

ASTROPHYSIK

Das tobende Universum

Der Gamma-Satellit Fermi beobachtet seit zwei Jahren die energiereichsten Vorgänge im Kosmos.

Jochen Greiner

Das Fermi Gamma-ray Space Telescope übertrifft seine Vorgänger an Empfindlichkeit, räumlichem Auflösungsvermögen und Energieabdeckung. Doch wie schnell sich spektakuläre Beobachtungsergebnisse einstellten, welche Genauigkeit und Eindeutigkeit sie erreichten, überraschte selbst die beteiligten Astronomen.

Am 11. Juni 2008 brachte eine Delta-II-Rakete das Weltraumteleskop auf seine 565 Kilometer hohe Umlaufbahn. Kurz nach dem erfolgreichen Abschluss der zweimonatigen Testphase benannte die NASA das Gamma-ray Large Area Space Telescope (GLAST) zu Ehren des Kernphysikers Enrico Fermi um. Dieser hatte 1948 – elf Jahre nach Erhalt des Physik-Nobelpreises für die Entdeckung der durch langsame Neutronen ausgelösten Kernreaktionen – die Theorie für zwei Mechanismen entwickelt. Sie beschreiben, wie geladene Teilchen beim Passieren von mit nahezu Lichtgeschwindigkeit dahin rasenden Stoßfronten beziehungsweise turbulenten Plasmen Energien bis hin zu TeV oder gar PeV ($10^{12} - 10^{15}$ eV) erhalten können [1]. Diese beiden Prozesse sind heutzutage als Fermi-Beschleunigung erster und zweiter Ordnung bekannt.

Fermis Arbeit erschien just zu einer Zeit, als verschiedene Forscher über die Existenz von Gammastrahlung aus dem All spekulierten. So sollten die energiereichen Partikel der kosmischen Strahlung durch Compton-Streuung zumindest einen Teil ihrer Energie auf Lichtteilchen übertragen. Diese würden dann – gemäß der von Ernest Rutherford eingeführten Bezeichnung für die dritte Sorte radioaktiver Strahlung – zu Gamma-Quanten. Sie haben mehr Energie als Röntgen-Photonen, mindestens 120 keV, und Wellenlängen, die kleiner sind als ein Atom. Zum Glück für das Leben, wie wir es kennen, schirmt die Erdatmosphäre uns vor diesem Bombardement ab. Für die Forscher bedeutet dies aber im Gegenzug, die Lufthülle unter sich lassen zu müssen, um nach Gammastrahlung zu suchen. Erster Satellit zu diesem Zweck war Explorer-11, gestartet 1961. Der rund 40 Kilogramm schwere Kundschafter verzeichnete während seines siebenmonatigen Dienstes mehr als 20 000 Treffer von Teilchen der kosmischen Strahlung und 22 gleichmäßig über den gesamten Himmel verteilte Gamma-Photonen – Ausdruck des erwarteten Gamma-Hintergrunds.



NASA

Das Gamma-Observatorium Fermi kann mit seiner großen Detektorfläche und -empfindlichkeit auch leuchtschwache Quellen beobachten.

Die Nachfolger von Explorer 11 registrierten dann in den späten 1960er- und Mitte der 1970er-Jahre erstmals einzelne, diskrete Quellen in diesem Energiebereich: Sonneneruptionen, die ersten Pulsare (Geminga, Crab, Vela) und die mysteriösen Gammastrahlenausbrüche (Gamma-Ray Bursts, GRBs).

Einen erheblich tieferen Einblick in das tobende Universum ermöglichte das Compton Gamma Ray Observatory, das auch etliche aktive galaktische Kerne (Active Galactic Nuclei, AGN) detektierte, überwie-

KOMPAKT

- Fermi ist der Nachfolger des NASA-Gamma-Observatoriums Compton aus den 1990ern. Seine beiden Instrumente, LAT und GBM, decken das elektromagnetische Spektrum von 8 keV bis etwa 300 GeV ab – und damit die energiereichsten Prozesse im Universum.
- Das Large Area Telescope (LAT) beobachtet ständig emittierende Quellen wie aktive Galaxien, Pulsare oder Supernovaüberreste und verzeichnet den zeitlichen Verlauf ihrer Emission, um die dahinter liegenden Mechanismen im Detail zu entschlüsseln.
- Der Gamma-ray Burst Monitor (GBM) scannt den gesamten Himmel nach Ausbrüchen von Gammastrahlen in der Erdatmosphäre oder im Kosmos und gibt deren Positionen an die Observatorien am Boden zur Nachbeobachtung in anderen Spektralbereichen weiter.

