

# Gamma-Ray Bursts

Vortrag zur Arbeitsgruppe:  
Schwarze Löcher

der Sommerakademie LaVilla  
06.09.2006

von Steven Keuchel

# Gamma-Ray Bursts

- Kurzcharakterisierung, Gamma Ray Bursts ...
  - ... sind plötzlich auftretende Blitze aus Gammastrahlung
  - ... kommen aus zufälligen Richtungen am Himmel
  - ... haben eine Dauer von wenigen Millisek. bis hin zu mehreren Minuten
  - ... birgen gewaltige Energiemengen

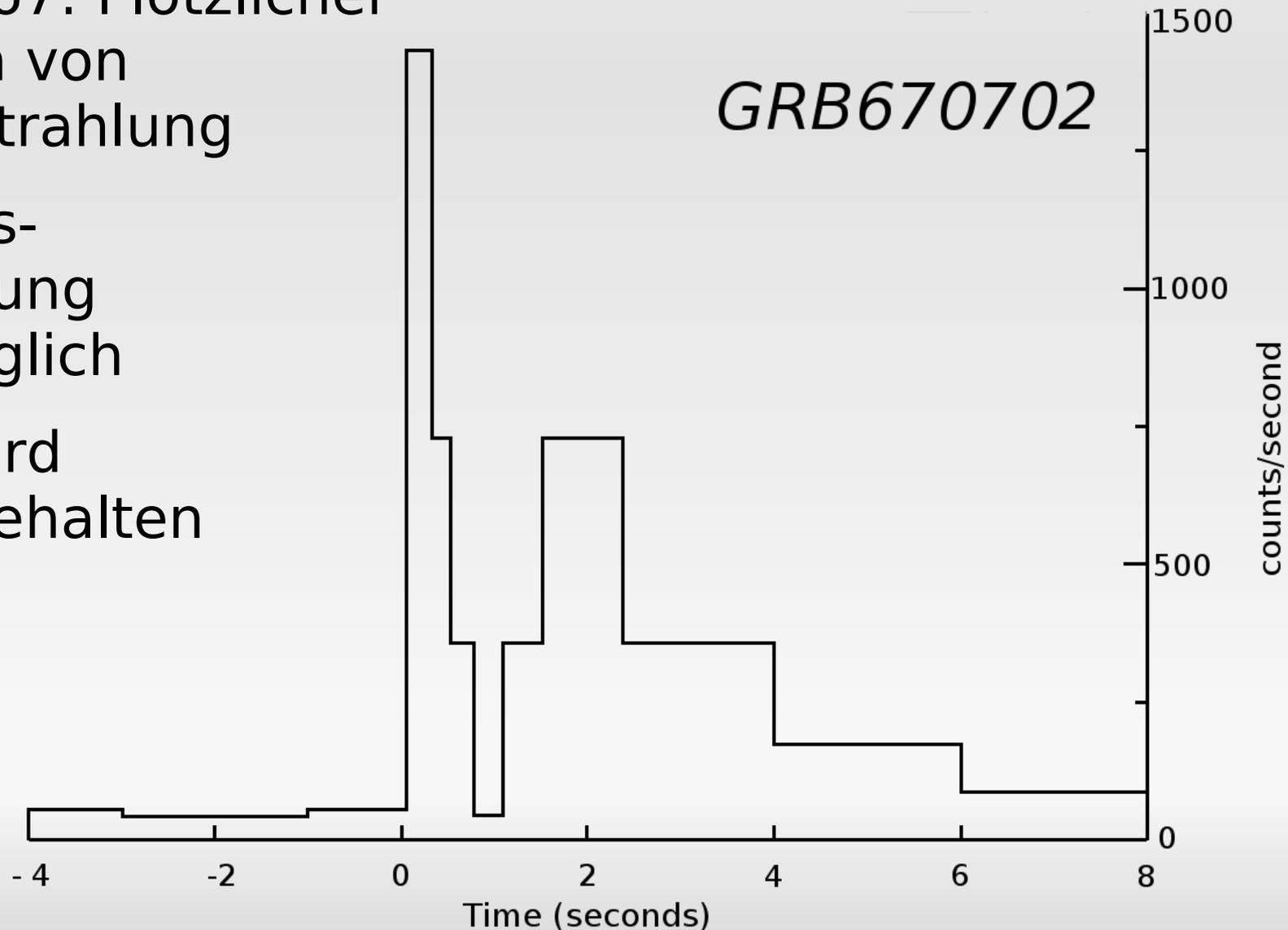
# Das VELA-Projekt

- Beginn: 1963
- Ziel: Entdeckung geheimer Nukleartests (entgegen dem NTBT)
- Instrumente für:
  - Neutronen
  - Röntgenstrahlen
  - Gammastrahlen



# Das Rätsel: GRB670702

- 2. Juli 1967: Plötzlicher Ausbruch von Gammastrahlung
- Herkunftsbestimmung nicht möglich
- Vorfall wird geheimgehalten



# Der Beginn

- Erste Veröffentlichung 1973
- Vela beobachtete bis dahin 16 GRBs
- Anstoss zur Erforschung dieses Phänomens:
  - Herkunft (Richtung, Entfernung)
  - Dauer des Ausbruchs
  - Strahlungsflussdichte (Fluenz)
  - Spektrum

# Erste Schritte ...

- Compton Gamma Ray Observatory (1991-2000)

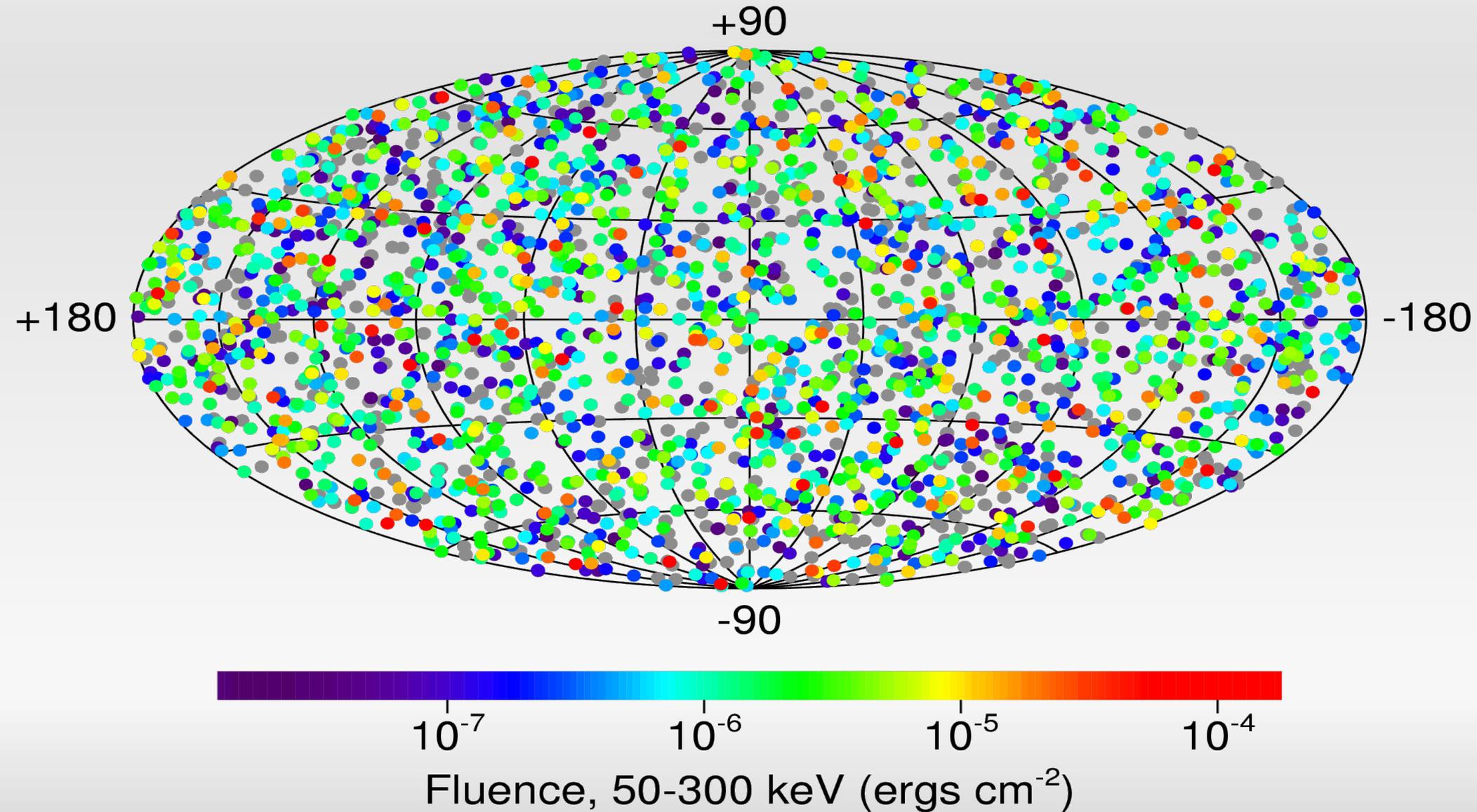
## Burst And Transient Source Experiment

