Superrechner in der Kosmologie

Volker Springel

In den vergangenen zwei Jahrzehnten hat die Kosmologie enorme Fortschritte erreicht, die uns der Aufklärung einer der faszinierendsten wissenschaftlichen Fragen überhaupt, der nach dem Ursprung unserer Welt, ein ganzes Stück näher gebracht haben. Es gibt nun ein klar definiertes und durch Beobachtungen recht genau bestimmtes Standardmodell für das hierarchische Wachstum kosmischer Strukturen. Dieses Modell hält aber einige große Überraschungen bereit. Die erste ist, dass die meiste stoffliche Materie im All aus einem bisher unbekannten Elementarteilchen besteht, der sogenannten *Dunklen Materie*. Tatsächlich sind die Astrophysiker davon überzeugt, dass es von diesem Stoff etwa sechsmal so viel gibt wie von der normalen Materie, die wir auf der Erde kennen.

Die zweite große Überraschung ist, dass das Universum offenbar von einem mysteriösen Kraftfeld durchdrungen ist, der *Dunklen Energie*. Albert Einstein hatte diese ursprünglich als „kosmologische Konstante" in seine allgemeine Relativitätstheorie eingeführt. Für lange Zeit sah es aber so aus, als ob diese Konstante nur eine mathematische Möglichkeit ist, ohne physikalisch realisiert zu sein. Aber vor etwas mehr als zehn Jahren hat man durch die Beobachtung entfernter Supernovaexplosionen überraschenderweise entdeckt, dass das Universum vor einiger Zeit begonnen hat, seine Ausdehnungsgeschwindigkeit plötzlich wieder zu erhöhen – zuvor hatte sich diese Ausdehnung aufgrund der bremsenden Wirkung der Schwerkraft beständig verlangsamt. In diesen Beobachtungen hat man ausgenutzt, dass bestimmte Typen von Supernovae immer gleich hell sind. Man kann dann die beobachtete relative Helligkeit solcher „Standardkerzen" mit ihrer durch die Raumausdehnung bewirkten spektralen Verschiebung verknüpfen und die Rate der Raumausdehnung in der Vergangenheit rekonstruieren. Als einzige Erklärung für die beobachtete beschleunigte Ausdehnung kommt nur die Dunkle Energie in Betracht. Heute ist es sogar so, dass die Dunkle Energie für etwa 75% des Energieinhalts des Universums verantwortlich ist, während die gewöhnliche und die Dunkle Materie zusammen nur etwa 25% ausmachen. Der Anteil der gewöhnlichen Materie beträgt also nur etwa 4%. Zu früheren Zeiten war der Beitrag der Materie aber viel höher und dominierte das Energiebudget, denn anders als die Dichte der Dunklen Energie (welche konstant bleibt) sinkt die Materiedichte mit der Raumausdehnung immer weiter ab.

Ein weiterer entscheidender Baustein im modernen Puzzle der Kosmologie liegt in einem besseren Verständnis des Urknalls selbst, insbesondere der Bedingungen, die er für die weitere Entwicklung des Universums hinterlassen hat. Hier haben besonders die Beobachtungen der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung zu entscheidenden Durchbrüchen geführt. Diese Mikrowellenstrahlung ist die Restwärme des Urknalls – sie füllt immer noch das ganze Universum, ist aber heute auf nur noch 2,73 °C über dem absoluten Nullpunkt abgekühlt. Interessanterweise ist diese Temperatur aber nicht exakt konstant. Je nach Himmelsrichtung gibt

DOI 10.1007/s00287-009-0385-y

Volker Springel
Max-Planck-Institut für Astrophysik,
Karl-Schwarzschild-Str. 1, 85740 Garching bei München
E-Mail: volker@mpa-garching.mpg.de

