

vermeidbaren Streukapazitäten besitzen die beschriebenen Bauteile in der Regel eine schlechte RC -Konstante, die den Betrieb auf niedrige Frequenzen beschränkt. Hinzu kommt noch der Einfluss des $1/f$ -Rauschens, das die Auflösung begrenzt. In der Arbeit von Knobel und Cleland wurde der Einzelelektronen-Transistor daher als Mischer eingesetzt [2], was Messungen bei hohen Frequenzen mit großer Bandbreite erlaubt. Bei diesem Verfahren wird der Resonator bei seiner Eigenfrequenz von 117 MHz betrieben, während gleichzeitig eine Oszillatorspannung an die Gatterelektrode angelegt wird, deren Frequenz um etwa 1 kHz verschoben ist. Messgröße ist der Spannungsabfall am Einzelelektronen-Transistor bei der Differenzfrequenz im kHz-Bereich, dessen Verlauf die Resonanz des Balkens bei 117 MHz abbildet.

Damit ist es erstmals gelungen, eine mechanische Schwingungsanregung im Ausgangssignal des Transistors zu beobachten. Die von Knobel und Cleland erreichte Auflösung liegt bislang zwei Größenordnungen über dem erwarteten Übergang ins quantenmechanische Regime. Wie die Autoren bemerken, könnten jedoch ähnliche Resonatoren bei entsprechend hohen Eigenfrequenzen und sehr tiefen Temperaturen in einer optimierten Anordnung den Übergang von der klassischen Mechanik in das Regime der Quantenmechanik zeigen. Der experimentelle Nachweis der Nullpunktschwingung eines mechanischen Systems rückt damit erstmals in den Bereich des Möglichen.

EVA M. HÖHBERGER UND
ROBERT H. BLICK

- [1] R. H. Blick et al., Phys. Blätter, Januar 2000, S. 31; X. M. H. Huang et al., Nature **421**, 496 (2003)
- [2] R. G. Knobel und A. N. Cleland, Nature **424**, 291 (2003)
- [3] J. Kirschbaum et al., Appl. Phys. Lett. **81**, 280 (2002); E. M. Höhberger et al., Appl. Phys. Lett. **82**, 4160 (2003)
- [4] F. W. Beil et al., Nanotechnology **14**, 799 (2003)

Missing Link

Erstmals gelang es, die Verbindung zwischen einem kosmischen Gammastrahlenausbruch und einer Supernova nachzuweisen.

Am 29. März 2003 – um 11:37:14.70 Uhr Weltzeit – entdeckte der amerikanische Satellit HETE-II einen der hellsten Gammastrahlenausbrüche (Gamma Ray Burst, GRB) im All, der je beobachtet wurde.¹⁾ GRBs sind kurzzeitig am Himmel aufleuchtende, sehr helle Strahlungsquellen im Gamma-Band. Überraschend schnell stellte sich der Ursprung von GRB030329, so die offizielle Bezeichnung, heraus. Zunächst ließ sich am Very Large Telescope (VLT) der ESO in Chile mit dem UVES-Instrument die Rotverschiebung der Spektrallinien zu $z=0,1685$ bestimmen. Bei einer flachen Kosmologie (kosmologische Konstante $\Omega_{\Lambda}=0,7$) entspricht dies einer Leuchtkraft-Entfernung von ungefähr 800 Mpc. Unter Annahme einer isotropen Ausstrahlung ergibt sich damit eine Gesamtenergie von ca. 9×10^{44} J. Zum Vergleich: Beim Kollaps eines massereichen Sternes wird eine Bindungsenergie E_{SN} von über 10^{46} J frei – zu 99 % in Form von Neutrinos, sodass nur etwa 10^{44} J für die kinetische Energie der ausgestoßenen Materie übrig bleiben. Das optische Feuerwerk einer Supernova benötigt dagegen gerade einmal 10^{42} J!

Sehr rasch nach der Entdeckung verfolgten die Astronomen jede Nacht, über Tage und Wochen, das Nachglühen („afterglow“) des Bursts. Die Helligkeit im R-Band (720 ± 100 nm Wellenlänge) betrug während der ersten Beobachtungen etwa 12 mag – vermutlich war der GRB in den ersten Minuten sogar mit bloßem Auge sichtbar.

