

ASTROPHYSIK

Das Fenster zum COSMOS

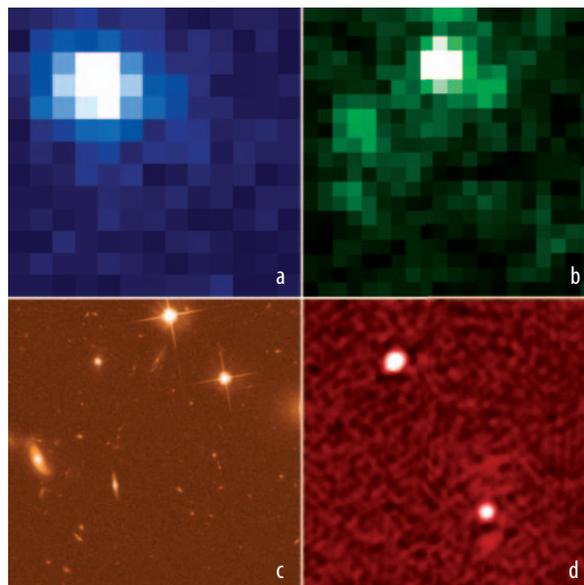
Wellenlängenübergreifende Messungen helfen, die Entstehung von Galaxien zu entschlüsseln.

Knud Jahnke, Eva Schinnerer, Frank Bertoldi und Günther Hasinger

Mit dem Cosmic Evolution Survey (COSMOS) wird ein äquatornahes Gebiet am Himmel untersucht, dessen Fläche neunmal größer ist als die des Vollmonds. Indem das Projektteam die Ergebnisse zahlreicher Messungen über einen breiten Spektralbereich von Radiowellen bis zur Röntgenstrahlung kombiniert, kann es u. a. verfolgen, wie Galaxien entstehen oder sich Galaxienhaufen bilden, und angeben, wie sich baryonische und Dunkle Materie im Universum verteilen.

Aus den winzigen Dichteveriationen der dem Urknall entsprungene Ursuppe hat die Kraft der Gravitation ein breites Spektrum von Strukturen geschaffen: Nach 13 Milliarden Jahren erstreckt sich ihr Größenspektrum über fast 20 Zehnerpotenzen – von Galaxienhaufen über Sterne bis hin zu Planeten. Im frühen Universum war die Strukturentwicklung von der mysteriösen Dunklen Materie getrieben, die sich außer mit ihrer gravitativen Wirkung nicht bemerkbar macht. Das Universum besteht nur zu rund 4,5 Prozent aus der vertrauten sichtbaren „baryonischen Materie“, zu 25 Prozent aus Dunkler Materie und zu 70 Prozent aus Dunkler Energie, die zu einer beschleunigten Ausdehnung des Weltalls führt. Da die stoßfreie Dunkle Materie während ihrer Kontraktion nicht abkühlen kann, bleibt sie auf große galaktische Skalen verteilt, während sich die sichtbare Materie abkühlt und sich dadurch z. B. in Molekülwolken, Sterne und Schwarze Löcher verdichten kann.

Eine Herausforderung der modernen Astrophysik ist es zu verstehen, wie die baryonische Materie sich zu Galaxien verdichtet. Die zur Entstehung von Galaxien führenden Prozesse sind vielfältig und oft eng miteinander verkoppelt, was ein Verständnis dieses Prozesses aus einfachen physikalischen Gesetzen erschwert. Dank der endlichen Lichtgeschwindigkeit und da sich über die Rotverschiebung der Galaxien die Entfernung bestimmen lässt, können aktuelle Großteleskope direkt verfolgen, wie Galaxien im frühen Universum entstehen. Dies funktioniert zwar nicht an einzelnen Objekten, wohl aber, indem man eine Vielzahl von Galaxien in unterschiedlichen Entwicklungsstadien und über einen großen räumlichen und zeitlichen Bereich beobachtet und klassifiziert. Auf diese Weise lassen sich die Entstehungsgeschichte des Galaxienzoos mit statistischen Methoden nachzeichnen und daran beteiligte physikalische Prozesse identifizieren.



In diesem Ausschnitt aus dem COSMOS-Feld werden bei verschiedenen Wellenlängen unterschiedliche Strukturen sichtbar: Im Röntgenlicht (a), mit dem Hubble-Weltraumteleskop im sichtbaren Bereich (c) und bei Radiowellenlängen (d) zeigt sich eine Galaxie mit aktivem Kern. Im Infraroten bei 24 µm (b) erscheinen zwei Galaxien mit staubiger Sternentstehung, die im sichtbaren Licht nicht oder nur schwach emittieren.

Die Detektionsempfindlichkeit der dazu nötigen Aufnahmen muss zum einen ausreichend hoch sein, um auch die entfernten, frühen Galaxien nachzuweisen und quantitativ zu beschreiben. Zum anderen muss der aufgenommene Bereich groß genug sein, um einen repräsentativen Querschnitt der vorkommenden Umgebungsbedingungen abzubilden. Da kosmische Strukturen bis zu 100 Mpc (1 Megaparsec $\approx 3 \cdot 10^{22}$ m)

KOMPAKT

- Bei COSMOS wird ein speziell ausgewähltes Himmelsfenster mithilfe der besten Teleskope über einen breiten Wellenlängenbereich untersucht. Damit soll es gelingen, die Entwicklung von Galaxien und großskaligen Strukturen zu entschlüsseln.
- Im Rahmen von COSMOS ließ sich erstmals die Verteilung der gesamten Masse dreidimensional bestimmen.
- Außerdem zeigt die Kombination aus Radio-, Röntgen- und optischen Aufnahmen eindrucksvoll, wie Galaxien zu Superhaufen verschmelzen.
- Massereiche Strukturen im frühen Universum lassen sich mittels sog. Submillimeter-Galaxien untersuchen.

