

Ausbildungsseminar: Nukleare Astrophysik - Kerne und Sterne
Prof. Dr. Wolfgang Gebhardt
PD Dr. Alexander Lenz

Gammablitz und die Entstehung stellarer Schwarzer Löcher



Mario Bamesreiter und Josef Loher

05. Juni 2007

Übersicht

1. Einleitung	3
2. Schwarze Löcher	3
2.1. Was sind Schwarze Löcher?	3
2.2. Klassifizierung durch die Masse	4
2.3. Entstehung eines stellaren Schwarzen Lochs	6
3. Gamma Ray Bursts	7
3.1. Grundlegendes	7
3.2. Nachleuchten	8
3.3.2 Arten von GRBs	8
3.2.1. Lange GRBs	9
3.2.2. Kurze GRBs	10
3.4. Anisotropes Feuerballmodell	11
3.5. Ultrarelativistischer Jet	12
4. Weitere Aussichten	14
Literatur- und Bilderverzeichnis	15

1. Einleitung

In den späten 60er Jahren des 20ten Jahrhunderts starteten die USA das Vela Satellitenprogramm. Nach dem Abkommen zum nuklearen Teststopp 1963 sollten sie zum Aufspüren illegaler Atomtests durch die UdSSR dienen. Kein derartiger Test wurde je detektiert. Jedoch kam es am 2. Juli 1967 zur Registrierung eines kurzen, sehr intensiven Aufleuchtens von Gammastrahlung. Die Signatur hatte keine Ähnlichkeit mit der eines Atomwaffentests und war auch nicht terrestrischen Ursprungs. 1973 wurden die Satellitendaten für die Wissenschaft zugänglich und es begann die Erforschung der sog. „Gammablitz“.

Da bei der Entstehung eines Gammablitzes immer ein Schwarzes Loch beteiligt ist, soll im Folgenden zunächst die Natur dieses kosmischen Objekts näher betrachtet werden.

2. Schwarze Löcher

2.1. Was sind schwarze Löcher?

Schwarze Löcher sind Objekte, deren Masse so dicht gepackt ist, dass ihnen sogar das Licht nicht mehr entkommen kann. Aus diesem Grund sind sie schwarz und sind schwer zu entdecken. Den Begriff *Black Hole* hat John Wheeler 1967 erstmals für solche Objekte gebraucht.

Schwarze Löcher können aber nicht nur durch ihre astronomischen Eigenschaften, sondern auch streng mathematisch beschrieben werden. Denn sie sind Objekte der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART), die Albert Einstein entwickelt hatte und 1916 veröffentlichte. In dieser Theorie wird Raum und Zeit zu einem einheitlichen Gebilde der Raumzeit vereinigt. Die Raumzeit wird durch jegliche Form von Energie (auch Masse) gekrümmt. D.h. die Raumzeit eines Schwarzen Loches wird durch dessen Masse von außen nach innen immer stärker gekrümmt bis die Krümmung im Zentrum schließlich unendlich wird. Dieser Ort heißt *Singularität*. In diesem Sinne ist ein klassisches Schwarzes Loch eine singuläre Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen.

Wie kann man sich nun eine solche Singularität vorstellen? Hier gibt es zwei Arten. Rotiert das schwarze Loch nicht, handelt es sich um eine Punktsingularität, d.h. die gesamte Masse ist in einem Punkt vereint. Diese Form nennt sich auch *Schwarzschild-Lösung*. Karl Schwarzschild hatte bereits 1916 die erste Lösung auf die Einsteinschen Feldgleichungen gefunden. Der charakteristische Radius eines solchen Loches, heißt *Schwarzschild-Radius*. Dieser ist definiert als $R_s = 2GM/c^2$. Wobei M die Masse des Schwarzen Loches, G die Gravitationskonstante und c die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist.

Rotiert das Loch hingegen, nennt man diesen Typ *Kerr-Lösung*. Diese wurde von Roy Kerr 1963 entdeckt. Dabei handelt es sich, wie gesagt, um ein rotierendes Objekt, was dazu führt, dass die Singularität zu einer unendlich dünnen Ringsingularität aufgebläht wird. Die Kerr-Lösung geht in die Schwarzschild-Lösung als Grenzfall über, wenn man die Rotation gegen Null gehen lässt. Der Horizontradius eines maximal rotierenden Lochs des Kerr-Typs wird als *Gravitationsradius* bezeichnet. Dieser ist definiert als $r_g = GM/c^2 = 0.5R_s$.

Sowohl der Schwarzschild-Radius als auch der Gravitationsradius sind gebräuchliche Längenskalen in der relativistischen Astrophysik.

Auf eine weitere Diskussion der Lösungen wird hier verzichtet. Es sei nur noch erwähnt, dass es in beiden Typen einen sog. *Ereignishorizont* gibt (Abb. 2.1). Auf dieser Grenzfläche wird die Entweichgeschwindigkeit gleich der Vakuumlichtgeschwindigkeit. D.h. jede Art von Strahlung, die diesen Punkt überschritten hat, wird unwiederbringlich in das Loch gesogen.

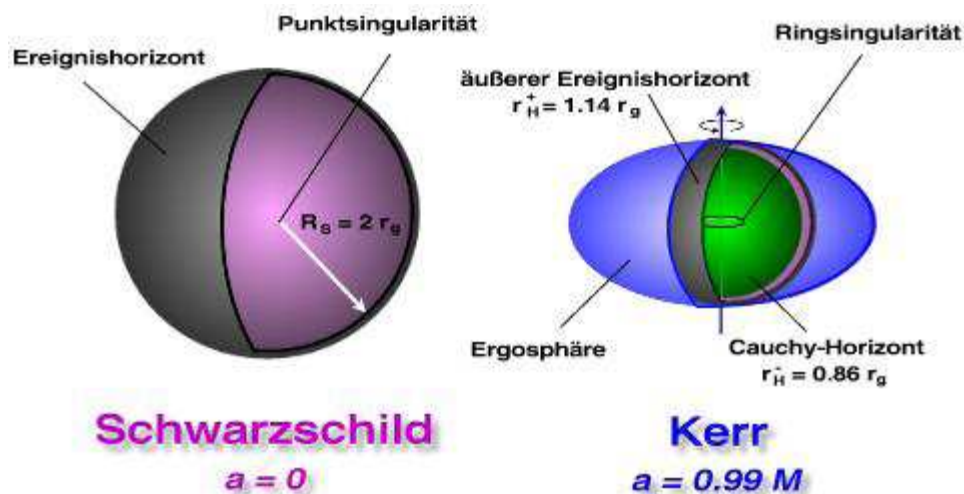


Abb. 2.1 Vergleich zwischen Schwarzschild und Kerr bei gleicher Masse

2.2. Klassifizierung durch die Masse

Durch die Masse kann man Schwarze Löcher in mehrere Typen einteilen, die verschiedene Entstehungsmechanismen und Entwicklungen durchlaufen haben.