- Spektrum: 10 keV – 100 MeV  
(20 keV – 1 MeV sensitiv)
- Winkelauflösung : 4°-10°
- zeitliche Auflösung: 64 ms
- Problem:
  - Winkelauflösung zu gering



... und erste Ergebnisse

# 2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



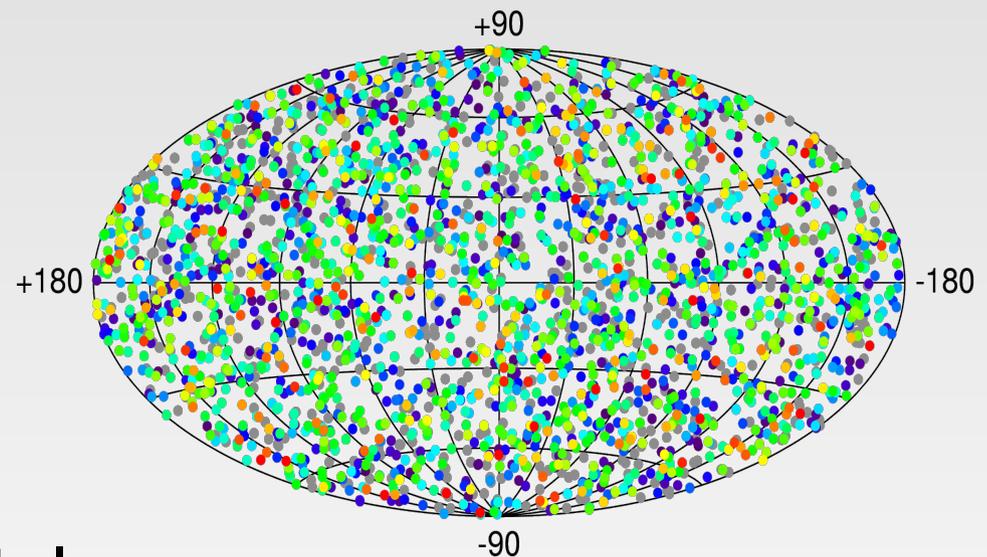
# Isotrope Verteilung

- Isotrope Verteilung der Bursts

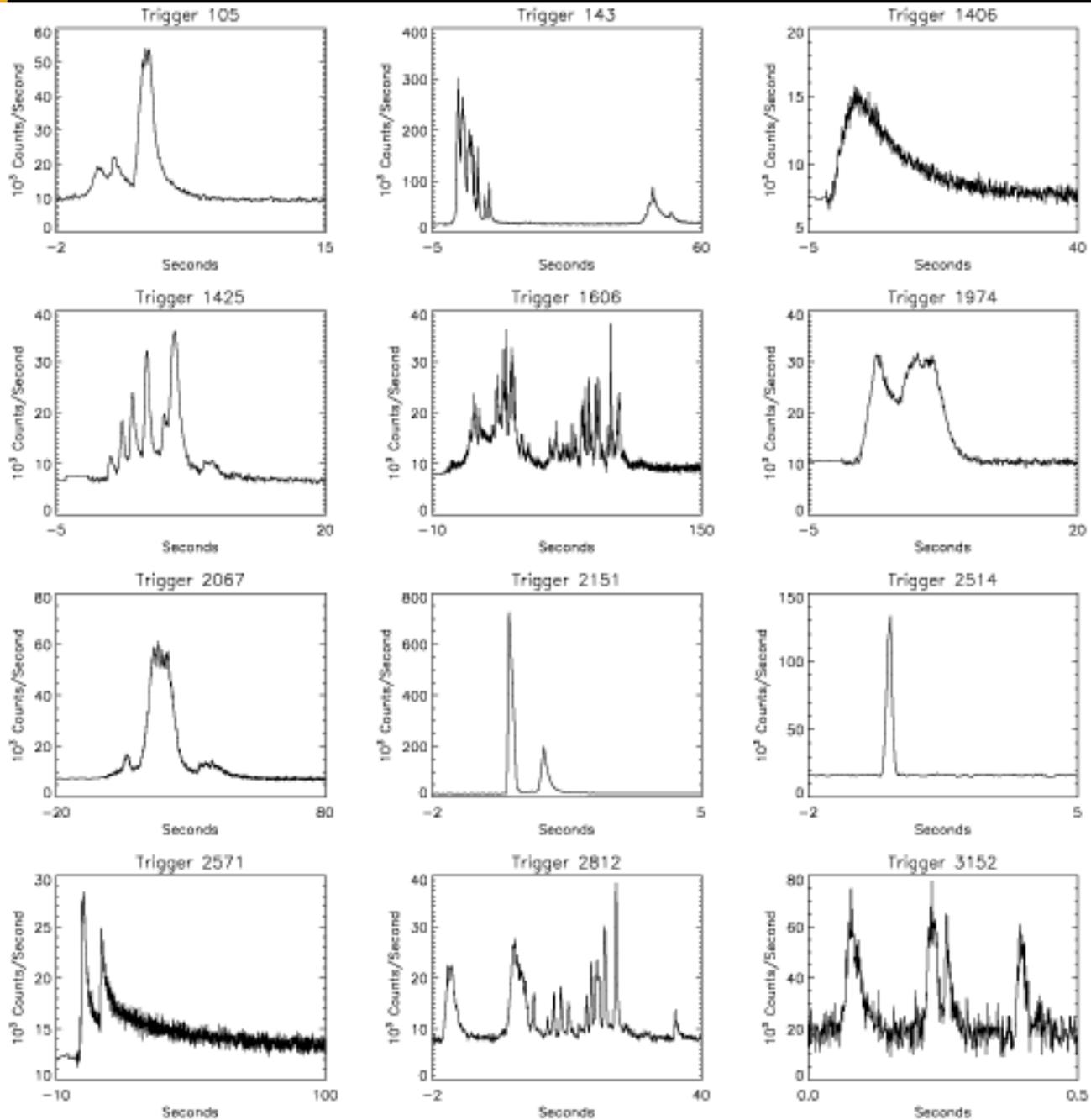
- keine Konzentrierung zur Milchstraßenebene oder zum galaktischen Zentrum

→ mögliche Quellen:

- weit ausgedehntes Halo
- extragalaktische Herkunft
- kosmologische Strings ( $z > 1000$ )



