
Lexikon

der



Astrophysik

von



Andreas Müller

aus dem

Wissensportal für Astrophysik

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

April 2007

Abbildungsverzeichnis

22.1	Multiwellenlängen-Beobachtungsfoto der Cartwheel-Galaxie von 2006.	6
22.2	Vergößerung des Chandra-Beobachtungsfotos der Cartwheel-Galaxie von 2006.	7
22.3	Beziehung zwischen kosmischer Zeit und Rotverschiebung im Universum.	11
22.4	Urknall: Expansion und Abkühlung des Universums.	15

22 Lexikon U

22.1 ULIRG

Das Akronym ULIRGs steht für *Ultra-Luminous InfraRed Galaxies*. Gelegentlich wird das R auch unterschlagen und man liest von ULIGs. Diese Galaxien zeichnen sich also durch eine **extreme Infrarothelligkeit** aus, die im fernen Infrarot (engl. *far infra-red*, **FIR**) etwa 10^{12} Sonnenleuchtkräfte und mehr beträgt. Dabei entspricht die Leuchtkraft der Sonne etwa 4×10^{26} Watt oder 4×10^{33} erg! Mit LIRG/LIG werden Infrarotgalaxien bezeichnet, die eine Leuchtkraft von wenigen Größenordnungen unterhalb derjenigen von ULIRGs/ULIGs haben.

22.1.1 Woher kommt diese extreme Infrarothelligkeit?

Modell 1: Starburst

Das erste Modell erklärt die Infrarothelligkeit durch eine **erhöhte Sternentstehungsaktivität** (engl. *starburst activity*), also eine hohe Bildungsrate von massereichen Sternen in der Galaxie. Nun mag man sich fragen, warum plötzlich Sterne vermehrt entstehen. Der Grund dafür ist die **Verschmelzung von Galaxien**. Im Speziellen vermuten die Astronomen, dass gasreiche Spiralgalaxien zusammenstoßen. Die Vermischung und Verdichtung von Gas in den kollidierenden Galaxien leitet eine verstärkte und schnelle Entstehung von Sternen ein. Alle Sterne zusammen erhöhen die Infrarothelligkeit der verschmelzenden Galaxien insgesamt.

Modell 2: AGN

Während des Galaxienzusammenstoßes verliert das Gasgemisch Drehimpuls infolge *dynamischer Reibung*, d. h. die Gasmassen ziehen sich gegenseitig an und 'bremsen sich aus'. Das Gas wird dabei von der Sternpopulation in den Galaxien 'entkoppelt' und fließt in den Zentralbereich der verschmelzenden Galaxien. Das sind ideale Voraussetzungen zum Zünden eines Aktiven Galaktischen Kerns (AGN). Im Standardmodell der AGN wird durch **Akkretion auf ein supermassereiches Schwarzes Loch** im Zentrum der Galaxie eine gigantische Leuchtkraft erzeugt. Mittels Interferometerbeobachtungen im Bereich der Millimeterstrahlung konnte die Gasmasse innerhalb von 0.5 kpc um das Zentrum der hellsten Infrarotgalaxien zu 10 Mrd. Sonnenmassen bestimmt werden. Das sind riesige Gaskonzentrationen!

22.1.2 zwei erfolgreiche Infrarotsatelliten

Der 1983 gestartete *Infrared Astronomical Satellite* (**IRAS**, *Soifer et al.* 1987) und das 1995 gestartete *Infrared Space Observatory* (**ISO**, *Kessler et al.* 1996) haben das Verständnis der mysteriösen Infrarotgalaxien gewaltig nach vorne gebracht. Der IRAS-Survey wurde bei Wellenlängen von 12, 25, 60 und 100 Mikrometern (engl. *micron*) durchgeführt und

deckte 96% des Himmels ab (Fachbegriff: *all-sky survey*)! ISO ist mit zwei Spektrometern ausgestattet, die zwischen 2.4-45 und 43-197 Mikrometern beobachten.

22.1.3 Status der (U)LIRG-Forschung

Bei den größten Infrarotleuchtkräften sind ULIRGs die dominierenden Objekte: Sie treten dann in vergleichbarer Zahl wie die Seyfert-Galaxien auf und sind sogar zahlreicher als die Quasare.

Die Analyse eines speziellen Samples aus 15 ULIRGs ergab, dass 70-80% der Galaxien durch die Entstehung massereicher Sterne angetrieben werden, wohingegen 20-30% davon durch einen AGN erklärt werden können. Indikator für AGN-Aktivität ist dabei die Stärke der spektroskopischen Signatur von polyaromatischen Kohlenwasserstoffen (PAHs). In etwa der Hälfte der ULIRGs im Sample laufen beide Prozessen gleichzeitig ab, und zwar in der etwa ein bis zwei kpc durchmessenden zirkumnuklearen Scheibe (*Genzel et al.* 1998).

Es zeigte sich auf der Grundlage der neuen Infrarotbeobachtungen, dass **LIGs/ULIRGs generell AGN und Starburst-Aktivität** zeigen. Die anfänglich favorisierte Trennung von Starburst vs. AGN ist nicht mehr haltbar und ULIRGs sind komplexer als ursprünglich gedacht (*Genzel & Cesarsky* 2000).

22.1.4 ULIRGs zeigen auch Röntgenaktivität!

Astronomen konnten nachweisen, dass ULIRGs auch am anderen Ende des Spektrums sehr auffällig sind: sie zeigen **Röntgenleuchtkräfte** bis zu 10^{42} erg/s (entsprechend 10^{11} Sonnenleuchtkräften). Dies fanden die Astronomen beim **ULIRG NGC 6240** durch Beobachtungen mit dem deutschen Röntgenobservatorium *ROSAT* (*Komossa et al.* 1998). Außerdem wurde bei dieser Beobachtung ein Komplex verschiedener **Fe-K α -Linien** entdeckt. Diese Eisenlinien sind gerade ein Charakteristikum für AGN. Die Linien liegen (für neutrales Eisen) bei einer Ruheenergie von etwa 6.4 keV und entstehen durch *Fluoreszenz* in ionisiertem Eisen. Sie sind außerordentlich wichtig bei der Diagnostik von AGN, um Parameter des Systems aus Schwarzes Loch und Akkretionsscheibe abzuleiten. Eine gute Auflösung dieser Linien ermöglicht die Bestimmung von wesentlichen Parametern, wie Neigung (*Inklination*) der Scheibe, der Rotation des Loches (Kerr-Parameter) und des Geschwindigkeitsfeldes des Plasmas in der Umgebung des Loches.

22.1.5 Tanz zweier superschwerer Löcher

Spätere Beobachtungen an NGC 6240 deckten weitere faszinierende Fakten auf: Mit dem US-amerikanischen Röntgensatelliten *Chandra*, das räumliche Strukturen sehr gut auflösen vermag, gelang der Nachweis eines **doppelt-aktiven Kerns** in NGC 6240 (*Komossa et al.* 2003). Mit anderen Worten: im Zentrum von NGC 6240 tummeln sich **zwei supermassereiche Schwarze Löcher**, die umeinander tanzen. Genau das würde man als Folge der oben beschriebenen Galaxienkollision auch erwarten. NGC 6240 gehört zu den besten Kandidaten eines 'Binär-Lochs'.

Von solchen 'Lochzwillingen' wissen Relativisten, dass sie wie die stellaren Analoga (umkreisende stellare Schwarze Löcher, Hulse-Taylor-Pulsar) intensive Gravitationswellen abstrahlen - vor allem, wenn sich die beiden Löcher sehr nahe kommen. Durch den Energieverlust des Systems infolge Abstrahlung der Gravitationswellen sollten die beiden gigantischen Löcher irgendwann einmal verschmelzen. Die Gravitationswellenforscher

erwarten dann eine intensive Abstrahlung der Gravitationswellen (engl. *gravitational wave burst*). Sie hoffen, dass das *bald direkt beobachtbar* sein wird.

