
Lexikon

der



Astrophysik

von



Andreas Müller

aus dem

Wissensportal für Astrophysik

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

April 2007

Abbildungsverzeichnis

14.1	mechanisches Model für die MRI.	7
14.2	Strukturen eines Kerr-Loches inklusive Ergosphäre.	11
14.3	effektives Potential in Schwarzschild, parametrisiert durch den spezifischen Drehimpuls.	12
14.4	Illustration einer flachen Metrik.	19
14.5	Illustration einer allgemeinen, gekrümmten Metrik.	20
14.6	Mikroquasar: überfließende Materie von einem massereichen Stern auf ein kompaktes Objekt.	23
14.7	Panorama der Milchstraße, beobachtet mit 2MASS (Infrarot).	26
14.8	Panorama der Milchstraße, beobachtet mit COBE, DIRBE (Infrarot).	27
14.9	ROSAT-Panorama der Milchstraße (weiche Röntgenstrahlung).	29
14.10	Panorama der Milchstraße, beobachtet mit COMPTEL (Gammastrahlung).	30
14.11	zwei Sternhaufen im Röntgen- und Infrarotlicht.	34
14.12	Verlauf der Milgrom-Funktionen in MOND.	38
14.13	duale Verknüpfung von fünf Stringtheorien und der Supergravitation zur M-Theorie.	41

14 Lexikon M

14.1 Machscher Kegel

Der Machsche Kegel ist eine spezielle Struktur in der Akustik, die bei Körpern beobachtet wird, die sich schnell durch ein Medium bewegen.

14.1.1 Über- und Unterschallgeschwindigkeit

Der Machsche Kegel wurde nach dem österreichischen Physiker und Philosophen *Ernst Mach* (1838 - 1916) benannt. Er betrachtete die Ausbreitung von Schallwellen, wenn sich Objekte durch ein Medium (z. B. Luft, Wasser) bewegen. Bewegungen schneller als der Schall im betreffenden Medium nennt man **supersonisch**. Die Machzahl übersteigt dann den Wert 1. Demgegenüber gibt es die **subsonischen** Bewegungen mit Geschwindigkeiten unterhalb der Schallgeschwindigkeit.

14.1.2 Einhüllende von Schockwellen ist ein Kegel

Bewegt sich ein Objekt schneller als mit Schallgeschwindigkeit (im Allgemeinen abhängig von der Temperatur und der Zusammensetzung des Mediums) im betreffenden Medium, so bilden sich im Medium an der Spitze des Objektes Stoßwellen aus, so genannte **Schockwellen**. Entlang der Bahn des supersonisch bewegten Körpers werden in jedem Punkt kugelförmige Schockwellen angeregt, die ins Medium propagieren. Die Kugelwellen an jedem Bahnpunkt weisen dabei verschiedene Radien auf, je nachdem wie viel Zeit sie hatten, um zu propagieren. Der Radius ist deshalb größer bei Bahnpunkten, die der Körper vor längerer Zeit passiert hat, als bei dem Punkt, wo er sich aktuell befindet: hier bildet sich die Kugelwelle gerade erst aus und hat einen kleinen Radius. Die Überlagerung all dieser kugelförmigen Stoßwellen, die **Einhüllende**, formt deshalb einen Kegel, den man **Machschen Kegel** nennt. Der Sinus des halben Öffnungswinkels des Kegels, des so genannten *Machschen Winkels*, entspricht gerade dem Quotienten aus Schall- zur Bewegungsgeschwindigkeit des Körpers. Der Machsche Winkel ist also umso kleiner, je schneller sich der Körper im Medium bewegt.

14.1.3 Analogie zur Cerenkov-Strahlung

In der Strömungsmechanik, Hydro- und Aerodynamik machen sich die Schockwellen akustisch bemerkbar. Der **Überschallknall** pflanzt sich mit den Schockwellen fort und ist hörbar (bekannt z. B. bei tief fliegenden Düsenjets).

Es gibt jedoch das analoge, optische Pendant: die Cerenkov-Strahlung. Dies ist gerade diejenige elektromagnetische Strahlung, die von Quellen emittiert wird, die sich schneller, als mit der Lichtgeschwindigkeit im betreffenden Medium (der *Phasengeschwindigkeit*) fortbewegen. Bei der Beschreibung der Cerenkov-Strahlung tritt eine verwandte Physik auf, nur dass die emittierten Wellen nicht mehr akustischer, sondern elektromagnetischer Natur

sind. Die Begriffe Machscher Kegel und Machscher Winkel werden hier bisweilen auch ersetzt durch Cerenkov-Kegel und Cerenkov-Winkel.

Sobald ein Körper, der sich durch das Medium bewegt, eine höhere Geschwindigkeit als die Lichtgeschwindigkeit im betreffenden Medium hat (*superluminale* Bewegung), kommt es zur Emission der Cerenkov-Strahlung. Die Cerenkov-Strahlung ist gewissermaßen ein Regulator, um den superluminal bewegten Emitter auf die Phasengeschwindigkeit im betreffenden Medium abzubremesen. Bei diesem Phänomen kommt es zu keinem Zeitpunkt zur Verletzung der Speziellen Relativitätstheorie, weil die Vakuumlichtgeschwindigkeit c nie überschritten wird.

14.2 Machsches Prinzip

Das Machsche Prinzip ist eines der wesentlichen Prinzipien, das *Albert Einstein* zu seiner Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) inspirierte. Einstein setzte sich mit diesem Prinzip stark auseinander, weil er erkannte, dass es Raumzeit nur in Verbindung mit Materie zulässt. Für Einstein hatte die Raumzeit allerdings einen unabhängigen Charakter (vergleiche Vakuum-Feldgleichungen der ART). Neben dem Machschen Prinzip sind wichtige Konzepte, die die ART beeinflussten das Äquivalenzprinzip, das Kovarianzprinzip, das Korrespondenzprinzip und das Prinzip minimaler gravitativer Kopplung.

14.2.1 Der Pionier

Das Machsche Prinzip ist benannt nach dem österreichischen Physiker und Philosophen *Ernst Mach* (1838 - 1916), der sich aus einer eher philosophischen Perspektive Gedanken zum Gültigkeitsrahmen der Newtonschen Gesetze und ihrer Bedeutung für Bewegung machte (1893). Seine Arbeiten auf dem Gebiet der Physik sind bis heute von hohem Stellenwert (siehe auch Machscher Kegel und Machzahl).

14.2.2 Über das Wesen der Trägheit

In diesem Abschnitt soll es um grundsätzliche Aspekte von Bewegung, Trägheit und Masse gehen. Mach führte den Begriff der **relativen Bewegung** ein: Bewegung ist immer relativ zu einem Bezugspunkt definiert, zum Beispiel eine relative Bewegung gegenüber dem Hintergrund der Fixsterne. Er folgerte, dass über einen Körper in einem darüber hinaus leeren Universum keine Aussage gemacht werden kann, ob er sich bewege, weil eben der Bezugsrahmen fehle. Erst die Massenverteilung und die Bewegungszustände der Fixsterne legen den Bezugsrahmen fest und sind die Quelle der **Trägheitskräfte** (z. B. Zentrifugalkraft und Corioliskraft). In diesem Sinne bestimmen relativistisch gesprochen Masse und Energie (der Energie-Impuls-Tensor) dort, bei den Fixsternen, die Trägheit hier.

Die Trägheit ist also nichts anderes als ein Phänomen, das aus der Wechselwirkung aller Körper im Universum zustande kommt!

Die Beschleunigung, die man in der Newtonschen Bewegungsgleichung der Mechanik findet, ist also nur gegenüber einem Bezugsrahmen definiert. Es gibt keine absolute Beschleunigung (ebenso wenig wie einen absoluten Raum), sondern nur **relative Beschleunigungen**. Dieses Szenario kann man sich auch als **Anfangswertproblem**

vorstellen: gegeben seien die Positionen und Bewegungszustände (Geschwindigkeitsvektoren) sämtlicher Körper im Universum *zu einem bestimmten Zeitpunkt*. Die Lösung des Anfangswertproblems liefert sämtliche Trägheitseigenschaften von Testteilchen *zu allen Zeiten*, sowohl in der Vergangenheit, als auch in der Zukunft. Das 'Universum' ist dabei eine geschlossene, raumartige Hyperfläche, also ein geschlossener 3D-Raum. Die Lösung des Anfangswertproblems, einer Bewegungsgleichung, liefert dann den 4D-Raum, die Raumzeit, in Vergangenheit und Zukunft.

14.2.3 Aus dem Machschen Prinzip folgt axiomatisch:

- ◇ Materieverteilungen bestimmen Geometrie.
- ◇ Ohne Materie, keine Geometrie.
- ◇ Ein Körper im leeren Universum hat keine Trägheitseigenschaften.

14.2.4 Bezug zu Einstein

Die erste Aussage ist von besonderer Bedeutung, findet sie doch ihren mathematischen Niederschlag in den Einsteinschen Feldgleichungen der ART.

Der **de-Sitter-Kosmos**, ein **materiefreies** Universum mit positiver kosmologischer Konstante verletzt somit das Machsche Prinzip, denn es handelt sich um eine Raumzeit (Geometrie) ohne Körper (siehe zweite Aussage)!

14.3 Machzahl

Die *Machzahl* ist eine wichtige Kenngröße in der Strömungsmechanik und Hydrodynamik. Sie wurde von dem österreichischen Physiker und Philosophen *Ernst Mach* (1838 - 1916) gefunden und entspricht dem Verhältnis der Geschwindigkeit eines bewegten Körper und der Schallgeschwindigkeit des Mediums, in dem er sich bewegt.

14.3.1 Wir kennen's von Flugzeugen

Bekannt ist dies in der Aerodynamik: so gibt es Flugzeuge die Mach 1 (einfache Schallgeschwindigkeit) und Mach 2 (doppelte bzw. Überschallgeschwindigkeit) fliegen können. Oberhalb der Schallgeschwindigkeit wird 'die Schallmauer durchbrochen', und vor dem bewegenden Objekt breitet sich eine Schockwelle aus. Die Einhüllende vieler solcher Stoßwellen bilden den Machschen Kegel. Die Bewegung unterhalb der Schallgeschwindigkeit (M kleiner 1) nennt man *subsonisch*, oberhalb von der Schallgeschwindigkeit (M größer 1) heißt sie *supersonisch*.

14.3.2 Analogie von Akustik und Optik

Während bei der Cerenkov-Strahlung ein Lichtblitz entsteht, gibt es bei überschallschnellen Bewegungen in der Akustik den **Überschallknall**. Ein einfaches Beispiel ist die Peitsche. Der Knall der Peitsche resultiert aus der supersonischen Bewegung der kleinen Peitschenspitze.

14.4 Magnetar

Damit bezeichnet man eine spezielle Form von Pulsaren (also Neutronensternen), die ein abnorm hohes Magnetfeld in der Größenordnung von 10^{15} bis 10^{16} Gauß und mehr besitzen! Ein typischer, normaler Neutronenstern hat hingegen 'nur' Feldstärken von 10^{12} bis 10^{13} Gauß. Das sind extreme Feldstärken: die stärksten Magnetfelder auf der Erde haben etwa eine Million Gauß (also 100 Tesla; 1 Tesla = 10000 Gauß).

14.4.1 Magnetare im Pulsar-HRD

In der Stellarastrophysik bezeichnet das Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) der Sterne eine doppellogarithmische Auftragung der Leuchtkraft eines Sterns über seiner Effektivtemperatur oder Spektralklasse.

Etwas Ähnliches gibt es in der Pulsarastrophysik: hier heißt es *Pulsar-HRD* und entspricht einer Auftragung von Periodenabnahme über Periodendauer der Pulse. Die Magnetare bevölkern in diesem Diagramm den Bereich **langsam rotierender Neutronensterne**. In einem Übergangsbereich zu den kürzeren Perioden befinden sich die so genannten AXPs, während sich dann das Gros der Pulsare anschließt mit den schnellsten Rotationen im Bereich von Millisekunden.

14.4.2 Ursprung der Magnetare starken Magnetfelder

Folgende Entstehungsszenarien wurden vorgeschlagen:

- ◇ **Dynamo-Prozess:** Dieser Effekt ist schon länger bekannt. Hier werden die Magnetfelder, die den Magnetar in Form einer Magnetosphäre umhüllen, durch die **schnelle Rotation** mitgeschleppt und aufgewickelt. Im Feldlinienbild steht eine hohe Feldliniendichte für ein starkes Magnetfeld (Arbeiten von *Duncan et al.*).
- ◇ **Artefakt der MRI:** Ein neuerer Zugang wurde in Anlehnung an die MHD-Akkretionsphysik gefunden. Die so genannte **magnetische Rotationsinstabilität (MRI)** (auch *Balbus-Hawley-Instabilität* genannt) soll die starken Felder bereits vor der eigentlichen Magnetarphase erzeugen. Bereits bei der Bildung des Neutronensterns aus einem massereichen Vorläuferstern (*core-collapse pre-neutron star*, CC PreNS), sollen sich über den Mechanismus dieser Instabilität schwache Saatmagnetfelder in den Schalen des CC PreNS bis zu einer Sättigungsgrenze von 10^{16} Gauß aufbauen!

Es liegt auf der Hand, dass bereits vorhandene Felder des Vorläufersterns im Gravitationskollaps mitgerissen und verstärkt werden. Über **Synchrotronstrahlung** sind diese Felder in Betrag und Richtung (Polarisation) der astronomischen Beobachtung zugänglich.

14.4.3 magnetische Rotationsbremse

Die gemessene langsame Rotation vieler Magnetare im Vergleich zu anderen Pulsaren ist kein Zufall: letztendlich sind die hohen Magnetfelder dafür verantwortlich, weil sie einen **Anti-Frame-Dragging-Effekt** hervorrufen, d. h. die Magnetosphäre bremst die Rotation der Raumzeit dieser kompakten Objekte. Dies konnte von *Ioka & Sasaki* (astro-ph/0305352, 2003) gezeigt werden. Diese Arbeit ist in der allgemein relativistischen

Magnetohydrodynamik (**GRMHD** für *General Relativistic Magnetohydrodynamics*) bzw. einer Theorie magnetisierter, relativistischer Sterne anzusiedeln. Diese schöne Anwendung der ART sei im Folgenden kurz skizziert.

14.4.4 Blick ins Innere des Magnetars

Man setzt den Energie-Impuls-Tensor der idealen (d. h. perfekte Leitfähigkeit) Magnetohydrodynamik an und zerlegt die vierdimensionale Raumzeit (ganz ähnlich dem ADM-Formalismus) in einem $(2+1)+1$ *Split* gemäß der Arbeit von *Gourgoulhon & Bonazzola* (1993). Nun formuliert man die **relativistische Grad-Shafranov-Gleichung** des Problems, die die Information über den magnetischen Fluss enthält. Eine fast schon historische Methode erweist sich als nützlich: *Regge & Wheeler* betrachteten bereits 1965 in allgemeiner Form Störungen auf der Schwarzschild-Metrik. Genau dieser Formalismus wurde ausgenutzt, um die Metrik des Magnetars zu zerlegen. Die Störung ist dabei das Magnetfeld, weil die im Magnetfeld gespeicherte Energie natürlich eine Auswirkung auf die Krümmung der Raumzeit hat. Nun entwickelt man die skalare Flussfunktion in Multipolen (*Legendre-Polynomen*). So leitet man schließlich ein relativistisches **Eigenwert-Problem** ab und studiert unter verschiedenen Randbedingungen die so zerlegte Magnetosphäre des Magnetars. *Ioka & Sasaki* konnten *erstmal* **meridionale Zirkulationen** des polytropisch beschriebenen Plasmas innerhalb des Magnetars untersuchen. Sicherlich ist die Zustandsgleichung eines Polytropen nur eine 'nullte Näherung' für das exotische Innere des (Prä-)Neutronensterns und wird modifiziert werden müssen. Das Magnetfeld wurde so angelegt, dass es innerhalb des Magnetars eingeschlossen ist und an der Oberfläche verschwindet. Auch hier werden sicher andere Randbedingungen mit endlicher Feldstärke folgen. Interessanterweise ist durch die Ausbildung eines meridionalen Plasmaflusses entlang der Rotationsachse des Kompaktors die **Reflektionssymmetrie** zwischen Nord- und Südhalbkugel verletzt! Anders gesagt gibt es eine Vorzugsrichtung beim Magnetar, entlang derer **einseitige Jets** ausbrechen könnten, wie spekuliert wird.

14.4.5 Wie die schnelle Drehung zerfallen könnte

Es gibt in der Fülle der beobachteten und klassifizierten Neutronensterne ein hypothetisches Entwicklungsszenario: Nach einer Supernova Typ II, der klassischen *core-collapse SN*, entsteht ein schnell rotierender Magnetar, der die ersten etwa 10000 Jahre als so genannter Soft Gamma Ray Repeater (SGR) in Erscheinung tritt. Ein SGR ist ein Emitter weicher Gammastrahlung. Sie wurden 1979 entdeckt und senden wiederholte, hochenergetische Ausbrüche im Spektralbereich der Gammastrahlung aus, was durch Rekonnexionsprozesse starker, stellarer Magnetfelder erklärt wird (*Thompson & Duncan, 1995*). Dabei gibt es Frakturen in der Kruste des Neutronensterns, aus denen die Energie der Magnetfelder freigesetzt werden kann. Die sich wiederholenden Gamma-Bursts klingen mit der Zeit ab und in weiteren etwa 30000 Jahren offenbart sich der Magnetar als Anomalous X-ray pulsar (AXP), also als anomaler Röntgenpulsar. Die Rotationsperiode nimmt weiter zu, die Rotation wird immer langsamer, was durch bereits erwähnte Anti-Frame-Dragging-Prozesse geleistet wird und dadurch, dass Energie durch Sternenbeben in der Neutronensternkruste abgeführt wird. Weitere 30000 bis 100000 Jahre später ist der AXP nur noch ein dunkler, kaum beobachtbarer, langsam rotierender Neutronenstern: ein *toter Magnetar*.

14.4.6 Bekannte Vertreter

Beispiel für Magnetare, AXPs und SGRs sind 1E1841-045 (AXP), SGR 1806-20, SGR 1900+14 und SGR 0525-66. Auch der langsame (2.7 h Periode) Pulsar 2S 0114+650 wird als Magnetar interpretiert (*Li et al., 1999*, astro-ph/9901084).

14.5 magnetische Rotationsinstabilität

Instabilitäten sind von allgemeinem Interesse in der Fluidodynamik, weil sie die Dynamik von Strömungen beeinflussen. Die Fluidodynamik kann in die beiden Teildisziplinen Hydrodynamik (HD) und Magnetohydrodynamik (MHD) untergliedert werden. Bei der MHD kommen elektrische und magnetische Felder hinzu, die einen Einfluss auf die Bewegung astrophysikalischer Plasmen haben.

Die magnetische Rotationsinstabilität beeinflusst entscheidend die Dynamik rotierender Plasmen, die in schwache Magnetfelder eingetaucht sind. Wie das genau funktioniert, soll in diesem Abschnitt geklärt werden.

