mit dem Fachausdruck *Viskosität* bezeichnet wird. Bei irdischen Fluiden verhält es sich nicht anders: zäher Honig fließt völlig anders als Wasser. Die viskose Strömung wird durch Reibungsprozesse zu einem so genannten **dissipativen Akkretionsfluss**. Vernachlässigt der Theoretiker die Viskosität, so löst er nicht die Navier-Stokes-, sondern die (etwas einfacheren) *Euler-Gleichungen*. Hydrodynamische Simulationen zeigen vor allem die **hydrodynamische Turbulenz** des Akkretionsflusses. Sie wurde lange Zeit als wesentlich für die Umverteilung des Drehimpulses im Akkretionsfluss angesehen. Das es deutlich effizientere Mechanismen gibt, konnte erst eine neue, magnetische Akkretionsphysik zeigen.

Ein heißer Akkretionsfluss besteht aus einem Plasma, also elektrisch geladenen Teilchen: Elektronen und Ionen. Im Kosmos gibt es immer nicht zu vernachlässigende Magnetfelder, z. B. interstellarer oder intergalaktischer Natur. Für geladene Spezies werden Magnetfelder dynamisch relevant, weil sie über Lorentz-Kräfte den Materiestrom abzulenken vermögen. Die Hydrodynamik muss dann um entsprechende Gleichungen der Elektrodynamik erweitert werden: Dieses Regime heißt Magnetohydrodynamik (MHD). Dabei treten neue Differentialgleichungen wie die Induktionsgleichung auf. Mit dem jeweiligen Satz an Differentialgleichungen ist das Strömungsproblem bei weitem nicht gelöst; es handelt sich nur um den Ansatz. Die Akkretionstheoretiker diskretisieren nun die Differentialgleichungen. Ziel ist es, die Gleichungen auf einem Gitter zu lösen, d. h. das Gebiet, auf dem sich der Akkretionsfluss bewegt, wird in kleine Raumelemente geteilt. In zwei Raumdimensionen (2D) können dies Quadrate sein; in drei Raumdimensionen (3D) eignen sich z. B. Würfel. Die Theoretiker entwickeln nun Computerprogramme (*Solver*, dt. Löser), die die Zeitentwicklung der Strömung auf dem Gitter berechnen. Dazu werden (wie in der Meteorologie, die ähnliche Strömungsaufgaben behandelt) die leistungsfähigsten Rechner benötigt. Am Ende hat man große Datenmengen, die in einem letzten Arbeitsschritt als Bilder und Animationen visualisiert werden. Erst dann folgen die wissenschaftliche Interpretation der Ergebnisse und der Vergleich mit der Beobachtung.

Die MHD-Simulationen von Akkretionsflüssen konnten zeigen, dass magnetische Mechanismen wie die magnetische Rotationsinstabilität deutlich effizienter sind, um die Dynamik des Akkretionsstroms zu beeinflussen (aktuelle Arbeiten von *De Villiers & Hawley* 2002-2004). In der Akkretionsphysik endet damit die Epoche der reinen Hydrodynamik, und es beginnt das Zeitalter der Magnetohydrodynamik.

2.8.14 Zweige der Akkretionsphysik

Simulationen sind im Allgemeinen sehr komplex und verlangen eigentlich im Falle der Akkretionsphysik der AGN auch eine adäquate Berücksichtigung der Speziellen und Allgemeinen Relativitätstheorie, der kovarianten Elektrodynamik und der kovarianten Strahlungsphysik (vergleiche Kovarianzprinzip). Alle Effekte sind jedoch kaum mit einer einzigen Software zu bewältigen. Noch sind die numerischen, aber auch die methodischen Herausforderungen sowie die Anforderungen an den Computer zu groß. Vereinfachungen werden daher - wie immer in der Physik - gemacht, indem man in erster Näherung Teilbereiche vernachlässigt. Bisher haben sich folgende Zweige der Akkretionsphysik herausgebildet und bewährt:

- ◇ **Newtonsche Ideale Hydrodynamik** ohne Berücksichtigung von Magnetfeldern.

Ideal bezieht sich zudem auf die Vernachlässigung von Wärmeleitung im Plasma. Newtonsch bedeutet, dass relativistische Effekte vernachlässigt werden.

- ◇ **Post-Newtonsche Zugänge** ahmen den Einfluss der Allgemeinen Relativitätstheorie nach: ein nicht rotierendes Schwarzes Loch wird nicht mit der Metrik, sondern mit einem verallgemeinerten Newtonschen Potential, dem *Paczynski-Wiita Potential* (gefunden 1980), beschrieben.
- ◇ **Nicht-radiative Modelle** (engl. *non-radiative models*) vernachlässigen sämtliche Strahlungsprozesse. Das bedeutet, dass die Wechselwirkung/Rückkopplung von Strahlung auf den Akkretionsfluss keinerlei Beachtung findet, was eine gewichtige Vereinfachung darstellt! Diese Wechselbeziehung von Strahlung und Materie gestaltet sich so, dass durch Emission von Strahlung die Materie gekühlt und durch Absorption von Strahlung geheizt werden kann. Wie man sich vorstellen kann, beeinflussen diese Effekte die Dynamik des Akkretionsflusses in der Natur enorm. Die Strahlungsphysik muss durch Kühl- und Heizfunktionen im Gleichungssystem implementiert werden. Das ist schon in flachen Raumzeiten nicht-trivial, vor allem dann, wenn ein umfangreiches Netzwerk verschiedener Spezies (z. B. Kühlung durch H_2 -Chemie in protostellaren Jets) berücksichtigt wird. Die Streuung, Absorption und Reemission der Strahlung wird durch Gleichungen für den **Strahlungstransport** umgesetzt. In einer gekrümmten Raumzeit wurde das zugehörige *kovariante Strahlungstransportproblem* bisher **nicht** gelöst. Nicht-radiative Zugänge finden sich sowohl in der Hydrodynamik (engl. *non-radiative hydrodynamics*) als auch in der Magnetohydrodynamik (engl. *non-radiative MHD*). Die sich ergebenden so simulierten nicht-radiativen Akkretionsflüsse nennt man **NRAFs**. Das englische Akronym steht für *non-radiative accretion flows*. In **Radiativen Modellen** finden Strahlungsprozesse entsprechend Berücksichtigung. Sie werden gegenwärtig nur im Newtonschen und post-Newtonschen Regime untersucht.
- ◇ Der modernste und aktuell vielfältig erforschte Bereich der Akkretionsphysik ist die **Magnetohydrodynamik auf gekrümmten Raumzeiten**, besonders in der Kerr-Geometrie rotierender Schwarzer Löcher. Diese Domäne heißt **GRMHD**, was für *general relativistic magnetohydrodynamics* steht. Die Konzepte der Allgemeinen Relativitätstheorie werden mit denen der Magnetohydrodynamik verknüpft. Typisch ist dabei die Verwendung der idealen MHD (also ohne Wärmeleitung). Pionierarbeit auf diesem Gebiet leisteten *De Villiers & Hawley* (2002). Sie erweiterten den NRAF-Sektor vom post-Newtonschen ('pseudo-relativistischen') in den allgemein relativistischen Sektor. Die gefunden NRAF-Strukturen in diesen Simulationen geben sehr gut die theoretischen Erwartung wieder, bedürfen aber noch weiterer Erforschung. Die GRMHD steht noch am Anfang, es sind allerdings wichtige Entdeckungen zu erwarten, die die relativistische Akkretionsphysik befruchten werden.
- ◇ Allgemein kann man die Akkretionsphysik in einer, zwei oder in drei Raumdimensionen plus einer Zeitdimension beschreiben. Niedrigere Dimensionalität kann den numerischen und rechenzeitlichen Aufwand erheblich reduzieren. Aber dafür gibt sie nur ein eingeschränktes, möglicherweise sogar falsches Bild der so simulierten Natur ab. Das hohe Ziel sind immer **dreidimensionale Modelle**, weil nur mit allen räumlichen Freiheitsgraden die volle Dynamik des Systems zutage tritt.

Alle simplen Modelle haben ihre Berechtigung darin, dass sie einen grundsätzlichen Einblick in die Akkretionsphysik vermitteln. Aber um den letzten Schritt der Berücksichtigung aller Prozesse wird man nicht herunkommen. Diesem Ziel nähern sich die Akkretionsphysiker sukzessive an.

2.8.15 Von der großen auf die kleine Längenskala - ein Problem

Eine weitere Herausforderung der Akkretionsphysik besteht darin, ausgedehnte Akkretionsscheiben **global**, d. h. auf großen Raumskalen, zu modellieren. Die Physik variiert sehr stark in unterschiedlichen Bereichen der Scheibe, vor allem bei den AGN. Das Interesse der Akkretionsphysik richtet sich auf die Dynamik auf der ganzen Skala! Betrachtet man eine globale Akkretionsscheibe, so befindet sich außen der ausgedehnte Staubtorus (pc-Skala), geht am inneren Ende über in die kalte, dünne Standardscheibe (sub-pc-Skala), die schließlich bei kleinen Abständen vor dem Schwarzen Loch in ein heißes, aufgeblähtes Gebiet mündet (AU-Skala), den heißen Akkretionsfluss. Auf der Längenskala sind das etwa **acht Größenordnungen**. Analog verhält es sich mit der Temperaturskala. Ein großer Skalenunterschied beschwört eine numerische Technik herauf, die man als **Adaptive Gittermethoden** (engl. *adaptive mesh refinement*, **AMR**) bezeichnet. Trotz dieser Techniken ist es bisher aus Gründen, die die Hardware von Supercomputern und die Methodik betreffen, nicht gelungen, globale Simulationen der Akkretionsphysik zu bewerkstelligen. Schon die innere Akkretion bei wenigen Gravitationsradien Abstand stellt die Theoretiker vor eine Vielzahl von Problemen: Relativität, Magnetohydrodynamik und Strahlung (engl. *radiative GRMHD*) müssen hier konsistent modelliert und gelöst werden. Bisher ist das niemandem auf der Welt gelungen...

2.8.16 Weitere Informationen

- ◇ Wie eine Flüssigkeit - Hydrodynamik in der Astrophysik
- ◇ Akkretionsscheiben um rotierende Schwarze Löcher
- ◇ Schwarze Löcher - Das dunkelste Geheimnis der Gravitation
- ◇ GRMHD war zentrales Thema meiner Doktorarbeit. Download der Dissertation als pdf (9.9 MB) oder als komprimiertes ps (14.4 MB)
- ◇ Einführender und sehr verständlicher Artikel über Akkretion, den ich für Einstein online (AEI Golm) geschrieben habe. Titel: Glühende Scheiben: Wie Schwarze Löcher ihre Nachbarschaft zum Leuchten bringen

2.9 Aktiver Galaktischer Kern

Aktive Galaktische Kerne (engl. *Active Galactic Nuclei*, AGN) sind allgemein gesprochen die Zentren sehr heller, sehr aktiver Galaxien. AGN gehören zum Hauptbeschäftigungsfeld extragalaktischer Forschung in der Astronomie.

2.9.1 AGN-Zoo

Je nach spektralen Eigenschaften - wie dem hellsten Spektralbereich (Radio, Infrarot, UV, Röntgen etc.) beispielsweise - unterscheiden die Astronomen verschiedene AGN-Klassen:

- ◇ Quasi-stellare Objekte (QSOs) und Quasare
- ◇ Seyfertgalaxien
- ◇ Radiogalaxien
- ◇ BL-Lac-Objekte
- ◇ Blazare
- ◇ *Low Ionization Nuclear Emission Line Regions*, kurz LINERs
- ◇ Ultraleuchtkräftige Infrarotgalaxien oder kurz ULIRGs (oder ULIGs)
- ◇ und (heutzutage weniger gebräuchlich) Markariangalaxien

2.9.2 Vereinheitlichte Sicht auf aktive Galaxien

In den letzten beiden Jahrzehnten hat sich ein Trend unter den Astronomen ausgebildet, die Vielfalt der AGN-Klassen in einem einzigen physikalischen Modell zu vereinheitlichen (u. a. *Antonucci & Miller 1985, Urry & Padovani 1995*). Diese **Unifikation der AGN** ist möglich, wenn man ein **Standardmodell eines AGN** betrachtet, das grundsätzlich folgende charakteristische Elemente enthält:

- ◇ rotierendes, supermassereiches Schwarzes Loch,
- ◇ Akkretionsscheibe,
- ◇ Staubtorus,
- ◇ und Jets.

Die Vielfalt, die sich in den AGN-Klassen widerspiegelt, beruht auf der unterschiedlich starken Ausprägung dieser Grundelemente: der eine AGN wird dominiert von Jets und zeigt starke Radioemission (Radiogalaxien); ein anderer AGN sammelt besonders viel Materie in besonders kurzer Zeit auf (Quasar) und noch ein weiterer AGN zeigt stark abgeschwächte optische und weiche Röntgenstrahlung (Seyfertgalaxie Typ II). Die unterschiedlich starke Ausprägung wiederum hat ihre Ursachen einerseits in der Physik: grundlegende astrophysikalische Parameter - wie Lochmasse, Akkretionsrate, Torusmasse, etc. - variieren von AGN zu AGN. Andererseits gibt es auch rein geometrische Effekte, wie die Orientierung des AGN, so dass sich die Galaxie für den Beobachter von ganz unterschiedlichen Seiten präsentieren kann. Das bewirkt beispielsweise den Unterschied von Quasar zu Blazar.

Abbildung 2.5 skizziert schematisch das Standardmodell eines AGN mit oben genannten Grundelementen. Das Schema entspricht einem Querschnitt durch den innersten Bereich eines AGN - etwa die innerste Parsec. Dabei muss berücksichtigt werden, dass sowohl die horizontale, als auch die vertikale Richtung logarithmisch skaliert ist, damit alle hier dargestellten Komponenten überhaupt ins Bild passen. Die nun folgenden Absätze widmen sich einer detaillierten Beschreibung der einzelnen Komponenten im AGN-Standardmodell.

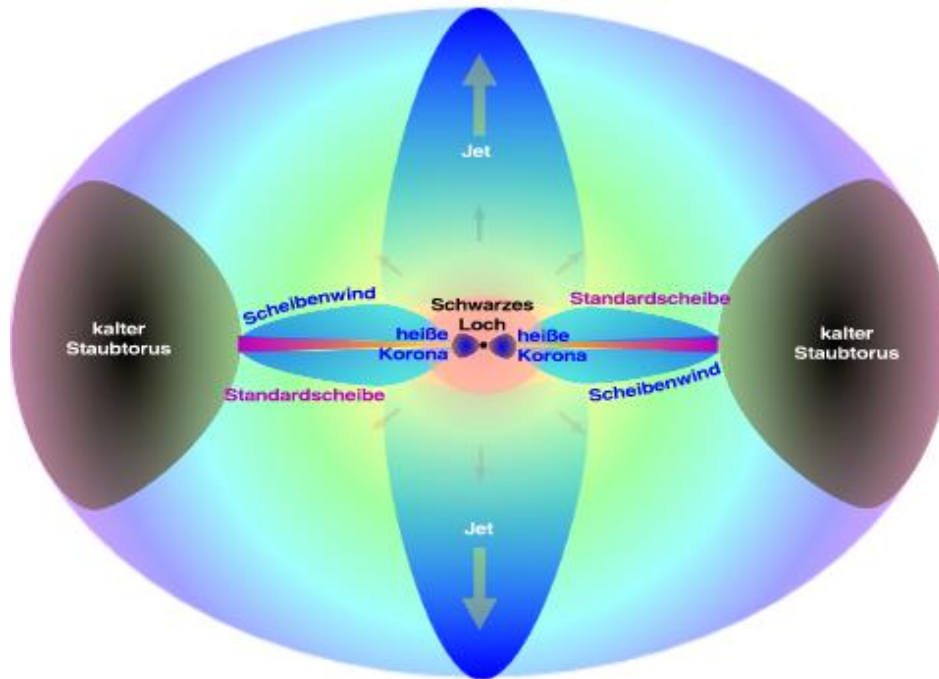


Abbildung 2.5: Tomographie eines Aktiven Galaktischen Kerns bis zur pc-Skala.

