

# Aufbau und Zerstörung

## Über Schwarze Löcher, Sternexplosionen und die Entstehung von Galaxien

*Galaxien sind in massereiche Halos aus unsichtbarer Dunkler Materie eingebettet, aber nicht jeder dunkle Halo beherbergt eine Galaxie. Welche Faktoren entscheiden, ob es in einem Halo überhaupt zur Stern- und Galaxienbildung kommt? Und wie entsteht die beobachtete strenge Korrelation zwischen der Masse einer Galaxie und der Masse des Schwarzen Lochs in ihrem Zentrum? Es gibt erste Antworten auf diese neuen Fragen.*

Von Guinevere Kauffmann und Simon White

### IN KÜRZE

- Wo viele neue Sterne entstehen, ereignen sich bald zahlreiche Supernova-Explosionen. In massearmen Zwerggalaxien kommt dadurch die weitere Sternbildung schnell zum Erliegen.
- Die riesigen elliptischen Galaxien beherbergen in ihren Zentren extrem massereiche Schwarze Löcher. Diese Monster können so viel Energie freisetzen, dass sie sogar diese riesigen Galaxien leer fegen und auch hier die weitere Sternbildung unterbinden.
- Solche Mechanismen regeln vermutlich die Entwicklung der Galaxien und können manche der beobachteten Merkmale erklären.

Die Gravitation beherrscht den gesamten Kosmos. Das gilt auch für unsere Sonne: Schwerkraft presst sie zusammen, bis in ihrem Zentrum heftige Kernfusionsreaktionen zünden, die unsere Welt erleuchten. Schwerkraft zwingt die Planeten in ihre Bahnen um die Sonne und die Sterne in ihre Umlaufbahnen rund um das Zentrum unseres Milchstraßensystems, der Galaxis. Dieselbe Massenanziehung bewirkte auch, dass sich die universelle Ausdehnung, die mit dem Urknall begonnen hatte, verlangsamte, bis sich in einigen Bereichen diffuse Materie von ihr abkoppelte, auf sich selbst zurückfiel und dabei Sterne und Galaxien bildete.

Die Schwerkraft spendet nicht nur das Licht durch den Aufbau der Sterne, sondern zugleich zerstört sie die Sterne auch und erschafft letztlich vollständige Dunkelheit. Wenn ein massereicher Stern seinen nuklearen Brennstoff aufgebraucht hat, lässt die Gravitation seine inneren Regionen in einen Neutronenstern zusammenstürzen, einen gigantischen Atomkern mit der Masse der Sonne und der Größe der Stadt Berlin. Dabei werden enorme Energiemengen frei,

die den Rest des Sterns auseinanderreißen und bewirken, dass er für einige Wochen heller strahlt als seine gesamte Muttergalaxie. Bei einigen besonders massereichen Sternen geht dieser Zusammensturz noch weiter, so dass an Stelle eines Neutronensterns ein Schwarzes Loch entsteht, ein Objekt, das man nicht direkt sehen kann, weil seine Schwerkraft so stark ist, dass weder Licht noch irgendetwas anderes ihm jemals entkommt.

Neuere Studien zeigen, dass die schöpferischen und die zerstörerischen Aspekte der Schwerkraft eng miteinander verknüpft sind, wenn es darum geht, das Leben von Galaxien zu regeln. Wenn junge Protogalaxien sich von der kosmischen Expansion absondern und in sich zusammenstürzen, explodieren massereiche neue Sterne, pumpen Energie in das Gas, aus dem sie sich erst kürzlich gebildet haben, und schleudern den Großteil davon aus den kleineren Systemen heraus. In den Kernregionen großer Galaxien wachsen Schwarze Löcher und werden dabei deutlich massereicher als jeder einzelne Stern. Dieses Wachstum setzt gewaltige Mengen an Energie frei, die letztlich verhindern, dass sich in

1 Bogenminute  
3500 Lichtjahre

ihrer Wirtsgalaxie weitere neue Sterne bilden, um jene zu ersetzen, die altern und sterben. Die Geschichte dieses Wechselspiels aus Schöpfung und Zerstörung wollen wir in diesem Artikel erzählen.

## Sterne und Galaxien

Galaxien gibt es in vielen unterschiedlichen Formen und Größen. Unsere Sonne umkreist das Zentrum unserer eigenen Galaxis einmal in etwa 250 Millionen Jahren. Die meisten anderen Sterne der Galaxis folgen ähnlichen Umlaufbahnen und bilden zusammen die galaktische Scheibe, die wir als kreisförmiges Band von Sternen – die Milchstraße – an unserem Himmel sehen. Während die Sterne selbst einen Großteil der Materie dieser Scheibe ausmachen, ist ungefähr ein Zehntel dieser Materie in Form von Gas und kleinen festen Teilchen, die man als Staub bezeichnet, im interstellaren Raum verteilt. Aus diesem interstellaren Medium bilden sich in der Milchstraße kontinuierlich neue Sterne. Das Zentrum des Milchstraßensystems ist umgeben von einem runden Schwarm aus Sternen, der als galaktischer »Bulge« bezeichnet wird. Dieser zentrale Bereich ent-

hält ungefähr 15 Prozent aller Sterne des gesamten Systems. Die Sterne im Bulge sind alle alt – in der Region bilden sich keine neuen Sterne mehr. Genau im Zentrum der Galaxis befindet sich ein Schwarzes Loch. Anders als im Sonnensystem, wo der Zentralkörper (die Sonne) tausendmal so viel Masse enthält wie alle Planeten zusammen, macht die Masse des zentralen Schwarzen Lochs nur ungefähr ein Zehntausendstel der Gesamtmasse der Sterne in der Scheibe und etwa ein Tausendstel der Masse der Sterne im Bulge aus.

Unser Milchstraßensystem ist eine typische Spiralgalaxie – so bezeichnet, weil die Sterne und das Gas in der Scheibe häu-

Zahlreiche Supernova-Explosionen erzeugen in der stellaren Scheibe der nahen, relativ kleinen Starburst-Galaxie M 82 einen gewaltigen heißen Wind, der das interstellare Gas aus der Galaxie herausfegt und somit weitere Sternentstehungsaktivität unterbindet. Das Bild ist ein Komposit: Die Hubble-Aufnahme im Sichtbaren (gelb-grün) zeigt die Verteilung der Sterne; im Infraroten (Weltraumteleskop Spitzer, rot dargestellt) leuchten warmes interstellares Gas und Staub, und im Röntgenlicht (Weltraumteleskop Chandra, blau dargestellt) strahlt das Millionen Grad heiße Gas, das senkrecht zur Scheibe in die Umgebung abströmt.

**w i s**  
wissenschaft in die schulen!

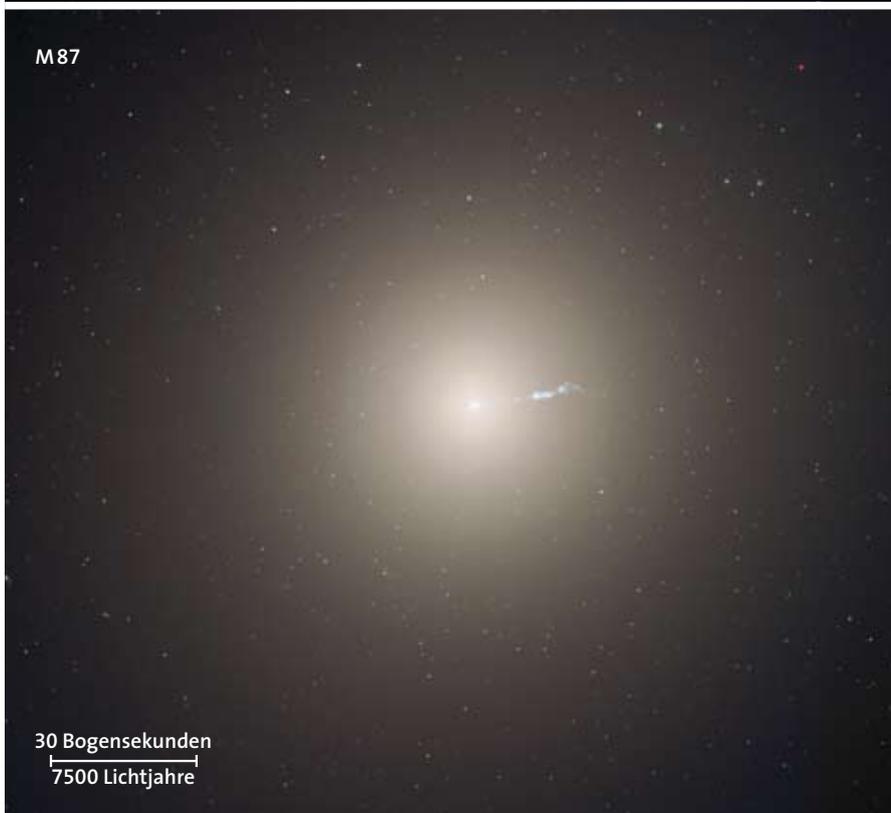
der gymnasialen Oberstufe grundlegende Zusammenhänge der Gravitation in einem heuristischen Gespräch dargestellt. Unser Projekt »Wissenschaft in die Schulen!« führen wir in Zusammenarbeit mit der Landesakademie für Lehrerfortbildung in Bad Wildbad durch. Es wird von der Klaus Tschira Stiftung gGmbH großzügig gefördert.