14.5.1 Vorbereitung: Einfall von Materie

In der Akkretionsphysik untersuchen die Astrophysiker Strömungen, die sich auf ein Zentralobjekt bewegen. Materie wird aufgrund der Gravitation von einer Zentralmasse angezogen und führt zum Anwachsen dieser akkretierenden Masse. Diese so genannten *Akkretoren* können gewöhnliche Sterne, Protosterne, aber auch kompakte Objekte wie Weiße Zwerge, Neutronensterne oder Schwarze Löcher sein.

Typischerweise rotiert die akkretierte Materie um den Akkretor und bewegt sich dabei nach innen. Es bildet sich eine **Akkretionsscheibe** aus, die sehr erfolgreich mit Standardscheiben beschrieben werden kann. Daneben gibt es ganz verschiedene Formen von Akkretionsflüssen.

14.5.2 Zutaten: Magnetfelder & Rotation

Ein Phänomen von großer Bedeutung in der MHD-Akkretionsphysik ist nun die *Magnetorotationsinstabilität* oder **magnetische Rotationsinstabilität** (engl. *magneto-rotational instability*, kurz **MRI**). Wie der Name der Instabilität andeutet sind die wesentlichen Zutaten **Magnetfelder** und **Rotation**. Beides ist natürlicherweise in heißen Akkretionsflüssen vorhanden, weil die hohe Temperatur das akkretierte Material ionisiert und weil dieses Material Drehimpuls besitzt. Beide Zutaten der MRI müssen jedoch bestimmte Kriterien erfüllen: die Magnetfelder müssen **schwach** sein und die Rotation **differenziell**. Aufgrund des ersten Kriteriums heißt die MRI bisweilen auch 'Instabilität schwacher Magnetfelder' (griffiger als englische Bezeichnung: *weak field instability*). Die MRI funktioniert nur bei schwachen Magnetfeldern, die natürlicherweise mit dem bewegten Akkretionsplasma assoziiert sind. Bei starken Magnetfeldern (für Experten: Felder an der Äquipartitionsschwelle) wird die MRI unterdrückt.

14.5.3 Funktionsweise anhand eines mechanischen Modells

Schematisch ist in Grafik 14.1 eine rotierende Scheibe dargestellt (violett), bei der es sich um den rotierenden Akkretionsfluss um ein Schwarzes Loch (schwarz ausgefüllter Kreis in der Mitte) handeln möge. Es wird angenommen, dass die Scheibe gegen den Uhrzeigersinn

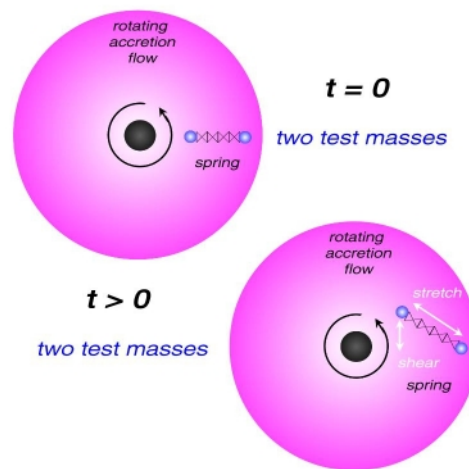


Abbildung 14.1: mechanisches Modell für die MRI.

rotiert. Aus der Akkretionsscheibe werden nun zwei Testteilchen herausgegriffen, die auf einer Linie liegen (*kollinear*), sich aber im Abstand zum Drehzentrum unterscheiden. Zwischen beiden Testteilchen wirkt eine anziehende Kraft: Im realen MHD-Fluss ist das die gemeinsame Magnetfeldlinie, die versucht die beiden Plasmateilchen zusammenzuhalten. Hier, im mechanischen Modell, wird die anziehende Kraft durch eine Metallfeder symbolisiert. Stellen wir uns nun vor, dass man die Rotation der Scheibe einschalten könnte. Die Abbildung links oben ist ein Schnappschuss zu einem Zeitpunkt, bevor die Rotation startet: Die Testteilchen sind locker durch die Feder verbunden. Auf die Feder in entspannter Ruhelage wirken keine Kräfte. Rechts unten wurde die Rotation in Gang gesetzt. Was passiert mit den Testteilchen?

Die Testteilchen rotieren differenziell, so dass das innere Testteilchen das äußere überholt. Als Folge dessen dehnt sich die Feder, weil die Teilchen nach und nach getrennt werden (engl. *to stretch*: dehnen). Die Feder bzw. die Magnetfeldlinie widersteht der Trennung der Testteilchen entlang der Verbindungsline und wirkt **stabilisierend**. In tangentialer Richtung, also in Drehrichtung, versucht die Feder allerdings der Scherung (engl. *to shear*: scheren) entgegenzuwirken, um eine starre Rotation beizubehalten. Dieser Effekt ist **destabilisierend**! Die Feder bzw. das Magnetfeld zwingt das Testteilchen zu schnell für seinen neuen, näheren Abstand zu rotieren. Das äußere Testteilchen wird deshalb beschleunigt, während das innere Testteilchen abgebremst wird. Anders gesagt: Durch die MRI transportieren innere Plasmateilchen im Akkretionsfluss Drehimpuls nach außen zu äußeren Plasmateilchen. Sie ist ein **sehr effizienter Mechanismus für den Drehimpulstransport** in magnetischen Akkretionsflüssen.

14.5.4 Drehimpulstransport als Voraussetzung für Materieeinfall

Der Drehimpuls wird also nach außen auf benachbarte Teilchen abgeführt. So kann das Plasma überhaupt erst in den Bereich des Akkretors gelangen und z. B. in ein Schwarzes Loch fallen. Würde der Drehimpuls nicht nach außen transportiert werden, so würde das Teilchen zu

schnell rotieren, nicht einfallen und nach außen beschleunigt werden. Physiker sagen in diesem Fall, es würde an der Drehimpulsbarriere reflektiert werden.

Die MRI sorgt über diesen Effekt auch für die **magnetische Turbulenz** (engl. *magnetic turbulence*) im Akkretionsfluss. Mittlerweile wird dies gegenüber der rein hydrodynamischen Turbulenz favorisiert. Die MRI konnte 1991 von den Astrophysikern *Balbus* und *Hawley* abgeleitet werden. Bisweilen sprechen Akkretionsphysiker deshalb von der *Balbus-Hawley Instabilität* (BHI). Inzwischen wurde ihre Funktionsweise vielfältig in MHD-Simulationen demonstriert z. B. von *De Villiers & Hawley* 2002. Die MRI ist ein bedeutsamer Mechanismus in der magnetohydrodynamischen Akkretionsphysik.

14.6 Magnetohydrodynamik

Dieser Begriff, kurz **MHD** genannt, subsumiert eine Theorie, die die Wechselwirkung zwischen Magnetfeldern und Plasma beschreibt. Das Plasma wird dabei als kontinuierliches Medium beschrieben, so dass eine Verbindung zwischen den Gleichungen der Hydrodynamik einerseits und den Maxwell-Gleichungen der Elektrodynamik andererseits Inhalt der MHD ist.

14.6.1 MHD + Einstein = kompliziert

Eine Beschreibung im Rahmen der Relativitätstheorie ist mithilfe des Maxwellschen Feldtensors und des Maxwellschen Energie-Impuls-Tensors umsetzbar. Außerdem ist eine Formulierung der **kovarianten MHD-Gleichungen** (*General Relativistic Magnetohydrodynamics*, **GRMHD**) in der Kerr-Metrik über den 3+1-Split (dem ADM-Formalismus) möglich.

Von Interesse sind diese Gleichungen natürlich bei der Beschreibung der Akkretion auf ein Schwarzes Loch, weil die Wechselwirkung des Plasmas mit Magnetfeldern wichtig ist. In der gekrümmten Raumzeit kommt es dabei zu speziellen Effekten, die Newtonsch nicht erklärbar sind. Dazu zählen der **gravitomagnetische Dynamo**, der besonders in Nähe des Schwarzen Loches starke, toroidale Magnetfelder erzeugt (siehe dazu auch Frame-Dragging und Lense-Thirring-Effekt). Diese Felder können eine wesentliche Rolle bei der Emission von Synchrotronstrahlung in dieser Raumregion spielen.

14.6.2 magnetische Erzeugung von relativistischen Jets

Der Blandford-Znajek Mechanismus kann bei vorhandenem Magnetfeld Rotationsenergie vom Schwarzen Loch elektromagnetisch extrahieren und könnte so die Bildung von Jet im innersten Bereich des Systems aus Schwarzen Loch und Akkretionsscheibe (siehe auch Standardscheibe) bewirken. Diese Prozesse spielen eine Rolle bei Röntgendoppelsternen und Aktiven Galaktischen Kernen (AGN).

14.6.3 magnetische Turbulenz & magnetische Akkretion

Die **Magnetorotationsinstabilität** (MRI) oder *Balbus-Hawley-Instabilität* treibt die **magnetische Turbulenz** in magnetisierten Akkretionsflüssen an. Die Turbulenz ist besonders relevant für den **Transport von Drehimpuls** in der Akkretionsscheibe. Außerdem restrukturiert sie den globalen Akkretionsfluss und sorgt für Materieeinflüsse und Materieausflüsse.

14.7 Magnitude

Siehe dazu unter Helligkeit.

14.8 marginal gebundene Bahn

Dies bezeichnet einen charakteristischen Orbit um ein Schwarzes Loch.

14.8.1 Allgemeines zur Himmelsmechanik

Zur besseren Veranschaulichung des Begriffs sei zunächst auf die Bewegungen von Himmelskörpern im Sonnensystem verwiesen: Ganz allgemein sind die Bahnen um die Sonne **Kegelschnitte**, also Schnittfiguren einer Ebene mit einem Kegel, d. h. Ellipse, Kreis, Parabel oder Hyperbel. Die empirisch gefundenen Kepler-Gesetze können mathematisch mit der Newtonschen Gravitationsphysik erklärt werden. Mit den Mitteln der klassischen Mechanik sind so Bahnbewegungen im Zentralpotential einer Masse berechenbar.

Welche dieser Bahnen ein Körper beschreibt, hängt von seiner Geschwindigkeit und seiner relativen Position zur Zentralmasse ab:

Kreisbahn, Ellipsenbahn

Die gebundenen Bahnen um die Sonne sind gerade die Kreise (Exzentrizität null) und Ellipsen, wie sie die Planeten oder Kometen beschreiben. Dabei sind die Exzentrizitäten der Kometen wesentlich höher, als die der Planeten, so dass sie scheinbar für lange Zeit das Sonnensystem verlassen, um dann wiederzukehren. Ein berühmtes Beispiel ist der *Halleysche Komet*, der eine Umlaufperiode von etwa 76 Jahren hat. Die Gesamtenergie dieser Körper ist kleiner als null.

Parabelbahn

Die parabolischen Orbits vollführen die **marginal gebundenen Körper**, die gerade auf der kritischen Grenze zwischen potentieller Energie durch die Anziehung der Sonnenmasse und kinetischer Energie durch eigene Bahngeschwindigkeit liegen: ihre Gesamtenergie ist gerade null.

Hyperbelbahn

Die Körper auf hyperbolischen Bahnen haben eine Gesamtenergie größer als null.

14.8.2 Fluchtgeschwindigkeit

Man könnte sich die Verhältnisse auch mit der **Fluchtgeschwindigkeit** klarmachen:

$$v_{\text{esc}} = \sqrt{2GM/r},$$

mit der Zentralmasse M , der Gravitationskonstante G und einem Radius r , z. B. dem Oberflächenradius des Körpers, von dem man die Fluchtgeschwindigkeit bestimmen möchte. Bei der Erde beispielsweise müssen Raketen eine Geschwindigkeit von 11.18 km/s (mehr als 40000 km/h!) aufbringen, um ihrem gravitativen Anziehungsbereich entkommen zu können

(Erdmasse $M_{\text{Erde}} = 5.974 \times 10^{24}$ kg, Erdradius $r_{\text{Erde}} = 6378$ km). Die Fluchtgeschwindigkeit hängt natürlich vom Abstand ab und wird entsprechend kleiner, wenn das Testteilchen weiter von der Zentralmasse entfernt ist.

Für kleinere Geschwindigkeiten als die Fluchtgeschwindigkeit beschreiben Körper gebundene Bahnen (Ellipsen) um eine Zentralmasse, für den exakten Wert der Fluchtgeschwindigkeit sind sie auf parabolischen Bahnen und bei größeren Geschwindigkeiten als die Fluchtgeschwindigkeit sind die Bahnen hyperbolisch.

14.8.3 Was ist nun die marginal gebundene Bahn?

In der Physik Schwarzer Löcher handelt es sich bei der marginal gebundenen Bahn um einen der **charakteristischen Radien**, neben der marginal stabilen Bahn, dem Ereignishorizont und dem Photonenorbit. Die marginal gebundene Bahn, üblicherweise mit r_{mb} (mb, engl. *marginally bound*) abgekürzt, kennzeichnet einen Abstand, bei dem ein Testteilchen, das im Unendlichen ruhend erscheint, gerade an der Schwelle ist, um vom Schwarzen Loch angezogen zu werden.

14.8.4 Beispiel: Kerr-Metrik

Man berechnet diesen Abstand in der Kerr-Geometrie (rotierende Schwarze Löcher) über eine Betrachtung eines *effektiven Potentials*, indem man die Bindungsenergie E gleichsetzt mit der Ruhemasse m des Testteilchens (in relativistischen Einheiten, $c = 1$ etc.). Das Verfahren ist also analog zu den Kepler-Bahnen im Newtonschen Fall, nur dass durch die Verwendung des relativistischen Ausdrucks für die Gesamtenergie, $E = mc^2$, einen geschwindigkeitsunabhängigen Term, den Ruhemassenterm, übrig lässt. Daher nicht $E = 0$, sondern $E = m$. Demnach erhält man:

$$r_{\text{mb}} = 2M \mp a + 2\sqrt{M}\sqrt{M \mp a} = \left(\sqrt{M} + \sqrt{M \mp a}\right)^2.$$

Der marginal gebundene Radius folgt für Schwarzschild ($a = 0$) gerade zu 4 Gravitationsradien und im extremen Kerr-Fall ($a = M$ in geometrisierten Einheiten) zu einem Gravitationsradius.

Abbildung 14.2 fasst sämtliche Strukturen eines Kerr-Loches (mit $0 < a/M < 0.7$) inklusive charakteristischen Radien zusammen:

14.8.5 Empfehlung: gleich weiter lesen

Der nächste Eintrag marginal stabile Bahn bietet weitere Informationen zum Thema, insbesondere eine Darstellung der effektiven Potentiale.

14.9 marginal stabile Bahn

Dies bezeichnet einen charakteristischen Orbit um ein Schwarzes Loch.

14.9.1 Stabile Rotation am Abgrund

Nicht alles in der Umgebung Schwarzer Löcher muss unbedingt in sie hineinfallen. Um ein Schwarzes Loch ist ebenso eine stabile Rotation auf Kepler-Bahnen möglich, wie bei den Planeten um die Sonne.

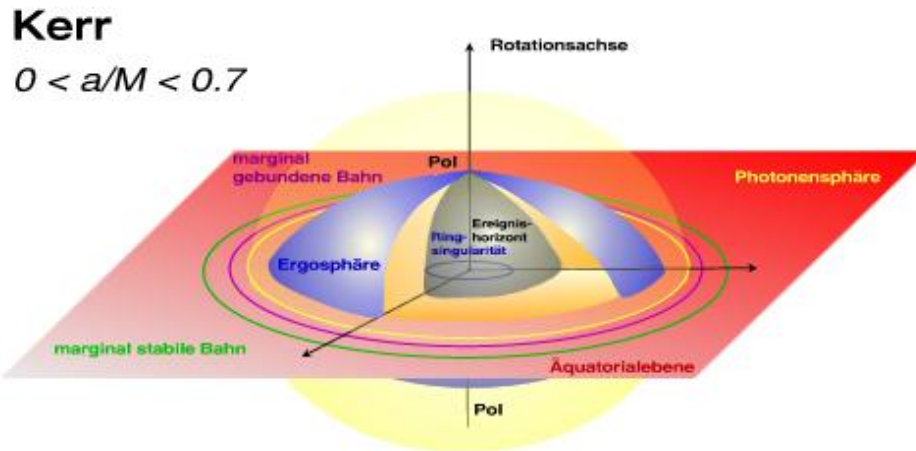


Abbildung 14.2: Strukturen eines Kerr-Loches inklusive Ergosphäre.

Es gibt allerdings eine charakteristische Grenze, die markiert, wo **keine stabile Rotation** mehr möglich ist: diese Grenze ist die marginal stabile Bahn. Es ist ein charakteristischer Radius bei Schwarzen Löchern, den man mit r_{ms} abkürzt. Etwas aussagekräftiger ist die alternative Bezeichnung **ISCO**, die für *innermost stable circular orbit*, also der 'innersten, stabilen Kreisbahn' steht. Ein Objekt, das sich auf *kleineren* Abständen als der marginal stabilen Bahn bewegt, muss entweder in das Loch fallen oder auf einer ungebundenen Bahn den Bereich des Lochs verlassen.

14.9.2 mächtiges Werkzeug: das effektive Potential

Ebenso wie bei der Diskussion von Planetenbahnen im Gravitationspotential der Sonne (gebundene Keplerbahnen) kann man Bahnen in einem *effektiven Potential* eines Schwarzen Loches für die Schwarzschild-Metrik oder die Kerr-Metrik diskutieren. In Diagramm 14.3 wird das in der Schwarzschild-Geometrie demonstriert: Im Diagramm ist das Potential V über den Radius aufgetragen, wobei die Potentialkurven mit dem spezifischen Drehimpuls L/m des Probeteilchens mit Masse m parametrisiert sind. Die genaue Form des Potentials hängt also davon ab, wie schnell das Teilchen um das Loch rotiert. Der Radius wird wie in der Allgemeinen Relativitätstheorie üblich in Einheiten der Lochmasse M gemessen; dies sind gerade die geometrisierten Einheiten.

