

Geheimnisvolle Ausbrüche

Die gleichzeitige Beobachtung von Gammablitzen und Gravitationswellen stellt unser Wissen über die Eigenschaften der Jets bei den Strahlungsausbrüchen infrage.

Jochen Greiner

Obwohl Jets in verschiedenen astrophysikalischen Szenarien auftreten, ist bisher wenig über die zugrundeliegenden Mechanismen bekannt. Ihre schnelle zeitliche Variation bei Gammablitzen könnte es erlauben, die Struktur und den Emissionsmechanismus besser zu verstehen. Die Multimessenger-Beobachtungen des Gammablitzes GRB 170817A haben erste Einblicke gewährt und an bestehenden Modellen gerüttelt.

Um zu verstehen, wie ein astrophysikalischer Jet funktioniert, gilt es zunächst, seinen Erzeugungsmechanismus zu entschlüsseln. Außerdem stellen sich die Fragen, wie die Beschleunigung auf nahezu Lichtgeschwindigkeit und die Kollimation erfolgen, was seine innere geometrische Struktur ausmacht und welcher Mechanismus der Strahlungsemission zugrundeliegt. Um diese zu beantworten, scheinen die Jets bei Gammablitzen deutlich besser geeignet als diejenigen aus dem Kern Aktiver Galaxien: Während letztere sich auf Zeitskalen von vielen Jahren entwickeln, variieren Gammablitze deutlich schneller. Im Folgenden zeigt das Beispiel von GRB 170817A, wie neue Untersuchungen unseren Blick auf die Jets von Gammablitzen verändert haben. Zukünftig sollte die gleichzeitige Beobachtung von Gammablitzen und Gravitationswellen klären, ob es sich dabei um einen Einzelfall handelt oder einen deutlichen Fortschritt im allgemeinen Verständnis.

Gammablitze (engl. Gamma-Ray Bursts, GRBs) stellen die stärksten beobachteten Ausbrüche von elektromagnetischer Strahlung dar: Sie geben binnen einer Sekunde so viel Energie ab wie unsere Sonne während ihrer gesamten Lebensdauer von rund zehn Milliarden Jahren. Wenn die Elektronen in den Schockwellen dieser Ausbrüche mit der umgebenden Materie wechselwirken, entsteht ein Nachleuchten, das mehrere Tage als Röntgenstrahlung, im optischen Bereich und als Radiowellen sichtbar ist. Aufgrund ihrer Dauer und Ursache unterscheidet man zwei Arten von Gammablitzen (Abb. 1). „Lange“ Ausbrüche erzeugen Blitze, die typischerweise zehn bis hundert Sekunden anhalten und bei der Supernova-Explosion massereicher Sterne entstehen. Die Beobachtung von zwei Dutzend Ausbrüchen in geringer Entfernung zu uns belegt dies durch den Nachweis optischen Lichts der Supernova etwa acht bis zehn Tage nach dem Gammablitz [1]. Massereiche Sterne werden nur einige Millionen Jahre alt – im Gegensatz zu unserer Sonne. Daher treten die Strahlungsausbrüche relativ schnell nach der Entstehung des Muttersterns auf. Da massereiche

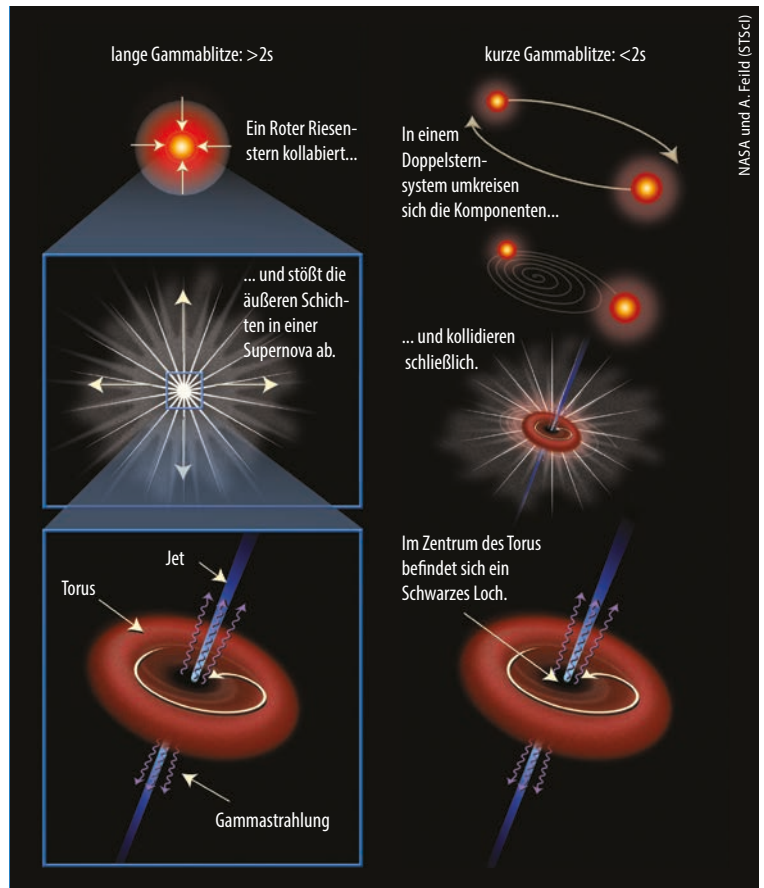


Abb. 1 Lange Gammablitze (links) entstehen, wenn ein massereicher Stern am Ende seines Lebens kollabiert und in einer Supernova explodiert. Verschmelzen zwei kompakte Objekte (rechts), zum Beispiel Neutronensterne, stoßen sie ebenfalls einen relativistischen Jet aus, der hier als kurzer Gammablitz beobachtbar ist.

