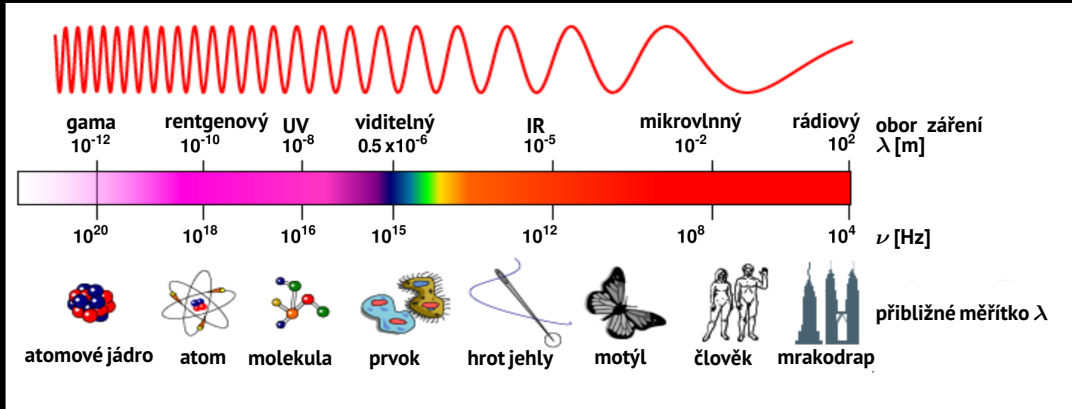


# Vesmírné gama záblesky - laboratoře nejvyšších energií

Petr Kurfürst

Kosmologická sekce ČAS  
9. října 2024

# Co je záření gama?



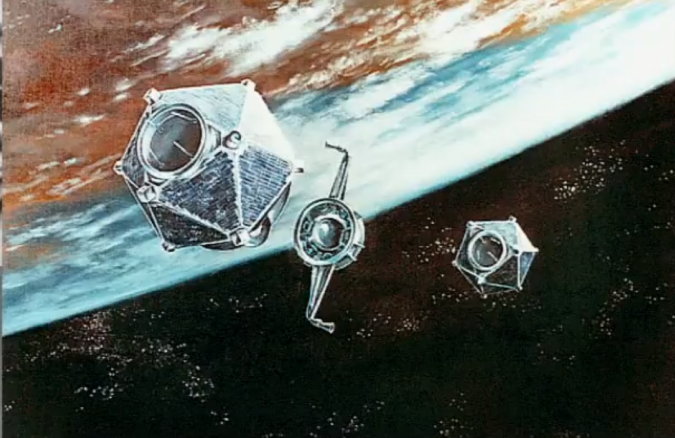
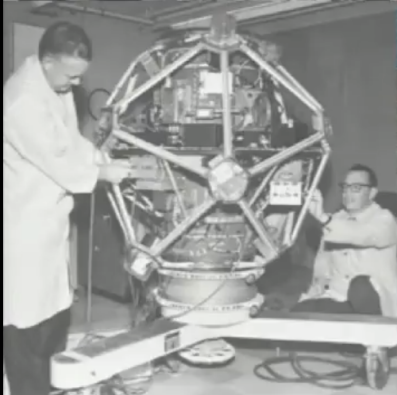
- Záření gama je nejenergetičtější formou „světla“
- Jeho vlnová délka se přibližně rovná velikosti atomového jádra
- Neprochází (naštěstí pro nás) zemskou atmosférou



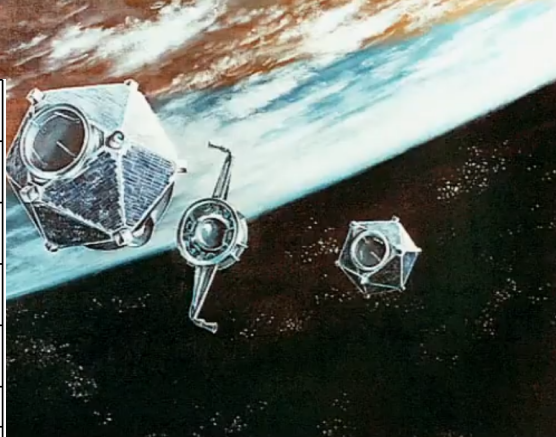
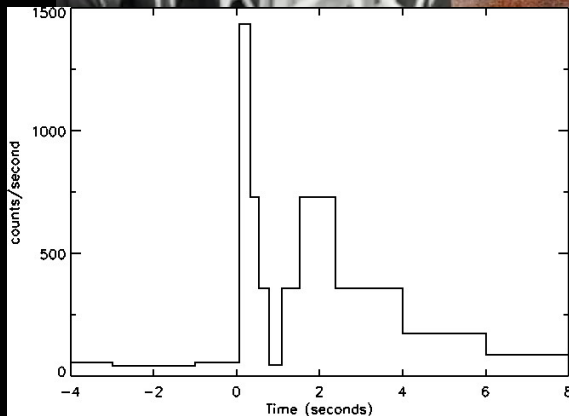
# Limited Nuclear Test Ban Treaty (1963)



... zakázat, zabránit a neprovádět žádné zkoušky jaderných zbraní v atmosféře & za jejími hranicemi, včetně vnějšího kosmického prostoru

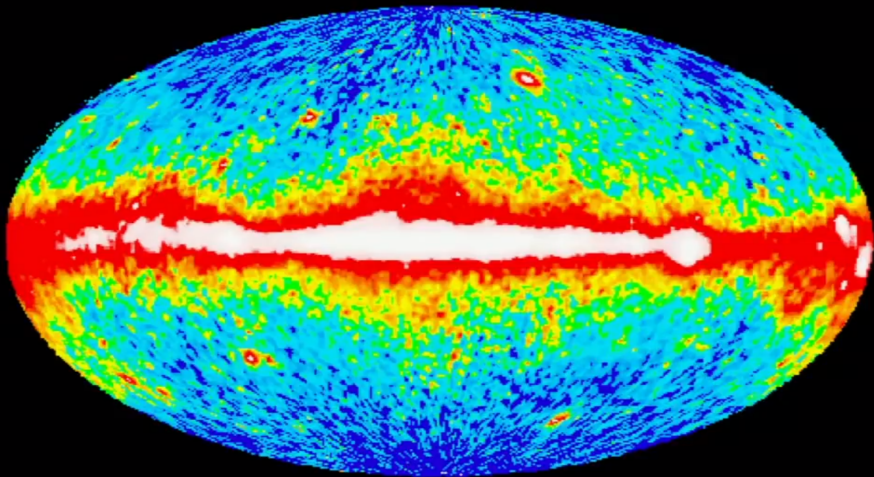


**2. 6. 1967: sonda Vela 4a (publikováno až v roce 1969)  
(Zdroj: Klebsadel+ 1973)**



**2. 6. 1967: sonda Vela 4a (publikováno až v roce 1969)  
(Zdroj: Klebsadel+ 1973)**

**Gama záblesky (GRBs): nejzářivější elektromagnetický jev**



**v průměru 3krát za den**

**(Zdroj: Compton Gamma-Ray satellite)**

## Gama záblesky (GRBs): nejzářivější elektromagnetický jev



v průměru 3krát za den

(Zdroj: Compton Gamma-Ray satellite)

