

Volker Springel

Das Universum im Supercomputer

Wie sind unsere Galaxien entstanden und wie entwickelten sie sich? Mit neuen Simulationsmodellen und Methoden numerischer Kosmologie wollen Astrophysiker Licht in das Dunkel bringen. Ausgangspunkt: kurz nach dem Urknall

Die Sonne ist nur einer von fast 100 Milliarden Sternen in unserer Heimatgalaxie, der Milchstraße. Mit bloßem Auge sehen wir davon aber nur einige der nächstgelegenen Sterne in unmittelbarer Nachbarschaft, und leider bewirkt die Lichtverschmutzung in unseren Städten, dass viele Menschen das Band der Milchstraße noch nie selbst am Nachthimmel gesehen haben.

Aber die Milchstraße ist bei Weitem nicht die einzige Galaxie im Universum. Mit modernen Teleskopen lassen sich Milliarden solcher Sterneninseln detektieren. Der US-amerikanische Astronom Edwin Hubble (1889–1953) führte vor gut 100 Jahren eine Klassifikation ihrer Gestalten ein, die auch heute noch benutzt wird. Grob unterscheidet man Scheibengalaxien, bei denen sich die Sterne in Kreisbahnen um das Zentrum bewegen, und elliptische Galaxien, bei denen die Sterne auf ungeordneten Bahnen laufen. Da es aber unglaublich viel Platz zwischen den Sternen gibt, führt das praktisch nie zu Kollisionen zwischen ihnen.

Edwin Hubble entdeckte auch, dass sich die Galaxien von uns wegzubewegen scheinen, und zwar umso schneller, je weiter diese entfernt sind. Dieses als Hubble-Expansion bezeichnete Phänomen lieferte

einen ersten entscheidenden Hinweis darauf, dass sich der Raum selbst ausdehnt, ähnlich dem Teig eines Hefezopfs, der tüchtig aufgeht und in dem man sich die Rosinen als Galaxien vorstellen mag. Die Rosinen bewegen sich dabei nicht relativ zum Teig, doch entfernen sie sich alle voneinander, und zwar umso rascher, je größer ihre aktuelle Distanz bereits ist.

In den vergangenen Dekaden führten Astronomen systematische Himmeldurchmusterungen durch, bei denen man neben der Winkelposition auch den Abstand von Hunderttausenden Galaxien bestimmen konnte. Die entstandenen dreidimensionalen Karten der Galaxienverteilung hielten eine weitere große Überraschung parat: Die Galaxien sind keinesfalls zufällig im Raum verteilt, sondern ordnen sich in einer netzartigen Struktur an, in der Galaxien entlang fadenartiger Ketten konzentriert sind, die in Knoten zusammenlaufen und mächtige Leerräume umspannen.

Woher kommt dieses kosmische Netz? Warum gibt es überhaupt Galaxien in den beobachteten Formen, Gestalten und Größen? Und wann und wie sind die Galaxien entstanden? Dies sind nur einige der grundlegenden Fragen, die die Kosmologie über die Galaxienentstehung beantworten will.

Was wie ein modernes Kunstwerk aussieht, ist die Visualisierung von kosmischen Strukturen: Die gravitativ kollabierten Teile aus Dunkler Materie (orange-weiß) sind in ein komplexes kosmisches Netz aus Dunkler Materie eingebettet. Einfallendes Gas wird in hydrodynamischen Stoßwellen (blau-weiße Flächen) aufgeheizt.