Dr. Knud Jahnke, Dr. Eva Schinnerer, MPI für Astronomie, Königstuhl 17, 69117 Heidelberg; Prof. Dr. Frank Bertoldi, Universität Bonn, Auf dem Hügel 71, 53121 Bonn und Prof. Dr. Günther Hasinger, MPI für extraterrestrische Physik, Gies-senbachstr., Postfach 1312, 85741 Garching

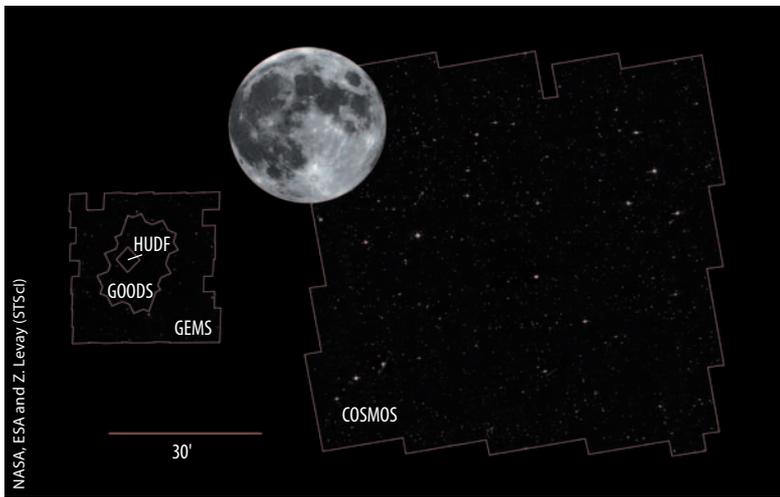


Abb. 1 Die hochempfindlichen Aufnahmen des Hubble Ultra Deep Field (HUDF) und der GOODS- und GEMS-Projekte¹⁾ (links) decken einen viel kleineren Bereich ab als das COSMOS-Mosaik (rechts), das der neunfachen Fläche des Vollmonds entspricht. Das COSMOS-Bild ist

das größte jemals in dieser Auflösung aufgenommene Bild. In der gedruckten Auflösung sind nur einige wenige saturierte helle Sterne zu sehen, während die Mehrzahl der über 2 000 000 Objekte aufgrund ihrer Größe im Hintergrund verschwinden.

groß sind, sollten die Beobachtungen entsprechend große Himmelsareale abdecken. Dies ist mit modernen, leistungsstarken Großteleskopen mittlerweile möglich, wenn auch sehr aufwändig.

Je weiter Galaxien von uns entfernt sind, umso mehr ist ihr Spektrum zu langen Wellenlängen verschoben, da das Universum seit dem Urknall expandiert. Diese Rotverschiebung z von rund $71 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc})$ ist der natürliche Entfernungsmaßstab der extragalaktischen Astronomie sowie ein Maß für die Zeit, die wir in die Vergangenheit zurückblicken. So entspricht z. B. eine Rotverschiebung von $z = 0,1$ einem Rückblick in die Zeit vor 1,3 Milliarden Jahren. Der Urknall bei $z = \infty$ liegt 13,6 Milliarden Jahre zurück.

¹⁾ GOODS ist die Abkürzung für Great Observatories Origins Deep Survey, GEMS steht für Galaxy Evolution from Morphology and Spectral Energy Distributions.

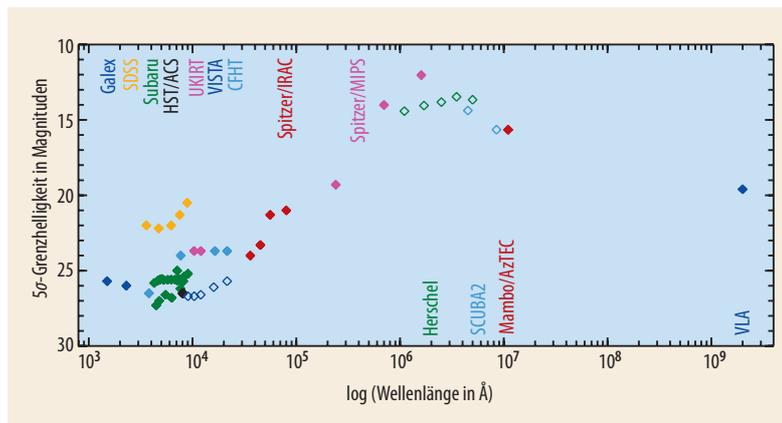


Abb. 2 Beobachtete Bilddatensätze im COSMOS-Feld: Gezeigt sind die zentrale Wellenlänge und Grenzhelligkeit in astronomischen Magnituden. Diese Grenzhelligkeit muss ein Objekt haben, um mit fünffacher Standardabweichung (5σ) oberhalb des Rauschens detektiert zu werden. Die gefüllten Symbole geben

die im COSMOS-Feld verfügbaren Daten an. Die offenen Symbole markieren bewilligte, aber noch nicht durchgeführte Aufnahmen (VISTA, Herschel, SCUBA2). Hinzu kommen die Röntgendaten der XMM-Newton- und Chandra-Satelliten bei noch kleineren Wellenlängen (nicht gezeigt).

Von Daten zu Erkenntnissen

Der Cosmic Evolution Survey (COSMOS) ist das derzeit wohl ambitionierteste Projekt seiner Art, denn es deckt einen Bereich von $1,4 \cdot 1,4$ Quadratgrad am Himmel in aktuell 46 Filterbändern vom Röntgen- bis zum Radiobereich ab (Abb. 1). Das COSMOS-Feld liegt bewusst in Äquatornähe, damit es für alle aktuellen und künftigen bodengebundenen Teleskope von beiden Hemisphären aus zugänglich ist. Die weltweit jeweils besten verfügbaren Teleskope haben fast im gesamten der Astronomie zugänglichen Wellenlängenbereich Bilder von diesem Feld aufgenommen.

