

1.2 Runs

Computersimulationen des Unsichtbaren am Max-Planck-Institut für Astrophysik

Das dreifach dunkle Bild

Ein Bild (Abb. 19) war der Anlass dafür, eine Studie am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching bei München durchzuführen. Das Bild schaffte es auf das Cover von *Nature*,¹ es diente als Hintergrund für das Poster eines Symposiums der *International Astronomical Union* und als Animation wird es immer wieder in Fach- und Populärvorträgen verwendet.²

Zwei Besonderheiten machen dieses Bild für uns interessant. Erstens beruht es nicht auf Beobachtungsdaten, sondern auf den Resultaten einer Computersimulation. Es beansprucht zwar, etwas zu zeigen, das in der Natur tatsächlich existiert, aber dieses Etwas schreibt sich nicht – wie vermittelt auch immer – in das Bild ein. Vielmehr beruht dieses Bild auf allgemeinen Naturgesetzen, speziellen Annahmen über das zu simulierende Objekt und computertechnischen Anpassungen. Es ist also kein Lichtbild, nicht einmal ein Strahlungsbild im weiteren Sinne. Seine Grundlage, die Simulationsdaten, sind erst einmal überhaupt nicht bildhaft. Uns interes-

1 | Bd. 435, Heft 7042 (2005). Der zugehörige Artikel, die Hauptpublikation zur *Millennium*-Simulation, ist Springel et al. 2005.

2 | U.a. in dem Eröffnungsvortrag Simon Whites auf dem erwähnten Symposium und in dem öffentlichen Vortrag mit dem Titel »From the Big Bang to the Milky Way« von Joe Silk am Tycho-Brahe-Planetarium in Kopenhagen am 10.06.08.

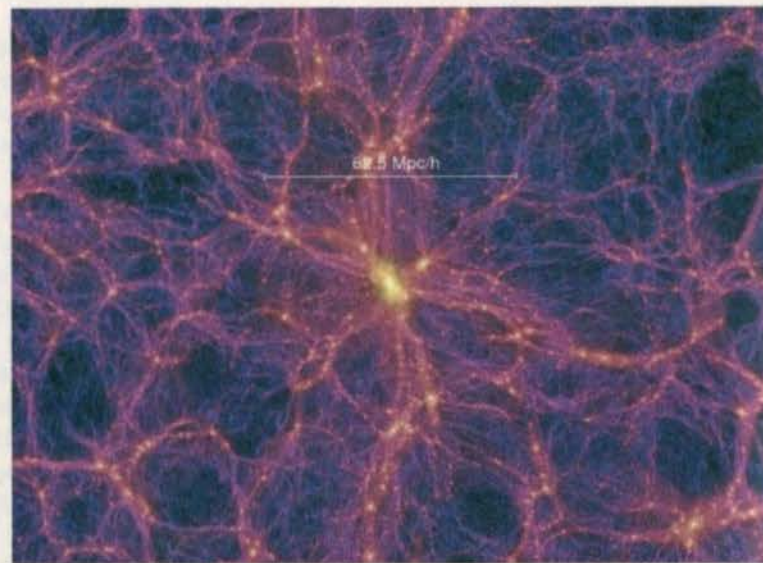


Abb. 19: Typische Visualisierung aus der Millennium-Simulation, Erläuterung im Text (© Volker Springel, Max-Planck-Institut für Astrophysik, Garching).

siert, ob dies zu einer besonderen Bildpraxis führt, wie und wofür also aus den Simulationsdaten Datenbilder gemacht werden.

Die zweite Besonderheit besteht darin, dass **das auf dem Bild gezeigte Objekt selbst unsichtbar ist.** Das Bild zeigt nämlich die Verteilung der Dunklen Materie im Universum. Die Dunkle Materie ist nicht einfach in einem alltäglichen Sinne dunkel, das heißt zu schwach leuchtend oder zu weit entfernt, um mit Teleskopen gesehen zu werden. Die Dunkle Materie ist an sich unsichtbar, weil sie überhaupt keine Strahlung aussendet (oder technischer ausgedrückt: nicht elektromagnetisch wechselwirkt). Für die Astrophysik ist sie aber ungeheuer wichtig, weil sie den Hauptteil der Materie im Universum ausmacht. Noch dazu ist sie als Wissenschaftsobjekt ziemlich jung. Damit stellt sich die Frage, wie die Dunkle Materie ohne lange Bild- und Vorstellungstradition veranschaulicht wird.

Zwei gute Gründe, nach Garching zu fahren, um die Entstehung des Bildes, die zugrunde liegende Simulation und die Bildpraxis in der theoretischen Astrophysik zu beobachten, zu beschreiben und zu erklären.

Das »Forschungszentrum Garching« ist eine Ansammlung verschiedenster Forschungseinrichtungen, einschließlich der mathematischen und naturwissenschaftlichen Fakultäten der Münchener Universität, etwas

außerhalb von Garching.³ Das Max-Planck-Institut für Astrophysik – zur Unterscheidung vom Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik (MPE) halboffiziell als »MPA« bezeichnet – befindet sich ganz am Ende des »Kosmos Garching«. Auf unser Bild treffen wir aber schon lange, bevor wir das Institutsgebäude überhaupt sehen.

Im U-Bahnhof »Garching« führt eine lange Rolltreppe hinunter zu den Gleisen. Entlang dieser Rolltreppe ist die Ausstellung »Bilder aus den Wissenschaften 2007« der Max-Planck-Gesellschaft aufgebaut. Auf 27 großen Tafeln sieht man Farbdrucke aus der Forschung der verschiedenen Max-Planck-Institute. Die Bilder zeigen nicht Wissenschaftler oder Geräte *bei* der Arbeit, sondern es handelt sich um Bilder *aus* der Arbeit. Es sind Bilder, die in dieser oder ähnlicher Form in der Forschungspraxis selbst eine Rolle spielen.

Als wir, die Rolltreppe hinunterfahrend, ziemlich weit unten das Dunkle-Materie-Bild (Abb. 19) sehen, erkennen wir es sofort.⁴ Wir wissen, *was* es zeigt und *wie* es dies zeigt. Für die übrigen 26 Bilder gilt dies nicht. Bei diesen können wir nur schauen, vermuten, raten oder sie einfach bewundern. Die meisten Bilder sind bunt, perfekt gestaltet und damit angenehm anzusehen. Aber wir sind bei kaum einem in der Lage zu sagen, was es darstellt. Oft ist es den Bildern nicht einmal anzusehen, ob sie auf Beobachtungen oder auf Simulationen beruhen und ob sie etwas sehr Großes oder sehr Kleines zeigen. Auch die Disziplin, aus der die Bilder stammen, ist bei vielen nicht zu erschließen. Erklärungen zu den Bildern gibt es in der Ausstellung selbst keine. Man muss sich schon ins das Garchinger Rathaus begeben, um sich die zugehörige Broschüre zu besorgen, die die Auflösung dieser »Bilderrätsel« bereithält.

Die U-Bahnstation »Garching-Forschungszentrum« hat man mit Namen und Zitaten berühmter Wissenschaftler ausgestaltet und die Inhalte ihrer Forschung durch Formeln und Diagramme zumindest angedeutet. In der Station »Garching« hingegen wird das reine Bild gezeigt. Die einzige Texttafel ganz am Anfang der Ausstellung verklärt die völlige Dekontextualisierung und behauptet ein Umschlagen in abstrakte Kunst:

»Die Wissenschaft überschreitet immer wieder neue Grenzen, um bisher Unbekanntes zu erforschen und Ungesehenes sichtbar zu machen. Neben der rein wissenschaftlichen Dokumentation der Forschungsobjekte entstehen dabei oft auch Bilder mit überraschend ästhetischen Formen und Struk-

³ | Vgl. Heßler 2007a.

⁴ | Das dort gezeigte Bild enthält allerdings nicht den Maßstab mit der Bezeichnung »62,5 Mpc/h«. Zur Erläuterung der Einheit, siehe Anmerkung 11.

turen: abstrakte Kunstwerke aus einer dem menschlichen Auge verborgenen Welt.»⁵

Das Bild als isoliertes Bild ist also auch in einem dritten, jetzt metaphorischen Sinn, dunkel:⁶ **Es zeigt nicht die Bedingungen seiner Herstellung. Es erklärt sich nicht als Bild.** Dies, nämlich das Bild in seiner Genese und in seiner Funktion zu verstehen, soll dieser Text ermöglichen. Das ist allerdings – um es von vornherein zu sagen – nicht ganz einfach. Ein Bild aus der aktuellen astrophysikalischen Forschung *nicht* zu verstehen, mag ärgerlich sein. Ein solches Bild hingegen verstehen zu wollen, ist zumindest mühevoll. Denn ohne ein gewisses Verständnis von Computersimulationen und ohne ein klein wenig Astrophysik ist dies weder möglich noch sinnvoll. Wir werden also versuchen, alle drei Formen von Dunkelheit zu beleuchten. Man wird dann nicht nur etwas über Bildherstellung, sondern auch über Computersimulationen und über Dunkle Materie erfahren. Es geht darum, diejenige Form der Wissenschaft besser zu verstehen, aus der das Bild für die Ausstellung herausgerissen wurde.

Simulationen und Visualisierungen am MPA

Sowohl Simon White, Direktor am MPA, als auch Volker Springel, Leiter der *Galaxy Formation Group*, der uns während unseres Aufenthalts betreut, hatten uns gewarnt: Das MPA sei ein theoretisches Institut, an dem nicht beobachtet würde, folglich gebe es für uns, die wir hauptsächlich an Visuellem interessiert seien, nicht viel zu sehen.

Der erste Eindruck im Institut ist ein anderer: In allen Büros hängen großformatige Ausdrucke der eigenen Visualisierungen, man findet Bilder aus *Star Wars*, jemand hat eine Galaxie auf dem selbstgestrickten Pullover, das Dunkle-Materie-Bild dient als Bildschirmhintergrund, bei einer internen Besprechung liegt der Tisch voller Farbausdrucke, Konferenzplakate sind mit Visualisierungen hinterlegt und jedes *Monthly Research Highlight* auf der MPA-Website muss mit einem Bild versehen sein.

Und dennoch: Halb aus ernsthafte Gastgeber Sorge, halb mit dem Habitus eines reinen Denkers kokettierend, drückt Volker Springel seinen Zweifel aus, ob wir überhaupt eine Woche lang genug zu sehen haben werden. Nach einer Woche haben wir den Eindruck, zwar sehr viele Per-

⁵ | Hier zitiert nach <http://www.bilder.mpg.de> [23.02.09]. Dort finden sich auch einige der Bilder mit Erklärungen.

⁶ | Streng genommen ist schon der Begriff »Dunkle Materie« metaphorisch, weil sich »dunkel« auf das Maß der Helligkeit bezieht, das auf nicht-sichtbare Objekte anzuwenden sinnlos ist.

sonen, Simulationen und Visualisierungen kennen gelernt zu haben, bei weitem aber nicht alle.

Als theoretisches Institut beherbergt das MPA einerseits klassische theoretische Astrophysik und Kosmologie, die auf der Basis weniger Grundgleichungen spezifische Probleme analytisch zu lösen versuchen. Die uns interessierende, ebenfalls als »theoretisch« bezeichnete Methode ist die numerische Simulation von Problemen, die analytisch nicht berechnet werden können. Für die moderne Kosmologie und Astrophysik insgesamt sind Computersimulationen zu einer unverzichtbaren Methode geworden, am MPA ist es inzwischen die dominierende Methode.

Ein astrophysikalisches Problem zu simulieren, erfordert gleich mehrere Kompetenzen, nämlich erstens die Beherrschung allgemeiner astrophysikalischer Kenntnisse, zweitens die Fähigkeit, ein spezielles Problem physikalisch sinnvoll zu modellieren, drittens sehr gute Programmierfähigkeiten und viertens Erfahrungen in der Visualisierung der Ergebnisse. Für diese verschiedenen Fähigkeiten gibt es keine methodenspezifische Arbeitsteilung. Einhellig ist man der Überzeugung, nur Astrophysiker könnten die Simulationscodes richtig programmieren, so dass die computertechnische Seite der Simulation nicht ausgelagert werden könne. Physiker könnten das Programmieren lernen, nicht aber Programmierer, physikalisch zu denken.

Dass ein- und dieselbe Person alles macht, wird gleichzeitig als unabdingbar und als problematisch gesehen. In der Regel beansprucht die Arbeit am Simulationscode den größten Teil der täglichen Arbeitszeit. Entsprechend sind die Astrophysiker nicht zuletzt Produzenten von Software, die auch für ganz andere Zwecke als das jeweils gerade interessierende Problem eingesetzt werden kann. Anerkennung als Astrophysiker finden sie aber nur über astrophysikalische Ergebnisse. Anders gesagt sind die tatsächlichen Resultate der Arbeit – Daten, Programme und Visualisierungen – zwar sämtlich für die inhaltliche Forschung unabdingbar, gelten selbst aber nicht als Forschungsergebnisse. Dies erfordert eine Gratwanderung, um einerseits die bestmöglichen Simulationen laufen zu lassen, ohne andererseits zum Programmierer zu »degenerieren«.

Etwas anders ist die Situation in Bezug auf die Ausgliederung der Visualisierung. Die Ansichten dazu sind hier uneinheitlich, ebenso wie die Bedeutung, die der Visualisierung für die eigentliche Forschung zugemessen wird. Die meisten derjenigen, die Visualisierung für hilfreich oder sogar unerlässlich für die *Forschung* halten (für *Public Outreach* halten alle sie für unerlässlich), machen auch die Visualisierung selber. Manche delegieren diese hingegen an den Visualisierungsexperten Ralph Bruckchen. Dieser hat seine Fähigkeiten in der amerikanischen Filmindustrie erworben und wurde vom Rechenzentrum der Max-Planck-Gesellschaft

speziell für Visualisierungen eingestellt. Obwohl dessen Büro keine 100 Meter vom MPA entfernt ist, ist nicht allen Astrophysikern bekannt, dass es einen Spezialisten für Visualisierungen gibt.

Die enge Verknüpfung sehr spezieller Physik mit sehr speziellen Codes führt dazu, dass die Simulationen am MPA typischerweise Ein-Personen-Projekte sind. Diese können mit ganz unterschiedlichen Objekten und Fragestellungen zu tun haben. Wir haben u.a. Simulationen zu Dunkler Materie, zur Dynamik von Supernovae, zu Protuberanzen auf der Sonne und zur Kollision von Galaxien gesehen. Was die Forschungen verbindet, ist die *Methode*, das heißt die Simulation. Zum Teil werden für ganz verschiedene Objekte dieselben Codes benutzt und lediglich angepasst, zum Teil werden aber auch ganz neue Codes geschrieben. Diese Form der theoretischen Astrophysik erlaubt ein hohes Maß an individueller Kreativität. Dies gilt auch für die Visualisierungen: In welchem Maß, wofür und auf welche Weise Visualisierungen im Zuge der Forschungen gemacht werden, hängt weitgehend von den einzelnen Wissenschaftlern ab.

Entsprechend dieser Organisation gibt es auch für unsere Darstellung keine sich schon aus dem Arbeitsablauf selbst anbietende Logik. Hier gibt es weder eine abgegrenzte, überschaubare Gruppe, noch eine klar erkennbare Prozesskette. Die Funktion von Visualisierungen in der Forschungspraxis kann sich hier nur aus dem Vergleich mehrerer Simulationen ergeben.

Es gibt also weder eine vertikale Arbeitsteilung noch objektbezogene Teams, sondern eine Parallelität strukturell ähnlicher Einzelprojekte. In gewisser Weise passt diese Form zu der Architektur des MPA. Die Grundstruktur des 1979 bezogenen Gebäudes ist in etwa die einer Spiralgalaxie. In der Mitte befindet sich das schwarze Loch, ein im Stile der 70er Jahre möblierter Innenhof, der – jedenfalls im Januar – nicht benutzt wird. Drumherum befindet sich ein Ring auf drei Stockwerken, von dem nach außen hin vier Spiralarme abgehen, in denen die meisten der Büros untergebracht sind.

Im *bulge* der Galaxie, nämlich ganz oben, befindet sich der Seminarraum, in dem die institutsübergreifenden Vorträge stattfinden. Der fensterlose, spitz auf den Platz des Vortragenden zulaufende Raum hat durchaus etwas von einem Elfenbeinturm. Über eine enge Treppe pilgern jeden Montag um 15:30 Uhr alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter zu den Höhen aktueller Forschungen.

Diese Strenge herrscht keineswegs in allen Teilen des Instituts. In einem der inneren Ringe ist die Bibliothek untergebracht, die direkt an einen offenen Bereich anschließt, in dem sich mehrere Tische und eine Tafel befinden. Dazu gehört eine ebenso offene Teeküche, in der man sich für ein paar Cent Kaffee oder Tee machen kann.

Das Konzept, dass man sich dort trifft und unterhält, scheint erfolgreich. Von hier aus kann man die Rundgänge auf allen Ebenen sehen, und entsprechend ergeben sich spontane Kontakte. Und ebenso funktioniert das halbobligatorische Kaffeetrinken um 10:30 im unteren Teil der Ringebene, das inoffiziell als spätest möglicher Arbeitsbeginn gilt.

Ansonsten ist – zumindest für uns – keine Aufteilung des Gebäudes zu erkennen. Ungeachtet der formalen, für alle Max-Planck-Institute geltenden Struktur mit drei Abteilungen (hier: Kosmologie, Hochenergie-Astrophysik und Stellare Astrophysik), die jeweils in thematisch definierte Arbeitsgruppen aufgeteilt sind, erschließt sich uns beim Entlanggehen der Flure die inhaltliche oder methodische Zusammengehörigkeit jedenfalls nicht.

Volker Springel, der Autor der *Millennium*-Simulation und Produzent unseres Eingangsbilds, hat es übernommen, nicht nur über seine eigene Arbeit Auskunft zu geben, sondern auch die Kontakte zu anderen Astrophysikern herzustellen, mit denen wir in den nächsten Tagen sprechen werden. Die Auswahl für uns potentiell interessanter Gesprächspartner erfolgt anfangs ganz eindeutig nach dem Kriterium »Bildaffinität«. Alle, mit denen wir gesprochen haben, finden nicht nur Visualisierungen für Simulationen wichtig, sie haben auch ein Händchen für die verschiedensten Formen der Visualisierung. Mit deutlichem Stolz werden uns die aktuellsten und besten Produkte vorgeführt.

Auch wenn uns diese Visualisierungen natürlich interessieren, dauert es manchmal einen Moment, bis wir unseren Gesprächspartnern klar machen können, dass wir uns ebenso für die *Genese* der Bilder, also erstens für die jeweils zu Grunde liegende *Simulation* und zweitens für die *Herstellung* der Visualisierung interessieren. In der Regel springt das Gespräch dann zu den Objekten, also den Sternen, Galaxien und Clustern, die man auf den Bildern ja so schön sehen kann.

Dass es so schwierig ist, das Dazwischen zwischen den Bildern und den Objekten zu zeigen, liegt daran, dass dies nicht sehr anschaulich ist. Die meiste Zeit des Tages sieht man auf den Computerbildschirmen Programmzeilen der Simulationscodes, keine Bilder. Auch wenn man immer bemüht ist, uns möglichst viel Visuelles zu zeigen und die Bedeutung von Visualisierungen zu betonen, so hat dies oft den Charakter des »auch« oder »trotzdem«. Marcus Brüggen, ehemals am MPA und während unseres Aufenthalts als Gastwissenschaftler in Garching, bringt es folgendermaßen auf den Punkt: Visualisierungen sind für die Astrophysik das »Wichtigste«, aber gleichzeitig das »Unwissenschaftlichste«.

Bilder sind am MPA allgegenwärtig, aber es wird nicht laufend an oder mit Bildern gearbeitet. Man hat die Bilder im Kopf, aber nicht immer zur Hand. Mehrmals musste ein Wissenschaftler längere Zeit auf seinem

Computer suchen, um uns ein bestimmtes Bild zu zeigen. Und wenn er es gefunden hatte, handelte es sich häufig nicht um eine unmittelbare Visualisierung von Daten, sondern um einen Bestandteil von anderen Medien, etwa Veröffentlichungen oder Vortragspräsentationen.