2.9.3 Das superschwere Loch: eine unglaubliche Höllenmaschine

Der zentrale Motor der AGN ist nach gängiger Vorstellung ein **akkretierendes, rotierendes, supermassereiches Schwarzes Loch**. Diese Idee wurde schon vor mehr als dreißig Jahren vorgeschlagen (Lynden-Bell 1969, Lynden-Bell & Rees 1971). Die Masse des superschweren Loches kann zum Beispiel kinematisch anhand von Sternbewegungen (vgl. Kepler-Gesetze) bestimmt werden, falls der AGN nah genug ist, um seine Sterne auflösen zu können. Mit diesem Verfahren konnten *Genzel & Eckart* 1995 die Masse des supermassereichen Schwarzen Loches im Galaktischen Zentrum zu 2.4 Millionen Sonnenmassen bestimmen. *Ghez et al.* leiteten später eine Masse von 2 Millionen Sonnenmassen ab. Neuere Messungen korrigieren diesen Wert nach oben auf 3.6 Millionen Sonnenmassen (VLT-Beobachtungen, *Eisenhauer et al.* 2005). Die Milchstraße ist allerdings **kein AGN**, vielleicht war sie jedoch vor Millionen von Jahren aktiver und müsste gemäß der Masse des Schwarzen Loches eine Seyfertgalaxie gewesen sein.

Typische Massen dieser gigantischen Schwarzen Löcher von AGN liegen zwischen einer Million und drei Milliarden Sonnenmassen. Riesige elliptische Radiogalaxien bilden das Zentrum der Galaxienhaufen, z. B. M87 im Virgo-Haufen. Ihre Schwarzen Löcher sind mit einigen Milliarden Sonnenmassen die schwersten überhaupt!

2.9.4 Zutat Nr. 2: Futter für das Loch

Die **Akkretionsscheibe** besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen: der kalten, geometrisch dünnen und optisch dicken Standardscheibe und dem heißen, advektions-dominierten, optisch dünnen Akkretionsfluss (siehe ADAF).

Die Standardscheibe ist infolge des Drehimpulses der einfallenden Materie und infolge von Strahlungskühlung vertikal kollabiert. Sie schließt sich inwärts gerichtet an den Staubtorus an. Am Innenrand der Standardscheibe gibt es eine ausgedehnte, heiße Region, die **Korona**. Hier entsteht die energiereiche elektromagnetische Strahlung der AGN. Die Strahlung entsteht durch unterschiedliche physikalische Prozesse: So entsteht thermische Strahlung, die besonders hohe Energien bei dem heißen Plasma erreicht; aber es entsteht auch Bremsstrahlung oder Synchrotronstrahlung (die nicht-thermisch ist). Die Akkretionsscheibe ist magnetisiert: der galaktische Dynamo bildet und verstärkt die Magnetfelder in der Scheibe; der ergosphärische Dynamo nahe am Ereignishorizont des schnell rotierenden Schwarzen Loches (Kerr-Typ) erzeugt schlauchartige Magnetfelder, die wesentlich zur Bildung Poynting-Fluss-dominierter **Jets** beitragen. Bei diesem komplexen Mechanismus wird dem Schwarzen Loch über magnetische Kopplung Rotationsenergie entzogen, die auf das Plasma übertragen wird (siehe Blandford-Znajek-Mechanismus). Durch den Frame-Dragging-Effekt zwingt das Kerr-Loch dem Plasma und dem Magnetfeld die Rotation auf. Dadurch entstehen verdrillte MHD-Wellen, **torsionale Alfvèn-Wellen**, die sich nach außen mit der Alfvèn-Geschwindigkeit bewegen. Weil die Alfvèn-Geschwindigkeit mit der inversen Wurzel der Dichte skaliert, kann in einem inhomogenen Umgebungsmedium des AGN die Alfvèn-Welle abgebremst oder beschleunigt werden, je nachdem, ob die Dichte nach außen zu- oder abnimmt. Die Torsion legt nahe, dass AGN-Jets im Allgemeinen um ihre Achse rotieren. Der so genannte **torsionale Alfvèn-Wellen-Zug** (engl. **TAWT** für *torsional Alfvèn wave train*) sorgt also neben Beschleunigungen durch Gasdruck und Lorentzkräften dafür, dass die Jets bis auf sehr große Längenskalen (kpc bis Mpc) nach außen propagieren: AGN-Jets sind **magnetisch getrieben**.

Außerdem werden an der Oberfläche der Akkretionsscheibe Teilchenströme erzeugt, die man **Scheibenwinde** nennt. Der Bildungsmechanismus ist ganz analog zu dem des Sonnenwinds: Magnetfelder durchstoßen die Sonnen- bzw. Scheibenoberfläche und entreißen Plasma, das sich entlang den Magnetfeldlinien bewegt (siehe auch Blandford-Payne-Szenario). Treffen sich Magnetfeldlinien unterschiedlicher Polarität, so werden sie vernichtet. Dieses Phänomen nennen Physiker **Rekonnexion**: dabei wird magnetische Feldenergie in kinetische Energie des Plasmas umgewandelt. Das Plasma kann nun die Oberfläche verlassen und manifestiert sich als Teilchenwind.

2.9.5 Einsicht oder Blockade durch Unmengen von Staub

Massereiche Sterne wie Rote Riesen und Wolf-Rayet-Sterne blasen ihre Materie in Form von Sternenwinden in den interstellaren Raum. Dieser Sternenstaub sammelt sich in einem gigantischen Schlauch an, der sich um das Zentrum des AGN legt und so schwer ist, wie Millionen bis hundert Millionen Sonnen. Das ist der **Staubtorus**, dessen Existenz sehr wahrscheinlich ist. So lässt sich die 10-Mikrometer-Linie, die sich im Infraroten mal als Emissions- und mal als Absorptionslinie zeigt, elegant durch einen Staubtorus erklären, der sie mal reflektiert (Emission) und mal verschluckt (Absorption). Der Abstand dieses Schlauchs vom zentralen superschweren Loch liegt typischerweise unterhalb der pc-Skala. Je nachdem, unter welchem Winkel der astronomische Beobachter auf die Ebene des Schlauchs schaut, sorgt der Staubtorus dafür, dass man in das Zentrum des AGN blicken kann oder nicht. Die Konsequenz ist eine Teilung in **zwei AGN-Typen**: im einen Fall ist der Einblick in das Innere gestattet (Typ 1); im anderen Fall ist das Innere des AGN verhüllt (Typ 2). Dazwischen sind natürlich ebenfalls Neigungswinkel erlaubt, so dass Zwischentypen (1.2, 1.4 etc.) definiert

werden können.

2.9.6 AGN sitzen in Galaxien verschiedener Gestalt

Die **Wirtsgalaxien** (*Hostgalaxien*) der AGN sind - je nach AGN-Typ - ganz unterschiedlichen Hubble-Typs, z. B. elliptisch, spiralförmig, balkenspiralförmig, irregulär. Seyfertgalaxien finden sich fast ausschließlich in Spiralen, Radiogalaxien sind nur in Ellipsen, Quasare sind in allen Typen anzutreffen. Es gibt sogar 'Kannibalismus' unter den Quasaren, also Quasare, die räumlich so dicht beieinander stehen, dass sie sich über gravitative Wechselwirkungen stark deformieren oder sogar miteinander verschmelzen.

2.9.7 AGN im kosmologischen Kontext

Kosmologisch gesehen handelt es sich bei den AGN um Objekte des **jungen Universums**, die also sehr weit entfernt sind, aber aufgrund ihrer Helligkeit und enormen Aktivität über solche Distanzen noch sichtbar sind. Die kosmologischen Rotverschiebungen von AGN erstrecken sich aktuell von $z = 0.008$ (Seyfertgalaxie MCG-6-30-15) bis etwa $z = 6.41$ (ein SDSS-Quasar). Der am weitesten entfernte beobachtete Galaxie bei $z = 10$ befindet sich in einer Phase heftiger Sternentstehung. Es ist eine **Starburstgalaxie**. Die Kosmologie muss nun das Problem lösen, wie in relativ kurzer Zeit (gedacht in kosmischen Zeiträumen) supermassereiche Schwarze Löcher entstehen konnten, die schließlich über Akkretion den Aktivitätszyklus der AGN in Gang brachten und - nach Abklingen der Akkretionsrate - aus den AGN die normalen, d. h. nicht aktiven Galaxien des lokalen Universums wurden.

2.9.8 AGN-Spektroskopie

Die **Spektren von AGN** sind sehr vielfältig, was letztendlich die Ursache des AGN-Zoos ist. Im Prinzip wird heute der gesamte Bereich des elektromagnetischen Spektrums von AGN beobachtet: von Radiowellen, über infrarote und optische Strahlung, in den kurzwelligeren Bereich der ultravioletten, Röntgen- und Gammastrahlung sowie TeV-Emission. Radiogalaxien und radiolaute Quasare zeigen starke Radioemission von den Jets. Im optischen Spektrum finden sich bei Seyfertgalaxien und Quasaren häufig ungewöhnlich **breite Spektrallinien**, die durch die hohen Geschwindigkeiten des Plasmas in der Akkretionsscheibe Doppler-verbreitert sind. Zum anderen sind **Exzesse** im Bereich der Röntgen-, UV- oder Infrarotstrahlung beobachtbar. Blazare zeigen sogar TeV-Emission, was konservativ durch Comptonisierung der Hintergrund- oder Jet-Synchrotronstrahlung und nicht-konservativ durch das Proton-Blazar-Modell erklärt wird.

Wenn man alle aktiven Galaxienkerne über einen Kamm scheren möchte, kann man eine Art Prototypspektrum ableiten. Die Illustration 2.6 zeigt ein **Mulwellenlängenspektrum eines AGN vom Typ-1** in idealisierter Form. Das Spektrum ist eine Auftragung des spektralen Flusses (vertikale Achse) über der Wellenlänge bzw. Strahlungsenergie (obere, horizontale Achse) bzw. über der Strahlungsfrequenz (untere, horizontale Achse). Der Fluss ist ganz salopp gesprochen so etwas wie eine Helligkeit.

Der rote Buckel

Starten wir links so fällt der erste 'rote Buckel' (engl. *red bump*) im Spektrum auf, der im Bereich der Wärmestrahlung Infrarot liegt und etwa bis zum roten Licht reicht. Diese

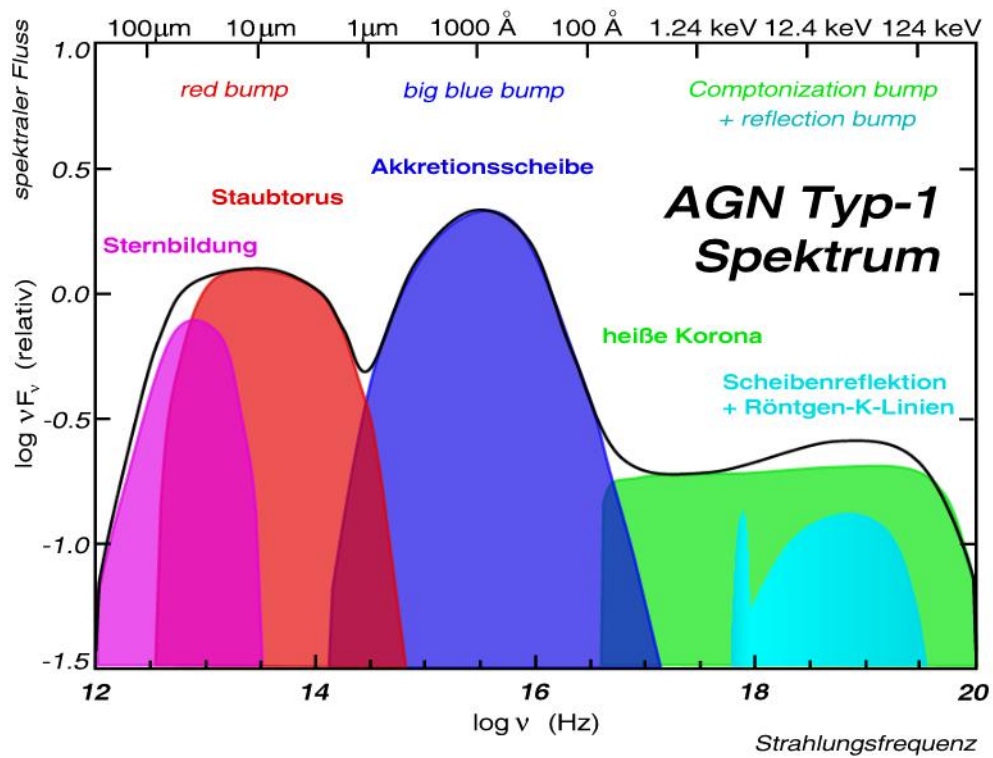


Abbildung 2.6: Multiwellenlängenspektrum eines AGN Typ-1.

Strahlung kommt zum einen von **jungen Sternen** (siehe Protosterne, YSOs); zum anderen handelt es sich bei dieser Strahlung um **'recycelte Strahlung'** aus dem Zentrum des AGN. Trifft nämlich die hochenergetische UV- und weiche Röntgenstrahlung den Staubtorus, so wird sie gestreut, absorbiert und abgeschwächt infolge der Extinktion: die ursprüngliche Strahlung wird gerötet und somit im Spektrum nach links verschoben. Das Maximum des roten Buckels liegt etwa bei 10 Mikrometer Wellenlänge.

Der große, blaue Buckel

In der Mitte gibt es schon wieder einen Buckel. Weil er bei kurzen, optischen Wellenlängen anzutreffen ist (Maximum etwa bei 100 Nanometern) heißt der zweite Buckel der 'große, blaue Buckel' (engl. *big blue bump*). Der Ursprung dieser **Strahlung ist die Akkretionsscheibe**. Sie wird zum Zentrum des AGN hin immer heißer und gibt thermische Strahlung ab. Denkt man sich die Scheibe zerlegt in konzentrische Ringe, so gibt jeder Ring die Wärmestrahlung (Planck-Strahler) seiner charakteristischen Temperatur ab. Die Summe dieser Planck-Kurven ist gerade der blaue Buckel. Er dominiert das Spektrum und erreicht die größten Flüsse (vertikale Achse beachten).

Der Compton- und Reflektionsbuckel

Der dritte Buckel sitzt im Spektrum ganz rechts, bei höchsten Strahlungsenergien: Röntgen-, Gamma- und sogar TeV-Strahlung. Der innere Akkretionsfluss im AGN befindet sich in unmittelbarer Nähe zum zentralen Schwarzen Loch. Dort wird es so heiß, dass hochenergetische Röntgenstrahlung produziert wird. In Magnetfeldern beschleunigte, relativistische Teilchen geben außerdem Synchrotronstrahlung ab. Wenn diese hochenergetischen Strahlungsformen auf die deutlich kältere Akkretionsscheibe weiter außen treffen, wirkt diese wie ein Spiegel: die Standardscheibe reflektiert die energiereiche Strahlung und produziert einen **Reflektionsbuckel** (engl. *reflection bump*; im Bild türkisfarben). Dabei kommt es auch zur *Fluoreszenz* in der Scheibe: die Ionen werden dazu angeregt, charakteristische Linienstrahlung abzugeben. Die dominante Spektrallinie ist die **Eisenlinie**, die zu den Röntgen-K-Linien gehört und einige keV Energie bei der Emission hat.

Es kommt auch vor, dass niederenergetische Umgebungsstrahlung den Weg in den optisch dünnen, heißen, inneren Akkretionsfluss findet. Die Photonen können dabei am heißen Plasma gestreut werden und Energie gewinnen. Dieser Vorgang heißt in der Astrophysik **Comptonisierung** und produziert den Compton-Buckel (in der Abbildung grün dargestellt). Der Compton-Buckel dominiert den energiereichen dritten Buckel im AGN-Typ-1-Spektrum. Verglichen mit den beiden niederenergetischen Buckeln steckt im Compton- und Reflektionsbuckel weniger Fluss.

Der Weg der Astronomie war natürlich umgekehrt: die Astronomen beobachteten Spektren vieler AGN, dachten sich Modelle aus, um diese Beobachtungen zu erklären und gelangten so über Jahrzehnte zu diesem gerade vorgestellten, subtilen Modell der AGN-Multiwellenlängenspektren.

2.9.9 neue Beobachtungsfenster

Es besteht die Hoffnung, dass sich neben den elektromagnetischen Fenstern bald andere Teilchen von AGN beobachten lassen, die uns weitere Informationen über diese interessanten Objekte bescheren, nämlich Neutrinos und Gravitationswellen.

2.9.10 Variabilität & Kompaktheit der AGN

Die **Variabilität** dieser Quellen vor allem im Bereich der Röntgenstrahlung ist sehr hoch und läuft auf kurzen Zeitskalen (Tage!) ab. Das Emissionsgebiet muss daher **recht klein** sein, nämlich im Durchmesser nur einige Lichttage. Es kommt daher nur das enge Gebiet um das supermassereiche Schwarze Loch in Frage.

