

■ Dunkle Materie im Hintertreffen

Die Form der Rotationskurven von Spiralgalaxien bei hoher Rotverschiebung deutet darauf hin, dass in frühen Epochen Galaxien von der sichtbaren Materie dominiert werden.

Die meisten Sterne im heutigen Universum finden sich in Spiralgalaxien wie unserer Milchstraße. Die „Freeman-Disk“ beschreibt deren Flächenhelligkeit I als Funktion des Radius R sehr gut durch ein Exponentialgesetz:

$$I(R) = I_0 \exp(-1,7R/R_{1/2}),$$

wobei I_0 die zentrale Flächenhelligkeit ist und $R_{1/2}$ den Radius bezeichnet, innerhalb dessen 50 Prozent des Lichts der Galaxie entstehen. Für die Rotationskurve ergibt sich im Fall einer selbstgravitierenden Scheibe im zentrifugalen Gleichgewicht, dass die Rotationsgeschwindigkeit mit dem Radius zunächst zunimmt und bei $1,3 R_{1/2}$ ein Maximum erreicht, um dann bei immer größeren Radien gemäß dem Keplerschen Gesetz wie $R^{-1/2}$ abzufallen (Abb. 1). Doch bereits die Messungen von Vera Rubin aus den 1970er-Jahren zeigten, dass die Rotationskurven von Spiralgalaxien keineswegs mit dem Radius abfallen, sondern gegen eine konstante Geschwindigkeit v_c streben [1]. Dabei ist v_c meist größer als die aus der Flächenhelligkeit abgeleitete Geschwindigkeit v_{max} , sodass die Gesamtmasse der Galaxie die aus der Helligkeit abgeleitete Masse um ein Vielfaches übersteigt. Rotationskurven gelten daher neben

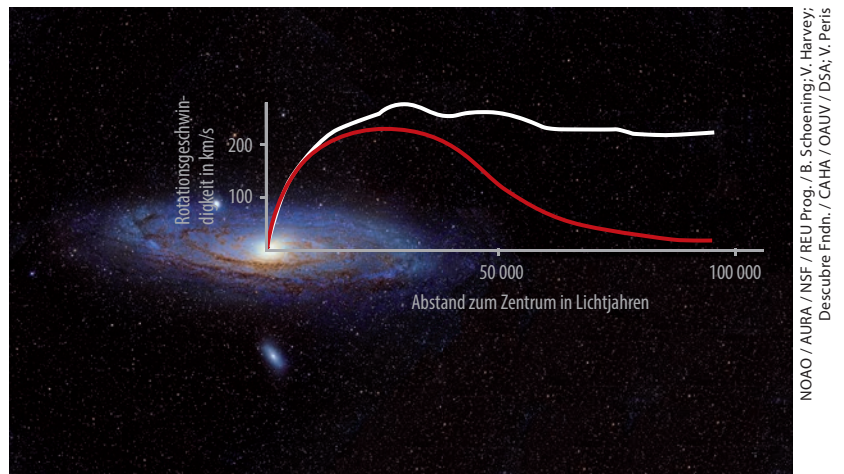


Abb. 1 Berechnete (rot) und gemessene (weiß) Rotationskurven von Spiralgalaxien stimmen nicht überein: Die Existenz Dunkler Materie erklärt die Abweichung.

dem Gravitationslinseneffekt in Galaxienhaufen [2] und den Fluktuationen in der kosmischen Hintergrundstrahlung [3] als Beleg dafür, dass das Universum von einer nur schwach wechselwirkenden und ihrem Ursprung nach weiterhin mysteriösen „Dunklen Materie“ dominiert ist. Rotationskurven bieten den Vorteil, dass sich aus ihnen die Massenverteilung in Galaxien ergibt, und sich somit auch die gravitative Wechselwirkung von Dunkler und sichtbarer Materie untersuchen lässt.

