

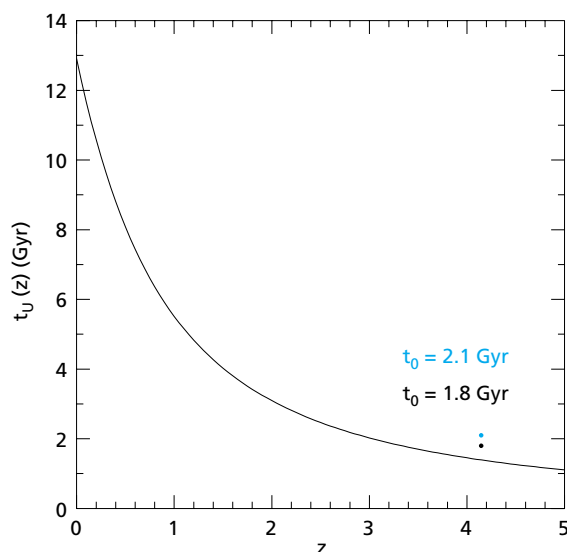
Ein Quasar älter als das Universum?

Zusammenfassung: Der Quasar APM 08279+5255 mit einer Rotverschiebung von $z = 3,91$ weist ein Häufigkeitsverhältnis zwischen Eisen und Sauerstoff vom etwa dreifachen Wert unserer Sonne auf ($\text{Fe}/\text{O} \approx 3$). Ein Objekt mit einem solchen Häufigkeitsverhältnis kann nach momentanem Verständnis der Sternenevolution nur in einem Zeitraum von ~ 2 -3 Milliarden Jahren entstehen. Aufgrund dieses hohen Alters ist es für eine ganze Palette von kosmologischen Modellen inklusive dem momentan favorisierten sog. Λ CDM-Modell nicht möglich, diesen Quasar unterzubringen, falls für die Hubble-Konstante H_0 und die Materiedichte Ω_m Werte angenommen werden, die mit dem kosmischen Mikrowellenhintergrund und der großräumigen Struktur im Universum konsistent sind. Die in diesem Artikel vorgestellten Ergebnisse könnten darauf hindeuten, daß die Kosmologie möglicherweise wieder mit einer „Alterskrise“ konfrontiert wird. Dazu müßte dieses Beispiel aber auch an weiteren Quasaren bestätigt werden.

Einleitung

Nach konventioneller Vorstellung sind Quasare (Quasi-stellare Objekte, QSO) hochenergetische Zentren weit entfernter Galaxien.¹ Aufgrund ihrer relativ großen scheinbaren Helligkeit gelten sie angesichts ihrer enormen Entfernung als die hellsten Objekte im Universum. Da die Lichtgeschwindigkeit begrenzt ist, braucht das Licht dieser QSO sehr lange, bis es die Erde erreicht. Aus diesem Grund sehen wir die QSO nicht in ihrem heutigen Zustand, sondern wie sie aussahen, als das Licht vor langer Zeit von ihnen ausstrahlte. Je weiter man also in das Universum hinaussieht, desto weiter kann man zeitlich zurückblicken.

Abb. 1: Die schwarze Kurve stellt das Modellalter $t_U(z)$ des sogenannten Λ CDM-Modells in Abhängigkeit der Rotverschiebung z dar. Für $z = 0$ zeigt die Kurve das heutige Modellalter des Universums. Für zunehmende Rotverschiebung z wird das Modellalter immer kleiner. Der blaue Punkt entspricht dem Modellalter $t_O(z = 3,91)$ eines QSO bei der Rotverschiebung $z = 3,91$ und der rote Punkt seiner unteren Altersschranke (siehe Text). Damit der QSO im dargestellten kosmologischen Modell untergebracht werden könnte, müßten sich die Punkte (oder mindestens der rote Punkt) unterhalb der Kurve befinden.