14.9.3 Tal: stabil - Berg: labil

Wie in der klassischen Mechanik auch, kann man mit diesen Potentialkurven das Schicksal von Teilchen diskutieren. Die Minima der Potentialkurven legen gerade die stabilen Keplerbahnen in der Äquatorebene des Loches fest. Die Potentialkurven für die spezifischen Drehimpulse L/m größer 3.464 zeigen ein ausgeprägtes Maximum. Reicht die Gesamtenergie einlaufender Teilchen aus, um diesen *Potentialberg* zu überwinden, so fällt das Teilchen in das Loch. Ist die Gesamtenergie kleiner als das Maximum von V , so wird das Teilchen am *Potentialwall* reflektiert. Es kann dann den Bereich des Loches wieder verlassen oder sich bei weiterem Energieverlust auf einer elliptischen Bahn 'einschwingen'. Im Potentialminimum nimmt das

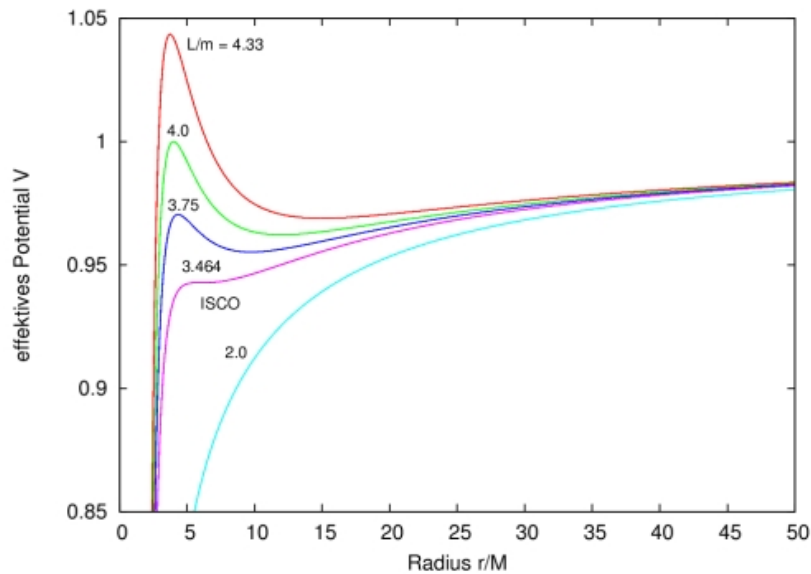


Abbildung 14.3: effektives Potential in Schwarzschild, parametrisiert durch den spezifischen Drehimpuls.

Teilchen eine stabile Kreisbahn ein (konstanter Radius).

14.9.4 marginale Stabilität am Wendepunkt

Bei dem bestimmten Wert $L/m = 3.464$ sieht man einen **Wendepunkt** im Potentialverlauf (violette Kurve). Von der Schulmathematik ist bekannt, dass in Wendepunkten die zweite Ableitung - hier die des Potentials nach dem Radius r - verschwindet. Diese spezielle Kurve kennzeichnet die engste Bahn um das Schwarze Loch, den **Radius marginaler Stabilität** oder **ISCO**. Hier ist gerade noch eine stabile Rotation um das Loch möglich. Wird jedoch das Teilchen gestört, so dass es sich nur ein wenig nach innen bewegt, fällt es in das Loch. Die Raumzeitstruktur des statischen Schwarzen Loches verbietet enge stabile Kreisbahnen nahe am Loch!

14.9.5 Lochrotation diktiert Ort der marginalen Stabilität

Für Schwarzschild (Kerrparameter a ist null) liegt die marginal stabile Bahn bei 6.0 Gravitationsradien. Im Diagramm oben ist bei diesem Abstand der Wendepunkt lokalisiert.

Für den extremen Kerr-Fall (Kerrparameter a ist eins) fällt r_{ms} mit dem äußeren Horizontradius zusammen und liegt bei nur einem Gravitationsradius. Für die Kerr-Geometrie kann ein ähnliches, effektives Potential diskutiert werden.

14.9.6 Die Mastergleichung in Kerr

Allgemein berechnet sich der ISCO gemäß folgender Gleichungen (Kerrparameter a , Masse des Schwarzen Loches M):

$$r_{ms} = M \left(3 + Z_2 \mp \sqrt{(3 - Z_1)(3 + Z_1 + 2Z_2)} \right)$$

$$Z_1 = 1 + \left(1 - \frac{a^2}{M^2}\right)^{1/3} \left(\left(1 + \frac{a}{M}\right)^{1/3} + \left(1 - \frac{a}{M}\right)^{1/3} \right)$$

$$Z_2 = \sqrt{3 \frac{a^2}{M^2} + Z_1^2}$$

14.10 Markariangalaxien

Markariangalaxien ist ein bestimmter Typus aktiver Galaxien, für die wiederum Astrophysiker den Oberbegriff Aktive Galaktische Kerne (AGN) verwenden. Markariangalaxie ist eine historisch bedingte Bezeichnung und heute nicht mehr so gebräuchlich. Heutzutage verwenden Astronomen eher den Ausdruck Seyfert-Galaxie anstelle von Markariangalaxie.

14.10.1 Eigenschaften und Pionier

Markariangalaxien zeigen ein abnorm starkes Kontinuum im Ultraviolett sowie breite, thermische Emissionslinien. Sie wurden Anfang der 1970er Jahre entdeckt und sind nach dem sowjetischen Astronom *B.E. Markarian* benannt.

14.10.2 Prototyp und weitere Quellen

Eine bekannte Quelle und der leuchtkräftigste Vertreter unter den Markariangalaxien ist **Mrk 231**. Unter den Mrk-Objekten gibt es auch einen anderen AGN-Typ, die Blazare, wie beispielsweise Mrk 421 und Mrk 501. Beide nennt man TeV-Blazare, weil sie im höchsten Energiebereich elektromagnetischer Strahlung emittieren: bei einigen Teraelektronenvolt (10^{12} eV).

14.11 Maxwell-Tensor

Der Maxwell-Tensor ist ein Tensor und damit ein Objekt von Einsteins Relativitätstheorie. Dieser Tensor heißt auch elektromagnetischer Feldstärketensor und ist eingebettet in eine kovariante Formulierung der Elektrodynamik, d. h. die klassische Maxwellsche Theorie wurde relativistisch verallgemeinert.

14.11.1 Wie sieht so ein Tensor aus?

Der Maxwell-Tensor hat als Matrix notiert folgende Gestalt:

$$\mathbf{F}^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & E_x & E_y & E_z \\ -E_x & 0 & B_z & -B_y \\ -E_y & -B_z & 0 & B_x \\ -E_z & B_y & -B_x & 0 \end{pmatrix}$$

Wie man sieht enthält er sowohl Komponenten des elektrischen Feldes (E), als auch des Magnetfeldes (B). Die Indizes x,y,z stehen dabei für die drei Raumrichtungen in kartesischen Koordinaten. Die Kenner der Matrizen sehen auch, dass der Maxwell-Tensor offensichtlich nicht symmetrisch ist: spiegelt man die Komponenten des Tensors an der Hauptdiagonalen, so erhält man zwar die gleiche Komponente des Feldes, aber umgekehrtes Vorzeichen. In Einsteins Theorie schreibt man das kompakt so: $\mathbf{F}_{\mu\nu} = -\mathbf{F}_{\nu\mu}$.

14.11.2 Aus 4 mach 2

Der Maxwell-Tensor bündelt also in kompakter Schreibweise die Komponenten des elektrischen und magnetischen Feldes. Damit ermöglicht er eine sehr elegante und kompakte kovariante Schreibweise der vier Maxwellschen Gleichungen der klassischen Elektrodynamik. Im Vakuum und in einer flachen Raumzeit, also für die Minkowski-Geometrie der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) reduzieren sich die Maxwellschen Gleichungen auf nur zwei Gleichungen:

$$\begin{aligned}\nabla_\nu F^{\mu\nu} &= j^\mu \\ \partial_{[\lambda} F_{\mu\nu]} &= 0\end{aligned}$$

14.11.3 Elektrodynamik in gekrümmten Raumzeiten

In der Allgemeinen Relativitätstheorie konstituiert dieser Tensor zusammen mit dem metrischen Tensor den Energie-Impuls-Tensor des elektromagnetischen Tensors. Damit wird eine Behandlung der Elektrodynamik in gekrümmten Raumzeiten möglich. Es resultieren dann die so genannten **Einstein-Maxwell-Gleichungen**. Als Lösungen dieser Nicht-Vakuum-Feldgleichungen kennt man eine statische, elektrische Punktladung, die Reissner-Nordström-Lösung, und eine rotierende, elektrische Ringladung, die so genannte Kerr-Newman-Lösung. Letztere repräsentiert eine sehr allgemeine Form von Schwarzes Löchern 'mit den meisten Haaren' (vergleiche Keine-Haare-Theorem). Es weist die physikalischen Eigenschaften Masse, Drehimpuls und elektrische Ladung auf.

14.11.4 relativistische Astrophysik: SRMHD & GRMHD

Der Maxwell-Tensor wird ebenfalls benötigt, wenn die Astrophysiker Plasmen beschreiben wollen und dabei relativistische Effekte voll berücksichtigen wollen. In der flachen Raumzeit der SRT heißt dieses Forschungsfeld Speziell Relativistische Magnetohydrodynamik, (*special relativistic magnetohydrodynamics*, SRMHD). Forschungsgegenstand sind dann z. B. die fast lichtschnellen Jets von radiolauten Quasaren und Radiogalaxien (also von Aktiven Galaktischen Kernen). Diese extrem schnellen Materieströmungen werden mit aufwendigen Berechnungen auf Supercomputern simuliert.

Geht man zu den gekrümmten Raumzeiten über, so sprechen die Astrophysiker von Allgemein Relativistischer Magnetohydrodynamik, (*general relativistic magnetohydrodynamics*, GRMHD). Forschungsgegenstand ist dann beispielsweise die unmittelbare Umgebung eines Schwarzen Loches, wo die Wechselwirkung des Loches mit (als Flüssigkeit beschriebene) Materie und Akkretion untersucht werden.

14.12 Membran-Paradigma

Das Membran-Paradigma (engl. *membrane paradigm*) ist ein Modell, das auf den Ereignishorizont Schwarzer Löcher angewendet werden kann. Insbesondere bei der Elektrodynamik und Magnetohydrodynamik Schwarzer Löcher ist diese Sichtweise erfolgreich.

14.12.1 Väter des Membran-Paradigmas

Das Membran-Paradigma geht in seinen Anfängen auf *Richard Hanni* und *Remo Ruffini* zurück (1971). Sie erkannten, dass der äußere Horizont eines Schwarzen Loches (r_+) wie eine **elektrisch leitende Kugelschale** aufgefasst werden kann.

14.12.2 Wie geht das?

Man kann sich das so veranschaulichen: In einer Versuchsanordnung der klassischen Elektrostatik nähert man elektrisch positive Ladung einer ruhenden, neutralen Metallkugel. Dabei werden die beweglichen Ladungsträger in der Kugel, die Elektronen, in denjenigen Bereich der Kugelschale gezogen werden, der der äußeren positiven Ladung am nächsten ist, weil sich ungleichnamige Ladungen anziehen. Es findet also in der Metallkugel eine Ladungsumverteilung statt, anders gesagt: Die Metallkugel wird **polarisiert**.

Berechnet man nun die elektrischen Feldlinien einer elektrischen Punktladung im starken Gravitationsfeld eines Schwarzen Loches, so wird die Feldkonfiguration durch die gekrümmte Raumzeit stark deformiert. Die Feldtopologie hat eine starke Ähnlichkeit zum gerade besprochenen Beispiel einer Metallkugel, wie *Hanni* und *Ruffini* feststellten. Dem Membran-Paradigma zufolge darf man nun den kugelsymmetrischen Ereignishorizont als dünne Kugelschale (engl. *stretched horizon*) auffassen. In dieser Membran (engl. *membrane*) befinden sich gleich viele elektrisch positive und negative Ladungsträger. Nähert sich nun eine elektrische Ladung dem Horizont, so wird die Membran analog zur Metallkugel polarisiert.

14.12.3 Anwendungsgebiete des Paradigmas

Das Membran-Paradigma Schwarzer Löcher kann beim Blandford-Znajek-Mechanismus angewendet werden. Bei diesem Prozess wird dem rotierenden Schwarzen Loch (Kerr-Geometrie) Rotationsenergie entzogen. Die so extrahierte Energie kann benutzt werden, um über Magnetfelder **ergosphärische Plasmaausflüsse** zu treiben. *Blandford* und *Znajek* fanden 1977, dass bei dieser Energieextraktion elektrische Ströme an den Polen des rotierenden Horizonts eintreten und nahe am Äquator des Horizonts wieder austreten. Der Eintritt wird durch den Einfall elektrisch positiver Ladungsträger (*Ionenrämpfe*) repräsentiert. Der Austritt hingegen wird durch den Einfall negativer Ladungsträger (Elektronen) bewerkstelligt. Das rotierende Kerr-Loch kann dabei wie ein **Spannungsgenerator** aufgefasst werden, der elektrische Ströme aus der Äquatorebene treibt. Der elektrische Stromkreis folgt poloidalen Feldlinien und wird beim Wiedereintritt in die Polregion wieder geschlossen. Dies generiert die charakteristische **Magnetosphäre rotierender Schwarzer Löcher**. Das Plasma in der Umgebung Schwarzer Löcher wird durch die elektrischen Ströme getrieben und erzeugt die Jets. Diese großskaligen Plasmaströmungen können mühelos relativistische Geschwindigkeiten erreichen und den Bereich des Schwarzen Loches verlassen. Man beobachtet sie in vielen Typen Aktiver Galaktischer Kerne (AGN) in Form von Radioemission von der Synchrotronstrahlung der Elektronen, vor allem in Radiogalaxien und radiolauten Quasaren. Die gleiche Physik kommt auch beim anisotropen Feuerball-Modell der Gamma Ray Bursts zum Einsatz - hier sind die Lorentz-Faktoren sogar um ein bis zwei Zehnerpotenzen größer!

14.12.4 noch mehr Papas

Znajek und *Damour* erkannten 1977/78, dass man die elektrischen Ströme in das Bild des Membran-Paradigmas von *Hanni* und *Ruffini* einbetten kann, indem man sich vorstellt, dass die Ströme an die Ladungen im Horizont, in der Membran, koppeln. Die Ströme knüpfen an die Ladungsträger im Horizont an und führen von der Polregion zu äquatorialen Gebieten. Es stellte sich heraus, dass man mathematisch **Verallgemeinerungen der klassischen Gesetze der Elektrodynamik** erhält, die analog sind zum Ampèreschen Gesetz, Gauß'schen Gesetz, Ohmschen Gesetz und zur Ladungserhaltung.

14.12.5 Analoga zur klassischen Elektrodynamik

- ◇ **Ampèresches Gesetz:** Der Oberflächenstrom des Ereignishorizonts ist gerade so groß, so dass sämtliche parallelen magnetischen Feldlinien eliminiert werden und ihr Anteil im Innern hinter dem Horizont verschwindet.
- ◇ **Gauß'sches Gesetz:** Die Oberflächenladung des Ereignishorizonts ist gerade so groß, so dass sämtliche elektrische Feldlinien an ihm enden und nicht ins Innere hinter dem Horizont eindringen.
- ◇ **Ohmschen Gesetz:** Der Oberflächenstrom des Ereignishorizonts ist proportional zu den elektrischen Feldern, die tangential zum Horizont orientiert sind. Der Proportionalitätsfaktor entspricht einem *endlichen Widerstand* von 377 Ohm.
- ◇ **Ladungserhaltung:** Die Ladungsbilanz ist null. Der Anteil elektrisch positiver Ladung, der an den Polen am Horizont eindringt, ist gerade so groß wie der Anteil negativer Ladungen, die ihn am Äquator verlassen.

Das Membran-Paradigma ist ein mächtiger Formalismus in der Elektro- und Magnetohydrodynamik Schwarzer Löcher.

14.12.6 Aber Vorsicht...

Eines muss jedoch klar gestellt werden: Innerhalb des Ereignishorizonts verliert das Membran-Paradigma seine Vorhersagekraft. Insbesondere 'spürt' ein Beobachter, der in ein Schwarzes Loch fallen würde, **nicht** irgendwelche Ladungen, die am Horizont lokalisiert sind!

14.12.7 Quellen

- ◇ Buch von *Kip Thorne*: Black Holes and Time Warps, 1994
- ◇ Papier von *S.S. Komissarov* 2002, astro-ph/0211141
- ◇ Buch von *Thorne, Price & Macdonald*: The Membrane Paradigm, Yale University Press, 1986

14.13 Mesonen

Die Mesonen (grch. *meson*: mittel) sind neben den Baryonen eine Unterklasse der Hadronen. Sie bestehen aus zwei Quarks, und zwar einem Quark und einem Antiquark (siehe auch Antimaterie), die aber nicht unbedingt dasselbe *Flavor* haben müssen. Aber daraus erklärt sich ihre **Kurzlebigkeit**. Alle Mesonen sind Bosonen, weil die Spins ihrer fermionischen Konstituenten zu ganzzahligen Spins koppeln.

14.14 Metalle

Metall bezeichnet in der Astronomie im Unterschied zur Chemie alle Elemente, die im Periodensystem der Elemente nach Wasserstoff (*H*) und Helium (*He*) folgen!

Für den Astronomen ist nicht nur Gold ein Metall, sondern auch Kohlenstoff.

14.14.1 Hoppla!

Die sonderbare Regelung kam deshalb zustande, weil Wasserstoff, Deuterium (schwerer Wasserstoff, *D*) Helium und Lithium (*Li*) die mit Abstand häufigsten Elemente im Universum sind. Diese leichten Elemente wurden in der **primordialen Nukleosynthese** bereits in der Frühphase des Kosmos erzeugt. Alle schwereren Elemente bis zum Element Eisen (*Fe*) werden erst im Innern von Sternen durch thermonukleare Fusion gebildet. Noch schwerere Elemente oberhalb der Atommasse von Eisen werden erst in den Explosionen massereicher Sterne am Ende ihrer Sternentwicklung, den Supernovae und in Sterngiganten, den Roten Riesen, erzeugt. Hier unterscheidet man verschiedene Einfangprozesse von Nukleonen (Proton und Neutron): den s-Prozess, den r-Prozess und den seltenen p-Prozess.

14.14.2 Nicht-Metalle gab es schon vor den Sternen

Wasserstoff, Helium und Lithium wurden bereits *primordial* in den Frühphasen des Universums erzeugt. Ursache dafür war der heiße Feuerball, der nach dem Urknall expandierte. In dieser Phase war der Feuerball mit etwa 10^9 Kelvin so heiß, dass er selbst als riesiger Fusionsreaktor fungierte: die Temperaturen reichten für das Wasserstoff- und Heliumbrennen aus.

’Brennen’ ist der zweite Begriff, der abweichend zur Chemie verwendet wird: damit ist nicht etwa eine chemische Reaktion gemeint, an der Sauerstoff beteiligt ist, sondern die Fusion der jeweiligen Spezies.

14.14.3 Die ersten Sterne

Die ersten Sterne, die sich überhaupt im Universum gebildet haben, die **Population III**, unterschieden sich deutlich von den Sternen der Folgegenerationen. Sie bestanden ausschließlich aus primordialem Material (also *H*, *D*, *He-3*, *He-4* *Li-7*) und konnten deshalb viel massereicher sein. Der Bereich ab 100 Sonnenmassen, der im lokalen Universum nur noch bei Exoten wie *η Carinae* (Sternbild *Schiff*) tangiert wird, war für PopIII-Sterne durchaus üblich. In diesem Zusammenhang sprechen die Astronomen häufig von *Very Massive Stars* (VMS), sehr massereiche Sterne.

