



Quasar – ein aktiver galaktischer Kern:
In dieser künstlerischen Darstellung ist ein zentrales, extrem massereiches Schwarzes Loch von einer Akkretionsscheibe umgeben. Diesen inneren Kern umgibt ein Torus aus Molekülen und Staub.

NASA/JPL-Caltech

Der Quasar, das Lichtecho und die Standardkerze

W I S wissenschaft
in die schulen!

Lichtechos von Quasaren verraten Astronomen nicht nur etwas über deren innere Struktur, sondern ermöglichen auch eine neue Art der kosmischen Entfernungsmessung.

Mit den Entfernungen im Universum ist es so eine Sache. Sämtliche Quellen sind weit entfernt, aber wie weit ist weit? Nur weil ein Himmelskörper hell scheint, heißt das nicht, dass er tatsächlich näher ist als das vergleichsweise dunkle Exemplar direkt daneben. Stattdessen könnte das dunklere Himmelsobjekt einfach nur wirklich sehr viel leuchtstärker sein, dafür aber weiter entfernt. Denn das, was Astronomen auf der Erde direkt messen können, ist die scheinbare Helligkeit eines Objekts. Darüber, wie weit entfernt jenes Objekt ist, sagt diese scheinbare Helligkeit nichts aus. Um kosmische Distanzen zu bestimmen, benötigen Forscher daher eine andere Messgröße: die absolute Helligkeit. Sie ist ein Maß für die Leuchtkraft, die das Objekt tatsächlich vor Ort hat. Kennt man also die absolute Helligkeit, so lässt sich in Kombination mit der scheinbaren Helligkeit

die Entfernung eines Himmelskörpers vergleichsweise einfach berechnen.

Da aber eine direkte Messung der absoluten Helligkeit meist nicht möglich ist, behelfen sich Astronomen mit so genannten Standardkerzen. Das sind Himmelsobjekte, bei denen sich auf Grund anderer Eigenschaften auf die absolute Helligkeit schließen lässt und die deshalb wie eine Art kosmisches Lineal funktionieren. Ein Beispiel dafür sind Cepheiden (siehe SuW 11/2020, S. 26). Dabei handelt es sich um eine bestimmte Art veränderlicher Sterne, deren Leuchtkraft periodisch zu- und abnimmt. Diese Schwankungen erlauben Aufschlüsse über die absolute Helligkeit.

Ein weiteres Beispiel sind Supernovae vom Typ Ia, explodierende Weiße Zwerge in einem Doppelsternsystem (siehe SuW 3/2020, S. 30). Weil viele Weiße Zwerge auf die gleiche Art und Weise explodie-

ren, lassen sich die absolute Helligkeit und damit die Entfernungen zu diesen Supernovae relativ leicht bestimmen.