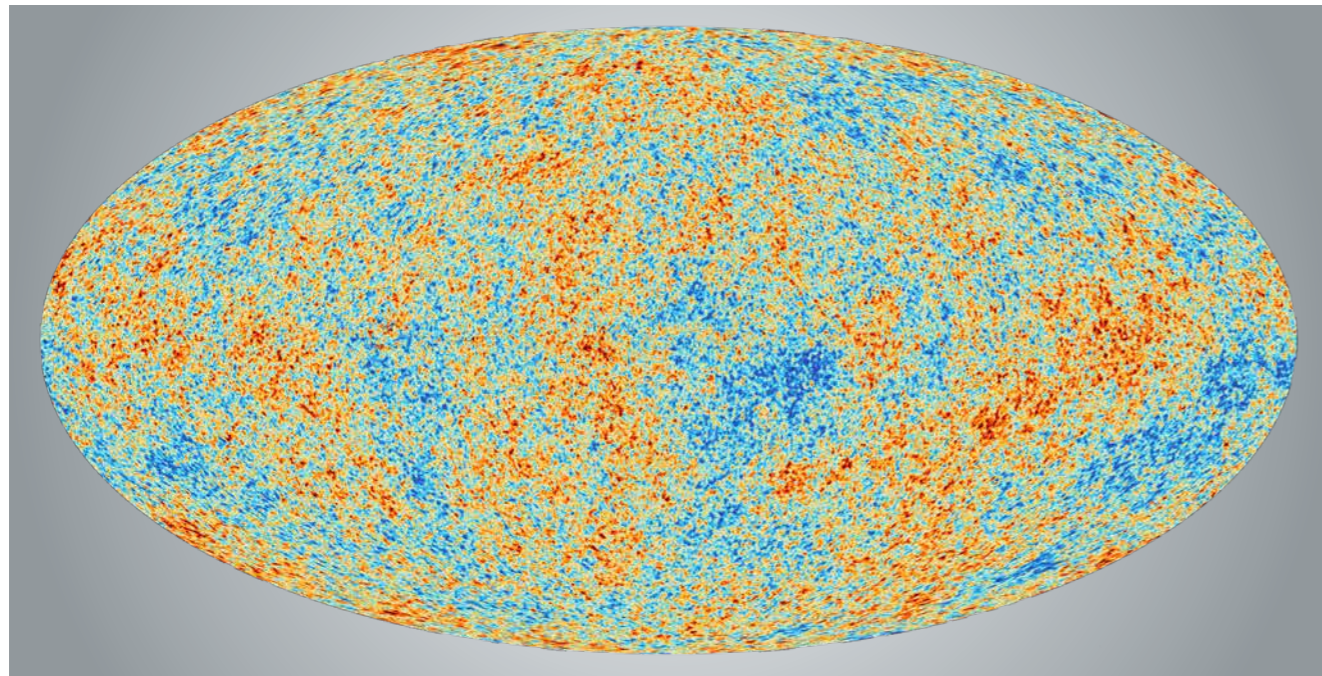


Illustration: European Space Agency, Planck Collaboration

Oben: Der Planck-Satellit der ESA hat den kosmischen Mikrowellenhintergrund zwischen 2009 und 2013 mit bisher unerreichter Genauigkeit beobachtet. Diese Karte des ganzen Himmels zeigt winzige Temperaturschwankungen der Wärmestrahlung, die uns aus allen Richtungen erreicht. Rechts: Schematische Darstellung der Raumausdehnung und Strukturentwicklung des Universums seit dem Urknall. Der Anfangszustand ca. 380000 Jahre nach dem Urknall (grünliche Fläche) lässt sich direkt im kosmischen Mikrowellenhintergrund beobachten.

Wer die Raumausdehnung quasi umkehrt und zurück in der Zeit extrapoliert, das heißt, eine Schätzung anhand der beobachteten Entwicklungstrends vornimmt, kommt rasch zu der Schlussfolgerung, dass das Universum in einem unglaublich dichten, heißen Zustand begonnen haben muss. Das ist der Urknall, vor etwa 13–14 Milliarden Jahren. Tatsächlich ist noch eine Restwärmestrahlung aus dieser Zeit zu sehen, der sogenannte kosmische Mikrowellenhintergrund. Dabei handelt es sich um Photonen, die freigesetzt wurden, als das Universum 380000 Jahre nach dem Urknall auf etwa 4000 Grad abgekühlt war.

Im heißeren Zustand vor diesem Zeitpunkt lag noch ein undurchsichtiges Plasma vor, aber nun konnten Wasserstoff und Heliumkerne ihre Elektronen einfangen und ein neutrales Gas bilden, sodass sich die Wärmestrahlung frei bewegen konnte.

