

Die Entwicklung von Galaxien auf kosmologischen Zeitskalen

Mit aufwändigen Computermodellen lässt sich die spektrale und chemische Entwicklung von Galaxien gekoppelt simulieren.

Uta Fritze-von Alvensleben

Eine der fundamentalen Fragen der heutigen Astrophysik ist, wie aus dem außerordentlich homogenen, isotropen und einfachen Urplasma die heute beobachtete wunderbare Vielfalt von Galaxien entstehen konnte. Angesichts der kosmologischen Zeitskalen, auf denen sich Galaxien entwickeln, sind alle Beobachtungen Momentaufnahmen. Daher lassen sich nur im detaillierten Vergleich zwischen Beobachtungen und numerischen Modellen Entwicklungszusammenhänge verstehen und z. B. auf sog. tiefen Belichtungen unter den schwachen, entfernten, jungen Galaxien Vorläufer bestimmter Galaxientypen identifizieren, die wir heute in geringer Entfernung beobachten. Ein solches numerisches Modell, das erstmals die spektrale und die chemische Entwicklung von Galaxien gekoppelt auf kosmologischen Zeitskalen beschreibt, haben wir in meiner Arbeitsgruppe an der Universitätssternwarte Göttingen in den letzten Jahren entwickelt.

Größteleskope wie das Very Large Telescope (VLT) der ESO in Chile, bestehend aus vier 8m-Teleskopen, sowie das Hubble Space Telescope (HST) im Weltraum mit hochauflösenden abbildenden Detektoren und Spektrometern zeigen uns nahe Galaxien mit einer Fülle von Details (Abb. 1a) und entfernte Galaxien in großer Zahl, wie z. B. im „Hubble Deep Field“, der bislang tiefsten Belichtung eines winzigen, etwa ein Hundertstel der Vollmondfläche messenden Himmelsfeldes (Abb. 1b).

Kurz nach der Entdeckung der ersten extragalaktischen Systeme jenseits unserer Milchstraße, klassifizierte Edwin Hubble die Galaxien in die heute nach ihm benannte Hubble-Sequenz. Diese reicht von elliptischen Galaxien, die nur aus alten kühlen Sternen bestehen und die, wie wir seit einigen Jahren wissen, von heißen Röntgen-Gas-Halos umgeben sind, über die Spiralgalaxien enthalten neben einer zentralen sphäroidalen Komponente, dem „Bulge“, der bei den so genannten frühen Spiraltypen (Sa) stark und zu späteren Spiraltypen (Sb, Sc, Sd) hin weniger stark ausgeprägt ist, eine diskusähnliche Scheibe aus jüngeren Sternen, Gas und Staub, in der – besonders entlang der Spiralarme – auch heute noch Sterne entstehen. Neben dieser Hubble-Sequenz der normalen Galaxien wurde später im

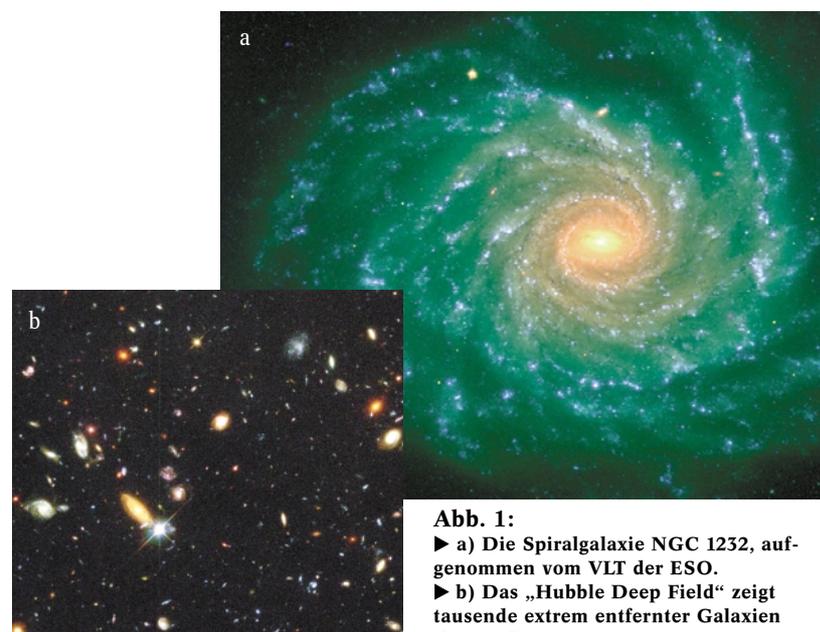


Abb. 1:

- ▶ a) Die Spiralgalaxie NGC 1232, aufgenommen vom VLT der ESO.
- ▶ b) Das „Hubble Deep Field“ zeigt tausende extrem entfernter Galaxien (bis $z > 5$).

lokalen Universum noch eine Art Parallelesequenz aus Galaxien geringer Flächenhelligkeit („Low Surface Brightness Galaxies“) entdeckt sowie eine zahlenmäßig bei weitem dominierende Population aus Zwerggalaxien. Beide umfassen ebenfalls Typen, die von Objekten mit ausschließlich alten Sternen bis zu solchen mit Gas, jungen Sternen und aktiver Sternentstehung reichen.

Beobachtungen bei verschiedenen Wellenlängen ergänzen sich gegenseitig. Daher sollten auch Galaxienmodelle einen möglichst großen Spektralbereich umfassen. Während wir in Röntgenbeobachtungen das ca. 10^7 - 10^8 K heiße Gas sehen, etwa um große elliptische Galaxien, zeigt uns der UV-Bereich die jungen, heißen, massereichen Sterne und, da diese sehr kurzlebig sind, die Gebiete aktiver Sternentstehung. Der optische Spektralbereich wird dominiert von sonnenähnlichen Sternen; Nahinfrarot-Beobachtungen zeigen alte, kühle, massearme, langlebige Sterne, die im Allgemeinen die Massen von Galaxien dominieren. Im fernen IR sehen wir die thermische Emission von Staub, wenn er von jungen Sternen aufgeheizt wird, im Sub-mm-Bereich das kalte molekulare Gas, den Grundstoff für Sternentstehung, und im Radiobereich schließlich das neutrale Wasserstoffgas.