Die Rotverschiebung einer Galaxie ist die relative Frequenzverschiebung ihres Spektrums und wird mit einer dimensionslosen Zahl z angegeben. Je größer z , desto höher die Rotverschiebung. Es gehört zu den Grundlagen der Urknall-Kosmologie, daß die Rotverschiebung z mit der Distanz D der Galaxien zunimmt, was als Hinweis auf eine Expansion des Universums gedeutet wird. Dieses Verständnis soll der folgenden Diskussion zugrunde gelegt werden. Der Zusammenhang zwischen Rotverschiebung und Distanz läßt sich für die verschiedenen kosmologischen Modelle theoretisch herleiten und als Funktion $D(z)$ ausdrücken.² $D(z)$ hängt i.A. von den gewählten kosmologischen Parametern ab und ist demnach je nach Kosmologie verschieden. Auf ähnliche Weise läßt sich auch für jede Rotverschiebung z (und damit Distanz) berechnen, wie alt das Universum war, als das Licht, das wir heute beobachten, aus dieser Entfernung abstrahlte. Dieses Modellalter läßt sich als Funktion $t_U(z)$ ausdrücken (Abb. 1). Weiter bezeichnen wir das Alter eines bestimmten Objektes bei der Rotverschiebung z , d.h. die Zeitspanne von seiner Bildung bis zum Zustand, in welchem wir es heute beobachten, als $t_O(z)$.³ Da wie $D(z)$ auch die Funktion $t_U(z)$ vom gewählten kosmologischen Modell abhängt, kann man durch Altersabschätzungen eines Objektes $t_O(z)$ im Prinzip die verschiedenen kosmologischen Modelle testen. Ist nämlich bei dieser Rotverschiebung das Modellalter dieses Objektes $t_O(z)$ größer als das Modellalter des Universums $t_U(z)$, ergibt sich ein Widerspruch innerhalb des betrachteten Modells, da das Alter eines Objektes nicht größer sein kann als das Alter des Universums. Damit kann das Modell dann ausgeschlossen werden.

APM 08279+5255 – ein alter Quasar mit hoher Rotverschiebung

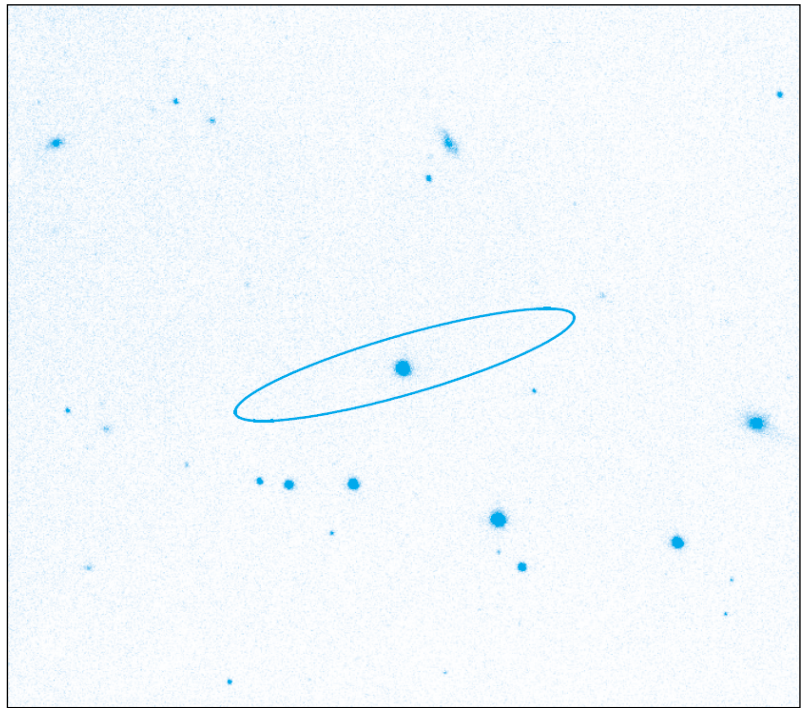
Genau dieser Test wurde mit dem QSO APM 08279+5255 (Abb. 2) durchgeführt. Es handelt sich dabei um einen besonders hellen QSO bei einer Rotverschiebung von $z = 3,91$ (IRWIN et al. 1998). Nach dem aktuellen Standardmodell war das Universum bei dieser Rotverschiebung etwa 1,6 Gyr (Gigajahre, Milliarden Jahre) alt (und damit könnte auch der Quasar in dem Zustand, in welchem wir ihn heute beobachten, höchstens so alt sein, Abb. 1). Das Licht brauchte etwa 12 Milliarden Jahre, bis es uns erreichte. Der QSO befindet sich jedoch heute in einer Distanz von etwa 24 Milliarden Lichtjahren.² HASINGER et al. (2002) untersuchten diesen

QSO mit Hilfe des Röntgensatelliten XMM-Newton auf seine Metallizität (Anteil an Elementen schwerer als Helium).

