

Licht ins Dunkel bringen

Die Astronomie dringt immer tiefer in die Geheimnisse des Universums ein.

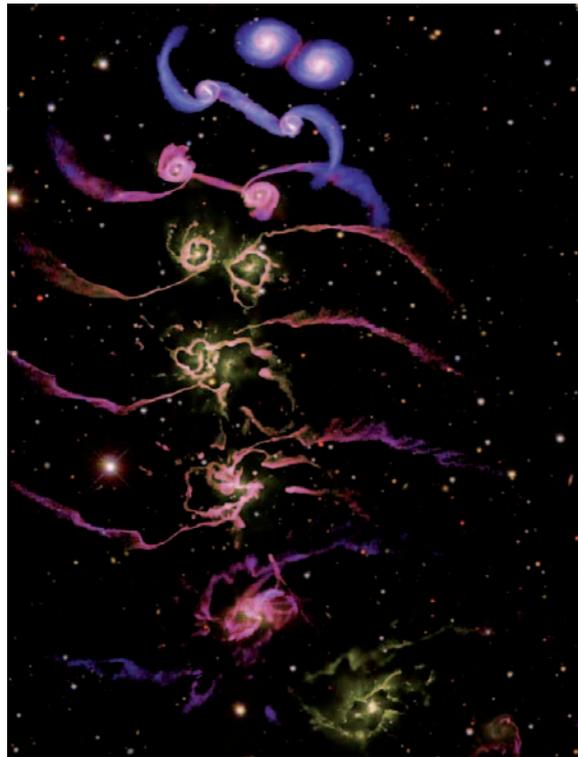
Matthias Bartelmann

Die Astronomie feiert derzeit ein goldenes Zeitalter, besonders gewürdigt durch das diesjährige Internationale Jahr der Astronomie. Maßgeblich verdankt sich das einer stürmischen instrumentellen Entwicklung, die neue Beobachtungsfenster weit öffnet, die vorher bestenfalls zu ahnen waren. Die Flut neuer Daten liefert dabei ebenso viele überraschende Ergebnisse wie neue Fragen.

Die wesentlichen Fragen, um die Astronomie und Astrophysik gegenwärtig kreisen, lassen sich erstaunlich bündig zusammenfassen. Angefangen bei großen Skalen, geht es zunächst um den Aufbau, den Ursprung und die Entwicklung des Universums. Hier zeigt sich, dass gerade die Natur der beiden dominierenden Bestandteile des Universums noch weitgehend unbekannt ist: Die kosmischen Strukturen bestehen im Wesentlichen aus der rätselhaften Dunklen Materie, und die Dunkle Energie liefert die vielleicht plausibelste Erklärung für die beschleunigte kosmische Expansion.

■ Um den Ursprung und die heutige Struktur des Universums zu erklären, fordert das kosmologische Standardmodell zwingend einen Urknall mit einer darauf folgenden Phase inflationärer Ausdehnung. Das wirft jedoch viele Fragen auf und ist der Gegenstand intensiver Forschung. Das betrifft z. B. das Ende des „dunklen Zeitalters“, das nach der Freisetzung des kosmischen Mikrowellenhintergrunds begann, als die baryonische Materie im Universum in einen neutralen Zustand übergang. Erst die Entstehung der ersten Sterne und andere Quellen energiereicher Strahlung brachten wieder Licht in die Dunkelheit und ionisierten das kosmische Gas wieder.

■ Das Paradigma der Galaxienentstehung besagt, dass sie hierarchisch erfolgt, indem sich zuerst kleine Strukturen bilden, miteinander verschmelzen und dabei die Gaskomponente stark stören. Dies leitete Phasen intensiver Sternentstehung mit nachfolgenden Supernova-Explosionen ein. Hier häufen sich wichtige offene Fragen: Wie geschah dies im Einzelnen? Welche Prozesse waren dabei entscheidend? Auf welchen Zeitskalen liefen sie ab? Wie hingen sie von der kosmischen Umgebung der Galaxien ab und zu welchen Morphologien und Transformationen der Galaxien führten sie? Ungeklärt ist auch, wie die Galaxien das Netzwerk kosmischer Strukturen kennzeichnen und



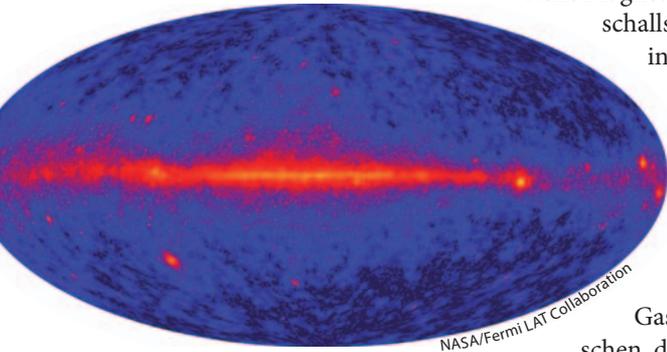
MPI für Astrophysik

Die mittlerweile verfügbare Rechenleistung ermöglicht es Astrophysikern, die Jahrmillionen dauernde Verschmelzung zweier Galaxien mit zentralen Schwarzen Löchern zu simulieren.