Seit dieser Zeit hat die Raumausdehnung die Wellenlängen der Photonen allerdings um etwas mehr als einen Faktor 1000 gestreckt, sodass die Temperatur der Strahlung heute nur noch $2,73^\circ$ Kelvin ($-270,42^\circ$ Celsius) über dem absoluten Nullpunkt ($-273,15^\circ$ Celsius) liegt.

Satelliten wie das Mikrowellen-Weltraumteleskop Planck der European Space Agency (ESA) haben diese Strahlung sehr präzise vermessen, insbesondere ihre winzigen Temperaturschwankungen von nur etwa einem Zehntausendstel um die mittlere Temperatur. Mithilfe dieser statistischen Eigenschaften lassen sich verschiedene Annahmen über die Zusammensetzung des Universums präzise voraussagen und dann mit den Messungen vergleichen.

Die Schlussfolgerungen dieses Vergleichs strapazieren unsere

menschliche Erfahrungswelt. Denn der Energie/Materie-Inhalt des Universums besteht zu nur etwa 5 Prozent aus normaler Materie, das heißt den chemischen Elementen des Periodensystems. Etwa 25 Prozent ist dagegen sogenannte Dunkle Materie, vermutlich ein bislang noch nicht identifiziertes, extrem schwach wechselwirkendes Elementarteilchen, während gut 70 Prozent als Dunkle Energie vorliegt. Letztere wirkt der Schwerkraft entgegen und sorgt dafür, dass sich das Universum in den letzten 5 Milliarden Jahren beschleunigt ausdehnt, in Umkehrung der Wirkung der normalen Schwerkraft, die stets bremsend auf die Raumexpansion einwirkt. Die wahre physikalische Natur von Dunkler Materie und Dunkler Energie ist eines der fundamentalsten Rätsel in der modernen Physik.