Dr. Jochen Greiner, Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE), Giessenbachstraße 1, 85748 Garching

1) Dabei handelt es sich um das Energetic Gamma-Ray Experiment Telescope (EGRET) und das Burst And Transient Source Experiment (BATSE).

gend aus der Unterklasse der Blasare mit ihren fast lichtschnellen Materiestrahlen (Jets). Es war 1991 als zweites der vier großen Weltraumteleskope der NASA von einem Spaceshuttle ins All gebracht worden, ein Jahr nach Hubble. Mit seinen vier Instrumenten und einer Gesamtmasse von 17 Tonnen war es ein wahrer Titan der Forschung und der direkte Vorläufer von Fermi. Denn dessen zwei wissenschaftliche Instrumente, das Large Area Telescope und der Gamma-ray Burst Monitor (Infokasten „Die Fermi-Instrumente“), sind direkte Weiterentwicklungen von zwei der vier Compton-Experimente¹⁾. Sie sollen Fragen beantworten, welche die Beobachtungen mit Compton bis zu dessen Verglühen über Australien im Juni 2000 nicht klären konnten oder sogar erst aufgeworfen haben:

- Wie genau geht die Teilchenbeschleunigung in Supernova-Überresten vor sich, wie sieht die Dynamik der Stoßfronten aus?
- Wo haben die Jets der Quasare und Blasare ihren Ursprung?
- Welcher Prozess entzieht Neutronensternen die Rotationsenergie und führt zur Entstehung von Gammastrahlung?
- Lässt sich der diffuse Gamma-Himmel auflösen und was verbirgt sich hinter den vielen bislang unidentifizierten Einzelquellen?
- Können die Helligkeitsverläufe schnell aufleuchtender GRBs und anderer „transienter“ Quellen zeitlich aufgelöst und ihre Eigenschaften bestimmt werden?

■ Was können wir anhand des Studiums supermassereicher Schwarzer Löcher und deren Entwicklung über das frühe Universum lernen?

Die ersten beiden Jahre der Mission brachten bereits eine überwältigende Fülle an Ergebnissen. Insbesondere hat die Strategie, faktisch den gesamten Himmel alle drei Stunden im „all-sky survey“-Modus zu scannen, viele überraschende Resultate hervorgebracht, die die Wissenschaftler selbst bei den sich – im astronomischen Maßstab – äußerst schnell ändernden Helligkeiten von Gamma-Quellen nicht erwartet hatten. Im Februar 2010 erschien der erste LAT-Katalog, der die im ersten Jahr entdeckten fast 1500 Quellen enthält [3]. Dabei zeigt sich eine große Vielfalt von Objektklassen mit ständiger Emission oberhalb von 100 MeV (Tab. 1 und Abb. 1).

Heiße Blitze im Kalten Krieg

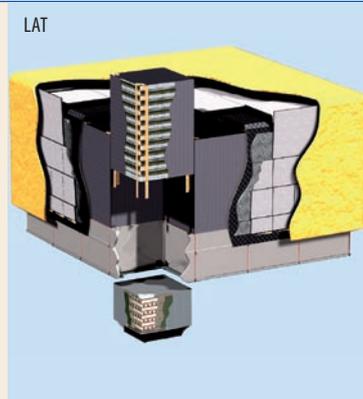
Kaum ein anderes Forschungsgebiet der Astrophysik hat in den letzten Jahren einen so gewaltigen Fortschritt erlebt wie die Erforschung der kosmischen Gammastrahlenausbrüche (Gamma-Ray Bursts, GRBs; salopp „Bursts“). Das sind einmalige, Sekunden-kurze Strahlungsblitze im besonders energiereichen Gammalicht. Im Moment des Auftretens sind sie die mit Abstand hellsten Gammaquellen am Himmel. Vela-Militärsatelliten entdeckten sie in der zweiten Hälfte der 1960er Jahre – die Späher suchten eigentlich nach

DIE FERMI-INSTRUMENTE

Das **Large Area Telescope LAT** ist ein abbildendes Gammastrahlen-Teleskop für die systematische Durchmusterung des Himmels im Energiebereich zwischen 100 MeV bis zirka 300 GeV. Zum Nachweis der Photonen dient der Paarzeugungseffekt, mit dem sich neben der Energie auch die Richtung des einfallenden Gammaquants bestimmen lässt. Bei genügend hohen Energien oberhalb von 100 MeV „konvertiert“ das masselose Lichtteilchen in zwei mit Masse behaftete Teilchen entgegengesetzter Ladung, ein Elektron und sein Antiteilchen, ein Positron.