wie sich die Produkte ihrer chemischen Entwicklung auf kosmischen Skalen verteilen. Unsere Heimatgalaxie, die Milchstraße, stellt für diese und viele daran anschließende Rätsel ein ideales, weil viel genauer erforschbares Labor zur Verfügung.

■ Die Entstehung und Entwicklung von Sternen und Planeten bildet das dritte zentrale Gebiet der gegenwärtigen astronomischen und astrophysikalischen Forschung. Unter dem Einfluss welcher physikalischen Prozesse verdichten sich Gaswolken so weit, dass Sterne entstehen? Entscheidend dafür ist, auf welche Weise das Gas abkühlen kann. Atomares Wasserstoffgas allein kühlt nur bis etwa 10 000 K effizient ab. Für eine weitere Abkühlung müssen Rotationsübergänge in Molekülen und vor allem niederenergetische Anregungen in den Hüllen schwerer Elemente sorgen. Diese summarisch als Metalle bezeichneten Elemente stehen im jungen Universum aber noch nicht zur Verfügung. Gerade das macht die Entstehung der ersten wenigen Sternengenerationen zu einem besonderen Problem. Aber auch wesentliche Aspekte späterer Sternentstehung sind ungeklärt, insbesondere, welche

Prof. Dr. Matthias Bartelmann, Institut für Theoretische Astrophysik, Albert-Überle-Str. 2, 69120 Heidelberg,



Diese Aufnahme des Fermi-Satelliten zeigt den ganzen Himmel im Gamma-Licht.

NASA/Fermi LAT Collaboration

Rolle Magnetfelder und überschallschnelle Turbulenz in Gas- und Molekülwolken dabei spielen. Hier gilt es auch, den Materiekreislauf zwischen Sternen und dem interstellaren Gas genauer zu erforschen, denn gerade damit

hängt zusammen, auf welche Weise Planetensysteme um Sterne entstehen und sich entwickeln konnten.

Neue Augen der Astronomie

2009 jährt sich auch die Entdeckung der Spektralanalyse durch Kirchhoff und Bunsen zum 150. Mal. Seitdem gilt die Spektroskopie, zunächst die der Sonne, dann die anderer Sterne, heute auch die von Quellen aus der Frühzeit des Universums, als eine der zentralen Techniken der Astronomie. Der Einzug der Spektralanalyse in die Astronomie markiert den Übergang zur Astrophysik. Während die Astronomie vorher eher deskriptiv und rein beobachtend war, schiebt sich seitdem die physikalische Modellierung der beobachteten Phänomene in den Vordergrund.

Heute werden die Begriffe Astronomie und Astrophysik so gut wie synonym verwendet. Die wissenschaftlichen Fragen und Ziele gehen Hand in Hand mit der Entwicklung neuartiger Teleskope und Instrumente, das gegenwärtige „goldene Zeitalter“ der Astronomie ist wesentlich auf die enorm erweiterten Beobachtungsmöglichkeiten zurückzuführen. Leistungsstarke, kompakte Teleskope und CCD-Kameras ermöglichen es auch Amateurastronomen, seltene Ereignisse oder neue Himmelskörper zu finden.

Optische und Infrarot-Teleskope, ausgestattet mit Kameras und Spektrografen, erschließen von der Erdoberfläche wie vom Weltraum aus auf vielfältigste Weise nahe Sternentstehungsgebiete, Staub- und Molekülwolken und fernste Galaxien. Radioteleskope bilden vor allem die Synchrotronstrahlung relativistischer Elektronen ab und zeigen damit die Auswirkungen hochenergetischer Prozesse in ausgedehnten Magnetfeldern. Der Aufbau und Einsatz spezieller Teleskope für die Beobachtung der kosmischen Reionisation am Ende des „dunklen Zeitalters“ beginnt gerade.

Dazwischen öffnet sich seit vergleichsweise kurzer Zeit ein Fenster im Submillimeterbereich, das einen

Blick auf das sehr junge, weit entfernte und damit stark rotverschobene Universum ebenso erlaubt wie die Untersuchung niederenergetischer Rotationsübergänge in mehratomigen Molekülen. Die genaue Kartierung des kosmischen Mikrowellenhintergrunds und seiner Polarisation revolutionierte die Kosmologie, weil sie hilft, zahlreiche kosmologische Parameter mit hoher Genauigkeit einzuschränken. Galaxienhaufen werden ebenfalls im Submillimeterbereich sichtbar, weil das in ihnen enthaltene heiße Plasma das Planck-Spektrum des Mikrowellenhintergrunds auf charakteristische Weise verformt.