## Gama záblesky (GRBs): nejzářivější elektromagnetický jev

### OBSERVATIONS OF GAMMA-RAY BURSTS OF COSMIC ORIGIN

RAY W. KLEBESADEL, IAN B. STRONG, AND ROY A. OLSON

University of California, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico

*Received 1973 March 16; revised 1973 April 2*

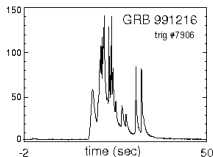
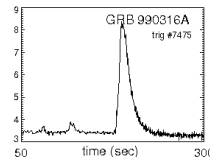
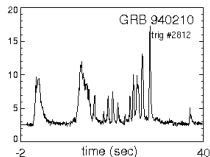
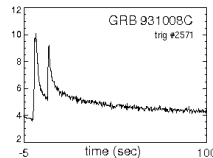
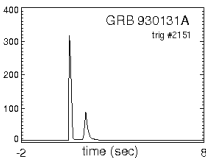
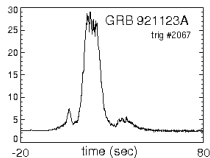
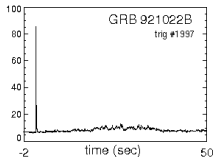
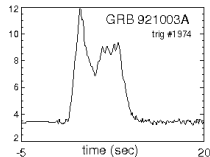
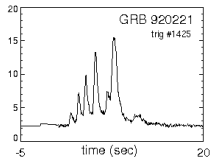
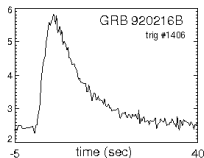
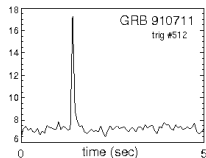
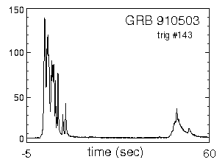
#### ABSTRACT

Sixteen short bursts of photons in the energy range 0.2–1.5 MeV have been observed between 1969 July and 1972 July using widely separated spacecraft. Burst durations ranged from less than 0.1 s to  $\sim 30$  s, and time-integrated flux densities from  $\sim 10^{-5}$  ergs  $\text{cm}^{-2}$  to  $\sim 2 \times 10^{-4}$  ergs  $\text{cm}^{-2}$  in the energy range given. Significant time structure within bursts was observed. Directional information eliminates the Earth and Sun as sources.

v průměru 3krát za den

(Zdroj: Compton Gamma-Ray satellite)





- BATSE světelné křivky  
GRB: velká rozmanitost

- 'Multimessengers'

- **3 detekce za den,**  
pro srovnání - supernovy  
( $\approx 1$  za století v MW) -  
1 detekce za sekundu