14.14.4 Begriff der Metallizität

Eine wichtige Kenngröße in der Stellarphysik ist *Metallizität* (engl. *metallicity*). Es handelt sich dabei um den Metallgehalt pro Einheitsvolumen, wobei 'Metall' wieder astronomisch zu verstehen ist (Elemente schwerer als Helium). An diese Größe gelangen Astronomen recht einfach über die Auswertung von Spektren. Metalle machen sich in Sternspektren als Absorptionslinien bemerkbar. Diese Linien heißen **Metalllinien**. Die relative Stärke dieser Linien wächst mit der Metallhäufigkeit im Stern. Ein gutes Maß ist der Vergleich der relativen Stärken von der Absorptionslinie von Eisen zu der von Wasserstoff, in der Regel mit $[Fe/H]$ abgekürzt. Dieses Verhältnis wird außerdem logarithmiert. Die Metallizität wird an der Sonne geeicht, d. h. man bezieht $[Fe/H]$ des beobachteten Objekts auf dasjenige der Sonne. So gewinnen die Astronomen die Metallizität in Einheiten der **solaren Metallizität** (engl. *solar metallicity*).

14.14.5 Zahlenbeispiele

Ein metallarmes Objekt hat zum Beispiel $[Fe/H] = -2$, also zwei Hundertstel der solaren Metallizität. Generell gilt die Nomenklatur, dass ein Objekt mit $[Fe/H] > \text{als } -1$ **metallreich** (engl. *metal-rich*) und mit $[Fe/H] < \text{als } -1$ **metallarm** (engl. *metal-poor*) genannt wird.

14.14.6 Recycling erhöht Metallizität

PopIII-Sterne sind extrem metallarm und weisen Metallizitäten von $[Fe/H] < -6$ auf, d. h. sie haben weniger als ein Millionstel der solaren Eisenhäufigkeit. Diese Verhältnisse änderten sich mit der schnellen Sternentwicklung der gigantischen PopIII-Sterne: entweder sie gingen am Ende ihrer Entwicklung im Gravitationskollaps mehr oder weniger direkt in stellare Schwarze Löcher (möglicherweise z.T. auch in andere kompakte Objekte) über, oder sie wurden durch die **Paarinstabilitäts-Supernova** völlig zerrissen. Egal was davon geschah: auf jeden Fall konnte auf diese Weise das interstellare Medium (ISM) mit **reprozessiertem Material höherer Metallizität** angereichert werden. Es folgten neue Sterngenerationen, die in ihrem heißen Innern weitere schwerere Elemente fusionierten, wenn sie nur genügend heiß waren. Dieser Materiekreislauf erhöhte damit nach und nach die Metallizität des Universums. Diese Elementvielfalt war sicher eine Voraussetzung für die Entstehung komplexen Lebens auf der Erde.

14.14.7 Populationen

Der Begriff der *Population* für Sterngruppen geht auf den deutschen Astronomen *Walter Baade* (1893 - 1960) zurück. **Population I** waren die jüngsten, d. h. zuletzt gebildeten, Sterne und bevölkern vornehmlich die galaktische Scheibe, offene Sternhaufen und die Spiralarme. **Population II** bezeichnet hingegen die so genannte *Halo-Population*, also alte Sterne, die im galaktischen Halo sitzen. In diesem Halo, einer sphäroiden Region, die die galaktische Scheibe umhüllt, befinden sich die ältesten Objekte einer Galaxie, die Kugelsternhaufen.

Das ständige Recycling interstellaren Materials und die obigen Definitionen der Populationen lassen sofort erkennen, dass die Metallizität von Population III über II nach I beständig zunahm.



Abbildung 14.4: Illustration einer flachen Metrik.

14.15 Metrik

Die Metrik ist in Einsteins Relativitätstheorie ein geometrisches Gebilde, das von den drei Raumdimensionen und der Zeitdimension aufgespannt wird. Diese *vierdimensionale Mannigfaltigkeit* wird auch Raum-Zeit-Kontinuum oder kurz Raumzeit (engl. *space-time*) genannt.

Raum und Zeit bilden eine Einheit und stellen die 'Bühne' (die *Welt*), wo sich die Geschehnisse ereignen. Diese 'Bühne' ist jedoch *dynamisch* (siehe auch Diffeomorphismus) und in ihrer Dynamik beeinflusst von jeder Energieform, z. B. von der Masse.

In Einsteins Theorie ist die Metrik ein Tensor. Dieser **metrische Tensor** ist *symmetrisch* und besteht deshalb aus (im Allgemeinen) zehn unabhängigen Komponenten. Wegen der vier Dimensionen kann der metrische Tensor als 4×4 -Matrix geschrieben werden, der eigentlich $4 \times 4 = 16$ Komponenten hat. Die Symmetrie reduziert die 16 auf zehn unabhängige Komponenten.

Im Prinzip kann man die Begriffe Raumzeit, Metrik, metrischer Tensor und Linienelement synonym verwenden. Das Linienelement stellt die Metrik kompakt als eine Gleichung dar.

14.15.1 flache Metrik

Der einfachste metrische Tensor ist derjenige einer **flachen Raumzeit** (siehe Grafik 14.4), die so genannte Minkowski-Metrik. In Abwesenheit von Massen und Energie oder bei verschwindend kleinen Energien liegt diese **Vakuum-Raumzeit** vor, die auch den Hintergrund der Speziellen Relativitätstheorie bildet. Der Minkowski-Tensor ist deshalb sogar **diagonal**, hat nur vier von null verschiedenen Komponenten auf der Matrixdiagonalen. Diese sind sogar **konstant**, was in eine ungekrümmte und statische Raumzeit mündet. Die Zeit zeichnet sich gegenüber den Raumkoordinaten dadurch aus, dass sie entgegengesetztes Vorzeichen trägt. Dieser Umstand sichert die Lorentzinvarianz des Linienelements. D.h. verschiedene Beobachter in unterschiedlichen Bezugssystemen mögen unterschiedliche Zeitabstände oder Raumabstände für sich genommen messen, aber **raumzeitliche Abstände** stimmen überein und sind in diesem Sinne absolut. Die Relativisten sagen auch: das Linienelement ist eine *Invariante*.

14.15.2 Signatur der Metrik

Es gibt genau zwei mögliche Konventionen für die Vorzeichenwahl in der Minkowski-Metrik: $(- + + +)$ oder $(+ - - -)$. Dies nennt man die *Signatur der Metrik*. Kurz sagt man auch, die



Abbildung 14.5: Illustration einer allgemeinen, gekrümmten Metrik.

Signatur sei $+2$ oder -2 , entsprechend der Summe der Vorzeichen.

Diese Freiheit bei den Vorzeichen gilt für *alle* Metriken der Relativitätstheorie. Im Vorzeichenunterschied schlägt sich letztendlich die unterschiedliche Natur von Raum und Zeit nieder: Die drei Raumdimensionen haben alle das gleiche Vorzeichen, entweder $+++$ oder $---$; legt man diese Vorzeichen fest, so *muss* die Zeit das entsprechend gegensätzliche Vorzeichen haben. Raum und Zeit bilden zwar ein Kontinuum, doch ihr unterschiedliches Wesen besteht einzig in diesem scheinbar harmlosen Vorzeichenunterschied.

14.15.3 gekrümmte Metrik

Die Morphologie der vierdimensionalen Mannigfaltigkeit ändert sich entscheidend, wenn **Quellen des Gravitationsfeldes** auftauchen. Das illustriert Grafik 14.5. Der metrische Tensor einer gekrümmten Metrik enthält Komponenten, die *koordinatenabhängig* sind. Sie legen gerade die **Krümmungseigenschaften** der betreffenden Metrik fest.

14.15.4 Beispiel 1: die gekrümmte Schwarzschild-Metrik

Die historisch erste Lösung einer daraus resultierenden **gekrümmten Raumzeit** war die Schwarzschild-Metrik (1916). Sie beschreibt kugelsymmetrische und statische Raumzeiten von Punktmassen und wird in der Astrophysik auf relativistische, aber nicht rotierende Sterne und insbesondere auf statische, nicht rotierende Schwarze Löcher angewendet. Die Schwarzschild-Lösung ist eine Vakuumlösung der Einsteinschen Feldgleichungen, der Energie-Impuls-Tensor ist null, aber die Quelle der Gravitation ist eine punktförmige Singularität im Symmetriezentrum der Raumzeit.

Der zugehörige metrische Tensor der Schwarzschild-Lösung ist ebenfalls diagonal wie die Minkowski-Metrik, aber die Diagonalelemente sind koordinatenabhängig. Daraus folgen die Krümmungseigenschaften der Schwarzschild-Raumzeit fest, die vor allem nahe der Singularität wesentlich werden.

14.15.5 Beispiel 2: die gekrümmte Kerr-Metrik

Eine rotierende Verallgemeinerung der statischen Schwarzschild-Lösung wurde erst 1963 von dem neuseeländischen Mathematiker *Roy Patrick Kerr* gefunden, die seither Kerr-Metrik heißt. Bei dieser Metrik sind auch zwei Nebendiagonalelemente (die $t\Phi$ -Komponente und ihr symmetrisches Pendant) von null verschieden, in denen sich gerade die **Rotation der Raumzeit** widerspiegelt (siehe auch Lense-Thirring-Effekt).

14.15.6 Symmetrien der Raumzeit

Transformationen, die die Metrik in ihrer Gestalt nicht verändern, also *forminvariant* lassen, nennt man Isometrien. Die Isometriebedingung führt auf die **Killing-Gleichung** und liefert die Killing-Felder einer Metrik, die eng mit deren Symmetrie zusammenhängen. Dies ist ein wichtiges Werkzeug, um die Symmetrieeigenschaften von Raumzeiten zu studieren.

14.15.7 Determinante der Metrik

Eine wichtige Größe, die man aus dem metrischen Tensor ableitet, ist die *Determinante* der Metrik, üblicherweise mit g bezeichnet. Stellt man den metrischen Tensor als 4×4 -Matrix dar, folgt die Determinante nach den üblichen Regeln der Matrizenrechnung.

g geht zum Beispiel in die Lagrangedichte der ART ein (*Einstein-Lagrangedichte*, *Einstein-Hilbert-Wirkung*) und kann Ausgangspunkt einer Quantenfeldtheorie der Gravitation genutzt werden. In den Eichtheorien ist das eine mächtiger, mathematischer Apparat.

14.15.8 Metriken der Kosmologie

Die zentrale Metrik der Kosmologie ist die Robertson-Walker-Metrik, die der Schwarzschild-Metrik sehr ähnelt. Allerdings ist in dieser relativistischen Beschreibung des materiegefüllten Universums neu, dass die Friedmann-Weltmodelle *keine* Vakuumraumzeiten sind. Dann wird der Energie-Impuls-Tensor verschieden von null und die Materie im vorliegenden Fall durch eine ideale Flüssigkeit beschrieben. Außerdem kann in **Lambda-Universen**, was offensichtlich auch in der Natur realisiert ist, ein *kosmologischer Term* berücksichtigt werden. Die zusätzliche Quelle des Gravitationsfeldes neben der als Flüssigkeit beschriebenen Materie ist dann die Dunkle Energie, die *antigravitativ* wirkt und die Expansion des Universums beschleunigt. Der metrische Tensor der Robertson-Walker-Metrik ist ebenfalls diagonal, aber mit koordinatenabhängigen Komponenten.

14.15.9 Analysen der Raumzeit mit konformen Metriken: Penrose-Diagramme

In der Analyse von Metriken hat es sich als Vorteil erwiesen, das Verhalten der Raumzeit im Unendlichen mit einer unphysikalischen Metrik zu studieren, die man aus der Raumzeit gewinnt. Man führt eine konforme Transformation durch und gewinnt aus einer gegebenen Metrik eine dazu konforme Metrik. Diese Prozedur ist die Voraussetzung zur Gewinnung von **Penrose-Diagrammen**, die von großer Relevanz bei der Untersuchung von Raumzeiten in der ART sind.

14.16 Mikrobblazar

In Analogie zu den Blazaren ist der Mikrobblazar ein Mikroquasar, bei dem der (stellare) Jet in Richtung des Beobachters zeigt. Dadurch kommt es zu starken Blauverschiebungseffekten (*beaming*), weil der Jet sich typischerweise mit relativistischen Geschwindigkeiten bewegt.

14.17 Mikrolinse

In der Astronomie bezeichnet Mikrolinse eine **massearme Gravitationslinse**, z. B. ein Brauner Zwerg, ein Stern der Spektralklasse M oder ein extrasolarer Planet.

14.17.1 Mikrolinsen verstärken Licht einer Hintergrundquelle

Mikrolinsen sorgen zwar für eine 'Bildverzerrung' des gelinsten Objekts im Hintergrund. Dieser Effekt ist allerdings so schwach ausgeprägt, dass es nur photometrisch bzw. spektroskopisch über eine Messung des charakteristischen Anstiegs der Helligkeit in der Lichtkurve zu messen ist.

14.17.2 Beispiele astronomischer Beobachtungen

Eine Mikrolinsenbeobachtung von 2002, katalogisiert als OGLE-2002-BLG-055, wurde 2004 erneut untersucht, weil sich herausstellte, dass viele Interpretationen der Beobachtung möglich sind (*Gaudi & Han* 2004, astro-ph/0402417).

Im April 2004 wurde die Entdeckung eines **planetarischen Mikrolinsen-Ereignisses** bekannt gegeben: OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53 ist ein Binärsystem aus Stern und jupiterartigem Planet, die etwa einen Abstand von drei Astronomischen Einheiten voneinander haben und fast 17 000 Lichtjahre von der Erde entfernt sind (*Bond et al.* 2004, astro-ph/0404309).

14.17.3 Weiter im Lexikon

Mehr zum Thema liefert der Eintrag Gravitationslinse.

14.18 Mikroquasar

Ein Mikroquasar ist eine sternartige Quelle, die eine sehr ähnliche Physik aufweist, wie die Quasare, allerdings auf einer viel kleineren Längenskala.

14.18.1 Quasare sind die größeren Brüder

Während Quasare AGN sind, also helle Kerne ganzer Galaxien, deren Motor im Wesentlichen die Akkretion auf ein supermassereiches Schwarzes Loch ist, sind Mikroquasare Doppelsterne, wobei die kompakte Komponente ein stellares Schwarzes Loch ist. Die andere Komponente ist ein massereicher Stern (typischerweise 10 bis 30 Sonnenmassen schwer) vom Spektraltyp O bis B, der Materie an das Schwarze Loch verliert. Dies geschieht dadurch, dass dieses System aus zwei Körpern einen *inneren* Lagrange-Punkt besitzt, wo keine effektive Gravitationskraft herrscht, weil sich die Gravitations- und Zentrifugalkräfte von der einen Komponente mit der der anderen gerade aufheben. Liegt dieser kritische Punkt innerhalb des massereichen Wirts- oder Donatorsterns - Astronomen sprechen dann von der Überschreitung des Roche-Volumens - so verliert er Materie an das kompakte Objekt. Astrophysiker nennen das im Fachjargon den *Roche-lobe overflow*, den die Illustration 14.6 zeigt: Üblicherweise blasen die massereichen Donatorsterne kräftige Winde (vergleichbar dem Sonnenwind) in das interstellare Medium, so dass *Wind-Akkretion* stattfinden kann. Das Aufsammeln dieses Sternenwinds stellt eine Alternative zum *Roche-lobe overflow* dar. Typische Akkretionsraten auf die kompakte Komponente liegen bei 10^{-4} Sonnenmassen pro Jahr. Weil die überfließende Materie Drehimpuls besitzt, spiraliert sie genauso wie beim 'großen Bruder', dem Quasar, in einer flachen Akkretionsscheibe langsam in das Schwarze Loch. Dabei heizt sich die Scheibe so sehr auf und Comptonisierung setzt ein, die in einer starken Emission im Röntgenbereich resultiert. Mikroquasare sind also auch Röntgendoppelsterne (engl. *X-ray binaries*, kurz

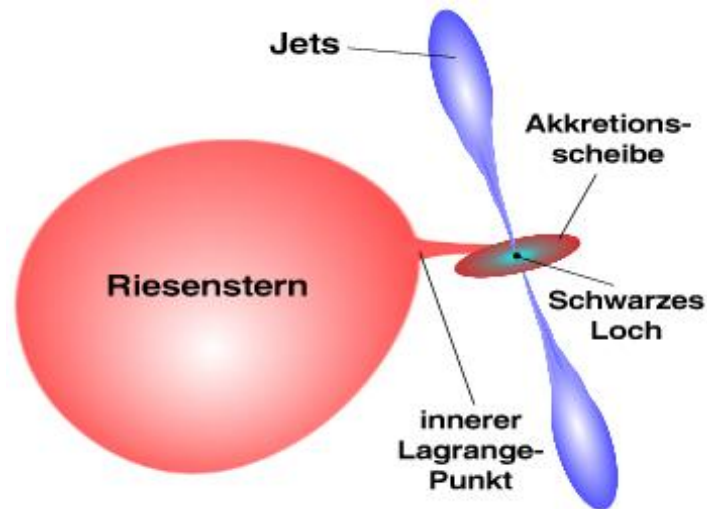


Abbildung 14.6: Mikroquasar: überfließende Materie von einem massereichen Stern auf ein kompaktes Objekt.

XRBs). Die Akronym-Sucht wird jedoch noch weiter getrieben: XRBs werden in LMXBs (*low-mass X-ray binaries*), HMXBs (*high-mass X-ray binaries*), BHXBs (*black hole X-ray binaries*), SSS (*supersoft sources*) und ULX (*ultraluminous X-ray source*) unterschieden.

14.18.2 Woher kommen Mikroquasare?

Die Entwicklung hin zu einem solchen System muss recht katastrophal gewesen sein: im Rahmen der Sternentwicklung muss nämlich das kompakte Objekt aus einem Gravitationskollaps des vormaligen 'normalen' Doppelsternsystems hervorgegangen sein. Dabei hat das System jedoch seine Rotation umeinander mehr oder weniger beibehalten.

Im strengen Sinne sind Mikroquasare nur solche XRBs, die ein stellares Schwarzes Loch enthalten, eben genau wie das große Vorbild, der Quasar, der ein supermassereiches Schwarzes Loch enthält. Mittlerweile bezeichnet man jedoch auch häufig solche Systeme als Mikroquasar, die einen Neutronenstern als kompaktes Objekt enthalten. Oftmals sind sich die Beobachter auch gar nicht sicher, welche Natur das kompakte Objekt hat. Um was es sich genau handelt, kann nur mit einer **genauen Massenmessung** bestimmt werden: ist die kompakte Komponente schwerer als drei Sonnenmassen, so muss es ein Schwarzes Loch sein.

