

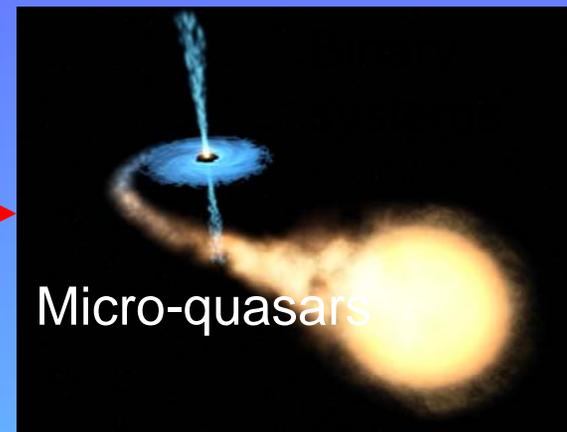
Il fenomeno dell' aggregazione (accretion) in Astrofisica

Materia di un oggetto stellare attratta gravitazionalmente da un altro oggetto vicino (sistema binario)

M.S. Longair Vol II
Cap. 16

M. Vietri Cap. 5

Esempio



Caduta di un singolo protone da distanza infinita su di una stella di massa M e raggio R

$$\frac{1}{2} m_p v_{ff}^2 = \frac{GMm_p}{R}$$

caduta sulla superficie (raggio R) \Rightarrow brusca decelerazione e conseguente radiazione.

Rate di "aggregazione" = \dot{m}

Il fenomeno dell' aggregazione (accretion) in Astrofisica

Per una massa m :

$$\frac{1}{2} m v_{ff}^2 = \frac{GMm}{R}$$

Rate di dissipazione dell'energia cinetica:

$$L = \frac{1}{2} \dot{m} v_{ff}^2 = \frac{GM\dot{m}}{R}$$

Raggio di Schwarzschild di una stella di massa M :

$$r_g = \frac{2GM}{c^2} \Rightarrow$$

Luminosità:

$$L = \frac{1}{2} \dot{m} c^2 \left(\frac{r_g}{R} \right)$$

Esprimiamola luminosità come il prodotto della massa aggregata per unità di tempo per una certa "efficienza" ξ di conversione dell'energia della massa m in radiazione:

$$L = \xi \dot{m} c^2$$

$$\text{Troviamo: } \xi = \frac{1}{2} \left(\frac{r_g}{R} \right)$$

L'efficienza di conversione dipende solo dalla "compattezza" della stella.

Nana bianca:

$$M = M_{Sol.} ; R \cong 5 \times 10^6 m \Rightarrow \xi \cong 3 \times 10^{-4}$$

Stella di neutroni:

$$M = M_{Sol.} ; R \cong 15 km \Rightarrow \xi \cong 0.1$$

Processi nucleari (Idrogeno \rightarrow He) $\xi \cong 7 \times 10^{-3}$

Il fenomeno dell' aggregazione per un buco nero

Per un BH non esiste piu' una superficie solida su cui la massa m possa "cadere". Tuttavia \rightarrow

Momento angolare :

$$|\vec{q}| = m v r \sin \theta = m v_{\perp} r$$

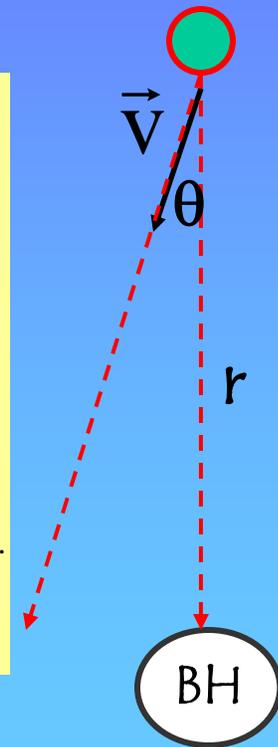
$|\vec{q}|$ e' conservato

Energia cinetica :

$$E = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m v_{\parallel}^2 + \frac{1}{2} m v_{\perp}^2 \quad (\text{Termine traslazionale} + \text{termine rotazionale})$$

$$E_{\text{rotaz.}} = \frac{1}{2} m v_{\perp}^2 = \frac{1}{2} \frac{m^2 v_{\perp}^2 r^2}{m r^2} = \frac{1}{2} \frac{|\vec{q}|^2}{m r^2}; \text{ aumenta al diminuire di } r \text{ piu' rapidamente dell'energia potenziale..}$$

Rende impossibile il collasso ad $r=0$,



Formazione di un "disco di aggregazione"

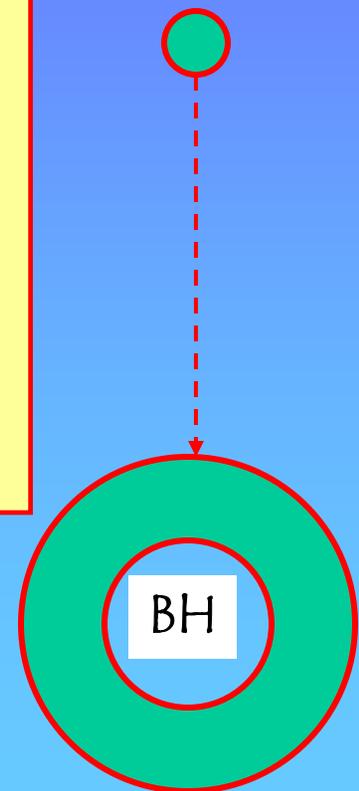
Il fenomeno dell' aggregazione per un buco nero

Il collasso e' possibile per il materiale diretto lungo l'asse di rotazione del materiale gia' formato \rightarrow formazione di un anello di aggregazione

Effetti degli attriti interni (viscosita')
Trasferimento di momento angolare verso l'esterno (materia si sposta verso l'esterno \rightarrow altra materia verso l'interno \rightarrow collasso verso il BH).

Calcolo dettagliato dell'efficienza:
BH a simmetria sferica $\xi = 0.06$
BH di Kerr: $\xi = 0.426$

Formazione di un "disco di aggregazione"



Luminosità limite (Eddington)

Per luminosità elevate la pressione di radiazione respinge l'ulteriore materiale in caduta (luminosità limite di Eddington).

Bilancio tra pressione di radiazione (scattering Thomson) e forza gravitazionale. Coppia elettrone-protone a distanza r dal BH:

$$f_{grav.} = \frac{GM}{r^2} (m_P + m_e) \approx \frac{GM}{r^2} m_P$$

Pressione di radiazione \rightarrow agisce sull'elettrone - legato al protone dalla forza Coulombiana.

Forza sull'elettrone = impulso ($p=hc/\lambda$) impresso per unità di tempo dai fotoni (flusso di Fotoni = N_{ph}) $\rightarrow f = \sigma_T \times N_{ph} \times p$

Verifichiamo le dimensioni $\rightarrow N = [m^2 \times m^{-2} s^{-1} \times J s m^{-1}]$

Sezione d'urto Thomson $\sigma_T = 6.653 \times 10^{-29} m^2$.