Zu diesem Beitrag stehen jedem Interessierten auf unserer Internetseite [www.wissenschaft-schulen.de](http://www.wissenschaft-schulen.de) didaktische Materialien zur freien Verfügung. Darin werden ausgehend vom Lehrstoff



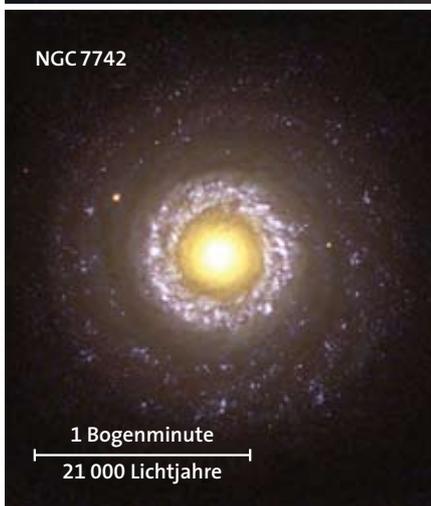
NGC 4414

30 Bogensekunden  
9000 Lichtjahre



M87

30 Bogensekunden  
7500 Lichtjahre



NGC 7742

1 Bogenminute  
21 000 Lichtjahre

Die typische Spiralgalaxie NGC 4414 lichtete das Weltraumteleskop Hubble im sichtbaren Licht ab (oben). Vom Kern der elliptischen Galaxie M87 im Zentrum des Virgo-Galaxienhaufens geht ein Jet aus, der, wie diese Hubble-Aufnahme zeigt, nicht nur im Radiobereich, sondern auch im sichtbaren Licht leuchtet (Mitte). Den inneren Bereich um den aktiven Kern der Galaxie NGC 7742 nahm ebenfalls das Weltraumteleskop Hubble auf. Hier sieht man viel Licht von der Materie, die gerade ins zentrale Schwarze Loch fällt (unten).

fig Spiralmuster bilden (siehe die Spiralgalaxie NGC 4414 links). Solche Galaxien sind häufig, aber es gibt auch viele Welteninseln, die eine andere Form aufweisen: ganz ohne Scheibe, nur eine gleichmäßige elliptische Verteilung von Sternen, ähnlich wie beim Bulge des Milchstraßensystems. Diese Objekte sind als elliptische Galaxien bekannt und scheinen in den meisten Fällen sehr wenig interstellares Gas oder Staub und gar keine jungen Sterne zu enthalten. Die massereichsten Galaxien in Galaxiengruppen und -haufen sind oft solche elliptischen Galaxien – zum Beispiel die nebenstehend gezeigte M87 im Zentrum des Virgo-Haufens. Im Gegensatz dazu weisen sehr kleine Welteninseln oft eine beachtliche Sternbildungsaktivität auf, und viele von ihnen scheinen reine Scheibengalaxien ohne Bulge zu sein. Die seltsamen Formen solcher sternbildenden Zwerggalaxien sind der Grund dafür, dass sie als unregelmäßig klassifiziert werden. Ein prominentes Beispiel ist die irreguläre Zwerggalaxie M82, siehe die vorherige Seite oben.

Im gegenwärtigen Universum bilden sich Sterne nur in Galaxien und sind fast ausschließlich in Galaxien angesiedelt. Wenn man zufällig einen beliebigen Stern auswählt, ist die Wahrscheinlichkeit, dass er sich in einer Galaxie befindet, die massereicher ist als unser Milchstraßensystem, ungefähr so hoch wie die Wahrscheinlichkeit, dass er in einer kleineren Galaxie lebt. Galaxien mit mehr als zehnmals so vielen Sternen wie die Milchstraße existieren zwar, sind aber selten. Nur ein paar Prozent aller Sterne leben in solchen Riesengalaxien. Zwerggalaxien mit hundertmal weniger Sternen als die Milchstraße existieren ebenfalls und sind reichlich vorhanden, aber insgesamt leben nur wenige Prozent aller Sterne in solch kleinen Systemen. Sterne scheinen also bevorzugt in solchen Galaxien zu leben, die ähnlich groß sind wie unsere eigene Galaxis. Wie wir noch sehen werden, ist diese Vorliebe ein Rätsel, wenn wir zu verstehen versuchen, wie Galaxien entstanden sind.

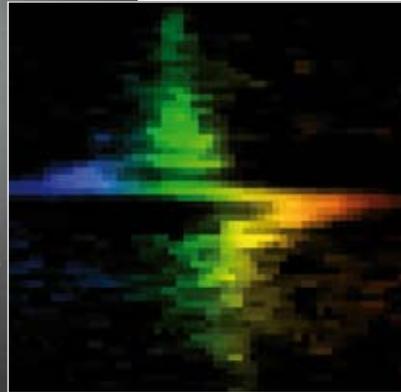
### Extrem massereiche Schwarze Löcher

Es stellt sich heraus, dass fast alle großen Galaxien in ihren Zentren äußerst massereiche Schwarze Löcher beherbergen – ein solches Beispiel zeigt das Bild links unten. Im Zentrum der Milchstraße können die Astronomen einzelne Sterne beobachten, die sich auf elliptischen Bahnen rund um

M 84

NASA/HST/STScI/B. Woodgate/G. Bower

3 Bogensekunden  
730 Lichtjahre



Das große Bild zeigt den Zentralbereich der Galaxie M 84, in dem sich ein massereiches Schwarzes Loch befindet, und die Lage des verwendeten Spektrografenspalts. Im Inset ist die Geschwindigkeit der Sterne entlang dem Spektrografenspalt auf den Beobachter zu (blau kodiert) oder von ihm weg (gelb/rot) dargestellt. Den höchsten Abständen von der zentralen (grünen) Linie entsprechen die höchsten Rotationsgeschwindigkeiten. Ohne das zentrale Schwarze Loch würden alle Werte auf der grünen Geraden liegen.

eine unsichtbare zentrale Massenkonzentration bewegen. Mit Hilfe der Gesetze der Schwerkraft, die Isaac Newton bereits im 17. Jahrhundert einführte, lässt sich ableiten, dass die Masse des zentralen Objekts vier Millionen Mal so groß ist wie die Masse der Sonne – darüber berichtete Stefan Gillessen im Februar-Heft von SuW. Wenn man die zentrale Quelle mit einem Netzwerk von Radioteleskopen beobachtet, die über den gesamten Erdball verteilt sind, stellt sich heraus, dass sie kleiner ist als unser eigenes Sonnensystem. Diese Messungen zeigen, dass die Massendichte im Zentrum unserer Galaxis viel größer ist, als es für irgendein anderes Objekt mit Ausnahme eines Schwarzen Lochs möglich wäre.

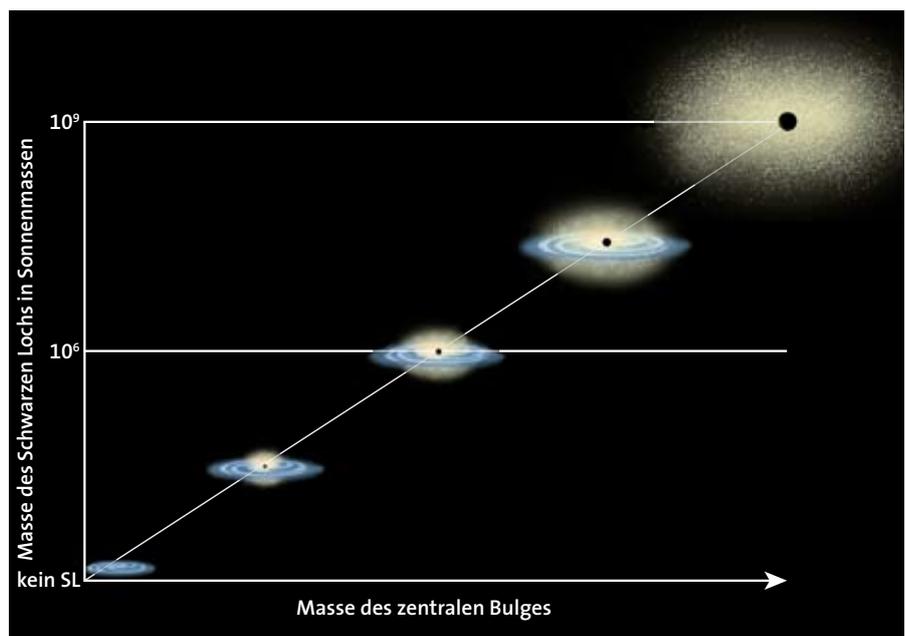
In anderen, entfernter liegenden Galaxien können die Bewegungen einzelner Sterne nicht gemessen werden, aber die typischen Bewegungen der Sterne und des Gases nahe den Zentren dieser Systeme lassen sich dennoch aus ihren Spektren ableiten, wie das Bild oben demonstriert. In beinahe allen Fällen weisen die so bestimmten Geschwindigkeiten auf zentrale Objekte hin, deren Masse das Millionen- oder sogar Milliardenfache der Sonnenmasse beträgt.

Noch bemerkenswerter ist die strenge Proportionalität zwischen der Masse des Bulges einer Galaxie und der Masse des Schwarzen Lochs in ihrem Zentrum: Die

Masse des Schwarzen Lochs scheint immer ungefähr ein Tausendstel der Masse des Bulges auszumachen, egal, ob die Galaxie eine kleine sternbildende Spiralgalaxie oder eine alte elliptische Riesengalaxie ist (siehe Bild unten). Diese Tatsache scheint darauf hinzuweisen, dass das Wachstum des Bulges und jenes des zentralen Schwarzen Lochs sehr eng miteinander verknüpft sein müssen, aber wie diese Verknüpfung genau aussieht, ist un-

klar und führte zu einer kosmischen Huhn-und-Ei-Debatte: Bildeten sich zuerst die massereichen zentralen Schwarzen Löcher und bestimmten später die Bildung der umgebenden Bulges, oder entstanden zuerst Galaxien, und die Größe ihres Bulges bestimmte das Wachstum des zentralen Schwarzen Lochs?