22.1.6 weitere ULIRGs

Andere ULIRGs sind IRAS 05189-2524, die einen (Compton-dünnen) 1.9 Seyfertkern aufweist, UGC 5101 mit zirkumnuklearen Scheibe heftigster Sternentstehung und ULIRG 00029-1424 mit einer kosmologischen Rotverschiebung von $z = 0.44$.

22.1.7 wissenschaftliche Veröffentlichungen

- ◇ Soifer et al. 1987, *ApJ* **320**, 238: The IRAS bright galaxy sample. II - The sample and luminosity function
- ◇ Soifer, Neugebauer & Houck 1987, *ARA&A* **25**, 187: The IRAS view of the extragalactic sky
- ◇ Sanders & Mirabel 1996, *ARA&A* **34**, 749: Luminous Infrared Galaxies
- ◇ Kessler et al. 1996, *A&A* **315**, 27: The Infrared Space Observatory (ISO) mission.
- ◇ Genzel et al. 1998, *ApJ* **498**, 579: What powers ultraluminous IRAS galaxies?
- ◇ Komossa, Schulz & Greiner 1998, *A&A* **334**, 110: ROSAT HRI discovery of luminous extended X-ray emission in NGC 6240
- ◇ Genzel & Cesarsky 2000, *ARA&A* **38**, 761: Extragalactic Results from the Infrared Space Observatory
- ◇ Komossa et al. 2003, *ApJ* **582**, 15: Discovery of a Binary Active Galactic Nucleus in the Ultraluminous Infrared Galaxy NGC 6240 Using Chandra

22.2 ULX

ULX ist ein Akronym für *ultraluminous X-ray source* und bezeichnet damit eine **ultraleuchtkräftige Röntgenquelle**. Das Attribut 'ultra-' weist darauf hin, dass es sich um Quellen mit *ungewöhnlich hoher Röntgenleuchtkraft* handeln muss. ULXs haben ihrer Definition nach Röntgenleuchtkräfte von $L_X = 10^{39}$ bis 10^{41} erg/s im Band zwischen 0.2 und 10 keV.

Dass diese Röntgenleuchtkräfte gigantisch sind, erkennt man beim Vergleich mit der Röntgenleuchtkraft der Sonne: selbst im Maximum schafft sie nur knapp 5×10^{27} erg/s. Das ist billionenfach schwächer (12 Größenordnungen!) als beim schwächsten ULX!

22.2.1 Wo gibt's denn sowas?

ULXs wurden sowohl in der Milchstraße, als auch in zahlreichen extragalaktischen Systemen beobachtet.

22.2.2 Was leuchtet denn da?

Eine sehr schnelle Abschätzung kann mit dem *Eddington-Kriterium* durchgeführt werden. Unter der Annahme, dass das Leuchten durch **Akkretion** erzeugt wird, setzt die Eddington-Leuchtkraft die beobachtete Leuchtkraft in Bezug zur Masse des aufsammelnden Objekts. Auf dieser Basis lassen sich schon sehr interessante Schlüsse auf Eigenschaften der ULXs ziehen.

Szenario 1: Ein super-Eddington-Akkretor

Nehmen wir an, der ULX strahle mit einer Leuchtkraft von 10^{39} erg/s. Nehmen wir weiterhin an, dass die Masse des Materieaufsammlers (*Akkretor*) 1.4 Sonnenmassen betrage (das ist gerade die Chandrasekhar-Masse). Dann folgern wir mit der Eddington-Relation, dass der ULX unter diesen Voraussetzungen eine **super-Eddington-Quelle** sein muss. Mit anderen Worten: Der ULX würde extrem effizient Materie aufsammeln.

Szenario 2: Ein intermediate-mass black hole

Bleiben wir weiterhin bei der angenommenen ULX-Leuchtkraft von 10^{39} erg/s. Lässt sich das auch anders auf der Basis des Eddington-Arguments verstehen? Ja, denn der Akkretor könnte auch massereicher sein. Akkretiert der ULX gerade am Eddington-Limit, so können wir mit der ersten Gleichung unter dem Eintrag Eddington-Leuchtkraft sofort seine Masse ausrechnen. Wir erhalten bei 10^{39} erg/s exakt **7.7 Sonnenmassen**. Für das obere Ende der ULX-Leuchtkräfte erhalten wir sogar **770 Sonnenmassen**. Sollte der Akkretor sogar sehr ineffizient Materie aufsammeln und als sub-Eddington-Quelle z. B. nur durch ADAF-Akkretion angetrieben werden, so müsste die Akkretormasse noch **weit größer als 1000 Sonnenmassen** sein.

Was könnte das für ein Objekt sein? Diese Massen sind gerade für die leuchtkräftigsten ULXs zu hoch, als dass es ein massereicher Stern sein könnte. Es wurde daher vorgeschlagen, dass akkretierende, mittelschwere Schwarze Löcher (engl. *intermediate-mass black holes*, **IMBHs**) ULXs erklären könnten. Diese Annahme ist nicht ohne Reiz, weil diese 'Mittelgewichte' die klaffende Lücke zwischen den 'Fliegengewichten' (stellare Schwarze Löcher) und den 'Schwergewichten' (supermassereiche Schwarze Löcher) füllen würden. Szenario 2 wird gestützt von IMBHs, die auch in Kugelsternhaufen und jungen Sternhaufen vermutet werden.

Die Signatur eines IMBHs ist eine **kalte** Akkretionsscheibe mit Temperaturen von $kT \sim 100$ bis 200 eV. Das folgt aus der Theorie der Standardakkretionsscheiben, deren Temperatur *antiproportional* zur Akkretormasse ist. Kurz: Hohe Lochmasse macht eine kalte Scheibe.

22.2.3 Geschichtlicher Abriss

- ◇ ULXs werden seit mehr als zwanzig Jahren beobachtet - allerdings hießen sie Anfang der 1980er Jahre nicht ULXs: *Palumbo et al.* (1985) berichteten, dass sie sowohl in der Spiralgalaxie M51, als auch in deren Begleitgalaxie NGC5195 helle Röntgenquellen (10^{39} bis 10^{40} erg/s) mit dem Einstein-Observatorium identifizieren konnten. In beiden Fällen sind diese Objekte nicht mit dem Kern ihrer Wirtsgalaxie assoziiert. Im Falle von M51 wurde eine Quelle mit etwa zehn Sonnenmassen abgeleitet.
- ◇ 1993 schlugen *Fabian & Ward* sogar einen Akkretor mit etwa hundert Sonnenmassen vor, den sie mit einem ULX in der Zwerggalaxie NGC5408 in Verbindung brachten.

- ◊ In einem wichtigen Papier zu ULXs wird auf der Grundlage von ROSAT-Daten die Existenz von IMBHs von 100 bis 10000 Sonnenmassen gefordert (*Colbert & Mushotzky* 1999). Die Quellen in diesem Sample sind konsistent damit, dass sie viel Materie in kurzer Zeit akkretieren (so genannter *high state*, siehe Bild unter Akkretion).
- ◊ Eine statistische Analyse von ROSAT-Daten ergab, dass eine von fünf Galaxien mindestens einen ULX enthalte (*Roberts & Warwick* 2000).
- ◊ 2001 wurde ein ULX in der Galaxie M82 mit dem US-amerikanischen Röntgenteleskop Chandra entdeckt, der unter dem Eintrag mittelschwere Schwarze Löcher detailliert beschrieben wird. Bei diesem hellsten aller ULXs sprechen Astronomen gelegentlich auch von einem HLX, einer *hyperluminous X-ray source*.

22.2.4 Kritik an der Definition

Die Definition eines ULXs nur mit *einem einzigen* Parameter, der Röntgenleuchtkraft, kann leicht dazu führen, dass die ULX-Population eine Mischung aus Quellen sehr unterschiedlicher Physik ist.

22.2.5 Einige Fakten

Eine Bedeckung wäre zu erwarten, falls sich die Quelle des ULX in einem Doppelsternsystem befindet, das gerade so zum irdischen Beobachter geneigt ist, dass der Begleiter vor dem ULX vorüberzieht. Doch bislang wurde **keine einzige Bedeckung** bei ULXs beobachtet.