In diesem Zusammenhang muß darauf hingewiesen werden, daß in der Astrophysik viele Größen nur in einem statistischen Sinn abgeschätzt werden können. Das bedeutet, daß man aufgrund einer Messung z.B. der Metallizität eines QSO keinen eindeutigen Wert zuweisen kann, sondern nur eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, die häufig durch den wahrscheinlichsten Wert mit zugehörigen Standardabweichungen angegeben wird. In unserem Fall wurde das Häufigkeitsverhältnis zwischen Eisen und Sauerstoff Fe/O anhand eines Modells mit Namen „absori“ abgeschätzt, das ein Ergebnis von $3,3 \pm 0,9$ in Einheiten des solaren Wertes lieferte. Das bedeutet, das Fe/O -Verhältnis dieses QSO ist gut dreimal so hoch wie bei unserer Sonne. Allerdings ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Fe/O -Verhältnisses stark asymmetrisch. Während höhere Werte von Fe/O leicht möglich sind, scheint eine Metallizität von $\text{Fe}/\text{O} \approx 2$ so gut wie ausgeschlossen (HASINGER et al. 2002, FRIÇA et al. 2005).

Ein hoher Wert wie $\text{Fe}/\text{O} \approx 3$ kam überraschend. Schließlich gilt die Metallizität einer Galaxie bzw. eines QSO als wichtiger Anhaltspunkt für ihre Altersabschätzung. Nach konventionellem Verständnis wird eine Galaxie im Laufe ihrer kosmischen Entwicklung reicher an schweren Elementen, die durch die entsprechende Sternentwicklung in mehreren Sternenerationen geliefert werden. Allerdings kann die absolute Menge schwerer Elemente einer Galaxie nicht direkt mit ihrem Alter in Verbindung gebracht werden, da dieses auch von der Rate der Sternbildung abhängt (FRIÇA et al. 2005). Ist die Sternbildungsrate sehr hoch, so kann auch ein relativ junges Objekt eine hohe Metallizität im Vergleich mit unserer Sonne aufweisen. Auf diese Weise kann erklärt werden, warum gewöhnlich auch sehr stark rotverschobene QSO beobachtet werden, die reich an schweren Elementen sind, obwohl es sich entsprechend ihrer Entfernung um relativ junge Objekte handeln muß.

Häufigkeitsverhältnisse von schweren Elementen sind dagegen bessere Altersindikatoren. Anders als absolute Werte hängen diese nicht stark von bestimmten Modellparametern und den Details der Sternbildungsgeschichte ab. Steht α für eines der Elemente O, Ne, Mg, Si oder S, so können besonders die Fe/α -Verhältnisse (in Einheiten des solaren Wertes) für die Altersabschätzungen von Galaxien verwendet werden. Im Gegensatz zu Fe, das in Supernovae vom Typ Ia in langen Zeiträumen ($\approx 0,3\text{--}1$ Gyr) gebildet wird, werden die α -Elemente größtenteils in Supernovae vom Typ II in relativ kurzen Zeiträumen ($\approx 0,1$ Gyr) gebildet. Eine grobe Abschätzung zeigt, daß ein Verhältnis von $\text{Fe}/\alpha \approx 1$ wie wir es in der Sonne vorfinden, demnach auf eher längere Zeiträume hinweist, während ein Verhältnis $\text{Fe}/\alpha < 1$ eher kürzere



Zeiträume nahelegt, da die Sternbildung offensichtlich durch Supernovae vom Typ II dominiert war. Ein Verhältnis $\text{Fe}/\alpha > 1$ deutet schließlich darauf hin, daß die Galaxie wahrscheinlich älter als 1 Gyr ist (FRIÇA et al. 2005). Um jedoch das genaue Alter abzuschätzen, muß man die Evolution des QSO an einem Modell numerisch simulieren.

Das Modellalter von APM 08279+5255 wurde zuerst von KOMOSSA & HASINGER (2002) auf ~ 3 Gyr geschätzt. Das Modell, das sie für diese Abschätzung verwendeten, basiert auf der Bildung von elliptischen Galaxien. Es weist allerdings einige Schwächen auf und hat dabei die Tendenz, gewisse Metalle überzuproduzieren (FRIÇA et al. 2005). FRIÇA et al. (2005) führten später eine eigene, unabhängige Abschätzung durch, die auf einem neueren chemodynamischen Modell beruht. Dieses chemodynamische Modell setzt ein einzelnes kugelsymmetrisches Halo aus Dunkler Materie voraus, in welchem sich Gas befindet, das zu Beginn nur aus Wasserstoff und Helium besteht. Dieses Gas fällt dann unter der Schwerkraft des Halos zum Zentrum hin und formt dadurch laufend Sterne. Für die Modellrechnung wurde dieses kugelsymmetrische Halo in verschiedene kugelsymmetrische Unterbereiche aufgeteilt, und in jedem dieser Unterbereiche wurde die hydrodynamische Evolution des Gases numerisch berechnet. Die Evolution der Elemente kommt zustande, indem sich Sterne aus dem interstellaren Gas formen und danach Gas angereichert mit schweren Elementen an das interstellare Gas zurückgeben. Es wurde dabei angenommen, daß die Sterne entweder als Supernovae (vgl. Abb. 3) oder Planetarische Nebel (vgl. Abb. 4) „sterben“. Mit diesem Modell erhielten FRIÇA et al. (2005) ein etwas geringeres Alter des QSO von etwa 2,1 Gyr.