Und dennoch: Wenn man die Funktion von Visualisierungen in und für Simulationen in der Astrophysik verstehen will, muss man es vermeiden, sich die Rosinen besonders viseophiler Forscher, spektakulär anzusehender Objekte oder gelungener Visualisierungen herauszupicken. Vor allem darf man sich nicht *innerhalb* einer Simulation auf Momente von Visualisierung beschränken. Nur im Gesamtzusammenhang einer Simulation kann man erstens verstehen, an welchen Stellen zu welchem Zweck auf welche Weise visualisiert wird. Und nur so kann man, zweitens, die Bilder selbst verstehen, einschließlich dessen, was auf den Bildern *nicht* zu sehen ist. Dass wir gegenüber unseren Gesprächspartnern auf unserem Interesse auch an den nicht-bildlichen Teilen der Arbeit insistieren müssen, ohne die eigentliche Arbeit am Code im Einzelfall nachvollziehen zu können, bleibt ein Grundproblem unseres Ansatzes – und damit auch dieser Darstellung.

Erschwert wird dies dadurch, dass wir nicht auf alle Forschungsgegenstände vorbereitet sind, da sich die Kontakte erst während der Woche unseres Besuchs ergeben. Vormittags über Turbulenzen in der Grenzschicht der Sonne und nachmittags über die Gasausbreitung in einer Typ Ia-Supernova ernsthaft zu sprechen, erfordert von uns, gelinde gesagt, etwas Improvisation. Dennoch – oder gerade deswegen – ergeben sich in jedem der Gespräche ganz neue Aspekte. Verschiedene Auffassungen und Ansätze werden deutlich, aber auch Gemeinsamkeiten, also das, was man den Stil von astrophysikalischen Simulationen nennen kann.

Um diesen Stil zu verdeutlichen, soll jetzt die *Millennium*-Simulation (aus der das obige Bild stammt) detailliert erläutert werden. Die *Millennium*-Simulation eignet sich dafür in besonderer Weise, weil an ihr fast alles (jedenfalls im Prinzip) öffentlich ist. Dies betrifft den Code selbst, nämlich das von Volker Springel geschriebene Programm *GADGET* und dessen Nachfolger *GADGET-2*, das ständig erweitert wird und das inzwischen auch für viele andere Simulationen verwendet wird. Um dieses Programm verstehbar zu machen, hat der Autor dazu umfangreiche Artikel publiziert, die die Grundgedanken und den Aufbau des Codes erklären (Springel et al. 2001; Springel 2005).⁷ Diese Texte erlaubten es uns, das Programm soweit zu verstehen, dass wir gezielt weiterfragen konnten.

⁷ | Dass diese Texte nicht ausreichen, um sofort mit dem Programm zu arbeiten, wird nicht weiter verwundern. Ein erst seit kurzem am MPA tätiger Doktorand mit sehr guten Computerkenntnissen berichtet uns, dass er etwa

Öffentlich sind aber auch die Resultate des *Millennium-runs*. Damit sind zunächst die *Daten* aus der Simulation gemeint, die weltweit von Astrophysikern genutzt werden, um daraus Erkenntnisse über Strukturentstehung im Universum zu gewinnen. Nicht ohne Stolz berichtet Volker Springel, dass in Kürze das 100. Paper, das auf den *Millennium*-Daten beruht, publiziert werde.⁸ Entsprechend seien seine Papers zu dieser Simulation und zu *GADGET* seine meistzitierten Papers – eine Tatsache, die er gleichzeitig auch bedauert und sich stattdessen für eines seiner inhaltlichen Papers eine derartige Verbreitung wünscht.

Schließlich sind auch die meisten der *Visualisierungen* öffentlich zugänglich, und zwar nicht nur die unbewegten Bilder, sondern auch die Filme (*Zoom-ins*) und die virtuellen Durchflüge.⁹

Ganz anders als die Daten, Programme und Bilder hat Volker Springel die *Herstellung* der Bilder nicht öffentlich dokumentiert. Die Kriterien der Visualisierung sind nicht etwa geheim, er hat uns die Prozedur bereitwillig erklärt. Offen bleibt dennoch, warum dieser Teil des Prozesses nicht ebenso öffentlich nachvollziehbar gemacht wurde wie die übrigen.

Die Millennium-Simulation

Das Objekt

Das Grundschema astrophysikalischer Simulationen ist immer ähnlich. Ausgangspunkt ist ein Objekt, dessen Verhalten sich weder analytisch noch empirisch ausreichend erforschen lässt. Das Objekt der *Millennium*-Simulation ist das größte Objekt, das im Rahmen des kosmologischen Standardmodells Sinn macht.¹⁰ Simuliert wird die Entwicklung von

eine Woche gebraucht habe, um mit einer vereinfachten Version einfachste Simulationen laufen zu lassen. Dann habe er noch einmal zwei Monate gebraucht, um das Programm soweit zu beherrschen, dass er anfangen konnte, für seine eigene Fragestellung (die Messung von Gammastrahlung aus der Dunklen Materie der Milchstraße) die benötigten Features zu programmieren.

⁸ | Zum Zeitpunkt der Drucklegung dieses Buches sind es schon 187 Papers, was verdeutlicht, dass noch lange nach dem *run* einer Simulation mit und an den Daten gearbeitet wird, <http://www.mpa-garching.mpg.de/millennium/> [23.02.09].

⁹ | Siehe <http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/> [23.02.09].

¹⁰ | Eine knappe, systematische Einführung in die moderne Kosmologie etwa auf dem Niveau von Bachelorstudenten der Physik ist Liddle 2007. Bör-

Strukturen in einem Raumwürfel mit einer Kantenlänge von 500 Mpc/h.¹¹ Auf größeren Skalen gibt es keine Strukturen mehr, das Universum ist homogen. Simuliert wird also kein *bestimmtes* Gebiet, sondern einfach ein ausreichend großes Raumgebiet. Wie aber entstehen darin die heute beobachtbaren Strukturen?

Das älteste beobachtete Objekt des Universums ist nach heutigem Stand der Forschung die kosmische Hintergrundstrahlung (*Cosmic Microwave Background*, CMB). Sie resultiert aus der Entkopplung von Strahlung und Materie etwa 380.000 Jahre nach dem Urknall.¹² Vorher war das Universum so heiß, dass es nicht zur Bildung von Atomen kommen konnte, weil jedes eingefangene Elektron durch die allgegenwärtige energiereiche Strahlung sofort wieder vom Atomkern getrennt wurde (Plas-

ner 2004 ist etwas populärer und berücksichtigt stärker Beobachtungsdaten, ist jedoch weniger anschaulich in den theoretischen Kapiteln. Ein umfassendes und fundiertes Kapitel zur Kosmologie enthält Raith 2002.

11 | Parsec (pc) ist die in der Astrophysik und der Kosmologie gängige Längeneinheit. 1 pc entspricht derjenigen Entfernung, aus der man den Durchmesser der Erdumlaufbahn um die Sonne unter einem Winkel von einer Bogensekunde sehen würde. Damit ist 1 pc = 3,26 Lichtjahre. Entsprechend gilt: 1 kpc = 1000 pc; 1 Mpc = 1000000 pc und 1Gpc = 1000000000 pc. Zur Orientierung: Der nächste Stern ist etwa 1 pc entfernt, der Durchmesser der Milchstraße beträgt 10 kpc, der durchschnittliche Abstand zwischen Galaxien ist etwa 1 Mpc und der Radius des beobachtbaren Teils des Universums ist etwa 14 Gpc. Das „h“ bezeichnet den Hubblefaktor. Die Hubblekonstante H (die genau genommen keine Konstante ist, sondern sich im Laufe der Zeit ändert) ist die momentane Expansionsrate des Universums. Sie beträgt nach heutigem Wissen 71,9 km·s⁻¹/Mpc. Dies bedeutet anschaulich, dass sich ein Objekt in 1 Mpc Entfernung mit 71,9 Kilometern pro Sekunde von uns wegbewegt. Da Entfernungsmessungen sehr viel unsicherer sind als Geschwindigkeitsmessungen, ist auch die Hubblekonstante nicht sehr genau bekannt. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, berechnet man den dimensionslosen Hubblefaktor $h = H/(100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}/\text{Mpc})$ und teilt alle Längenangaben durch diesen. Dies hat den Vorteil, dass sich bei Korrekturen an der Hubblekonstante die Längenskalen nicht ändern. 500 Mpc/h sind also nach heutiger Kenntnis der Hubblekonstante ($h = 0,719$) 695 Mpc.

12 | Alle der folgenden Zahlenangaben sind als ungefähre Werte zu betrachten, da es keine einheitlichen, offiziellen Werte gibt. Es hängt von dem Vertrauen in bestimmte Messverfahren ab, welchen Wert man favorisiert und für seine eigene Simulation verwendet. Alle hier verwendeten Werte nach http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current/parameters_summary.cfm [18.06.08].

ma). Als durch die Expansion des Universums die Strahlung an Energie verloren hatte, trennten sich Atome und Strahlung und blieben jeweils für sich stabil. Die durchschnittliche Temperatur des Universums zu dieser Zeit von etwa 3000 Kelvin hat sich durch die 1090-fache Ausdehnung des Raumes bis heute auf 2,725 Kelvin abgekühlt.¹³ Dieser Temperatur entspricht jedenfalls das Strahlungsspektrum der Mikrowellen, die man aus allen Richtungen des Weltalls mit fast gleicher Intensität empfängt.

Die Homogenität der Mikrowellenstrahlung gilt als eines der wichtigsten Argumente für die Urknalltheorie. Für die aktuelle Forschung ist allerdings wichtiger, dass der CMB eben nur *fast* homogen ist. Auf Skalen, die man insbesondere aus den Messungen der *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP) sehr genau kennt, findet man kleine Ungleichheiten von etwa 10^{-5} (also etwa 0,001%). Diese Inhomogenitäten sind die Keime für die heute im Universum beobachtete sehr inhomogene Verteilung von Materie. Materie verdichtet sich zu kugelförmigen Halos. In diesen verdichten sich Wasserstoff- und Heliumatome zu Sternen, die sich im Zentrum der Halos sammeln und unterschiedlich geformte Galaxien bilden. Die Halos selber mitsamt der Galaxien aus Sternen und Gas sammeln sich zu Galaxienhaufen, die durch Filamente aus Halos verbunden sind und so eine netzartige Struktur, das *cosmic web*, bilden. Zwischen diesen Materieanhäufungen gibt es riesige, fast leere Gebiete, die sogenannten *voids*. Eine der zentralen Fragen der *Millennium-Simulation* ist, wie und wann diese verschiedenen Strukturen entstanden sind.

Um die Strukturentstehung aus den kleinen Inhomogenitäten zur Zeit der Entkopplung bis heute zu simulieren, spielt die gewöhnliche, sichtbare Materie allerdings kaum eine Rolle. Dies liegt daran, dass gewöhnliche Materie (auch »baryonische Materie« genannt: vor allem Gas, zu etwa 10% Sterne, sowie die kaum ins Gewicht fallenden Planeten, Kometen etc.) nur etwa 4,4% des Materiegehalts des Universums ausmachen. Viel wichtiger ist mit etwa 21,4% Massenanteil die Dunkle Materie.¹⁴

Wie bereits erwähnt, geht man davon aus, dass die Dunkle Materie nicht der elektromagnetischen Wechselwirkung unterliegt, wohl aber der Gravitation. Worum es sich bei der Dunklen Materie handelt, ist unklar.

13 | Kelvin bezeichnet die absolute Temperatur. Temperaturdifferenzen entsprechen der Celsiusskala, jedoch ist der Nullpunkt der Kelvinskala nicht der Schmelzpunkt des Eises, sondern der absolute Nullpunkt: 0 Kelvin = -273,15 °Celsius.

14 | Hinzu kommt noch, mit etwa 74,2%, die Dunkle Energie, die allerdings, da sie nicht der Gravitation unterliegt, für die Strukturentstehung unmittelbar keine Rolle spielt und in der *Millennium-Simulation* nicht berücksichtigt ist.

Man vermutet ein bislang unbekanntes Elementarteilchen, das man bisher allerdings weder in astronomischen Observatorien noch in den Teilchenbeschleunigern der Hochenergiephysik hat »sehen« können.

Die *Millennium*-Simulation berücksichtigt nur die Dunkle Materie. Für die gewöhnliche Materie geht man in der Simulation davon aus, dass sie der Dunklen Materie folgt, da sie ja gravitativ an diese gebunden ist. Die Simulation des Verhaltens der baryonischen Materie (und damit der sichtbaren Objekte) ist wegen der elektromagnetischen Wechselwirkung sehr viel komplizierter als die der Dunklen Materie. Bislang gibt es keine Simulation, die beispielsweise die Form und Struktur unserer eigenen Galaxie, der Milchstraße, einigermaßen realistisch reproduziert.¹⁵

Das physikalische Modell

Für das Objekt der Simulation, also die Dunkle Materie in einem Raumgebiet, wird nun ein physikalisches Modell erstellt. Die Grundidee der Dynamik ist, dass dorthin, wo schon mehr Dunkle Materie ist als woanders, noch mehr Dunkle Materie hingezogen wird, so dass sich Inhomogenitäten verstärken und zu immer weiter gehenden Verklumpungen führen. Ein Effekt, der dieser Entwicklung allerdings bremsend entgegenwirkt, ist die Expansion des Universums, die darin besteht, dass sich auf großen Skalen alle Materie voneinander entfernt.

Simulationen funktionieren aufgrund der begrenzten Rechenzeit immer mit vergleichsweise wenigen Elementen. Dazu muss das Objekt diskretisiert, also (gedanklich) in Elemente zerlegt werden. Diese Elemente sind (wie unten noch genauer beschrieben wird) entweder Zellen oder Teilchen. Die *Millennium*-Simulation basiert auf Teilchen. Ein solches Teilchen wird folgendermaßen konstruiert: Zunächst wird ein kubisches Raster mit jeweils 2160 Zellen Kantenlänge, insgesamt also etwa 10 Mrd. Zellen, gebildet. Jede Zelle ist etwa 250 kpc/h lang, breit und hoch. Jeder Zelle wird nun die Gesamtmasse an Dunkler Materie in ihrem Volumen zugeordnet. Dies sind 860 Mio. Sonnenmassen pro Zelle. Diese Masse wird aber nicht als homogen in der Zelle verteilt gedacht, sondern als im Mittelpunkt konzentriert. Die Zellen spielen im Weiteren keine Rolle mehr. Die so konzentrierte Masse ist dann »ein Teilchen«, ein Objekt, das streng genommen nur in der Simulation, also weder in der Natur noch in der physikalischen Theorie existiert. Jedes dieser Teilchen bekommt eine Identifikationsnummer, die es während der ganzen Simulation behält. Einzige weitere Informationen zu diesen Teilchen sind sein Ort (in

¹⁵ | Wobei auch die Beobachtungen der Milchstraße (noch) viele Forschungsfragen unbeantwortet lassen.

drei Koordinaten) und seine Geschwindigkeit (in drei weiteren Koordinaten). Neben der räumlichen Diskretisierung gibt es noch die zeitliche. Die Entwicklung des Systems erfolgt in der Simulation nicht kontinuierlich, sondern in Sprüngen.

Im Prinzip ist die Physik der Simulation sehr einfach. Volker Springel versichert uns, dass der Prozess, streng nach der eigentlich für die Kosmologie zuständigen Allgemeinen Relativitätstheorie berechnet, genauso verlaufen würde, doch das Modell selbst beruht auf nichts Weiterem als Newton'scher Mechanik. Für jedes Teilchen wird im Prinzip die Kraft berechnet, die – von allen anderen Teilchen ausgehend – auf dieses wirkt. Für einen Zeitsprung wirkt sich dies in Form der Änderung der Geschwindigkeit aus.¹⁶ Und da das Teilchen ja selbst eine Geschwindigkeit hat, muss es zudem um eine entsprechende Strecke verschoben werden.

Nach und nach wird dort, wo mehr Materie ist, noch mehr Materie hingezogen, so dass sich schließlich sehr viele Teilchen auf sehr kleinem Raum befinden. Hier dürfen nun die Teilchen keineswegs, wie Physiker es am liebsten haben, als punktförmig angesehen werden. Stattdessen wird eine nicht gerade willkürliche, aber auch in keiner Weise physikalisch begründbare Glättungskurve eingeführt, damit Teilchen, die in sehr kleinem Abstand (d.h. in weniger als 5 kpc Entfernung) aneinander vorbeifliegen, sich nicht gegenseitig ablenken. Aus diesem Grund heißt dieser Simulationsansatz *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH).

Hinzu kommt noch der Einfluss der Expansion. Die *Millennium*-Simulation rechnet mit mitbewegten Koordinaten, das heißt, sie tut so, als sei das simulierte Volumen immer gleich groß, und berücksichtigt die Expansion in Form einer entfernungsabhängigen Abschwächung der Gravitation. Das heißt, alle Längenangaben, insbesondere die Länge des simulierten Volumens von 500Mpc/h, beziehen sich auf das Jetzt, nicht auf den Zustand zu Beginn der Simulation.

Der Code

Dieses physikalische Modell muss nun in ein Computerprogramm übersetzt werden, wobei das entscheidende Kriterium für die Qualität des Programms die benötigte Rechenzeit ist. Zum Beispiel wäre es eine grobe Verschwendung von Rechenzeit, für jedes Teilchen die Kraftwirkung auf jedes andere Teilchen zu berechnen, denn die benötigte Zeit würde quadratisch mit der Anzahl der Teilchen wachsen. Daher werden für jedes

¹⁶ | Genau genommen handelt es sich um eine Änderung des Impulses, doch da die Masse jedes Teilchens sich nicht ändert, macht dies hier keinen Unterschied.

Teilchen die anderen Teilchen zusammengefasst, weiter entfernte in größeren Einheiten und nähere in feinerer Auflösung.

Trotz derartiger Optimierungen ist der Rechenaufwand so hoch, dass die Berechnungen auf mehrere Prozessoren verteilt werden müssen. Dies erfordert es, physikalisch interagierende Gebiete nicht entlang der Schnittstellen zwischen den Prozessoren zu zerteilen. Als wegweisend erwies sich hier die Benennung der Teilchen nach ihrer Position auf einer sogenannten Peano-Hilbert-Kurve. Dies ist eine fraktale Kurve,¹⁷ die gleichzeitig die Teilchen in eine Reihenfolge bringt, dabei aber den Würfel nicht zeilenweise abfährt, sondern so beschaffen ist, dass Teilchen mit nahe beieinander liegender Identitätsnummer auch räumlich innerhalb des Würfels beieinander liegen. Dies stellt eine typische Lösung eines Hybridproblems dar, wie es sich nur aus der Überlagerung von physikalischem Modell und computertechnischen Bedingungen ergibt. Oder anders gesagt: Dies ist ein Beispiel dafür, dass die Simulation von einer Person konzipiert werden muss, die beides, die astrophysikalische Situation und die Möglichkeiten der Computer, gleichzeitig im Kopf hat.

Die Anfangs- und Randbedingungen

Damit ist das grundlegende Modell für die Weiterentwicklung eines Zustands gegeben. Was man für den eigentlichen *run* der Simulation noch braucht, sind die Anfangs- und Randbedingungen. Das Modell der *Milennium*-Simulation hat sogenannte periodische Randbedingungen. Das bedeutet, dass man dieselbe Materieverteilung außerhalb des Würfels in jede Richtung wiederholt. Auch dies ist eine Eigentümlichkeit der Simulation im Gegensatz zur Natur und zur Theorie.

Selbstverständlich muss man auch außerhalb des Würfels Materie annehmen, denn sonst würde sich die gesamte Materie über kurz oder lang in der Mitte des Würfels ansammeln. Dies wäre natürlich wenig realistisch, soll doch der (gedachte!) Würfel gerade einen beliebigen Ausschnitt des Universums repräsentieren. Mit periodischen Randbedingungen passiert dies nicht, aber dafür hat man ein Universum, das sich alle 500 Mpc/h exakt wiederholt. Die Periodizität wird in einigen Visualisierungen gleichzeitig benutzt und verschleiert, wie später dargestellt werden wird.

