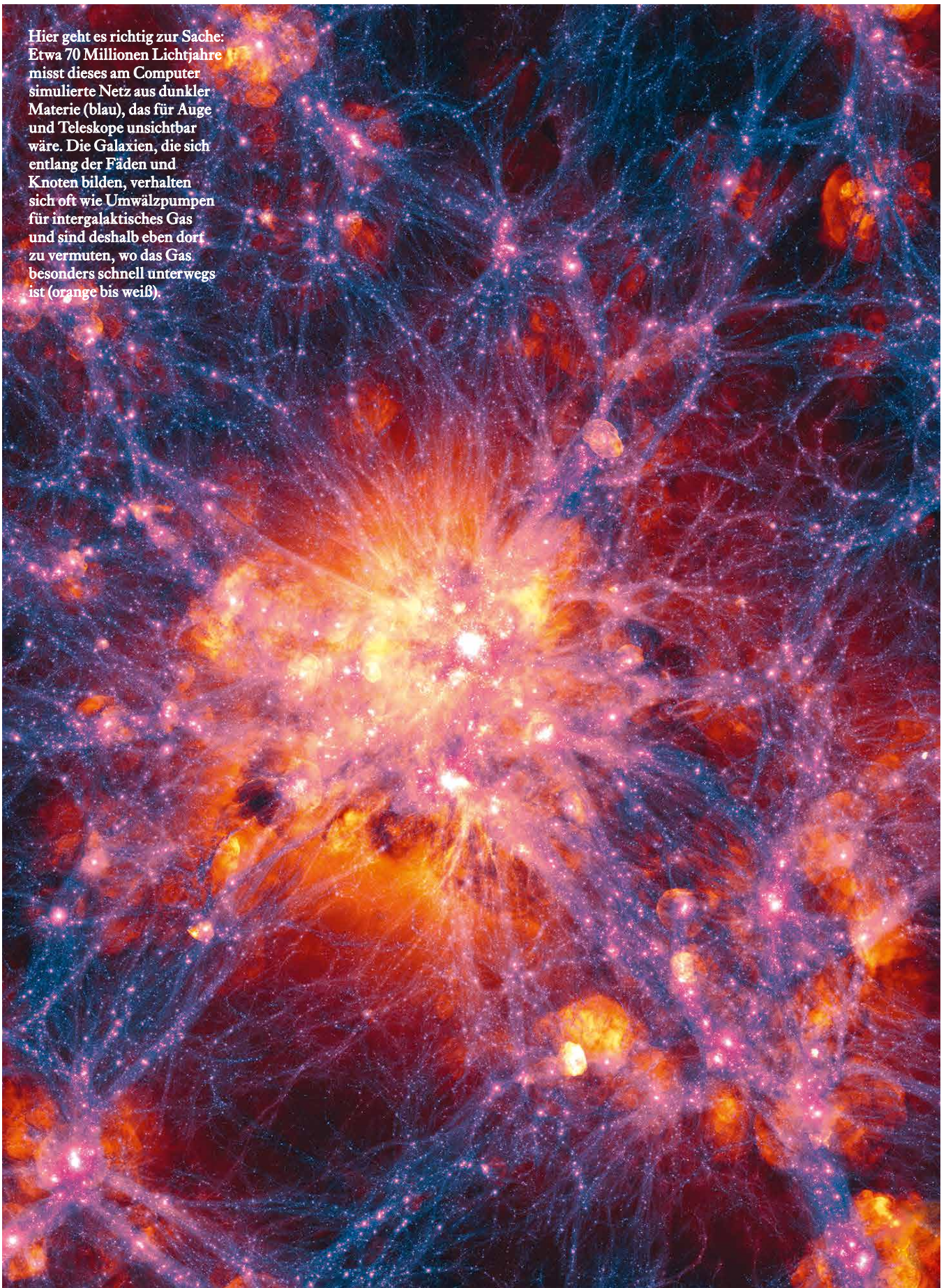


Hier geht es richtig zur Sache: Etwa 70 Millionen Lichtjahre misst dieses am Computer simulierte Netz aus dunkler Materie (blau), das für Auge und Teleskope unsichtbar wäre. Die Galaxien, die sich entlang der Fäden und Knoten bilden, verhalten sich oft wie Umwälzpumpen für intergalaktisches Gas und sind deshalb eben dort zu vermuten, wo das Gas besonders schnell unterwegs ist (orange bis weiß).