- **Primordiale Schwarze Löcher** haben eine sehr geringe Masse. Sie entspricht etwa 10^{18} g oder 10^{-15} Sonnenmassen. Der Radius beträgt nur etwa 1 pm. Es wird vermutet, dass diese Löcher in der Frühphase unseres Universums existiert haben. Deswegen werden sie auch primordial genannt. Es gibt keine Belege dafür, ob solche Löcher wirklich existiert haben oder wie sie entstanden sind. Stephen Hawking hat gezeigt, dass solche Löcher schnell zerstrahlen können durch die sog. *Hawking-Strahlung*. Das bedeutet, dass primordiale Löcher nicht bis jetzt überdauern hätten können.
- **Stellare Schwarze Löcher** haben eine Masse zwischen etwa 3 und 100 Sonnenmassen. Sie sind entweder durch den Gravitationskollaps eines massereichen Sterns oder durch die Verschmelzung zweier Neutronensterne entstanden. Beide Prozesse werden später noch einmal aufgegriffen und ihr Zusammenhang mit den GRBs erläutert. Beispiele für solche Objekte sind z.B.: Cyg X-1, Cyg X-3
- **Mittelschwere Schwarze Löcher** kann man in den Bereich von 100 bis eine Mio. Sonnenmassen einteilen. Es wird davon ausgegangen, dass diese Löcher in Kugelsternhaufen existieren, da Bewegungen von Sternen um das Zentrum des Kugelsternhaufens gut mit massereichen Schwarzen Löchern beschrieben werden können. Kugelsternhaufen sind alte galaktische Bestandteile und befinden sich in Randgebieten einer Galaxis. Dort befindet sich fast kein interstellares Gas mehr, was aufgesammelt werden könnte. Vermutlich sind diese Löcher aus leichteren stellaren Schwarzen Löchern entstanden. Ihre Masse haben sie durch Akkretion gewonnen. Auch wird angenommen, dass Schwarze Löcher der Masse zwischen 100000 und einer Mio. Sonnenmassen im Zentrum von Zwerggalaxien sitzen.

Als Kandidaten für solche Objekte in Kugelsternhaufen sind z.B. M15 und G1 zu nennen und in Zwerggalaxien kommen dafür beispielsweise POX 52 und NGC 4395 in Frage.

- Supermassereiche Schwarze Löcher** haben, wie ihr Name schon erahnen lässt, eine enorme Masse. Man schätzt, dass ihre Masse zwischen 10^6 und 10^{10} Sonnenmassen liegt. Man ist davon überzeugt, dass sich solche riesigen Schwarzen Löcher im Zentrum jeder Galaxie wieder finden lassen. Dies lässt sich durch das Standardmodell der *Aktiven Galaktischen Kerne (AGN)* beschreiben, das nicht ohne die Existenz eines supermassereichen Schwarzen Lochs im Zentrum auskommt.

Das AGN-Paradigma (Abb. 2.2) besagt, dass sich in einem Aktiven Galaktischen Kern ein Schwarzes Loch befindet und durch Akkretion von Plasma die gewaltige Leuchtkraft zustande bringen. Der Materiestrom bildet die sog. *Standardscheibe* aus. Sie wird zum Zentrum immer heißer und strahlt Wärmestrahlung ab. Nahe am Schwarzen Loch ist diese im Bereich der Röntgenstrahlung. Außerdem kann kalte Umgebungsstrahlung Comptonisiert werden. Hierbei werden energiearme Photonen durch inverse Compton-Streuung zu energiereichen Photonen. Im Plasma befinden sich auch ionisierte Teilchen, die durch ihre Bewegung in vorhandenen Magnetfeldern Synchrotron- und Zyklotronstrahlung erzeugen können. Ein AGN leuchtet in allen Wellenbereichen und ist nichts anderes, als ein supermassereiches Schwarzes Loch, das seine Umgebung zum Leuchten bringt. Die leuchtkräftigsten Vertreter solcher AGNs sind Quasare mit einer Leuchtkraft von etwa 10^{47} erg/s.

Auch in unserer Milchstraße befindet sich im Zentrum ein supermassereiches Schwarzes Loch. Nach Berechnungen hat Sgr A* eine Masse von etwa 3.6 Mio. Sonnenmassen. Die größten Vertreter superschwerer Schwarzer Löcher sitzen in elliptischen Galaxien, die sich in gigantischen Galaxiehaufen befinden. Computersimulationen haben eine Masse von 10^{10} Sonnenmassen ergeben. Beispiele dafür sind die Galaxien M87 und Cygnus A.