In der Umgebung des ULX könnten sich Supernovaremnants befinden, die sich bildeten, als der ULX geboren wurde. Die Supernovaüberreste strahlen im Radiobereich, aber auch optisch. Die energiereiche Strahlung der ULXs ionisiert den expandierenden Nebel um die Zentralquelle, so dass dann der Nebel optisch beobachtbar ist. Dieser Vorgang ist ganz ähnlich bei den Planetarischen Nebeln - nur sitzt dort kein ULX, sondern ein Weißer Zwerg der 'nur' UV-Strahlung emittiert.

ULX-Spektren ähneln sehr denjenigen von galaktischen Röntgendoppelsternen. Doch einige zeigen besonders weiche, thermische Röntgenstrahlung ($kT \sim 50$ bis 100 eV). Diese spezielle Klasse von Röntgenquellen heißt **superweiche Röntgenquellen** (engl. *supersoft X-ray sources*, **SSS**). Superweiche ULXs wurden sowohl in der Milchstraße, als auch in den Magellanischen Wolken und der Antennengalaxie entdeckt.

22.2.6 Alternative: Mikroblazare

Ähnlich wie bei den Mikroblazaren und Blazaren versuchten Astronomen, die extreme ULX-Strahlung durch **Blauverschiebung** (*beaming*) zu erklären (*Reynolds et al.* 1997). Mit diesem Ansatz würden stellare Schwarze Löcher als ULX-Population ausreichen, und die nötigen Lorentz-Faktoren der Jets lägen bei etwa 5 (*Körding et al.* 2002). In diesem Fall hat das ULX-Modell eine Vorzugsrichtung, nämlich die Ausbreitungsrichtung des Jets und wird daher als *anisotropes Modell* klassifiziert. Die oben beschriebenen Akkretionsmodelle mit IMBHs sind dagegen *isotrop*. Die Jets würden außerdem mit bis zu 30% zur weichen Röntgenstrahlung beitragen.

Beobachtungen im Fall von M82 X-1 sprechen *gegen* das Beaming-Modell, weil hier Quasi-periodische Oszillationen (QPO) und eine relativistisch verbreiterte Eisenlinie (*Strohmayer & Mushotzky* 2003) entdeckt wurden.

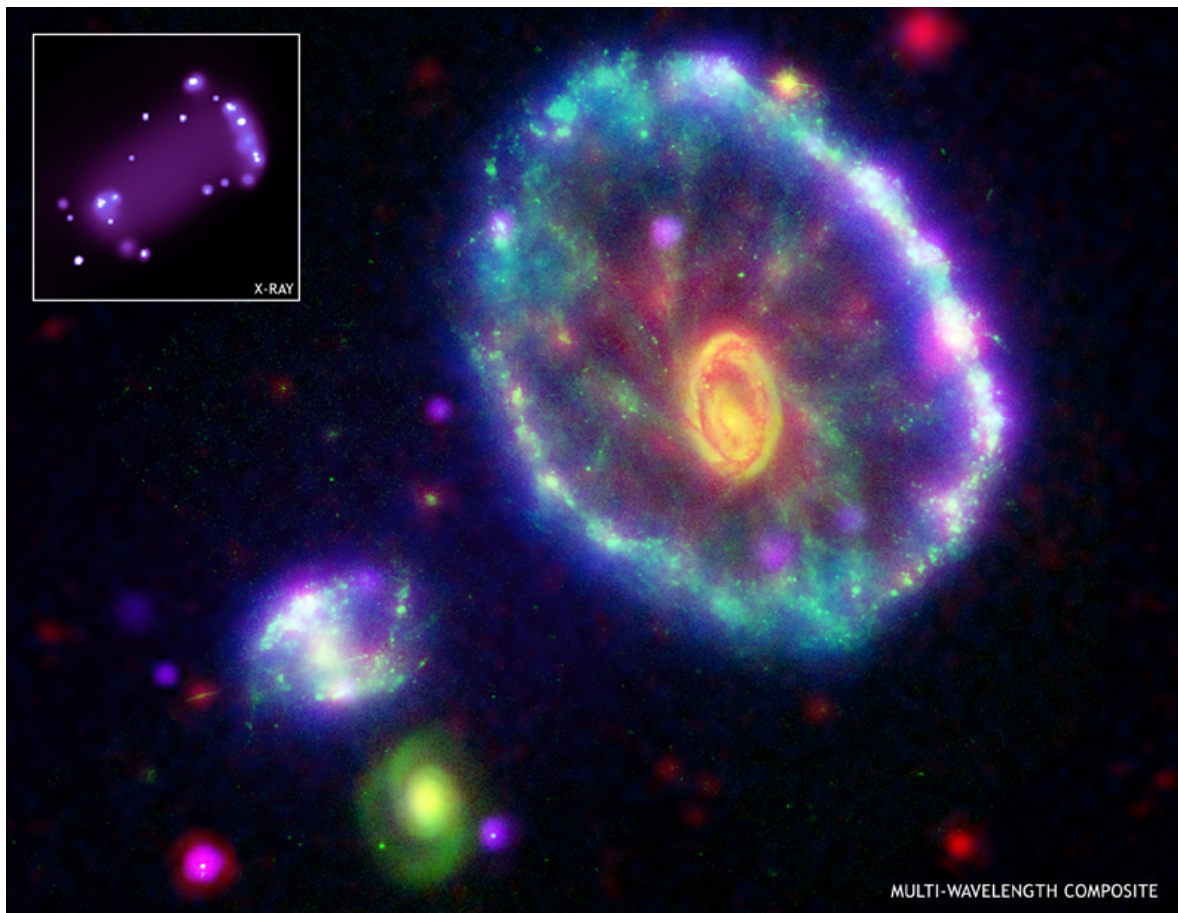


Abbildung 22.1: Multiwellenlängen-Beobachtungsfoto der Cartwheel-Galaxie von 2006.

Wie im Lexikoneintrag mittelschwere Schwarze Löcher exemplarisch an M82 X-1 erläutert wird, sprechen mittlerweile auch Computersimulationen der Haufendynamik für die Bildung von IMBHs (*Zwart et al.* 2004).

22.2.7 ULXs mögen eine jugendliche Umgebung

Es herrscht Einigkeit darüber, dass ULXs viel häufiger **mit Systemen hoher Sternentstehung assoziiert** sind. So wurden in den irregulären, sich in einem Verschmelzungsprozess befindlichen Antennengalaxien neun ULXs und in der Wagenrad-Galaxie (engl. *Cartwheel Galaxy*) im sternbildenden Ring sogar 20 ULXs entdeckt! Die beeindruckende Schönheit der etwa 400 Mio. Lichtjahre entfernten Wagenrad-Galaxie zeigt das Beobachtungsfoto 22.1 (Credit: NASA/JPL/CXC, *Appleton et al.*; *Wolter & Trinchieri et al.* 2006). Das Foto ist Falschfarbenbild, das sich aus unterschiedlichen Wellenlängenbereichen zusammensetzt: Violett ist Röntgenstrahlung, blau ist Ultraviolettstrahlung, grün ist optisches Licht und schließlich ist rot Wärmestrahlung. Auch bei der Wagenrad-Galaxie ist die Sternentstehung die Konsequenz einer Galaxienkollision: die kleinere Galaxie links unten stieß mit einer größeren Galaxien zusammen. Daraus ging die eigentümliche Wagenrad-Struktur

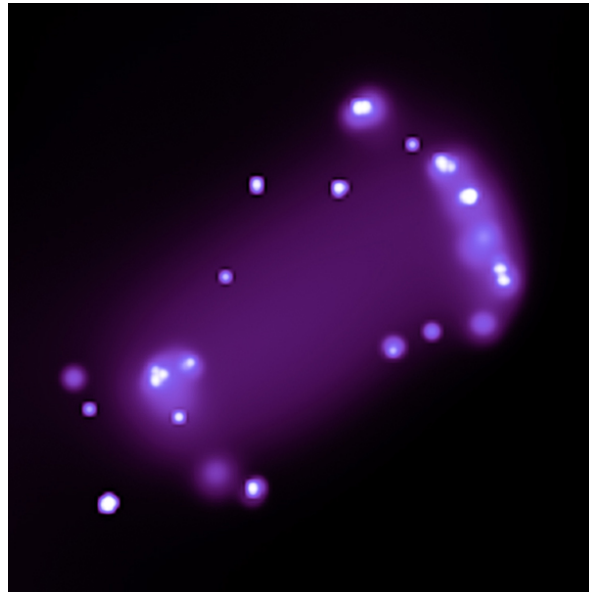


Abbildung 22.2: Vergrößerung des Chandra-Beobachtungsfotos der Cartwheel-Galaxie von 2006.

hervor. Das kleine Bild links oben zeigt nur die Röntgenstrahlung. Einige Punktquellen, die mit ULXs auf dem ausgeprägten, sternbildenden Ring in Verbindung gebracht werden, sind dort gut sichtbar.