Hauptziel von COSMOS ist es nachzuvollziehen und zu beschreiben, wie sich Galaxien entwickeln und zu großskaligen Strukturen formieren. Dabei gilt es aufzuklären, wie bestimmte Phänomene wie Sternentstehung, Galaxienzusammenstöße, Bildung verschiedener Galaxientypen usw. von ihrer großskaligen Umgebung abhängen. Zwei Punkte spielen eine entscheidende Rolle:

- Die Feldgröße ist durch die Voraussage von Vielteilchen-Simulationen zur Strukturentstehung motiviert [1]. Danach haben die größten zu erwartenden Strukturen eine Ausdehnung von rund 100 Mpc, also $3 \cdot 10^{24} \text{ m}$ in mitbewegten Koordinaten. Bei einer Rotverschiebung von 2, also 10 Milliarden Jahre in der Vergangenheit, entspricht dies einem Winkeldurchmesser von 1,3 Grad am Himmel. Damit lässt sich die Entwicklung der unterschiedlichsten Strukturen als Funktion der Umgebungsdichte studieren – von Leerräumen (sog. Voids) bis hin zu dichtesten Galaxienhaufen.
- COSMOS wird von der Physik beherrscht, die bei verschiedenen Wellenlängen beobachtbar ist: von aktiven Galaxienkernen (AGN), in deren Zentrum sich ein Schwarzes Loch befindet, und heißem Gas in den Bereichen zwischen den Galaxienhaufen im Röntgenbereich, jungen Sternen im UV, älteren im sichtbaren

Spektralbereich	Instrument	Zielobjekte/-prozesse
Röntgen	XMM-Newton, Chandra	AGN, Haufegas, Sternentstehung
UV	Galex, Subaru	Sternentstehung/ junge Sterne
optisch	Subaru, HST, SDSS, CFHT	Sternentstehung, Galaxienstruktur, Weak Lensing
optische Spektroskopie	VLT, Magellan	Entfernungen, Gruppen, Strukturen, AGN
Nah-Infrarot	CFHT, VISTA	Galaxien bei großen z
NIR-Spektroskopie	Keck	Galaxien bei großen z
Mittleres Infrarot/ Fern-Infrarot	Spitzer, Herschel	staubige Sternentstehung
Sub-Millimeter/ Millimeter	MAMBO, AZTEC, SCUBA2	extreme Sternentstehung bei großen z
Radio	VLA	AGN, staubige Sternentstehung

Tab. Das COSMOS-Feld wird über einen breiten Spektralbereich untersucht, um ganz unterschiedliche physikalische Prozesse zu analysieren. (AGN steht für Aktive Galaxienkerne)

Licht und nahem Infrarot. Im fernen Infraroten zeigt sich der Staub aufgeheizt durch intensive Sternentstehung; Jet-Phänomene aktiver Kerne sieht man im Radiobereich. Kombiniert werden diese Daten mit der höchsten räumlichen Auflösung, die das Hubble-Weltraumteleskop (HST) ermöglicht (Tab. und Abb. 2).

Das Herzstück von COSMOS ist ein hochaufgelöstes Mosaik aus 590 Einzelbildern der Advanced Camera for Surveys (ACS) des Hubble-Weltraumteleskops, das aus rund 10^{10} Pixeln besteht und in knapp 900 Stunden Aufnahmezeit entstanden ist. Dieses Bild ist das größte jemals aufgenommene HST-Mosaik und ermöglicht eine genaue morphologische Klassifikation von Galaxientypen. Spiral- und elliptische Galaxien lassen sich unterscheiden, das Vorkommen von Balken untersuchen und Anzeichen für Wechselwirkungen von Galaxien bei größeren Entfernungen beobachten, was vom Boden aus so nicht möglich ist.

Im Röntgenbereich untersuchen die Satelliten XMM-Newton und Chandra mit einer Beobachtungszeit von 400 bzw. 500 Stunden das COSMOS-Feld, im optischen Bereich das Subaru-Teleskop auf Hawaii mit mehr als 35 Beobachtungsnächten. Spektroskopische Nachbeobachtungen von 50 000 Galaxien mit dem Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte (600 Stunden) und dem IMACS-Spektrographen am Magellan-Teleskop in Chile (20 Nächte) befinden sich im dritten Jahr und werden noch bis 2010 dauern. Die Gesamtkosten für den derzeit existierenden Datensatz betragen mehr als 60 Millionen Euro.

Als Grundlage für dreidimensionale Studien im Raum dienen „photometrische Rotverschiebungen“, da derzeit weltweit nicht genug Teleskopkapazität zur Verfügung steht, um die mehrere 100 000 schwachen Galaxien spektral zu untersuchen. Für diese Messungen werden im sichtbaren Spektralbereich in möglichst dicht beieinander liegenden Filterbändern Bilddaten aufgenommen, um die Rotverschiebung verschiedener Strukturen zu bestimmen. Diese Daten werden mit denen aus UV- und IR-Messungen kombiniert. Dadurch ist es möglich, anhand bekannter breitbandiger Signaturen in der spektralen Energieverteilung von Galaxien wie die Kontinuumsform, charakteristische Absorptionsstrukturen (z. B. die 400-nm-Kante in Galaxienspektren), sehr breite Emissionslinien von z. B. Wasserstoff in Quasaren oder Emissionsbereiche von Staub eine Schar theoretischer Modelle mit der Rotverschiebung als freiem Parameter anzupassen. Zu den Objekten, die zusätzlich hochaufgelöst spektroskopisch vermessen werden, gehören hellere Galaxien und Quasare (Abb. 3) oder besonders seltene und physikalisch interessante Objekte wie wechselwirkende Galaxien, sehr weit entfernte oder extrem staubige Galaxien oder solche, in denen vermehrt Sterne entstehen.

Mittlerweile nutzen mehr als 150 Forscherinnen und Forscher aus acht Ländern – darunter aus vier Instituten in Deutschland (MPIs für Astronomie in Heidelberg sowie für Extraterrestrische Physik bzw. Astrophysik in Garching und die Universität Bonn) diese Daten innerhalb des COSMOS-Konsortiums. Sie

haben seit 2003 diesen einmaligen Datensatz zusammengetragen und untersuchen nun fundamentale Fragen zur Strukturbildung. Die meisten Daten werden normalerweise nach ein bis zwei Jahren der gesamten Welt zur Verfügung gestellt. Dies ist u. a. schon mit den HST-, Galex-, Subaru-, XMM- und VLA-Daten geschehen.²⁾

Auszüge aus einer wahren Ergebnisflut

Wissenschaftlich einzigartig ist die Stärke von COSMOS, Strukturen der Galaxienverteilung durch die Kombination von hoher räumlicher Auflösung, Feldgröße und Wellenlängenabdeckung dreidimensional zu analysieren. In einer Sonderausgabe der Astrophysical Journal Supplement Series wurden Ende letzten Jahres auf mehr als 600 Seiten erste wissenschaftliche Ergebnisse von COSMOS veröffentlicht. Wir möchten hier einige Highlights exemplarisch herausgreifen.