Priv.-Doz. Dr. Uta Fritze-von Alvensleben, Universitätssternwarte Göttingen, Geismarlandstr. 11, 37083 Göttingen – Festvortrag anlässlich der Verleihung des Hertha-Sponer-Preises auf der 67. Physikertagung in Hannover.

Galaxien – ihre Entwicklung und Modellierung

Galaxien entwickeln sich in dreierlei Hinsicht: chemisch, spektral und dynamisch. Die ersten numerischen Modelle zur Galaxienentwicklung in den 70er-Jahren beschrieben jeweils einen dieser drei Aspekte. Sie wurden seither ständig weiterentwickelt und waren vielfach treibende Kraft für die Entwicklung immer leistungsfähigerer Computer, Parallelrechner und spezialisierter Hardware¹⁾ Eine Vielzahl von Beobachtungsrelationen zeigt jedoch deutlich, dass die drei Aspekte der Galaxienentwicklung in der Natur eng verflochten sind. Daher geht das Bestreben heute dahin, dies auch in neuen und umfassenderen Modellen zu berücksichtigen. Eine voll-konsistente simultane Beschreibung aller drei Aspekte ist heute noch nicht erreicht. Im Folgenden stelle ich unser in Göttingen entwickeltes Modell vor, das erstmals die chemische und spektrale Entwicklung unterschiedlicher Galaxientypen in konsistenter Weise gekoppelt beschreibt, sowie unsere ersten Ansätze, dies auch mit hydrodynamischen und N -Körper-Rechnungen für die dynamische Entwicklung von Dunkler Materie, Gas und Sternen zu verknüpfen.

Spektrale Entwicklung

Das Spektrum einer Galaxie setzt sich zusammen aus der Summe all ihrer rund 1 bis 200 Milliarden Sternspektren sowie den Emissions- und Absorptionsbeiträgen von Gas und Staub. Ein Sternspektrum wird im Kontinuumsverlauf recht gut durch ein Schwarzkörperspektrum der entsprechenden Temperatur approximiert mit – je nach Temperatur und chemischer Zusammensetzung – bis zu etwa 50 Millionen Atom- und Molekülabsorptionslinien. Hertha Sponer, die Namensgeberin des mir zugesprochenen Preises, hat eine ganze Reihe dieser Absorptionslinien im Labor vermessen. Massereiche Sterne sind heiß, leuchtkräftig und kurzlebig, ihr Strahlungsmaximum liegt im UV und bei kurzen optischen Wellenlängen. Die heißesten unter ihnen emittieren ionisierende Photonen, die umgebendes Gas zum Leuchten anregen können mit einem Emissionsspektrum aus Kontinuum und Emissionslinien, welche durch Physik und Chemie des Gases bestimmt sind. Massearme Sterne sind kühl, leuchtschwach und langlebig und haben ihr Strahlungsmaximum im langwelligen optischen und NIR-Bereich. Die zu einer gegebenen Zeit in einer Galaxie vorhandene Sternpopulation hängt von mehreren Faktoren ab: zunächst von der als universell angesehenen Anfangsmassenverteilung der Sterne, für die Edwin Salpeter 1955 ein Potenzgesetz fand, nach dem immer viel mehr massearme als massereiche Sterne gebildet werden. Weitere Faktoren sind die Sternentstehungsgeschichte der betreffenden Galaxie sowie die Lebensdauern und Entwicklungswege jedes Sterns – von der Hauptreihe über das Riesenstadium bis zum planetaren Nebel oder der Supernova und schließlich zum Weißen Zwerg, Neutronenstern oder stellaren Schwarzen Loch. Lebensdauern und Entwicklungswege eines Sterns hängen von seiner Masse und von seiner chemischen Anfangszusammensetzung ab.

Die Sternentstehungsgeschichte ist der wichtigste Parameter von Galaxien-Entwicklungsmodellen. Während jede Galaxie ihre individuellen Fluktuationen hat, deutet die Gesamtheit einer Vielzahl von Beobachtungen darauf hin, dass unterschiedliche Galaxientypen unterschiedliche, für sie jeweils typische, mittlere

Sternentstehungsgeschichten hatten, sofern sich die Mittelung über hinreichend große Zeitintervalle erstreckt. So haben etwa elliptische Galaxien und die Bulges von Spiralen den Großteil ihrer Sterne in einer frühen und relativ kurzen Phase gebildet und zeigen heute keine aktive Sternbildung mehr, während die Sternentstehung in Scheiben von Spiralgalaxien über Zeitskalen von vielen Milliarden Jahren recht konstant gewesen ist.

Chemische Entwicklung: Gas und Sterne

Im Urknall entstanden nur H, He und Spuren leichter Elemente bis Li. Alle anderen schweren Elemente, aus denen Sterne, Planeten und schließlich alles Leben auf der Erde bestehen, wurden in früheren bereits erloschenen Sternenerationen erzeugt. Dabei wurden sie am Ende individueller Sternenleben durch Winde, Abstoßung planetarer Nebel oder durch Supernovae zunächst in die Gasphase freigesetzt, die sich dadurch chemisch anreichert, und von dort in eventuell nachfolgende Sternenerationen wieder eingebaut. Die chemischen Häufigkeiten des Gases oder interstellaren Mediums einer Galaxie werden bestimmt durch die im Zusammenhang mit der spektralen Entwicklung bereits erwähnte stellare Anfangsmassenverteilung und die Sternentstehungsgeschichte der Galaxie, die Lebensdauern und die so genannten „Yields“. Das sind rückgelieferte Massenbruchteile bestimmter chemischer Elemente von Sternen, die wiederum von deren Masse und Anfangszusammensetzung abhängen. Weiterhin kann die chemische Zusammensetzung des Gases in einer Galaxie durch Einstrom von im Allgemeinen weniger angereichertem Gas von außen und/oder eventuell Ausstrom von besonders angereichertem Gas modifiziert werden. Diese Ein- und Ausstromraten in ihrer zeitlichen Entwicklung sind weitere freie Parameter in Galaxien-Entwicklungsmodellen.

