

Was das Auge nicht sieht: Rund 400 Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt treibt der Comahaufen im All. Optische Teleskope zeigen nur die einzelnen Galaxien (graue Flecken). Röntgenspäher wie der Satellit *Rosat* hingegen enthüllen eine ausgedehnte Gasatmosphäre (rot).

Die Architektur des Alls

Das Universum gleicht einer unfassbar großen Honigwabe. Gigantische Galaxienhaufen besetzen die Knotenpunkte der wächsernen Wände um die Zellen aus leerem Raum. **Hans Böhringer** vom **Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik** in Garching untersucht diese Ansammlungen von Milchstraßen. Dabei begegnet er den unsichtbaren Seiten des Weltalls.

TEXT **HELMUT HORNUNG**

Das Foto ist ziemlich düster, weite Teile glimmen in einem violetten Schwarz. Aber vor allem in der oberen Hälfte ändert sich das Bild: Da erhellen Abermillionen Lichter die Szene. Die meisten scheinen nicht isoliert, sondern reihen sich zu funkelnden Ketten aneinander, bilden netzförmige Muster mit hellen Klecksen. Die US-Raumfahrtbehörde Nasa hat das Foto Anfang Dezember 2012 veröffentlicht, der Satellit *Suomi NPP* die Einzelaufnahmen geschossen, aus denen es zusammengesetzt ist. Es zeigt – die Erde bei Nacht.

Das Bild weckt bei jedem Betrachter andere Assoziationen. In beeindruckender Weise spiegelt sich das Nord-Süd-Gefälle auf unserem Planeten wider: Viele Lichter bedeuten große Städte und dichte Besiedelung wie in Europa oder Nordamerika; Afrika ist, mit Ausnahme der Südspitze, nahezu schwarz. Einen Astronomen wiederum mag das Bild an Überirdisches erinnern. An nicht weniger als den Bau des Weltalls. Denn betrachtet man das Universum als Ganzes, wirkt es keineswegs homogen. Vielmehr durchziehen Filamente den Raum und bilden ein Netzwerk, das den Blasenwänden eines kosmischen Schaumbads gleicht. Oder den Zellwänden einer Honigwabe. Die hellen Strukturen markieren dabei die Ballungsräume der Materie, die dunklen sind gigantische Leeren, *voids* genannt.

Wie kommt das Weltall zu solch einer wabenförmigen Struktur? Um das

herauszufinden, betreibt Hans Böhringer am Garching Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik so etwas wie Kosmografie – kosmische Geografie: Ähnlich wie die hellen Lichter auf den Nasa-Bildern den Konturen der Kontinente folgen, zeichnen Galaxienhaufen die Architektur des Alls nach. Viele von ihnen würden demnach den Großstädten entsprechen. Auch unsere Milchstraße ist Teil eines Haufens: der Lokalen Gruppe. Diese hat etwa 40 Mitglieder und gleicht eher einem Vorort; wenigstens gehört sie zu einer Megacity, dem Virgo-Superhaufen.

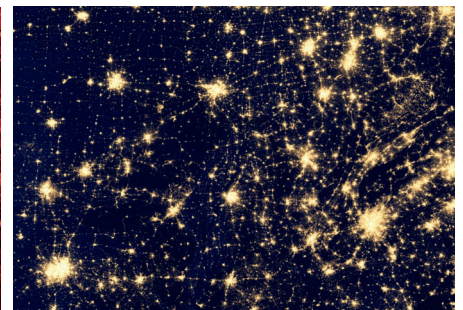
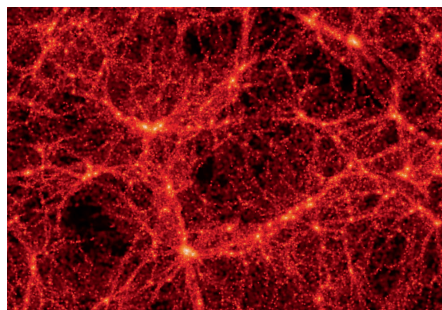
„Galaxienhaufen sind die größten klar definierten Objekte im Universum“, sagt Böhringer. Sie umfassen bis zu einige Tausend Milchstraßen, jede ein System aus Milliarden von Sternen, Gas- und Staubwolken. Unsere Sonne ist einer von ungefähr 200 Milliarden Sternen, die zusammen mit der inter-