Dunkel oder stellar? Das ist hier die Frage

Der schwache Gravitationslinseneffekt (Weak Lensing) nutzt aus, dass Dunkle Materie zwar nicht direkt sichtbar ist, aber dennoch gravitativ wirkt. Misst man statistisch, wie Massenverteilungen, die in unsere Richtung liegen, Bilder weit entfernter Hintergrundgalaxien verzerren, so lässt sich eine projizierte und neuerdings sogar dreidimensionale Verteilung der gesamten Masse – Dunkle Materie eingeschlossen – berechnen. Dieses gelang im COSMOS-Feld besonders eindrucksvoll. Ein Team unter der Leitung von Richard Massey vom CalTech nutzte dazu das Bild des Hubble-Weltraumteleskops und photometrische Rotverschiebungsinformationen, um ein Massen-

2) Das Archiv ist öffentlich zugänglich unter <http://irsa.ipac.caltech.edu/data/COSMOS>.

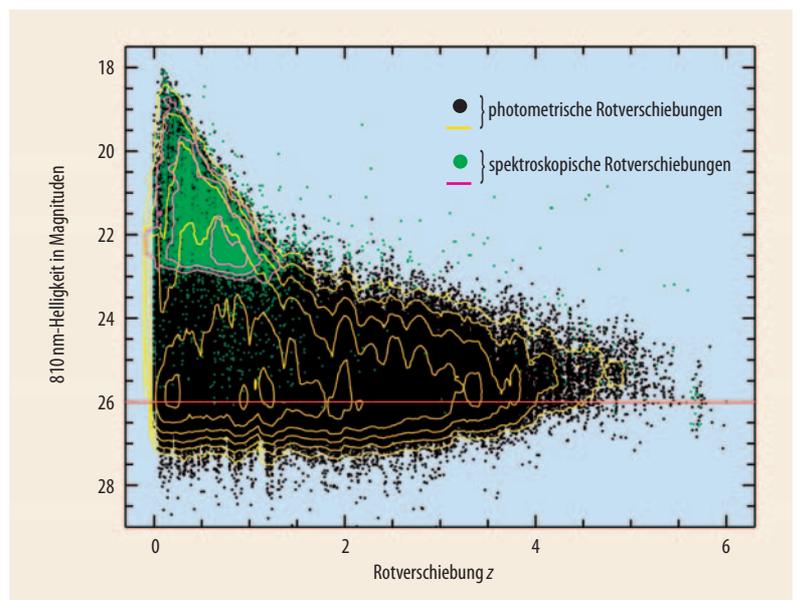


Abb. 3 Rotverschiebungsverteilung von rund 750 000 Galaxien in COSMOS. Für ungefähr 11 000 von ihnen existieren detaillierte Spektren. Bis zu einer Helligkeit von etwa 26 Magnituden, also oberhalb

der roten Linie, ist dieser bei 810 nm selektierte Katalog für Galaxien vollständig. Zum Vergleich: Sirius ist mit einer Helligkeit von $-1,4$ Magnituden um einen Faktor 10^{11} heller.

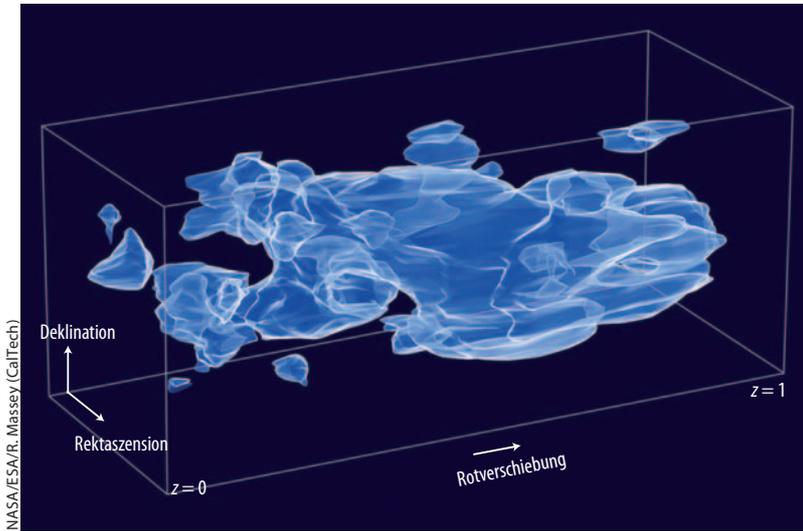


Abb. 4 Mithilfe der Weak-Lensing-Tomographie ließ sich die dreidimensionale Verteilung von stellarer Masse und Dunkler Materie im COSMOS-Feld bestimmen [2]. Entlang der Rotverschie-

bung verläuft die Tiefe des Universums bzw. die Zeitrichtung. Die Blauskala gibt die Gesamtdichte an, die überall von Dunkler Materie dominiert ist.

Tomogramm im COSMOS-Feld bis zur Rotverschiebung 1 zu erzeugen (Abb. 4).

Eine derart detaillierte Bestimmung der Gesamtmasse in einem solchen Raumvolumen ist vollkommen neu. Im direkten Vergleich mit der Masse der Sterne in Galaxien (stellare Masse) und der Galaxienanzahldichte sowie Röntgenemission von Haufengas im Temperaturbereich von 10^6 K ergibt sich daraus ein Bild, nach dem in Filamenten³⁾ aus Dunkler Materie die projizierte Gesamtdichte um einen Faktor zwei höher ist als in durchschnittlichen Bereichen des Himmels. Die Massendichte reicht aber nicht aus, um das heiße Gas gravitativ zu binden. Diese Filamente münden in röntgenleuchtstarke Galaxienhaufen, die nochmals anderthalbmal dichter sind.

