

0. Vorbemerkung

Das Angebot der AWHS zum Thema “Moderne Astrophysik” folgt dem Konzept aller Themenmodule: Durch eine (durchaus willkürliche) enge Auswahl weniger Aspekte eines Themas soll den Schülern ein *Einblick* in einen Themenkreis vermittelt werden. Es ist nicht der Anspruch einen vollständigen *Überblick* über das Thema zu vermitteln. Die ausgewählten Aspekte sollen mit einer Tiefe behandelt werden, der dem zeitlichen Umfang und dem Vorwissen der Schüler angemessen ist. Wenn möglich sollen die Schüler dabei Gelegenheit zu aktivem Umgang mit einigen dieser Aspekte bekommen.

Zwei Merkmale charakterisieren den Stand einer wissenschaftlichen Disziplin: Ihre Fragestellungen, also ungelöste Probleme, und die Methoden, die zu ihrer Lösung angewendet und weiterentwickelt werden. Unter diesem Blickwinkel wird die “Moderne Astrophysik” hier betrachtet; die ausgewählten Fragestellungen sind:

1. Ist unser Sonnensystem ein “Einzelfall”? (Planetensysteme)
2. Was ist im Zentrum der Milchstrasse? (Physik der Galaxien)
3. Hat das Universum eine Struktur? (Kosmologie)

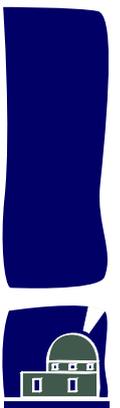
1. Planetensysteme

Schon Laplace und Kant haben im 18. Jahrhundert physikalische Betrachtungen über die Entstehung des Sonnensystems angestellt, beide vertraten die Idee einer Entstehung aus einem “Urnebel”, eine Einschätzung die sich aus heutiger Sicht als richtig erwies. Dabei ist bisher unbekannt, ob Einzelereignisse, etwa der nahe Vorbeiflug eines anderen Sterns am frühen Sonnensystem, seine Entwicklung massgeblich beeinflusst haben.

Analytische Abschätzungen und numerischen Simulationen zeigen heute, dass eine Entstehung des Sonnensystems aus einer kontrahierenden Gas- und Staubwolke (“protostellare Wolke”) ohne wesentliche Einwirkung von außen möglich ist. Viele Fragen, wie z.B. die genauen Prozesse der Bildung von Körpern zunehmender Grösse, beginnend bei Staubpartikeln über Körper mittlerer Grösse (“Planitesimale” mit wenigen km Durchmesser) bis schließlich zu Planeten sind dabei noch ungeklärt.

Für eine protostellare Wolke mit etwa einer Sonnenmasse ist eine Ausdehnung von einigen tausend Astronomischen Einheiten (AE = große Halbachse der Erdbahn um die Sonne) zu erwarten. Dieser Abschätzung liegt eine Temperatur von ≈ 10 K und eine Dichte zugrunde, wie man sie in Molekülwolken beobachtet. Zum Vergleich: Die Bahn des äußersten Planeten, Pluto, hat einen Durchmesser von etwa 80 AE. Großskalige Strömungen des interstellaren Mediums führen dazu, dass sich unterschiedliche Teile der protostellare Wolke mit unterschiedlicher Geschwindigkeit bewegen. Einen wichtigen Beitrag dazu liefert die *differentielle* Rotation der Milchstrasse, also die vom Abstand zum Milchstraßenzentrum abhängige Winkelgeschwindigkeit der galaktische Rotation. Das führt zu einer zunächst sehr langsamen Rotation (Umlaufzeiten $\approx 10^9$ Jahre) der protostellaren Wolke. Bei der folgenden gravitativen Kontraktion der Wolke wird diese Rotation wegen der Drehimpulserhaltung stark beschleunigt, es kommt zur Bildung einer Gas- und Staubscheibe um den entstehenden Stern (“zirkumstellare Scheibe”). In einer solchen Scheibe kann durch turbulente Reibung und magnetische Felder Drehimpuls nach aussen transportiert werden. Durch diese Mechanismen tragen im heutigen Sonnensystem die Planeten etwa 99.5% des gesamten Drehimpulses, die Sonne nur 0.5%. Einen erheblichen Anteil ihres Drehimpulses hat die Sonne in ihrer frühen Entwicklung (einige 10^7 Jahre) durch die Kopplung ihres Magnetfeldes an das umgebende Medium abgegeben.