Dynamische Entwicklung

Die Entstehung und die dynamische Entwicklung von Galaxien sind bestimmt durch externe und interne Gra-

Dunkle Materie

Studien der internen Kinetik von Galaxien (Rotationskurven bei Spiralen, vermutlich gravitativ gebundene heiße Röntgenhalos bei elliptischen Galaxien) zeigen, dass Galaxien große Mengen Dunkler Materie (DM) enthalten, die sich nur durch ihre Schwerkraft bemerkbar macht und in den Außenbereichen die Dynamik bei weitem dominiert. (Auch die Dynamik ganzer Galaxien in Galaxienhaufen zeigt, dass die Haufen durch DM dominiert sind.) Die Galaxien enthalten demnach ca. 90 % DM und ca. 10 % leuchtende Materie. Die Natur der DM ist unklar: entweder „kalt“ (Cold Dark Matter, CDM) oder „heiß“ (Hot Dark Matter, HDM). CDM-Teilchen sind massiv und daher kalt

im kinetischen Sinne, d. h. sub-relativistisch. HDM-Teilchen sind masselos oder extrem massearm und daher heiß im kinetischen Sinn, sie bewegen sich (fast) mit Lichtgeschwindigkeit. HDM-Kandidaten sind etwa Neutrinos, CDM-Kandidaten sind baryonische Materie z. B. in Form von Gas, Braunen Zwergen (substellare Jupiter-artige Objekte, die zu massearm sind, um Wasserstoffbrennen zünden zu können) oder stellaren Überresten (Weiße Zwerge, Neutronensterne, Schwarze Löcher). Ob die DM kalt oder heiß ist, macht einen Unterschied für die Strukturbildung, da HDM durch ihre hohen Geschwindigkeiten Strukturen auf kleinen Skalen verwischt.

1) In sog. GRAPE-boards ist die Berechnung der wechselseitigen Gravitationskräfte zwischen Sternen Hardware-verdrahtet, gegenwärtige Maschinen erreichen Teraflops.

vation zwischen all ihren Komponenten: der Dunklen Materie (siehe Infokasten), die in semianalytischer oder numerischer Beschreibung dissipationsfrei behandelt wird, des Gases, das sich im Gravitationspotential der Dunklen Materie dissipativ entwickelt und entweder rein hydrodynamisch oder durch sog. SPH-Modelle (SPH: Smoothed Particles Hydrodynamics) beschrieben wird, und schließlich der Sterne, die durch stoßfreie N-Körper-Codes²⁾ behandelt werden (meist mit TREE-Struktur³⁾, um größere Teilchenzahlen zu bewältigen).

Um die drei Komponenten gemeinsam zu behandeln, ist ein Sternentstehungskriterium erforderlich, das angibt, unter welchen Bedingungen (Dichte und Temperatur) und mit welcher Effizienz Sterne aus dem Gas gebildet werden. Ferner ist das Feedback der Sterne durch Strahlung, Rücklieferung von Masse und schweren Elementen sowie dem damit verbundenen kinetischen Energieeintrag in das Gas zu berücksichtigen. Dynamische Modelle werden zur Galaxienentstehung und vielfach für die Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Galaxien angewendet.

Wechselwirkung zwischen Galaxien

Die Wechselwirkung zwischen Galaxien ist ein ebenso häufiger wie spektakulärer Vorgang. Während Sterne mit typischen mittleren Abständen von 10^7 Sternradien in fast allen Umgebungen in sehr guter Näherung stoßfrei sind, spielen Begegnungen, Wechselwirkungen und Verschmelzung bei Galaxien mit typischen mittleren Abständen von nur ca. 80 Galaxienradien für ihre Entwicklung eine entscheidend prägende Rolle: Im Mittel hatte jede Galaxie im Laufe ihres Lebens mindestens eine nahe Begegnung/Verschmelzung mit einer vergleichbar großen Galaxie. Galaxienbegegnungen sind, sofern die Galaxien Gas enthalten, hochgradig dissipativ, führen, wenn sie eng und langsam genug sind, nach wenigen Perizentren zur Verschmelzung. Sie sind mit nachhaltiger morphologischer Transformation verknüpft, in der eine eventuell vorhandene Scheibe leicht zerstört wird zu Gunsten einer Vergrößerung der sphäroidalen Komponente. Sofern mindestens eine der beteiligten Galaxien Gas enthält, wird durch die Wechselwirkung ein – je nach Geometrie und Relativbewegung mehr oder weniger räumlich ausgedehnter – Sternentstehungsausbruch ausgelöst. Bei der Verschmelzung großer gasreicher Spiralen, ähnlich unserer Milchstraße, wie etwa im Beispiel der „Antennae-Galaxien“ in Abb. 2, werden dabei galaxienweit enorme Sternentstehungseffizienzen erreicht, die nur denen beim Anfangskollaps protogalaktischer Wolken im frühen Universum vergleichbar sind, und die zur Neubildung ganzer Populationen gravitativ stark gebundener und damit langlebiger (Kugel-)Sternhaufen führen können [3–7].