22.2.8 Status der ULX-Forschung auf dem Symposium der Internationalen Astronomischen Gesellschaft 2005

Im Sommer 2005 trafen sich Astronomen aus der ganzen Welt, um über hochenergetische, kosmische Quellen zu sprechen. Auch über die ultraleuchtkräftigen Röntgenquellen wurde kontrovers diskutiert. Hier sollen wesentliche Resultate kurz vorgestellt werden, die im Konferenzband der Internationalen Astronomischen Gesellschaft (s. u. Quellenangaben) nachzulesen sind:

- ◇ Eine Beobachtung des **ULX Holmberg II X-1** mit XMM-Newton ergab, dass die Spektren besser mit einem stellaren Schwarzen Loch von 10 bis 100 Sonnenmassen modelliert werden können. Es gibt zwar auch Anzeichen für eine weiche Komponente der Röntgenstrahlung, d. h. für eine kalte Scheibe, doch die zeitlichen Variabilitäten schließen ein Loch schwerer als 100 Sonnenmassen aus. Außerdem legen die Modellanpassungen die Existenz einer optisch dicken Korona nahe (*Roberts et al.* 2005).
- ◇ Die optischen Beobachtungen an dem **ULX NGC 1313 X-2** gestatten es mithilfe der optischen Spektrallinie He-II bei 468.6 nm die Lochmasse kinematisch zu bestimmen. Auch hier spricht das Resultat eher für ein stellares Schwarzes Loch (*Pakull et al.* 2005).
- ◇ **NGC 253 ULX1** ist ein so genannter rekurrerender (d.h. wiederkehrenden) ULX. Röntgenbeobachtungen mit ROSAT und XMM an diesem Objekt lassen sich am besten

mit Bremsstrahlung erklären und weisen auf ein Schwarzes Loch mit mehr (aber nicht viel mehr) als 11 Sonnenmassen hin (*Bauer & Pietsch* 2005).

- ◇ Wie sind die IMBHs in ULXs entstanden? Ein Szenario wurde vorgestellt, demzufolge sie das Überbleibsel von Sternen der Population III sind, also sehr massereichen Sternen, die sich als die ersten im Kosmos gebildet haben. Die **Pop-III-IMBHs** überdauern die kosmologische Entwicklung bis ins lokale Universum und wachsen dabei gegebenenfalls durch das Aufsammeln von Materie. Wenn sie schließlich durch eine dichte Molekülwolke oder eine Sternentstehungsregion wandern, zündet der ULX durch Akkretion und wird für uns sichtbar (*Mii & Totani* 2005).

22.2.9 Fazit

Die Natur der ULXs ist noch unklar, doch eine Reihe guter Modelle liegt vor, die mit astronomischen Beobachtungen getestet werden können. Zurzeit sprechen sowohl Beobachtungen, als auch Computersimulationen in der Tat für die akkretierenden, mittelschweren Schwarzen Löcher. Die Jets stellarer Schwarzer Löcher oder exotische Akkretionszustände stellarer Schwarzer Löcher werden weniger favorisiert. Doch auch akkretierende, stellare Schwarze Löcher erklären in vielen Fällen die Beobachtungen. In dieser Hinsicht herrscht unter Astronomen sicherlich noch **keine Einigkeit**.

Ein guter Ausweg aus diesem Dilemma könnte das folgende Szenario sein: Vielleicht sind die hellsten der ULXs eine homogene Klasse und assoziiert mit IMBHs, während die leuchtschwächeren ULXs nur durch stellare Schwarze Löcher angetrieben werden. **Dann wären ULXs beides**, stellare und mittelschwere, aktive Schwarze Löcher, die durch eine schärfere Definition des ULX-Begriffs separiert werden könnten.

22.2.10 Quellen & wissenschaftliche Veröffentlichungen

- ◇ *Ward, M.*: Ultra-luminous X-ray Sources, proceedings to IAUS 230, 271, 2005
- ◇ *Roberts et al.*: New Insights into ultraluminous X-ray sources from deep XMM-Newton observations, proceedings to IAUS 230, 288, 2005
- ◇ *Pakull et al.*: Ultra-luminous X-ray Sources: Bubbles and Optical Counterparts, proceedings to IAUS 230, 293, 2005
- ◇ *Bauer & Pietsch*: The recurrent ultra-luminous X-ray transient NGC 253 ULX1, proceedings to IAUS 230, 298, 2005
- ◇ *Mii & Totani*: Ultra-Luminous X-ray Sources: Evidence for Very Efficient Formation of Population III Stars Contributing to the Cosmic Near-Infrared Background Excess?, proceedings to IAUS 230, 304, 2005
- ◇ *Colbert & Mushotzky*: The nature of accreting black holes in nearby galaxy nuclei, *ApJ* 519, 89, 1999
- ◇ *Fabbiano, G.*: X-rays from Normal Galaxies, *ARA& A* 27, 87, 1989

22.3 Unifikation

Unifikation ist eine mächtige Strategie im Denken generell und in der Physik im Speziellen. Unter dem Eintrag Vereinheitlichung, dem Synonym für Unifikation, wird die historische Entwicklung des Unifikationsbestrebens in der theoretischen Physik nachskizziert, die Vereinheitlichung selbst kritisch hinterfragt und ihre Grenzen aufgezeigt.

22.4 Unitarität

Unitarität, Spezialität und Orthogonalität sind bestimmte Eigenschaften von Transformationsmatrizen, oder allgemein gesprochen, von mathematischen Operatoren. Operatoren sind von besonderer Wichtigkeit für die Mathematik und Physik, vor allem in der Quantentheorie: Sie sind diejenigen mathematischen Objekte, die in Form von **Operatorgleichungen** (z. B. der *Schrödingergleichung* der Quantenmechanik) die Dynamik von Quantensystemen beschreiben.

22.4.1 unitäre Transformationen

Unitäre Transformationen können Gruppen oder Symmetriegruppen bilden. Deshalb behandelt man sie in der Gruppentheorie, die besonders relevant für die Teilchenphysik ist. Die (Matrizen-)Eigenschaften Unitarität, Orthogonalität und Spezialität dienen dann einer **Klassifikation dieser Gruppen**. Ein unitärer Operator U erfüllt folgende Eigenschaft

$$U^\dagger = U^{-1}.$$

Unitarität ist eine wichtige Eigenschaft physikalischer Operatoren, weil anschaulich gesprochen eine unitäre Transformation die Physik nicht ändert. Deshalb ist z. B. der Hamilton-Operator, der die Energie-Zustände und -eigenwerte eines Quantensystems diktiert unitär. In der Quantenmechanik (QM) und den Quantenfeldtheorien (QFT) ist Unitarität eine **Zeittranslationssymmetrie der Dynamik**. Mit der Allgemeinen Relativitätstheorie muss der Zeitbegriff neu gedeutet werden. Hier ist die Aufrechterhaltung der Zeittranslationssymmetrie deutlich erschwert. Es besteht daher nicht notwendig die Forderung nach Unitarität einer Quantengravitation, beispielsweise der Loop-Quantengravitation (LQG).