Abb. 2: In der Ellipse befindet sich der QSO APM 08279+5255. (Aus IRWIN et al. 1998, Abdruck mit Erlaubnis der AAS)

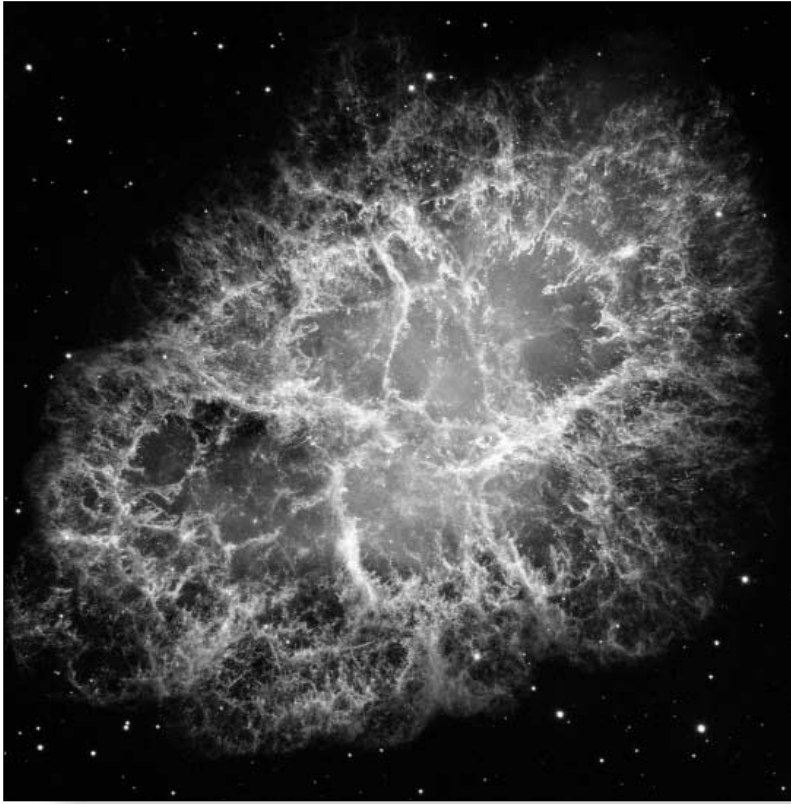


Abb. 3: Der Krebsnebel (im Bild) ist aus einer Supernovaexplosion entstanden, die vor etwa 1000 Jahren stattgefunden hat. Sie wurde im Jahre 1054 von Chinesischen Astronomen aufgezeichnet. Durch Supernovae werden schwere Elemente wie Sauerstoff oder Eisen, die sich in Sternen gebildet haben, an das interstellare Medium abgegeben. Auf diese Weise nimmt eine Galaxie oder ein QSO an Metallizität zu. (NASA)

Dieser Abschätzung lag jedoch das Verhältnis $\text{Fe}/\text{O} \sim 3$ zugrunde. Sollte das richtige Verhältnis aufgrund statistischer Unsicherheiten stattdessen aber nur $\sim 2,5$ betragen, wäre der QSO noch 1,8 Gyr alt. Dies soll im folgenden als eine untere Altersschranke verwendet werden.

Diskussion verschiedener kosmologischer Modelle

Da ein Objekt nicht älter sein kann als das Alter des Universums bei der entsprechenden Rotverschiebung, lassen sich nun bemerkenswerte Folgerungen für eine Reihe von kosmologischen Modellen gewinnen. FRIAÇA et al. (2005) führten hierzu eine Analyse durch, in der sie fünf verschiedene kosmologische Modelle prüften: 1. Das flache Λ CDM-Modell. Dieses wird dominiert von Dunkler Materie und der kosmologischen Konstante Λ (einfachste Form der Dunklen Energie) und ist das momentan favorisierte kosmologische Modell (Konkordanz-Modell). 2. Das verallgemeinerte Chaplygin-Gas-Modell. 3. und 4. Zwei Modelle mit einer komplizierteren Struktur der Dunklen Energie. 5. Ein fünfdimensionales Brane-world Szenario⁴.