Da diese neuen Sternhaufen aus in den Spiralen vorangereichertem Gas entstehen, sind sie aufgrund ihrer gegenüber den alten Sternhaufen aus dem frühen Universum erhöhten chemischen Häufigkeiten sozusagen ewige Zeugen ihrer violenten Entstehungsphase, auch wenn der Sternentstehungsausbruch abgeklungen ist und das Verschmelzungsprodukt morphologisch und spektral längst einer elliptischen Galaxie ähnelt. In einem ASTROVIRTEL-Projekt der ESO studieren wir anhand von VLT- und HST-Archivdaten von UV bis NIR die Entstehung und Entwicklung von Sternhaufen bei Galaxienwechselwirkung und die Rückschlüsse, die Sternhaufenpopulationen auf die Entstehungsgeschichte ihrer Muttergalaxien zulassen.

Chemisch konsistente Modelle

In meiner Arbeitsgruppe in Göttingen haben wir in den letzten Jahren die chemischen und spektralen Aspekte der Galaxienentwicklung in konsistenter Weise gekoppelt. Das heißt, wir modellieren simultan die chemische Entwicklung des Gases und die spektrale Entwicklung der Sternpopulation und tragen der zunehmenden chemischen Anreicherung aufeinanderfolgender Sternenerationen Rechnung. Dies ist möglich geworden durch die in jüngster Zeit verfügbaren stellaren Lebensdauern, Yields, Entwicklungswege und Spektren für Sterne mit unterschiedlichen – und nicht mehr ausschließlich solaren – Anfangszusammensetzungen. Ein wesentlicher Vorteil der simultanen Beschreibung von chemischer und spektraler Entwicklung gegenüber älteren Modellen, die jeweils nur einen Aspekt behandelten, ist das wesentlich günstigere Verhältnis aus wenigen freien Parametern (im Wesentlichen der zeitliche Verlauf der Sternentstehungsrate und eventuell Ein- und Ausstromraten) und vielen Beobachtungsgrößen: Spektren, Leuchtkräfte, Farben, stellare und Gashäufigkeiten, Gasgehalt, Emissionslinien, etc.

Die wenigen Modellparameter für die verschiedenen Galaxientypen sind stark dadurch eingeschränkt, dass die Modelle zur heutigen Zeit die oben genannte Viel-

2) N-Körper-Code: beschreibt gravitativ-dynamische Entwicklung eines Sternsystems mit Sternen als Massenpunkten.

3) Tree- (= Baum-) Struktur für rationale Berechnung der $N(N-1)$ Gravitationskräfte zwischen N Sternen: nahe Nachbarsterne werden einzeln berücksichtigt (Analogie: Blätter), etwas weiter entfernte Sterne werden zu kleinen Gruppen in ihrem Schwerpunkt zusammengefasst (Analogie: Zweige), noch weiter entfernte Sterne zu größeren Gruppen (Analogie: Äste), usw.



Abb. 2: Zwei Spiralen, jede einmal ähnlich unserer Milchstraße, kurz vor der endgültigen Verschmelzung ihrer Kerne. Wegen der langen Gezeitenarme wird dieses System aus NGC 4038 und 4039 auch „The Antennae“ genannt. Links ist eine Aufnahme vom Boden aus zu sehen, rechts

eine Aufnahme des grünmarkierten Ausschnitts mit dem Hubble Space Telescope. In einem gewaltigen „Starburst“ bilden sich gerade massenhafte Sterne, Sternhaufen und sogar kompakte, stark gebundene Kugelsternhaufen.

zahl von Beobachtungsgrößen der jeweiligen Galaxientypen reproduzieren sollen. Die Ergebnisse der chemisch-konsistenten Modelle stimmen dabei gut überein mit den beobachteten breiten stellaren Elementhäufigkeitsverteilungen naher Galaxien. Die chemisch-konsistente Beschreibung ist insbesondere wichtig für nahe Galaxien geringer chemischer Anreicherung, wie z. B. späte Spiralen oder Zwerggalaxien, und natürlich für Galaxien im frühen Universum, für deren Beschreibung unser Galaxienentwicklungscode mit einem kosmologischen Modell verknüpft ist.

Kosmologische Entwicklung von Galaxien

Aufgrund der endlichen Lichtlaufzeit sehen wir entfernte Galaxien in jüngeren Entwicklungszuständen. Heutige Beobachtungstechniken erlauben uns, Galaxi-

4) Λ ist die kosmologische Konstante, die Einstein in seine Feldgleichungen eingeführt hat, sie entspricht einer Vakuumenergiedichte Ω_Λ . Gegenwärtig beste Werte: $\Omega = \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$ (in Einheiten der kritischen Dichte, die das Universum gerade schließt, gewonnen aus den Boomerang-Experimenten), $\Omega_m \sim 0,3$, $\Omega_\Lambda \sim 0,7$.

en bis zu extrem großen Entfernungen zu beobachten, deren Licht emittiert wurde, als sie weniger als 10 % des heutigen Weltalters hatten. Die Entfernung zu solchen Galaxien wird über die Rotverschiebung angegeben, die ihre Spektrallinien beim Durchqueren des expandierenden Universums erfahren. Für die derzeit favorisierte Kosmologie mit Materiedichte $\Omega_m = 0,3$, Vakuumenergiedichte $\Omega_\Lambda = 0,7$, Hubble-Konstante $H_0 = H(t = \text{heute}) = \dot{R}/R = 65 \text{ km}/(\text{s Mpc})$ (mit $R = \text{Weltradius}$) und die Annahme, dass die Sternentstehung im Großteil der heutigen hellen Galaxien bei einer Rotverschiebung $z \sim 10$ begann, gibt Tabelle 1 den Zusammenhang zwischen Rotverschiebung und Entwicklungsalter der Galaxie an.