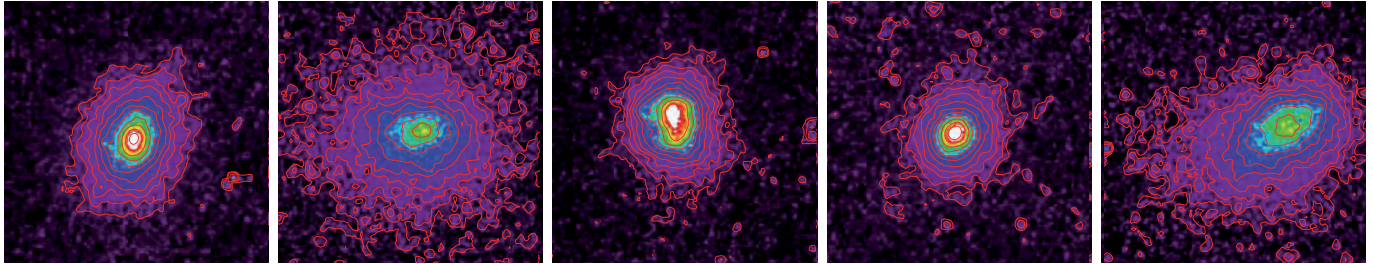
stellaren Materie eine solche Galaxie bilden. Die Schwerkraft, die auf der Erde einen Stein zu Boden fallen lässt, bindet die Galaxien eines Haufens mit unsichtbaren Ketten aneinander. „Unsichtbar“ – ein Wort, das Böhringers Forschungen bestimmt.

DER RAUM IST LEER – NACH IRDISCHEN MASSSTÄBEN

Zum einen ist da die Dunkle Materie, die fast ein Viertel des Weltalls ausmacht. Die ersten Hinweise auf diesen bis heute rätselhaften Stoff fand Fritz Zwicky im Jahr 1933 bei der Beobachtung des Comahaufens, eines 400 Millionen Lichtjahre entfernten Galaxienhaufens mit mehr als 1000 Mitgliedern. Der schweizerische Astronom schätzte, dass das 400-Fache der sichtbaren Masse nötig sei, um das Gebilde als Ganzes in Form zu halten; die Schwerkraft der

Himmel und Erde: Das kosmische Netz aus Materiefilamenten (links) hat verblüffende Ähnlichkeit mit Aufnahmen unseres Planeten bei Nacht (rechts). Die hellen Knoten markieren jeweils Ballungsräume – Materie im einen, Städte im anderen Fall.





Galerie der Galaxien: Auf den Bildern ferner Haufen haben die Wissenschaftler die Strahlungsintensität der Röntgenhalos farblich codiert. Das Gas – ein Plasma aus Ionen und Elektronen – hat extrem hohe Temperaturen von mehreren Dutzend bis 100 Millionen Grad. Die Spektralanalyse liefert noch weitere wichtige Daten über das intergalaktische Medium, etwa dessen chemische Zusammensetzung.

sichtbaren Milchstraßen reicht dazu bei Weitem nicht aus. („Die Jagd nach dem Unsichtbaren“, Seite 34 ff.)

Zum Zweiten steckt in einem Galaxienhaufen jede Menge heißes Gas. Der Raum zwischen den einzelnen Sternsystemen ist praktisch leer – aber nur für irdische Verhältnisse. „Die Dichte liegt um viele Größenordnungen unter der eines Laborvakuaums“, sagt Böhringer. „Dennoch gibt es genügend Teilchen, sodass sich die Gesamtmasse des Gases zum Fünffachen der Masse aller Galaxien aufaddiert.“ Um die hohen Temperaturen des galaktischen Gases zu verstehen, genügt einfache Physik.

In den Comahaufen etwa fällt das Material mit einer Geschwindigkeit von 1000 Kilometern pro Sekunde ein. Während dieses Sturzflugs wandelt es seine potenzielle Energie in kinetische um. Mit Überschallgeschwindigkeit

prallt das einstürzende Gas auf solches, das sich bereits im Haufen zwischen den Galaxien befindet. Bei der Kollision werden die Teilchen abgebremst, aus Bewegung entsteht Wärme. Die typischen Temperaturen liegen bei einigen Dutzend bis zu 100 Millionen Grad. Und die Masse des Materials ist auch nicht gerade zu verachten: „Im Comahaufen entspricht die Gasmasse ungefähr der von einer Billiarde Sonnen“, sagt Hans Böhringer.