# Přehled teorií v období 1973 - 1993

| GRB     | Peak time<br>UTC | $T_{00}$<br>[s]  | $\delta_{\text{res}}$ | Hardness ratio<br>$\log H$ | GRB     | Peak time<br>UTC | $T_{00}$<br>[s]  | $\delta_{\text{res}}$ | Hardness ratio<br>$\log H$ |
|---------|------------------|------------------|-----------------------|----------------------------|---------|------------------|------------------|-----------------------|----------------------------|
| 030922A | 08:43:35.950     | (2.28 ± 0.08)E+1 | 3.0E-1                | −(1.07 ± 0.30)E-1          | 040611  | 13:36:00.600     | (1.80 ± 0.10)E+1 | 4.0E-1                | (2.02 ± 0.44)E-1           |
| 030922B | 18:30:56.900     | (1.08 ± 0.03)E+1 | 2.0E-1                | (4.63 ± 1.41)E-2           | 040619  | 15:15:52.250     | (7.70 ± 0.27)E+1 | 1.0E-1                | −(1.74 ± 0.28)E-1          |
| 030926  | 16:52:28.290     | (2.80 ± 0.31)E-1 | 2.0E-2                | (2.89 ± 0.77)E-1           | 040701  | 22:46:45.250     | (9.60 ± 0.69)E+0 | 3.0E-1                | (9.16 ± 5.34)E-2           |
| 031005  | 08:21:50.250     | (1.60 ± 0.18)E+1 | 5.0E-1                | −(4.44 ± 1.19)E-1          | 040718  | 01:16:31.250     | (7.50 ± 0.65)E+0 | 1.0E-1                | −(1.77 ± 0.73)E-1          |
| 031019  | 22:00:57.175     | (7.50 ± 0.17)E+0 | 1.5E-1                | (2.48 ± 0.70)E-1           | 040723  | 04:06:38.150     | (1.02 ± 0.04)E+1 | 1.0E-1                | −(1.51 ± 0.27)E-1          |
| 031024  | 09:24:14.350     | (4.00 ± 0.32)E+0 | 1.0E-1                | (1.77 ± 0.58)E-1           | 040731  | 10:24:42.750     | (2.45 ± 0.07)E+1 | 5.0E-1                | (1.23 ± 0.18)E-1           |
| 031027  | 17:07:50.250     | (3.90 ± 0.07)E+1 | 5.0E-1                | −(1.03 ± 0.10)E-1          | 040803  | 15:08:57.750     | (1.14 ± 0.11)E+2 | 1.5E+0                | −(3.95 ± 1.05)E-1          |
| 031107  | 18:24:07.400     | (1.92 ± 0.06)E+1 | 4.0E-1                | (1.02 ± 2.13)E-2           | 040810  | 14:12:42.650     | (1.92 ± 0.05)E+1 | 3.0E-1                | −(7.96 ± 1.96)E-2          |
| 031108  | 14:11:19.250     | (2.75 ± 0.07)E+1 | 5.0E-1                | (1.67 ± 0.16)E-1           | 040815  | 01:29:04.250     | (8.00 ± 0.33)E+0 | 1.0E-1                | (4.57 ± 0.42)E-1           |
| 031111  | 16:45:20.920     | (3.20 ± 0.08)E+0 | 8.0E-2                | (1.50 ± 0.08)E-1           | 040823  | 21:21:55.125     | (1.38 ± 0.14)E+0 | 3.0E-2                | (2.05 ± 0.83)E-1           |
| 031118  | 06:26:16.410     | (2.60 ± 0.27)E-1 | 2.0E-2                | (2.01 ± 0.57)E-1           | 040824  | 05:16:07.500     | (4.90 ± 0.50)E+1 | 1.0E+0                | −(4.90 ± 7.92)E-2          |
| 031120  | 05:52:38.250     | (9.75 ± 0.30)E-1 | 1.5E+0                | (4.24 ± 2.27)E-2           | 040921  | 16:06:20.265     | (2.80 ± 0.73)E-1 | 7.0E-2                | (1.88 ± 0.64)E-1           |
| 031127  | 18:58:55.050     | (1.92 ± 0.17)E+1 | 3.0E-1                | −(2.88 ± 0.83)E-1          | 040925  | 22:28:59.750     | (4.75 ± 0.16)E+1 | 5.0E-1                | (6.66 ± 2.68)E-2           |
| 031130  | 02:04:53.775     | (4.65 ± 0.29)E+0 | 1.5E-1                | (5.52 ± 0.44)E-2           | 040926  | 04:03:18.100     | (7.60 ± 0.22)E+0 | 2.0E-1                | (1.93 ± 0.11)E-1           |
| 031214  | 22:50:44.150     | (8.30 ± 1.01)E+0 | 4.0E-1                | −(6.98 ± 9.55)E-2          | 041003  | 09:17:56.250     | (9.00 ± 0.74)E+0 | 5.0E-1                | −(1.16 ± 0.52)E-1          |
| 031218  | 06:28:09.370     | (2.20 ± 0.24)E-1 | 2.0E-2                | (1.46 ± 0.51)E-1           | 041006  | 12:18:40.350     | (1.11 ± 0.08)E+1 | 3.0E-1                | −(4.71 ± 0.80)E-1          |
| 031219  | 05:39:05.850     | (7.50 ± 0.21)E+0 | 1.0E-1                | −(1.21 ± 0.21)E-1          | 041007  | 02:02:08.350     | (2.00 ± 0.13)E+1 | 1.0E-1                | (3.52 ± 0.37)E-1           |
| 031226A | 15:43:08.750     | (3.45 ± 0.29)E+1 | 5.0E-1                | −(4.63 ± 1.03)E-1          | 041009  | 06:38:21.250     | (7.50 ± 0.76)E+0 | 3.0E-1                | −(8.60 ± 7.65)E-2          |
| 031226B | 15:31:29.750     | (4.40 ± 0.23)E+1 | 5.0E-1                | −(5.74 ± 4.22)E-2          | 041010  | 02:50:10.22E-1   | (1.50 ± 0.04)E+1 | 1.0E-1                | (1.50 ± 0.04)E+1           |
| 040102  | 19:35:26.975     | (7.80 ± 0.83)E+0 | 1.5E-1                | −(4.43 ± 1.15)E-1          | 041012  | 12:40:51.250     | (4.60 ± 0.53)E+1 | 1.0E+0                | −(3.90 ± 1.16)E-1          |
| 040108  | 07:46:39.900     | (3.30 ± 0.37)E+1 | 6.0E-1                | −(2.64 ± 1.03)E-1          | 041013A | 02:35:25.000     | (1.84 ± 0.09)E+2 | 2.0E+0                | (1.27 ± 3.84)E-2           |
| 040113  | 01:36:46.350     | (1.62 ± 0.10)E+1 | 3.0E-1                | −(4.60 ± 5.01)E-2          | 041013B | 22:56:27.865     | (3.60 ± 0.46)E-1 | 3.0E-2                | (6.92 ± 7.69)E-2           |
| 040115  | 18:30:11.550     | (2.19 ± 0.24)E+1 | 3.0E-1                | −(2.40 ± 0.94)E-1          | 041015  | 10:22:18.950     | (3.90 ± 0.29)E+0 | 1.0E-1                | −(1.82 ± 0.60)E-1          |
| 040125  | 22:14:47.100     | (1.40 ± 0.23)E+1 | 2.0E-1                | −(1.67 ± 1.16)E-1          | 041016  | 04:39:37.000     | (1.80 ± 0.17)E+1 | 1.0E-1                | −(1.90 ± 0.84)E-1          |
| 040205A | 05:19:47.350     | (3.90 ± 0.62)E+0 | 4.0E-1                | −(2.06 ± 1.20)E-1          | 041018  | 13:38:00.950     | (1.02 ± 0.10)E+2 | 1.0E+0                | −(3.19 ± 3.19)E-2          |
| 040205B | 09:27:45.750     | (2.65 ± 0.33)E+1 | 5.0E-1                | (2.19 ± 0.98)E-1           | 041101  | 01:49:36.150     | (3.20 ± 0.34)E+0 | 1.0E-1                | (2.28 ± 0.85)E-1           |
| 040207  | 22:12:22.600     | (2.44 ± 0.06)E+1 | 4.0E-1                | (1.07 ± 0.17)E-1           | 041102  | 11:12:23.750     | (2.70 ± 0.22)E+0 | 1.0E-1                | (1.69 ± 0.60)E-1           |
| 040211  | 15:02:08.050     | (3.70 ± 0.52)E+0 | 1.0E-1                | −(2.61 ± 1.25)E-1          | 041107  | 15:49:29.250     | (4.70 ± 0.45)E+1 | 5.0E-1                | −(6.04 ± 7.68)E-2          |
| 040215  | 00:26:02.500     | (5.00 ± 0.29)E+1 | 1.0E+0                | −(3.57 ± 0.57)E-1          | 041116  | 05:34:56.500     | (5.00 ± 0.53)E+1 | 1.0E+0                | −(3.38 ± 1.06)E-1          |
| 040220  | 00:55:15.800     | (1.72 ± 0.09)E+1 | 5.0E-1                | (1.51 ± 0.46)E-1           | 041117  | 15:18:00.950     | (1.62 ± 0.05)E+1 | 3.0E-1                | −(1.81 ± 0.24)E-1          |
| 040225A | 05:30:53.850     | (1.05 ± 0.11)E+1 | 3.0E-1                | −(8.84 ± 8.12)E-2          | 041120  | 19:23:41.300     | (8.60 ± 0.42)E+0 | 2.0E-1                | −(3.20 ± 0.44)E-1          |
| 040225B | 10:02:12.200     | (1.40 ± 0.16)E+1 | 4.0E-1                | −(3.12 ± 1.10)E-1          | 041125  | 16:07:27.400     | (2.52 ± 0.04)E+1 | 4.0E-1                | −(2.34 ± 0.06)E-1          |