DAS DIGITALE UNIVERSUM

TEXT: THOMAS BÜHRKE

Dunkle Materie und dunkle Energie bestimmen, wie das Universum aussieht. Das ist aber auch schon so ziemlich das Einzige, was Kosmologinnen und Kosmologen über sie wissen. Ihre Natur ist noch völlig unklar. Beobachten lassen sie sich nicht, aber ein Team um Volker Springel am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching simuliert, wie die mysteriöse Materie und die rätselhafte Energie die Entwicklung des Alls geprägt haben – und lernt dabei nicht nur etwas über ihre Eigenschaften.

Wie geheimnisvolle Monolithe stehen Dutzende schwarzer Kästen im Garching Leibniz-Rechenzentrum. Miteinander verknüpft, bilden sie den leistungsfähigsten Supercomputer Deutschlands, den SuperMUC-NG. Unvorstellbare 27 Milliarden Rechenschritte pro Sekunde vollzieht diese Maschine – ideal für Volker Springels riesige Simulationen. Springel stieß Mitte der 1990er-Jahre zum Max-Planck-Institut für Astrophysik, als der Brite Simon White gerade mit dem Aufbau einer Forschungsgruppe begann. Der vielfach ausgezeichnete White gilt als einer der Pioniere von numerischen Simulationen der großräumigen Struktur im Kosmos. An-

ders gesagt: Mithilfe von Computermodellen ging er der Frage nach, wie sich aus dem heißen Gas nach dem Urknall im Laufe von Jahrtausenden die heute sichtbare Vielfalt an Galaxien und Galaxienhaufen bildete. Dabei geht es nicht nur darum, die Entwicklung des Universums so zu simulieren, dass dieses im Computer die Form annimmt, die sich heute mit Teleskopen beobachten lässt: Wenn die Rechnungen zum richtigen Ergebnis führen, ist dies vielmehr auch ein guter Hinweis darauf, dass die Kosmologinnen und Kosmologen die Prozesse dahinter richtig verstehen.

Anders als so mancher Astronom hat Springel niemals den Drang verspürt, den Himmel durch ein Teleskop zu beobachten. Der Wunsch, Physik zu studieren, war indes schon früh da, und bereits in der Schulzeit beschäftigte er sich mit der numerischen Seite der Astrophysik. „Tatsächlich habe ich an ‚Jugend forscht‘ mit einer Computersimulation teilgenommen“, erinnert sich der Wissenschaftler. Als er später auf Simon Whites Arbeiten aufmerksam wurde, war klar, dass er bei ihm promovieren wollte. Wie sich zeigte, war dies die richtige Wahl. Nach einigen wegweisenden Erfolgen

in den vergangenen zwanzig Jahren ist Volker Springel heute ein ebenfalls mit zahlreichen Auszeichnungen ge-

59

ehrter Wissenschaftler. Die kosmischen Simulationen laufen nach einem relativ einfachen Prinzip ab. In einem digitalen Volumen werden virtuelle Materieteilchen platziert. Anschließend verfolgt man in Zeitschritten ihre Bewegung, welche ausschließlich von der zwischen den Teilchen wirkenden Schwerkraft bestimmt wird. Die Anfangskonfiguration ist erfreulicherweise bekannt. Man erkennt sie in der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung. Diese entstand etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall und ist heute am gesamten Himmel als nahezu homogene Verteilung nachweisbar. „Mit dem europäischen Weltraumteleskop Planck haben wir in diesem Strahlungshintergrund ein Fleckenmuster mit kleinsten Fluktuationen messen können, das auf Dichteschwankungen im Urgas zurückgeht“, erklärt Springel. Entsprechend muss auch das Gas kurz nach dem Urknall verhältnismäßig homogen verteilt gewesen sein. Und diese Beobachtung liefert die Anfangsbedingungen für die Simulationen.



