

Gamma-Ray Bursts

Kurzzeitig am Himmel aufleuchtende intensive Gammastrahlungsquellen sind ein aktueller Forschungsschwerpunkt der relativistischen Astrophysik

Sylvio Klose, Jochen Greiner und Dieter H. Hartmann

Kaum ein anderes Forschungsgebiet der Astrophysik hat in den letzten Jahren einen so gewaltigen Fortschritt erlebt, wie das Studium der kosmischen *Gamma-Ray Bursts* – der kurzzeitig am Himmel aufleuchtenden sehr intensiven Gammastrahlungsquellen. Heute weiß man, dass es sich hierbei um die leuchtkräftigsten Erscheinungen im Universum handelt. Verbunden mit ultra-relativistischen Materieausflüssen und womöglich der Entstehung stellarer Schwarzer Löcher hat sich hier ein kosmisches Laboratorium der relativistischen Astrophysik eröffnet, dessen Einfluss auf andere Forschungszweige der Astronomie noch gar nicht abzusehen ist.

Am Anfang der 30er Jahre diskutierte Lew Landau das Modell kompakter Sterne, die ab einer bestimmten Kompression einzig durch den Entartungsdruck eines Fermi-Gases vor dem Gravitationskollaps bewahrt werden. Dank des Pauli-Prinzips sind solche Sterne bis zu einer charakteristischen, durch die Natur der jeweiligen Fermionen gegebene Grenzmasse stabil. Einige Jahre darauf berechneten J. Robert Oppenheimer und George M. Volkoff unter Benutzung einer einfachen Zustandsgleichung die Masse-Radius-Beziehung von Sternen, die durch den Entartungsdruck eines Neutronengases stabilisiert werden. Für diese *Neutronensterne* hat sie die Form $R \text{ [km]} \approx 15 (M/M_{\odot})^{-1/3}$, wobei M_{\odot} die Sonnenmasse ist ($1M_{\odot} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$). Schon im Jahre 1934 spekulierten Walter Baade und Fritz Zwicky, ob nicht jene zur damaligen Zeit rätselhaften, extrem leuchtkräftigen *Supernovae* den Übergang eines gewöhnlichen Sterns zu einem Neutronenstern darstellen könnten, wobei als Energiequelle die bei einem Sternkollaps freiwerdende Gravitationsenergie von etwa GM^2/R dient. Nachdem man nämlich damals zu der Ansicht gelangt war, dass der am nördlichen Sternhimmel sichtbare Andromedanebel eine Galaxie wie die unsrige ist, deren Entfernung sich in der Größenordnung von 10^6 Lichtjahren bewegt, musste der dort im Jahre 1885 aufgeleuchtete ‚neue Stern‘ (lateinisch ‚Nova‘) die milliardenfache Leuchtkraft unserer Sonne entwickelt haben. Bis Mitte der 30er Jahre hatte man rund 20 solcher *Supernovae* auch in anderen Galaxien entdeckt.

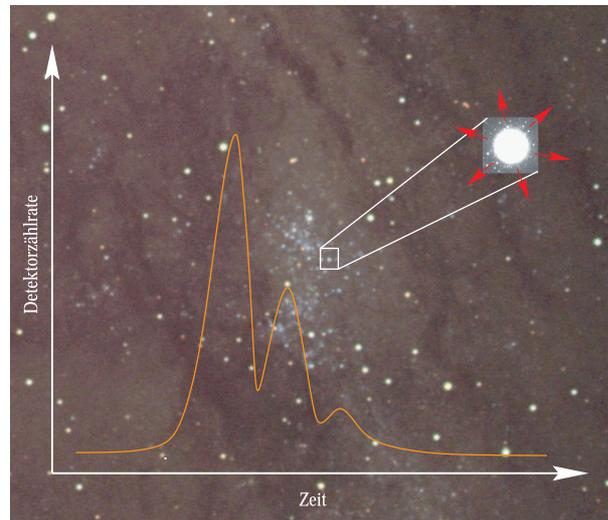


Abb. 1: Ein kosmischer Gamma-Ray Burst, der sich in einem Ansnellen der Zählrate eines Gammastrahlendetektors äußert, hat vermutlich seine Ursache in einer Sternexplosion in einer fernen Galaxie.

Neutronensterne, Supernovae und stellare Schwarze Löcher

Wie wir heute wissen, können *Supernovae* auch auf andere Szenarien zurückgehen und insbesondere SN 1885¹⁾ war ein solcher Fall – die Explosion eines so genannten Weißen Zwerges, eines Sterns, der einzig durch den Entartungsdruck des *Elektronengases* vor dem Gravitationskollaps bewahrt wird. Die Grundvorstellungen obiger Ideen haben sich aber als richtig erwiesen. Neutronensterne können entstehen, wenn ein massereicher Stern ($\approx 8M_{\odot}$) am Ende seiner Entwicklung den über Kernfusion verfügbaren Brennstoffvorrat in seinem Zentralgebiet erschöpft hat und dieses kollabiert. Bei der Bildung eines Neutronensterns der Masse M_{\odot} beträgt die freiwerdende Gravitationsenergie rund $2 \times 10^{46} \text{ Ws}$. Rund 99 % davon werden von Neutrinos abtransportiert, rund 1 % geht in die kinetische Energie der abgestoßenen Supernovahülle und nur etwa 0,05 % werden als *Supernova-Licht* abgestrahlt. Durch beobachtete *Supernova-Raten* in anderen Galaxien weiß man heute, dass ein solches Ereignis in unserer Galaxis im Mittel etwa alle 100 Jahre auftritt.

Für Neutronensterne gibt es eine Grenzmasse, oberhalb derer der Entartungsdruck der Sternmaterie dem eigenen Gravitationsdruck nicht mehr standhalten kann. Theoretisch liegt diese je nach angesetzter Zustandsgleichung der Materie im Sterninneren um $2M_{\odot}$. Ein solcher Wert lässt sich auch aus den Massen von Neutronensternen in Doppelsternsystemen ableiten.

¹⁾ Es ist üblich, *Supernovae* mit SN und dem Jahr, in dem sie beobachtet wurden, zu bezeichnen.