Flusso di fotoni: $N_{ph} = L / (4\pi r^2 hc)$

\rightarrow Forza sugli elettroni: $f = \sigma_T L / 4\pi r^2 c$

Uguagliando le due forze:

$$\frac{\sigma_T L}{4\pi r^2 c} = \frac{GM m_P}{r^2} \Rightarrow L_E = \frac{4\pi GM m_P c}{\sigma_T}$$

Luminosità' limite (Eddington)

Luminosità' limite per una sorgente di massa M a simmetria sferica :

$$L_E = \frac{4\pi G M m_p c}{\sigma_T}$$

L_E e' indipendente dal raggio R , ma dipende solo dalla massa M

Puo' esser riscritta nella forma :

$$L_E = \frac{2\pi r_g m_p c^3}{\sigma_T} = 1.3 \times 10^{31} \left(\frac{M}{M_{Sol.}} \right) W$$

Luminosità' di binarie X

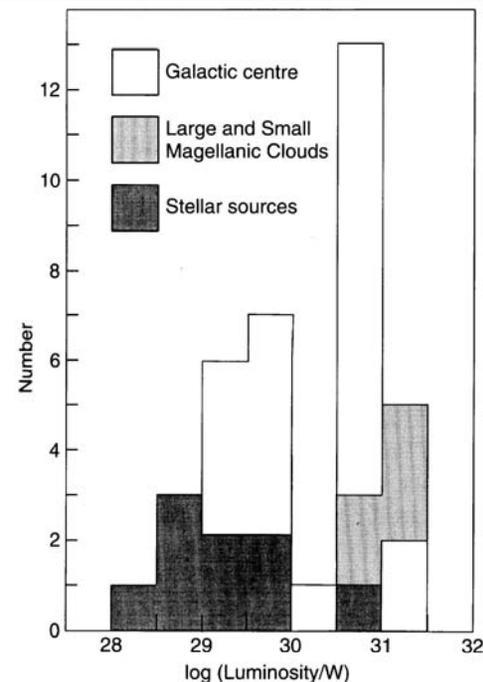


Figure 16.2. A histogram of the X-ray luminosities of bright X-ray sources in the 1-10 keV energy band in our Galaxy and the Magellanic Clouds. The Eddington limiting luminosity for a $1M_{\odot}$ object is 1.3×10^{31} W. (After B. Margon and J.P. Ostriker (1973). *Astrophys. J.*, **186**, 91.)

Luminosità e temperatura di una NS

$$L_E = \frac{2\pi r_g m_p c^3}{\sigma_T} = 1.3 \times 10^{31} \left(\frac{M}{M_{Sol.}} \right) W$$

Vediamo dai dati che le luminosità tipiche delle binarie X sono circa quelle massime consentite dal limite di Eddington.
Ammettendo che irradiano come un corpo nero, si può determinare la temperatura.

$$4\pi R_{NS}^2 \sigma T^4 = 1.3 \times 10^{31} W$$

$$\text{con : } \sigma = 5.670 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4} \Rightarrow T = 2 \times 10^7 K$$

↓
1.8 KeV

È quindi naturale che le NS che aggregano all'incirca al limite di Eddington emettano la più gran parte dell'energia negli X

GRB's (1)

*Emissioni improvvise, di altissima intensita'. Durata: da pochi ms a pochi s
Scoperti negli anni '60 da satelliti militari americani usati per monitorare
eventuali esplosioni nucleari nell'atmosfera. Informazione resa pubblica
solo nel 1973.*

*Studiati dal CGRO (Compton Gamma Ray Observatory). Distribuzione
uniforme sull'intera volta celeste → origine extragalattica*

*Osservazioni di BATSE 30KeV-1.2 MeV
(sul CGRO) → 1600 γ Bursts osservati*

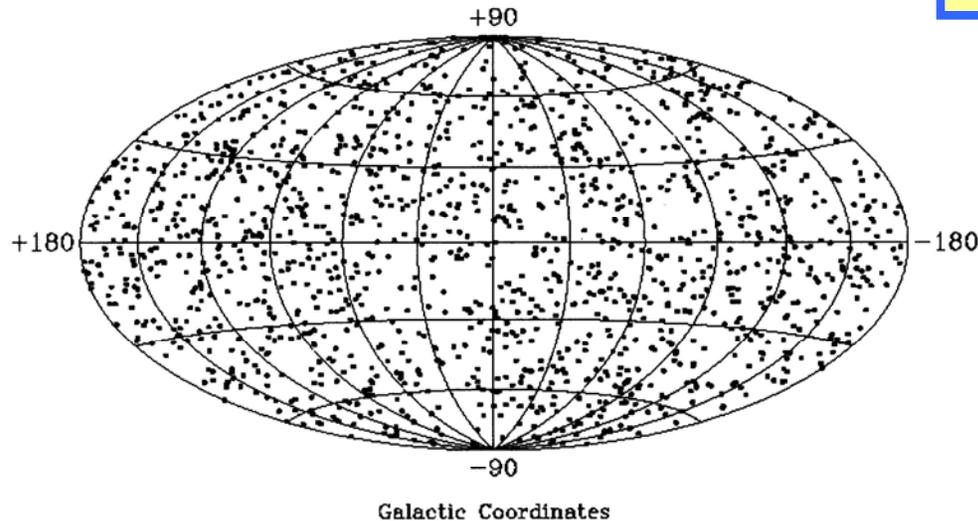


Fig. 13.1. More than 1600 bursts have been detected by the BATSE. The uniformity of the distribution of sources indicates that they have an extragalactic origin. Figure from <http://cosscc.gsfc.nasa.gov/cosscc/burst.html>.

GRB's (2)

