

Zu groß, zu schwer, zu alt, zu viele!

Wackelt das Paradigma der hierarchischen Galaxienentstehung?

Lange Zeit ging man davon aus, dass die Galaxien aus protogalaktischen Gaswolken in einem Anfangskollaps entstanden sind und sich heute als weitgehend geschlossene Systeme entwickelt haben, unterschieden durch mehr (Spiralgalaxi-



Diese bislang tiefste Belichtung eines kleinen (etwa ein Zehntel Vollmondfläche), vordergründig leeren Himmelsfeldes mit den Kameras des Hubble Space Telescope (HST) zeigt über 10 000 Galaxien. Die schwächsten (<29 mag) und rötlichsten von ihnen haben Rotverschiebungen von $z > 6$, d. h. ihr Licht wurde ausgesendet, als die Galaxien weniger als 0,5 Mrd. Jahre alt waren. Die empfindlichen Detektoren an Bord des HST empfangen von diesen nur noch etwa ein Photon pro Minute. (Foto: NASA/HST)

en) oder weniger (elliptische Galaxien) zeitlich ausgedehnte Sternentstehung. 1978 schlugen Searle und Zinn jedoch ein anderes Modell vor, zunächst um die Inhomogenitäten im Halo unserer Milchstraße zu erklären [1]. Demnach verschmolzen sukzessive kleinere prägalaktische Bausteine miteinander und bildeten so in kosmologischen Zeitskalen die Galaxien. Dieses so genannte hierarchische Szenario hat sich in den letzten Jahren zum allgemein akzeptierten Paradigma in der Astrophysik entwickelt. Neue Beobachtungen [2, 3] stellen dieses Modell jedoch nun in Frage.

Derzeit geht man davon aus, dass die Materie im Universum nur zu 10 % aus gewöhnlicher (baryonischer) Materie besteht und zu 90 % aus „Dunkler Materie“, die sich nur über die Gravitation bemerkbar macht und deren Ursprung rätselhaft ist. Die kosmische Hin-

tergrundstrahlung zeigt, dass das Universum etwa 300 000 Jahre nach dem Urknall in sehr guter Näherung homogen und isotrop gewesen ist mit Dichte- und Temperaturschwankungen kleiner als 10^{-5} .

Damit im Einklang beschreiben Simulationen und semianalytische Modelle für repräsentative Teile des Universums, wie sich – ausgehend von Anfangsfluktuationen der Materiedichte – die heutige Struktur des Universums gebildet hat: von der Entstehung der Galaxien aus subgalaktischen Fragmenten über die Bildung von Galaxienhaufen und -superhaufen bis hin zur großräumigen Struktur mit ihrem Netz von Filamenten, Galaxienhaufen und sog. Voids.¹⁾ Dabei beschreiben die genannten Modelle zunächst nur die Entwicklung der Dunklen Materie (DM). „Normale“ Materie wie Gas und die daraus entstehenden Sterne führt man in diese Simulationen über zusätzliche Parameter ein. Dazu zählen etwa der „bias-Parameter“, der angibt, wie viel Gas sich in einem DM-Halo gegebener Masse befindet, oder empirische „Rezepte“, die bestimmen, unter welchen Bedingungen und mit welcher Effizienz sich Gas in Sterne umwandelt.

Zunächst kontrovers und nur ein Modell unter vielen, mauserte sich das hierarchische Modell in den letzten 15 Jahren zum allgemein akzeptierten Paradigma, das durch viele Beobachtungen bestätigt wurde. So steigt mit zunehmender Rotverschiebung, also abnehmendem Alter, die Zahl der Galaxien, die unregelmäßig geformt sind oder miteinander wechselwirken bzw. verschmelzen. Auch die Bestimmungen der kosmologischen Parameter, die in die Strukturbildungsmodelle eingehen, konvergierten in den letzten Jahren zum „concordance model“²⁾.

Doch seit einigen Jahren mehrten sich die Hinweise darauf, dass dieses Modell nicht ganz stimmen kann. 1998 berichteten Charles Steidel und Mitarbeiter (Caltech) von der Entdeckung eines außerordentlich massereichen Galaxienhaufens bei einer Rotverschiebung $z = 3$, zu einer Zeit also, als das Universum gerade mal zwei Milliarden Jahre alt war [4]. Einen solchen Galaxienhaufen dürfte es nach den hierarchischen Modellen keinesfalls geben. Also nur ein Einzelfall? Unwahrscheinlich, aber nicht unmöglich.