Seit den 1980er Jahren wurden Gas+Staub-Scheiben um eine zunehmende Anzahl von Sternen direkt beobachtet (zirkumstellare Scheiben). Weitere Beobachtungen zeigen Inhomogenitäten und Asymmetrien in diesen Scheiben, die auf Planetensystemen in der



Entstehung hindeuten. Allerdings ist dieser Zusammenhang bisher noch nicht direkt nachgewiesen. Diese Beobachtungen erfordern einerseits eine hohe Auflösung (wegen der geringen Winkelausdehnung der mindestens einige Lichtjahre entfernten Scheiben), sie müssen andererseits den enormen Helligkeitskontrast zwischen dem Zentralstern und der ihn umgebenden Scheibe bewältigen.

Seit den 1990er Jahren hat die Untersuchung von Planetensystemen durch den (indirekten) Nachweis von Planeten ausserhalb des Sonnensystems eine wesentliche Erweiterung erfahren. Gegenwärtig stehen dabei zwei Beobachtungsmethoden im Vordergrund: (i) Messung von geringfügigen Helligkeitsschwankungen durch die Bedeckung des Zentralsterns ("photometrische" Beobachtungen). (ii) Messung der Radialgeschwindigkeitsvariationen des Zentralsterns, also der von der Erde fortgerichteten Geschwindigkeitskomponente, aus Dopplerverschiebungen in seinem Spektrum. Diese Radialgeschwindigkeitsvariationen werden durch die Bewegung des Zentralsterns um den Schwerpunkt des Gesamtsystems verursacht.

Beide Methoden, (i)+(ii), bevorzugen systematisch den Nachweis von Planeten mit kurzen Umlaufzeiten und grossen Massen (bzw. Radien). Für beide Methoden sind sehr hohe Messgenauigkeiten erforderlich, die mit abnehmender Grösse der nachzuweisenden Planeten zunimmt.

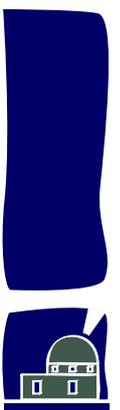
Wollte man Jupiter durch spektrale Beobachtungen des Sonnensystems von außen mit Methode (ii) nachweisen, müsste man Radialgeschwindigkeitsvariationen der Sonne von $\Delta v \approx 10$ m/s über einen Zeitraum von einigen Jahren nachweisen, was eine spektrale Auflösung von etwa $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta v}{c} \approx 10^{-7}$ erfordern würde (λ bezeichnet die beobachtete Wellenlänge, c die Lichtgeschwindigkeit). Sehr leistungsfähige astronomische Spektrographen erreichen Auflösungen von einigen 10^5 , so dass solche Messungen nicht "direkt", z.B. an einer einzigen Spektrallinie möglich sind. Sie sind nur durch die Mittelung der Information zahlreicher Spektrallinien und eine genaue und langzeitstabile Wellenlängeneichung möglich.

Zusammenfassend deutet unser heutiges Verständnis des Sonnensystems und die inzwischen zahlreichen Beobachtungen anderer Planetensysteme darauf hin, dass unser Sonnensystem kein "Einzelfall" ist. Eine interessante Aufgabe der Astrophysik in den nächsten Jahrzehnte wird die Suche nach erdartigen Planeten sein.

2. Physik der Galaxien - Der Aufbau der Milchstraße

Wie wir heute wissen, befindet sich das Sonnensystem etwa 25 000 ly (Lichtjahre) vom Zentrum einer gewöhnlichen Spiralgalaxie (*gr.* galactos = Milch) mit einer Masse der Grössenordnung 10^{11} - 10^{12} Sonnenmassen und einem Durchmesser von etwa 100 000 ly. Diese Galaxie, die Milchstraße, besteht aus verschiedenen Komponenten: (i) Der Hauptteil der sichtbaren Materie (Sterne, interstellares Gas + Staub) befindet sich in einer flachen Scheibe in der die Massendichte etwa exponentiell nach außen abnimmt. Senkrecht zur Scheibe beträgt die Skalenhöhe der exponentiellen Abnahme nur etwa 1 000 ly. (ii) In der Mitte der Scheibe befindet sich eine Ausbuchtung ("Bulge") mit etwa 15 000 ly Durchmesser. Ein Teil des Bulges ist möglicherweise in einem "Balken" konzentriert, seine Existenz ist jedoch noch nicht gesichert. (iii) Der Zentralbereich, der einen Durchmesser von wenigen Lichtjahren hat. (iv) Eine nahezu sphärische Massenverteilung, der sogenannte Halo, der die Kugelsternhaufen, interstellares Gas, sowie dunkle Materie (s. Abschnitt 3) umfasst.