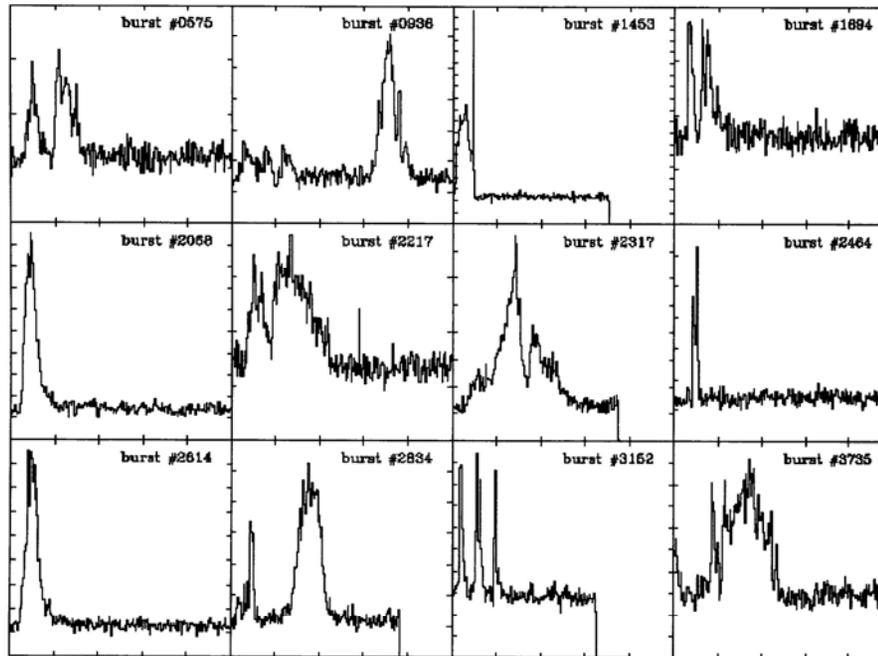
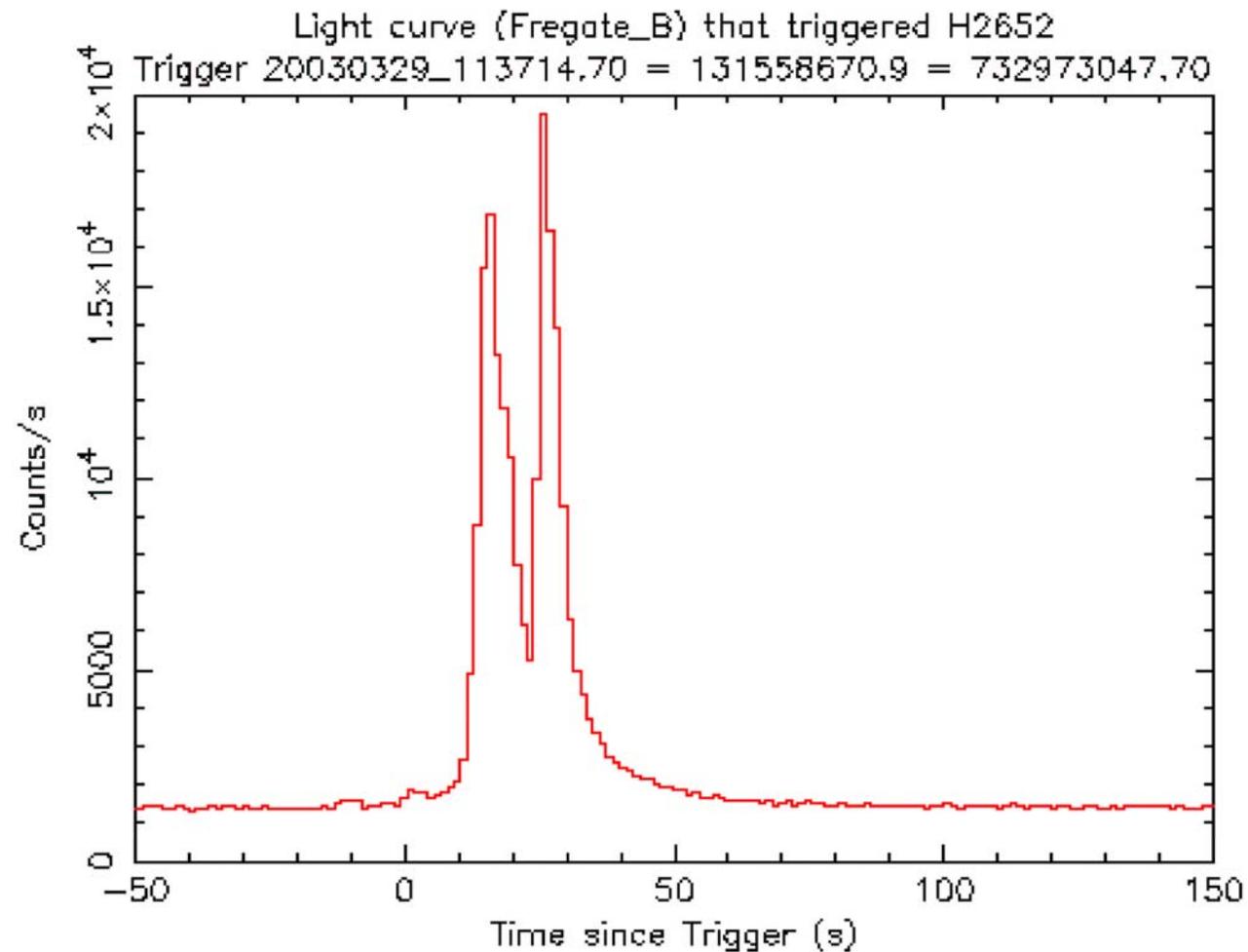


Fig. 13.2. GRB brightness (vertical axis) *versus* time (horizontal axis, 2 seconds) for twelve relatively short bursts. Bursts last a few tens of milliseconds to hundreds of seconds, with no two bursts showing exactly the same development in time. From <http://cossc.gsfc.nasa.gov/cossc/burst.htm>.

*Durate tipiche dei GRB's
da poche decine di ms a
centinaia di secondi*

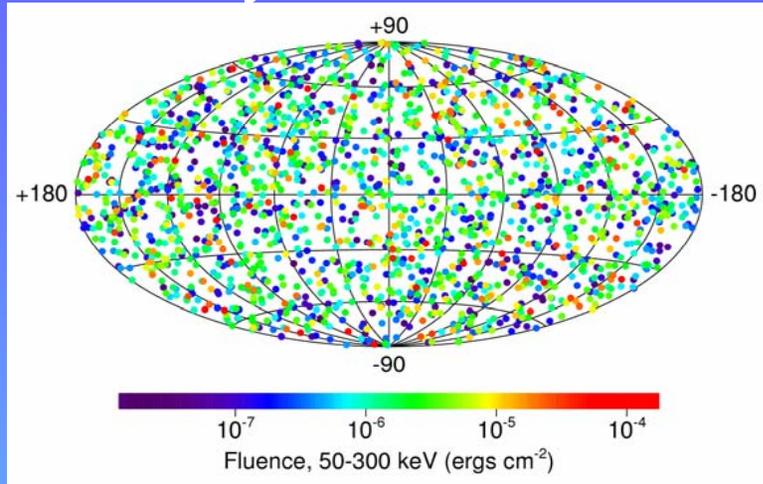
*Variabilita' cosi rapida →
piccole dimensioni della
zona di emissione*

GRB's (3)



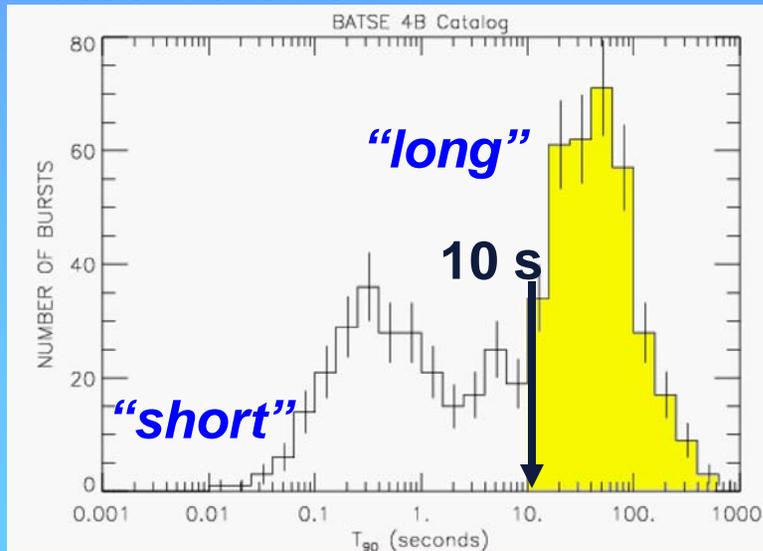
GRB's (4)

