

tiges Exemplar gehandelt hat, muss ihr Licht um einen Faktor 52 verstärkt worden sein. Sogleich vermuteten Goobar und sein Team eine Gravitationslinse als Verursacher. Ohne die Natur dieser Linse genau zu kennen, ergab sich ihr Verstärkungsfaktor alleine aus der Differenz der erwarteten und der gemessenen scheinbaren Helligkeit der Supernova.

Gravitationslinsen sind eine zwingende Folge von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie – und in der Astronomie seit Jahrzehnten bekannt. Im Falle von SN2016geu vermuteten die Astronomen, dass eine von der Erde aus gesehen auf der Sichtlinie zur weiter entfernten Supernova und ihrer Heimatgalaxie liegende zweite Galaxie als Linse wirken müsse. Diese könnte das Licht der Supernova durch ihre Gravitationswirkung nicht nur verstärken, sondern auch verzerren und in mehrere Einzelbilder aufteilen. Mit den Teleskopen des Palomar Observatory war es aber nicht möglich, die punktförmige Quelle detaillierter darzustellen – dazu reichte ihre durch die Luftunruhe auf etwa zwei Bogensekunden begrenzte Winkelauflösung nicht aus. Goobar und seine Kollegen wandten sich deshalb an das W. M. Keck Observatory auf Hawaii sowie an das Very Large Telescope der ESO in Chile. Beide Teleskope sind mit adaptiven Optiken ausgestattet. Diese Technik erlaubt es, atmosphärische Störungen zu korrigieren und weit schärfere Bilder zu erstellen, als es mit herkömmlichen Teleskopen am Erdboden üblicherweise möglich ist.

Tatsächlich gelang es insbesondere mit dem Keck-Teleskop, vier separate Abbildungen der Supernova aufzulösen (siehe Bild S. 16). Die vier Bilder hatten leicht unterschiedliche Helligkeiten und lagen zwischen 0,26 und 0,31 Bogensekunden vom Zentrum der Heimatgalaxie entfernt. Sie wiesen azimutale Abstände von nahezu 90 Grad auf – bildeten also ein beinahe perfektes Einstein-Kreuz. Auch die stark verzerrte Heimatgalaxie der Supernova ist auf den Bildern zu erkennen, als Ringsegment um die im Vordergrund liegende Linsengalaxie.

Supernova Typ Ia unter der Lupe

Damit war SN 2016geu zweifelsfrei als die erste gravitationsgelinste Typ-Ia-Supernova bestätigt. Um die Genauigkeit üblicher Modelle von Gravitationslinsen zu überprüfen, verglichen die Forscher die aus der einfachen Abschätzung der Hel-

ligkeiten der vier Bilder ermittelten Verstärkungsfaktoren mit einem Modell der Gravitationslinse, das die Linsengalaxie als eine gleichmäßige, elliptische Massensammlung mit einer Gesamtmasse von 17 Milliarden Sonnenmassen beschreibt. Die Vorhersagen bezüglich der Helligkeiten wichen um einen Faktor drei bis vier von den beobachteten Werten ab – offenbar ist das Modell zu einfach.

In einer echten Galaxie ist die Materie eben nicht gleichförmig verteilt, sondern eher körnig angeordnet. Substrukturen in der Sternverteilung und der Verteilung der Dunklen Materie können Milli- und Mikrolinseneffekte verursachen. Diese wieder-

um lösen leichte Helligkeitsvariationen aus, ohne zusätzliche auflösbare Linsenbilder zu erzeugen. Auch sorgt der in der Linsengalaxie mit hoher Wahrscheinlichkeit enthaltene Staub für eine Absorption des Lichts der Supernova. Da die Menge des Staubs und damit die Stärke der Absorption unbekannt sind, weisen auch die mit der direkten Methode ermittelten Verstärkungsfaktoren Unsicherheiten auf. Berücksichtigt man verschiedene Staubverteilungsprofile der Galaxie, so ergeben sich Verstärkungsfaktoren für die gesamte Supernova zwischen 4,1 und 4,8 mag.

Mehrfach-Supernovae wie SN2016geu sind nützlich für die Kosmologie. Indem

ZUM NACHDENKEN

Supernova Typ Ia durch Gravitationslinse



Die im September 2016 entdeckte Supernova SN2016geu stellte sich als dem Typ Ia zugehörig heraus. Damit ist ihre Helligkeit vor Ort mit großer Genauigkeit bekannt. Modellunabhängig lässt sich deshalb aus der beobachteten Helligkeit der vier durch die vorgelagerte Gravitationslinse produzierten Bilder die jeweilige Verstärkung bestimmen.

Aufgabe 1: Beobachtungen mit Laserleitstern gestützter adaptiver Optik am 10-Meter-Keck-Teleskop und mit dem Weltraumteleskop Hubble zeigten, dass die Gravitationslinse eine elliptische Galaxie ist. Die Winkelgröße ihrer großen Halbachse ist etwa $\delta_a = 0,31''$, die der kleinen Halbachse $\delta_b = 0,27''$. Für die aus von der Linsengalaxie verursachten Absorptionslinien in den Spektren der Supernova ermittelte Rotverschiebung $z = 0,216$ ergibt sich eine zur Winkeldurchmesser-Distanz gehörende Skala von $\sigma = 3,612 \text{ kpc}''$. Wie groß ist die Linsengalaxie? Man gebe das Ergebnis in kpc an.

Aufgabe 2: Die Masse M_G der Gravitationslinse lässt sich in der Form

$$M_G = \frac{c^2}{4G} \frac{D_s D_l}{D_{ls}} \frac{b^2}{\sqrt{1-\epsilon^2}}$$

angeben. Dabei ist $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ die Lichtgeschwindigkeit, und die Gra-

vitationskonstante ist $G = 6,643 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$. $D_s = 1157 \text{ Mpc}$ ist die Winkeldurchmesser-Distanz der Supernova, $D_l = 745,8 \text{ Mpc}$ die der Linsengalaxie und $D_{ls} = 513,2 \text{ Mpc}$ diejenige zwischen Linsengalaxie und Supernova. Die Modellrechnung der Gravitationslinse ergibt die beiden Parameter $b = 0,287''$ und $\epsilon = 0,16$. Wie groß ist die Masse der Linsengalaxie? Man beachte, dass b in das Bogenmaß umgerechnet werden muss. Dabei gilt: $2\pi \triangleq 360^\circ$. Ein Parsec entspricht $3,086 \cdot 10^{-16} \text{ m}$.

Aufgabe 3: Die Verstärkung der Supernovahelligkeit durch die Gravitationslinse liegt bei $V = 52$. Wenn für das Verhältnis der beiden Intensitäten mit und ohne Verstärkung $I = V I_0$ gilt, dann ergibt sich der Helligkeitszuwachs Δm mit Hilfe der Gleichung:

$$\Delta m = 2,5 \text{ mag} \lg(I/I_0).$$

Welcher Helligkeitsdifferenz entspricht das in Magnituden? AMQ

Ihre Lösungen senden Sie bitte bis zum **4. August 2017** an: Redaktion SuW – Zum Nachdenken, Haus der Astronomie, MPIA-Campus, Königstuhl 17, D-69117 Heidelberg. Fax: 06221 528377. PDF: zum-nachdenken@sterne-und-weltraum.de. Einmal im Jahr werden unter den erfolgreichen Lösern **Preise** verlost: siehe S. 101