

wahrscheinlich noch mindestens 30 Prozent des Wasserstoffs des intergalaktischen Mediums in atomarer Form vorzufinden sind.

Die exakte Rotverschiebung $z = 7,54$ von J1342+0928 ließ sich durch die Emissionslinie des einfach ionisierten Kohlenstoffs bestimmen. Im Zusammenspiel mit der gleichzeitig beobachteten thermischen Emission von Staubeilchen ist die Präsenz von Kohlenstoff ein Hinweis auf eine bereits im frühen Universum stattfindende Produktion schwerer Elementen-

te. Als Kandidaten kommen zum Beispiel Kernkollaps-Supernovae oder Sterne der Population III in Frage, die es mit hoher Effizienz schaffen, schwerere Elemente zu erzeugen.

Hyper-Eddington-Akkretion

In weiteren Nachfolgebeobachtungen fand sich die Emissionslinie des einfach ionisierten Magnesiums, was auf ein zentrales Schwarzes Loch mit einer Masse von rund 800 Millionen Sonnenmassen hinweist. Es ist jedoch noch ungeklärt,

wie ein derart massereiches Schwarzes Loch in so kurzer Zeit entstehen kann. So kommt hier das so genannte Eddington-Limit ins Spiel: Akkretiert ein Objekt sehr viel Materie, so führt die damit einhergehende Leuchtkraftsteigerung zu einem Strahlungsdruck, der einen weiteren Materialtransport nach innen unterbindet und somit den Massezuwachs reguliert. Gilt diese Bedingung auch für die Entstehung dieser extrem massereichen Schwarzen Löcher, so muss bereits der Kondensationskeim des Schwarzen Lochs eine Masse von einigen tausend Sonnenmassen aufgewiesen haben. Es gibt jedoch auch Modelle, die unter bestimmten Umständen eine Überschreitung des Eddington-Limits zulassen: die so genannte Hyper-Eddington-Akkretion. Hätte das Schwarze Loch derartige Phasen durchlaufen, so wäre ein Anwachsen auf die hier beobachtete Masse auch in kürzerer Zeit möglich gewesen.

Offenbar sind viele der Aussagen über die Entwicklung von J1342+0928 noch spekulativ. Erst Beobachtungen mit leistungsfähigeren Teleskopen werden helfen, die Modelle zur Strukturentstehung des frühen Universums weiter zu verbessern. Dabei gilt es sich vor Augen zu halten, dass J1342+0928 tatsächlich erst der zweite entdeckte Quasar mit einer Rotverschiebung $z > 7$ ist, sich die Modelle also nur auf wenige Datenpunkte stützen können. Die Wissenschaftsgemeinde befindet sich hier also gerade einmal am Anfang, Licht ins Dunkel der Epoche der Reionisation zu bringen.

MARKUS SCHMALZL war Postdoc am Observatorium Leiden, Niederlande, bei Allegro, der ALMA Local Expertise Group, und ist jetzt Data Scientist bei der Firma cynora in Bruchsal.

ZUM NACHDENKEN

Hyper-Eddington-Akkretion



Die Existenz extrem massereicher Schwarzer Löcher im jungen Universum lässt sich mit herkömmlichen Mitteln nicht erklären. Ein begrenzender Faktor beim Wachstum ist der Strahlungsdruck: Größere Akkretionsraten haben auch einen höheren Strahlungsdruck zu Folge, der ab einem gewissen Maximum – dem Eddington-Limit – ein stärkeres Wachstum verhindert (siehe »Zum Nachdenken« in SuW 11/1988, S. 696).

Aufgabe 1: Im Fall des Eddington-Limits wird eine weitere Steigerung der Akkretionsrate durch die nach außen dringende Strahlung verhindert, die mit den Elektronen des ionisierten Gases in Wechselwirkung tritt. Die Strahlung speist sich aus der im Gravitationspotenzial freigesetzten Energie der nach innen strömenden Materie. Es gilt:

$$L_{\text{Edd}} = 4 \pi c G \sigma_T^{-1} m_H M_{\text{SL}} \quad (1)$$

a) Man forme Gleichung (1) derart um, dass sie mit der Sonnenleuchtkraft $L_{\odot} = 3,846 \cdot 10^{26} \text{ W}$ und der Sonnenmasse $M_{\odot} = 1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ skaliert. Die Lichtgeschwindigkeit ist $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, die Gravitationskonstante ist $G = 6,6743 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ und der klassische Thomson-Wirkungsquerschnitt ist $\sigma_T = 6,6525 \cdot 10^{-29} \text{ m}^2$. **b)** Man berechne das Eddington-Limit L_{Edd} für das bei $z = 7,54$ im $t_z = 690$ Millionen Jahre jungen Universum mit $M_{\text{SL}} = 7,8 \cdot 10^8 M_{\odot}$ schon extrem massereiche Schwarze Loch des Quasars J1342+0928. Man vergleiche mit der jet-

zigen bolometrischen Leuchtkraft von $L_{\text{bol}} = 4 \cdot 10^{13} L_{\odot}$.

Aufgabe 2: Man bestimme die Ausgangsmasse M_0 des Schwarzen Lochs unter der Maßgabe, dass die Akkretion ständig am Eddington-Limit erfolgte und das Wachstum bei einem Alter von $t_0 = 50$ Millionen Jahren begann. Eduardo Bañados und Kollegen (siehe Kurzbericht) verwenden die Gleichung:

$$M_{\text{SL}}(t) = M_0 \exp(-t/t_0), \quad (2)$$

wobei $t = t_z$ und $\exp \alpha = e^\alpha$. Sofern M_0 größer ist als rund $1000 M_{\odot}$, bleibt als Lösung nur die so genannte Hyper-Eddington-Akkretion. Bei ihr überwiegt der Gravitationsdruck äußerer Partien den inneren Strahlungsdruck.

Zusatzaufgabe: Bei einer Umwandlungsrate $\eta = 0,1$ von Materie zu Energie ist die Akkretionsrate $\dot{M}_{\text{Edd}} = dM/dt$ mit der Eddington-Leuchtkraft L_{Edd} verknüpft durch $\eta \dot{M}_{\text{Edd}} = L_{\text{Edd}}/c^2$. Letztere ist laut Gleichung (1), $L_{\text{Edd}} = \kappa M_{\text{SL}}$, von der Masse des Schwarzen Lochs abhängig. Man leite Gleichung (2) her und bestimme t_0 . AXEL M. QUETZ

Ihre Lösungen senden Sie bitte bis zum **9. März 2018** an: Redaktion SuW – Zum Nachdenken, Haus der Astronomie, MPIA-Campus, Königstuhl 17, D-69117 Heidelberg. Fax: 06221 528377. PDF: zumnachdenken@sterne-und-weltraum.de. Einmal im Jahr werden unter den erfolgreichen Lösern Preise verlost: siehe S. 101

Literaturhinweise

Bañados, E. et al.: An 800 Million Solar Mass Black Hole in a Significantly Neutral Universe at Redshift 7.5. In: Nature, doi:10.1038/nature25180 (2017).

Venemans, B. P. et al.: Copious Amounts of Dust and Gas in a $z = 7.5$ Quasar Host Galaxy. In: The Astrophysical Journal Letters 851:L8, 2017

W I S Didaktische Materialien:
www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1285848