Sterne häufig in Gruppen vorkommen, zeichnen sich die Muttergalaxien langer Ausbrüche wegen der vielen anderen jungen, heißen Sterne durch eine blaue Farbe und eine hohe Sternentstehungsrate aus. Lange Blitze lassen sich bis an den „Rand des Universums“ beobachten: Sie gehören zu den am weitesten entfernten bekannten Objekten. In den vergangenen zehn Jahren dienten sie in der Kosmologie dazu, die Entstehung der ersten Sterne und Galaxien zu untersuchen.

Die „kurzen“ Gammablitze sind dagegen nach weniger als zwei Sekunden vorüber; ihre Ursache ist das Verschmelzen zweier Neutronensterne. Damit dieses stattfindet, müssen sich zunächst in einem Doppelsystem beide Vorläufer zu Neutronensternen entwickelt haben. Weil

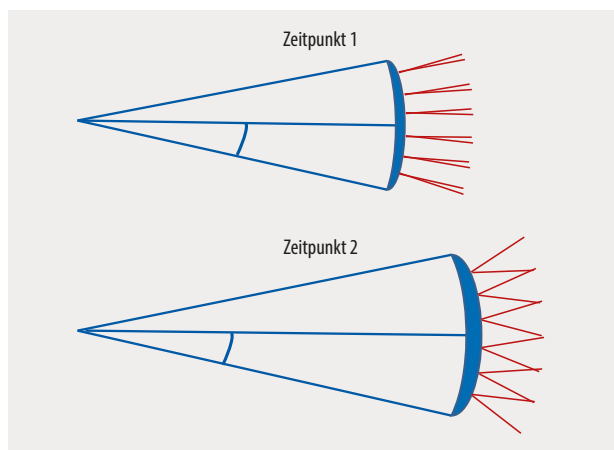


Abb. 2 Mit der Zeit wächst durch Abbremsen der Schockfront der Beaming-Winkel an (rot), während der geometrische Öffnungswinkel des Jets (blau) konstant bleibt.

diese Energie in Form von Gravitationswellen abstrahlen, deren geringe Intensität derzeit noch nicht detektierbar ist, kommen sie sich zunehmend näher, bis sie schließlich verschmelzen. Dieser Prozess dauert deutlich länger als die vorherige Sternentwicklung. Deshalb sind kurze Strahlungsausbrüche erst lange nach der Entstehung ihrer Vorgängersterne zu beobachten – und in den Muttergalaxien gibt es kaum noch Anzeichen von Sternentstehung.

Die Kombination zweier Effekte führt dazu, dass sich kurze Gammablitzes schwieriger detektieren lassen. Zum einen senden sie mehr hoch- als niederenergetische Strahlung aus; die meisten Detektoren reagieren aber deutlich empfindlicher bei niedrigen Energien. Zum anderen ist die abgestrahlte Energie (oder Leistung $\times$ Zeit) wegen ihrer kürzeren Dauer deutlich kleiner. Die bisher detektierten bzw. detektierbaren kurzen Blitze stammen deshalb überwiegend aus „kleineren“ Entfernungen, entsprechend der zweiten Lebenshälfte unseres Universums. Die geringere abgestrahlte Energie macht auch das Nachleuchten deutlich schwächer und damit die Entfernungsbestimmung mittels optischer Spektroskopie viel schwieriger. In den Blick der breiten Öffentlichkeit gerieten die kurzen Gammablitzes, als 2017 der gleichzeitige Nachweis des GRB 170817A mit Gravitationswellen gelang [2].

Zur Geometrie von Jets

Die riesigen Energiemengen beider Klassen lassen sich durch Jets erklären, die sich fast mit Lichtgeschwindigkeit auf uns zu bewegen. Die Jets entstehen, weil sich im Zentrum jeweils ein Torus um ein kompaktes Objekt bildet, sehr wahrscheinlich ein Schwarzes Loch. Bei den langen Blitzen kollabiert der massereiche Stern am Ende seiner Entwicklung. Beim Kollaps entsteht eine Schockfront, welche die weiter innen befindliche Materie weiter komprimiert. Den äußeren Anteil mit etwa der Hälfte der ursprünglichen Masse stößt sie radial nach außen ab: Das ist als Supernova beobachtbar. Wegen der Drehimpulserhaltung bildet sich aus dem inneren Teil ein schnell rotierender Torus um das neu entstandene zentrale Schwarze Loch. Bei den kurzen

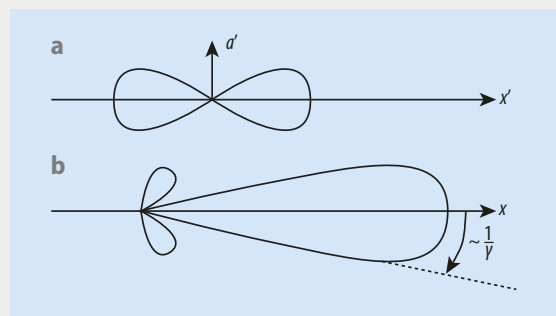
Strahlungsausbrüchen rotieren die beiden Konstituenten des Doppelsternsystems umeinander und bilden kurz vor dem Verschmelzen einen schnell rotierenden Torus in der Bahnebene des Doppelsternsystems.

