

# Der Kosmos im Computer

Die Arbeitsgruppe »Theoretische Astrophysik« schlägt eine Brücke vom Universum kurz nach dem Urknall bis zur Gegenwart. In den fortgeschrittensten Supercomputersimulationen untersuchen die Forscher, wie sich aus der einst homogen verteilten Materie die heutige Vielfalt von Galaxien entwickeln konnte.

Von Volker Springel

**A**stronomie und Astrophysik beschäftigen sich mit dem wohl größten aller denkbaren Forschungsgegenstände: dem Universum als Ganzem. Tatsächlich sprengen die Dimensionen der Zahlen in diesen Disziplinen die menschliche Vorstellungskraft und Erfahrungswelt. Welche physikalische Größe man auch betrachtet – ob Temperatur, Dichte, Druck oder Magnetfeldstärke –, im Universum finden wir dafür fast durchweg Zahlenwerte, die um viele Größenordnungen über allem liegen, was wir auf der Erde und in unseren Laboratorien je werden messen können.

Schon grundlegende Tatsachen über den Kosmos übersteigen unseren Erfahrungshorizont. Wir wissen heute, dass das Universum etwa 13,6 Milliarden Jahre alt ist, dass dieses Raumzeitgebilde expandiert und dass sich die Expansion sogar immer weiter beschleunigt. Wir wissen, dass Sterne viele hundert Millionen Jahre lang leben – aber nicht ewig –, dass Planeten um andere Sterne eher die Regel als die Ausnahme sind und dass große Galaxien gewaltige Schwarze Löcher beherbergen.

Vielleicht die größte Zumutung, welche die moderne Kosmologie für unseren Verstand bereithält, ist aber die Entdeckung, dass das Universum vor allem so genannte Dunkle Materie und Dunkle Energie enthält. Erstere besteht aus einer bislang noch nicht nachgewiesenen Teilchenart, die sich vor allem durch ihre Schwerkraftwirkung verrät. Die Dunkle Energie ist noch rätselhafter. Forscher machen sie für die beschleunigte Ausdehnung des Kosmos verantwortlich.

Im Universum dominieren also keineswegs die Atome der »normalen«, so genannten baryonischen Materie. Vielmehr repräsentiert der Stoff, aus dem wir selbst ebenso wie Sterne und Galaxien bestehen, gerade einmal vier Prozent der kosmischen Energiedichte.

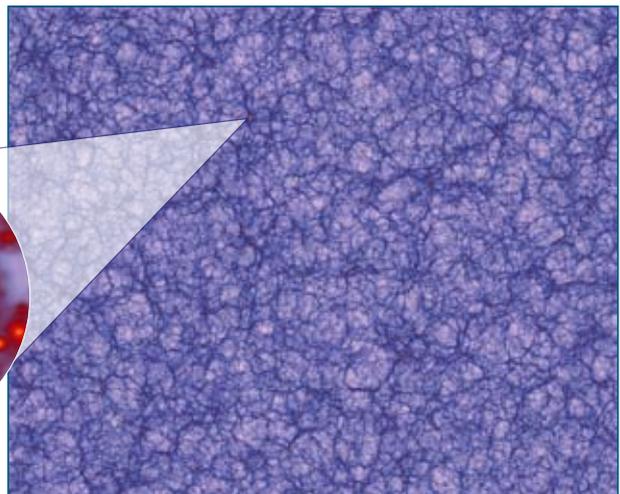
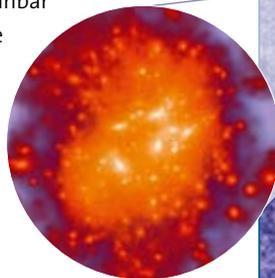
Diese Erkenntnis verdanken wir dem Lambda-CDM-Modell (*Lambda Cold Dark Matter*), das als Standardmodell der Kosmologie gilt. Als umfassende Theorie des Universums erklärt es eine Vielzahl astronomischer Daten und macht auch genaue Voraussagen darüber, wie das All unmittelbar nach dem heißen Urknall vor 13,6 Milliarden Jahren

ausgesehen hat. Zu jener Zeit waren Materie und Strahlung fast perfekt gleichmäßig verteilt, abgesehen von winzigen Abweichungen, den Folgen von Quantenfluktuationen in einer frühen Phase des Urknalls. Diese lassen sich noch heute messen, denn sie sind dem extrem gleichmäßigen »Hintergrund« aus Mikrowellenstrahlung aufgeprägt, der das All erfüllt. Die Astronomen vermuten, dass die Schwankungen gleichsam die Saatkörner für alle späteren von der Schwerkraft geformten Materiestrukturen im Universum darstellen.