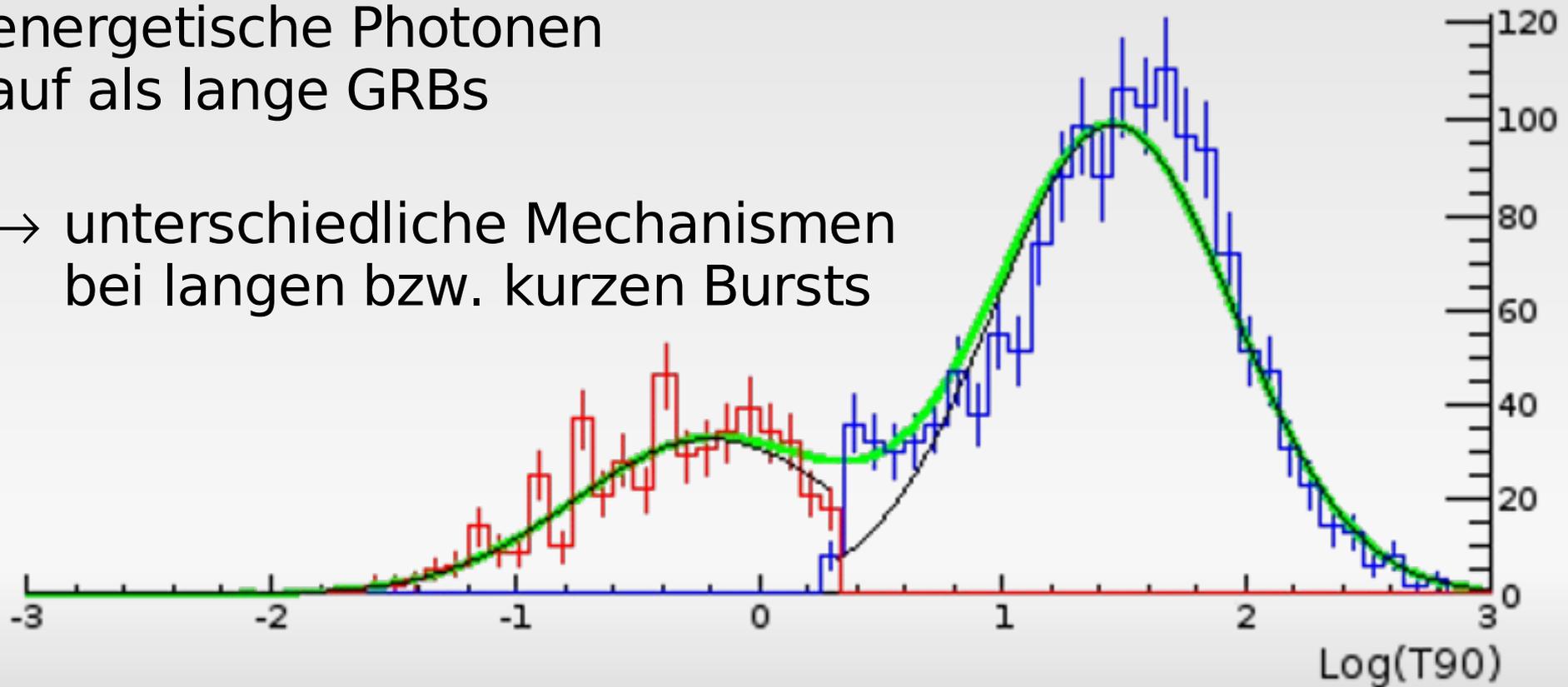
# GRB Lichtkurven



- Rasanter Anstieg der Leuchtkraft und exponentieller Abfall (FRED)
- Ein oder mehrere Peaks
- Hohe zeitliche Variabilität der Leuchtkraft

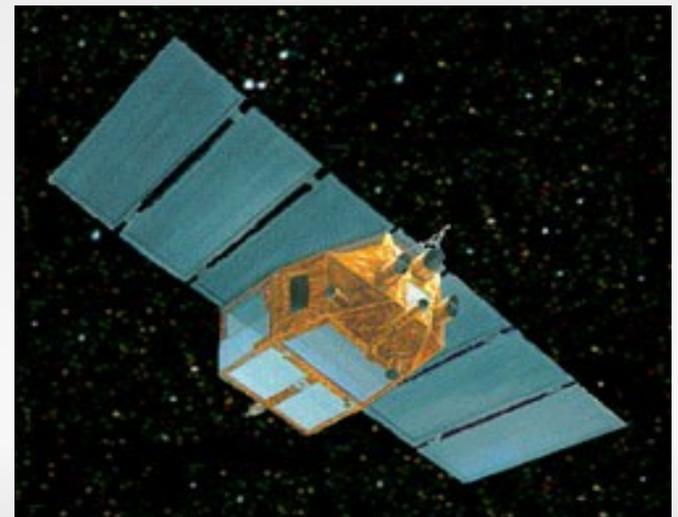
# Bimodalität

- Bimodale Verteilung  
< 2s Short Bursts; > 2s Long Bursts
  - weiterer Unterschied: Härte der Strahlung  
kurze GRBs weisen mehr höher  
energetische Photonen  
auf als lange GRBs
- unterschiedliche Mechanismen  
bei langen bzw. kurzen Bursts



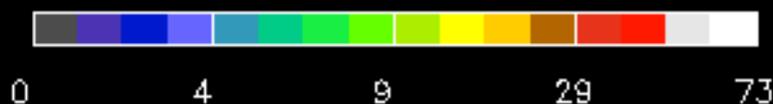
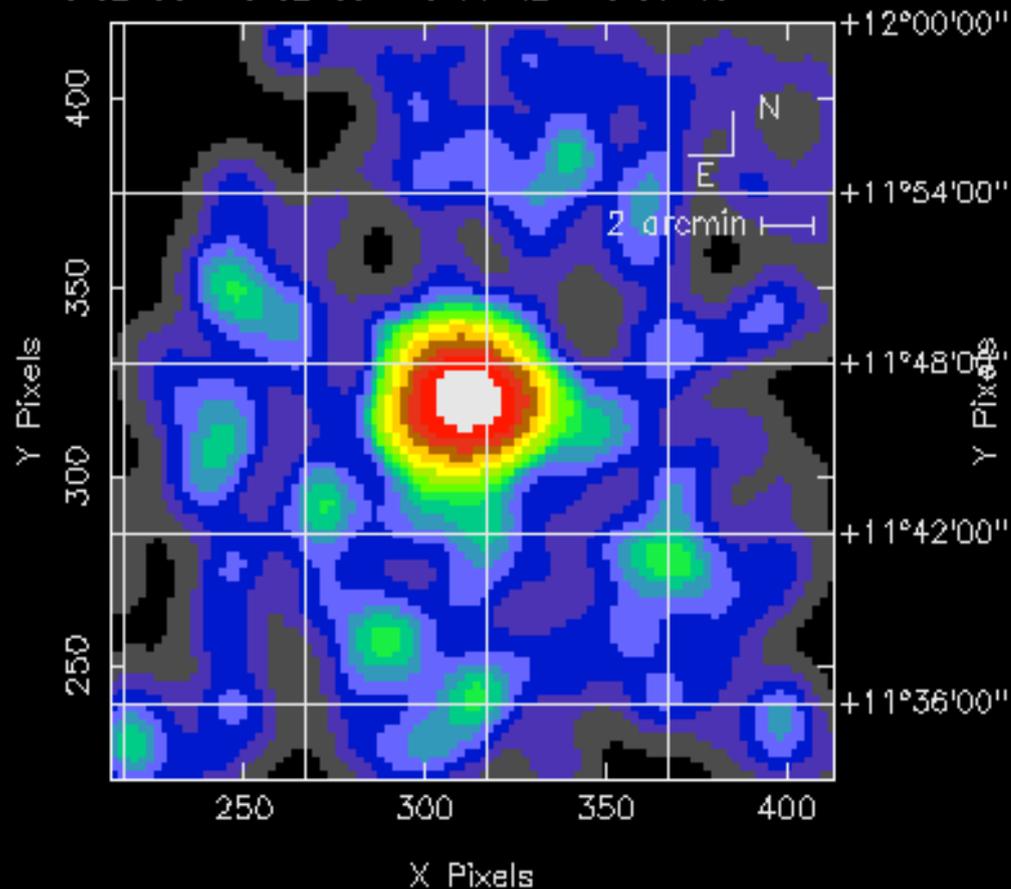
# BeppoSAX

- Beppo-SAX (1996-2002)  
Satellite for X-ray astronomy
  - Spektrum: 0.1 - 300 keV (Narrow Field Instr.)  
2 - 28 keV (Wide Field Camera)  
15 - 300 keV (Phoswich Detector Sys.)
  - Winkelauflösung:  
~5 Bogenminuten
  - zeitliche Auflösung: 0.5ms WFC
  - Problem:
    - Positionierung zu langsam  
(insb. für kurze Bursts)