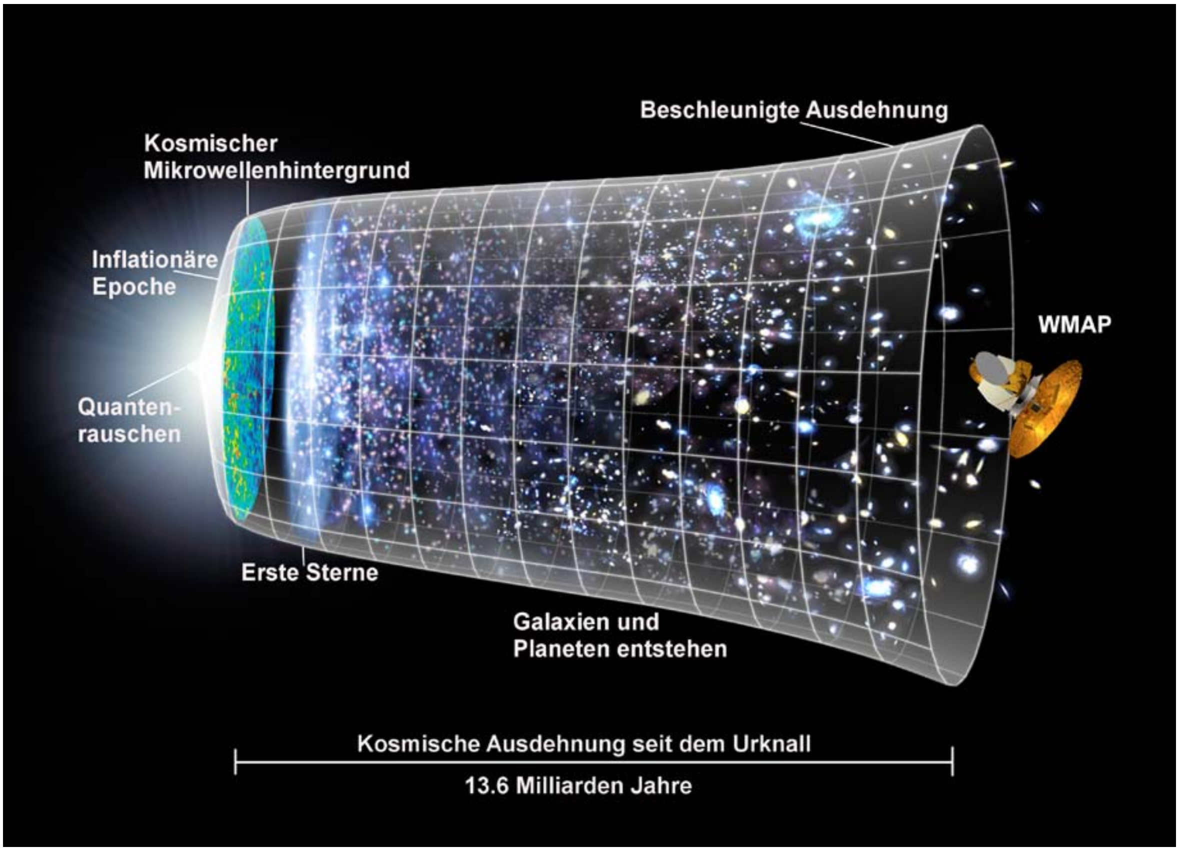

***Abb. 1** Zeitentwicklung des Universums. Diese Skizze (Credit: NASA/WMAP) veranschaulicht die Entwicklung des Universums über 13,6 Mrd. Jahre. Ganz links ist die „Inflationäre Epoche" dargestellt, in der das Universum für eine kurze Zeit exponentiell angewachsen ist. Danach dehnt sich das Universum für mehrere Milliarden Jahre immer langsamer aus, da es von der Schwerkraft abgebremst wird. Schließlich macht sich die Wirkung der Dunklen Energie bemerkbar, und vor etwa 5 Mrd. Jahren begann das Universum, sich beschleunigt auszudehnen. Die Wärmestrahlung des heißen Urknalls wurde etwa 380.000 Jahre nach dem Urknall ausgesandt und kann heute als kosmischer Mikrowellenhintergrund von Satelliten wie WMAP empfangen werden. Die winzigen Schwankungen in diesem Hintergrund wachsen später zu Galaxien unterschiedlicher Größe heran.*

es winzige Schwankungen von etwa einem zehntausendstel der mittleren Temperatur. Die Strahlung selbst wurde zu einem Zeitpunkt von etwa 380.000 Jahren nach dem Urknall emittiert, als das Universum bereits kalt genug war, um neutrale Atome zu bilden und durchsichtig zu werden. Man kennt das Alter dieser Epoche wie auch das gesamte Alter des Universums mittlerweile bis auf wenige Prozent genau, da diese kosmologischen Kenndaten dem Schwankungsmuster der Mikrowellenhintergrundstrahlung gewissermaßen aufgeprägt sind. Darüber hinaus reflektieren die Temperaturschwankungen die Bedingungen zu einem sehr frühen Zeitpunkt des Universums – sie geben uns damit direkte Informationen über die *Anfangsbedingungen* der kosmischen Strukturentstehung. Die physikalische Interpretation der entsprechenden Beobachtungen ist, dass zu diesem Zeitpunkt die Materie fast vollständig gleichförmig verteilt war, abgesehen von winzigen Fluktuationen in der Dichte. Das Universum war wie ein spiegelglatter See, mit kleinen Kräuselungen an der Oberfläche. Diese Störungen gehen letztlich auf Quantenfluktuationen im Urknall zurück, die durch eine anfängliche, sogenannte inflationäre Epoche bis auf makroskopische Skalen aufgeblasen wurden (siehe Skizze in Abb. 1).

Interessant ist nun die Frage, wie sich das Universum danach weiterentwickelt. Wenn man die Anfangsbedingen nach dem Urknall kennt, dann sollte sich durch Anwendung der physikalischen Gesetze die weitere Entwicklung vorausberechnen lassen. Die spannende Frage lautet dann: Kommt bei einer solchen Rechnung, über einen Zeitraum von 13,6 Mrd. Jahren (d. h. vom Urknall bis heute), ein Universum heraus, das so aussieht wie das All um uns herum? Eine Übereinstimmung würde die kosmologischen Theorien und die Ideen der Astrophysiker über Dunkle Materie und Dunkle Energie überzeugend bestätigen. Umgekehrt würden ernste Diskrepanzen die Theorie widerlegen.

Das macht unmittelbar klar, warum Entwicklungsrechnungen des Universums eine große wissenschaftliche Bedeutung haben. Allerdings gibt es hierbei ein Problem – mit Papier und Bleistift ist eine solche Rechnung nicht zu machen. Denn physikalisch wird die Entwicklung der Materie von Systemen partieller Differenzialgleichungen beschrieben, die zu allem Überfluss auch noch an die Poisson-Gleichung zur Beschreibung der Gravitation gekoppelt sind. Lösungen dieser Gleichungen für komplexe Geometrien können nur auf numerischem Wege gewonnen werden. An dieser Stelle muss die Astrophysik nun auf Superrechner und Methoden der Informatik zurückgreifen, um Simulationen des Universums durchführen zu können.