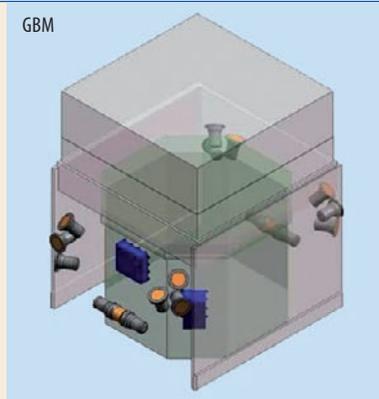
Ein Spurdetektor bestimmt den Weg der beiden entstandenen Fermionen über die Wechselwirkung der geladenen Teilchen mit den einzelnen Detektoreinheiten. Daraus lässt sich die ursprüngliche Energie und Richtung des Gammaphotons rekonstruieren. Am LAT sind Institute aus Frankreich, Italien, Schweden und den USA beteiligt.

Der **Gamma-ray Burst Monitor GBM** besteht aus 14 Kristalldetektoren, zwölf aus Natriumiodid (NaI), sowie zwei aus Wismutgermanat (BGO) [2]. Diese Szintillationskristalle leuchten beim Eindringen eines Gammaphotons kurz auf (szintillieren). Lichtempfindliche Elek-



Die zwei Instrumente des Fermi-Observatoriums: ein Schema der 16 „Türme“ des LAT und die Anordnung der 14 Kristalldetektoren des GBM am Satellitenkörper.

tronenröhren, die an die Kristalle gekoppelt sind, wandeln das Szintillationslicht in ein elektrisch verwertbares Signal um, aus dem der GBM-Bordrechner eine erste grobe Position errechnet. Er übermittelt diese einerseits an das LAT, andererseits zur Bodenstation, damit die Position möglichst rasch per Burst-Alarm Wissenschaftlern weltweit zur Verfügung steht. Denn das Ziel ist es, so schnell es geht mit möglichst vielen und unterschiedlichen Instrumenten Beobachtungen des GRB-Nachglühens in anderen Wellenlängenbereichen anzustellen.



Aufgrund der unterschiedlichen Dichte und Kernladungszahl überdecken NaI und BGO die Energiebereiche von 8 keV bis 1 MeV beziehungsweise 150 keV bis 40 MeV.

Der GBM wurde vom Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik in Garching und dem Marshall Space Flight Center der NASA in Huntsville, Alabama, entwickelt. Im Auftrag des MPE bauten die Firmen Jena-Optronik und EADS Astrium, Friedrichshafen, die GBM-Detektor-Hardware, gefördert aus Mitteln des DLR.

NASA, MPE

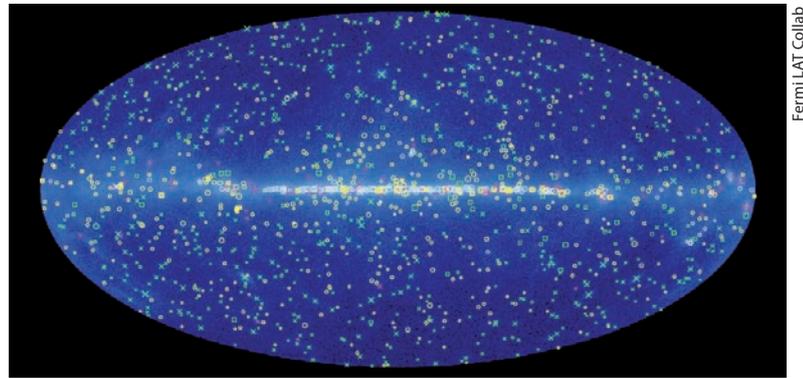
Quellen des ersten LAT-Kataloges	
Objektkategorie	Anzahl der Objekte
Blasare	573
andere aktive galaktische Kerne (AGN)	120
Pulsare (PSRs)	87
Supernova-Überreste (SNRs)	44
Kugelsternhaufen	8
Normale Galaxien	6
Doppelsternsysteme	3
Sonstige	7
Bislang unidentifiziert	630

Tab. 1 Aufschlüsselung des ersten Fermi-LAT-Quellenkatalogs („1FGL“) nach der Art der 1451 Objekten, die der Fermi-Satellit von August 2009 bis Juli 2010 beobachtet hat. Blasare und andere AGN – und somit die extragalaktischen Quellen – sind bei den identifizierten Gammastrahlern in der Überzahl.

verbotenen Kernwaffentests seitens der UdSSR. In anderen Spektralbereichen blieben sie unentdeckt, über ihre Natur herrschte deshalb lange Rätselraten. Das Jahr 1997 brachte den Durchbruch: Dem italienisch-niederländischen Röntgensatelliten BeppoSAX gelang es erstmals, das Nachleuchten oder „Nachglühen“ eines Bursts in einem anderen Frequenzbereich zu erfassen. Dabei zählt tatsächlich jede Minute, deshalb gibt es seit sechs Jahren einen speziellen NASA-Satelliten, der genau darauf spezialisiert ist, den kleinen, flinken „Swift“.²⁾ Heute ist klar, dass es sich bei GRBs um Objekte bei kosmologischen Entfernungen handelt. Entsprechend entwickeln sie, wie auch Quasare, enorme Leuchtkräfte – im Maximum geben sie so viel Energie ab wie 10^{16} Sonnen oder 10^5 Milchstraßen.