Beobachtungen innerhalb der ersten zwölf Stunden zeigten einen mittleren Abfall des Flusses proportional zu $t^{-\alpha}$ mit $\alpha \sim 1$ und signifikante Variationen auf Zeitskalen von Stunden. Da Messungen innerhalb der ersten Minuten und Stunden selten sind, ließen die Beobachtungen von Uemura et al. und Price et al. [1] neue Erkenntnisse erwarten.

Erste Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen Gamma Ray Bursts und Supernovae lieferten GRB980425 und die Typ-Ic-Supernova SN1998bw [5]. Bei GRB030329 schien es nun möglich,

diese Hypothese erstmals beweisen zu können.

Die ersten Beobachtungen von GRB030329 zeigen einen Einbruch (*break*) in der Lichtkurve bei $t_b \sim 0,5$ Tagen [1]. Von vielen *afterglows* ist bekannt, dass sich der Index α signifikant und auf kurzen Zeitskalen vergrößern kann. Im Falle von GRB030329 änderte sich bei t_b der Index schlagartig von etwa 1 zu 2. Diese abrupte Veränderung führt man darauf zurück, dass sowohl das direkte Gamma-Signal als auch das „optische“ Nachglühen²⁾ des Bursts durch Emission von Synchrotron-Strahlung in den Schock-Regionen relativistischer Jets erzeugt wird. Mit der Zeit nehmen

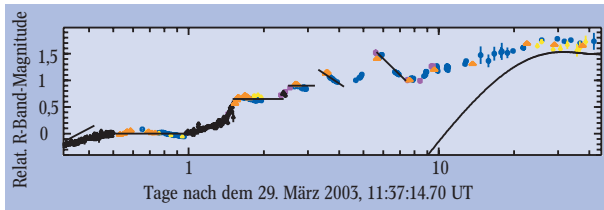


Abb. 1: In der auf das Potenzverhalten renormierten R-Band-Lichtkurve von GRB030329 macht sich nach ca. 10 Tagen der Einfluss der Supernova SN2003dh bemerkbar. (Quelle: J. Greiner)

die Lorentz-Faktoren ab und der Öffnungswinkel des Jets vergrößert sich [2]. Diese Annahmen führen zum Standard-Szenario, das einem Potenzgesetz folgt, unterbrochen allerdings von einem charakteristischen „jet-break“.

Anhand des Zeitpunktes dieses *breaks* lässt sich der Öffnungswinkel des Jets bestimmen – er beträgt wenige Grad für GRB030329 – und damit die abgestrahlte Energie korrigieren. Diese bestimmten Price et al. nun zu etwa 3×10^{42} J, wesentlich weniger also als der „kanonische“ Wert 5×10^{43} J. Damit ist GRB030329 mit GRB980425 vergleichbar, der mit $z = 0,0085$ bisher nächste Gamma Ray Burst – falls er tatsächlich mit der Supernova SN1998bw assoziiert sein sollte.

Abb. 1 zeigt die renormierte R-Band-Lichtkurve bis zur sechsten Woche nach dem Burst, unter der Annahme eines „normalen“ Helligkeitsabfalls kurz nach dem *break*. Dieser Abfall wird durch Episoden unterbrochen, in denen das Nachleuchten innerhalb von Stunden scheinbar neue Energieschübe erhält und danach wieder in das „normale“ Potenzgesetz zurückfällt. Nach drei Tagen folgen den Sprüngen steilere Abfälle. Eine überzeugende Theorie dieser Unstetigkeiten steht noch aus. Eine Woche nach

der Entdeckung von GRB030329 brachte die Lichtkurve den Astrophysikern weitere Überraschungen. Die stetig ansteigende Helligkeit (Abb. 1) deutete auf eine neue dominierende Komponente hin – am Ende gar auf eine Supernova?

Das „Kollapsar-Modell“ [3] für Langzeit-GRBs (Dauer > 2 s) basiert auf der Idee, dass schnell rotierende, massereiche Sterne unter speziellen Bedingungen ein Schwarzes Loch bilden können, welches, umgeben von einer Akkretionsscheibe, einen doppelseitigen Jet entlang der Rotationsachse durch die kollabierende Sternhülle treibt. Durchbricht ein solcher Jet die Sternoberfläche, so wird er als GRB „sichtbar“. Schockwellen im Jet erzeugen den GRB durch Synchrotron-Strahlung relativistischer Elektronen. Das Nachglühen setzt gleichzeitig oder unwesentlich später durch Wechselwirkung zwischen Jet und umgebender Materie ein.³⁾ Das Modell sagt eine simultane Supernova vorher, die innerhalb von zwei bis drei Wochen ihre maximale Helligkeit erreichen sollte. Der relative Anstieg der Helligkeit von GRB030329 nach etwa zehn Tagen deutete zwar auf die vorhergesagte Supernova hin, doch dies war leider noch kein Beweis.