Eine Möglichkeit, Aufschluss über diesen Punkt zu gewinnen, liegt in der Untersuchung von Galaxien, in denen sich ge-



Es besteht eine strenge Proportionalität zwischen der Masse der zentralen Schwarzen Löcher und jener der Bulges, in die sie eingebettet sind.

genwärtig Schwarze Löcher bilden. Man nimmt an, dass Materie, die in ein Schwarzes Loch fällt, eine dieses Schwarze Loch umgebende Akkretionsscheibe spiralförmig von außen nach innen durchläuft und schließlich im Schwarzen Loch verschwindet. Innerhalb der Akkretionsscheibe (siehe nebenstehendes Bild) bewirken Reibungskräfte, dass die Materie sich extrem aufheizt und ungefähr ein Zehntel der gesamten Ruhemasse des Materials, das letztlich vom Schwarzen Loch verschluckt wird, abstrahlt. Diese enorme Energiefreisetzung ist der Grund, warum akkretierende (und damit wachsende) Schwarze Löcher zu den hellsten Objekten im Universum gehören.

Bei Quasaren kann die Helligkeit des zentralen akkretierenden Schwarzen Lochs alle Sterne der Wirtsgalaxie vollständig überstrahlen. Diese Objekte sind so hell, dass sie noch am Rand des beobachtbaren Universums zu erkennen sind. Das Licht, das wir heute vom fernsten bekannten Quasar empfangen, verließ das Objekt, als das Universum 7,5-mal kleiner und noch nicht einmal ein Zehntel so alt war wie heute. Quasare erlauben uns so, die Bildung Schwarzer Löcher über mehr als 90 Prozent der kosmischen Geschichte hinweg zu studieren. In der Tat erhält man, wenn man die gesamte Strahlungsenergie, die von Quasaren beobachtet werden kann, zusammenrechnet und diese Zahl mit 10 multipliziert (um das Verhältnis der abgestrahlten Energie zur verschluckten Masse zu berücksichtigen), eine Schätzung der gesamten von Schwarzen Löchern geschluckten Masse, die der Gesamtmasse inaktiver Schwarzer Löcher in den Zentren heutiger Galaxien sehr nahe kommt. Dies weist darauf hin, dass das meiste Wachstum Schwarzer Löcher für uns im Bestand aktiver galaktischer Kerne sichtbar ist.

Akkretierende Schwarze Löcher erzeugen nicht immer riesige Leuchtkräfte. Manchmal bilden sich in den Akkretionsscheiben mächtige Materiejets, die senkrecht zu den Scheiben bis in Entfernungen von Millionen von Lichtjahren, weit über das Ende der Galaxien in den intergalaktischen Raum hinausschießen (siehe Bild oben). Wie genau diese Jets produziert werden, bleibt ein Geheimnis, aber nach einer beliebten Theorie ziehen Magnetfeldlinien geladene Teilchen aus der Akkretionsscheibe heraus und beschleunigen sie dabei nahezu bis auf Lichtgeschwindigkeit. Geladene Teilchen, die sich spiralförmig durch



ESA/NASA / AVO Project / Paolo Padovani

**In dieser künstlerischen Darstellung ist eine Akkretionsscheibe um ein Schwarzes Loch zu erkennen, aus der die beiden Komponenten eines bipolaren Jets in Richtung der Pole herausschießen.**

ein Magnetfeld bewegen, produzieren die Synchrotronstrahlung, welche die Jets für Radioteleskope sichtbar macht. Wenn die Jets aus der Galaxie herausschießen, müssen sie intergalaktisches Gas aus dem Weg schieben (siehe das Bild oben rechts und das Titelbild). Dabei wird viel von der Energie des Jets auf das Gas in der Umgebung übertragen und heizt dieses dadurch auf. Wie wir noch sehen werden, könnte diese Übertragung von Energie eine wichtige Rolle in unserer Geschichte spielen, weil sie verhindert, dass die Galaxien auf enorme Größen anwachsen. Um diese miteinander verflochtenen Beziehungen verstehen zu können, müssen wir einen kurzen Exkurs in die modernen Ideen zu der Frage einfügen, wie sich alle kosmischen Strukturen, und insbesondere Galaxien, aus dem Urknall bildeten.

### **Das Wachstum von Strukturen im Universum**

Der kosmische Mikrowellenhintergrund ist die vom Urknall übrig gebliebene Hitzeabstrahlung, und wenn wir ihn vermessen, können wir Strukturen in unserem Universum zu einer Zeit sehen, bevor es überhaupt Galaxien gab. Die Situation ähnelt sehr dem Himmel an einem grauen Tag. Unter den Wolken ist die Luft durchsichtig, so dass die Struktur, die wir sehen, in den Wolken selbst liegt, die das Sonnenlicht, das durch sie hindurchstrahlt, in alle

Richtungen streuen. Das heutige Universum ist durchlässig für Mikrowellen, so dass uns die Mikrowellenkarten Strukturen in den kosmischen »Wolken« zeigen, die zuletzt die Strahlung streuten, die uns vom Urknall erreicht. Diese letzte Streuung fand sehr früh statt, nur 380 000 Jahre nach dem Urknall, als das Universum tausendmal kleiner, tausendmal heißer und 30 000-mal jünger als heute war. Zu dieser Zeit gab es keine Planeten, keine Sterne, keine Galaxien und auch keine Atomkerne, die schwerer als Lithium waren. Es war die Zeit, als sich Protonen und Elektronen zum ersten Mal verbanden, um neutrale Wasserstoffatome in großer Zahl zu bilden.

Dennoch sind unsere Mikrowellenkarten nicht völlig strukturlos. Die Intensität der Strahlung variiert minimal zwischen der einen und der anderen Richtung (siehe Bild rechts). Diese schwachen Fluktuationen werden durch Wellen verursacht, die sich durch die kosmischen Wolken auf ähnliche Weise ausbreiten wie Schallwellen durch Luft. Die Eigenschaften dieser Fluktuationen vermitteln uns präzise Informationen über drei Dinge: den Prozess, der die Fluktuationen im sehr frühen Universum erzeugte; den Materiegehalt des Mediums, durch das sie sich ausbreiten; sowie die Geometrie des Raumes, durch den wir sie sehen. Alle späteren Strukturen, insbesondere die Galaxien und Galaxienhaufen,

bildeten sich durch gravitative Verstärkung dieser Fluktuationen.

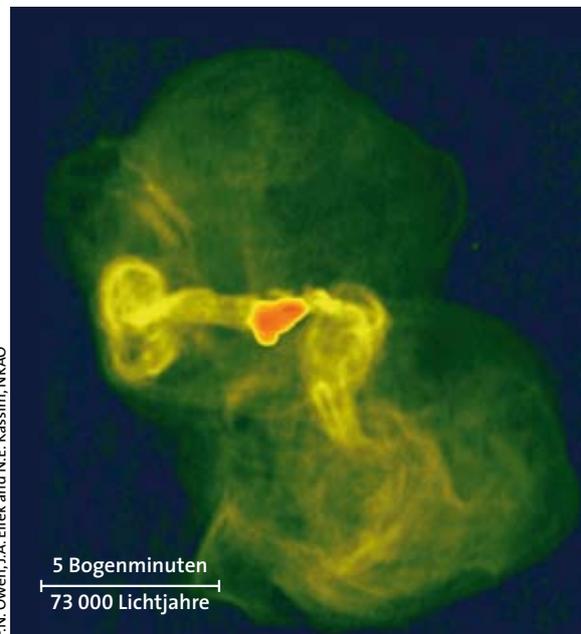
Der Mikrowellenhintergrund zeigt uns nicht nur die anfänglichen Bedingungen, unter denen die Galaxien und ihre zentralen Schwarzen Löcher entstanden sind, sondern er sagt auch etwas darüber aus, woraus sie zusammengesetzt sind. Nur 4,5 Prozent der Massenenergie des heutigen Universums bestehen aus der uns vertrauten Art von Materie, zusammengesetzt aus Protonen, Neutronen und Elektronen. Weitere 21 oder 22 Prozent bestehen aus Dunkler Materie, einer Art neutraler Elementarteilchen, deren direkter Nachweis in irdischen Labors noch nicht gelungen ist. Der Rest ist allem Anschein nach Dunkle Energie, welche die gegenwärtige Expansion des Universums beschleunigt, aber ziemlich wenig Einfluss auf die Strukturbildung hat. Die erst kürzlich entdeckte Dunkle Energie war eine Überraschung für die Wissenschaftler; hingegen ist der Grund für die Annahme von Dunkler Materie in Galaxien, Galaxienhaufen und ihrer Umgebung schon seit 75 Jahren bekannt.

Um Galaxien in Galaxienhaufen zu halten, ist viel mehr Masse notwendig, als direkt in Form von Sternen oder intergalaktischem Gas zu sehen ist – das folgt aus den hohen Geschwindigkeiten, mit denen sich einzelne Galaxien innerhalb der Haufen bewegen. Ganz ähnlich dazu sind auch die Bewegungen der Materie in den äußeren Teilen von Galaxien viel zu schnell, um sich durch die Gravitationswirkung der beobachteten Sterne erklären zu lassen. Folglich sind Galaxien wie die unsere von »Ha-

los« aus Dunkler Materie umgeben, die sich mindestens zehnmal so weit erstrecken wie die sichtbaren Galaxien und mehr als zehnmal so viel Masse enthalten.