2.9.11 Unifikation mit wenigen Parametern

Die Fülle der beobachteten Aktiven Galaktischen Kerne kann unifiziert werden, indem man wenige physikalische Parameter vorgibt, die die Aktivität und die wesentlichen Eigenschaften eines AGN steuern. Diese sind die **Masse und Drehimpuls des supermassereichen Schwarzen Loches**, die **Akkretionsrate** und Eigenschaften der Umgebung, also des intergalaktischen Mediums (IGM), wie die **Stärke und Morphologie der Magnetfelder** und die **Dichteverteilung der Materie**. Vermutlich gibt es weitere Parameter, aber das sind sicherlich die wichtigsten.

Dieser Parameterraum bildet die Ausgangssituation für AGN. Die AGN-Physik muss es nun leisten, ausgehend von diesen wenigen Parametern ein **globales Modell von AGN** umzusetzen. Das anspruchsvolle Ziel der AGN-Theoretiker ist es, auf dem Hintergrund der Kerr-Geometrie (weil das Schwarze Loch rotiert) ein magnetohydrodynamisches Modell (weil der Einfluss von Magnetfeldern wesentlich ist) mit allen Strahlungsprozessen (Kontinuumsstrahlung, Emissionslinien, Bremsstrahlung, Synchrotronstrahlung, kovarianter Strahlungstransport) inklusive Mikrophysik (Moleküle, Neutrinos) zu lösen, d. h. zu simulieren. Weil das offensichtlich allein aus Gründen der Längenskala (ein Gravitationsradius beim heißen Akkretionsfluss, 10000 Gravitationsradien beim Staubtorus) nicht möglich ist, kann der Theoretiker nur Teilaspekte untersuchen: die AGN-Physik zerfällt in Akkretionsphysik, Jetphysik, Staubphysik. Daneben gibt es massive numerische Probleme, wo zunächst effiziente Lösungsalgorithmen entwickelt werden müssen (z. B. beim kovarianten Strahlungstransport; Emission von Gravitationswellen). Und natürlich gibt es im Bereich der Computer Hardware-Probleme, vor allem begrenzt der Arbeitsspeicher (*memory*) die Auflösung des Gitters (vergleiche AMR), auf dem das physikalische Verhalten numerisch gelöst wird. Am Ende steht eine globale Sicht, die man aus einer Synopse der Teildisziplinen erhält: das physikalische Verständnis von AGN.

2.9.12 Der entfernteste AGN

Der Entfernungsrekordhalter unter allen AGN ist der Quasar SDSS J1148+5251 (*Fan et al. 2003*) mit einer Rotverschiebung von $z = 6.41$ (*Willott et al. 2003*), der den Quasar SDSS 1030+0524 ($z = 6.28$) ablöste. Er ist so weit entfernt, dass man bis in die **Epoche der Reionisation** zurückblickt, wo das intergalaktische Medium (IGM) zum Teil noch neutral war! Es gelang sogar die Virialmasse des supermassereichen Schwarzen Loches mithilfe der Reverberation Mapping-Technik abzuschätzen. Das Ergebnis: 3 Mrd. Sonnenmassen (ebenfalls *Willott et al. 2003*, astro-ph/0303062).

2.9.13 Weitere Informationen

- ◇ Web-Artikel: Aktive Galaktische Kerne - Leuchtfeuer im All
- ◇ Web-Artikel: Akkretionsflüsse um rotierende Schwarze Löcher

- ◇ externer Artikel: Aktive Schwarze Löcher: Ultraheiße Leuchtfeuer im All von Andreas Müller, erschienen bei Einstein online (AEI Golm)

2.10 Alfvèn-Geschwindigkeit

Darunter versteht man die Geschwindigkeit einer Alfvèn-Welle, benannt nach dem schwedischen Physiker *Hanns Alfvèn* (geb. 1908), einem der Pioniere auf dem Gebiet der Magnetohydrodynamik (Nobelpreis 1970).

Die Alfvèn-Welle ist eine der **Plasmawellen**, neben der langsamen und der schnellen **magnetosonischen Welle**. Diese Form von Wellen ist in der Astrophysik wichtig für die Dynamik von magnetohydrodynamischen Jets und magnetohydrodynamischen Akkretionsflüssen.

$$v_A = \sqrt{\frac{B^2}{\rho}}$$

Wie die Gleichung zeigt, ist die Alfvèn-Geschwindigkeit v_A definiert als Wurzel aus dem Quotient aus dem Quadrat des Magnetfeldes (Formelsymbol B) über einer charakteristischen Dichte (grch. Buchstabe ρ) im System. Aus der Gleichung ist ersichtlich, dass die Alfvèn-Geschwindigkeit wächst, wenn die Massendichte abfällt. Das spielt eine z. B. Rolle, wenn eine Alfvèn-Welle in ein unterdichtetes Gebiet propagiert: die MHD-Welle wird dann schneller.

2.11 Alfvèn-Zahl

Eine der **charakteristischen, dimensionslosen Zahlen** der Magnetohydrodynamik (MHD), die man nutzt, um das System oder eine entsprechende Computersimulation zu beschreiben.

Sie ist definiert als Wurzel des Quotients aus dem Quadrat der Alfvèn-Geschwindigkeit V_A über dem Quadrat einer charakteristischen Geschwindigkeit V_0 im System.

2.12 Allgemeine Relativitätstheorie

Die Allgemeine Relativitätstheorie, kurz **ART** (engl. *General Relativity*, **GR**), ist eine **Theorie der Gravitation**, die die klassische Theorie des englischen Physikers und Mathematikers *Isaac Newton* (1643 - 1727) ablöste. Die ART bietet völlig neue Einsichten in die Natur der Schwerkraft und muss deshalb als revolutionär eingestuft werden: Quantentheorie und Relativitätstheorie sind die bedeutendsten physikalischen Theorien des 20. Jahrhunderts, und ihre Bedeutung ist bis heute für die moderne Physik zentral!

2.12.1 Neudefinition elementarer Begriffe & Grundaussagen der ART

Beide Theorien haben das **naturwissenschaftliche Weltbild** entscheidend modifiziert und geprägt: unsere Vorstellungen von Raum, Zeit, Materie und Energie wurden neu definiert. Die wesentliche Aussage der ART ist, dass jede Form von Energie (auch Materie) die Raumzeit krümmt. Die Raumzeit ist eine vierdimensionale Mannigfaltigkeit, die sich aus den drei Raumdimensionen (Länge, Breite, Höhe) und der Zeitdimension zusammensetzt. Dieses **geometrische Gebilde** wird durch die Metrik bzw. das Linienelement eindeutig

festgelegt. Seine morphologischen Eigenschaften werden durch Energie und Materie verändert. Die Raumzeit ist vierdimensional; vereinfachend kann man sie sich in zwei Dimensionen wie eine dünne, dehnbare Haut vorstellen, die durch darauf befindliche Massen Dellen bekommt ('Gummimatten-Modell'). Ohne Massen hat die Haut keine Dellen, sie ist eben. Solche Raumzeiten heißen *flach*. Ein Testkörper, der nun auf eine durch Massen eingedellte Haut gelegt wird, muss unweigerlich der Krümmung folgen. Deshalb bewegt sich der Testkörper in einer gekrümmten Raumzeit oder anders gesagt: *er fällt im freien Fall*. Die Bewegungslinien heißen Geodäten und sind verschiedenen, je nachdem, ob der Testkörper eine **Ruhemasse** hat (Materie) oder nicht (Licht). Diese **geometrische Interpretation der Gravitation** löste somit den Kraftbegriff Newtons ab.

2.12.2 Albert Einstein - Pop-Ikone der Physik

Die Relativitätstheorie geht auf den deutschstämmigen Physiker *Albert Einstein* (1879 - 1955) zurück. Er entwickelte zunächst die Spezielle Relativitätstheorie (SRT), die er 1905 veröffentlichte. Dies ist eine Theorie der gegeneinander gleichförmig geradlinig bewegten Bezugssysteme (Inertialsysteme), die bereits das Kontinuum von Raum und Zeit offen legte (siehe z. B. Lorentz-Transformation). Die zentralen Aspekte der SRT sind die **Äquivalenz von Masse und Energie** ($E = mc^2$) und die **Konstanz der Lichtgeschwindigkeit c** in **allen** Inertialsystemen. Einstein postulierte diese Konstanz und folgerte erstaunliche Effekte auf Raum und Zeit, wie die Längen-Kontraktion und Zeitdilatation, die tatsächlich experimentell bestätigt werden konnten.

In den darauf folgenden Jahren, von 1907 bis 1915, verallgemeinerte Einstein die Gleichförmigkeit der Bewegung auf Beschleunigungen. Dieser Ansatz mündete in eine neue Theorie der Gravitation, der **Allgemeinen Relativitätstheorie**, die er 1916 veröffentlichte. *Allgemein* ist sie in dem Sinne, weil die Relativbewegungen zwischen den Bezugssystemen *verallgemeinert* wurden und beliebig sein können. Die SRT hingegen gilt nur für ganz bestimmte Relativbewegungen, nämlich gleichförmig geradlinige; in diesem Sinne ist sie *speziell*.

Eine wesentliche Basis der Relativitätstheorie ist das Relativitätsprinzip. Danach sind alle zueinander gleichförmig geradlinig bewegten Bezugssysteme völlig gleichberechtigt. Identische physikalische Experimente, die man in relativ zueinander gleichförmig bewegten Systemen durchführt, liefern gleiche Ergebnisse. Insbesondere sind relativ in Ruhe befindliche Systeme ununterscheidbar von gleichförmig geradlinig bewegten Systemen. Das Relativitätsprinzip wurde in der ART auf beschleunigte Systeme verallgemeinert. Dann heißt es Äquivalenzprinzip und besagt, dass es prinzipiell nicht möglich ist, *träge* von *schwerer Masse* zu unterscheiden. Das bedeutet, dass man nicht entscheiden kann, ob eine Masse durch eine konstante Kraft beschleunigt wird oder in einem Gravitationsfeld frei fällt. Außerdem gilt nach dem *Prinzip der allgemeinen Relativität*, dass alle Beobachter gleichberechtigt sind.

2.12.3 Anspruchsvolle Mathematik der ART

Mathematisch bedient sich die ART den Tensoren, die die bündige Vektorschreibweise Newtons ablöste und weiter verallgemeinerte. Sie sind auf geometrischen Gebilden, den *Mannigfaltigkeiten*, definiert und können physikalisch interpretiert werden (siehe dazu die Tensoren im Index). Die Tensoren sind eingebettet in den Formalismus der **Differentialgeometrie**. Nach dem Prinzip der allgemeinen Kovarianz sollten alle

$$\mathbf{G}_{\mu\nu} = 8\pi \mathbf{T}_{\mu\nu}$$

Abbildung 2.7: Die Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie in tensorieller Form.

Gleichungen der Physik *tensorielle Form* haben. Neben diesen Prinzipien leiteten Einstein auch das Korrespondenzprinzip, das Machsche Prinzip und das Prinzip der minimalen gravitativen Kopplung. Die Allgemeine Relativitätstheorie wird zu recht Albert Einstein zugesprochen, aber man muss vielen anderen Physikern und Mathematikern zugute halten, das ihr Denken Einstein nachhaltig beeinflusste. Die Tensoren als zwingende Objekte der ART, die erst einen koordinatenunabhängigen Zugang möglich machten, waren bereits von den Mathematikern gefunden worden. Philosophische Aspekte von Bewegung und Trägheit, die in die ART mündeten, wurden bereits vom österreichischen Physiker *Ernst Mach* (1838 - 1916) vorweggenommen. Insofern war die Zeit auch reif für eine Allgemeine Relativitätstheorie.

2.12.4 Die Feldgleichung der Gravitation

Die wichtigsten Tensoren der ART sind der Einstein-Tensor, der die Information über die gekrümmte Raumzeit enthält, und der Energie-Impuls-Tensor, der die physikalische Information über die Energieformen (wie auch Materie) enthält. Beide Tensoren werden in den fundamentalen **Einsteinschen Feldgleichungen der ART** miteinander verknüpft. Der physikalische Gehalt dieser Verknüpfung ist, dass einerseits jede Energie die Metrik krümmt und andererseits die Metrik dasjenige geometrische Gebilde festlegt, auf dem die Energie lokalisiert ist. Lakonisch formuliert: *'Die Geometrie sagt der Materie, wie sie sich bewegen soll, und die Materie diktiert der Geometrie wie sie sich zu krümmen hat.'*

Die Feldgleichungen haben tensoriell eine sehr einfache Gestalt, wie die Gleichung 2.7 zeigt (hier *ohne* Λ -Term). Die kompakte Notation ist auch gerechtfertigt, weil sie das Wesen der Symbiose aus gekrümmter Raumzeit und Energie enthüllt. Doch die so scheinbare, mathematische Einfachheit täuscht: die Feldgleichungen der ART sind an sich 16 Gleichungen, von denen sechs aufgrund der Symmetrie der Tensoren nicht betrachtet werden müssen. Einstein-Tensor und Energie-Impuls-Tensor sind Tensoren zweiter Stufe. Jeden von ihnen kann man als 4×4 - Matrix darstellen. Die Tensorsymmetrie reduziert die daraus resultierenden $4 \times 4 = 16$ Gleichungen auf nur 10 Gleichungen. Die verbleibenden zehn Gleichungen sind miteinander gekoppelt. Zudem sind die Gleichungen partielle Differentialgleichungen, die auch noch nicht-linear sind. Die **Nichtlinearität** der Gleichungen ist ein Ausdruck der oben dargelegten rückseitigen Wechselbeziehung von Raumzeit und Energie. Die **Kopplungskonstante** der Einsteinschen Feldgleichungen (siehe Gleichung oben, Zahlenwert von 8π) kann man aus einem *Korrespondenzprinzip* ableiten: im Grenzfall schwacher Gravitationsfelder und kleiner Geschwindigkeiten gegenüber der Vakuumlichtgeschwindigkeit c muss die ART in die Newtonsche Theorie übergehen. Die Kopplungskonstante folgt dann aus einem Vergleich von Einsteinschen Feldgleichungen und **Poisson-Gleichung**. Für den Gleichungstypus, wie ihn die Feldgleichungen der ART zeigt, bietet die Mathematik keinerlei Patentrezepte, um die allgemeine Lösung zu notieren. Die Gleichungen werden deshalb vereinfacht und man betrachtet verschiedene

Sektoren der Feldgleichungen. Mal setzt man den Energie-Impuls-Tensor null und betrachtet nur Vakuumlösungen, mal setzt man bestimmte Symmetrien der Lösungen (Kugel- oder Achsensymmetrie) voraus, mal betrachtet man nur Raumzeiten konstanter Krümmung - aber auch dann findet man nur spezielle Lösungen. Die Allgemeine Relativitätstheorie birgt sicher noch viele gekrümmte Mannigfaltigkeiten, die in der Natur vorkommen, die aber bis heute niemand kennt.

Die Einsteinschen Feldgleichungen sind also ein **kompliziertes System aus zehn partiellen, nichtlinearen, gekoppelten Differentialgleichungen**. Um so erstaunlicher war es, dass bereits ein Jahr nach der Publikation der ART, im Jahr 1916, der deutsche Astrophysiker *Karl Schwarzschild* eine erste Lösung fand. Die nach ihm benannte (äußere) **Schwarzschild-Metrik** löst die Vakuumfeldgleichungen. Sie beschreibt kugelsymmetrische Raumzeiten von relativistischen Sternen und insbesondere nicht rotierende, elektrisch ungeladene Schwarze Löcher.

2.12.5 Konsequenzen der ART

- ◇ **Relativität von Zeit und Länge**, wie schon von der Speziellen Relativitätstheorie antizipiert. Der Ablauf der Zeit hängt ganz allgemein in der Relativitätstheorie vom Bezugssystem ab. Insbesondere folgt in der ART eine Dehnung der Zeit bei Anwesenheit von Gravitationsfeldern. Zeit verrinnt langsamer in der Nähe von Massen, also stärkeren Gravitationsfeldern. Diese Dehnung der Zeit heißt **gravitative Zeitdilatation**.
- ◇ Energieverlust von Strahlung im Gravitationsfeld. Die Strahlung muss Arbeit gegen das Gravitationsfeld verrichten und verliert deshalb Strahlungsenergie. Weil rote Strahlung energieärmer als blaue ist und die Ursache des Energieverlusts die Gravitation ist, heißt dieser Effekt gravitative Rotverschiebung oder **Gravitationsrotverschiebung**. Dies entspricht vom Effekt her prinzipiell der gravitativen Zeitdilatation, wenn man von der Frequenz- in die Zeitdarstellung geht.
- ◇ Ablenkung von Strahlung im Gravitationsfeld. Dieses Phänomen heißt **Gravitationslinseneffekt** bzw. Gravitationsaberration (engl. *gravitational lensing*).
- ◇ relativistische Verallgemeinerung der *Binetschen Gleichung*. Die ART liefert den korrekten und beobachteten Zahlenwert für die **Periheldrehung des innersten Planeten Merkur**. Periheldrehung bezeichnet die Drehung der Apsidenlinie, also der Verbindungslinie von sonnennächsten Punkt (Perihel) mit dem sonnenfernen Punkt (Aphel) der Merkurbahn, im Raum. Die Ellipse der Merkurbahn ist also nicht geschlossen, sondern dreht sich im Raum, so dass eine Rosettenform der Bahnbewegung rotiert. Die Ursache dieses Phänomens ist die gravitative Wechselwirkung des Merkurs mit der schweren Sonne. Die Periheldrehung gibt es auch in der Newtonschen Gravitationsphysik, aber nur die ART erklärt den exakten, gemessenen Betrag. Die Periheldrehung ist nur bei Merkur von Belang, weil er der Sonne am nächsten steht und damit der beste Indikator für relativistische Gravitation ist.
- ◇ **Emission von Gravitationswellen** von beschleunigten Massen. Auf diese Weise breiten sich Veränderungen des Gravitationsfeldes/von Krümmungen in der Raumzeit mit Lichtgeschwindigkeit aus. Gravitationswellen wurden bisher **nicht direkt** beobachtet.