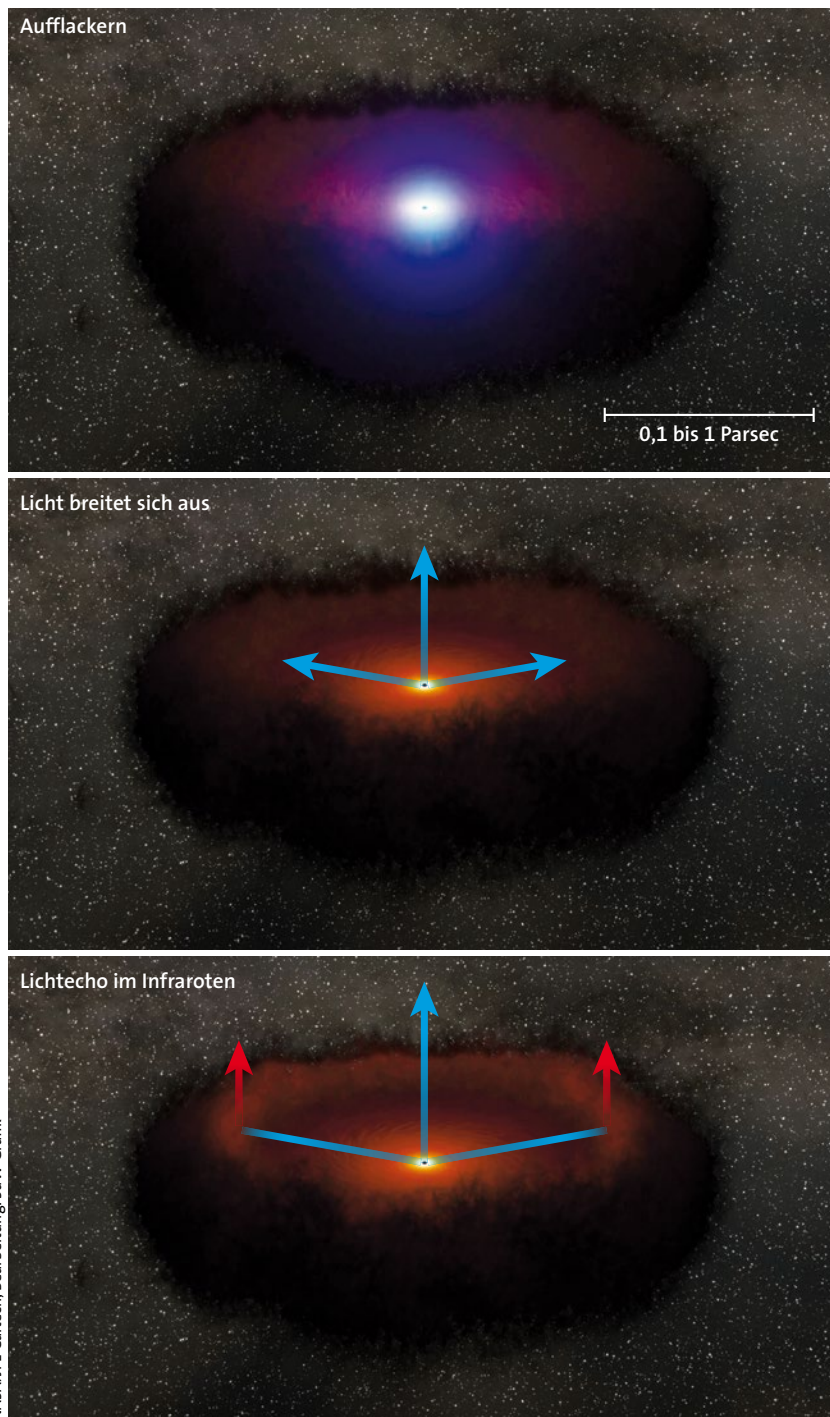
Die Quasar-Maschine

Nun wären natürlich weitere Standardkerzen immer schön. Wie wäre es zum Beispiel mit Quasaren? Einen Ansatz, wie das funktionieren könnte, haben Qian Yang und Yue Shen von der University of Illinois zusammen mit Kollegen im Fachmagazin »The Astrophysical Journal« aufgezeigt, beziehungsweise mit neuen Daten unterfüttert.

Bei einem Quasar handelt sich um einen aktiven galaktischen Kern (englisch: active galactic nuclei, AGN). In seinem Zentrum befindet sich ein extrem massereiches Schwarzes Loch. Umgeben ist dieses von einer Akkretionsscheibe, einer Scheibe aus Gas, das sich um das Schwarze Loch dreht, und aus dem Material früher

Lichtecho im Infraroten

In der Akkretionsscheibe um das massereiche Schwarze Loch des aktiven Kerns einer Galaxie (AGN) kommt es zu einem hellen Aufblitzen im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums (oben). Der Blitz breitet sich innerhalb des mehrere Lichtjahre großen Staubtorus aus (Mitte, blaue Pfeile). Nach der Lichtlaufzeit vom Zentrum bis zum Torus wird dessen Materie aufgeheizt und sendet nun seinerseits Infrarotstrahlung ab (unten, rote Pfeile). Gegenüber dem ursprünglichen Blitz erreicht uns die Infrarotstrahlung in einigen Quasaren um Jahre verzögert. Aus diesem Laufzeitunterschied lässt sich der mittlere Radius des Torus bestimmen.



NASA/JPL-Caltech; Bearbeitung: SuW-Grafik



Animation des Lichtechos:
suw.link/2104-Echo

oder später in es hineinstürzt. Die Scheibe kann man sich aus Materieringen zusammengesetzt denken, deren Temperatur mit wachsender Entfernung vom Zentrum immer mehr abnimmt. Umschlossen wird das Gebilde von einem relativ kalten Staubtorus (siehe »Quasar – ein aktiver galaktischer Kern«).