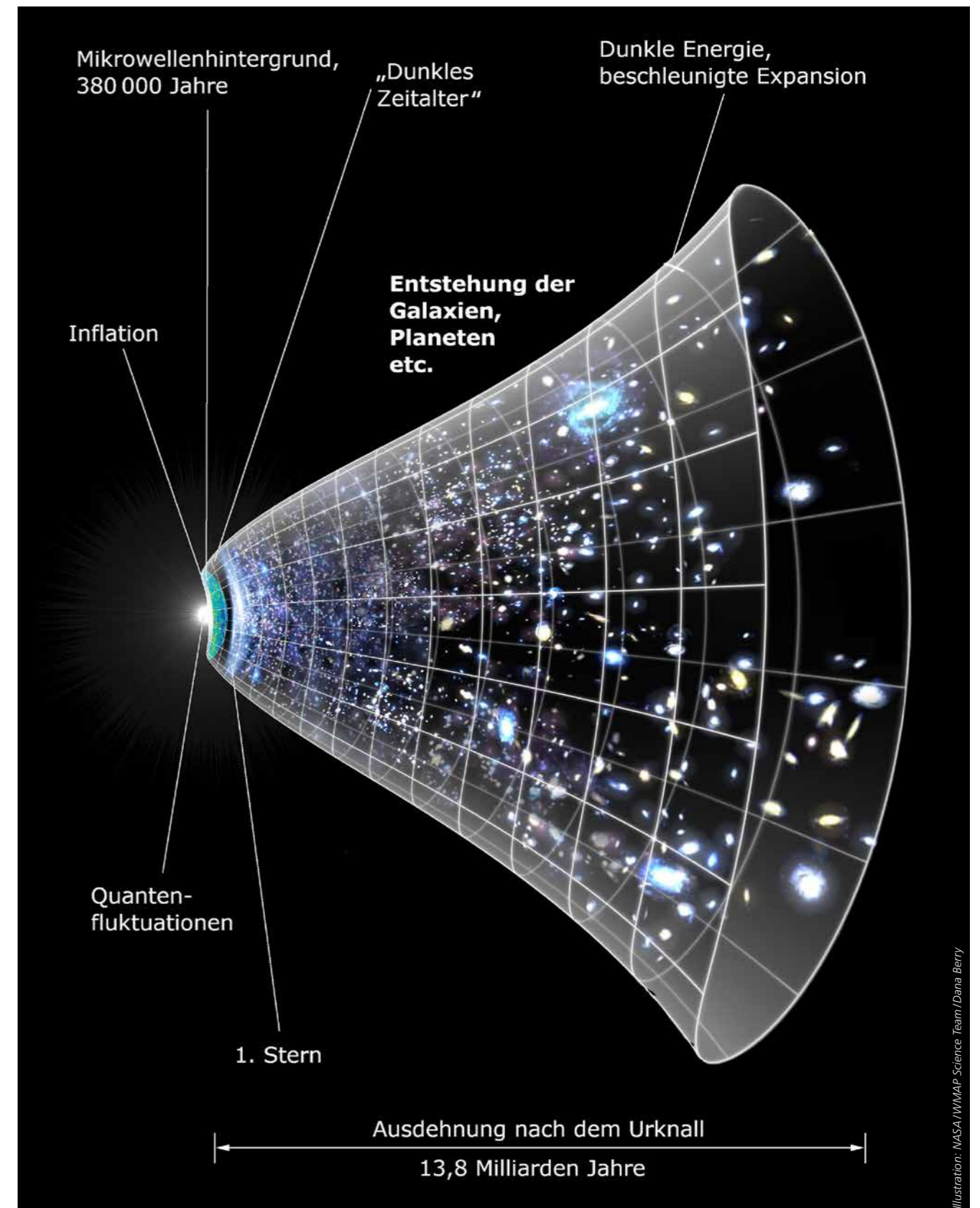


Illustration: NASA/WMAP Science Team / Dana Berry

Können in einem derartig seltsam zusammengesetzten Universum tatsächlich Galaxien entstehen, wie wir sie beobachten? Gemeinsam mit meiner Arbeitsgruppe und der internationalen Forschungsgemeinschaft versuche ich, mit Methoden der numerischen Kosmologie darauf Antworten zu finden. Dabei wird vom Zustand des Universums kurz nach dem Urknall ausgegangen, wie er im Mikrowellenhintergrund beobachtet wird. Zu dieser Zeit gab es noch keine Sterne und Galaxien, und auch exotische Objekte wie super-schwere Schwarze Löcher existierten noch nicht.

Die Forscherinnen und Forscher bilden diesen Anfangszustand nun auf einem Supercomputer nach und führen eine Entwicklungsrechnung vorwärts in der Zeit aus, auf Basis der bekannten physikalischen Gesetze. Wenn die Theorien über den Urknall und die dunklen Komponenten des Kosmos richtig sind, dann sollten diese Simulationen eigentlich Gala-

xien produzieren, die genauso aussehen wie beobachtet.

So einfach das Prinzip dieses Ansatzes ist, so schwierig ist es, ihn praktisch umzusetzen. Denn die zu berechnenden physikalischen Gesetze umfassen nicht nur Schwerkraft, Magnetohydrodynamik und Strahlungstransport, sondern auch Prozesse der Sternentstehung und Sternentwicklung, des Wachstums von superschweren Schwarzen Löchern und deren Energieeinspeisung im Zentrum von Galaxien. In der Summe ergibt sich ein sogenanntes Multiskalen- und Multiphysikproblem von enormer Komplexität, das mit speziell entwickelten Simulationsprogrammen bearbeitet wird.

Ein Beispiel: Mit dem AREPO-Code konnte ein spezielles Verfahren entwickelt werden, das ein unstrukturiertes, mit der Strömung mitbewegtes Gitter einsetzt, um die Hydrodynamik der kosmischen Gase zu simulieren. Das ermöglicht eine

automatische lokale Anpassung und hohe geometrische Flexibilität in der erzielten Auflösung und ist deshalb ideal, um die Galaxienentstehung auf dem Rechner zu verfolgen.