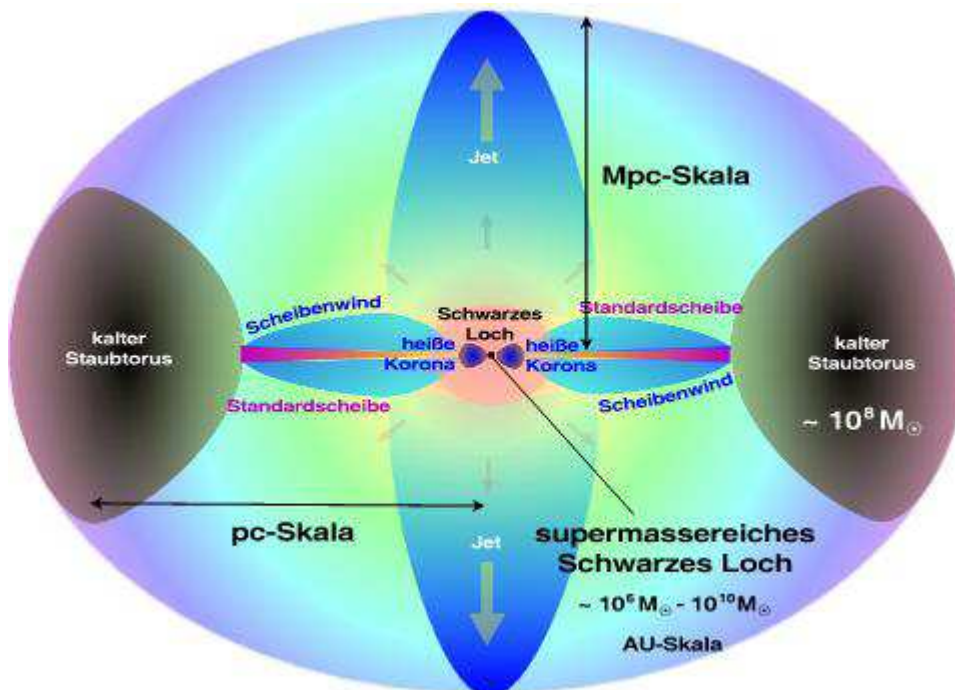


Abb. 2.2: Querschnitt durch einen AGN

2.3. Entstehung eines stellaren Schwarzen Lochs

Wie schon vorher erwähnt, sollen hier besonders die stellaren Schwarzen Löcher im Vordergrund stehen, da mit ihrer Entstehung *Gammablitz*e, auch *Gamma Ray Bursts* genannt, in Verbindung gebracht werden. Hierbei kann man zwischen zwei Prozessen unterscheiden. Zum einen gibt es den Kollaps eines massereichen Sterns, der in einer *Hypernova* endet. Zum anderen können stellare Schwarze Löcher durch die Verschmelzung zweier Neutronensterne entstehen.

Gehen wir zunächst näher auf die Hypernova ein. Eine Hypernova ist, wie ihr Name schon vermuten lässt, eine gewaltige Sternenexplosion. Sie steht am Ende der Lebensphase eines massereichen Sterns, beispielsweise eines Wolf-Rayet-Sterns. Wolf-Rayet-Sterne haben eine Masse von 20 bis 100 Sonnemassen und sind sehr heiß (einige 10000 K an der Oberfläche). Dadurch laufen auch die thermonuklearen Fusionsprozesse im Inneren dieser Sterne sehr schnell ab. Wenn die Nukleosynthese im Inneren ihr Ende erreicht hat, d.h. der Kern besteht nur noch aus Eisen und Nickel, können der rapide abfallende Strahlungs- und Gasdruck der Gravitation nicht mehr entgegenwirken. Nun fällt der Sternkern unter seiner eigenen Masse zusammen und wird zum stellaren Schwarzen Loch unter der Voraussetzung, dass der kollabierende Kern etwa drei Sonnenmassen oder mehr hat. Diese Vorgänge sind so schnell abgelaufen, dass die Sternhülle, in der weiter die Kernfusion von leichteren Elementen stattfindet, davon unberührt geblieben ist. Nun wird das Schwarze Loch aktiv und saugt das umgebende Sternmaterial in sich hinein. Der Materiestrom wird durch die Rotation auf eine Kreisbahn gezwungen und es entsteht eine Scheibe, die sog. Standardscheibe. Dadurch, dass das Schwarze Loch nun Materie aufnimmt werden zwei ultrarelativistische Jets senkrecht zur Akkretionsscheibe durch die Sternhülle geschossen und es entstehen Schockwellen. Die Sternhülle wird zerstört und die Hypernova hat begonnen. Die fast lichtschnellen Jets treffen auf das Sternmaterial und heizen es enorm auf, etwa 10 Mil. Kelvin. Durch interne Schocks im Jet entsteht die Gammastrahlung und wird entlang der Schockfront emittiert. Außerdem strahlen ionisierte Teilchen durch ihre Bewegung in der Umgebung von Magnetfeldern Synchrotronstrahlung ab. Somit leuchtet die Hypernova als Gammablitz auf. Auf die Dynamik der ultrarelativistischen Jets kommen wir später noch zu sprechen.

Kommen wir nun auf den zweiten Prozess der Entstehung eines stellaren Schwarzen Loches, die Verschmelzung zweier Neutronensterne (Abb. 2.3). Neutronensterne sind äußerst kompakte Objekte, die jedoch eine stabile Form aufweisen. Die Materie kann in der „neutralen“ Form der enormen Gravitation standhalten und kollabiert nicht unter ihrer eigenen Masse, was in einem Schwarzen Loch enden würde. Wenn sich aber solche Sterne in einem Doppelsternsystem befinden, was im Universum recht häufig vorkommt, können sich die beiden Sterne durch ihre starken Anziehungskräfte zu nahe kommen und kollidieren. Durch die Kollision überschreiten die Objekte ihre kritische Masse und sie verschmelzen zu einem stellaren Schwarzen Loch. Das Schwarze Loch stößt die sehr schnell aufgenommene Materiemenge als ultrarelativistische Jets hinaus. Die Verschmelzung erzeugt nun einen Gamma Ray Burst.

Wir haben nun die Entstehung stellarer Schwarzer Löcher behandelt und sind auch schon kurz auf die Gammablitz eingegangen. Im Folgenden gehen wir näher auf die GRBs ein.

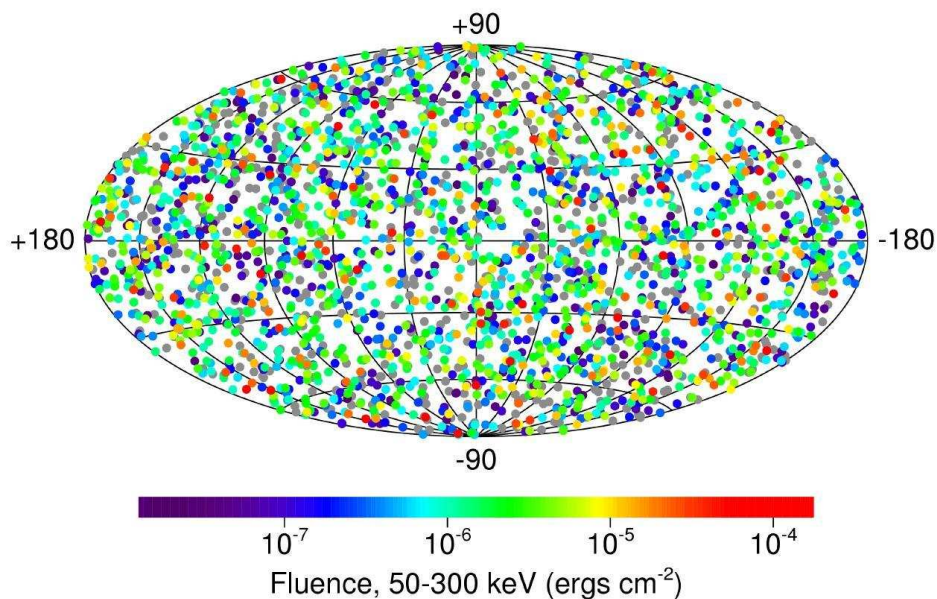


Abb. 2.3 Verschmelzung zweier Neutronensterne
(Illustration)

3. Gamma Ray Bursts

3.1. Grundlegendes

Gammastrahlenausbrüche oder *GRBs*, wie sie kurz genannt werden, sind gewaltige Ausbrüche von Gammastrahlung in einer sehr kurzen Zeit. Sie sind die gigantischsten Explosionen, die im Universum vorkommen. Die dabei freiwerdende Energie kann bei bis zu 10^{51} erg liegen! Sie können wenige Sekunden bis zu einigen Minuten dauern. Was die Länge eines GRBs bedeutet, wird uns im nächsten Kapitel beschäftigen. Die Ausbrüche treten völlig isotrop am Himmel auf (Abb. 3.1). D.h. es sind Ereignisse, die im ganzen Kosmos stattfinden.