22.4.2 Lesehinweis

Nähere Beschreibungen zu diesen Aspekten befinden sich unter dem Eintrag Symmetriegruppe.

22.5 Universum

Ein Synonym für die Gesamtheit der Welt, den Kosmos oder das Weltall. Damit verbirgt sich hinter dem Universum alles, was wir kennen, erfassen und wahrnehmen können, aber sicher auch Dinge, die wir (noch) nicht kennen. Tja, wie könnte man etwas so Komplexes wie das Universum in wenigen Sätzen in einem Lexikon beschreiben? Der Detailreichtum dieser wunderbaren, komplexen Welt sprengt sicher jede Enzyklopädie. Wir nehmen natürlich - wie

an allen Stellen des Lexikons - die Perspektive des Sternenfreundes bzw. Astrophysikers ein und fragen nach der Beschaffenheit und dem Ursprung des Universums aus der Sicht des Naturwissenschaftlers.

22.5.1 Kosmogonie & Kosmologie

Von dieser sicher beschränkten Perspektive muss zunächst zwischen zwei besonderen Teilgebieten der Astronomie unterschieden werden: Die **Kosmogonie** beschäftigt sich im engeren Sinne mit der *Entstehung des Universums*, wohingegen die **Kosmologie** den Zustand, die Entwicklung, die Geometrie und die Topologie des Universums untersucht. Meist wird der Begriff Kosmologie lapidar als Oberbegriff verwendet.

22.5.2 mathematische Beschreibung des Kosmos als Ganzes

Anfang des 20. Jahrhundert wurden die mathematischen Mittel gefunden, um den Kosmos als Ganzes zu beschreiben: Einsteins **Allgemeine Relativitätstheorie**, eine Theorie der Gravitation, stellt in Gestalt der Einsteinschen Feldgleichungen ein mächtiges Werkzeug zur Verfügung, das sogar den ganzen Kosmos beschreibt. In gewissem Sinne haben wir die viel zitierte 'Weltformel' bereits gefunden!

Die Feldgleichung der ART vereint alle möglichen Modelle für Universen in sich, sowohl ein statisches Universum, als auch dynamische Universen. Bemüht man die ART zur Beschreibung der Welt und macht gewisse physikalisch plausible und empirisch begründete Annahmen wie das kosmologische Prinzip, so verwandeln sich Einsteins Feldgleichungen in die Friedmann-Gleichungen. Deren Lösungen heißen **Friedmann-Weltmodelle** oder **FLRW-Universen**, die von gewissen Parametern und vor allem von im Kosmos vorhandenen Energieformen abhängen. All diese Energieformen bestimmen die Dynamik der gesamten Raumzeit des Universums, oder weltlicher ausgedrückt, sein Schicksal.

22.5.3 Satz kosmologischer Parameter

Entwicklung und Zukunft des Universums werden von einem Satz kosmologischer Parameter bestimmt, wie die Friedmannsche Kosmologie enthüllte. Bei Festlegung von kosmologischen Parametern, wie der Dunklen Energie, der Dunklen Materie, der baryonischen Materie, dem Hubble-Parameter und dem Krümmungsparameter folgt zwingend, wie es mit dem Universum weitergeht.

Im Rahmen der **experimentellen Kosmologie** werden verschiedene Methoden benutzt, um den Zahlenwerten der kosmologischen Parameter auf die Spur zu kommen - in der Theorie sind sie frei und müssen deshalb empirisch ermittelt werden. Neben weit entfernten, explodierenden Sternen (Supernovae Typ Ia), der Zusammensetzung der Materie aufgrund der Nukleosynthese, der Verteilung und Anzahl von Galaxien in Galaxienhaufen verrät vor allem die beobachtete, kosmische Hintergrundstrahlung den Satz kosmologischer Parameter (am besten verwendet man alle Methoden gemeinsam). So wissen die Astronomen auf der Basis aktueller Messungen des Mikrowellen-Satelliten **WMAP** (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*), der gerade die Hintergrundstrahlung exakt ausmisst, dass unser Universum nicht immer da war: Es hat ein **Alter von 13.7 Milliarden Jahren** (Fehler von nur 1%). Das Alter bezeichnet man auch als **kosmische Zeit** (engl. *cosmic time*). Das ist im Vergleich zum Alter der Erde, etwa 4.5 Milliarden Jahre, nicht unbedingt viel mehr. Dieses Alter ist

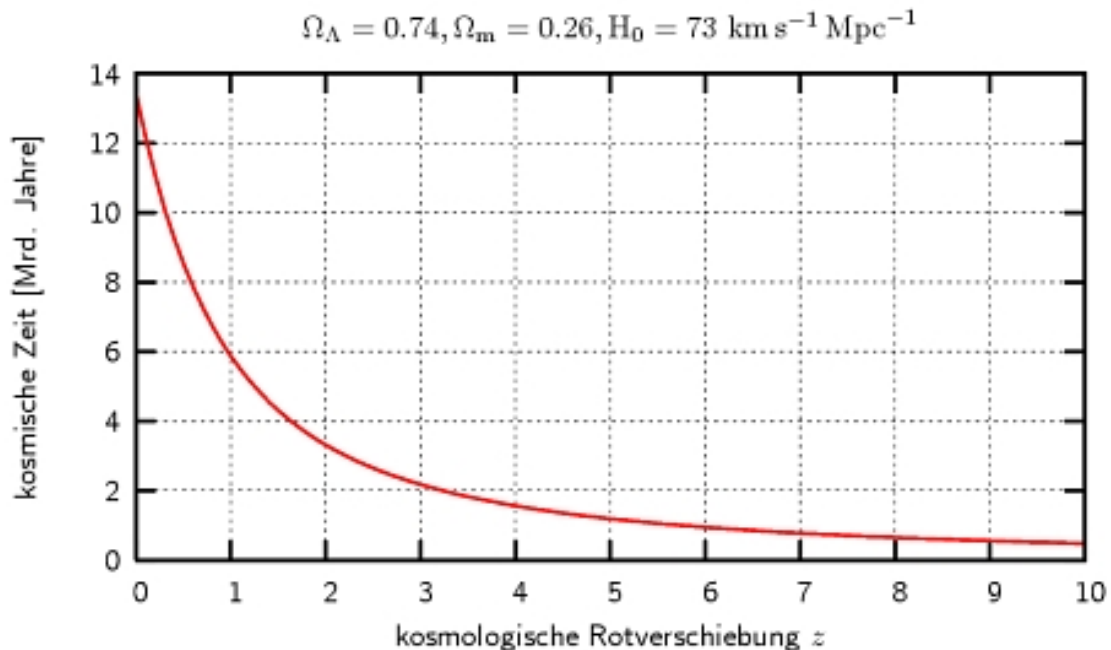


Abbildung 22.3: Beziehung zwischen kosmischer Zeit und Rotverschiebung im Universum.

mit bekannten kosmologischen Parametern reproduzierbar, wie Abbildung 22.3 demonstriert.

22.5.4 Der Anfang

Dreht man das Rad der Zeit zurück und betrachtet dabei das FLRW-Universum mit den aus der Beobachtung bestimmten kosmologischen Parametern, so stellt man mit Erstaunen fest, dass es einen beliebig kleinen und heißen Anfang des Universums gab. Dieser Anfangszustand ist mit dem berühmten Wort Urknall gemeint. Ursprünglich war das Wort abwertend gemeint: der Kosmologe *Fred Hoyle* erfand den Begriff und verbreitete ihn erstmals in einem Radiointerview. Er wollte die Hypothese des hot Big Bang eigentlich in Misskredit bringen. Das Gegenteil trat ein: Die 'Urknalltheorie' als Hypothese vom Anfang der Welt hat sich seither als Dauerbrenner bewährt, ist konsistent mit den meisten astronomischen Beobachtungen und gehört daher auch zum *scientific mainstream*, zur herrschenden Lehrmeinung. Der Pionier der Urknall-Idee war eigentlich der Theoretiker und Priester *Abbé Georges Lemaître*: Er sprach lange vor Hoyle allerdings von der 'Geburt des Raumes'.

