

Die Entstehung der Galaxien

Die phantastischen Fortschritte der Kosmologie haben ein Standardmodell zur Entstehung von großräumigen Strukturen im Universum ermöglicht.

Volker Springel

Die Anfangsbedingungen für die Galaxienentstehung im Universum sind heute im Prinzip bekannt. Dadurch wird es möglich, mit analytischen und numerischen Methoden detaillierte theoretische Modelle für die Geschichte der Galaxienentstehung zu entwickeln. Durch den Vergleich dieser Voraussagen mit den enorm verbesserten Beobachtungsdaten, die Großteleskope in jüngster Zeit ermöglicht haben, gelang es, die wichtigsten Prozesse der Galaxienentstehung im kosmologischen Standardmodell aufzuklären und zu einem in seinen Grundlagen überaus erfolgreichen Modell der hierarchischen Galaxienentstehung zu verschmelzen. Allerdings bleibt die komplexe Dynamik der Galaxienentstehung weiterhin eine der spannendsten Aufgaben für Astronomen und Astrophysiker.

Die kosmische thermische Hintergrundstrahlung, von Penzias und Wilson im Jahr 1965 entdeckt, liefert einen der stärksten direkten Beweise für die Theorie des heißen Urknalls. In jüngster Zeit hat sich dieser Mikrowellenhintergrund mit einer Temperatur von 2,73 K zudem als ein hochpräzises Instrument entpuppt, um kosmologische Parameter, wie etwa die gesamte Energiedichte oder die Ausdehnungsgeschwindigkeit des Universums, zu messen. Dies ist möglich, da sich die Physik des frühen Universums, zum Zeitpunkt der Emission der Hintergrundstrahlung etwa 300 000 Jahre nach dem Urknall, in charakteristischer Weise in Temperaturfluktuationen der Hintergrundstrahlung niederschlägt. Allerdings gelang es erst 1982 durch den COBE-Satelliten, diese winzigen Schwankungen der Größenordnung 10^{-5} erstmals nachzuweisen. Moderne Experimente, wie jüngst die Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) [1], konnten die Winkelkorrelationsfunktion der Temperaturschwankungen inzwischen auf immer kleineren Skalen, mit immer geringerer Unsicherheit, messen (Abb. 1). Das erstaunliche, für die Kosmologie hochbedeutende Ergebnis ist, dass die wichtigsten kosmologischen Parameter nun mit guter Genauigkeit *bekannt sind* (siehe Infokasten „Das kosmologische Hintergrundmodell“), und dass zudem verschiedenste Experimente, die unterschiedliche Physik ausnutzen und das Universum zu sehr verschiedenen Zeitpunkten vermessen, zu konsistenten Ergebnissen gelangen.

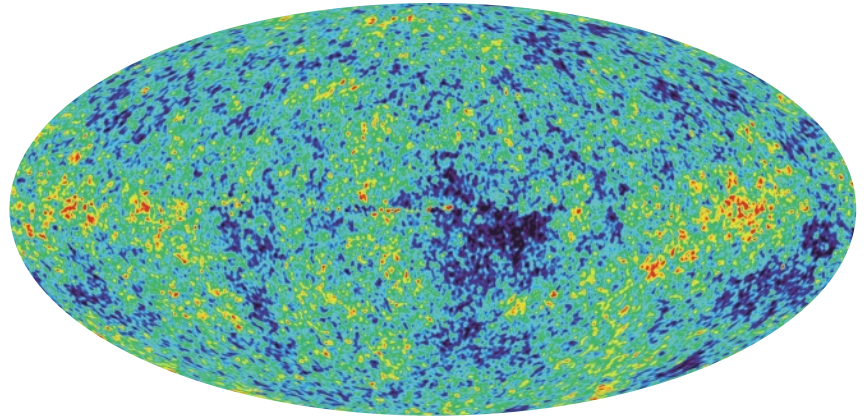


Abb. 1: Die bislang genaueste Himmelskarte der Temperaturschwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung wurde jüngst von der WMAP-Mission gewonnen (Quelle: WMAP).

Die grundlegenden kosmologischen Größen beziehen sich dabei auf Parameter so genannter Friedmann-Lemaître-Modelle, die man als Lösung der Einsteinschen Gravitationsgleichungen unter der Annahme erhält, dass das Universum – zumindest auf sehr großen Skalen – als homogen und isotrop angenommen werden kann. Die zeitliche Entwicklung der Raumausdehnung lässt sich dann durch einen dimensionslosen Skalenfaktor $a(t)$ beschreiben, der einer einfachen Differentialgleichung genügt:

$$\frac{\dot{a}}{a} = H_0 \sqrt{\Omega_0 a^{-3} + (1 - \Omega_0 - \Omega_\Lambda) a^{-2} + \Omega_\Lambda}.$$

Die linke Seite, $H(t) \equiv \dot{a}(t)/a(t)$, gibt die Ausdehnungsrate des Universums zur Zeit t an, welche auch als Hubble-Rate bezeichnet wird. Zum heutigen Zeitpunkt t_0 hat diese den Wert der *Hubble-Konstanten* H_0 . Üblicherweise wird die Normierung des Skalenfaktors als $a(t_0) = 1$ gewählt, wie wir es auch hier getan haben. Ferner wird die Dichte ρ der Materie im Universum in dimensionsloser Form als

$$\Omega_0 = \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho$$

ausgedrückt, und in ähnlicher Weise führt man für den Wert der kosmologischen Konstante Λ die Größe

$$\Omega_\Lambda = \frac{c^2}{3H_0^2} \Lambda$$

ein. Je nach den Werten von Ω_0 und Ω_Λ ergeben sich ganz unterschiedliche globale Raumgeometrien für das Universum. Für $\Omega_0 + \Omega_\Lambda = 1$ ist der Raum flach, für $\Omega_0 + \Omega_\Lambda < 1$ offen (d. h. hyperbolisch gekrümmt) und für $\Omega_0 + \Omega_\Lambda > 1$ geschlossen. Es ist deshalb klar, dass die Werte von H_0 , Ω_0 und Ω_Λ fundamentale Bedeutung für jedes kosmologische Weltmodell haben.