- lange Dauer, starke GRBs
- kurze Dauer, schwache GRBs
- Fluss unbekannt aufgrund unvollständiger Daten

Abb. 3.1 2700 von BATSE aufgenommene GRBs

Da durchschnittlich pro Tag ein GRB beobachtet wird, braucht man eine Katalogisierung. Dabei erhält jeder Ausbruch eine Erkennungsnummer. Diese beginnt mit „GRB“, danach folgt das Datum des Bursts. „GRB 050904“ steht für den Gamma Ray Burst, der am 4. September 2005 beobachtet wurde. Gibt es mehrere GRBs an einem Tag, werden sie aufsteigend mit Buchstaben des Alphabets gekennzeichnet.

Um ein paar Beispiele zu nennen, führen wir ein paar besondere GRBs an. Der kürzeste Burst dauerte etwa 6 ms (GRB 910711), der längste etwa 1.5 h (GRB 940217B). Der am weitesten entfernte Burst, hatte eine Rotverschiebung von $z = 6.29$ (GRB 050904), der uns am nächsten registrierte war bei $z = 0.0085$ (GRB 980425), der auch mit der Supernova SN 1998bw in Verbindung gebracht wird.

3.2. Nachleuchten

Im Jahr 1997 gab es einen Durchbruch in der Erforschung von Gamma Ray Bursts. 30 Jahre nachdem der erste GRB entdeckt wurde, konnte ein *Nachleuchten*, oder auch *Afterglow* genannt, gemessen werden. Es wurde gefunden, dass es in anderen Wellenlänge (Röntgen, Ultraviolett, Infrarot, Radio, Optisch) ein Nachleuchten gibt. Durch das Nachleuchten konnte man nun die Entfernung des GRBs messen, indem man die Rotverschiebung der Strahlung bestimmt. So zeigte sich, dass die Bursts aus sehr großen Entfernungen kommen.

Das Nachleuchten kommt dadurch zustande, dass die auslaufende Schockwelle des ultrarelativistischen Jets auf das *Circum Burst Material* treffen und es aufheizen (Abb. 3.6). Ionisierte Teilchen geben durch Bewegung in der Umgebung von Magnetfeldern Synchrotronstrahlung in allen Wellenbereichen ab.

Das Nachleuchten wurde bis auf zwei Ausnahmen nur bei langen Gammastrahlenausbrüchen gesehen. Zum ersten Mal wurde nun auch bei einem kurzen Ausbruch ein Afterglow gefunden. Bei dem nur 30 ms langen GRB 050509B wurde ein Nachleuchten (Abb. 3.5) entdeckt.

3.3. 2 Arten von GRBs

Trägt man die GRBs nach ihrer Dauer auf, so ergibt sich der Graph aus Abb. 3.2. Der Graph hat zwei Maxima, bei etwa 0.3 s und bei etwa 30 s, und ein signifikantes Minimum bei 2 s. hieraus kann man erkennen, dass es zwei verschiedene Typen von GRBs gibt. Man teilt sie ein in kurze Bursts, die zwischen 0.01 und 2 Sekunden dauern, und in lange Bursts, die mehr als 2 Sekunden dauern. Die Dauer eines GRBs hat etwas mit seinem Entstehungsmechanismus zu tun. Wie schon bei der Entstehung eines stellaren Schwarzen Lochs bereits erwähnt, gibt es zwei Prozesse. Demnach identifiziert man lange GRBs mit einem Kollaps eines massereichen Sterns zu einem Schwarzen Loch, einer Hypernova, oder mit einer Supernova. Kurze GRBs assoziiert man mit der Verschmelzung zweier Neutronensterne oder von einem Neutronenstern mit einem Schwarzen Loch.

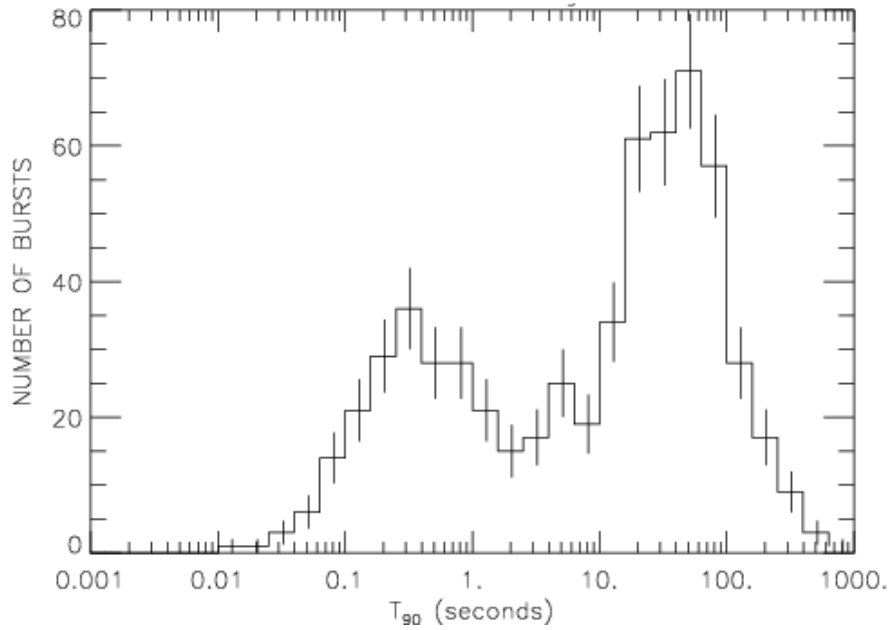


Abb. 3.2 Bimodale Struktur

3.3.1. Lange GRBs

Wie schon vorhin beschrieben, werden Hypernovae oder Supernovae mit der Entstehung von langen GRBs identifiziert. Doch nicht jede Supernova kann mit einem GRBs assoziiert werden. Man hat beobachtet, dass Supernovae viel häufiger in Spiralgalaxien auftreten als lange GRBs. Außerdem ereignen sich GRBs bevorzugt in lichtschwachen und kleinen Galaxien. Diese Beobachtungen weisen darauf hin, dass die Entstehung eines langen GRBs mit der Metallizität zusammenhängt. Die Galaxien, in denen lange GRBs beobachtet wurden, zeigen eine sehr geringe Metallizität. Dies lässt sich dadurch erklären, dass metallreiche Sterne starke Winde entwickeln und sehr viel Masse verlieren und deshalb nicht mehr zu einem Schwarzen Loch, aber zu einem Neutronenstern kollabieren können. Demnach treten lange GRBs in metallarmen, jungen Galaxien auf.