Die Ausgangssituation der Simulation ist zunächst einmal das Gitter

¹⁷ | Auch hier ein Hinweis für Puristen: »fraktale Kurve« ist eigentlich ein Widerspruch in sich, da es sich erst im Grenzfall unendlicher Iteration um das Fraktal handelt – und dies hat dann gerade nicht mehr die 1-dimensionale Geometrie einer Kurve; das räumliche Peano-Hilbert-Fraktal hat vielmehr die Dimension 3.

von Teilchen aus Dunkler Materie. Dieses wird nun gestört, indem die Teilchen leicht verschoben werden. Sowohl die Periodizität als auch die Amplitude der Störungen beruhen auf den WMAP-Daten zum CMB. Die Periodizität (die hier nichts mit der Wiederholung der Würfel zu tun hat) resultiert aus der Frühphase des Universums und lässt sich aus den Messdaten durch eine Fouriertransformation gewinnen.¹⁸

Entsprechend dieser Vorgaben werden die Teilchen nun *zufällig* verschoben. Es ist hier wichtig festzuhalten, dass nicht etwa die Daten von WMAP zum CMB verwendet werden. Die Anfangssituation der Simulation ist nur *statistisch* mit der Anfangssituation im Universum vergleichbar, nicht aber *im Detail*. Welches Teilchen im Einzelnen verschoben wird, wo also später einmal Galaxienhaufen und wo *voids* entstehen, hat nichts damit zu tun, wo in dem tatsächlichen Universum solche zu finden sind.

Für dieses Vorgehen gibt es zwei Gründe. Zum einen kennt man die tatsächliche Verteilung der (Dunklen) Materie nicht. Die uns heute erreichende Hintergrundstrahlung repräsentiert die Oberfläche einer Kugel, deren Radius genau der Laufzeit des Lichtes von damals bis heute entspricht.¹⁹ Es handelt sich dabei also um eine zweidimensionale Struktur, nicht um eine dreidimensionale, und sie ist schon von daher keine ausreichende Datengrundlage.

Der andere Grund ist, dass es in der Simulation um Strukturbildungsprozesse im Universum geht. Die Besonderheit dieser Simulation liegt gerade darin, dass das simulierte Gebiet so groß ist, dass das Universum auf noch größeren Skalen schon homogen ist. *Dass* das Universum auf großen Skalen homogen ist, ist das sogenannte kosmologische Prinzip, auf dem die gesamte moderne Kosmologie beruht. Wo der simulierte Ausschnitt im Universum liegt, ob er überhaupt in dem von uns beobachtbaren Teil des Universums liegt, darf demnach keine Rolle spielen. So wäre etwa die Frage, wo in dem Würfel wir uns befinden, schlicht sinnlos.

¹⁸ | Eine Fouriertransformation ist eine mathematische Operation, bei der eine räumliche Verteilung als Überlagerung periodischer Funktionen mit verschiedenen Frequenzen dargestellt wird. Die jeweiligen Amplituden der einzelnen Funktionen können selbst wieder räumlich dargestellt werden. Man nennt dies das Spektrum einer Verteilung.

¹⁹ | Diese Entfernung ist nicht die Zeitdifferenz mal der Lichtgeschwindigkeit, weil dies die Expansion nicht berücksichtigen würde. Durch die Expansion entfernen sich die Erde (oder besser: der Ort, an dem einmal die Erde sein wird) und der momentane Ort eines Photons voneinander, so dass es entsprechend länger dauert, bis das Photon die Erde eingeholt hat.

Die Tests

Das Programm wird anschließend anhand kleinerer Gebiete oder größerer Auflösungen in vergleichsweise schnell möglichen *runs* getestet. In der Regel zeigen sich dabei Programmierfehler, die anschließend repariert werden. Für dieses *debugging* sind Visualisierungen ein unersetzbares Hilfsmittel, da schon diese kleinen Simulationen Datenmengen produzieren, die auf der Ebene der Zahlen selbst nicht mehr überschaubar sind.

Visualisierungen spielen bei Simulationen also erst relativ spät eine Rolle. Datenbilder gibt es erst, wenn es Daten gibt, und die Daten sind eben die Produkte von *runs* (und seien es vorläufige *runs*), die erst durchgeführt werden können, wenn die wesentliche Modellier- und Programmierarbeit schon gemacht ist.

Volker Springel erzählt uns von einer dünnen, weißen Linie, die sich anfangs quer durchs Bild zog. Diesen Fehler hätte man den Daten selbst nicht ansehen können. Genau genommen kann man den Daten selbst überhaupt nichts ansehen, weil es schlicht zu viele sind. Erkennen kann man die Fehler also nur, indem man durch Hilfsprogramme die Daten statistisch oder stichpunktartig analysiert. Oder eben, indem man in Visualisierungen direkt etwas sieht. Man kann sich jedoch mit keinem der beiden Verfahren sicher sein, alle Fehler zu finden, denn bei Suchprogrammen muss man die Art des Fehlers schon voraussetzen und bei Visualisierungen begrenzt schon die Bildschirmauflösung, die um ein Vielfaches größer ist als die Auflösung der Daten selbst, die Sichtbarkeit von Artefakten.

Der Run

Nach solchen Tests und Korrekturen erfolgte dann im Sommer 2004 der eigentliche *Millennium-run*. Die entsprechende Presseerklärung betont weniger die astrophysikalischen Ergebnisse als vielmehr die technischen Bedingungen der Simulation selbst: Mit dieser Aufgabe waren die 512 Prozessoren des »Supercomputers« des Rechenzentrums der Max-Planck-Gesellschaft in Garching, eines IBM p690-Parallelrechners, einen Monat lang beschäftigt.²⁰

Gerechnet wurden je nach Teilchen bis zu 11.000 Zeitschritte, von denen 64 aufbewahrt wurden. Als Bezeichnung der Zeitpunkte der Simulation dient hier wie in der Astrophysik und Astronomie allgemein üblich die Rotverschiebung z . Diese gibt an, um wie viel sich seit dem entsprechenden Zeitpunkt das Universum (und mit diesem die Lichtwellen) aus-

²⁰ | Presseinformation der Max-Planck-Gesellschaft vom 01.06.2005.

gedehnt haben. Zum Beispiel bedeutet $z = 2$, dass sich die Wellenlänge des Lichts verdoppelt hat, also z.B. aus blauem Licht rotes geworden ist. Der Skalenfaktor des Universums a ist ein Maßstab für die Ausdehnung und hängt mit z zusammen: $z + 1 = 1/a$.

Die Simulation beginnt nicht mit dem Zeitpunkt der Entkopplung (bei etwa $z = 1090$), sondern bei $z = 127$. Der Grund dafür ist, dass anfangs die Inhomogenitäten in der Dunklen Materie kleiner sind als die Ungenauigkeiten der Berechnung selber. Bemerkenswerterweise endet die Simulation bei $z = 0$, also heute, obwohl nichts an dem Modell und dem Programm dagegen spräche, auch die zukünftige Entwicklung zu simulieren.

Das unmittelbare Ergebnis der Simulation sind also 64 Datensätze, von denen jeder die Orts- und Geschwindigkeitskoordinaten sowie die Nummern aller 10 Mrd. Teilchen für einen bestimmten Zeitpunkt enthält.

Es ist wohl die doppelte Größe der *Millennium*-Simulation, die ihre Attraktivität ausmacht – und die als Grund für die Benennung »Millennium« angeführt wird (Springel et al. 2005: 629–630). Nicht jede Simulation führt schließlich zu einem langen Artikel in *Nature*, eigens angekündigt durch eine Presseerklärung. Mit der doppelten Größe ist einerseits die Größe des simulierten Objektes und andererseits die Größe der Simulation selbst gemeint. Fast eine Milliarde Sonnen zu einem einzigen Teilchen zusammenzufassen, mag etwas grob erscheinen, aber tatsächlich ist – bezogen auf das simulierte Volumen – die *Millennium*-Simulation diejenige mit der feinsten Auflösung.

Größe – in beiderlei Sinne – scheint eine Qualität an sich darzustellen. In Frankreich hat man inzwischen eine Dunkle-Materie-Simulation, die *Horizon*-Simulation, durchgeführt, die einen noch größeren Raumbezug (von der Größe des beobachtbaren Teils des Universums) umfasst. Der technische Fortschritt impliziert immer seine eigene Unzulänglichkeit. Volker Springel weist darauf hin, dass zwar die Teilchenzahl höher, durch das größere Volumen aber die Teilchendichte geringer sei als bei der *Millennium*-Simulation. Für Forscher, die z.B. an Galaxienentstehung interessiert sind, sind ohnehin die räumlich kleineren, aber ebenso großen Rechenaufwand erfordernden Simulationen von Dunkler Materie und Gas viel interessanter. Dennoch hat das Virgo-Konsortium, in dessen Rahmen die *Millennium*-Simulation entstand, inzwischen mit den *Overwhelmingly Large Simulations* (OWLS) reagiert.²¹

²¹ | In dieser Bezeichnung steckt offensichtlich auch ein kleiner Seitenhieb auf die beobachtenden Kollegen des *European Southern Observatory* (ESO). Dessen ursprünglich als Nachfolger für das *Very Large Telescope* (VLT) geplantes *Overwhelmingly Large Telescope* (OWL) wird aus Kosten-

Die Daten selbst stellen noch kein neues astrophysikalisches *Wissen* dar. Um die Daten aus dem *Millennium-run* für die Astrophysik zu nutzen, muss man gezielt Fragen an die Daten stellen. Man hat es mit Datenobjekten zu tun, die ungeheuer komplex sind und die es mit verschiedenen Methoden zu untersuchen und zu nutzen gilt.²²

Nutzung der Daten: post-processing und Visualisierungen

Mit den so gewonnenen Daten passiert nun zweierlei. Einerseits werden sie im sogenannten *post-processing* inhaltlich, meist statistisch analysiert. Das *post-processing* ist jedoch mehr als eine bloße Auswertung, wie man sie etwa mit Messdaten ausführt. Dort wird die in den Daten implizierte Aussage extrahiert, womit dann die Daten selbst auch schon ihre Produktivität erschöpft haben und ganz hinter die Aussage zurücktreten. Beim *post-processing* einer großen Simulation hingegen sind die Möglichkeiten, aus ihnen Erkenntnisse zu gewinnen, so vielfältig, dass man den Datenbestand eher als ein hochgradig komplexes Objekt ansehen kann, an das man Fragen stellen kann – Fragen, die sich oft bei der eigentlichen Simulation noch gar nicht gestellt hatten.

Andererseits werden die Daten visualisiert. Ganz wie beim *post-processing* legen die Daten selbst nicht fest, wie dies geschieht. Es kommt immer darauf an, was man in dem Datensatz sichtbar machen will. Eine dieser Visualisierungen von Daten aus der *Millennium-Simulation* soll nun etwas genauer analysiert werden.

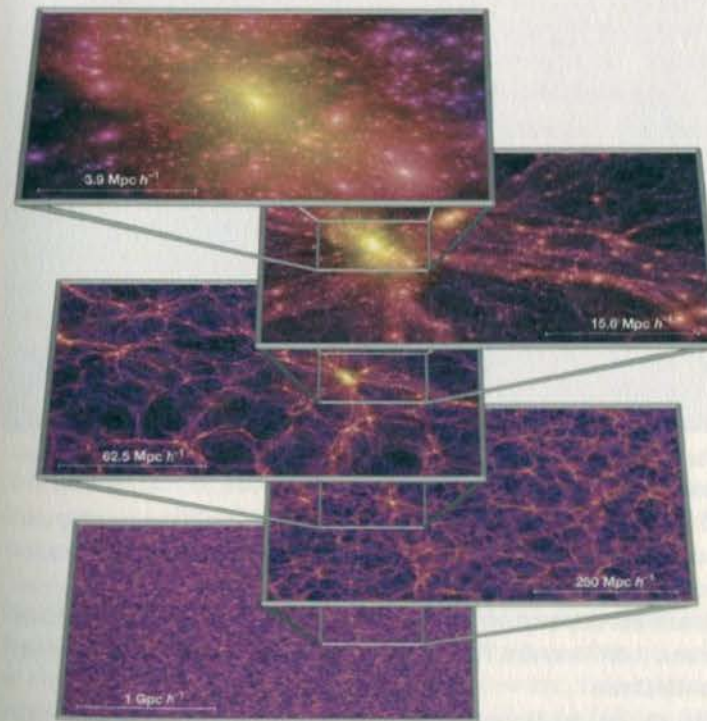
Von ihrer Funktion her sind diese Datenbilder Illustrationen der Ergebnisdaten des *runs*. Zeitlich betrachtet entstehen sie nach dem *run*, aber vor der (immer noch andauernden) Auswertung der Daten. Sie verbinden somit die Simulation mit der anschließenden astrophysikalischen Forschung, sind aber selbst nicht unmittelbar für die Forschung relevant. Ihre Funktion besteht vor allem darin, die Leistungsfähigkeit der Simulation zu veranschaulichen und für die Daten zu werben. Später werden Datenbilder vorgestellt, die enger in den Forschungsprozess eingebunden sind.

gründen nicht gebaut, weswegen man sich nun mit dem *European Extremely Large Telescope (E-ELT)* zufrieden geben muss.

22 | Dass nicht die Daten selbst das Ergebnis sind, sondern die sich in Publikationen manifestierenden Auswertungen, wird auch an folgendem deutlich: Der Akt, der durch die mit Sperrfrist versehene Pressemitteilung zum Ereignis wird, ist nicht der Abschluss des *runs* am 14.06.04, sondern die Veröffentlichung in *Nature* am 02.06.05, also fast ein Jahr später.

Das Projektionsbild aus der *Millennium-Simulation*

In Volker Springels Büro treffen wir wieder auf das uns vertraute Bild, nun aber nicht als einzelnes Bild, sondern als eine Montage aus fünf ineinander geschachtelten Bildern in unterschiedlichem Maßstab (Abb. 20). Es ist diese Montage, die als erstes Bild in dem *Nature*-Artikel das »Bild« der *Millennium-Simulation* prägte.



The dark matter density field on various scales. Each individual image shows the projected dark matter density field in a slab of thickness $15 h^{-1}$ Mpc (sliced from the periodic simulation volume at an angle chosen to avoid replicating structures in the lower two images), colour-coded by density and local dark matter velocity dispersion. The zoom sequence displays consecutive enlargements by factors of four, centred on one of the many galaxy cluster haloes present in the simulation.

Abb. 20: Visualisierung aus der *Millennium-Simulation* mit Originalbildlegende, aus Springel et al. 2005.

Wir sehen auf den Bildern eine netzartige Struktur. Auch wenn wir wissen, dass Dunkle Materie gezeigt wird, scheinen bestimmte Bereiche in den Filamenten und besonders an einigen Knotenpunkten zu leuchten. Der violette Farbeindruck hat etwas Geheimnisvolles. Der schwarze Hintergrund vermittelt zudem den Eindruck von Tiefe: Man blickt zwischen den Strukturen hindurch in die Tiefe des Raumes.

Sind diese Eindrücke gewollt? Sind sie überhaupt bei verschiedenen Personen gleich? Was davon ist im Bild selbst begründet, was in unseren Sehgewohnheiten? Ist dies eine ganz naive Betrachtung, die sich sofort verflüchtigt, wenn wir erstens wissen, *was* die Bilder darstellen und zweitens, *wie* sie es darstellen?

Eine erste Klärung ergibt schon die Bildlegende. Sie gibt an, dass es sich um eine Projektion einer 15 Mpc/h dicken Scheibe aus dem simulierten Volumen handelt. Zur Erinnerung: Der Datenbestand als Resultat des *Millennium-runs* besteht aus 64 *snapshots*, wobei für jeden *snapshot* die Position und die Geschwindigkeit aller 10 Mrd. Teilchen gespeichert sind. Wie kommt man von diesen Daten zu einem Bild, wie wir es in Abb. 20 betrachten können?

Es handelt sich bei dem Bild um eine Projektion. Projektion ist hier im mathematischen, nicht im optischen Sinn gemeint und hat nichts mit Zentralperspektive, Schattenwürfen usw. zu tun. Mathematisch ist eine solche Projektion – zumindest, wenn sie parallel zu einer der Koordinatenachsen erfolgt – äußerst einfach.

Für alle Teilchen, die sich in der Scheibe befinden, lässt man die entsprechende Koordinate einfach weg. Damit wird aus einer dreidimensionalen Verteilung eine zweidimensionale. Oder anschaulich gesprochen: Nicht erst das *Bild* ist flach, schon der dargestellt *Datensatz* ist flach. Dies bedeutet, jede Form des Tiefeneindrucks ist ein Effekt des Bildes selbst, nicht der Daten.

Es ist eine der Herausforderungen digitaler Visualisierung, dreidimensionale Objekte auf dem zweidimensionalen Bildschirm dreidimensional erscheinen zu lassen. Es gibt dafür unterschiedliche Ansätze, von denen einige später dargestellt werden. Dies spielt hier aber gerade keine Rolle, weil schon die Daten selbst zweidimensional sind. Verfahren des *volume rendering*, zum Beispiel durch künstlich eingerechnete Beleuchtung oder mehr oder weniger transparente Grenzflächen, finden sich bezeichnender Weise nur für die an Metallstangen erinnernden Rahmen und Verbindungen der Bilder.

Kaum verständlich ist aus der Legende, wie die Helligkeit und die Farben zustande kommen. Volker Springel erklärt uns die Helligkeitscodierung so: Die Helligkeit gibt die Materiedichte an. Dafür wird ein Ausschnitt aus dem Projektionsdatensatz in Zellen (Pixel) zerteilt, für je-

de Zelle gezählt, wie viele Teilchen Dunkler Materie sich darin befinden, und dann der Anzahl ein Helligkeitswert zugeordnet. Er zeigt uns das Bild ohne Farbcodierung (Abb. 21):

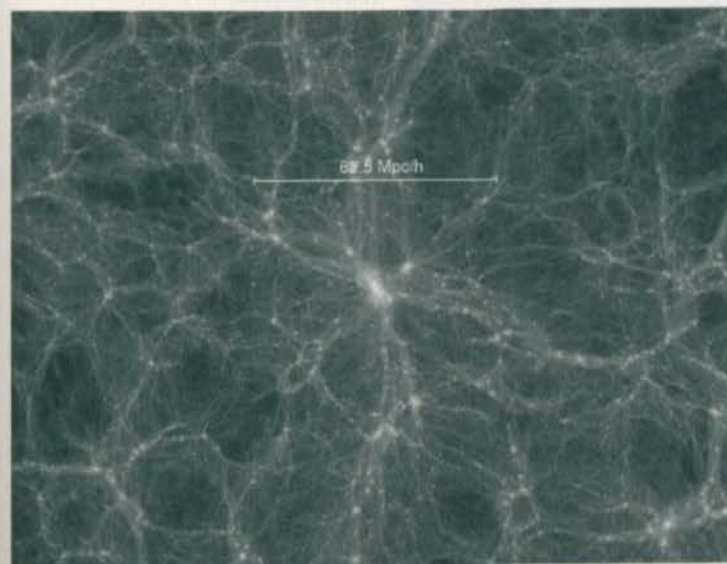


Abb. 21: Wie Abb. 19, jedoch ohne Farbcodierung der Geschwindigkeitsdispersion; unveröffentlicht (© Volker Springel, Max-Planck-Institut für Astrophysik, Garching).

Man beurteile selbst, ob das Schwarz-Weiß-Bild einen Tiefeneindruck hat. Und ob intendiert oder nicht: In jedem Fall gilt es schon bei einem so einfachen Schritt, Dichte in Helligkeit zu übersetzen, Entscheidungen zu fällen, die das Bild prägen. Dass zum Beispiel *mehr* Teilchen *heller* dargestellt werden, ist keinesfalls selbstverständlich. In einer anderen Publikation, in der ein bestimmtes Phänomen ergänzend zur graphischen Darstellung bildlich verdeutlicht wird, finden sich die Teilchen durchaus – tonersparend – schwarz auf weiß (vgl. Abb. 27). Dass die Darstellung heller Objekte vor dunklem Hintergrund an den Nachthimmel und an Stern- und Galaxiephotographien angelehnt ist, ist offensichtlich.

Schon eine solche Darstellung der Dichteverteilung allein zeigt die charakteristischen Strukturen, wie man sie in Abb. 20 sieht. Dass man hier einen Zusammenhang in Form des *cosmic webs* sieht, hängt nicht nur von den Daten, sondern auch von den gewählten Parametern der Visualisierung ab: Nähme man eine dünnere Scheibe aus dem Datenraum oder eine andere Umrechnung von Dichte in Helligkeit, so könnte man durch-



Abb. 22: Farbskala für die Darstellung der Geschwindigkeitsdispersion; unveröffentlicht (© Volker Springel, Max-Planck-Institut für Astrophysik, Garching).