Die Untersuchung der Milchstraße wird durch die Lage des Sonnensystems innerhalb der galaktischen Scheibe erheblich erschwert. Zum einen ist uns dadurch ein Blick *auf* die Scheibe verwehrt, der direkt die Spiralarmstruktur etc. zeigen würde. Zum anderen ist die Sichtweite im visuellen Licht innerhalb der Scheibe durch den Staub, der z.T. in Dunkelwolken konzentriert ist, stark eingeschränkt. Aus der Richtung des galaktischen



Zentrums erfolgt eine Abschwächung (Extinktion) des sichtbaren Lichtes um einen Faktor von etwa $4 \cdot 10^{-13}$ (31 Magnituden); im Infraroten ist die Abschwächung durch die wellenlängenabhängige Streuung an den Staubpartikeln deutlich geringer, z.B. bei $\lambda = 2.2 \mu\text{m}$ noch etwa 0.06 (3 Magnituden). Durch die recht geringe Temperatur des interstellaren Staubs (typ. wenige 10 K) ausserhalb der direkten Umgebung von Sternen sind Beobachtungen im Infrarot oder im noch langwelligeren Radiobereich für langreichweitige Beobachtungen in der Milchstraßenebene somit günstig.

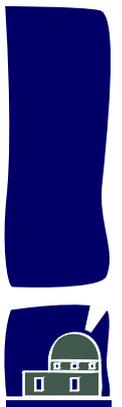
Wegen der Sichtweitenbeschränkung liefern "Sternzählungen" im sichtbaren Licht kaum Information über den Aufbau der Milchstraße. Solche Zählungen wurden bereits von W. Herschel im 18. Jahrhundert durchgeführt, konnten jedoch vor der Entdeckung der interstellaren Extinktion im 20. Jahrhundert nicht sinnvoll interpretiert werden.

Unser Wissen über den Aufbau der Milchstraße stammt insofern aus *nicht-optischen* Beobachtungen der Milchstraße und aus der Beobachtung anderer Galaxien. Eine vermutlich der Milchstraße sehr ähnliche Galaxie ist z.B. NGC 3953 (Entfernung 55 Mly), ebenfalls in manchen Eigenschaften ähnlich ist die nächste große "Nachbargalaxie" M31 (Entfernung 2,3 Mly). Die historische Name von M31, "Andromedanebel", sollte aus heutiger Sicht durch "Andromeda-Galaxie" ersetzt werden. Doch erst in den 1920er Jahren konnte die Entfernung von M31 durch E. Hubble und andere bestimmt werden. Damit wurde ihre extragalaktische Natur bewiesen, die zuvor heftig umstritten war. Auch die Entfernung und Lage des Zentrums der Milchstraße wurde erst in den 1920er Jahren durch H. Shapley aus dem Mittelpunkt des Systems der Kugelsternhaufen bestimmt. Bis dahin war die Ausdehnung der Milchstrasse vollkommen unbekannt gewesen.

Die Masse "dunkler" (= nicht "sichtbarer", bisher nur durch ihre Gravitationswirkung nachweisbarer) Materie in der Milchstraße kann aus der Rotationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Zentrumsabstand bestimmt werden. Unter der vereinfachenden Annahme einer kugelsymmetrischen Massenverteilung ermöglicht das dritte Keplerschen Gesetz ($T^2/a^3 \propto M$, mit der Umlaufzeit T und der grossen Halbachse der Umlaufbahn a) einen Schluss auf die Zentralmasse M . Diese Rotationsgeschwindigkeit nimmt in den äusseren Bereichen weitaus langsamer ab, als es die Verteilung der "sichtbaren" Materie (= Sterne + interstellares Gas und Staub) erwarten liesse; solche Beobachtungen werden ebenso an anderen Galaxien gemacht. Eine mögliche Erklärung wäre ein sphärischer äusserer Halo aus dunkler Materie von bis zu 300.000 ly Durchmesser, der die Milchstraße umgibt. Die Masse eines solchen "dunklen Halos" würde die Masse der sichtbaren Materie um ein Vielfaches überschreiten. Die physikalische Natur dieser dunklen Materie ist bisher nur bruchstückhaft verstanden (s. Abschnitt 3).