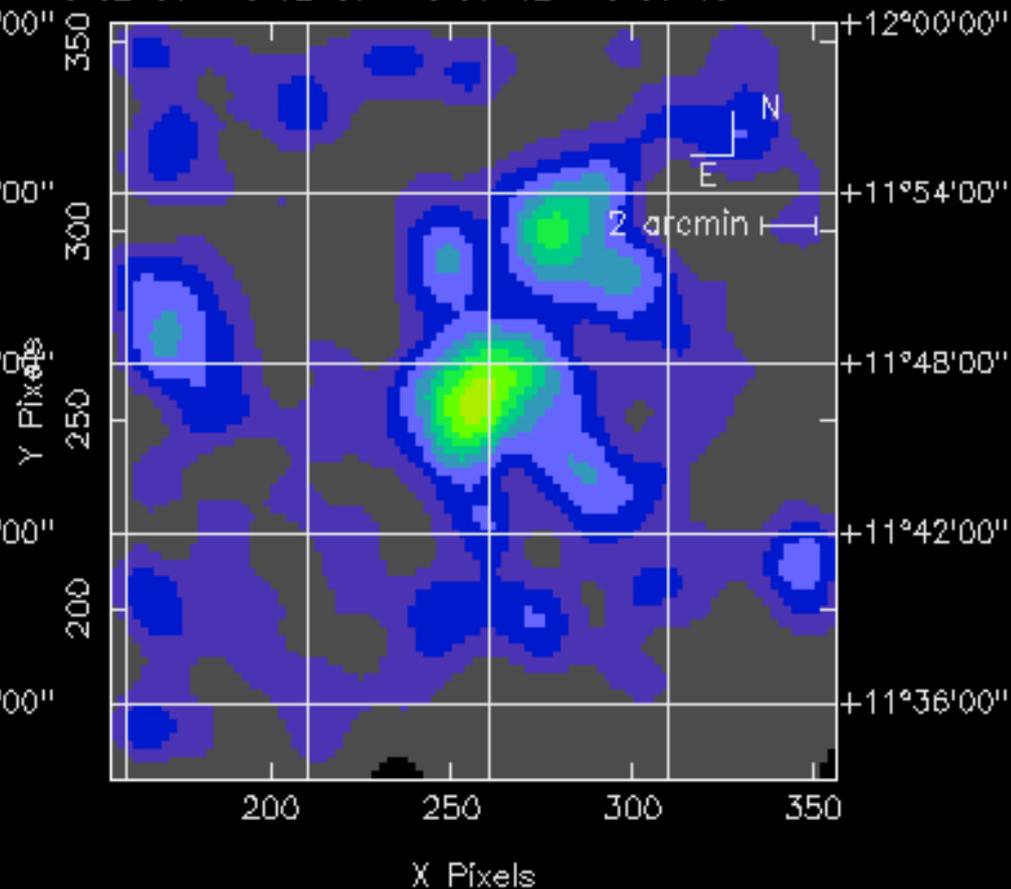


# Afterglow des GRB970228

BeppoSAX observation of GRB970228 field  
SAX MECS 1997 Feb 28 Exposure: 14334 s  
5<sup>h</sup>02<sup>m</sup>36<sup>s</sup> 5<sup>h</sup>02<sup>m</sup>09<sup>s</sup> 5<sup>h</sup>01<sup>m</sup>42<sup>s</sup> 5<sup>h</sup>01<sup>m</sup>15<sup>s</sup>



BeppoSAX observation of GRB970228 field  
SAX MECS 1997 Mar 3 Exposure: 16272 s  
5<sup>h</sup>02<sup>m</sup>36<sup>s</sup> 5<sup>h</sup>02<sup>m</sup>09<sup>s</sup> 5<sup>h</sup>01<sup>m</sup>42<sup>s</sup> 5<sup>h</sup>01<sup>m</sup>15<sup>s</sup>



# Nachglühen der GRBs

- Beppo-SAX entdeckte als erstes den “Afterglow” (Nachglühen) eines langen GRB (970228) im Röntgenbereich
  - die schwindende Strahlung hält bis zu mehreren Tagen an
  - weitere Nachbeobachtungen auch im optischen sowie Radiobereich
- 
- verbesserte Lokalisierung
  - Entfernungsmessung über die Rotverschiebung
  - Identifizierung von Wirtsgalaxien an der Position der GRBs

# Extragalaktische Herkunft

- Insgesamt wurden bisher über 90 Rotverschiebungen gemessen
- circa 50 davon von Swift
- Weitere Identifizierungen von Wirtsgalaxien

→ Beweis für die extragalaktische Herkunft erbracht

# Supernovaassoziation

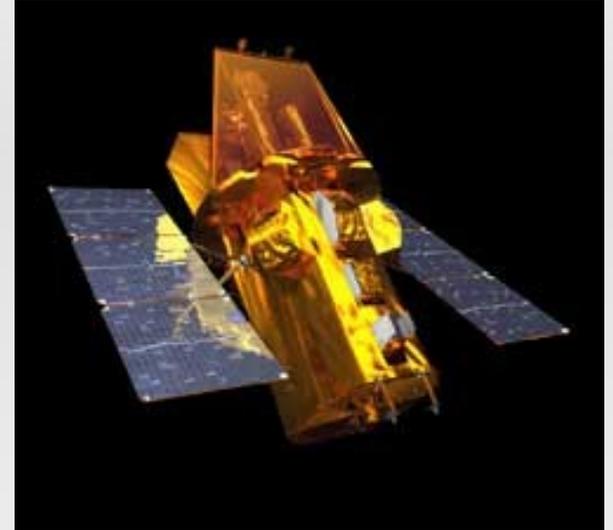
- 4. April 1998:  
BeppoSax findet eine SN in der Fehlerbox des GRB980228.  
Möglicher Zusammenhang zwischen GRBs und Supernovae ?
- Weitere Assoziiierungen folgten insbesondere GRB030329, SN2003dh !



# Neues Spielzeug

## ● Swift (2004-20???)

- Burst Alert Telescope  
15-150 keV, 1'-4'
- X-Ray Telescope  
0.2-10 keV, 3"-5"
- UltraViolett/Optical Telescope  
170-650 nm, 0.3"-2.5"



## ● Swift ist schnell !!:

- Lokalisierung des GRB mit BAT in 15s
- Repositionierung für XRT in 20-70s

# Die Swift-Mission

## ● Ziele der Swift-Mission:

- Bestimmung des Ursprungs der Gammastrahlenbursts
- Klassifizierung der GRBs und Suche nach neuen Typen
- Die Benutzung der GRBs um das frühe Universum zu erforschen
- Eine Himmelsdurchmusterung im harten Röntgenbereich

# Emissionsgebiet

- zeitliche Auflösung: 1ms (BeppoSAX)
- Hohe zeitliche Variabilität der Strahlung  
→ Emissionsgebiet der Gammastrahlung  
ist relativ klein
- $\Delta t = 1\text{ms}$  (BeppoSAX)  
→  $\Delta t \cdot c = 300\text{km}$

# Energiebetrachtung

## GRB000131

- Annahme: isotrope Energieverteilung
- gemessene Flussdichte:  $F_\gamma = 41.8 \cdot 10^{-6} \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2}$   
gemessene Rotversch.:  $z = 4.5$   
→ Leuchtkraftdistanz:  $r_L = 1.557 \cdot 10^{29} \text{ cm} (H_0 = 65, q_0 = 0.1)$