Auch eine bestimmte Art von Quasar-Absorptionslinien-Systemen (Damped Lyman Alpha Systems,

DLAs) mit Rotverschiebungen $z = 2-4$ brachten das hierarchische Modell in Schwierigkeiten. Diese DLAs scheinen schon genauso viel Masse überwiegend in Form von Gas zu haben wie heutige Galaxien an Gas und Sternen und auch an Anzahldichte vergleichbar zu sein, wie Arthur Wolfe und seine Mitarbeiter (University of San Diego) schon seit 1990 behaupten [5]. Hier ist jedoch die Interpretation nicht ganz eindeutig, zumindest bei einigen könnte es sich auch um Gruppen subgalaktischer Bausteine handeln, die noch dabei sind, zusammenzufallen.

Auch neue extrem tiefe Himmelsdurchmusterungen (Surveys) zunächst kleiner und dann größerer Himmelsausschnitte wie zuletzt das Hubble Ultra Deep Field³⁾ (HUDF, s. Abb.) bringen das hierarchische Szenario in Schwierigkeiten. Zwei Teams berichten nun von der Entdeckung unerwartet massereicher Galaxien bei großen Rotverschiebungen, die in keinem der gängigen hierarchischen Modelle vorgesehen sind.

Andrea Cimatti und Mitarbeiter fanden vier nach heutigen Standards massereiche, morphologisch, chemisch und spektral voll entwickelte Galaxien im HUDF bei Rotverschiebungen im Bereich $1,6 < z < 1,9$, als das Universum erst etwa ein Viertel seines heutigen Alters hatte. Das Alter der Sternpopulation bestimmten Cimatti et al. dabei zu 1–1,7 Mrd. Jahren. Die chemischen Häufigkeiten sind fast schon so hoch wie in unserer Sonne. Die gute räumliche Auflösung der verwendeten Kamera zeigt regelmäßige Leuchtkraftprofile wie bei heutigen elliptischen Galaxien. Nahinfrarot-Beobachtungen im Rahmen des K20-Surveys mit dem 10m-Very Large Telescope (VLT) der Europäischen Südsternwarte (ESO) in Chile erlauben, aus den Helligkeiten im Vergleich mit Galaxienentwicklungsmodellen die stellaren Massen abzuschätzen. Diese liegen mit 10^{11} Sonnenmassen im oberen Bereich heutiger Galaxien.

Karl Glazebrook, Roberto Abraham und Kollegen finden im Deep Deep Survey mit dem 8m-Gemini-Teleskop ebenfalls zahlreiche rote, alte, massereiche Galaxien um $z = 2$. Die Anzahldichte der massereichen Galaxien im mitbewegten Volumen entspricht im Wesentlichen der heutigen Dichte massereicher Galaxien. Unsicherheiten erlauben dabei zwar

1) Vgl. Physik Journal Juli/August 2003, S. 73 und Juni 2003, S. 34

2) Die Hubble-Konstante hat dabei den Wert $H_0 = 65 - 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, die Materiedichte beträgt 30 % der kritischen Dichte ($\Omega_0 = 0,3$), die für ein geschlossenes Universum erforderlich ist, und die Vakuumenergiedichte ergibt sich zu $\Omega_\Lambda = 0,7$, wodurch das Universum marginal offen/geschlossen wird.

3) www.stsci.edu/hst/udf

einen Faktor von 2 bis 5; der Unterschied zu den Vorhersagen hierarchischer Modelle macht allerdings einen Faktor von etwa 20 aus.

Heißt das nun: zurück zu den klassischen Modellen mit „monolithischem Anfangskollaps“? Wohl nicht, denn die Beobachtungen zeigen auch eine große Zahl noch junger, kaum entwickelter und weniger massereicher sowie wechselwirkender und verschmelzender Galaxien bei $z \leq 2$. Ist das hierarchische Paradigma ernstlich erschüttert oder lässt es sich vielleicht durch ein Anpassen seiner Parameter noch retten? Hier sind sicher noch Spielräume, handelt es sich doch um Modelle mit einem Satz einfachster Annahmen. Insbesondere könnten z. B. der sog. Bias-Parameter oder die Sternentstehungseffizienz keine Konstanten, sondern abhängig von der Masse der DM-Halos sein. Oder deuten diese Beobachtungen etwa auf eine neue Physik? In jeden Fall erleben wir Astrophysiker gegenwärtig eine äußerst spannende Epoche, in der extragalaktische Beobachtungen zusammen mit detaillierten Modellrechnungen zur Galaxienentstehung und -entwicklung das Weltbild der Physik entscheidend mitgestalten.