2.12.6 Vielfache experimentelle Bestätigungen

Alle diese Phänomene wurden experimentell verifiziert und gelten als glänzende Bestätigungen der ART. Erste experimentelle Erfolge konnte die ART bereits 1919 bei einer Sonnenfinsternis in Afrika erzielen, weil sie richtig die **Lichtablenkung an der Sonne** prognostizierte. Ebenfalls konnte die **Periheldrehung des Merkur** korrekt berechnet werden. Die beobachtete Diskrepanz von etwa 43 Bogensekunden pro Jahrhundert für die Verschiebung der elliptischen Planetenbahn wurde durch die ART bestens erklärt. 1993 wurde die indirekte Bestätigung der Emission von **Gravitationswellen** bei dem Binärpulsar PSR 1913+16 mit dem Nobelpreis prämiert: *Hulse* und *Taylor* konnten experimentell nachweisen, dass sich die Pulsare sukzessiv annähern, weil das Doppelsternsystem Rotationsenergie durch die Abstrahlung von Gravitationswellen verliert.

2.12.7 Einsteins Kosmos

Kosmologisch hat die ART eine Relevanz, weil sie als erste physikalische Theorie des Weltalls anzusehen ist. Die Welt ist danach vierdimensional und lokal im Allgemeinen nicht Euklidisch. Ob das Universum global Euklidisch oder nicht ist, hängt davon ab, welches Friedmann-Weltmodell vorliegt. Diese Frage ist nach wie vor Gegenstand der modernen Kosmologie. So muss der genaue Energiegehalt des Universums gemessen werden (siehe auch Missing-Mass Problem). Aktuell wird ein unendliches, offenes, expandierendes und flaches Universum indiziert und favorisiert (Messungen von Ballonexperimenten und des Mikrowellen-Satelliten WMAP). Dessen Dynamik wird von der Dunklen Energie dominiert, die neben baryonischer Materie und Dunkler Materie die gewichtigste Energieform stellt. Mathematisch beschreibt man dieses vierdimensionale Universum global mit der Robertson-Walker-Metrik. Der Materieinhalt wird mit einer relativistischen, idealen Flüssigkeit beschrieben. Die Dunkle Energie wird im kosmologischen Lambda-Term in den Feldgleichungen realisiert. Es wird in der modernen Kosmologie in Erwägung gezogen, dass die kosmologische Konstante nicht konstant ist, sondern zeitlich variieren kann. Diese Modelle heißen Quintessenzen. Die Lambda-Kosmologie und die Suche nach einer Weltformel gehörten zu Einsteins letzten Arbeiten. Einstein rechtfertigte sein Lambda damit, dass es ein seinerzeit favorisiertes Statisches Universum ermögliche. Als jedoch das expandierende Universum beobachtet wurde (Hubble-Effekt), zog Einstein sein Lambda zurück und bezeichnete es als 'die größte Eselei seines Lebens'. Moderne kosmologische Modelle benötigen ihn, weil er ein wichtiger Parameter ist, um Beobachtungen erklären zu können. Anschaulich wird das Lambda-Glied so interpretiert, dass bereits das Quantenvakuum eine Energie zur Verfügung stellt (*Vakuumpolarisationen*), die die Raumzeit krümmt. Diese Interpretation ist jedoch noch nicht gefestigt und wird im Rahmen der Quintessenz untersucht.

2.12.8 Extreme der Gravitation: kompakte Sterne

Die ART liefert eine mathematische Beschreibung für Schwarze Löcher, die in diesem Zusammenhang eine Lösung der **Vakuum-Feldgleichungen** bzw. Einstein-Maxwell Feldgleichungen darstellen. Die Gravitationsfelder dieser Kompakten Objekte sind so stark, dass die Newtonsche Theorie versagt. Andere Kompakte Objekte, wie Neutronensterne, Magnetare, Quarksterne und Gravasterne sind ebenfalls nur mit der ART korrekt zu beschreiben. Die relativistischen Korrekturen bei Weißen Zwergen sind hingegen marginal: Hier verwenden Astrophysiker häufig noch die Newtonsche Theorie, um die die

Strukturgleichungen (*Lane-Emden-Gleichung*) des kompakten Sterns abzuleiten. **Aber die Stabilität des Weißen Zwergs** ist nur relativistisch erklärbar. Nun ist relativistisch aber im Sinne der **speziell relativistischen Quantenmechanik** (und nicht der Allgemeinen Relativitätstheorie) zu verstehen. Denn: der Spin der Elektronen, einer wesentlichen Teilchenspezies im Innern Weißer Zwerge (neben Kohlenstoff), sorgt für den **stabilisierenden Entartungsdruck**.

2.12.9 Über die Grenzen von Einsteins größtem Wurf

Die ART ist eine **klassische Theorie**, klassisch nun im Sinne von *nicht quantisiert* zu verstehen, weil Quanteneigenschaften, wie Orts-Impuls-Unschärfe oder das Quantenvakuum $|B_i \text{ nicht } |B_i$ eingehen. Es gibt Bereiche der Natur bzw. der Physik, wo auch die ART versagt. Man kann den Parameterraum, wo dies geschieht mit starken Gravitationsfeldern in Verbindung mit sehr kleinen, atomaren und subatomaren Raumskalen umreißen. Das führt auf die Planck-Skala.

Auch das Auftreten von Singularitäten könnte als Indiz gewertet werden, dass die Theorie modifiziert oder durch eine übergeordnete Theorie, einer Quantengravitation, ersetzt werden muss. Gemäß der **Singularitätentheoreme** von *Hawking* und *Penrose* sind Singularitäten etwas 'Natürliches' und unabhängig von der ART. Das Beispiel der Gravasterne zeigt jedoch, dass man zumindest die Singularität des Schwarzschild-Loches durch eine **reguläre Alternative** ersetzen kann. Regularität ist für viele Physiker außerordentlich attraktiv. In diesem Sinne ist die *Singularitäten-Frage* noch nicht geklärt und muss durch experimentelle und theoretische Forschung weiter erörtert werden. Dies könnte so ausgestaltet sein, dass es Astronomen gelänge, Singularitäten oder Gravasterne tatsächlich zu bestätigen oder dass Theoretikern die Formulierung einer robusten Quantengravitation glückt. Lange Zeit wurden die Stringtheorien als einziger Weg zur Quantengravitation angesehen. Die aktuelle Forschung hat in Form der Loop-Quantengravitation eine weitere Alternative gefunden. Die Loop-Quantengravitation kann als direkte Weiterentwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie angesehen werden, die den Konzepten der Quantenmechanik versucht gerecht zu werden. In der Beschreibung der Natur hat sich bisher weder die Stringtheorie, noch die Loop-Quantengravitation bewährt. Die Entwicklung von Bewährungsproben hat bereits begonnen und wird sicherlich in den nächsten Jahren verstärkt verfolgt werden.

2.12.10 Kein Platz für Zweifler

Eines ist jedoch klar: Behauptungen, wie '*Die Relativitätstheorie ist falsch!*' oder '*Einstein irrte!*' sind von der Hand zu weisen, unseriös und absolut anachronistisch. Die ART wurde durch viele Experimente bestens verifiziert und ist eine (im Popperschen Sinne der Wissenschaftstheorie) *bewährte Theorie*. Wie bei der Newtonschen Theorie bzw. generell bei physikalischen Theorien, gibt es auch bei der ART einen **Gültigkeitsrahmen**, der bei bestimmten Parametern (starke Felder, kleine Raumskalen) in ein Versagen der Theorie mündet. Das Versagen wird durch divergierende Größen, wie Krümmung oder Dichte, und womöglich schon durch das Auftreten von Singularitäten signalisiert. **Jede der ART übergeordnete Theorie muss aber die Allgemeine Relativität als Grenzfall enthalten**, ebenso wie die ART die Newtonsche Theorie enthält. Deshalb wird auch nach dem Auffinden einer robusten Quantengravitation die ART ihre Daseinsberechtigung behalten!

2.12.11 Lesehinweis zur Vertiefung

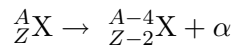
Außerhalb des Lexikons finden Sie einen ausführlichen Artikel zu wichtigen Objekten der Allgemeinen Relativitätstheorie und der Astrophysik: Schwarze Löcher - Das dunkelste Geheimnis der Gravitation.

2.13 Alpha-Zerfall

Eine der drei Formen von **Radioaktivität** neben Beta- und Gamma-Zerfall. Bei der Radioaktivität senden bestimmte Atomkerne (Fachbegriff: *Radionuklide*) bestimmte Materieteilchen (Elektronen, Positronen, Heliumatomkerne, auch Neutronen) oder hochenergetische, elektromagnetische Strahlung aus. Radioaktivität ist aufgrund seiner stark ionisierenden Wirkung gefährlich für Leben! Teilweise kann Radioaktivität schon mit einfachen Mitteln abgeschirmt und somit 'entschärft' werden.

2.13.1 Was genau ist nun α -Zerfall?

Die Radionuklide beim α -Zerfall sind so genannte **α -Strahler**, d. h. sie senden Heliumatomkerne, einen Verbund aus zwei Protonen und zwei Neutronen, aus. Diese He-Kerne nennt man dann **α -Teilchen** (nicht zu verwechseln mit dem α -Männchen bei den Wölfen). Die Reaktionsgleichung lautet in allgemeiner Form für einen beliebigen Atomkern X mit der Protonenanzahl Z (Ordnungszahl des Elements) und der Atommasse A (Summe der Anzahl aus im Atomkern gebundenen Protonen und Neutronen):



Sendet der Kern X ein Alpha-Teilchen aus, so reduziert sich seine Atommasse um vier und die Ordnungszahl um zwei, d. h. es hat eine Nuklearreaktion in Form einer Umwandlung des Elements stattgefunden. Die entsprechenden Verschiebungen im Periodensystem der Elemente bzw. auf der Nuklidkarte regeln die so genannten *Soddy-Fajans-Verschiebungssätze*. Wie immer in der Physik gelten bei diesen Reaktionen **Erhaltungssätze** (z. B. für Masse, Energie und Teilchensorte), so dass das, was auf der linken Seite steht der Summe der Komponenten auf der rechten Seite entsprechen muss. Die Masse eines Alpha-Teilchens beträgt 3.7274 GeV (berücksichtige 'Massendefekt' durch Bindung der vier Nukleonen).

2.13.2 Die Ursache ist nur quantentheoretisch zu verstehen

Erst durch die Quantentheorie war es möglich, diese Form von Radioaktivität (die anderen beiden auch) zu erklären. Der **Tunneleffekt** ermöglicht es dem Alpha-Teilchen durch die Coulombbarriere des Atomkerns zu 'tunneln' und den Kern zu verlassen: der Kern emittiert Alpha-Strahlung.

Diese Strahlung ist für das Leben die gefährlichste der radioaktiven Strahlungen, weil die biologische Schädigung der schweren Alpha-Teilchen enorm ist. Zum Glück ist Alpha-Strahlung aufgrund der hohen Masse (und Ladung) der He-Atomkerne kurzreichweitig und lässt sich bereits durch ein Blatt Papier wirksam abschirmen.

2.14 AMR

In vielen Bereichen der theoretischen Astrophysik und generell in der Strömungsmechanik benutzt man die Gleichungen der **Hydrodynamik** (HD) und **Magnetohydrodynamik** (MHD). In der Astrophysik haben sie sich bewährt, um die Dynamik zahlreicher kosmischer Objekte auf dem Computer zu simulieren. Die Gleichungen können auf ganz unterschiedlichen Längenskalen eingesetzt werden, je nachdem, wie groß die betrachteten Körper sind.

Manchmal sind die Objekte sehr ausgedehnt und es interessiert die Dynamik auf vielen Skalen gleichzeitig - in ein und derselben Simulation. Ein Beispiel ist die Akkretion auf ein supermassereiches Schwarzes Loch in einem Aktiven Galaktischen Kern (AGN) oder die Ausbreitung eines großskaligen Jets, der vom AGN emittiert wird. Dann muss man Verfahren finden, die die Dynamik auf vielen Größenskalen abbilden können ohne die Hardwareanforderungen zu überschreiten. Diese Techniken heißen **Adaptive Gittermethoden** (engl. *adaptive mesh refinement*, **AMR**). Um dies zu verstehen, muss zunächst erläutert werden, was ein numerisches **Gitter** ist.

2.14.1 So geht es in der Praxis

In HD/MHD-Simulationen zerlegt man das zu untersuchende Gebiet (engl. *solution domain*) in kleinere Zellen. Es handelt sich um ein Verfahren der **Diskretisierung**, die notwendig ist, um überhaupt Numerik betreiben zu können. Auf jeder Zelle, die mit Ortskoordinaten im Gebiet eindeutig fixiert ist, nimmt eine physikalische Funktion bestimmte Werte an. Typische Funktionen sind in der Hydrodynamik Druck, Dichte und Temperatur, in der Magnetohydrodynamik Magnetfeld, magnetischer Druck und Alfvén-Geschwindigkeit. Sie variieren räumlich über das betrachtete Gebiet, aber auch zeitlich, wenn man sich z. B. eine bestimmte Zelle herausnimmt und deren Zeitentwicklung separat studiert. Die Dynamik steckt in der Zeitabhängigkeit. Die kleineren Zellen, im einfachsten Fall Quadrate (2D) oder Würfel (3D), formen ein (hier äquidistantes) **Gitter**. Im Beispiel handelt es sich um ein regelmäßiges, *strukturiertes Gitter*. Daneben kann man den Bereich auch in ein *unstrukturiertes Gitter* zerlegen, was man häufig bei **Finite Elemente Methoden** findet. AMR passt nun die **Feinheit des Gitters**, also die Größe der Gitterzellen, in jedem Bereich des Gitters unterschiedlich an. Das Kriterium ist, ob sich die betreffende Größe stark in einer bestimmten Region des Gitters ändert oder mehr oder weniger konstant bleibt. Nur dort wo sie sich stark ändert, muss stärker aufgelöst werden, d. h. das Gitter verfeinert werden. Diese Gitter nennt man *adaptiv*. Ein Maß für die räumliche Variation einer Größe ist der **Gradient**. Er kann als Kontrollparameter für die AMR benutzt werden. AMR ist ein numerisch effizientes Verfahren, weil es die Ressourcen der Hardware nur dort bündelt, wo Strukturen auftreten, also 'etwas Interessantes' geschieht.

2.15 anthropisches Prinzip

Dieses Prinzip, benannt nach dem altgriechischen Wort $\alpha\nu\theta\rho\omega\pi\omicron\varsigma$, *anthropos* für *Mensch*, findet Anwendung in der Kosmologie und besagt verkürzt:

Wir sehen das Universum so, wie es ist, weil wir hier sind, um es zu sehen.

Ausgangspunkt des anthropischen Prinzips ist die Frage nach der Beschaffenheit des Universums. Warum ist es gerade so, wie wir es beobachten, und nicht anders? Die Antwort

liegt nach Auslegung des anthropischen Prinzips in unserer Existenz: physikalisch sind durchaus andere Realisierungen des Universums denkbar. Weil aber nur bestimmte, mögliche Universen die Existenz des Menschen zulassen, muss das Universum so sein, wie wir es beobachten, *denn wir sind hier*, um es zu beobachten.