Man beginnt dabei zunächst mit der Konstruktion eines diskretisierten Modelluniversums. Die Masse der unbekannten Elementarteilchen (dabei handelt es sich vermutlich um *Neutralinos* oder *Axionen*, deren einzige verbleibende Wechselwirkung die Gravitation ist) wird durch Pseudoteilchen repräsentiert. Diese Teilchen sind lediglich mathematische Hilfskonstrukte, insbesondere ist ihre Masse viel größer als die der Elementarteilchen selbst. Physikalisch macht das am Ende aber glücklicherweise keinen wesentlichen Unterschied, selbst wenn die Masse der Simulationsteilchen viele Millionen oder gar Milliarden Sonnenmassen beträgt. Denn es kommt nur darauf an, eine hinreichend genaue Diskretisierung der stoßfreien Boltzmann-Gleichung, welche die Dynamik der Dunklen Materie beschreibt, zu erhalten. Sobald man genügend viele Teilchen benutzt, bewegen sich die Teilchen näherungsweise *stoßfrei* in dem kollektiven Gravitationsfeld der anderen Teilchen, unabhängig von dem Wert ihrer Masse. Das erlaubt es, die Dynamik der Elementarteilchen zu berechnen, ohne dass man deren Natur genau kennen muss. Allerdings kann man natürlich keine kleineren Strukturen als ein einzelnes Pseudoteilchen in der Simulation darstellen. Die Beschreibung bleibt also approximativ, wird aber umso besser, je mehr Teilchen man benutzt.

Ein weiteres Problem ist die prinzipiell unendliche Größe des Universums. Zwar können wir wegen der Lichtlaufzeit nur einen endlichen Ausschnitt beobachten, aber am Rand unseres Horizonts hört das Universum nicht einfach auf. Wir können diesen Bereich in der Rechnung auch nicht weglassen, sonst würde die Wirkung der Gravitation und die Ausdehnungsrate des Raumes verfälscht. Die übliche Lösung dafür sind sogenannte periodische Randbedingungen: Man sperrt das Modelluniversum in einen Würfel, der in jeder Raumrichtung beliebig oft repliziert wird. Mit diesem mathematischen Trick kann man einen unendlichen Raum befüllen, braucht aber nur den einen fundamentalen Würfel wirklich zu berechnen. Diese Methode funktioniert, da das Universum auf sehr großen Skalen homogen und isotrop ist, das heißt, es gibt keine Strukturen jenseits einer bestimmten Größe von etwa 500 Mio. Lichtjahren. Vorausgesetzt, der fundamentale Würfel ist deutlich größer als diese Homogenitätsskala, liefert er ein treues und repräsentatives Bild des wirklichen Universums.

In der Rechnung selbst will man nun die Bahnbewegungen von einer Anzahl N von Teilchen unter dem Einfluss der gegenseitigen Gravitation berechnen. Für $N = 2$ entspricht dies dem Kepler-Problem der Bewegung zweier Körper um ihren gemeinsamen Schwerpunkt. Diesen Fall kann man noch leicht analytisch lösen, aber schon für $N > 3$ wird dies unmöglich. In der Kosmologie ist dieses N-Körper Problem besonders schwierig, weil die Zahl N der Teilchen *sehr groß* sein muss, um ein möglichst treues Modell des Universums zu erhalten. Je größer N, desto genauer die Simulation und desto größer ist die physikalische Information, die man extrahieren kann. Allerdings steigt der Rechenaufwand für eine naive Berechnung der Gravitationskräfte proportional zu $O(N^2)$, denn im Prinzip muss man für jedes Teilchen i eine Art Newton'sche Gravitationskraft berechnen:

$$\boldsymbol{F}_i = G \sum_{j=1}^{N} \frac{m_i m_j (\boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i)}{\left|\boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i\right|^3}$$

d. h., für jedes Teilchen muss man die $N - 1$ Gravitationskräfte aller anderen Teilchen aufsummieren. Bereits für eine Milliarde Teilchen ergibt sich damit ein Rechenaufwand von etwa $N(N-1)/2 \approx 10^{18}$ Teilkräften, jede davon erfordert ungefähr 20–30 Fließkommaoperationen. Selbst auf einem Teraflop-

Rechner dauerte dies bereits fast ein Jahr, wobei noch gar nicht berücksichtigt ist, dass man die Kraftberechnung bis zu 10.000-mal für die einzelnen Zeitschritte wiederholen muss! Später werden wir die „Millennium-Simulation" kurz vorstellen, eine der größten bisher durchgeführten kosmologischen Simulationen. Diese Simulation benutzte sogar 10 Mrd. Teilchen, was mit dem einfachen Verfahren der direkten Summation aufgrund der $O(N^2)$-Skalierung gleich noch einmal 100-mal so lang gedauert hätte.