GRBs treten in zwei Populationen auf mit sehr kurzer (< 2 s) und etwas längerer Ausbruchsdauer [4]. Die langsameren Ereignisse führen die Astrophysiker auf die Explosion bestimmter massereicher Sterne zurück, in deren Folge ein Schwarzes Loch entsteht [5]. Während dieser „Hypernovae“ schießen polare Jets ins All, deren Kollision mit dem in den Jahrtausenden zuvor abgegebenen Sternwind und dem interstellaren Material zum Nachleuchten führt. Die weniger als zwei Sekunden dauernden Bursts stammen dagegen wohl von verschmelzenden alten Neutronensternen.

Die Kombination von LAT und GBM auf Fermi erlaubt nun erstmals, die Gamma-Emission über sieben Dekaden in der Energie gleichzeitig zu messen: 8 keV bis 100 GeV. Übertragen auf ein Klavier wäre dies ein Tonumfang von 23 Oktaven! Damit erbrachte das Observatorium gleich eine Reihe überraschender Ergebnisse. So zeigte sich, dass die GRB-Emission oberhalb von 300 MeV deutlich länger ausgedehnt ist als im „klassischen Bereich“ von 20 keV bis einigen MeV. Dies kannte man von einem einzigen Burst von 1994, LAT findet es jetzt allerdings bei jedem neuerlichen Ereignis. Außerdem beginnt die Emission in diesem Teil des Spektrums mit einer Zeitverzögerung, die etwa ein Zehntel seiner Gesamtdauer beträgt. Dies gilt für beide Burst-Populationen, lange wie kurze. Zudem tritt manchmal eine weitere spektrale Komponente mit deutlich energiereicheren Photonen auf.



Fermi LAT Collab

Abb. 1 Die Karte des Gammahimmels mit den Objekten aus Tab. 1 zeigt Supernova-Überreste (violette Quadrate), Pulsare (violette Kreuze), dazugehörige Nebel (violette Kreise), Röntgendoppel-

sterne und Mikroquasare (weiße Kreuze), die meist in der Nähe des Milchstraßen-Äquators liegen. Extragalaktische Objekte sind mit grünen Symbolen markiert, unidentifizierte mit gelben.

Diese unerwarteten Resultate erlauben es, die Bedingungen an den Emissionsmechanismus von GRBs deutlicher einzuschränken, als dies bisher mit dem Spektrum bis maximal 2 MeV möglich war. Die Interpretation bereitet aber noch Kopfzerbrechen, da die Daten eher gegen Stoßfronten innerhalb der Jets als Quelle sprechen. Ist die klassische Emission von 20 keV bis 2 MeV gar die thermische Strahlung des explodierenden Feuerballs? Fermi wies jedenfalls erstmals einen Beitrag nach, der von magnetisiertem Plasma bei etwa 99,99995 Prozent der Lichtgeschwindigkeit und einem Magnetfeld von fast einem Tesla stammt.

Auch aus einem anderen Grund sind die GRB-Spektren interessant: Mit ihnen lässt sich das extragalaktische Hintergrundlicht vermessen. Dieses ist wegen seiner geringen Intensität für die üblichen Methoden faktisch unsichtbar, bewirkt aber je nach Entfernung des Bursts ein Abknicken bei sehr hohen Energien. Da es ein Relikt der Sternentstehung ist, kann man mit dieser Information die Stern- und Galaxienentstehung in der Frühphase des Universums entschlüsseln, die wiederum ganz wesentlich von der Dunklen Materie abhängt. Erste diesbezügliche Messungen haben das aus den 1980er Jahren stammende Standardmodell eines relativ starken extragalaktischen Hintergrundlichts schon ausgeschlossen.

Kosmische Teilchenbeschleuniger

Etwa ein Zehntel der AGN emittieren intensive Radiostrahlung. Dazu gehören Radiogalaxien, BL-Lacertae-Objekte (BL Lacs) und ein bestimmter Teil der Quasare³⁾. Die letzten beiden bilden die Klasse der Blasare (engl. Blazars). Diese „radiolauten“ Objekte, insbesondere die Blasare, stellen die meisten Quellen im LAT-Katalog (Tab. 1). Die etwa gleich starke Energieabgabe im Radio- und Gamma-Regime deutet auf einen engen Wechselbeziehung zwischen den Emissionsmechanismen in den beiden Spektralbereichen hin. Ein solcher Zusammenhang ist allerdings noch nicht zweifelsfrei nachgewiesen. Wie bei den GRBs ist auch bei den Blasaren einer der quasi lichtschnellen Jets zufällig auf

2) vgl. „Ausbrüche, flink nachgewiesen“, Physik Journal, Januar 2005, S. 7

3) Flach-Spektrums-Radioquasare, FSRQs

4) „Synchrotron-selbst-Compton“, SSC. Dabei sind auch Mehrfachstreuungen möglich – invers-Compton (IC) 2. Ordnung und höher.