Dr. Sylvio Klose, Thüringer Landessternwarte Tautenburg, 07778 Tautenburg; Dr. Jochen Greiner, Astrophysisches Institut Potsdam, 14482 Potsdam; Prof. Dr. Dieter H. Hartmann, Clemson University, Clemson, South Carolina, SC 29634-0978, USA

Wenn gravitationsinstabile Zentralgebiete massereicher Sterne diese Grenzmasse überschreiten, dürften sie demnach anstatt zu einem Neutronenstern direkt zu einem Schwarzen Loch kollabieren. In der Tat sind allein in unserer Galaxis bisher rund ein Dutzend kompakte Objekte als Mitglieder in Doppelsternsystemen gefunden worden, deren aus der Bahndynamik abgeleiteten Massen oberhalb rund $3M_{\odot}$ liegen und die daher als Kandidaten für stellare Schwarze Löcher gelten.

Da es die Natur offenbar nicht verhindern kann, dass stellare Schwarze Löcher entstehen, stellt sich die Frage, ob sich ihre Geburt beobachten lässt. Es scheint heute, als hätten die kosmischen Gammastrahlungsausbrüche diesen noch fehlenden Baustein in unserem Wissen enthüllt. Obwohl unser Kenntnisstand in dieser Hinsicht noch mangelhaft ist, sind diese Ausbrüche in den letzten Jahren zu einem Paradebeispiel des Fortschritts in der astronomischen Forschung geworden.

2) Die Rotverschiebung z ist die Messgröße in der Kosmologie. Der Zusammenhang zwischen kosmologischer Rotverschiebung und Entfernung sowie dem zugehörigen Weltalter hängt vom zugrundegelegten Weltmodell ab [3].

10^{-14} und 10^{-10} $\text{Ws}^{-1} \text{cm}^{-2}$ für Energien oberhalb von 20 keV. Die stärksten Bursts können nachweislich die oberen Schichten der Ionosphäre der Erde stören. Die mit BATSE festgestellte streng isotrope Verteilung der Bursts am Himmel und ihre beobachtete Helligkeitsverteilung machte bis Mitte der 90er Jahre deutlich, dass die Burstquellen in Entfernungen stehen müssen, die kosmologischen Rotverschiebungen um $z \approx 1$ entsprechen.²⁾

Die Beobachtungen zeigen, dass es sich bei den Bursts um ein Phänomen handeln muss, bei dem relativistische Effekte eine Schlüsselrolle spielen. Beobachtete Variabilitätszeitskalen Δt der Bursts bis herunter zu Millisekunden führen im Rahmen der klassischen Physik zunächst zu dem Schluss, dass die charakteristische Ausdehnung $c \Delta t$ eines solchen Emissionsgebietes nur einige 100 bis 1000 km betragen kann. Des Weiteren lässt die charakteristische Entfernungsskala aus den genannten Strahlungsflüssen bei isotroper Emission auf das Freisetzen von etwa 10^{44} Ws am Ort einer GRB-Explosion allein in Form von Gammastrahlung schließen. In einem kleinen Raumgebiet müssen demnach kurzzeitig sehr hohe Energiedichten vorliegen. Die so implizierten hohen Anzahldichten an Gammaquanten aber müssen über Paarbildungsprozesse ($\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$) in diesem Raumgebiet Elektron-Positron-Paare erzeugen. Das Wechselspiel von Paarerzeugung und Paarvernichtung macht die mittlere freie Weglänge der Gammaquanten sehr klein; die Strahlung ist wie in einem Hohlraum gefangen, und ein solcher *Feuerball* müsste im Hochenergiebereich ein thermisches Spektrum emittieren. Die Spektren der Bursts sind aber nicht-thermisch, mit nachweisbaren Flüssen bis in den MeV- und teils sogar in den GeV-Bereich [4]. Diese Beobachtungen lassen sich am einfachsten miteinander in Einklang bringen, wenn ein solcher Feuerball mit ultra-relativistischer Geschwindigkeit auf den Beobachter zu expandiert. Die dafür notwendigen Lorentz-Faktoren $\Gamma = (1 - (v/c)^2)^{-1/2}$ sind beachtlich: Mit $\Gamma > 100$ werden sie von keiner anderen kosmischen Objektklasse erreicht. Selbst die relativistischen Materieausflüsse aktiver Galaxien bleiben weit dahinter zurück.

Nach der heute favorisierten Vorstellung ist die Burstquelle ein kompaktes Objekt, welches einen sich mit ultra-relativistischer Geschwindigkeit ausbreitenden Materieausfluss bewirkt. Aus der Variabilitätszeitskala Δt der Bursts und den deduzierten Lorentz-Faktoren lässt sich schließen, dass die Gammastrahlung in Entfernungen um $R = \Gamma^2 c \Delta t \approx 10^{8 \pm 1}$ km vom eigentlichen Explosionsort freigesetzt wird. Der Gammaburst entsteht vermutlich, wenn sich in diesem Materieausfluss verschiedene Explosionsschalen mit unterschiedlichem Lorentz-Faktor ausbreiten und daraufhin miteinander kollidieren. Dies sollte geschehen können, wenn die Energiefreisetzung ähnlich einem Geysir einige Sekunden anhält. Ein Burst verkörpert demnach die Umsetzung kinetischer Energie eines ultra-relativistischen Materieausflusses in elektromagnetische Strahlung. Weniger geklärt ist bisher, wie die beobachteten Burstprofile (Abb. 2) entstehen und was der Hauptgrund für die so unterschiedliche Dauer der Bursts ist. Einen wesentlichen Fortschritt in diesen speziellen Fragen wird vermutlich erst die simultane Beobachtung von GRBs in einem breiten Spektralbereich erbringen. Dies verlangt eine neue Generation von GRB-Satelliten und auch automatische Teleskope der 1- bis 2-m-Klasse, welche in nächster Zeit weltweit in Betrieb gehen wer-