Echo am Staubtorus

Quasare sind extrem leuchtstark, wofür hauptsächlich die Akkretionsscheibe sorgt. Sie wird auf Grund der internen Reibung erhitzt und zum Leuchten angeregt. Fällt nun von außen zusätzlich Material auf diese Akkretionsscheibe, so wird sie abgebremst und die dabei freigesetzte Energie in Wärme und Strahlung umgewandelt – die Akkretionsscheibe leuchtet dann heller. Irdischen Astronomen erscheint dies so, als steigere der ganze Quasar seine Helligkeit. Die Ursache hierfür: Außer bei nahen Exemplaren und mit viel Mühe ist es nicht möglich, die Struktur eines Quasars räumlich aufzulösen. Tatsächlich erscheinen die allermeisten Quasare in irdischen Teleskopen auf Grund ihrer enormen Entfernungen als punktförmige Objekte. Das Licht vom Materieeinfall aber breitet sich in alle Richtungen aus, insbesondere auch in die Richtung des kühlen Staubtorus. Sobald es auf ihn trifft, erhitzt es ihn, und der Staubtorus sendet in der Folge Infrarotstrahlung aus. Das nennen Astronomen ein Lichtecho. Je nachdem, wie groß der Quasar und wie weit der Torus vom Zentrum entfernt ist, kann es Tage, Monate oder auch Jahre dauern, bis dieses Lichtecho erscheint (siehe »Lichtecho im Infraroten«).

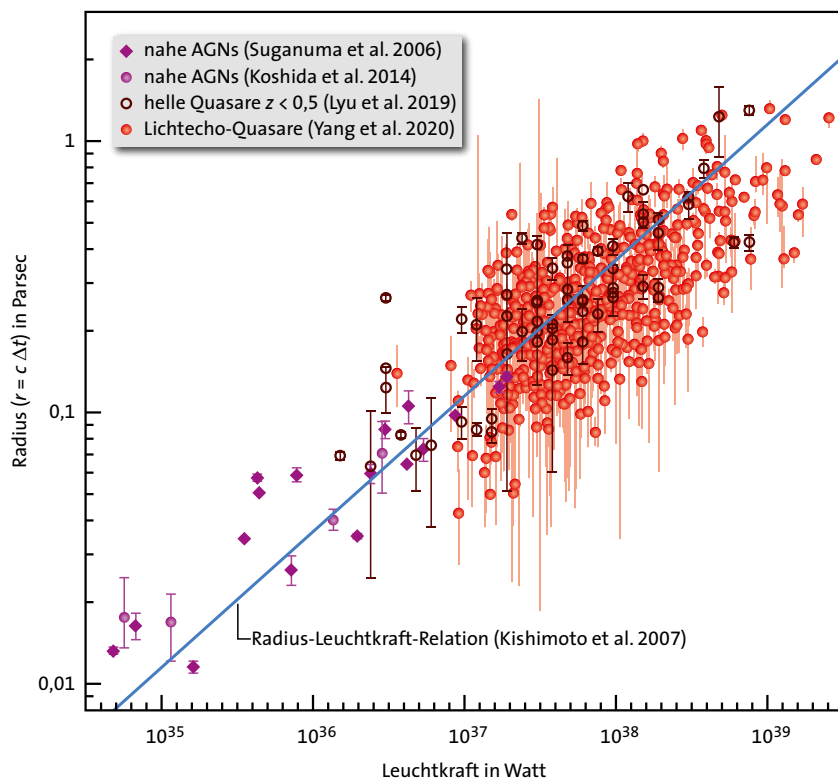
Ein neuer Distanzmesser?

Forscher haben diese Technik namens Reverberation Mapping bereits genutzt, um die Struktur der Quasare zu enthüllen. Stimmen ihre Vorstellungen über den Aufbau der Quasare tatsächlich mit Messungen aus Lichtechos überein?

Sie machten die aufregende Entdeckung, dass zwischen der Helligkeit der Quasare, die aus anderen Messungen bekannt war, und dem mittleren Abstand des Staubtorus zur zentralen Maschine ein Zusammenhang besteht: Demnach ist dieser Radius proportional zur Quadratwurzel der optischen Leuchtkraft des AGN (siehe »Torusgrößen und Quasarleuchtkräfte«).

Torusgrößen und Quasarleuchtkräfte

Über einen sehr großen Bereich von Leuchtkräften folgen die mittleren Radien der Staubtorus in Quasaren in diesem doppeltlogarithmischen Diagramm einem einfachen Zusammenhang ($1 \text{ Parsec} = 3,26 \text{ Lichtjahre}$). Die 598 roten Punkte gewannen die Forscher um Qian Yang aus Lichtechemessungen. Die wenigen anderen Messwerte stammen aus älteren Untersuchungen. Die blaue Linie stellt jene Proportionalität dar, die Makoto Kishimoto von der Kyoto Sangyo University und Kollegen im Jahr 2007 anhand von acht nahen Quasaren publizierten. Die Messunsicherheiten sind mitunter recht groß und bieten Raum für Verbesserungen. Aber wie man gut erkennen kann, wurde ein großer Bereich untersucht, in dem die Helligkeitsunterschiede der Quasare um einen Faktor 10 000 variieren.