Es müssen daher sehr viel schnellere Verfahren für eine näherungsweise Berechnung der Gravitationskräfte entwickelt und eingesetzt werden. In aktuellen Simulationscodes wird hierzu eine Kombination aus Fourier-Methoden und einer hierarchischen Multipolentwicklung benutzt. Mit schnellen diskreten Fourier-Transformationen (*fast Fourier transform*, FFT) kann man das langreichweitige Gravitationsfeld sehr effizient berechnen. Üblicherweise wählt man die Anzahl N_g der Gitterpunkte etwa gleich groß wie die Teilchenzahl. Der enorme Nutzen der FFTs ergibt sich daraus, dass sie die Komplexität der Berechnung der Gravitationskräfte an den Gitterpunkten von $O(N_g^2)$ auf $O(N_g \log N_g)$ reduzieren. Ein schwerer Nachteil ist dabei aber, dass die räumliche Auflösung auf die Skala der eingesetzten Gitterzellen begrenzt bleibt. Um einen höheren dynamischen Bereich zu erreichen und auch Strukturen unterhalb der Gitterzellen auflösen zu können, setzt man zusätzlich sogenannte *Tree*-Algorithmen ein. Hierbei wird eine hierarchische Gruppierung der Teilchen vorgenommen, die in einer Baumstruktur verwaltet wird. Die Idee ist dabei, das Gravitationsfeld einer hinreichend entfernten Gruppe durch ihre niedrigsten Multipolmomente anzunähern. Das erste Multipolmoment ist dabei einfach die Gesamtmasse der Teilchengruppe, versammelt an ihrem Schwerpunkt. Für eine sphärisch symmetrische Teilchenverteilung reicht das bereits für eine genaue Beschreibung der Kraft aus. So muss man ja für die Berechnung der Schwerkraft des Mondes auch nicht die Kräfte von jedem einzelnen seiner Felsbrocken aufsummieren. Es genügt, sich die gesamte Masse des Mondes an seinem Schwerpunkt konzentriert zu denken. Das nächste Multipolmoment einer Gruppe, das Dipolmoment, verschwindet, da es keine negative Massen gibt. Das nächsthöhere Moment, der sogenannte Quadrupoltensor, beschreibt dann Abweichungen von einer kugelsymmetrischen Verteilung. Wie auch die noch höheren Momente ist es aber für hinreichend entfernte Gruppen bereits so klein, dass es meist vernachlässigt werden kann.

Um die einzelnen Gruppen zu erzeugen, teilt man den Simulationswürfel rekursiv in jeweils acht Tochterwürfel, so lange, bis jeder Würfel nur noch ein Teilchen enthält. Hat man dann für jede Gruppe die Multipolmomente bestimmt, kann man die Gravitationskraft an jedem Punkt mit einem Lauf über die Baumstruktur dieser hierarchischen Gruppierung berechnen. Dabei entscheidet man bei jedem Teilwürfel, ob er klein genug ist und entfernt genug liegt, um seine Multipolentwicklung benutzen zu können. Falls dies der Fall ist, ist man entlang dieses Astes des Baums fertig (insbesondere muss man nicht die Teilkräfte der Teilchen der Gruppe alle einzeln berechnen), andernfalls öffnet man den Würfel und betrachtet jede seiner kleineren Tochtergruppen. Mit diesem Verfahren lassen sich unabhängig vom Grad der Verklumpung die Gravitationskräfte effizient und auf geometrisch sehr flexible Weise berechnen, wobei der Rechenaufwand nur noch mit $O(N \log N)$ skaliert. Insgesamt erreicht man durch die Kombination beider Verfahren, d. h. der Fouriermethode für den langreichweitigen Teil der Kraft und dem Tree-Algorithmus für den kurzreichweitigen, eine enorme Beschleunigung.

Trotzdem ist der Rechenaufwand für die angestrebten Teilchenzahlen immer noch so groß, dass die Rechenkapazität einzelner CPUs nicht ausreicht. Um die nötige Leistung zu erreichen, versucht man, möglichst große Parallelrechner einzusetzen. Diese sind auch aus einem anderen Grund angezeigt: Der Speicherbedarf typischer Simulationen beträgt leicht einige hundert GB, was kostengünstig nur auf Parallelrechnern mit verteiltem Speicher verfügbar ist. Die modernsten kosmologischen Simulationscodes sind deshalb explizit parallelisiert, unter Verwendung des *Message-Passing-Interface* (MPI)-Standards. Damit lassen sich hochgradig portable parallele Anwendungen schreiben, vor allem, wenn die gut standardisierte Programmiersprache C verwendet wird. Das in der Astrophysik immer noch beliebte Fortran erfordert dagegen oft Anpassungen an die Eigenheiten der Compiler auf verschiedenen Plattformen. Andere Sprachen werden aus Geschwindigkeitsgründen kaum für Simulationscodes verwendet.

