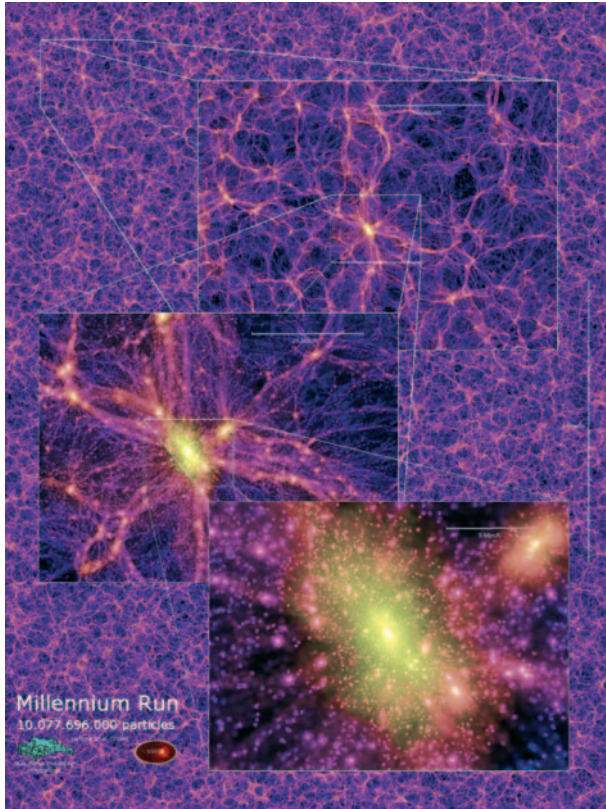


Dunkle Strukturen

Die bislang größte astrophysikalische Computersimulation beschreibt detailliert die Entstehung von Galaxien.

In den vergangenen Jahrzehnten haben zahlreiche kosmologische Messungen ein einheitliches Bild des Universums gezeichnet, das heute im kosmologischen Standardmodell



Von massearmen Galaxien bis hin zu den größten Superhaufen reicht das Spektrum an Strukturen, deren Entstehung nun simuliert wurde. (Quelle: MPA Garching)

zusammengefasst wird. Demzufolge wird das Universum im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie durch ein homogenes und isotropes Modell beschrieben, dessen gesamte Energiedichte gerade ausreicht, um einen flachen Raum zu erzeugen. Dabei trägt „normale“ baryonische Materie knapp 5 % zur Energiedichte bei und dunkle Materie, die ihren Namen erhalten hat, weil sie nicht elektromagnetisch wechselwirkt, rund 25 %. Den großen Rest von etwa 70 % steuert die dunkle Energie bei, welche die kosmische Expansion beschleunigt und keinerlei Strukturen bildet [1].

Dieses Modell wird flankiert durch die Paradigmen der kosmologischen Inflation und der Kalten Dunklen Materie (Cold Dark Matter, CDM). Der Inflation zufolge durchlief das Universum sehr kurz nach dem Urknall eine Phase beschleunigter Expansion, in der es sich mindestens um etwa das e^{60} -

fache ausdehnte [2]. Fluktuationen in Quantenfeldern wurden durch die Inflation zu makroskopischen Saatfluktuationen vergrößert, die durch die Gravitation weiter anwuchsen. So entstanden über kosmische Zeitskalen die Strukturen, die wir heute beobachten: Quasare, Galaxien, Galaxienhaufen und Superhaufen [3]. Dabei spielen die Eigenschaften der Dunklen Materie eine entscheidende Rolle. Hier hat sich das CDM-Modell durchgesetzt, weil heiße (d. h. relativistische) Teilchen die Entstehung der Galaxien zu stark verzögert hätten. Gemeinsam mit der Inflation und eingebettet in das allgemein-relativistische Modell steckt das CDM-Modell den Rahmen für die theoretische Untersuchung der kosmischen Strukturbildung ab und erlaubt präzise Aussagen darüber, wie und wann Galaxien, Quasare und Galaxienhaufen entstanden. Hält das Modell der Prüfung im Detail stand?