Wenn das allgemein stimmte, wäre das großartig, was die Möglichkeit der kosmischen Distanzmessung betrifft. Denn dann könnten Forscher die Lichtechos beobachten und daraus die Entfernung der Quasare folgern. Das Vermessen der Lichtechos ist ein Wartespiel: Aufleuchten des Quasars im optischen Bereich, anschließend warten, bis ein ähnliches Aufleuchten im infraroten Bereich auftritt. Aus der Zeitdifferenz Δt ergibt sich mit $r_T = c \Delta t$ (c = Lichtgeschwindigkeit) der Radius r_T des Staubtorus. Auf Grund der gefundenen Korrelation könnte man somit direkt auf die absolute Helligkeit schließen. Zwar mag der Zusammenhang zunächst trivial klingen: je größer der Radius, desto heller der Quasar. Aber rein von den physikalischen Mechanismen her legt er nahe, dass sich Quasa-

re, ob groß oder klein, jung oder alt, sehr ähnlich verhalten – vergleichbar einigen Supernovae vom Typ Ia.

Ob das stimmt, haben die Forscher von der University of Illinois anhand einer ziemlich großen Stichprobe von fast 9258 Quasaren überprüft, von denen optische Aufnahmen existierten. Auch ihre Helligkeiten, beziehungsweise Entfernungen waren bereits bekannt. Das Licht dieser Quasare war zwischen 10,4 und 3,4 Milliarden Jahre bis zur Erde unterwegs, entsprechend ihren kosmologischen Rotverschiebungen zwischen 2 und 0,3. Der Beobachtungszeitraum in den Daten deckt einen Zeitraum von rund zwanzig Jahren ab. Aus diesen Informationen konnten die Forscher aber nur das erste Aufleuchten des Quasars im optischen Bereich erkennen.

Nun hieß es, in Aufnahmen des Infrarotweltraumteleskops NEOWISE nach den dazugehörigen Lichtechos zu suchen. Die Beobachtungsdaten deckten den Zeitraum von 2010 bis 2019 ab. So endeten die Forscher schließlich mit der großen Zahl von 587 Lichtechos weit entfernter Quasare. Teilweise betrug die Zeitverzögerung zehn Jahre, bis das entsprechende Infrarotsignal NEOWISE erreichte.

Ziel fast erreicht?

Die so erhaltenen Radien – also die Größe des jeweiligen Staubtorus – konnten die Forscher dann den bereits bekannten Helligkeiten gegenüberstellen, um die Korrelation zwischen Radius und Helligkeit zu testen. Und es ist etwas dran! Das scheint klar ersichtlich. Dies ist umso erstaunlicher, als dass es sich um völlig verschiedene Quasare in unterschiedlichen Entfernungen und voneinander abweichender Größen handelt. Allerdings fehlt den Quasaren eine Kleinigkeit, bis sie wirklich das Zeug zur Standardkerze haben: Noch ist diese Korrelation nicht ordentlich kalibriert. Die Forscher müssen also an dem Zusammenhang zwischen Torusgröße und Leuchtkraft noch etwas feilen, bis sie künftig anhand der AGN-Größe direkt auf deren absolute Helligkeit schließen können. Dann wäre es ziemlich einfach: Der aus dem Lichtecho gewonnene Radius lässt auf die absolute Helligkeit schließen und – kombiniert mit der scheinbaren Helligkeit – direkt auf die Entfernung.

Das gilt natürlich nicht für die Quasare aus der Stichprobe des vorliegenden Fachartikels – sie wurden ja schließlich für die Kalibrierung genutzt. Aber derzeit sieht es so aus, als könnten zumindest einige Quasare künftig standardmäßig ihre Entfernung verraten – mit Hilfe ihres Lichtechos.

FRANZISKA KONITZER studierte Physik und Astrophysik an der University of York und ist in München als Journalistin tätig.

Literaturhinweis

Yang, Q., Shen, Y.: Dust reverberation mapping in distant quasars from optical and mid-infrared imaging surveys. The Astrophysical Journal 900, 2020

WIS Didaktische Materialien:
www.wissenschaft-schulen.de/artikel/128584