Volker Springel sagt uns, dass die Bilder durch die Farbe »kontrastreicher« und »schöner« wirken sollen. Um aus den Schwarz-Weiß-Bildern Farbbilder zu machen, definiert er eine Eigenschaft, die etwas komplizierter ist als die Dichte. Es handelt sich um die Geschwindigkeitsdispersion. Farbcodiert wird nicht, wie *schnell* sich die Teilchen im Bereich eines Pixels bewegen, sondern wie *unterschiedlich* schnell. Dieser Wert ist zum Beispiel höher, wenn sich Teilchen aufeinander zu bewegen, als wenn sie sich parallel zueinander bewegen.

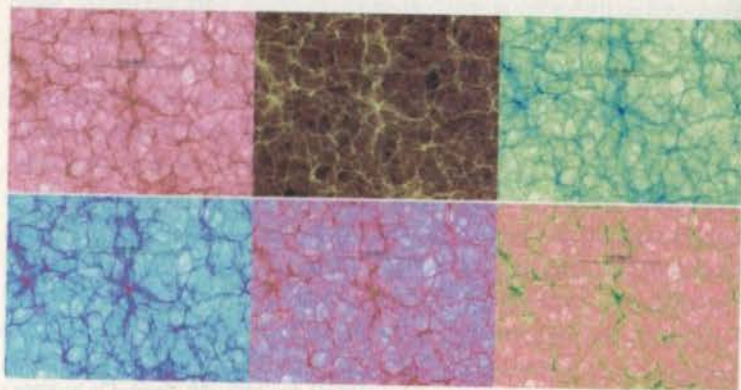


Abb. 23: Entwürfe für eine andere Farbgestaltung für die Projektionsbilder aus der Millennium-Simulation; unveröffentlicht (© Volker Springel, Max-Planck-Institut für Astrophysik, Garching).

aus unzusammenhängende Objekte erhalten. Das Objekt »cosmic web« ist ganz wesentlich ein visuell generiertes Objekt.

Eigentlich zeigt Abb. 21 schon den Kern der Millennium-Simulation, nämlich die räumliche Verteilung der Dunklen Materie. Nur wird man kaum ein Schwarz-Weiß-Bild in *Nature* veröffentlichen, wenn gleich selbst in der Astrophysik Verlage immer noch Gebühren für Farbdrucke verlangen, so dass einige Astrophysiker die elektronische Version mit Farbbildern versehen, die gedruckte Version hingegen mit Schwarz-Weiß-Bildern.

Natürlich ist auch »Aufeinanderzubewegen« für das Grundthema der Simulation – Strukturentstehung – relevant, wie aber genau, bleibt zunächst unklar, zumal nirgends publiziert ist, wie diese berechnet wird. Volker Springel erläutert uns, dass die Geschwindigkeitsdispersion eine für das Verständnis der Prozesse wichtige und ohnehin zu berechnende Größe ist. Aber abzulesen, wie dies hinsichtlich der Dichte bedingt möglich ist, ist sie dem Bild nicht. Bei einzelnen Pixeln ist die Farbe kaum zu erkennen, zumal sie ja durch die Hell-Dunkel-Skala überformt ist.

Er zeigt uns daher die von ihm speziell für die Millennium-Simulation erstellte Farbcodierung (vgl. Abb. 22.) In senkrechter Richtung ist der Hell-Dunkel-Übergang gezeigt und in waagerechter Richtung ein Farbkontinuum von geringer Geschwindigkeitsdispersion links zu hoher rechts. Volker Springel betont, dass es ihm auf gute Unterscheidbarkeit ankomme, ohne dass den Farben eine bestimmte Bedeutung zukäme. Lediglich grün habe er für seine Farbpalette vermieden.²³ Seiner Aussage nach sei das charakteristische Violett der Projektionsbilder nicht intendiert gewesen, sondern habe sich einfach aus den Daten ergeben.

Dabei experimentierte er mit verschiedenen Farbskalen, wie die Bilder in Abb. 23 zeigen. Dieses sind Entwürfe für das Titelblatt für das erwähnte *Nature*-Heft. Für farbig aufmachende Zeitschriften ist der Wechsel des dominierenden Farbtons wichtig, weswegen Volker Springel die Visualisierung der Materiedichte zunächst in anderen Farbtönen versucht hatte. Auch wenn das Titelbild letztlich in der violetten Farbcodierung erschien, so bieten diese Studien doch einen markanten Vergleich zu der üblich gewordenen Farbcodierung. Die Visualisierungen erinnern uns eher an gefärbte histologische Schnitte, während uns die violette Variante zum Weltraum zu passen scheint. Oder haben wir uns einfach schon zu sehr an das violette Design gewöhnt?

Zwei ganz verschiedene physikalische Eigenschaften werden also überlagert und durch die Kombination einer Farbcodierung mit einer Hell-Dunkel-Skala visualisiert. Die Logik der Konstruktion ist vollkommen klar und operiert ohne jeden Trick der Darstellung. Dennoch ist die Trennung der beiden Eigenschaften auf dem Bild nicht mehr möglich, weil die Trennung in »Farbe« und »Helligkeit« auf der Bildebene nicht mehr gelingt. Durch die Überlagerung der Farbwerte (der Geschwindigkeitsdispersion) mit den Graustufen (der Dichte) treten bestimmte Strukturen und Objekte leuchtender hervor. Insgesamt wird der Eindruck von Bildtiefe verstärkt. Da, wie erwähnt, weder in den Daten, noch in der

23 | Man könnte vermuten, grün passe grundsätzlich mehr zur Erde als zum Kosmos, doch andere Simulationen werden durchaus unter Verwendung von grün visualisiert.

Visualisierungssoftware Dreidimensionalität steckt, ist unser Eindruck *innerhalb* der einzelnen Bilder, von »leuchtenden« Strukturen, die dem Betrachter irgendwie »näher« seien, und von dunklen Bereichen, wo man in die »Tiefe des Raumes« sähe, also allein ein Effekt der Helligkeits- und Farbcodierung in Kombination mit den Sehgewohnheiten von Himmelsbildern.

Anders ist dies mit dem Tiefeneindruck *zwischen* den Bildern. Die Folge der fünf Bilder in Abb. 20 zeigt jeweils einen Ausschnitt aus dem vorangegangenen Bild in 4-facher Vergrößerung. Schon durch die nicht rechtwinklige (wie es den Daten entspräche), sondern trapezförmige Begrenzung der einzelnen Bilder wird ein Blick von schräg oben suggeriert. Dieser Eindruck wird noch verstärkt durch das als rechtwinklig wahrgenommene Gerüst zwischen den Bildern. Jedes Bild tritt dabei nach oben und nach vorne aus dem Vorgängerbild, dem Betrachter entgegen. Der Effekt entspricht damit dem Heran-Zoomen durch ein Teleobjektiv, bei dem das Objekt nicht einfach vergrößert, sondern herangeholt wird.

Auch diese Darstellungsweise ist keineswegs selbstverständlich. Denkbar wäre auch eine Visualisierung in Form eines immer tieferen Eindringens in den Kosmos, um den Objekten näher zu kommen, ein in Bezug auf die beobachtende Astronomie häufig verwendeter Topos.

Bei all dem ist daran zu erinnern, dass entsprechend der Logik der *Millennium*-Simulation die gezeigten Objekte gar nicht »weit weg« oder »nah dran« sind. Dies hat nichts damit zu tun, dass es sich um eine Simulation handelt, denn es wäre möglich, *bestimmte* Raumgebiete zu simulieren. Es liegt vielmehr an der Prämisse der Simulation, gerade *kein bestimmtes* Gebiet zu simulieren. Der doppelte Tiefeneindruck, dass man auf den Bildern etwas Entferntes und dazu noch in die Tiefe zu sehen scheint, ist also, streng genommen, gar nicht im Sinne der *Millennium*-Simulation.

Was aber ist auf den Projektionsbildern überhaupt zu sehen? Die Bildlegende macht dies – zumindest für ein Objekt – ganz klar: Die Folge der Ausschnittsvergrößerungen fokussiert auf einen *galaxy cluster halo*. Diese Auswahl ist offenbar visuell motiviert: das Ding, auf das die Bildfolge zoomt, ist das hellste, mithin aktivste und spannendste innerhalb des unteren, noch weitgehend strukturlosen Bildes. Astrophysik, so wird hier schon deutlich, ist objektzentriert. Insgesamt erscheint das Universum keineswegs als unendliche, leere Weite, sondern geradezu als voll. Bei der Wahl einer anderen Schichtdicke und einer anderen Helligkeitsskala sähe dies – wie erwähnt – ganz anders aus.

Die zweite Stelle, an der sich die Kombination von objektbezogenem Realismus und kosmologisch begründeter Arbitrarität zeigt, sind die beiden unteren Bilder. Eigentlich ist der simulierte Raumwürfel nur 500 Mpc/h

lang, die Bilder zeigen aber weit größere Gebiete. Nun wird, wie bereits geschildert, für die Simulation der Würfel in alle Richtungen wiederholt. Man könnte dies also auch mit dem Projektionsbild tun, dann würden sich die Strukturen jeweils mehrfach exakt wiederholen.

Bilder können nur bedingt ihre eigene Entstehung zeigen. In welchem Maße sie dies tun, hängt von der Konstruktion jedes einzelnen Bildes ab. Hier jedenfalls soll den Bildern die Periodizität der Simulation nicht anzusehen sein. Aus diesem Grund wird die Projektionsebene *schräg* in den Würfel gelegt, so dass aus den Wiederholungen rechts und links jeweils *andere* Schichten gezeigt werden. Was hier als ein ausgebreitetes Bild zu sehen ist, kann man also auch als eine *nebeneinander* gestellte Darstellung von im Simulationsraum *hintereinander* liegenden Schichten ansehen.

Die Hauptabsicht der schrägen Projektion, so bestätigt uns Volker Springel, ist aber eine andere. Durch die Nichterkennbarkeit der Grenzen des Simulationsgebietes soll die Irritation vermieden werden, die darin bestünde, dass man hier überhaupt auf Simulationsdaten sähe. Am Himmel gibt es keine periodische Wiederholung. Sähe man eine Wiederholung auf den Bildern, wäre man also sofort daran erinnert, dass dies kein realistisches Abbild sein kann. Die auf diese Weise erzeugte Einmaligkeit jeden Teilgebietes dient dazu, auf die Raumgebiete selber zu sehen. Indem die Irritation einer Wiederholung vermieden wird, soll man Strukturen im Weltall sehen, nicht Daten einer Simulation.

Auffallend dabei ist, dass diese – immerhin mit einigem zusätzlichen Rechenaufwand verbundene – Verschleierung *im* Bild in der Legende *zum* Bild gleich wieder aufgehoben wird. Denn dort wird genau diese Strategie offen benannt.

Exkurs: Die Verselbständigung eines Bildes

Die *Millennium*-Simulation ist in verschiedenen Zeitschriften publiziert worden, die verschiedene Publika ansprechen. Auffallend ist, dass in allen Zeitschriften immer die gleichen Bilder verwendet werden, wohingegen sich die Beschriftungen der Bilder und die Bildunterschriften stark unterscheiden.

Nature gilt unter den Astrophysikern trotz seiner bunten Aufmachung als vollwertige Fachzeitschrift. Das Dunkle-Materie-Bild, einschließlich der Bildunterschrift, ist schon besprochen worden²⁴. Parallel dazu erschien eine Pressemitteilung, ein kurzer Artikel im *Physik Journal* (Bar-

²⁴ | Ein zweiter Artikel in *Nature* (Springel et al. 2006) zeigt eine Serie von Zeitschnitten in der Form wie Abb. 19.

telmann 2005)²⁵ und ein ausführlicherer in *Sterne und Weltraum* (Springel 2006). In diesen dreien ist ein etwas anders verschachteltes Bild zu sehen (Abb. 24).

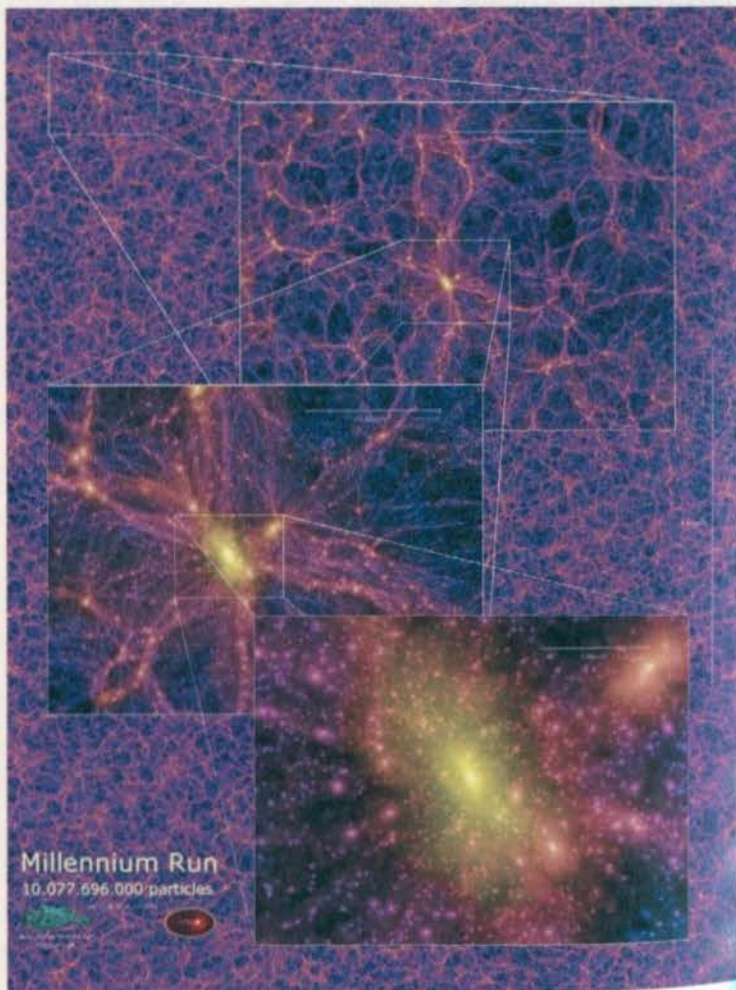


Abb. 24: Geschachteltes Projektionsbild, das fast identisch in einer Pressemitteilung und in zwei verschiedenen Zeitschriften abgedruckt ist (© Volker Springel, Max-Planck-Institut für Astrophysik, Garching).

²⁵ | Springel selbst hatte kurz vor dem *Millennium-run* einen ausführlichen Überblicksartikel über kosmologische Simulationen in derselben Zeitschrift publiziert (Springel 2003).

[Pressemitteilung:]

»Die Verteilung der Dunklen Materie im Universum auf unterschiedlichen Skalen. Das Bild im Hintergrund zeigt einen Schnitt durch die Millennium-Simulation auf einer Gesamtbreite von mehr als neun Milliarden Lichtjahren. Auf solch riesigen Skalen erscheint das Universum fast homogen, doch die überlagerte Serie von Vergrößerungen zeigt ein komplexes »kosmisches Netz« aus Dunkler Materie auf Skalen bis zu etwa 300 Millionen Lichtjahren. Diese Großraumstruktur besteht aus Filamenten, die große Leerräume umspannen und sich in massereichen Halos aus Materie treffen. Die größten dieser Halos sind mächtige Galaxienhaufen, die über eintausend Galaxien enthalten, welche von der Simulation als Halosubstruktur aufgelöst werden. Filme und Bilder zur Pressemitteilung <http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/presse/>.«

[Sterne und Weltraum:]

»Ein schrittweiser Zoom in die kosmische Großraumstruktur der Millennium-Simulation. Jedes der einzelnen Bilder vergrößert den markierten Bildausschnitt um einen Faktor 4, bis schließlich einer der vielen großen Galaxienhaufen in der Simulation mit den eingebetteten Galaxien zu sehen ist. Die Farbe der Bilder zeigt dabei die lokale »Temperatur« der Teilchen der dunklen Materie an. Die Skalen beziehen sich auf eine Hubble-Konstante mit dem Wert $H_0 = 73 \text{ km s}^{-1}/\text{Mpc}$.«

[Physik Journal:]

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

Das Bild selbst ist in allen drei Publikationen gleich, nicht jedoch die Beschriftung. Aufschlussreich ist die Art, wie die Längen angegeben sind.

Im *Physik Journal*, dessen Leserschaft Physiker aller Fachrichtungen sind, bei denen offensichtlich Grundkenntnisse in Kosmologie vorausgesetzt werden, sind die Längen in der auch fachintern benutzten Einheit »Mpc/h« angegeben (zur Erläuterung: siehe Anm. 11).

Für *Sterne und Weltraum* hingegen sind die Längen in »Megaparsec« umgerechnet worden, und diese Beschriftung wurde auch im Bild selbst entsprechend geändert. Diese Zeitschrift richtet sich vor allem an Amateur-Astronomen. Bei diesen setzt man offenbar die Kenntnis der für die Astronomie gängigen Einheit »Megaparsec« voraus, nicht aber die kosmologische Theorie der Expansion, aufgrund derer die Angabe in Mpc/h üblich ist.

Noch populärer ist die Presseerklärung. Hier werden die Längen in »Lichtjahren« angegeben. Auch wenn dies eine in der Astrophysik ganz ungebrauchliche Einheit ist, so ist sie viel leichter zu erklären als »Parsec«.

Deutlich spärlicher als in den Fachpublikationen sind in allen diesen Medien die Angaben zur Bildherstellung. In der Presseerklärung ist lediglich von einem »Schnitt durch die Millennium-Simulation« die Rede, in *Sterne und Weltraum* wird mitgeteilt, dass die »Farbe der Bilder« die »lokale Temperatur« (als Übersetzung von »Geschwindigkeits-Dispersion«) zeige, und im *Physik Journal* finden sich in der Bildunterschrift überhaupt keine Angaben zur Bildherstellung. Bei allen dreien bezieht sich der Hauptteil der Bildunterschrift auf die auf den Bildern sichtbaren Objekte, vor allem Galaxiencluster.

Bemerkenswert ist dabei der nahtlose Übergang von den Daten zu den Objekten im Universum. Wenn die Presseerklärung von einem »Schnitt durch die Millennium-Simulation auf einer Gesamtbreite von mehr als neun Milliarden Lichtjahren« spricht, so bezieht sich der erste Teil des Satzes auf die Simulationsdaten, der zweite aber schon auf das gezeigte Objekt, denn die Simulation selbst ist ja nicht neun Milliarden Lichtjahre groß. Das Datenbild als Vermittler zwischen der Simulation und dem Universum wird nicht erwähnt. Während die Daten etwas fundamental anderes sind als das Universum, ermöglicht das Bild scheinbar, in den Daten das Universum zu sehen, und zwar gerade dadurch, dass das Bild als eigenständiges Objekt hinter seiner Funktion zurücktritt.

Dabei bemühen sich die Bildunterschriften um einen glatten Übergang von dem, was man sieht, zu dem, was man sehen soll, nämlich den Objekten im Universum. Wenn wir verschiedenen Personen diese Bilder ohne Erläuterung und ohne Bildunterschrift gezeigt haben, und sie gefragt haben, was sie auf ihnen sehen, so war immer von »netzartigen Strukturen« und »leuchtenden Dingen« die Rede. Die Bildunterschrift macht daraus das »richtige« Objekt, indem sie den visuellen Eindruck in »kosmisches Netz aus Dunkler Materie«, »Galaxien« und »Galaxienhaufen« übersetzt.

Die Projektionsbilder aus der Millennium-Simulation wie in Abb. 19, Abb. 20 und Abb. 24 stehen für sich, sprechen aber nicht für sich. Sie sind weder selbstverständlich, noch unverständlich. Man kann sie nicht ohne Erklärung verstehen, weder die ihnen zugrunde liegende Simulation, noch die Visualisierungen selbst. Umgekehrt vermitteln sie auch nicht das Gefühl, nichts zu verstehen, wie es zahlreiche der Diagramme (siehe gleich) tun. Das Bild als Bild funktioniert genau durch diese Vagheit, was das Dargestellte und das Verfahren der Darstellung angeht. Genau deshalb lässt sich dieses Bild – ohne Änderungen an ihm selbst – für ganz

unterschiedlich vorgebildete Betrachter als Illustration des Millennium-runs verwenden.