- Gesamtenergie der Gammastrahlen

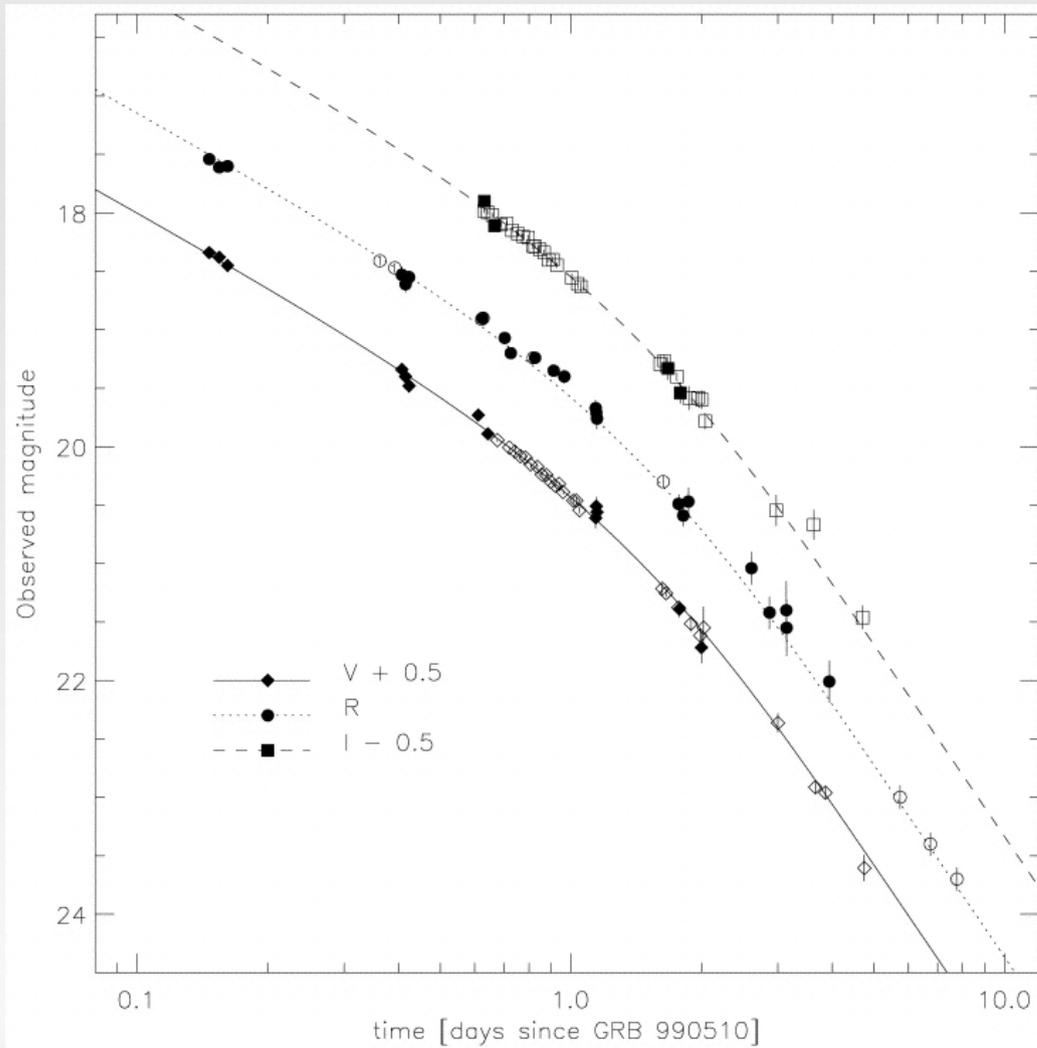
$$E_{ISO}(\gamma) = \frac{4\pi r_L^2}{z+1} \cdot F_\gamma \approx 2.315 \cdot 10^{54}$$

- Vergleich: Massenäquivalenz der Sonne

$$E_S \approx 1.99 \cdot 10^{33} \text{ g} \cdot \left(2.998 \cdot 10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{s}}\right)^2 \approx 1.789 \cdot 10^{54} \text{ erg}$$

- Energiefreigabe im Gammaband entspricht der Massenäquivalenz einer Sonnenmasse !  
→ anisotrope Emission ?

# Afterglow lightcurve break



- erst Abnahme der Leuchtkraft nach dem Potenzgesetz
- dann beschleunigte Abnahme der Leuchtkraft
- Abstrahlung in Form eines Jets, Beschleunigung durch Erreichen des Jet-Rands
- Öffnungswinkel aus der Lichtkurve bestimmbar ( $1^{\circ}$ - $20^{\circ}$ )

# Anisotrope Energiebetrachtung

- die benötigte Energie verringert sich um ein hundertfaches

$$E_J(\gamma) = f_b \cdot E_{ISO}(\gamma)$$

mit

$$f_b = (1 - \cos \theta_J) \approx \theta_J^2 \div 2$$

$$\theta_J = 20^\circ \rightarrow f_b \approx 0.06$$

$$\theta_J = 1^\circ \rightarrow f_b \approx 0.00015$$

Der Energiebedarf für die Gamma Ray Bursts ist somit kleiner als zuvor angenommen, aber bei  $10^{51}$  erg immer noch immens.

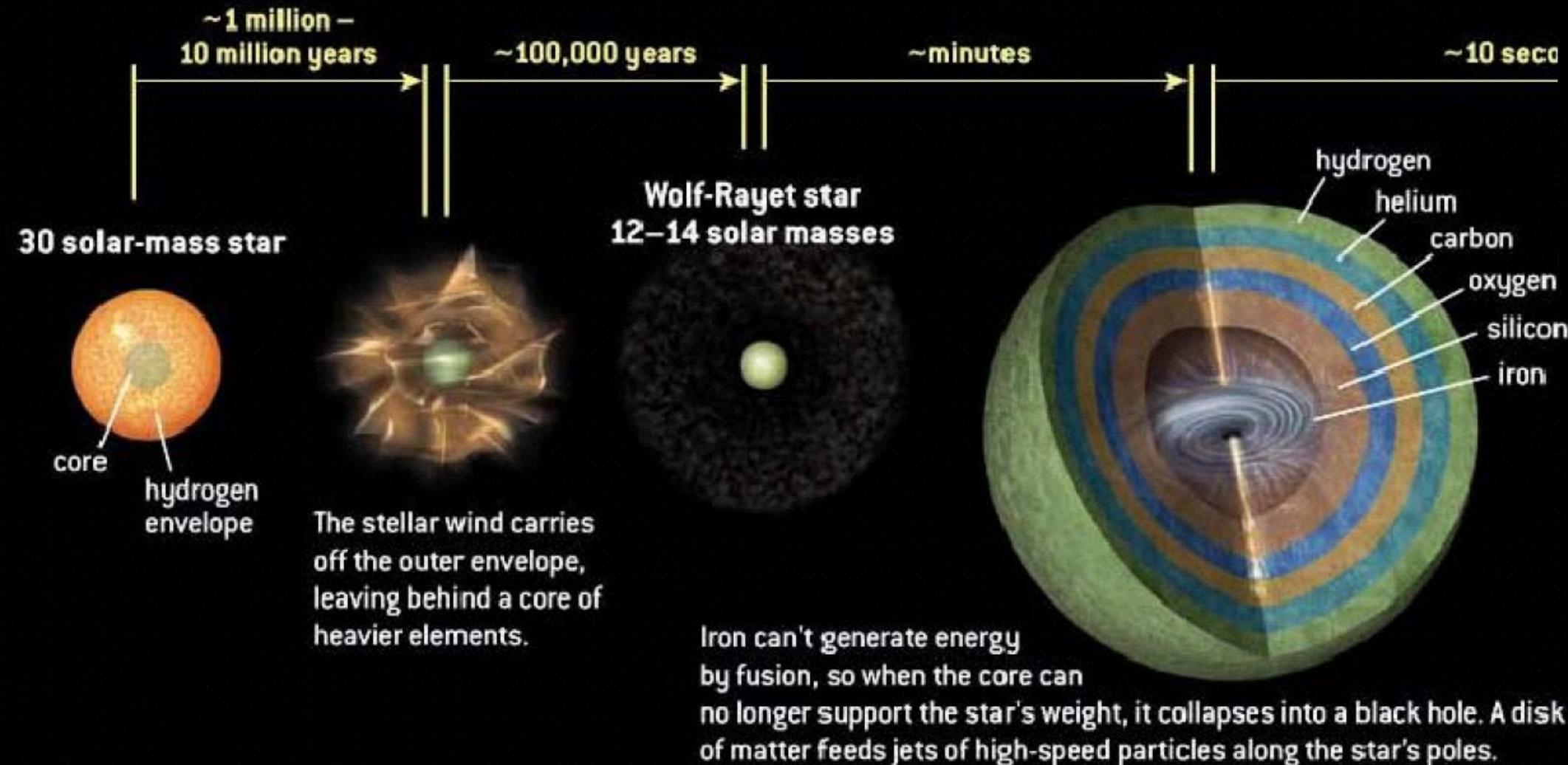
# Kompaktheitsproblem

- kleines Emissionsgebiet + hohe Gesamtenergie
  - hohe Energiedichte
  - hohe Rate an Paarbildungen  
/-vernichtungen ( $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ )
- die Gammastrahlung sind wie in einem Hohlraum gefangen
  - Quelle ist optisch dick ( $\tau = 10^{12} - 10^{16}$ )
  - Abstrahlung eines thermischen Spektrums (Schwarzkörperstrahlung)
- Beobachtung: das abgestrahlte Spektrum entspricht keiner planckschen Kurve
  - Quelle muss optisch dünn sein ( $\tau \ll 1$ )