Für die chemisch-kosmologische Entwicklung erlaubt dieser Zusammenhang, die zeitliche Entwicklung einer ganzen Reihe von Elementhäufigkeiten direkt in ihre Rotverschiebungsentwicklung zu übersetzen,

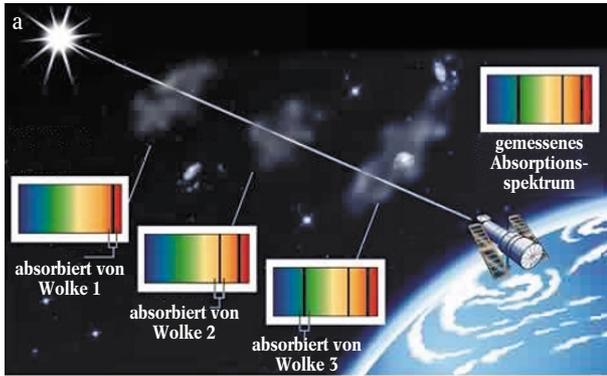
ter und Säulendichten für neutralen Wasserstoff, vergleichbar denen in Scheiben naher Spiralgalaxien, ableiten lassen. Bei gleicher Absorptionsrotverschiebung zeigen die Quasarspektren immer auch eine ganze Fülle von Absorptionslinien neutraler und niedrig-ionisierter Elemente, aus denen sich Ionisationsstruktur und schließlich Elementhäufigkeiten ergeben. Durch Vergleich der Häufigkeiten von Elementen, die in Laborexperimenten stark auf Staub kondensieren (sog. refraktorische Elemente) und solchen, die dies nur schwach oder gar nicht tun, zum Beispiel Zn, lassen sich das Staub-Gas-Verhältnis in den Absorbergalaxien bestimmen und Korrekturen für die Häufigkeiten refraktorischer Elemente. Es zeigt sich, dass die DLAs einen Großteil aller baryonischen Materie im Rotverschiebungsbereich 2–3 enthalten und typischerweise Gasmassen, die der Summe aus Stern- und Gas-Massen heutiger Spiralen entsprechen. Damit stellt sich die Frage, ob DLAs protogalaktische Scheiben und damit die Vorläufer heutiger Spiralgalaxien sein können. Kinetische Untersuchungen ergaben keine eindeutige Antwort.

Ein detaillierter Vergleich unserer chemisch-konsistenten Modelle für Spiralgalaxien mit einer Vielzahl von Elementhäufigkeiten für ein großes Sample von DLAs über den Rotverschiebungsbereich von $z \sim 0,5$ bis $z > 4$ zeigte, dass die beobachteten DLA-Häufigkeiten tatsächlich gut durch unsere Spiralmodelle beschrieben werden – von den sich schneller und stärker anreichernden Sa- bis zu den sich langsamer und schwächer anreichernden Sd-Galaxien – und einen natürlichen Anschluss finden an die lokal beobachteten ISM-Häufigkeiten in diesen Typen (Abb. 3b). Damit erlauben die chemisch-konsistenten Modelle mit einfachen Voraussetzungen, die chemische Entwicklung von Galaxien über mehr als 90 % des Weltalters zu verstehen [9]. Gleichzeitig sagten sie Helligkeiten für die Absorbergalaxien vorher [8], die kürzlich durch erste VLT-Beobachtungen eindrucksvoll bestätigt wurden.

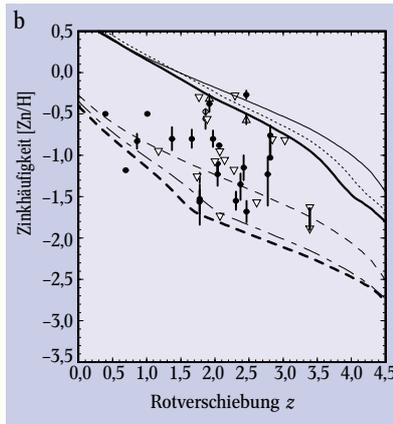
Im Bezug auf die spektro-kosmologische Entwicklung einer Galaxie ist zusätzlich zu einer Entwicklungskorrektur, die das jüngere Alter entfernter Galaxien bei Aussenden des heute von uns beobachteten Lichtes berücksichtigt, noch eine kosmologische Korrektur erforderlich, die der Rotverschiebung und Flussabschwächung des Spektrums beim Weg durch das expandierende Universum Rechnung trägt, sowie ein Term, der in relativistischer Verallgemeinerung der euklidischen $1/r^2$ -Abschwächung des Flusses entspricht. Die Entwicklungskorrektur hängt erwartungsgemäß davon ab, wie stark sich die Sternentstehungsrate einer Galaxie und damit ihr Spektrum zeitlich ändern.

Die Rotverschiebung des emittierten Spektrums auf dem Weg zu uns bewirkt zum Beispiel, dass wir im Optischen bei einer Galaxie mit $z > 1$ das Ruhesystem-UV sehen, welches bei nahen Galaxien aufgrund der Dominanz extrem junger Sterne eine deutlich andere Morphologie zeigt als das optische Licht. Erst Beobachtungen im NIR, die vom Boden durch starke atmosphärische Nachthimmelslinien beeinträchtigt werden, zeigen bei rotverschobenen Galaxien das gewohnte optische Bild des Ruhesystems. Für sehr weit entfernte Galaxien bei Rotverschiebungen jenseits von 2,5 muss als weiterer Effekt noch die sog. „attenuation“ berücksichtigt werden, d. h. die Abschwächung des emittierten Spektrums durch den kumulativ-stochastischen Effekt der

Abb. 3:
► a) Das gemessene Absorptionsspektrum eines Quasars entsteht aus dem anfangs strukturlosen Kontinuum durch die sukzessive Absorption in Gaswolken.



► b) Rotverschiebungsentwicklung des Logarithmus der Zink-Häufigkeiten in DLA-Absorbergalaxien im Vergleich mit chemisch-konsistenten Modellrechnungen für Spiralgalaxien vom Typ Sa (oben) bis Sd (unten).