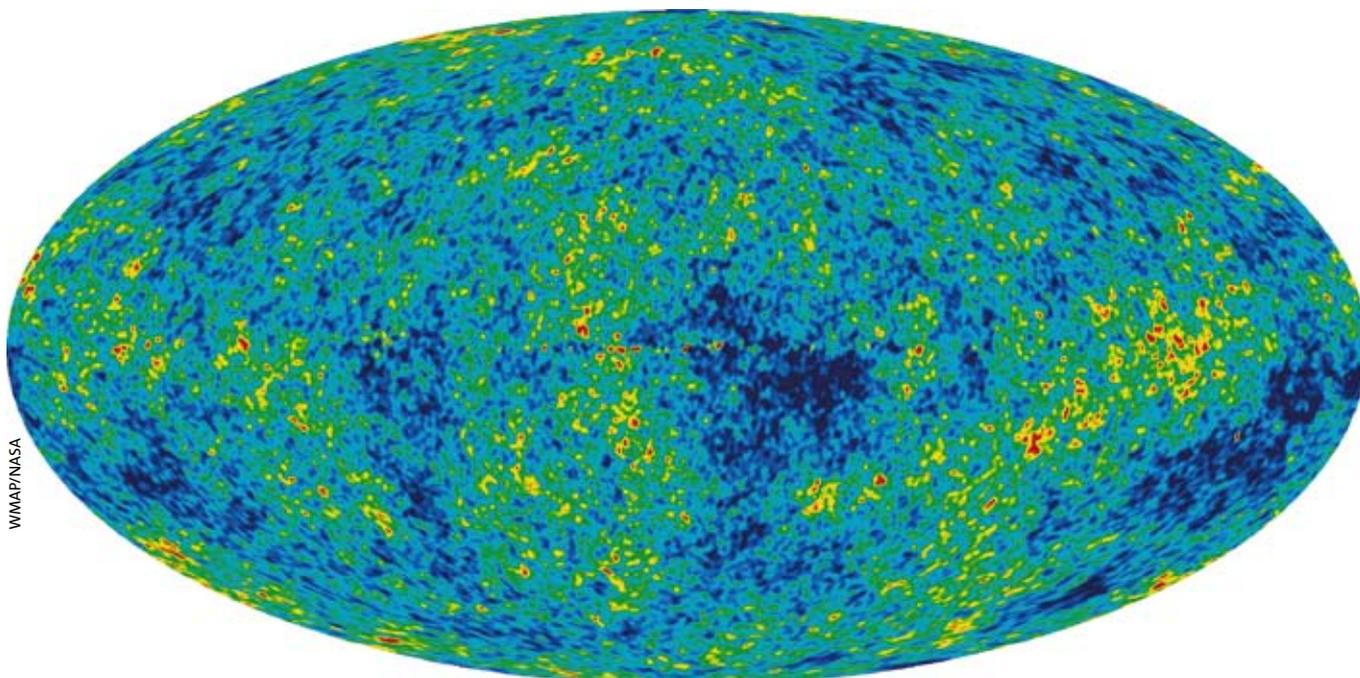
Wenn wir Inhalt und Struktur des prägalaktischen Universums kennen und glauben, dass wir die Prozesse verstehen, welche die spätere Entwicklung steuern, dann sollten wir, ausgehend vom einfachen Anfangsstadium, das wir im Mikrowellenhintergrund beobachten, die beobachteten Eigenschaften von Galaxien und Galaxienhaufen sowie von Sternen und Planeten berechnen können. Alles, was wir dafür benötigen, ist ein ausreichend leistungsfähiger Computer. Die Versuche der Astronomen, solche Modellrechnungen der kosmischen Entwicklung durchzuführen, waren recht erfolgreich, haben aber, wie vorherzusehen war, auch vieles ans Licht gebracht, was man bisher noch nicht versteht. Die Modellrechnungen brachten Strukturen hervor, die mit Beobachtungen in größerem Maßstab als dem einzelner Galaxien ziemlich gut übereinstimmen.

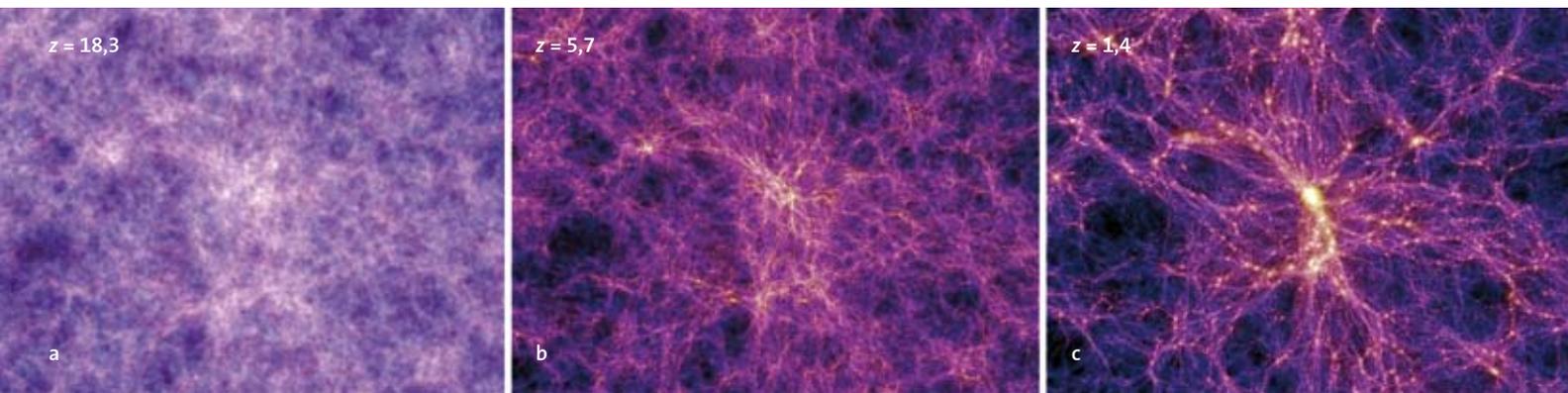
Das heutige Universum enthält den Modellrechnungen zufolge Klumpen von Dunkler Materie von der richtigen Masse und in der richtigen Menge, um die beobachtete Zahl und die globalen Eigenschaften der Galaxien zu erklären. Man geht davon aus, dass die Dunkle Materie in einem Netzwerk riesiger Filamente und blattartiger Strukturen verteilt ist, das der beobachteten großräumigen Verteilung von Galaxien sehr ähnlich sieht (siehe die Bildsequenz auf S. 36 und 37 oben). Wenn man aber die Eigenschaften der Galaxien



**Das Schwarze Loch im Kern der Galaxie M87 emittiert einen teilweise auch im Optischen sichtbaren bipolaren Jet (siehe das mittlere Bild auf S. 32). Diese mit dem Very Large Array erstellte Radiokarte zeigt, wie der nahezu lichtschnelle Teilchenstrom mit der intergalaktischen Materie weit außerhalb von M87 wechselwirkt.**

**Diese hoch aufgelöste Radiokarte wurde mit dem Satelliten WMAP aufgenommen und zeigt die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung des gesamten Himmels. Die Strahlung wurde 380 000 Jahre nach dem Urknall emittiert, als das kosmische Plasma rekombinierte und damit durchsichtig wurde.**





selbst vorherzusagen versucht, wird es komplizierter.

Das Hauptproblem hängt mit der Frage zusammen, wo und mit welcher Effizienz sich Galaxien bilden. Während der Mikrowellenhintergrund uns sagt, dass 4,5 Prozent des gegenwärtigen Universums aus gewöhnlicher Materie bestehen, machen die sichtbaren Regionen von Galaxien insgesamt weniger als ein Zehntel dieser Materie aus. Der Rest hat sich offenbar nicht zu Galaxien verdichtet und muss demzufolge gegenwärtig im intergalaktischen Raum verteilt sein. Im Durchschnitt war die Galaxienbildung offensichtlich sehr ineffizient. Die sichtbare Masse von Galaxien wie unserer eigenen macht weniger als ein Zehntel der Masse aus, die man für ihre Halos Dunkler Materie ableiten kann, doch für das Universum als Ganzes liegt das Verhältnis dieser beiden Größen bei 5 zu 1. Wo ist der Rest der gewöhnlichen Materie, die zu unserer Milchstraße gehören sollte?

Diese Fragen stehen anscheinend im Zusammenhang mit der Tatsache, dass Sterne bevorzugt in Galaxien wie unserer eigenen entstehen. Simulationen kosmischer Strukturbildung sagen vorher, dass wenig mehr als ein Drittel aller Dunkler Materieteilchen sich in dunklen Halos befindet, die massereicher sind als derjenige unserer Milchstraße, während der Rest in Klumpen geringerer Masse vorliegt. Somit sollte die Größenordnung unserer Milchstraße auch für die Halos Dunkler Materie typisch sein. Andererseits ergeben Berechnungen, dass mehr als zehn Prozent aller Dunklen Materieteilchen zu Halos gehören, die mehr als hundertmal so massereich sind wie der Halo der Milchstraße, während volle 40 Prozent zu Halos gehören, die mehr als 10000-mal masseärmer sind (siehe Grafik rechts). Folglich sind die in Sternen gebundenen Massenanteile der Galaxien einander viel ähnlicher als jene ihrer Dunklen Halos. Offensichtlich be-

hindert irgendetwas die Galaxienbildung sowohl innerhalb sehr massereicher als auch sehr massearmer Halos. Galaxienbildung geschieht am effektivsten innerhalb von Halos Dunkler Materie, die dem Halo unserer Milchstraße sehr ähnlich sind.