Um diese Analyse durchzuführen, wurden gewisse Werte für die Hubble-Konstante H_0 und die heutige Materiedichte Ω_m angenommen.⁵ Im Hubble Space Telescope Key Project wurde über eine Kalibrierung von Cepheiden die Hubble-Konstante zu $H_0 = 72 \pm 8 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ bestimmt (FREEDMAN et al. 2001). Grundsätzlich gilt, je klei-

ner H_0 desto älter das Universum. Um ein möglichst hohes Alter des Universums zu ermöglichen, nahmen FRIAÇA et al. (2005) darum den Wert $H_0 = 64 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ an, was eine Standardabweichung unter dem wahrscheinlichsten Wert liegt. Für die Materiedichte wurde $\Omega_m = 0,27$ angenommen. Dies entspricht dem wahrscheinlichsten Wert, der aus einer statistischen Analyse des kosmischen Mikrowellenhintergrundes bestimmt wurde, dessen Daten der Satellit WMAP lieferte (SPERGEL et al. 2003). Allerdings wurden bei dieser Analyse auch Daten der großräumigen kosmischen Struktur einbezogen. Die großräumige Struktur im Universum wird gewöhnlich anhand von sogenannten Galaxien-Surveys untersucht. Das sind Beobachtungsprojekte, die systematisch ein gewisses Gebiet am Himmel abdecken und davon beispielsweise Rotverschiebungskarten der Galaxien erstellen. Anhand statistischer Untersuchungen solcher Galaxienverteilungen im Universum lassen sich auch Rückschlüsse auf kosmologische Parameter ziehen. Am effektivsten sind allerdings Analysen, bei denen Daten des kosmischen Mikrowellenhintergrundes und der großräumigen Struktur kombiniert werden. Für die oben angegebene WMAP-Analyse wurden z.B. Daten der 2dF Galaxy Redshift Survey (2dFGRS) einbezogen. Berücksichtigt man stattdessen die Sloan Digital Sky Survey (SDSS), so wird Ω_m sogar noch etwas höher (TEGMARK et al. 2004). Für den Parameterwert $\Omega_m = 0,27$ (und höhere Werte) läßt sich nun leicht zeigen, daß sämtliche der fünf oben erwähnten kosmologischen Modelle mit einem QSO-Alter von 2,1 Gyr unvereinbar sind. Dies trifft sogar für die untere Altersschranke von 1,8 Gyr zu. Wird für die Hubble-Konstante schließlich sogar der sehr niedrige Wert $H_0 = 58 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ angenommen, um das Alter des Universums noch einmal zu erhöhen, so ist ein QSO-Alter von 2,1 Gyr immer noch für alle Modelle zu viel.

FRIAÇA et al. (2005) machten noch eine weitere Abschätzung. Nimmt man anstelle von $\Omega_m = 0,27$ den niedrigeren Wert $\Omega_m = 0,23$ an, so werden unter der Annahme einer sehr niedrigen Hubble-Konstante $H_0 = 58 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ das Λ CDM-Modell und die anderen Modelle mit Dunkler Energie dann doch kompatibel mit einem QSO-Alter von 2,1 Gyr. Für höhere Werte der Hubble-Konstante beinhalten sonst auch in diesem Fall alle fünf Modelle ein zu junges Alter für den QSO. FRIAÇA et al. (2005) weisen jedoch darauf hin, daß ein Wert von $\Omega_m = 0,23$ eine Standardabweichung unterhalb des besten Wertes von SPERGEL et al. (1993) liege, die eine Kombination der WMAP- und 2dFGRS-Daten verwendeten. Allerdings lag zu dieser Zeit noch nicht das abschließende Datenset der 2dFGRS vor. Dieses ist jedoch inzwischen verfügbar und liefert einen wahrscheinlichsten Wert für die Materiedichte von $\Omega_m = 0,23$ (COLE et al. 2005). In diesem Punkt unterscheiden sich die Ergebnisse der bei-