| 040228  | 00:09:08.500     | (2.73 ± 0.02)E+2 | 2.0E-1                | −(1.58 ± 0.07)E-1          | 041202  | 02:30:57.300     | (1.66 ± 0.03)E+1 | 2.0E-1                | (1.14 ± 0.12)E-1           |
| 040302A | 04:14:38.250     | (2.37 ± 0.23)E+1 | 3.0E-1                | −(2.26 ± 0.54)E-1          | 041203  | 07:49:56.450     | (1.60 ± 0.08)E+1 | 1.0E-1                | −(1.52 ± 0.21)E-1          |
| 040302B | 12:24:03.900     | (1.08 ± 0.02)E+2 | 2.0E-1                | −(7.71 ± 0.64)E-2          | 041211B | 11:31:53.400     | (2.00 ± 0.09)E+1 | 4.0E-1                | (8.20 ± 3.31)E-2           |
| 040303  | 15:32:37.750     | (2.97 ± 0.27)E+1 | 3.0E-1                | −(1.52 ± 0.76)E-1          | 041211C | 23:57:42.925     | (6.15 ± 0.16)E+0 | 1.5E-1                | (4.46 ± 0.07)E-1           |
| 040310  | 00:02:36.550     | (1.60 ± 0.22)E-1 | 2.0E-2                | (2.13 ± 0.48)E-1           | 041213  | 06:59:36.330     | (1.40 ± 0.24)E-1 | 2.0E-2                | (3.19 ± 0.82)E-1           |
| 040316  | 18:16:14.150     | (1.50 ± 0.02)E+1 | 1.0E-1                | −(4.87 ± 1.30)E-2          | 041218  | 15:45:50.500     | (1.10 ± 0.57)E+1 | 1.0E+0                | −(2.22 ± 0.98)E-1          |
| 040323  | 13:03:04.750     | (1.89 ± 0.19)E+1 | 3.0E-1                | −(2.92 ± 0.94)E-1          | 041219  | 01:42:19.400     | (0.80 ± 0.11)E+1 | 1.0E-1                | −(1.32 ± 0.47)E-1          |
| 040324  | 20:12:11.908     | (2.55 ± 0.17)E-1 | 1.5E-2                | (2.54 ± 0.26)E-1           | 041223  | 14:06:42.250     | (4.05 ± 0.11)E+1 | 5.0E-1                | (8.55 ± 2.11)E-2           |
| 040327  | 16:19:27.500     | (2.00 ± 0.32)E+1 | 1.0E+0                | −(4.06 ± 1.54)E-1          | 041224  | 20:20:58.250     | (3.85 ± 0.58)E+1 | 5.0E-1                | −(3.21 ± 1.42)E-1          |
| 040329  | 11:10:51.965     | (2.07 ± 0.04)E+2 | 3.0E-2                | (3.06 ± 0.12)E-1           | 041231  | 21:50:48.050     | (1.00 ± 0.12)E+0 | 1.0E-1                | (3.20 ± 0.56)E-1           |
| 040330  | 13:14:42.150     | (2.88 ± 0.41)E+1 | 3.0E-1                | (0.04 ± 1.09)E-1           | 050124  | 11:30:03.250     | (2.80 ± 0.38)E+0 | 1.0E-1                | −(2.24 ± 1.12)E-1          |
| 040344  | 06:58:52.150     | (4.90 ± 0.35)E+0 | 1.0E-1                | −(1.38 ± 0.60)E-1          | 050127  | 19:07:37.700     | (3.30 ± 0.10)E+1 | 6.0E-1                | −(1.71 ± 0.22)E-1          |
| 040413  | 13:09:56.490     | (2.80 ± 0.31)E-1 | 2.0E-2                | (1.12 ± 0.68)E-1           | 050203  | 17:22:00.850     | (2.80 ± 0.24)E+0 | 1.0E-1                | −(0.85 ± 4.62)E-2          |
| 040414  | 11:09:22.500     | (7.70 ± 0.24)E+1 | 1.0E+0                | −(1.63 ± 2.36)E-2          | 050213  | 19:24:04.750     | (1.70 ± 0.09)E+1 | 5.0E-1                | (2.43 ± 0.37)E-1           |
| 040421  | 02:30:27.300     | (1.14 ± 0.02)E+1 | 2.0E-1                | (2.73 ± 0.08)E-1           | 050214  | 11:38:33.500     | (4.00 ± 0.66)E+1 | 1.0E+0                | −(0.16 ± 1.23)E-1          |
| 040423  | 02:23:30.350     | (4.20 ± 0.53)E+0 | 3.0E-1                | −(1.16 ± 0.87)E-1          | 050216  | 07:56:54.275     | (5.00 ± 0.72)E+1 | 5.0E-2                | (5.66 ± 1.00)E-1           |
| 040425  | 16:23:34.275     | (8.10 ± 0.19)E+0 | 5.0E-2                | (1.08 ± 0.28)E-1           | 050219  | 21:05:51.650     | (9.40 ± 0.17)E+1 | 5.0E-1                | −(0.01 ± 0.55)E-1          |
| 040427  | 20:12:37.700     | (8.00 ± 0.77)E+0 | 2.0E-1                | −(4.55 ± 7.43)E-2          | 050311  | 17:06:58.850     | (2.40 ± 0.44)E+0 | 3.0E-1                | −(1.44 ± 1.09)E-1          |
| 040429  | 10:53:04.400     | (2.52 ± 0.19)E+1 | 4.0E-1                | (2.85 ± 6.00)E-2           | 050312  | 05:40:13.575     | (1.50 ± 0.51)E-1 | 5.0E-2                | (3.35 ± 0.82)E-1           |
| 040502A | 06:37:06.900     | (1.86 ± 0.04)E+1 | 2.0E-1                | −(2.97 ± 0.22)E-1          | 050314  | 08:33:08.900     | (8.00 ± 0.35)E+0 | 2.0E-1                | −(4.77 ± 0.45)E-1          |
| 040502B | 13:30:02.500     | (1.66 ± 0.07)E+2 | 1.0E+0                | −(2.32 ± 0.39)E-1          | 050320  | 08:04:26.900     | (1.54 ± 0.13)E+1 | 2.0E-1                | (5.51 ± 5.52)E-2           |
| 040506  | 23:45:18.800     | (6.56 ± 0.42)E-1 | 8.0E-1                | (1.05 ± 0.26)E-1           | 050321  | 22:11:51.500     | (2.70 ± 0.76)E+0 | 2.0E-1                | (2.21 ± 0.41)E-2           |
| 040508  | 10:15:44.750     | (4.05 ± 0.56)E+1 | 5.0E-1                | −(0.95 ± 1.08)E-1          | 050326  | 09:53:56.500     | (2.70 ± 0.11)E+1 | 2.0E-1                | −(2.54 ± 0.36)E-1          |
| 040510  | 09:59:37.300     | (6.00 ± 0.57)E+0 | 2.0E-1                | −(2.87 ± 0.83)E-1          | 050328  | 03:25:14.875     | (4.50 ± 0.51)E-1 | 5.0E-2                | −(1.02 ± 0.20)E-1          |
| 040513  | 03:02:17.500     | (5.30 ± 0.83)E-1 | 1.0E+0                | −(0.78 ± 1.20)E-1          | 050404  | 17:27:48.500     | (1.14 ± 0.03)E+1 | 2.0E-1                | (1.03 ± 0.18)E-1           |
| 040526  | 20:21:13.350     | (1.29 ± 0.19)E+1 | 3.0E-1                | −(4.19 ± 1.53)E-1          | 050409  | 01:18:36.050     | (1.26 ± 0.05)E+0 | 2.0E-2                | (3.05 ± 0.30)E-1           |
| 040528  | 16:55:58.150     | (2.16 ± 0.07)E+1 | 3.0E-1                | −(4.75 ± 0.26)E-1          | 050411  | 21:51:09.500     | (6.80 ± 0.69)E+0 | 2.0E-1                | (1.18 ± 0.80)E-1           |
| 040531  | 23:13:04.750     | (4.20 ± 0.31)E+1 | 3.0E-1                | −(4.73 ± 0.91)E-1          | 050412  | 18:58:45.900     | (1.94 ± 0.08)E+1 | 2.0E-1                | −(5.03 ± 0.51)E-1          |
| 040601  | 06:33:24.625     | (2.73 ± 0.29)E+1 | 2.5E-1                | (5.10 ± 8.45)E-2           | 050429  | 14:09:50.900     | (1.94 ± 0.15)E+1 | 2.0E-1                | (1.35 ± 0.63)E-1           |
| 040603A | 15:40:58.700     | (1.24 ± 0.13)E+1 | 2.0E-1                | −(1.42 ± 0.84)E-1          | 050430  | 09:13:09.100     | (1.42 ± 0.17)E+1 | 2.0E-1                | (0.20 ± 9.23)E-2           |
| 040603B | 19:15:38.500     | (7.50 ± 1.00)E+1 | 3.0E+0                | −(5.04 ± 1.49)E-1          | 050501  | 08:19:38.825     | (2.40 ± 0.19)E+0 | 1.5E-1                | (7.81 ± 4.03)E-2           |
| 040605A | 04:31:44.500     | (5.80 ± 0.72)E+1 | 2.0E-1                | (3.25 ± 0.44)E-1           | 050502  | 19:56:57.575     | (1.60 ± 0.20)E+1 | 5.0E-2                | (1.22 ± 0.04)E-1           |
| 040605B | 18:46:16.390     | (1.80 ± 0.22)E-1 | 2.0E-2                | (2.33 ± 0.48)E-1           | 050509  | 09:31:26.700     | (2.00 ± 0.04)E+1 | 2.0E-1                | −(6.35 ± 1.57)E-2          |
| 040605C | 23:58:45.800     | (1.68 ± 0.08)E+1 | 4.0E-1                | −(4.30 ± 0.50)E-1          | 050516  | 12:58:05.200     | (7.60 ± 1.16)E+0 | 4.0E-1                | (1.16 ± 1.11)E-1           |