22.5.5 rasante Entwicklung von Strukturen

Die ersten Sterne haben sich bereits 200 Millionen Jahre nach dem Urknall gebildet! Das ist astronomisch und auch erdgeschichtlich betrachtet eine unglaublich kurze Zeitspanne. Diese Beobachtung stellt die Kosmologie vor ernst zu nehmende Herausforderungen, weil

sie erklären muss, wie in solch kurzer Zeit Elementarteilchen, Materie und schließlich Sterne sowie Galaxien entstehen konnten.

22.5.6 kosmische Geometrie, Topologie und das Konkordanz-Modell

Die Geometrie ist entweder ein flaches, offenes oder geschlossenes, Euklidisches Universum ($k = 0$) oder ein geschlossenes Dodekaeder-Universum (positive Krümmung, $k = +1$) oder ein geschlossenes Horn-Universum (negative Krümmung ($k = -1$)). Bisher sind all diese Modelle mit Beobachtungsdaten verträglich! Favorisiert wird von den meisten Wissenschaftlern das erste Szenario, das auch unter der Bezeichnung **flaches Λ CDM-Modell** läuft. Dies meint ein flaches Universum ($k = 0$), das von einer Dunklen Energie in Gestalt der kosmologischen Konstante Λ und der kalten Dunklen Materie (engl. *cold dark matter* = CDM) dominiert wird. Eine andere gebräuchliche Betitelung anstelle von flaches Λ CDM-Modell ist kosmologisches Standardmodell oder kosmologisches Konkordanz-Modell.

22.5.7 Multiversum

Während man früher an **ein Universum** glaubte, wird in vielen modernen, kosmologischen Modellen (Branenkosmologie, Ekpyrotisches Modell, Zyklisches Universum) die Existenz vieler Universen diskutiert. In der **Quantenkosmologie** spricht man sogar von **Multiversen**, die sich in großer Zahl bilden können und wieder vergehen. Diese Viele-Welten-Theorie ist eine Anleihe aus der Quantentheorie, wo virtuelle Teilchen aufgrund der Unschärferelation entstehen und vergehen und unter Umständen real werden. Mit dem **Ekpyrotischen Modell** wurde der Begriff vom Paralleluniversum salonfähig gemacht, der bis dahin eher in Science-Fiction-Literatur zu finden war. Dennoch: Bislang existieren Multiversen nur in der Vorstellung so manchen Forschers - es gibt keinerlei Evidenzen für ein Multiversum.

22.5.8 kosmische Topologie: eine aktuelle Herausforderung

Die Frage, ob das Universum offen/unendlich oder geschlossen/endlich ist, ist letztendlich eine **topologische Frage**. Sie ist bisher nicht zufrieden stellend beantwortet worden, sondern Kosmologen argumentieren meist mit Einfachheit (*Ockhams Rasierklinge*). Eine genaue Prüfung der Argumente ergibt: Ein **multi-verbundenes Universum** (engl. *multi-connected Universe*) ist noch nicht vom Tisch.

Erschwerend kommt hinzu, dass es im Allgemeinen *unendlich viele* Topologien zu einem festen Krümmungsparameter gibt! Die Allgemeine Relativitätstheorie legt im Rahmen der **relativistischen Kosmologie** die Topologie des Universums *nicht* fest. Sie muss auf der Basis mathematischer Überlegungen vorgeschlagen werden und auf Konsistenz mit der Beobachtung (Stichwort: 'topologische Trugbilder', siehe dazu unter Eintrag Topologie), insbesondere der kosmischen Hintergrundstrahlung, überprüft werden. Deshalb könnte das geschlossene Dodekaeder-Universum tatsächlich in der Natur realisiert sein. Sollte sich dieses Szenario als falsch herausstellen, so sind auch bei Verifikation des Euklidischen Universums unendliche oder endliche Varianten möglich - je nach Topologie.

22.6 Unruh-Effekt

Dieser Effekt ist benannt nach dem Relativisten *William G. Unruh*. Es geht dabei um die Frage, wie im Rahmen der Relativitätstheorie ein *beschleunigter* Beobachter das Minkowski-Vakuum wahrnimmt.

22.6.1 rechnerischer Ansatz und Ergebnis

Dazu wird wie in der Berechnung der Hawking-Strahlung ein masseloses Skalarfeld auf dem Hintergrund der flachen Minkowski-Raumzeit betrachtet und die kovariante Klein-Gordon-Gleichung (eine Wellengleichung für das Skalarfeld) formuliert. Das Feld ist quantisiert, die Raumzeit nicht. In diesem Sinne ist der Zugang semi-klassisch.

Es bietet sich an, für die Beschreibung *Rindler-Koordinaten* (Rindler-Metrik) zu verwenden, die mit Sinus und Kosinus Hyperbolicus verknüpft sind und an die Struktur des Lichtkegels angepasst sind. In diesen Koordinaten wird die Wellengleichung reformuliert und das Skalarfeld in so genannte *Rindler-Moden* entwickelt. Analog zu Hawkings Ansatz wertet man nun den **Vakuumerwartungswert** für das Minkowski-Vakuum aus. Dieser **verschwindet nicht**, sondern zeigt eine auffällige Ähnlichkeit zur **Planck-Kurve** eines thermischen Strahlers. Man nennt die Teilchen, die der beschleunigte Beobachter im Vakuum detektiert **Beschleunigungsstrahlung** oder **Unruh-Strahlung** (in Analogie zur Hawking-Strahlung).

22.6.2 zwei Seiten einer Medaille: Unruh-Strahlung und Hawking-Strahlung

Die Messung des Vakuums bei der Beschleunigung erfolgt mithilfe eines **Unruh-DeWitt-Detektors**, der an das zu messende Skalarfeld koppelt. Ein beschleunigter Beobachter sieht das Minkowski-Vakuum als ein **Quantenfeld im thermischen Gleichgewicht**. Dieser Unruh-Effekt ist das Analogon zum Hawking-Effekt, ersterer gilt in flachen Raumzeiten ('ohne Gravitation'), letzterer in gekrümmten ('mit Gravitation'). Die Verwandtschaft der Effekte gilt aufgrund des **Äquivalenzprinzips**, denn ein frei fallender Beobachter (FFO) in einer gekrümmten Raumzeit ist einem beschleunigten Beobachter in einer flachen Raumzeit völlig gleichwertig, d. h. äquivalent.

22.6.3 Teilchen oder nicht Teilchen, das ist hier die Frage

Die Implikationen dieses Sachverhalts sind immens. Sie münden in eine **Relativität des Teilchenbegriffs**: Es hängt vom Bezugssystem ab, ob ein Beobachter ein reales Teilchen oder ein virtuelles Teilchen (Quantenvakuum) sieht!

22.6.4 Historische Aspekte

Unruh bezog sich 1975 zunächst auf die Verdampfung (Evaporation) Schwarzer Löcher und behandelte erst 1984 zusammen mit *Robert W. Wald* das Problem des beschleunigten Beobachters in der Abhandlung *What happens when an accelerated observer detects a Rindler particle?*.

22.6.5 Lesehinweis

Thomas Müller: Gravitation und Quantentheorie, Diplomarbeit (pdf), Universität Tübingen (2001)

22.7 Urknall

Das Urknall-Modell ist sicher das populärste, kosmologische Modell und auch dasjenige, das am stärksten von astronomischen Beobachtungen gestützt wird. Im englischsprachigen Raum ist der Begriff Big Bang für den Urknall sehr gebräuchlich.