Um die Entstehung dieser Strukturen zu untersuchen, sind wir mittlerweile nicht mehr allein auf Beobachtungen angewiesen. Vielmehr haben sich Computersimulationen als außerordentlich wichtiges neues Forschungsinstrument etabliert. Dank ihrer Hilfe lassen sich komplexe physikalische Gleichungssysteme lösen, ohne dass wir auf Vereinfachungen zurückgreifen müssen, welche die Ergebnisse verfälschen. Auch virtuelle astrophysikalische Experimente sind nun möglich. Im Computer können wir beispielsweise zwei Galaxien kollidieren und miteinander verschmelzen

## Vom großen Ganzen zum Detail

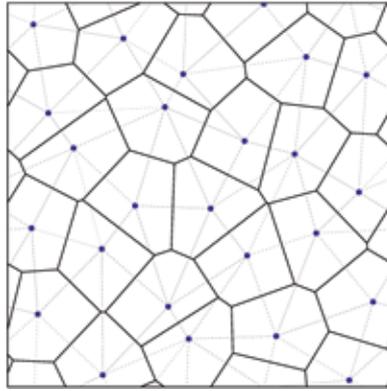
**In den Filamenten aus Dunkler Materie**, die im Lauf der Millennium-XXL-Simulation entstehen, bilden sich ganze Haufen von Galaxien, im Bildausschnitt rechts erkennbar als kleine, helle Flecken. Die Kantenlänge dieses zweidimensionalen Ausschnitts aus der Simulation beträgt mehrere Milliarden Lichtjahre. Zoomt man in sie hinein (kreisförmiger Bildausschnitt, Durchmesser rund 20 Millionen Lichtjahre), sieht man die Materieansammlungen in höherer Auflösung. Je heller hier die Bildpunkte, desto größer ist die Dichte der Dunklen Materie.



ALLE ABILDUNGEN DIESER ARTIKELS: VOLKER SPRINGEL

## Dem Geschehen dynamisch auf der Spur

Um Gase oder Flüssigkeiten in einem Volumen zu untersuchen, kann man den Raum in statische Zellen unterteilen. Besser ist jedoch ein Voronoi-Gitter (Grafik), wie es der Simulationskode AREPO für die Berechnung von strömenden Gasen verwendet. Jede Zelle umfasst den Raumbereich, der dem zugehörigen Punkt am nächsten liegt. Die Wände zwischen den Zellen sind die Ebenen, welche die Verbindungsstrecken (gepunktet) benachbarter Punkte in der Mitte senkrecht durchschneiden. Verschiebt man die Punkte mit der lokalen Gasgeschwindigkeit, verändert sich das Gitter dynamisch. Die räumliche Auflösung des Verfahrens ist dadurch gerade dort besonders hoch, wo viel geschieht.



lassen. Solche Verschmelzungsprozesse spielen eine entscheidende Rolle beim Aufbau immer größerer Galaxien. Während wir sie in der Natur nie beobachten können – schließlich benötigen sie Jahrtausende –, lassen sie sich nun am Rechner simulieren.

Genau solchen Experimenten widmet sich meine Arbeitsgruppe »Theoretische Astrophysik« am Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS). Mit ihnen wollen wir eine Brücke vom Universum kurz nach dem Urknall, als es sich durch nur wenige Parameter vollständig beschreiben ließ, bis zu seinem heutigen komplexen Zustand schlagen. Vor allem haben wir uns zum Ziel gesetzt, das Phänomen der Galaxienbildung über die gesamte Zeit seit dem Urknall aufzuklären.

Bei der Entstehung von Galaxien ist ein außerordentlich breites Spektrum an physikalischen Prozessen im Spiel. Es reicht von der Dynamik der Dunklen Materie und der Dunklen Energie über Vorgänge bei der Sternentstehung bis hin zur Entwicklung superschwerer Schwarzer Löcher, zu elektromagnetischen Strahlungsprozessen und zur Magnetohydrodynamik. Es sind vor allem Computersimulationen, welche diese Komplexität berechenbar machen.