méně než 100 GRB událostí, 135 teorií!

krátké trvání & extrémní energie:

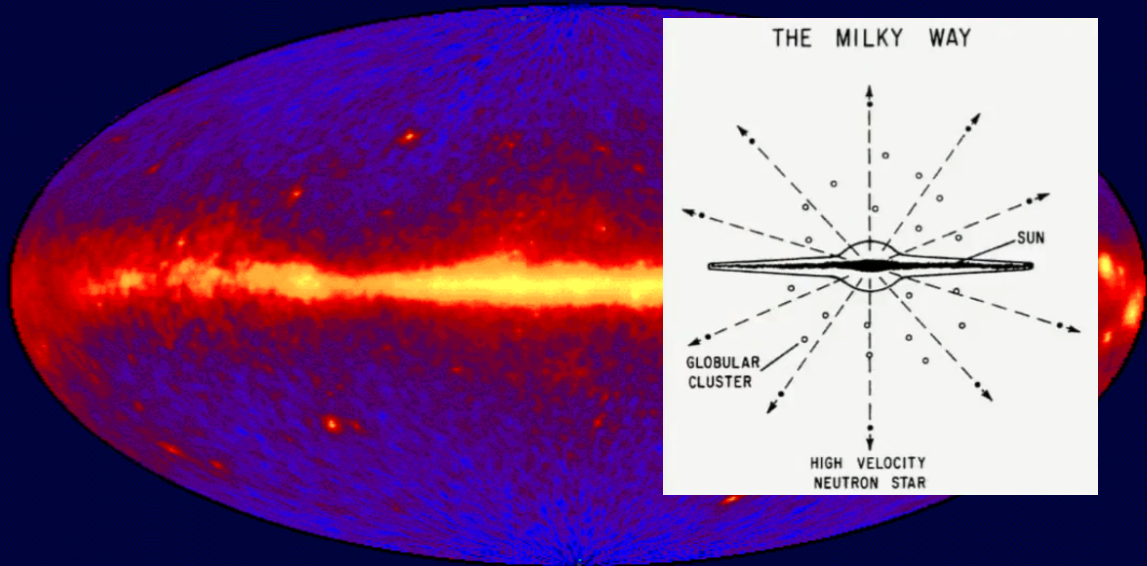
- nový druh explodujících hvězd?
- obří výtrysky z velmi vzdálených hvězd?
- anihilace hmoty s antihmotou?
- srážky černých děr?
- ... mezihvězdné války?

**Problém:** nejistota ve vzdálenosti - je rovná „velikosti“ vesmíru?

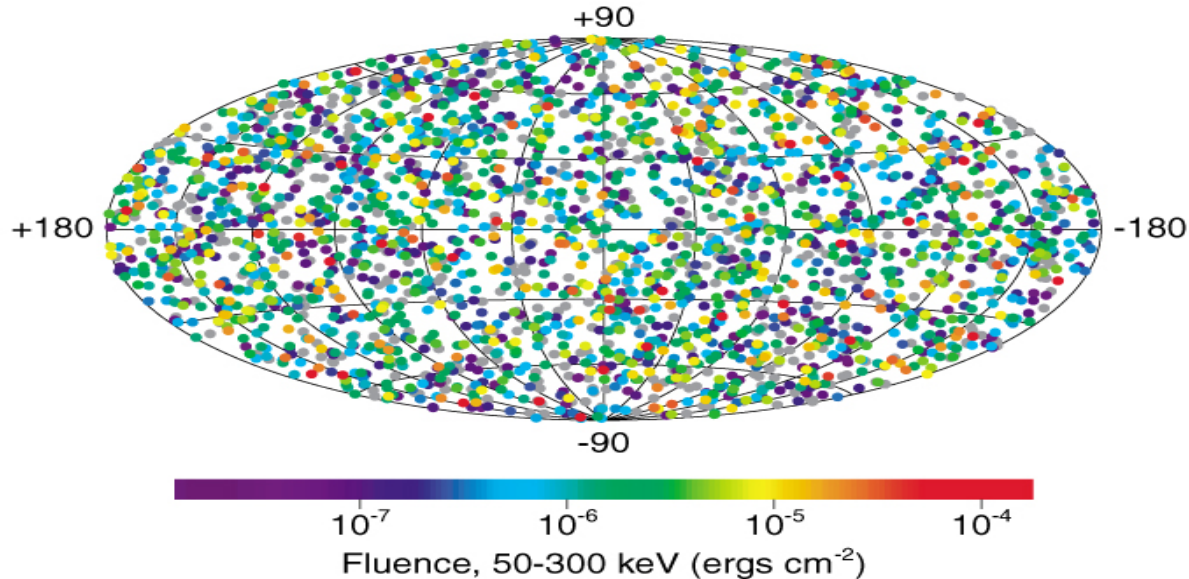
**Compton Gamma-ray Observatory (1991)**