Die Dichteschwankungen im Urgas waren so gering, dass sich einzelne Regionen mit einer höheren Masseansammlung selbst in Jahrmilliarden unmöglich mittels eigener Schwerkraft zu den heutigen Galaxien und Galaxienhaufen hätten verdichten können. Ein wichtiger Grund: Wenn sich ein Gas zusammenzieht, erwärmt es sich und baut damit einen thermischen Druck auf, der einer weiteren Kontraktion beispielsweise zu Sternen entgegenwirkt. Man kennt dieses Phänomen von der Luftpumpe: Hält man das Ventil zu und presst die Luft zusammen, so erwärmt sich diese und lässt sich nicht weiter komprimieren. Und dennoch existieren die Galaxien. Daher postulierten Forschende bereits vor vierzig Jahren die Existenz von Dunkle-Materie-Teilchen als Geburtshelfern. Wenn diese sich aufgrund der Schwerkraft verdichten, bauen sie keinen Druck auf, der die weitere Kontraktion verhindern würde. Auf diese Weise formten die Teilchen der dunklen Materie riesige Gebilde. Diese wirkten als Schwerkraftfallen, in welche die normale Materie hineinströmte, sich langsam abkühlte und Sterne und Galaxien bildete. Simulationen helfen zu verstehen, wie sich dunkle Materie im Universum verteilt und welche Eigenschaften sie haben könnte. Dunkle Materie sendet kein Licht aus und verschluckt es auch nicht. Obwohl in jeder Sekunde vermutlich rund eine Milliarde Dunkle-Materie-Teilchen

unseren Körper durchqueren, ist noch unklar, woraus sie bestehen. Bekannt ist aber, dass ihr Masseanteil im Universum rund fünfmal größer ist als jener der normalen Materie, die sehr wohl mit Licht interagiert und damit für Teleskope sichtbar ist. Numerische Simulationen der kosmischen Evolution müssen aus diesem Grund stets sowohl die dunkle als auch die normale, für uns sichtbare Materie berücksichtigen. Aus Letzte-

Dunkle-Materie-Teilchen in einem würfelförmigen Volumen mit 1,6 Milliarden Lichtjahren Kantenlänge. Das Ergebnis stimmte in beeindruckender Weise überein mit der Verteilung von Galaxien im Universum, die von der Erde aus mit Teleskopen beobachtet werden kann: Galaxien sammeln sich in Gruppen und Haufen unterschiedlicher Größe. Diese sind wiederum miteinander zu Supergalaxienhaufen verbunden, die eine blasen-



AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Numerische Simulationen auf Superrechnern ermöglichen es, die Entwicklung des Kosmos vom heißen Urgas bis zu den heutigen Galaxien zu rekonstruieren.

Die Rechnungen berücksichtigen sowohl die sichtbare Materie, aus der alle Sterne und Planeten bestehen, als auch die dunkle Materie und die dunkle Energie und geben Aufschluss über deren Verteilung und Eigenschaften.

rer bestehen alle Sterne, die Planeten und auch wir Menschen.

Vor etwa zwanzig Jahren sorgte ein Team um Simon White und Volker Springel mit der Millennium-Simulation für große Aufmerksamkeit. Es war den Forschenden gelungen zu berechnen, wie sich die Verteilung der dunklen Materie im expandierenden Universum über Jahrmilliarden hinweg verändert haben muss. Sie nutzten dazu mehr als zehn Milliarden

artige Struktur aus Fäden und Wänden bilden und große Leerräume umschließen, ähnlich wie ein Schaum. Die Galaxien scheinen sich genau dort gebildet zu haben, wo sich gemäß der kosmologischen Simulation die dunkle Materie zusammenklumpt.