Ein schnell rotierender Torus um ein zentrales kompaktes Objekt stößt einen Teil seiner Materie wieder aus, wenn die Rate der ins Zentrum strömenden Materie zu groß ist. Der Ausstoß erfolgt bevorzugt entlang der Rotationsachse des Torus, aus Symmetriegründen in beide Richtungen. Weil die ausströmende Materie in einem engen Winkelbereich kollimiert wird, heißen die resultierenden Gebilde Jets. Für die Kollimation gibt es mehrere Erklärungen; auch die Zusammensetzung der Materie im Jet ist unklar – vermutlich dominieren eher Elektronen als Protonen. Für die Beschreibung des Jets ist es wichtig, zwischen seinem geometrischen Öffnungswinkel und dem Beaming-Winkel zu unterscheiden (**Abb. 2**): Ersterer bleibt konstant, während letzterer mit der Zeit immer größer wird. Schocks innerhalb der Jets gelten als Ursprung der gemessenen Gammastrahlung.

Diese Schocks lassen sich als sehr dünne Schalen von Materie beschreiben: Quer zur Ausbreitungsrichtung entspricht ihr Durchmesser der geometrischen Dicke des Jets; in Richtung der Expansion sind sie um Größenordnungen kleiner. Salopp gesagt kommen sie entlang der Normalen als „fliegende Eierkuchen“ daher. Aufgrund des relativistischen Beaming [3] ist nur ein Teil ihrer Oberfläche sichtbar: der Ausschnitt, dessen Normale innerhalb eines Winkels $1/\gamma \ll \theta \approx 2^\circ - 5^\circ$ auf uns gerichtet ist. Dabei bezeichnet γ den Lorentz-Faktor: $\gamma = [1 - (v/c)^2]^{-1/2} \approx 100 - 500$. Mit voranschreitender Zeit, in der die Schockfront abbremst und somit γ kleiner wird, sinkt die emittierte Leistung stetig. Weil gleichzeitig die sichtbare Fläche zunimmt, wirkt sich dies auf die beobachtete Intensität anfangs verlangsamt aus. Sobald aber die sichtbare Region den Rand des Jets erreicht, kann sie nicht weiter anwachsen: Die Intensität der

Relativistischer Doppler-Effekt

Bewegt sich ein Elektron in einem Magnetfeld, wirkt die Lorentz-Kraft beschleunigend senkrecht zu seiner Bewegungsrichtung. Im nicht-relativistischen Fall (a) hat die abgestrahlte Synchrotronstrahlung eine Winkelabhängigkeit von $(1 - \sin^2\theta \cos^2\varphi)$. Im relativistischen Fall (b) erhöht der Lorentz-Faktor den Anteil vorwärtsgerichteter Strahlung (abgestrahlte Leistung proportional zu γ^6) und reduziert den Anteil in entgegengesetzter Richtung. Die abgegebene Strahlung ist in einen schmalen Bereich der Breite $1/\gamma$ in Bewegungsrichtung konzentriert (engl. beaming).



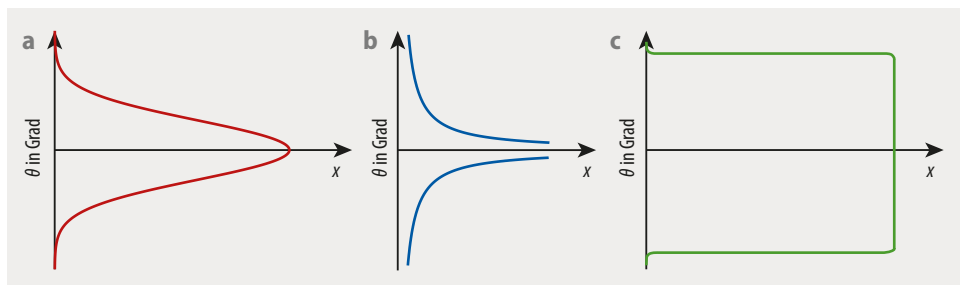


Abb. 3 Wie sich die Energiedichte eines Jets als Funktion des Öffnungswinkels verhält, ist bisher nicht bekannt: Eine Gauß-Verteilung (a) oder ein Potenzgesetz (b) scheinen möglich; der „Zylinderhut“ (c) ist unphysikalisch.

messbaren Strahlung fällt deutlich schneller ab als vorher. In der Lichtkurve des Nachleuchtens eines Gammablitzes zeigt sich dies im sogenannten Jet-Knick.

Ist der Öffnungswinkel des Jets und damit sein Querschnitt größer, erreicht die sichtbare Region den Rand erst später. Deshalb lässt sich aus der Messung des Zeitintervalls zwischen dem Gammablitz und dem Jet-Knick der Öffnungswinkel bestimmen. In vielen untersuchten Ausbrüchen trat der Knick ungefähr einen halben bis ganzen Tag nach dem Gammablitz auf, was einem Öffnungswinkel θ von etwa zwei bis fünf Grad entspricht. Das Verhältnis vom Radius am vorderen, dicken Ende zur Länge des Jets beträgt damit zwischen 1:29 und 1:11. Bisher galt die Annahme, dass die Gammastrahlung wegen des relativistischen Beaming (Infokasten) nur innerhalb des Öffnungswinkels des Jets beobachtbar ist. Damit ergibt sich für die Anzahl aller Strahlungsausbrüche im Universum ein Wert, der ungefähr 100-mal kleiner ist als die Zahl aller Kernkollaps-Supernovae: Nur jede hundertste Supernova erzeugt einen Ausbruch. Sollten aber auch Beobachtungswinkel jenseits des Öffnungswinkels möglich sein, braucht es intrinsisch weniger Ausbrüche, um die beobachtete Rate zu erklären. Entsprechend seltener ginge mit einer Supernova ein Gammablitz einher, zum Beispiel nur jedes 500. Mal.

