

# Die Evolution unseres Universums

Supercomputer wie der neue SuperMUC des Leibniz-Rechenzentrums (LRZ) sind ein unverzichtbares Werkzeug astrophysikalischer Forschung.

VON VOLKER SPRINGEL

**Abb. 1: Kosmische Großraumstruktur in beobachteten Galaxienkatalogen (blau), verglichen mit der simulierten Galaxienpopulation in der Millennium-Simulation (rot).**

WIE KAUM EIN ANDERES Forschungsgebiet beschäftigen sich Astronomie und Astrophysik mit einer enormen Vielfalt an höchst exotischen Vorgängen in der Natur. Das Spektrum reicht von ultradichten kompakten Objekten wie Neutronensternen über energetische Prozesse wie Supernova-Explosionen bis hin zu den äonenlangen Vorgängen der Entstehung des Weltalls und seiner größten Strukturen, den Galaxien und Galaxienhaufen.

All diesen Phänomenen gemeinsam ist, dass sie sich einem experimentellen Zugang auf der Erde fast vollständig entziehen. Simulationsrechnungen auf leistungsfähigen Computern erlauben es aber, dieses fundamentale Problem zumindest teilweise zu umgehen, denn Simulationen gestatten „virtuelle“ Experimente, die eine immer größere Treue gegenüber den betrachteten physikalischen Vorgängen erreichen. Die „Zahlenfresser“ des High Performance Computing erlauben es dabei, die komplizierten Differentialgleichungssysteme der Astrophysik mit all ihren Nichtlinearitäten zu lösen und damit neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu gewinnen sowie Theorien zu überprüfen. Daher sind Computersimulationen heute zur wichtigen dritten Säule der astrophysikalischen Forschung geworden, neben der Beobachtung und der theoretischen Modellbildung.

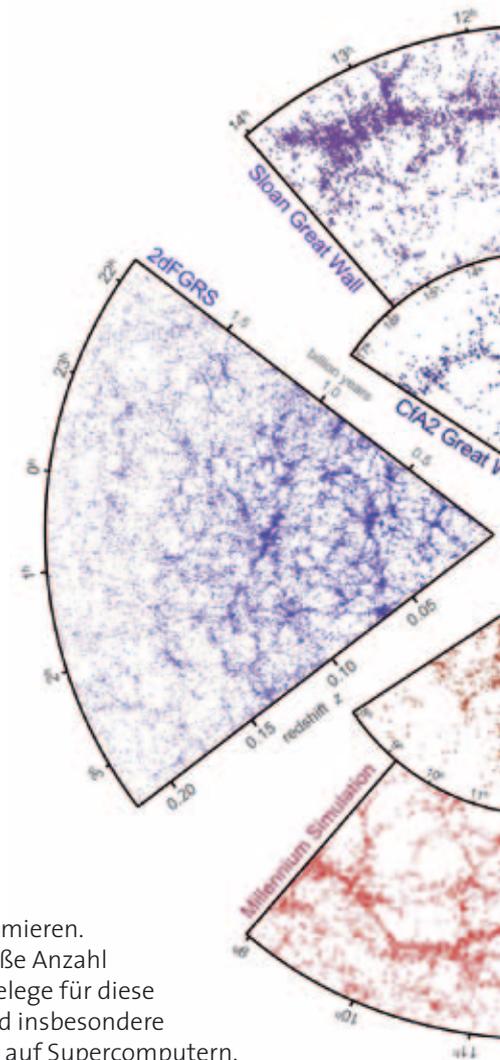
Besonders deutlich wird das in der Kosmologie. Eine der frappierendsten astronomischen Erkenntnisse der letzten beiden Dekaden ist, dass der Materieinhalt des Universums offenbar zum großen Teil aus nicht-baryonischer dunkler Materie besteht und zusätzlich eine dunkle Energie für eine beschleunigte Expansion des Raumes im heutigen All sorgt. Es ist Astrophysikern keineswegs leicht gefallen, die Existenz der rätselhaften dunklen Materie und dunklen Ener-