Uniformity



- Origin of GRBs
 - Galactic
 - Cosmological
- Theoretical Emission Models:
 - Standard fireball model
 - Internal Shocks model
 - External Shock model

Pulse Duration



Multiwavelength study
GeV studies possible if:
fast repositioning ~ 10 s
low E threshold ~ 30 GeV
From BATSE catalog ~ 50 /year
Expected signal rate $6 \div 600$ Hz
(in $[10s, T]$ assuming $T \sim 20s$)
 $2 \div 3$ "long" GRBs detectable/year

GRB's (5)

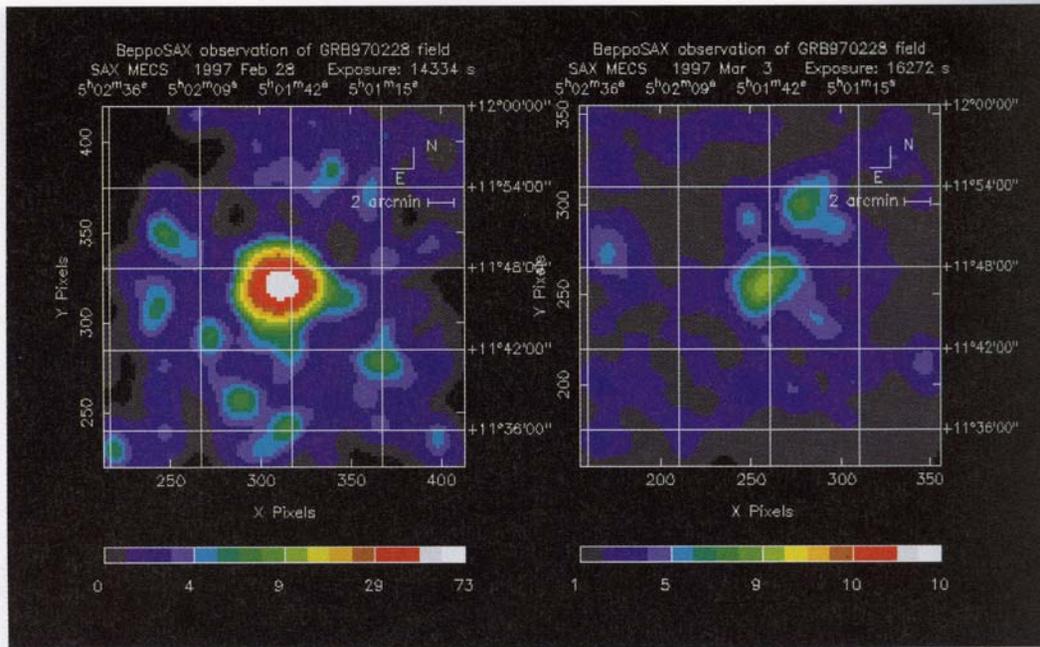


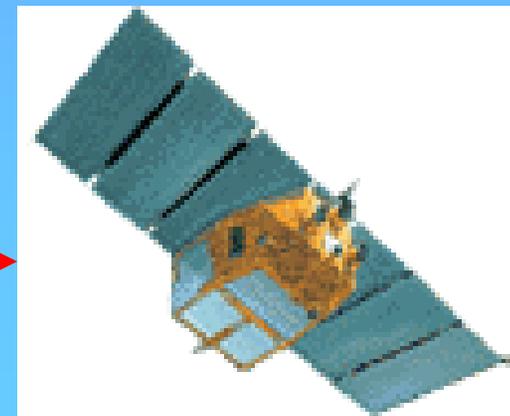
Plate 8. BeppoSAX observations of GRB970228. On the left is the original observation of the burst on 28 February 1997. On the right is the same region of the sky on 3 March showing the burst object has dimmed. The bright spot at the location of the GRB is pinpointed with just a few arc minutes uncertainty. Credit: BeppoSAX Team, ASI, ESA.

Misure negli X con grande precisione angolare (minuti d'arco) fatte nel 1997 da BeppoSAX (Italia-Olanda)

Segnale osservato il 28 Febbraio 1997 e 24 ore dopo dai grandi telescopi ottici (Keck e Hubble): redshift $z=0.835$ → origine extragalattica

Segnale scomparso poco dopo

BeppoSAX Detector →



Legge di Hubble

$$v = H_0 r$$

$$(H_0 \sim 71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1})$$

velocità v misurata attraverso lo shift Doppler delle linee spettrali (redshift):

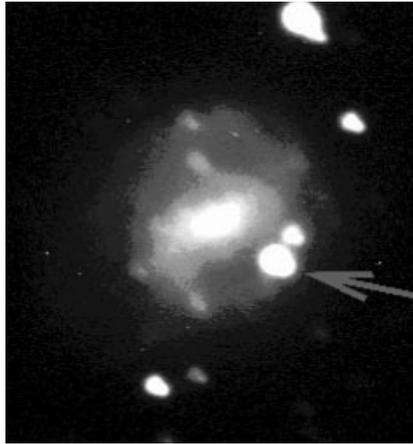
$$z = (\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{em}}) / \lambda_{\text{em}}$$

$$(1+z) = [(1+v/c)(1-v/c)]^{1/2}$$

Non relativisticamente $\rightarrow z = v/c$

e.g.: 3C279 $Z=0.538$

GRB's (6)



29 Marzo 2003: Osservazione di una supernova (SN2003dh; $Z=0.1685$) temporalmente e spazialmente coincidente con un GRB (GRB030329)

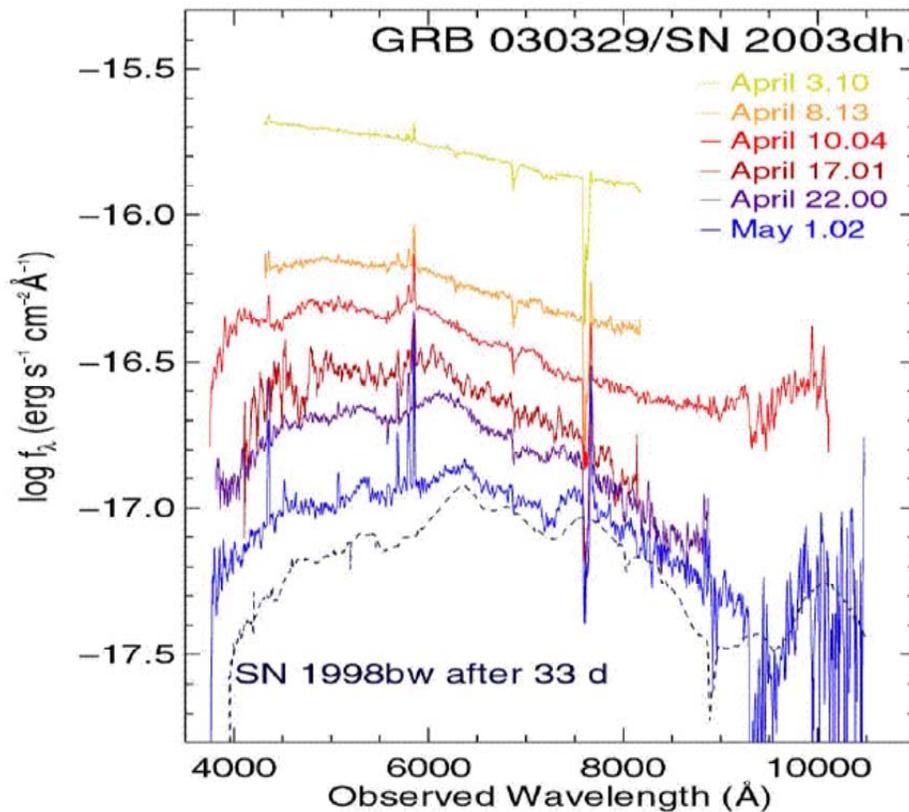
*Modello dell'origine dei GRB
Esplosione di una supernova con doppia emissione:*