Obwohl erstmals 1967 detektiert und seit Ende der 1970er-Jahre dediziert mit Satellitenmissionen untersucht, bleiben viele Vorgänge rund um die Strahlungsausbrüche unverstanden. Dazu gehören folgende Fragen:

- Wie genau bilden sich die Jets? Wie werden sie beschleunigt und kollimiert?
- Woraus besteht der Jet? Dominiert Materie oder ein Magnetfeld die Dynamik?
- Welche Geometrie beschreibt den Jet? Wie groß ist der Öffnungswinkel? Wie sieht die radiale Energieverteilung innerhalb des Jets aus?
- Wie genau wandelt sich die kinetische Energie des Jets bzw. ein Teil davon in Strahlung um? Welcher Emissionsprozess herrscht vor?

Im Folgenden liegt der Schwerpunkt auf den letzten beiden Punkten.

Zur Struktur von Jets

Völlig unbeantwortet bleibt bisher die Frage nach der Struktur von Jets bzw. wie sich die Energie radial, also von der Achse zur Oberfläche des Kegels, verteilt. Studien nutzen häufig der Einfachheit halber einen gleichförmigen Jet mit scharfer Kante (Abb. 3c). Dieser „Zylinderhut“-Jet ist

aber unphysikalisch. Oft diskutierte realere Versionen beruhen auf einer Gauß-Verteilung (Abb. 3a) oder einer mit einem Potenzgesetz nach außen abnehmenden Verteilung (Abb. 3b, sog. Universal-Jet). Beide Geometrien konzentrieren die meiste Energie entlang der Jet-Achse, während die Energie bzw. Intensität der emittierten Strahlung nach außen sehr schnell abfällt. Theoretische Modelle legen nahe, dass schon unter einem Beobachtungswinkel von 15 bis 20° die Energie um einen Faktor 10^{4-5} abfällt (Abb. 4) [4]. Dann wären Gammablitz nur sichtbar, wenn der Jet innerhalb weniger Grad in Beobachtungsrichtung zeigt. Obwohl die unterschiedlichen Strukturen auch zu verschiedenen Knicks in den Lichtkurven führen, gelang es bisher nicht, mithilfe der beobachteten Daten eines der Modelle zu favorisieren.

Wie Jets Strahlung emittieren

In den Jets breiten sich die Schocks nahezu mit Lichtgeschwindigkeit aus und beschleunigen Elektronen in einem Magnetfeld unbekannter Struktur. Die physikalischen Eigenschaften der Schocks legen fest, auf welche Weise die Elektronen elektromagnetische Strahlung emittieren. In jedem Fall verlieren die Elektronen Energie und kühlen

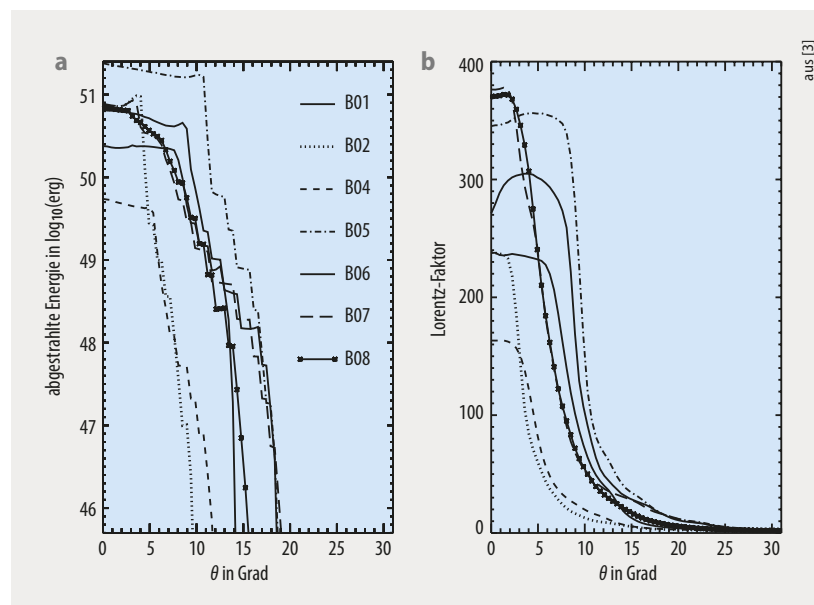


Abb. 4 Verschiedene Modelle sagen eine unterschiedliche Abnahme der abgestrahlten Energie E_{100} bei zunehmendem geometrischen Winkel θ relativ zur Jet-Achse vorher (a). Damit ändert sich auch der Verlauf des Lorentz-Faktors γ (b) und des Beaming-Öffnungswinkels $1/\gamma$ abhängig von θ .