ENERGIEREICHE STRAHLUNG MIT KURZEN WELLENLÄNGEN

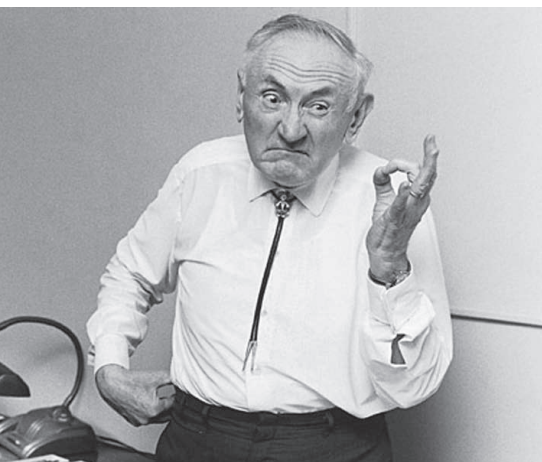
Gewogen hat Böhringer den Comahaufen allerdings nicht. Ja, er hat das Gas – ein Plasma aus Ionen und Elektronen – noch nicht einmal mit eigenen Augen gesehen. So absurd es klingen mag: Es ist für optische Teleskope unsichtbar. Vielmehr sendet die heiße Materie überwiegend energiereiche Strahlung bei extrem kurzen Wellenlängen aus. Und dieses Röntgenlicht lässt sich nur mit speziellen Detektoren jenseits der Erdatmosphäre auffangen.

Der am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik entwickelte Satellit *Rosat* war ein solcher Detektor (MAXPLANCKFORSCHUNG 1/2012, Seite 94 f.). Von Juni 1990 bis Februar 1999 spürte der Späher an die 125 000 Röntgenquellen auf. Hinter 2000 der hellsten

Strahler verbergen sich Galaxienhaufen, genauer: ihre Halos. So nennen Astronomen die galaktischen Gashüllen, die wie Atmosphären in den Haufen zwischen den einzelnen Galaxien sitzen. Aus deren Analyse lassen sich eine Menge von Erkenntnissen ableiten, denn im Röntgenlicht können Forscher die Halos vollständig durchleuchten.

Die Halos sind „optisch dünn“, das heißt durchsichtig, weil die Photonen in dem fein verteilten Gas freie Bahn haben. Daher tragen diese Lichtteilchen die Botschaften von allen möglichen atomaren Prozessen ungehindert nach draußen. Werden in dem Gas etwa freie Elektronen beschleunigt oder gebremst, senden sie Röntgenlicht aus; und stoßen sie mit Atomen zusammen, kommt es zur Abstrahlung von Spektrallinien. Diese sind für jedes Element ebenso charakteristisch wie die Fingerabdrücke für einen Menschen. Um die Linien aufzuspüren, zerlegen Astronomen das Licht in Spektren und erhalten unter anderem Aufschluss über die Inhaltsstoffe des Gases. „Wie nicht anders zu erwarten, besteht es zu 80 Prozent aus Wasserstoff und Helium, den häufigsten Elementen im Kosmos“, sagt Hans Böhringer.

Allerdings finden sich noch andere Zutaten wie Kohlen-, Sauer- und Stickstoff, Nickel, Eisen, Magnesium, Silicium oder Calcium. Auch das verwundert



Genialer Querulant: Fritz Zwicky (1898 bis 1974) galt als schwieriger Zeitgenosse. Friedrich Dürrenmatt diente er als Vorbild für die Figur des Johann Wilhelm Möbius im Drama *Die Physiker*. Im Jahr 1933 entdeckte Zwicky bei der Untersuchung des Comahaufens die Dunkle Materie.



Ballungsraum: Einige Tausend Milchstraßensysteme stehen im mehr als 20 Millionen Lichtjahre durchmessenden Comahaufen beieinander, die Schwerkraft hält sie zusammen. Diese Aufnahme im sichtbaren Licht zeigt die hellsten davon und verrät nicht, dass das Konglomerat aus Galaxien in heiße Gaswolken eingebettet ist und 87 Prozent seiner Masse in der Dunklen Materie stecken.

den Fachmann nicht allzu sehr, handelt es sich dabei doch um Elemente, die massereiche Sterne erbrütet und am Ende ihres Lebens in einer Supernova freigesetzt haben. „Auf diese Weise testen wir Modelle der Sternentwicklung.“

Aus einem Linienspektrum lesen Forscher die Fingerabdrücke der einzelnen Elemente, ähnlich der Spurensicherung an einem Tatort. Auf diese Weise entschlüsseln sie nicht nur die chemische Zusammensetzung, sondern auch den physikalischen Zustand des Gases wie Dichte, Temperatur und Masse. Diese Werte hängen miteinander zusammen. Beispielsweise bewegen sich die Teilchen bei hohen Temperaturen mit großen Geschwindigkeiten. Damit ein Halo dennoch stabil bleibt, braucht es viel Masse, die mit ihren starken Schwerkraftfesseln das Gasgepinst in Zaum hält.

Apropos Masse: Hans Böhringer und seine Kollegen bestätigen den Befund

Fritz Zwicky: Der größte Anteil des Materials in Galaxienhaufen konzentriert sich in der Dunklen Materie. Die Werte liegen weit über denen im gesamten Universum. „Ganze 87 Prozent macht die Dunkle Materie im Comahaufen aus, elf Prozent stecken im Gashalo und lediglich zwei Prozent in den sichtbaren Galaxien“, sagt Böhringer.