14.18.3 relativistische Jets

Eine weitere Übereinstimmung von Mikroquasaren und Quasaren ist die Bildung von Jets. Astronomen entdeckten die Plasmaströme erstmals im Bereich der Radiostrahlung - mittlerweile gibt es auch viele optische Fotos und Röntgenbilder von Jets. Die morphologische Übereinstimmung von radiolauten Quasaren und Mikroquasaren ist die Begründung für den Terminus *Mikroquasar*. Je nachdem, wie der Jet hydrodynamisch oder magnetohydrodynamisch entstand, kann es zu morphologischen Unterschieden kommen: die extragalaktischen Jets von AGN sind in der Regel ein recht kontinuierlicher, kollimierter Plasmastrahl. Wohingegen man bei den stellaren Jets von Mikroquasaren auch

diskontinuierliche Plasmaauswürfe beobachtet (Radio- und Röntgenbeobachtungen). Man spricht bei den diskontinuierlichen Materiepaketen von *Blobs* oder *Bullets*, die ballistisch das interstellare Medium um den Mikroquasar durchqueren und dabei Bremsstrahlung und Synchrotronstrahlung emittieren.

14.18.4 Bedeckung verrät Umlaufperiode

Die Astronomen wollen so viele Parameter der Mikroquasare messen wie nur geht. Wenn sie Glück haben, ist die räumliche Orientierung des Doppelsternsystems so, dass der massereiche Stern die kompakte Komponente bedecken kann. Häufig ist der Stern ein Wolf-Rayet-Stern. Bei geeigneter Orientierung kommt es deshalb zu **Bedeckungsphänomenen**, die sich in der Variabilität der Röntgenemission widerspiegeln: immer wenn der massereiche Stern vor der Akkretionsscheibe steht, sehr wie auf der Erde keine Röntgenstrahlung. Daraus kann man die **Umlaufperiode** ableiten - eine für Astronomen wertvolle Information.

14.18.5 relativistische Jets

Auch die Orientierung des Jets ist wesentlich: zeigt er in Richtung Erde, können Überlichtgeschwindigkeitseffekte auftreten, wie bei den Blazaren. Manchmal spricht man dann auch von **Mikroblazaren**. Außerdem ist bei diesen kleinen Inklinationen des Jets die Radioemission unterdrückt. Möglicherweise können sie in Zukunft durch die Emission von UHE-Neutrinos identifiziert werden.

14.18.6 Bekannte Vertreter

Einige Mikroquasare in der Milchstraße sind: Cyg X-1, Cyg X-3, GRS 1915+105, SS 433, Cir X-1, XTE J1748-288, LS 5039, GRO J1655-40, XTE J1550-564 und Sco X-1.

14.18.7 Weitere Literatur

- ◇ Web-Artikel: In Kompakte Objekte des Himmels stelle ich ein paar Mikroquasare etwas detaillierter vor.
- ◇ Publikation: *Distefano et al., ApJ, 575, 378-383 (2002)* stellen die Emission von UHE-Neutrinos verschiedener Mikroquasare vor und geben erwartete Raten an.

14.19 Milchstraße

Der klare Nachthimmel präsentiert uns Myriaden von Sternen. Beobachtet man die Verteilung der Sterne sehr genau, so fällt schon mit bloßem Auge auf, dass sich einige davon in einer Art Band zu häufen scheinen. Dieses Band umspannt den ganzen Globus. Es verläuft am Nordhimmel beispielsweise durch die Sternbilder Schlangenträger, Leier, Kepheus, Cassiopeia, Perseus, Fuhrmann und Zwillinge. Mit einem Feldstecher oder einem Fernrohr lässt sich das Band in viele Einzelsterne auflösen. Wir haben hier das **Band der Milchstraße** entdeckt.

14.19.1 Zuhause in der Milchstraße

Die Milchstraße ist eine gigantische Ansammlung von Sternen, und wir befinden uns mittendrin. Solche Sternsysteme heißen **Galaxien**. Die Milchstraße (engl. *Milky Way*) ist unsere Heimatgalaxie - es gibt aber noch viel mehr Galaxien im Universum: etwa einige hundert Milliarden!

Die Milchstraße besteht aus einigen hundert Milliarden Sternen, die sich zusammen mit leuchtendem Gas und kalten Staub in einer gigantischen, rotierenden Materiescheibe angesammelt haben. Diese Materiescheibe hat einen **Durchmesser von gut 100000 Lichtjahren**, eine Masse von etwa 40 Milliarden Sonnenmassen und heißt **galaktische Scheibe**. Im Abstand von etwa 26000 Lichtjahren vom Zentrum der Scheibe umkreisen wir Erdlinge mit der Sonne das Zentrum der Milchstraße. Die Scheibe erscheint am Himmel als das Milchstraßenband. Schon das Band verrät uns daher viel über die Struktur der Milchstraße. Außerdem zeigen genauere astronomische Messungen, dass die Scheibe eine innere, spiralförmige Struktur besitzt. Die Milchstraße ist eine **Spiralgalaxie**.

Nach innen verdickt sich die Scheibe zu einem nuklearen Sternhaufen. Diese Verdickung nennen die Astronomen *Bulge* (engl.: 'Verdickung, Wulst'; ausgesprochen wie 'balsch') oder *Sphäroid*. Wie eine riesige, kugelförmige Kuppel umspannt die Scheibe der **galaktische Halo**. In dieser Kugelschale tummeln sich tausende Kugelsternhaufen, die ihrerseits etwa 100000 sehr alte Sterne beherbergen (z. B. Weiße Zwerge, RR Lyrae-Sterne, siehe auch Population).

14.19.2 Didaktisches zu galaktisch & extragalaktisch

Alles, was sich innerhalb der Milchstraße befindet, wird mit dem Attribut **galaktisch** bedacht, z. B. Galaktischer Schwarz-Loch-Kandidat (Galaktische Schwarze Löcher dürfen also nicht mit supermassereichen Schwarzen Löchern in den Zentren von Galaxien verwechselt werden!). Alles, was sich außerhalb der Milchstraße befindet, erhält das Attribut **extragalaktisch**.

14.19.3 Ein infraroter Blick auf die Milchstraße

Wir befinden uns in der Milchstraße, so dass wir uns kein Bild der Milchstraße von außen machen können. Die Astronomen können jedoch faszinierende Innenansichten einer Galaxie fotografieren: Das Falschfarbenbild 14.7 ist kein Gemälde oder eine Computersimulation, sondern basiert tatsächlich auf vielen Einzelbeobachtungen. Es zeigt den ganzen Himmel (*All Sky Survey*; dargestellt im galaktischen Koordinatensystem) im Licht der Infrarotstrahlung bei 2 Mikrometer Wellenlänge (Credit: 2MASS, University of Massachusetts und JPL/NASA). Strahlung bei dieser etwas höheren Wellenlänge als rotes Licht hat den Vorteil, dass sie den Staub in der Milchstraße mühelos durchdringt. Im Optischen ist die Sicht entlang der galaktischen Scheibe, insbesondere ins Zentrum der Milchstraße stark beeinträchtigt durch Staub. Erst bei Radio-, Infrarot oder auch bei harter Röntgenstrahlung ist die Sicht ungetrübt.

Das Foto zeigt nun das Band der Milchstraße, das sich von links nach rechts zieht. Das helle Zentrum der Milchstraße ist klar in der Bildmitte zu erkennen. Auch der Bulge ist gut zu sehen: die Verteilung der Sterne verdichtet sich zum Zentrum und formt eine Verdickung. Nach oben und unten nimmt die Sterndichte deutlich ab, weil das die Regionen ober- bzw. unterhalb der galaktischen Scheibe sind. Hier tummeln sich noch einige Sterne; vor allem ist das die Region des kuppelförmigen Halos, in dem sich die Kugelsternhaufen, die ältesten Objekte der Milchstraße, befinden.

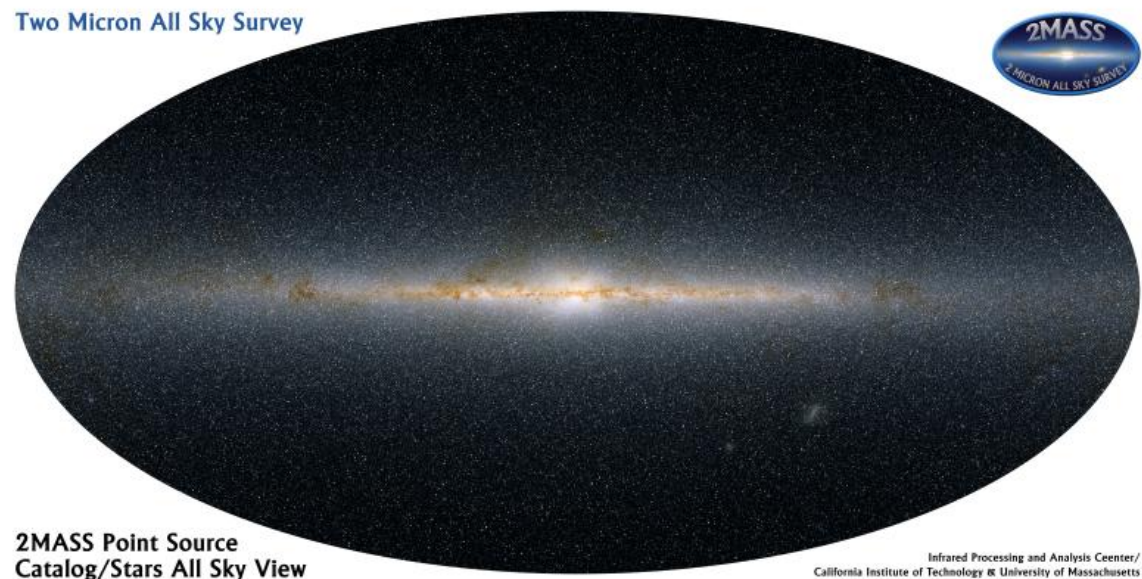


Abbildung 14.7: Panorama der Milchstraße, beobachtet mit 2MASS (Infrarot).

14.19.4 Nachbarn der Milchstraße

Im Bild sind außerdem unten rechts ('auf 4 Uhr') zwei Flecken zu sehen. Das sind nicht etwa Planetarische Nebel oder Kugelsternhaufen - es sind ebenfalls Galaxien! Es sind die beiden **Magellanischen Wolken**: die *Große Magellanische Wolke* (engl. *Large Magellanic Cloud*, LMC) und die *Kleine Magellanische Wolke* (engl. *Small Magellanic Cloud*, SMC). Die Galaxien begleiten die Milchstraße als eigenständige Galaxien jeweils in etwa 50 kpc Entfernung. Es sind also extragalaktische Systeme. Die Magellanischen Wolken sind deutlich masseärmer als die Milchstraße und haben sich durch die Gezeitenwechselwirkung stark verändert. Es sind *irreguläre Galaxien* geworden (siehe auch Hubble-Klassifikation). Von Europa aus sind die Magellanischen Wolken leider nicht zu sehen, aber auf der Südhalbkugel der Erde sind LMC und SMC gut zu beobachten und erscheinen als diffuse, kugelige Wölkchen.

In größerer Entfernung gibt es noch einen weiteren Nachbarn der Milchstraße: die **Andromedagalaxie** (Messierobjekt M31) ist 667 kpc entfernt. Die Andromedagalaxie zeigt einen Blauverschiebungseffekt gegenüber der Milchstraße, weil sich beide durch die Wirkung der Gravitation aufeinander zu bewegen. Früher oder später werden die beiden Galaxien zusammenstoßen und miteinander verschmelzen. Von außen betrachtet wird dieser Verschmelzungsprozess so ähnlich aussehen, wie er schon jetzt bei den Antennengalaxien beobachtet werden kann (siehe Foto unter Gezeitenkräfte, Abschnitt 'Galaxienhochzeit'). Kosmologisch gesehen ist die Entfernung zwischen Andromeda und Milchstraße noch zu klein, als dass die kosmologische Rotverschiebung ins Gewicht fallen würde. Deshalb kann es lokal noch zu Blauverschiebungen kommen.

Andromeda ähnelt sehr der Milchstraße in Gestalt (*Morphologie*) und Masse. Beide Galaxien dominieren eine Ansammlung von Galaxien. Dieser Galaxienhaufen heißt **Lokale Gruppe**. Neben Andromeda, LMC, SMC sowie Dreiecksgalaxie gibt es viele kleine Zwerggalaxien in der Lokalen Gruppe. Einige von ihnen werden von Dunkler Materie

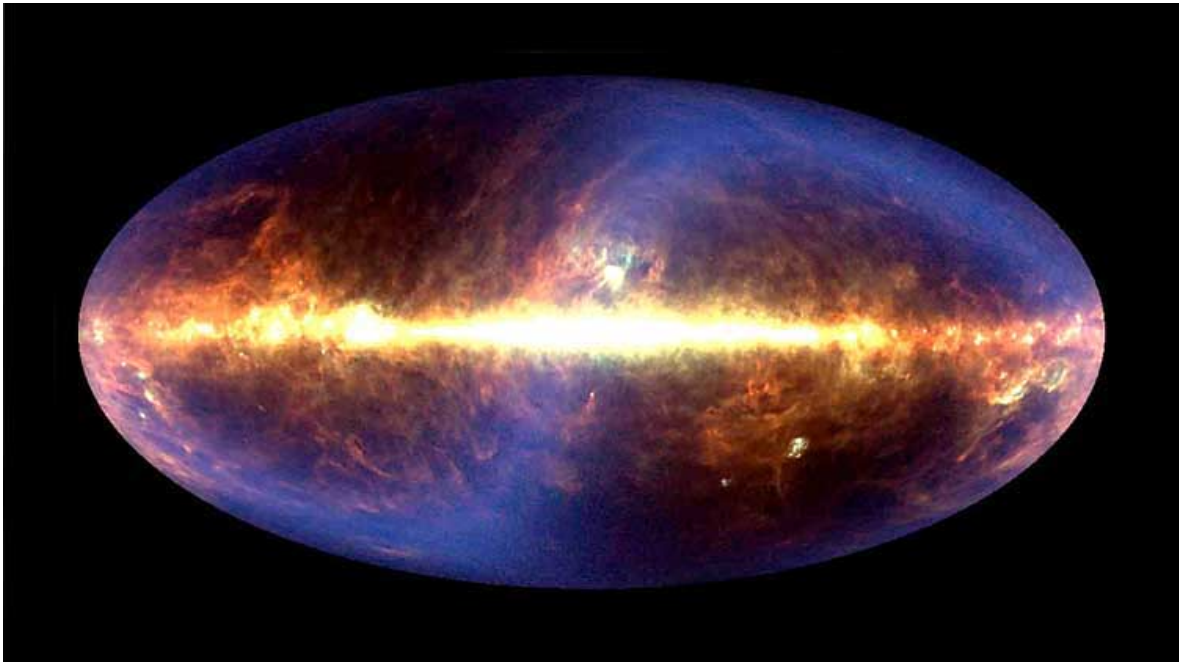


Abbildung 14.8: Panorama der Milchstraße, beobachtet mit COBE, DIRBE (Infrarot).

dominiert und sind extrem leuchtschwach (siehe Eintrag Dunkle Materie, Abschnitt 'Galaktischer Gasdiebstahl').

14.19.5 Ein zweiter Blick auf die Milchstraße

Das Bild 14.7 zeigt im Wesentlichen die Sterne in der Milchstraße. Wenn die Astronomen die Wellenlänge um den Faktor 30 bis 100 erhöhen, dringen sie noch tiefer in das Infrarote ein. Die Milchstraße sieht dann anders aus: Das Foto 14.8 zeigt den **kosmischen Infrarothintergrund** (Credit: COBE/DIRBE/NASA, M. Hauser 1998). Es ist ein Falschfarbenbild, bei dem blau einer Wellenlänge von 60, grün einer Wellenlänge von 100 und rot einer Wellenlänge von 240 Mikrometern zugeordnet wurde. Das Band der Milchstraße erscheint nun hell und diffus, weil hier **interstellares Gas und Staub** leuchten. Das interstellare Gas wiegt etwa 5 Milliarden Sonnenmassen (Robin et al. 2003). In der Scheibenebene scheint es förmlich zu kochen: Sternexplosionen wie die Supernovae und kräftige Sternenwinde treiben das interstellare Material heraus aus der Ebene und 'pusten' es zu hohen, galaktischen Breiten. Astronomen nennen die aufsteigenden, extrem schnellen Gaswolken **Superblasen** (engl. *superbubbles*). Sie werden auch im Radiobereich beobachtet. In der Milchstraße geht es ziemlich turbulent zu!

Bei den höheren Wellenlängen sind die Magellanischen Wolken viel besser zu sehen, als im Beispiel oben und erscheinen hier als weiße Flecken rechts unten. Außerdem fällt eine blaue, S-förmige Struktur auf, die sich von links unten durch das Zentrum der Milchstraße nach rechts oben zieht. Wir erinnern uns: blau ist die kürzeste Wellenlänge von 60 Mikrometern. Das ist gerade **interplanetarer Staub**, der sich im Sonnensystem befindet (siehe auch Zodiakallicht). Dieser 'Staub vor unserer Haustür' trübt die Sicht ins Weltall. Wir sehen

hier in blau also nichts anderes als die Ebene der **Ekliptik**! Entlang des blauen Bands ordnen sich die zwölf Tierkreiszeichen an. Genau in der Mitte, im **Galaktischen Zentrum**, befindet sich das Sternbild Schütze (*Sagittarius*, Sgr).

14.19.6 Das Monster im Zentrum der Milchstraße

Im Galaktischen Zentrum (Sgr A*) befindet sich wie in (nahezu) jeder Galaxie eine hochkompakte, dunkle Masse. Sie ist dunkel, weil die Gravitation das Licht einfängt. Dieser Gravitationsrotverschiebungseffekt kann nur mit Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie verstanden werden.

Eine genaue Analyse der Sternbewegungen im Zentrum der Milchstraße mithilfe von Nahinfrarotbeobachtungen (Infrarotgruppe um Reinhard Genzel, MPE) ergibt, dass die kompakte Masse ein **supermassereiches Schwarzes Loch von etwa 3.6 Millionen Sonnenmassen** sein muss!

14.19.7 Ein dritter Blick: Die Milchstraße im Röntgenlicht

Der unter deutscher Führung betriebene Röntgensatellit ROSAT war von 1990 bis 1999 aktiv. Das MPE Garching ist das wichtigste Datenzentrum für ROSAT. Die erfolgreiche ROSAT-Mission hat die Röntgenastronomie mit vielen neuen Erkenntnissen bereichert. Der Röntgenhimmel bildet spektakuläre und sehr energiereiche, kosmische Prozesse ab. In der Milchstraße sind prominente Röntgenquellen heißes Gas, Supernovaremnants und Röntgendoppelsterne; in der extragalaktischen Röntgenastronomie kommen vor allem die hellen Zentren anderer Galaxien, die Aktiven Galaktischen Kerne (AGN), und das sehr heiße, intergalaktische Plasma dazu.