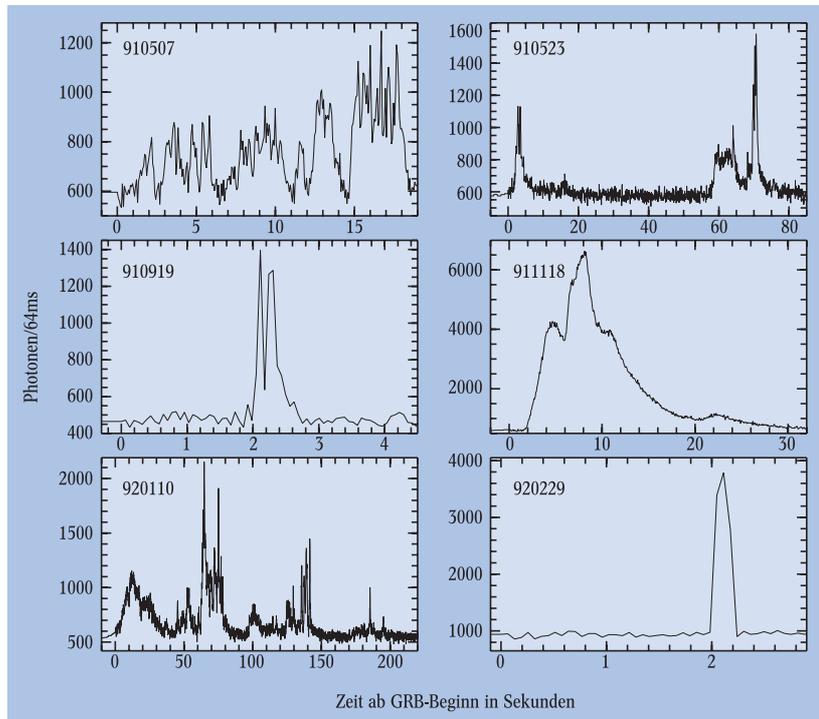


Abb. 2: Beispiele für Lichtkurven von GRBs. Aufgetragen ist die Photonenzählrate über der Zeit mit einer Auflösung von 64 ms. Bemerkenswert sind die Vielfalt der Strukturen sowie der erhebliche Unter-

schied in der Dauer der GRBs. nach [2]. Die Bezeichnung der GRBs (oben links in den Diagrammen) ergibt sich aus Jahr (JJ), Monat (MM) und Tag (TT) des Ereignisses zu einer 6stelligen Ziffernfolge.

Kosmische Gamma-Ray Bursts

Als kosmische Gammastrahlungsausbrüche (engl.: *Gamma-Ray Bursts*, kurz GRBs) werden temporär am Himmel aufleuchtende, sehr helle Strahlungsquellen bezeichnet (Abb. 1; [1]). Die Burstdauer kann zwischen rund 0,01 und 1000 Sekunden liegen (Abb. 2). In diesem Zeitraum ist die Strahlungsquelle im Gammaband das hellste Objekt am Himmel. Die Bursts wurden erstmals in den 60er Jahren mit Satelliten entdeckt, die eigentlich das Abkommen über den Atomwaffen-Teststopp überprüfen sollten. Mit dem bislang erfolgreichsten Satellitenexperiment zum Studium dieser Erscheinungen, dem *Burst And Transient Source Experiment* (BATSE) auf dem *Compton Gamma-Ray Observatory*, konnte in den Jahren 1991 bis 2000 etwa täglich ein Burst detektiert werden. Die mit BATSE gemessenen Strahlungsflüsse bewegen sich zwischen

den. Dagegen ist das Verständnis der einem Burst folgenden Erscheinung, des so genannten *Afterglow*, in den letzten Jahren ganz immens gewachsen.

Afterglows

Der Energieverlust des Feuerballs infolge der Emission der Gammastrahlung reicht nicht aus, um ihn als solchen aufzulösen. Er muss daher zwangsläufig in das die Burstquelle umgebende Medium hineinlaufen. Dies könnte z. B. das gewöhnliche interstellare Medium der GRB-Muttergalaxie mit typischen Dichten von 0,1 bis 10 H-Atomen/cm³ sein. Der Feuerball wird hier auf nicht-relativistische Geschwindigkeit abgebremst. Dabei wird in diesem Medium eine Stoßwelle erzeugt, in der Elektronen auf ultra-relativistische Geschwindigkeiten beschleunigt werden. Weil überall im interstellaren Raum schwache magnetische Felder vorhanden sind, emittiert dieses Elektronenensemble Synchrotronstrahlung, wobei bei höheren Energien auch inverse Compton-Streuung der Synchrotronphotonen an den Elektronen Bedeutung erlangt. Diese Strahlungsemission bewirkt ein Nachglühen der Materie am Ort der Explosion. Formal ist dies ähnlich zu Supernova-Überresten. Das theoretische Verständnis dieser, nach dem englischen Fachterminus *Afterglow* genannten Entwicklungsphase der Bursts, geht im Wesentlichen auf die Arbeiten von P. Mészáros (Pennsylvania, USA) und M. Rees (Cambridge, England) aus den 90er Jahren sowie die Schule um T. Piran (Jerusalem, Israel) zurück [5, 6]. Vorausgegangen waren die klassischen Untersuchungen von R. D. Blandford und C. F. McKee über relativistische Stoßwellen [7] sowie die Arbeiten von G. Cavallo, M. Rees, B. Paczyński (Princeton, USA) und J. Goodman (Institute for Advanced Study, USA) aus den 70er und 80er Jahren über kosmologische Implikationen der Bursts.

Das Modell sagt voraus, dass sich der Helligkeitsabfall eines GRB-Afterglows und seine spektrale Energieverteilung durch ein einfaches Potenzgesetz beschreiben lassen und dass die zugehörigen Exponenten einfache Relationen erfüllen. Für die Flussdichte F_ν , die der Beobachter bei der Frequenz ν misst, gilt demnach

$$F_\nu \sim t^{-\alpha} \nu^{-\beta}. \quad (1)$$

Dabei ist z. B. $\alpha = 3\beta/2$ für den Fall, dass sich der Afterglow in ein äußeres homogenes Medium entwickelt und die Explosion isotrop war. Dies ist eine seitens der astronomischen Beobachtung relativ leicht überprüfbare Voraussage. Dazu verfolgt man die Lichtkurve des Afterglows (Parameter α) und ermittelt seine spektrale Energieverteilung (Parameter β).