$X_i(t) \leftrightarrow X_i(z)$, mit $i = \text{H, He, C, N, O, Mg, Mn, Al, Si, S, Cr, Fe, Ni, Zn}$. Informationen über das Gas in sehr entfernten Galaxien geben uns Beobachtungen von Quasar-Absorptionslinien. Dabei werden, wie in Abb. 3a skizziert, dem von einem sehr entfernten Quasar ausgesandten und weitgehend strukturlosen Kontinuum beim Durchgang durch Gas in und um Galaxien entlang unserer Sichtlinie zum Quasar Absorptionslinien mit der Rotverschiebung der absorbierenden Galaxien aufgeprägt, deren Analyse uns eine Fülle von Informationen über Physik und Chemie des Gases liefert, sogar in Galaxien, die selbst aufgrund ihrer Lichtschwäche (und projizierten Nähe zu einem hellen Quasar) nicht direkt zu sehen sind.

Zum Beispiel zeigen sog. „Damped Lyman- α Absorber“ (DLAs) breite strahlungsgedämpfte Ly α -Wasserstoffabsorptionslinien, die für Absorber bei Rotverschiebungen $z \geq 1,5$ im Optischen beobachtet werden können, und aus deren Profilen sich Doppler-Parame-

Tabelle 1:
Der Zusammenhang zwischen Rotverschiebung z und Alter einer Galaxie

z	Alter
0	13 Gyr
1	6 Gyr
2	3 Gyr
4	1 Gyr

Absorption kurzwelliger Photonen ($\lambda_{\text{Ruhe}} < 1216 \text{ \AA}$) durch intergalaktischen Wasserstoff – überwiegend in Form sog. Ly α -Wald-Wolken. In Bezug auf die Entwicklungskorrektur ist die chemisch-konsistente Beschreibung von besonderer Bedeutung, weil sie erstmals die geringere chemische Anreicherung entfernter junger Galaxien konsistent berücksichtigt. Sie trägt also der Tatsache Rechnung, dass die Häufigkeitsverteilung ihrer Sterne noch nicht bis zu solaren Werten reicht, und die Spektren weniger stark angereicherter Sterne sich nicht nur in ihren Absorptionslinien, sondern auch in Form und Höhe ihres Kontinuums erheblich von solchen solarer Zusammensetzung unterscheiden.

In sog. Deep-Field-Aufnahmen, sowohl vom HST als auch von bodengebundenen Großteleskopen wie dem VLT in zahlreichen Wellenlängenbändern, wurden Galaxien bis zu einer Helligkeitsgrenze von 29 mag beobachtet. Das entspricht etwa der Helligkeit einer Kerze in der Entfernung des Mondes! Das gegenwärtige Limit für Spektroskopie zur Rotverschiebungsbestimmung dagegen liegt bei einer Helligkeit, die um einen Faktor 40 größer ist. Durch Vergleich der spektralen Energieverteilungen, wie sie sich aus den Multi-Band-Beobachtungen ergeben, mit Galaxien-Entwicklungsmodellen lassen sich photometrische Rotverschiebungen bestimmen, die, soweit sie spektroskopisch getestet werden konnten, außerordentlich gut ($\Delta z/z \leq 10 \%$) bestätigt wurden und ein wertvolles Hilfsmittel darstellen zur Vorauswahl potenziell hochrotverschobener Galaxien aus der Vielzahl näherer, intrinsisch schwächerer Objekte. Aus diesen „Deep Fields“ haben wir heute statistisch relevante Samples von mehreren tausend Galaxien im Rotverschiebungsbereich zwischen 2,5 und 3,5, die klar weit mehr sind als die „Spitze des Eisbergs“ in Helligkeit, und noch eine beachtliche Zahl bei $z > 3,5$. Die gute Übereinstimmung der Helligkeits- und Farbentwicklung aus den chemisch-konsistenten Modellen mit den Beobachtungen zeigt, dass wir auch die spektro-kosmologische Entwicklung normaler Galaxientypen bis hin zu $z \sim 4$ und damit über mehr als 90 % des Weltalters verstehen (Abb. 4) [1, 10, 11]. Damit wird es möglich, in unterschiedlichen Entfernungen und damit Entwicklungsstadien Vorläufer bestimmter lokaler Galaxientypen zu identifizieren. Damit sind zunächst spektrale Typen gemeint, wie sie durch eine bestimmte Sternentstehungsgeschichte definiert werden. Morphologische Dekomposition von Galaxienbildern ist mit dem HST bis zu Rotverschiebungen $z \geq 1,5$ möglich. Die Frage, wie weit zurück die lokal so eindeutige Korrelation zwischen spektralem und morphologischem Typ gültig ist, untersuchen wir gegenwärtig [12].

Galaxienentstehung und dynamische Entwicklung

In Zusammenarbeit mit der Gruppe um M. Steinmetz (jetzt AIP in Potsdam) haben wir begonnen, unsere Entwicklungsmodelle für Sternpopulationen unterschiedlicher chemischer Zusammensetzungen in deren kosmologische Strukturbildungssimulationen einzubinden, um auch den dritten, noch fehlenden Aspekt der dynamischen Entwicklung in ein einheitliches Modell zur Galaxienentstehung und -entwicklung mitaufzunehmen. Ausgehend von einem primordialen Dichtefluktuationsspektrum (Λ CDM) umfasst diese Simulation die Entwicklung von Dunkler Materie, Gas und Sternen in einem Volumen von 720×720 Millio-

nen Lichtjahren (s. Abb. 5) mit bestimmten Annahmen für den sog. „bias“, also das Massenverhältnis von baryonischer (Gas) zu Dunkler Materie und einem Sternentstehungskriterium. In einem zweiten Schritt wird mit erhöhter Auflösung hineingezoomt in das Subvolumen einer Simulation, aus dem bei $z \sim 1$ eine Galaxie entstanden ist, die Ähnlichkeit mit unserer

4) U-Band entspricht Wellenlängen um 3500 Å, B-Band um 4400 Å, V-Band um 5500 Å, I-Band um 9000 Å.