Ein aktuelles Beispiel dafür ist die Millennium-XXL-Simulation, die wir unlängst mit Kollegen des internationalen Virgo-Konsortiums auf dem JuRoPa-Supercomputer am Forschungszentrum Jülich durchgeführt haben. In diesem Modell verfolgen wir die Entstehung kosmischer Strukturen wie Galaxien

und Galaxienhaufen. Es enthält 303 Milliarden ( $6720^3$ ) Dunkle-Materie-Bausteine, die eine würfelförmige Raumregion mit einer Kantenlänge von weit mehr als zehn Milliarden Lichtjahren erfüllen. Die Dunkle-Materie-Bausteine unserer Simulation sind dabei nicht als Elementarteilchen zu verstehen. Vielmehr ist jeder einzelne von ihnen ein fiktives Makropartikel mit einer Milliarde Sonnenmassen.

### Die weltgrößte kosmologische Simulation

Ihre Auflösung und ihr Volumen machen Millennium-XXL, die ihren Vorgänger darin um den Faktor 30 übertrifft, zur weltweit größten kosmologischen Simulation überhaupt. Sie liefert unerreicht genaue statistische Daten über die großräumige Struktur des Kosmos und die Entstehungsgeschichte von etwa 500 Millionen Galaxien.

Diese Daten sind unerlässlich, um zukünftige Beobachtungsprogramme, welche die zeitliche Entwicklung der Dunklen Energie im Universum und ihre physikalische Natur ergründen sollen, zu kalibrieren und systematische Fehlerquellen auszuschließen. Der Grundgedanke besteht darin, dass die beobachtbare Galaxienverteilung Rückschlüsse auf die tatsächliche Materieverteilung im Universum zulässt. Welcher Art diese Beziehung ist, die vom Galaxientyp und auch von der Zeit abhängt, können wir dank der Simulationsdaten genau untersuchen. In der Materieverteilung finden wir wiederum so genannte baryonische akustische Oszillationen, die ihrer-

seits eine Signatur der Expansionsgeschichte des Alls darstellen und damit wichtige Hinweise auf die Eigenschaften der Dunklen Energie geben.

Seit den frühen 1980er Jahren hat sich die Zahl der Teilchen in den jeweils größten kosmologischen Simulationen etwa alle eineinhalb Jahre verdoppelt. Diesem langjährigen Trend zufolge hätte die Millennium-XXL-Simulation erst im Jahr 2015 möglich sein sollen. Dass sie schon heute realisiert wurde, ist unseren neuen Strategien im Umgang mit extrem großen Datenmengen und den darauf aufbauenden Galaxienmodellen zu verdanken. Sie fanden ihren Niederschlag zum einen in einer speziell angepassten Version unserer Simulationssoftware GADGET3. Zum anderen reizten wir die Möglichkeiten des JuRoPa-Supercomputers am Forschungszentrum Jülich voll aus.

Dort schufteten alles in allem 12288 Prozessoren gemeinsam an der Rechnung. In insgesamt fast drei Millionen Arbeitsstunden führten sie 86 Trilliarden Kraftberechnungen aus. Jede einzelne davon ermittelt die gravitative Wechselwirkung eines einzelnen Dunkle-Materie-Bausteins mit allen anderen Komponenten der Simulation. Dank der Parallelisierung der Berechnungen erhielten wir das Ergebnis schon nach 9,3 Tagen. Ein gewöhnlicher Computerprozessor, der eine Rechnung nach der anderen ausführt, hätte dazu gut 300 Jahre benötigt.

Einer der wichtigsten Faktoren, welche die Größe solcher Simulationen beschränken, ist der Speicherbedarf. Für unseren neuen Code entwickelten wir daher auch besonders speichereffiziente und schnelle Berechnungsverfahren. Am Ende benötigte die Rechnung für die 303 Milliarden Teilchen dennoch fast 30 Terabyte oder 30 000 Gigabyte Hauptspeicher, womit wir den uns zugeteilten Speicher des Superrechners vollständig ausnutzten.

Das riesige Volumen der Millennium-XXL-Simulation erlaubt es, auch extrem seltene Ereignisse und Objekte aufzuspüren, beispielsweise sehr massereiche Galaxienhaufen. Das Lambda-CDM-Modell sagt voraus, dass die Masse von Galaxienhaufen eine recht scharf definierte Obergrenze im Bereich von einigen  $10^{15}$  Sonnenmassen besitzt. In jüngster Zeit wurden tatsächlich einige Exemplare entdeckt, die recht nahe an dieser Grenze liegen. Manche Forscher behaupten sogar, sie lägen bereits darüber. In der Millennium-

XXL-Simulation bilden sich tatsächlich auch Galaxienhaufen, die ein wenig mehr Masse besitzen. Noch besteht daher kein offensichtlicher Grund zur Besorgnis: Alle Galaxienhaufen, die je beobachtet wurden, lassen sich weiterhin mit dem kosmologischen Standardmodell erklären. Doch schon die Entdeckung eines einzigen Haufens, dessen Masse diese Grenze deutlich überschreitet, könnte es widerlegen.