Beispiele für eine Verbindung zwischen einer Supernova und einem GRB sind SN 1998bw/GRB 980425 und SN 2003dh/GRB 030329. SN 1998bw wurde zwar mit einem GRB identifiziert, aber die weitere Entwicklung des Spektrums war ungewöhnlich und neu. Aus diesem Grund ist die Verbindung von SN 2003dh mit dem GRB 030329 ein besseres Beispiel. In beiden Fällen ist die Besonderheit, dass das Nachleuchten ein sehr weitreichendes Spektrum hat, was für Supernovae typisch ist. Es finden sich keine Absorptionslinien von Wasserstoff, Helium und Silizium in dem Spektrum, was zu einer Klassifikation als Typ Ic führt. Jedoch ist bei einer typischen Ic Supernova die Helligkeit viel geringer und auch die erzeugte Menge an ^{56}Ni ($\sim 0.07M_{\odot}$) ist im Vergleich viel kleiner, etwa um den Faktor vier bis zehn (Tabelle 1). Daraus kann man schließen, dass es sich um eine Explosion eines sehr großen Sterns handelt.

SN/Burst	z	Peak [mag]	$E_{\text{SN}} [10^{52} \text{ erg}]$	$E_{\text{rel}} [10^{49} \text{ erg}]$	$E_{\gamma} [10^{49} \text{ erg}]$	$M(^{56}\text{Ni}) [M_{\odot}]$
1998bw/980425	0.0085	$M_V = -19.16 \pm 0.05$	2 - 3	1 - 30	< 0.08	0.5 - 0.7
2003dh/030329	0.1685	$M_V = -18.8 \text{ bis } -19.6$	2 - 5	≈ 50	7 - 46	0.3 - 0.55

Tabelle 1 Vergleich physikalischer Daten von SN 1998bw und SN 2003dh

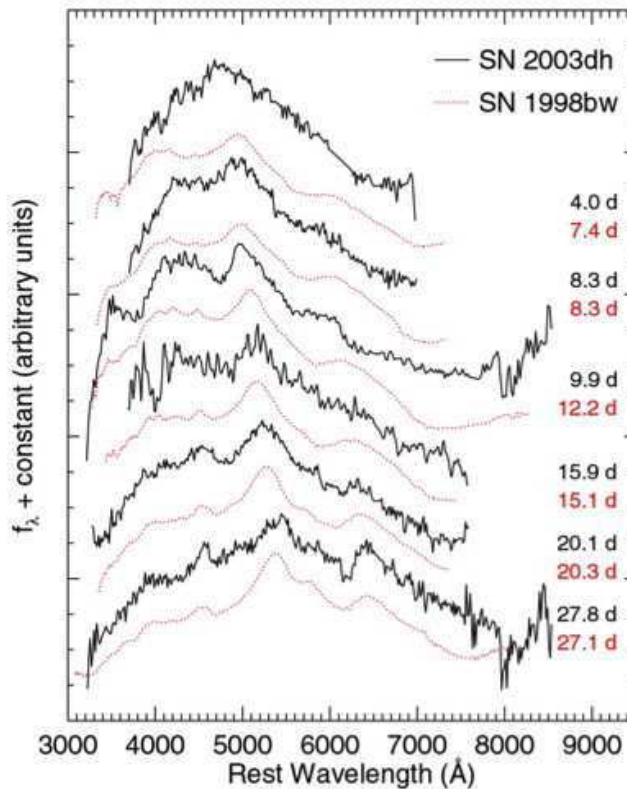


Abb. 3.3 Vergleich zwischen SN 2003dh und SN 1998bw

Vergleicht man nun das Ausklingen der Spektren von SN2003dh und SN1998bw (Abb. 3.3), so sieht man, dass sich der Verlauf sehr ähnelt. Daraus kann man folgern, dass auch SN1998bw mit einem GRB assoziiert werden kann.

3.3.2. Kurze GRBs

Kommen wir nun auf die kurzen Gamma Ray Bursts zu sprechen. Sie dauern von 0.01 bis 2 Sekunden. Ihre Entstehung wird mit der *Verschmelzung (Merging)* von kompakten Objekten, wie Neutronensterne oder Schwarze Löcher, identifiziert. Diese Vereinigungen laufen sehr schnell ab und können deshalb die Ursache für kurze Ausbrüche sein.

In Doppelsternsystemen, die sehr häufig im Universum vorkommen, kann es passieren, dass sich die beiden Objekte zu Nahe kommen und aufeinanderprallen. Es kommen dafür Systeme aus zwei Neutronensternen oder aus einem Neutronenstern und einem Schwarzen Loch in Frage. Sieht man sich die Galaxie, aus der der GRB aufleuchtete, näher an, so ist eine signifikante Anzahl an elliptischen Galaxien zu erkennen. Elliptische Galaxien sind sehr alte Galaxien und lassen den Schluss zu, dass diese GRBs aus Verschmelzungen von Neutronen-Doppelsternsystem entstehen. Denn es dauert sehr lange bis solche Doppelsternsysteme entstehen und Verschmelzen können. Durch Simulationen konnte man die Dauer auf 10^8 Jahre abschätzen. Auch konnte keine Verbindung zu einer Supernova hergestellt werden. Aus diesen Gründen ist man der Annahme, dass der Verschmelzungsprozess die Grundlage für kurze GRBs ist.

Bei der Verschmelzung von zwei Neutronensternen entsteht ein stellares Schwarzes Loch. Auch hier werden zwei ultrarelativistische Jets entlang der Rotationsachse hinausgeschossen, aus denen die Gammaphotonen emittiert werden. Das gleiche passiert, wenn ein Schwarzes Loch und ein Neutronenstern verschmelzen. Bis auf zwei Ausnahmen (GRB 050509B, GRB 050724) wurde bei kurzen Bursts kein Nachleuchten entdeckt.