5) vgl. J. Wilms, Besser als Atomuhren, Physik Journal, August/September 2010, S. 20

den Beobachter gerichtet, die Intensität dadurch relativistisch verstärkt, „gebeamt“, und gleichzeitig blauer verschoben [6].

Die Radioemission als Synchrotronstrahlung relativistischer Elektronen im Magnetfeld ist unstrittig, für die Gamma-Emission gibt es jedoch zwei konkurrierende Szenarien: Entweder erzeugt dieselbe Elektronenpopulation auch die Gammastrahlung durch inverse Compton-Streuung von „weichen Photonen“ (hier: optisch bis Röntgen), die etwa von der Akkretionsscheibe oder dem Jet herrühren.⁴⁾ Oder aber es liegen Protonen vor, die so schnell sind, dass die Grenze für die Produktion von Pionen überschritten ist. Diese zerfallen wiederum in Myon- und Elektron-Positron-Paarkaskaden und geben ihrerseits Synchrotronstrahlung ab. In diesem Szenario sind jedoch relativ hohe Magnetfelder von etlichen Millitesla nötig, damit die Teilchen aus der beschleunigenden Region nicht zu früh entweichen.

Die ersten Untersuchungen des zeitlichen Verhaltens der Gamma-Emission ergaben zunächst den bekannten Befund, dass mehr als die Hälfte der untersuchten Objekte mit hoher Signifikanz zeitlich variabel sind und ausgeprägte, steile Intensitätsspitzen zeigen, so genannte Flares. Völlig unerwartet war dagegen das Vorherrschen von symmetrischen Profilen dieser Spitzen. Das bedeutet, die Emission stammt wohl eher von einem Prozess, der mit der Durchgangsdauer der Photonen oder Teilchen einer bestimmten Region zusammenhängt und nicht von der schnellen Injektion von beschleunigten Teilchen. Denn diese würden nach einem schnellen Anstieg einen langsamen Abfall durch Kühlungsprozesse zeigen, das ergäbe keine symmetrischen Flares. Wie dieser neue Befund zu einer der beiden oben beschriebenen Alternativen passt, ist aber noch nicht klar.

Haben wir den Dreh bald raus?

Aus der Radioastronomie kennt man seit über vierzig Jahren Pulsare als Neutronensterne mit Rotationsperioden von 10^{-3} bis 10 Sekunden und Magnetfeldstärken

von bis zu 10^8 Tesla. Die Pulse, die diesen aus Supernova-Explosionen hervorgegangenen Sternleichen den Namen gaben, entstehen durch die Neigung der Magnetfeld- gegen die Rotationsachse. Die erzeugte Strahlung wird nicht isotrop, sondern bevorzugt in eine Richtung ausgesandt, ähnlich zu den Leuchtufern für die Schifffahrt, man spricht deshalb gerne von galaktischen Leuchttürmen.⁵⁾ Im Radiobereich sind etwa 2000 Vertreter bekannt, im Gammabereich waren es vor dem Start von Fermi dagegen nur 9 Pulsare. Wegen dieses extremen Missverhältnisses konnte man bisher auch den Emissionsprozess nicht eindeutig ableiten. Die energiereichen Photonen könnten entweder den magnetischen Polen des Neutronensterns entstammen oder aber so genannten Löchern weit außen in der Magnetosphäre. Zwar sagen die Modelle eine unterschiedliche Form der Gammapulse und ein unterschiedliches Verhältnis von Exemplaren voraus, die entweder im Radio- oder im Gammabereich strahlen (radiolaut oder radioleise), aber eine Unterscheidung zwischen den Modellen durch die Beobachtungen war nicht möglich.

Fermi brachte den großen Durchbruch: Schon im ersten Quellenkatalog (Tab. 1, Abb. 1) sind 87 Pulsar-Identifikationen verzeichnet. Zwar sind Gamma-Photonen von Pulsaren immer noch selten: Lediglich eines in 1330 Umdrehungen erreicht uns vom hellsten, dem Crab-Pulsar im Krebsnebel. Bei den leuchtschwächeren sind es zwei oder drei pro Tag, das ist eines in ein paar hunderttausend Runden. Die Beobachtungen erstrecken sich jedoch über viele Billionen Umdrehungen, sodass „nur“ eine extreme Genauigkeit der Zeitmessung bestehen muss, um Veränderungen auf Zeitskalen unter einer Millisekunde zu messen.