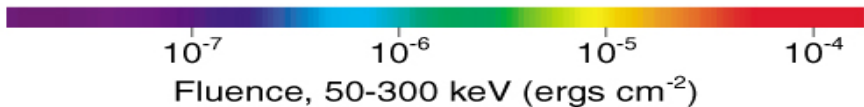
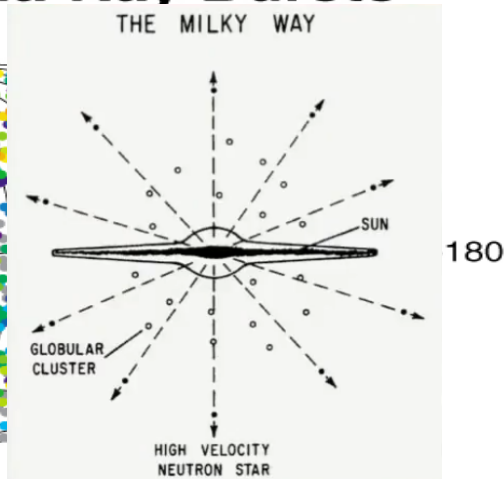
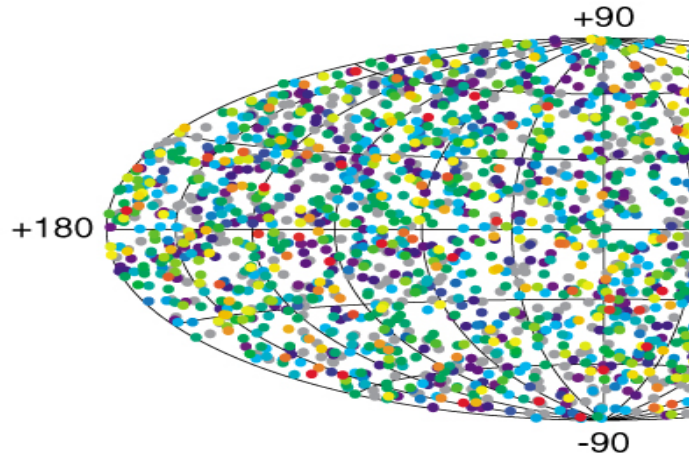
# EGRET All-Sky Map Above 100 MeV



# 2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



# 2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



# „Velká debata“ (1995)

Velká debata Shapley - Curtis (1920)  
o celkové velikosti vesmíru



„Vzdálenost ke GRB objektům“

Galaktická

kosmologická

Don Lamb



Bogdan Paczyński



# Objev dosvitů (afterglows)

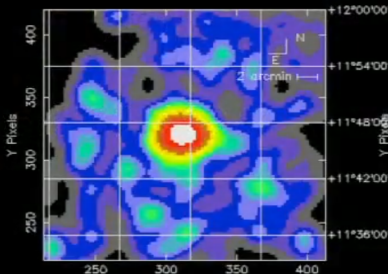


BeppoSAX

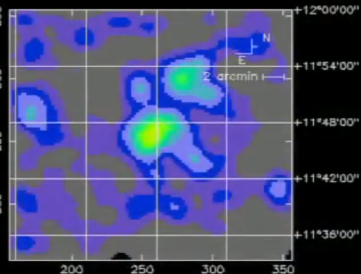
100krát vyšší rozlišení než  
*Compton*,