Der Forschung dienen diese Bilder jedenfalls nicht unmittelbar. Sie werden zum Beispiel nicht systematisch nach interessanten Objekten oder Strukturen durchsucht. Es wurden nicht einmal von jedem Raumgebiet und aus jeder Richtung derartige Bilder erstellt. Es ist in den auf den verschiedenen Darstellungsvarianten immer derselbe Galaxien-Cluster zu sehen.

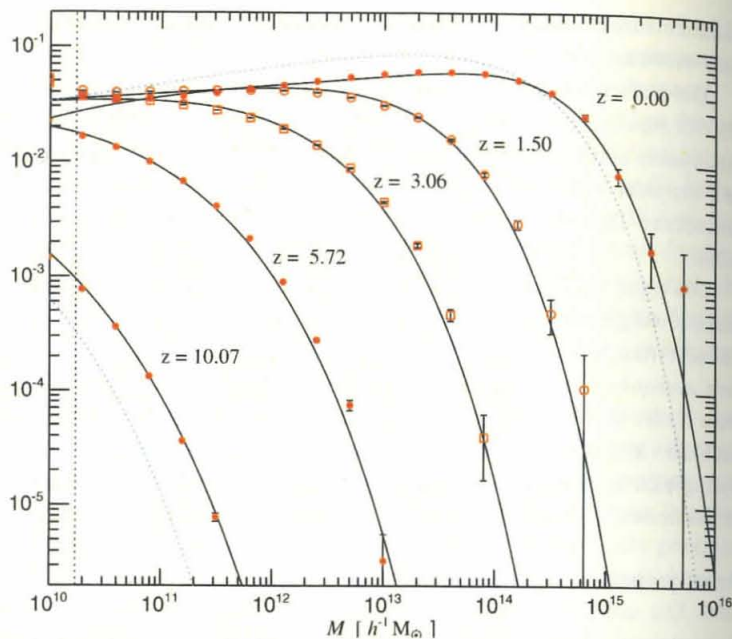
Die eigentliche auf der Millennium-Simulation beruhende Forschung arbeitet weitgehend mit Daten, nicht mit Bildern. Sie wird auch in anderen Zeitschriften, wie den *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, dem *Astrophysical Journal* oder *Astronomy and Astrophysics* publiziert. Dort findet sich das Projektionsbild jedoch nicht. Und dennoch werden auch die vielfältigen Resultate des *post-processing* wiederum visualisiert, wenngleich in entsprechend uneinheitlicherer Form als das kanonische Projektionsbild.

Post-processing: Diagramme

Beim *post-processing* werden an die Datensätze gezielt Fragen gestellt. Es kann darum gehen, Objekte mit definierten Eigenschaften zu suchen oder bestimmte Strukturen oder zeitliche Entwicklungen zu erkennen. Wegen der großen Menge der Daten basieren solche Analysen selbst wieder auf Computerprogrammen, die zum Teil als Teile von *GADGET* bereitstehen, zum Teil aber auch speziell geschrieben werden müssen.

Zwei Beispiele sollen dies verdeutlichen. Eine typische Aufgabe ist das Auffinden verdichteter Dunkler Materie. Dazu werden – für jeden *snapshot* einzeln – diejenigen Teilchen, deren Abstand unter einer bestimmten Grenze liegt, zu Einheiten zusammengefasst und katalogisiert. Ab 20 Teilchen werden diese als Objekte behandelt. Ob es sich dabei tatsächlich um physikalisch durch Gravitation zusammenhängende, also durch die Expansion des Universums nicht mehr auseinander zu ziehende Objekte (die Astrophysiker sprechen von »virialisierten« Objekten) handelt, lässt sich anhand der Identifikationsnummern der Teilchen über verschiedene Zeitschnitte hinweg verfolgen. Diese Nummern ermöglichen es auch festzustellen, welche Objekte sich im Laufe der Zeit zu größeren Objekten verbinden. Daraus resultiert ein Katalog von 20 Millionen Galaxien, die individuell bis zu ihrem Ursprung zurückverfolgt werden können.²⁶

²⁶ | Genauer gesagt, sind dies nicht die Galaxien selber, sondern deren Halos aus Dunkler Materie. Halos sind weitgehend kugelförmige Verdich-



Differential halo number density as a function of mass and epoch. The function $n(M, z)$ gives the comoving number density of halos less massive than M . We plot it as the halo multiplicity function $M^2 \rho^{-1} dn/dM$, where ρ is the mean density of the universe. Groups of particles were found using a friends-of-friends algorithm with linking length equal to 0.2 of the mean particle separation. The fraction of mass bound to halos of more than 20 particles (vertical dotted line) grows from 6.42×10^{-4} at $z = 10.07$ to 0.496 at $z = 0$. Solid lines are predictions from an analytic fitting function proposed in previous work, while the dashed lines give the Press-Schechter model at $z = 10.07$ and $z = 0$.

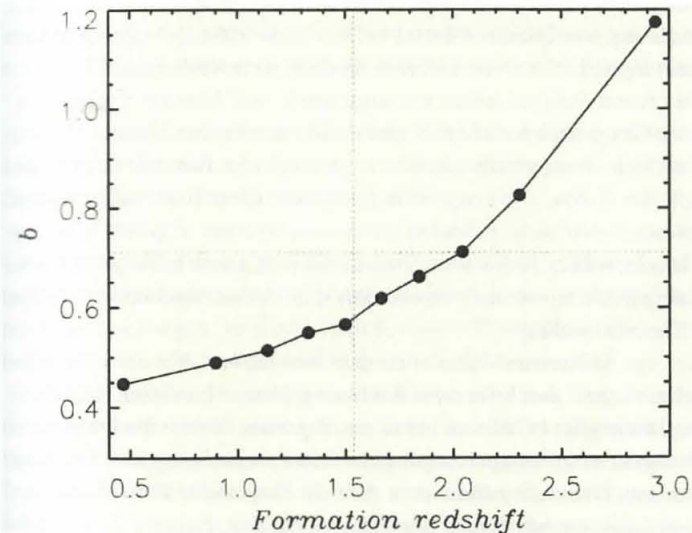
Abb. 25: Verteilung der Häufigkeit von Halos aus Dunkler Materie in Abhängigkeit von deren Größe, mit der Originalbildlegende, aus Springel et al. 2005.

Die Möglichkeit der Erstellung derartiger *merger trees* wird als ein Hauptgewinn der *Millennium*-Simulation betont. Dafür sind ganz neue Codes erforderlich, die mit dem Code für die eigentliche Simulation nichts zu tun haben. Die Erstellung der *merger trees* muss vollkommen

tungen von Dunkler Materie in unterschiedlicher Größe, in denen sich die gewöhnliche Materie zu Galaxien und Galaxienhaufen verdichtet.

automatisiert sein, da man es ja immer mit allen 10 Mrd. Teilchen zu tun hat. Dementsprechend erfolgt die Auswertung vor allem statistisch. Die so gewonnenen Resultate werden dann visualisiert, allerdings ganz anders als in Abb. 19.

Abb. 25 gibt eine solche Visualisierung wieder. Es geht um die Häufigkeit verschieden großer Objekte zu verschiedenen Zeiten. Auf der x-Achse ist (logarithmisch) die Masse der Objekte, ausgedrückt in Sonnenmassen (der üblichen Masseneinheit in der Astrophysik) aufgetragen. Die y-Achse bezeichnet (ebenfalls logarithmisch) die jeweilige Häufigkeit für jede Größe.²⁷



Bias as a function of halo formation time. We divide haloes with particle number in the range [100, 200] into ten equalized subsamples as a function of their formation time. For each subsample we compute a mean formation redshift and a bias factor. The figure plots these two quantities against each other. Vertical and horizontal dotted lines show the mean formation redshift and the mean bias for the sample as a whole.

Abb. 26: Verteilung von kleinen Halos aus unterschiedlichen Epochen, Erläuterung im Text, aus Gao et al. (2005).

²⁷ | Streng genommen ist die differentielle Häufigkeit aufgetragen. Dies ist erforderlich, da die Masse kontinuierlich aufgetragen ist. Die Gesamtmasse der verdichteten Objekte ergibt sich dann durch die Integration der differentiellen Häufigkeit, also als Fläche unter der Kurve.

Man sieht, dass zum Beispiel für $z = 10,07$ (also während der Anfangsphase der Simulation) noch nicht sehr viele Objekte existieren. Das schwerste Objekt hat $5 \cdot 10^{11}$ Sonnenmassen, was etwa 500 Teilchen entspricht. Im Laufe der Zeit (also mit abnehmendem z) nehmen sowohl die jeweilige Häufigkeit als auch die maximale Größe zu, bis bei $z = 0$ (also heute) Objekte mit bis zu 10^{16} Sonnenmassen (10 Mio. Teilchen) entstanden sind.

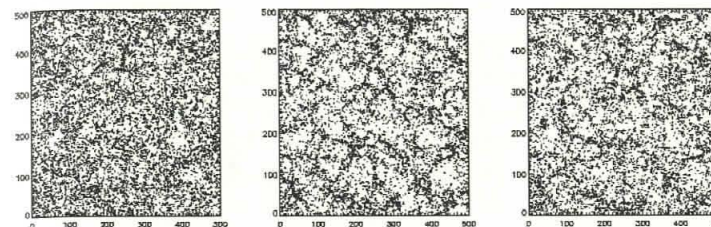
Das wichtigste Ergebnis dieser Auswertung besteht darin, dass schon früher als in dem gängigen Modell (das durch blaue Kurven dargestellt ist) größere Objekte in höherer Zahl vorkommen. Dies ist von daher wichtig, als so das kosmologische Modell einschließlich der verwendeten Parameter nicht in Konflikt zu den Beobachtungen gerät. Insbesondere die Beobachtung von Quasaren deutet auf eine sehr frühe Entstehung großer Verdichtungen hin, was die früheren Modelle nicht vorhersagten.

Das zweite Beispiel haben wir ausgewählt, weil hier das Ergebnis sowohl als Graph als auch als Bild visualisiert wurde. Die Dunkle Materie formiert sich – wie gerade gesehen – im Laufe der Zeit zu Halos unterschiedlicher Größe. Die Frage ist nun, wie sich diese Halos selbst wieder gruppieren, bevor sie zu größeren Halos verschmelzen. Eigentlich, so sagt die Theorie, sollten Halos *derselben* Größe sich gleich stark gruppieren, unabhängig davon, wann sie entstanden sind. Ältere Simulationen haben diese Theorie bestätigt.

Aus der *Millennium*-Simulation geht nun hervor, dass dies für kleine Halos, die erst durch die hohe Auflösung dieser Simulation »sichtbar« werden, nicht gilt. In Worten lautet das Ergebnis: Halos, die früher entstanden sind, sind – bei gleicher Größe – heute stärker gruppiert als später entstandene. Dieses Ergebnis ist in Abb. 26 dargestellt. Die x-Achse bezeichnet die Rotverschiebung, letztlich also die Zeit. Dagegen ist b aufgetragen, das ein Maß für die »Gruppiertheit« darstellt. Für die Auswertung wurden alle Halos, die zwischen 100 und 200 Teilchen enthalten, berücksichtigt. Der Anstieg der Kurve zeigt, dass ältere Halos stärker gruppiert sind als jüngere.

In Abb. 27 ist jeweils eine Projektion einer 30 Mpc/h dicken Schicht für die gesamte Stirnfläche von 500 Mpc/h mal 500 Mpc/h gezeigt. Berücksichtigt sind links die 10% jüngsten Halos, in der Mitte die 10% ältesten Halos und rechts eine zufällige Mischung.²⁸ Die stärkere Verdichtung zu Filamenten ist hier unmittelbar zu sehen. Der Text selbst spricht von einer »visual impression« (Gao et al. 2005). Aber Abb. 26, so wird gesagt, zeige das Phänomen »in more detail«. »Detail« bezieht sich also auf den

²⁸ | Für die Altersbestimmung benötigt man den Katalog der *merger trees*: Das »Alter« ist die Zeit, die vergangen ist, seitdem das Objekt mehr als 20 Teilchen hat.



Images comparing the distribution of "young" haloes, "old" haloes and dark matter. The region plotted is a 30h-1Mpc slice through the Millennium Simulation. All haloes plotted contain between 100 and 200 particles. The row shows the 10% youngest (left) and 10% oldest (middle) of these haloes, together with an equal number of randomly selected dark matter particles (right).

Abb. 27: Visualisierungen der Verteilung von kleinen Halos aus unterschiedlichen Epochen (Ausschnitt), mit Originalbildlegende; weitere Erläuterungen im Text, aus Gao et al. (2005).

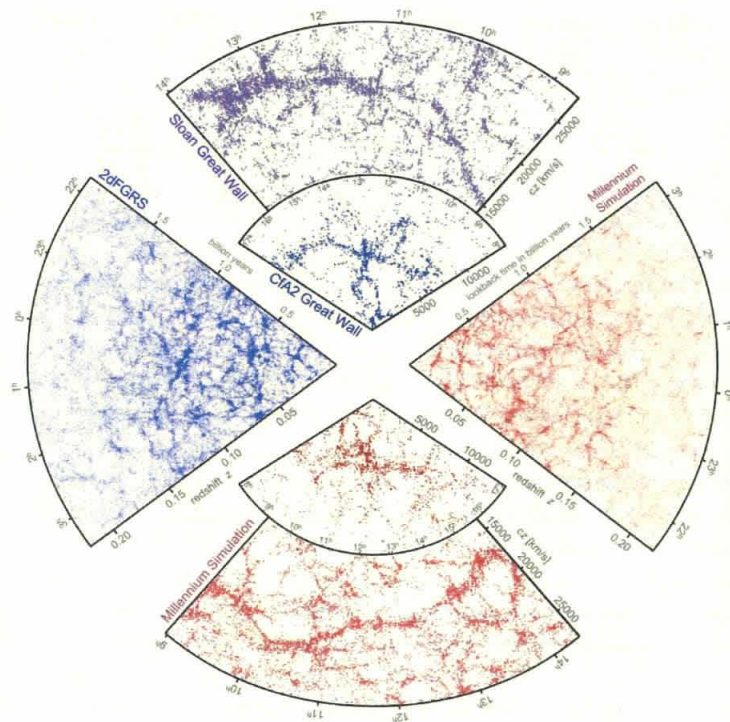
Grad des Verständnisses grundlegender Prozesse und nicht etwa auf eine bestimmte Struktur in der Halo-Verteilung selbst. Simulationen und deren Visualisierungen, so wird deutlich, zeigen Himmelsobjekte exemplarisch, nicht spezifisch. Wir werden darauf zurückkommen.

Vergleicht man den Gebrauch von Bildern und von Diagrammen, so darf nicht der Eindruck entstehen, sie seien für alle Bereiche gleich wichtig. In den Fachpublikationen überwiegen ganz eindeutig die Diagramme. In Farbe oder schwarz-weiß werden statistische Auswertungen veranschaulicht, Zeitreihen geplottet, Ergebnisse mit früheren Simulationen, Beobachtungsdaten oder theoretischen Modellen verglichen, usw.

Vergleich mit Beobachtungen 1: Karten

Eine dritte Form der Visualisierung sind Karten. In dem ausgewählten Beispiel findet sich auch erstmals ein Vergleich mit Beobachtungsdaten, und zwar auf visueller Ebene.

Die blauen und violetten Sektoren in Abb. 28 resultieren aus Beobachtungen. Dargestellt sind die Ergebnisse der drei größten Kartierungen von Galaxien. Alle Kartierungen beziehen sich nicht auf den ganzen Himmel, sondern nur auf einen bestimmten Längenbereich, der außen in Stunden angegeben ist. Es wurde auch nur jeweils ein bestimmter Breitenbereich durchmustert. Für jede beobachtete Galaxie wurde deren Richtung und Rotverschiebung gemessen. Aus der Rotverschiebung ergibt sich mittels der Lichtgeschwindigkeit die Entfernung von der Erde, insgesamt also die



The galaxy distribution obtained from spectroscopic redshift surveys and from mock catalogues constructed from cosmological simulations. The small slice at the top shows the CfA2 "Great Wall", with the Coma cluster at the centre. Drawn to the same scale is a small section of the SDSS, in which an even larger "Sloan Great Wall" has been identified. This is one of the largest observed structures in the Universe, containing over 10,000 galaxies and stretching over more than 1.37 billion light years. The wedge on the left shows one-half of the 2dFGRS, which determined distances to more than 220,000 galaxies in the southern sky out to a depth of 2 billion light years. The SDSS has a similar depth but a larger solid angle and currently includes over 650,000 observed redshifts in the northern sky. At the bottom and on the right, mock galaxy surveys constructed using semianalytic techniques to simulate the formation and evolution of galaxies within the evolving dark matter distribution of the "Millennium" simulation are shown, selected with matching survey geometries and magnitude limits.

Abb. 28: Vergleich der Daten aus der Millennium-Simulation mit Beobachtungsdaten, mit Originalbildlegende, aus Springel et al 2006.

Position im Raum. In Abb. 28 sind die Positionen in eine Breitenenebene projiziert. Der Abstand vom Zentrum markiert die Entfernung von der Erde, die gleichzeitig (wegen der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit) auch den Zeitpunkt in der Vergangenheit angibt, zu dem das Licht ausgesandt wurde. Als Maß für die Entfernung ist wahlweise die Zeit, die Rotverschiebung z oder die Fluchtgeschwindigkeit cz angegeben.

Der kleinere Sektor in Abb. 28 beruht auf den Messungen des *Harvard-Smithsonian Centre for Astrophysics* (CfA2). Deutlich zu sehen ist eine lange Struktur, der *Great Wall*. Der größere der oberen Sektoren zeigt Daten des internationalen *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS), der am *Apache Point Observatory* durchgeführt wird. In dieser weiter in den Raum (und die Vergangenheit) reichenden Kartierung erkennt man eine noch größere Struktur, den *Sloan Great Wall*, das größte bekannte »Objekt« im Universum überhaupt. In dem linken Sektor finden sich die entsprechenden Daten des britisch-australischen *2 degree Field Galaxy Redshift Survey* (2dFGRS).

Wie diese Messungen funktionieren, inwieweit die Erkennung von Galaxien automatisiert ist, welchen Anteil der Galaxien man überhaupt »sehen« kann usw., ist der Graphik nicht anzusehen. Für die beobachtende Astronomie gibt es natürlich vergleichsweise komplexe, wenngleich in der Sache ganz andersartige Verfahren, um zu einer Visualisierung wie dieser zu kommen. Die Theoretiker wissen dies, sie wissen aber auch, dass sie gar nicht erst zu versuchen brauchen, die technischen Bedingungen der Entstehung der Galaxienkarten zu verstehen. Hier gibt es methodisch und damit sozial eine Trennung; eine Verbindung besteht nur auf der Ebene der Daten und der Visualisierungen in Bezug auf bestimmte Objekte. Die Karten selbst kann man für den Vergleich einfach als Bilddateien von den Websites der entsprechenden Projekte herunterladen.

Sektorenkarten wie diese werden nun als Standard genommen, um die Simulationsdaten mit den Beobachtungsdaten zu vergleichen. Die Daten aus der *Millennium*-Simulation und die Beobachtungsdaten sind jeweils gegenüber dargestellt. Das heißt, die Vergleichbarkeit selbst, die sich aus der auf den ersten Blick erkennbaren Ähnlichkeit der roten und der blau-violetten Sektoren ergibt, resultiert *ausschließlich* auf der Anpassung der Theorie an die Beobachtung. Oder genauer: der Anpassung der *Visualisierung* der Simulationsdaten an die visualisierten Beobachtungsdaten.

Für diesen Vergleich werden die Simulationsdaten extrem zurechtgestutzt. Ein vergleichsweise kleines Raumgebiet wird ausgewählt, die Daten in eine Ebene projiziert, die Geschwindigkeit der Objekte außer Acht gelassen und in größerer Entfernung die Objekte deutlich ausgedünnt. Das Resultat sind Karten, deren Objekte sich *im Prinzip* ähneln, was als Argument für die Richtigkeit der Simulation betrachtet wird.

Dies ist eine ganze andere Bildpraxis als die zur Illustration von Simulationsdaten. Hier geht es nicht um Schönheit oder Anschaulichkeit, sondern um unmittelbare Vergleichbarkeit, die selbst wieder in den Dienst der Legitimierung der Simulation gestellt wird. Wie bei den Illustrationen gehen mit der Visualisierung die meisten Informationen des Datensatzes verloren; der Zweck und die Umsetzung dieser extrem reduzierten Datenbilder sind jedoch ganz verschiedene. In beiden Fällen geht es um Ähnlichkeit, aber bei den Projektionsbildern ist es eine Ähnlichkeit mit Vorstellungen von Objekten im Universum (oder gängigen Bildern von diesen), während es bei den Karten um Ähnlichkeit mit anderen Datenbildern geht.