Im lokalen Universum sind Zwerggalaxien mit niedriger Flächenhelligkeit ideale Objekte, um

die Massenverteilung der Dunklen Materie zu vermessen. Der Anteil der Sterne am Gravitationspotential beträgt weniger als ein Prozent, und ihre Kinematik ist komplett von Dunkler Materie dominiert. Gemäß dem Standardmodell der Kosmologie (Λ CDM-Modell) sollte die Dichte zum Zentrum hin wie R^{-1} divergieren (cusps) [4]. Beobachtungen zeigen aber, dass die Dichte im Zentrum zu einem konstanten Wert konvergiert (cores) – bisher ist dieses „cusp-core problem“ nicht befriedigend verstanden [5].

Die meisten Sterne befinden sich aber in massereicheren Galaxien mit höherer Flächenhelligkeit, die einen merklichen Teil ihres Gases im Zentrum angesammelt und in Sterne verwandelt haben. Ein komplexes Wechselspiel aus Kühlen (z. B. durch Sternentstehung) und Aufheizen (z. B. durch Supernova-Explosionen und Sternwinde) findet statt, das gemäß dem Λ CDM-Modell in Spiralgalaxien mit der Masse unserer Milchstraße am wirksamsten ablaufen sollte: Zwanzig Prozent des verfügbaren Gasvorrats kann in Sterne verwandelt werden. Das sternbildende Gas sammelt sich im Gegensatz zur Dunklen Materie nahe des Zentrums an. In Galaxien wie unserer Milchstraße dominiert im leuchtenden Bereich die sichtbare

KURZGEFASST

■ Sonnige Beobachtungen

Mit dem ballongetragenen Sonnenobservatorium Sunrise gelang es, die Grenzschicht zwischen der sichtbaren Oberfläche und der Atmosphäre unserer Sonne mit einer einzigartigen Auflösung von 50 bis 100 km zu beobachten. Das Sonnenteleskop registrierte in einer Höhe von mehr als 35 km beim Erstflug 2009 ein unerwartetes Aktivitätsminimum, während sich 2013 die Sonne temperamentvoll zeigte. Ein Sonderband sammelt erste Auswertungen der zahlreichen Daten, die dabei helfen, den Masse- und Energietransport in der Sonnenatmosphäre und die Dynamik ihrer hoch komplexen Magnetfelder besser zu verstehen. *Astroph. J. Suppl. Ser.* **229**, No. 1 (2017)

■ Gespannte Oberfläche

Die Oberflächenspannung sorgt dafür, dass Wasser in Luft kugelförmige Tropfen bildet. Kürzlich zeigte ein internationales Forscherteam, dass die Oberflächenspannung von Wasser bei Zimmertemperatur nicht immer dem Gleichgewichtswert von 72,75 mN/m entspricht. Für perfekte, neu erzeugte Schnittstellen zwischen Luft und Wasser ergaben sich stattdessen etwa 90 mN/m. Bereits nach weniger als einer Millisekunde stellt sich aber der Gleichgewichtswert ein. Relevant ist das Ergebnis z. B. für die Auflösung von Tintenstrahldruckern, weil diese heute mit MHz-Frequenzen Tropfen bilden. *I. M. Hauner et al., J. Phys. Chem. Lett.* **8**, 1599 (2017)

Materie, und die Sterne tragen merklich zur inneren Kinematik bei. Um beispielsweise die Sonne auf ihrer Bahn um das galaktische Zentrum zu halten, muss sich innerhalb ihrer Umlaufbahn etwa gleichviel Dunkle wie sichtbare Materie befinden [6], was die möglichen Massenverteilungen der Dunklen Materie einschränkt [7]. Je nachdem, wie viel sichtbare Materie im Innern vorliegt, variiert die Form der Rotationskurven signifikant. Als Maßzahl f_{DM} eignet sich das Verhältnis von Masse in Form Dunkler Materie zur Gesamtmasse innerhalb $R_{1/2}$: Für hohe f_{DM} wächst die Rotationsgeschwindigkeit langsam an und geht fließend in den flachen Bereich über. Bei niedrigem f_{DM} wächst die Rotationsgeschwindigkeit schnell bis zu einem Maximum v_{max} an, fällt danach zunächst langsam ab und nähert sich dem flachen Teil der Rotationskurve an.