Mehrere Monate Rechenzeit waren nötig gewesen, um die Entwicklung der Dunkle-Materie-Teilchen seit dem Urknall vor 13,4 Milliarden Jahren bis heute in 11 000 Zeitschritten zu simu-

lieren. Ein großer Erfolg, dem aber zwei Mängel anhafteten. Zum einen repräsentierte jedes Teilchen in der Computersimulation eine Masse von 860 Millionen Sonnenmassen, was der Masse einer kleinen Galaxie entspricht. Die Simulation bildete die Verteilung der dunklen Materie daher immer noch mit sehr grober Auflösung ab. Zum anderen konnte die Millennium-Simulation ausschließlich die Verteilung dunkler Materie

Halos ist nämlich ein sehr dynamischer Vorgang: Dunkle-Materie-Halos können miteinander verschmelzen, es entstehen dabei etwa größere Strukturen mit kleinen Subhalos. Um der tatsächlich beobachteten Verteilung der Galaxien am nächsten zu kommen, simuliert die Königsklasse der Algorithmen die normale Materie gleich mit, aus der sich dann entlang der Schwerkraftfalle der dunklen Materie die Galaxien automatisch her-

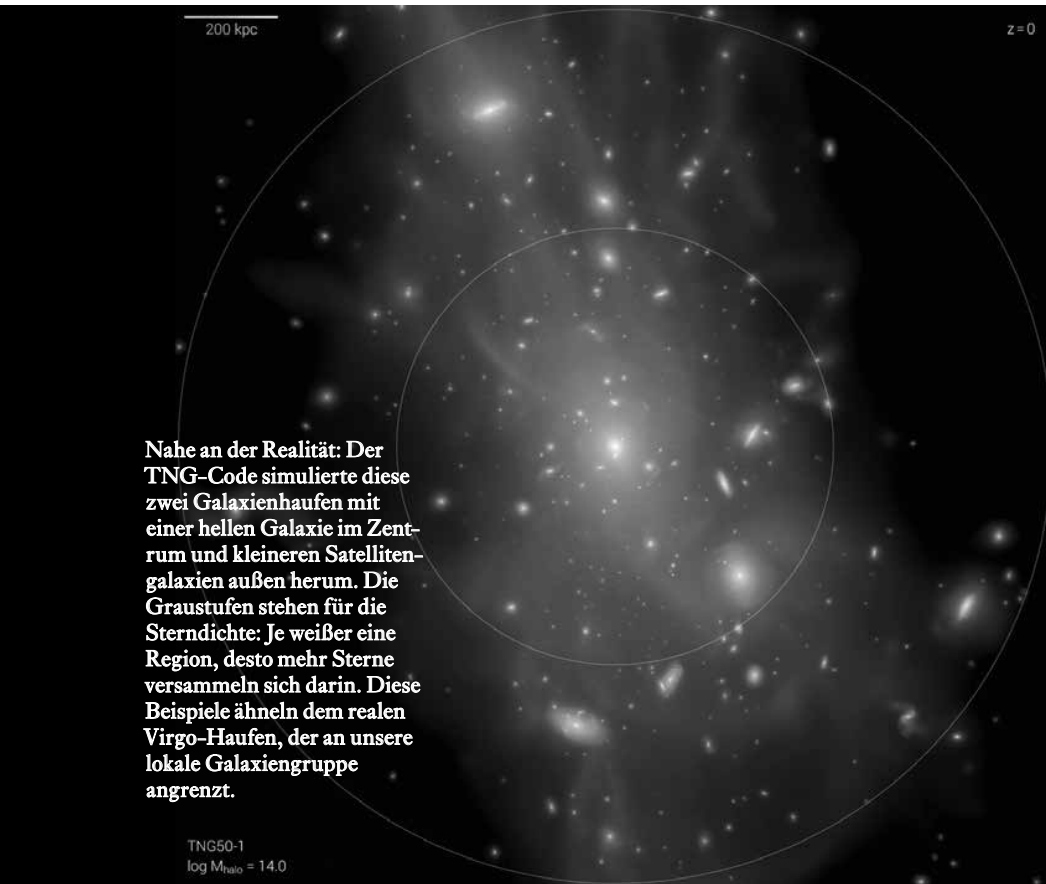
ren. Die kosmische Strukturbildung wird somit zu einem sich selbst regulierenden Prozess, in dem Sterne auf ihre Umgebung einwirken und so die Entwicklung der nächsten Generation von Sternen beeinflussen – und damit die Gestalt der Galaxien selbst.