2.15.1 Zwei Formulierungen des anthropischen Prinzips

- ◇ **schwaches anthropisches Prinzip:** *Die Bedingungen für die Entwicklung des Lebens werden nur in bestimmten Gebieten des Weltalls angetroffen.*
- ◇ **starkes anthropisches Prinzip:** *Die Bedingungen für die Entwicklung des Lebens werden nur in wenigen Universen angetroffen.*

Das schwache anthropische Prinzip besagt, dass das Universum zunächst eine Entwicklung durchmachen muss, bevor Leben entsteht. Die Entwicklung geht über die Bildung der Teilchenspezies, Atomen und Molekülen, dem Verklumpen von intergalaktischer Materie zu Galaxien aus gravitativen Instabilitäten, der Entstehung von Sternen in Galaxien, der Bildung von Planeten um einige Sterne bis hin zur Entstehung des Lebens auf ausgewählten Planeten. Dieser Prozess dauert seine Zeit, augenscheinlich so lange, wie unser Universum gebraucht hat: etwa 13.7 Milliarden Jahre. Das lokale Universum (bei einer kosmologischen Rotverschiebung von $z = 0$) erfüllt demnach erst die Bedingungen für Leben. Wie jeder weiß: Die Beobachtung stützt dies.

Das starke anthropische Prinzip ist eine Modifikation, die mit der **Viele-Welten-Theorie** aufkam. Im Rahmen einer **Quantenkosmologie** kann man Mechanismen der Quantentheorie auf kosmologische Modelle übertragen: die Erzeugung und Vernichtung von Teilchen besitze eine Analogie in der Erzeugung und Vernichtung von Universen! Dies führe gemäß *Everett* und *Wheeler* auf die Interpretationsmöglichkeit, dass nicht nur ein Universum entstehen kann, sondern viele, ein kosmisches Kommen und Gehen. Aber auch in diesem **Multiversum** könnten nur bestimmte Universen die Bedingungen für Leben erfüllen, daher die obige Formulierung des starken anthropischen Prinzips.

2.16 Antigravitation

Bezeichnung für eine Kraft oder ein Phänomen, das der Schwerkraft, der Gravitation entgegen wirkt. Die Theorien der Gravitation, wie Newtonsche Theorie und an sich auch die Relativitätstheorie sagen nichts über die Existenz von Antigravitation aus. Im Kern kann man die Gravitationskraft nicht abschirmen, weil es nur eine Form 'gravitativer Ladungen' gibt, die **Masse**. In der Elektrodynamik hingegen ist es möglich die elektrischen Kräfte abzuschirmen, wenn positive auf negative Ladungen treffen. In der Relativitätstheorie gibt es 'keine negative Ruhemasse'!

2.16.1 Wie soll das gehen?

Zumindest hypothetisch gibt es Teilchen mit **imaginärer Masse**, die Tachyonen. Diese Teilchen bewegen sich mit Geschwindigkeiten größer als die Lichtgeschwindigkeit (was man als *superrelativistisch* bezeichnen könnte) und verstoßen damit gegen das in der Physik fundamentale **Kausalitätsprinzip**: Ursache und Wirkung können sich bei der Vermittlung

von Tachyonen vertauschen. Physiker versuchen dies zu vermeiden und sind bei Theorien, die Tachyonen hervorbringen äußerst skeptisch.

2.16.2 Bitte etwas weniger verrückt...

Es gibt jedoch eine mysteriöse Kraft, die entscheidend die Entwicklung des Universums bestimmt und die man als Antigravitation bezeichnen könnte: die **Dunkle Energie**. Sie wirkt der Gravitation entgegen ist also *repulsiv* und grundlegend anders als Materie. Im Prinzip hat sie Einstein eingeführt, als er 1917 seine Allgemeine Relativitätstheorie auf die Kosmologie anwendete. Er wollte mathematisch ein aus seiner Sicht ästhetisches **statisches Universum** rechtfertigen. Dies war jedoch nur möglich, wenn er einen weiteren Term in seinen Feldgleichungen einführte, der die Dynamik unterdrückte: den **Lambda-Term** oder auch kosmologische Konstante genannt. Eine **positive kosmologische Konstante** wirkt sich nun repulsiv aus und ist dementsprechend ein Antagonist zur (*attraktiven*) Gravitation.

2.16.3 Expansion des Universums ist antigravitativ

Mit der Entdeckung der Expansion des Universums wurde die kosmologische Konstante fallengelassen und geriet lange Zeit in Vergessenheit bis sie in den 90er Jahren wieder *en vogue* wurde, um kosmologische Daten zu erklären. Jetzt, im Jahre 2004, wird die kosmologische Konstante sogar von Supernova (Typ Ia) favorisiert, weil keine merkliche zeitliche Variabilität der Dunklen Energie nachgewiesen werden konnte (*Riess et al.* 2004, astro-ph/0402512, HST-Beobachtungen).

In der Kosmologie findet man deshalb nach wie vor Modelle mit positiver kosmologischer Konstante, sogar noch mehr: die aktuellen Messungen stützen die These, dass wir in einem **Lambda-dominierten Universum** leben. Der Anteil Dunkler Energie ist sogar mit 2/3 der entscheidende Anteil.

Außerdem glaubt man, dass eine Blase Dunkler Energie, ein '**Antigravitationsvakuum**' im Innern neuer Lösungen der Einstein-Gleichungen realisiert sind, die man Gravasternen genannt hat. Das Antigravitationsvakuum stabilisiert den Gravastern und verhindert dessen Kollaps. Sie werden nun als **reguläre** Alternative zu den Schwarzen Löchern diskutiert.

2.17 Antimaterie

Antimaterie besteht aus **Antiteilchen**. Antiteilchen unterscheiden sich von 'normalen' Teilchen nur im Vorzeichen aller *additiven* Quantenzahlen. Zu den additiven Quantenzahlen gehört die **elektrische Ladung**, die Baryonenzahl, aber auch die verallgemeinerten Ladungsbegriffe wie Farbladung und schwache Hyperladung. Alle anderen Eigenschaften, wie Masse, Spin, Isospin und Lebensdauer sind identisch.

2.17.1 Kein schöner Tanz: Paarvernichtung

Trifft ein Teilchen auf sein Antiteilchen, so vernichten sie sich gegenseitig. In der Physik heißt dieser Vorgang **Paarvernichtung** oder *Annihilation*. Aus der Vernichtung der Teilchen geht elektromagnetische Vernichtungsstrahlung (*Annihilationsstrahlung*) hervor.

2.17.2 Dann lieber 'Teilchen aus dem Nichts'

Der umgekehrte Vorgang passiert jedoch auch: die **Paarerzeugung**. Dabei wandelt sich Strahlungsenergie in Materie um. Das Erstaunliche an diesem Phänomen ist, dass aus Photonen mit Ruhemasse null massebehaftete Teilchen, also Teilchen endlicher Ruhemasse, hervorgehen. Es gilt dabei immer die strenge Einhaltung der **Energieerhaltung**. Das berühmte **Masse-Energie-Äquivalent**, $E = mc^2$, das *Albert Einstein* 1905 in seiner Speziellen Relativitätstheorie (SRT) abgeleitete, kann herangezogen werden, um die Energie der Strahlung zu berechnen. Weil die Teilchen vollständig zerstrahlen, geht ihre gesamte Masse in Strahlungsenergie. Neben Energieerhaltung ist auch die **Drehimpulserhaltung** zu beachten, daher ist in der Regel für diesen Prozess ein **Rückstosskern** oder **Rückstossteilchen** vonnöten.

2.17.3 Beispiel: Elektron & Positron

Das bekannteste Beispiel, weil in der Natur häufig anzutreffen, ist die Erzeugung oder Vernichtung eines **Elektron-Positron-Paares**. Jedes dieser Teilchen hat eine Ruhemasse von 511 keV, nur unterscheiden sie sich in der elektrischen Ladung: das Elektron ist negativ, das Positron positiv geladen. Treffen diese beiden Teilchen zusammen, so entsteht die charakteristische Vernichtungsstrahlung in Form von zwei entgegengesetzt auseinander laufenden Gammaphotonen mit einer Energie von jeweils 511 keV. Elektron und Positron haben sich vernichtet. Es müssen zwei Photonen entstehen, weil neben der Energieerhaltung auch die Erhaltung von Impuls und Drehimpuls beachtet werden muss.

Die beiden Leptonen, Elektron und Positron, sind leichte Teilchen. Demzufolge wäre die Vernichtungsstrahlung aus einem Proton und einem Antiproton, die jeweils 2000fach schwerer sind als das Elektron bzw. Positron entsprechend noch hochenergetischer! In der Natur ist das sicher weniger häufig realisiert, jedoch gibt es astrophysikalische Quellen bei denen dieser Prozess in Erwägung gezogen wird. In der Teilchenphysik bzw. Hochenergiephysik werden bei hohen Energiedichten **virtuelle Paare** aus schweren Teilchen und Antiteilchen erzeugt. Die Nukleonen sind Baryonen und bestehen aus drei Quarks. Präzise gesagt nennt man sie die drei **Valenzquarks**. Sie wechselwirken durch den Austausch von Gluonen miteinander, die die starke Kraft vermitteln. Im Rahmen der *Heisenbergschen Unschärfe* der Quantentheorie können sich die Gluonen in virtuelle Paare aus Quark und Antiquark verwandeln. Dann existiert für kurze Zeit im Nukleon neben drei Valenzquarks ein so genannter **Quark-See** aus vielen Quark-Antiquark-Paaren.

2.17.4 Star Treks Pioniere

Der Quantenphysiker *Paul Dirac* (1902 - 1984) hat als erster die Existenz von Antimaterie 1928 theoretisch vorhergesagt, indem er eine speziell relativistische Erweiterung der Quantenmechanik formulierte (*Dirac-Theorie*). Dabei stellte sich heraus, dass der Spin der Teilchen eine natürliche Eigenschaft in der relativistischen Quantenmechanik ist.

In der Dirac-Theorie tauchte neben dem Elektron sein Antiteilchen, das Positron, auf. Im Speziellen war es dieses Teilchen, das später, im Jahr 1932, von *C.D. Anderson* experimentell gefunden wurde. Antiproton und Antineutron (mit entsprechendem Quarkinhalt anti-u, anti-u, anti-d bzw. anti-u, anti-d, anti-d) folgten viel später, in den Jahren 1955 und 1958.

2.17.5 Endlich Antiatome

Es ist möglich aus Antiteilchen **Antiatome** experimentell herzustellen. Dies ist jedoch sehr aufwendig, weil aus oben erläuterten Gründen die Antiatome gut von der normalen Materie abgeschirmt werden muss. Dies gelingt mit so genannten *magnetischen Fallen*. Am CERN ist es im Jahre 1995 für sehr kurze Zeit gelungen das einfachste Antiatom, nämlich **Antiwasserstoff**, herzustellen, wo ein Positron um ein negativ geladenes Antiproton 'kreist'! Die Herstellung von Antimaterie wird weiter intensiviert, um sie längere Zeit bestehen lassen zu können, beispielsweise dadurch dass ein Strahl relativistischer Teilchen auf Materie prallt, einem Prozess, wo auch Antiteilchen freigesetzt werden.

Teilchen, die ihr eigenes Antiteilchen sind, nennt man **Majorana-Teilchen**. So nimmt man vom elektrisch neutralen und sehr leichten, schwach wechselwirkenden Neutrino an, dass es ein Majorana-Teilchen ist. In Experimenten, die den *doppelten* Beta-Zerfall und die Erhaltung der Leptonenzahl untersuchen, versuchen Physiker dies nachzuweisen.

2.17.6 Antimaterie im Kosmos - na klar!

Die Frage, ob isolierte Galaxien aus Antimaterie bestehen, ist nicht ohne weiteres zu beantworten, weil die Photonen die gleichen Eigenschaften hätten, wie bei einer Galaxie mit normaler Materie. Nur die Teilchenemission der Galaxie scheint ein Weg zu sein, um darüber eine Aussage treffen zu können. Man geht davon aus, dass die Materie gegenüber der Antimaterie bei weitem überwiegt, weil ansonsten im Überlappungsgebiet eine signifikante Emission von Annihilationsstrahlung beobachtet werden müsste. Tatsächlich wird die Annihilationsstrahlung von Elektronen und Positronen als Gammasppektrallinie bei 511 keV Ruheenergie von Astronomen beobachtet. So nutzten Astronomen des Max-Planck-Instituts für Astrophysik 2004 das SPI-Instrument an Bord des Gammasatelliten Integral um die Gammalinie im Zentrum der Milchstraße zu beobachten (*Churazov et al., astro-ph/0411351*). Die Linie verriet, dass das interstellare Gas in der Sagittarius-Region etwa 7000 bis 40000 Grad heiß ist.

Im lokalen Universum beobachten wir eine Dominanz der 'normalen' Materie. Der Ursprung dieser Materie wird mit der Baryogenese beschrieben. In diesem Modell der Kosmologie wird davon ausgegangen, dass die 'normale' Materie nicht in allen Entwicklungsphasen des Universums dominant war. In einer der frühesten Stadien des Kosmos gab es vermutlich sogar fast gleich viel Materie und Antimaterie. Diese Phase heißt GUT-Ära. In dieser Epoche war es so heiß, etwa 10^{16} GeV, dass drei der vier Naturkräfte zur X-Kraft 'verschmolzen waren'. Diese Eigenschaft heißt auch GUT-Symmetrie. Die Großen Vereinheitlichten Theorien werden zugrunde gelegt, um den GUT-Kosmos zu beschreiben. Die GUT erlaubt, dass die Erhaltung der Baryonen- und Leptonenzahl verletzt werden kann. So ist es ohne weiteres möglich, dass sich über verschiedene Teilchenreaktionen ein Missverhältnis zwischen den Mengen an Materie und Antimaterie herausstellt. Es genügt bereits eine winzige **Materie-Antimaterie-Asymmetrie**, in der auf jedes Antiteilchen ein plus ein Milliardstel Teilchen kommen. Sobald die GUT-Symmetrie infolge der Abkühlung des Universums durch Expansion gebrochen wird (unterhalb etwa 2×10^{16} GeV), **gilt** die Baryonenzahlerhaltung. Dann kann das Verhältnis Materie zu Antimaterie für den ganzen Kosmos nicht mehr geändert werden! Die bis dato vorhandene Materie und Antimaterie vernichtete sich zu gleichen Anteilen gegenseitig. Die daraus hervorgehende Annihilationsstrahlung verwandelte den frühen Kosmos in ein Strahlenmeer aus Photonen. Diese **Urstrahlung** ist heute noch nachweisbar: Es

ist die kosmische Hintergrundstrahlung, die hier ihren Ursprung fand. Die Strahlung war in ihrer Bildungsphase noch 'eingeschlossen' in ein dichtes Urplasma. Anfangs bestand das Urplasma aus Quarks und Leptonen. In folgenden Entwicklungsphasen bildeten sich Baryonen, Mesonen, später Nukleonen in der primordialen Nukleosynthese und schließlich Atome in der Rekombinationsära. Erst in dieser relativ späten Entwicklungsphase des Kosmos, bei einer kosmologischen Rotverschiebung von $z = 1100$ oder 380000 Jahre nach dem Urknall, konnten die Urphotonen ihren 'Käfig' aus dichtem Plasma verlassen: Die Hintergrundstrahlung verließ die letzte Materiefläche (engl. *last scattering surface*), an der sie streute und war frei. Man spricht im Physikerjargon auch von der Entkopplung der Hintergrundstrahlung. Springen wir noch einmal an den Punkt, wo die Vernichtungsstrahlung entstand: Der geringe Anteil an Materie, der keinen passenden Antimateriepartner fand, zerstrahlte nicht und überdauerte das Inferno. So erklärt die minimale Materie-Antimaterie-Asymmetrie der GUT-Ära das Vorhandensein und die Dominanz der Materie heute, im lokalen Kosmos.

2.17.7 Antimaterie im Alltag der Physiker

Die Antimaterie ist schon lange Gegenstand der Science-Fiction Literatur, aber an sich nicht so exotisch, wie dort dargestellt wird. An Teilchenbeschleunigern ist die kurzzeitige Existenz von Antiteilchen ein alltägliches Phänomen. Erinnerung sei noch an den **Warpantrieb** in der SF-Serie Star Trek und das **positronische Gehirn** des Androiden Lt. *Commander Data* bei *Star Trek - The Next Generation*. In beiden Fällen sollten erhebliche Schwierigkeiten darin bestehen, die Antimaterie von der normalen Materie abzuschirmen. Die positronischen Ströme könnten magnetisch auf Sollbahnen gehalten werden. Offensichtlich hat diese hoch entwickelte Zivilisation Mittel und Wege gefunden, dies in den Griff zu bekommen.

2.18 Apastron

Dies ist ein typischer Begriff aus der Himmelsmechanik, einer klassischen Disziplin der Astronomie. Das Apastron (grch. *apo*: entfernt von; grch. *astron*: Stern) ist der **fernste 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 Periastron ist Apastron besonders bei der Diskussion von *Doppel- und Mehrfachsternsystemen* gebräuchlich.