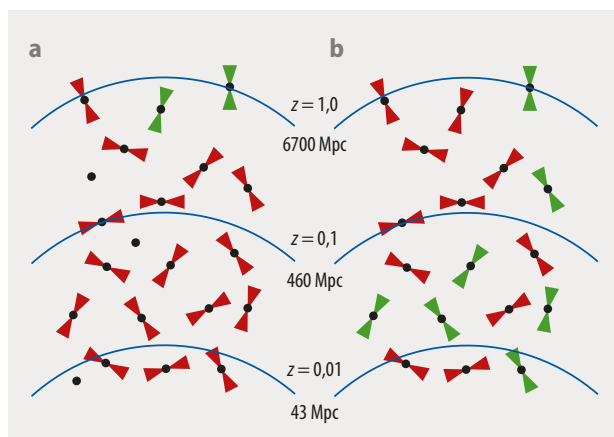


Abb. 5 Die beiden Verteilungen zeigen, von welchen verschmelzenden Neutronenstern-Paaren wir vor GRB 170817A (a) bzw. danach (b) erwartet haben, den Gammablitz (grün) zu sehen oder nicht (rot). Isolierte schwarze Punkte entsprechen Systemen, die keinen Gammablitz erzeugen.

ab. Dieses Abkühlen sollte das Emissionsspektrum über die Dauer eines Gammablitzes verändern.

Seit den 1970er-Jahren messen Gammadetektoren auf Satelliten die Spektren von Gammablitzten. Deren leichte Krümmung fällt deutlich geringer aus, als von einem thermischen Spektrum erwartet. Bislang ist unklar, ob sich die Krümmung kontinuierlich über weite Energiebereiche erstreckt oder ob sie durch zwei Potenzfunktionen mit unterschiedlicher Neigung hervorgerufen wird. Dagegen steht fest, dass die Peak-Energie E_{Peak} , das Maximum des Energieflusses, zwischen 100 und 300 keV liegt. Zeitaufgelöste Analysen der Gammaskpektren zeigen, dass sich E_{Peak} während des Blitzes häufig bis zu 20 bis 50 keV zu kleineren Energien verschiebt.

Derzeit stehen zwei Szenarien für den Emissionsmechanismus zur Diskussion, die beide ein gekrümmtes Spektrum generieren: Synchrotronstrahlung einer Population von Schock-beschleunigten, abkühlenden Elektronen oder die Emission aus einer optisch dichten Photosphäre, die mit relativistischer Geschwindigkeit expandiert. Einfache leptonische Modelle für die Synchrotronstrahlung, in denen nur die Elektronen strahlen, bleiben energetisch ineffizient. Daher braucht es weitere, effizientere Dissipationsmöglichkeiten, zum Beispiel hadronische Kollisionen mit Beschleunigung der Sekundärprodukte oder magnetische Instabilitäten mit Rekonnexion. Dabei ändert sich die Struktur eines Magnetfelds abrupt auf kleinen räumlichen Skalen. Das beschleunigt Elektronen und wandelt so magnetische in kinetische Energie um. Strahlungseffiziente Photosphären könnten aufgrund der Dissipation entstehen, zum Beispiel durch magnetische Rekonnexion oder sub-photosphärische Schocks, wenn Protonen und Neutronen entkoppeln.

Überraschendes durch Gravitationswellendetektion

Die Gravitationswellendetektoren LIGO/Virgo haben am 17. August 2017 das Verschmelzen zweier Neutronensterne im Ereignis GW170817 nachgewiesen. Gleichzeitig haben die Gammaobservatorien Fermi und INTEGRAL

den Gammablitz GRB 170817A beobachtet. Diese bemerkenswerte Koinzidenz gilt als Geburtsstunde der Gravitationswellen-Astronomie und hat das seit 30 Jahren favorisierte Szenario für die Entstehung kurzer Gammablitzte eindrucksvoll bestätigt. Einerseits lieferten optische Beobachtungen in den Tagen nach dem Gammablitz deutliche Belege für die im r-Prozess ablaufenden Kernreaktionen [5] und damit eine vielversprechende Erklärung für die Entstehung schwerer Elemente [2]. Andererseits hat GRB 170817A auch unser mangelhaftes Verständnis über die Struktur und den Strahlungsmechanismus von Jets offengelegt. Niemand hatte vorhergesagt, dass ein Jet mit einem Öffnungswinkel von 5° noch unter einem Winkel von 30° zu sehen ist (**Abb. 4a**). Darüber hinaus stammt das beobachtete Spektrum mit großer Sicherheit nicht von demselben Strahlungsprozess, der für die Emission in Richtung des Jets verantwortlich ist.

Gammastrahlung von außerhalb des Jets

Die unterschiedlichen Amplituden der zwei Polarisationsrichtungen von Gravitationswellen ergeben die Neigung der Bahnebene des verschmelzenden Doppelsternsystems relativ zur Sichtlinie des Beobachters: Für GW 170817 resultierte ein Winkel von $(28^{+15}_{-11})^\circ$ [6]. Aus der Modellierung des Nachleuchtens ergeben sich für den Jet ein Öffnungswinkel von weniger als 5° und ein Winkel von $(25 \pm 10)^\circ$ zwischen Jet-Achse und Beobachtung [7]. Die große Unsicherheit stammt von den verschiedenen Jet-Modellen inklusive deren Struktur und nicht von der Messung. Die Ergebnisse zeigen, dass es erstmals gelungen ist, Gammastrahlung von außerhalb des Öffnungswinkels zu detektieren.