Die Voraussagen des Afterglow-Modells sind durch die Beobachtungen in den letzten Jahren im Wesentlichen glänzend bestätigt worden. Im Jahre 1997 gelang es erstmals, einen GRB-Afterglow mit dem italienisch-holländischen BeppoSAX-Satelliten im Röntgenbereich zu detektieren und daraufhin auch mit erdgebundenen Teleskopen zu finden. Im Vergleich zu einem Burst handelt es sich bei einem solchen Afterglow um ein äußerst lang-anhaltendes breitbandiges Nachglühen, das sich im Optischen mitunter über Tage und sogar Wochen, im Radioband über Monate verfolgen lässt. Im Optischen stellt es mit seiner Leuchtkraft selbst klassische Supernovae weit in den Schatten (Abb. 3). Einige Autoren sprechen daher von einer Hypernova. Weil aus technischen Gründen die Bursts im Gammaband (noch) nicht auf Bogensekunden-Genauigkeit geortet werden können, hat sich die Afterglow-Phase als das

entscheidende physikalische Phänomen erwiesen, um die Bursts überhaupt erst am Himmel zu lokalisieren.

Seit 1997 sind im Rahmen großer internationaler Beobachtungskampagnen rund 25 GRB-Afterglows im Optischen, 35 im Röntgen- und 20 im Radioband detektiert worden [8, 9].³⁾ Die daraufhin bislang in 20 Fällen gelungene Messung der Rotverschiebungen z der Afterglows oder der ihnen unterliegenden GRB-Muttergalaxien ergab bis auf einen Fall Werte zwischen rund 0,5 und 4,5 mit einer Häufung um $z = 1$. Dies

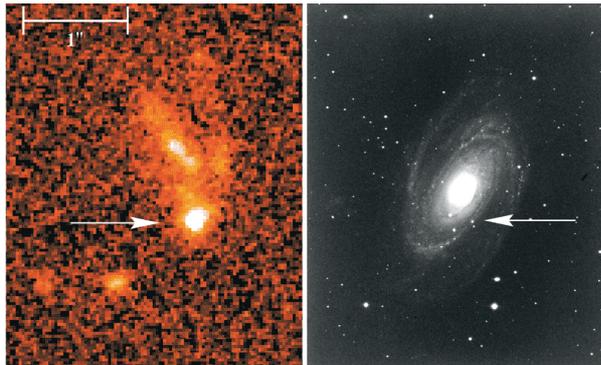


Abb. 3: Links: Der Afterglow von GRB 990123, aufgenommen mit dem *Hubble Space Telescope*, rund zwei Wochen nach der Explosion. Zu dieser Zeit war der Afterglow bereits rund 100mal schwächer als 12 Stunden nach dem Burst. Als schwacher Fleck ist die unter der Burstquelle liegende Muttergalaxie zu erkennen ($z = 1,6$). Rechts: Das Leuchten der Supernova 1993J in der uns nahe gelegenen Galaxie M 81 ($z \approx 0,001$). Sie war die dritthellste Supernova an der nördlichen Hemisphäre im 20. Jahrhundert. Das Bild wurde mit dem 2-m-Teleskop der Thüringer Landessternwarte um die Zeit des Strahlungsmaximums aufgenommen (Bildhöhe rund Monddurchmesser).

steht im Einklang mit der statistischen Analyse der BATSE-Daten. In einem Fall erwies sich die Burstquelle als in nur rund 40 Mpc Entfernung gelegen ($z = 0,0085$).

Das Afterglow-Modell ist zwar sehr erfolgreich, baut jedoch auf theoretischen Ansätzen auf, die nicht unmittelbar aus *first principles* folgen und die daher in Zukunft noch zu klären sind. Um das Strahlungsspektrum des Elektronenensembles zu berechnen, setzt man z. B. für deren Energieverteilung (Lorentz-Faktor γ_e) ein Potenzgesetz an: $N(\gamma_e) d\gamma_e \sim \gamma_e^p d\gamma_e$. Es ist bislang offen, wie genau dieser Ansatz das Energiespektrum der in ultra-relativistischen Stoßwellen beschleunigten Elektronen beschreibt. Auch wäre es interessant zu wissen, ob in solchen Stoßwellen Protonen auf ultra-relativistische Geschwindigkeiten beschleunigt werden können. Und wenn dem so wäre: Könnten GRBs dann als Quelle der ultra-hochenergetischen kosmischen Teilchenstrahlung infrage kommen?

Sind Gamma-Ray Bursts nicht-isotrope Explosionen?

Wenn sich die Materieausflüsse von GRBs mit Lorentz-Faktoren $\Gamma > 100$ ausbreiten, wird die relativistische Abberation der darin isotrop emittierten elektromagnetischen Strahlung für den Beobachter von wesentlicher Bedeutung. Mit $\Gamma \gg 1$ gilt für den relativistischen Öffnungswinkel dieser für den Beobachter scheinbar keulenförmigen Emission $\Theta_{\text{rel}} \approx 1/\Gamma$. Der Gammaburst selbst entstammt demgemäß einem Gebiet, dessen Öffnungswinkel kleiner als $1/100$ rad ist. Zu anderen Bereichen des Feuerballs hat der Beobachter zunächst keinen kausalen Kontakt. Die

3) Die Internetseite von J. Greiner, www.aip.de/~jcg/grb.html, listet aktuelle GRB-Beobachtungen und die aktuelle Literatur auf.

Gammabeobachtungen verraten daher erst einmal nicht, ob eine isotrope Explosion vorliegt oder eine kollimierte Explosion (ein sog. Jet) mit einem intrinsischen Öffnungswinkel $\Theta_{\text{jet}} > \Theta_{\text{rel}} + \Theta_0$, wobei Θ_0 der Versatz des Beobachters relativ zur Jetachse ist. Der Gedanke, dass ein Jet vorliegen könnte, ist nicht abwegig. Das Jet-Phänomen stellt eine in der Entwicklung kosmischer Objekte nicht ungewöhnliche Erscheinung dar; Jet-artige Materieauswürfe finden sich sowohl bei

Abb. 4: Der Jet der Radiogalaxie Virgo A in ca. 16 Mpc Entfernung kann als (qualitatives) Beispiel eines kollimierten Materieauswurfs gelten (Aufnahme mit dem *Hubble Space Telescope*). Im Falle eines GRBs würde ein Beobachter aufgrund der hohen relativistischen Aberration Strahlung vom Jet nur wahrnehmen, wenn er sich direkt im Jetkegel befindet.



entstehenden Sternen, bei Röntgendoppelsternen, als auch bei Radiogalaxien und Quasaren (Abb. 4).