Die Himmelskarte 14.9 fasst die ROSAT-Daten zu einem Bild des ganzen Röntgenhimmels zusammen: Es handelt sich dabei um diffuse, weiche Röntgenstrahlung zwischen 0.1 und 2 keV Strahlungsenergie, die als Falschfarbenbild dargestellt wurde (Credit: Röntgengruppe MPE): das Energieband zwischen 0.1 und 0.4 keV wurde rot, zwischen 0.5 und 0.9 keV gelbgrün und das energiereichste Band zwischen 0.9 und 2 keV blau dargestellt. Das galaktische Halo trägt zum energieärmsten Band bei und erscheint rot. Heiße Gasblasen mit einigen Million Kelvin Temperatur erscheinen gelbgrün. Die energiereichste Emission stammt von Supernovaüberresten und dem Zentrum der Milchstraße. Die weiße, extrem helle Quelle innerhalb der galaktischen Ebene rechts ist der Vela-Supernovaüberrest, der intensiv mit ROSAT untersucht wurde (siehe auch Velapulsar). Die weiße, helle Punktquelle in der galaktischen Ebene links vom Zentrum ist Cygnus X-1, ein Röntgendoppelstern, der ein stellares Schwarzes Loch mit etwa 10 Sonnenmassen enthält. Einige blaue Punkte sind extragalaktische Punktquellen wie AGN - viele Punktquellen wurden jedoch zur Erstellung des Bildes abgezogen. Die dunklen Streifen sind Artefakte von der Datenauswertung.

14.19.8 Ein vierter Blick: Gammahimmel der Milchstraße

Ein bestimmtes Isotop des Elements Aluminium (Al-26) ist radioaktiv und ein β^+ -Strahler: ein Proton im Atomkern verwandelt sich durch Beta-Zerfall in ein Neutron, ein Positron und ein Antineutrino, so dass aus Aluminium das neue Element Magnesium wird. Dabei entsteht ein hochangeregter Magnesiumatomkern Mg^* , der sich durch Aussendung hochenergetischer Gammaphotonen der Energie 1809 keV abregt. Diese aus dem Gamma-Zerfall entstandene Strahlung hat eine so hohe Energie, dass sie mühelos alles durchdringt.

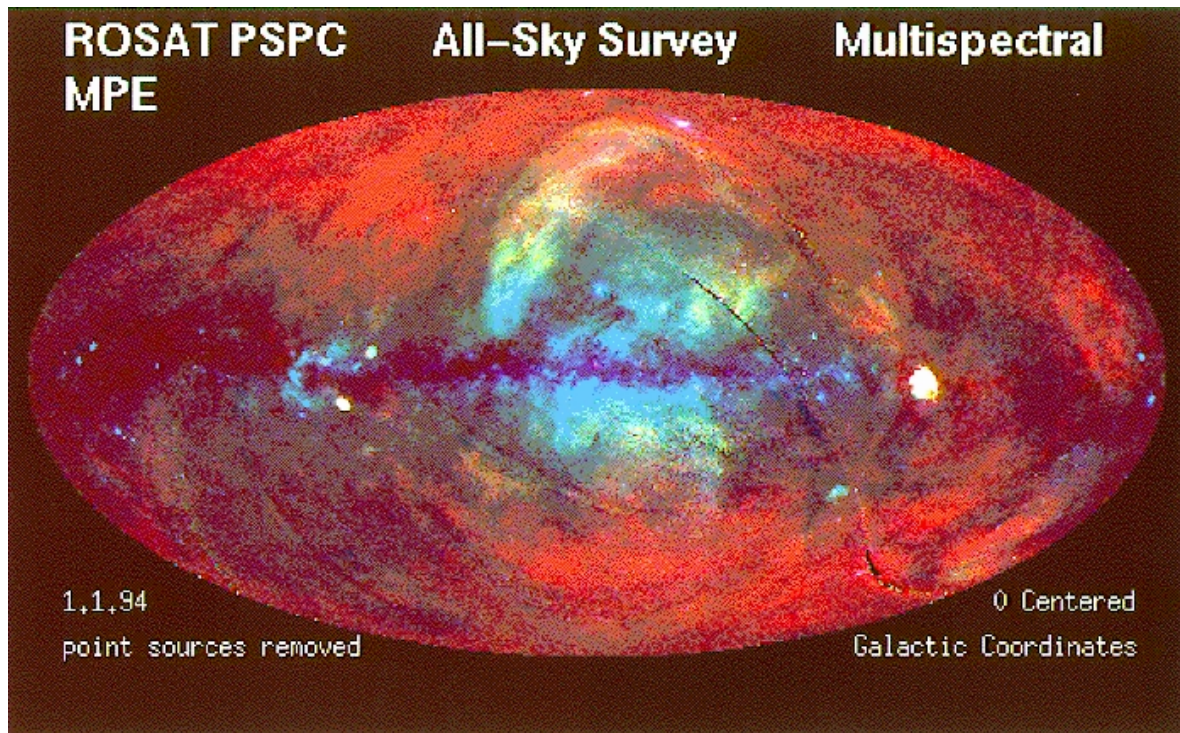


Abbildung 14.9: ROSAT-Panorama der Milchstraße (weiche Röntgenstrahlung).

Was hat das mit der Milchstraße zu tun? Dieses Aluminium wird wie viele andere Elemente von massereichen Sternen in der Milchstraße erzeugt. Es reichert sich mit der Zeit im interstellaren Medium an, weil die Sterne es durch starke Winde (Wolf-Rayet-Phasen) in die Umgebung befördern. Da Al-26 mit einer Halbwertszeit von 720000 Jahren zerfällt, sollte die Gammastrahlung des angeregten Tochterkerns Mg-26 nachweisbar sein. In der Tat gibt es diese Strahlung und Abbildung 14.10 zeigt den ganzen Himmel im Licht der hochenergetischen Aluminiumspektrallinie bei 1809 keV (Credit: CGRO/COMPTEL, *Plüschke et al.* 2001): In dieser Spektrallinie stecken sehr viele Informationen: wie man auf der Himmelskarte sieht, gibt es offensichtlich eine Häufung von Aluminium in der Galaktischen Ebene und dort speziell nahe am Galaktische Zentrum. Das verwundert nicht, weil dort die meisten Sterne zu finden sind, die dieses Material in der stellaren Nukleosynthese hergestellt haben. Die Emission von Al-26 bildet also direkt die Population massereicher, junger Sterne ab. Ausgedehnte Sternentstehungsregionen mit vielen jungen, massereichen Sternen treten besonders hervor. Auf der Karte ist sind beispielsweise die *Cygnus-Region* (in der galaktischen Ebene, roter Fleck ganz links) und der *Orionnebel* (etwas unterhalb der galaktischen Ebene, grüner Fleck ganz rechts).

Aufgrund des Doppler-Effekts wird die Spektrallinie verändert, je nachdem wie sich das emittierende Material relativ zur Erde bewegt. Tatsächlich belegt die breite Linienform die galaktische Rotation der Milchstraße. Weiterhin konnte mit neuen, hochpräzisen Beobachtungsdaten des ESA-Teleskops Integral aus dem Linienfluss, zunächst auf die Gesamtmasse des Aluminiums und schließlich auf die Rate der Supernovae (Typen Ib, Ic, II) in unserer Heimatgalaxie geschlossen werden: die Rate liegt bei 1.9 ± 1.1 pro Jahrhundert

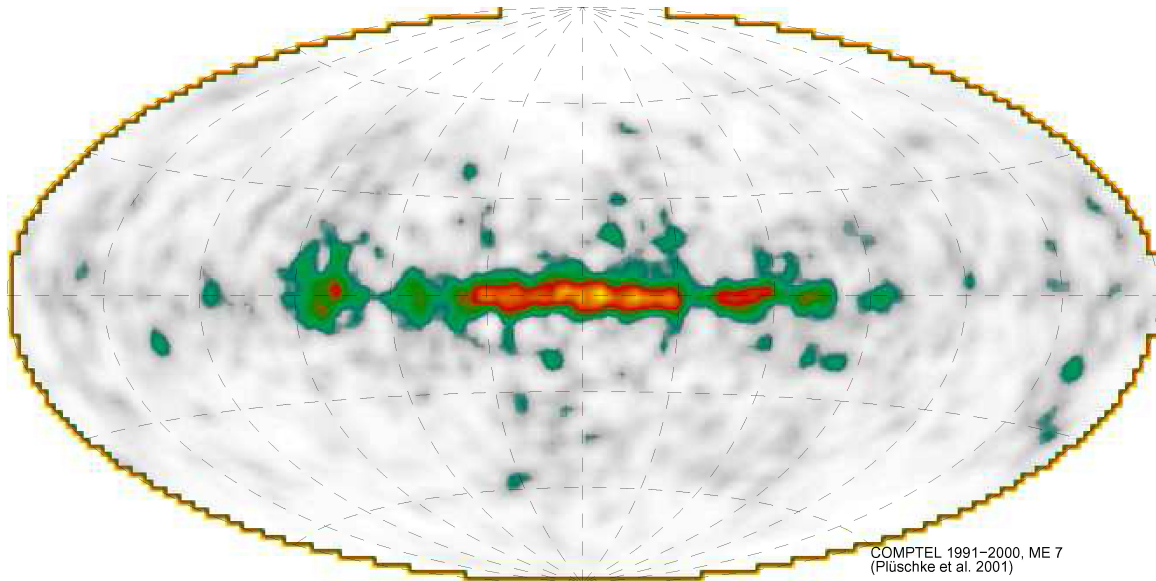


Abbildung 14.10: Panorama der Milchstraße, beobachtet mit COMPTEL (Gammastrahlung).

(*Diehl et al.*, Nature 2006). Dieses Ergebnis ist in Übereinstimmung mit anderen Methoden.

14.19.9 Weitere Literatur

- ◇ Web-Artikel: Das größte Schwarze Loch der Milchstraße
- ◇ ROSAT am MPE
- ◇ *R. Diehl* (MPE): Al-26 Radioaktivität in unserer Galaxis

14.20 Minkowski-Metrik

Die Minkowski-Metrik beschreibt den **flachen Raum**, also eine vierdimensionale Mannigfaltigkeit *ohne Krümmungen*, d. h. in Abwesenheit von Massen oder Energien. In Berechnungen wird diese Metrik auch benutzt, wenn lokale Krümmungen vernachlässigbar sind, weil die Energien betrachteter Testteilchen (Photonen etc.) sehr klein sind.

14.20.1 Metrik der SRT

Die Minkowski-Metrik ist die Metrik oder Raumzeit der Speziellen Relativitätstheorie (SRT). Sie wurde nach dem Mathematiker *Hermann Minkowski* (1864 - 1909) benannt, der die elegante Formulierung der Zusammenfassung von Raum und Zeit 1908 begründet hat. Minkowski war der Mathematikprofessor von *Albert Einstein* und fand nach der Veröffentlichung der SRT (1905) die bündige Schreibweise in Vierervektoren und Matrizen.

14.20.2 einfache Eigenschaften

Die Metrik hat eine sehr einfache, mathematische Gestalt:

$$\eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} = \text{diag}(+, -, -, -).$$

Das ist der metrische Tensor der Minkowski-Metrik als 4×4 -Matrix dargestellt. Wie man unmittelbar sieht, ist die Matrix **diagonal**. Auf der Hauptdiagonalen der Matrix stehen die Zahlen 1, -1, -1, -1; in der Relativitätstheorie hat man die Freiheit auch die Folge -1, 1, 1, 1 zu wählen. Die *Signatur*, also der Überschuss an positivem oder negativem Vorzeichen bei der Summenbildung der Diagonalelemente, ist entsprechend -2 oder +2. Im Unterschied zur Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) sind die Matrixkomponenten *konstant* und hängen nicht von den Raum- oder der Zeitkoordinate ab. Die Minkowski-Metrik ist eben im Unterschied zu den Raumzeiten der ART **flach** und überall in der Raumzeit gleich. Dass die Matrixkomponenten vom Betrag her 1 sind, liegt daran, weil relativistische Einheiten mit der Vereinfachung Vakuumlichtgeschwindigkeit $c = 1$ gewählt wurde (siehe auch geometrisierte Einheiten).

Damit ähnelt die Minkowski-Metrik zwar der **Euklidischen Metrik** - der Unterschied besteht nur in einem Vorzeichen, der jedoch gewichtig ist und die **Lichtkegelstruktur** von Raum und Zeit in der SRT prägt.

Die Minkowski-Metrik ist ein Zustand sehr hoher Symmetrie: sie besitzt zehn Killing-Vektoren.

14.21 Missing-Mass-Problem

Mit diesem Begriff benennen Astronomen die Problematik, dass der gesamte Materieinhalt des Universums zwar global mit Satelliten wie COBE oder WMAP aus der kosmischen Hintergrundstrahlung und alternativen Methoden bestimmt werden kann, aber sich die Materieformen der *direkten* Beobachtung entziehen. Dieser Eintrag wird zeigen, dass das Missing-Mass-Problem zwei Facetten (eine baryonische und eine nicht-baryonische) hat.

14.21.1 Der Normalfall: baryonische Materie

Baryonische Materie ist der physikalische Fachbegriff für die uns sehr vertraute Materieform, aus der wir selbst und unsere Umgebung bestehen. So zählen die Nukleonen (Protonen und Neutronen) und Quarks (deren Konstituenten) zu der baryonischen Materie. In diesem Sinne ist diese Materieform nicht exotisch. Das Sonnensystem, Sterne, interplanetares, interstellares und intergalaktisches Gas und Staub, extrasolare Planeten und auch Braune Zwerge bestehen aus baryonischer Materie. Auch die Massen aller Schwarzen Löcher im Universum werden der baryonischen Materie zugerechnet. Dieses ganze Material ist jedoch mit steigender Entfernung äußerst schwer detektierbar, weil es nicht oder kaum leuchtet. Diese Schwierigkeit ist verschärft, wenn das Material kalt ist und nur im Infraroten oder Radiobereich leuchtet. Dann kann es sich der Sicht der Astronomen leichter entziehen. Nur als heißes, baryonisches Gas ist es gut sichtbar, wie wir im nächsten Abschnitt sehen werden.

14.21.2 Kosmische Mengen baryonischer Materie

Nach aktueller Datenlage der experimentellen Kosmologie beträgt der Anteil baryonischer Materie **nur etwa 4%** an allen Energieformen im Kosmos! 96% sind demzufolge unbekannt und unverstanden! Doch selbst die 4% baryonische Materie sind mit astronomischen Einzelbeobachtungen nicht messbar (z. B. *Cen & Ostriker* 1999; *Fukugita et al.* 1998; *Tytler et al.* 1996). So befinden sich in Galaxienhaufen große Mengen heißen, intergalaktischen Gases. Es wurde durch die Wechselwirkung der Galaxien im Haufen auf einige Millionen Grad aufgeheizt. Der Antrieb für die Heizung ist letztendlich die Gravitation. Als Konsequenz strahlt dieses Gas **thermische Röntgenstrahlung** ab und ist leicht mit Röntgenteleskopen beobachtbar. Es zeigt sich dabei, dass sich das Gas in Filamenten und blattartigen Strukturen anordnet (z. B. *Zappacosta et al.* 2002). Der Vergleich des Anteils baryonischer Materie auf der Grundlage der kosmischen Hintergrundstrahlung mit demjenigen auf der Grundlage der Galaxienbeobachtungen zeigt, dass zu wenig baryonische Materie beobachtet wird! Diese Diskrepanz bezeichnet man als **baryonisches Missing-Mass-Problem**.

14.21.3 Wie steht's mit Neutrinos?

Neutrinos **haben eine Masse**, wie die Cerenkov-Detektoren von Super-Kamiokande (*Kamioka Neutrino Detection Experiment*) in Japan belegen. Sie werden in großer Zahl in Sternen wie der Sonne (*solare Neutrinos*) und in Supernovae erzeugt; aber sie wechselwirken kaum mit Materie: etwa **70 Milliarden der solaren Neutrinos** treffen pro Sekunde allein einen menschlichen Daumnagel - ohne eine Reaktion mit den Atomen einzugehen. Das macht den Charakter der schwachen Wechselwirkung aus und gestaltet die Detektion der Neutrinos so schwierig.

Der Knackpunkt ist, dass trotz dieser unglaublich großen Zahl Neutrinos sie aufgrund ihrer Leichtigkeit **nicht** entscheidend zur Gesamtmasse des Kosmos beitragen. Neutrinos werden zur so genannten heißen Dunklen Materie (engl. *hot dark matter*, HDM) gerechnet.

14.21.4 kosmologische Bedeutung baryonischer Materie

Die oben erwähnten 4% Anteil der normalen Materie legt nahe, dass Baryonen so gut wie irrelevant für die Dynamik des Kosmos sind. Wo steckt der Rest der Energie? Die Problematik in dieser Frage könnte man als **nichtbaryonisches Missing-Mass-Problem** bezeichnen.

14.21.5 Dunkle Materie

Einen nicht geringen Anteil an den verbleibenden 96% hat die **Dunkle Materie** (engl. *dark matter*, **DM**). Sie macht etwa 22% von der Gesamtenergie aus. Die Forderung nach dieser Materieform wird nicht nur aufgrund kosmologischer Messungen laut, sondern beispielsweise auch auf der Basis von lokalen Messungen der Kinematik innerhalb von Galaxien - auch innerhalb der Milchstraße. Dunkle Materie macht sich hier gravitativ bemerkbar und hält die Galaxie zusammen, aber sie strahlt nicht und ist dunkel. Ihre Natur wird nach wie vor erforscht. Ohne Dunkle Materie könnte man die Beobachtungen nur mit alternativen Gravitationstheorien wie MOND erklären.

Im engeren Sinne bezeichnet Dunkle Materie nur die *nicht-baryonische Form*. Das könnten schwach wechselwirkende Teilchen wie die hypothetischen WIMPS (engl. Akronym für *Weakly Interacting Massive Particles*) sein.

Ebenso kommen supersymmetrische Teilchen in Betracht: Das Standardmodell der Elementarteilchen hat eine Erweiterung in der Supersymmetrie (SUSY) gefunden. Ob die Natur tatsächlich SUSY erfordert ist noch unklar. Diese Theorie fordert weitere, neue Teilchen, wie das Neutralino, das Photino, das Gluino, Squarks etc. Sollten diese Teilchen existieren und darüber hinaus eine nicht verschwindende Masse haben, so sind es Kandidaten für die Dunkle Materie. Ihre große Anzahl im Universum würde einen signifikanten Anteil der Gesamtmasse bilden, was den gemessenen Wert für Ω_m physikalisch in den aktuellen WMAP-Daten erklären könnte.

Als letzte exotische Alternative bleibt noch das Axion, das mit einer speziellen Symmetrie in der Quantenchromodynamik verknüpft ist.

14.21.6 Dunkle Energie

Die wichtigste, weil dominante Ingredienz für die Kosmologie, ist die **Dunkle Energie**. Sie hat einen Anteil von 74% an allen Energieformen, ist aber völlig unverstanden. Die beste physikalische Erklärung für die Dunkle Energie ist, dass das Vakuum selbst auf diese Weise kosmologisch in Erscheinung tritt. Die Physiker rechneten diesen Ansatz auf der Grundlage physikalischer Gesetze nach - und scheiterten! Mit den Gesetzen der Quantenfeldtheorie können sie Quantenvakuum und Dunkle Energie nicht vereinen. Damit gehört dieses Problem zu den größten Rätseln der modernen Physik!