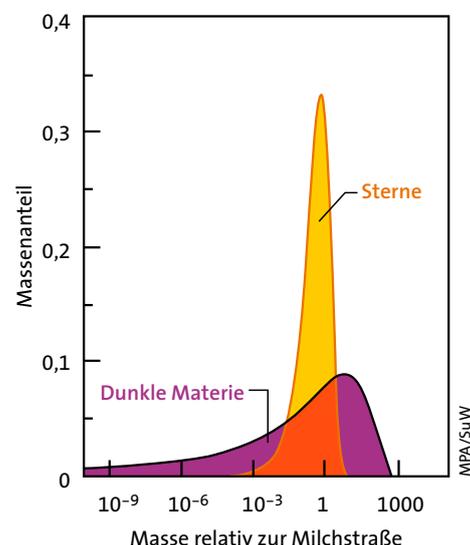
### Die parallele Entwicklung der Galaxien und ihrer zentralen Schwarzen Löcher

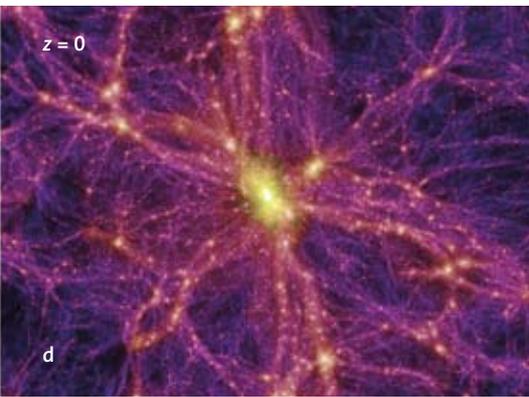
Die enge Beziehung zwischen der Masse der Bulges und jener ihrer massereichen zentralen Schwarzen Löcher (siehe Bild auf S. 33 unten) legt die Vermutung nahe, dass die verborgenen Monster irgendwie das Anwachsen der Bulges kontrolliert haben – oder vielleicht umgekehrt. Auch Untersuchungen der fernsten Quasare, deren Licht die meiste Zeit seit dem Urknall zu uns unterwegs war, deuten auf eine solche Verknüpfung hin. Sie zeigen, dass das Wachstum der Galaxien auf Grund von Sternbildung sehr ähnlich verlief wie das Wachstum der zentralen Schwarzen Löcher auf Grund von Akkretion. Anscheinend erreichten beide Wachstumsformen ein Maximum, als das Universum etwa ein Fünftel so alt war wie heute; danach sind sie auf etwa ein

**Die beiden Kurven geben für Objekte unterschiedlicher Masse im heutigen Universum die Massenanteile der Sterne und der Dunklen Materie an: Demnach befinden sich 90 Prozent aller Sterne in Objekten ähnlicher Masse wie das Milchstraßensystem; dagegen steckt 90 Prozent aller Dunklen Materie in Halos, deren Masse bis zu tausendmal größer oder millionenmal kleiner als die Masse des Milchstraßensystems sein kann. Demnach bilden sich Galaxien bevorzugt in dunklen Halos wie demjenigen unserer Milchstraße.**

Zehntel dieser maximalen Raten zurückgefallen.

Allerdings gibt es für diese Befunde nur indirekte Hinweise. Wenn wir verstehen möchten, wie die Galaxien und die zentralen Schwarzen Löcher gegenseitig ihr Wachstum beeinflussen, so müssen wir untersuchen, wie die Akkretion des Schwarzen Lochs und die Sternbildung in den einzelnen Fällen verknüpft sind. In fernen Quasaren überstahlt das Licht der Akkretionsscheibe um das Schwarze Loch das Licht der umgebenden Galaxie, und das erschwert die Bestimmung der Gesamtmasse der Sterne oder der Sternentstehungsrate in der Galaxie erheblich. Die Erforschung der zentralen Schwarzen Löcher erhielt jedoch in den letzten fünf Jahren dank neuer, sehr ausgedehnter fotometrischer und spektroskopischer Durchmusterungen neuen Schwung. Die ambitionierteste dieser Durchmusterungen war und ist der Sloan Digital Sky Survey (SDSS, siehe Bild unten rechts) – sie überdeckt mittlerweile ein Viertel des gesamten Himmels. Dabei wurden die Helligkeiten, die Entfernungen und die physikalischen Eigenschaften von mehr als einer Million Galaxien bestimmt.





**Diese Computersimulation zeigt die zeitliche Entwicklung der Verteilung Dunkler Materie in einem kleinen, etwa 200 Millionen Lichtjahre breiten Ausschnitt im Alter von (a) 15 Millionen, (b) einer Milliarde, (c) 4,7 Milliarden, (d) 13,6 Milliarden Jahren (heute). Am Ende der Entwicklung steht ein reichhaltiger Galaxienhaufen.**

Die im Rahmen der Sloan-Durchmusterung erhaltenen Spektren erlauben eine Abschätzung des Alters und der chemischen Zusammensetzung der Sterne in einer Galaxie sowie eine genaue Bestimmung ihrer Gesamtmasse. Die Spektren enthalten auch die von dem ionisierten Gas emittierten Linien. An den Eigenschaften dieser Emissionslinien lässt sich erkennen, ob das diffuse Gas in der Galaxie durch die Strahlung heißer, kürzlich entstandener Sterne oder aber durch die Strahlung einer Akkretionsscheibe in ihrem Zentrum angeregt wurde. Aus der Stärke der Emissionslinien lässt sich im ersten Fall die Entstehungsrate der Sterne und damit die Wachstumsrate der in Sternen gebundenen Masse der Galaxie abschätzen, im zweiten Fall die Wachstumsrate des Schwarzen Lochs durch Akkretion.

Wie oben beschrieben, gibt es hauptsächlich zwei Arten von Galaxien: elliptische, die aus alten Sternen bestehen und kaum interstellares Gas enthalten, in denen also gegenwärtig kaum Sternentstehung stattfindet; und Spiralgalaxien, deren Scheiben viel sternbildendes interstellares Gas enthalten und deren kleinere Bulges den elliptischen Galaxien ähneln. Neuere Galaxiendurchmusterungen wie der SDSS belegen, dass elliptische und Spiralgalaxien nicht einfach zwei Enden einer morphologischen Sequenz sind: Sie unterscheiden sich nicht nur in der Form, sondern auch in vielen anderen Eigenschaften, nicht zuletzt in der Anzahl der Sterne, die sie enthalten. Anscheinend zerfällt die Population der Galaxien bei einer charakteristischen stellaren Masse von 30 Milliarden Sonnenmassen in zwei unterschiedliche Familien: Galaxien geringerer Masse besitzen typischerweise eine junge Sternpopulation, Sternentstehung findet in ihnen statt, sie haben geringe Dichten und sind nur schwach zu ihren Zentren hin konzentriert. Oberhalb dieser Masse zeigt sich ein

abrupter Übergang zu »alten« Systemen mit geringer Sternbildungsaktivität, ihre Massendichte ist hoch und ihre Massenverteilung stark zum Zentrum hin konzentriert, wie es für elliptische Galaxien und für Spiralgalaxien mit sehr massereicher Bulge typisch ist.

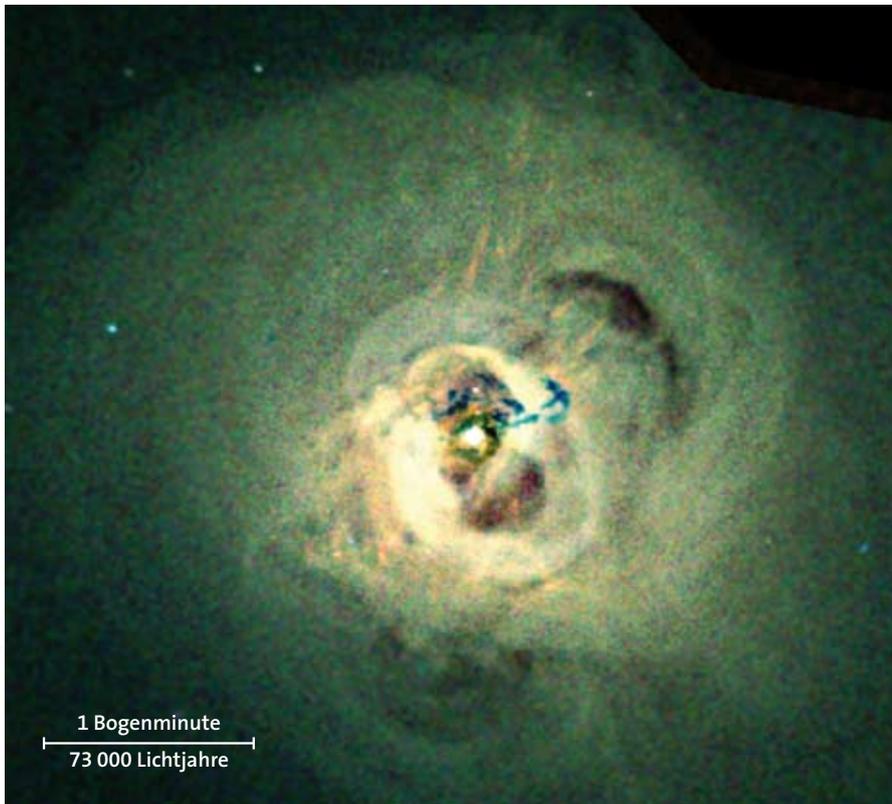
Eine besonders interessante Entdeckung war, dass sich in dieser zeitlichen Sequenz die Galaxien mit aktiven Kernen (AGNs) in einer speziellen Region konzentrieren. Die allermeisten AGNs finden sich in den Galaxien oberhalb der genannten stellaren Massengrenze, aber die Galaxien, die sehr nahe bei dieser Grenze liegen, enthalten die am schnellsten wachsenden Schwarzen Löcher (also jene mit den stärksten Emissionslinien). Es kommt hinzu, dass Galaxien mit schnell wachsenden zentralen Schwarzen Löchern wesentlich mehr junge Sterne enthalten als ähnliche Galaxien, deren

Schwarze Löcher gerade nicht wachsen: Das Wachstum der stellaren Komponente der Galaxien geht offenbar Hand in Hand mit der Massenzunahme ihrer zentralen Schwarzen Löcher. Im Mittel über alle Galaxien einer gegebenen Masse beträgt die Sternbildungsrate, mit der die stellare Komponente der Galaxien anwächst, etwa das tausendfache der Rate, mit der die mittlere Masse ihrer zentralen Schwarzen Löcher durch Akkretion zunimmt. Genau dieses Verhältnis ist erforderlich, um das beobachtete konstante Verhältnis der stellaren Masse in den galaktischen Bulges zur Masse ihrer zentralen Schwarzen Löcher aufrechtzuerhalten.