Die Zweifel an einer isotropen Explosion werden vor allem durch die aus den Gammabeobachtungen folgenden freigesetzten Energiemengen genährt – besonders deutlich bei GRB 990123: Legt man isotrope Emission zugrunde, so erreichte hier die im Gamma-band emittierte Energie rund $1,9M_{\odot}c^2$.

Der Afterglow von GRB 990123 zeigte rund zwei Tage nach dem Burst eine Beschleunigung des Helligkeitsabfalls, was sich in der Tat dahingehend erklären lässt, dass zu dieser Zeit der Beobachter in kausalen Kontakt zum Rand eines Jets geriet. Eine solche Beschleunigung der Helligkeitsabnahme ist bisher im Optischen bei einer Reihe von Bursts detailliert verfolgt worden. Die Kenntnis der Zeit, um die diese Beschleunigung nach einem Burst auftritt, gestattet es, Θ_{jet} im Rahmen von Afterglow-Modellen abzuschätzen, die anisotrope Explosionen beschreiben. Die derart deduzierten Öffnungswinkel der Jets liegen zwischen rund 3 und mehr als 25 Grad. Entsprechend reduzieren sich dann die anhand von zunächst angenommener isotroper Emission deduzierten Energiefreisetzung um den so genannten *beaming-Faktor* von etwa $4\pi/(2\pi\Theta_{\text{jet}}^2)$, wobei hier neben einem Jet auch ein Gegenjet angenommen wird. Fasst man die vorliegenden Beobachtungsdaten zusammen, so scheinen die im Gammaband leuchtkräftigsten Bursts auch die am engsten kollimierten Materieausflüsse zu beinhalten. Berücksichtigt man diesen Effekt, dann sammeln sich alle Bursts bei einem Energieausfluss um etwa 10^{44} Ws im Gammaband.

Ein generell eng gebündelter Materieausfluss bei den Bursts hat weitere interessante Konsequenzen: Einerseits erhöht er die Ereignisrate im Kosmos um den (mittleren) beaming-Faktor, weil wir damit aufgrund der relativistischen Aberration nicht von allen GRBs Kenntnis erlangen. Andererseits muss es für uns detektierbare Afterglows geben, von denen wir keinen eigentlichen GRB als Vorläufer gesehen haben, weil die Jetachse nicht auf uns gerichtet war. Wenn nämlich in der Afterglow-Phase der Lorentz-Faktor mit der Zeit abfällt, nimmt entsprechend der relativistische Öffnungswinkel mit der Zeit zu. Der Beobachter kann dann von einem GRB-Afterglow Kenntnis erlangen, obwohl er zurzeit der Strahlungsemission im Gamma-

band außerhalb des relativistischen Öffnungskegels eines intrinsisch eng kollimierten Jets lag. Nach solchen Afterglows ohne vorher detektierten Burst hat man in archivierten Röntgendaten des Ariel-V- und des ROSAT-Satelliten gesucht – ohne deutliche Hinweise zu finden [10]. Tiefe optische Himmelsdurchmusterungen nach solchen Afterglows sind derzeit im Gange.

Die Natur der Burster-Population

Die freigesetzten Energiemengen und die beobachteten Variabilitätszeitskalen der Bursts lassen kompakte Objekte (Neutronensterne oder Schwarze Löcher) als Burstquellen am wahrscheinlichsten erscheinen. Das hohe Energiereservoir eines rotierenden Schwarzen Lochs würde auch für die stärksten GRBs ausreichend Energie bereitstellen können. So gehen dann auch die derzeit favorisierten Vorstellungen davon aus, dass es eine kurzfristige, intensive Akkretion von Materie auf ein Schwarzes Loch ist, die verbunden mit magnetischen Feldern als Motor einer GRB-Explosion wirkt.

Die Burst-Szenarien, welche Schwarze Löcher einschließen und mit den aus den BATSE-Daten folgenden GRB-Raten von etwa 0,1 bis 10 pro Million Jahre und Galaxie im Einklang sind, kulminieren in zwei Modellen: a) dem Gravitationskollaps eines sehr massereichen Sterns ($M \gtrsim 25M_{\odot}$) [11] und b) dem Verschmelzen eines Doppelsternpaares, bei dem mindestens eine Komponente ein Schwarzes Loch oder ein Neutronenstern ist [12, 13]. Den Hauptbeitrag zu letzterer Gruppe dürften verschmelzende Neutronensternpaare bilden (Abb. 5). Diese Zweiteilung der Burst-szenarien trägt der Beobachtung Rechnung, dass sich die Bursts im Gammaband in zwei grundsätzlich verschiedene jeweils Gauß-förmig verteilte Populationen gruppieren, die sich zum einen in den spektralen Eigenschaften und zum anderen in der Dauer unterscheiden. Die eine Population besteht aus relativ weichen und langanhaltenden (etwa 2 bis etwa 1000 Sekunden) Bursts, die andere aus relativ harten und zugleich kurzen (etwa 0,01 bis 2 Sekunden Dauer) Bursts.