Die verschiedenen Massenindikatoren verdeutlichen sehr eindrucksvoll, wie sich physikalisch ver-

schiedene Komponenten in wiederkehrenden Strukturen zeigen: Abb. 5 zeigt die Karte des schwachen Gravitationslinseneffektes und die Verteilung von stellarer Masse, Galaxienanzahldichte und Röntgen-Haufengas separat. Die stellare Masse folgt recht gut der Verteilung der Dunklen Materie – Galaxien entstehen in Dunkler-Materie-Halos, je massereicher die Galaxie, desto größer der Halo. Bei der Galaxienanzahldichte ist es ganz ähnlich, die größte Dichte liegt ebenfalls in den Haufen. Die höchsten Intensitäten der ausgedehnten Röntgenemission zeigen die Orte der insgesamt höchsten Massedichte bzw. tiefsten Potentialtöpfe an.

Untersucht man detailliert, wie sich großskalige Strukturen über die acht Milliarden Jahre seit einer Rotverschiebung von $z = 1,1$ entwickelt haben, zeigt sich, dass die extremen Dichtespitzen noch stärker geworden sind – es sind noch kompaktere massereichere Galaxienhaufen entstanden [3]. Der altbekannte Umstand, dass Galaxien in Haufen im Mittel ältere Sterne haben und weniger neue bilden, wurde bestätigt und quantifiziert: Sie sind von $0,3 < z < 1$ im Schnitt zwei bis vier Milliarden Jahre älter als außerhalb der Haufen – unabhängig von der Rotverschiebung. Dies gilt gleichermaßen für massereiche und masseärmere Galaxien.

Wenn Galaxien zu Haufen verschmelzen

Die COSMOS-Karte des Very Large Array in New Mexico (VLA) bei 1,4 GHz ist die empfindlichste Radioaufnahme ihrer Art. Sie hat eine Größe von zwei Quadratgrad, eine Auflösung von 1,5 Bogensekunden und eine 5σ -Detektionsempfindlichkeit von $50 \mu\text{Jy}$ [4]⁴⁾. Neben Radio-Punktquellen sind dort etwa 80 ausgedehnte Radiogalaxien mit weit auslaufenden Jets zu sehen. Bei zehn von diesen sind die Jets zu einem „C“ gebogen (Abb. 6), es sind „Wide-Angle Tail“-Galaxien (WAT). Diese gebogenen Jets resultieren aus einer Bewegung der Radiogalaxie relativ zum dichten Gas, das den Raum zwischen den einzelnen Galaxien füllt.

3) Filamente sind überdichte Regionen, die im Gegensatz zu Haufen nur in zwei Raumdimensionen kollabieren, in einer aber ausgedehnt sind.

4) Jansky Jy ist die Einheit der spektralen Flussdichte, also die beim Beobachter ankommende Energie pro Zeit, Frequenzintervall und Fläche: $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$.

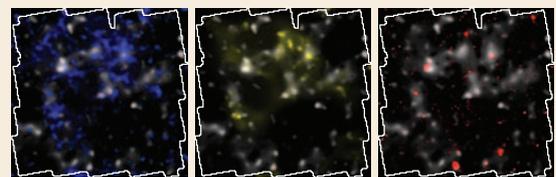
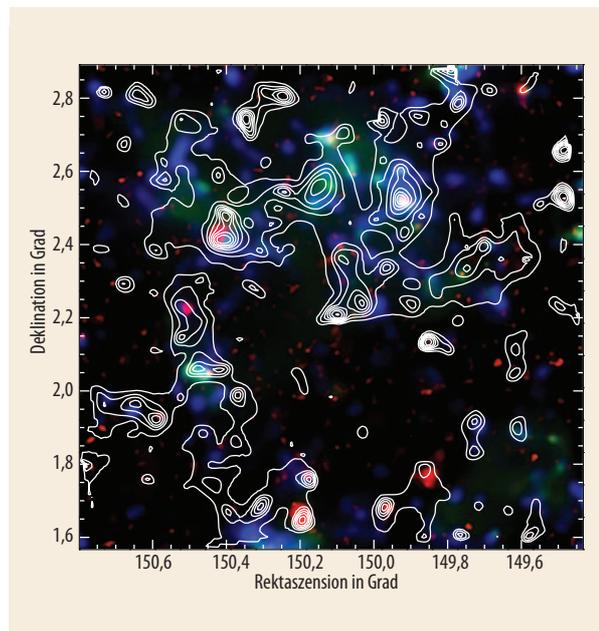


Abb. 5 Die Projektion der totalen Massendichte im Intervall $z = 0$ bis 1 aus der Weak-Lensing-Analyse (als Kontur links und Graustufen oben), verglichen mit anderen, unabhängigen Massenindikatoren. Die Weak-Lensing-Karte zeigt die Gesamtmasse und wird von Dunkler Materie beherrscht. Stellare Masse (blau) und Galaxien-Anzahldichte (gelb, aus optischen und NIR-Daten) werden dagegen von Baryonen dominiert. Ausgedehnte Röntgenstrahlung (rot) zeigt heißes Intraaufengas an, als Indikator für große lokale Massendichten.

R. Massey

Gewöhnlich können nur die massereichsten Galaxien Radiojets ausbilden. Im Falle eines Haufens im dynamischen Gleichgewicht befänden sich diese Galaxien in dessen Zentrum und damit gegenüber dem Haufengas weitgehend in Ruhe. Die CWAT-01-Galaxie in **Abb. 6** zeigt daher, dass dieser Haufen ($z = 0,22$) weiter im Entstehen begriffen ist. Für die Galaxie selbst ließen sich die Bewegungsrichtung und die ungefähre Geschwindigkeit bestimmen [5].

Nimmt man optische und Röntgendaten hinzu, so finden sich in der Nähe drei bis vier weitere Galaxienhaufen, die offensichtlich ebenfalls zu diesem gravitativen Komplex gehören. Sehr wahrscheinlich verschmelzen alle einzelnen Komponenten gerade zu einem Superhaufen. Diese Entdeckung ist ein sehr eindrucksvolles Beispiel dafür, wie sich große Strukturen im Universum bilden, und bietet zugleich ein ideales Laboratorium, um die beteiligten Prozesse detailliert zu studieren. Der entstehende Superhaufen mit $2 \cdot 10^{14}$ Sonnenmassen wird eine Masse von etwa einem Fünftel des Coma-Haufens haben, dem massereichsten Galaxienhaufen im lokalen Universum. Momentan ist diese Region noch eine der „unordentlichsten“ im Universum.