FORSCHER ENTLARVEN UNBEKANNTE RÖNTGENQUELLEN

Der Coma- oder der 65 Millionen Lichtjahre entfernte Virgohaufen entpuppen sich als ideale Studienobjekte, zumal sie vergleichsweise nah und schon lange bekannt sind. Wie oben erwähnt, hat *Rosat* jedoch an die 2000 weitere Galaxienhaufen aufgespürt, deren Halos offensichtlich als helle Röntgenquellen aufscheinen. Doch woher wissen die Astronomen, dass hinter diesen Quellen tatsächlich Galaxienhaufen sitzen?

Zunächst studiert Böhringer die bestehenden Kataloge von Röntgenhaufen und sucht in Verzeichnissen, die mit optischen Teleskopen erstellt wurden. Zeigen die Bilder mehrere verdächtige Objekte – sprich Galaxien – „auf einem Haufen“, nimmt der Astronom die Spektren und leitet daraus jeweils die Entfernungen ab. Das geschieht über die kosmische Rotverschiebung: Die Expansion des Weltalls zieht die Wellen der im Raum eingebetteten Objekte auseinander und verschiebt sie in den roten Spektralbereich. Je weiter eine Galaxie von uns entfernt ist, umso schneller flieht sie vor uns, und umso höher ist der Wert der Rotverschiebung z.

Der Zusammenhang zwischen Rotverschiebung und Entfernung ist bei sehr hohen z-Werten jedoch kompliziert und wird vom jeweils verwendeten kosmologischen Modell bestimmt. Die Astronomen sprechen daher lieber von „Rückblickzeit“ – jenem Alter, das

ein Objekt hatte, als sein Licht auf die Reise ging. In jedem Fall bedeuten identische z -Werte dasselbe Alter und dieselbe Distanz. Stimmen sie bei den erwähnten verdächtigen Galaxien überein, gibt es daher kaum Zweifel, dass sie alle zu ein und demselben Haufen gehören.

Auf diese Weise erstellen die Forscher am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik zwei Kataloge: *Noras II* enthält 934 Galaxienhaufen am Nordhimmel, *Reflex II* umfasst 919 Haufen am südlichen Firmament. Das große Datenmaterial bedeutet für Hans Böhringer viel Arbeit – aber in einem überraschend anderen Sinn, als man zunächst erwartet.

Der Wissenschaftler führt den Besucher aus seinem Zimmer durch ein Labyrinth von Gängen und Treppen in einen langen Flur, an dessen einer Wand ein hasenstallgroßer Holzkasten steht. Die Front ist mit einer Glasscheibe versehen. Böhringer knipst das Licht an, und in dem Kasten leuchten Hunderte orangefarbener Kreise auf. Sie scheinen frei im Raum zu schweben. „Hier sehen Sie ungefähr 900 Galaxienhaufen, exakt angeordnet an ihren wirklichen Positionen im Weltall“, sagt Böhringer. Die Galaxienhaufen sind Klebepunkte aus dem Kaufhaus.

„Es gibt drei Größen, entsprechend ihrer absoluten Leuchtkraft.“ Befestigt



Nah dran: Die Objekte seiner Forschungen stellt Hans Böhringer im Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik aus – in Form eines Schaukastens, den er mit 900 Galaxienhaufen (orangefarbene Klebepunkte) bestückt hat.

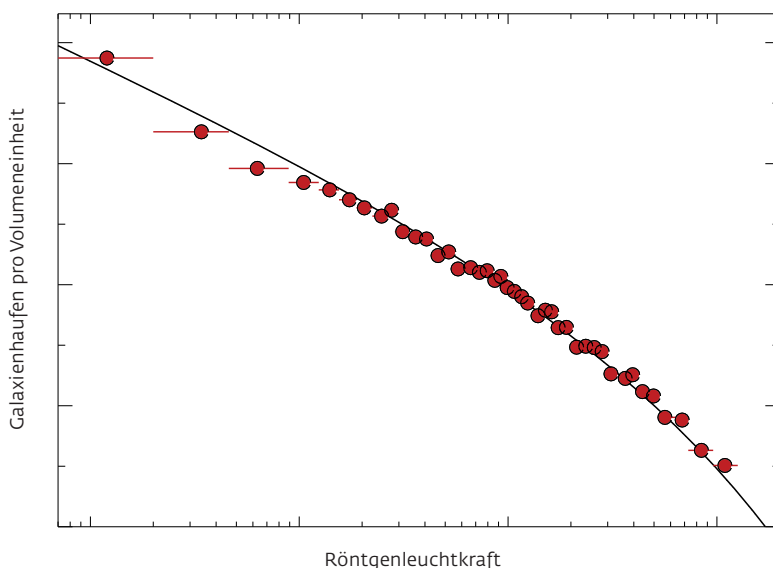
sind die Punkte an 38 parallel hintereinander aufgestellten Platten aus Antireflexglas. Die papiernen Galaxienhaufen hat der Forscher mit fluoreszierender Farbe angepinselt, UV-Lampen beleuchten sie. „Wenn ich irgendwann Zeit habe, muss ich noch mal 900 Punkte kleben“, sagt Böhringer. Der Inhalt soll dem aktuellen Stand von *Noras II*