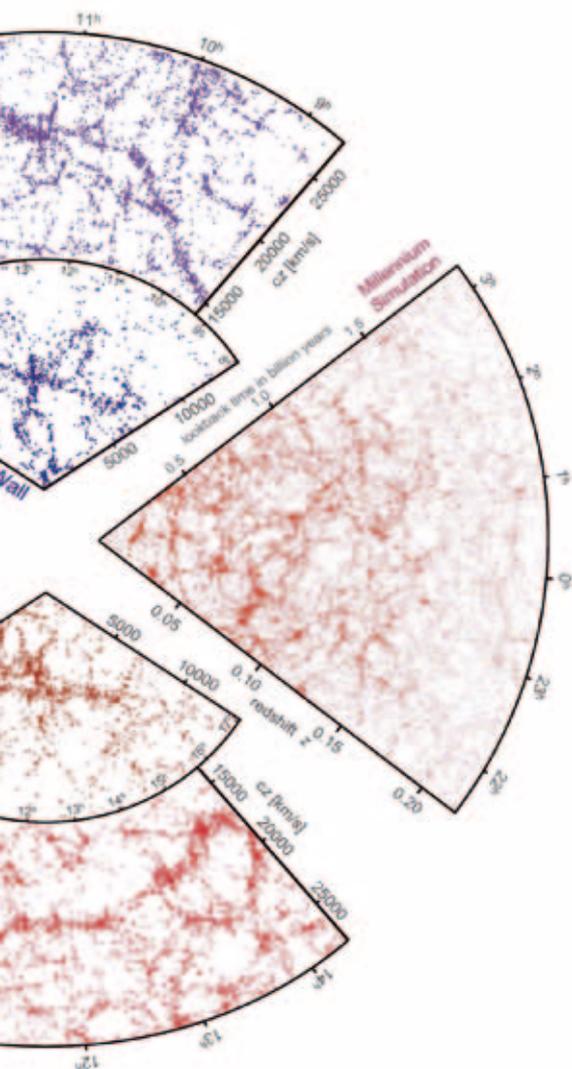
gie zu proklamieren. Erst eine große Anzahl sehr guter Belege für diese Theorie – und insbesondere Rechnungen auf Supercomputern, etwa am Leibniz-Rechenzentrum – haben diese so phantastisch anmutende Hypothese in eine belastbare Theorie verwandelt, in Form des kosmologischen Standardmodells „ $\Lambda$ CDM“.

## Die kosmische Großraumstruktur

2005 publizierte das Virgo-Consortium (ein internationales Team von Astrophysikern aus Deutschland, England und Kanada) die „Millennium-Simulation“, eine bahnbrechende Berechnung dieses  $\Lambda$ CDM-Universums. Sie wurde auf dem PSI-Supercomputer des Rechenzentrums Garching der Max-Planck-Gesellschaft durchgeführt und setzte die gewaltige Zahl von zehn Milliarden Massenteilchen ein, um den Materieinhalt des Universums in einer Region von mehr als zwei Milliarden Lichtjahren Kantenlänge zu repräsentieren. Die Simulation verfolgte die Entstehung von mehr als 20 Millionen Galaxien und machte Voraussagen für ihre räumliche Verteilung, ihre Entstehungsgeschichte und ihre physikalischen Eigenschaften.

Interessanterweise stimmten die Voraussagen des  $\Lambda$ CDM-Modells mit vielen Beobachtungsdaten überein, vor allem auf großräumigen Skalen. Abbildung 1 zeigt z. B. einen Vergleich





virtueller Himmelsdurchmusterungen in der Millennium-Simulation mit echten Daten großer Galaxien-Beobachtungsprogramme, die das kosmische Netz vermessen haben. Die Millennium-Simulation führte den bisher mächtigsten Nachweis, dass die nichtlinearen Strukturen aus dunkler Materie des  $\Lambda$ CDM-Modells tatsächlich ein erfolgreiches Gerüst für die Entstehung von realistischen Galaxien liefern.

### Dunkle Materie in der Milchstraße

Die Suche vieler Physiker nach der dunklen Materie ist mit diesem Erfolg nur weiter befeuert worden. Denn um die Hypothese der Existenz der dunklen Materie zweifelsfrei nachzuweisen, wird ein direkter Nachweis der konkreten physikalischen Natur dieser Teilchen benötigt. Besonders wichtig ist dabei die Milchstraße selbst, in deren Halo aus dunkler Materie das Sonnensystem eingebettet ist. Detektionsexperimente in abgeschirmten unterirdischen Laboren auf der Erde erfordern Voraussagen für die erwartete Dichte der dunklen Materie an der Position der

Sonne sowie für die Geschwindigkeitsverteilung der Teilchen, die die Erde durchströmen. Nur bei genauer Kenntnis dieser Parameter lassen sich die erwarteten Detektionsraten zuverlässig voraussagen und mithin die Messungen korrekt interpretieren.