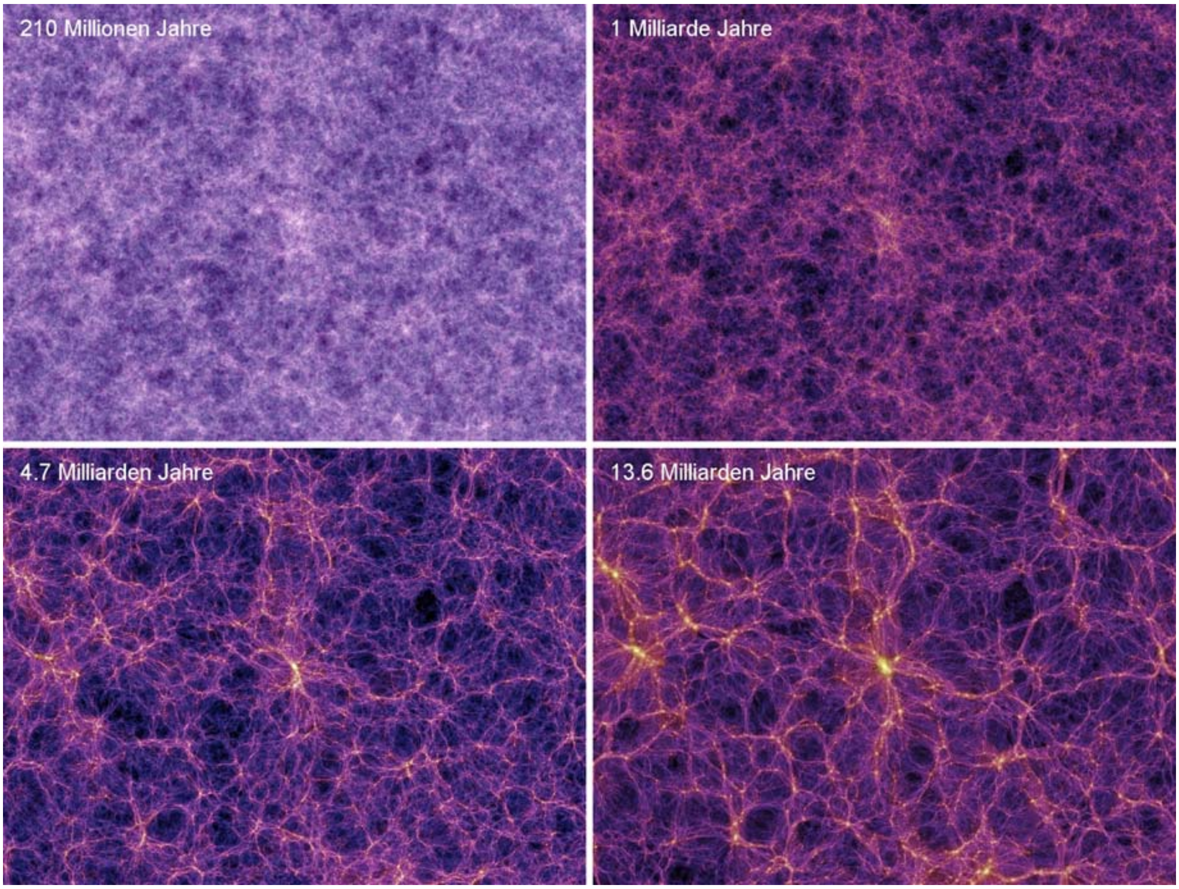

***Abb. 2** Zeitentwicklung kosmischer Strukturen in der Millennium Simulation. In diesen vier Bildern ist jeweils die projizierte Dichte der Dunklen Materie zu verschiedenen Zeiten in einem Ausschnitt eines simulierten Universums gezeigt. Der dargestellte Raumbereich umfasst dabei etwa 1500 Mio. Lichtjahre, von links nach rechts. Deutlich sichtbar ist, wie die Materieverteilung mit der Zeit unter dem Einfluss der Schwerkraft immer stärker verklumpt. Es entsteht ein „kosmisches Netz" aus Filamenten und Knotenpunkten, welches große Leerräume umspannt.*

Ein Ergebnis einer solchen Rechnung ist in Abb. 2 gezeigt. Die Bilder zeigen die Zeitentwicklung in einem Ausschnitt der „Millennium Simulation", welche im Jahr 2005 zum ersten Mal mehr als 10 Mrd. Teilchen simulierte. Dafür wurden 512 Prozessoren eines IBM Power4 Systems eingesetzt, und die Rechnung dauerte etwa einen Monat, oder ~350.000 CPU-Stunden insgesamt. Außerdem wurden etwa 920 GB RAM benötigt, bei 1 TB physikalisch verfügbarem Speicher. Die produzierte Datenmenge betrug etwa 23 TB und wird nach wie vor weiter wissenschaftlich analysiert.

Seit Mitte der 1970er-Jahre, als die ersten Rechnungen auf diesem Gebiet mit einigen hundert Teilchen durchgeführt wurden, stieg die verwendete Teilchenzahl in den Simulationen exponentiell an. Im Schnitt hat sich die Größe der Simulationen etwas schneller als alle 17 Monate verdoppelt (siehe Abb. 3). Interessanterweise liegt diese Wachstumsrate sehr nahe an dem Moore'schen Gesetz der Halbleiterindustrie. Allerdings muss man beachten, dass der Rechenaufwand der Simulationen stärker als linear mit N zunimmt, vor allem, weil für höhere Teilchenzahlen auch immer mehr Zeitschritte benötigt werden. Astrophysiker haben also nicht einfach nur die steigende Rechenkapazität ausgenutzt (wobei das natürlich eine entscheidende Hilfe war), sondern mussten die Leistungsfähigkeit der Simulationssoftware durch bessere Algorithmen und Parallelisierung ebenfalls enorm steigern, sonst hätte sich diese Wachstumsrate nicht realisieren lassen. Eine große Schwierigkeit kosmologischer Simulationen liegt dabei in der starken Kopplung der