Erst spektroskopische Beobachtungen am VLT wenige Tage nach dem 3. April untermauerten die Verbindung zwischen dem Gammastrahlenausbruch und der Supernova. Das „glatte“ Spektrum vom 4. April war noch dominiert durch die Synchrotron-Strahlung, doch bereits am 8. April ließen sich stark verbreiterte Linienzüge erkennen, ganz ähnlich zu denen der Supernova SN1998bw! Die spektroskopische Analyse von Hjorth et al. [1] und Stanek et al. [4] (Abb. 2) erbrachte dann den ersehnten Beweis und stärkte damit das Kollapsar-Modell. Da die „Linien“ durch Geschwindigkeiten von mehr als $0,1 c$ verbreitert sind, qualifiziert sich diese – als SN2003dh registrierte – Supernova als extremes Beispiel der Hypernova-Klasse. Hjorth et al. schlossen aus einem Vergleich mit SN1998bw auf ein Ausbruchdatum für SN2003dh von ± 2 Tage relativ zu GRB030329. Die räumliche und zeitliche Nähe lässt jedenfalls keinen Zweifel an der Verbindung zwischen den beiden Phänomenen und damit wenig Raum für alternative Theorien.

Bereits früher hatte ein nachfol-

gendes, wiederholtes Aufflackern einiger *afterglows* auf Supernovae hingedeutet. Zudem ließen die erhöhten Sternentstehungsraten der mit den Bursts assoziierten Galaxien darauf schließen, dass GRBs mit explodierenden massereichen Sternen in Beziehung stehen.⁴⁾

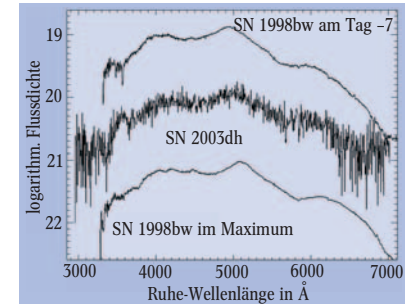


Abb. 2: Das differenzielle (MMT) Spektrum der Supernova SN2003dh am 8. April 2003 [4] zeigt das Gesamtspektrum von GRB030329 am 8. April abzüglich des skalierten Spektrums vom 4. April, das noch vom „glatte“ Spektrum des Nachleuchtens dominiert war. Der Vergleich mit den Spektren von SN1998bw zu zwei Zeiten zeigt eine große Übereinstimmung.

Spektrallinien im Röntgenbereich deuteten auf Eisen und damit auf frische Nukleosynthese hin.

Diese Indizien und die Verbindung zwischen GRB980425 und SN1998bw [5] waren bislang die besten Argumente für die Supernova-Hypothese, die mit GRB030329 nun bestätigt ist. Die unterliegende „Host Galaxie“ stellt sich als eine Zwerggalaxie ähnlich der Kleinen Magellanschen Wolke mit erhöhter Sternentstehungsrate heraus.

Dieser Fortschritt könnte uns dem Ziel näher bringen, GRBs als „kosmologische Werkzeuge“ zu nutzen, um mit Experimenten wie HETE, INTEGRAL und ihren Nachfolgern (Swift, Agile, GLAST ...) Zeugen werden zu können, wie Schwarze Löcher entstehen oder wie sich Sterne bis zur hypothetischen ersten Generation bilden, die man bei $z > 10$ vermutet.

DIETER HARTMANN

- [1] M. Uemura et al., Nature **423**, 843 (2003); P. A. Price et al., Nature **423**, 844 (2003); J. Hjorth et al., Nature **423**, 847 (2003)
- [2] P. Meszaros, Ann. Rev. Astron. Astrophys. **40**, 137 (2002)
- [3] S. E. Woosley, ApJ **405**, 273 (1993); A. MacFadyen und S. E. Woosley, ApJ **524**, 262 (1999)
- [4] K. Z. Stanek et al., ApJ **591**, L17 (2003); K. S. Kawabata et al., ApJ **593**, L19 (2003)
- [5] T. Galama et al., Nature **395**, 670 (1998)

Prof. Dr. Dieter Hartmann, Department of Physics and Astronomy, Clemson University, Clemson, South Carolina, USA