Von Satelliten aus lässt sich Strahlung im UV-, Röntgen- und Gamma-Bereich aufnehmen und liefert Informationen über energiereiche Prozesse, die etwa in massereichen Sternen und ihrer Umgebung am Rand kompakter Objekte wie Neutronensternen oder Schwarzen Löchern, in den Stoßwellen von Supernova-Explosionen oder in Gammastrahlenausbrüchen auftreten. Die vergleichsweise weiche Röntgenemission des thermischen Plasmas in Galaxienhaufen hat große Bedeutung für unser Verständnis der kosmischen Strukturbildung.

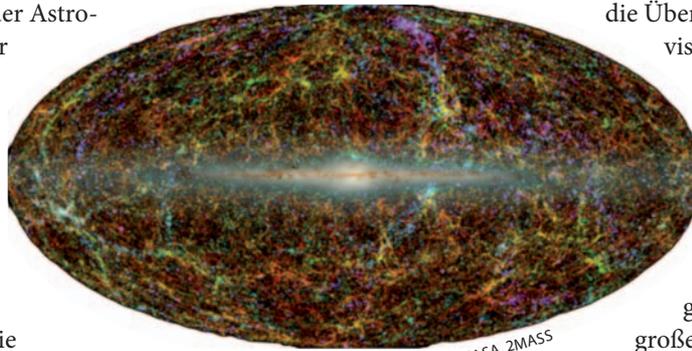
Cherenkov-Teleskope ermöglichen es, die Übergangsstrahlung relativistischer Teilchen nachzuweisen, die in der

Erdatmosphäre durch höchstenergetische Gammastrahlung entstehen. Dem direkten und indirekten Nachweis höchstenergetischer Teilchen dienen

große Anlagen wie das Pierre-Auger-Experiment. Hochenergetische

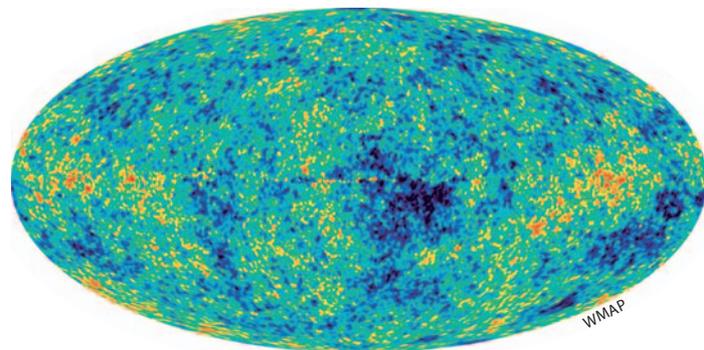
Neutrinos verraten sich durch Myonen, deren Cherenkov-Effekt sich in Wasser und Eis durch große Photomultiplier-Arrays wie Antares, Amanda oder Icecube nachweisen lässt.

Ein weiteres, gänzlich anderes Fenster, vor allem für die Untersuchung kompakter Objekte, entsteht derzeit durch Gravitationswellen-Detektoren, deren Empfindlichkeit für die Messung relativer Längenänderungen bereits ein phantastisches Niveau erreicht hat.



NASA, 2MASS

Die 2MASS-Durchmusterung erfasst den Himmel im nahen Infrarot. Die Rotverschiebung und damit die Entfernung der Objekte wächst von blau über grün bis rot an.



WMAP

Anhand der winzigen Fluktuationen in der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung lassen sich Informationen über die Frühzeit unseres Universums gewinnen.

Allein im elektromagnetischen Spektrum überblicken astronomische Teleskope, Instrumente und Detektoren damit einen Frequenzbereich von etwa 20 Größenordnungen – vom MHz-Bereich bei Radioteleskopen bis zu Photonenenergien von etwa 300 GeV. Indirekte Methoden, die vor allem auf der Cherenkov-Strahlung relativistischer Teilchen beruhen, können Teilchen mit Energien bis zu einigen 10^{20} eV nachweisen!

Darüber hinaus spielt die Entwicklung der Computer eine entscheidende Rolle, denn diese ermöglichen einerseits immer aufwändigere und realistischere Simulationen, andererseits die Archivierung und Verarbeitung immer größerer Datenmengen („Virtuelle Observatorien“). Zweifellos ist es notwendig, die Datenflut aus den vielen Bereichen der beobachtenden Astronomie theoretisch aufzuarbeiten und zu modellieren, damit sie zu einem besseren Verständnis unseres Universums und einem fundamentalen Erkenntnisgewinn führt. Wie überall in der Physik sind Theorie und Empirie nur zusammen stark.