Gleichwohl sind die Anforderungen an die benötigte Rechenleistung enorm, um einen repräsentativen Ausschnitt des Universums zu simulieren. Glücklicherweise können moderne Supercomputer diese Leistung immer besser bereitstellen, dank oft mehrerer Hunderttausend zusammengeschalteter Rechenkern. Diese so einzusetzen, dass sie alle gemeinsam und gleichzeitig an einem stark gekoppelten System wie der Entwicklung des Universums arbeiten, stellt ein überaus anspruchsvolles algorithmisches Problem dar. Denn die Rechenoperationen auf den riesigen Datenmengen müssen so verteilt werden, dass einzelne Rechenkern nicht aufeinander warten müssen. Gelingt das erfolgreich, können unter Ausnutzung dieser Parallelisierung

Moderne hydrodynamische Simulationen der kosmischen Entwicklung: Jede Abbildung zeigt den gleichen Ausschnitt aus einer Simulation des Illustris-TNG-Projekts, nur dass jeweils eine andere physikalische Information visualisiert ist, angefangen von der Dunklen Materie über die Sternverteilung bis zur Röntgenleuchtkraft des ionisierten, heißen Gases zwischen den Galaxien.

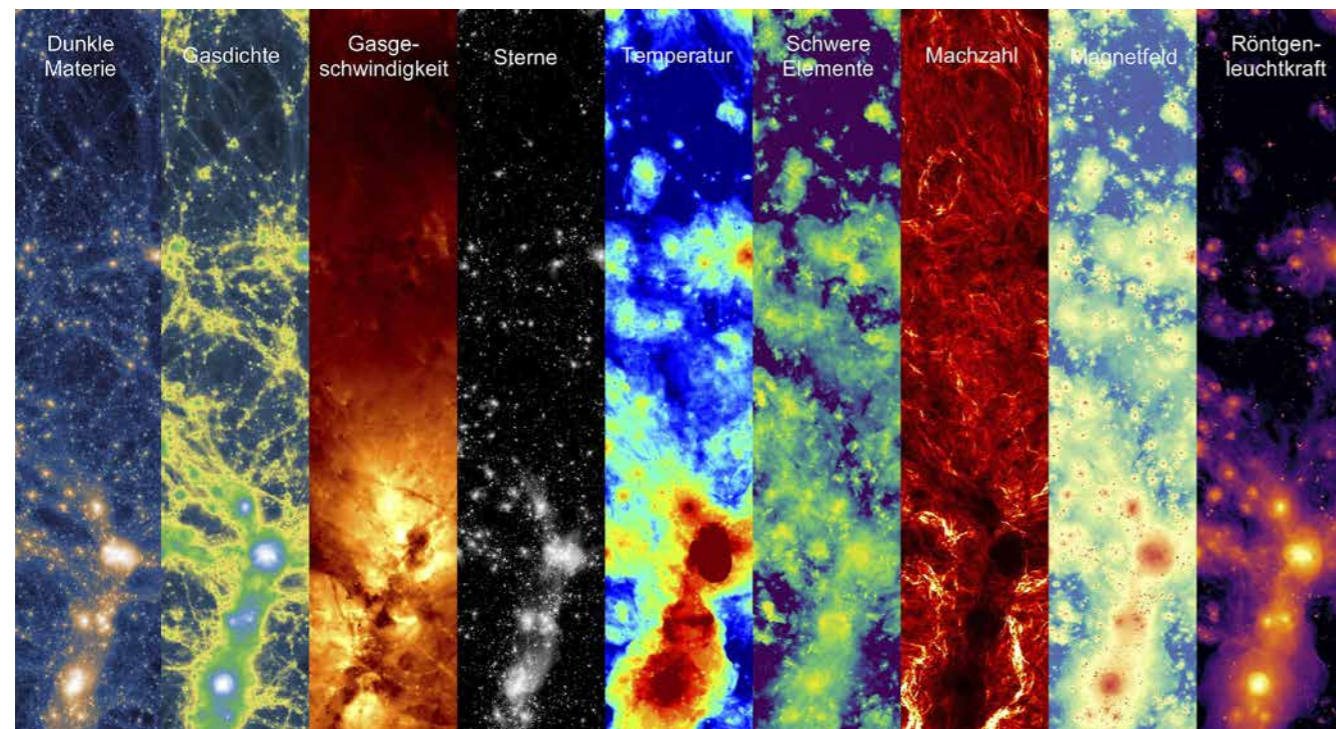


Illustration: IllustrisTNG Collaboration



Sonderbriefmarke der Deutschen Post zu Ehren des Illustris-Projekts.

die kosmologischen Simulationen enorm beschleunigt werden.