2.19 Apertursynthese

Ein mittlerweile weit verbreitetes Verfahren in der Radio- und optischen Astronomie zur Erhöhung der Öffnung von Teleskopen. Als **Öffnung** bezeichnet man den Durchmesser des Objektivs bei Teleskopen. Je größer die Öffnung, umso mehr Photonen (also Informationen) können von der Quelle 'aufgesammelt' werden. Das Bild der Quelle wird heller. Die Lichtstärke wird umso wichtiger, je mehr man ein Objekt vergrößert, wie jeder Hobbyastronom weiß.

Daher ist eine große Öffnung bei allen Teleskopen erstes Ziel und motiviert zum Bau von Großteleskopen!

2.19.1 Statik schiebt den Riegel vor

Aus statischen Gründen gibt es Obergrenzen für Großteleskope. Je größer die Sammelfläche für Licht oder Teilchen ist, umso schwerer ist das Objektiv und die gesamte Montierung des Teleskops. Optische Teleskope der 10-Meter-Klasse bilden eine Schwelle, die man durch neue Methoden der Spiegelkonstruktion (kleine hexagonale Einzelspiegel bilden den großen Spiegel: *multi-mirror telescope*, MMT) zu erweitern sucht. Die Einzelspiegel werden durch eine Technologie namens *Aktive Optik* in eine angemessene Passform gebracht, die derjenigen eines großen Einzelspiegels entspricht.

2.19.2 Zauberei mit vielen Teleskopen und Atomuhren

Nun kann man sich eines Tricks behelfen, der sich in der Radioastronomie schon lange bewährt hat: salopp formuliert schließt man viele Einzelteleskope zu einem synthetischen Großteleskop zusammen. Dieses Verfahren nennt man *Apertursynthese* und man betreibt dann **Interferometrie**.

Dabei ist es wichtig, dass die **Synchronisation** zwischen den Einzelteleskopen stimmt. Sie alle blicken an dieselbe Stelle am Himmel um die Strahlungsemission einer Quelle aufzuzeichnen. Es muss sehr genau zeitlich korreliert sein, wann welches Teleskop welche Daten aufnimmt. Dies ist der aufwendigste Teil in der Interferometrie und wird natürlich mit Computern bewerkstelligt. Das Bild einer Quelle ist also eine Überlagerung vieler Einzelbilder von Einzelteleskopen. Dadurch dass die Einzelteleskope einen räumlichen Abstand voneinander haben, besitzt das resultierende Bild eine viel **größere Auflösung**. Die 'Augen' interferometrischer Teleskope sehen viel schärfer!

2.19.3 Aktuelle Auflösungsgrenzen

Radioastronomisch reicht das in den Millibogensekundenbereich (mas) und Mikrobogensekundenbereich, was eine genaue Radiokartierung des Galaktischen Zentrums der Milchstraße ermöglicht hat. Denn dieses ist optisch durch Staub verborgen!

Gegenwärtige interferometrisch arbeitende Teleskopverbände sind das VLA, VLBI und VSOP (radioastronomisch) sowie seit kurzem optisch VLTI.

2.20 Aphel

Dies ist ein typischer Begriff aus der Himmelsmechanik, einer klassischen Disziplin der Astronomie. Das Aphel (grch. *apo*: entfernt von; grch. *helios*: Sonne) ist der **fernste 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 Allgemeine Relativitätstheorie verwendet werden.

Siehe auch Perihel.

2.21 Apogäum

Dies ist ein typischer Begriff aus der Himmelsmechanik, einer klassischen Disziplin der Astronomie. Das Apogäum (grch. *apo*: entfernt von; grch. *geo*: Erde) ist der **fernste 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 Perigäum.

2.22 Astronomie

2.22.1 Etymologie und Geschichte

Die Astronomie (*ἀστρον*, *astron*, grch.: Stern, Gestirn, Himmel) ist die Stern- oder Himmelskunde und gilt als die älteste unter den Naturwissenschaften. Offenbar hat sich der denkende Mensch früh gefragt, welche Ereignisse am Himmel geschehen. Das verwundert nicht, dominiert doch schon der Lauf der Sonne, des nächsten Sterns (Entfernung: durchschnittlich etwa 150 Mio. Kilometer, eine Astronomische Einheit oder acht Lichtminuten), unseren Tagesablauf durch den Wechsel von hell und dunkel. Die Mondphasen, die hellen Planeten und das rotierende Firmament rufen auch bei blanker Unkenntnis Faszination und Erstaunen hervor. Die erwachsende Neugierde ist deshalb eine natürliche Konsequenz und mündete in ein Hinterfragen und **Erforschen des Himmels**. Zu Beginn der Menschheitsgeschichte spielte die rituelle Verehrung von Himmelsobjekten eine große Rolle. Das beobachtet man auch heute noch in Form von Rudimenten in vielen Kulturkreisen und wenigen Naturvölkern, denen die moderne Zivilisation verschlossen blieb. Unkenntnis und Unverständnis schüren Ehrfurcht und Furcht. Die Verehrung und zeremonielle Handlungen sollten die Naturkräfte besänftigen. In vielen Kulturen bildeten sich so polytheistische Religionen aus, in denen Naturgottheiten verehrt wurden und werden.

Die häufige **Beobachtung** des Himmels führte allerdings auch auf die Entdeckung von Regelmäßigkeiten und periodischer Ereignisse. Triviale Beispiele sind der Wechsel von Tag und Nacht, die Mondphasen sowie die Jahreszeiten. Damit wurde das Himmelsgeschehen vorhersagbar, was die Geburtsstunde astronomischen Wissens markiert. Wer in die Zukunft blicken kann, hat Macht. Die astronomischen Kenntnisse weniger Hüter des Wissens wurde von Anfang an auch missbraucht, um Unkundige zu beeindrucken und an sich zu binden. Die Astronomie entwickelte sich deshalb zusammen mit der **Astrologie** und den Religionen. Ursprünglich wurde auch die Sternkunde als Wissenschaft mit dem griechischen Wort *astrologia* bezeichnet. Beeindruckende Beispiele der Verschmelzung von Astronomie und Astrologie sind die ältesten Menschheitskulturen wie die Babylonier in den vor- und die Maya im nachchristlichen Jahrtausend. In beiden Kulturen nutzten Priesterastronomen geschickt ihre fortgeschrittenen Kenntnisse des Himmels. Weitere Details dieser historischen Entwicklung entnehmen Sie bitte dem Essay Der Sternenhimmel.

2.22.2 Geburtsstunde der wissenschaftlichen Beobachtung

Spätestens das **Zeitalter der Aufklärung** im 17. und 18. Jahrhundert markiert einen Wendepunkt, an dem sich die **Astronomie als Naturwissenschaft** emanzipierte. Die Erfindung des Fernrohrs im Jahr 1608 durch den Holländer *Hans Lipperhey* ermöglichte die Entdeckung bisher unsichtbarer Geschehnisse am Himmel. Ein Pionier der beobachtenden Astronomie ist *Galileo Galilei*, der das *holländische Fernrohr* benutzte. Später modifizierte *Johannes Kepler* (1571 - 1630), dieses Fernrohr, indem er als Okular die Zerstreuungslinse durch eine Sammellinse ersetzte. Dieses astronomische Fernrohr heißt *Kepler-Fernrohr*. Die damit aufkommenden experimentellen Erfolge und das Entwickeln einer wissenschaftlichen Methodik legten den Grundstein der modernen Astronomie: Wie in allen Naturwissenschaften wird auch das astronomische Weltbild durch **Experimente und Theorien** aufgebaut (Das Konzept wird in zwei weiteren Essays Die wissenschaftliche Methode und Alles graue Theorie? tief greifend behandelt). Die Experimente sind jederzeit wiederholbar, d. h. reproduzierbar und werden durch ein physikalisches Modell, einer Theorie, erklärt. In der Astronomie gibt es sozusagen ein 'Himmelslabor'. Da der irdische Wissenschaftler hier nicht viel Einflussmöglichkeiten hat spricht man bei den Experimentatoren in der Astronomie von den **Beobachtern**. Sie beobachten den Himmel mit den unterschiedlichsten Messgeräten (Detektoren), vor allem mit **Teleskopen**, und dokumentieren diese Beobachtung. Die **Theoretiker** entwickeln zu diesen Beobachtungen ein **physikalisches Modell**, das in vielen Einzelheiten die Beobachtung erklärt, indem es die Ursache(n) für das beobachtete Ereignis entlarvt. Im engeren Sinne meint man mit dem Begriff **Astronomie** heute den beobachtenden Zweig dieser Naturwissenschaft (Empirie, Praxis) und mit dem Begriff **Astrophysik** den theoretischen Zweig, der besonders nahe an der Naturwissenschaft Physik ist.

Weiterhin unterscheidet man die **Profiastronomie** von der **Amateurastronomie**: In der professionellen Astronomie forschen Berufsastronomen mit moderner Technologie wie Großteleskopen, Satellitentechnik und Supercomputern und im Rahmen großer, internationaler Kollaborationen - aus Kostengründen und zum Wissensaustausch. In der Amateurastronomie forschen versierte Hobbyastronomen mit kleinerem (aber ebenfalls vielfach modernem) Gerät. Amateurastronomen sind häufig Spezialisten für Langzeitbeobachtungen beispielsweise von Veränderlichen, für die Kometenjagd oder für die optische Astrophotographie. Aufgrund hoher Kosten und fehlender Manpower wird dieser Aufwand in der Profiastronomie kaum betrieben.

2.22.3 Disziplinen der beobachtenden Astronomie

Die Astronomie hat sich seit der Erfindung des Teleskops im 17. Jahrhundert, der Verbesserung der Detektoren und der Ausarbeitung der Relativitätstheorie und der Quantentheorie im 20. Jahrhundert enorm entwickelt. Mittlerweile unterscheidet man folgende Disziplinen der Astronomie:

- ◇ Grundsätzlich sind Beobachter an **Detektorphysik** und **Teleskopbau** interessiert. Es muss sehr präzise geklärt werden, was mit dem Signal vom Himmel (Photon oder andere Teilchen) im Detektor passiert. Denn im Prinzip wird aus dem ursprünglichen Signal ausnahmslos ein elektronisches Signal (elektrischer Stromimpuls), dass die entsprechende Information trägt. Die Photoplatten der klassischen, optischen Astronomie wurden mittlerweile in der Profiastronomie durch CCDs (engl. *charged coupled devices*) verdrängt. Ein CCD-Chip besteht aus einem lichtempfindlichen

Halbleitermaterial. Diese Fläche ist unterteilt in Pixeln, also einem Raster aus Elementen. Ein digitales Bild wie das Bild auf dem Computermonitor besteht aus einer großen Zahl von Pixeln. Je mehr Pixel es sind, umso feiner ist die Darstellung des Bildes. CCDs gibt es in jeder Digitalkamera. Dort wandeln sie auch die elektromagnetische Information die vom Objektiv kommt in elektrische Ströme um. Diese Ströme werden wieder genutzt, um das Pixelbild abzubilden z. B. auf einer Flüssigkristallanzeige (engl. *liquid crystal display*, LCD) oder einem Monitor. Die Vorteile des CCDs sind die hohe Quantenausbeute (es registriert sehr viele Photonen, wenige gehen verloren) und die digitalisierte Form der Informationsdaten. CCDs zeichnen Signale aus nahezu allen Spektralbereichen auf und werden deshalb vor allem in der Infrarot-, optischen und Röntgenastronomie als 'Kameras' eingesetzt. Ein Astronom bereitet die Information einer kosmischen Quelle einerseits als Bild auf (*Imaging*) oder als Spektrum (siehe unten: Spektroskopie).

- ◇ Die **Astrometrie** ist ein klassischer Zweig, der sich mit der Position und Entfernung der Gestirne beschäftigt. Diese Disziplin ist auch heute noch von großer Relevanz, folgen doch aus diesen präzisen Grunddaten neue, sekundäre Parameter. Winzige Effekte der modernen Astronomie reagieren besonders sensibel auf einen unzureichenden Grunddatenstock.
- ◇ Die **Spektroskopie** beschäftigt sich mit der Gewinnung der Spektren von Himmelsobjekten, also einer Intensität (alternativ: Leuchtkraft, Helligkeit, Farbindex, in der Regel ein spektraler Fluss), die über einer Wellenlänge (gleichwertig: Frequenz oder Energie) aufgetragen wird. Aus diesem charakteristischen Verlauf, das den Laien an den Kursverlauf seiner Aktie erinnern mag, folgert der Astronom charakteristische Eigenschaften der Quelle. Der Theoretiker versucht diese Spektren mit einem physikalischen Emissions- und Absorptionsmodell zu reproduzieren, das in der Regel auch die Umgebung der Quelle und den Bereich zwischen Quelle und Beobachter berücksichtigen muss. Die Anfänge der Astronomie liegen in der optischen Astronomie, also der Untersuchung von Licht aus dem Weltall. Mittlerweile bietet der moderne Teleskopbau den Astronomen die Möglichkeit aus allen Spektralbereichen der elektromagnetischen Wellen Informationen kosmischer Quellen zu empfangen. Die Strahlung, die die irdische Atmosphäre abblockt (z. B. Ultraviolett- und Röntgenstrahlung), wird in satellitengestützten Observatorien außerhalb der Erdatmosphäre gemessen. Deshalb haben sich (aufsteigend in der Strahlungsenergie) die Zweige der Radioastronomie, Infrarotastronomie, optischen Astronomie, Ultraviolettastonomie, Röntgenastronomie und Gammaastronomie ausgebildet. Originär wurden also Photonen beobachtet, aber heute beobachten Profis die Spektren sämtlicher Teilchen, die aus den Weiten des Universums zu uns gelangen. Deshalb gibt es in der modernen Astronomie auch die Neutrinoastronomie (siehe Neutrino), die TeV-Astronomie (siehe Elektronenvolt), die Hochenergieastrophysik (die sich z. B. mit Kosmischer Strahlung und Gamma Ray Bursts beschäftigt) und die Gravitationswellenastronomie. Auch wenn Gravitationswellen bisher nicht direkt nachgewiesen wurden, so ist das gerade das erklärte Ziel der aufblühenden Gravitationswellenastronomie. Die Allgemeine Relativitätstheorie sagt eindeutig die Existenz dieser Wellen voraus, die als 'Beben im Raum-Zeit-Gefüge' aufgefasst werden können.

Im Fachjargon spricht man bei den unterschiedlichen Spektralbereichen von den 'Fenstern der Astronomie'. Die Bezeichnung folgt einer metaphorischen Sicht, dass man durch jedes Beobachtungsfenster ins All etwas Neues vom Universum sehen kann. Die Information einer kosmischen Quelle liegt demnach in Form eines (elektromagnetischen) Multiwellenlängenspektrums und Teilchenspektren vor und kann von Astrophysikern interpretiert werden. Insgesamt muss sich auf der Grundlage des entwickelten, physikalischen Modells ein 'stimmiges Bild' aus sämtlichen Beobachtungsdaten ergeben. Erst dann darf die Quelle als verstanden deklariert werden!

- ◇ Die **Photometrie** hat zur Aufgabe die Leuchtkraft bzw. Helligkeit eines Himmelsobjektes zu messen. Nimmt man diese Helligkeit über ein gewisses Zeitintervall auf, so erhält man eine so genannte Lichtkurve. Die Form der Lichtkurve verrät bereits sehr viel über die Quelle und kann beispielsweise dazu dienen unmittelbar eine Supernova, einen Gamma Ray Burst, eine Nova, einen besonderen Typus eines veränderlichen Sterns oder eine Quasi-periodische Oszillation zu klassifizieren. Photometrische Untersuchungen bei Galaxien helfen bei der Klassifikation ihrer Morphologie in Hubble-Typen und sind somit Interessensgebiet der Galaxienentwicklung.
- ◇ In der **Polarimetrie** wird eine weitere Eigenschaft elektromagnetischer Wellen erforscht: die Feldvektoren schwingen bei manchen Quellen in bevorzugten Raumrichtungen. Diese Schwingungszustände heißen Polarisationsrichtungen und man unterscheidet linear, zirkular und elliptisch polarisiertes Licht von unpolarisiertem Licht. Sonnenlicht ist z. B. unpolarisiert, d. h. sämtliche Schwingungszustände liegen vor. Sie können durch einen Polarisationsfilter, wie einer Sonnenbrille, ausgeblendet werden: hinter die Sonnenbrille gelangt nur Strahlung einer bestimmten Polarisation. Weil durch Ausblenden einer Polarisationsrichtung auch Strahlungsintensität verloren geht, wird es hinter einer Sonnenbrille dunkler. Synchrotronstrahlung ist immer linear polarisiert. Sie entsteht, wenn elektrische Ladungen in Magnetfeldern beschleunigt werden. Die lineare Polarisationsrichtung lässt Rückschlüsse auf die räumliche Verteilung des Magnetfeldes am Emissionsort zu. Genau das nutzen Radioastronomen aus, um die galaktischen Magnetfelder zu kartieren. Offensichtlich sind diese Magnetfelder wichtig in der Dynamik der Galaxien und bei der Bildung von Spiralarmen in Spiralgalaxien.