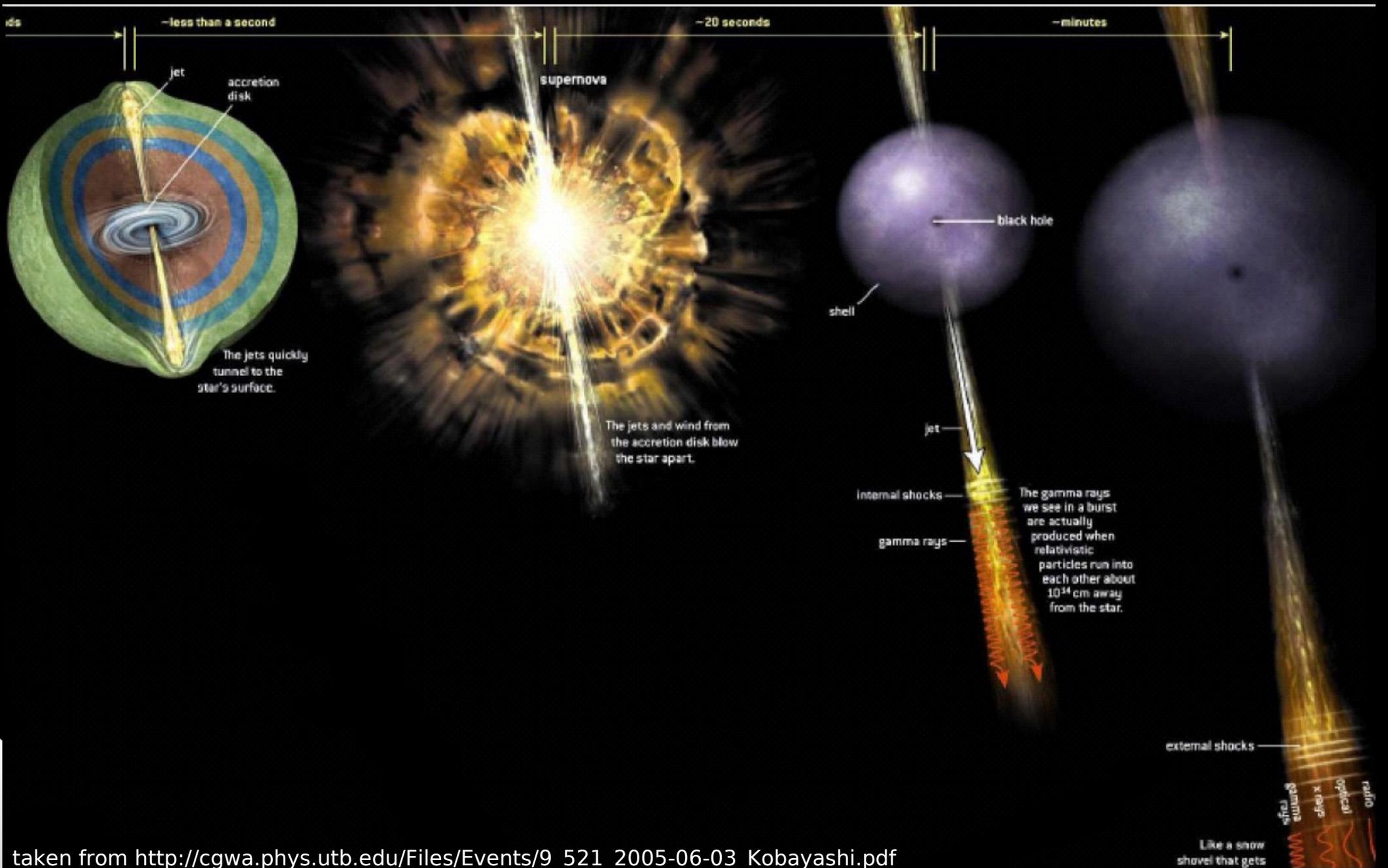
# Ausweg: anisotroper relativistischer Feuerball

- einfachster Ausweg:  
ein anisotroper Feuerball, der sich mit ultrarelativistischer Geschwindigkeit bewegt
  - vergrößertes Emissionsgebiet der Strahlung (Faktor  $\Gamma^2$ )
  - aufgrund der Blauverschiebung haben die Photonen weniger Energie  
→ es treten weniger Paarbildungen auf (Faktor  $\Gamma^{2\kappa}$  mit  $\kappa = 2$ )
  - Relativistische Abberation (Faktor  $\Gamma^2$ )
- Notwendige Geschwindigkeit:  
Lorentzfaktor  $\Gamma > 100 \leftrightarrow v > 0.99995 \cdot c$

# Hypernova als Long GRB-Motor nach Woosley/MacFayden



# Hypernova als Long GRB-Motor nach Woosley/MacFayden



# interne Schocks nach Rees/Mészáros/Piran

- der Auswurf des Jets, bestehend aus Elektronen, Positronen, Plasma und Strahlung, läuft ins externe Medium
- Hauptteil der Energie in Form von kinetischer Energie
- Konvertierung der kinetischen Energie in Strahlungsenergie:
  - schnellere Schalen holen langsamere ein, bei einem Abstand von ungefähr  $10^{14}$  cm
  - es entstehen chaotische magnetische und elektrische Felder
  - Elektronen erzeugen Strahlung durch Synchrotron- und inverse Compton-Prozesse

# externe Schocks

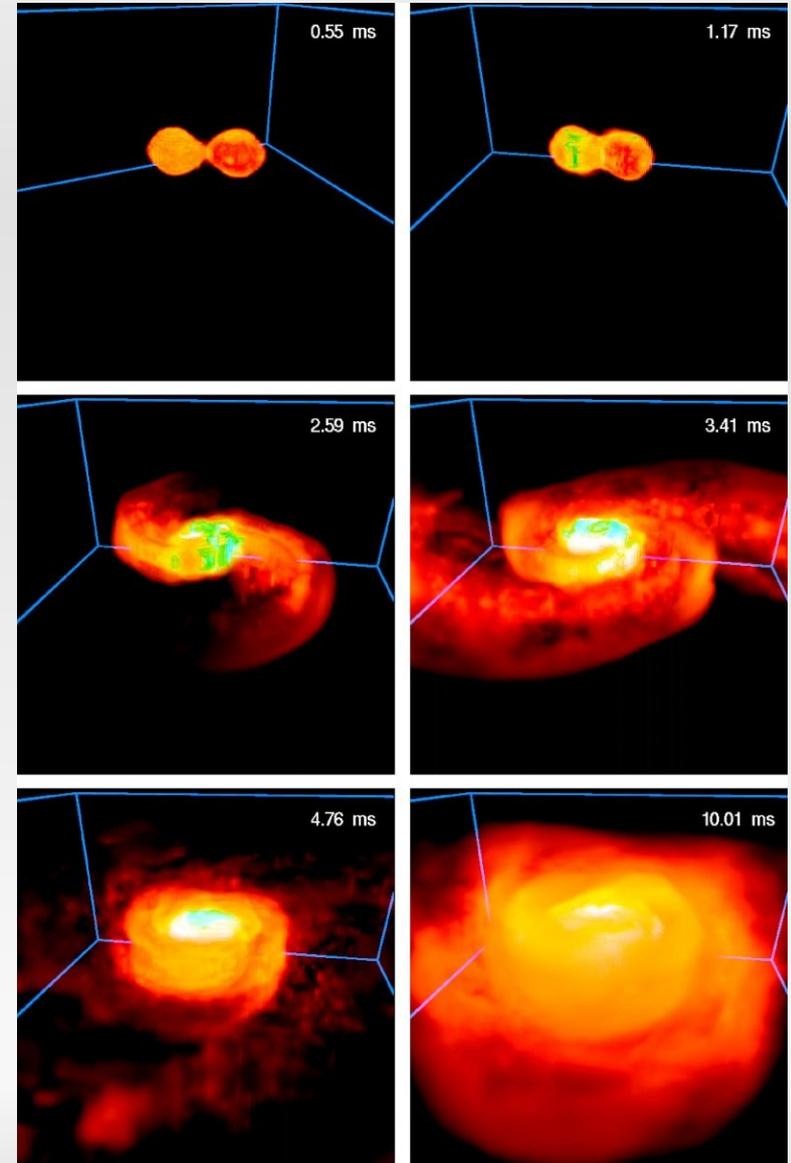
- Entstehung der Afterglows durch externe Schocks:
  - der Feuerball läuft wie eine Stoßwelle ins interstellare Medium bzw. das zirkumstellare Medium
  - Elektronen des Mediums werden auf die ultra-relativistische Geschwindigkeit des Feuerballs beschleunigt
  - dabei emittieren sie Synchrotron-Strahlung