Nun kann man offensichtlich aus jedem Datensatz mit mehreren Millionen Galaxien immer Karten erzeugen, die im Prinzip so aussehen wie diese. Doch eine prinzipielle Ähnlichkeit reicht nicht. Um über die *prinzipielle* Ähnlichkeit hinaus auch eine *spezifische* Ähnlichkeit zu bekommen, wurde in die Darstellungen der Simulationsdaten ein Element – man muss es so sagen – *eingebaut*. Ganz ähnliche Objekte wie den *Great Wall* und den *Sloan Great Wall* sieht man nun auch auf den auf der Simulation beruhenden unteren Sektoren. Wie ist das möglich, wenn doch schon vom Ansatz der *Millennium*-Simulation her gar keine bestimmten Objekte, ja nicht einmal eine bestimmte Raumregion simuliert wird? Warum finden sich hier, an etwa derselben Stelle, ähnlich aussehende Objekte? Ist dies Zufall, und wenn ja, was hätte dieser Zufall für eine Aussagekraft?

Volker Springel gibt uns darauf eine überraschend einfache Antwort. In der Tat wurde speziell für diese Visualisierung ein Raumausschnitt noch einmal, und zwar *mehrfach* simuliert, *bis* sich solche Objekte zeigten. Genau diese *runs* wurden dann für den Kartenvergleich ausgewählt.

Einerseits mag man hier die Grenze der legitimen Bildanpassung schon als überschritten ansehen. Auch wenn das Objekt nicht gerade direkt in die Karte gezeichnet wurde, so nimmt doch die Auswahl aus einer Vielzahl von Möglichkeiten *nach dem Kriterium der Ähnlichkeit* dem Vergleich seine epistemische Kraft. Das Bild selbst hat diese nur deshalb behalten, weil man ihm dieses Auswahlkriterium nicht mehr ansieht. Und in der Bildunterschrift wird dies mit »selected with matching survey geometries« nur sehr vage angedeutet.

Andererseits kann man einwenden, gerade *weil* Simulationen keine bestimmten Gebiete oder Objekte simulieren, ist es legitim, sie mehrfach laufen zu lassen und alle Ergebnisse als gleichermaßen gültig anzusehen. *Wenn* sich dann ein ähnliches Objekt wie in der Beobachtung zeigt, ist dies immerhin ein Hinweis darauf, dass solche Objekte (in der Simulation) entstehen *können*.

Ungeachtet dieser bildethischen (oder simulationsethischen) Frage

zeigt dieses Beispiel die starke Orientierung der simulierenden Astrophysik an den Ergebnissen der beobachtenden Astrophysik als Korrektiv für die Simulationen.

Der Weltraum auf dem Bildschirm: Simulationen und Visualisierungen in 2D, 3D und 4D

Die Projektionsbilder aus der *Millennium*-Simulation sind im Wesentlichen Visualisierungen zur Illustration. Sie dienen nicht unmittelbar der Forschung. Zudem sind sie (bis auf die Durchflüge) nur zweidimensional. All dies gilt für die beiden folgenden Simulationen nicht, bei denen die Visualisierungen ganz eng mit dem Verständnis der untersuchten Prozesse zusammenhängen.

Auch von der Physik her unterscheiden sie sich signifikant von der *Millennium*-Simulation. Diese hatte nur mit Dunkler Materie zu tun, die nur durch Gravitation wechselwirkt. Sobald aber gewöhnliche, baryonische Materie simuliert wird, muss man Stöße zwischen Teilchen, mit hin Druck und Temperatur, berücksichtigen. Dass die simulierten Objekte einzelne Sterne sind, also sehr viel kleiner als ein einziges von Volker Springels »Teilchen«, ist demgegenüber ein geringer Unterschied, da die Simulationsmethoden für kleine und für große Objekte sich im Prinzip nicht unterscheiden.

Supernovae

Friedrich Röpke ist Leiter der DFG-Nachwuchsgruppe *Comprehensive Modeling of Type Ia Supernova Explosions*. Eine Supernova ist die Explosion eines Sterns durch eine thermonukleare Reaktion. Dabei verschmelzen die Atomkerne der Bestandteile und bilden verschiedene schwerere Elemente. Bei dem Prozess werden innerhalb kurzer Zeit ungeheure Mengen an Strahlung freigesetzt. Dies macht Supernovae vor allem für die beobachtende Astronomie so interessant. Obwohl das Objekt, ein einzelner Stern, sehr klein ist, ist das Ereignis so hell, dass man es noch aus sehr großer Entfernung beobachten kann. Je weiter entfernt, umso früher hat eine Supernova stattgefunden und umso tiefer kann man in die Vergangenheit des Universums sehen.

Von besonderer Bedeutung sind Supernovae vom Typ Ia, da sie immer fast gleich hell sind, so dass man aus dem Vergleich ihrer Helligkeit mit ihrer Rotverschiebung auf ihre Entfernung schließen kann. Es waren die Beobachtungen solcher Typ-Ia-Supernovae, die dazu geführt haben, dass man seit einigen Jahren der Meinung ist, dass sich momentan die Expansion des Universums nicht abbrems, sondern beschleunigt.

Um die Lichtkurve und ihre Spektralzerlegung interpretieren zu können, ist ein Verständnis der chemischen und physikalischen Prozesse notwendig. Während das Leuchten einer Supernova mehrere Wochen dauert, geschieht die eigentliche Explosion innerhalb von etwa 1 bis 2 Sekunden. Zu dieser Zeit ist der Stern noch so dicht, dass keine Strahlung nach außen dringen kann. Das heißt, genau die entscheidende Phase einer Supernova ist nicht beobachtbar.

Das simulierte Objekt ist im kosmischen Maßstab sehr klein, aber die Simulation selbst nicht. Verwendet wird ein Gitterkubus, der in jede Richtung 1024-fach unterteilt ist, also etwa 1 Mrd. Zellen enthält. Anders als in der *Millennium*-Simulation bleiben hier nicht die Teilchen bestehen und bewegen sich in dem Volumen. Vielmehr werden die Zellen beibehalten und jeweils berechnet, wie viel Materie jede Zelle zu welcher Seite betritt oder verlässt. Das für die Simulation verwendete Programm gehört damit zu den *grid codes*. Allerdings wird der Maßstab der Größe des Objekts angepasst. Anfangs hat der Würfel eine Kantenlänge von 2000 Kilometern, später entsprechend mehr.

Kompliziert wird die Simulation dadurch, dass sich die Materie durch die Kernreaktionen verändert, also nicht nur Physik (Hydrodynamik), sondern auch Kernchemie in das Modell mit eingehen muss.²⁹ Die Simulation beruht also, mehr als die vorangehenden, auf speziellen theoretischen Vorannahmen und Modellen. Zudem unterscheiden sich die Supernovae untereinander, so dass Friedrich Röpke die Simulation mehrfach mit verschiedenen Parametern durchführt, um herauszufinden, welcher Parameter für die beobachteten Varianten maßgeblich ist.

Für die Visualisierung stellt sich – wie bei jeder Simulation – die Frage, was eigentlich das Objekt ist. Die Materie? Die Zellen? Die Bewegung? Dies ist durch die Daten selbst nicht vorgegeben. Zudem ist bei dem Prozess die Dreidimensionalität entscheidend, doch wie kann man diese darstellen?

Friedrich Röpke konstruiert zunächst eine Fläche im Raum. Die Fläche ist die »thermonukleare Flamme«, also die Orte, an denen gerade die thermonukleare Reaktionen passieren. Diese Fläche wird durch Instabilitäten und Turbulenzen stark verformt und bekommt dadurch eine komplizierte Morphologie. Dann wird jedem Raumpunkt ein Zahlenwert zugeordnet, der den Abstand zur Flamme angibt. Die Fläche besteht also

29 | Bei den von Friedrich Röpke untersuchten Supernovae fusioniert in einem weißen Zwerg ^{12}C und ^{16}O zu ^{56}Ni . Trotz der ganz andersartigen Verbrennung beruhen Friedrich Röpkes Simulationsmodelle auf solchen, die in der Automobilindustrie zur Simulation von Verbrennungen im Motor erstellt wurden.

aus den Raumpunkten mit dem Abstand Null. Diese *level set method* wird auch in der Medizin für die Veranschaulichung von dreidimensionalen Objekten angewandt.

Die Visualisierung selbst geschieht dadurch, dass die Fläche als Außenfläche eines auf diese Weise theoretisch erzeugten Dings gezeigt wird. Künstliche Beleuchtung und Schatten (*volume rendering*) lassen dieses Ding als ein räumliches Objekt erscheinen. In Abb. 29 ist das durch die Flammenfläche definierte Ding blass-blau dargestellt. Gelb-orange ist hingegen die Materiedichte des explodierenden Sterns gezeigt. Um die immer im Inneren des Gases befindliche Flammenfläche sehen zu können, ist ein 90°-Sektor aus dem Stern herausgeschnitten worden.

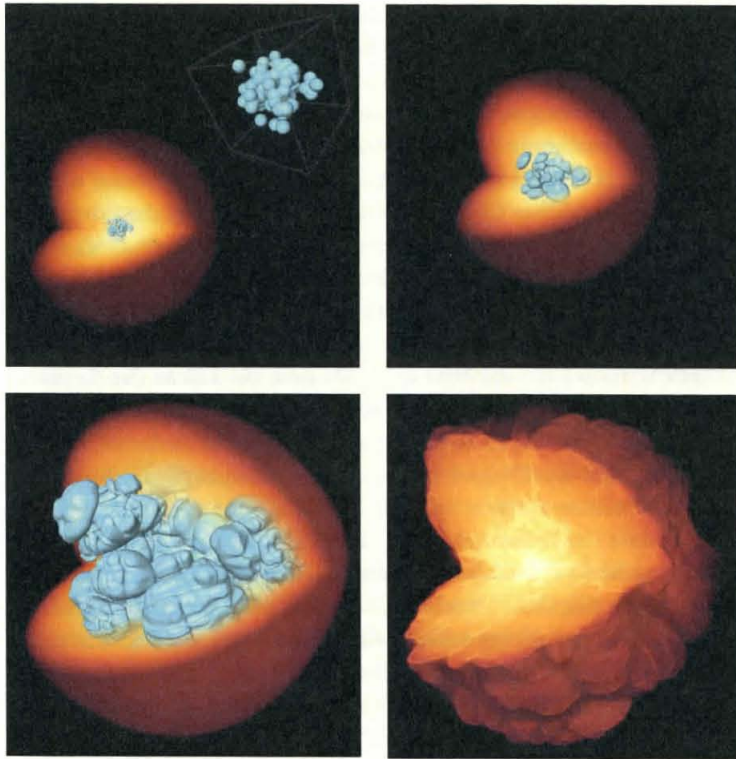
Auch wenn sowohl das Bild selbst als auch die Fläche der thermonuklearen Flamme zweidimensional sind, so ist dennoch auf den ersten Blick zu erkennen, dass die zugrunde liegende Simulation dreidimensional ist. Man sieht das »Ding« dreidimensional, und auch die Flammenfläche verformt sich im Raum.

Angesichts des hohen Aufwands für die Erstellung einer solchen Visualisierung sind wir zunächst erstaunt, dass Friedrich Röpke betont, Visualisierungen seien kein Mittel zur Entdeckung. Auch der Vergleich mit den Beobachtungen erfolge ausschließlich über Daten, die man aus dem *post-processing* der Ergebnisdaten erhalte, nicht in Form von Bildern.

Auch hier hat die Bildpraxis mit der Anbindung an die Beobachtung zu tun. Für eine Supernova, die wegen ihrer Kleinheit immer nur als Punkt gesehen werden kann, spielen Bilder (hier im Sinne von *räumlichen* Helligkeitsdifferenzen) keine Rolle. Wichtig und gut beobachtbar ist hingegen der zeitliche Verlauf der Lichtkurve nach der Explosion, welche zudem spektral zerlegt werden kann. Entsprechend berechnet man aus den Simulationsdaten, wie hell die verschiedenen chemischen Elemente strahlen würden und kombiniert diese Daten zu einem »synthetischen Spektrum«, das dann mit dem beobachteten Spektrum verglichen werden kann. Wenn beide übereinstimmen, spricht einiges dafür, dass die Simulation der Verbrennung richtig war – und dann kann man sich die Visualisierung ansehen, um den Prozess zu verstehen. Visualisierungen, so drückt es Friedrich Röpke aus, dienen dem »Erklären«, aber die Daten enthalten die »Erkenntnisse«.

Sonnenprotuberanzen

Friedrich Kupka forscht in der Gruppe *Stellar Structure and Evolution*. Auch er steckt sehr viel Arbeit in die Visualisierung seiner Simulation, aber auch er betont, dass die harten Ergebnisse aus dem *post-processing* gewonnen werden – und diese Ergebnisse werden dann in üblichen *plots*



Snapshots from a full-star SN Ia simulation starting from a multi-spot ignition scenario. The logarithm of the density is volume rendered indicating the extend of the WD star and the isosurface corresponds to the thermonuclear flame. The last snapshot corresponds to the end of the simulation and is not on scale with the earlier snapshots.

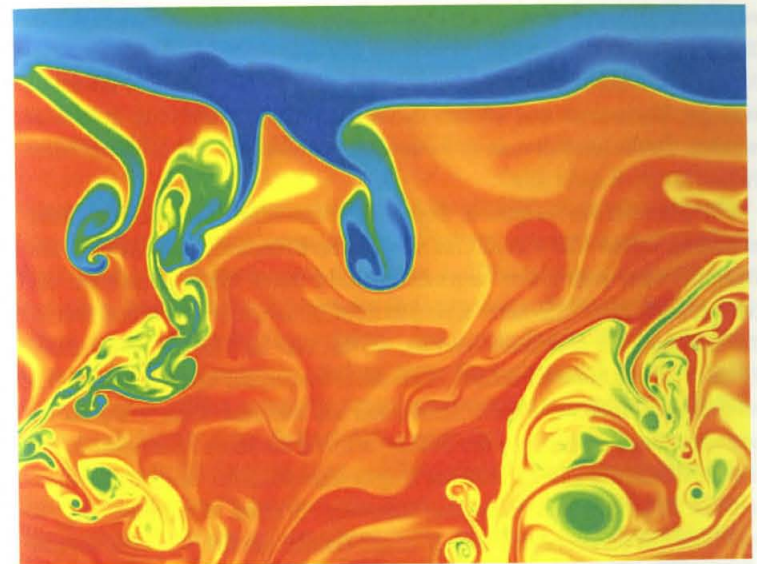
Abb. 29: Visualisierung der thermonuklearen Flamme aus der Simulation einer Typ-1a-Supernova; aus Röpke (2006). Die Bilder zeigen den Zustand am Anfang der Explosion sowie 0,3 Sekunden, 0,6 Sekunden und 10 Sekunden danach. (© Friedrich Röpke, Max-Planck-Institut für Astrophysik, Garching).

visualisiert. Und doch haben Visualisierungen für Friedrich Kupka noch eine andere Funktion neben der Visualisierung von Daten und dem nachträglichen Verstehen von Phänomenen. Bildliche Darstellungen dienen als Heuristik zum Auffinden neuer Phänomene. Dafür muss man allerdings, das zeigen seine Visualisierungen deutlich, gleichzeitig die Physik,

den Simulationsansatz und das Visualisierungsverfahren verstehen. Dies gilt insbesondere für zweidimensionale Simulationen.

Dass – wie bei Friedrich Röpke – zwar die Visualisierung, nicht aber die Simulation zweidimensional ist, ist nicht selbstverständlich. Man kann durchaus physikalische Prozesse durch geeignete Randbedingungen zweidimensionalisieren, und zwar schon in der Simulation, nicht erst in der Visualisierung. Dies wird häufig aus Gründen der Einfachheit und der besseren Auflösung getan. Es ist dann im Einzelfall zu diskutieren, was dies über in der Natur so nicht beschränkte Phänomene aussagt.

Abb. 30 zeigt einen *snapshot* aus einem Film zur Dynamik der Grenzschicht der Sonne. Das Bild wirkt zweidimensional, aber wir können dem Bild nicht ansehen, ob die zu Grunde liegende Simulation zwei- oder dreidimensional ist. Dies geht nicht nur uns so: Mehrfach fragen Kollegen



Specific entropy (red = high) in the high-resolution domain. Note the sharp and smooth boundary of the nascent plume (left of the middle); the instabilities and entrainment of surface material (low entropy) in the more developed plume (farther left); and the head instabilities of the plume quite to the left. Compare with the smooth structures in the entropy plot in Stein & Nordlund. (2000), fig. 11 there. In vorticity indications of turbulence are, however, seen there, l.c., fig. 13.

Abb. 30: Snapshot aus einer Simulation der Dynamik in der Grenzschicht der Sonne, aus Muthsam et al. (2008).

bei Vorträgen und informellen Diskussionen, ob eine Simulation, deren Visualisierung sie gerade gezeigt bekommen, »2D or 3D« sei.

Die Dimension des Modells der Simulation ist unbedingt von der Dimension der Visualisierung zu unterscheiden. Der Begriff »Dimension der Visualisierung« kann sich auf zweierlei beziehen. Physisch sind die meisten Visualisierungen zweidimensional, weil schlicht der Bildschirm, die Leinwand, oder das Papier zweidimensional (flach) sind. Dies gilt aber nicht unbedingt für das, was man auf dem Bild sieht. Eine dreidimensionale Simulation kann dreidimensional oder zweidimensional visualisiert werden, also so, dass man ihr die 3-Dimensionalität der Simulation ansieht oder eben nicht.

Bei Friedrich Kupkas zweidimensional wirkendem Bild ist tatsächlich auch die Simulation schon zweidimensional. Man kann sich dies so vorstellen, als würde man die Gasbewegungen zwischen zwei parallelen, senkrecht ins Innere der Sonne reichenden Glasplatten beobachten. Die Beschränkung auf zwei Dimensionen hat technische Gründe: Ein 2D-Modell ist einfacher zu programmieren und die Berechnungen brauchen weniger Rechenzeit und können daher mit höherer Auflösung gerechnet werden. Dafür handelt man sich allerdings Effekte ein, die es in der wirklichen 3D-Welt nicht gibt.

Wir sind etwas skeptisch, doch Friedrich Kupka sagt uns, er könne eindeutig solche »2D-Artefakte« von echten Effekten unterscheiden. Ein Beispiel: Man sieht einen vertikalen Schnitt durch die Grenzschicht der Sonne, etwa 2600 Kilometer breit und 2000 Kilometer tief. Farbcodiert ist die Entropie, die dort höher (rot) ist, wo das Gas heiß ist. Der eigentliche Effekt sind die herabsinkenden, sich dabei biegender und am Rande verwirbelnden *plumes* (Fahnen, Schwaden) aus kälterem Gas, wie man sie neu entstehend etwas links der Bildmitte sowie als ältere Exemplare in der linken Bildhälfte sieht. Friedrich Kupka unterscheidet den sich verbreiternden Kopf von dem nach oben weisenden Stamm. Außerdem zeigt er uns Bereiche rotierender Gases geringer Dichte, die sich von dem Stamm ablösen. Diese *vortex patches* (Wirbelflecken) entlang des Stamms eines *plumes* sind allerdings ein typisches 2D-Artefakt.

Während wir, als wir es gezeigt bekommen, die *plumes* und die *vortex patches* sehen, sind wir nicht in der Lage, reale Phänomene von 2D-Artefakten anhand des Bildes zu unterscheiden. Friedrich Kupka sagt uns, dass niemand dies ohne Hintergrundwissen könne. Gerade die *vortex patches* seien aber schon aus der Meteorologie und der Ozeanographie bekannt und ihre Physik gut verstanden. In früheren, größeren Simulationen habe man zudem festgestellt, dass sie in 2D auftauchen, nicht aber in 3D. Friedrich Kupka warnt daher davor, solche Bilder ohne Erklärung Laien zu zeigen. Aber auch nicht alle Astrophysiker verfügen über die notwendigen

Vorerfahrungen. So diskutiert der Artikel zu dieser Simulation (Muthsam et al. 2008) *alle* dieser »entities«, die Effekte ebenso wie die Artefakte. Der Gegenstand des Artikels sind also streng genommen die Vorgänge in der 2D-Simulation, nicht die Vorgänge in der Sonne. Interessant sind besonders solche in 2D sichtbaren Effekte, von denen man ahnt, dass sie auch in 3D vorkommen. Die 2D-Simulation ist dann ein *proof of concept*, mit dem man eine aufwendige 3D-Simulation legitimiert.