Die Gammalichtkurven der meisten Pulsare haben zwei scharfe Pulse. Dagegen liegt nur selten ein einzelner, breiter Puls vor (Abb. 2). Die Emission kommt daher in diesem Fall wohl von einem fächerähnlichen Strahl und ist disjunkt zur Radiostrahlung. Je nach relativer Lage des Beobachters wird die Sichtlinie zweimal geschnitten oder streift sie nur – in dem Falle registrieren wir einen langen Puls. Diese Geometrie schließt das Modell der Polkappenemission aus, ist aber mit den

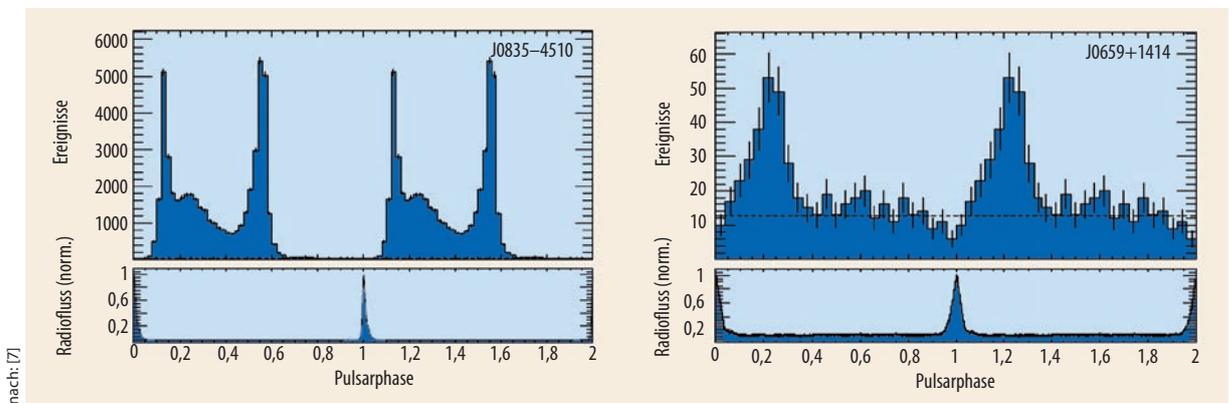


Abb. 2 Der Vela-Pulsar (PSR J0835-4510, links) ist einer der hellsten Gammastrahler am Himmel, rund hundertmal so stark wie der Monogem-Pulsar

(PSR J0659+1414, rechts). Die oberen Felder geben die Fermi-Gammazählrate bei Photonenenergien von 1 GeV und mehr über zwei Umdrehungen an. Vela

zeigt zwei Gamma-Spitzen pro Umlauf, Monogem dagegen nur eine. Bei beiden sind die Spitzen deutlich gegenüber den Radiopulsen versetzt (unten).

nach: A. Harding / NASA

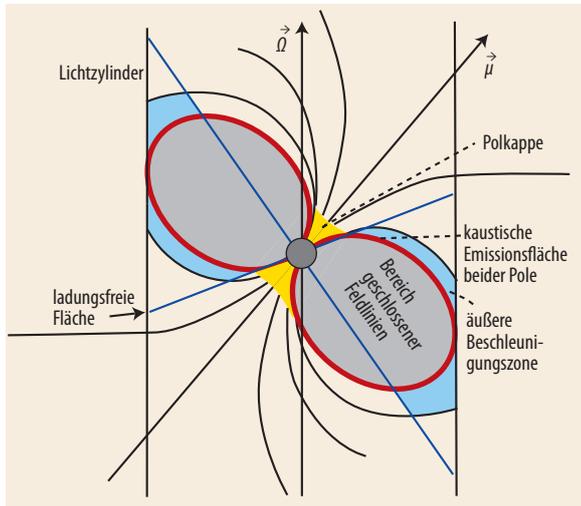


Abb. 3 Bei einem Pulsar ist der magnetische Dipolvektor $\vec{\mu}$ gegenüber dem Rotationsvektor $\vec{\Omega}$ verkippt. Der Lichtzylinder ist die Fläche um die Rotationsachse mit $r_{Lz} = c/\omega$, auf der ein mit dem Neutronenstern starr verbundenes Bezugssystem mit Lichtgeschwindigkeit rotieren würde. Die möglichen Entstehungsgebiete der Gammastrahlung sind farbig markiert.

alternativen Szenarien magnetosphärischer Quellen kompatibel (**Abb. 3**).