doba doručení signálu  $\sim$  hodiny

Feb 28, 1997

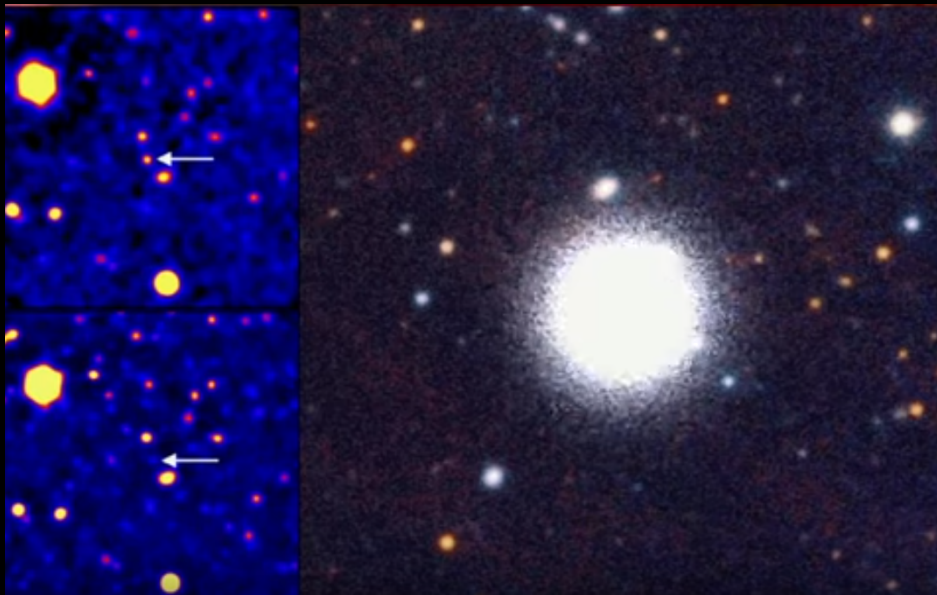


Mar 3, 1997

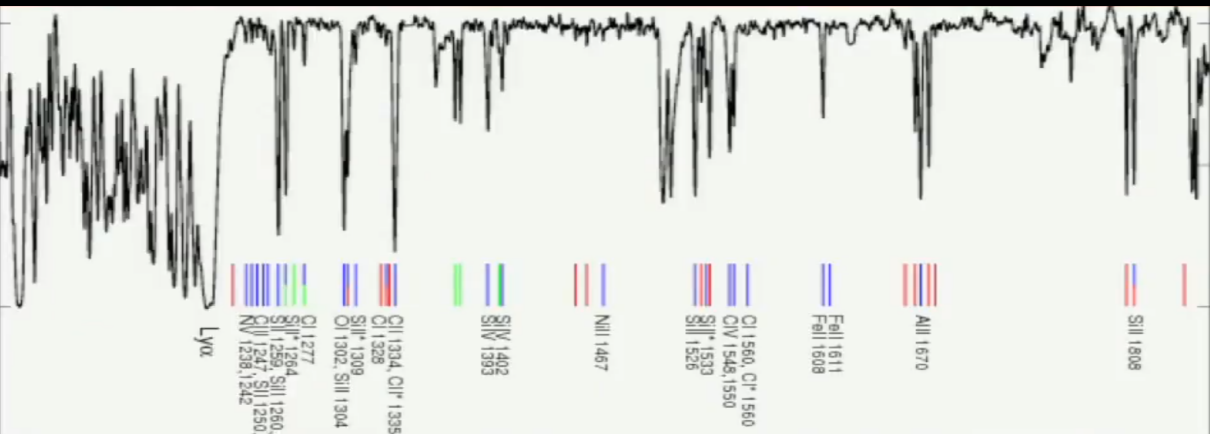




# Objev dosvitů - viditelné světlo



# GRB přicházejí z „konce“ vesmíru



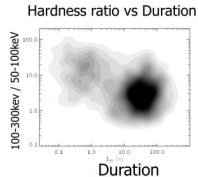
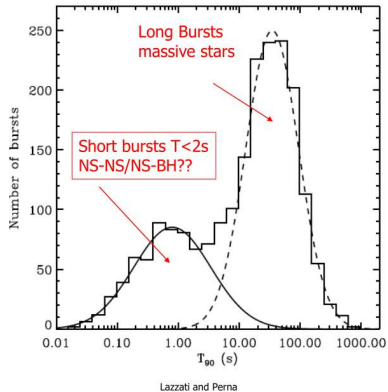
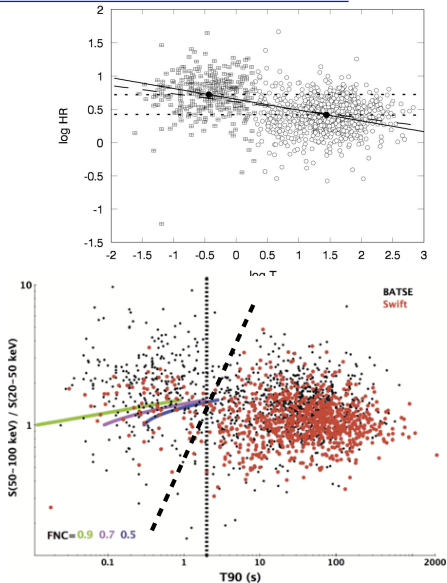
12,1 miliardy světelných let daleko !

Energie GRB = kompletní přeměna Slunce na energii ( $E = M_{\odot}c^2 \approx 10^{54}$  erg)

# GRB: nejjasnější elmag jevy

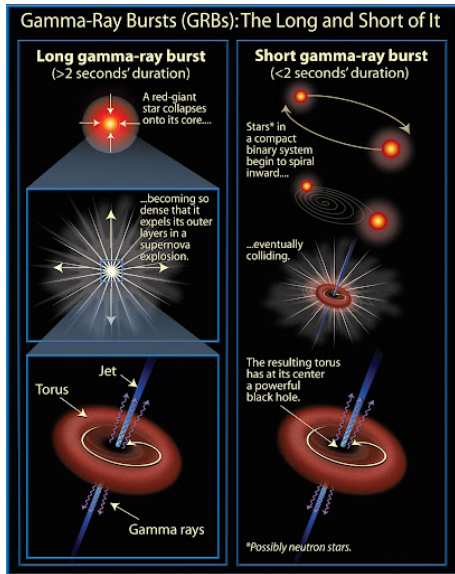
## Krátké & dlouhé GRB

### GRB duration distribution



Mazets et al. 1981, Norris et al. 1984, Kouveliotou et al. 1993

## GRB: nejjasnější elmag jevy



## Krátké & dlouhé GRB

různé typy progenitorů

< 2 s

ultra  
dlouhé?

krátké GRB

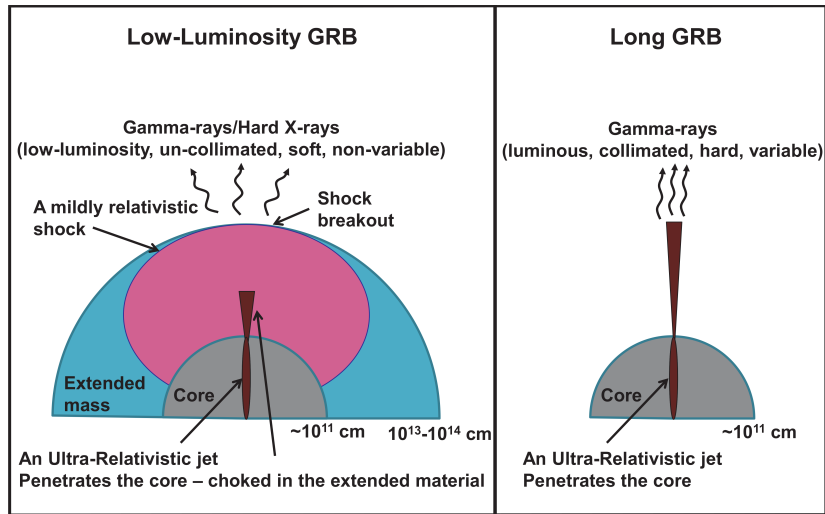
dlouhé GRB

různé fyzikální mechanismy

méně zářivé  
krátké GRB →  
„mírné“ svě-  
telné křivky &  
odlišný spekt-  
rální vývoj

méně zářivé  
dlouhé GRB  
→ „mírnější  
a hladší“ svě-  
telné křivky

## GRB: nejjasnější elmag jevy



## Dlouhé GRB & méně zářivé dlouhé GRB

Nezbytná podmínka pro GRB: „pracovní doba“ „motoru“ je dostatečně dlouhá na to, aby výtrysk (jet) prorazil obálku hvězdy.

(Zdroj: Nakar+ 2015, Lazzati+ 2012, del Colle+ 2018, atd.)

## GRB: nejjasnější elmag jevy

- 🔵 **Čas vs. energie**  $\Rightarrow$  kompaktní objekt  $\Rightarrow$  BH nebo NS
- 🔵 **Rozměr „motoru“ GRB:**  $\lesssim 10^6$  cm
- 🔵 **Hustota energie:**  $\sim 10^{33}$  erg cm $^{-3}$   $\Leftrightarrow$  mass density  $\sim 10^{13}$  g cm $^{-3}$
- 🔵 **Teplota:**  $\sim 10^{11}$  K  $\rightarrow$  mnohem vyšší než teplotní práh pro produkci párů  $e^+e^- \Rightarrow$  téměř stejný počet fotonů a párů
- 🔵 Plazma dominováno páry nebo Poyntingův tok (Poynting flux)?
- 🔵  $\Rightarrow$  **BH s akrečním diskem?**
- 🔵  $\Rightarrow$  **Magnetar?**
- 🔵 Indikace pro model „kolapsaru“  $\rightarrow$  několik dlouhých GRB detekováno v roce 1997 v galaxiích s tvorbou hvězd (star-forming galaxie)
- 🔵 Krátké GRB pozorujeme ve všech typech galaxií