- 1) fotoni emessi al momento della fase iniziale del collasso*
- 2) Espulsione di materiale con altissima velocità*
- 3) Impatto del materiale con il "guscio" della stella e nuova emissione di particelle e fotoni*

GRB's (7)

GRB 030329 – SN2003dh

Hjorth et al. 2003



*29 Marzo 2003: Osservazione di una supernova (SN2003dh; $Z=0.1685$)
Evoluzione del segnale nell'ottico nei giorni successivi al GRB (GRB030329)*

Associazione di un GRB con una SN

GRB's (8)

Normalmente una SN rilascia la maggior parte dell'energia sotto forma di neutrini.

La curva di luminosità dura molte settimane.

Nel caso dei GRB la durata è di pochi secondi.

Possibile spiegazione → diversa struttura del manto esterno

Per una normale SN → manto molto denso agisce da assorbitore dello shock
→ l'energia è rilasciata molto lentamente

Se il manto esterno è molto poco denso, questo può acquistare una enorme energia cinetica (relativistica).

Per un manto che contenga lo 0.01% della massa della stella → l'energia cinetica del materiale espulso può corrispondere a 1000 volte la sua massa.

Ipotesi: energia (massa M) della stella convertita in energia cinetica con efficienza ε del 10%. Manto contiene lo 0.01% della massa della stella:

$$E_{kin} = (1 - 10^{-4})Mc^2 \times \varepsilon$$

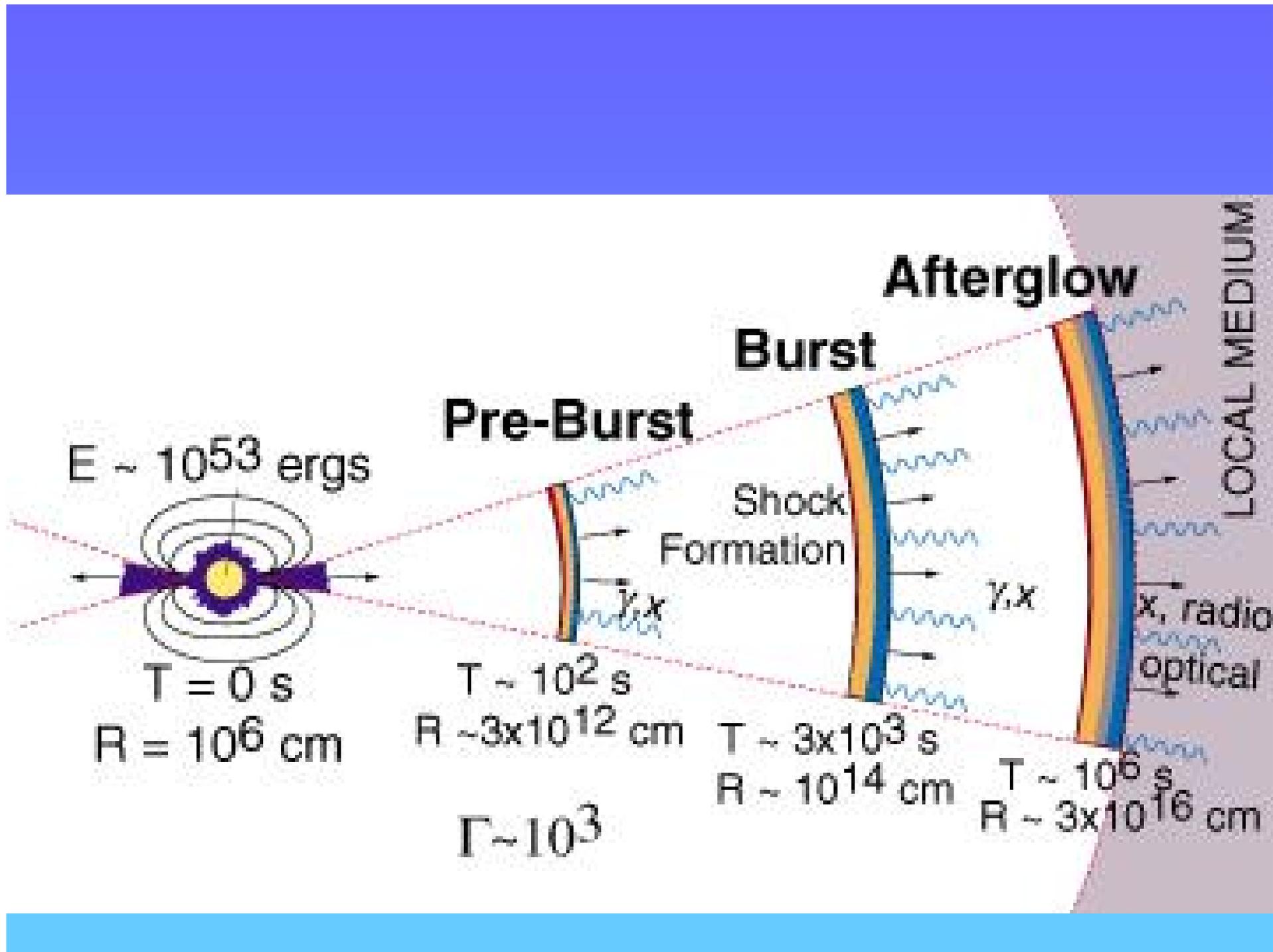
$$\text{Massa del manto: } 10^{-4} \times M \cdot c^2$$

$$\gamma = \frac{(1 - 10^{-4})\varepsilon}{10^{-4}} = 10^3$$

GRB Generic Model

This leads us to the following generic model:

- I. *A hidden central inner engine which produces a relativistic outflow of energy*
 - NS-NS, NS-BH, BH-He, Collapsar, Hypernova
- II. *Energy transport from the engine to an outer region where,*
 - Kinetic energy flux by relativistic particles is easiest
- III. *there is a conversion of energy to the observed prompt radiation, i.e., the burst*
 - Kinetic energy is converted to thermal energy in shocks, then radiated away as gamma-rays. Two models: internal and external shocks.
- IV. *Later, there is a conversion of the remaining energy into radiation, i.e., the afterglow*
 - a) Inner engine of GRB shines for long time, produces both the pre-cursor as well as the afterglow
 - b) Slowing down of relativistic shell by the ISM, i.e., an external shock, the Blandford-McKee self-similar solution