Dr. Volker Springel,
Max-Planck-Institut
für Astrophysik,
Karl-Schwarzschild-
Str. 1, 85741 Gar-
ching

Die Messungen der letzten Jahre haben nun gezeigt, dass sich die Energiedichten in der Materie und im Vakuum tatsächlich gerade zu dem kritischen Wert für ein räumlich flaches Universum addieren. Allerdings trägt eine kosmologische Konstante (oder eine ebenso rätselhafte *dark energy*) zum heutigen Zeitpunkt mit etwa 70 % zu dieser Energiedichte bei, während normale stoffliche Materie nur 30 % ausmacht. Wiederum der Großteil dieser Materie ist nicht von gewöhnlicher Natur, sondern muss in der Form noch unbekannter Elementarteilchen vorliegen, welche nicht, oder nur extrem schwach, mit normaler baryonischer Materie wechselwirken. Über die Bedeutung dieser „Dunklen Materie“ für die Galaxienentstehung werden wir noch sprechen. Für gewöhnliche Baryonen (zum größten Teil H und He) bleibt nur ein Rest von 15 % am Materieinhalt, das heißt ein Beitrag von 4 % zur gesamten heutigen Energiedichte. Nur etwa ein Zehntel aller Baryonen sind aber zur heutigen Zeit in Sternen gebunden. Optische Studien leuchtender Galaxien sehen also gewissermaßen nur die Schaumkronen der Materieverteilung im Universum. Der große Rest der Baryonen liegt als diffus verteiltes Gas vor, von dem man nur einen Teil beobachten kann, etwa in Form von Röntgenemission des heißen Plasmas in Galaxienhaufen, oder durch selektive Absorption des Lichts entfernter Quasare in neutralem Gas des intergalaktischen Raums.

Die rätselhafte Vielfalt der Galaxien

Es ist noch keine einhundert Jahre her, dass der Astronom Edwin Hubble erkannte, dass viele „Nebel“ am Nachthimmel gar nicht zur Milchstraße gehören, sondern selbst viel weiter entfernte, mithin extragalaktische Sternsysteme sind. Heute wissen wir, dass die

Milchstraße eine relativ gewöhnliche Spiralgalaxie typischer Leuchtkraft mit etwa 10^{11} Sternen ist. Im beobachtbaren Teil des Universums gibt es aber noch mindestens weitere 10^{10} Galaxien.

Diese Galaxien zeichnen sich nicht nur durch große Variationen in ihrer Helligkeit und Größe aus, sondern auch durch eine erstaunliche Vielfalt in der Gestalt ihrer Sternverteilungen. Abbildung 2 zeigt einige Beispiele für extreme Ausprägungen der Galaxienmorphologie. Elliptische Galaxien weisen annähernd sphärisch symmetrische, glatte Sternverteilungen auf, deren Sterne sich auf ungeordneten Bahnen bewegen. Sie enthalten meist kein Gas und zeigen wenig Anzeichen für Sternbildung in jüngerer Vergangenheit. Spiralgalaxien bilden das andere Extrem, mit ihren hochgradig geordneten Sternscheiben, welche häufig von Spiralarmen aus jungen heißen Sternen durchzogen sind. Bei vielen Spiralgalaxien ist die Scheibe von einem zentralen Balken dominiert und weist bisymmetrische Spiralarme an den Enden des Balkens auf. Spiralgalaxien enthalten oft auch eine zentrale kugelförmige Verdickung (engl. *bulge*), welche gewissermaßen eine elliptische Galaxie im Kleinen darstellt. Zwischen diesen Grundtypen kommen Mischformen unterschiedlichster Ausprägung vor, welche Astronomen auch heute noch nach einem „Stimmgabelschema“, das auf Edwin Hubble zurückgeht, klassifizieren. Viele, meist kleine und leuchtschwache Galaxien mit gestörter Morphologie passen aber nicht gut in dieses Schema und entziehen sich als „irreguläre Galaxien“ einer klaren Klassifikation.

Galaxien enthalten oft kleinere Zwerggalaxien als Satelliten, wie etwa auch die Milchstraße in Form der Großen und Kleinen Magellanschen Wolken und neun weiteren leuchtschwächeren Satelliten. Daneben gibt es in den stellaren Halos der Galaxien eine Population von Kugelsternhaufen, die sehr alte Sterne enthalten.

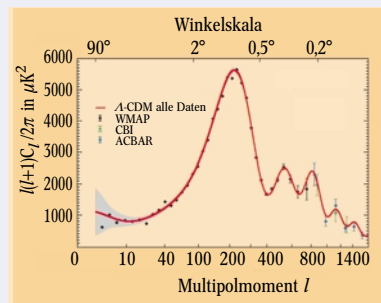
Auf größeren Skalen finden sich Galaxien schließlich zu Gruppen und Haufen unterschiedlicher Größe zusammen. Die größten Galaxienhaufen enthalten dabei etwa 1000 Galaxien und haben Massen von bis zu einigen 10^{15} Sonnenmassen. Solche Haufen stellen die größten „virialisierten“ Systeme im Universum dar, womit ein dynamisches Gleichgewicht zwischen der ungeordneten Bewegung der Galaxien und ihrer gegenseitigen gravitativen Anziehung gemeint ist. Nach dem Virialsatz der Mechanik entspricht die gesamte kinetische Energie dabei gerade der Hälfte der potentiellen Energie, $E_{\text{kin}} = -E_{\text{pot}}/2$, und die Bindungsenergie beträgt $E_{\text{tot}} = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = -E_{\text{kin}}$.

Astronomen versuchen seit jeher intensiv, die Gründe für die verblüffende Vielfalt in der Morphologie der Galaxien zu verstehen und aufzuklären, wie der Prozess der Galaxienentstehung vom Urknall bis zur heutigen Zeit verlaufen ist. In den letzten beiden Jahrzehnten sind dabei entscheidende Fortschritte gelungen, die zur Entwicklung der Theorie der hierarchischen Galaxienentstehung geführt haben. Wir wollen dieses Modell im Folgenden besprechen. Es fußt wesentlich auf der Annahme, dass der materielle Inhalt des Universums von so genannter *kalter dunkler Materie* dominiert wird.