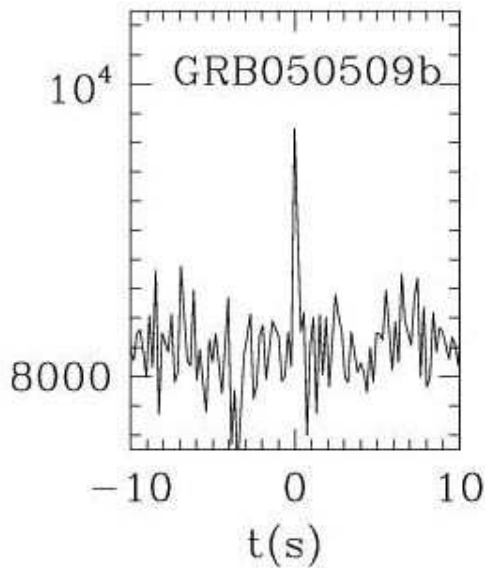


Abb. 3.4 Lichtkurve von GRB 050509B

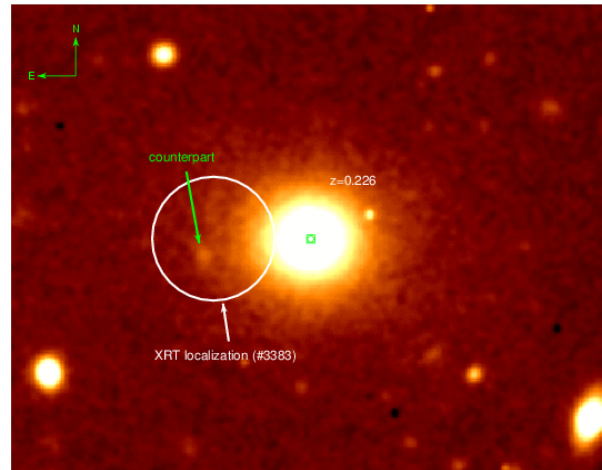


Abb. 3.5 optisches Nachleuchten von GRB 050509B

Als Beispiel wollen wir GRB 050509B aufführen. In Abbildung 3.4 ist die Lichtkurve des Ausbruchs zu sehen, die vom Satelliten SWIFT aufgenommen wurde. Dieser sehr kurze GRB dauerte nur 30 Millisekunden und hatte eine Entfernung von 2.7 Milliarden Lichtjahren, was einer Rotverschiebung von 0.226 entspricht. Die Besonderheit an diesem GRB ist, dass er, obwohl er ein kurzer ist, ein Nachleuchten (Abb. 3.5) hat. Dies wurde erst bei einem weiteren kurzen GRB gesehen.

Der Ausbruch ereignete sich ungefähr 100000 Lichtjahre von einer Galaxie entfernt, die zu dem Cluster NSC J1234610+285901 gehört. Diese Galaxie ist eine sehr alte Galaxie, in der keine neuen Sterne entstehen. Dies stützt das Modell, dass für kurze Bursts keine Supernovae oder Hypernovae in Frage kommen, da es in solchen Galaxien keine jungen massereichen Sterne gibt. Sie entstehen vielmehr aus Verschmelzungen von Neutronensternen und das kann nur in alten Systemen geschehen. Es kann Milliarden Jahre dauern bis sich eine solche Verschmelzung ereignet, doch es dauert nur wenige Millisekunden bis sie abgelaufen ist.

3.4. Anisotropes Feuerballmodell

Wie schon besprochen, wird bei einem Gammastrahlenausbruch eine sehr große Menge an Energie durch den Kollaps eines massereichen Sterns oder durch Verschmelzungsprozesse freigesetzt. In beiden Fällen entsteht ein stellares Schwarzes Loch, das bei der Entstehung sehr viel Gravitationsenergie freisetzt, die in wenigen Millisekunden auf kleinem Raum (ca. einige 10 Kilometer) in freie Energie umgewandelt wird. Zu dieser Energie kommt noch ein vergleichbarer Anteil durch Akkretion von umgebender Materie hinzu. Vermutlich wird ein großer Teil dieser Energie als Neutrinos und Gravitationswellen emittiert. Diese Formen der Energie konnten noch nicht gemessen werden. Ein kleinerer Teil in der Größenordnung von $10^{50} - 10^{52}$ erg geht in einen Feuerball über, der aus Elektronen, Positronen, Baryonen und γ -Strahlen besteht. Diese sind nicht-thermische γ -Strahlen und entstehen im Wesentlichen durch Synchrotronstrahlung und durch inverse Compton-Streuung. Dies wird *prompte Emission* genannt. Zusätzlich entstehen γ -Strahlen durch *interne Schocks*. Die Schockwellen werden abgebremst und nachfolgende überholen diese. Dabei prallen sie bei Geschwindigkeiten von $v \approx c$ aufeinander. Abbildung 3.6 illustriert das anisotrope Feuerballmodell.

Weil die Leuchtkraft des Feuerballs die Eddington-Leuchtkraft um viele Größenordnungen übersteigt, kann er expandieren. Die Expansion muss aber mit relativistischer Geschwindigkeit sein. Der Grund ist, dass sonst auf sehr kleinem Raum ($r \leq c\delta t$) sehr viele Photonen unterzubringen sind, was sofort zu einer Paarerzeugung $\gamma \leftrightarrow e^+ + e^-$ und zur Verhinderung des Feuerballs führen würde. Wenn sich der Feuerball mit relativistischer Geschwindigkeit auf uns zu bewegt, kann das Gebiet der Emission sehr viel größer sein, nämlich $r = \Gamma^2 c\delta t$.

Γ ist der *Lorentzfaktor* und ist definiert als

$$\Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Es wird angenommen, dass er in der Größenordnung von 10^2 liegt, etwa zwischen 100 und 300. Zum Vergleich, ein Lorentzfaktor von 100 entspricht schon einer Geschwindigkeit von 0.9999c. Eine weitere Folge der relativistischen Geschwindigkeiten ist die *Blauverschiebung* der Photonenfrequenz. Die Photonen sind am Explosionsort um den Faktor Γ energieärmer als wir sie beobachten. Außerdem erscheint uns auch ihre Intensität höher (*Beaming*). Des Weiteren wird die Strahlung durch ihre hohe Geschwindigkeit gebündelt. Der Öffnungswinkel des Strahlenkegels ist $\theta = \Gamma^{-1}$.