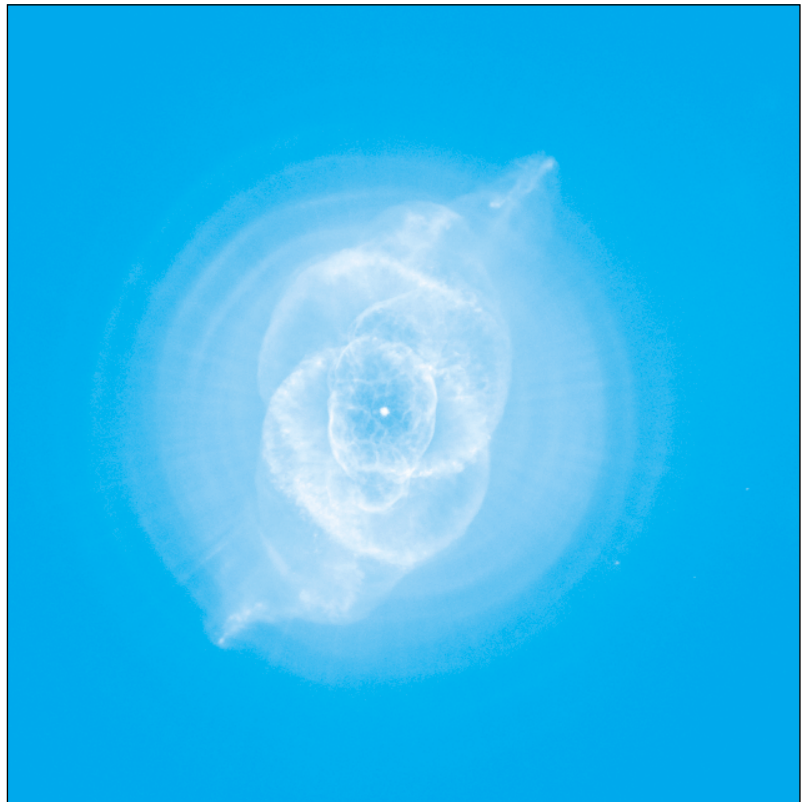
den großen Galaxien-Surveys SDSS und 2dFGRS, wobei sie allerdings innerhalb einer Standardabweichung miteinander vereinbar sind. COLE et al. (2005) sprechen ihre niedrige Schätzung der Materiedichte gegenüber früheren Analysen auch explizit an und bemerken, daß dafür im Vergleich mit der früheren Analyse die Hubble-Konstante automatisch größer sei und nun einen wahrscheinlichsten Wert von $H_0 = 77 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ habe. Wenn also ein niedriger Wert von Ω_m nur auf Kosten einer höheren Hubble-Konstante möglich ist, können somit auch die Parameterwerte von 2dFGRS insgesamt die Altersdiskrepanzen nicht relativieren.

JAIN & DEV (2005) führten eine ähnliche Analyse wie FRIÇA et al. (2005) durch, indem sie 4 weitere Dunkle Energie-Modelle testeten. Neben dem QSO APM 08279+5255 wurden für diese Analyse auch noch weitere Galaxien berücksichtigt. JAIN & DEV (2005) kamen im wesentlichen zu denselben Ergebnissen wie FRIÇA et al. (2005). Während die zusätzlichen Galaxien, die neben APM 08279+5255 berücksichtigt wurden, unter der Annahme von $\Omega_m = 0,27$ und $H_0 = 64 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ den Parameterraum für ein bestimmtes Modell tatsächlich einengten, konnte der QSO APM 08279+5255 in keinem der diskutierten Modelle untergebracht werden. Dies änderte sich auch nicht, wenn für die Materiedichte der niedrigere Wert $\Omega_m = 0,23$ angenommen wurde.

Eine ganze Palette von kosmologischen Modellen inklusive das momentan favorisierte Konkordanz-Modell ist offenbar nicht in der Lage, den Quasar aus Altersgründen unterzubringen.

In der bisherigen Diskussion wurde noch nicht berücksichtigt, daß der Zeitraum vom Urknall bis zur anfänglichen Bildung von Galaxien zum Modellalter $t_0(z)$ des untersuchten Objekts noch hinzugegerechnet werden müßte. Eine Abschätzung dieses Zeitraums beläuft sich auf $\sim 0,4 \text{ Gyr}$ (z.B. NAVABI & RIAZI 2003), ist aber stark modellabhängig. Angesichts einer solchen zusätzlichen Zeitspanne verschärft sich die oben diskutierte Altersdiskrepanz noch zusätzlich.