22.7.1 Geschichtliches

Der Terminus *Big Bang* stammt von dem Kosmologen *Sir Fred Hoyle* (1915 - 2001), der ihn 1949 eigentlich als Pejoration für das Modell eingeführte, denn Hoyle war Gegner des Urknall-Modells. Der Pionier des Urknall-Modells ist aus heutiger Sicht der belgische Astronom *Abbé Georges Lemaître* (1894 - 1966). Er fand nahezu zeitgleich, aber unabhängig voneinander, mit dem russischen Mathematiker *Alexandr A. Friedmann* **dynamische** Modelle für das Universum: die Friedmann-Weltmodelle. Solche Modelluniversen können expandieren oder kollabieren, sogar im Wechsel (oszillieren). *Lemaître* unternahm eine Extrapolation eines sich ausdehnenden Weltalls in die Vergangenheit zu kleinen kosmischen Radien hin. Dabei entdeckte er ein beliebig kleines Universum, was er als die '**Geburt des Raumes**' bezeichnete (Artikel im Fachmagazin *Nature*, 1931).

22.7.2 Was ist nun der Urknall?

Heutzutage spricht man weniger von einer 'Geburt des Raumes', sondern benutzt Hoyles griffiges Wort Urknall. Physikalisch gesehen ist der Urknall der Beginn des Universums aus einem unendlich heißen, unendlich dichten und unendlich kleinen Zustand, der so genannten **Urknallsingularität**. Die Singularität ist eine unausweichliche Konsequenz von Friedmanns und Lemaîtres Rechnungen. Erkenntnistheoretisch und philosophisch betrachtet ist das eine faszinierende und brisante Aussage:

Der Kosmos hatte einen Anfang!

Dass das keineswegs selbstverständlich ist, bemerkt man z. B. daran, dass in den Anfängen der relativistischen Kosmologie ein statisches Universum (etabliert von Einstein) eindeutig favorisiert wurde. Es war einfach unvorstellbar, dass das Universum eine Dynamik haben könne, geschweige denn einen Anfang!

22.7.3 Urknall - sprachlicher Kunst- oder Fehlgriff?

Analysiert man das Wort Urknall daraufhin, ob es ein physikalisch betrachtet gut gewählter Begriff für das Modell ist, so schließt man, dass der Wortbestandteil *Ur* gut passt (wie wir sehen werden): der Urknall geschah tatsächlich vor Urzeiten. Kritischer ist der zweite Wortbestandteil *Knall* zu sehen: Knall ist ein akustisches Phänomen, die extrem schnelle Ausbreitung einer Schallwelle. Beim Urknall hat es eigentlich gar nicht geknallt, und erst recht gab es (nach allem, was wir heute zu wissen glauben) keine Zuhörer. Denn im Urknall kam der Raum auf die Welt, und wie es sich für einen Neugeborenen gehört, fing er gleich an zu wachsen. Die physikalisch vielleicht treffendere Bezeichnung '*Urausdehnung*' ist eben sprachlich nicht so gelungen. Manchmal tun Leute, die Böses wollen, eben Gutes.

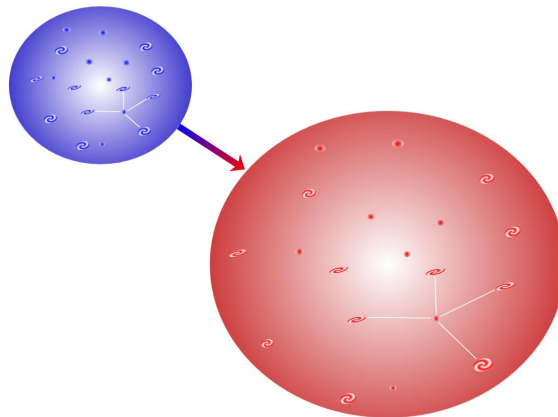


Abbildung 22.4: Urknall: Expansion und Abkühlung des Universums.

1. Zeuge des Urknalls: Galaxienbewegung

Astronomen unterscheiden generell zwei Arten der Galaxienbewegungen: Einerseits gibt es einen rein kinematischen Effekt: alle Galaxien haben eine **Eigenbewegung** (*Pekuliarbewegung*), die sogar wie im Falle der Andromedagalaxie auf uns zu gerichtet sein kann (und in einer Blauverschiebung der Strahlung der Andromedagalaxie resultiert). Dies ist jedoch nur ein *lokaler Effekt*, d. h. solche Eigenbewegungen sind nur wichtig, wenn die betreffende Galaxie der Milchstraße relativ nahe ist. Die physikalische Ursache für die Eigenbewegung ist die gegenseitige, gravitative Anziehung der Galaxien und Galaxienhaufen untereinander (siehe auch Gezeitenkräfte).

Andererseits gibt es eine Galaxienbewegung, die kosmologisch gesehen, also bei großen Distanzen, klar dominiert. Diese Bewegung wird diktiert von der globalen Raumzeit, die das Universum als Ganzes beschreibt (siehe Grafik 22.4). Eine solche Beschreibung ist mit Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie möglich, und sie führt auf die Friedmann-Weltmodelle. Diese Modelle besagen, dass das Universum von allem geformt und dynamisch kontrolliert wird, was sich in ihm befindet. Die kosmischen Zutaten sind baryonische Materie, Dunkle Materie und Dunkle Energie. Die Dunkle Energie wird zu späten Entwicklungsphasen des Universums wichtig und bestimmt besonders dann seine Dynamik: die Dunkle Energie in Form einer kosmologischen Konstante zieht den Kosmos auseinander und treibt eine (sogar beschleunigte!) Expansion. Die Galaxien und Galaxienhaufen als Teil des Kosmos müssen diese Bewegung mitmachen, weil sie ja in den sich ausdehnenden Raum eingebettet sind. Diese **globale Bewegung aller Galaxien** ist eine Fluchtbewegung, weil die Ausdehnung in alle Richtungen gleichermaßen erfolgt. Astronomen bezeichnen dieses Phänomen als Hubble-Effekt, der 1929 astronomisch entdeckt wurde. Mit dieser sich ausdehnenden Raumzeit, dem 'Hubble-Strom', werden alle Galaxien und Körper des Universums mitbewegt.

2. Zeuge des Urknalls: kosmische Hintergrundstrahlung

Die kosmische Hintergrundstrahlung ist das älteste Signal, das Menschen in der Natur jemals gemessen haben! Es handelt sich um Wärmestrahlung, die uns aus der Tiefe des Alls von allen Seiten gleichförmig erreicht. Dem nahezu perfekten Schwarzkörperspektrum kann eine Temperatur von nur etwa drei Kelvin zugeordnet werden. Die Strahlung wird

in der Kosmologie so interpretiert, dass sie das Relikt des **expandierenden Feuerballs** ist, der durch den Urknall auseinander getrieben wurde. Es gab einen heißen Anfang. Mit der Zeit dehnte sich der Feuerball aus und kühlte auf die niedrige, beobachtete Temperatur ab. Diese Interpretation wird gestützt von der beobachteten **Isotropie** der kosmischen Hintergrundstrahlung: sie kommt gleichermaßen aus allen Richtungen. Die komplette Verteilung der Hintergrundstrahlung (engl. *Cosmic Background Radiation*, CBR oder *Cosmic Microwave Background*, CMB) am Himmel bezeugt den heißen Zustand des frühen Universums vor mehr als 13 Milliarden Jahren.

Bei einer kosmologischen Rotverschiebung von $z \sim 1100$ befand sich das Universum in der Rekombinationsära. In dieser Entwicklungsphase bildeten sich die Atome und die Strahlung löste sich gerade von der Materie, weil der Streuquerschnitt für Photonen drastisch abnahm. Anders gesagt: Das Universum wurde durchsichtig! Im lokalen Universum ($z = 0$) sind in jedem Kubikzentimeter noch **412 Photonen** der Hintergrundstrahlung enthalten. Die 3K-Strahlung ist der wichtigste Beweis für einen Urknall, den Gegner dieses Modells erst erklären müssten.