und *Reflex II* angepasst werden, der gut 1800 Röntgenhaufen umfasst.

Der Guckkasten ist weit mehr als eine wissenschaftliche Spielerei. Schließlich zeigt er einen naturgetreuen Ausschnitt des Universums – einen Würfel mit vier Milliarden Lichtjahren Kantenlänge. Darin ist jeder Galaxienhaufen nicht nur mit zwei Himmelskoordinaten erfasst – ähnlich wie man die Position eines Orts auf der Erde durch die Angabe von geografischer Länge und Breite exakt bestimmen kann –, sondern auch noch mit seiner Entfernung. Erst dadurch wird die Karte dreidimensional und liefert ein maßstabsgetreues Abbild der natürlichen Verhältnisse.

Auf den ersten Blick sieht selbst der Laie, dass die großräumige Verteilung der Galaxienhaufen keineswegs homogen ist. Vielmehr deuten sich schon auf dieser Skala die anfangs angesprochenen netzförmigen Strukturen an. Um diese kosmische Honigwabe im Detail zu untersuchen, nutzen die Astronomen mehrere Methoden.

„Ein wichtiges Instrument ist das Massenspektrum“, sagt Hans Böhringer. Das hat mit einem klassischen Spektrum nichts zu tun, bei dem ein Prisma oder ein Gitter das Licht eines Objekts in einen Regenbogen zerlegt. Ein Massenspektrum gibt Auskunft darüber, wie sich die Galaxienhaufen



Einfacher Zusammenhang: Das Diagramm zeigt die Leuchtkraftfunktion von Galaxienhaufen, also ihre Anzahl pro Volumeneinheit bei einer bestimmten Röntgenleuchtkraft. Die Grafik verdeutlicht, dass die Haufen mit den höchsten Leuchtkräften und den größten Massen sehr selten sind. Das entspricht der Materieverteilung im jungen All, wo viele kleine und wenige große Fluktuationen existierten.

» Die Inflation hat winzige Fluktuationen des ursprünglichen Quantenvakuums schlagartig auseinandergezerrt und über den melonengroßen Raum verteilt.

gemäß ihrer Masse verteilen. Anders formuliert: Wie viele Galaxienhaufen einer bestimmten Masse gibt es pro Volumeneinheit?

Um zu verstehen, weshalb Antworten auf diese Frage von grundlegender Bedeutung sind, müssen wir einen Ausflug zu den Wurzeln allen Seins unternehmen. Die meisten Kosmologen, die Geburt und Entwicklung des Universums nachspüren, akzeptieren heute das Modell des inflationären Urknalls. Danach ist das All vor 13,7 Milliarden Jahren aus einem Quantenvakuum hervorgegangen. Im unvorstellbar kurzen Zeitraum von 10^{-34} bis 10^{-32} Sekunden nach dem Urknall soll sich der Kosmos

mit Überlichtgeschwindigkeit um 30 Größenordnungen aufgebläht haben, von der Planck-Länge (10^{-35} Meter) bis zum Durchmesser einer Melone.

NACH DEM URKNALL GEHT DIE KOSMISCHE SAAT AUF

Diese Inflation hat das All nicht nur extrem geglättet, sondern auch winzige Fluktuationen des ursprünglichen Quantenvakuums schlagartig auseinandergezerrt und über den nun melonengroßen Raum verteilt. Weil der Kosmos weiter expandierte – und noch heute expandiert –, wuchsen auch die anfänglichen (primordialen) Dichtefluktuationen.

Wenige Hundert Millionen Jahre nach dem Urknall entwickelten sich daraus großräumige Strukturen in Form netzartiger Filamente: die Keimzellen von Galaxienhaufen, Galaxien und Sternen.