Das kosmologische Hintergrundmodell

Messungen der Temperaturfluktuationen in der kosmischen thermischen Hintergrundstrahlung gehören zu den besten Methoden, um kosmologische Grundparameter des Universums zu bestimmen. Statistisch lässt sich das Gaußsche Zufallsfeld der Temperaturfluktuationen vollständig durch die Zwei-Punkt-Winkelkorrelationsfunktion der Temperaturschwankungen beschreiben. Diese Funktion enthält wertvolle Informationen über die Bedingungen im frühen Universum, da die Temperaturfluktuationen direkt die Dichteschwankungen, die im frühen Universum existierten, reflektieren. Außerdem manifestieren sich akustische Schwingungen der baryonischen Materie relativ zur dunklen Materie in charakteristischer Weise in dieser Funktion. Die so erzeugten *Features* hängen empfindlich von den Werten der kosmologischen Parameter ab und lassen sich besonders gut in der Fourier-Transformierten der Winkelkorrelationsfunktion, dem Leistungsspektrum, analysieren (Abb.). Aus der Höhe und Position der so genannten akustischen *Peaks* können dann kosmologische Parameter extrahiert werden. In Übereinstimmung mit einer ganzen Reihe unterschiedlicher anderer astronomischer Beobachtungen ergeben diese Daten

ein konsistentes Bild des Universums [2]: Der Raum ist *flach*, d. h. die Materiedichte $\Omega_0 = 0,27 \pm 0,02$ und die Dichte in der *dunklen Energie*, Ω_Λ , addieren sich zu einem Wert, der mit eins konsistent ist, $\Omega_{\text{tot}} = 1,02 \pm 0,02$. Allerdings liegt nur ein Anteil $\Omega_b = 0,044 \pm 0,002$ an Ω_0 als baryonische Materie vor, der dominierende Rest ist *dunkle Materie*. Die gegenwärtige Expansionsgeschwindigkeit des Raumes, d. h. der Wert der Hubble-Konstanten, ist $H_0 = 71 \pm 4 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Das Alter des Universums ist damit $13,7 \pm 0,2$ Milliarden Jahre.



Die neuen WMAP-Daten ergänzen ältere Daten des Cosmic Background Imager (CBI) sowie des Arcminute Cosmology Bolometer Array Receiver (ACBAR) und ergeben ein konsistentes Bild des Universums.

Dunkle Materie und die Großraumstruktur im Universum

Spiralgalaxien, in denen sich die Sterne näherungsweise auf Kreisbahnen um das Zentrum bewegen, lieferten früh einen entscheidenden Hinweis auf die Existenz dunkler Materie. Die Rotation speziell in den Außenbereichen ist zu schnell, um durch die Gravitationskraft der eingeschlossenen Baryonen erklärt werden zu können. Es muss sehr viel mehr weitere unsichtbare Masse geben, eben die postulierte dunkle Materie, welche sich bisher nur durch ihre gravitative Wirkung nachweisen ließ. Eine Reihe von Experimenten versucht zwar, dunkle Materie direkt zu detektieren, doch bislang gelang es nicht, eines dieser Teilchen, bei denen es sich etwa um Axionen oder um das leichteste supersymmetrische Teilchen handeln könnte, eindeutig aufzuspüren.

Nachweisen lässt sich die Gravitation der dunklen Materie aber beispielsweise auch in der Dynamik virialisierter Galaxienhaufen, da sich deren Galaxien so schnell bewegen, dass sie ohne die bindende Wirkung der dunklen Materie in alle Richtungen auseinanderfliegen würden. Ferner erreicht die Massenkonzentration in Galaxienhaufen nur durch die dunkle Materie solch hohe Werte, dass starke Gravitationslinseneffekte auftreten können, bei denen Hintergrundquellen vergrößert, verzerrt und in Mehrfachabbildungen aufgespalten werden, wie es in vielen Systemen beobachtet wird.

Schließlich gibt es indirekte Nachweise der dunklen Materie, die sich aus der Theorie der Strukturentstehung selbst ergeben. Einen wichtigen Schlüssel hierzu bildet die Beobachtung der großräumigen Verteilung der Galaxien im Raum. Das Licht weit entfernter Galaxien erreicht uns *rotverschoben*, auch wenn die Quelle in Ruhe ist. Diese kosmologische Rotverschiebung zwischen der emittierten Wellenlänge λ und der beobachteten Wellenlänge λ' entsteht aufgrund der Ausdehnung des Raums, die während der Laufzeit des Lichts stattfindet. Die kosmologische Rotverschiebung $z = \lambda'/\lambda - 1 = 1/a - 1$ ist dabei direkt durch den Skalenfaktor $a(t)$ des Raums zur Zeit der Emission des Lichts gegeben. Mit ausreichend lichtempfindlichen Teleskopen und Spektrometern lässt sich z direkt messen, und man erhält damit indirekt nicht nur den Zeitpunkt in der Vergangenheit, zu dem das Licht emittiert wurde, sondern über die Lichtlaufzeit auch eine Entfernung zu der Galaxie. In der Kosmologie wird daher die Rotverschiebung gleichermaßen als Zeit- und Entfernungsangabe benutzt. Inzwischen ist es gelungen, Galaxien jenseits von $z > 5,78$ zu beobachten [4]. Das Licht dieser Objekte wurde vor über 12 Milliarden Jahren emittiert, als das Universum nur etwa 10 % Prozent seines heutigen Alters erreicht hatte, und sich auch noch annähernd zehnmal schneller ausdehnte als heute.

In den vergangenen Jahren wurden mehrere systematische Beobachtungsprogramme zur Bestimmung der Rotverschiebungen aller hinreichend heller Galaxien in einem bestimmten Himmelsabschnitt durchgeführt. Diese lieferten eine dreidimensionale Karte der Galaxienverteilung im Raum, welche durch Dopplereffekte aufgrund der Galaxieneigenbewegungen nur unwesentlich gestört ist (Abb. 3).

Interessanterweise sind die Galaxien keineswegs gleichmäßig oder zufällig im Raum verteilt. Stattdessen ähnelt ihre Verteilung eher einem Netzwerk aus Filamenten, das riesige Leerräume ohne Galaxien um-

schließt und an dessen Kreuzungspunkten sich Galaxienkonzentration wie Gruppen oder Haufen befinden. Die statistischen Eigenschaften dieser Galaxienverteilung lassen sich mit großer Genauigkeit vermessen und schränken jedes plausible Modell der Galaxienentstehung wesentlich ein.

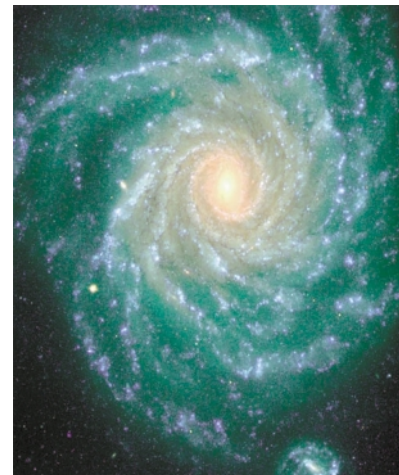


Abb. 2: Galaxien zeigen ein weites Spektrum unterschiedlicher Morphologien. Elliptische Galaxien wie M87 im Zentrum des Virgo Galaxienhaufens (links oben, Quelle: David Malin, AAO) besitzen eine annähernd sphärisch symmetrische Sternverteilung. Spiralgalaxien dagegen besitzen hochgradig geordnete, scheibenförmige Sternverteilungen, wie etwa NGC 1232 (rechts oben, Quelle: ESO, VLT). Die Ausprägung der Spiralarme ist unterschiedlich, und oft gibt es Mischformen, mit kleinen sphärischen Sternsystemen (*bulges*) im Zentrum. Die Scheibe kann auch zu einem zentralen Balken entarten, wie etwa in NGC 1365 (unten, Quelle: ESO, VLT).