Numerische hydrodynamische Rechnungen lassen erwarten, dass der Gravitationskollaps massereicher Sterne, wenn er in der Bildung eines Schwarzen Loches münden sollte, lange Bursts erzeugen kann. Der GRB-Motor dürfte hierbei mit Akkretionsraten in der Größenordnung von $0,1M_{\odot} \text{ s}^{-1}$ relativ lange aktiv sein, weil die Sternmaterie beim Kollaps einige Zeit benötigt, bevor sie das frisch gebildete Schwarze Loch im Zentrum des Sterns erreicht. Hingegen sollte das Verschmelzen eines Neutronenpaares kurze Bursts erzeugen [13], weil einerseits die räumliche Ausdehnung der Akkretionsscheiben und die einbezogenen Sternmassen vergleichsweise gering und andererseits die Akkretionsraten hoch sind (in der Größenordnung von $1M_{\odot} \text{ s}^{-1}$). Jedoch könnte auch hier das Energiereservoir 10^{47} Ws erreichen, weil durch den hohen Bahndrehimpuls der verschmelzenden Neutronensterne möglicherweise ein nahezu maximal rotierendes Schwarzes Loch von zwei bis drei Sonnenmassen entsteht. Beim Verschmelzungsprozess können dabei bis zu einige $0,01M_{\odot}$ neutronenreicher Materie das System verlassen [13], was wesentlich zur Anreicherung des interstellaren Mediums mit neutronenreichen Kernen, wie z. B. dem Element Gold, beitragen kann (sog. *r*-Prozess; rascher Neutroneneinfang). Solche Neutronensternpaare, die innerhalb einiger 100 Millionen Jahre verschmelzen müssen, sind auch in unserer Galaxis anhand von Radio-

beobachtungen gefunden worden, z. B. PSR 1913+16 (Physik-Nobelpreis an R. A. Hulse und J. H. Taylor im Jahre 1993).

Wenn die langen Bursts auf die Explosion massereicher Sterne zurückgehen, dann sollte es eine Verwandtschaft zu jener wesentlich größeren Gruppe von Supernovae geben, welche ebenfalls die Explosion eines massereichen Sterns beinhalten, aber in der Geburt eines Neutronensterns münden. Diese potenzielle Beziehung ist erstmals mit GRB 980425 zutage getreten, bei dem man als wahrscheinlichste Quelle eine Supernova in nur rund 40 Mpc Entfernung fand. Diese stellte sich als die – bezüglich ihrer physikalischen Eigenschaften – ungewöhnlichste Supernova heraus, die man je gesehen hat. Bald darauf fanden sich in den Afterglow-Lichtkurven anderer rotverschobener GRBs ebenfalls Hinweise für das Erscheinen von Supernova-Licht einige Wochen nach der Explosion. Seither ist man intensiv bemüht, numerische Modelle solcher Explosionen zu entwickeln [11, 14].

Während die Beobachtungen die Hypothese unterstützen, dass die langen Bursts mit dem Endstadium massereicher Sterne verknüpft sind, ist die Situation bei den kurzen Bursts noch ungeklärt. Aus technischen Gründen konnte bisher keiner dieser Bursts mit Satelliten auf zumindest Bogenminuten-Genauigkeit lokalisiert werden, sodass rasche und tiefe Nachfolgebeobachtungen den Afterglow letztlich hätten exakt lokalisieren können. Daher ist es derzeit ungewiss, ob diese Bursts überhaupt von Afterglows gefolgt werden.

Ob durch das Verschmelzen zweier Neutronensterne, durch das Zerstören eines Neutronensterns beim Einfall auf ein Schwarzes Loch oder durch den Kollaps des Inneren eines schnell rotierenden, massereichen Sterns (sog. *Collapsar-Modell*) – all diesen Szenarien ist gemeinsam, dass letztlich ein rotierendes Schwarzes Loch (ein *Kerr-Loch*) von einem massereichen, baryonischen Torus oder einer Scheibe umgeben ist. Torus bzw. Scheibe werden vom Schwarzen Loch akkretiert. Innere Dissipation erzeugt dabei eine gewisse Akkretions-Leuchtkraft, die auf der Freisetzung gravitativer Bindungsenergie beruht. Viel bedeutender jedoch ist, dass über Torus oder Scheibe magnetische Felder mit dem Schwarzen Loch koppeln und ihm Rotationsenergie entziehen können. Der dann wirkende magnetische Bremseffekt wurde erstmals im Jahre 1977 von R. D. Blandford und R. L. Znajek im Zusammenhang mit Modellen für die Kerne aktiver Galaxien vorgeschlagen [15]. Vermutlich aber wirkt dieser Mechanismus (im Weiteren BZ-Mechanismus genannt) nicht nur bei supermassereichen Schwarzen Löchern, sondern auch bei ihren masseärmeren Verwandten, den Energiequellen für die GRBs.

In einem maximal rotierenden Schwarzen Loch der Masse M steckt die Rotationsenergie $E_{\text{rot}} = 0,29 Mc^2$. Bei einem Wirkungsgrad des BZ-Mechanismus von 0,31 kann dieser Prozess bis zu $1,6 \times 10^{46} (M/M_{\odot}) \text{Ws}$ an Energie aus dem Schwarzen Loch extrahieren. Der dabei maximal mögliche Energiestrom ist $\dot{E} \approx 6,7 \times 10^{45} H_{11}^2 (M/M_{\odot})^2 \text{Ws}^{-1}$, wobei H_{11} die Feldstärke am *Kerr-Horizont* in Einheiten von 10^{11} Tesla ist [16]. Die Kombination obiger Gleichungen lässt eine Abschätzung der *Bremsdauer* $t \approx E_{\text{rot}}/\dot{E}$ zu, welche in der Tat in etwa den Bereich der beobachteten Dauer der langen Bursts abdecken kann. Es ist also denkbar, dass der BZ-Mechanismus für den GRB-Motor von zentraler Bedeutung ist. Die Umwandlung dieses Stroms an elektromagneti-

scher Energie in einen bipolaren ultra-relativistischen Materiestrahl (Leptonen, mit wenig Kontamination durch Baryonen) findet vermutlich entlang der Rotationsachse des Schwarzen Lochs statt. Die einzelnen Explosionsszenarien werden sich in Zukunft daran messen lassen müssen, ob sie die aus der Beobachtung geschlossenen Öffnungswinkel der Jets erlauben.