Wenn die Effizienz des kosmischen Materiekreislaufs die Verteilung sichtbarer Materie bestimmt und die Entwicklung von Galaxien den Kreislauf beeinflusst, sollte es signifikante Variationen im Gasanteil von Galaxie zu Galaxie geben. Skalenrelationen wie die Tully-Fisher-Relation, welche die Rotationsgeschwindigkeit von Galaxien mit deren Leuchtkraft korreliert, sollten dann ebenfalls variieren. Beobachtungen deuten aber darauf hin, dass die kinematischen Eigenschaften exzellent mit der Masse und Verteilung der leuchtenden Materie allein korrelieren [5]. Daher müssen die beiden Komponenten des Λ CDM-Modells – sichtbare und Dunkle Materie – auf nicht-triviale Weise systematisch koppeln, indem z. B. die Dunkle Materie durch das Gravitationspotential der zentrumsnah akkumulierten Sterne in geeigneter Weise kontrahiert wird [8]. Rotationskurven von Galaxien erlauben es, die astrophysikalischen Prozesse der Galaxienentstehung zu studieren und die Eigenschaften und Natur der Dunklen Materie oder alternativer Gravitationstheorien (z. B. Modified Newtonian Dynamics – MOND) zu untersuchen.

Um Rotationskurven systematisch zu analysieren, gilt es,

Galaxien verschiedener Masse und Flächenhelligkeit in Abhängigkeit von der kosmischen Epoche zu betrachten. Beispielsweise sind Spiralgalaxien früher Epochen dichter als ihre heutigen Gegenstücke und deutlich turbulenter. Forscher des Max-Planck-Instituts für Extraterrestrische Physik analysierten nun erstmals Rotationskurven von Galaxien bis zu einer Rotverschiebung von $z = 2,6$ und blickten damit bis zu 10 Milliarden Jahre in die Vergangenheit [9]. Neueste optische Instrumente am Very Large Telescope der ESO ermöglichten es, erstmals die Populationen von einigen hundert Galaxien mit guter räumlicher und spektroskopischer Auflösung zu untersuchen.

Ein Vergleich der Rotationskurven der Milchstraße mit sechs Galaxien ähnlicher Masse sowie dem Mittelwert aus 97 hochrotverschobenen Galaxien zeigt, dass alle Kurven schnell zum Maximalwert v_{max} anwachsen, um danach innerhalb von zwei bis drei $R_{1/2}$ abzufallen, in Extremfällen auf Werte von $0,3 \cdot v_{\text{max}}$. In ihrer Form entsprechen diese Rotationskurven somit denen der flächenhellsten Galaxien im lokalen Universum bei $z = 0$. Das Abfallen der Rotationsgeschwindigkeit ist aber deutlich stärker ausgeprägt und kommt so im lokalen Universum selten vor. Die dynamische Modellierung der Rotationskurven zeigt, dass in frühen Epochen die Galaxien sehr viel stärker von sichtbarer Materie dominiert sind als ihre lokalen Äquivalente: Während die Maßzahl f_{DM} bei $z = 0$ zwischen 40 und 90 Prozent beträgt, sinkt sie für $z \sim 2$ auf 0 bis 20 Prozent ab. Außerdem sind die turbulenten Geschwindigkeiten mit 50 km/s deutlich höher. In der Tat ergeben sich die kinematischen Daten bei $z \sim 2$ weitgehend aus der alleinigen Gravitationswirkung der sichtbaren Materie (Abb. 2). Ob das Λ CDM-Modell dieses Defizit von Dunkler Materie in der jungen Galaxienpopulation erklären kann, bleibt zu zeigen.