Einer der größten Erfolge des hierarchischen Modells der Galaxienentstehung ist es, die großräumige Verteilung (das so genannte *Clustering*) der Galaxien auf allen relevanten Skalen sehr gut erklären zu können. Die Positionen und Größen einzelner Galaxien, sowie die Großraumstrukturen zu denen sie sich zusammenfinden, werden dabei direkt als das Produkt des gravitativen Wachstums primordialer Störungen in der ansonsten gleichförmig verteilten dunklen Materie erklärt, einem Prozess, dem wir uns nun zuwenden wollen.

Gravitative Instabilität und das Wachstum von Strukturen

Im jungen Universum war die Materieverteilung fast perfekt gleichförmig. Es existierten nur winzige Schwankungen, über die die Messungen der Fluktuationen im Mikrowellenhintergrund unmittelbar Zeugnis geben. Der letztendliche Ursprung dieser Fluktuationen könnte in einer inflationären Epoche in der Frühphase des Urknalls gelegen haben [5, 6]. In einfachen Versionen dieser Theorie wurde das Universum unter dem Einfluss eines Skalarfeldes exponentiell um mindestens einen Faktor e^{60} ausgedehnt, wobei Quantenfluktuationen bis auf makroskopische Skalen verstärkt wurden. Nach dem Ende der Inflation blieb

dann ein skaleninvariantes Spektrum winziger Fluktuationen in der Energiedichte zurück.

Das weitere Schicksal der Fluktuationen wird nun in erster Linie von der Gravitation bestimmt. Eine auch nur leicht überdichte Region relativ zur mittleren Dichte des Universums zieht weiteres Material etwas stärker an, wodurch die Überdichte der Region langsam zunimmt. Zwar wird dieser Prozess durch die schnelle Raumexpansion gebremst (in einem Newton-

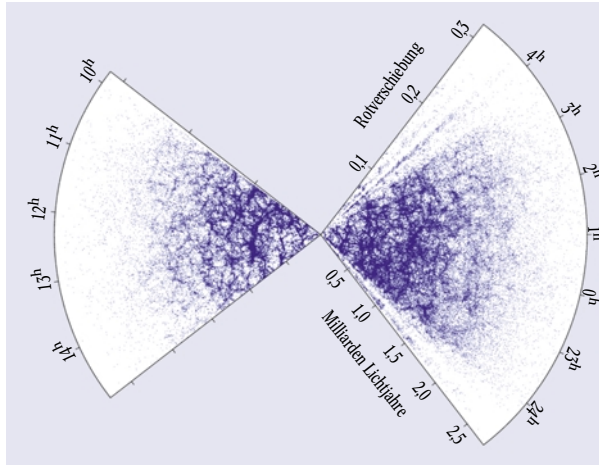


Abb. 3: Beim 2dF Galaxy Redshift Survey [3] wurden die Rotverschiebungen für rund 250000 Galaxien in zwei Himmelsregionen mit einer Gesamtfläche von etwa 2000 Quadratgrad bestimmt. Dies erlaubt es, eine detaillierte dreidimensionale Karte der Galaxien- und damit der Massenverteilung im Universum zu erstellen. Die statistischen Eigenschaften der Galaxienverteilung geben wichtige Hinweise auf den Prozess der Strukturentstehung im Universum. Mit zunehmendem Abstand dünnt die Galaxienverteilung in dieser Darstellung scheinbar aus, da bei großem Abstand nur noch die hellsten Galaxien beobachtbar sind.

schen Raum würde die Instabilität exponentiell anwachsen), doch expandiert die überdichte Region etwas langsamer als der Hintergrund, sodass sich die relative Überdichte mit der Zeit immer weiter erhöht. Irgendwann wird die Überdichte schließlich so groß, dass die Expansion der Region anhält und sich in einen Kollaps umkehrt. Die anfänglichen Störungen können also als Keime aller weiteren Strukturbildung, einschließlich der später entstehenden Galaxien, angesehen werden.

Koppelt sich eine Störung auf diese Weise von der allgemeinen Raumexpansion ab und kollabiert, kommt es zur Bildung eines so genannten *Halos*. Damit ist ein selbstgravitierendes System aus dunkler Materie und baryonischem Gas gemeint, das näherungsweise im Virialgleichgewicht ist. Die Wechselwirkung der Teilchen der dunklen Materie untereinander ist allerdings so schwach, dass sie als völlig stoßfrei angesehen werden können und die Möglichkeit des direkten Energieaustauschs zwischen zwei Teilchen nicht besteht. Der Übergang ins Gleichgewicht erfolgt daher durch Energieaustausch einzelner Teilchen mit dem kollektiven Gravitationsfeld der kollabierenden Massenverteilung. Der resultierende Umverteilungsprozess der Teilchenenergien läuft ab, solange sich das Gravitationsfeld zeitlich schnell ändert, aber er kommt zum Stillstand, sobald das System ein dynamisches Gleichgewicht erreicht hat und sich das kollektive Gravitationsfeld näherungsweise nicht mehr ändert. In dem entstandenen statischen Gravitationsfeld bleiben die Energien

der stoßfreien Teilchen dann individuell erhalten. Am Ende dieses als *violent relaxation* bezeichneten Prozesses bleibt ein näherungsweise sphärisch symmetrischer Halo aus dunkler Materie übrig, bei dem die ungeordnete Bewegung der Teilchen einen weiteren gravitativen Kollaps verhindert. Die innere Struktur dieser Halos kann bisher nur durch numerische Simulationen genau berechnet werden, auf die wir später noch zurückkommen werden.

Eine wesentliche Eigenschaft des gegenwärtigen Standardmodells ist, dass die dunkle Materie als *kalt* angenommen wird, daher auch der Name „CDM“ für *cold dark matter*. Damit ist gemeint, dass die dunkle Materie aus Teilchen besteht, die zum Zeitpunkt ihrer thermischen Entkopplung im frühen Universum bereits nichtrelativistisch waren. Wäre das nicht der Fall, würden kleinskalige Fluktuationen ausgelöscht, bevor sie anwachsen könnten, da die Teilchen aufgrund ihrer Geschwindigkeiten einfach aus ihnen herausströmen könnten.