Das Nachleuchten entsteht durch die *externen Schocks* (Abb.3.6). Die auslaufenden Schockwellen treffen auf die umgebende Materie und wechselwirken mit dieser. Dabei wird wieder durch Synchrotronstrahlung das gesamte Spektrum des Nachleuchtens erzeugt.

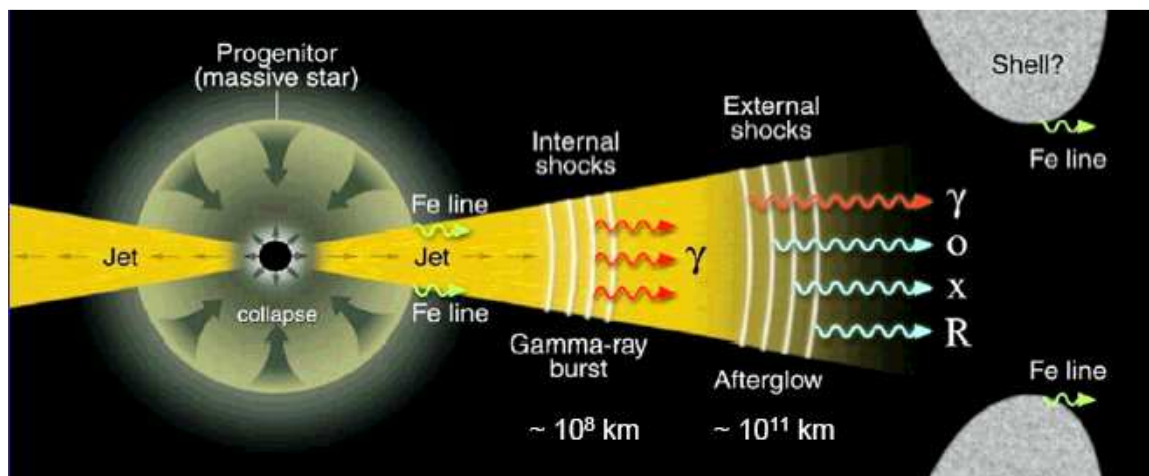


Abb. 3.6 anisotropes Feuerballmodell

3.5. Ultrarelativistischer Jet

Das Schlüsselement des anisotropen Feuerballmodells ist der ultrarelativistische Jet. Der Jet entsteht, indem das stellare Schwarze Loch, was beim Kollaps oder beim Verschmelzungsprozess entstanden ist, umgebende Materie akkretiert. Dieser Effekt kann mit der *Magnetohydrodynamik* (MHD) erklärt werden. Die MHD verbindet die Hydrodynamik mit magnetischen Phänomenen. Zuerst betrachtet man das Schwarze Loch und geht davon aus, dass es sich um ein Kerr-Loch handelt. Kerr-Löcher zwingen auch die Raumzeit in eine Rotation. Befinden sich nun Magnetfeldlinien in der Nähe, werden diese verdrillt. Es kann passieren, dass sich dabei Linien unterschiedlicher Polarität treffen. Bei der *Rekonnexion* brechen die Magnetfelder lokal zusammen und übertragen ihre Energie auf das Plasma der

Umgebung. Die MHD zeigt nun, dass sich Poynting-Flüsse (Abb. 3.7) ausbilden und das Schwarze Loch über einen Jet verlassen können. Ein weiterer Mechanismus, der zu der Erzeugung des Jets beiträgt, ist der Blandford-Znajek-Prozess. Auf diesen Effekt gehen wir aber nicht näher ein.

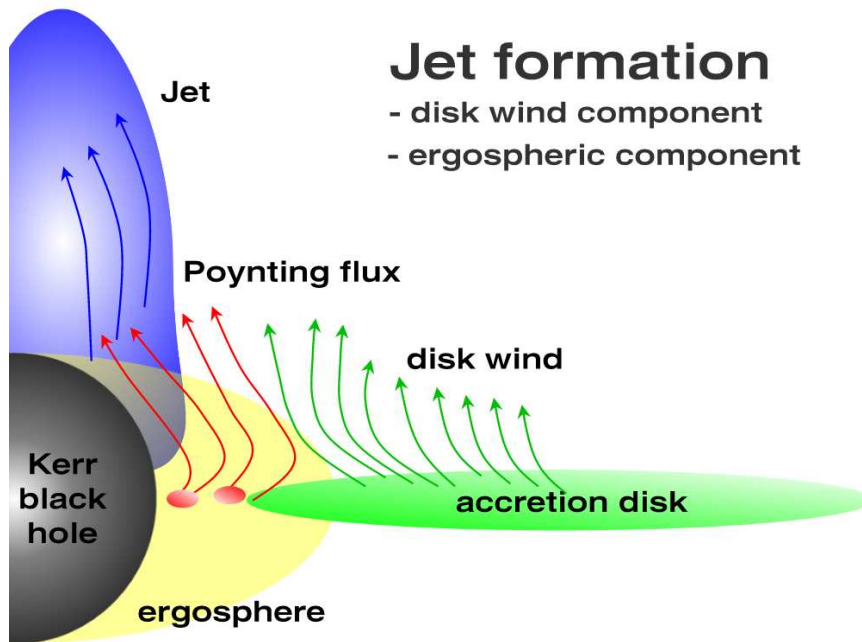


Abb. 3.7 Jetbildung durch ein Kerr-Loch

Der Jet ist nun entstanden und bewegt sich in der Umgebung von Magnetfeldern. Da der Jet aus Plasma besteht, wird er durch die Lorentz-Kraft einerseits kollimiert und andererseits beschleunigt. Abbildung 3.8 zeigt nun schematisch die Struktur innerhalb des Jets.

Ausbreitung eines Jets

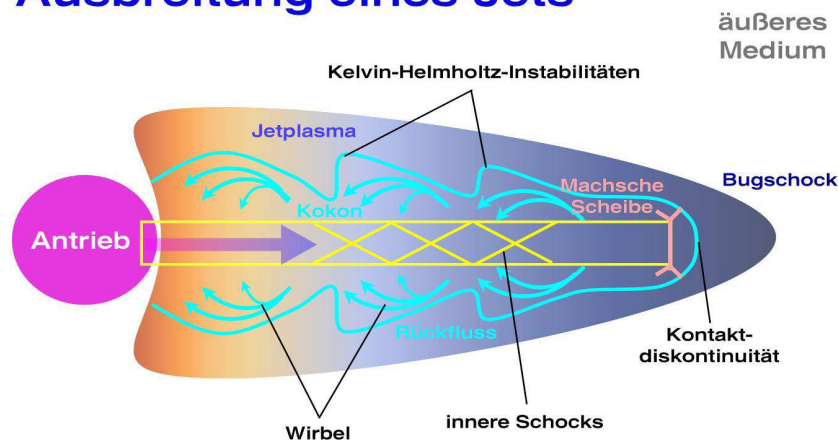


Abb. 3.8 Struktur innerhalb des Jets

Dadurch dass der Jet durch Wechselwirkung mit dem CBM abgebremst wird, verringert sich der Wert des Lorentzfaktors und dies ergibt eine Vergrößerung des Öffnungswinkels. Der Jet geht von der Kollimierung in eine Aufweitung über. Für die Zeitentwicklung des Öffnungswinkels des Jets gilt:

$$\theta_{\text{Jet}} \approx \Gamma^{-1}$$

$$\Gamma(t) \propto t^{-3/8} \Rightarrow \theta_{\text{Jet}} \propto t^{3/8}$$

Hierzu das Ergebnis einer Simulation (Abb. 3.9)