Neben dieser Haufen-Ansammlung wurden durch die Kombination der Röntgendaten von XMM [6] und dem optischen Rotverschiebungskatalog weitere 71 Galaxienhaufen durch ihr ausgedehntes heißes Gas identifiziert [7]. Dabei fiel eine besonders massereiche Röntgen-Struktur bei $z = 0,73$ auf, welche die Masse der gesamten CWAT-01-Ansammlung hat. Genauere Untersuchungen der darin enthaltenen Spiral- und elliptischen Galaxien zeigen, dass sich wie im lokalen Universum die alten roten elliptischen Galaxien hauptsächlich in den dichteren Regionen des Haufens aufhalten, während die jungen blauen⁵⁾ Spiral- und Scheibengalaxien die weniger dichten Regionen bevorzugen. Wenn zwei Sub-Haufen in dieser Struktur verschmelzen, führt das zum Zentrum hin dichter werdende Haufengas zu einem Bereich, in dem es zu einer Stoß-

wellenfront im Gas kommt, die im Röntgenbereich sichtbar ist. Auf der kühleren Seite der Stoßwelle (engl. shock wave), also auf der Seite, durch welche die Stoßwelle bereits hindurchgewandert ist, befinden sich viele Scheibengalaxien, in denen verstärkt Sterne entstehen. Dies deutet auf Stoßwellen-induzierte Sternentstehung in diesen Galaxien hin [8].

Submillimeter-Galaxien auf der Spur

Um massereiche Strukturen im noch früheren Universum zu identifizieren, eignen sich sog. Submillimeter-Galaxien (SMG). Wie der Name schon sagt, wurden diese Galaxien zuerst im Submillimeter-Spektrum identifiziert. Sie bilden neue Sterne mit einer Rate von bis zu mehreren 1000 Sonnenmassen pro Jahr und gelten als die Vorläufer heutiger massereicher elliptischer Galaxien. Dies bedeutet, dass sie bei einer Rotverschiebung von 2 bis 3, also etwa 2,5 bis 3,5 Milliarden Jahre nach dem Urknall, noch relativ selten sind. Selbst in den gut 30 Quadratbogenminuten im COSMOS-Feld, welche die beiden Bolometer-Kameras am James-Clerk-Maxwell-Teleskop auf Hawaii abbilden, ließen sich nur etwa 30 signifikante Submillimeter-Galaxien identifizieren. Bolometer-Kameras detektieren breitbandig die einfallende Strahlung und eignen sich daher ideal dazu, die thermische Emission interstellaren Staubs zu messen.

Eine Submillimeter-Galaxie zu identifizieren, ist ausgesprochen schwierig (**Abb. 7**). In lang belichteten optischen Karten liegen innerhalb der Positionsungenauigkeit der Bolometer-Kamera von etwa sechs Bogensekunden etliche Galaxien. Um Submillimeter-Galaxien zu identifizieren, helfen die empfindlichen Radiokarten bei einer Wellenlänge von 20 cm, die eine wesentlich höhere Auflösung haben und zudem viel weniger Quellen zeigen als optische Karten. Nur wenige Radioquellen korrespondieren mit Submillimeter-Galaxien, aber die meisten detektierbaren SMGs sind auch in Radiokarten sichtbar. Dies ermöglicht es, optische Quellen eindeutig zu identifizieren (**Abb. 8**).

5) Die Farbe einer Galaxie hängt von der Farbe ihrer Sterne ab. Blau bedeutet, dass noch heiße, massereiche, junge Sterne vorhanden sind. Eine blaue Galaxie besteht aus einem jungen Mix von Sternen, in ihr können weiterhin Sterne entstehen.



Abb. 6 Im COSMOS-Feld formt sich bei einer Rotverschiebung von $z = 0,22$ ein Galaxien-Superhaufen. Vor einem Farbkompositbild der bodengebundenen Aufnahmen des Subaru-Teleskops ist die diffuse Röntgenstrahlung (XMM-Satellit) des Intra-Haufengases in Regenbogen-Falschfarben dargestellt. In Weiß ist die 1,4 GHz-Radioemission übergelegt, in der links unterhalb des Zentrums die gebogene Wide-Angle-Tail-Galaxie CWAT-01 sichtbar ist. Ihre gebogenen Radio-Jets sind ein deutliches Zeichen dafür, dass sie sich relativ zum Haufengas bewegt und sie in den linken unteren Haufen einfällt. In dieser unrelaxierten Region verschmelzen gerade mindestens vier Komponenten zu einem Superhaufen.

Da das Verhältnis der Millimeter- zur Radiointensität für sternformende Galaxien ähnlich ist und sich bei der verschobenen Frequenz der gemessenen Punkte in der Energieverteilung ändert, lässt sich daraus die Rotverschiebung abschätzen.

Der große Vorteil von COSMOS gegenüber anderen Feldern liegt in der Qualität der Daten in einem weiten spektralen Bereich, der es erheblich vereinfacht, Submillimeter-Galaxien zu identifizieren und zu charakterisieren. Auch die wenigen bislang in COSMOS detektierten Submillimeter-Galaxien lieferten schon wichtige neue Erkenntnisse. Zum einen liegen die Millimeter-Quellen bei höherer Rotverschiebung als die zuvor entdeckten, was interessante Aufschlüsse über Stern- und Galaxienentstehung im sehr frühen Universum, also weniger als zwei Milliarden Jahre nach dem Urknall, erlaubt. Zum anderen zeigt die Umgebung vieler Submillimeter-Galaxien in COSMOS eine Häufung rötlicher Galaxien. Das deutet darauf hin, dass sich die Galaxienanzahl um diese Galaxien bei ihrer jeweiligen Rotverschiebung verdichtet. Submillimeter-Galaxien scheinen sich in den Kondensationskernen von sich später herausbildenden massereichen Galaxienhaufen zu befinden.

Von Balken, Spiralen und aktiven Galaxien

Neben dem Fokus auf großskalige Strukturen ermöglicht COSMOS auch klassische Studien zur Galaxienentwicklung. Die große Anzahl von Galaxien jenseits einer Rotverschiebung von $z = 0,3$ erlaubt es, einige wichtige Fragen zu klären. So lässt sich – ohne oder mit Berücksichtigung der Umgebungsdichten – untersuchen, wie sich zahlreiche Parameter abhängig von z. B. Galaxienmasse, -typ, Farbe oder Alter zeitlich entwickeln. Dies ermöglicht Rückschlüsse auf die beiden Hauptprinzipien der Galaxienentwicklung, auf

die Ursachen und Bedingungen für Sternentstehung sowie die treibenden Kräfte hinter der Ausbildung der Galaxienstrukturen.