Eine Antwort auf diese Frage erfordert große Computersimulationen, um einerseits Vorhersagen über vergleichsweise kleine Objekte wie Galaxien zu gewinnen, andererseits aber große Volumina zu simulieren, um sehr seltene Objekte wie etwa helle Quasare im frühen Universum zu bekommen. Mit der „Millennium-Simulation“ hat das deutsch-englisch-kanadisch-amerikanische Virgo-Konsortium nun die weltweit größte derartige Simulation präsentiert [4]. Dem von Simon White am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching geleiteten Konsortium standen dazu 512 Prozessoren des neuen IBM-p690-Supercomputers am Rechenzentrum der Max-Planck-Gesellschaft in Garching zur Verfügung, die rund 350000 Prozessorstunden brauchten, um die Entwicklung der 14 Millionen Jahre nach dem Urknall vorhandenen Fluktuationen bis hin zu den heutigen Strukturen zu simulieren. Die Simulation umfasste einen würfelförmigen Ausschnitt des Universums mit einer Kantenlänge von 685 Mpc, der rund 40000-fachen Ausdehnung der Milchstraße. Dieses Volumen enthielt über 10 Milliarden „Teilchen“ von jeweils 10^9 Sonnenmassen. Damit reicht der dynamische Bereich der Simulation von kosmologisch sehr großen Skalen bis zu massearmen Galaxien wie etwa der Kleinen Magellanschen Wolke, einem Begleiter unserer Milchstraße.

Da die Simulation von baryonischer Materie zu „teuer“ ist, d. h.

zuviel Rechenzeit und Speicherplatz verbraucht, behandelt die Simulation ausschließlich Dunkle Materie. Dennoch erlaubt sie es, die Entwicklung von Galaxien detailliert zu beschreiben. Dazu werden zunächst schon während der Simulation gravitativ gebundene Strukturen aus Dunkler Materie, sog. Dunkle Halos, identifiziert. Später lässt sich dann genau rekonstruieren, welcher Halo sich wie entwickelt hat, wann er mit anderen Halos verschmolzen ist und wie er sich verändert hat. Diese Information wird anschließend verwendet, um mithilfe semi-analytischer Modelle zur Galaxienentstehung bestimmen zu können, welche Arten von Galaxien sich wo innerhalb der Simulation bilden, wie sie sich entwickeln und welche beobachtbaren Eigenschaften sie aufweisen. Qualitativ behandeln die semi-analytischen Modelle auf stark vereinfachte Weise, was mit dem durch die Dunkle Materie zusammen gehaltenen Gas in Galaxien passiert, wenn in ihm Sterne entstehen und vergehen.

Von den vielen Ergebnissen der Millennium-Simulation seien hier vier herausgegriffen. Zunächst bestätigt sie, dass das CDM-Modell im Einklang mit den Beobachtungen die Entstehung heller Quasare bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt erlaubt. Die wenigen Quasare, die sich in der Simulation ausreichend früh bilden, finden sich später in den Zentren der masse-reichsten Galaxienhaufen wieder. Zweitens gibt die Simulation die beobachtete räumliche Korrelation der Galaxien, also das Clustern in Galaxienhaufen und Superhaufen, perfekt wieder. Über weite Bereiche der räumlichen Ausdehnung folgt diese Korrelation einem Potenzgesetz, aber die Simulation zeigt, dass dies nur Zufall ist: Teilt man die Galaxien nach ihrer Helligkeit oder ihrer Farbe auf, zeigen die getrennt bestimmten Korrelationsfunktionen deutliche Abweichungen von Potenzgesetzen. Verglichen mit Beobachtungen, sind blaue Galaxien in der Simulation zudem weniger stark korreliert, rote dagegen stärker. Dies wird helfen, die Entstehung und Entwicklung der Galaxien besser zu verstehen. Schließlich bestätigt die Simulation, dass die Auswirkungen akustischer Schwingungen des Gases im jungen Universum auch in der heutigen Verteilung der Galaxien erkennbar sein sollten.