In den 1960er Jahren wurde durch radioastronomische Beobachtungen die sehr gering ausgedehnte Radioquelle Sgr A* in Richtung des galaktischen Zentrums entdeckt. Sie liegt im Sternbild Schütze (= Sagittarius), ihre Position fällt mit dem Rotationsmittelpunkt ("dynamisches Zentrum") der Milchstraße zusammen. Neuere Beobachtungen durch Langbasis-Interferometrie (VLBI, "very long-baseline I.") zeigen, dass ihre Ausdehnung kleiner als 1 AE ist. Das entspricht einer Winkelausdehnung von $\lesssim 10^{-4}''$ ($1'' = 1$ Bogensekunde = $1/3600$ Grad); das Hauptproblem einer genaueren Grössenbestimmung ist die Beobachtungsunschärfe durch die Streuung im interstellaren Medium.

Durch Infrarotbeobachtungen der Bahn von Sternen die das Milchstraßenzentrum sehr nah umlaufen (in Abständen von wenigen hundert AE) ist es seit den 1990er Jahren gelungen, die Zentralmasse bei Sgr A* mit zunehmender Genauigkeit zu bestimmen ($3,7 \pm 1,5 \cdot 10^6$ Sonnenmassen, Stand 2002) und die Ausdehnung der Massenverteilung einzugrenzen. Eine solch konzentrierte Massenverteilung legt den Schluss auf ein zentrales Schwarzes Loch im dynamisches Zentrum der Milchstraße sehr nahe: "Sgr A* ist der beste Kandidat für ein supermassives [= nicht aus dem Kollaps eines Sternes entstandenes]



Schwarzes Loch, den wir kennen" (Melia & Falcke 2001). Alternative Erklärungen für eine solch konzentrierte Massenverteilung, basieren auf hypothetischen teilchenphysikalischen Annahmen, etwa sehr massiven Neutrinos usw..

Um die Hypothese eines Schwarzen Loches zu bestätigen könnte man versuchen, seinen "Schatten" vor einem Hintergrundobjekt direkt zu beobachten. Dieser "Schatten" hat eine Ausdehnung von der Grössenordnung des Ereignishorizontes des Schwarzen Loches, der für ein nicht-rotierendes Schwarzes Loch gleich dem Schwarzschild-Radius $r_s = 2GM/c^2$ ist. Für eine Masse von 10^6 Sonnenmassen beträgt $r_s \approx 0.02$ AE, die erforderlichen Beobachtungen werden vermutlich in naher Zukunft bei submillimeter-Wellenlängen möglich sein.

Die Akkretion von Materie durch eine grosse Zentralmasse, also vermutlich ein supermassives Schwarzes Loch, ist derzeit die einzige Erklärung für die beobachtete Emission von Galaxienkernen. Dies gilt insbesondere für die starke Emission einiger Galaxien im frühen Universum (AGN, active galactic nuclei), zu denen auch Quasare zählen.

3. Kosmologie: Das Universum als Ganzes

Die Kosmologie ist der Zweig der Astrophysik, der sich mit den Eigenschaften und der Entwicklung des Universums beschäftigt. Turner & Tyson (1999) nennen drei "Beobachtungssäulen" auf denen unser derzeitiges Verständnis des Universums ruht:

(i) Seine Expansion, die sich in einer mit der Entfernung d zunehmenden Rotverschiebung z des Spektrums von Galaxien äussert: $z \simeq H_0 d/c$ für $z \ll 1$. Dabei gilt $z \equiv (\lambda_{\text{beobachtet}} - \lambda_{\text{emittiert}})/\lambda_{\text{emittiert}}$; c bezeichnet die Lichtgeschwindigkeit und λ die Wellenlänge. Auf nicht zu großen Skalen ist die Rotverschiebung also proportional zur Entfernung, die Proportionalitätskonstante ist die Hubblekonstante H_0 . Ihr Wert beträgt $H_0 = 67 \pm 10$ km/s, wobei die Fehlerangabe systematische Abweichungen unterschiedlicher Bestimmungsmethoden mitberücksichtigt.

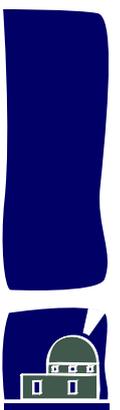
(ii) Die nahezu vollständig isotrope (in allen Richtungen gleiche) kosmische Hintergrundstrahlung, die das Spektrum eines Planckschen Strahlers der Temperatur $2,7277 \pm 0.002$ K aufweist.