UTA FRITZE-VON ALVENSLEBEN

- [1] L. Searle und R. Zinn, *Astrophys. J.* **225**, 357 (1978)
- [2] K. Glazebrook et al., *Nature* **430**, 181 (2004)
- [3] A. Cimatti et al., *Nature* **430**, 184 (2004)
- [4] C. C. Steidel et al., *Astrophys. J.* **492**, 428 (1998)
- [5] A. M. Wolfe und J. X. Prochaska, *Astrophys. J.* **494**, L15 (1998)

Mikroskopische Kapillarwellen sichtbar gemacht

Konfokale Mikroskopie von kolloidalen Flüssigkeiten macht Oberflächenwellen und andere hydrodynamische Prozesse im Mikrometerbereich beobachtbar.

Die Oberflächenspannung verursacht wohl die bekanntesten physikalischen Phänomene an Wasseroberflächen. Sie bewahrt Wasserläufer davor unterzugehen, sie lässt Wasser in engen Röhren hochsteigen und macht Wassertropfen rund. Weniger bekannt ist, dass die Oberflächenspannung für Längenskalen kleiner als die sog. Kapillarlänge L_{\parallel} deutlich stärker ist als die Gravitationskraft und damit zur entscheidenden

rückstellenden Kraft für Wasserwellen mit Wellenlängen zwischen wenigen Millimetern bis zu molekularen Abständen wird. Denn für molekulare Flüssigkeiten wie Wasser findet man Kapillarlängen $L_{\parallel} = \sqrt{\gamma/\Delta\rho g}$ im Millimeterbereich aufgrund der großen Oberflächenspannung γ .^{*)} Im Unterschied zu Gravitationswellen, die man am Meeresstrand beobachten kann, rührt die Anregungsenergie bei diesen sog. Kapillarwellen mit Wellenlängen $\lambda < L_{\parallel}$ nicht vom Wind her, sondern von der thermischen Molekülbewegung. Die mittlere Amplitude dieser Wellen ist durch das Verhältnis der rückstellenden Oberflächenspannung γ zur treibenden thermischen Energie $k_B T$ gegeben: $L_{\perp} \sim \sqrt{k_B T/\gamma}$.

Solche thermisch angeregten Kapillarwellen sorgen z. B. dafür, dass dünne Flüssigkeitsfilme aufreissen und „entnetzen“. Die Kontrolle der Oberflächenspannung ist daher eine wesentliche Voraussetzung für zahlreiche mikro- und nanotechnologische Anwendungen wie die Präparation dünner Schichten oder die Herstellung von Microchips.

Allerdings sind für molekulare Flüssigkeiten die Amplituden L_{\perp} nur einige Nanometer groß und die auftretenden Geschwindigkeiten $\gamma/\eta \approx 10$ m/s aufgrund kleiner Viskositäten η sehr hoch. Deshalb ist zur detaillierten Untersuchung dieser Wellen in der Regel hochauflösende Röntgenstrahlung notwendig.

Dirk Aarts, Matthias Schmidt und Henk Lekkerkerker (Universität Utrecht) haben nun gezeigt, dass Grenzflächen von kolloidalen Flüssigkeiten mit modernen Mikroskopietechniken studiert werden können und dass sich die Oberflächenspannung und damit die charakteristischen Längen- und Zeitskalen über mehrere Größenordnungen verändern lassen [1]. Dies ist vor allem dem Umstand zu verdanken, dass sich kolloidale Teilchen (fluoreszierende PMMA-Kügelchen in einer Polystyrol-Lösung) wie extrem große Atome verhalten können [2]. Bereits Albert Einstein und Jean Baptiste Perrin konnten zeigen, dass die bekannte barometrische Höhenformel nicht nur für die Dichte molekularer Gase, sondern aufgrund der thermischen Brownschen Bewegung auch für Kolloide gilt. Aufgrund der durch die Polymere in der Lösung erzeugten attraktiven entropischen Wechselwirkung („Depletion“-Kraft) [3] gibt es kolloidale Suspensionen aber nicht nur in

der Gasphase mit niedriger Kolloiddichte, sondern als Flüssigkeiten mit hoher Dichte, sodass sich auch eine Grenzfläche koexistierender Phasen ausbilden kann (Abb. 1).