Die Diskussion kann wie folgt zusammengefaßt werden: Nimmt man für die Hubble-Konstante H_0 und die Materiedichte Ω_m numerische Werte an, die aus verschiedenen, unabhängigen Untersuchungen innerhalb des Standardmodells gewonnen wurden und miteinander kompatibel sind, so ist offenbar eine ganze Palette von kosmologischen Modellen inklusive das momentan favorisierte Konkordanz-Modell nicht in der Lage, den QSO APM 08279+5255 aus Altersgründen unterzubringen.



Kommentar

Die Altersabschätzung von Galaxien bzw. QSO hängt relativ stark vom verwendeten Entwicklungsmodell für die Galaxien bzw. QSO ab. Darum müssen die angegebenen Modellalter mit einer gewissen Vorsicht betrachtet werden. Allerdings haben FRIÇA et al. (2005) mit einer unabhängigen Methode die Größenordnung der Altersschätzung von KOMOSSA & HASINGER (2002) bestätigt. Sie schreiben zudem: „A highly suprasolar value of the Fe/O abundance ratio for a QSO is a strong evidence that the QSO is old“ (Übers.: „ein Wert des Fe/O-Häufigkeitsverhältnisses, das weit über dem solaren Wert liegt, ist ein starkes Argument, daß der QSO alt ist“).

Welche Konsequenzen können nun aus diesen Analysen gezogen werden? Es soll betont werden, daß die Urknallkosmologie durch diesen einen QSO nicht widerlegt wird. Dies liegt einerseits daran, daß die Abschätzung vieler astrophysikalischer Parameter (z.B. Metallizität) mit mehr oder weniger hohen statistischen Unsicherheiten behaftet ist. Aufgrund des statistischen Charakters dieser Unsicherheiten kann man insbesondere nie gänzlich ausschließen, daß in seltenen Fällen der wirkliche Wert eines Parameters vom wahrscheinlichsten Wert seiner Abschätzung stark abweicht. Doch selbst falls das gefundene Resultat durch weitere Untersuchungen an APM 08279+5255 bestätigt und auf weitere Galaxien ausgedehnt werden sollte (s.u.), hat die Erfahrung andererseits gezeigt, daß es bisher der Urknallkosmologie immer gelungen

Abb. 4: „Abgebildet ist ein planetarischer Nebel mit Namen „Katzenauge“. Planetarische Nebel haben nichts mit Planeten zu tun, sondern entstehen, wenn ein sonnenähnlicher Stern seine äußere Hülle abstößt. Auf diese Weise entstehen faszinierende Nebel mit schweren Elementen, die somit an das interstellare Medium abgegeben werden. In der Mitte des Nebels sieht man den Kern des ursprünglichen Sterns. (NASA)

ist, sich durch geeignete Modifikationen der Stringenz unerwarteter Beobachtungen zu entziehen. In dieser Hinsicht ist das Urknallmodell ein typisches Paradigma, dessen „harter Kern“ bisher erfolgreich durch einen „Schutzgürtel“ aus Theorien und Hilfhypothesen geschützt wurde.

Allerdings könnten die in diesem Artikel vorgestellten Ergebnisse darauf hindeuten, daß die Kosmologie möglicherweise wieder mit einer „Alterskrise“ konfrontiert wird. Vor einiger Zeit hatte man ähnliche Probleme mit dem Alter von Kugelsternhaufen in unserer kosmischen Umgebung, die offenbar älter waren als das Modellalter der damals favorisierten Kosmologie. Dieser Widerspruch konnte allerdings aufgelöst werden (CHABOYER et al. 1998).

Es kann in Aussicht gestellt werden, daß es aufgrund der spektralen Auflösung und Empfindlichkeit des zukünftigen Röntgensatelliten XEUS bald möglich sein wird, die Metallizität von APM 08279+5255 weiter zu überprüfen und in dieser Hinsicht noch weit mehr Galaxien bzw. QSO zu untersuchen (KOMOSSA & HASINGER 2002). Sollten die in diesem Artikel vorgestellten Ergebnisse bestätigt werden, wird es wohl unvermeidlich, durch die Einführung neuer, freier Parameter das momentan favorisierte Modell zu modifizieren. Bislang deutet sich dafür aber noch keine Möglichkeit an.