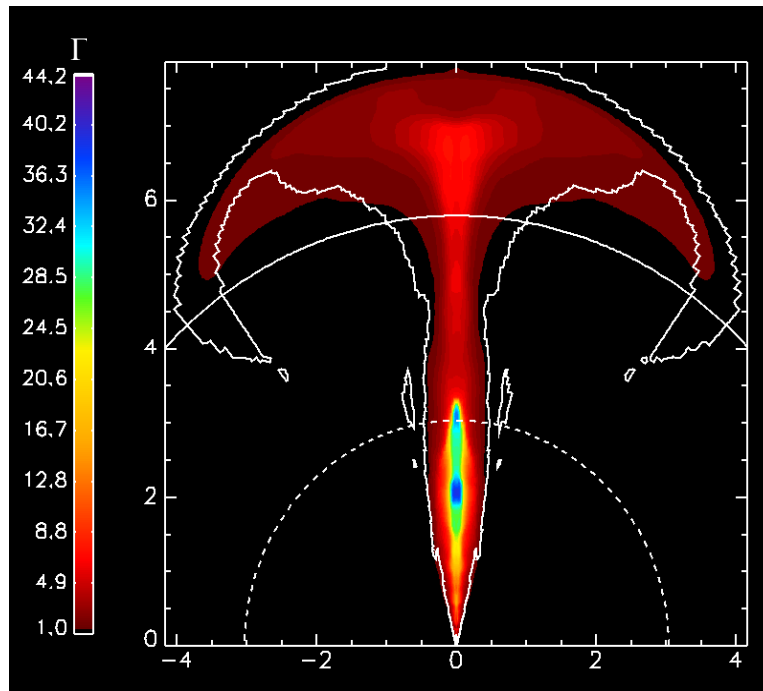


Abb. 3.9 Simulation eines Jets
(1.8 s nach der Explosion, Achseneinheit 100000 km)

Man sieht, dass sich der Jet pilzförmig aufweitet. Die ist sehr von Interesse, denn es kann sein, dass man den eigentlichen GRB nicht sieht, aber das schwächere Nachleuchten wahrnimmt. Man vermutet solche „verwaiste“ GRBs zu entdecken, konnte jedoch noch keinen nachweisen.

4. Weitere Aussichten

Glücklicherweise ereignen sich lange, energiereiche GRBs in unserer Galaxie sehr selten. Ein Ausbruch in der Nähe der Erde hätte fatale Folgen für das Leben durch die allgemein bekannte Schädigung des Erbguts oder die direkte Zerstörung der Organismen. Zudem kann ein „nuklearer Winter“ beginnen, eingeleitet durch Reaktionen in der Erdatmosphäre, die von der Gammastrahlung ausgelöst werden.

Der mit 7500 Lichtjahren zwar recht weit entfernte Superstern η Carinae (ca. 100 Sonnenmassen) wäre dennoch ein möglicher Kandidat für einen GRB, der dem irdischen Leben gefährlich werden könnte, wenn die Ausrichtung des GRBs in unsere Richtung zeigt. Umstritten ist, ob bereits stattgefundenene prähistorische Massensterben auf unserem Planeten darin ihre Ursache finden.

Literatur

- [1] Lexikon der Astrophysik, Andreas Müller, 2007
<http://www.mpe.mpg.de/~amueller/index.html>
- [2] Vorträge von Andreas Müller (A brief history of Black Holes, Cosmic Jets as Sources for ultra-high energetic Neutrinos, Gamma Ray Bursts)
http://www.mpe.mpg.de/~amueller/astro_ppt.html
- [3] Gamma-Ray Bursts, P. Mészáros, 2006
- [4] Supernovae, Jets and Collapsars, A. I. MacFadyen, S. E. Woosley, A. Heger, 1999
arXiv:astro-ph/9910034 v1
- [5] The Supernova Gamma-Ray Burst Connection, S. E. Woosley, J. S. Bloom, 2006
arXiv:astro-ph/0609142v1
- [6] Vortrag Gamma Ray Bursts – GRBs
<http://www.astro.uni-jena.de/Teaching/SS2005/Evor/GRBneu.pdf>
- [7] Diversity of the Supernova – Gamma-Ray Burst Connection, K. Nomoto, N. Tominaga, M. Tanaka, K. Maeda, T. Suzuki, J. S. Deng, P. A. Mazzali
- [8] Gamma-Ray Bursts – Die energiereichsten Explosionen im Universum, Markus Garczarzyk, 2005
<http://www.mppmu.mpg.de/~garcz/publications/2005/GRBDieEnergierichstenExplosionenImUniversum.pdf>

Bildernachweis

- Titelbild: Lexikon der Astrophysik, Gamma Ray Burst
Abb. 2.1: Lexikon der Astrophysik, Schwarze Löcher
Abb. 2.2: Lexikon der Astrophysik, Schwarze Löcher
Abb. 2.3: Lexikon der Astrophysik, Gamma Ray Burst
Abb. 3.1: <http://www.swift.le.ac.uk/grb.shtml>
Abb. 3.2: <http://www.mppmu.mpg.de/~garcz/publications/2005/GRBDieEnergierichstenExplosionenImUniversum.pdf>
Abb. 3.3: The Supernova Gamma-Ray Burst Connection
Abb. 3.4: <http://grb.sonoma.edu/>
Abb. 3.5: <http://grb.sonoma.edu/>
Abb. 3.6: Vortrag Gamma Ray Bursts – GRBs
Abb. 3.7: Lexikon der Astrophysik, Jet
Abb. 3.8: Lexikon der Astrophysik, Jet
Abb. 3.9: Vorträge von Andreas Müller