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse einer numerischen Simulation des Gravitationskollaps eines sehr massereichen Sterns, der in der Bildung eines Schwarzen Lochs mündet. Ausgegangen wurde von einem $35M_{\odot}$ -Stern, welcher im Laufe seiner Entwicklung $21M_{\odot}$ durch einen Sternwind verlor, bevor mit dem Erschöpfen des Kern-

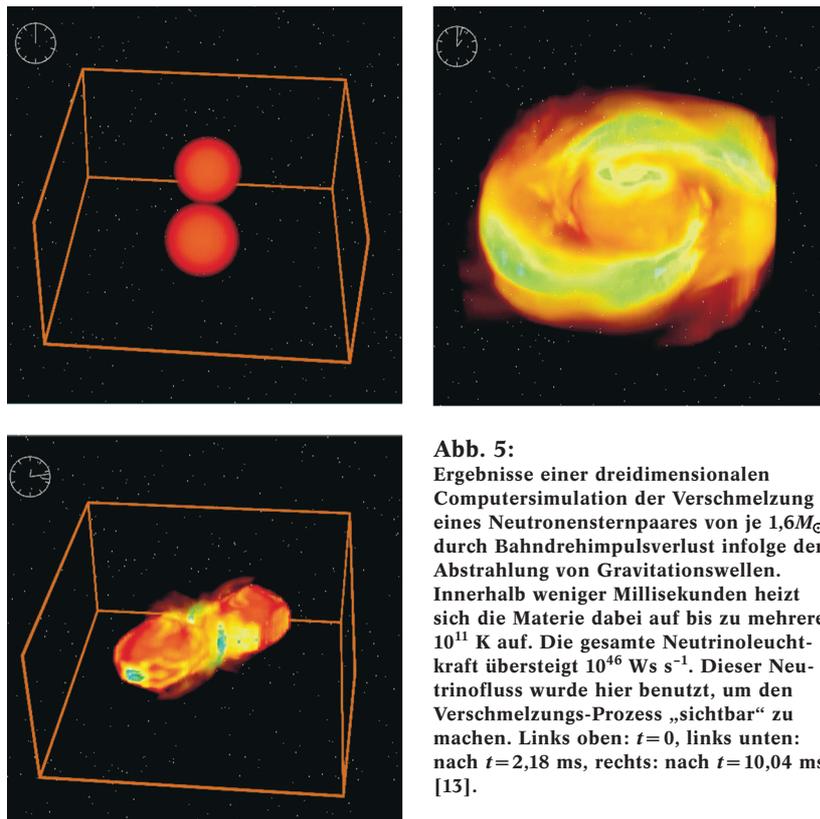


Abb. 5: Ergebnisse einer dreidimensionalen Computersimulation der Verschmelzung eines Neutronensternpaares von je $1,6M_{\odot}$ durch Bahndrehimpulsverlust infolge der Abstrahlung von Gravitationswellen. Innerhalb weniger Millisekunden heizt sich die Materie dabei auf bis zu mehrere 10^{11} K auf. Die gesamte Neutrino-Leuchtkraft übersteigt 10^{46}Ws^{-1} . Dieser Neutrinofluss wurde hier benutzt, um den Verschmelzungs-Prozess „sichtbar“ zu machen. Links oben: $t=0$, links unten: nach $t=2,18$ ms, rechts: nach $t=10,04$ ms [13].

brennstoffs sein Inneres kollabierte. Gezeigt ist hier die Dichteverteilung in den inneren 1000 km, etwa 5 s nach Beginn des Kollaps. Im Torus um das entstandene Schwarze Loch erreichen Dichte und Temperatur Werte von 10^9g/cm^3 bzw. 10^{10} K. Materie akkretiert hier in das Loch (etwa $3M_{\odot}$) mit $\dot{M} \approx 0,1M_{\odot} \text{s}^{-1}$. Im Jet sind die Materiedichten wesentlich geringer und die Materie fließt entlang der Rotationsachse des Lochs (welches sich im Inneren des Sterns befindet!) mit Geschwindigkeiten nahe c . Der bipolare Jet wird getrieben durch Energiefreisetzung in der Nähe des Schwarzen Lochs (BZ-Mechanismus) und die Annihilation von Neutrinos und Antineutrinos. Bis zur Sternoberfläche muss er etwa 100 000 km Sternmaterie durchlaufen.

Gamma-Ray Bursts als Werkzeuge der Kosmologie

Den Burst vom 23. Januar 1999 begleitete ein optischer Strahlungsblitz, dessen Quelle vermutlich die Rückwärtsstoßwelle war, die in den GRB-Feuerball hineinlief. Dieser optische Blitz war rund 10mal schwächer als die am Nachthimmel noch mit unbewaffnetem Auge sichtbaren Sterne. Bei einer Rotverschiebung von 1,6 entsprach dies aber im Strahlungsmaximum der mehr als 10^{16} -fachen Leuchtkraft der

Sonne. Wäre die Burstquelle in immerhin 1 kpc Entfernung gewesen, so hätte ihre scheinbare Helligkeit im Strahlungsmaximum mit jener der Sonne am Himmel konkurrieren können! Obgleich GRB 990123 wohl eher zu den allerhellsten Bursts zählte, so machte er doch deutlich, dass Bursts eine so außergewöhnliche Helligkeit entwickeln können, dass man sie – unabhängig davon, ob man das Phänomen selbst versteht oder nicht – effektiv als potenzielles Werkzeug der Kosmologie benutzen kann.

Auf seinem Weg zum Beobachter durchläuft das Afterglow-Licht viele Gpc intergalaktischen Mediums, gegebenenfalls auch die äußeren Halos von Protogalaxien, bevor es das interstellare Medium unserer Galaxis

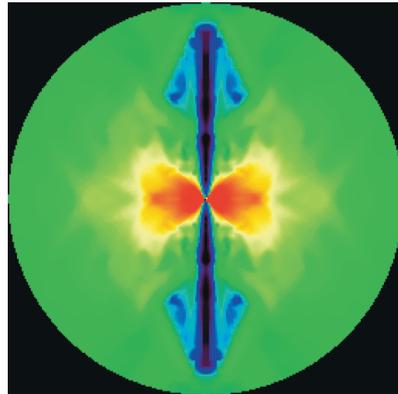


Abb. 6: Ergebnisse einer numerischen Simulation des Gravitationskollaps eines sehr massereichen Sterns, welcher in der Bildung eines Schwarzen Lochs mündet [11]. Links und rechts des entstandenen Schwarzen Lochs sieht man den Torus (orange), aus dem Materie ins Loch akkretiert. Entlang der Rotationsachse fließt Materie mit Geschwindigkeiten nahe c im so genannten Jet (blau).