Fakt ist, dass die Zustandsgleichung der Dunklen Energie einen *negativen* Druck aufweist (siehe auch w-Parameter). Ihre Wirkung ist daher **antigravitativ**. Die Dunkle Energie ist gerade der Motor für die Expansion des Universums. Die Ausdehnung wird nach aktuellen Messdaten ewig fortschreiten und sogar beschleunigt.

14.22 mittelschwere Schwarze Löcher

Die Schwarzen Löcher können anhand ihrer Masse klassifiziert werden. Als wohl etablierte Klassen gelten die stellaren Schwarze Löcher (ca. 3 bis 100 Sonnenmassen), die aus dem Gravitationskollaps massereicher Sterne hervorgehen und die supermassereichen Schwarzen Löcher (ca. 1 Mio. bis 10 Mrd. Sonnenmassen), die sich in den Zentren von Galaxien, insbesondere von Aktiven Galaktischen Kernen befinden. Die mittelschweren Schwarzen Löcher sind nun solche, die soviel Masse haben, dass sie zwischen die Massendomänen von stellaren und supermassereichen Schwarzen Löchern fallen, nämlich **100 bis 1 Mio. Sonnenmassen**. In den letzten Jahren haben astronomische Beobachtungen die Existenz dieser in der Fachsprache auch *intermediate-mass black holes* (IMBHs) genannten Löcher nahe gelegt. Dabei ist eine Häufung im Massenbereich zwischen 1000 und 10000 Sonnenmassen festzustellen. Gibt es wirklich mittelschwere Schwarze Löcher?

14.22.1 Refugien mittelschwerer Löcher

Die Systeme, in denen mittelschwere Schwarze Löcher enthalten sein sollen, sind junge Sternhaufen, Kugelsternhaufen und Zwerggalaxien. Die Löcher verraten sich aus der Bewegung der Sterne im Haufen bzw. der Galaxie oder durch ultrahelle Röntgenquellen. Im Folgenden sollen diese Beobachtungen vorgestellt werden.

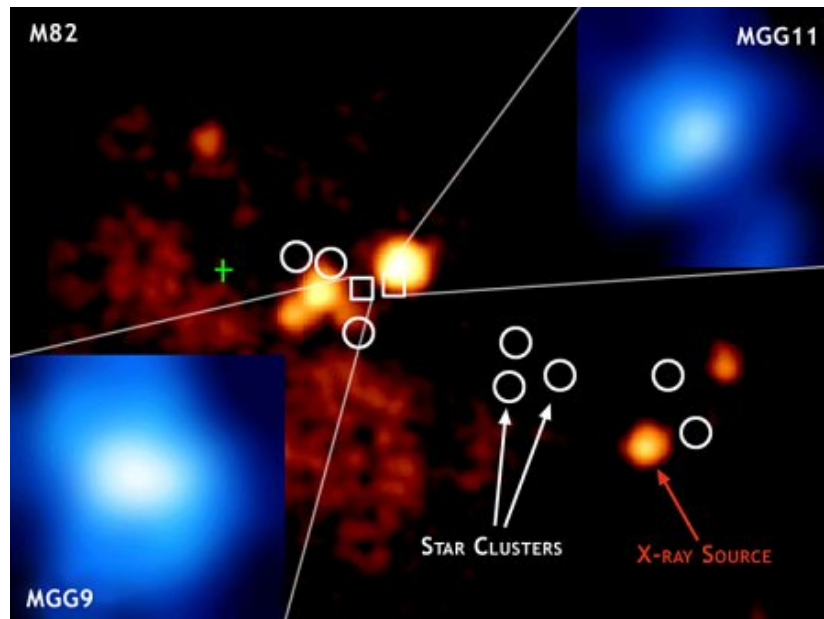


Abbildung 14.11: zwei Sternhaufen im Röntgen- und Infrarotlicht.

Junge Sternhaufen in M82

Der junge Sternhaufen MGG 11 ist etwa 200 pc vom Zentrum der Starburstgalaxie M82 entfernt. Dieser Haufen enthält eine helle Röntgenquelle. Die beste Erklärung dafür ist ein **Schwarzes Loch mit mindestens 350 Sonnenmassen** - ein IMBH. Simulationen mit dem japanischen Supercomputer GRAPE-6 konnten zeigen, dass dynamische Reibung im Sternhaufen (kein Kugelsternhaufen!) dazu führen kann, dass die Sterne (typischerweise Hauptreihensterne mit 30-50 Sonnenmassen) ins Haufenzentrum auf kreisförmigen Bahnen absinken und zusammenstoßen (*Zwart et al.* 2004). In der Astrophysik heißen solche Verschmelzungsprozesse *runaway mergers*. Dabei kann ein supermassereicher Superstern von 800 bis 3000 Sonnenmassen entstehen. Supersterne mit mehr als 260 Sonnenmassen explodieren ohne großen Massenverlust in Supernovae (*Heger et al.* 2003), so dass der Superstern in MGG 11 direkt zu einem IMBH kollabierte. Akkretierte diese mittelschwere Schwarze Loch nun Gas oder Sterne, so kann die ultrahelle Röntgenquelle zünden. Dieser so genannte **ULX** (engl. *ultraluminous X-ray source*) wurde tatsächlich bei MGG 11 mit Chandra beobachtet. ULXs haben ihrer Definition nach Röntgenleuchtkräfte zwischen 10^{39} und 10^{41} erg/s im Band zwischen 0.2 und 10 keV. Die Bezeichnung **M82 X-1** ('hellste Röntgenquelle in M82') ist somit plausibel.

Die Simulationen erklären auch, dass der Nachbarhaufen MGG 9 kein IMBH produzieren kann, weil er zu groß ist: Dadurch ist die Zeitskala für dynamische Reibung deutlich größer, so dass die massereichen Sterne in Supernovae explodieren, noch bevor sie das Zentrum erreichen. MGG 9 enthält daher kein IMBH und keine helle Röntgenquelle (*Zwart et al.* 2004).

Das Beobachtungsfoto 14.11 (Credit: CXC/NASA 2004) zeigt in orange die Zentralregion von M82 wie sie mit dem US-amerikanischen Röntgenteleskop Chandra beobachtet wurde (Credit: *Matsumoto et al.* 2001; Detektion des ULX in M82). Die Quadrate entsprechen den Positionen der beiden jungen, etwa 10 Millionen Jahre alten Sternhaufen MGG 9 und MGG

11, die in den Ecken vergrößert und in blau im Licht der Wärmestrahlung zu sehen sind (Credit: *McCrady et al.* 2003).

M82 X-1 zeigt außerdem Quasi-periodische Oszillationen und eine relativistisch verbreiterte Eisenlinie (*Strohmayer & Mushotzky* 2003). Der QPO weist darauf hin, dass M82 X-1 tatsächlich sehr kompakt sein muss: aus der gemessenen QPO-Frequenz folgt eine Ausdehnung von **höchstens vier Sonnenradien!** Nimmt man an, dass die höchste QPO-Frequenz mit einer Keplerbahn auf dem marginal stabilen Orbit um ein Schwarzschild-Loch assoziiert sei, folgt die **Lochmasse zu höchstens 18700 Sonnenmassen**. Die Diskrepanz zur oben angegebenen kleineren Lochmasse verwundert - und in der Tat werden QPOs in diesem Fall nicht als zuverlässige Massenindikatoren angesehen.

IMBH in Kugelsternhaufen

Michele Trenti hat die Dynamik von Kugelsternhaufen und die Signaturen von IMBHs darin untersucht (Arbeiten von 2006). Er vermutet, dass ähnliche Sternzusammenstöße wie in den jungen Sternhaufen auch in alten Sternhaufen wie den Kugelsternhaufen geschehen. Dabei arbeiten zwei Prozesse gegeneinander: Das Haufenzentrum heizt sich durch die Sternzusammenstöße auf; durch die Expansion des Haufens gibt es eine Dissipation dieser Wärme, d. h. eine Abkühlung. Ob sich nun im Haufen ein IMBH bildet, hängt davon ab, welcher der beiden Prozesse dominiert.

Trenti konnte zeigen, dass das Verhältnis zweier charakteristischer Haufenradien, dem Kernradius r_c über dem Halbmassenradius r_h , sich nach einiger Zeit immer bei etwa 0.3 einstellt, falls im Haufen ein IMBH existiert. Das geschieht mehr oder weniger unabhängig vom Dichteprofil der Sterne im Haufen. Numerische Untersuchungen auf der Basis von N-Körper-Simulationen zeigen, dass das Radienverhältnis ohne IMBH deutlich abweichende Werte annimmt: $r_c/r_h \sim 0.02$, falls der Haufen aus Einzelsternen besteht oder $r_c/r_h \sim 0.05$, falls der Haufen aus Doppelsternen besteht. Deutlich größere, beobachtete Quotienten $r_c/r_h > 0.5$ könnten sogar auf ein **Binär-IMBH** hinweisen! Trenti kommt mithilfe des Radienkriteriums zu dem Schluss, dass mehr als die Hälfte der 57 Kugelsternhaufen im betrachteten Sample innerhalb der Milchstraße ein mittelschweres Loch enthalten sollten. Es ist nicht leicht, diese Zahl zu verallgemeinern, weil sicherlich Auswahl Effekte involviert sind - stimmt diese Überlegung jedoch, so haben wir es mit einer nicht unbedingt erwarteten Zahl mittelschwerer Löcher allein in der Milchstraße zu tun.

Es gibt zwei Kugelsternhaufen, die als sehr gute Kandidaten für Wirte mittelschwerer Schwarzer Löcher gelten, nämlich M15 und G1. Unsicherheiten, die eine klare Aussage über ein IMBH beeinträchtigen, liegen einerseits in der präzisen Bestimmung der Sternkinematik im jeweiligen Haufen begründet; andererseits ist die Lokalisierung von Röntgenquellen schwierig.

M15 ist ein galaktischer Kugelsternhaufen, der im Sternbild *Pegasus* liegt. Er sitzt wie alle Kugelsternhaufen der Milchstraße im galaktischen Halo und ist von der Erde etwa 9.8 kpc entfernt. Aus den Sternbewegungen folgt hier kinematisch eine Lochmasse von etwa **3400 Sonnenmassen** innerhalb einer Zentralregion von nur 0.05 pc (*van den Bosch et al.* 2005).

Der andere Kugelsternhaufen G1 gehört hingegen nicht zur Milchstraße, sondern bewegt sich im Halo der Andromedagalaxie. Es verwundert daher nicht, dass G1 mit 720 kpc deutlich weiter weg ist - entsprechend schwieriger gestaltet sich die Auflösung des Haufens in Einzelsterne. Dieser Kugelsternhaufen ist mit 10 Mio. Sonnenmassen der massereichste Kugelsternhaufen überhaupt. Aus den Sternbewegungen um das Zentrum folgt hier sogar eine Lochmasse von etwa **18000 Sonnenmassen** (*Gebhardt et al.* 2005).

IMBH in Zwerggalaxien

Die Lochmassen, die man in Kugelsternhaufen vermutet, sind schon beeindruckend, wie das letzte Beispiel G1 zeigt. Diese Massen können durch die mittelschweren Massen in Zwerggalaxien übertrumpft werden.

Ein Beispiel ist die Seyfert-Zwerggalaxie NGC 4395 im Sternbild *Jagdhunde*. Die Entfernung beträgt 4.2 Mpc. Die Masse des zentralen mittelschweren Schwarzen Loches beträgt etwa 10000 bis 100000 Sonnenmassen (*Shih et al.*, 2003), maximal allerdings etwa 6.2 Mio. Sonnenmassen (*Filippenko & Ho*, 2003).

Die zweite elliptische, ebenfalls aktive Zwerggalaxie heißt POX 52 und ist etwa 93 Mpc entfernt. Die Sternbewegungen um den Galaxienkern deuten auf eine kompakte Zentralmasse von 160000 Sonnenmassen hin (*Barth et al.* 2003, 2004). Stimmt die Massenangabe tatsächlich, so würde POX 52 gerade an die Massengrenze reichen, die zu den supermassereichen Schwarzen Löchern führt.

Schließlich wurde vor kurzem ein weiterer IMBH-Kandidat in einer Zwerg-Seyfertgalaxie aus dem *Sloan Digital Sky Survey* gefunden. Die Zwerggalaxie hat den Katalognamen SDSS J160531.84+174826.1 und weist eine kosmologische Rotverschiebung von $z = 0.032$ auf. Die Lochmasse wurde in diesem Fall aus der Doppler-Verbreiterung der Spektrallinie $H\alpha$ kinematisch zu 70000 Sonnenmassen bestimmt (*Dong et al.* 2006).

14.22.2 weitere Typen Schwarzer Löcher

Physiker und Astronomen spekulieren über die Existenz Schwarzer Löcher am unteren Ende der Massenskala. Dafür haben sich die Namen **Mini-Löcher** (siehe dazu unter Schwarze Löcher) und **primordiale Schwarze Löcher** eingebürgert. Es bestehen allerdings derzeit noch berechnete Zweifel an deren Existenz.

14.22.3 wissenschaftliche Publikationen & Quellen

- ◇ *Matsumoto et al.*: Discovery of a Luminous, Variable, Off-Center Source in the Nucleus of M82 with the Chandra High-Resolution Camera, *ApJ* **547**, L25, 2001
- ◇ *Zwart et al.*: Formation of massive black holes through runaway collisions in dense young star clusters, *Nature* **428**, 724, 2004
- ◇ *Strohmayer & Mushotzky*: Discovery of X-ray quasi-periodic Oscillations from an Ultraluminous X-ray source in M82: Evidence against Beaming, *ApJ* **586**, L61, 2003
- ◇ *Trenti, M.*: Dynamical evidence for intermediate mass black holes in old globular clusters, Preprint unter astro-ph/0612040
- ◇ *Trenti et al.*: Star Clusters with Primordial Binaries: III. Dynamical Interaction between Binaries and an Intermediate Mass Black Hole, Preprint unter astro-ph/0610342
- ◇ *Dong et al.*: SDSS J160531.84+174826.1: A Dwarf Disk Galaxy With An Intermediate-Mass Black Hole, Preprint unter astro-ph/0610145
- ◇ Web-Artikel: Kompakte Objekte des Himmels mit mehr Einzelheiten zu diesen und weiteren Himmelsobjekten

14.23 MOND

MOND steht für *MOdified Newtonian Dynamics*, und es handelt sich dabei um eine alternative Gravitationstheorie. Diese Theorie wurde 1983 von dem israelischen Physiker *Mordehai Milgrom* publiziert und wird seither von ihm und anderen Wissenschaftlern weiterentwickelt.

14.23.1 Motivation für MOND

Die Newtonsche Gravitation sollte Bewegungen innerhalb von Galaxien gut beschreiben können, weil Gravitationsfelder schwach und Geschwindigkeiten klein sind. Tatsächlich jedoch wurden Abweichungen gefunden, z. B. in der Bewegung von Gaswolken in den rotierenden Scheiben von Spiralgalaxien. Die gemessene Rotation und Zufallsbewegungen sind größer als erwartet. Anders gesagt, es treten *Beschleunigungsvariationen* auf, die Newtonsch nicht erklärbar sind. Auch die Pioneer-Anomalie besteht in einer rätselhaften Beschleunigung der Sonden Pioneer 10 und 11.

In der konventionellen Astrophysik wird diese Diskrepanz durch die Existenz einer unsichtbaren Materieform, **Dunkle Materie** (DM), gelöst (Das funktioniert leider nicht beim Pioneer-Problem). Die Dunkle Materie erzeugt dabei eine *zusätzliche* Gravitationskraft zur sichtbaren, baryonischen Materie und schon sind die rätselhaften Beschleunigungen erklärbar. Im Falle der Galaxien erklärt eine kugelige Verteilung Dunkler Materie um die galaktische Scheibe, das so genannte **DM Halo**, die gemessenen Rotationskurven recht gut.

MOND stellt nun eine alternative Erklärung für die Beschleunigungen *ohne* DM bereit. Generell sind Alternativen ohne DM dadurch motiviert, dass bis heute keiner der nicht-baryonischen DM-Kandidaten (z. B. ein exotisches Teilchen) experimentell aufgefunden wurde.

14.23.2 Wie funktioniert MOND?

Milgroms Ansatz besteht nun in einem modifizierten Newtonschen Gravitationsgesetz in dieser Form

$$\mu(|\mathbf{a}|/a_0) \mathbf{a} = -\nabla \Phi_N$$

Die rechte Seite ist gerade der negative Gradient des Gravitationspotentials - genau wie in der Newtonschen Gravitation. Auf der linken Seite steht eine Beschleunigung $\mathbf{a}$, was auch in Übereinstimmung zu Newton ist. Die Modifikation besteht in der neuen Funktion μ , die auf der linken Seite die Newtonsche Beschleunigung modifiziert: Im Fall der Newtonschen Gravitation gilt immer $\mu = 1$ (oder äquivalent a_0 geht gegen 0). Milgrom hat hingegen nun eine **glatte, beschleunigungsabhängige Funktion** μ angesetzt, die nur bei Beschleunigungen $|\mathbf{a}| \gg a_0$ nahe bei 1 liegt. Dabei ist a_0 eine Konstante, die etwa $1.2 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$ beträgt. Dieser Zahlenwert resultiert aus MOND-Studien an vielen Galaxien (*Begeman et al.* 1991). Zwei Vorschläge für den Verlauf von μ zeigt Diagramm 14.12.