3. Zeuge des Urknalls: weit entfernte Sternexplosionen

Eine weitere Stütze der Urknalltheorie sind extrem weit entfernte Weiße Zwerge, die ein Techtelmechtel mit ihrem Begleitstern eingehen. Die Liaison endet für den Zwerg nicht nur unglücklich, sondern tödlich. Was passiert physikalisch? Nun, wie das so ist mit den Beziehungen, ist am Anfang noch alles sehr romantisch: Der Nachbarstern macht dem Zwerg Geschenke und füttert ihn liebevoll mit Materie. Allerdings vertragen Zwerge nicht so viel. Sie können durch diesen Massenzufluss nicht beliebig wachsen: bei Überschreiten der kritischen Chandrasekhar-Masse wird der Zwerg instabil und explodiert in einer **Supernova Typ Ia**. Eine in der Tat Aufsehen erregende Scheidung! Da die Chandrasekhar-Grenze beinahe fundamental ist, weil sie nur von der Zusammensetzung des Sterns abhängt, läuft die Explosion für alle Weißen Zwerge im Kosmos mehr oder weniger gleich ab. Sie zündet mit einer immer ähnlichen Explosionsenergie und ist daher eine sehr gute Standardkerzen in der Astronomie.

Damit sind sie **ideale Entfernungssindikatoren** und eignen sich für Kosmologen bestens zur Vermessung des Universums und zur Bestimmung der kosmologischen Parameter. Auch die mittlerweile in großer Zahl beobachteten Supernovae sind mit dem Urknall vereinbar.

4. Zeuge des Urknalls: Häufigkeit der ersten Elemente im Kosmos

Die leichten, chemischen Elemente, Wasserstoff, Helium und Lithium, betraten die kosmische Bühne bereits **vor den Sternen**. Das Universum war in seiner Frühphase heiß genug, um selbst Elemente durch thermonukleare Fusion zu erzeugen. Diese 'Reaktorphase' endete jäh, als das Universum infolge der Ausdehnung zu kalt wurde. Dieser Vorgang der Elementherstellung des Universums selbst heißt in der Astronomie **primordiale Nukleosynthese**. Die gemessene Verteilung der primordialen Elemente passt hervorragend zum Modell vom heißen Urknall.

5. Zeuge des Urknalls: Verteilung und Anzahl der Galaxien

Die Art und Weise wie sich Galaxien großräumig anordnen und zu Galaxienhaufen zusammenfinden kann ebenfalls astronomisch sehr genau kartiert werden. Es zeigt sich, dass

sich die Modelle für **Galaxienhaufen** dazu eignen, um aus Vergleich von Beobachtung und Theorie die kosmologischen Parameter zu bestimmen.

Die Astronomen benutzen dazu Tiefenfeldbeobachtungen, in der Fachsprache Deep Fields genannt. Langbelichtete Fotos vieler Himmelsbereiche liefern die Daten tausender Galaxien - u. a. auch ihre räumliche Verteilung und ihre Häufigkeit. Die Astronomen stellen das in Form von *Leuchtkraftfunktionen* dar, deren Kurvenprofile empfindlich sind für die kosmologischen Parameter. Eine große Unsicherheit steckt bei diesen Untersuchungen in der Masse des Galaxienhaufens, die 20 bis 30% betragen kann. Die Beobachtungen der Cluster werden mit hydrodynamischen und N-Körper-Simulationen verglichen. Die Struktur der Haufen kann auf so genannte *power ratios* abgebildet werden - das sind im Prinzip verschiedene Multipole, die die mehr oder weniger kugelige Form der Haufen parametrisieren. Betrachtet man die Galaxienhaufen in verschiedenen Rotverschiebungsintervallen, so sind auch kosmologische Entwicklungsstudien möglich. Auch das Wachstum der Strukturen hängt von dem Satz kosmologischer Parameter ab und kann so eingeschränkt werden. Derartige Untersuchungen werden im Röntgenbereich auch am MPE durchgeführt (Gruppe um *Hans Böhringer*). Die Untersuchungen an Haufen mit $z > 1$ haben 2007 begonnen. Das wichtige Resultat lautet: Die Analysen mit Galaxienhaufen ergeben den gleichen Satz kosmologischer Parameter und decken sich so mit der Hypothese eines Urknalls.

22.7.4 Urknall + Inflation

Das klassische Modell vom Urknall wurde aufgrund bestimmter Unzulänglichkeiten (Homogenitätsproblem, Flachheitsproblem, Horizontproblem, Fehlen magnetischer Monopole) durch die **Inflation** von *Alan H. Guth* 1981 ergänzt. An den Urknall schloss sich eine kurze Phase überlichtschneller Expansion an.

22.7.5 Grenzen der Urknalltheorie

Probleme bereitet das klassische Urknall-Modell, weil es in einem **singulären Anfangszustand** unendlicher Dichte und Temperatur startet. Diese Urknall-Singularität ist wesensverwandt mit den Krümmungssingularitäten der Schwarzen Löcher in Einsteins Theorie. Hier gelten nicht mehr die Gesetze der Physik bzw. versagt jegliche physikalische Beschreibung, weshalb man sie gerne vermeiden würde.

Seit einigen Jahrzehnten arbeiten Gravitationsforscher an neuen Gravitationstheorien, die versuchen, über Einsteins Theorie hinauszugehen und das Gravitationsfeld zu quantisieren. Ein Beispiel für eine solche Quantengravitation ist die Loop-Quantengravitation (LQG). Berechnungen im Rahmen der LQG zeigen, dass in der Tat die Urknall-Singularität zum Verschwinden gebracht werden kann (*Bojowald*, Gen. Rel. Grav. 35, 1877, 2003; als ePrint: gr-qc/0305069 sowie der Vortrag astro-ph/0309478). Noch steht diese Grundlagenforschung am Anfang und die LQG hat sich noch nicht als Gravitationstheorie bewährt. Die Konsequenz dieses interessanten Ergebnisses ist, dass der Versuch unternommen werden muss, die Anfänge des Kosmos loopquantentheoretisch zu verstehen. Decken sich die Vorhersagen der neuen Theorie mit Beobachtungen, so ist eine neue, mächtige, physikalische Theorie entdeckt worden.

Ein weiteres Problem ist das Folgende: Paradoxe Weise erklärt das Urknall-Modell nicht den Urknall selbst, sondern nur dessen Folgen! Eine **erste Erklärung des Urknalls** weist ein kosmologisches Modell auf, das man als Ekpyrotisches Modell bzw. Zyklisches Universum kennt. Dieses Modell vermeidet auch die Anfangssingularität und erklärt, warum

sie uns als solche erscheint. Mit diesen avantgardistischen Modellen begann ein neuer Sektor der Kosmologie: die Branen-Kosmologie. Branen erfordern jedoch weitere räumliche Dimensionen (Extradimensionen) neben den bekannten dreien. Bislang ist es nicht gelungen, diese Zusatzdimensionen nachzuweisen. Insofern sind die Branen-Modelle und auch die Ekpyrosis noch spekulativ.

22.7.6 Der Tag ohne Gestern

Es macht mittlerweile tatsächlich Sinn, die Frage zu stellen, was **vor** dem Urknall war. Lange Zeit war diese Frage verpönt, weil - so die Aussage - mit dem Urknall auch erst die Zeit 'geboren' wurde. Es gab deshalb 'kein Davor'. Das ist richtig. Allerdings hat mit dem Urknall nur '*unsere* Zeit', d. h. die kosmische Zeit unseres Universums begonnen. Über die kosmische Zeit eines anderen Universums - z. B. eines anderen Branenkosmos - wird keine Aussage gemacht. Es darf also durchaus spekuliert werden. Ob unser Universum und wir selbst aus der Kollision von Branen oder einer mikroskopischen Blase des Quantenschaums hervorgegangen sind, ist derzeit nicht zu beurteilen. Es wird auch mittels astronomischer Beobachtungen schwierig nachzuweisen sein, weil das für Strahlung undurchlässige Urplasma vor der Rekombinationsepoche einen Blick in den frühen Kosmos verwehrt. Vielleicht können Astronomen mithilfe der **Gravitationswellenastronomie** (siehe Gravitationswellen) tiefer in die Frühphasen des dichten Kosmos geschaut werden - doch dazu muss zunächst die *direkte* Messung von Gravitationswellen gelingen. Auch wenn der Urknall ein 'Tag ohne Gestern' gewesen sein mag, ist jedoch klar, dass Theoretiker daran arbeiten zu erklären, was den Urknall bewirkt hat.

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