Beispielsweise haben die aufwendigen Simulationen des IllustrisTNG-Projekts zur Galaxienentstehung typischerweise etwa 20 Millionen Prozessorstunden benötigt, das heißt, mit einem einzelnen schnellen Rechenkern hätte das deutlich über 2200 Jahre gedauert. Als parallele Simulation auf einem Supercomputer mit circa 16000 Kernen konnte das Team dies in weniger als zwei Monaten bewältigen. Zum Verständnis: Das IllustrisTNG-Projekt ist eine der weltweit größten und kontinuierlichen astrophysikalischen Simulationsreihen, die ein Team international kooperierender Wissenschaftler seit 2011 durchführt.

Die in diesem Zusammenhang erzielten Ergebnisse haben sich als eine wahre Schatzkiste für das theoretische Verständnis der Galaxienentstehung erwiesen. Interessanterweise entstehen in den Rechnungen Galaxien unterschiedlicher Gestalt, deren Morphologie und Größe sehr den Beobachtungen gleicht. Auch die Verteilung der Galaxien im Raum weist ein Muster auf, dessen statistische Eigenschaften hervorragend mit der beobachteten Galaxienverteilung übereinstimmt. Das gilt sogar, wenn

man die Galaxien in feinere Gruppen einteilt, etwa nur blaue (aktiv sternbildende) oder rote Galaxien (kaum/keine jungen Sterne) betrachtet.

Besonders spannende Voraussetzungen betreffen die Rolle der supermassereichen Schwarzen Löcher im Zentrum der Galaxien. Während Galaxien wachsen, verschlingen diese Schwerkraftfallen enorme Mengen Gas. In großen Galaxien wachsen sie dabei auf Massen jenseits von 1 Milliarde Sonnenmassen an. Und in besonders aktiven Phasen werden dabei riesige Mengen Energie freigesetzt, die manche Objekte als Quasare strahlen lassen, heller als das kombinierte Licht aller Sterne der Wirtsgalaxie. Schon lange wurde vermutet, dass die Schwarzen Löcher dadurch auf Galaxien einwirken und ihre Entwicklung möglicherweise entscheidend beeinflussen können.

In IllustrisTNG wird diese Kopplung mitberechnet, wenn auch unter stark vereinfachenden Annahmen. Dadurch konnten wir bestätigen, dass der Einfluss der Schwarzen Löcher auf die Entwicklung von großen Galaxien besonders bedeutsam ist. Dort sorgen sie dafür, dass eine weitere Sternentstehung irgendwann un-

terdrückt wird, und zwar beginnend im Zentrum und dann auf die Außenbereiche übergreifend. Dadurch wirken sie als eine Art Begrenzer für die maximale Größe, die Galaxien erreichen können, und sie sorgen für die Erhaltung der charakteristischen roten Farbe der großen elliptischen Galaxien. Lässt man hingegen die Physik der Schwarzen Löcher in Simulationsrechnungen außen vor, entstehen unweigerlich Galaxien mit einer viel zu großen Sternmasse, die noch dazu blau sind. Solche Objekte gibt es im Universum nicht.

Ähnlich sieht es mit der Dunklen Materie aus. Lässt man diese in den Simulationen einfach weg oder gibt ihr ganz andere als die theoretisch vermuteten Eigenschaften, dann bilden sich entweder gar keine Galaxien oder nur solche, deren Eigenschaften stark von den beobachteten Galaxien in unserem Universum abweichen. Simulationsrechnungen können also die Gültigkeit kosmologischer und astrophysikalischer Theorien überprüfen. Derzeit spricht alles dafür, dass es die Dunkle Materie und die Dunkle Energie tatsächlich gibt.



Foto: MPA Garching

Professor Dr. Volker Springel ist Direktor am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching und Honorarprofessor an der LMU München. Er ist Gottfried Wilhelm Leibniz-Preisträger der DFG 2021.

Adresse: Max-Planck-Institut für Astrophysik, Karl-Schwarzschild-Straße 1, 85748 Garching

DFG-Förderungen in der Einzelförderung und in Koordinierten Verfahren, namentlich Sonderforschungsbereichen und Schwerpunktprogrammen.

www.mpa-garching.mpg.de/165768/Galaxy_Formation