In den CDM-Modellen findet eine solche Auslöschung nicht statt. Dadurch kommt es zu einem wichtigen Phänomen: Kleinere Massenfluktuationen kollabieren früher als Störungen auf größeren Skalen. Dies führt direkt zum Konzept der hierarchischen Galaxienentstehung, bei der zunächst kleine Galaxien entstehen, die sich durch weiteres gravitatives Wachstum zu immer größeren Systemen zusammenschließen. Wäre die dunkle Materie dagegen thermisch heiß oder relativistisch, würde sich das Wachstum der Strukturen in qualitativ ganz anderer Weise vollziehen. Da dann die ersten kollabierenden Strukturen schon sehr massereich wären, könnten sich kleinere Galaxien allenfalls durch Fragmentation aus ihnen bilden, was aber Beobachtungen in vielfältiger Weise widerspricht.

Das in den letzten Jahren entstandene Standardmodell der Strukturentstehung enthält neben der dunklen Materie auch noch eine nichtverschwindende kosmologische Konstante Λ , weshalb es oft als Λ CDM-Modell bezeichnet wird. Qualitativ läuft die Strukturbildung in dieser Kosmologie sehr ähnlich wie in einem reinen CDM-Modell ab, allerdings ergeben sich vor allem in der zukünftigen Entwicklung größere Unterschiede. Während sich in CDM-Modellen ohne kosmologische Konstante die Ausdehnungsrate des Universums monoton mit der Zeit verlangsamt, dreht sich diese Entwicklung in dem Λ CDM-Modell zu einem bestimmten Zeitpunkt um, sodass das Universum in eine Phase sich *beschleunigender* Expansion eintritt [7]. Dies ist für unser Universum bereits geschehen.

Die Entstehung leuchtender Galaxien

Bisher haben wir nur den Kollaps der dunklen Materie betrachtet. Der baryonische Massenanteil von etwa 15 % verhält sich in der anfänglichen linearen Phase des Wachstums der Dichtefluktuationen noch ganz ähnlich wie die dunkle Materie, da das Gas kalt ist und Druckkräfte vernachlässigbar sind. Allerdings treten beim nichtlinearen Kollaps der Baryonen, die sich in sehr guter Näherung wie ein ideales Gas verhalten, hydrodynamische Schockwellen auf, die kinetische Energie in thermische Energie verwandeln und das Gas bis auf einige Millionen Grad aufheizen, für Galaxienhaufen auch bis auf fast 10^8 Grad. Am Ende ist das Gas ähnlich wie die dunkle Materie verteilt, befindet sich aber in einem hydrostatischen Gleichgewicht, das von einem isotropen Gasdruck unterstützt wird.

Der entscheidende Unterschied zwischen Gas und dunkler Materie ist aber nun, dass die Baryonen durch Strahlungsprozesse Energie verlieren können. Für das stoßionisierte Plasma aus Wasserstoff ($\sim 76\%$ Massenanteil) und Helium ($\sim 24\%$) in virialisierten Halos sind dabei vor allem Bremsstrahlung und Rekombinationsstrahlung verantwortlich. Als Folge dieser Dissipationsprozesse kann das Gas den Kollaps unter Eigengravitation fortsetzen, während die dunkle Materie im Virialgleichgewicht verbleibt. Es kommt zu einer teilweisen Trennung dieser beiden Komponenten – das Gas stürzt gewissermaßen zum Zentrum der Potentialtöpfe der Halos aus dunkler Materie.

Ein vollständiger Kollaps in das Zentrum wird allerdings durch Drehimpuls verhindert, den das Gas besitzt und welcher es in erkalteter Form schließlich auf Kreisbahnen um das Zentrum stabilisiert. So entsteht eine Gasscheibe, in welcher das Gas durch lokale gravitative und dynamische Instabilitäten weiter verdichtet werden kann. Schließlich bilden sich Gaswolken, deren Zentren bis auf stellare Dichten kollabieren können und so durch die Bildung neuer Sterne eine Spiralgalaxie entstehen lassen.

Der Drehimpuls ist also von entscheidender Bedeutung für die Größe der stellaren Scheiben von Spiralgalaxien. Das CDM-Modell kann dabei den Ursprung des benötigten Drehimpulses gut erklären. Die großräumige Massenverteilung wirkt mit gravitativen Gezeitenkräften auf die sich bildenden Halos. Während des Kollapses prägen diese Drehmomente genau den benötigten Drehimpuls auf, um die beobachtete Größenverteilung von Spiralgalaxien zu erklären. Allerdings funktioniert diese Erklärung nur, wenn man annimmt, dass das Gas seinen anfänglichen Drehimpuls im Prozess des hierarchischen Galaxienaufbaus im wesentlichen behält. Numerische Simulationen zeigen aber bisher, dass das dissipative Gas sehr leicht Drehimpuls an die dunkle Materie verlieren kann, sodass die dabei gebildeten Galaxien unrealistisch klein sind [9]. Dies könnte ein grundsätzliches Problem mit dem theoretischen Standardmodell anzeigen, doch es gilt derzeit als wahrscheinlicher, dass theoretische Berechnungen die Physik der Sternentstehung bisher noch nicht hinreichend realistisch berücksichtigt haben [10].

Spiralgalaxien sind der häufigste Typ von Galaxien, vor allem im so genannten „Feld“, d. h. außerhalb von Galaxiengruppen oder Haufen. In den Galaxienhaufen hingegen dominieren elliptische Galaxien und Spiralen sind selten. Diese Relation zwischen Morphologie und Galaxienanzahldichte (engl. *morphology-density relation*) wird im Standardmodell durch Wechselwirkungen und Verschmelzungsprozesse von Galaxien untereinander erklärt.

Die hierarchische Galaxienentstehung

Hierbei kommt der Mechanismus der hierarchischen Galaxienentstehung in entscheidender Weise ins Spiel. Die Strukturentstehung ist dabei ein kontinuierlicher, dynamischer Prozess, bei dem Galaxien durch Akkretion ständig weiter an Masse zunehmen können. Verläuft das Wachstum hinreichend langsam, d. h. nur durch Akkretion diffuser Materie oder kleinerer Zwerggalaxien, können Spiralgalaxien dies „überleben“. Die aufgesammelten Galaxien werden dabei zu Satelliten, oder sie werden vollständig aufgelöst und in die größere Galaxie integriert.

Verschmilzt eine Spiralgalaxie allerdings mit einer

Galaxie ähnlicher Größe, sind die zerstörerischen Gezeitenkräfte und die kurzzeitigen Fluktuationen im Gravitationspotential so stark, dass die stellaren Scheiben vollständig zerstört werden. Die geordnete Bewegung der Sterne auf Kreisbahnen wird so in ein ungeordnetes Knäuel von Orbits umgewandelt, wodurch eine elliptische Galaxie entsteht.

Dieses Bild der Entstehung elliptischer Galaxie ist ein moderner theoretischer Entwurf, der sich erst in den letzten Jahren gegenüber dem traditionellen Modell des monolithischen Kollapses für die Entstehung von elliptischen Galaxien durchgesetzt hat. Das hohe Alter der Sterne in den meisten elliptischen Galaxien wurde oft als Beweis für die Entstehung in einem einzigen Kollaps angeführt, doch zeigen detaillierte Studien zur hierarchischen Galaxienentstehung, dass dieses Modell die Eigenschaften elliptischer Galaxien ebenfalls gut reproduzieren kann, wenn auch viele Details weiterhin umstritten sind.

Ein möglicher Begleitprozess größerer Galaxienverschmelzungen sind intensive Ausbrüche der Sternentstehung (sogenannte *starbursts*). Während der Galaxienkollision regen die starken Gezeitenkräfte zunächst die Entartung der stellaren Scheiben zu ausgeprägten Balken an. Zwischen den Sternen und dem dissipativen Gas in den Balken kommt es dann zu Drehmomenten, die es dem Gas erlauben, Drehimpuls abzugeben und entlang des Balkens mit hoher Effizienz in das Zentrum der Galaxie zu strömen. Man glaubt, dass dies einen mächtigen Ausbruch der Sternentstehung im Zentrum auslösen kann, so wie er etwa in einigen ultrahellen Infrarotgalaxien beobachtet wird. In diesen Galaxien sind die Zentren von dichten Staubwolken verdeckt, die das direkte UV-Licht der jungen Sterne verschlucken und im infraroten Wellenlängenbereich erneut emittieren.

Man weiß auch, dass viele Galaxien – vermutlich sogar alle – ein zentrales, superschweres Schwarzes Loch enthalten, wie man es etwa im Zentrum der Milchstraße und einigen nahen Galaxien bereits direkt nachweisen konnte. Galaxien mit so genannten *aktiven Galaxienkernen* weisen eine besonders starke Emission in einem punktförmigen Bereich des Zentrums auf, von der man glaubt, dass sie durch Akkretion von Gas auf ein Schwarzes Loch zustande kommt. Dabei kann etwa 10% der Ruheenergie des Gases in Strahlung umgewandelt werden. In den meisten Galaxien sind die zentralen Schwarzen Löcher inaktiv, da im Zentrum kein Gas mehr für die Akkretion zur Verfügung steht, doch kann durch einen Verschmelzungsprozess neues Gas einfallen und das Loch gewissermaßen zum Leben erwecken.

Astronomen gehen heute auch davon aus, dass das Licht entfernter Quasare auf dieses Phänomen zurückgeht. In den hierarchischen Modellen ist die Verschmelzungsrate der Galaxien in der Vergangenheit nämlich viel höher als heute, außerdem enthielten die Galaxien zu dieser Zeit noch mehr Gas. Die beobachtete starke zeitliche Entwicklung der Häufigkeit von Quasaren stimmt gut mit theoretischen Vorhersagen, die auf dem hierarchischen Modell basieren, überein. Allerdings ist es nach wie vor umstritten, inwiefern Schwarze Löcher eine wichtige Rolle für den Galaxienentstehungsprozess selbst bilden, etwa als eine Art Katalysator wirken, oder ob sie nur ein prominentes, aber letztlich nicht entscheidendes Begleitphänomen darstellen.

Mit der Entstehung einer elliptischen Galaxie ist die Entwicklung einer Galaxie allerdings nicht unbedingt bereits an ihrem Ende angelangt. Falls noch weiteres Gas im Halo des verschmolzenen Systems vorhanden ist, kann dieses allmählich seine Druckunterstützung durch Strahlungskühlung verlieren. Ähnlich wie bei der Entstehung der ersten Generation einer Spiralgalaxie führt dies zur erneuten Entstehung einer Scheibe. Die in der Verschmelzung gebildete „elliptische“ Galaxie wird so zum *Bulge*, der von einer neuen jüngeren Sternscheibe umgeben ist. Auf diese Weise können die Mischformen der Galaxienmorphologie erklärt werden.

Modellrechnungen zur Galaxienentstehung

Es ist ausgesprochen schwierig, den Prozess der Galaxienentstehung direkt aus seinen Anfangsbedingungen bis zum heutigen Zustand in der erforderlichen Komplexität rechnerisch zu verfolgen. Dies liegt zum einen ganz wesentlich an dem enormen dynamischen Bereich, der in diesem Problem auftritt, und der ein wesentlicher Bestandteil des hierarchischen Modells ist. Zum anderen spielen eine Vielzahl von „kleinskaligen“ physikalischen Prozessen, die mit der Sternentstehung und ihren Rückwirkungen auf die Gasdynamik zu tun haben und die bestenfalls partiell verstanden sind, eine entscheidende Rolle für die Ausgestaltung der stellaren Systeme. In voller Allgemeinheit lässt sich Galaxienentstehung deshalb nur in Computersimulationen behandeln, die auf den derzeit leistungsfähigsten Supercomputern durchgeführt werden. Allerdings ist es dabei recht unklar, wie die schlecht verstandene Physik der Sternentstehung abgebildet werden soll, abgesehen von den enor-

men numerischen Schwierigkeiten, die sich durch den großen dynamischen Bereich der Rechnungen ergeben. Simulationen müssen sich daher meist auf eine Beschreibung mit stark vereinfachenden Näherungen beschränken.

Im Bereich der Strukturentstehung in der dunklen Materie ist die Unsicherheit dabei noch relativ klein. Die Dynamik der dunklen Materie wird durch die stoßfreie Boltzmann-Gleichung beschrieben, gekoppelt an die Poisson-Gleichung im expandierenden Raum. Dieses auch als Poisson-Vlasov-System bezeichnete System partieller Differentialgleichungen löst man durch Diskretisierung als ein N -Teilchen-System. Durch Fortschritte in der Computertechnik und den eingesetzten Algorithmen hat man diesen Teil der Rechnung mittlerweile recht gut unter Kontrolle. Die größten bisher durchgeführten Rechnungen dieser Art benutzen bis zu einer Milliarde Massenpunkte, in periodischen Würfeln von bis zu 3 Gpc Kantenlänge [8] (Abb. 4).

Auf großen Skalen ist die einzige relevante Kraft die Gravitation, daher sollten die Baryonen hier wie die dunkle Materie verteilt sein, und mithin spiegelt sich auch in der Verteilung der Galaxien diejenige der dunklen Materie wider. Dieser Zusammenhang ermöglicht es wiederum, das beobachtete Clustering der Galaxien mit Voraussagen der Theorie der dunklen Materie zu vergleichen, auch wenn die Physik der Sternentstehung im Detail noch nicht verstanden ist.

Man kann aber auch versuchen, hydrodynamische Prozesse der Baryonen näherungsweise in Computermodelle einzubeziehen. Solche Rechnungen sind sehr aufwändig, speziell dann, wenn Strahlungsprozesse und die dadurch mögliche Dissipation im Gas berücksichtigt werden. Das Gas kann dann zu sehr hohen Dichten kollabieren, was kurze dynamische Zeitskalen zur Folge hat, und dynamische Rechnungen, die ja weiterhin das gesamte Schicksal des Universums über sein volles Alter verfolgen sollen, extrem verteuert. Derzeit lässt sich dieses Problem nur mit Hilfe phänomenologischer Rezepte zur rechnerischen Behandlung der Sternentstehung umgehen. Abbildung 5 zeigt ein Beispiel einer solchen Rechnung bei Rotverschiebung $z=3$ [11]. Auf großen Skalen zeigt das Gas eine ähnlich filamentartige Verteilung wie die dunkle Materie. Wie die Vergrößerung einer der leuchtkräftigsten Galaxien allerdings zeigt, haben sich im Zentrum der Halos leuchtende stellare Systeme gebildet.

Aufgrund ihrer physikalischen und numerischen Schwierigkeiten sind hydrodynamische Simulationen derzeit wohl noch nicht das leistungsfähigste Instrument, um theoretische Voraussagen für die Galaxienentstehung zu liefern. Dieses kommt den so genannten *semi-analytischen Modellen* zu [13–16].

Hierbei wird das recht sichere Wissen über den hierarchischen Entstehungsprozess von Halos aus dunkler Materie mit analytischen Methoden zur Beschreibung der Physik der Baryonen kombiniert (Abb. 6). Zwar müssen auch in dieser Methode oft stark vereinfachende Annahmen gemacht worden, doch sind diese physikalisch motiviert und rechnerisch leicht handhabbar. Vor allem aber sind diese Modellbildungen ein unverzichtbares Werkzeug, um überhaupt erst einmal die möglichen Konsequenzen bestimmter physikalischer Hypothesen über den Galaxienentstehungsprozess zuverlässig abschätzen zu können. Durch den Vergleich mit den immer besser werdenden Beobachtungsdaten

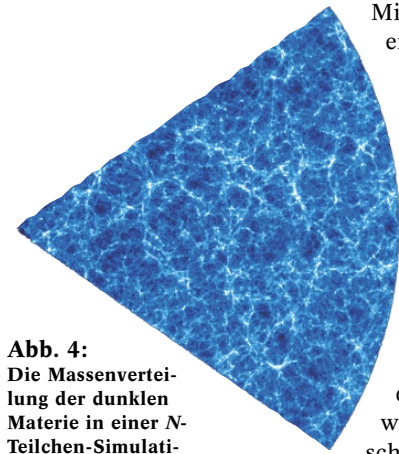


Abb. 4: Die Massenverteilung der dunklen Materie in einer N -Teilchen-Simulation der Strukturentstehung. Darstellung in einer Rotverschiebungsprojektion, ähnlich wie für den in Abb. 3 gezeigten Galaxienkatalog, (aus [8])

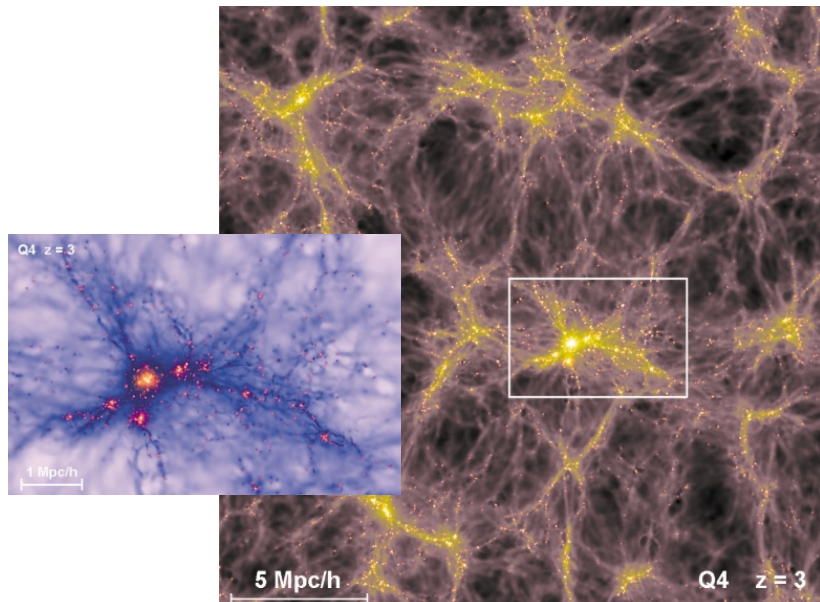


Abb. 5: In der Gasverteilung einer hydrodynamischen Simulation der Galaxienentstehung ist deutlich die filamentartige Struktur der Materieverteilung zu erkennen, selbst zu diesem frühen Zeitpunkt der Entwicklung bei Rotverschiebung $z=3$, als das Universum erst etwa zwei Milliarden Jahre alt war. Die „Verklumpungen“ von Gas sind Halos, in deren Zentren sich Sterne bilden. Der vergrößerte Ausschnitt links zeigt diese Sterne in rot. (aus [11])

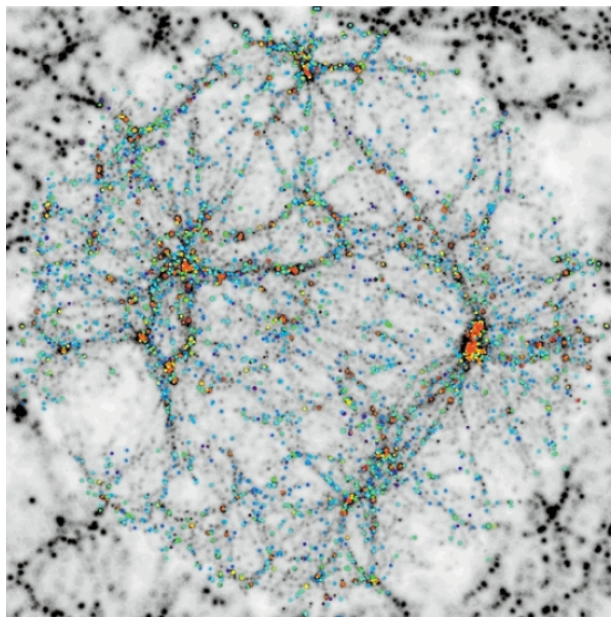


Abb. 6: Die Galaxienverteilung im lokalen Universum, vorausgesagt mit einem semi-analytischen Modell der Galaxienentstehung. Die Farbe der Symbole gibt einen Farbindex der Galaxien an. Man sieht, dass die vorwiegend roten elliptischen Galaxien bevorzugt in großen Galaxienhaufen zu finden sind (aus [12]).

ist es so in den letzten Jahren erst möglich geworden, die Bedeutung vieler der wichtigsten physikalischen Prozesse im Galaxienentstehungsprozess qualitativ und quantitativ zu verstehen.