In massereicheren Galaxien kommen die Sternentstehungsaktivität und das Wachstum der zentralen Schwarzen Löcher gleichermaßen zum Erliegen, während die Radiostrahlung emittierenden Jets immer häufiger auftreten. Die massereichsten Galaxien in unserer kosmischen Nachbarschaft erreichen das Billionenfache der Masse der Sonne, und bei fast allen geht von ihrem Kern ein Radiojet aus. Ein bekanntes Beispiel ist die elliptische Galaxie M87 mit ihrem spektakulären bipolaren Jet (siehe die Bilder auf S. 32, Mitte und S. 35 oben). Die meisten dieser Riesengalaxien stehen in den Zentren massereicher Galaxienhaufen, die gravitativ von Dunkler Materie beherrscht werden und auch große Mengen heißen intergalaktischen



**Dieses 2,5-Meter-Teleskop steht auf dem Apache Point in New Mexico und dient einzig der Sloan-Himmelsdurchmusterung.**



Diese tiefe, mit dem Röntgensatelliten Chandra gewonnene Aufnahme der Galaxie NGC 1275 und ihrer Umgebung zeigt ausgeprägte Strukturen in der Röntgenemission des 30 bis 70 Millionen Grad heißen Gases im Perseus-Haufen. Die helle Quelle im Zentrum stimmt mit dem supermassereichen Schwarzen Loch in NGC 1275 überein.

langlebige Sterne verwandelten interstellare Materie (Gas und Staub) auswerfen. Ein spektakuläres Beispiel in unserer kosmischen Nachbarschaft dafür ist M 82 (Bild auf S. 31): Offensichtlich verhindert dieser dramatische Verlust das weitere Wachstum dieser Galaxien. Zwar sind solche extremen Starburst-Galaxien im heutigen Universum selten, aber in früheren Zeiten, als die Sternentstehungsraten in Galaxien zehnmal so hoch waren wie heute, waren sie häufig. Beobachtungen zeigen, dass bei hohen Rotverschiebungen jede Galaxie mit aktiver Sternbildung einen galaktischen Wind ausstößt.

Supernovae können erklären, warum in massearmen Halos nur ein geringer Teil der interstellaren Materie in Sterne umgewandelt wird. Aber warum ist der Sternbildungsprozess auch in den massereichsten Halos so ineffizient? In den Galaxien, die sich in den Zentren solcher Halos gebildet haben, gab es in neuerer Zeit keine Sternbildungsaktivität, weshalb auch kaum Supernovae stattfinden konnten; andererseits sind in massereichen Halos viel mehr Supernovae erforderlich, um die interstellare Materie auszustoßen, weil hier viel stärkere Gravitationskräfte zu überwinden sind. Zumindest in den größten Objekten scheinen die im Radiobereich leuchtenden Jets die hauptsächlichen Energielieferanten für den Ausstoß der interstellaren Materie zu sein. Dies demonstrieren besonders tiefe Röntgenbeobachtungen der Zentralregionen großer Galaxienhaufen überzeugend.

In solchen Haufen erreicht die Dunkle Materie das Tausendfache der Masse des Halos unserer Milchstraße, sie enthalten Hunderte von Galaxien, eingebettet in eine ausgedehnte Verteilung heißen, im Röntgenlicht strahlenden Gases. Zum Beispiel ist der Perseus-Haufen eins der massereichsten Objekte im bekannten Universum und die hellste Röntgenquelle unter allen Galaxienhaufen. In seinem Zentrum steht die »Kannibalgalaxie« NGC 1275 (Perseus A), die große Mengen einfallenden intergalaktischen Gases akkretiert. Auf

Gases enthalten, dessen thermische Strahlung mit Röntgenteleskopen beobachtbar ist. Seit langer Zeit rätseln Forscher, warum die beobachtete Röntgenstrahlung zwar große Mengen Energie mit sich fortträgt, das intergalaktische Gas aber offenbar nicht abkühlt, kondensiert und damit heftige Sternbildung auslöst: Derartige Sternentstehung wird nicht beobachtet, denn in den alten elliptischen Galaxien, die in den Zentren massereicher Galaxienhaufen stehen, findet kaum Sternentstehung statt. Offenbar wird die abgestrahlte Energie auf eine unbekannte Weise ersetzt und so die gravitative Verdichtung des intergalaktischen Gases verhindert.

### Des Rätsels Lösung: Supernovae ...

Es muss also sowohl in massearmen, als auch in massereichen galaktischen Halos einen die Sternentstehung hemmenden Mechanismus geben. Die Eigenschaften der Galaxien variieren stark mit deren Masse. Galaxien mit einem massearmen Halo besitzen stark ausgeprägte Scheiben mit hoher Sternbildungsaktivität und enthalten selten akkretierende zentrale Schwarze Löcher. Dagegen weisen Galaxien mit einem massereichen Halo auch einen massereichen Bulge auf, sie enthalten wenige junge Sterne und häufig ein akkretierendes (aktives) zentrales Schwarzes Loch. Es ist deshalb wahrscheinlich, dass in den beiden Arten von Halos unterschiedliche Prozesse

wirken. In ihren modernen Theorien der Galaxienbildung verwenden Astronomen den Begriff Rückkopplung (Feedback), um all jene Prozesse zu beschreiben, bei denen Sternentstehung oder AGN-Aktivität das umgebende Gas aufheizen und damit genau den Brennstoff beseitigen, der die Aktivität aufrechterhält.

In den Halos geringer Masse scheinen die massereichen Sterne, die nur wenige Millionen Jahre leben und dann als Supernovae explodieren, das Wachstum der Galaxien zu hemmen. Bei diesen Explosionen wird die Sternmaterie größtenteils mit etwa einem Zehntel der Lichtgeschwindigkeit ausgeworfen, sie treiben eine Stoßwelle in das umgebende interstellare Medium, heizen es dabei auf und reichern es mit den bei der Explosion erzeugten Elementen Sauerstoff, Silizium und Eisen an. Supernovae ereignen sich in der Milchstraße zweimal pro Jahrhundert, sind aber in den so genannten Starburst-Galaxien, deren Sternentstehungsraten beim Hundert- bis Tausendfachen unserer Galaxis liegen, viel häufiger. Die Summe der Explosionen von einer Million Sterne innerhalb einer Million Jahre treibt das Gas in einem schwach kollimierten »galaktischen Wind« aus diesen Galaxien heraus. Die Materie in diesen Winden ist sehr heiß und lässt sich am besten mit Röntgenteleskopen beobachten.

Astronomen schätzen, dass kleine Starburst-Galaxien etwa das Zehnfache der in

dem lang belichteten gezeigten Röntgenbild des Perseus-Haufens sind Bögen, Wellen und Filamente zu erkennen (links): Eine spezielle Bildverarbeitung fördert ausgedehnte Bereiche mit nur sehr schwacher Röntgenemission zu Tage (in der Abbildung violett dargestellt); es handelt sich um Blasen geringer Dichte, die mit hochenergetischen, nahezu lichtschnellen, im Radiobereich nachweisbaren Teilchen angefüllt sind. Möglicherweise sind diese Strömungen auf eine zyklische Ausbruchsaktivität des zentralen Schwarzen Lochs zurückzuführen: Dadurch entstehen großräumige Schallwellen, die das heiße Röntgen gas durchlaufen.

### ... oder galaktische Jets?

In manchen Fällen zeigt sich, dass derartige Strukturen direkt mit den Jets zusammenhängen, die aus den Kernen der massereichen Galaxien in den Zentren der Haufen austreten. Die im Perseus-Haufen erkennbaren Schwaden werden durch explosive, in der Umgebung des zentralen, extrem massereichen Schwarzen Lochs erzeugte Strömungen verursacht. So entstehen Schallwellen, die das gesamte Gas im inneren Bereich des Haufens aufheizen und damit dessen Abkühlung und Umwandlung in neue Sterne verhindern. Dieser Prozess unterdrückte das Wachstum der Galaxien im Zentralbereich dieses sehr massereichen Haufens weit gehend. Der Fall zeigt in aller Deutlichkeit, wie ein winziges, aber extrem massereiches Schwarzes Loch die Heizung und Kühlung des Gases bis weit außerhalb seiner Muttergalaxie bestimmen kann.

Sehr wenige Galaxien lassen sich in solchem Detail untersuchen wie die Galaxie im Zentrum des Perseus-Haufens oder die auf S. 31 gezeigte Starburst-Galaxie M82. Die beiden oben beschriebenen Mechanismen (Supernova-Explosionen in massearmen Galaxien und Radiojets in massereichen) liefern im Prinzip ausreichend Energie, um das Galaxienwachstum so weit zu unterdrücken, dass damit erklärt ist, warum die in Sternen gebundene Masse eine so viel geringere Variation zeigt als die Masse der Dunklen Materie der Halos, in denen die Galaxien entstehen. Dennoch ist nach wie vor unklar, ob diese Mechanismen in allen Objekten und während der gesamten Geschichte des Universums am Werk waren, so wie es jetzt in den wenigen Objekten geschieht, die wir genauer untersuchen können.