Dieses komplexe Wechselspiel berücksichtigte erstmals die Illustris-Simulation. In ihr berechnete ein Team unter Leitung von Volker Springel und Mark Vogelsberger vom Massachusetts Institute of Technology zahlreiche physikalische Wechselwirkungen der dunklen und der normalen Materie über die gesamte kosmische Geschichte hinweg. Und auch wenn sie ein Universum simulierten, das nur etwa ein Siebzigstel der Größe der Millennium-Simulation hatte, haben sie damit ein wahres Rechenmonster geschaffen. Das Ergebnis war indes verblüffend: Die ausgefeilten Modelle ließen tatsächlich eine realistische Population von Galaxien entstehen, wie wir sie heute beobachten.

Ein Auge fürs Detail ⁶¹

Ein Trick war hier für das Gelingen entscheidend: der sogenannte Moving-Mesh-Code namens Arepo. Arepo unterteilt das simulierte Universum nicht wie üblich in ein starres Gitter, sondern verwendet ein sich bewegendes Gitter, dessen Zellengröße sich dynamisch den Gegebenheiten anpasst: Wo viel passiert, verengt sich das Gitter, sodass es kleinere Details rechnen kann, dafür weitet es sich in aktivitätsarmen Regionen. Mit dieser Zoomtechnik verringert sich der Rechenaufwand erheblich.

Das Team beobachtete so, wie etwa 50 000 Galaxien unterschiedlicher Größe entstehen und sich entwickeln, und verglich die Ergebnisse direkt mit den Beobachtungen. Dabei entdeckten die Forscherinnen und Forscher mit Illustris, dass bei der simulierten Evolution des Universums all jene Typen von Galaxien entstehen, die Edwin Hubble schon im frühen 20. Jahrhundert klassifiziert hatte. Mit der Nachfolgersimulation, The Illustris Next Generation, kurz Illus-

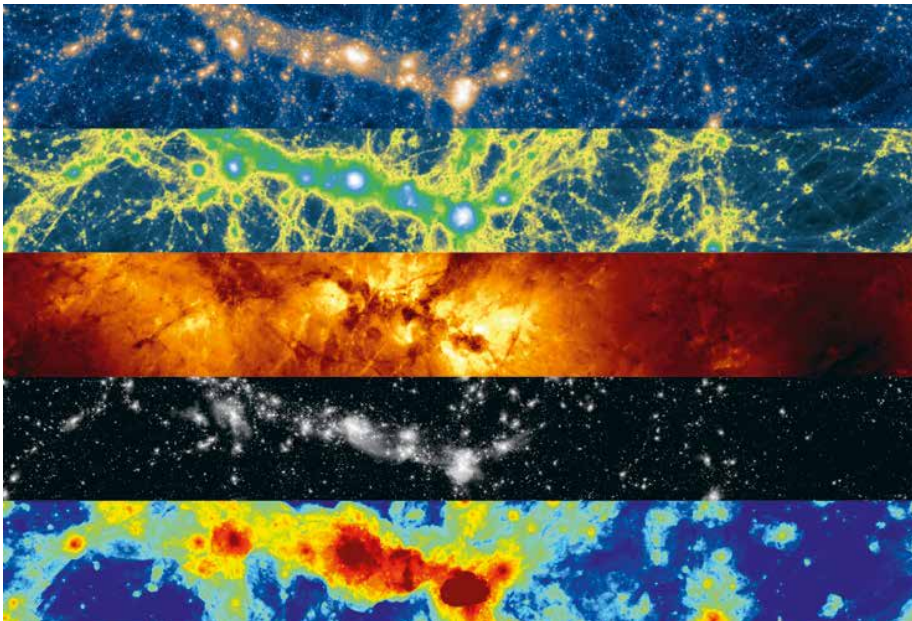


Nahe an der Realität: Der TNG-Code simulierte diese zwei Galaxienhaufen mit einer hellen Galaxie im Zentrum und kleineren Satellitengalaxien außen herum. Die Graustufen stehen für die Sterndichte: Je weißer eine Region, desto mehr Sterne versammeln sich darin. Diese Beispiele ähneln dem realen Virgo-Haufen, der an unsere lokale Galaxiengruppe angrenzt.

berechnen. Die normale Materie wurde am Schluss in Form leuchtender Galaxien mit einem einfachen, sehr unsicheren Verfahren ergänzt.