Damit stützt die Simulation das

CDM-Modell auf eindrucksvolle Weise, weist aber auch auf Lücken in unserem Verständnis der Galaxienentstehung und -entwicklung hin. Beispielsweise scheinen wir zwar gut zu verstehen, wie sich die gesamte Galaxienpopulation verhält, aber nicht, wie sich ihre wesentlichen Untergruppen (rote Galaxien bevorzugen dichte, „alte“ Umgebungen, blaue Galaxien sind jung) einzeln verhalten. Die 25 Terabyte Simulationsdaten, die die Verteilung der dunklen Materie und die Positionen dunkler Halos für zahlreiche Zeitschnitte sowie dazu noch Informationen über die Entwicklung der Halos enthalten, soll ein Virtuelles Observatorium anderen Astrophysikern zugänglich machen. Diese könnten den Datensatz, dessen Qualität und Quantität auf Jahre hinaus Maßstäbe setzen wird, dann u. a. nutzen für Untersuchungen des starken und schwachen Gravitationslinseneffekts, für Analysen der Verteilung von Halos und dunkler Materie sowie Tests von Modellen zur Entstehung und Entwicklung von Galaxien in Halos.

MATTHIAS BARTELMANN

- [1] C. Wetterich, Physik Journal, Dezember 2004, S. 43
- [2] M. Bartelmann, Phys. Blätter, September 2001, S. 41
- [3] V. Springel, Physik Journal, Juni 2003, S. 31
- [4] V. Springel, S. D. White et al., arxiv:astro-ph/0504097, erscheint voraussichtl. am 2. Juni in Nature

■ Flüssige Quarkmaterie

Am Relativistic Heavy Ion Collider wurde in Gold-Gold-Kollisionen ein neuer Materiezustand aus Quarks und Gluonen erzeugt. Dieser Zustand verhält sich allerdings entgegen mancher Erwartungen nicht wie ein ideales Gas, sondern vielmehr wie eine fast ideale Flüssigkeit.

Die Theorie der starken Wechselwirkung, die Quantenchromodynamik (QCD), sagt bei sehr hohen Temperaturen und Dichten einen neuen Zustand stark wechselwirkender Materie voraus, das Quark-Gluon-Plasma (QGP). Dieser Zustand, in dem das übliche „confinement“ der Quarks und Gluonen in Baryonen aufgehoben ist, existierte im frühen Universum

vermutlich in der Zeitspanne zwischen etwa 10 Pico- und 10 Mikrosekunden nach dem Urknall.

Um diesen Zustand im Labor herzustellen, kam 1983 die Idee für einen dedizierten Schwerionenbeschleuniger auf. Ab 1992 wurde daraufhin der Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) gebaut, in dem Goldkerne mit einer Energie von 200 GeV pro Nukleonpaar kollidieren, d. h. in einem zentralen Stoß von zwei Goldkernen steht im Schwerpunktsystem eine Energie zur Verfügung, die dem Hundertfachen der Ruhemasse der beiden Kerne entspricht. Diese riesige Energie führt zur Bildung eines sehr heißen Feuerballs, der schließlich in bis zu 5000 Hadronen (Protonen, Neutronen, Pionen, Kaonen ...) aufbricht.

Während der Planung und dem Bau von RHIC blieb die „community“ der Schwerionenphysiker nicht untätig, sondern begann 1986 zwei bereits existierende Protonen-Beschleuniger, das AGS in Brookhaven und das SPS am CERN, nach Bau von geeigneten Injektoren für Ionen zu nutzen, um stationäre Targets mit Kernen bis hin zum Blei zu bombardieren. Die Energien lagen

Prof. Dr. Matthias Bartelmann, Institut für Theoretische Astrophysik, Universität Heidelberg, Albert-Ueberle-Straße 2, 69120 Heidelberg