durchstößt. Dies alles kann dem Afterglow charakteristische Spektrallinien aufprägen. Bei Quasaren macht man sich dies bereits seit Jahren zunutze, um das intergalaktische Medium zu erforschen. GRB-Afterglows hingegen können bei vergleichbaren Entfernungen für kurze Zeit um viele Größenklassen heller sein. Zudem nimmt im Vergleich zu Quasaren die Helligkeit der Afterglows mit zunehmender Rotverschiebung weniger schnell ab. Dies liegt im exponentiellen Abfall ihrer intrinsischen Leuchtkraft begründet. Die kosmologische Zeit-Dilatation sorgt dann nämlich dafür, dass bei festgehaltener Zeit nach einem Burst (im Ruhesystem des Beobachters) ein Afterglow in einer umso früheren Entwicklungsphase gesehen wird, je höher die Rotverschiebung ist, bei der er steht. Dann aber ist auch seine Leuchtkraft größer (Gl. 1). Dies macht die Detektion von GRB-Afterglows bis zu $z \approx 10-20$ theoretisch möglich, auch wenn dies aufgrund der intergalaktischen Absorption des Wasserstoffs dann nicht mehr im Optischen möglich wäre. Es wird eines der Hauptziele der kommenden Jahre sein, nach solchen hoch-rotverschobenen Bursts zu suchen.

Wenn sich die Collapsar-Modelle als richtig erweisen, dann zeigen die Bursts wie gigantische Leuchtbojen auf Sternentstehungsregionen im frühen Universum. Und weil der Kollaps sehr massereicher Sterne nur rund 10^7 Jahre nach ihrer Entstehung stattfindet, ergibt sich damit die Gelegenheit, die zeitliche Entwicklung der kosmischen Sternentstehungsrate (M_{\odot} pro Jahr und Mpc^3) bis hin zur ersten, bisher unentdeckten Stern-Generation zu verfolgen. Tiefe optische und Nah-Infrarot-Durchmusterungen kleiner Ausschnitte des Himmels haben diese Rate bisher bis zu Rotverschiebungen von $z \approx 4$ kenntlich gemacht, mit jedoch großen Unsicherheiten für $z > 2$. Numerische Simulationen der globalen kosmischen Strukturbildung deuten darauf hin, dass die Entstehung von Sternen bei $z \approx 20$ begann und dann zwischen $z \approx 10$ und $z \approx 1$ etwa

konstant war (im mitbewegten Volumenelement). Von $z \approx 1$ bis heute ($z = 0$) fiel sie um mehr als einen Faktor zehn. Mit Quasaren, Galaxien, Supernovae und GRBs zusammen könnte man somit seitens der Beobachtung den gesamten Bereich von $z = 0-20$ überdecken. Vom bisherigen Rotverschiebungsrekordhalter der Bursts mit $z = 4,5$ ist es sinnbildlich nicht mehr weit bis zu Rotverschiebungen um 10 bis 20, als die ersten Sterne entstanden.

Literatur

[1] G. J. Fishman, C. A. Meegan, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **33**, 415 (1995).
 [2] G. J. Fishman et al., *ApJ Suppl. Ser.* **92**, 229 (1994).
 [3] M. Bartelmann, *Phys. Bl.*, September 2001, S. 41.
 [4] K. Hurley et al., *Nature* **372**, 652 (1994).
 [5] T. Piran, *Phys. Rep.* **314**, 575 (1999).
 [6] P. Mészáros, *Science* **291**, 79 (2001).
 [7] R. D. Blandford, C. F. McKee, *Phys. Fluids* **19**, 1130 (1976).
 [8] J. van Paradijs, C. Kouveliotou, R. A. M. J. Wijers, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **38**, 379 (2000).
 [9] S. Klose, *Rev. Mod. Astron.* **13**, 129 (2000).
 [10] J. Greiner et al., *Astron. Astrophys.* **353**, 998 (2000).
 [11] A. I. MacFadyen, S. E. Woosley, *ApJ* **524**, 262 (1999).
 [12] C. L. Fryer, S. E. Woosley, D. H. Hartmann, *ApJ* **526**, 152 (1999).
 [13] M. Ruffert, H.-Th. Janka, *Astron. Astrophys.* (2001).
 [14] M. A. Aloy et al., *ApJ* **531**, L 119 (2000).
 [15] R. D. Blandford, R. L. Znajek, *Month. Not. Roy. Astron. Soc.* **179**, 433 (1977).
 [16] H.-K. Lee, R. A. M. J. Wijers, G. E. Brown, *Phys. Rep.* **325**, 83 (2000).

Die Autoren

Jochen Greiners Hauptinteresse gilt seit Jahren der Röntgenastronomie. Im deutschsprachigen Raum war er in den 80er Jahren einer der ersten, die sich der Erforschung der GRBs zuwandten. Was mit der Suche nach den optischen Gegenstücken dieser Bursts begann, hat sich zu einem seiner Hauptarbeitsgebiete entwickelt. Greiner hat zudem wesentlichen Anteil an der Entdeckung und Erforschung der so genannten superweichen Röntgenquellen – womöglich den Vorläufern von künftigen Supernova-Explosionen.

Dieter Hartmann studierte in Göttingen die thermodynamischen Eigenschaften nuklearer Materie unter Bedingungen im Inneren von Supernovae. Als Austauschstudent ging er anschließend an die University of California Santa Cruz, wo er 1989 über GRBs promovierte. Nach einem postdoc-Aufenthalt am Lawrence Livermore National Laboratory arbeitet er heute an der Clemson University in South Carolina.

Sylvio Klose studierte in den 80er Jahren Physik an der Friedrich-Schiller-Universität in Jena und promovierte dort in Astronomie über die physikalischen Eigenschaften des interstellaren Mediums. Mitte der 90er Jahre erwarb sein Interesse an den GRBs, als er herausfand, dass Röntgenstreuung am interstellaren Staub für die Erforschung der Natur der GRBs interessant sein kann. Mittlerweile bekommt er Meldungen über Satelliten-Detektionen von GRBs auf sein Handy.

Jochen Greiner, Sylvio Klose und Dieter Hartmann (v.l.) vor dem Auto von S.K. – man beachte das Nummernschild (GRB ...).