Der Schluss, dass Spiralgalaxien bei hohen Rotverschiebungen keine flachen Rotationskurven besitzen, ist aber verfrüht. Ob die Rotations-

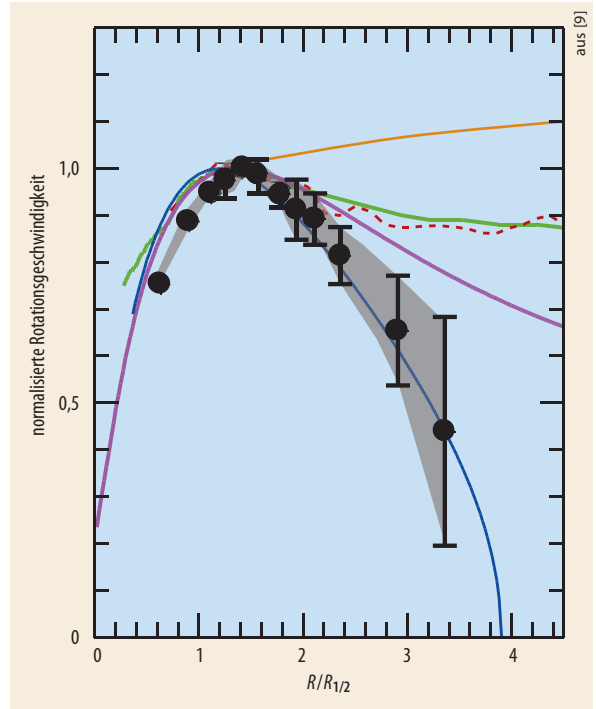


Abb. 2 Die Rotationskurven von 97 hochrotverschobenen Galaxien (grau) sowie die gebinteten Kurven sechs ausgewählter Galaxien (schwarz) fallen deutlich ab, im Gegensatz zu der nahezu flachen Rotationskurve typischer massereicher Spiralgalaxien der heutigen Epoche (orange) oder jener der Milchstraße (grün) und der Andromedagalaxie M31 (rot). Sogar die Kurve einer selbstgravitierenden kalten exponentiellen Scheibe (Freeman-Disk, lila) fällt weniger stark ab. Vielmehr ähneln diese Rotationskurven derjenigen einer Spiralgalaxie, die von sichtbarer Materie dominiert ist, mit warmem oder turbulentem Gas, in der die darin wirkenden Druckkräfte die notwendigen Rotationsgeschwindigkeiten reduzieren.

kurven weiter abfallen oder sich asymptotisch einer flachen Kurve annähern, lässt sich derzeit noch nicht beantworten. Dazu müsste der untersuchte radiale Bereich noch weiter erhöht werden, was beobachtungstechnisch bisher nicht möglich war. Die systematische Studie öffnet aber die Tür zur Untersuchung der Dynamik von Galaxien im jungen Universum. Weitere beobachtende wie auch theoretische und modellierende Studien werden folgen.

Matthias Steinmetz

- [1] V. Rubin et al., *ApJ* **225**, L107 (1978)
- [2] R. S. Ellis, *Phil. Trans. R. Soc. A* **368**, 967 (2010)
- [3] Planck Coll., *A&A* **594**, 13 (2015)
- [4] J. F. Navarro et al., *ApJ* **490**, 493 (1997)
- [5] S. McGaugh, *ApJ* **609**, 652 (2004)
- [6] T. Piffl et al, *MNRAS* **445**, 3133 (2014)
- [7] M. Abadi et al, *MNRAS* **407**, 435 (2010)
- [8] M. Steinmetz und J. F. Navarro, *ApJ* **513**, 555 (1999)
- [9] R. Genzel et al., *Nature* **543**, 397 (2017)

Prof. Dr. Matthias Steinmetz, Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP), An der Sternwarte 16, 14482 Potsdam