Ähnliche Analysen erlaubte bislang nur GRB 980425, den Beppo-SAX und CGRO/BATSE detektiert haben und der wegen einer ungewöhnlichen zeitlichen und räumlichen Koinzidenz mit der Supernova SN 1998bw in Verbindung steht. Obwohl anfangs kontrovers diskutiert, gilt dieser lange Gammablitz von etwa 30 Sekunden als der erste, der beweist, dass der Ursprung langer Ausbrüche in Supernova-Explosionen sehr massereicher Sterne liegt. Dieser uns bisher räumlich nächste Ausbruch in einer Entfernung von 37 Mpc (Rotverschiebung: $z = 0,0085$) zeigte eine um vier Größenordnungen kleinere Leuchtkraft als übliche lange Gammablitzte. Heute ist die Interpretation akzeptiert, dass die Beobachtung von GRB 980425 von der Seite erfolgte, obwohl kein Wert für den Beobachtungswinkel vorliegt.

Der Vergleich von Beobachtungsdaten und Modellen zeigt demnach, dass die Gamma-Emissivität wohl deutlich langsamer mit dem Abstand zur Jet-Achse abfällt als erwartet und die Wahrscheinlichkeit größer ist, kurze Blitze deutlich außerhalb des Öffnungswinkels zu beobachten. Obwohl verschiedene Modelle die Daten vergleichbar gut beschreiben, bleibt die genaue Jet-Struktur weiterhin offen.

Unbekannter Strahlungsmechanismus

Die spektralen Eigenschaften der Gammastrahlung von GRB 170817A lassen sich nicht mit dem Emissionsmechanismus anderer kurzer Gammablitzte erklären – auch nicht unter der Annahme eines kleineren Lorentz-Faktors. Ähnlich wie bei einem Schwarzkörper-Strahler, dessen

Leuchtkraft eine Funktion seiner Temperatur ist, liegen für Synchrotron- und photosphärische Emission Parameterrelationen vor, um eine Kompatibilität mit beobachteten Eigenschaften zu prüfen. In beiden Fällen gelingt dies für keines der verwendeten Jet-Profile: Die Kombination von beobachteter Leuchtkraft und Photonen-Energie E_{Peak} mit der maximalen Strahlungsleistung lässt sich nicht allein durch einen dem Off-axis-Winkel entsprechenden, kleineren Lorentz-Faktor γ erklären. Das Beispiel von Synchrotronstrahlung für einen Universal- oder Gauß'schen Jet belegt dies: Das Verhältnis von Leuchtkraft L und E_{Peak}^2 ist proportional zu $\alpha \xi \gamma^{-1}$. Dabei ist α ein Maß für den Energieinhalt des Jets und ξ der Anteil der Elektronen, die Synchrotronstrahlung emittieren. Für die kanonischen kurzen Gammablitzte, deren Jet sich direkt auf uns richtet, lässt sich die beobachtete Gammastrahlung sehr gut mit Synchrotronstrahlung erklären. Da bei GRB 170817A die Leuchtkraft um vier Größenordnungen reduziert war, E_{Peak} aber nur um einen Faktor 2 bis 3, fällt das Produkt $\alpha \xi$ etwa 3000- bis 5000-mal geringer aus. Da ein $\alpha \ll 0,01$ nicht mit einem relativistischen Jet zu vereinbaren ist und eine sehr kleine Anzahl strahlender Teilchen ($\xi \ll 1$) zu einer sehr kleinen Strahlungseffizienz führt, müsste GRB 170817A deutlich mehr Energie intrinsisch freigesetzt haben. Ein größerer Lorentz-Faktor des Jets schwächt diese Einschränkungen etwas ab; mehr als ein Faktor 10 lässt sich aber nicht gewinnen (**Abb. 4b**). Die analysierte Relation zwischen Leuchtkraft, E_{Peak} und den anderen Größen gilt also nur für kanonische kurze Gammablitzte, aber nicht für GRB 170817A oder – allgemeiner ausgedrückt – von der Seite beobachtete Jets. Eine andere Struktur der Jets oder bislang vernachlässigte Aspekte im Strahlungstransport könnten zu einer konsistenten Erklärung führen.

Schwache Ausbrüche ganz nah

Neben dem mysteriösen Strahlungsmechanismus lässt sich auch die implizierte räumliche Verteilung von Strahlungsausbrüchen, insbesondere die Entfernungsverteilung, seit der Beobachtung von GRB 170817A nicht mit bisher akzep-

tierten Modellen erklären. Gemäß der bisherigen Interpretation stammt die Gammastrahlung nur aus dem inneren Öffnungswinkel des Jets. Entsprechend sollten schwächere Gammablitzte entweder weiter entfernt sein als hellere oder um wenige Grad relativ zu unserer Sichtrichtung orientiert sein. Aus dem zweiten Fall folgt eine marginal unterschiedliche Entfernung (Faktor ≈ 3) im Vergleich zu Ausbrüchen, die ihren Jet genau auf uns richten. In der neuen Interpretation stellt sich dies deutlich anders dar: Wenn sich Gammastrahlung bei einem Beobachtungswinkel von 30° mit $1/10\,000$ der Leuchtkraft sehen lässt, müssen einerseits die meisten schwachen Gammablitzte bei großen Beobachtungswinkeln auftreten, weil es viel mehr „falsch“ ausgerichtete Jets geben sollte als solche, die mit $< 5^\circ$ auf uns gerichtet sind. Andererseits lassen sich diese schwachen Ausbrüche nur in hundertmal kleinerer Entfernung messen, weil unsere Instrumente sonst nicht empfindlich genug dafür sind. In dieser neuen, „invertierten“ Sicht befinden sich also die schwachen Gammablitzte näher bei uns als die helleren Objekte, deren Jet-Achse nicht direkt auf uns gerichtet ist (**Abb. 5**).