Degradierte Planeten und neue Welten

Die derzeitige Erforschung unseres und anderer Planetensysteme schließt nicht nur den Kreis zu den Ursprüngen der modernen Astronomie vor 400 Jahren, sondern belegt eindrucksvoll, wie sehr die stürmische Entwicklung der Beobachtungsmethoden die Astrophysik revolutioniert hat.

Raumsonden verschiedenster Art haben uns einen sehr viel genaueren Blick auf die Körper unseres Sonnensystems erlaubt. Ulrich Christensen und Norbert Krupp zeigen in ihrem Artikel, wie die Planeten und Monde mehr und mehr ins Blickfeld der Geowissenschaftler geraten sind. Zudem stellen Meteorite und die Zusammensetzung des kosmischen Staubs eine Verbindung zwischen Planetologie und Mineralogie her.

Andreas Kopp befasst sich mit den vier großen Monden des Jupiter, mit deren Entdeckung die moderne Astronomie begann. Galilei erkannte, dass Jupiter offenbar das Zentrum seines eigenen Mondsystems ist. Damit zeigte er, dass die Erde keineswegs das ausgezeichnete Zentrum der Welt sein kann und versetzt so dem überlieferten geozentrischen Weltbild einen entscheidenden, empirisch begründeten Todesstoß. Für Galilei waren die Jupitermonde nur winzige Lichtpünktchen, heute erkennen wir in ihnen höchst unterschiedliche und vielgestaltige Welten, die noch zahlreiche Überraschungen versprechen.

Erst mithilfe höchstempfindlicher Spektroskopie ließen sich weit über dreihundert Planeten außerhalb des Sonnensystems entdecken (vgl. den Artikel von Joachim Wambsganß), mittlerweile gelang sogar ein direkter Blick auf Exoplaneten. Es scheint, als wäre unser Sonnensystem keineswegs typisch bzw. ein typisches Planetensystem ganz anders beschaffen als unser vertrautes. Die Vielzahl neuer Erkenntnisse hat die Grenzen zwischen Planeten, Kleinplaneten,



Der aus der Reihe der Planeten verstoßene Pluto in einer künstlerischen Ansicht: Zu erkennen ist die Oberfläche,

sein Mond Charon und die Sonne, die hier tausendmal schwächer leuchtet als auf der Erde.

Zwergplaneten und sogar Monden verschwimmen lassen. Deswegen hat die Internationale Astronomische Union im August 2006 neu definiert, was als Planet gilt. Das hat damals großes Aufsehen erregt, weil unser entfernter, aber seit 1930 vertrauter Mitplanet Pluto aus dieser Definition fiel, zum Zwergplaneten wurde und die Kleinplanetennummer 134340 bekam. Dabei ist die neue Definition durchaus gut physikalisch begründbar. Ihr zufolge ist ein Planet ein Himmelskörper, der sich in einem Orbit um einen Stern befindet, unter seiner eigenen Schwerkraft annähernd Kugelform annehmen und die Umgebung seiner Bahn von kleineren Körpern befreien konnte. Pluto scheiterte am dritten Kriterium.

Plutos Degradierung ist eher eine kuriose Episode. Viel entscheidender ist dagegen, wie Wilhelm Kley in seinem Artikel zeigt, dass die entdeckten extrasolaren Planeten unsere Theorien der Entstehung von Planetensystemen ins Wanken bringen, die vorher gänzlich auf dem Wissen über unser Sonnensystem aufbauten. Das wirft selbstverständlich spannende Fragen auf, nicht zuletzt die nach der Möglichkeit von Leben auf anderen Planeten. Wer weiß, vielleicht ist es Forschern außerirdischer Zivilisationen bereits gelungen, Spuren organischen Lebens auf der Erde nachzuweisen?

DER AUTOR

Matthias Bartelmann (FV Gravitation und Relativitätstheorie) studierte Physik an der LMU München. Seine Promotion fertigte er am MPI für Astrophysik in Garching an, wo er, unterbrochen von einem Auslandsaufenthalt am Harvard-Smithsonian Center für Astrophysics, anschließend forschte. Nach der Habilitation 1998 war Bartelmann Projektleiter des deutschen Beitrags zum Planck-Satelliten. Seit 2003 ist er Professor für theoretische Astrophysik am Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg. Sein Arbeitsgebiet ist die Kosmologie, insbesondere die Theorie der Gravitationslinsen, die kosmische Strukturbildung und der Mikrowellenhintergrund. Als Kurator des Physik Journal hat er diesen Schwerpunkt koordiniert.