### Eher ein Gas als eine Flüssigkeit

Trotz ihrer beeindruckenden Größe besitzt die Millennium-XXL-Simulation einen Nachteil: Über kleinräumige Strukturen und Vorgänge in einzelnen Galaxien trifft sie nur wenige Aussagen. Schließlich ist selbst ein Objekt von der Größe der Milchstraße durch gerade einmal 1000 Bausteine repräsentiert. Hinzu kommt: Unsere Simulation behandelt die normale baryonische Materie der Einfachheit halber als stoßfreies Fluid; als einzige Wechselwirkung ist also die Schwerkraft berücksichtigt. Tatsächlich unterliegt die Materie aber Druckkräften und verhält sich damit eher wie ein ideales Gas. Außerdem kann sie thermische Energie verlieren, indem sie Strahlung abgibt. Unter der Wirkung der Schwerkraft kann sie also, weil sie von Hitze weniger stark auseinandergetrieben wird, noch viel stärker verklumpen als Dunkle Materie.

Diese Unterschiede von baryonischer und Dunkler Materie werden auf kleinen Skalen wichtig. Wir müssen also die baryonischen Prozesse korrekt simulieren, wenn unser Modell auch über die inneren Regionen von Galaxien Aussagen treffen soll. Die Berechnung des hydrodynamischen Verhaltens normaler Materie erweist sich allerdings als ausgesprochen anspruchsvoll. Die typische Dichte des Wasserstoff- und Heliumgases, das sich zu sternbildenden Galaxien verdichtet, ist sehr niedrig. Ein solches ideales Gas, in dem praktisch keine innere Reibung stattfindet, neigt über einen sehr weiten Skalenbereich hinweg stark zu Turbulenzen. Zudem führen große Unterschiede in Temperatur, Dichte und Geschwindigkeit zu gewaltigen Überschallströmungen. Und schließlich »spürt« auch jedes Teilchen im Gas die Schwerkraft aller anderen Gaspartikel. Während diese so genannte Eigengravitation bei strömungsmechanischen Problemen auf der Erde völlig vernachlässigbar ist, gewinnt sie in der Astrophysik entscheidende Bedeutung. So kontrahiert

etwa eine Gaswolke nur deshalb allmählich zu einem Stern, weil sich die Teilchen gegenseitig anziehen.

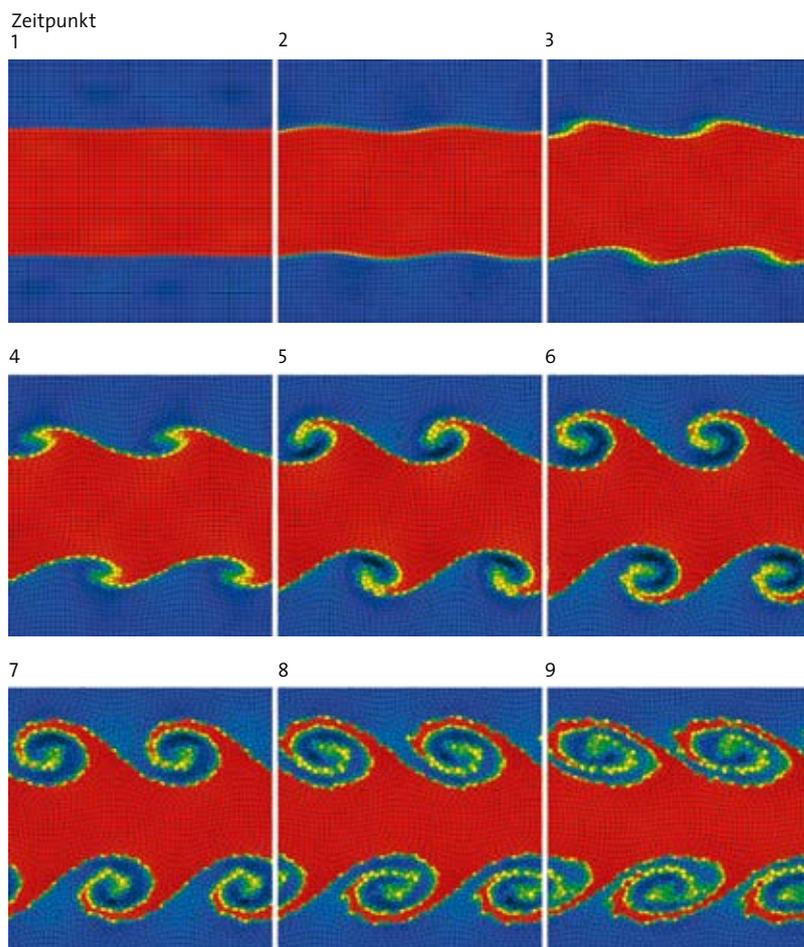
Astrophysiker müssen also neue Wege gehen, um geeignete numerische Verfahren für die Kosmologie zu entwickeln. Die zentrale Idee des Ansatzes zur Simulation baryonischer Gase, den unsere Gruppe entwickelt hat, ist der Einsatz eines unstrukturierten Gitters, das im Unterschied zu herkömmlichen Verfahren nicht stationär ist, sondern sich mit dem Gas mitbewegen kann. Dadurch lässt sich genau dort, wo die relevanten Prozesse stattfinden, eine hohe Auflösung erzielen. Bei der neuen Methode gehen wir von einem Satz von Punkten im Raum aus, die jeweils von einer so ge-