Um die erwartete Verteilung der dunklen Materie in der Milchstraße im Rahmen des kosmologischen Standardmodells präzise zu berechnen, hat ein internationales Wissenschaftlerteam unter Leitung von Simon White vom Max-Planck-Institut für Astrophysik 2008 die weltweit bestaufgelöste Simulation der Milchstraße erstellt. Das sog. Aquarius-Projekt wurde auf dem Supercomputer HLRB II des Leibniz-Rechenzentrums durchgeführt. In der Hauptrechnung auf 1.000 Prozessoren und mit einem Hauptspeicherbedarf von mehr als 3 Terabyte wurden fast 5 Milliarden Teilchen eingesetzt, um einen einzelnen Milchstraßen-Kandidaten und seine unmittelbare Umgebung zu untersuchen. Die erreichte Auflösung war dabei fast eine Million Mal besser als in der Millennium-Simulation. Die hochaufgelöste Region wurde sorgfältig in eine großräumige Simulation des umgebenden Universums eingebaut, so dass die Rechnung die Entstehung der Milchstraße konsistent aus den vom Urknall hinterlassenen kosmologischen Anfangsbedingungen verfolgte, und zwar über einen Zeitraum von mehr als 13 Milliarden Jahren. Die entstandene Milchstraße enthielt am Ende etwa 1,5 Milliarden Auflösungselemente, und der erreichte dynamische Bereich pro Raumdimension betrug fast  $10^7$ . Alle diese Werte sind Rekordzahlen für das Forschungsgebiet, die auch heute noch unübertroffen sind.

Eines der wichtigsten Ergebnisse des Aquarius-Projekts war die genaue Bestimmung der Häu-

**Abb. 2:** Verteilung dunkler Materie im Halo der Aquarius-Simulation. Der virialisierte Bereich dieses Modells der Milchstraße enthält eine riesige Zahl von Substrukturen.

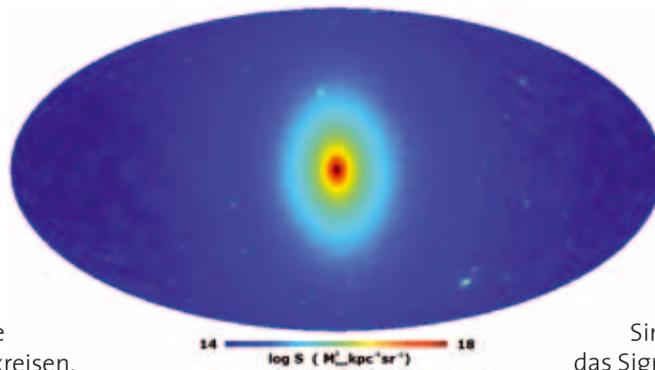


**Abb. 3:** Eine Himmelskarte der erwarteten Intensität von Vernichtungsstrahlung der dunklen Materie auf Basis der Aquarius-Simulation, von der Position der Sonne aus. Der helle zentrale Bereich markiert das galaktische Zentrum.

figkeit sowie erstmalig auch der inneren Struktur von so genannten Subhalos aus dunkler Materie, die in der Milchstraße kreisen. Diese Satellitensysteme sind überaus zahlreich (über 300.000 konnten in Aquarius gefunden werden, s. Abb. 2) und bestehen aus den dichten Zentren von Strukturen, die bei der hierarchischen Entstehung des Systems in die simulierte Milchstraße eingefallen sind. Dabei wurde ihre äußere Massenhülle teilweise durch Gezeitenkräfte abgestreift, aber ihre Kerne konnten länger überleben und in der Galaxie ihre Bahnen ziehen. Der Phasenraum des Halos der Milchstraße ist deshalb nicht einfach glatt und strukturlos, sondern im Gegenteil durch eine große Komplexität und einen Reichtum an kleinskaliger Substruktur gekennzeichnet.

Besonders interessant an den Subhalos ist ihre Verbindung zu den beobachteten leuchtenden Satellitengalaxien in der Milchstraße. Diese besitzt nämlich einige Dutzend Zwerggalaxien in ihrem Halo – etwa die beiden Magellanschen Wolken –, und es liegt nahe, diese Satelliten mit den Substrukturen aus dunkler Materie zu identifizieren. Allerdings gibt es von den Letzteren augenscheinlich wesentlich mehr als Zwerggalaxien. Ob dieses Problem einen Widerspruch zur  $\Lambda$ CDM-Theorie darstellt oder durch physikalische Prozesse der Galaxienentstehung erklärt werden kann, ist aktuell hoch umstritten.