So ließ sich feststellen, dass das Vorkommen großer stellarer Balken in Spiralgalaxien stark von der Masse abhängt. Bei einer Rotverschiebung von $z = 0,8$, was weniger als dem halben Alter des Universums entspricht, zeigen die massereichsten Spiralgalaxien den gleichen Anteil an Balken wie im lokalen Universum, während bei masseärmeren die Entwicklung noch viel später, aber auch viel langsamer, vorangeht. Dies bedeutet, dass sich in massereicheren Spiralgalaxien dynamische Strukturen früher und schneller gebildet haben als in masseärmeren und die strukturelle und die dynamische Entwicklung nicht durch die Stärke der Sternentstehung in der jeweiligen Galaxie reguliert werden [10].

In eine ähnliche Richtung zeigt die Untersuchung der Anzahldichte der größten Spiralgalaxien. Diese ist größtenteils bereits seit $z = 1$ konstant – die größten Spiralen sind demnach sehr früh entstanden. Die Masse der Zentralverdickung (engl. bulge) nimmt hingegen noch zu, hauptsächlich durch Effekte wie Balken oder Scheibeninstabilitäten, während Galaxienverschmelzungen nebensächlich sind [11].

Durch die Größe des Feldes ist es möglich, nach sehr seltenen Objekten zu suchen und sie genau unter die Lupe zu nehmen. Akkretierende supermassereiche Schwarze Löcher, die sich im Zentrum Aktiver Galaxienkerne finden, werden zu Hunderten entdeckt. Dank der kombinierten Informationen aller Wellenlängen ist es möglich, sowohl den Energieumsatz des Schwarzen Lochs als auch die Eigenschaften seiner Gastgalaxie abhängig von seiner Umgebung zu studieren.

Wichtig sind hierbei die Röntgen- und Radioinformation von XMM-Newton und Chandra bzw. dem

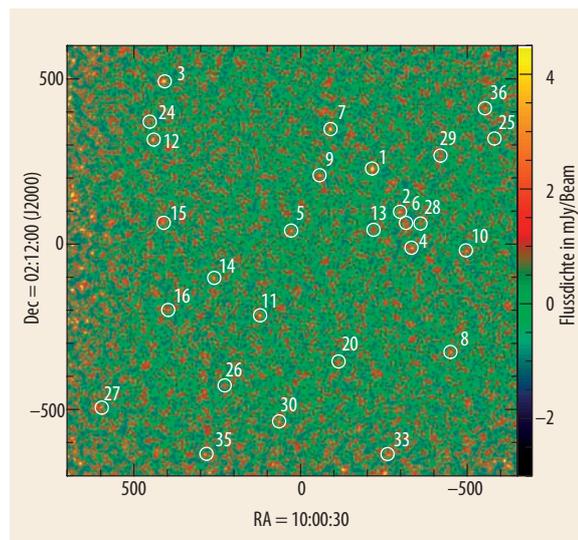


Abb. 7 Die Karte der Bolometer-Kamera zeigt die Flussdichte bei 1,2 mm eines 23×23 Quadratbogenminuten großen Teils des COSMOS-Feldes. Weiße Kreise markieren Spitzen oberhalb von 3σ , 15 sind mit $> 4\sigma$ sehr signifikante Detektionen von Submillimeter-Galaxien [9]. Aufgrund der ungleichmäßigen Belichtung nimmt das Rauschen zum linken und unteren Rand hin zu.

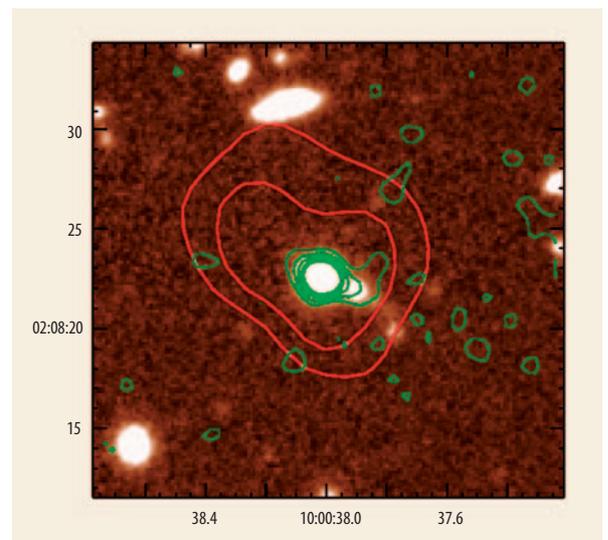


Abb. 8 Der Multiwellenlängenvorteil von COSMOS: Eine Submillimeter-Galaxie (rote Konturen) auf der Aufnahme des Subaru-Teleskops bei 810 nm. Die grünen Konturen zeigen die Intensität der Very Large Array-1,4-GHz-Radioemission, mittels derer sich die Submillimeter-Galaxie eindeutig einer optischen Galaxie zuordnen lässt.

Very Large Array. Im Radiobereich ließen sich erstmals bei sehr schwachen Quellen im Submillijansky-Bereich Aktive Galaxienkerne und Sternentstehung als physikalische Ursachen für Radioemission bei individuellen Galaxien trennen. Daraus resultiert z. B. ein von Staubabsorption ungetrübtter Blick darauf, wie die verschiedenen Sternentstehungsraten vom Alter des Universums abhängen [12]. Zusammen mit Röntgendaten ließ sich gleichzeitig ein umfangreicher Katalog von über 1600 Aktiven Galaxienkernen erstellen.