Um die Masse eines Haufens zu bestimmen, gibt es mehrere Möglichkeiten. Bei einer Methode ermitteln die Forscher lediglich seine Röntgenleuchtkraft. Zuvor müssen sie viele Galaxienhaufen vermessen und eine Menge an statistischen Störeffekten berücksichtigen. Und sie müssen die eine oder andere Masse mit einem unabhängigen Verfahren herausfinden, etwa mithilfe einer Gravitationslinse (MAXPLANCKFOR-

NEUER RÖNTGENSPÄHER AM START

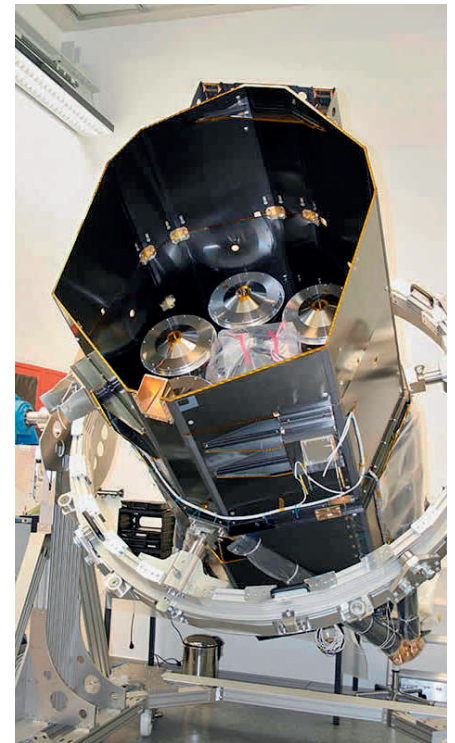
Die Röntgenastronomen sind gespannt: Im Jahr 2014 soll der russische Satellit *Spektrum-Röntgen-Gamma* (SRG) von Baikonur aus starten. Das Hauptinstrument an Bord heißt *eRosita* und soll mit bisher unerreichter spektraler und räumlicher Auflösung die erste vollständige Himmelsdurchmusterung im mittleren Röntgenbereich bis zehn Kiloelektronenvolt vornehmen.

eRosita wird den dunklen Seiten des Universums nachspüren, der Dunklen Materie und der Dunklen Energie. Bei Letzterer könnte es sich um die Vakuumenergie handeln, die der Kosmologischen Konstante in Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie entspricht; es könnte aber auch ein zeitvariables Energiefeld sein. Die Lösung dieser Frage wird eine fundamentale Rolle für die Physik spielen.

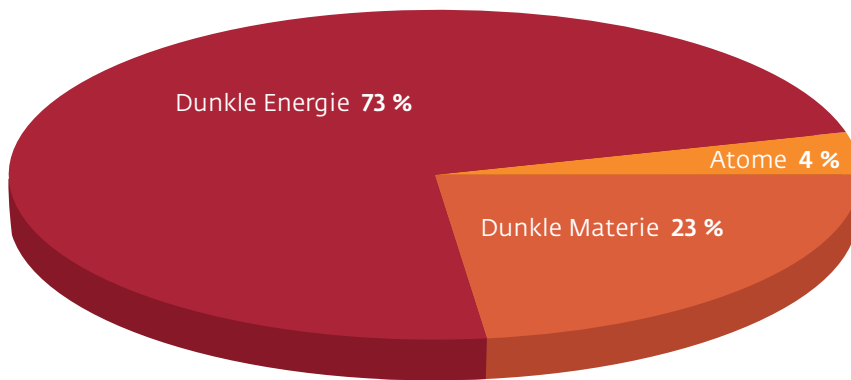
Die wissenschaftlichen Hauptziele der Mission:

- Die Beobachtung des heißen intergalaktischen Mediums von 50 000 bis 100 000 Galaxienhaufen und Galaxiengruppen und ihrer Gashalos, mit denen sie sich im Röntgenbild zu erkennen geben. Damit wollen Forscher die großräumigen Strukturen des Universums kartografieren und deren Entwicklung studieren.
- Die systematische Untersuchung aller schwarzen Löcher in nahen Galaxien und vieler neuer (bis zu drei Millionen), weit entfernter aktiver galaktischer Kerne.
- Die detaillierte Untersuchung der Physik von Röntgenquellen in unserer Galaxie, wie Supernovaüberreste, Röntgendoppelsternsysteme und Vorhauptreihensterne.

Das *eRosita*-Teleskop besteht aus sieben identischen Spiegelmodulen. Um die geforderte Sensitivität zu erreichen, enthält jedes Modul 54 ineinander verschachtelte Spiegelschalen, die ein Team um Peter Predehl am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik entwickelt hat. Wissenschaftler um Lothar Strüder haben im Münchner Halbleiterlabor der Max-Planck-Gesellschaft die Kameras entworfen.



Spion im Reich der Finsternis: das Röntgenobservatorium *eRosita*.