# Short GRB-Motoren

- Entstehung der Short Gamma Ray Bursts durch Verschmelzen kompakter Objekte
- Insbesondere NS-NS / BH-NS Verschmelzung

# Short GRB-Motoren

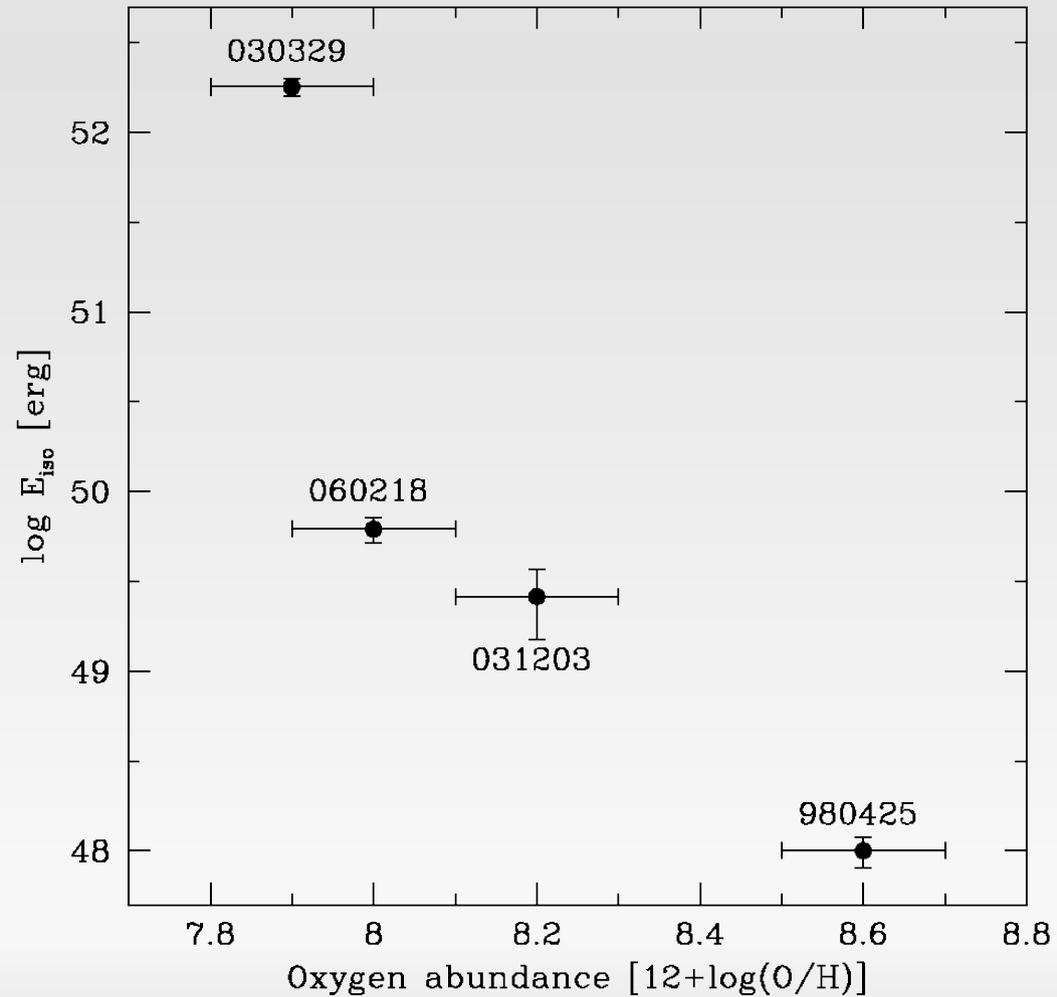
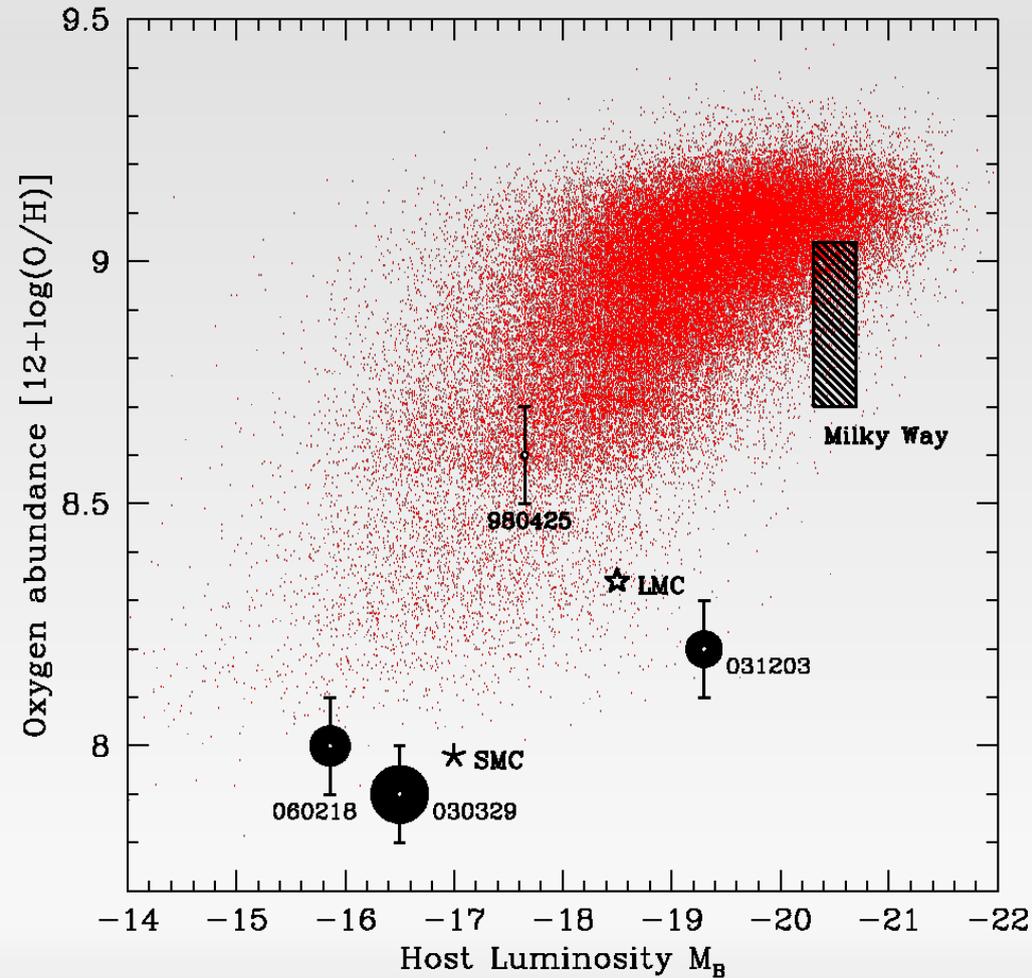
- Ablauf:
  - Radius verkleinert sich durch Abstrahlung von Gravitationswellen
  - der (leichtere) NS wird zerrissen
  - es bildet sich ein extrem schnell rotierender kompakter Kern, der zu einem BH kollabiert, und ein Akkretionstorus



# Wirtsgalaxien

- Studie von A. Fruchter (Nature Mai 2006)
  - von den 42 beobachteten Long GRBs, sind 41 in irregulären Zwerggalaxien, mit hoher Sternentstehungsrate, und 1 in einer Spiralgalaxie
  - 16 zu den GRBs assoziierte SN konzentrieren sich zur hellsten Region der Galaxien
  - “normale” Supernovae sind gleichmäßig zwischen Spiral- und Zwerggalaxien verteilt
- Long Bursts sind in jüngeren, weiter entfernten Galaxien zu finden, kurze Bursts in näheren und damit älteren Populationen.