Eine andere wichtige Implikation der dunklen Substrukturen betrifft das erwartete Signal so genannter Vernichtungsstrahlung der dunklen Materie. Zwar wissen die Teilchenphysiker noch nicht genau, woraus die dunkle Materie wirklich besteht, sie haben aber einen Favoriten, der sich in der gängigsten Erweiterung des Standardmodells der Elementarteilchen-Physik recht natürlich ergibt. Diese Teilchen werden als Neutralinos bezeichnet und sind ihr eigenes Antiteilchen. Insbesondere können sie sich in dichten Regionen mit ihresgleichen zu reiner Energie zerstrahlen, was sich am Ende in der Ausstrahlung harter Gamma-Strahlung manifestieren sollte. Eine Detektion solcher Gamma-Photonen könnte damit einen indirekten Nachweis der dunklen Materie liefern. Derzeit wird mit dem FERMI-Satelliten intensiv nach diesem Glimmen der dunklen Materie gefahndet. Da die Rate solcher Vernichtungsereignisse quadratisch mit der Dichte ansteigt, verändern die Substruktur-Klumpen in



dem galaktischen Halo das erwartete Gamma-Signal entscheidend. Mit der Aquarius-Simulation konnte das Signal dieser Vernichtungsstrahlung, das man durch die Myriaden von dichten Subhalo-Zentren im Halo der Milchstraße erwartet, zum ersten Mal sehr präzise bestimmt werden (Abb. 3).

### Aktuelle Trends

Trotz dieser beeindruckenden Fortschritte bei der Aufklärung der Strukturen aus dunkler Materie steckt unser Verständnis der baryonischen Prozesse der Galaxienentstehung noch in den Kinderschuhen. In so genannten hydrodynamischen Simulationen wird neben der dunklen Materie auch das Helium- und Wasserstoffgas simuliert, das durch Strahlungskühlung in den Halos auskondensiert und im Zentrum schließlich so dicht wird, dass Sterne entstehen können. Die schwereren Sterne wiederum explodieren nach einiger Zeit als Supernova und setzen lokal gewaltige Energiemengen frei, ferner schwere Elemente, mit denen sie das interstellare Gas chemisch anreichern. Es ist eine große Herausforderung der aktuellen Forschung, die Regulierung der Sternentstehung durch Überschall-Turbulenz, Magnetfelder und Energieeinspeisung durch Supernovae und akkretierende Schwarze Löcher mit Hilfe von Supercomputer-Simulationen besser zu verstehen. Die Anforderungen an die Rechenleistung sind für solche Simulationen noch erheblich höher als für Berechnungen nur der dunklen Materie.

Daneben erfordern sie auch besondere numerische Methoden für die Hydrodynamik, die hochgradig adaptiv und genau arbeiten müssen, weshalb sie ständig weiterentwickelt werden. Ein aktuelles Beispiel ist in Abbildung 4 zu sehen. Hierbei wurde ein neues numerisches Verfahren, das mit einem dynamisch bewegten Voronoi-Gitter arbeitet, erstmals auf das Problem der Galaxienentstehung angewandt. Verglichen mit einer korrespondierenden Simulation, die mit dem Smoothed-Particle-Hydrodynamics-Verfahren durchgeführt wurde, sieht man, dass die neue Methode eine wesentlich besser ausgeformte Spiralgalaxie bildet. Diese beiden Modelle

### DER AUTOR

**Prof. Dr. Volker Springel** ist Professor für Theoretische Astrophysik an der Universität Heidelberg. Er leitet eine Arbeitsgruppe am Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS), die mit Hilfe von Computersimulationen erforscht, wie sich das Weltall nach dem Urknall entwickelt hat und welche Rolle die dunkle Materie spielt. Seine Forschungsergebnisse basieren u. a. auf Simulationsrechnungen am Leibniz-Rechenzentrum.

wurden auf Ranger, einem Supercomputer des Texas Advanced Computing Centers, berechnet. Wir planen, die nächste Generation dieser Simulationen auf SuperMUC mit wesentlich besserer Auflösung und einer vollständigeren Abbildung der relevanten Physik durchzuführen.