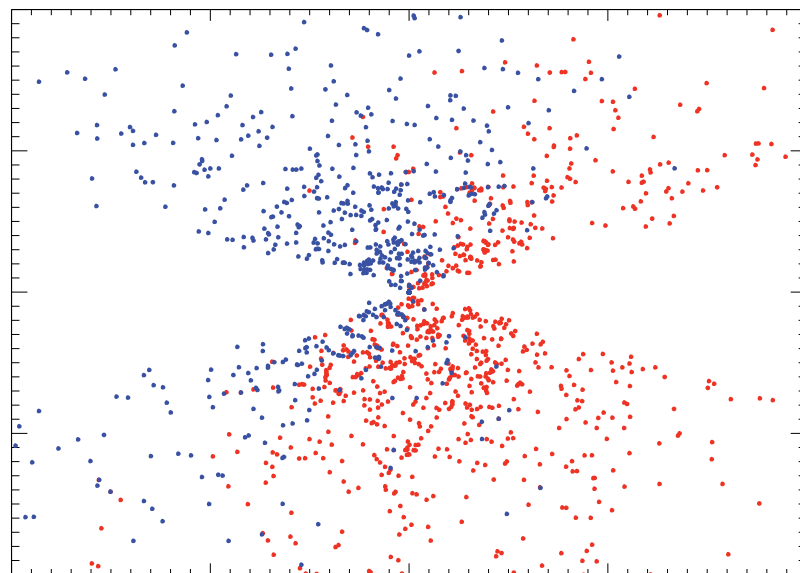


Unbekannter Stoff: Beobachtungen deuten darauf hin, dass ungefähr 96 Prozent des Universums unsichtbar sind. Die baryonische Materie, aus der Menschen, Planeten, Sterne oder Galaxien bestehen, macht nur ganze vier Prozent der Masse aus.

SCHUNG 4/2010, Seite 56 ff.). Am Ende steht ein Diagramm, das auf der y-Achse die Leuchtkräfte und auf der x-Achse die Massen angibt. Durch die Messpunkte läuft eine Kurve. Trägt man darauf die neu ermittelte Leuchtkraft eines Galaxienhaufens ein, ergibt sich sofort dessen Masse. Diese ist umso größer, je kräftiger der Haufen im Röntgenlicht leuchtet.

Mithilfe eines solchen Massenspektrums veranstalten Hans Böhringer und seine Kollegen eine kosmische Volks-

zählung. Wie bei irdischen Erhebungen interessiert sie nicht nur das Ergebnis für einen bestimmten Zeitpunkt. So nehmen Regierungen immer wieder Volkszählungen vor und vergleichen die Ergebnisse miteinander. Dabei gewinnen sie wertvolle Einblicke in die demografische Entwicklung ihres Landes. „Wenn wir Astronomen die Zahl der Galaxienhaufen pro Volumeneinheit für unterschiedliche Epochen bestimmen, erhalten wir Einblick in die Evolution des Universums“, sagt Böhringer.



Kosmisches Muster: Aus Daten des Röntgensatelliten *Rosat* haben Forscher eine dreidimensionale Karte der Galaxienhaufen erstellt. Zusätzlich zu den Positionen am Himmel gaben sie für jeden Haufen die Rotverschiebung als Maß der Entfernung an und verliehen der Grafik dadurch Tiefe. Die unterschiedlichen Farben rühren von verschiedenen Durchmusterungen her; aus den Regionen ohne Punkte liegen keine Daten vor. Selbst ohne aufwendige statistische Auswertungsverfahren zeigt sich, dass die Haufen dazu tendieren, Ketten oder Klumpen zu bilden.

Nach dem Urknall ist das Weltall gewachsen und hat sich entfaltet, vom Einfachen zum Komplexen, von den anfangs winzigen Fluktuationen hin zu den großen Strukturen. Demnach sollte etwa die Anzahl der Galaxienhaufen im Laufe der Zeit schwanken. Und weil deren Verteilung und Dichte wiederum von den kosmologischen Modellen abhängen, werden Böhringers Beobachtungen zum Prüfstein für die Theorie.

DAS UNIVERSUM ALS GEORDNETES EXPERIMENT

Wie ein Demograf die Bevölkerung nach allen Regeln statistischer Kunst untersucht, wendet der Max-Planck-Forscher raffinierte mathematische Methoden wie das Leistungsspektrum an, um die Verteilung der Galaxienhaufen zu ermitteln. „Es zeigt sich, dass die Chance, einen Galaxienhaufen zu finden, in der Nähe eines anderen Haufens größer ist als an einem beliebigen Punkt“, sagt Böhringer über das Ergebnis. Mit anderen Worten: „Die Verteilung der Haufen ist geklumpt.“ Und das gilt ebenso für die Dunkle Materie. Die nämlich muss nach dem Verständnis der Wissenschaftler hinter den Galaxienhaufen stecken – wie eine unbeleuchtete Großstadt auf dem Satellitenfoto der Erde. Erst wenn man die Lichter anknipst, werden die Umrisse der Stadt sichtbar.