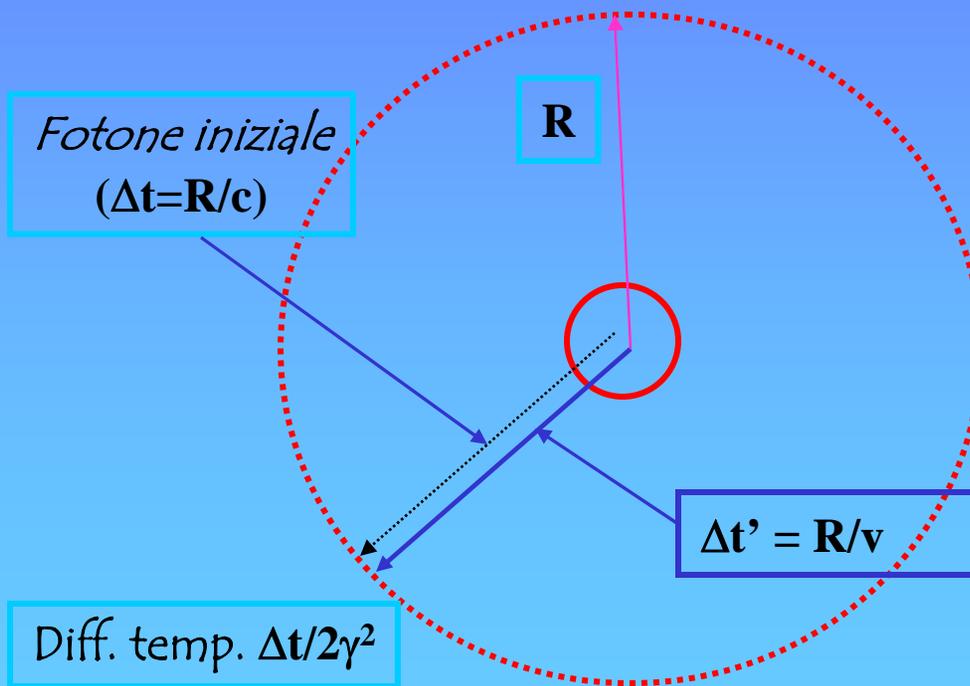


GRB's (7)

Possibile modello dell'origine dei GRB

Esplosione di una supernova con doppia emissione:

- 1) *fotoni emessi al momento della fase iniziale del collasso*
- 2) *Espulsione di materiale con altissima velocità β*
- 3) *Impatto del materiale con il "guscio" della stella e nuova emissione di particelle e fotoni*



Strato espulso ad altissima velocità, β insieme alla prima emissione luminosa

guscio in espansione incontra (~ 1 mese) materiale esterno \leftarrow frenamento e nuova emissione

Osservatore al centro: tempo impiegato dal primo flash per raggiungere il luogo della seconda emissione: $\Delta t = R/c$

*Velocità di espansione del guscio:
 $v = \beta c \sim c(1 - 1/2\gamma^2)$*

Differenza temporale tra i due flash:

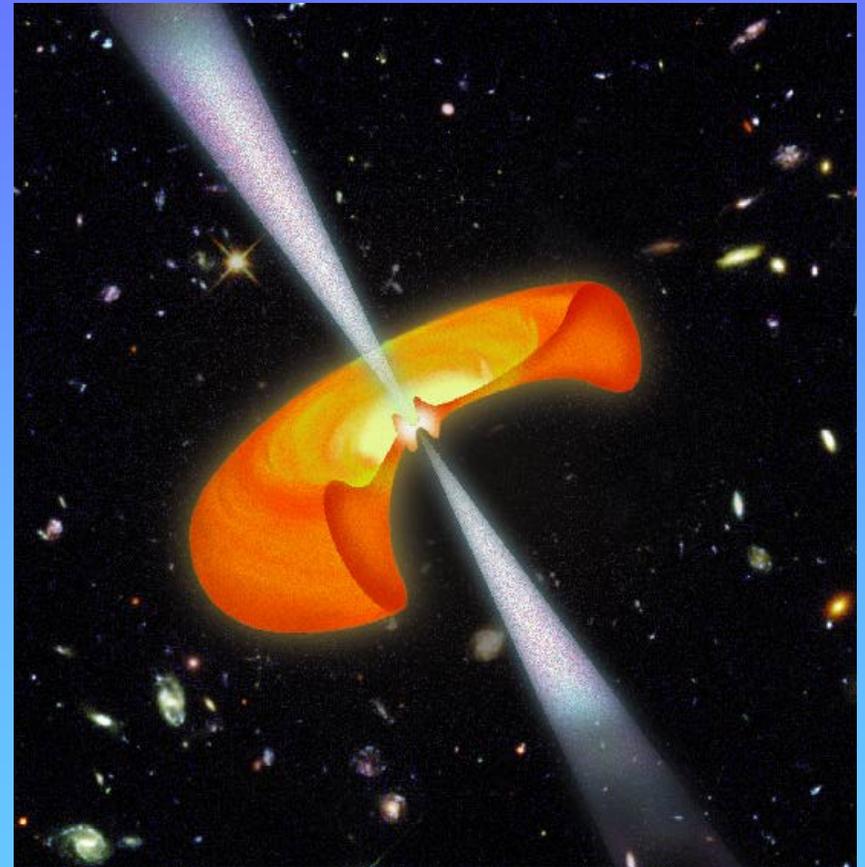
$$\Delta \tau = R/v - R/c = R/(2\gamma^2 c) = \Delta t/2\gamma^2$$

~ 1 s per $\Delta t = 1$ mese e $\gamma = 10^3$

GRB Engine Models

Collapsar and Hypernova

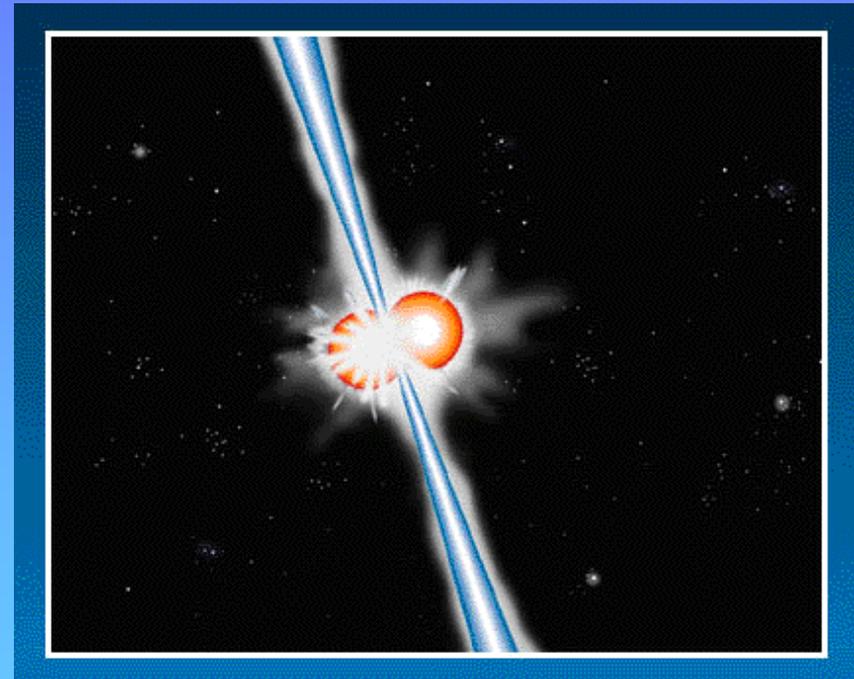
- Another end for stars, fits in with stellar evolution of massive stars
- Type I
 - Iron core collapse to BH
 - 0.01 – 0.1 solar mass per second for first 20 s
 - Variability down to 50 ms, duration of about 10 seconds
- Type II – “Failed Supernova”
 - Fallback of SN explosion onto NS/BH
 - 0.001 – 0.01 solar mass per second, no jet by neutrinos
 - Duration 10-100 times longer than Type I