Ein anderer wichtiger Trend bei kosmologischen Simulationen liegt in einer weiteren massiven Erhöhung der Teilchenzahlen der N-Körper-Simulationen. Es werden Rechnungen ähnlich zur Millennium-Simulation angestrebt, nur noch viel größer, mit bis zu 1.000 Milliarden Teilchen und mehr. Der wesentliche Antrieb für dieses Ziel ergibt sich aus großen und sehr teuren Beobachtungsprojekten, die auf eine Vermessung von Eigenschaften der dunklen Energie abzielen. Etliche dieser Projekte sind unlängst auf den Weg gebracht worden. Das ambitionierteste ist der europäische EUCLID-Satellit, der ab 2019 eine sechsjährige Kartierung des Weltraums beginnen und unter anderem die so genannten baryonischen Oszillationen vermessen soll. Diese prägen der Materieverteilung des Universums gewissermaßen eine Standardlänge auf, deren genaue Bestimmung zu verschiedenen Epochen eine Rekonstruktion der kosmischen Ausdehnungsgeschichte und damit der Entwicklung der dunklen Energie erlaubt. Allerdings erfordern die Messungen von EUCLID sehr präzise Kalib-

rierungen, die sich nur mit extrem großen und genauen numerischen N-Körper-Simulationen erreichen lassen.

### Die Millennium-XXL-Simulation

Ein aktuelles Beispiel für eine erste solche kosmologische Simulation ist das Millennium-XXL-Projekt, das das Virgo-Konsortium unlängst auf dem Supercomputer JUROPA am Forschungszentrum Jülich durchgeführt hat. Diese Rechnung repräsentiert die dunkle Materie mit 303 Milliarden Teilchen ( $6.720^3$ ) in einer würfelförmigen Region mit einer Kantenlänge von 4,2 Gigaparsec, was einer Strecke entspricht, für die selbst Licht mehr als 10 Milliarden Jahre benötigt. Insgesamt 12.288 Prozessoren des Supercomputers arbeiteten gemeinsam an der Rechnung, für zusammengekommen etwa 3 Millionen CPU-Stunden. Auch der Speicherverbrauch der Millennium-XXL-Simulation war immens. Am Ende benötigte die Rechnung fast 30 Terabyte Hauptspeicher, was genau dem gesamten verfügbaren Speicher auf dem eingesetzten Teil des Superrechners (70 % des Gesamtsystems) entsprach. Um diese große Simulation überhaupt möglich zu machen und die Analyse der mehr als 100 Terabyte erzeugten Daten einigermaßen praktikabel zu halten, mussten ganz neue Strategien für den Umgang mit extrem großen Datenmengen und den daraus extrahierten Galaxienmodellen entwickelt werden.

Ein interessanter Aspekt des riesigen Volumens der Millennium-XXL-Simulation ist, dass man dadurch nach extrem seltenen Ereignissen und Objekten suchen kann. Sehr massereiche Galaxienhaufen, die einige  $10^{15}$  Sonnenmassen enthalten, gehören zu dieser Kategorie (Abb. 5). In jüngster Zeit hat der PLANCK-Satellit ein neues Rätsel über Galaxienhaufen entdeckt, und zwar in Form einer systematischen relativen Verschiebung zwischen zwei beobachteten Skalenrelationen von Galaxienhaufen. Diese Abweichung widerstand zunächst allen einfachen Erklärungsversuchen, so dass selbst exotische Vermutungen, wie etwa die mögliche Existenz einer Population von Haufen ohne Gasinhalt, in Betracht gezogen wurden. Mit den Daten der Millennium-XXL-Simulation konnte nun aber gezeigt werden, dass die Abweichung in den Skalenrelationen vollständig durch statistische Auswahleffekte erklärt werden kann. Dies zeigt einmal mehr, wie wichtig Supercomputer für die Theoriebildung und die Interpretation umfangreicher Beobachtungsdaten in der Astronomie und Astrophysik sind.

**Abb. 4:** Projizierte Temperatur- und Gasdichteverteilungen in zwei hydrodynamischen Simulationen der Galaxienentstehung, ausgeführt mit dem neuen bewegten Gittercode AREPO (links) oder mit dem traditionellen SPH-code GADGET (rechts).

**Abb. 5:** Kosmische Großraumstruktur in einem dünnen Schnitt durch einen kleinen Teil der Millennium-XXL-Simulation. Die Vergrößerungen zeigen einzelne Galaxienhaufen, die jeweils das stärkste Signal in unterschiedlichen Beobachtungstechniken im gesamten Volumen der Simulation liefern.