Damit gelang in COSMOS die umfangreichste Untersuchung der Struktur von AGN-Galaxien bis zur Rotverschiebung $z = 1$. Die meisten Galaxien mit Aktiven Galaxienkernen von mittleren Massen ($\sim 10^7$ bis 10^8 Sonnenmassen) zeigen Strukturen zwischen Spiral- und elliptischen Galaxien und keine auffällige Häufigkeit von Galaxienzusammenstößen. Die aktiven Kerne werden hier offensichtlich nicht durch starke Störungen mit drehimpulsfreiem Gas versorgt, sondern sind wiederum durch Instabilitäten in der Galaxie selbst zu „füttern“ [13]. Noch nicht abgeschlossen ist hingegen die Untersuchung, wie die Massen von Schwarzen Loch und *Bulge* von Galaxien mit aktivem Kern zusammenhängen. Mit COSMOS als größtem Datensatz des Hubble-Weltraumteleskops ist es erstmals möglich, diese Relation für mehr als 100 Aktive Galaxienkerne zu bestimmen. Das ist besonders wichtig im Hinblick auf theoretische Modelle der Galaxienentwicklung, die Rückkopplungseffekte von Sternentstehung und Aktiven Galaxienkernen benötigen, um die Eigenschaften des heutigen Universums zu reproduzieren. Im Moment sind diese Effekte jedoch nur ad-hoc eingeführt, da gute Beobachtungen als Funktion der Struktur und des Alters des Universums noch fehlen. COSMOS wird somit einen wichtigen Beitrag zur Einschränkung der dabei möglichen Prozesse liefern.

Blick in die Zukunft von COSMOS

COSMOS ist kein abgeschlossenes Projekt, sondern hat sein Areal am Himmel mittlerweile als ein Standardfeld der extragalaktischen Astronomie etabliert. In den nächsten Jahren werden neue Datensätze bei weiteren Wellenlängen oder mit größerer Empfindlichkeit oder Auflösung hinzukommen, sowohl von Mitgliedern des COSMOS-Projektes als auch vermehrt von außerhalb. Alle neuen Instrumente und große Surveys visieren das COSMOS-Feld an. Derzeit ist bereits ein Herschel-Key-Programm im Bereich von 110 bis 500 μm für die erste Beobachtungsphase nach dem Start Ende 2008 bewilligt. Das Weltraumteleskop Herschel wird Daten mit deutlich höherer räumlicher Auflösung beisteuern und es erstmals erlauben, die Ferninfraroteigenschaften sehr vieler Galaxien detailliert zu untersuchen.

Ähnliches gilt für den Ultra-VISTA-Survey im nahen Infraroten, sobald das VISTA-Teleskop der ESO nächstes Jahr in Betrieb gegangen ist. VISTA ermöglicht eine um drei Magnituden empfindlichere Grenz-

helligkeit und wird somit die Datenbasis im Nahen Infrarot stark verbessern sowie Informationen für viele bisher undetektierte Galaxien liefern.

Ein weiteres Instrument, das fundamental neue Analysen ermöglichen wird, ist das Atacama Large Millimeter Array (ALMA), das sich derzeit in Chile im Bau befindet und das mit hoher Empfindlichkeit und extremer räumlicher Auflösung herunter bis zu 0,005 Bogensekunden neue Horizonte im (sub-)Millimeter-Bereich ermöglichen soll. Damit bleibt COSMOS auch in fernerer Zukunft eines von wenigen und mit das wichtigste Standardfeld für die hochauflösende extragalaktische Astronomie.

*

Wir danken Manuel Aravena, Alejo Martinez Sansigre und Vernesa Smolčić für fruchtbare Diskussionen und ihre Hilfe bei der Erstellung der Abbildungen.

Literatur

- [1] V. Springel et al., *Nature* **435**, 629 (2005)
- [2] R. Massey et al., *Nature* **445**, 286 (2007)
- [3] N. Scoville et al., *ApJS* **172**, 150 (2007)
- [4] E. Schinnerer et al., *ApJS* **172**, 46 (2007)
- [5] V. Smolčić et al., *ApJS* **172**, 295 (2007)
- [6] G. Hasinger et al., *ApJS* **172**, 29 (2007)
- [7] A. Finoguenov et al., *ApJS* **172**, 182 (2007)
- [8] L. Guzzo et al., *ApJS* **172**, 254 (2007)
- [9] F. Bertoldi et al., *ApJS* **172**, 132 (2007)
- [10] K. Sheth et al., *ApJ* **675**, 1141 (2008)
- [11] M. T. Sargent et al., *ApJS* **172**, 434 (2007)
- [12] V. Smolčić et al., angenommen zur Publikation in *ApJ*, ArXiv e-print 0803.0997, März 2008
- [13] J. M. Gabor et al., eingereicht bei *ApJ*, 2008

DIE AUTOREN

Knud Jahnke (FV Extraterrestrische Physik) studierte Physik und Astronomie an der Uni Hamburg (Promotion 2002), mit Abstechern nach Schweden und Schottland. Seit 2005 forscht er am MPI für Astronomie in Heidelberg, wo er eine Emmy Noether-Forschergruppe leitet. Bei COSMOS interessiert ihn speziell die Rolle aktiver Schwarzer Löcher bei der Entwicklung von Galaxien. Im sonstigen Universum spielen seine Familie und seine Anfang 2007 geborene Tochter die größte Rolle.



Eva Schinnerer forschte nach ihrem Studium der Geophysik und Astronomie und ihrer Promotion 1999 an der LMU München, am Owens Valley Radio Observatory und am National Radio Astronomy Observatory. Seit 2004 arbeitet sie am MPI für Astronomie, wo sie eine Minerva-Forschungsgruppe leitet. In COSMOS ist sie für die VLA-Beobachtungen verantwortlich.



Frank Bertoldi studierte Physik in Köln und Berkeley, wo er in theoretischer Astrophysik promovierte. Nach Forschungsaufenthalten in Princeton, Paris, Garching und Bonn ist er seit 2004 Professor für Radioastronomie an der Uni Bonn. An COSMOS interessieren ihn besonders die Eigenschaften der Submillimeter-Galaxien.



Günther Hasinger studierte Physik an der LMU München. Nach seiner Promotion war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am MPI für extraterrestrische Physik (MPE) Garching und 1994 – 2001 Direktor am Astrophysikalischen Institut Potsdam. Seit 2001 ist er Direktor der Hochenergie-Astrophysik am MPE. Seit 2002 ist er Mitglied der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften und seit 2003 Honorar-Professor an der TU München. 2005 erhielt er den Leibnizpreis der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