In Ermangelung genauerer Beobachtungen neigen Astronomen dazu, das mit dem Studium naher Systeme gewonnene rudimentäre Verständnis in unzulässiger Weise zu verallgemeinern, in der Hoffnung, dass nicht nur die physikalischen Gesetze, sondern auch die Verhaltensweisen solcher komplexer Systeme, wie Galaxien es sind, universelle Geltung besitzen. Schon oft zeigte sich aber, dass solche Extrapolationen unzulässig sind, und zweifellos erwarten uns noch viele weitere Überraschungen, bevor wir die komplexen Wechselwirkungen verstehen, die zwischen Wachstum und Entwicklung der Galaxien, dem Lebenskreislauf ihrer Sterne und den enormen Schwarzen Löchern in ihren Zentren stattfinden.



**GUINEVERE KAUFFMANN** leitet am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching eine Forschungsgruppe zur Entstehung und Entwicklung von Galaxien. 2007 wurde sie mit dem Leibniz-Preis, dem höchstdotierten deutschen Förderpreis, ausgezeichnet.



**SIMON D. M. WHITE** ist Direktor am Max-Planck-Institut für Astrophysik und leitet dort die Abteilung Kosmologie und Extragalaktische Astronomie.

### Literaturhinweise

**Bartelmann, M.:** Der kosmische Mikrowellenhintergrund. In: Sterne und Weltraum 5/2000, S. 330 – 337.

**Bartelmann, M.:** Das Standardmodell der Kosmologie. Teil 1 in: Sterne und Weltraum 8/2007, Seite 38 – 47; Teil 2 in: Sterne und Weltraum 9/2007, S. 36 – 44.

**Gillessen, S.:** Eine Nacht im Zentrum der Milchstraße. In: Sterne und Weltraum 2/2008, S. 52 – 61.

**Springel, V.:** Die Millennium-Simulation. Auf den Spuren der Galaxien. In: Sterne und Weltraum 11/2006, S. 30 – 40.

Interessante Weblinks:

[www.astronomie-heute.de/artikel/982124](http://www.astronomie-heute.de/artikel/982124)

## Die High-End Apo's von APM/LZOS!

Die Optiken dieser 3-linsigen Super Apochromaten, werden bei der renomierten Firma LZOS in Russland hergestellt, die Mechanik ist **MADE IN GERMANY**. Alle Teleskope haben eine Fokusslage, die eine uneingeschränkte binokulare Nutzung ohne Glaswegkorrektoren zulässt.

Wir bieten 3 Tubusvarianten an: - LW mit 2" Auszug  
 - LW Photo mit 2.5" Auszug  
 - CNC-LW II mit 3.5" Auszug.

Zu allen Modellen gibt es optimierte Bildfeldebnungslinsen. Der Lieferumfang beinhaltet grundsätzlich, ein interferometrisches Prüfprotokoll mit mind. 95% Strehl sowie die besten Okularauszüge am Markt, Starlight Feather Touch mit 1/10 Feinfokussierung.

**Wir fertigen diese Apo's der Spitzenklasse von 80mm - 530mm Öffnung!**

**Fragen Sie uns nach Ihrem Wunschmodell.**

**Kein "Made in China"**  
**Keine Kompromisse**

*So individuell wie Ihre Handschrift*

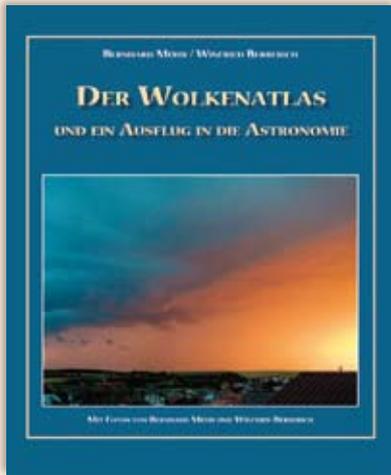
Poststrasse 79 • 66780 Rehlingen-Siersburg • Tel: 06835 - 923949-0

# www.apm-telescopes.com

E-mail: [anfrage@apm-telescopes.de](mailto:anfrage@apm-telescopes.de)



## Unser besonderer Tipp:



Bernhard Mühr, Winfried Berberich

### ■ Der Wolkenatlas und ein Ausflug in die Astronomie Wolken, Wetter und andere Phänomene

2008, 319 S. m. zahlr. Farbfotos., geb., Kunstschätzerverlag

Bestell-Nr. 2792. € 49,80 (D), € 51,20 (A)

Dieser reich bebilderte Band zeigt alles, was Sie mit bloßem Auge am Himmel sehen können. Etwa die Hälfte des Buches sind Wolkenarten und Wolkenformationen gewidmet. Es folgen Wettererscheinungen wie beispielsweise Reif, Regen, Hagel, Schnee, Regenbögen. Danach werden Sonne und Mond vorgestellt. Sonnenflecken, die Sonne im H-Alpha-Licht, Nebensonnen und Haloerscheinungen. Die Mondphasen, Krater und Mare, Mondfinsternis, Haloerscheinungen um den Mond. Das Buch endet mit astronomischen Objekten und Erscheinungen, die mit bloßem Auge oder einem Fernglas erreichbar sind: Der große Orionnebel, die Plejaden, Nordlichter (Polarlichter) und Kometen.



Enrico Bellone, Anna Maria Lombardi, William Shea

### ■ Biografienpaket: Kopernikus, Kepler, Galilei

Drei Sonderhefte von Spektrum der Wissenschaft

Ej: 2000, 2002 u. 2003, je 106 S., zahlr., meist farb. Abb., kart., Spektrum der Wissenschaft.

Bestell-Nr. 2760. € 9,80 (D), € 10,20 (A)

Zum Jahr der Astronomie 2009 erhalten Sie die Biografien dreier großer Astronomen zum günstigen Set-Preis!



Stefan Seip

### ■ Himmelfotografie mit der digitalen Spiegelreflexkamera

Die schönsten Motive bei Tag und Nacht  
2009, 144 S. m. 130 Farbbabb. u. 70 Screenshots, kart., Kosmos.

Bestell-Nr. 2777.  
€ 14,95 (D), € 15,40 (A)

In einfach nachvollziehbaren Schritt-für-Schritt-Anleitungen zu tollen Himmelsaufnahmen!

Schon mit einer handelsüblichen digitalen Spiegelreflexkamera lassen sich wunderschöne Himmelsfotos erzielen. Wie man zu solchen tollen Aufnahmen gelangt, erklärt einfach nachvollziehbar der erfahrene Astrofotograf Stefan Seip. Die Bandbreite der Motive reicht dabei von einem schönen Vollmondaufgang bis hin zum detailreichen Abbild schwacher Nebel. Dabei behandelt der Autor ausführlich die Fotografie sowohl mit, als auch ohne Fernrohr und gibt Tipps zur Bildbearbeitung. Ein ausführlicher Serviceteil mit zahlreichen Praxistipps lässt keine Fragen mehr offen.



NEU

Martin Bojowald

### ■ Zurück vor den Urknall

Die ganze Geschichte des Universums

2009, 368 S., geb., Fischer-Verlag.

Bestell-Nr. 2775.  
€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Dem junge Physiker Martin

Bojowald ist es gelungen, näher als jemals zuvor an den Urknall heranzukommen und sogar darüber hinaus.

Plötzlich sind Einblicke in das möglich geworden, was vor dem Urknall war – mit verblüffenden Erkenntnissen über eine aufregend unbekannt Welt mit negativer Zeit, umgestülpten Raumverhältnissen und einem Kosmos, der sich zusammenzieht, um nach dem Urknall zu expandieren. Alte kosmologische Modelle über den Zyklus des Werdens und Vergehens des Weltalls erhalten dadurch eine ganz neue Aktualität.

Portofreie Lieferung in D&A ab einem Bestellwert von € 20,-\*



Carole Stott

### ■ Praxisset Astronomie

2008, 72 S. mit zahlreichen Farbbildungen, mit Planisphäre, 44 Sternbild-Karten und Nachtlicht-Taschenlampe, Dörting-Kindersley.

Bestell-Nr. 2721. € 24,95 (D), € 25,70 (A)

Alles für die Nacht: Drehbare Himmelskarte, Taschenlampe, Sternkarten und Begleitbuch in einem stabilen Karton – das ideale Einsteigerpaket, auch für Jugendliche geeignet.



NEU

Richard Hamblin

### ■ Welche Wolke ist das?

Wetter, Wolken und Himmelsphänomene beobachten und erkennen

2009, 160 S. m. 120 Farbbabb., kart., Kosmos.

Bestell-Nr. 2778. € 14,95 (D), € 15,40 (A)

Von Schleierwolken über Gewittertürme bis hin zu durch die Industrie erzeugtes Mikroklima: Dieses Buch beschreibt alle Wolkentypen und ihren Zusammenhang mit der Wetterentwicklung. Ein eigenes Kapitel ist faszinierenden sowie seltenen Wetterphänomenen wie »Brockengespenstern« oder »Nebensonnen« gewidmet.



Andrew Liddle

### ■ Einführung in die moderne Kosmologie

Lehrbuch Physik

2009, 201 S. m. Abb., kart., Wiley-VCH.

Bestell-Nr. 2791.  
€ 29,90 (D), € 30,80 (A)

Der ideale Einstieg in die wissenschaftliche Kosmologie – sowohl für Studenten, als auch für anspruchsvolle Laien. Dieses Buch bietet eine relativ leicht verständliche Darstellung moderner kosmologischer Konzepte im überschaubarem Umfang. Es enthält zahlreiche Beispiele und Übungsaufgaben mit Lösungstipps. Sechs separate Kapitel bieten Stoff für Fortgeschrittene.



Heinz-Joachim Klötzler

### ■ Das Astro-Teleskop für Einsteiger

Kaufberatung, Technik, Himmelsbeobachtung

2. Aufl. 2008, 128 S. m. zahlr. Farbbabb., kart., Kosmos.

Bestell-Nr. 2473.  
€ 14,95 (D), € 15,40 (A)

Dieser Praxisratgeber bietet eine sichere Hilfe beim Einkauf, geleitet durch den Aufbau, zeigt die 20 schönsten Beobachtungsziele am Himmel und gibt Tipps für die ersten Astrofotos.