GRB Engine Models

Compact Object Merger

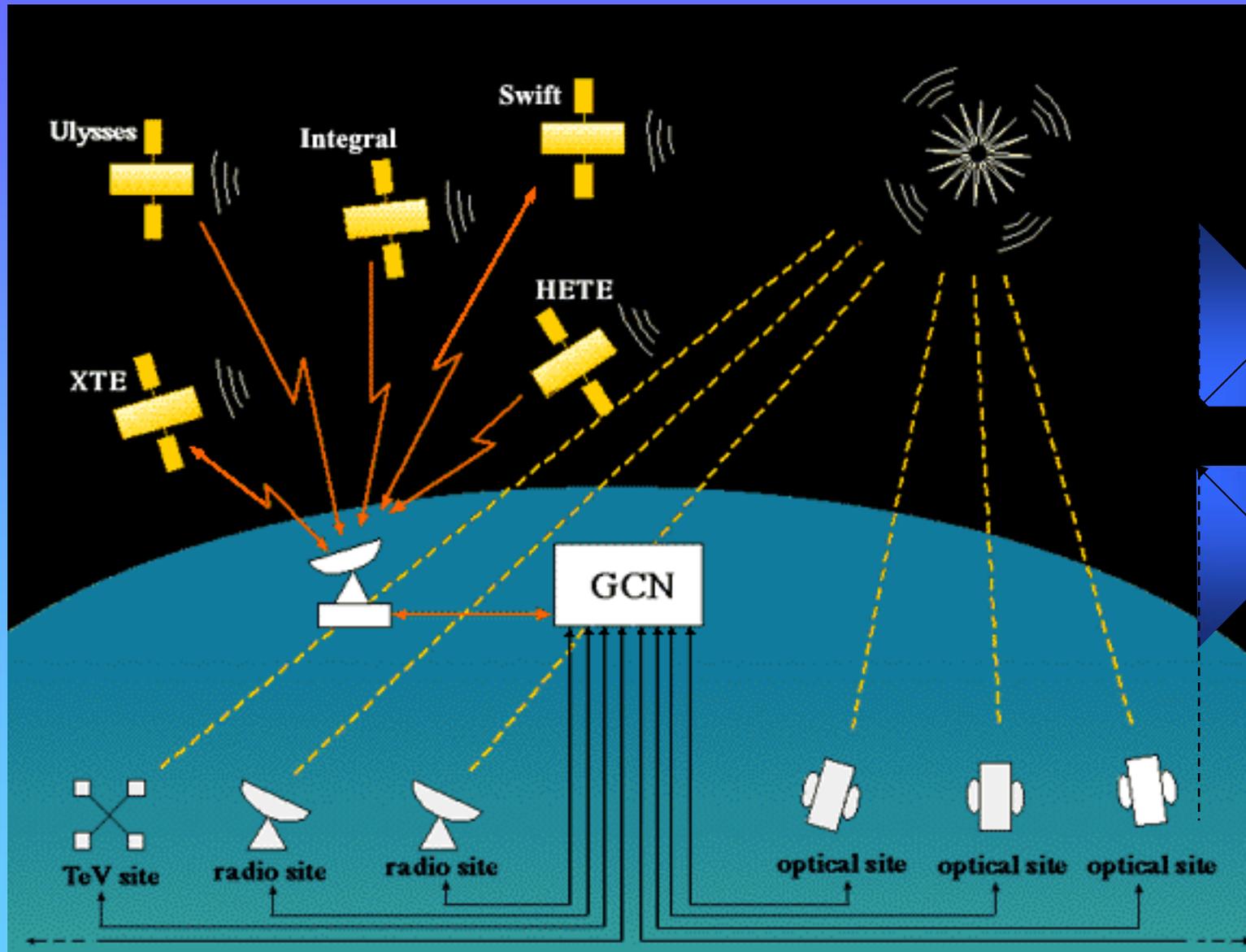
- Promising for short and hard bursts, not so much for long and soft
- **Direct Merger**
 - NS-NS, NS-BH, BH-He star binary mergers
 - Very short burst
 - Could have variability of output flow during merger
- **Tidal Disruption**
 - BH torus system
 - similar to collapsar model
 - Blandford-Znajek



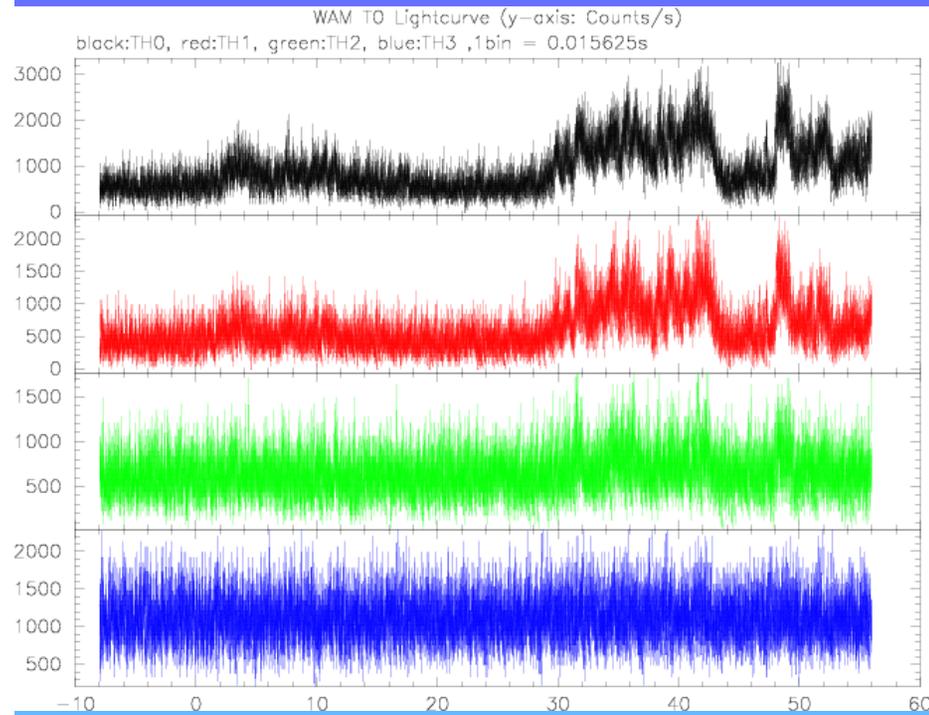
Determination

- Cosmic Rays
 - Possibility of 10^{19} eV cosmic rays from Fermi acceleration of protons in cosmological GRBs. E Waxman, ApJ 452, L1 (1995)
- Neutrino emission
 - 10^{14} eV neutrinos via photomeson production of pions in interactions between the fireball gamma rays and accelerated protons. E Waxman PRL 78:2292 (1997)
- Gravitational Wave Signature
 - All models have a predicted unique gravitational wave signature which should be detectable by advanced LIGO