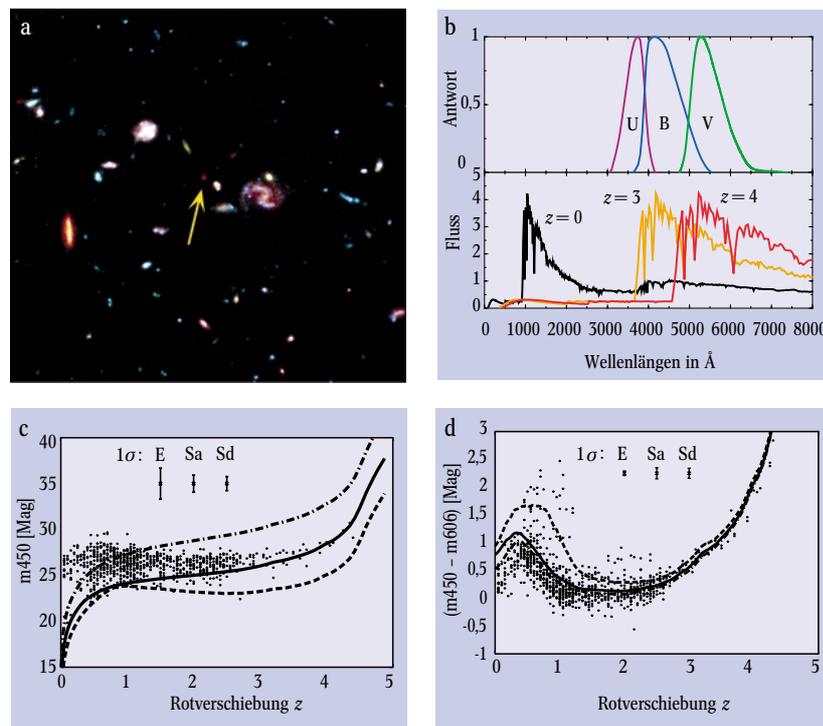


Abb. 4:
 ► a) Ausschnitt aus dem Hubble Deep Field (HDF) mit hochrotverschobener Galaxie.
 ► b) Prinzip der Drop out Technik: Bei einer Rotverschiebung $z \sim 3$ ist die Lyman-Kante eines Galaxienspektrums soweit rotverschoben, dass im U-Filter⁴⁾ fast kein Fluss mehr kommt, die Galaxie also zwar in B-, V-Bildern usw., nicht

aber im U-Bild detektiert wird (U drop out). Ab $z \sim 4$ ist sie erst im V-Band zu sehen (B drop out), usw.
 ► c, d) Helligkeitsentwicklung im B-Band (c) und Farbentwicklung, d. h. Differenz aus B- und V-Band, (d) der chemisch-konsistenten Modelle im Vergleich zu HDF-Daten aus [1].

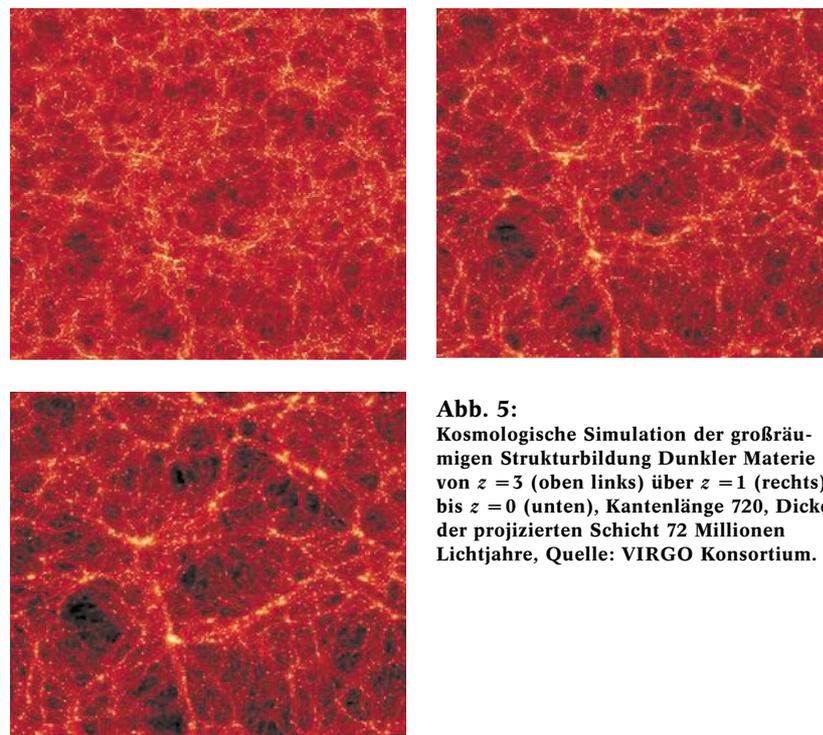


Abb. 5:
 Kosmologische Simulation der großräumigen Strukturbildung Dunkler Materie von $z = 3$ (oben links) über $z = 1$ (rechts) bis $z = 0$ (unten), Kantenlänge 720, Dicke der projizierten Schicht 72 Millionen Lichtjahre, Quelle: VIRGO Konsortium.