Die Oberflächenspannung $\gamma \sim k_B T/L^2 \sim 1 \mu\text{N/m}$ ist aber extrem klein, da der Teilchendurchmesser $L \sim 100$ nm der Kolloide im Gegensatz zu Atomen sehr groß ist (Abb. 2a). Sowohl die Kapillarlänge L_{\parallel} als auch die Wellenamplituden L_{\perp} dieser kolloidalen Oberflächen sind dementsprechend einige Mikrometer groß und damit mittels konfoka-

^{*)} Diese liegt im Bereich $\gamma \sim 10 - 100$ mN/m, bei einer Dichtedifferenz $\Delta\rho = \rho_l - \rho_g \sim 100 - 1000$ kg/m³ zwischen der fluiden und gasförmigen Phase, Erdbeschleunigung $g = 9,81$ m/s².

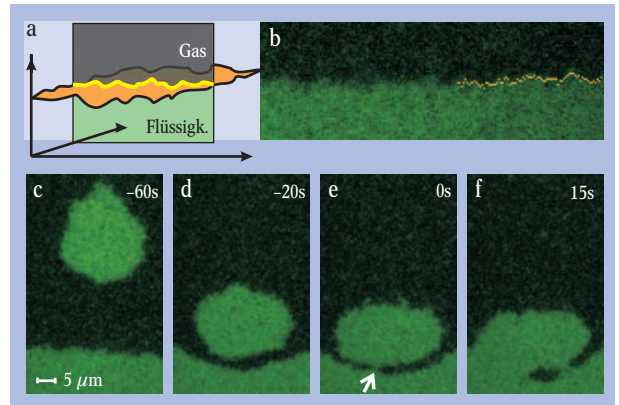


Abb. 1: Kapillarwellen auf kolloidalen Flüssigkeitsoberflächen lassen sich mit konfokaler Mikroskopie nun direkt im Ortsraum sichtbar machen (a, b). Die Helligkeit ist proportional zur Dichte der mit einem fluoreszierenden Farbstoff markierten Kolloide. Damit ließ sich erstmals detailliert beobachten, wie ein Tropfen in drei dynamischen Stadien mit einer Oberfläche verschmilzt: Der trennende Gasfilm wird dünner (c, d); eine Flüssigkeitsbrücke (Pfeil) entsteht durch Kapillarwellen (e); der Tropfen zerfließt in die fluide Phase, wobei Gasblasen eingeschlossen werden können (f) [1].

ler Mikroskopie direkt im Ortsraum sichtbar (Abb. 1a,b). Da auch die Geschwindigkeiten ($\gamma/\eta \approx 1 \mu\text{m/s}$) sehr klein sind, ist es möglich, hydrodynamische Prozesse in Echtzeit zu beobachten und z. B. die lange diskutierte Frage zu beantworten, wie wichtig Kapillarwellen für die Verschmelzung von Tröpfchen sind (Abb. 1c-f).

Flüssigkeiten und damit fluide Oberflächen sind nur in einem engen Temperatur- und Druckbereich thermodynamisch stabil. Seit sich van der Waals 1873 die Frage stellte, warum es überhaupt eine flüssige Phase gibt und nicht vielmehr nur Gase und Festkörper, blieb die Erforschung der mikroskopischen Struktur von Flüssigkeiten eine zentrale Aufgabe der statistischen Physik. Van der Waals' Antwort, dass eine attraktive Kraft zwischen den Teilchen eine notwendige Bedingung für einen fluiden Phasenübergang ist, stellte zwar einen Meilenstein im Verständnis kondensierter Materie

Priv.-Doz. Dr. Uta Fritze-von Alvensleben, Universitätssternwarte Göttingen, Geismarlandstr. 11, 37083 Göttingen