NEU

Lee Smolin

### ■ Die Zukunft der Physik

Probleme der String-Theorie und wie es weiter geht

2009, 400 S. m. Abb., geb., DVA.

Bestell-Nr. 2776.  
€ 24,95 (D), € 25,70 (A)

Steckt die Physik in einer Sackgasse? In seinem erfrischend provozierenden Buch argumentiert der renommierte Physiker Lee Smolin, dass sich die Physik in der Krise befindet, da sie sich in den letzten Jahren ganz der String-Theorie verschrieben hat – und die sei letztlich nicht beweisbar. Neben einer verständlichen Darstellung der String-Theorie bietet Lee Smolin einen Blick in die Zukunft der Physik und auf aussichtsreichere physikalische Forschungsgebiete.



Bequem bestellen:

→ direkt bei [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)

→ per E-Mail [info@science-shop.de](mailto:info@science-shop.de)

→ telefonisch 06221 9126-841

→ per Fax 0711 7252-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

\*Bestellungen in D & A unter € 20,- sowie Bestellungen im sonst. Ausland berechnen wir mit € 3,50. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsges. mBH



Eugen Reichl/Stefan Schiessl

## ■ Space 2009

Raumfahrtjahrbuch mit Chronik 2008

2008, 312 S., zahlr. Abb., VFR e.V.

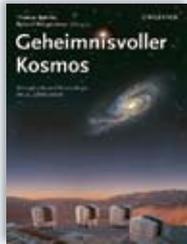
Bestell-Nr. 2517.

€ 14,90 (D), € 15,30 (A)

Das Jahrbuch zur spannenden Welt der Raumfahrt

Neben der umfangreichen Jahreschronik zur Raumfahrt behandeln die Autoren aktuelle und faszinierenden Schwerpunkthemen:

- Bemannte Raumfahrt in Europa: Endlich »go for launch«?
- Sternstunden für Europa: Columbus und ATV an der ISS
- Private Raumfahrt: Wer hat die Nase vorn?
- Exklusiv: Projekt Enterprise und Marsballon Archimedes
- Familienbande: Der Sohn des Kosmonauten
- Landung am Limit: Gefährliche Rückkehr für Sojus TMA 11
- Neues vom Mars: Die Wiedergeburt des Phoenix
- Bewährter Service: Chronik und Statistik 2008
- Neu: Raumfahrt Preview



Hrsg. v. Thomas Bürhrle u. Roland Wengenmayr

## ■ Geheimnisvoller Kosmos

Astrophysik und Kosmologie im 21. Jahrhundert

2008, IV, 180 S. m. 160 Farbabb., geb., Wiley-VCH.

Bestell-Nr. 2709.

€ 29,- (D), € 29,90 (A)

Strömten auf dem Mars einst gewaltige Flüsse? Wie beherrschen Dunkle Energie und Dunkle Materie die Entwicklung des Universums? Was ist ihre Natur? Welche Rolle spielen Schwarze Löcher bei der Entwicklung von Galaxien? Solche hochaktuellen Fragen versuchen Astrophysiker und Kosmologen in diesem Buch zu beantworten.

»Geheimnisvoller Kosmos« ist ein Reiseführer zu den Grenzen der heutigen Erkenntnis. Viele farbige Bilder und aussagekräftige Grafiken vereinfachen das Verstehen und machen das Lesen zum Genuss.



Harald Lesch, Jörn Müller

## ■ Weißt du, wie viel Sterne stehen?

Wie das Licht in die Welt kommt

2008, 316 S. m. 88 Farbabb., geb., C. Bertelsmann.

Bestell-Nr. 2772.

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Von Geburt bis zum Tod: Eine anspruchsvolle, aber doch verständliche Einführung in das Leben der Sterne, ganz in Lesch-Manier!

Die Frage des Kinderliedes »Weißt du, wie viel Sternlein stehen« können zwar auch die Astrophysiker Harald Lesch und Jörn Müller nicht endgültig beantworten, aber sie erzählen, woraus ein Stern besteht, warum er leuchtet, wie er geboren wird und wie er stirbt. Von Roten Riesen, Weißen Zwergen, Supernovae und Pulsaren ist die Rede, was Doppelsterne so alles erleben und wie die ersten Sterne im Universum entstanden sind. Anschaulich erzählt und doch auch immer auf Augenhöhe mit den neuesten Erkenntnissen der Astrophysik.



Lars Lindberg Christensen, Govert Schilling

## ■ Unser Fenster zum Weltraum, mit DVD

400 Jahre Entdeckungen mit Teleskopen

2008, II, 120 S. m. 150 Farbabb., geb., Wiley-VCH.

Bestell-Nr. 2708.

€ 24,90 (D), € 25,60 (A)

Sowohl im Buch als auch auf der beiliegenden DVD wird das Teleskop in all seinen Facetten beleuchtet: seine historische Entwicklungsgeschichte, seine Bedeutung für die Wissenschaft, die technologischen Durchbrüche sowie die Menschen hinter dieser bahnbrechenden Erfindung, ihre Erfolge und ihre Misserfolge.

Die DVD erzählt in aufregenden 59 Minuten die Geschichte des Teleskops, ergänzt durch einmalige Aufnahmen internationaler Observatorien, durch Animationen und Computersimulationen. Mit Untertiteln in 21 verschiedenen Sprachen.



Lambert Spix

## ■ Skyscout

Sterne und Sternbilder einfach finden.

Eine praktische Orientierungshilfe für Sternfreunde, komplett mit Himmels-

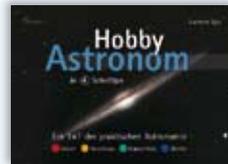
ansichten, Aufsuchhilfen, Karten und Beschreibungen. 2., verb. Aufl. 2008, ohne Pag., mit 4 Jahreszeiten-, 4 Übersichts-, 8 Detailkarten, kart., Oculum.

Bestell-Nr. 2109. € 9,90 (D), € 10,20 (A)

Der Skyscout ist als »Immer-dabei-Werkzeug« für Sternfreunde konzipiert.

Einsteiger lernen einfach, Sterne und Sternbilder zu finden und Amateurastronomen finden eine kompakte und robuste Aufsuchhilfe für ihre Lieblingsobjekte.

**Bestellen Sie bequem telefonisch: 06221 9126-841**



Lambert Spix

## ■ Hobby-Astronom in 4 Schritten

Ein 1x1 der praktischen Astronomie. Wissen, Ausrüstung, Beobachtung, Objekte

2007, 128 S. m. 130 meist farb. Abb. u. 11 Tab., Spiralbindung, Oculum.

Bestell-Nr. 2499. € 14,90 (D), € 15,40 (A)

Von den Grundzügen der ältesten Wissenschaft der Welt, über praktische Fragen bei der Bedienung eines Teleskops bis hin zu Beobachtungsvorschlägen für die ersten galaktischen Erlebnisse – leicht verständlich und anschaulich illustriert.

**Besuchen Sie uns im Internet unter: [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)**



Die Hörbuch-Edition von *Sterne und Weltraum* und *Spektrum der Wissenschaft* bietet Ihnen kosmische Beiträge dieser Monatszeitschriften zum Hören.



## ■ Planetensysteme, Audio-CD

Die Suche nach der zweiten Erde

2009, ca. 59 Min., Sprecher: Detlef Kügow, Komplett-Media.

Bestell-Nr. 2788.

€ 12,95 (D), € 12,95 (A)

Die Frage nach der Existenz von Planeten bei anderen Sternen – seit Jahrtausenden Gegenstand von Forschung und Spekulation – ist entschieden. Zwei Artikel aus *Sterne und Weltraum* berichten über unser neues Verständnis über Planeten: Neue Welten (Editorial von Jakob Staude), Die Bausteine der Planeten (von Mario Trieloff), Was ist ein Planet? (von Günther Wuchterl).



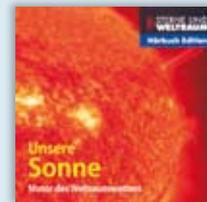
## ■ Kosmische Ursprünge, Audio-CD

Wie Astronomen die Geschichte des Universums enträtseln

2009, ca. 62 Min., Sprecher: Detlef Kügow, Komplett-Media.

Bestell-Nr. 2789. € 12,95 (D), € 12,95 (A)

Beiträge aus *Spektrum der Wissenschaft* zur Chronologie des Universums: Im Reich der ersten Dinge (Editorial von Götz Hoeppe), Welt ohne Anfang (von Thomas Thiermann und Markus Pössel), Urbild des Universums (von Götz Hoeppe), Und es expandiert doch! (von Marek Abramowicz und Stanislaw Bajtlik).



## ■ Unsere Sonne, Audio-CD

Motor des Weltraumwetters

2009, ca. 69 Min., Sprecher: Detlef Kügow, Komplett-Media.

Bestell-Nr. 2790.

€ 12,95 (D), € 12,95 (A)

Die Sonne versorgt uns mit Licht und Wärme und das seit 4,5 Milliarden Jahren mit bemerkenswerter Konstanz. So hat sie sich eine eigene CD in der Hörbuch Edition von *Sterne und Weltraum* verdient: Sonnenwind und Weltraumwetter (Editorial von Uwe Reichert), Von Vorstellungen zu Wissenschaft (von Andreas Kopp und Horst Fichtner), Anatomie unserer Sonne (von Rolf Schlichenmaier und Hardi Peter), Der Sonnenwind (von Christian Vocks), Raumsonden (von Bernd Heber).



**Bequem bestellen:**

→ direkt bei [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)

→ per E-Mail [info@science-shop.de](mailto:info@science-shop.de)

→ telefonisch 06221 9126-841

→ per Fax 0711 7252-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart