

Die Millennium-Simulation

Mit einem Superrechner auf den Spuren der Galaxien

VON VOLKER SPRINGEL

Die Millennium-Simulation verfolgt die Entstehung von mehr als 20 Millionen Galaxien in einem Ausschnitt des Universums mit einer Ausdehnung von mehr als zwei Milliarden Lichtjahren. Diese größte bisher durchgeführte Simulation der Entwicklung des Universums liefert ein detailliertes Modell für das Wachstum kosmischer Strukturen und hilft, die Verbindung zwischen massereichen Schwarzen Löchern und Galaxien zu verstehen.

Aus allen Himmelsrichtungen erreicht uns eine schwache Mikrowellenstrahlung, deren Frequenzverteilung genau der von Max Planck gefundenen Formel für die Wärmestrahlung eines Schwarzen Körpers folgt. Die Temperatur dieser Strahlung liegt bei 2,73 Kelvin, nur wenig über dem absoluten Nullpunkt. Ihre Existenz ist einer der wichtigsten Belege für das Urknallmodell, denn der Mikrowellenhintergrund ist nichts anderes als die Restwärme des heißen Urknalls, die sich durch die rasche Ausdehnung des Weltalls stark abgekühlt hat.

Doch dieser kosmische Mikrowellenhintergrund bietet noch viel mehr, er hat sich zu einer wahren Schatzkiste voll kosmologischer Informationen gemauert. Denn genaue Messungen zeigen, dass die Temperatur der Hintergrundstrahlung je nach Richtung ganz leicht

schwankt, um wenige hundertstel Prozent. Neueste Beobachtungen, wie die des Satelliten WMAP (siehe Abb. 1), liefern eine genaue Kartierung der Temperatur dieser winzigen Kräuselungen über den gesamten Himmel. Auf diese Weise erhält man eine Karte des frühen Universums, als es erst 380 000 Jahre alt war. Dies war nämlich der Zeitpunkt, zu dem das Universum so weit abgekühlt war, dass Wasserstoff- und Heliumkerne ihre Elektronen einfangen konnten, wodurch das Universum für Strahlung transparent wurde und so die Temperaturstrahlung sich frei ausbreiten konnte. Überträgt man die Entwicklungsgeschichte des Universums auf die Zeitskala eines menschlichen Lebens von 90 Jahren, dann zeigt die Karte des Mikrowellenhintergrunds das Weltall am Ende seines ersten Tages – es ist quasi ein »Baby-Photo« unseres Universums.

Den Temperaturfluktuationen entsprechen dabei Schwankungen in der Materiedichte, die es zu dieser frühen Zeit in dem neu geborenen Universum offenbar gegeben hat. Abgesehen davon war das Weltall aber gleichförmig, es enthielt eine glatte und homogene Verteilung der Materie und der Strahlung, aber noch keinerlei Objekte wie Sterne oder Galaxien. Man nimmt an, dass der eigentliche Ursprung der Fluktuationen in einer inflationären Frühphase des Universums liegt, als sich das All für eine kurze Zeit exponentiell aufblähte, und zwar um so einen gigantischen Faktor, dass selbst das Quantenrauschen des Vakuums auf makroskopische Skalen vergrößert wurde. Auf diese Weise gehen also die Temperaturfluktuationen und die von ihnen im späteren Kosmos erzeugten Strukturen letztlich auf mikroskopisch kleine Quantenprozesse zurück.

Ein Brückenschlag vom Anfang der Zeit bis zur heutigen Epoche

Die Beobachtungen des Mikrowellenhintergrunds zusammen mit unseren Vorstellungen über den Materieinhalt des Universums, über die wir noch sprechen werden, bedeuten, dass wir den frühen Zustand des Universums im Prinzip genau kennen. Durch Anwendung der gewöhnlichen Gesetze der Physik – im We-

◀ Abb. 1: Geringe Temperaturschwankungen im kosmischen Mikrowellenhintergrund verraten die winzigen Dichteunterschiede im frühen Universum, aus denen später die Galaxien entstanden sind. (Bild: NASA/WMAP Science Team)

sentlichen des Gravitationsgesetzes und der Expansion des Raumes – sollte sich aus diesen Anfangsbedingungen die spätere Entwicklung des Universums berechnen lassen. Falls eine solche Rechnung gelingt, kann man damit gleichsam eine Brücke vom einfachen frühen Zustand des Alls bis zum komplexen heutigen Zustand bauen. Ein Vergleich des vorhergesagten Endzustands mit Beobachtungsdaten des heutigen Universums erlaubt dann eine Überprüfung der zugrundeliegenden Theorie für die Entstehung kosmischer Struktur, und liefert Einsichten in den genauen Ablauf der Galaxienbildung.

In diesen kurzen Sätzen verbirgt sich so etwas wie das Grundprogramm der numerischen Kosmologie. Man nehme den Anfangszustand des Universums und stelle ihn in einem Computer nach, zusammen mit all den physikalischen Gesetzen, die man für das Weltall für wichtig hält. Dann rechnet man seinen Weg vorwärts in der Zeit, und prüft, was für ein Universum dabei herauskommt. Es ist fast wie bei einem Laborexperiment, nur dass Experimente mit dem ganzen Universum eben nur auf abstrakte Weise durch die Rechnungen eines Supercomputers möglich sind.

Am Ende solcher numerischen Rechnungen sind Kosmologen natürlich vor allem daran interessiert, ob das in der Simulation entstandene Universum ähn-

lich wie unser wirkliches Universum aussieht. Falls es Abweichungen gibt, dann sind die theoretischen Vorstellungen in irgendeiner Weise falsch. Umgekehrt deutet eine gute Übereinstimmung darauf hin, dass man die wichtigsten Zutaten für die Theorie der Galaxienentstehung gefunden hat. Das ultimative Ziel der kosmologischen Simulationen ist es dabei, auf dem Computer – ausgehend von den Anfangsbedingungen der Inflation – all die Galaxientypen in ihrer vollen Pracht entstehen zu lassen, die wir als Spiral- oder Elliptische Galaxien bewundern: ein hoher Anspruch, der sich derzeit noch nicht voll realisieren lässt. Allerdings sind schon große Schritte in diese Richtung gemacht worden, und einen solchen wollen wir hier eingehend vorstellen: die Millennium-Simulation. Zuvor müssen wir aber erst einmal klären, was es ist, das hier überhaupt simuliert wird.

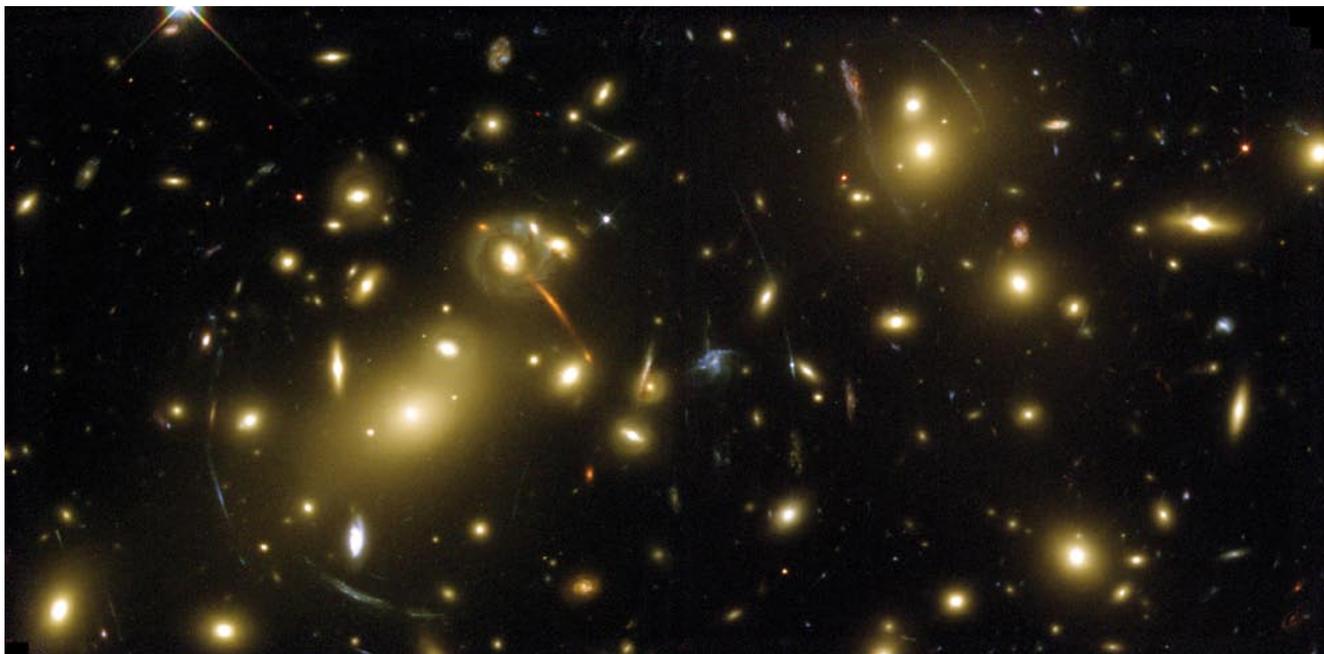
Geisterteilchen

Schon der schweizerisch-amerikanische Astronom Fritz Zwicky folgerte 1937 aus der Bewegung von Galaxien in Galaxienhaufen, dass diese eigentlich auseinanderdriften müssten, gäbe es nicht große Mengen unsichtbarer »dunkler Materie«, die diese Haufen zusammenhält. Später kamen noch viele andere Nachweise der dunklen Materie hinzu. So rotieren die Außenbereiche vieler Spiralgalaxien schneller, als man eigentlich erwarten würde (SuW 10/2006, S. 22). Denn berücksichtigt man nur die Schwerkraft der gewöhnlichen, sichtbaren Materie, die vor allem aus Wasserstoff und Helium besteht, dann sollten die Sterne auf diesen Außenbahnen eigentlich durch die Fliehkraft aus der Galaxie geschleudert werden. Auch die Lichtablenkungseffekte

starker Gravitationslinsen, wie sie etwa in der Form von Einsteinringen und -bögen in massereichen Galaxienhaufen wie in dem Haufen Abell 2218 zu sehen sind (Abb. 2), lassen sich nur durch das Vorhandensein großer Mengen an dunkler Materie verstehen.

Heute glauben wir, dass der »Kitt«, der Galaxien und Galaxienhaufen zusammenhält, aus einer Art von Elementarteilchen besteht, die nicht im normalen Standardmodell der Teilchenphysik enthalten ist. Es könnten etwa Axionen, Neutralinos, oder Gravitinos sein. An Ideen für die Natur dieser exotischen Materie mangelt es nicht, allerdings konnten die zugehörigen Teilchen bisher noch nicht im Labor direkt nachgewiesen werden. Man glaubt, dass dies vor allem an der extrem geringen Wechselwirkungswahrscheinlichkeit der dunklen Materie mit normaler Materie liegt, die noch viel geringer als die gewöhnlicher Neutrinos ist. So kommt es, dass die Teilchen der dunklen Materie durch die Erde, das Sonnensystem oder uns Menschen hindurch fliegen können, ohne einen Widerstand zu verspüren. Sie unterliegen einzig der Gravitation. Nun ist bei den Astrophysikern das Vertrauen auf die Grundgesetze der Schwerkraft so stark ausgeprägt, dass die

▼ Abb. 2: Der Galaxienhaufen Abell 2218 enthält so viel Materie, dass er das Licht von Hintergrundgalaxien ablenkt: Es werden mehrere Bilder erzeugt und in lange, dünne Bögen verzerrt. Solche Gravitationslinsen lassen sich nur durch große Mengen dunkler Materie in dem Haufen erklären. (Bild: NASA/Andrew Fruchter und das ERO-Team/STScI)



allermeisten von ihnen keinen Zweifel an der Existenz dieser Geisterteilchen haben, und auch ganz selbstverständlich mit ihnen in Computersimulationen rechnen, auch wenn man ihre genaue Natur noch nicht kennt.

Besonders verblüffend ist, dass es von der dunklen Materie viel mehr als von normaler Materie gibt, genau genommen etwa sechsmal so viel. Das heißt, dass die Schwerkraft auf großen Skalen vorwiegend durch die dunkle Materie erzeugt wird. Computersimulationen des Wachstums kosmischer Strukturen kommen daher gar nicht umhin, die dunkle Materie in den Simulationen zu berücksichtigen. Umgekehrt hat die normale Materie aus Wasserstoff und Helium nur einen so kleinen Anteil am Inhalt des Universums, dass man diesen Teil in Simulationen mitunter sogar vernachlässigt und so tut, als ob es sich bei der entsprechenden Masse auch um dunkle Materie handelt. Das vereinfacht die Simulationen sehr stark.

Das doppelt dunkle Rätsel

Obwohl schon die dunkle Materie rätselhaft ist, bietet das Universum ein Geheimnis, das noch tiefer in die fundamentale Physik von Raum und Zeit hineinreicht. Das Urknallmodell besagt, dass das Universum seinen Anfang vor rund 13,6 Milliarden Jahren in einem extrem heißen und dichten Zustand fand, aus dem heraus es sich rasend schnell ausgedehnt hat. Die Expansion des Alls wird aber mit der Zeit gebremst, schlicht und einfach aufgrund der gravitativen Anziehung der Materie selbst. Für lange Zeit war es eine der spannendsten Fragen der Kosmologie, ob die Expansion trotz der Abbremsung immer weiter gehen würde, ob sie asymptotisch zum Stillstand kommen würde, oder ob sie sich gar zu einer Kontraktion umkehren würde, die schließlich das Universum in einem großen »Endknall« zusammenfallen ließe. Immer aber sollte die Gravitation zu einer Verlangsamung der Expansion führen, denn etwas anderes kann sie aufgrund ihrer anziehenden Natur gar nicht verursachen.

Zur großen Überraschung der Astronomen hat die Expansionsgeschwindigkeit des Weltalls aber vor rund fünf Milliarden Jahren angefangen, sich plötzlich wieder zu vergrößern! Der Nachweis dieser beschleunigten Expansion gelang zuerst mit der Beobachtung von weit entfernten Supernovaexplosionen des Typs Ia. Diese »Standardkerzen« können bis zu Rotverschiebungen von $z \approx 1$ beobachtet werden, aber jene im Bereich $z > 0,5$ erscheinen leuchtschwächer als erwartet, was auf eine beschleunigte Expansion hindeutet. Dieser Effekt der Beschleunigung kann nur durch eine kosmolo-

► Abb. 3: Die Millennium-Simulation wurde auf dem Supercomputer IBM p690 des Rechenzentrums der Max-Planck-Gesellschaft in Garching durchgeführt. Jeder der 16 schwarzen Schränke beherbergt 32 Prozessoren und 64 Gigabyte Hauptspeicher. Die einzelnen Computer sind über armdicke Datenleitungen im Boden miteinander verbunden. Die anfallenden Daten wurden zuerst auf Festplatten und danach in dem großen Datensilo im Hintergrund gespeichert, in dem ein Roboter ein riesiges Archiv mit Magnetbändern verwaltet.

gische Konstante, oder allgemeiner eine »Vakuumenergiedichte«, erklärt werden, die den Raum durch eine Art negativen Druck anschwellen lässt.

Heute nennt man diese Komponente »dunkle Energie«. Sie stellt eine der schwierigsten Herausforderungen für moderne Quantenfeldtheorien dar, denn der beobachtete Wert der dunklen Energie lässt sich nicht auf natürliche Weise erklären. Dabei ist der Anteil der dunklen Energie an der gesamten Energiedichte des heutigen Universums keineswegs gering, im Gegenteil. Rund 75 Prozent stecken in dunkler Energie, 21 Prozent in dunkler Materie, und nur 4 Prozent in normaler Materie (vor allem Wasserstoff und Helium). Nur ein Zehntel der gewöhnlichen Atome steckt übrigens in leuchtenden Sternen, sodass wir am Nachthimmel nur ein halbes Prozent des kosmischen Energieinhalts sehen können. Es ist deshalb klar, dass Simulationen des Universums vor allem die beiden dunklen Komponenten berücksichtigen müssen.

Heutzutage sind die relativen Anteile der einzelnen Komponenten, also dunkler Materie, dunkler Energie und normaler Materie, sowie Grundparameter wie das Alter des Universums und die momentane Expansionsrate, bis auf wenige Prozent genau bestimmt – ein ganz wesentlicher Fortschritt, verglichen mit dem Wissen noch vor einigen Jahren. Entscheidenden Anteil daran haben vor allem die genauen Messungen der Temperaturfluktuationen in der Hintergrundstrahlung. In der statistischen Verteilung der Stärke dieser Schwankungen auf verschiedenen Winkelskalen ist nämlich gleichsam eine Signatur der Werte der wichtigsten kosmologischen Parameter aufgeprägt. Experimente wie WMAP haben diesen Schatz an kosmologischen Daten finden und entschlüsseln können.

Aber auch viele andere Daten über das Universum, angefangen mit der großräu-



migen Verteilung der Galaxien, über Absorptionsspektren ferner Quasare, bis hin zu schwachen Gravitationslinseneffekten, passen konsistent in das so entstandene Bild, das nun als das Standardmodell der Kosmologie bezeichnet wird: Kalte dunkle Materie mit einer kosmologischen Konstante, kurz Λ CDM (nach dem Symbol Lambda für die kosmologische Konstante und CDM für Cold Dark Matter). Das Attribut »kalt« bedeutet hier, dass die thermischen Geschwindigkeiten der Teilchen der dunklen Materie zu Beginn der Strukturentstehung vernachlässigbar klein waren. Dadurch bleiben auch kleinste Störungen in der Materiedichte erhalten; wäre die dunkle Materie dagegen »warm« oder »heiß«, so würden solche Schwankungen durch die Teilchenbewegung ausgewaschen.

Die Zehn-Milliarden-Teilchen-Simulation

Das Universum ist bekanntermaßen sehr groß und komplex. Dementsprechend schwierig gestaltet es sich, ein adäquates Computermodell zu entwickeln, das sowohl die großräumige Verteilung vieler Galaxien als auch gleichzeitig deren innere Eigenschaften räumlich auflösen kann. Die Treue eines solchen Modells wird dabei vor allem durch die Anzahl der Maseteilchen bestimmt, die zur Darstellung des Materieinhalts eingesetzt werden. Je mehr Teilchen verwendet werden, desto größer der Detailreichtum und Informationsinhalt der Simulation. Schon über die letzten 25 Jahre hinweg haben Astrophysiker deshalb versucht, immer größere



re Simulationen mit immer höheren Teilchenzahlen zu berechnen (SuW 10/2006, S. 19).

Mit dem Millennium-Projekt haben nun Wissenschaftler des VIRGO-Konsortiums neue Standards gesetzt. In dieser Simulation wurde die bisher größte Teilchenzahl überhaupt eingesetzt, mehr als zehn Milliarden, fast zehnmal so viel wie in den größten bis dahin durchgeführten kosmologischen Rechnungen. Die Teilchen befinden sich in einem Würfel mit einer Kantenlänge von etwa 2.1 Milliarden Lichtjahren. Mit dem mathematischen Trick periodischer Randbedingungen wird der Würfel in jeder Raumrichtung beliebig oft repliziert, sodass die Simulation zumindest mathematisch sogar das unendlich große Universum abdeckt.

Das Virgo-Konsortium ist eine internationale Gruppe von numerisch arbeitenden Kosmologen aus Deutschland, England, den USA, Kanada und Japan. Die Wissenschaftler setzten zur Berechnung der Millennium-Simulation einen Supercomputer der Max-Planck-Gesellschaft ein (Abb. 3) und ließen dessen 512 Prozessoren für einen Monat an dem Problem werkeln. Für die gleiche Aufgabe würde ein leistungsfähiger PC etwa 38 Jahre arbeiten müssen – wenn er denn genug Speicher hätte: Der Speicherbedarf der Simulation war so umfangreich, dass sie gerade noch in den ein Terabyte großen Hauptspeicher des verwendeten Großrechners passte.

Die von der Simulation produzierten Datenmengen sind aber noch um einiges

größer. Während der Entwicklungsrechnung wurde nämlich 64-mal ein »Schnappschuss« des jeweils gegenwärtigen Zustands des Universums ausgegeben und auf Festplatten gespeichert. Jeder solche Schnappschuss ist quasi ein detailreiches Photo des Modell-Universums. In diesem Fall enthalten die Photos aber wirklich sehr viel Information. Da die Simulation eine Auflösung von 10^5 Pixeln pro Raumdimension hat, entspricht das etwa 10^{15} Pixeln, der Informationsmenge von einer Milliarde 1-Megapixel-Photos. Insgesamt hat die Simulation 23 Terabyte an Daten gespeichert, genug um 35 000 CD-ROMs zu füllen, die gestapelt einen Turm von etwa hundert Metern Höhe ergeben würden.

Eine Menge Superlative für diese Simulation. Aber wozu braucht man alle diese Daten? Was lernen wir daraus? Dies lässt sich wohl am einfachsten anhand einiger Ergebnisse der Millennium-Simulation erläutern.

Kosmische Großraumstruktur

Die winzigen Schwankungen in der Materiedichte, mit der die Millennium-Simulation einige hunderttausend Jahre nach dem Urknall beginnt, verstärken sich mit der Zeit. Eine Region, in der anfänglich eine leicht überhöhte Dichte herrschte, zieht laufend weitere Materie an, sodass sich die Dichteschwankung nach und nach verstärkt. Zunächst läuft dieser Vorgang relativ langsam ab, gebremst von der raschen Ausdehnung des Universums. Aber letztlich behält die Gravitation die Oberhand: Sobald sich genügend Masse in einer Region angesammelt hat, wird die Schwerkraft dieser Materie so stark, dass sich der Materiekumpen von der weiteren Raumexpansion abkoppelt und unter der eigenen Schwerkraft kollabiert. Diese Phase nennt man auch »nichtlinearer Kollaps«.

Allerdings stürzt die Materie nicht in einem Punkt zusammen, sondern setzt die aus dem Gravitationsfeld gewonnene Energie in ungeordnete Bewegungsenergie um, die schließlich die Wolke aus dunkler Materie gegenüber der Schwerkraft stabilisiert. Es entsteht so ein dynamisches Gleichgewicht aus Bewegung und Gravitation, das zu einem stabilen »Halo« aus dunkler Materie führt. Das kosmische Gas aus Helium und Wasserstoff setzt die Gravitationsenergie ebenfalls in ungeordnete thermische Bewegung um, die als ein Gasdruck diese Materie im Halo gegen einen weiteren Kollaps unterstützt. Erst wenn der thermische Druck durch Energieabstrahlung verlorengeht, kann die Verdichtung des Gases im Zentrum der Halos weitergehen, sodass dort später Sterne entstehen

können. Die mehr oder weniger runden Materiekumpen der Halos sind die Bausteine der kosmischen Strukturen und beherbergen in ihren Zentren die leuchtenden Galaxien.

Dieser Vorgang der Strukturentstehung durch gravitative Instabilität lässt sich nur mit Computersimulationen genau berechnen. Die Serie von Bildern in Abb. 4 zeigt die zeitliche Entwicklung der Millennium-Simulation über 13 Milliarden Jahre, bis zur heutigen Epoche. Man sieht, wie der schwache Dichtekontrast der anfänglichen Fluktuationen mit der Zeit verstärkt wird, und wie schließlich durch nichtlineares Wachstum ein »kosmisches Netz« entsteht. Dieses filigrane Netzwerk besteht aus fadenartigen Materieverteilungen, die sich unregelmäßig durch den Raum ziehen. Entlang der Filamente finden sich Halos unterschiedlicher Größe, aufgereiht wie Perlen auf einer Kette. An den Kreuzungspunkten des Netzes liegen besonders große Halos, mit Massen bis zu einigen 10^{15} Sonnenmassen. Diese entsprechen den größten Galaxienhaufen im Universum, die weit über tausend Galaxien enthalten können. Das Netz umspannt große unterdurchschnittlich dichte Leerräume. Diese kosmischen »Voids« sind nicht gänzlich leer, enthalten aber nur noch sehr wenig Materie und Galaxien. Abb. 5 verdeutlicht diesen Reichtum an Struktur auf unterschiedlichen kosmischen Skalen mit einer Reihe schrittweiser Vergrößerungen, welche Distanzen von einigen Milliarden Lichtjahren im Hintergrund bis zu einigen Millionen Lichtjahren im Vordergrund umfassen.

Zu den grundlegenden quantitativen Informationen, die die Simulationen liefern, zählt zunächst einmal die Häufigkeit der Halos verschiedener Größe, und wie sich die Halopopulation im Laufe der Zeit entwickelt. Denn da die Entstehung von Galaxien in Halos abläuft, ist die Entwicklung der Galaxien sehr eng an das Schicksal der Halos gekoppelt. Betrachtet man die zeitliche Entwicklung der Halopopulation genauer, so stellt man fest, dass zunächst kleine Halos entstehen, die mit der Zeit durch Verschmelzen mit anderen Halos und durch Aufnahme weiteren Materials zu immer größeren Objekten heranwachsen. Die Entstehung kosmischer Strukturen im Λ CDM-Modell hat also einen hierarchischen Charakter, von klein zu groß, oder auch »bottom-up«.

Wenn nun im Zentrum eines jeden dieser Halos aus dunkler Materie eine Galaxie sitzt, dann bedeutet das auch, dass Verschmelzungen von Galaxien sehr häufig stattfinden sollten, und dass sich Sternpopulationen großer Gala-

xien aus der Kollision von einzelnen Galaxien ergeben sollten. In der Tat kennt man viele Galaxienpaare im lokalen Universum, die sich in einem Stadium der Wechselwirkung oder Verschmelzung befinden, was dieses hierarchische Modell unterstützt (Abb. 7). Allerdings gibt es auch Beobachtungen, die diesem Szenario scheinbar komplett zuwiderlaufen: So haben etwa die größten bekannten Galaxien – rote elliptische Galaxien – die ältesten Sternpopulationen. Nach dem hierarchischen Bild sollten aber doch die größten Objekte zuletzt entstehen – liegt hier nicht ein eklatanter Widerspruch vor?

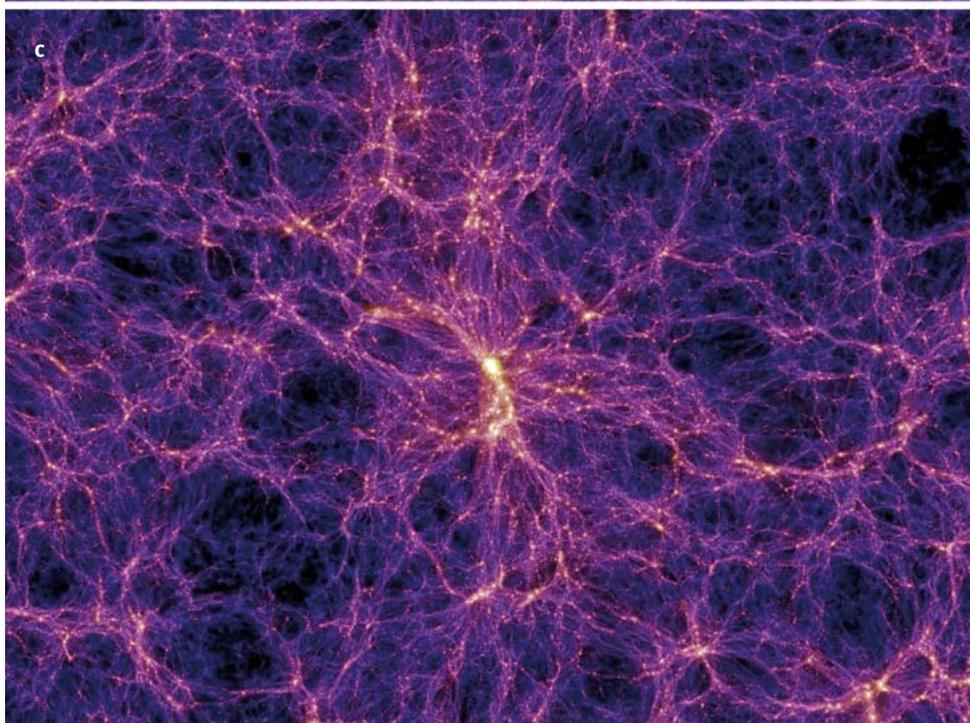
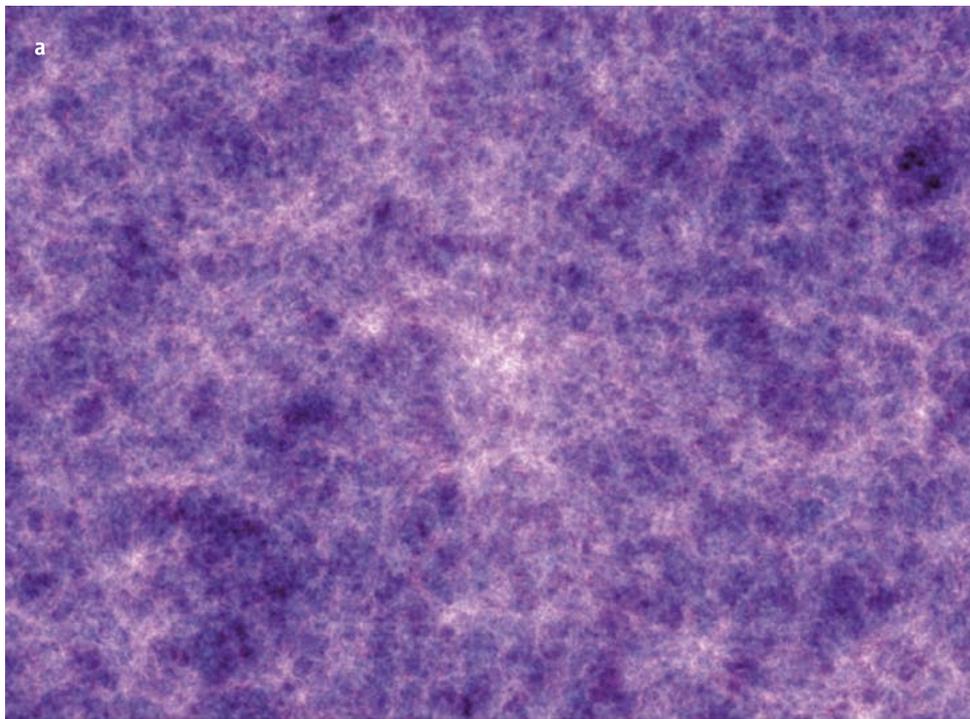
Eine Beantwortung dieser Frage erfordert, dass man genau untersucht, inwiefern sich das Wachstum der Halos aus dunkler Materie von dem Wachstum der eingebetteten Galaxien unterscheidet. Die Millennium-Simulation ist dafür ein ideales Werkzeug.

Die hierarchische Entwicklung einzelner Galaxien

Eines der wichtigsten Ziele der Millennium-Simulation ist die Aufklärung von Prozessen der Galaxienentstehung, indem man die theoretischen Modelle mit Beobachtungsdaten großer Himmeldurchmusterungen vergleicht. In den letzten Jahren haben die Beobachtungen dabei riesige Fortschritte in Qualität und Quantität gemacht. Große systematische Beobachtungsprogramme wie der Two-degree Field Galaxy Redshift Survey (2dFGRS) oder der Sloan Digital Sky Survey (SDSS) haben die Distanzen zu hunderttausenden von Galaxien in bestimmten Himmelsbereichen gemessen und dazu Eigenschaften wie Helligkeit, Größe, spektrale Farbe, Inhalt an schweren Elementen etc. bestimmt. Zusammen ergibt das eine Art Volkszählung von Galaxien, die ausgesprochen reichhaltige statistische Informationen enthält.

So kann man nun zum Beispiel genau messen, wie sich bestimmte Arten von Galaxien im Raum verteilen, oder wie die Häufigkeitsverteilung bestimmter Helligkeiten von Galaxien aussieht. Um diese Daten interpretieren zu können, benötigt man theoretische Modelle, die ein ähnlich großes Raumgebiet abdecken wie die Beobachtungen, und die die gemessenen Größen mit vergleichbarer statistischer Präzision voraussagen können. Die Millennium-Simulation ist die erste kosmologische Simulation, die diese beiden Ziele erfüllen kann.

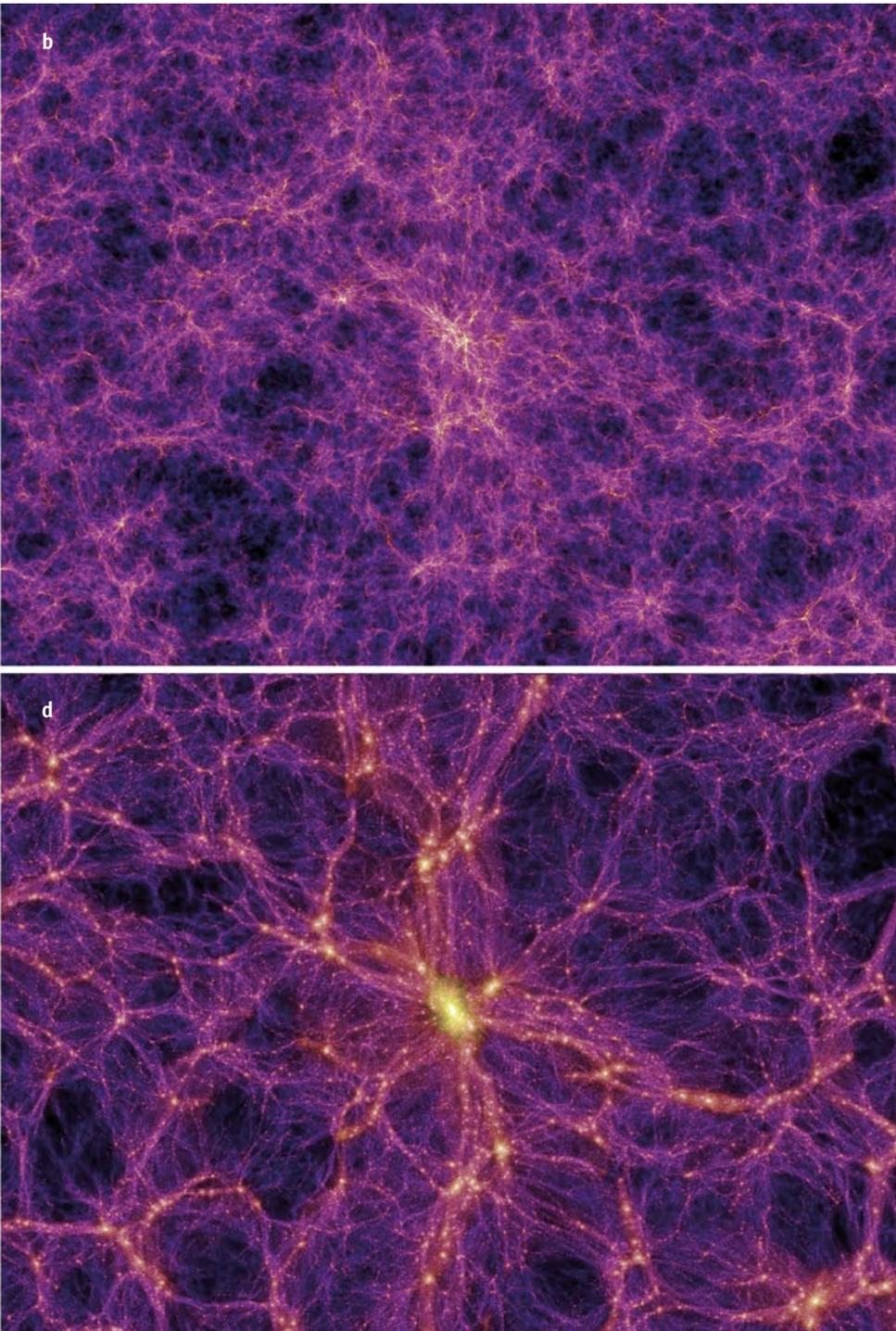
Um theoretische Voraussagen über die Galaxien machen zu können, braucht man allerdings ein physikalisches Modell für die Entstehung und Entwicklung



der Sternpopulationen, zusätzlich zu dem von der Millennium-Simulation gelieferten Gerüst der Verteilung der dunklen Materie. Um dieses Modell zu gewinnen, bestimmt man aus der Simulation zunächst die hierarchischen Verschmelzungsbäume der Halos aus dunkler Materie. Das bedeutet einfach, dass man zu jedem Ausgabezeitpunkt alle Halos findet und diese dann zeitlich verfolgt und bestimmt, welche Halos jeweils mit anderen verschmelzen. Da sich der Aufbau der kosmischen Strukturen hierarchisch vollzieht, erhält man eine Baumstruktur: Ausgehend von einem Halo zur heutigen Zeit ergibt sich eine Art Stammbaum in die Vergangenheit, der von allen Vorläu-

ferobjekten in früheren Zeiten bevölkert ist. Geht man umgekehrt vorwärts in der Zeit, dann beschreibt der Verschmelzungsbaum, wie einzelne Halos langsam wachsen, immer wieder mit anderen Halos verschmelzen und sich schließlich zur heutigen Zeit in einem bestimmten Objekt vereinen.

Insgesamt sind etwa 20 Millionen solcher Halo-Stammbäume in der Millennium-Simulation enthalten. Direkt beschreiben diese aber zunächst nur das Verhalten der dunklen Materie. Um die Eigenschaften der leuchtenden Galaxien zu erhalten, wendet man eine sogenannte semi-analytische Methode an, bei der man die komplizierten Prozesse



◀ Abb. 4: Die zeitliche Entwicklung der kosmischen Strukturen in der Millennium-Simulation. Die Bilder zeigen einen kleinen, etwa 800 Millionen Lichtjahre breiten Ausschnitt der Simulation im Alter von a) 15 Millionen Jahren, b) einer Milliarde Jahren, c) 4.7 Milliarden Jahren, d) 13.6 Milliarden Jahren (heute).

lierten Galaxien so, wie sie ein Teleskop auf der Erde detektieren würde. Auf diese Weise erstellt man virtuelle Beobachtungen des künstlichen Universums der Millennium-Simulation, die sich direkt mit der Wirklichkeit des 2dFGRS oder des Sloan Surveys vergleichen lassen.

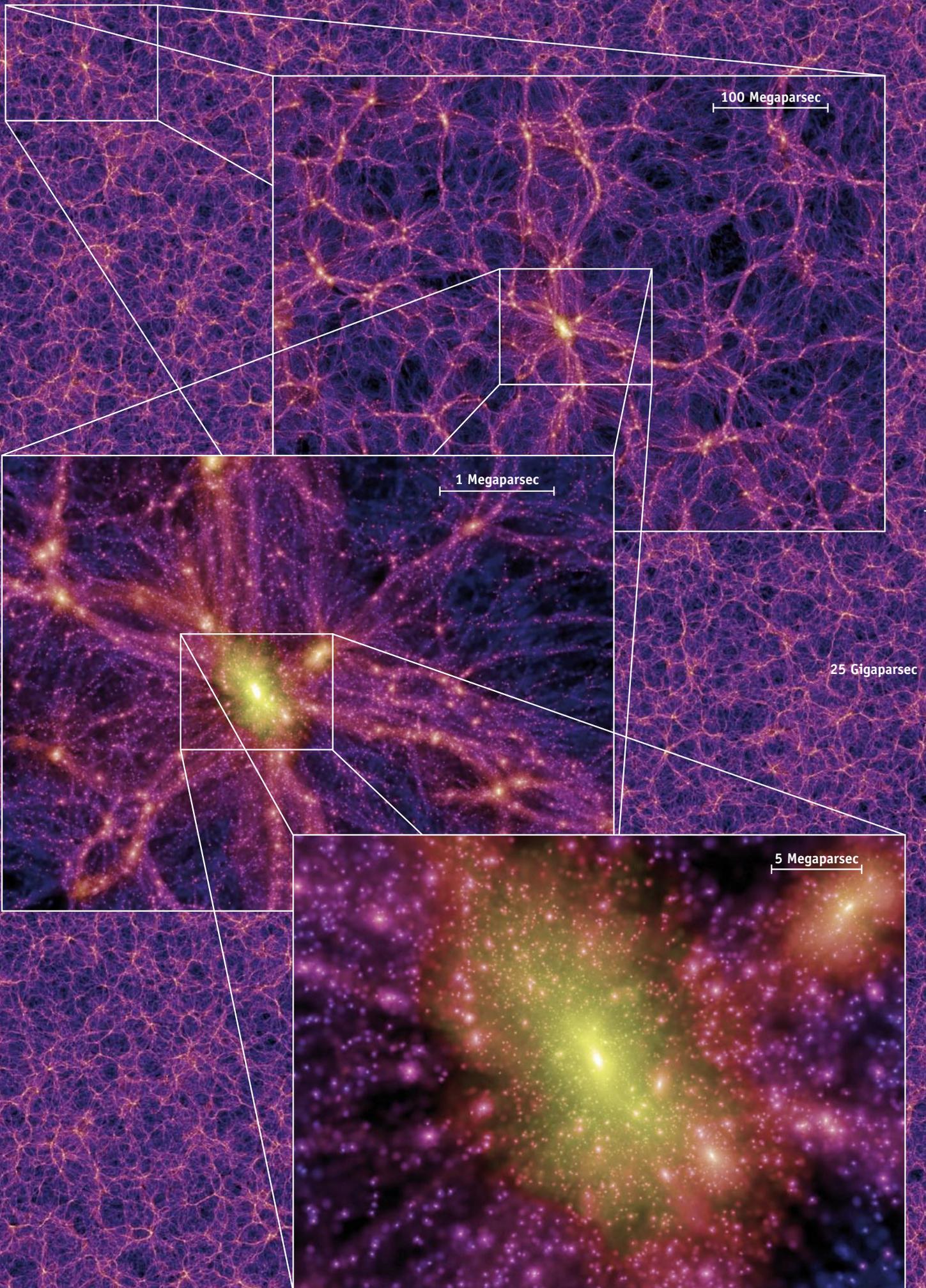
Ein faszinierendes Ergebnis dieser Vergleiche ist, dass das so gewonnene Modell überraschend gut mit der wirklichen Galaxienverteilung übereinstimmt. So wird etwa die Helligkeitsverteilung der Galaxien in verschiedenen spektralen Bändern sehr genau erklärt. Auch das wichtige Galaxien-Clustering, also die Tendenz von Galaxien, sich zusammenzuballen, wird sehr genau vorausgesagt, einschließlich feiner Effekte wie der Zusammenhang des Clusterings mit Farbe und Helligkeit der betrachteten Galaxien.

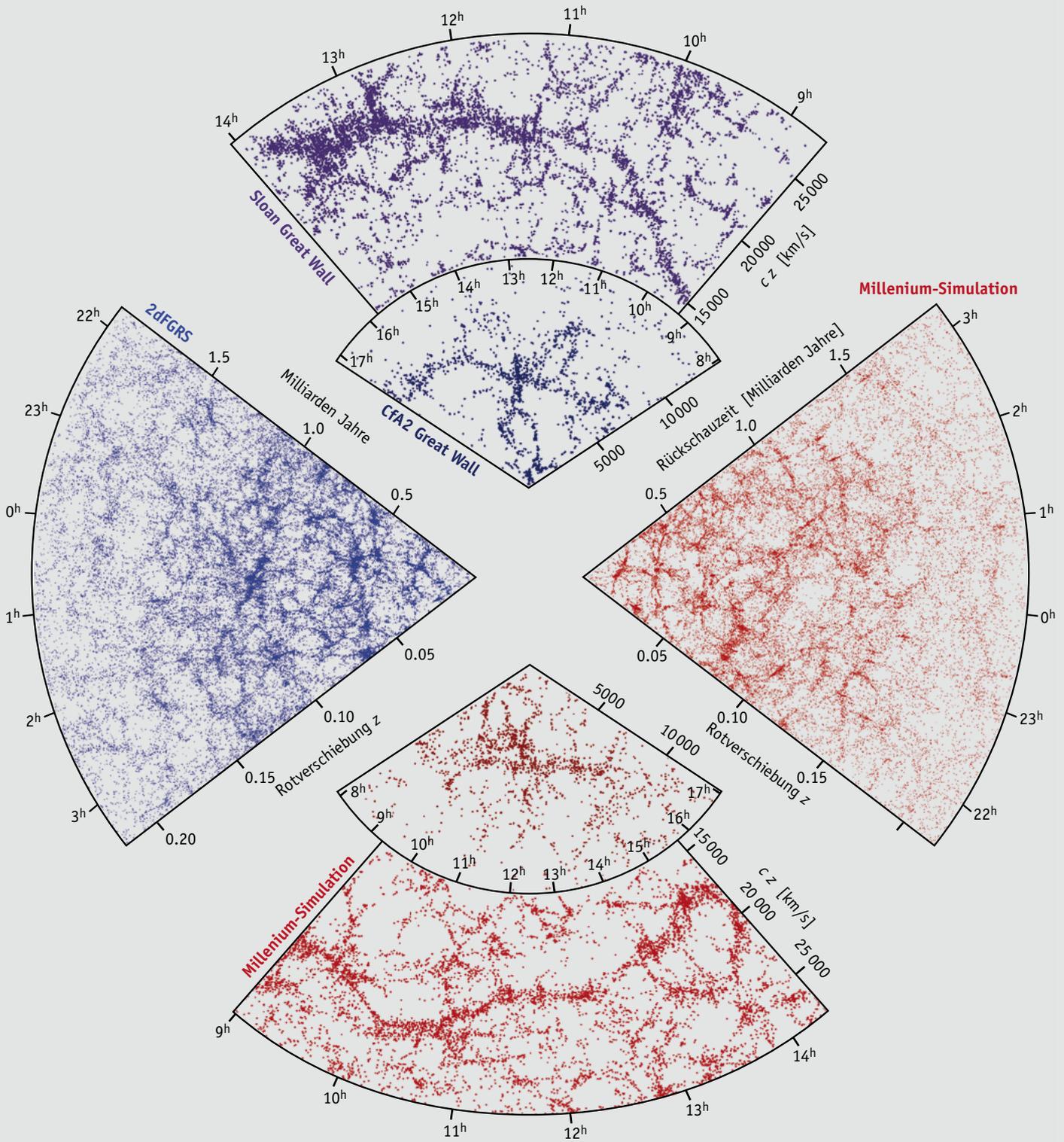
In Abb. 6 wird die Großraumstruktur in der Galaxienverteilung in verschiedenen Beobachtungen mit der Millennium-Simulation verglichen. In den Karten liegt die Erde jeweils am Ursprung, und jeder einzelne Punkt ist eine Galaxie. Objekte am äußeren Rand der Karten liegen bei einer Rotverschiebung von $z \approx 0.25$, was einem Blick zurück in die jüngere Vergangenheit des Universums vor rund zwei Milliarden Jahren entspricht. Die blauen Diagramme zeigen dabei Ergebnisse der 2dFGRS, Sloan und CfA2 Surveys, denen in Rot die Galaxien der Millennium-Simulation gegenübergestellt sind.

Man erkennt, dass auch die Galaxien ein kosmisches Netz bilden, das mit zunehmendem Abstand immer stärker ausdünn, da man dann nur noch die leuchtkräftigsten Galaxien beobachten kann. In den Sloan- und CfA2-Katalogen sind besonders prominente Großraumstrukturen zu erkennen, die Great Wall und die Sloan Great Wall. Mit einer Länge von mehr als 1.3 Milliarden Lichtjahren und einem Gehalt von mehr als 10000 Galaxien ist letztere »Mauer« die größte bisher bekannte Struktur im Universum. Früher wurde immer wieder bezweifelt, ob das Λ CDM-Modell ähnlich große Strukturen hervorbringen könnte, aber wie der Vergleich mit der Millennium-Simulation zeigt, ist das durchaus möglich.

der Sternentstehung und ihrer Regulierung durch Supernovaexplosionen und Quasare mit einfachen Annahmen und Gleichungen beschreibt. Einige dieser Gleichungen haben dabei phänomenologischen Charakter, das heißt, sie sind anhand von Beobachtungsdaten kalibriert, sind aber selbst keine grundlegenden physikalischen Gesetze. Das liegt einfach daran, dass viele Aspekte der Physik der Sternentstehung im Detail noch unverstanden sind, allerdings kann man grundlegende Skalierungseigenschaften, wie etwa die Abhängigkeit der mittleren Sternentstehungsrate von der Gasdichte, ganz gut mit empirischen Gleichungen beschreiben.

Löst man nun diese Entwicklungsgleichungen der Physik der Sternentstehung entlang der Verschmelzungsbäume vorwärts in der Zeit, so erhält man die leuchtenden Sternpopulationen, die als Galaxien die dunklen Halos bevölkern. Um das Verfahren noch realistischer zu machen, setzt man zusätzlich Modelle zur Synthese von Galaxienspektren ein. Diese erzeugen aus der vorausgesagten Altersverteilung der Sterne und ihrer gesamten Masse die spektrale Helligkeitsverteilung der Galaxie als Funktion der Wellenlänge des Lichts. Bezieht man dann auch noch die Empfindlichkeit eines Teleskops und Effekte wie Staubabsorption ein, dann sieht man die simu-





◀ Abb. 5: Ein schrittweiser Zoom in die kosmische Großraumstruktur der Millennium-Simulation. Jedes der einzelnen Bilder vergrößert den markierten Bildausschnitt um einen Faktor 4, bis schließlich einer der vielen großen Galaxienhaufen in der Simulation mit den eingebetteten Galaxien zu sehen ist. Die Farbe der Bilder zeigt dabei die lokale »Temperatur« der Teilchen der dunklen Materie an. Die Skalen beziehen sich auf eine Hubble-Konstante mit dem Wert $H_0 = 73 \text{ km s}^{-1}/\text{Mpc}$.

▶ Abb. 6: Karten der realen Galaxienverteilung aus verschiedenen großen Durchmusterungsprogrammen, verglichen mit der Millennium-Simulation. Die in Blau dargestellten Kataloge der 2dFGRS-, Sloan- und CFA2-Surveys zeigen die Großraumstruktur des Universums in unserer kosmischen Nachbarschaft. Besonders auffällig sind die beiden »Great Walls« im CFA2- und Sloan-Survey. Die in Rot dargestellten künstlichen Beobachtungen der Millennium-Simulation zeigen eine ähnliche Verteilung der Galaxien und bringen Strukturen vergleichbarer Größe hervor.



Diese Erfolge stellen eine wichtige Unterstützung für das Λ CDM-Modell und die Theorie der hierarchischen Galaxienentstehung dar. Die gefundene Übereinstimmung ist dabei umso erstaunlicher, wenn man bedenkt, dass dieses Modell entscheidend auf der Annahme der rätselhaften Komponenten der dunklen Materie und der dunklen Energie beruht.

Die Rolle massereicher Schwarzer Löcher

Eine wichtige Neuerung in dem semi-analytischen Modell der Millennium-Simulation war die Einbeziehung von massereichen Schwarzen Löchern in den Zentren von Galaxien. Man glaubt, dass solche Schwarzen Löcher die Kraftwerke sind, die die erstaunlichen Energiemengen liefern, die entfernte Quasare ausstrahlen.

Diese extrem hellen Punktquellen überstrahlen manchmal komplette Galaxien und sind bis zum Rand des sichtbaren Universums beobachtbar. Die enorme Helligkeit der Quasare speist sich dabei vermutlich aus der Akkretion von Gas auf extrem massereiche Schwarze Löcher. Verschlingen diese Gebilde Materie, so heizt sich das Gas zunächst durch Reibung in den sich bildenden Akkretions-scheiben sehr stark auf, sodass Röntgen- und harte Gammastrahlung emittiert wird. Bevor das Material in das Schwarze Loch stürzt, sendet es quasi einen Todes-schrei aus, in der Form dieser sehr energiereichen Strahlung, die typischerweise etwa zehn Prozent der gesamten verschluckten Ruhemasseenergie ausmacht.

Im heutigen Universum finden sich die massereichsten Schwarzen Löcher vorwiegend in den Zentren der großen Halos, die auch die größten Elliptischen Galaxien beheimaten. Hier strahlen sie zwar nicht mehr als Quasare, aber sie verhindern doch durch gelegentliche Aktivität, bei der sie relativistische »Jets« erzeugen, dass Gas aus der Atmosphäre der Halos

auskühlen kann. Auf diese Weise bewirken sie, dass kein frisches Material zur Bildung neuer junger Sterne in die Galaxien gelangen kann, sodass ihre Sternpopulationen immer stärker altern.

Interessanterweise sorgen die Schwarzen Löcher auf diese Weise dafür, dass sich ein altes Problem der Theorie der hierarchischen Galaxienentstehung auflöst. Zwar ist es so, dass die größten Halos aus dunkler Materie erst spät zusammengefügt werden, aber die enthaltenen Sterne können bereits viel älter sein. Da besonders in den massereichsten Elliptischen Galaxien die späte Entstehung junger Sterne durch extrem massereiche Schwarze Löcher verhindert wird, ergibt sich so das etwas überraschende Ergebnis, dass sich die Sternpopulationen der Galaxien »anti-hierarchisch« aufbauen: Die Sterne der größten Galaxien sind die ältesten und entstehen im Mittel früher als die der kleinen Galaxien, obwohl der Zusammenbau zu einem einzelnen Objekt für die großen Galaxien später erfolgt. Allerdings funktioniert das nur, wenn die Aktivität von Schwarzen Löchern berücksichtigt wird. Ohne sie ergäbe sich ein Konflikt zwischen der Theorie und den Beobachtungsdaten.

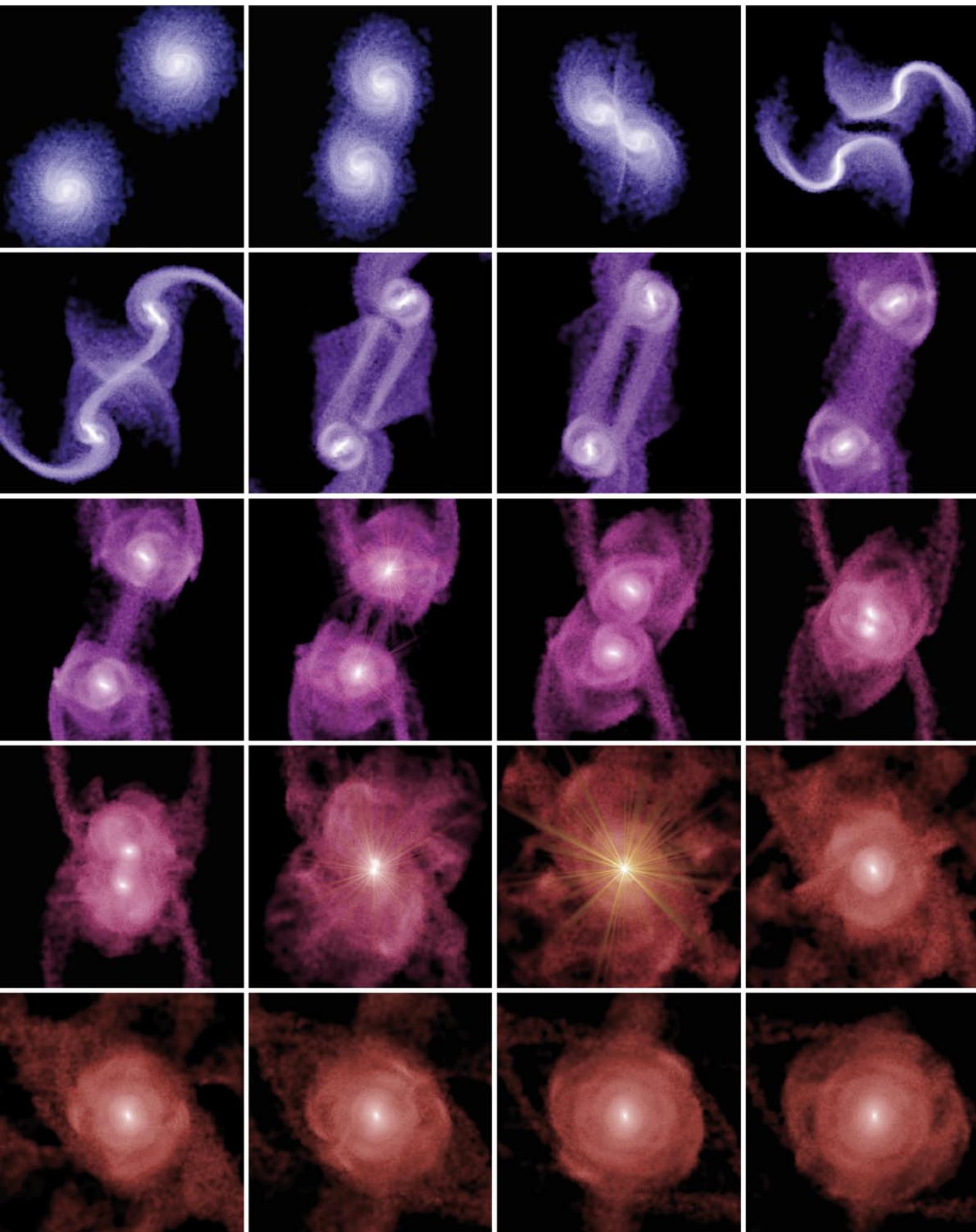
Schlafende Monster in den Galaxienzentren

Schwarze Löcher sind also mehr als nur interessante Begleitphänomene der Galaxien – sie beeinflussen und bestimmen deren Eigenschaften in entscheidender Weise. Man glaubt heute, dass die meisten Galaxien, vielleicht sogar alle, ein massereiches Schwarzes Loch in ihrem Zentrum beherbergen. Die Massen betragen dabei einige Millionen bis zu einigen Milliarden Sonnenmassen.

Die wichtige Rolle der Schwarzen Löcher spiegelt sich auch recht direkt in den Beobachtungsdaten, die eine enge Beziehung zwischen der Masse der zentralen

▲ Abb. 7: Wechselwirkungen von Galaxien sind im lokalen Universum häufig. Die beiden Spiralgalaxien im System NGC 4676 sind bereits ein erstes Mal kollidiert und haben durch ihre gegenseitigen Gezeitenkräfte lange Arme aus Sternen und Gas aus den Scheiben gerissen. In einigen hundert Millionen Jahren werden die beiden Sternsysteme erneut zusammenstoßen und dann zu einer Elliptischen Galaxie verschmelzen. (Bild: NASA, H. Ford, G. Illingworth, M. Clampin, G. Hartig, das ACS Science Team und ESA)

▶ Abb. 8: Die Verteilung der Sterne in einer simulierten Verschmelzung zweier Spiralgalaxien. In einer ersten Begegnung zerstören starke Gezeitenkräfte die Sternscheiben und treiben große Mengen Gas ins Zentrum der Galaxien. Dort kommt es in der Folge zu einem Ausbruch intensiver Sternentstehung und zu einem raschen Wachstum der eingebetteten massereichen Schwarzen Löcher. Sobald diese groß genug geworden sind, blasen sie das verbleibende Gas aus dem Zentrum und werden dabei für kurze Zeit als Quasare sichtbar. Schließlich verschmelzen die Galaxien zu einer neu entstandenen Elliptischen Galaxie, die aufgrund ihrer sehr geringen Sternentstehungsrate schnell eine rote Spektralfarbe entwickelt.



Literaturhinweise

Matthias Bartelmann: Der kosmische Mikrowellenhintergrund. SuW 5/2000, S. 330–337

Gerhard Börner: Kosmologie. Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt am Main 2002

SuW-Special 1/2003: Das junge Universum. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg

SuW-Dossier 1/2006: Die Struktur des Kosmos. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg

Schwarzen Löcher und der Geschwindigkeitsdispersion der Sterne der umgebenden Wirtsgalaxie zeigen. Am einfachsten ließe sich dies erklären, wenn beide mehr oder weniger gleichzeitig entstehen und ein Prozess der gegenseitigen Beeinflussung das weitere Wachstum begrenzt.

Dies könnte zum Beispiel bei der Verschmelzung zweier Spiralgalaxien auftreten (Abb. 7). In solchen Galaxienkollisionen werden die Scheiben durch gravitative Gezeitenkräfte zerstört und eine große Menge Gas ins Zentrum der Galaxien getrieben. Durch den starken Anstieg der Gasdichte kommt es dort zu einem Ausbruch der Sternentstehung, einem »Starburst«. Gleichzeitig lauert aber im Zentrum ein massereiches Schwarzes Loch, das mit dem einströmenden Gas reichlich gefüttert wird. Die einsetzende intensive Akkretion führt nun zu einem raschen Wachstum der Masse des Schwarzen Lochs, wodurch es mit der Zeit immer mehr Strahlungsenergie freisetzt.

Das vorher schlafende Monster wird durch das Ereignis der Galaxienkollision also quasi zum Leben erweckt und beginnt, als Quasar zu leuchten. Allerdings kann dieser Prozess nicht sehr lange andauern. Nach einigen zehn Millionen Jahren ist das Schwarze Loch so groß geworden und spuckt so viel Energie aus, dass das lokale Heizen des Gases im Zentrum zu groß wird. Wie bei einem Schnellkochtopf unter Überdruck fliegt der Deckel weg und das Gas wird aus dem Galaxienzentrum herausgeschleudert. Schlagartig brechen die Sternentstehung und das weitere Wachstum des Schwarzen Lochs ab. Zurück bleibt eine Elliptische Galaxie, die nun kaum noch Gas enthält und deren Sterne anfangen, schnell zu altern. Das Schwarze Loch wächst dabei genau bis zu einer Größe, bei der seine Energieausschüttung ausreicht, das Gas aus dem dunklen Halo der Galaxie zu treiben.

So erklärt sich in diesem Szenario auf natürliche Weise der beobachtete Zusammenhang zwischen der Größe der Schwarzen Löcher und der Geschwindigkeitsdispersion der Sterne, denn letztere ist in erster Linie ein Maß für die Stärke der gravitativen Bindung in dem Halo aus dunkler Materie.

In hydrodynamischen Computersimulationen von Galaxienkollisionen, wie in der Simulation in Abb. 8 gezeigt, lassen sich diese Prozesse recht detailliert nachvollziehen. Solche Modelle ermöglichen dann auch Voraussagen für den zeitlichen Verlauf der Quasar-Aktivität und wie das absorbierende Gas um den Quasar herum seine Lichtkurve beeinflusst. Die gegenwärtigen Ergebnisse der Simulationen scheinen dabei größere Änderungen unserer bisherigen Vorstellungen über die Absorption in der Umgebung von Quasaren notwendig zu machen.

Das bisher vorherrschende Modell ist in erster Linie geometrisch geprägt. Es basiert auf der Vorstellung, dass ein absorbierender Torus aus Staub viel des Quasarlichts verschluckt, je nachdem ob die Sichtlinie entlang der Achse des Torus verläuft, was wenig Absorption bewirkt, oder durch ihn hindurch, was eine erhebliche Dämpfung zur Folge hat. Dieses Modell sieht den Ursprung der zwei beobachteten Grundtypen von Quasaren dann einfach in der geometrischen Orientierung des Staubtorus relativ zu unserer Sichtlinie. Die neuen Simulationen favorisieren dagegen eine alternative Erklärung, in der die Absorption ein sich zeitlich schnell änderndes Phänomen ist, da sich die Gasschichtung um das Zentrum herum dynamisch verändert. Ein und derselbe Quasar kann dann zeitlich hintereinander entweder stark absorbiert oder wenig absorbiert gesehen werden, entsprechend den beobachteten Grundtypen, ganz ohne die Existenz eines Torus. Welches Modell letztlich stimmt, ist ein spannendes Thema der aktuellen Forschung.

Die Zukunft der Simulationen und des Universums

Computersimulationen sind ein faszinierendes Werkzeug kosmologischer Forschung. Sie tragen bereits heute entscheidend zur Grundlagenforschung in der Astrophysik bei und haben sich zu einem dritten Standbein neben den traditionellen Gebieten der Beobachtung und der Theorie entwickelt. Insbesondere wäre das Λ CDM-Modell ohne Simulationen wohl kaum zum gegenwärtigen Standardmodell der Kosmologie avanciert.

Die immer noch rasend schnelle Entwicklung der Informationstechnologie eröffnet einen viel versprechenden Ausblick auf die Zukunft. Die Leistungsfähigkeit von Computern und die Größe kosmologischer Simulationen verdoppeln sich etwa alle 18 Monate, ein Trend, der schon seit etwa 30 Jahren anhält. Wird dies nochmal dreißig Jahre so weitergehen, dann könnte eine Millennium-Simulation des Jahres 2035 nicht nur, wie heute, alle leuchtenden Galaxien als kleine Ansammlungen einer Handvoll Teilchen darstellen, sondern jeden einzelnen der Milliarden von Sternen in jeder dieser Galaxien!

Trüben lassen sollte man sich die Vorfremde auf die numerische Astrophysik der Zukunft auch nicht durch einen anderen, etwas ernüchternden Ausblick auf die Zukunft des Universums selbst. Die Existenz der dunklen Energie hat nämlich drastische Konsequenzen. Zwar wird dadurch das Universum sicher ewig weiter existieren, aber durch die Beschleunigung der Expansionsgeschwindigkeit wird es auch immer dünner, und der Abstand zwischen den Galaxien nimmt laufend zu. Entfernte Bereiche werden sich schließlich so schnell von uns weg bewegen, dass wir den kausalen Kontakt mit ihnen verlieren – das heißt, wir können auch keine Lichtsignale mehr von ihnen empfangen. In letzter Konsequenz bedeutet das, dass alle entfernten Galaxien vom Nachthimmel verschwinden werden, unerreikbaar für die beobachtende Astronomie der fernen Zukunft. Galaxienentstehung selbst hört dann ebenfalls auf, man sagt, die Großraumstrukturen »frieren aus«.

Es ist tröstlich, dass dieses ferne Schicksal erst in vielen Milliarden Jahren bevorsteht. Und ob es so kommt, ist auch noch keineswegs sicher, denn mit einigem Recht kann man die dunkle Energie als eines der größten Rätsel der modernen Physik bezeichnen. Und ob wir schon jetzt ihre Entwicklung richtig voraussagen, ist mehr als ungewiss. □



Volker Springel erforscht mit seiner Nachwuchsgruppe am MPI für Astrophysik in Garching die Entstehung der großräumigen kosmischen Strukturen

und der Galaxien. Sein besonderes Interesse gilt der Simulation der physikalischen Prozesse, die bei der Galaxienentstehung ablaufen.