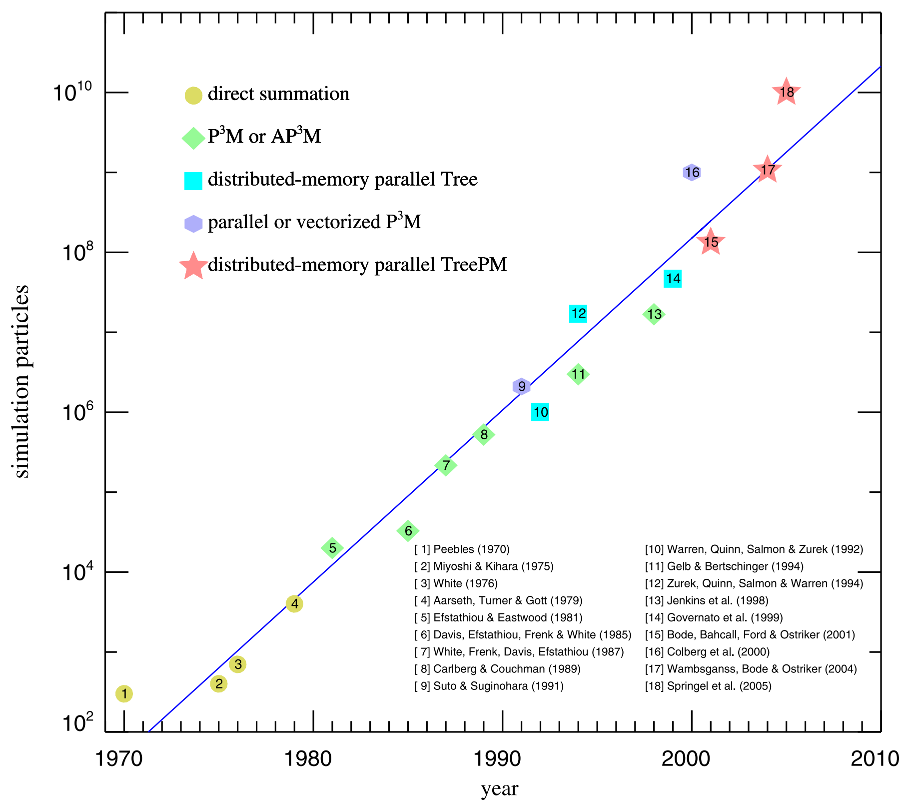

***Abb. 3** Größe der kosmologischen Simulationen als Funktion der Zeit. Das Diagramm zeigt die verwendete Teilchenzahl in den größten N-Körper-Simulationen der Kosmologie als Funktion des Publikationsjahres (aus [2]). Während der vergangenen drei Dekaden war das Wachstum exponentiell, mit einer Verdopplung alle 16,5 Monate (blaue Linie). Die verschiedenen Symbole bezeichnen unterschiedliche Berechnungsverfahren, für die immer leistungsfähigere Algorithmen entwickelt wurden*

Dynamik. Die einzelnen Teile der Simulation können nie völlig getrennt voneinander bearbeitet werden, da die langreichweitige Schwerkraft jedes Masselement mit jedem anderen verbindet. Ständig müssen deshalb große Datenmengen zwischen den einzelnen Rechnern ausgetauscht werden. Es ist also entscheidend, schnelle Kommunikationsnetzwerke zur Verfügung zu haben (derzeit meist basierend auf *Infiniband*, einer seriellen Hochgeschwindigkeitsübertragungstechnologie mit typischen Bandbreiten von 10–20 GBit/s) und die Kommunikationsbandbreite in der Simulationssoftware optimal einzusetzen. Ein weiterer kritischer Aspekt liegt in dem sogenannten *Work-Load-Balancing*. Durch die Verklumpung der Materie während der Strukturentstehung verändert sich der Rechenaufwand für die Simulation dynamisch sehr stark; insbesondere in sehr dichten Regionen steigt er stark an. Die Simulationssoftware muss nun versuchen, die einzelnen Bereiche der Simulation, die verschiedenen Prozessoren zugewiesen werden, so zuzuschneiden, dass der tatsächliche Rechenaufwand für die einzelnen Segmente gleich groß ist, denn am Ende jeden Zeitschritts liegt ein Synchronisationspunkt, an dem Teilergebnisse ausgetauscht und aktualisiert werden müssen. Die Simulation muss an diesem Punkt im Zweifel auf die langsamste CPU warten. Eine auch nur leicht ungleiche Verteilung wirkt sich deshalb gravierend auf die Rechenleistung und Skalierbarkeit zu großen Prozessorzahlen aus. In der Praxis sind diese Verluste in der Form von anfallenden Wartezeiten ein großes Problem, das nur schwer in den Griff zu bekommen ist und welches meist stärkere Schranken für die Skalierbarkeit bewirkt als die Bandbreite des Kommunikationsnetzwerkes.

Aktuell werden kosmologische Rechnungen mit bis zu einigen Tausend MPI-*Tasks (d. h. unabhängigen Prozessen)* durchgeführt. Um das Problem des Work-Load-Ungleichgewichts zu verringern, kann man auch den gemeinsamen Speicher von Rechenknoten mit *symmetrischen Multiprozessoren* (SMP) ausnutzen. Dies ist wegen der stürmischen