nannten Voronoi-Zelle umgeben sind. Diese besteht einfach aus derjenigen Raumregion, die näher an diesem Punkt liegt als an irgendeinem anderen. Gemeinsam bilden die Voronoi-Zellen dann ein Voronoi-Gitter, das den Raum gewissermaßen pflastert. Die Wände zwischen den Zellen sind die Ebenen, welche die Verbindungsstrecken benachbarter Punkte in der Mitte senkrecht durchschneiden (siehe Abbildung S. 11). Nun kann man, während sich Gestalt und Topologie des Gitters kontinuierlich ändern, die Bewegung der einzelnen Punkte der lokalen Bewegung des Gases anpassen.

Darüber hinaus gelang es uns, ein so genanntes Godunov-Verfahren höherer Ord-

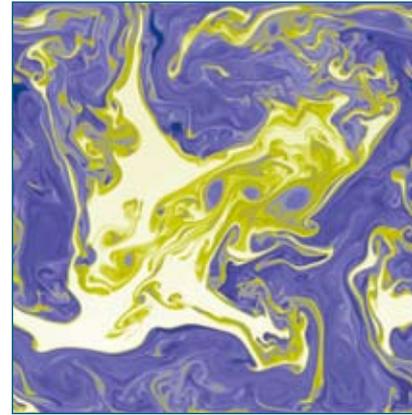
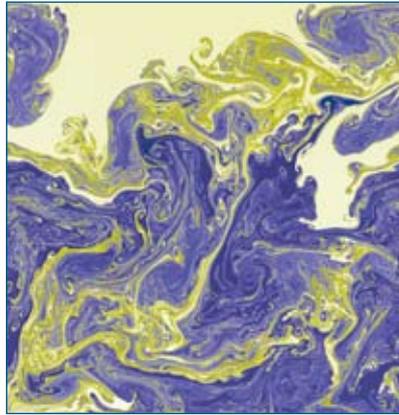
### Klügere Algorithmen, weniger Artefakte

**Bewegen sich zwei Phasen eines Gases** aneinander vorbei – im Beispiel fließt eine dichte Phase (rot) nach rechts, eine weniger dichte (blau) nach links –, entsteht eine so genannte Scherströmung, die zu typischen Kevin-Helmholtz-Wirbeln führt (unterste Zeile). Ein dynamisch mitbewegtes Voronoi-Gitter (schwarz umrandete Gitterzellen) erlaubt es, sie korrekt und ohne Artefakte darzustellen.



## Näher an der Realität

**Rayleigh-Taylor-Instabilitäten** führen dazu, dass sich zwei Phasen eines Fluids turbulent miteinander vermischen. Das Bild links zeigt das Simulationsergebnis bei mitbewegtem Gitter, rechts kam ein traditionelles festes Gitter zum Einsatz. Letzteres führt zu größeren Advektionsfehlern, so dass sich die simulierten Fluide lokal viel stärker als in der Realität vermischen. Auch die feine Schichtung der Phasen geht früher verloren.



nung auf dem bewegten Gitter zu implementieren. Mit seiner Hilfe können wir mit analytischen Methoden bestimmen, wie viel Masse, Energie und Impuls eine Zelle nach jedem Zeitschritt enthält.