Nun kommen Simulationen ins Spiel: Den Kosmologen gelingt es heute, die Evolution des Alls mithilfe von Supercomputern nachzustellen. Dazu reichen letztlich sechs Parameter aus, etwa der Wert, mit dem das All expandiert (Hubble-Konstante), oder die Dichte der Dunklen Energie, in der offenbar 73 Prozent des Universums stecken; diese Dunkle Energie treibt das All beschleunigt auseinander. Die Wissenschaftler füttern ihr Elektronenhirn also mit einem halben Dutzend Zutaten, starten kurz nach dem Urknall und lassen es dann Millionen und Milliarden Jahre in die Zukunft rechnen.

Bei diesen Simulationen entstehen großräumige Strukturen, die von den anfangs eingegebenen Parametern abhängen. „Variiert man diese Parameter, ändern sich auch die Strukturen“, sagt Hans Böhringer. „Das Ganze läuft als

sauberes, geordnetes Experiment ab.“ Auf diese Weise lässt sich zurückverfolgen, welche Anfangsbedingungen im ganz jungen Kosmos geherrscht und welche Parameter welche Werte gehabt haben müssen.

Ein brauchbares kosmologisches Modell liefert naturgemäß eine enge Übereinstimmung von Simulation und Beobachtung. Und da schneidet das geschilderte Szenario des inflationären Urknalls gar nicht schlecht ab. Auch die vermuteten Anteile von Dunkler Energie (73 Prozent) und Dunkler Materie (23 Prozent) an der gesamten Energiedichte des Universums scheinen recht gut zu passen – in der „normalen“ baryonischen Materie stecken offenbar nur vier Prozent. Dennoch sind noch viele Fragen offen. Hans Böhringer schreckt das nicht, im Gegenteil: „Am interessantesten wäre es doch, wenn wir irgendetwas Überraschendes entdecken würden.“ ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- **Galaxienhaufen** sind die größten Gebilde im Universum. Die meisten stecken in einer heißen Gashölle; dieser Halo zeigt sich im Röntgenlicht.
- Aus der Untersuchung der Röntgenhalos schließen Astronomen auf die Bestandteile des Gases und auf die Gesamtmasse der Galaxienhaufen. Die unbekannte Dunkle Materie macht mehr als 80 Prozent der Masse eines Haufens aus.
- Weil Galaxienhaufen die großräumigen Strukturen nachzeichnen, sind sie wertvolle Indikatoren für die Verteilung der Materie im Universum. Außerdem dienen sie dazu, kosmologische Modelle zu überprüfen.

GLOSSAR

Baryonische Materie: Allgemein versteht man darunter jene Materie, die wir kennen und aus der die sichtbare Welt besteht. Im engeren Sinne sind Baryonen Teilchen, die sich aus drei Quarks zusammensetzen, also etwa Protonen. Man unterscheidet auch noch zwischen Leptonen (etwa Elektronen) oder instabilen Mesonen (Quark-Antiquark-Paare).

Plasma: Elektrisch leitendes Gas, das vollständig aus freien Ladungsträgern besteht, also aus Ionen und Elektronen. Die Ionen sind Atome, die entweder mehr oder weniger Elektronen haben als im Normalzustand. 99 Prozent der baryonischen Materie im Weltall liegen als Plasma vor.

Supernova: Hat ein Stern am Ende seines Lebens mehr als acht Sonnenmassen und ist die innere Energiequelle (Kernfusion) versiegt, dann kann der nach außen wirkende Strahlungsdruck der Schwerkraft nicht länger widerstehen: Die Kugel kollabiert, und der Stern zerbricht. Bei einer anderen Art von Supernova explodiert ein kleiner, ausgebrannter Stern (Weißer Zwerg), weil er von einem größeren mit Materie gefüttert wird und schließlich unter dieser übermäßigen Nahrungsaufnahme zusammenbricht.



Wir machen Sie fit für Ihre Gründung.

Steckt in Ihnen eine Geschäftsidee? Worauf warten Sie noch? Mit dem Gründungswettbewerb start2grow 2013 bringen Sie Ihren Businessplan in Höchstform.

Bundesweiter Wettbewerb:

- Kostenfreie Teilnahme
- Hohe Geld- und Sachpreise
- Netzwerk mit mehr als 600 Coaches
- Alle Branchen plus Sonderdisziplin „Technologie“

Los geht's ab 26. November 2012. Jetzt anmelden: www.start2grow.de



Eine Initiative des dortmund-project.