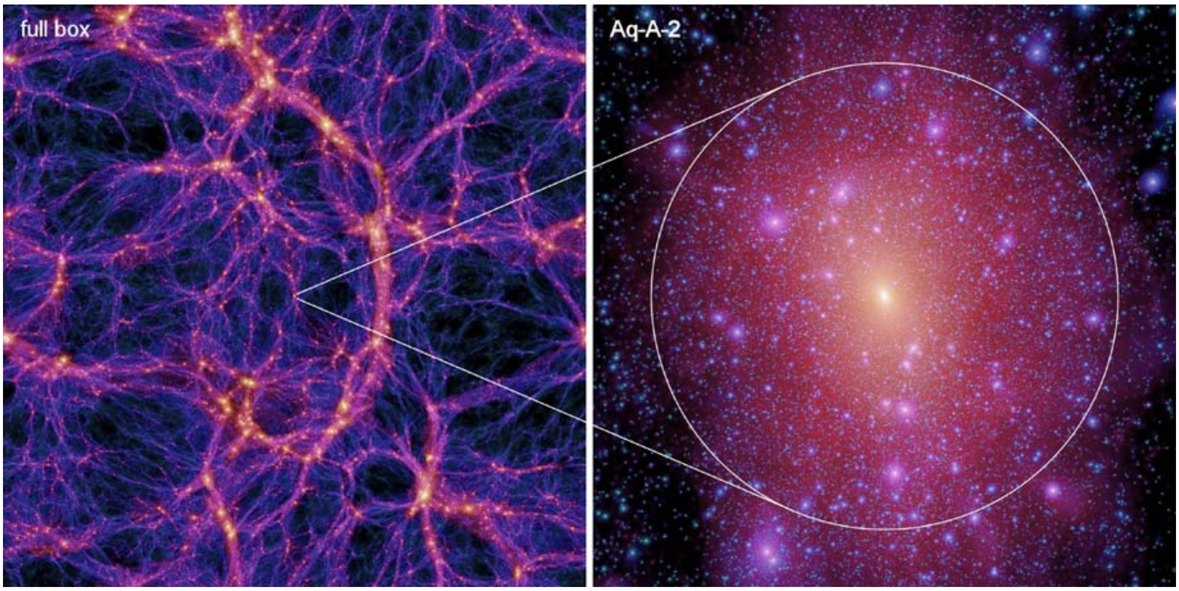

Abb. 4 *Darstellung des Ergebnisses einer „Zoom"-Simulation des Aquarius Projekts [3]. In dieser Rechnung wurden die Computerressourcen in einer kleinen Region konzentriert, um interne Details eines einzelnen Halos aus Dunkler Materie aufzulösen. Hier wurde ein Objekt von der Größe unserer eigenen Milchstraße studiert. Wie die hoch aufgelöste Simulation im Bild rechts zeigt, sagt das Standardmodell der Kosmologie voraus, dass unsere eigene Galaxie Myriaden von kleinen Substrukturen aus Dunkler Materie enthält, die in dem Gravitationsfeld der Milchstraße für lange Zeit mit Geschwindigkeiten bis zu einigen hundert Kilometern pro Sekunde als gebundene Objekte kreisen.*

Entwicklung von Architekturen mit Multicore-Prozessoren derzeit besonders interessant. So hat etwa auf der IBM Bluegene/P in Jülich, dem derzeit leistungsfähigsten Rechner in Deutschland, jeder Rechenknoten vier Cores, die entweder einzeln mit jeweils einem MPI-Task und dann getrenntem Speicher beschickt werden können, oder aber nur mit einem MPI-Task, der den gesamten Speicher des Knotens erhält, wobei dann die übrigen Cores mit Threads genutzt werden können. Letztere Strategie erweist sich bei kosmologischen Simulation oft als günstiger, da sich eine Balance der Arbeitslast für eine kleinere Anzahl von MPI-Tasks viel leichter erreichen lässt und in der Parallelisierung mit Threads Verluste durch ungleiche Auslastung innerhalb eines Knotens komplett vermieden werden können. Diese Strategie dürfte wohl auch der einzig gangbare Weg für zukünftige kosmologische Simulationen auf Petaflop-Systemen mit 10^5 und mehr Cores sein.

Derzeit werden kosmologische Simulationen vorbereitet, die mindestens 200 Mrd. Teilchen umfassen und einen Hauptspeicherbedarf von 30–40 TB RAM benötigen. Die dabei produzierten Datenmengen sind so gewaltig, dass Teile der benötigten Analysen (etwa das Auffinden von Galaxien mit *Groupfinding*-Algorithmen) direkt im Simulationscode erfolgen müssen. Neben solchen großen Simulationen, die riesige Gebiete des Universums mit gleichförmiger Auflösung simulieren, wendet man aber immer häufiger auch eine andere Simulationsstrategie an. Man konzentriert dabei die Rechenkapazität auf eine kleine hoch aufgelöste Region, während der Rest des würfelförmigen Modelluniversums mit vergleichsweise wenigen, schwereren Teilchen viel gröber abgedeckt wird. Damit kann man dann zum Beispiel in einzelne Objekte „hineinzoomen". In Abb. 4 ist ein Beispiel aus dem „Aquarius Projekt" des internationalen Virgo-Konsortiums gezeigt. Hier haben sich etwas 1,5 Mrd. Teilchen in einer Galaxie der Größe der Milchstraße versammelt, wobei die Auflösung lokal etwa eine Million Mal besser ist als in der Millennium Simulation. Die entsprechende Rechnung wurde auf 1024 CPUs des HLRB-II Superrechners (einem SGI Altix 4700 System) am Leibniz-Rechenzentrum in Garching durchgeführt und stellt die derzeit bestaufgelöste kosmologische Simulation dar. Der enorme dynamische Bereich dieser Simulation hat sich aber auch in einem großen Rechenaufwand niedergeschlagen – etwa 3 Mio. CPU-Stunden wurden für die

Simulation benötigt. Aufgrund der Parallelisierung dauerte die Rechnung mehrere Monate, aber auf einem seriellen System hätte sie 350 Jahre gedauert.

Die Aquarius-Simulation zeigt besonders deutlich, wie klumpig die Verteilung der Dunklen Materie selbst innerhalb einzelner Galaxien ist. In bestimmten, als wahrscheinlich angesehenen physikalischen Szenarien für die Natur der Teilchen der Dunklen Materie können sich diese mit sich selbst zerstrahlen, wobei energiereiche Gamma-Photonen entstehen. Man hofft, dass die Dunkle Materie deshalb vielleicht doch nicht komplett dunkel ist, sondern ganz schwach im Gamma-Licht glimmt. Vielleicht gelingt es deshalb Gamma-Satelliten, wie dem jüngst gestarteten FERMI-Satellit, die Dunkle Materie bereits in nächster Zeit zu entdecken, eine Aussicht, die viele Astrophysiker derzeit geradezu elektrisiert.