# Protecting Life in the Milky Way: Metal keep the GRBs away



# Rotation

- Höhere Anfangsmetallizität, bedeutet stärkere Sternwinde -> höherer Drehimpulsverlust
- Drehimpulsverlust durch Ausdehnung zu einem roten Riesen
  - Schwarzes Loch rotiert zu langsam um einen GRB zu erzeugen, oder erzeugt einen sehr schwachen GRB a.k.a. X-Ray Flash (z.B. XRF060218/SN2006aj, )
- Der XRF kann aber auch durch einen schnell rotierenden Neutronenstern erzeugt werden anstatt einem schwarzen Loch

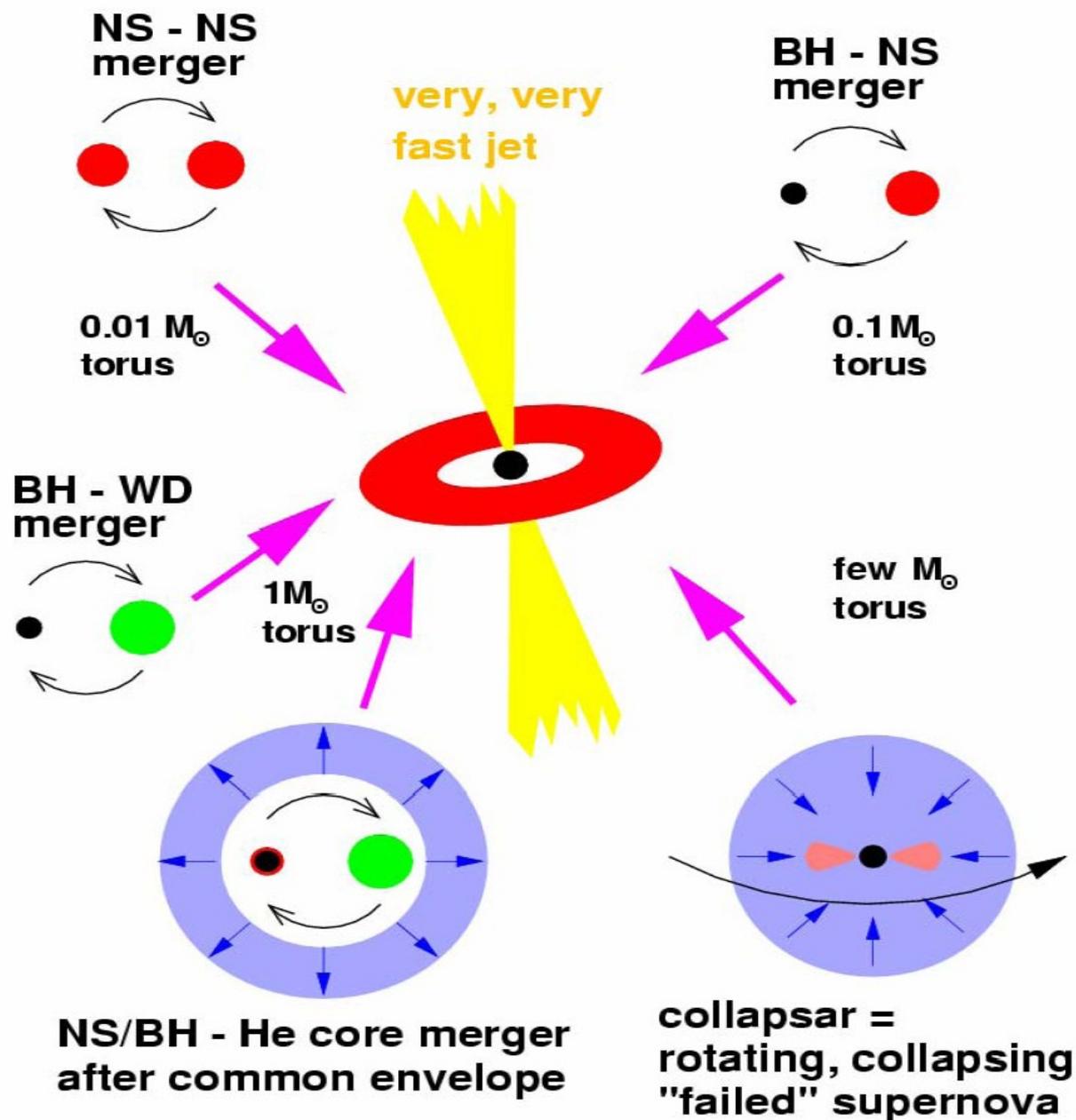
# Ausblick: GRBs und Kosmologie

- Können GRBs die Typ 1a SN als Standardkerzen ersetzen ?
- Vorteile:
  - einfacher zu detektieren
  - sehen weiter in die Vergangenheit zurück ( $z=6.29$  bei GRB050904)
  - theoretisch bei  $z > 20$  noch sichtbar)
- Probleme:
  - Die Leuchtkraft verschiedener GRBs schwankt zu sehr um von Nutzen zu sein.
  - Eichung schwierig, da im näheren Bereich nur sehr wenige Long Bursts detektiert wurden.

# Ausblick: GRBs und Kosmologie

- Ersatz: empirische Korrelation zwischen verschiedenen Eigenschaften
  - Variabilität der Lichtkurve
  - Isotrop äquivalente Leuchtkraft
  - Höchstwert der Leuchtkraft
  - Zeitabstand zwischen hochenergetischer und niederenergetischer Gammastrahlung
- Wie bei den Standardkerzen, ist die Eichung solcher Entfernungsmessung auch schwierig.

# Zusammenfassung



# Quellenverzeichnis

P. Mészáros 2006 Rep. Prog. Phys. 69 2259-2321

P. Jakobsson, et al., 2006, A&A, 447, 897

R. Naeye, Aug. 2006, Sky&Telescope

T. Piran, Okt. 1998, astro-ph/9810256

D. Frail, et al., Astrophysical Journal, 562:L55-L58

A. Fruchter, et al., Apr. 2006, astro-ph/0604463

K. Stanek, et al., Apr. 2006, astro-ph/0604113v1

J. Prochaska, et al, Oct.205, astro-ph/0510022

[http://cgwa.phys.utb.edu/Files/Events/9\\_521\\_2005-06-03\\_Kobayashi.pdf](http://cgwa.phys.utb.edu/Files/Events/9_521_2005-06-03_Kobayashi.pdf)

<http://swift.gsfc.nasa.gov/>

<http://www.aip.de/~jcg/grb990123.html>

[http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmo\\_01.htm](http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmo_01.htm)

<http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse/>

<http://www.mpe.mpg.de/~jcg/grb980425.html>

[http://www.mpe-garching.mpg.de/gamma/instruments  
/swift/www/index-d.html](http://www.mpe-garching.mpg.de/gamma/instruments/swift/www/index-d.html)

<http://www.physik.rwth-aachen.de/~hebbeker/lectures/sem02/schweitzer.pdf>

<http://www.tls-tautenburg.de/research/klose/SuW.ps>