Zunächst geht es also darum, die aus dem *run* resultierenden Daten zu verstehen, bevor man sie mit der Sonne vergleicht, oder besser gesagt: mit den *Daten* aus den *Beobachtungen* der Sonne. Selbstverständlich weisen die Autoren darauf hin, dass die *vortex patches* in 3D-Simulationen – und damit in der Sonne – nicht vorkommen. Doch genau dies zeigt, dass es offenbar auch für Sonnenexperten den Bildern selbst nicht anzusehen ist, was auf dem Bild der Spezifik der Simulation geschuldet ist und was auf die tatsächlichen Vorgänge in der Grenzschicht der Sonne verweist. Nur die gleichzeitige Kenntnis der Sonne, der Simulation und des Visualisierungsverfahrens erlaubt es, aus dem Bild Schlüsse zu ziehen.

Durchflüge für die Öffentlichkeit

Genau diese Entschlüsselungsleistung ist für die Öffentlichkeit nicht möglich. Entsprechend wird versucht, diese Übersetzungsprozesse (zwischen Simulation und Universum) in die Bilder und Visualisierungen selbst zu verlagern. Man soll den Bildern die Dreidimensionalität unmittelbar ansehen, man soll den Eindruck haben, von einem Punkt aus in eine bestimmte Richtung zu sehen, und zeitliche Veränderungen werden nicht als Graphen »Größe *y* gegen die Zeit« visualisiert (und damit entzeitlicht), sondern als Filme in der Zeit erfahrbar gemacht.

All dies gilt für die bisherigen Bildformen nicht. Das Dunkle-Materie-Bild ist eine flache Projektion, also eines, bei dem man nicht von einem bestimmten *Punkt* aus auf das Objekt sieht, sondern aus einer bestimmten *Richtung*. Dies gilt auch für das Bild der Sonnenprotuberanzen. Wenn aus diesen Filme montiert werden, so zeigen sie also die zeitliche Entwicklung des Objekts selbst und nicht die Bewegung des Beobachters. Anders ist dies bei virtuellen Durchflügen. Hier entsteht der dreidimensionale Eindruck dadurch, dass man erstens von einem bestimmten Punkt aus in den Raum sieht, zweitens, dass man in eine bestimmte Richtung sieht und drittens, dass sich Standpunkt und Blickrichtung zeitlich ändern. Auch einen solchen »Durchflug« gibt es von der *Millennium*-Simulation (<http://>

www.mpa-garching.mpg.de/gadget/ und <http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>).³⁰ Man umkreist einen spektakulären Galaxiencluster und nähert sich diesem, den Blick immer auf den Cluster gerichtet, um sich im zweiten Teil des Films auf einer Spiralbahn wieder von ihm zu entfernen und ihn am Schluss als leuchtenden Knoten im *cosmic web* zu sehen.

Solche zentralperspektivischen Bilder sind komplizierter zu generieren, weil sie alles berücksichtigen müssen, was auf der vom Auge ausgehenden Halbgerade passiert. Die entsprechenden Verfahren heißen *ray tracing*. Je nachdem, was man sehen soll, muss die Abschwächung des Lichts mit der Entfernung und die Abschattung durch andere Objekte berücksichtigt werden. Die speziellen Verfahren für das *ray tracing* hängen stark davon ab, in welcher Form die Materie in der Simulation modelliert ist.

Klaus Dolag hat speziell für *Smoothed Particle Hydrodynamics*-Simulationen (also solche mit Teilchen statt mit Zellen) eine *ray-tracing*-Visualisierungssoftware entwickelt (Dolag et al. 2008). Mit Hilfe dieser Software hat er eine Visualisierung erstellt, bei der ein Durchflug mit der zeitlichen Entwicklung des Objekts selbst kombiniert wurde. Man hat also einen 3D-Eindruck des Objekts mit der zusätzlichen Dimension der Zeit, weswegen er dies eine »4D-Visualisierung« nennt (<http://www.mpa-garching.mpg.de/~kdolag/>).

Diese sehr aufwändige Visualisierung wurde für das Planetarium in Turin erstellt. Für die Forschung sind derartige Visualisierungen nicht üblich. Allerdings betont nicht nur Klaus Dolag, dass Visualisierungen in verschieden aufwändigen Formaten für den Erkenntnisprozess, vor allem aber für die interne Kommunikation wichtig sind.

Integration durch Intuition: Bilder als *boundary objects*

Vorträge

Bilder, so sagen uns alle Gesprächspartner einhellig, sind vor allem für Vorträge unentbehrlich. Erstens machen sie Vorträge unterhaltsamer und

³⁰ | Demgegenüber sind interaktive Durchflüge, bei denen der Betrachter per Maus durch das Volumen manövriert, sehr viel schwieriger und vor allem rechenaufwändiger, weil hier die jeweilige Zentralprojektion in Echtzeit berechnet werden muss. Eine solche wurde im Rechenzentrum für die *Millennium*-Simulation erstellt, spielt aber für den *Public Outreach* keine Rolle.

zweitens ermöglichen sie es, viel Information zu verdichten und – wenn auch eher intuitiv – in kurzer Zeit zu vermitteln.

Wie dies funktioniert, bekommen wir gleich am ersten Tag zu sehen. Volker Springel hält einen Vortrag in dem für alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter verpflichtenden Institutskolloquium. Das Thema ist die von dem Vortragenden neuentwickelte *moving-mesh*-Methode.

Bislang gibt es zwei grundlegend verschiedene Ansätze für Simulationen. Entweder man konstruiert Teilchen, die sich im Raum bewegen (die für die *Millennium*-Simulation verwendete Methode, SPH) oder man berechnet die Materieflüsse in einem (gedachten) Gitternetz (*grid-codes*). Normalerweise wählt man bei seiner ersten großen Simulation den für die Fragestellung geeigneteren Ansatz aus. Bei den folgenden Simulationen ist es dann eher umgekehrt, das heißt, die beherrschte Methode bestimmt die Wahl des simulierten Objekts. Die meisten Astrophysiker legen sich also auf einen Ansatz fest, auch wenn es einige Hybridansätze gibt, die bestimmte Elemente aus beiden kombinieren.

Volker Springel beherrscht nicht nur beide, sondern stellt in dem Vortrag einen ganz neuen Ansatz vor, der eine echte Synthese beider darstellt: Er lässt die Zellen sich selbst bewegen. Bei der Bewegung der dreieckigen Zellen verformen sie sich, und wenn sie ein bestimmtes Winkelverhältnis unterschreiten, verschmelzen sie mit der Nachbarzelle. Wenn sie hingegen zu groß werden, teilen sie sich. Damit ist es möglich, auch kleinskalige Verwirbelungen zu simulieren.³¹

In dem etwa einstündigen Vortrag werden ausführlich Vor- und Nachteile der bisherigen Ansätze diskutiert und die Möglichkeiten des neuen Ansatzes begründet. Die Worte sind nüchtern gewählt und mit so zurückhaltender Gestik und Lautstärke vorgetragen, dass es nicht nur für uns einer erheblichen Konzentrationsleistung bedarf, dem Vortrag durchgängig zuzuhören.

Ganz anders die Bilder. An den entscheidenden Stellen zeigt Volker Springel Filme von Mustersimulationen mit dem neuen Ansatz und sorgt damit für Momente hoher Aufmerksamkeit. In deutlichen, hellen Farben sieht man, wie sich die Zellen bewegen, verformen, verbinden oder teilen. Die Filme sind von solcher Klarheit, dass man sofort sieht, wie die Methode funktioniert. (Oder jedenfalls denkt man dies und vergisst die kurz zuvor ja nur angedeuteten mathematischen Schwierigkeiten, die Dreiecke tatsächlich überall richtig zu berechnen.)

Es handelt sich hier um vergleichsweise triviale Probleme (etwa zwei

³¹ | Dieses Verfahren geht auf die Triangulation Frankreichs während der Französischen Revolution zurück und verwendet die später nach dem Mathematiker Georgii Voronoi (1868–1908) benannten Voronoi-Zellen.

sich durchmischende Flüssigkeiten in 2D), die mit Astrophysik noch gar nichts zu tun haben. Die Faszination, die im Publikum zu spüren ist, rührt vielmehr von der gekonnten Visualisierung selbst her. Mit großem Gespür für Rhythmus lässt der Vortragende die Zellen sich nicht zu langsam und nicht zu schnell bewegen, und die Filme selbst, so kurz sie als in den Vortrag zu integrierende Echtzeitelemente sein müssen, wirken nicht abgebrochen. Und sie funktionieren auf Anhieb. Noch lange nach dem Vortrag sind uns diese Bilder deutlicher »vor Augen« als die Vielzahl der Formeln und Diagramme »drumherum«.

Dass eine Visualisierung keineswegs immer hilfreich für einen Vortrag ist, sehen wir zwei Tage später in einem anderen Vortrag. Zugegeben, dieser Vortragende hat es schwerer, weil er zu der Minderheit der noch analytisch rechnenden Theoretiker gehört. Aber auch von einem solchen erwartet man am MPA Simulationen einschließlich Visualisierungen. Doch dies hat der Vortragende bis zu seinem Vortrag noch nicht geschafft. Es geht um Dunkle Energie, und die von ihm diskutierten Modelle sind so grundlegend anders als das der *Millennium*-Simulation zu Grunde liegende Standardmodell, dass man gerne *sehen* würde, wie ein Universum mit seinen Parametern aussähe. Doch was er zeigen kann, sind lediglich Formeln.

Seine Visualisierung besteht darin, dass er als Hintergrundbild für die PowerPoint-Präsentation ein Bild einer Schultafel verwendet. Der auf Knopfdruck erscheinende Text sieht aus wie mit weißer Kreide von Hand geschrieben. Offensichtlich ist dies eine ironisch-melancholische Reminiszenz an *die* Ikone der theoretischen Physik, die dicht mit Formeln beschriebene Tafel – aber gegenüber dem Vortrag bleibt dieser Kommentar äußerlich.

Team-meeting

Doch gerade die Eigenständigkeit von Bildern gegenüber dem Text kann auch positiv genutzt werden. Dies erleben wir auf dem wöchentlichen, einstündigen Team-Meeting. Da es sich um das gemeinsame Meeting zweier Gruppen handelt, weiß häufig der Leiter der einen Gruppe nicht im Detail, um was es in den vielfältigen, meist Promotionsprojekten, genau geht. Hier spielen Bilder eine integrative Rolle, indem sie gerade dadurch, dass sie *nicht* selbsterklärend sind, einen ersten Zugang ermöglichen, bei dem niemand *alles*, aber alle *etwas* verstehen.

Konkret funktioniert die Diskussion so: Ein Doktorand zeigt allen Anwesenden meist farbige Ausdrücke von Visualisierungen, entweder Graphen oder Bilder. Dies sind Zwischenergebnisse, bei denen dem Bearbeiter irgendetwas unklar und diskussionswürdig erscheint. Das Bild

wird dann nach und nach erklärt, das heißt, der Ersteller sagt, was zu sehen ist, welches der Maßstab ist, was die Farben zu bedeuten haben, ob es sich (bei Simulationen) um eine 2D- oder eine 3D-Simulation handelt usw.

Diese Erklärungen erfolgen häufig auf Nachfrage. Dies geschieht sehr offen. Da die Gruppe derjenigen, die zunächst einmal nichts verstehen, in der Regel alle außer dem Ersteller und dessen Betreuer umfasst, äußern sich auch andere Doktoranden, dass sie noch überhaupt nicht verstehen, was auf dem Bild dargestellt ist. Die Gruppenleiter können dies fördern, z.B. durch einen Scherz.

»Looks like lensing« äußert etwa einer der Leiter zu einem präsentierten Bild, auf dem runde, durch gegenüberliegende, sichelförmige Schalen eingefasste Objekte zu sehen sind. Dieser kleine Satz hat mindestens drei Funktionen. Erstens hat er ein integrierendes Moment, da es sich um einen typischen Insiderwitz handelt. Es werden wohl nur Astrophysiker verstehen, dass mit »lensing« der Gravitationslinseneffekt gemeint ist, bei dem das Licht durch Materie so abgelenkt wird, dass man ein dahinterliegendes Objekt zwei- oder mehrfach, und zwar sichelförmig um ein Zentrum angeordnet sieht – eine für die Existenz der Dunklen Materie ganz wichtige Beobachtung. Jeder in der Gruppe weiß dies.

Zweitens ist wohl jedem, auf jeden Fall aber dem Sprecher, klar, dass auf dem Bild *nicht* der Gravitationslinseneffekt zu sehen ist. Durch diese offensichtliche Falschbenennung kann der Sprecher seine eigene Unkenntnis dessen, was auf den Bildern eigentlich zu sehen ist, zum Ausdruck bringen, ohne diese Unkenntnis direkt zuzugeben.

Drittens öffnet diese für alle offensichtliche Rhetorik einen Fragehorizont, der buchstäblich bei Null, nämlich bei einer (absichtlich) absurd falschen Interpretation beginnt. Es kann dann keine zu einfachen Fragen mehr geben.

Im Laufe der Diskussion differenziert sich die anfängliche Gleichheit des Verständnisses aber sehr schnell aus. In der *gesprprochenen* Diskussion, so haben wir den Eindruck (und so ergeht es uns selber), werden nach und nach die meisten Teilnehmerinnen und Teilnehmer abgehängt. Nur noch Personen, die der Diskussion folgen können, fragen jetzt noch.

In beiden beschriebenen Fällen, formellen Vorträgen und informellen Meetings, fungieren Bilder als *boundary objects*, die die Kommunikation zwischen Personen mit unterschiedlichem Vorwissen ermöglichen.³²

³² | Das Konzept der *boundary objects* geht auf Star/Griesemer 1989 zurück.

Realität der Daten – Realität in den Daten

Das Problem der Kommunikation stellt sich auch im größeren Zusammenhang. Die *communities* und *sub-communities* innerhalb der Astrophysik sind objektbezogen, nicht methodenbezogen definiert: Es gibt die Galaxienforscher, die Sternforscher, die Kosmologen usw. Andererseits stehen sich innerhalb jeder *community* die beiden grundlegend verschiedenen methodischen Ansätze – Beobachtung und Theorie – gegenüber. Beide werden als unabdingbar für ein besseres Verständnis der Vorgänge angesehen. Man braucht, da sind sich alle einig, vor allem Massen von neuen Daten, und zwar sowohl Beobachtungsdaten als auch Simulationsdaten. Beides erwartet man von den nächsten Jahren, durch neue Missionen einerseits und durch schnellere Computer andererseits.

Zurzeit jedoch, so jedenfalls unser Eindruck, klafft zwischen beiden Methoden noch eine Lücke. Wiederum ist ein Scherz aufschlussreich, geäußert in einem weiteren Vortrag. Es geht um ein simuliertes Objekt, bei dem die Wahl der richtigen Parameter umstritten ist. Dies ist aber zugleich ein besonders schwer zu beobachtendes Objekt. »Zum Glück«, sagt der Vortragende, »dann können wir bestimmt noch 30 Jahre lang die Parameter nehmen, die wir wollen.«

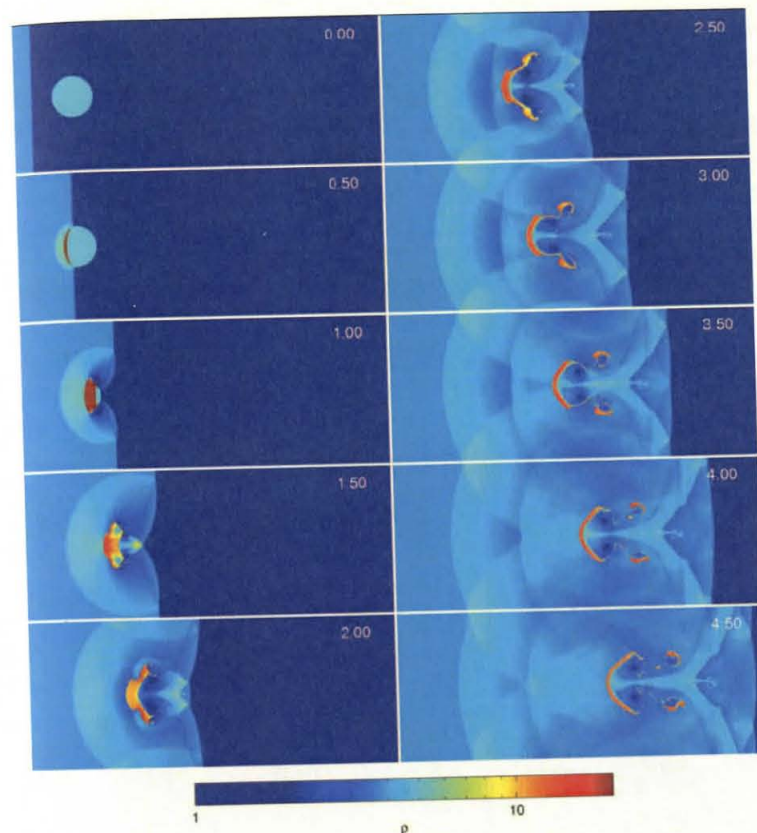
Wie also kann man Simulationen ohne empirische Kontrollen testen? Und wie erfolgt der Vergleich, wenn es denn Beobachtungsdaten gibt? Für beides spielen Bilder eine zentrale Rolle.

Testen von Simulationscodes

Eine Möglichkeit der Kontrolle besteht darin, die Simulationsverfahren selbst zum Gegenstand der Forschung zu machen. Nicht nur deshalb, weil die theoretischen Astrophysiker die meiste Zeit auf das Entwickeln dieser Codes verwenden, sind ihre Codes als Resultate der Forschung anzusehen, nur eben als computertechnische, nicht als astrophysikalische.³³ Sie sind mehr als bloße Hilfsmittel zum Verständnis bestimmter Phänomene, nämlich flexible, ausbaufähige Bausätze für die Simulation ganz verschiedener Probleme.

Neu entwickelte Codes werden daher zunächst auf einen weitgehend feststehenden Satz relativ einfacher Probleme angewandt. Es handelt sich dabei um Probleme, die entweder gerade noch analytisch berechenbar

³³ | Deshalb lassen diese sich nur in Ausnahmefällen als Ergebnisse in astrophysikalischen Fachzeitschriften publizieren – sofern der Autor überhaupt beabsichtigt, seinen Code öffentlich zu machen.



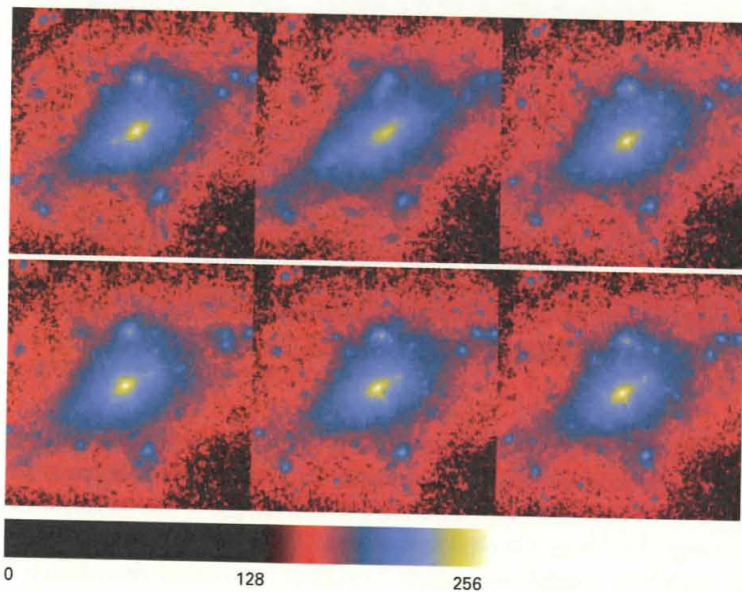
Time evolution of the interaction of a strong shock wave with a dense cloud of gas. The cloud of radius $r = 3.5$ has an initial relative overdensity of 5, and is embedded at pressure equilibrium in ambient gas of unit density and unit pressure. From the left, a shock wave with Mach number $M = 10.0$ approaches and strikes the cloud. The gas has $\gamma = 5/3$, giving the shock an incident velocity of $v = 9.586$ and a compression factor of 3.884 with respect to the background gas. Each panel shows the gas density in a region of size 62.5×25.0 , with the time indicated in the top-right corner. The computation assumed periodic boundaries at the top and bottom.