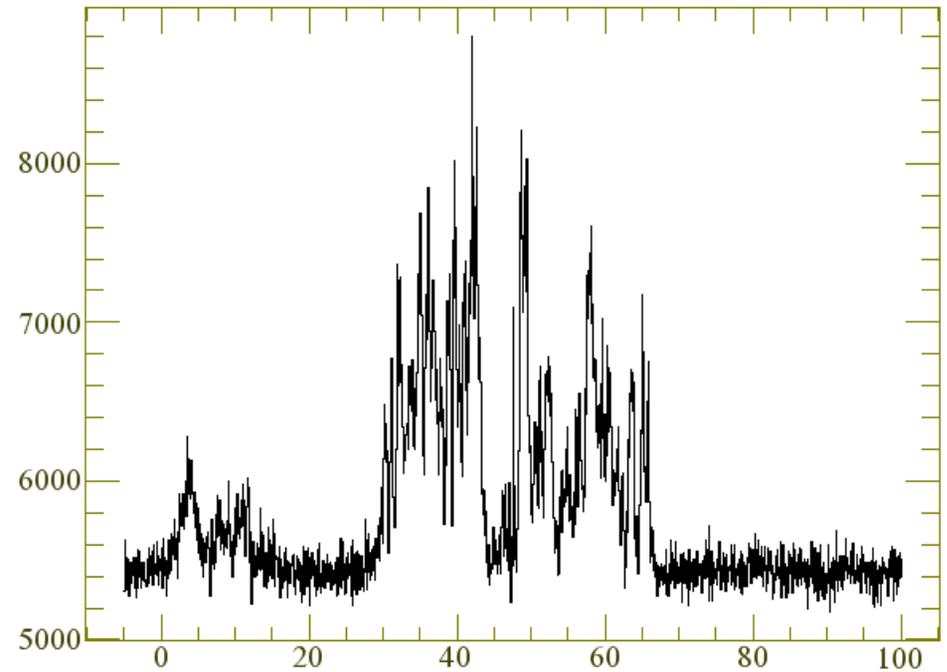
GRB Coordinates Network (GCN)



Gamma ray burst GRB 061007



SPIACS lightcurve around 2006/10/07 10:08:05.786 UTC



**SWIFT-BAT gamma measurements
with different thresholds**

**measurements in the visible
region of the spectrum**

Gamma ray burst GRB 061007

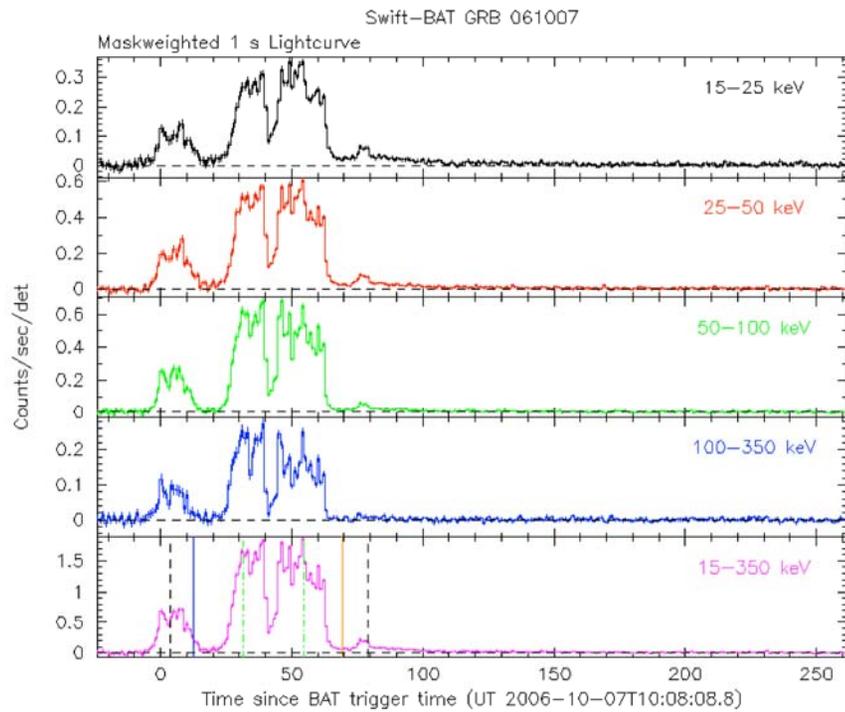


Fig.1: BAT Lightcurve. The mask-weighted light curve in the 4 individual plus total energy bands. The units are counts/sec/illuminated-detector (note illum-det = 0.16cm²) and T₀ is 10:08:08 UT.

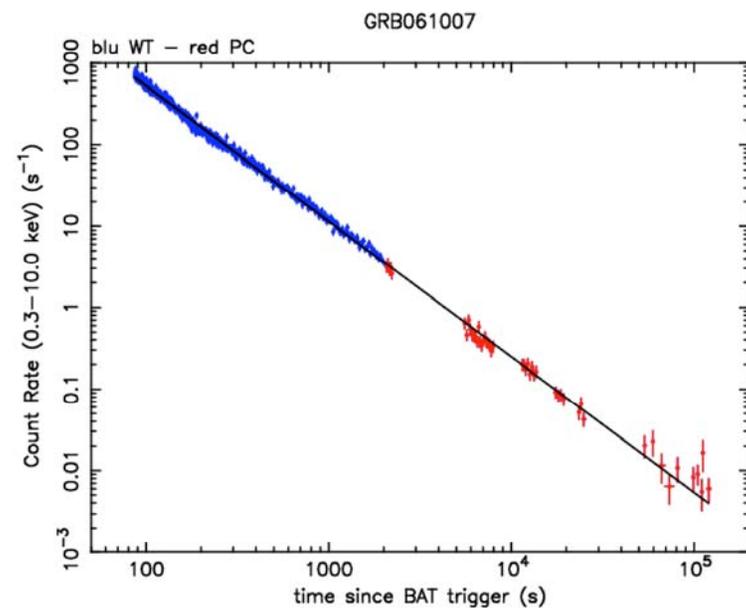


Fig. 2: XRT Lightcurve. Counts/sec in the 0.3-10 keV band: Window Timing mode (blue), Photon Counting mode (red). The approximate conversion is 1 count/s = $\sim 5 \times 10^{-11}$ ergs cm⁻²s⁻¹.

SWIFT-BAT measurements

XRT lightcurve

XRT, Visible and UV measurements started
~ 80 s after BAT trigger