Milchstraße hat. Dabei wird eine Massenauflösung von $10^7 M_{\odot}$ erreicht. Die spektrophotometrischen Eigenschaften dieser Galaxie lassen sich in künstliche HST-Bilder transformieren und zeigen unter Berücksichtigung von Entwicklungs- und kosmologischen Korrekturen sowie der „attenuation“ im I-Band ($\lambda_{\text{eff}}^{\text{restframe}} \sim 9000 \text{ \AA}$), wie bei $z \sim 3,5$ (Abb. 6, links) aus zwei Subkomponenten der „Bulge“ entsteht, während die Galaxie in U nicht zu sehen ist (U „drop out“). Bei $z = 1$ (Abb. 6, Mitte und rechts) zeigt die Galaxie sowohl im

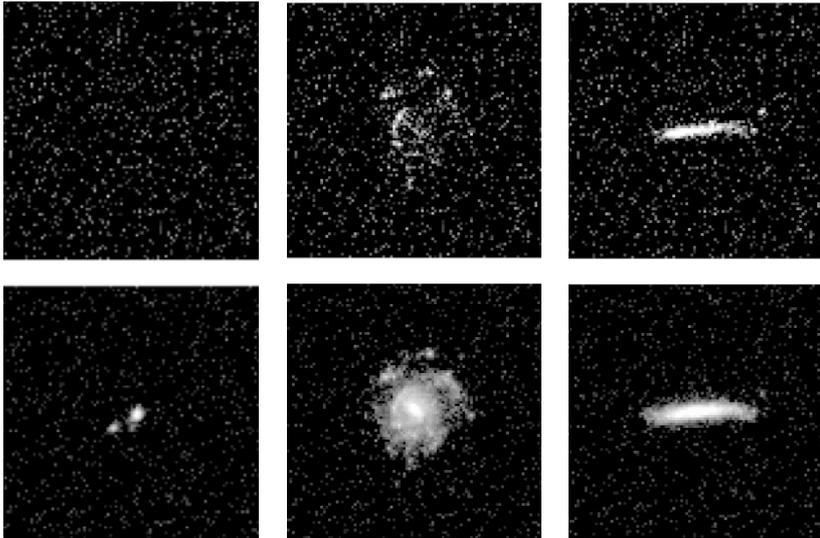


Abb. 6: Künstliche HST-Bilder einer Modellschnecke bei $z=3,5$ (linke Spalte) und bei $z=1$ (mittlere und rechte Spalte in Aufsicht und von der Seite). Die obere Reihe zeigt Bilder im U-Band, die untere im I-Band.

U- als auch im I-Band schöne Übereinstimmung mit nahen Spiralen, wird aber bei $z < 1$ zu kompakt [2]. Dies scheint an der immer noch zu groben Massenauflösung und der damit verbundenen ungenauen Beschreibung des *Feedback* zu liegen und ist Gegenstand gegenwärtiger weiterer Untersuchungen.

Danksagung

Mein ganz herzlicher Dank geht an meine akademischen Lehrer J. Gallagher, F. Schweizer, K. Freeman, R. Kennicutt, M. Pettini, K. Fricke, meine Kollaborationspartner C. Leitherer, M. Steinmetz, O. Gerhard, A. Burkert, F. Matteucci, P.-A. Duc, D. Alloin, K. Borner, R. de Grijs, und an meine Studenten H. Krüger, C. Einsel, C. Möller, J. Loxen, U. Lindner, O. Kurth, P. Weilbacher, J. Schulz, J. Bicker, T. Lilly und P. Anders sowie an DFG, DAAD, BMBF & ESO für finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] J. Bicker und U. Fritze-v. Alvensleben, eingereicht bei *Astronom. Astrophys.*
- [2] G. Contardo, M. Steinmetz und Fritze-v. Alvensleben, *Astrophys. J.* **507**, 497 (1998)
- [3] U. Fritze-v. Alvensleben, *Astronom. Astrophys.* **336**, 83 (1998)
- [4] U. Fritze-v. Alvensleben, *Astronom. Astrophys.* **342**, L25 (1999)
- [5] U. Fritze-v. Alvensleben und A. Burkert, *Astronom. Astrophys.* **300**, 58 (1995)
- [6] U. Fritze-v. Alvensleben und O. E. Gerhard, *Astronom. Astrophys.* **285**, 751 (1994a)
- [7] U. Fritze-v. Alvensleben und O. E. Gerhard, *Astronom. Astrophys.* **285**, 775 (1994b)
- [8] U. Fritze-v. Alvensleben, U. Lindner, C. S. Möller

- und K. J. Fricke, *Ap&SS* **276**, 1007 (2001)
- [9] U. Lindner, U. Fritze-v. Alvensleben und K. J. Fricke, *Astronom. Astrophys.* **342**, 709 (1999)
- [10] C. S. Möller, U. Fritze-v. Alvensleben, K. J. Fricke und D. Calzetti, *Ap&SS* **276**, 799 (2001)
- [11] C. S. Möller, U. Fritze-v. Alvensleben und D. Calzetti, *Ap&SS* **277**, 601 (2001)
- [12] J. Schulz, U. Fritze-v. Alvensleben und K. J. Fricke, *Astronom. Astrophys.* **398**, 89 (2003)

Die Autorin

Uta Fritze-von Alvensleben studierte Physik an der Universität Göttingen, unterbrochen durch ein Studienjahr an der Université de Grenoble und einen weiteren Auslandsaufenthalt am CERN in Genf. Nach ihrer Promotion an der Universitätssternwarte Göttingen (1989) baute sie dort sehr erfolgreich eine Forschungsgruppe zur Galaxienentwicklung auf. Das dort entwickelte Göttinger Galaxienentwicklungsmodell ist ein international anerkanntes „Markenzeichen“ geworden. Uta Fritze-von Alvensleben habilitierte sich 2001 an der Universität Göttingen. In ihren aktuellen Forschungen versucht sie, die innere Dynamik der Galaxien in die Simulationen miteinzubeziehen und ihre Entstehung im Rahmen kosmologischer Strukturbildungszenarien zu verstehen.