Abb. 31: Visualisierungen des Tests von GADGET-2 anhand des Modellproblems einer auf eine Gaswolke auftreffenden Schockwelle, mit Originallegende; aus Springel 2005.

sind oder die nur noch numerisch gelöst werden können, aber vergleichsweise einfache Randbedingungen haben.

Ein Beispiel ist eine Flüssigkeit in einem Gefäß mit einer schwereren Flüssigkeit darüber. Die schwerere Flüssigkeit sinkt, die leichtere Flüssigkeit verdrängend, nach unten, aber sie kann dies natürlich nicht überall gleichzeitig tun. So entstehen sehr komplexe Strömungen und teilweise Vermischungen, bis sich schließlich die schwerere Flüssigkeit vollständig unten befindet.

Diesen vergleichsweise einfachen Vorgang muss jeder Simulationscode beherrschen. Ein anderes typisches Problem ist in Abb. 31 dargestellt. Es handelt sich um eine Schockwelle, die von links auf eine kugelförmige Gaswolke trifft.



Santa Barbara cluster simulation: projected dark matter density in logarithmic units at $z = 0$, 1283 particles projected on a 10242 mesh, no smoothing. The dynamic range of the density variation in this figure is roughly 5 orders of magnitude. The lower force resolution used here for the FLASH simulation is apparent in the figure.

Abb. 32: Vergleich von Simulationscodes anhand der Visualisierung von Probesimulationen einer typischen astrophysikalischen Situation aus Heitmann et al. 2005.

Deutlich festzustellen ist vor allem, was alles *nicht* zu sehen ist. Man sieht etwa der Visualisierung nicht an, ob es sich um eine 2D-Simulation oder um eine 3D-Simulation handelt. Die einzelnen Parameter, von denen die Morphologie der Verwirbelungen nach dem Auftreffen entscheidend abhängt, werden nur in der Bildlegende angegeben. Auch die Farbgebung deutet nicht darauf hin, dass das Programm einmal für eine astrophysikalische Fragestellung benutzt werden soll.

Es gibt regelrechte Forschungsprogramme, in denen verschiedene Simulationscodes systematisch anhand kanonischer Probleme getestet werden. In Heitmann et al. (2005) etwa wird *GADGET-2* neben fünf anderen Programmen auf diese Probleme angewandt. Wohlgermerkt hat dies noch gar nichts mit Astrophysik zu tun, sondern nur mit allgemeiner Hydrodynamik.

Mit den Programmen lässt man danach typische, aber nicht sehr große astrophysikalische Simulationen laufen. Teilweise geschieht dabei die Kontrolle visuell durch Projektionsbilder wie in Abb. 32. Dass die Bilder sich so sehr ähneln, liegt erstens daran, dass alle Programme mit denselben Ausgangsdaten und Parametern gestartet wurden, zweitens, dass die Visualisierung selbst einheitlich erfolgte, und drittens, dass die Programme eben alle gute Ergebnisse bringen. Dies jedenfalls ist es, was man durch solche Tests bestätigt sehen möchte. Denn der systematische Vergleich verschiedener Programme untereinander stellt – zumindest für analytisch nicht lösbare Probleme – die einzige Möglichkeit dar zu testen, ob ein Code »richtige« Ergebnisse liefert.

»Richtig« heißt letztlich, dass der Code plausible Szenarien produziert. In der Tat traut man den Simulationen hier einiges zu. Insbesondere die großräumigen Simulationen wie der *Millennium-run* liefern den Hintergrund für weitere Forschungen.

Die zweite Realität

Klaus Dolag interessiert sich für die Interaktionen zwischen Galaxien: Kollisionen, Durchdringungen und ähnliche Ereignisse. Diese Ereignisse sucht er nicht am Himmel (wobei selbstverständlich auch die »beobachtenden« Astrophysiker nicht zum Himmel schauen, sondern auf Computerbildschirmen), sondern in den Datensätzen der *Millennium*-Simulation. Was Volker Springel selbst nicht getan hat, tut Klaus Dolag: Er durchsucht die vorhandenen Simulationen systematisch nach ihn interessierenden Objekten und Ereignissen. Es gibt Datenbanken, in denen Visuali-

sierungen aus unterschiedlichen Simulationen zusammengefasst sind und die eine solche rein visuelle Suche ermöglichen.³⁴

Diese Suche geschieht visuell, das heißt durch Ansicht der verfügbaren Visualisierungen. Klaus Dolag führt uns einen Ausschnitt aus einer größeren Simulation vor, bei dem eine Galaxie sich so um andere Galaxien bewegt, dass sie durch einen *swing-by*-Effekt – ähnlich wie Raumsonden durch Planeten – beschleunigt wird. Dies, so sagt er uns, würde man in den Daten mit noch soviel *post-processing* niemals finden.

Einerseits ist die Suche unbestimmt. Was genau Interessantes passiert, weiß auch er nicht im Voraus. Andererseits ist der Blick durch das Vorwissen über die simulierten Objekte geprägt. Nur mit dem Vorwissen zu Galaxien kann man besondere Objekte oder Phänomene in den Daten finden.

»In den Daten finden«: Spätestens hier bekommen die Daten selbst eine zweite Realität. Sie sind nicht nur als Daten real, sondern sie bilden selbst ein Paralleluniversum, eine unbekannt Welt, in der es Entdeckungen zu machen gibt. Selbstverständlich ist allen klar, dass diese Phänomene und Objekte selbst nicht existieren, und dass jedes einzelne von ihnen in seiner Spezifität nicht zuletzt von den zufälligen Anfangswerten des *runs* abhängt. Dennoch werden sie als typisch betrachtet und benutzt. Dass man die großen Simulationen (aus Gründen verfügbarer Rechnerzeit) jeweils nur einmal laufen lässt, mag diesen Status als Paralleluniversum noch stützen.

Um ein Objekt genauer zu untersuchen, benutzt Dolag die *Millennium*-Simulation als Hintergrund. In seiner eigenen Simulation wurde die *Millennium*-Simulation ab dem Auftreten des Ereignisses mit denselben Daten noch einmal gerechnet, jedoch in der zeitlichen und räumlichen Umgebung des Ereignisses mit sehr viel höherer Auflösung, in weiterer Entfernung davon jedoch mit sehr viel geringerer Auflösung. Das Resultat sind *snapshots* eines kleinen Raum-Zeit-Gebietes, die – anders als für die *Millennium*-Simulation – auch zu einem Film montiert wurden. Parallel werden die Ergebnisdaten dieser Simulation durch *post-processing* analysiert, um insbesondere quantitative Ergebnisse zu bekommen.

Dieses Vorgehen hat uns überrascht. Wir hätten vermutet, dass man solche Kollisionen von Galaxien von vornherein modellieren würde. Man könnte doch – so dachten wir – sich die Suche ersparen und die Galaxien einfach so konstruieren, wie man es für richtig hält, ohne auf den Zufall eines solchen Ereignisses innerhalb einer bestehenden Simulation angewiesen zu sein. Zudem könnte man dann systematisch Parameter (z.B. die

³⁴ | Wichtig ist das *German Astrophysical Virtual Observatory (GAVO)*, das derlei Daten zur Verfügung stellt.

Größe, die Geschwindigkeit, die Aufprallparallaxe usw.) variieren und sehen, was passiert.

Dies, so betont Klaus Dolag, geht nicht. Damit die Kollision realistisch verläuft, muss man immer die großräumige Umgebung – wenn auch in grober Auflösung – mitsimulieren. Diese Umgebung kann man nicht einfach modellieren.

Auch Marcus Brüggen benutzt die *Millennium*-Simulation als Fundus für seine eigene Simulation von Galaxienclustern. Dazu sucht er sich einen typischen Cluster heraus, und simuliert diesen, ähnlich wie Klaus Dolag, noch einmal in höherer Auflösung. Wie sehr die Daten aus der *Millennium*-Simulation zu quasi-natürlichen Objekten geworden sind, zeigt ein Detail: In der Publikation zu Marcus Brüggens Simulation bedanken sich die Autoren bei Volker Springel nicht etwa für den Zugang zu den Daten, sondern für »a set of GADGET simulated clusters« (Heinz et al. 2006). Galaxiencluster aus dem Paralleluniversum werden zu Dingen, die man verschenken kann.

Selbstverständlich wird nicht behauptet, genau diese Bewegungen der Galaxien oder diese Cluster gäbe es im wirklichen Universum. Es geht um *Phänomene*, also um *Typen* von Ereignissen und Objekten. Der Abgleich mit der wirklichen Welt ist letztlich maßgeblich dafür, ob einem einer Simulation entnommenen Phänomen Realitätsstatus zugewiesen wird. Und diese Einschätzung geschieht wiederum maßgeblich über Bilder.

Vergleich mit Beobachtungen 2: Virtuelle Teleskope, künstliche Daten, synthetische Beobachtungen

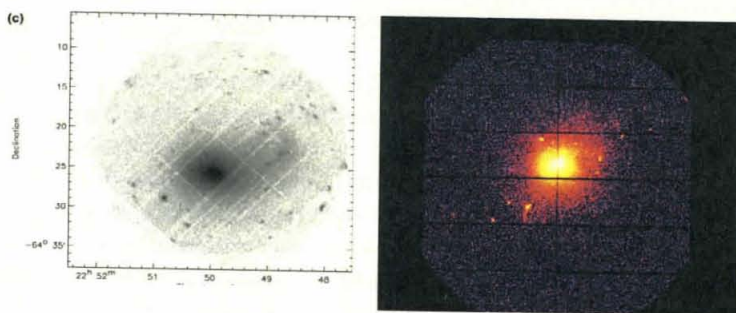
Eines der Hauptprobleme der Astrophysik besteht darin, die Anschlussfähigkeit der Simulation in Richtung der analytisch rechnenden Astrophysik auf der einen Seite und der beobachtenden Astronomie auf der anderen Seite zu gewährleisten. Gerade für die Verbindung zur Beobachtung spielen Visualisierungen eine entscheidende Rolle.

Wenn Simulationen und Beobachtungen nicht übereinstimmen, hat immer die Beobachtung recht. So jedenfalls hören wir dies mehrfach in Garching. Die Astrophysik ist »beobachtungsgetrieben«, wie Marcus Brüggen es ausdrückt. So schwierig und unvollkommen die Beobachtungen auch sein mögen, sie dienen als unverrückbarer Maßstab für die Beurteilung von Simulationen. Wenn die Simulationsergebnisse mit tatsächlichen Beobachtungen nicht übereinstimmen, würden die Theoretiker keinen Moment zögern, ihr Modell als unrealistisch anzusehen und entsprechend zu verändern.

Wie aber kann man überhaupt Simulationen mit Beobachtungen vergleichen? Der Kontakt zu tatsächlich schon gemachten, aber auch zu po-

tentiell machbaren Beobachtungen geschieht weitgehend über Bilder. Ein Simulations-Phänomen ist dann realistisch, wenn dessen *Bild* mit dem *Bild* eines tatsächlichen Phänomens übereinstimmt.

Selbstverständlich ist den Theoretikern klar, dass auch die Beobachtungsbilder Datenbilder sind, also Visualisierungen von Messdaten. Dabei spielt es gar keine Rolle, ob die realen Objekte selbst sichtbar (im Sinne von: elektromagnetische Strahlung in dem für das menschliche Auge empfindlichen Spektralbereich aussendend) sind oder nicht. Man sieht diesen Bildern *zum Teil* die technischen Bedingungen ihrer Entstehung noch an. Zwei Beispiele sollen dies verdeutlichen.



XMM-Newton EPIC 0.3–10 keV energy band count image of A3921. Raw, nonbackground subtracted images. [gekürzt]

Simulated photon image in the 0.7–2 keV energy band of a simulated galaxy cluster using XMAS-2. The image is binned to 3.2 arcsec. It includes background, vignetting effects, out-of-time events and the telescope optical paths. Simulation for the PN instrument on board of the XMM-Newton satellite [gekürzt]

Abb. 33: Vergleich eines Beobachtungsbilds (links) aus *Belsole et al. 2005: 631* mit einem simulierten Bild (rechts) aus *Dolag et al. 2008*.

In Abb. 33 ist links ein Beobachtungsbild der *European Photon Imaging Camera (EPIC)* auf dem *XMM-Newton*-Satellit der *ESA* zu sehen. Die Kamera nimmt Bilder von Röntgenstrahlen auf, die von dem sehr heißen intergalaktischen Gas ausgesandt werden. Zu sehen ist ein Galaxiencluster als dunkler Fleck sowie einige einzelne Galaxien als kleinere dunkle Punkte.

Das Bild rechts in Abb. 33 stammt aus einer Simulation. Auf der Basis der Simulationsdaten zu einem Galaxiencluster wurde dafür zunächst

berechnet, welche Strahlung in welcher Intensität dieser Cluster aussenden würde. Danach wurde berechnet, wie diese Strahlung von derselben Kamera wie im *XMM-Newton*-Satellit registriert würde. Die Bildunterschrift listet auf, welche Anpassungen an die (potentielle) Beobachtung gemacht wurden: Der Hintergrund des Clusters und der Randlichtabfall wurden ebenso berücksichtigt wie die optischen Abbildungseigenschaften der Kamera.

Auffällig ist, dass die Anpassung ganz asymmetrisch erfolgt. Die Simulationsbilder werden den Beobachtungsbildern angepasst, nicht umgekehrt. Ein besonders markantes Beispiel sind die schwarzen Linien. Die sensitive Fläche der hier simulierten Kamera ist aus einzelnen CCD-Chips zusammengesetzt. Selbst die Lücken zwischen diesen Chips sind in dem Simulationsbild berücksichtigt. Es werden also nicht etwa in dem Beobachtungsbild die Linien (etwa durch Interpolation) entfernt, vielmehr werden in den Simulationsbildern schwarze Striche künstlich eingefügt, um die Bilder ähnlich zu machen.

Für die Theoretiker sind nicht die Messungen, die Messwerte oder gar die vermessenen Gegenstände, sondern die Bilder das *Gegebene*, im Wortsinn also die *Daten*. Und in der Tat werden die auf diese Weise angepassten Simulationsbilder als »künstliche Daten« bezeichnet. Die Erzeugung dieser künstlichen Daten ist selbst wiederum automatisiert, so dass man mittels vorgefertigter Routinen, die als »virtuelle Teleskope« bezeichnet werden, in den Simulationsdaten »virtuelle Beobachtungen« oder »synthetische Beobachtungen« vornehmen kann.

In dem zweiten Beispiel wurde die Bildanpassung so weit getrieben, dass wir nicht mehr entscheiden können, welches Bild auf einer Beobachtung beruht und welches auf einer Simulation.

Das Beobachtungsbild zeigt einen Galaxien-Cluster, den Perseus-Haufen, wie er mit dem Röntgenteleskop *Chandra* aufgenommen wurde. Das Simulationsbild ist diesem in seiner Erscheinung vollkommen angepasst.³⁵

35 | Ein Detail hätten wir jedoch weder in einer Visualisierung einer Simulation noch in einem Beobachtungsbild erwartet. In dem rechten Bild zieht sich von oben in der Mitte ein schmaler, genau parallel begrenzter Streifen bis etwa zur Bildmitte nach unten, in dem alle Farben etwas dunkler als in der Umgebung sind. Wir fragen uns, wo ein solcher Effekt herkommt. Marcus Brügggen sagt uns, dass es sich lediglich um einen Fehler in der Visualisierung handelt, da er die Übergänge zwischen den CCD-Elementen nicht sorgfältig genug modelliert hätte. Wie schon bei Friedrich Kupka kann man also auch hier bestimmte Elemente außer Acht lassen, wenn man um ihre Entstehung weiß.

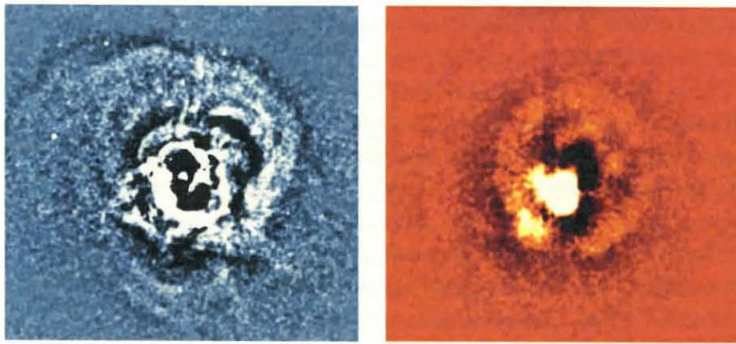


Abb. 34: Röntgenbilder vom Perseus-Haufen (links) <http://chandra.harvard.edu/photo/2003/perseus/>; [17.06.08] und von einem vergleichbaren Galaxiecluster aus einer Simulation (rechts) (© Marcus Brüggen, Jacobs University Bremen).

Das Bild soll den Galaxiencluster aus der Simulation so zeigen, wie man ihn mit *Chandra* sehen würde.

Marcus Brüggen sagt uns, er zeige diese beiden Bilder in Vorträgen gerne direkt nebeneinander. Aber wozu? Die formale Ähnlichkeit besagt doch nicht viel, weil man das Bild des simulierten Clusters ja gerade so produziert hat, dass es dem Beobachtungsbild ähnlich sieht. Aber auch ein Vergleich der gezeigten Objekte *im Detail* ist wenig aufschlussreich, da es verschiedene Cluster zeigt. Dass es sich dabei um einen realen und einen simulierten Cluster handelt, ist dabei noch nicht einmal wichtig. Selbst wenn beide Bilder realistische Abbildungen wären, könnten sie nicht gleich sein, weil die Cluster selbst nicht gleich sind. Was also kann man überhaupt vergleichen? Was heißt es, dass beide Bilder »ähnlich« sind? Die einzig sinnvolle Vergleichsebene erscheint die der Strukturen zu sein. Der simulierte Cluster sieht *strukturell* ähnlich aus wie der reale.

Es bleibt dann immer noch die Frage, wozu derartige künstliche Daten produziert werden. Wir erfahren, dass es weniger darum geht, auf diesen Bildern selbst etwas zu entdecken oder zu verstehen. Es geht also in den Clusterbildern gar nicht um die Cluster. Es geht um die den Bildern zu Grunde liegende Simulation. Die Ähnlichkeit ist schlicht ein Argument dafür, dass die Simulation richtig, die in die Simulation eingebauten Prozesse also konsistent mit den Daten sind.

Aus dem Vergleich von Clustern (genauer: von *Bildern* von *Daten* von simulierten und beobachteten Clustern) lernt man viel, was dann wiederum in die Simulation einfließen kann. Das Ziel ist hier nicht, auf den Simulationsbildern etwas Neues zu finden, sondern grundlegende Physik zu verstehen, um bessere Modelle entwickeln zu können. Der über die

Bilder vermittelte Vergleich mit den realen Objekten dient hier also nicht der Erforschung des Kosmos, sondern der Erforschung von Computerprogrammen.

Solche direkten Abgleiche, so Marcus Brüggen, sind allerdings nicht allgemein üblich, werden aber immer wichtiger. Die theoretische Astrophysik hinkt hier den immer besseren Beobachtungen hinterher.

Das Schlusswort zum Bildgebrauch in der Astrophysik überlassen wir einem der Garching Astrophysiker selbst, denn gleich eine ganz neue *community* von Beobachtern von Simulations-Visualisierungen vorherzusehen, wäre *uns* vermutlich als allzu kühne Übertreibung unseres Interesses am Bild ausgelegt worden. Als letzten Satz eines *Review*-Artikels über den Nutzen von Simulationen für die Astrophysik schreibt Klaus Dolag angesichts der rasanten Computerentwicklung: »This will increase the need of involving complex analysis pipelines for observing simulations, and might lead to a new branch of *virtual observers* in the astrophysics community, similar to the already, new formed branch of *computational astrophysicists*« (Dolag et al. 2008; Hervorhebungen im Original).

JAN FRERCKS