### Mitfließende Gitter

Der wesentliche Vorteil ist dabei der lagrange-sche Charakter der Methode. Wenn irgendwo im Universum eine neue Galaxie entsteht und sich die Gasdichte in dieser Region millionenfach erhöht, dann fließt das Gitter automatisch mit. Es erlaubt also genau dort eine stark erhöhte räumliche Auflösung, wo die Galaxie entsteht. Daneben erweisen sich die Zahlenwerte der Ergebnisse, anders als in traditionellen Gittermethoden, als vollständig unabhängig vom verwendeten Bezugssystem.

Das fließende Gitter verringert zudem Advektionsfehler. Zu diesem Typ von Berechnungsfehler kommt es, wenn ein Masseteilchen mit der Strömung mitgeführt wird und dabei nicht vollständig, sondern nur teilweise von einer Zelle in die nächste übertritt, so dass es zu einem unerwünschten Ausschmieren der Strömung kommt. Wegen der diskreten Struktur des Gitters lässt sich dieser Vorgang mathematisch nicht exakt darstellen. In einem bewegten Gitter kann die Zelle hingegen passend mitbewegt werden, so dass sich viele Advektionsfehler von vornherein vermeiden lassen und ein künstliches Mischen in hohem Maß verhindert wird.

Ein Beispiel zeigen die Bilder links. Hier strömen unterschiedlich dichte Gase aneinander vorbei. Dabei wachsen kleine Störungen an der Grenzfläche schnell zu wellenartigen Wirbeln heran, welche die beiden Phasen schließlich turbulent miteinander vermischen.

Will man diese so genannten Kelvin-Helmholtz-Instabilitäten numerisch beschreiben, führen Advektionsfehler in der Regel dazu, dass sich die Phasen im Modell früher vermischen als in der Realität. Indem wir diese Fehler stark reduzieren, können wir Überschallströmungen und Turbulenzen mit größerer Präzision darstellen (Bilder links und oben). Deshalb wollen wir das neue Verfahren auch in unserer Simulationssoftware AREPO einsetzen. An ersten Rechnungen dieser Art arbeiten wir bereits intensiv, sowohl mit Kollegen am Harvard Center for Astrophysics in Cambridge (Massachusetts) als auch im Virgo-Konsortium.

Außerdem wollen wir in der nächsten Zeit endlich die Entstehung von Spiralgalaxien besser verstehen lernen. Sternsysteme dieses Typs sind zwar die häufigsten im Universum, doch in bisherigen Simulationen bildeten sich fast ausschließlich elliptische Galaxien. Wir vermuten die Gründe dafür in einem unzureichenden Verständnis der Regulation der Sternentstehung durch bestimmte astrophysikalische Prozesse wie etwa die Explosion von Sternen als Supernovae. Auch die mangelnde Genauigkeit der bisher eingesetzten numerischen Methoden spielt eine Rolle. Zumindest dieses zweite Problem wird unser neuer AREPO-Kode möglicherweise lösen können.

Die vielleicht größte Aufgabe der Kosmologen besteht in diesen Jahren aber darin, die Rätsel um die Dunkle Seite des Kosmos aufzuklären. Mit unseren Simulationen versuchen wir, sie dabei zu unterstützen – indem wir physikalische Modelle überprüfen helfen, die eines Tages unser gesamtes Universum beschreiben könnten. ∞

### DER AUTOR



**Volker Springel** hat in Tübingen und an der University of California in Berkeley Physik studiert und im Jahr 2000 an der Ludwig-Maximilians-Universität München promoviert.

Als Postdoc war er an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) und am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching, wo er anschließend bis 2010 eine Forschungsgruppe zur numerischen Kosmologie leitete. Seither ist er Professor für Theoretische Astrophysik an der Universität Heidelberg. Hier forscht er am Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS) und am Astronomischen Recheninstitut des Zentrums für Astronomie.

### QUELLEN

**Springel, V.:** E pur si muove: Galilean-invariant Cosmological Hydrodynamical Simulations on a Moving Mesh. In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 401, S. 791–851, 2010. Vorab publiziert auf <http://arxiv.org/abs/0901.4107>

**Vogelsberger, M. et al.:** Moving Mesh Cosmology: Numerical Techniques and Global Statistics. Eingereicht. Vorab publiziert auf <http://arxiv.org/abs/1109.1281>

### WEBLINK

[www.h-its.org/tap](http://www.h-its.org/tap)

Details zu Millennium-Simulationen und weiteren Simulationsprojekten der HITS-Arbeitsgruppe Theoretische Astrophysik