(iii) Das beobachtete Häufigkeitsverhältnis der leichten Elemente Wasserstoff, Helium und Lithium, sowie ihrer Isotope, die sich mit heutigen teilchen- und kernphysikalischen Modellen durch eine "Kondensation" von Nukleonen zu Atomkernen kurz nach dem Urknall bei einer Temperatur von etwa 10^9 K erklären lässt ("primordiale Elementsynthese").

Alle drei "Säulen" sind Ergebnisse des 20. Jahrhunderts. Sie lassen sich durch ein Modell des Universums beschreiben, in dem es sich durch Expansion und Abkühlung aus einem sehr viel kompakteren und heißeren Ausgangszustand entwickelt: Die sogenannte Urknall-Theorie, deren Grundgedanke zuerst 1939 von G. Gamow und G. Lemaitre formuliert wurde.

Wäre die Expansion des Universums seit seinem Ursprung unbeschleunigt erfolgt, so lieferte $1/H_0 = 15 \pm 2$ Gyr direkt sein Alter ("Weltalter"). Wenn auch diese Voraussetzung nicht erfüllt ist, so liefert dieser Wert doch eine erste Abschätzung des Weltalters. Über die Veränderung von H mit der Entwicklung des Universums, also die Beschleunigung der Expansion ist derzeit noch wenig bekannt.

Heutige Modelle der primordialen Elementsynthese (s.o.), insbesondere das beobachtete Häufigkeitsverhältnis der beiden Wasserstoffisotope zeigen, dass "baryonische" Materie (= aus Protonen und Neutronen bestehend) weniger als 20% der aus dynamischen Messungen bestimmten Massen im Universum ausmachen. Diese dynamischen Messungen beruhen auf einer Analyse der Geschwindigkeitsverteilungen in Galaxien (s. Abschnitt 2), Galaxienhaufen und Galaxien-Superhaufen (= "Haufen von Haufen" von Galaxien). Zusammenfassend zeigen diese Ergebnisse, dass der Großteil der Materie des Universums "dunkel" und nicht-baryonisch ist.



Seit den 1990er Jahren haben Präzisionsmessungen geringfügige Inhomogenitäten in der Kosmischen Hintergrundstrahlung aufgezeigt. Diese Inhomogenitäten haben eine Amplitude von etwa 0.001% und sind gewissermassen ein präzises Echo der sehr kleinen, aber eben nicht verschwindenden Ungleichmässigkeiten der Materieverteilung im sehr frühen Universum.

Nach unserem heutigen Verständnins lässt sich der Zeitpunkt der Entstehung der Hintergrundstrahlung genau bestimmen. Es geschah etwa 300 000 Jahre nach dem Urknall bei einer Temperatur von etwa 3000 K, als Ionen und Elektronen neutrale Atome bildeten. Dadurch wurde die Materie weitgehend von der elektromagnetischen Hintergrundstrahlung "abgekoppelt", da kaum noch freie Elektronen fuer die Wechselwirkung mit Photonen zur Verfügung standen.

Die sogenannte Strukturbildung beschreibt die Entwicklung der großräumigen Strukturen des heutigen Universums aus den schwachen Inhomogenitäten des frühen Universums. Diese frühen Ungleichmässigkeiten der Materieverteilung haben als Keime für die heutigen grossräumigen Strukturen im Universum gedient. Die Bildung der heutigen "kontrastreichen" Strukturen aus den nur "kontrastarmen" frühen Inhomogenitäten erfordert das Vorhandensein nicht-baryonischer, kühler dunkler Materie im Universum; "kühl" bedeutet hier, dass sich die Teilchen mit nicht-relativistischen Geschwindigkeiten bewegen. Derzeit kann nur diese Annahme eine gravitative Kontraktion der Grobstrukturen des Universums erklären, die hinreichend "schnell", nämlich im Weltalter erfolgt ist.

Literatur / Internet-Quellen

- F. Melia, H. Falcke, The black hole at the galactic center,
Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics, 2001
- M. S. Turner, J. A. Tyson, Cosmology at the millenium,
Reviews of modern physics, 1999
- A. Unsöld, B. Baschek; Der neue Kosmos, 7. Auflage (Springer Verlag)

<http://www.obspm.fr/planets>