Daraus folgen interessante Konsequenzen. Zunächst stellt sich die Frage, wieso sich alle seit 2004 mit Swift detektierten, etwa 40 kurzen Gammablitzte bei Entfernungen von 500 bis 6700 Mpc (Rotverschiebung $z \sim 0,1$ bis 1) verorten lassen und nicht bei 40 Mpc ($z \sim 0,01$) wie GRB 170817A. In einer Kombination verschiedener Ursachen ist dafür wohl entscheidend, dass nur für zwei Gammablitzte optische Spektren des Nachleuchtens vorliegen, aus denen die Entfernung sicher abzuleiten ist. Stattdessen beruhen sonst die Abschätzungen für kurze Gammablitzte auf einer räumlichen Korrelation zur naheliegendsten Galaxie. Außerdem ändert sich die erwartete Rate gemeinsam detektierter Gravitationswellen- und Gammesignale. Bislang entsprach die Erwartung dem Anteil an Jets, die auf uns ausgerichtet sind, also ein Hundertstel. Mit den größeren möglichen Beobachtungswinkeln wächst diese Rate auf ein Dreißigstel bis ein Zehntel. Im dritten Beobachtungslauf O3 von LIGO und Virgo ließen sich vier Gravitationswellen-

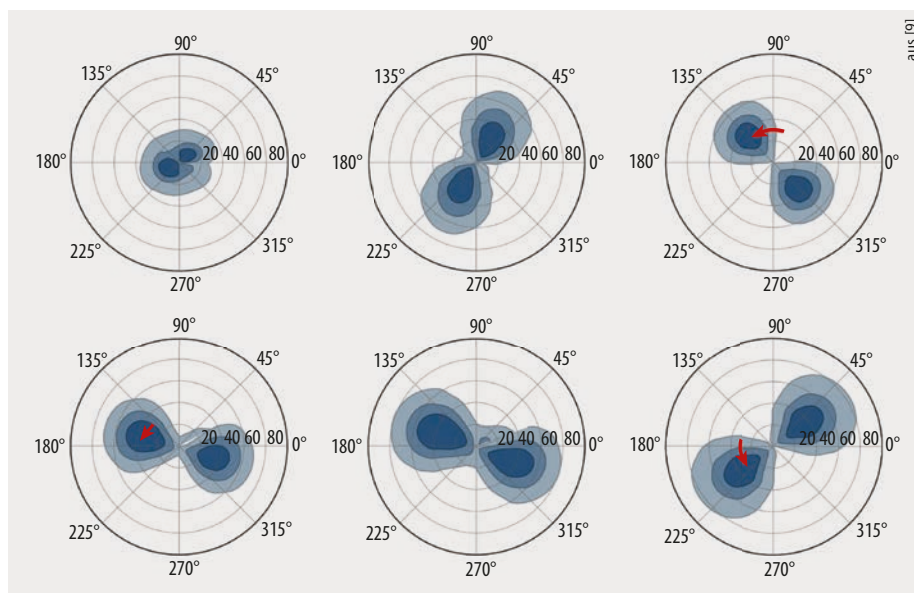


Abb. 6 Die Kreispanele zeigen den Polarisationsgrad in Prozent (Abstand vom Mittelpunkt) abhängig vom Polarisationswinkel (Azimuth) für die ersten sechs der insgesamt sieben Zeitintervalle des GRB 170114A. Jedes Kreispanel entspricht einer Zeit von etwa 0,6 s; rote Pfeile zeigen, wenn sich der Polarisationswinkel ändert. Da dieser nur zwischen 0° und 180° variiert, ergeben sich zwei Konfidenzregionen.

Ereignisse verschmelzenden Neutronensternen zuordnen; zu keinem erfolgte die gleichzeitige Detektion von Gammastrahlung: Die nächste Beobachtungskampagne von LIGO, Virgo und KAGRA könnte genug Ereignisse liefern, um die neue Abschätzung zu bestätigen.

Die Frage nach der Rate hat aber noch einen anderen Aspekt: Wie viele Doppelsternsysteme mit zwei Neutronensternen gibt es überhaupt, die pro Zeiteinheit verschmelzen und dabei einen kurzen Gammablitzen erzeugen? Unabhängig davon, ob bei jedem Verschmelzen ein Gammablitzen entsteht, bieten Populationsmodelle leider keine genaue Antwort. Insbesondere reproduzieren die Modelle derzeit nicht die Verteilung der Eigenschaften dieser Systeme, vor allem bei den Massen und Bahn-Exzentrizitäten [8]. Beides sind aber ganz wesentliche Parameter, um die Überlebenswahrscheinlichkeit des Doppelsternsystems nach der Bildung der Neutronensterne zu bestimmen. Entsprechend groß ist die Unsicherheit in der Gesamtrate verschmelzender Neutronensterne, die von 1 bis 400 $\text{Gpc}^{-3}\text{yr}^{-1}$ reicht. Der Wert ist kleiner als die empirisch aus den bisherigen LIGO-Virgo-Daten abgeleitete Rate von 13 bis 1900 $\text{Gpc}^{-3}\text{yr}^{-1}$. Daher könnten die Gravitationswellen verschmelzender Neutronensterne in den nächsten Jahren hilfreiche Nebenbedingungen für Populationsmodelle liefern. Auch aus der Beobachtung von Gammastrahlung lässt sich unter der Annahme, dass die Strahlung nur aus dem Öffnungswinkel des Jets stammt, eine Rate ableiten. Diese beträgt etwa $(4 \pm 2) \text{Gpc}^{-3}\text{yr}^{-1}$ und war mit den Populationsmodellen kompatibel.