14.23.3 Leistungen von MOND

Dieser Ansatz würde die beobachtete Abflachung der Rotationskurven in Spiralgalaxien erklären, weil bei genügend großem Abstand das neue Milgrom-Gravitationspotential

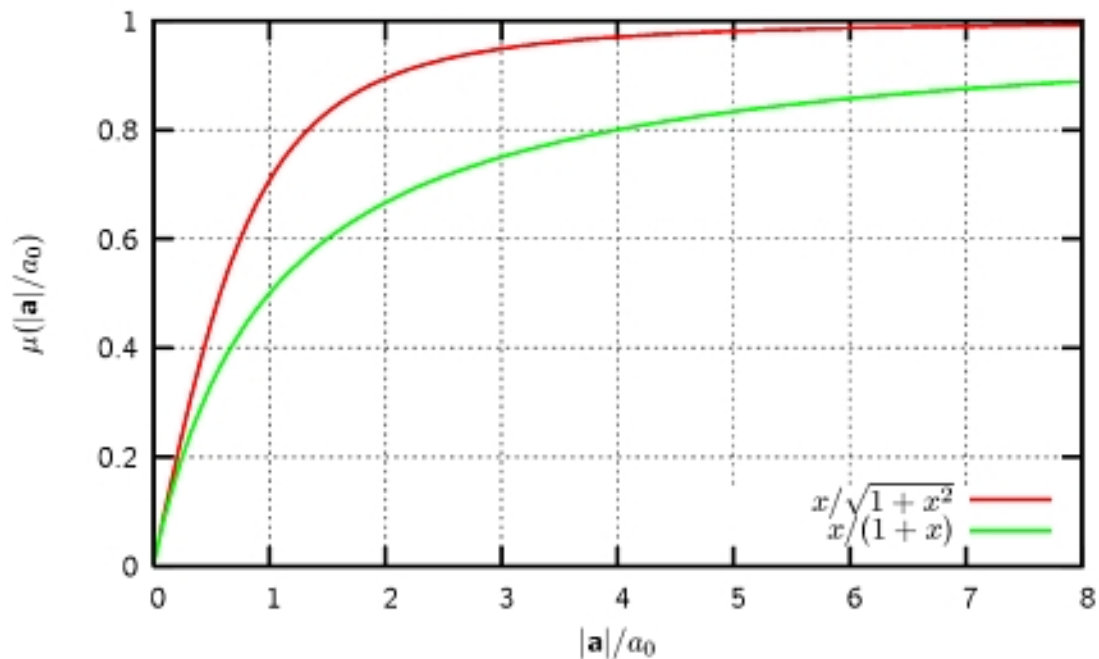


Abbildung 14.12: Verlauf der Milgrom-Funktionen in MOND.

unabhängig vom Radius wird. Ebenso ist MOND konsistent mit der *Tully-Fisher-Relation*, einer Korrelation zwischen Rotationsgeschwindigkeit und Blauhelligkeit, und den Beobachtungsdaten vieler weiterer Galaxien (Einzelheiten in *Bekenstein* 2007 und Referenzen darin).

1984 ist es Milgrom und seinem Kollegen *Jacob D. Bekenstein* (siehe auch Bekenstein-Hawking-Entropie) gelungen, das richtige Lagrange-Funktional (*Lagrangian*) zu finden, um das angesetzte Kraftgesetz ableiten zu können. Die entsprechend erweiterte Theorie nannten die beiden Autoren **AQUAL**, ein Akronym, das *Aquadratic Lagrangian Theory* bedeutet. Aus AQUAL folgt der Ansatz mit der μ -Funktion oben tatsächlich mathematisch. Der AQUAL-Lagrangian gewährleistet auch die Erhaltungssätze für Energie, Impuls und Drehimpuls, die von fundamentaler Bedeutung in der Physik sind. Außerdem ist AQUAL konsistent mit dem **schwachen Äquivalenzprinzip**.

14.23.4 relativistische Version von MOND

MOND ist eine veränderte Newtonsche Gravitation, aber im Kern ist sie ein Newtonsches Konzept. In der modernen Astrophysik sind jedoch viele Beobachtungen nur mit **relativistischen Modellen** zu verstehen - der Gravitationskollaps auf ein kompaktes Objekt, die Annäherung von Neutronensternen in einem Doppelsternsystem aufgrund der Emission von Gravitationswellen oder die Expansion des Universums im Rahmen der Kosmologie beispielsweise. Vermag die Milgrom-Theorie auch solche 'Extremfälle der Gravitation' zu beschreiben?

Die ersten Versuche einer relativistischen Verallgemeinerung von MOND mündeten in

RAQUAL (relativistische AQUAL) und einer Feldtheorie mit zwei Skalarfeldern namens **Phasengekoppelte Gravitation** (engl. *phase-coupled gravity*, PCG). Beide Theorien wurden jedoch aufgegeben: In RAQUAL traten akausale Überlichtgeschwindigkeitseffekte auf. Es wurde versucht, dies in PCG zu beheben, doch diese Feldtheorie entpuppte sich als nicht verträglich mit Beobachtungen im Sonnensystem (Drift der Kepler-Konstante a^3/P^2 aus dem dritten Kepler-Gesetz).

Auch die Implementation eines **neuen Vektorfelds** in AQUAL durch *R.H. Sanders* 1997 brachte neue Einsichten, doch alte Probleme: Zwar war diese relativistische Variante von MOND nun mit beobachteten, kosmologischen Gravitationslinsen verträglich, aber man handelte sich mit dem Vektorfeld eine ausgezeichnetes Bezugssystem im Kosmos ein - das ist nicht vereinbar mit dem kosmologischen Prinzip und sollte eine neue Form von 'Äther' bedingen, den die Physiker doch erfolgreich mit der Relativitätstheorie los geworden sind. Sanders relativistische MOND-Version war außerdem nicht kovariant.

Erst wenn das neue **Vektorfeld dynamisch** wird, können diese Probleme beseitigt werden. Das Resultat wird **TeVes** genannt. Dieses Akronym steht für *Tensor-Vector-Scalar theory of gravity*, also Tensor-Vektor-Skalar-Gravitationstheorie. TeVeS wurde 2004 erstmals von Bekenstein formuliert und wird seither weiterentwickelt. Die Bezeichnung ist plausibel, weil diese Gravitationstheorie durch einen Tensor, einen zeitartiger Vektor und einen Skalar konstruiert wird. Das ist ein klarer Unterschied zu Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie (ART), eine Gravitation, die nur durch einen Tensor, den metrischen Tensor, vermittelt wird. Die Unterschiede treten auf dem feldtheoretischen Niveau zutage, wenn man die Lagrangians der beiden Theorien vergleicht: Die ART basiert auf der Einstein-Hilbert-Wirkung, die nur von der Determinante des metrischen Tensors abhängt; TeVeS involviert dagegen weitere Terme im Lagrangian, die von dem neuen Vektor und dem neuen Skalar abhängen. Dennoch verhält sich die Kosmologie mit TeVeS in vielerlei Hinsicht so wie die Einsteinsche Kosmologie.

14.23.5 GR mit DM vs. TeVeS ohne DM

Kosmologische Gravitationslinsen sind im konventionellen Bild hohe und dichte Ansammlungen von normaler und Dunkler Materie. Die Standard-Gravitationsphysik besagt, dass sowohl normale Materie, als auch Dunkle Materie jeweils für sich genommen ein Gravitationspotential erzeugen, die beide an dem Licht 'ziehen'. In TeVeS gibt es keine Dunkle Materie. Daher bleibt nur das Gravitationspotential der normalen Materie bestehen, und den Part der Dunklen Materie übernimmt in TeVeS eine nicht-lineare Gleichung der AQUAL-Theorie.

14.23.6 aktueller Stand und kritische Einschätzung

MOND und dessen relativistische Erweiterung TeVeS sind Theorien in der Gravitationsforschung, die sich deutlich vom Mainstream absetzen. Ganz objektiv betrachtet gibt es unter Gravitationsforschern und Physikern zurzeit deutlich mehr Anhänger am Standardmodell mit Dunkler Materie, als an MOND/TeVés. Diese Beobachtung bedeutet jedoch gar nichts, weil in den Naturwissenschaften die bewährten Theorien gewinnen. Es wird sich also in einem langwierigen Prozess erweisen, welche Theorie die Natur am besten beschreibt.

Mit Blick auf die Struktur von TeVeS könnte man kritisch das Prinzip minimaler gravitativer Kopplung anführen, das im Kern ein Plädoyer für eine genügend einfache Theorie

ist. Ist nun eine Gravitationstheorie einfach, die Tensor, Vektor und Skalar erfordert? Oder ist eine Theorie einfach, die nur tensoriell ist, aber eine zusätzliche Materieform postuliert, die nie direkt beobachtet wurde? Darüber kann man sicher streiten.

Der moderne, orthodoxe Kosmologe mag MOND/TeV-S-Theorien mit dem Einwand abschmettern wollen, dass das Λ CDM-Konsensmodell bestens mit den Beobachtungen an der kosmischen Hintergrundstrahlung (CMB) und Supernovae Ia vereinbar sei. Doch kürzlich ist es gelungen, dass das CMB-Spektrum mit einer TeV-S-Kosmologie **ohne** Dunkle Materie erklärt werden könne (*Skordis et al.* 2006): Die kosmologische Konstante bliebe dann erhalten, und eine massereiche Form von Neutrinos (mit einer Masse noch innerhalb tolerabler Grenzen des Standardmodells) wäre vonnöten. Aktuell deutet sich in einigen TeV-S-Modellen sogar an, dass auch auf die rätselhafte Dunkle Energie verzichtet werden könne, falls eine TeV-S-Gravitation bemüht werde. Diese Entwicklungen sind sicherlich äußerst interessant - aber erst viele überstandene Hypothesentests von MOND/TeV-S werden das Gros der Wissenschaftler überzeugen, die fest an die Existenz von Dunkler Materie und Dunkler Energie glauben.

14.23.7 Originalveröffentlichungen & Quellen

- ◇ *Milgrom, M.*: A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis, *ApJ* **270**, 365, 1983
- ◇ *Bekenstein, J. D.*: The modified Newtonian dynamics - MOND - and its implications for new physics, Preprint unter astro-ph/0701848, 2007

14.24 Monopolproblem

Ein Problem in der Kosmologie, das durch die **Inflation** gelöst wird. Unter dem Eintrag Inflation werden Problem und Auflösung erläutert.

14.25 Morphismus

Morphismen sind Abbildungsvorschriften (engl. *map*), manchmal auch 'Pfeile' genannt, wie sie in einem Teilgebiet der Mathematik, der **Kategorietheorie**, behandelt werden.

14.25.1 Denken in anderen Kategorien

Eine Kategorie besteht aus Objekten und Morphismen, die die Objekte aufeinander abbilden können. Als Objekte kommen (mathematische) Gruppen, Vektorräume, (differenzierbare) Mannigfaltigkeiten wie eine Riemannsche Metrik (z. B. die Raumzeit der ART) etc. in Betracht. Generell nennt man Morphismen auch *Homomorphismen*. Findet beispielsweise die Abbildung von einer Gruppe in die andere statt, so nennt man den Morphismus einen *Gruppenhomomorphismus*.

14.25.2 -ismen

Je nach Eigenschaften unterscheidet man einen Homomorphismus in Automorphismus, Endomorphismus, Epimorphismus, Homöomorphismus, Isomorphismus oder Monomorphismus.

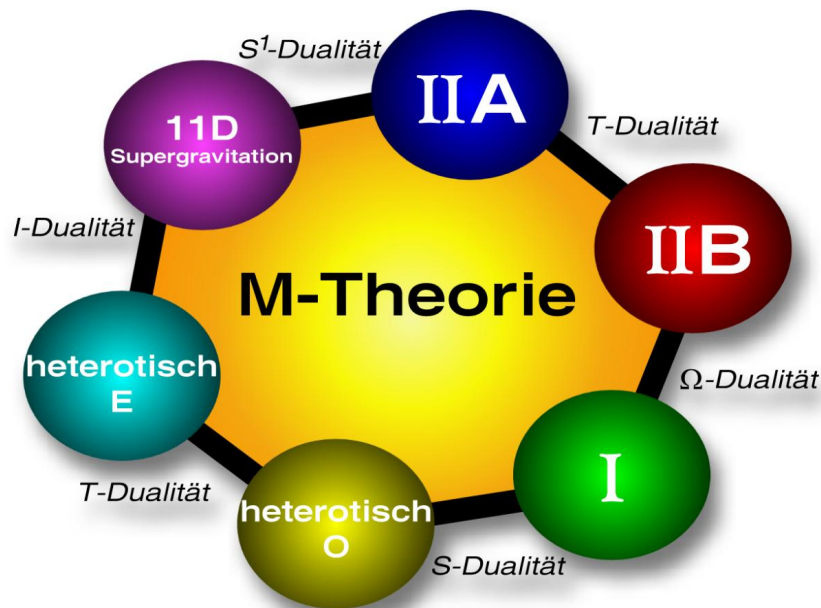


Abbildung 14.13: duale Verknüpfung von fünf Stringtheorien und der Supergravitation zur M-Theorie.

14.25.3 ART braucht den Diffeomorphismus

Von besonderer Wichtigkeit in der theoretischen Physik ist der Diffeomorphismus. Denn die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) mit ihren umwälzenden Vorstellungen von Raum und Zeit diktiert **Diffeomorphismusinvarianz** (engl. *diff-invariance*). Diese **Hintergrundunabhängigkeit** ist eine der wesentlichen Zutaten der Loop-Quantengravitation.

14.26 M-Theorie

Die M-Theorie bezeichnet die Mutter (engl. mother; alternativ: membrane, mystery, magic) aller Theorien und die elfdimensionale, vereinigte Theorie der fünf Stringtheorien und der Supergravitation. Der Physiker *Edward Witten* hat diesen Begriff geprägt und konnte zeigen, dass alle bis dato existenten, als verschiedenen angesehenen Stringtheorien Ausfluss ein und derselben, übergeordneten Theorie sind: der M-Theorie.

14.26.1 Dualitäten

Die Verbindung zwischen den sechs einzelnen Theorien bilden mathematische Relationen, die so genannten *Dualitäten*, was schematisch Grafik 14.13 zeigt.

14.26.2 M-Branen

Die mathematischen Objekte der M-Theorie sind die **M-Branen**, Strings und p-Branen (mit Dimension p). Gegenstand der M-Theorie bzw. Stringtheorien ist die Definition,

Quantisierung und Wechselwirkung solcher Objekte. Dabei wird die Fragestellung verfolgt, wie sie zu interpretieren sind, beispielsweise mit welchen Teilchen oder physikalischen Objekten (z. B. auch Schwarzen Löchern) sie assoziiert sind.

14.26.3 Zutat: nicht Uschi, sondern Susy

Es stellte sich heraus, dass die M-Theorie zur Vermeidung von akausalen Tachyonen (mit imaginärer Masse) notwendigerweise supersymmetrisch sein muss. Diese Eigenschaft erhöht die Anzahl möglicher bosonischer und fermionischer Teilchenkandidaten enorm! Supersymmetrie resultiert in einem riesigen Teilchenzoo.

14.26.4 Durchbruch oder Holzweg?

Die M-Theorie ist noch weit von einer konsistenten Theorie und vollständigen, mathematischen Beschreibung entfernt, die darüber hinaus praktikabel und verständlich ist. Anschaulich gesprochen, sind die Stringtheorien nur wenige Fragmente eines großen Puzzles, das in seiner Gesamtheit die mutmaßliche M-Theorie darstellt. Sowohl Stringtheorien und M-Theorie sind Gegenstand der aktuellen Forschung. Inwieweit diese Theorien tatsächlich die Natur adäquat beschreiben, muss noch gezeigt werden. Eine Hoffnung verbinden die Stringtheoretiker mit der M-Theorie: Ähnlich wie Relativitätstheorie und Quantentheorie die **Physikalischen Revolutionen des 20. Jahrhunderts** waren, so sollte die M-Theorie diejenige des 21. Jahrhunderts werden.

14.26.5 andere Konzepte

Neben diesem Kandidaten einer übergeordneten Theorie ist die Loop-Quantengravitation (LQG) getreten. Sie versucht mit den Prinzipien und Methoden der Allgemeinen Relativitätstheorie und Quantenmechanik die Konzepte einer robusten Quantengravitation zu definieren. Nimmt man das Unifikationsbestreben von Theorien als Kriterium, so will die LQG weniger (eine 'quantisierte Gravitation'), während die Stringtheorien bzw. die M-Theorie **alle** fundamentalen Wechselwirkungen in der Natur zu vereinigen sucht.

14.26.6 WANTED: experimenteller Input

Wesentliche Impulse von experimenteller Seite erhoffen sich die Physiker von modernen Teilchenbeschleunigern der nächsten Generation (2008: LHC am CERN) sowie kosmologischen Beobachtungsdaten. Diese Daten legen generell den Theorien Beschränkungen auf, die in eine Bewährung, Modifikation oder Falsifikation einer Theorie münden können.

14.27 Myonen

Myonen gehören zur großen Teilchengruppe der Leptonen und sind schwerer als ihre 'nächsten Verwandten': die Elektronen. Die Ruhemasse von Myonen (negative Ladung) und Antimyon (positive Ladung) beträgt jeweils 105.658357 MeV (Quelle: *Particle Physics Booklet*, Juli 2002).

14.27.1 Myonen fallen vom Himmel

Myonen (eingedeutscht auch als *Müonen* zu lesen) können in der **Höhenstrahlung** (siehe kosmische Strahlung) entstehen. Der Prozess läuft so ab, dass hochenergetische Gammastrahlung Elektron-Positron-Paare erzeugt. Die beiden Zerfallsteilchen fliegen diametral (Impulserhaltung) auseinander und können direkt nach der Entstehung auch wieder annihilieren (siehe auch Antimaterie). Auf diese Weise entstehen **Kaskaden von Teilchenschauern** in der Hochatmosphäre. Es ist aber auch möglich, dass sich über einen schwachen Prozess (siehe schwache Wechselwirkung) das entstandene Elektron-Positron-Paar in ein **Myon-Antimyon-Paar** umwandelt. Diese Teilchen zerfallen dann üblicherweise auch wieder in verschiedenen Zerfallskanälen.

14.27.2 Bedeutung für Neutrinoastronomie

Myonen haben eine hohe Relevanz in der Neutrinoastronomie, weil sie durch kosmische Neutrinos in Cerenkov-Detektoren gebildet werden. Das Detektionsprinzip der Neutrinodetektoren der neusten Generation, wie AMANDA und bald ICECUBE am Südpol, basiert gerade darauf, dass paradoxerweise *durch* die Erde beobachtet wird. Dies liegt daran, weil hochenergetische Neutrinos kosmischer Quellen Myonen in der Erdmaterie erzeugen können. Schaffen diese Myonen es, in das Detektorvolumen zu gelangen, erzeugen sie dort einen Cerenkov-Lichtkegel und können eindeutig einer extraterrestrischen Quelle zugeordnet werden. Der Richtungsversatz zwischen Neutrino und daraus gebildetem Myon ist minimal und beträgt maximal ein Grad. Die Myonen der Höhenstrahlung hingegen - die tatsächlich 'von oben' kommen - sind in der Neutrinoastronomie nur ein Störeffekt (*Untergrundrauschen*).

14.27.3 Wie kommt ihr eigentlich hierher?

Die **atmosphärischen Myonen** sollten aufgrund ihrer kurzen, mittleren Lebensdauer von 2.197 Mikrosekunden am Erdboden gar nicht nachweisbar sein. Dies ist trotzdem gelungen! Man erklärt dies mit der Speziellen Relativitätstheorie: da sich die Myonen mit Geschwindigkeiten bewegen, die vergleichbar sind mit der Lichtgeschwindigkeit, werden **relativistische Effekte** wirksam. Die Zeitdilatation dehnt die Zerfallszeit im Ruhesystem gegenüber der Zeitspanne im Beobachtersystem aus. Dadurch können die Myonen einen längeren Weg durch die Atmosphäre zurücklegen als klassisch abgeleitet: sie schaffen es bis auf den Erdboden!

14.27.4 Das Myon-Atom

Mit Myonen kann man eine exotische Form von Materie kreieren: **Myon-Atome**, in denen schwere Myonen anstatt Elektronen den Kern 'umkreisen'. Die Myon-Chemie wäre allerdings ein recht teures Unternehmen.

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