Christian Knobel

Anmerkungen

- ¹ Auf einige kontroverse Aspekte bezüglich der Interpretation von Quasaren und speziell deren Rotverschiebung wurde in KNOBEL (2004) hingewiesen. Hier soll jedoch die Standardinterpretation der QSO vorausgesetzt werden, um die Konsistenz innerhalb des Standardmodells der Kosmologie zu gewährleisten.
- ² Unter der Distanz D zu einer Galaxie versteht man die reine räumliche Distanz zum gegenwärtigen Zeitpunkt (engl. „comoving distance“). Diese Distanz ist jedoch aus kosmologisch konzeptionellen Gründen nicht direkt mit der Reisezeit des Lichtes dieser Galaxie in Verbindung zu bringen. Die Reisezeit t des Lichtes, das heute die Erde erreicht, betrug nicht D/c (c = Lichtgeschwindigkeit). Dies liegt daran, daß sich das Universum nach dem Standardmodell kontinuierlich ausgedehnt hat und zu einem früheren Zeitpunkt kleiner war. Die wirkliche Reisezeit des Lichtes ist demnach kleiner als D/c , da das Licht in früherer Zeit quasi schneller vorwärts kam. Die Größe D/c hat nur eine Bedeutung für Galaxien geringer Entfernung, für die das Hubble-Gesetz gültig ist (siehe Fußnote 5). Für den

QSO APM 08279+5255 ist das Hubble-Gesetz aber aufgrund der hohen Rotverschiebung längst nicht mehr gültig.

- ³ Da es zwischen der Rotverschiebung und der Distanz eines Objektes eine eindeutige universelle Beziehung gibt, wird gewöhnlich die Redeweise verwendet, ein Objekt mit der Rotverschiebung z befinde sich „bei der Rotverschiebung z “.
- ⁴ Brane-world Szenarien entstammen fundamentalen Konzepten aus der Teilchenphysik und haben zum Ziel, alle vier Grundkräfte zu vereinheitlichen. Sie haben gewisse Ähnlichkeiten mit String-Theorien. Um eine intuitive Anschauung zu bekommen, könnte man sich vorstellen, daß wir auf einer dreidimensionalen „Membran“ leben, die in einem höherdimensionalen Raum eingebettet ist.
- ⁵ Die Hubble-Konstante geht in das Hubble-Gesetz ein, das für kleine Rotverschiebungen z eine lineare Beziehung zwischen Distanz und Rotverschiebung beschreibt: $D = c/H_0 z$. Die Materiedichte wird in Einheiten der kritischen Dichte $\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$ angegeben, d.h. $\Omega_m = \rho_m/\rho_c$, wobei ρ_m die Materiedichte im Universum bezeichnet und G die Newtonsche Gravitationskonstante.

Literatur

- CHABOYER B, DEMARQUE P, KERNAN PJ & KRAUSS LM (1998) The age of globular clusters in light of HIPPARCOS: Resolving the age problem? *Astrophys. J.* 494, 96-110.
- COLE S et al. (2005) The 2dF Galaxy Redshift Survey: power-spectrum analysis of the final data set and cosmological implications. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 362, 505-534.
- FREEDMAN WL et al. (2001) Final results from the Hubble Space Telescope project to measure the Hubble constant. *Astrophys. J.* 553, 47-72.
- FRIÇA ACS, ALCANIZ JS & LIMA JAS (2005) An old quasar in a young dark energy-dominated universe? *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 362, 1295-1300.
- HASINGER G, SCHARTEL N & KOMOSSA S (2002) Discovery of an ionized Fe K edge in the $z = 3.91$ broad absorption line quasar APM 08279+5255 with XMM-Newton. *Astrophys. J.* 573, 77-80.
- IRWIN MJ, IBATA RA, LEWIS GF & TOTTEN EJ (1998) APM 08279+5255: An ultraluminous broad absorption line quasar at a redshift $z = 3.87$. *Astrophys. J.* 505, 529-535.
- JAIN D & DEV A (2005) astro-ph/0509212
- KNOBEL C (2004) Anomale Rotverschiebung – Herausforderung für das Standardmodell der Kosmologie? *Stud. Int. J.* 11, 20-28.
- KOMOSSA S & HASINGER G (2002) The X-ray evolving universe: (ionized) absorption and dust, from nearby Seyfert galaxies to high-redshift quasars. *Proceedings of the workshop “XEUS – studying the evolution of the hot universe”*. Edited by HASINGER G, BOLLER T & PARMER AN, MPE Report 281, 2003, p. 285.
- NAVABI AA & RIAZI N (2003) Is the age problem resolved? *J. Astroph. Astr.*, 24, 3-10.
- SPIRGEL DN et al. (2003) First-year Wilkinson Microwave Anisotropy probe (WMAP) observations: Determination of cosmological parameters. *Astrophys. J. Suppl.* 148, 175-194.
- TEGMARK et al. (2004) Cosmological parameters from SDSS and WMAP. *Phys. Rev. D.* 69, 103501.