Messung der Polarisation

Um Genaueres über den Emissionsmechanismus zu lernen, erscheint es vielversprechend, die Polarisation der Gammastrahlung zu messen, also die Schwingungsrichtung des elektrischen Feldes. Eine Polarisationsmessung liefert zum einen den Polarisationsgrad – den Anteil der Photonen, die in derselben Richtung polarisiert sind – und zum anderen den Polarisationswinkel, der die Ausrichtung des elektrischen Feldes anzeigt. Polarisierte Strahlung entsteht z. B. durch Streuung oder wenn Elektronen in einem Magnetfeld Strahlung emittieren. Bei Gammablitzen sollte Synchrotronstrahlung stark polarisiert sein, photosphärische Emission eher weniger. Dazu darf das Magnetfeld nicht völlig chaotisch sein, sondern muss eine großskalige, mit dem Jet verknüpfte Struktur besitzen. Polarisationsmessungen für Energien $\geq 50 \text{ keV}$ stellen das Nonplusultra gegenwärtiger Messtechnik dar. Bei den Versuchen, die Polarisation in Gammablitzen zu bestimmen, führten bisher relativ große Messfehler zu nicht eindeutigen Ergebnissen.

Die signifikanteste Messung stammt vom Polarimeter POLAR, das 2016 speziell für diesen Zweck sechs Monate lang auf der zweiten chinesischen Raumstation betrieben wurde. Einer von 50 vermessenen Gammablitzen war so hell und lang, dass die Polarisation für sieben aufeinanderfolgende Zeitintervalle bekannt ist (**Abb. 6**). Ab dem zweiten Intervall liegt ein großer Polarisationsgrad vor. Überraschenderweise ändert sich der Polarisationswinkel für jedes Zeitintervall: Die zeitliche Abfolge deutet auf eine kontinuierliche Rotation hin. Dafür gibt es bisher

keine theoretische Erklärung; die Rotation könnte aber die Diversität und schlechte Signifikanz vorangegangener Messungen verständlich machen, da diese bis auf eine Ausnahme nicht zeitaufgelöst gemessen wurden: Ein sich drehender Polarisationswinkel verschmiert das Signal bei zu großen Zeitintervallen. Im gezeigten Beispiel liegt ein simultaner Fit des Spektrums an ein physikalisches Synchrotronpektrum inklusive Elektronenkühlung und der Polarisation vor. Die Konsistenz des Resultats legt nahe, dass es sich um Synchrotronstrahlung handelt. Weitere Messungen dieser Art sind nötig, um die zeitliche Variation der Polarisation zu verifizieren.

Ausblick

Auch wenn die Struktur des Jets von GRB 170817A unklar bleibt, zeigen die Beobachtungen, dass es ohne die gleichzeitige Messung der Gravitationswellen nicht möglich ist, On- und Off-axis-Gammablitze zu unterscheiden. In Zukunft ist es nötig, die Entfernung exakter zu messen und das Nachleuchten genauer zu beobachten sowie detailliertere Modelle der Emissionseigenschaften zu entwickeln.

Um die Polarisation der Gammastrahlung zu untersuchen, soll ein neues Instrument mit etwa zehnmal höherer Empfindlichkeit auf der dritten chinesischen Raumstation Tiangong-3 installiert werden [10]: POLAR-2 ermöglicht es selbst für kurze Gammablitze wie GRB 170817A, die Polarisation zu messen. Diese Daten dürften einen großen Schritt zu einem besseren Verständnis der Emission von Jets sowohl entlang der Achse als auch bei großen Beobachtungswinkeln erlauben.

Literatur

- [1] H.-T. Janka, S. Klose und F. Röpke, *Sterne und Weltraum* **50**, 30 (2011)
- [2] G. Martínez-Pinedo, B. D. Metzger und F.-K. Thielemann, *Physik Journal*, Dezember 2017, S. 20
- [3] E. Püschel und G. Maier, *Physik Journal*, Januar 2022, S. 24
- [4] H.-T. Janka et al., *ApJ* **645**, 1305 (2006)
- [5] R. Diehl und C. J. Hansen, *Physik Journal*, Oktober 2020, S. 23
- [6] B. P. Abbott et al., *Phys. Rev. X* **9**, 011001 (2019)
- [7] S. Makhathini et al., *ApJ* **922**, 154 (2021)
- [8] I. Mandel et al., *MN* **500**, 1380 (2021)
- [9] J. M. Burgess et al., *A&A* **627**, A105 (2019)
- [10] Mehr zu POLAR-2: www.unige.ch/dpnc/polar-2

Der Autor



Jochen Greiner forscht seit vielen Jahren zu Gammablitzen, angefangen mit Monte-Carlo-Simulationen über Studien des Nachleuchtens bis zu Messungen der Gammastrahlung, u. a. 10 Jahre als PI des deutschen Fermi-Teams. Seit 2007 ist in Chile sein dediziertes Instrument GROND zum schnellen Vermessen großer Entfernungen langer Gammablitze im Einsatz. Er lehrt als Privatdozent an der TU München.

Dr. Jochen Greiner, Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Gießenbachstr. 1, 85748 Garching