Dennoch sind viele Fragen nach wie vor ungelöst. Die schwierigste Aufgabe liegt dabei in der Sternentstehung und ihren Rückwirkungsprozessen auf die Gasdynamik, dem sogenannten *Feedback*. Man glaubt, dass Supernovaexplosionen und stellare Winde die Rate der Sternentstehung in Galaxien regulieren und insbesondere kleine Galaxien an effizienter Sternentstehung hindern, vermutlich indem Baryonen regelrecht aus kleinen Galaxien „geblasen“ werden. Auch das UV-Strahlungsfeld von Quasaren und jungen Sternen könnte entscheidend zum Feedback beitragen. Ohne solche eine Dämpfung der Sternentstehung lässt sich die Heligkeitsverteilung der Galaxien derzeit nämlich nicht verstehen. Da kleine Halos sehr effiziente Kühlungsprozesse des Gases erlauben, sollten sie eigentlich vergleichsweise viele Sterne enthalten, doch das Gegenteil wird beobachtet. Die Aufklärung der Physik der Feedback-Prozesse steht daher im Zentrum gegenwärtiger Forschung auf dem Gebiet der Galaxienentstehung.

Schlussbetrachtungen

Wenn man bedenkt, dass die Grundidee der hierarchischen Galaxienentstehung erst vor 25 Jahren durch Simon White und Martin Rees [17] formuliert wurde, so wird klar, welchen phantastischen Fortschritt die Kosmologie in den vergangenen Jahren erlebt hat. Wir kennen heute mit guter Genauigkeit den Wert aller grundlegenden kosmologischen Parameter und haben eine solide Hypothese für die Entstehung der Galaxien, welche von Theoretikern und Beobachtern gleichermaßen mit großer Intensität weiteren Tests unterzogen wird. Gleichwohl bleiben viele wichtige Fragen nach wie vor ungelöst.

Die grundsätzlichen Herausforderungen stellen sich dabei wohl für die Teilchenphysik. Die Aufklärung der physikalischen Natur der dunklen Materie und der

dunklen Energie, die zusammen 96 % der heutigen Energiedichte des Universums ausmachen, gehört sicher zu den spannendsten Fragen der modernen Physik überhaupt.

Im Bereich der Galaxienentstehung stellt sich vor allem die Aufgabe, die Voraussagen, die sich aus dem theoretischen Modell der hierarchischen Galaxienentstehung im Rahmen der Λ CDM-Kosmologie ergeben, mit größerer Zuverlässigkeit zu bestimmen. Der Vergleich mit den mächtigen Daten der neuesten Generation großer Galaxienkataloge, wie etwa des *Sloan Digital Sky Survey* [18], wird dann zeigen, wie tragfähig dieses Modell wirklich ist. Die Widersprüche und Probleme, die es derzeit gibt, sind zahlreich, könnten sich aber durch ein besseres Verständnis der Physik der Galaxienentstehung weitgehend auflösen lassen. Es ist aber genauso gut denkbar, dass die Theorie der Galaxienentstehung oder das gerade entstandene Standardmodell der Λ CDM-Kosmologie noch in entscheidenden Punkten revidiert werden muss. In jedem Fall dürfte die Galaxienentstehung auf Jahre hinaus eines der aktivsten Forschungsfelder in der gesamten Astrophysik bleiben.

Literatur

- [1] C. L. Bennett et al., eingereicht bei *Astrophys. J.*, astro-ph/00302207 (2003)
- [2] D. N. Spergel et al., eingereicht bei *Astrophys. J.*, astro-ph/0302209 (2003)
- [3] M. M. Colless et al., *Mon. Not. R. Astr. Soc.* **328**, 1039 (2001)
- [4] A. J. Bunker et al., eingereicht bei *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, astro-ph/0302401 (2003)
- [5] A. H. Guth, *Phys. Rev. D* **23**, 347 (1981)
- [6] M. Bartelmann, *Phys. Bl.*, September 2001, S. 41
- [7] P. Giulini und N. Straumann, *Phys. Bl.*, November 2000, S. 41
- [8] A. E. Evrard et al., *Astrophys. J.* **573**, 7 (2002)
- [9] M. Steinmetz und J. Navarro, *Astrophys. J.* **513**, 555 (1999)
- [10] F. C. van den Bosch, A. Burkert und R. A. Swaters, *Mon. Not. R. Astr. Soc.* **326**, 1205 (2001)
- [11] V. Springel und L. Hernquist, *Mon. Not. R. Astr. Soc.* **339**, 312 (2003)
- [12] H. Mathis et al., *Mon. Not. R. Astr. Soc.* **333**, 739, (2002)
- [13] S. D. M. White und C. S. Frenk, *Astrophys. J.* **379**, 52 (1991)
- [14] G. Kauffmann, *Mon. Not. R. Astr. Soc.* **274**, 153 (1995)
- [15] G. Kauffmann et al., *Mon. Not. R. Astr. Soc.* **303**, 188 (1999)
- [16] C. Baugh et al., *Astrophys. J.* **498**, 504 (1998)
- [17] S. D. M. White und M. Rees, *Mon. Not. R. Astr. Soc.* **183**, 341 (1978)
- [18] M. Blanton et al., *Astron. J.* **328**, 2358 (2001)

Der Autor

Volker Springel, Jahrgang 1970, studierte Physik an der Universität Tübingen und der Universität von Kalifornien in Berkeley. Er promovierte 1999 an der LMU in München über die Entstehung und Entwicklung der Galaxien. Nach einem Forschungsaufenthalt am Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics 1999/2000 ist er seit 2001 Postdoktorand am Max-Planck-Institut für Astrophysik. Sein Hauptinteresse gilt der theoretischen Kosmologie, speziell der Struktur- und Galaxienentstehung im Universum, welche er mit numerischen Simulationen auf Großrechnern untersucht.