Die Energie der Pulsaremission stammt letztlich aus dem Verlust an Rotationsenergie \dot{E} durch die elektromagnetische Abbremsung der Rotationsperiode P des Neutronensterns. Die von Fermi detektierten Pulsare korrelieren interessanterweise nicht mit der Stärke des Magnetfelds an der Sternoberfläche, sondern mit der am Lichtzylinder, B_{Lz} (**Abb. 3**). Diese ist proportional zu $\sqrt{\dot{E}/P^2}$ – ein weiteres Argument zugunsten des Ursprungs der Strahlung in der äußeren Magnetosphäre.

Eine weitere Stütze sind die mit Fermi erheblich genauer bestimmten Spektren. In der äußeren Magnetosphäre ist das elektrische Feld, das parallel zum Magnetfeld ist, proportional zu B_{Lz} . Dies wiederum bestimmt den Knick im Spektrum bei einigen GeV.

Blitze in der Erdatmosphäre

Nach über zwanzig Jahren der Beobachtung extragalaktischer GRBs fanden die Astronomen mit dem Compton-Satelliten Anfang der 1990er-Jahre erstmals einige Gammablitz, die eindeutig von der Erde kamen und nannten sie Terrestrial Gamma-Flashes (TGFs). Typischerweise sind sie nur 0,1 bis 3 Millisekunden lang und haben ein deutlich härteres Energiespektrum (größerer Anteil energiereicher Photonen) als die GRBs.

Im Vergleich zu früheren Detektoren hat der GBM auf Fermi, insbesondere die zwei BGO-Detektoren, eine deutlich größere Empfindlichkeit bei hohen Energien von 1 MeV und mehr. Damit ist es erstmals möglich, mehr dieser seltenen Ereignisse zu messen und auch deutlich bessere Spektren pro Ereignis aufzunehmen. Die Resultate sind beeindruckend: Das Maximum der Energieabgabe liegt bei 20 bis 40 MeV, einige tausend Mal höher als bei den Elektronen, die für Nordlichter sorgen. Und noch besser: Eine Korrela-

tion mit Gewittern und den dazugehörigen klassischen Blitzen im sichtbaren Licht (Maximum der Emission bei einigen eV, also 10 Millionen mal kleinere Energie) ergibt den überraschenden Befund, dass diese in über 80 Prozent der Fälle gleichzeitig und am gleichen Ort auftreten – innerhalb von 150 Kilometern um den Fußpunkt des Satelliten auf der Erde [8]. Die Gleichzeitigkeit liegt innerhalb des zeitlichen Auflösungsvermögens der Detektoren, 50 Mikrosekunden.

Derzeit gibt es noch mehr Fragen als Antworten zu diesem Phänomen: Es scheint klar, dass sich elektrische Felder über den Gewittern zehn bis dreißig Kilometer hoch in die obere Atmosphäre erstrecken, und darin Elektronen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigen. Stoßen diese Elektronen mit Luftmolekülen zusammen, erzeugen sie Gammaphotonen (**Abb. 4**). Aber wie ein Blitz eigentlich entsteht, bleibt weiterhin unklar. Turbulenz in den Gewitterwolken kann riesige elektrische Spannungen generieren. Die spannende Frage ist aber, wie die Entladung startet? Initiiert der klassische Lichtblitz den TGF, oder umgekehrt? Wissenschaftler neigen derzeit eher zu der letzteren Variante: Die durch Turbulenzen erzeugten Spannungen sind zwar riesig, aber dennoch um etwa einen Faktor zehn zu klein, um Luft zu ionisieren und einen Funken zu erzeugen. Die Gammablitz könnten dies leisten – durch die kurzzeitige Erzeugung eines „Blitzes“ aus Elektronen.⁷⁾ Andererseits müsste dann zu jedem klassischen Lichtblitz auch ein TGF auftreten und messbar sein: So viele sieht Fermi allerdings nicht. Erste Abschätzungen deuten auf hundert bis tausend gegenüber weltweit vielen Millionen Lichtblitzen täglich.

Gefahr für uns Erdbewohner besteht nicht: Die Luft absorbiert die Energie nahezu vollständig. Lediglich für hochfliegende Flugzeuge in der Nähe von Gewittern könnten die Gammablitz ein Risiko darstellen. Trotz Abschirmung durch das Flugzeug können die Strahlendosen bis zu dem 400-fachen einer Thorax-Röntgenaufnahme betragen. Allerdings dürften dies extrem seltene Zufälle bleiben.