Schon bald wurde klar, dass die Entstehung von Galaxien nicht nur von der Größe der Dunkle-Materie-Strukturen, auch Halos genannt, abhängt. Vielmehr spielen auch deren Entstehungszeit, Rotation, Form, Dichteverteilung und mögliche Unterstruktur eine Rolle. Die Entwicklung der

ausbilden. Das erfordert einen erheblich höheren Aufwand, weil man dann physikalische Vorgänge berücksichtigen muss, die bei der dunklen Materie nicht auftreten: Wenn sich etwa normale Materie verdichtet, erwärmt sie sich, bis in sehr dichten Teilen von Gaswolken die Kernfusion zündet und Sterne entstehen. Insbesondere massereiche Sterne verändern mit intensiver Strahlung und heftigen Teilchenwinden wiederum ihre Umgebung, bis sie als Supernovae explodieren.



Vielschichtig: Ein und derselbe, etwa 350 Millionen Lichtjahre breite Ausschnitt der Illustris-TNG-Simulation in verschiedenen Darstellungsformen. Von oben nach unten: Dunkle-Materie-Dichte, Gasdichte, Geschwindigkeitsverteilung des Gases, Sternendichte und Gastemperatur.

62

trist-TNG, erhielten die Forschenden Simulationen unterschiedlicher räumlicher Zoomstufen und konnten damit sogar Galaxienhaufen und das Verhalten darin enthaltener Galaxien über Milliarden von Jahren studieren. Vor wenigen Jahrmilliarden etwa war das Universum besonders aktiv. Hier verschmolzen vermehrt Galaxien miteinander, was viel Materie in die Nähe supermassereicher Schwarzer Löcher in den Zentren der Galaxien spülte. Gebündelte Teilchenstrahlen, sogenannte Jets, schleuderten Teile davon wiederum in das intergalaktische Gas. Diese kosmischen Umwälzpumpen, auch aktive Galaxienkerne genannt, beobachtet man tatsächlich, und sie beeinflussen – sowohl in der Simulation als auch in der Realität –, ob und wie viele Sterne in der Galaxie entstehen. Ein weiterer Mechanismus der Selbstregulation.

Mit Illustris-TNG gingen die Forschenden noch weitere Fragen an, etwa wie sich die galaktische Materie mit schweren Elementen anreicherte. Kurz nach dem Urknall sind fast nur die leichtesten Elemente entstanden, Wasserstoff und Helium. Alle anderen, schweren Elemente des Periodensystems, wie Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff oder Eisen, wurden erst später im Innern von Sternen durch

Kernfusion gebildet. Von dort gelangten sie durch Teilchenwinde oder bei Sternexplosionen ins interstellare Medium, wo sie als Rohstoffe für neue Sterne und Planeten zur Verfügung standen. Sterne nachfolgender Generationen müssten also höhere Anteile schwerer Elemente enthalten als Sterne früherer Generationen. Diese chemische Evolution beobachten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler tatsächlich innerhalb unserer Milchstraße sowie in fernen Galaxien. Und auch hier punktet die Illustris-TNG-Simulation: Ihre Vorhersagen zum mittleren Alter der Sterne und deren Gehalt an schweren Elementen stimmt gut mit den Beobachtungen überein.

Die Welt im Computer sieht also der realen Welt schon sehr ähnlich. Das liegt – außer an der enormen Rechenleistung – an cleveren Computer-codes, die astrophysikalische Zusammenhänge aus Beobachtungen in Parameter der Simulation übersetzen. Direkt simulieren kann man die Entstehung der einzelnen Sterne mit Illustris-TNG nämlich nicht, denn selbst in der am höchsten auflösenden Variante repräsentiert jedes Masselement der normalen Materie 85 000 Sonnenmassen und jedes der dunklen Materie sogar 450 000 Sonnenmassen.