In der Aquarius-Simulation wird bereits eine Auflösung erreicht, bei der nicht nur die Schwerkraft eine wichtige Rolle spielt, sondern auch die Hydrodynamik der gewöhnlichen Materie sowie ihre Wechselwirkung mit dem Strahlungsfeld. Dies führt zu einer Vielzahl von komplexen Phänomenen, einschließlich der Entstehung und Entwicklung von Sternen, des Wachstums von Schwarzen Löchern oder der Entstehung von Planetensystemen. Zunächst folgt das kosmische Gas aus Wasserstoff und Helium der Gravitation der Dunklen Materie und wird von ihr in den einzelnen dunklen Halos versammelt. Hydrodynamische Stoßwellen heizen das Gas dabei stark auf, sodass es zunächst durch den Gasdruck an einem weiteren Kollaps durch die Schwerkraft gehindert wird. Allerdings kann das Gas die Wärmeenergie mit der Zeit abstrahlen. Wenn es erkaltet, sammelt es sich in einer dünnen Scheibe, die um das Zentrum des Halos wirbelt und nur noch von der Zentrifugalkraft unterstützt wird. In dieser Scheibe kommt es dann zu lokalen Störungen und der Entstehung von dichten Molekül- und Staubwolken, die teilweise von turbulenten Magnetfeldern durchdrungen sind. Schließlich kollabieren die Zentren der Wolken unter ihrer eigenen Schwerkraft zu einzelnen Sternen oder Sternhaufen. Indem sich ein Großteil der Gasscheibe in Sterne verwandelt, entstehen so scheibenförmige Spiralgalaxien, die typischerweise etwa 100 Mrd. Sterne enthalten.

Um diese im Detail noch unverstandenen Phänomene zu simulieren, muss man die Beschreibung der gravitativen Dynamik der Dunklen Materie mit den numerisch schwierigen Gleichungssystemen der Magnetohydrodynamik und des Strahlungstransports ergänzen. Die resultierenden Simulationstechniken sind dann teilweise verwandt mit numerischen Methoden in der Strömungsmechanik und Aerodynamik, allerdings mit dem wichtigen Unterschied, dass in der Astrophysik die Eigengravitation (d. h. das Schwerefeld des Fluids selbst) eine wichtige Rolle spielt und der dynamische Bereich sehr viel größer ist als bei allen irdischen

Abb. 5 Hydrodynamische Simulation einer Galaxienkollision [1]. In diesem Bild sind verschiedene Phasen des Zusammenstoßes und der anschließenden Verschmelzung zweier Spiralgalaxien gezeigt. Während der ersten Begegnung induzieren starke gravitative Gezeitenkräfte eine Verformung der galaktischen Scheiben und die Entstehung eines zentralen Balkens. Entlang dieses Balkens strömt dann diffuses Gas ins Zentrum der Galaxien. Es kommt zu einem Ausbruch intensiver Sternentstehung im Zentrum. Die beiden superschweren Schwarzen Löcher, die jeweils im den Herzen der Galaxien lauern, fangen an zu wachsen. Sie strahlen dabei enorm hell als Quasare und heizen die Umgebung stark auf. Schließlich führt die Energieeinspeisung zu einem Herausschleudern des verbleibenden Gases. Die verschmolzenen Galaxien bilden eine neue elliptische Galaxie, in deren Zentrum auch die beiden Schwarzen Löcher zu einer noch größeren Schwerkraftfalle verschmolzen sind.

Anwendungen. Beides macht die Simulationen entsprechend anspruchsvoller.

Ein Beispiel ist in Abb. 5 gezeigt, in der die Kollision und anschließende Verschmelzung zweier Spiralgalaxien in einer hydrodynamischen Simulation verfolgt wurde. Eingebettete superschwere Schwarze Löcher in den Zentren der beiden Galaxien werden durch die Wechselwirkung der Galaxien mit Gas gefüttert und fangen an, als Quasare zu leuchten. Schließlich führt die eingespeiste Energie zum Herausschleudern des Gases und zu einer Unterdrückung des weiteren Wachstums der Schwarzen Löcher. Zurück bleibt eine elliptische Galaxie (deren Sterne hier nicht gezeigt sind), die kaum noch Gas enthält und deshalb auch nur noch wenige neue Sterne bildet. Man glaubt, dass auch der Milchstraße und ihrer Begleitgalaxie Andromeda in etwa 4–6 Mrd. Jahren ein ähnliches Schicksal droht.

Numerische Simulationen auf Großrechnern haben sich zu einem wichtigen dritten Standbein der Astrophysik entwickelt, neben der beobachtenden Astronomie und der klassischen Theorie. Die Bedeutung der Simulationen nimmt dabei weiterhin zu. Derzeit basiert bereits fast jede sechste publizierte Arbeit in der Astrophysik auf Simulationen, während das vor zehn Jahren nur jede zehnte war. Es ist offensichtlich, dass mit der zunehmenden Komplexität der Simulationsprogramme und Rechnerarchitekturen die Zusammenarbeit zwischen Astrophysikern und Informatikern immer wichtiger werden wird. Nur so wird es möglich sein, das enorme wissenschaftliche Potenzial moderner Superrechner voll auszuschöpfen.

Literatur

1. Di Matteo T, Springel V, Hernquist L (2005) Nature 433:604–607
2. Springel V, White SDM, Jenkins A, Frenk CS, Yoshida N, Gao L, Navarro J, Thacker R, Croton D, Helly J, Peacock JA, Cole S, Thomas P, Couchman H, Evrard A, Colberg J, Pearce F (2005) Nature 435:629–636
3. Springel V, Wang J, Vogelsberger M, Ludlow A, Jenkins A, Helmi A, Navarro JF, Frenk CS, White SDM (2008) Mon Not R Astron Soc 391:1685–1711