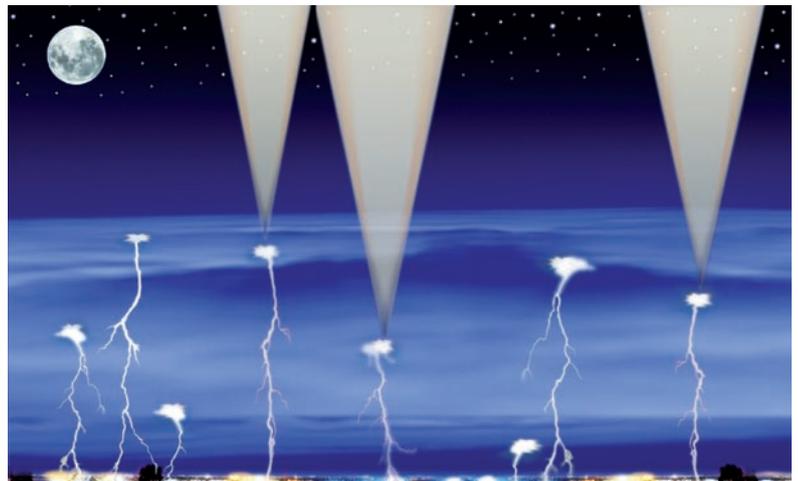


Abb. 4 Während sich die klassischen Lichtblitze eines Gewitters nach unten zur Erdoberfläche hin entladen, entsteht gleichzeitig Gammastrahlung. Diese ist in einem engen Kegel nach oben gerich-

tet, wo der GBM sie beim Überflug Fermis detektiert. Unklar ist, ob diese Terrestrial Gamma Flashes mit jedem Blitz einhergehen oder diese sogar überhaupt auslösen.

NASA, R. Kilgore

Fortsetzung folgt ... nicht?

Fermis offizielle Missionsdauer ist auf fünf Jahre angesetzt, aber die Beteiligten erhoffen sich das doppelte. Welche Rätsel sich mit seiner Hilfe bis dahin lösen lassen, steht noch in den Sternen. Viele Mitglieder der LAT-Kollaboration in Stanford und Schweden suchen nach Gamma-Linien oberhalb 30 GeV, die auf die Zerfallsstrahlung des Neutralinos bei 47 GeV oder anderer supersymmetrischer Teilchen zurückgehen und etwas über die Natur der Dunklen Materie verraten. Ist die Komponente im Zentrum der Milchstraße „echt“, die auf Partikel mit einer Masse zwischen 7,3 und 9,2 GeV hindeutet? [9]

Stoßen die Astronomen mit Fermi bald in ganz exotische Bereiche der Physik vor? Sehen wir in künftigen Beobachtungen die Signatur verdampfender Schwarzer Minilöcher? Oder Effekte der Quantengravitation in den Helligkeitsverläufen der GRBs? Von den bisherigen „klassischen“ Neuentdeckungen – viele Pulsare, GeV-Verzögerung und zusätzliche Strahlungskomponente bei GRBs – erhoffen wir uns jedenfalls in nächster Zeit weitere Erkenntnisse, bis hoffentlich hin zum vollständigen Verständnis dieser Objekte.

Denn auf dem Reißbrett existiert zurzeit noch keine Nachfolgemission. Bei den langen Vorlaufzeiten bedeutet das: kein Satellit in den nächsten beiden Jahrzehnten. Das heißt jedoch nicht, dass die Gamma-Astronomie bald völlig darbt: Im Bereich sehr hoher

Energien steigern die bodengebundenen Cherenkov-Teleskope ihre Leistung immer mehr und erweitern ihr Spektrum. Ihre untere Energieschwelle sank schon von 1 TeV auf 500 GeV – das geplante Cherenkov Telescope Array (CTA) soll sogar bis unterhalb von 100 GeV messen – ein vielleicht wesentlicher Überlapp mit Fermis LAT, der die Forschung wieder ein Stück voranbringt.

Literatur

- [1] *E. Fermi*, Phys. Rev. **75**, 1169 (1949)
- [2] *G. Lichti, A. von Kienlin*, Sterne u. Weltraum, Mai 2008, S. 40
- [3] *A. A. Abdo et al.* (Fermi LAT-Collab.), ApJS **188**, 405 (2010)
- [4] *S. McBreen und J. Greiner*, Physik Journal, Februar 2007, S. 16
- [5] *J. Greiner, A. Rau*, Sterne u. Weltraum Spezial 2, 2004, S. 78
- [6] *P. L. Biermann, A. Witzel*, Sterne u. Weltraum, Mai 1988, S. 283
- [7] *A. A. Abdo et al.*, ApJS **187**, 460 (2010)
- [8] *M. S. Briggs et al.*, J. Geophys. Res. **115**, A07323 (2010)
- [9] *D. Hooper and L. Goodenough*, arXiv:1010.2752v1 [hep-ph] (2010)

DER AUTOR

Jochen Greiner ist Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik (MPE) in Garching bei München und beschäftigt sich seit rund 25 Jahren mit GRBs. Weitere Interessengebiete sind Schwarze Löcher und Röntgen-Doppelsystemen. Seit 2007 ist er Co-Principal Investigator für Fermis Gamma-ray Burst Monitor (GBM), den die Gammagruppe am MPE entwickelte.