Da heute aber weitgehend bekannt ist, unter welchen Bedingungen (Größe, Dichte, Temperatur) eine interstellare Wolke kollabiert und wie viele Sterne mit welcher Masse in ihr entstehen, kann man diesen Vorgang mitrechnen. So vollzieht sich virtuell eine astrophysikalische Evolution über Jahrmilliarden hinweg.

Klein trifft Groß

Aus kosmologischer Sicht sind die Volumina, in denen Illustris-TNG die dunkle und die normale Materie gleichzeitig simuliert, noch relativ klein. Mit einer neuen Simulation namens Millennium-TNG, die im letzten Jahr veröffentlicht wurde, schlossen die Forscherinnen und Forscher nun an die Millennium-Simulation an, welche den bis dato größten Ausschnitt des Universums simulierte. Millennium-TNG übertrifft selbst diese Größe und bildete einen tausendmal größeren Raumbereich ab, als es noch mit Illustris-TNG möglich war.

Millennium-TNG benötigte vier Monate Rechenzeit, um zu verfolgen, wie sich in einer Region mit 2,4 Milliarden Lichtjahren Durchmesser etwa einhundert Millionen Galaxien ent-



wickelten. Das war damit wohl die aufwendigste aller Simulationen, die im selben Jahr in München durchgeführt wurden. „Wir mussten die Effizienz des Codes enorm steigern, um das Programm überhaupt zum Laufen zu bringen“, erklärt Springels Kollege Rüdiger Pakmor, der maßgeblich an Millennium-TNG gearbeitet hat. Insbesondere die optimale Parallelisierung über 120 000 Rechenkern hinweg war eine erhebliche Herausforderung. „Wir konnten nicht alle 300 000 Kerne nutzen, weil wir damit den restlichen Betrieb in der Zeit völlig lahmgelegt hätten.“

Die Mühe hat sich gelohnt: Millennium-TNG hat mehr als drei Petabyte an Simulationsdaten geliefert – das ist etwa so viel, wie mehrere Hundert handelsübliche Festplatten heute speichern können. Bislang sind die Daten nur zum Teil ausgewertet, viele Fragen warten noch auf Antworten, so zum Beispiel jene nach der

Galaxienentstehung im jungen Universum. Das James-Webb-Weltraumteleskop hat jüngst Galaxien aufgespürt, die schon wenige Hundert Millionen Jahre nach dem Urknall zu enormer Größe angewachsen zu sein scheinen – zumindest legt das ihre große Leuchtkraft nahe. „Mit diesem raschen Wachstum tun sich unsere Simulationen noch recht schwer“, sagt Springel. „Vielleicht ist die Sternentstehung kurz nach dem Urknall viel effizienter gewesen als zu späteren Zeiten, oder vielleicht sind damals massereiche, leuchtkräftige Sterne in höheren Anteilen entstanden, was diese Galaxien ungewöhnlich hell macht“, ergänzt Pakmor. Auch hier können Simulationen Hinweise geben, was damals wirklich passiert ist.

Die Simulationen bestätigen eindrucksvoll das heutige Standardmodell der Kosmologie. Es erreicht eine Präzision, von der vor zwei Jahrzehnten noch kaum jemand zu träumen ge-

wagt hätte, und ist in sich widerspruchsfrei, was auch nicht immer der Fall war. Aber: Es funktioniert nur, wenn die Simulationen die ominöse dunkle Materie und die noch rätselhaftere dunkle Energie berücksichtigen. Letztere lässt das Universum beschleunigt expandieren. Die Kosmologinnen und Kosmologen stehen heute also vor der erstaunlichen Erkenntnis, dass sie zwar die rund 14 Milliarden Jahre währende Evolution des Kosmos recht genau rekonstruieren können, jedoch über die Natur der beiden Hauptakteure – dunkle Materie und dunkle Energie – fast nichts wissen.

←

Die Schöpfer von Millennium-TNG bei der Arbeit: Gemeinsam interpretieren Volker Springel (links) und Rüdiger Pakmor die Dunkle-Materie-Strukturen des Universums, das sie mithilfe eines Supercomputers simuliert haben.

63



FOTO: AXEL GRIESCH FÜR MPG

←