Die Polarisation der kosmischen Hintergrundstrahlung ist ebenfalls ein modernes Forschungsgebiet. Die Hintergrundstrahlung trifft bei ihrer Ausbreitung ins lokale Universum auf mittlerweile entstandene Materie. Als Streuzentren wirken vor allem die Elektronen der Protogalaxien. Aus diesen Daten erhoffen sich die Kosmologen Informationen über die Materieverteilung im frühen Universum zu erhalten.

2.22.4 Disziplinen der theoretischen Astrophysik

Den theoretischen Sektor kann man genauso feiner untergliedern. Die Teildisziplinen der Astrophysik lauten:

- ◇ Die **Himmelsmechanik** ist der klassische, theoretische Zweig der Astronomie. Auf der Grundlage einfacher geometrischer und mechanischer Gesetzmäßigkeiten versuchten die Astrophysiker der ersten Stunde die Bewegung der Gestirne, vor allem von Sonne, Mond und der Planeten, zu erklären. Der alexandrinische Astronom

und Mathematiker *Claudius Ptolemäus* (~ 100 - 160) versuchte eine Erklärung mit geometrischen Mitteln im Rahmen eines geozentrischen Weltbildes. In diesem *Ptolemäischen Weltbild* bewegen sich alle Himmelskörper auf Kreisbahnen. Das allein konnte die komplizierten Planetenbewegungen nicht erklären, so dass Ptolemäus die so genannten *Epizykel* einführte: hier bewegen sich die Planeten auf Kreisbahnen, deren jeweilige Zentren ihrerseits einen Kreis um die Erde beschreiben. Diese rein geometrische Beschreibung der Planetenbewegung veröffentlichte Ptolemäus um das Jahr 150 n. Chr. in seinem astronomischen Handbuch, dem *Almagest*. Dieses Werk bildete lange Zeit die Grundlage der Astronomie, bis eine sehr exakte Beschreibung der Planetenbewegungen um die Sonne dem Astronomen *Johannes Kepler* auf *rein empirische* Weise gelang: 1609 formulierte er die ersten beiden der drei berühmten Kepler-Gesetze. Der Begriff Himmelsmechanik ist auch heute noch gebräuchlich, involviert aber dann die Newtonsche, Pseudo-Newtonsche, Post-Newtonsche oder Einsteinsche Gravitationsphysik.

- ◇ Kosmologie und **Kosmogonie** befassen sich mit der Entstehung und Entwicklung des Universums als Ganzes. Die Dunkle Energie entpuppt sich als die treibende Kraft, die für die Expansion des Kosmos seit dem Urknall sorgt. Das größte Rätsel der modernen Kosmologie ist, was sich genau hinter der Dunklen Energie verbirgt. Ist es eine globale Manifestation des Quantenvakuums? Triumphiert die Kosmologische Konstante über Quintessenz und Phantom-Energie?
- ◇ **Galaxienforschung** hat die Bildung, Verschmelzung und Dynamik von Galaxien und Galaxienhaufen zum Gegenstand. Typischerweise besteht eine Galaxie aus einigen hundert Milliarden Sternen und aus interstellarem Gas (interstellares Medium, ISM). Zwischen Galaxien gibt es ebenfalls Material, das intergalaktische Medium (IGM). In Galaxienhaufen ist das IGM dichter als bei 'frei stehenden' Feldgalaxien. Die Galaxien wechselwirken miteinander vornehmlich über die Gravitation. Die Gezeitenkräfte sorgen dabei für bizarre Verformungen und Verschmelzungen von Galaxien. Dabei spielt die Dunkle Materie eine wahrlich gewichtige Rolle, sorgt sie doch dafür, dass die Galaxien stärker miteinander wechselwirken als nur mit 'normaler Materie'.
- ◇ **Stellarphysik** befasst sich mit der Entstehung und Entwicklung von Sternen. Der Sternaufbau, thermonukleare Fusion und Zustandsgleichungen von Sternmaterie sind von besonderem Interesse und münden in ein Verständnis der Entwicklungspfade der Sterne im Hertzsprung-Russel-Diagramm. Am Ende der 'normalen Sternexistenz' stehen mitunter katastrophale Ereignisse wie Sternexplosionen (Supernovae, Hypernovae) und die Entstehung Kompakter Objekte wie z. B. Weißer Zwerge, Neutronensterne, Quarksterne oder gar Schwarzer Löcher.
- ◇ **Planetologie** behandelt mittels physikalischer Methoden die Bildung und weitere Entwicklung von Planeten. Unmittelbares Forschungsobjekt sind die Planeten des Sonnensystems, aber auch Planeten um andere Sterne, so genannte *Exoplaneten*, die mittlerweile entdeckt wurden. Man weiß inzwischen, dass Planeten aus Gasmassen entstehen, die sich um einen Stern angesammelt haben. Es häuft sich zunächst in protoplanetaren Scheiben (engl. *protoplanetary disks*, kurz Proplyds) an. Dies ist eine Form von Akkretionsscheiben, die im Vergleich zu den Scheiben in Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) und Röntgendoppelsternen relativ kalt und deutlich kleiner sind.

Schließlich fragmentieren aus der protoplanetaren Scheibe größere Klumpen, aus denen dann Planeten unterschiedlicher Größe entstehen.

Das Sonnensystem legt eine generelle Klassifikation in Gasplaneten wie Jupiter, Saturn und Uranus sowie Gesteinsplaneten (auch erdähnliche oder terrestrische Planeten genannt) wie Merkur, Venus, Erde und Mars nahe. Relikte des Protoplanetaren Nebels sind bis heute auszumachen: dünn verteiltes, interplanetares Gas existiert nach wie vor zwischen den Planeten. Es verursacht durch Streuung von Sonnenlicht das auf der Erde sichtbare Zodiaklicht. Die Planetologie muss auch klären, wie in den anderen Bereichen unseres Sonnensystems Kometen und Planetoiden (etwas irreführend auch Asteroiden genannt) entstehen konnten. Ein Berührungspunkt zur Stellarphysik ist die Unterscheidung von Sternen und Planeten: Astronomen kennen Übergangsobjekte wie die Braunen Zwerge und M-Zwerge (siehe dazu Eintrag Spektraltyp), die sich an der Schwelle zur thermonuklearen Fusion befinden.

- ◇ **Relativistische Astrophysik** ist der Oberbegriff für sämtliche Bereiche der Astrophysik, in denen die Effekte der Relativitätstheorie berücksichtigt werden müssen. Werden Geschwindigkeiten betrachteter Objekte (Gasteilchen, Elementarteilchen) vergleichbar mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit, so kommt die Spezielle Relativitätstheorie zur Anwendung. Bei starken Gravitationsfeldern von kompakten Objekten wie Schwarzen Löchern und Gravitationslinsen dringt man in den Gültigkeitsbereich der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) vor. Auch Gravitationswellen und die Kosmologie sind nur mit der ART angemessen zu behandeln. Die Relativität birgt ganz erstaunliche, neue Effekte wie die Lichtablenkung in Schwerfeldern (siehe Geodäten), dynamische Raumzeiten, die expandieren können z. B. das Universum selbst oder die nahezu phantastischen Aspekte der Wurmlöcher und kollidierenden Universen (siehe Branen-Kosmologie und Ekpyrosis).
- ◇ Quantengravitation befasst sich mit starken Gravitationsfeldern in kleinen Raumdimensionen. Diese Verhältnisse spielen in den Frühphasen des Universums kurz nach dem Urknall eine Rolle und auch in der Physik der Schwarzen Löcher z. B. bei der Hawking-Strahlung (dort als *semi-klassische Quantengravitation* ohne quantisiertes Gravitationsfeld!). Die Quantengravitation versucht die erfolgreichen und bewährten Konzepte der Relativitätstheorie mit den ebenso erfolgreichen der Quantentheorie zu vereinen. Auf diesem Weg wurden neue Konzepte erarbeitet, die in vielen Aspekten Erfolg versprechend scheinen: Die Stringtheorien verfolgen eine neue Sicht auf Welt der Elementarteilchen. Sie zielt auf eine Vereinheitlichung der vier fundamentalen Naturkräfte (gravitative, elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung). Außerdem werden weitere Raumdimensionen neben den dreien der ART diskutiert (siehe Extradimensionen und Kompaktifizierung). Ein anderer Zugang zu einer Quantengravitation besteht in der Loop-Quantengravitation. In der ART ist die Raumzeit kontinuierlich und wird nur durch einige intrinsische Singularitäten 'durchbohrt'. Die Loop-Quantengravitation verfolgt eine Quantisierung der Raumzeit in submikroskopische Einheiten. Diese 'Atome der Raumzeit' sorgen damit für eine Körnung der Raumzeit, was faszinierende, neue Konsequenzen eröffnet, die auch philosophisch sehr interessant sind (ein neuer Atomismus?).
- ◇ **Astroteilchenphysik** (gerne auch **Teilchenastrophysik**) und **Hochenergieastrophysik** beschäftigen sich mit den energetischsten Phänomenen

im Kosmos. So besteht die Kosmische Strahlung aus Teilchen, die Energien bis zu unglaublichen 10^{20} eV aufweisen. Man hat die Teilchen als Protonen, Elektronen, Neutrinos und andere zwar identifiziert, rätselt aber über ihren Ursprung.

Gigantische Teilchenbeschleuniger, die irdische Anlagen bei weitem überflügeln, kennt man inzwischen auch: Beispielsweise der Crab-Pulsar, ein schnell rotierender Neutronenstern (siehe Pulsar) im Sternbild Stier beschleunigt Teilchen auf ultrarelativistische Geschwindigkeiten (Lorentz-Faktor bis 10^7 !). Das macht ihn zu einer der hellsten Röntgen- und TeV-Quellen am Himmel.

Die Jets der AGN, beispielsweise von Blazaren, kommen auch als Quellen ultrahochenergetischer Leptonen und Hadronen in Betracht. Katastrophale Sternexplosionen und Verschmelzungsszenarien von kompakten Sternen setzen sekundenlange Blitze im Bereich der Gammastrahlung (GRBs) frei und stören damit sogar den irdischen Funkverkehr.

Weiterhin diskutiert man aufgrund von Erkenntnissen in der Teilchenphysik die Existenz schwerer supersymmetrischer Teilchen, die einen Anteil zur Dunklen Materie stellen könnten (*Dark SUSY*). Die moderne Generation an Teleskopen (HESS, MAGIC) vermag die hochenergetischen Teilchenschauer aus dem All zu registrieren. Es ist zu erwarten, dass die Hochenergieastrophysik ähnliche und vergleichbar erfolgreiche Wege beschreiten wird, wie die Röntgenastronomie in den 1990er Jahren.

- ◇ **Nebelphysik** behandelt das Zustandekommen von Emissions- und Reflexionsnebeln sowie Dunkelwolken. Prominente Beispiele sind der Orionnebel, bei dem man unmittelbar Zeuge der Sternentstehung wird: die Plejaden, einem offenen Sternhaufen, dessen Sterne in Reflexionsnebel eingebettet sind und der Pferdekopfnebel (ebenfalls im Sternbild Orion) einer Dunkelwolke aus Staub, die undurchdringlich für Strahlung optischer Wellenlängen ist.
- ◇ **Jetphysik** hat die Erzeugung, Dynamik und Entwicklung von Gasströmen zum Forschungsgegenstand. Astronomen beobachten Jets in vielen Systemen, sowohl als stellare Jets (*Mikrojets*) bei Protosternen, Röntgendoppelsternen und Kataklysmischen Veränderlichen, als auch als großskalige Jets (*Makrojets*) in Galaxien, vor allem den AGN. Die Theorie nutzt für diese strömenden Fluide die Gleichungen der Hydrodynamik und Magnetohydrodynamik (MHD). Je nach kosmischen Objekten fließen Konzepte der relativistischen Astrophysik ein, so z. B. bei der Akkretion auf ein rotierendes Schwarzes Loch (allgemein relativistische MHD).
- ◇ Die **Strahlungsphysik** ist so fundamental in der Astronomie, dass sie in beinahe alle genannten Disziplinen Einzug hält. Es gibt Grenzfälle, wo man sie vernachlässigen darf; dann spricht man von *nicht-radiativer Astrophysik*. Im engeren Sinne meint Strahlungsphysik die Entstehung unterschiedlicher Strahlungsformen (z. B. thermische Strahlung, Bremsstrahlung, Synchrotronstrahlung, Comptonisierung) und die Wechselwirkung von Strahlung mit Materie (Streuung, Absorption, Emission, Fluoreszenz, Reflexion).
- ◇ An den Randgebieten der Astrophysik zu anderen Naturwissenschaften darf man **Astrochemie** und **Exobiologie** ansiedeln. Das Weltall ist voll von komplexen Molekülen, die sich durch charakteristische Linienemission verraten. Insbesondere muss

Entfernungsskala im Sonnensystem

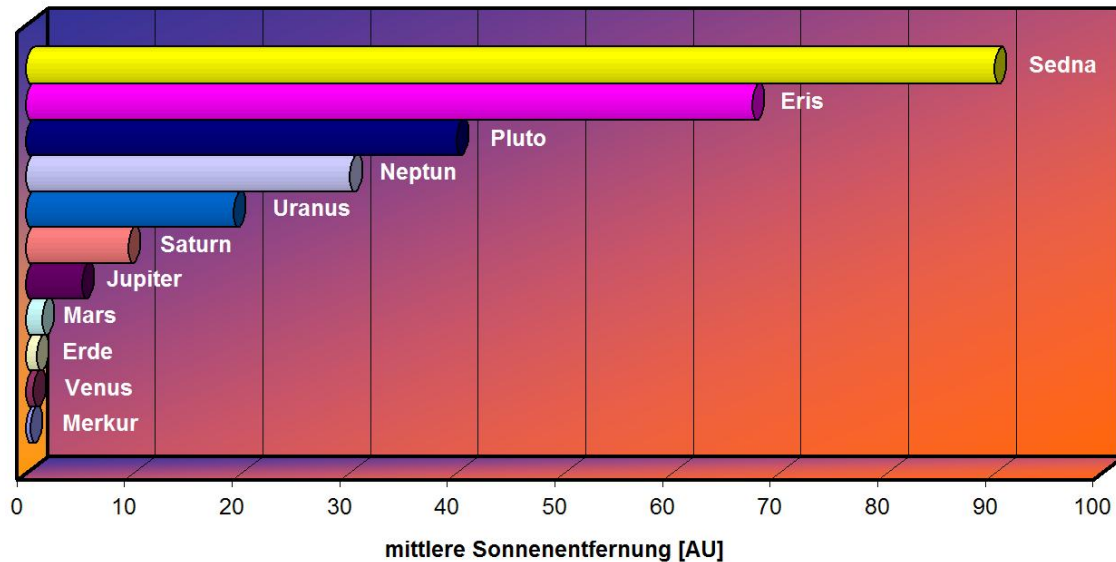


Abbildung 2.8: Entfernungsskala der Planeten im Sonnensystem.

für ihr Vorkommen eine geringe Temperatur gegeben sein. Denn die Umgebung heißer, junger Sterne (wie O- und B-Sterne) wird von UV-Strahlung durchflutet und ionisiert interstellare Gase (was zu charakteristischen HII-Regionen führt). Die **Staubastronomie** ist also eine Astronomie des kalten Universums. Erst in diesen kühlen Regionen kann ein 'chemischer Cocktail' gedeihen, der die Entstehung von Leben begünstigt. Die ganz allgemeinen Voraussetzungen für die Entwicklung von Lebensformen und deren Schicksal wird im Rahmen der Exobiologie untersucht.

Diese Themenschau zeigt: Astronomie ist mehr als ein verklärter Blick durch ein Fernrohr - Astronomie ist Grundlagenforschung an der Grenze des Denkbaren und Hochleistungstechnologie an der Grenze des Machbaren.

2.23 Astronomische Einheit

Eine typische Längeneinheit in unserem Sonnensystem, die festgelegt wurde aus dem mittleren Abstand von der Erde zur Sonne:

$$1 \text{ AU} = 149,597870 \text{ Millionen Kilometer}$$

Der *mittlere* Abstand muss verwendet werden, weil die Erdbahn um die Sonne eine geringe Exzentrizität aufweist, so dass es bei einem Umlauf einen sonnennächsten (**Perihel**) und sonnenfernsten Punkt (**Aphel**) gibt. Das astronomische Einheitensystem legt die *Internationale Astronomische Union* (*International Astronomical Union*, **IAU**), eine internationale Gemeinschaft von Astronomen, fest.

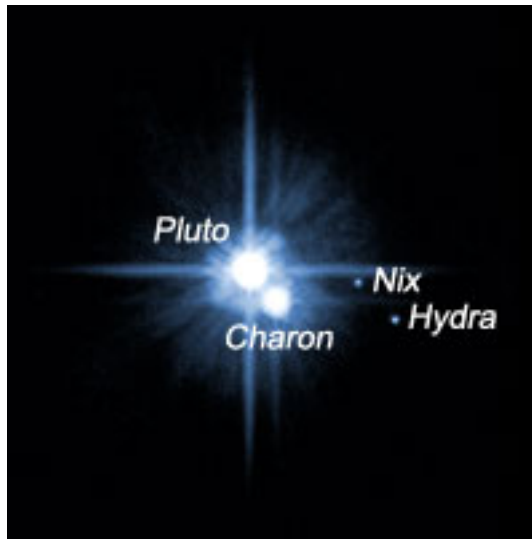


Abbildung 2.9: Pluto und seine drei Monde.

2.23.1 AU-Skala in unserem Sonnensystem

Scherzhaft könnte man sagen: Des Chemikers Gold (Elementsymbol Au), ist des Astronomen Längeneinheit. Die Astronomische Einheit ist typisch für planetare Längenskalen. Auf dieser charakteristischen Skala sind die mittleren Entfernungen der acht (!) Planeten von der Sonne (siehe Abbildungen 2.8):

- ◇ Merkur 0.4 AU
- ◇ Venus 0.7 AU
- ◇ Erde 1.0 AU (*per definitionem*)
- ◇ Mars 1.5 AU
- ◇ Jupiter 5.2 AU
- ◇ Saturn 9.5 AU
- ◇ Uranus 19.3 AU
- ◇ Neptun 30.1 AU

2.23.2 Pluto: Nix mehr Planet, dafür aber Mond Nix

Im August 2006 hat die Internationale Astronomische Union den Begriff des Planeten neu definiert. Daher gibt es nur noch acht Planeten im Sonnensystem und Pluto gehört zur neuen Klasse der **Zwergplaneten**. Pluto ist etwa 40 AU entfernt. Sein großer Mond *Charon* ist schon seit 1978 bekannt - im Jahr 2006 wurden zwei neue Monde entdeckt, die *Nix* und *Hydra* getauft wurden. Das Beobachtungsfoto 2.9, aufgenommen mit dem Weltraumteleskop



Abbildung 2.10: Weltraumteleskop Hubble, kurz HST.

Hubble zeigt Pluto mit seinen drei Monden (Credit: NASA/ESA, *Weaver, Stern & the Pluto Companion Search Team* 2006).

Pluto ist zwar kein Planet mehr, dafür aber 'Klassenprimus' einer neuen, offiziellen Objektklasse: den **Trans-Neptunischen Objekten** (TNOs). In Plutos Umgebung schließt sich der so genannte **Kuiper-Ring** an, der aus vielen kleinen Objekten besteht, ähnlich dem Planetoidengürtel zwischen Mars und Jupiter. Im Kuiper-Ring befindet sich ein weiterer Zwergplanet namens **Eris** und sein Mond *Dysnomia*. Beide wurden 2003 von *M.E. Brown*, *C.A. Trujillo* und *D. Rabinowitz* (Caltech, USA) entdeckt. Eris benötigt für einen Umlauf um die Sonne etwa 560 Jahre. Seine Distanz zur Sonne variiert zwischen 38 AU (Perihel) und 97 AU (Aphel).

Im Kuiper-Ring wurde im März 2004 ein recht großes, planetenartiges Objekt mit einem Durchmesser von ca. 1600 km ebenfalls von Browns Gruppe entdeckt. Der Himmelskörper ist mit etwa 90 AU mehr als doppelt so weit von der Sonne entfernt als Pluto. Deshalb ist es ein sehr kalter Ort. Die Oberflächentemperatur beträgt etwa 30 Kelvin. Der inoffizielle Name dieses Objekts ist **Sedna** (bzw. 2003 VB₁₂) und leitet sich von der Mythologie der Eskimos ab. Sedna ist eine Inuit-Gottheit, eine Meereshöttin, die gemäß der Mythologie am Meeresgrund in einer Eishöhle lebe. Die Umlaufzeit von Sedna ist mit über 10000 Jahren gigantisch. Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop *Hubble* (siehe Foto 2.10, Credit: STScI/NASA) legen nahe, dass Sedna keinen Trabanten hat. Einen offiziellen Status als Zwergplanet hat Sedna bisher nicht bekommen. Bisweilen fassen Astronomen diese Himmelskörper unter der Bezeichnung **Kuiper-Ring-Objekte** (engl. *Kuiper belt objects*, **KBOs**) zusammen. Sedna ist ein besonders großes KBO.

Mit der Vielzahl an Objekten ist der Kuiper-Ring Quelle vieler kurzperiodischer Kometen. Durch gravitative Störungen können kleine Planetoiden dieses Reservoir verlassen und in Sonnennähe gelangen. Die langperiodischen Kometen hingegen kommen aus einem noch weiter entfernten Reservoir, der sphäroiden **Oort'schen Wolke**, in einem Abstand von etwa 50 000 AU (etwa 0.8 Lj).

2.23.3 Umrechnungen:

- ◇ 1 AU = 149.597870 Millionen Kilometer
- ◇ 1 AU = 1.58×10^{-5} Lj
- ◇ 1 AU = 4.85×10^{-6} pc

$$\diamond 1 \text{ Lj} = 63240 \text{ AU}$$

$$\diamond 1 \text{ pc} = 206264.8 \text{ AU}$$

2.24 asymptotisch flach

Die asymptotische Flachheit ist eine Eigenschaft von vielen *gekrümmten* Raumzeiten in Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie. Eine Raumzeit heißt asymptotisch flach, wenn die gekrümmte Metrik für große Abstände (Radialkoordinate r gegen unendlich) in die flache Minkowski-Metrik der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) übergeht. Knapp gesagt, verschwindet die Krümmung im Unendlichen.

Sehr anschaulich ist dieser Übergang der Krümmung bei der Kerr-Metrik von rotierenden Schwarzen Löchern im Lexikoneintrag Kretschmann-Skalar (Abschnitt 'Kretschmann für Kerr') zu sehen: die 'zerklüfteten Berge des Krümmungsgebirges' flachen für große Radien ab (im Bild links) und werden zu 'Tälern'. Dieses Phänomen ist die asymptotische Flachheit.

2.25 Auflösungsvermögen

In der Astronomie ist das Auflösungsvermögen von astronomischen Instrumenten bedeutsam, weil es angibt, wie klein die Strukturen am Himmel sein können, die der Astronom noch abbilden kann. Je höher das Auflösungsvermögen, umso schärfer ist der Blick und umso engere Punkte können noch als getrennt wahrgenommen werden.

2.25.1 Einheit

Astronomen geben das Auflösungsvermögen im **Gradmaß** an, also in Grad ($^\circ$), Bogenminuten ($'$), Bogensekunden ($''$), Millibogensekunden (mas) oder gar Mikrobogensekunden (μas). Dabei gilt:

$$1^\circ = 60' = 3600'' = 3.6 \times 10^6 \text{ mas} = 3.6 \times 10^9 \mu\text{as}$$

2.25.2 Berechnung

Das Auflösungsvermögen eines optischen Systems hängt einerseits von der verwendeten Strahlung ab und andererseits vom Instrument - das ist wie in der Mikroskopie. Gesucht ist der minimale Winkelabstand θ , unter dem zwei Punktquellen am Himmel noch getrennt voneinander beobachtet werden können:

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \sim 2.52'' \times \frac{\lambda}{100 \text{ nm}} \frac{1 \text{ cm}}{D}$$

Diese Gleichung folgt aus der Beugungstheorie der Optik für kreisrunde Öffnungen und gibt das theoretische Auflösungsvermögen (*Rayleigh-Kriterium*) an. Hier sind λ die **Wellenlänge** der Strahlung des Objekts, das beobachtet wird und D die **Öffnung** des Teleskops. Der Faktor 1.22 ist gerade die Nullstelle der Besselfunktion, die das Beugungsmuster hinter einer kreisrunden Öffnung (so genanntes *Fraunhofer-Beugungsmuster*) bestimmt. Überlappen sich die Beugungsmuster zu sehr, kann man die Beugungsbilder der Quellen nicht mehr voneinander trennen.



Abbildung 2.11: Auflösungsvermögen: Pluto, der Herr der Unterwelt, mit seinem Diener, Charon.

Erdgebundene Teleskope erreichen diesen theoretischen Idealwert leider nicht, weil die Turbulenzen in der Erdatmosphäre das Bild der Quelle verschmieren. Erstaunlicherweise gilt diese Gleichung auch in der Radioastronomie, obwohl hier die Detektion der Strahlung ganz anders funktioniert (Anregung eines Dipols).

2.25.3 Zahlenbeispiele

In der Optik kann man folgende Auflösungsvermögen für unterschiedliche optische Beobachtungsinstrumente angeben:

- ◇ Menschliches Auge: unterhalb einer halben Bogenminute bzw. $25''$
- ◇ Historisches Fernrohr *Galileo Galilei* (um 1600): $3''$
- ◇ Moderne, erdgebundene Teleskope: wenige Zehntel Bogensekunden mit adaptiver Optik. Das *Seeing*, also die turbulenten Bewegungen in der Atmosphäre, begrenzen die Auflösung. Der Lichtstrahl 'springt' auf der Detektorfläche durch zufällige Brechungs- und Beugungseffekte in der Atmosphäre hin und her (siehe auch Laserleitstern).
- ◇ Weltraumteleskope wie Hubble (*Hubble Space Telescope*, HST) erreichen die höchste Auflösung im optischen Bereich der Strahlung, nämlich etwa $0.05''$ oder 50 mas.

(Die Angabe entspricht dem scheinbaren Abstand zweier Bildpunkte, der vom jeweiligen Instrument gerade noch getrennt werden kann.)

2.25.4 Scharfer Blick auf Pluto

Eine Demonstration des ungeheueren Auflösungsvermögens des HST zeigt das Foto 2.11: Hier sieht man Pluto, der vormals am weitesten entfernte Planet, der mittlerweile zur Gattung der Zwergplaneten gehört. Der schwächere Lichtpunkt rechts ist Plutos größter Mond Charon. Die beiden Scheiben der Himmelsobjekte wurden klar voneinander getrennt und haben einen Abstand am Himmel von nur 0.9 Bogensekunden. Dies entspricht in gewohnten Längeneinheiten knapp 20000 Kilometern. Die Beobachtung zeigt eindrucksvoll, wie sehr sich Pluto und Charon ähneln und dass Pluto etwa den doppelten Durchmesser von Charon aufweist (Credit: *Albrecht et al.* 1994, ESA/ESO/NASA).

2.25.5 Weltmeister Radioastronomie

Die Technik im Radiobereich ist schon weiter vorangeschritten. Hier nutzt man Verfahren der Apertursynthese und schaltet die Sammelleistung von Einzelteleskopen (engl. *single dish*) zusammen. In der **Radiointerferometrie** gelingt dann eine Auflösung von kosmischen Radioquellen (z. B. Galaktisches Zentrum, Radiojets von Aktiven Galaktischen Kernen) bis in den Mikrobogensekundenbereich hinein! So schafft das Very Large Array bei der höchsten Frequenz von 43 GHz eine Auflösung von 40 mas. Mit VLBI, also einem Zusammenschluss vieler Radioteleskope weltweit, lässt sich das zur Auflösung von **Mikrobogensekunden** steigern.

Die optischen Teleskope eifern der Apertursynthese der Radioastronomie nach. Es war gerade das Primärziel des VLT-Projekts die vier Teleskope der 8m-Klasse (und ein paar kleinere Hilfsteleskope) zusammenzukoppeln, um **optische Interferometrie mit hoher Auflösung** zu betreiben. Dies läuft unter dem Begriff VLTI und ermöglicht erdgebunden Teleskopen, mit dem HST zu konkurrieren: Das Auflösungsvermögen liegt dann auch im Millibogensekundenbereich.

2.26 Axion

Das Axion ist hypothetisches Elementarteilchen. In der Sprache der Teilchenphysiker ist es ein pseudo-skalares Spin-0 Boson, das 1977 im Rahmen des **Peccei-Quinn-Modells** eingeführt wurde, um die Brechung einer zusätzlichen chiralen Symmetrie, der Peccei-Quinn-Symmetrie, zu erklären. Das mag sich für den Laien schlimm anhören, aber es tut nicht weh.

2.26.1 Warum schon wieder eine neue Symmetrie?

Mit dieser neuen Symmetrie würde das so genannte *Theta-Problem* gelöst: Im Experiment findet man ein sehr kleines elektrisches Dipolmoment des Neutrons, das mit einem Winkelparameter Theta skaliert. Es stellt sich heraus, dass Theta sehr klein, nahe null ist, obwohl es theoretisch sehr viel größere Werte annehmen könnte. Das Peccei-Quinn-Modell erklärt nun diese Kleinheit, dafür handelt man sich allerdings das Axion ein, das bisher noch nicht nachgewiesen werden konnte. Sollte es existieren, gibt es jedoch starke Restriktionen für die Eigenschaften des Axions. Man nimmt an, dass das Axion dem Pion sehr ähnlich ist. Es werden **Axion-Pion-Oszillationen** angenommen, die es dem Axion ermöglichen in Pionen zu konvertieren (und umgekehrt). Der Hauptzerfallskanal (98.8%) von dem neutralen Pion sind zwei Gammaquanten. Dies legt nahe, dass für das Axion ähnliche Feynman-Diagramme existieren. In der Tat nimmt man auch **Axion-Photon-Oszillationen** an, wo sich ein Axion unter dem Einfluss eines Magnetfeldes in zwei Photonen umwandelt:

$$a \rightarrow \gamma\gamma$$

Dieser **Primakoff-Effekt** dient als hauptsächlicher Mechanismus, um zu versuchen, Axionen nachzuweisen.

2.26.2 Axionen von der Sonne?

In der Sonne sollten unter obigen Prämissen **solare Axionen** aus dem Photonenbad im Innern der Sonne erzeugt werden. Dabei übernehmen die Axionen im Wesentlichen die thermische

Energieverteilung der Photonen, die erwartungsgemäß bei etwa 4 keV ihr Maximum annimmt. Mithilfe von *Axion-Helioskopen* versucht man diese nachzuweisen, was bisher nicht gelang.

2.26.3 Axionen von anderen kosmischen Quellen?

Daneben erwartet man auch andere kosmische Quellen von Axionen bzw. axionen-induzierten Photonen, wie Supernovae, Rote Riesen bzw. Sterne generell und das Galaktische Halo der Milchstraße. Diese potenziellen Quellen geben Beschränkungen für die **Axionmasse**: die berühmte Supernova SN 1987a in der Großen Magellanschen Wolke liefert einen Maximalwert von 10^{-3} eV aus den Breiten empfangener Neutrinos. Hingegen legt die Kosmologie nahe, dass die Axionmasse nicht unterhalb von etwa 10^{-6} eV liegen darf, damit nicht die kritische Dichte des Universums überschritten wird und die kosmische Expansion umgekehrt wird.

2.26.4 Masse des Axions

Insgesamt ergibt sich also aus rein astrophysikalischen Überlegungen ein **Massenbereich für das Axion** von 10^{-6} und 10^{-3} eV. Es handelt sich also um ein sehr leichtes Teilchen. In signifikanter Zahl wäre das Axion jedoch von kosmologischem Interesse, weil es in Form hadronischer kalter Dunkler Materie zur Masse des Universums beitragen könnte.

Bei der Emission axion-induzierter Photonen aus dem Galaktischen Halo ist bei angenommenem Mittelwert für die Axionmasse Strahlung im Bereich der Mikro- und Radiowellen zu erwarten:

$$\nu_{\text{ph}} \approx 2 \times \frac{m_a}{10^{-5} \text{ eV}} \text{ GHz.}$$

2.26.5 Axion nix SUSY!

Um Verwechslungen auszuschließen, sei darauf hingewiesen, dass das Axion **kein SUSY-Teilchen** ist!

2.27 AXP

Das Akronym steht für *Accreting X-ray Pulsars*, also akkretierende Röntgenpulsare. Unter dem Begriff Röntgendoppelstern befindet sich eine zusammenhängende Beschreibung im Kontext zu anderen Typen akkretierende kompakten Objekte.

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