## Problém „kompaktnosti“:

- 🔵 **Energie:**  $\sim 10^{51}$  erg
- 🔵 **Časová proměnnost:**  $\delta t \cong 0.1$  s (or less!)
- 🔵 Stanovme **rozsah emitující oblasti:**  $R \leq c \delta t \lesssim 3 \times 10^9 \text{ cm} \approx 10^{10} \text{ cm}$
- 🔵 Pozorujeme **fotony s energií**  $\sim 300 \text{ keV} - 1 \text{ MeV}$ , s **vysokoenergetickým okrajem daleko vyšším** ( $1 \text{ MeV} \approx 10^{-6} \text{ erg}$ )  
 $\Downarrow$
- 🔵 Nyní odhadněme **# hustotu fotonů uvnitř zdroje záření** jako  
 $\sim E/R^3 \rightarrow 10^{51+6}/(10^{10})^3 \approx 10^{27} \text{ fotonů cm}^{-3}$
- 🔵 **Účinný průřez** pro  $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$  je řádově  $\sigma_T \sim 10^{-24} \text{ cm}^2$
- 🔵 **Optická hloubka**  $\tau_{\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-} \sim n_e \sigma_T R \cong 10^{27} \times 10^{-24} \times 10^{10} \approx 10^{13}$
- 🔵 To znamená: **optická hloubka** při které by tyto fotony měly uniknout z této „ohnivé koule“ **by byla**  $10^{13}$  (spíš ještě víc)  $\rightarrow$  **nemohou volně uniknout**
- 🔵 To znamená: the **spektrum** by muselo být **termální!**

## Problém „kompaktnosti“:

- 🔵 **Ale:** pozorujeme jasně **netermální spektrum** (synchrotronové)!
- 🔵 Potřebujeme „novou“ fyziku pro vysvětlení? Ano, ovšem tato „nová fyzika“ byla vytvořena v roce 1905: **speciální relativita!**
- 🔵  $E_{\text{ph}}$  (pozorovaná) =  $\Gamma E_{\text{ph}}$  (emitovaná),  $R \leq \Gamma^2 c \delta t$  (vysvětlení později)
- 🔵 Integrované mocninné „power law“ energiové spektrum  $dn(\epsilon)/d\epsilon \sim \epsilon^{-\alpha}$  redukuje # fotonů  $N_{\text{ph}}$  nad prahem pro  $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$  párovou produkci podle  $\epsilon^{-\alpha+1} = \Gamma^{-2\alpha+2} \Rightarrow \tau_{\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-} \sim \frac{N_{\text{ph}}}{R^3} \sigma_t R$
- 🔵 V tom případě: **optická hloubka** bude transformována jako

$$\tau_{\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-} \sim \Gamma^{-(2+2\alpha)} n_e \sigma_t R \approx 10^{13} / \Gamma^{2+2\alpha}$$

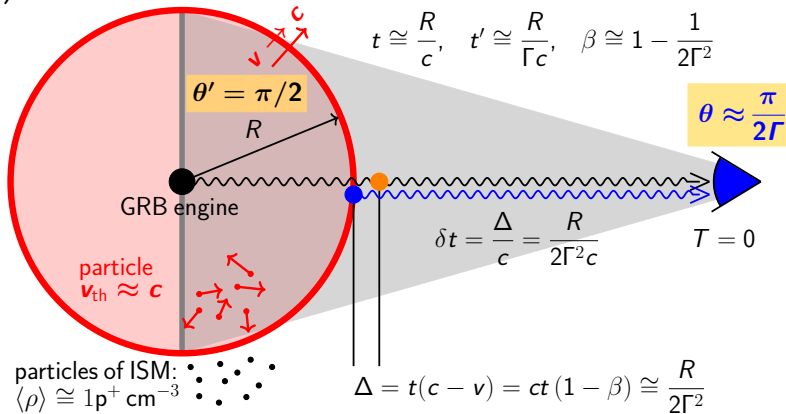
- 🔵 Index mocniny (exponent)  $\alpha \sim 2 \rightarrow \Gamma \gtrsim 100 - 150$  **řeší tuto záhadu!**
- 🔵 Existence **jetů** s vysokým  $\Gamma$  (s velkým relativistickým „beaming efektem“) **vysvětluje**  $E \gtrsim 10^{52} \text{ erg}$
- 🔵 **“Beaming” efekt:** pokud jsou fotony emitovány (v soustavě emitoru)  $\mathcal{K}'$  izotropně **pro pozorovatele  $\mathcal{K}$  bude polovina uvnitř sférického polovičního úhlu  $1/\Gamma$**



## Relativistické efekty:

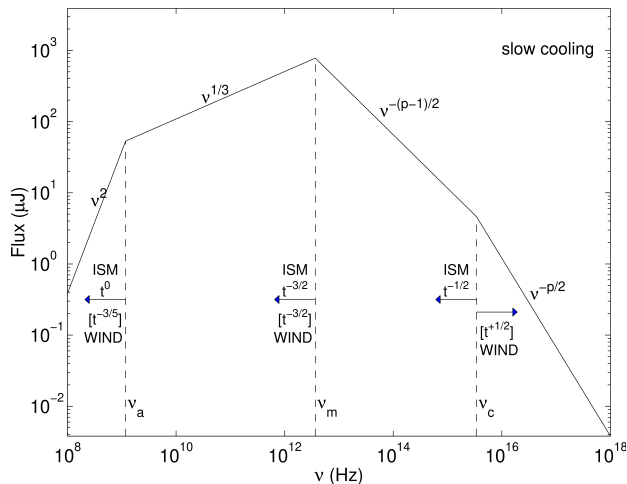
🔍 Nyní: jaká je (ultra)relativistická analogie pro  $v_{\text{shock}} \rightarrow c$ ?

🔍 Sférická rázová vlna v čase  $t$  (v soustavě pozorovatele) s poloměrem  $R$  a expanzní rychlostí  $v =$  (téměř)  $c$ :



## Synchrotronové spektrum:

- Širokopásmové synchrotronové spektrum dosvitů GRB ze sférického zdroje s konstantní hustotou (model „ISM“) a s hustotou  $\rho \propto r^{-2}$  (model „wind“):

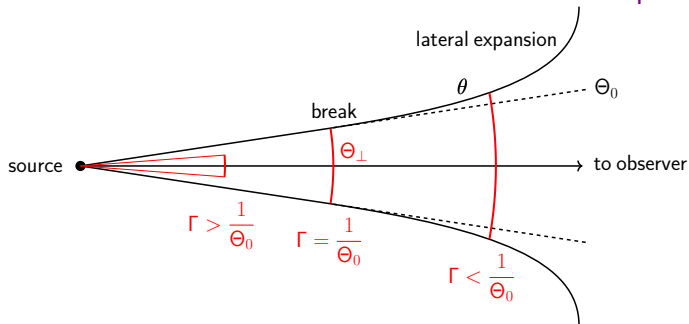


Příklad  
pozorovaného  
spektra několik dní  
po GRB

Zdroj: Kulkarni+ 2000

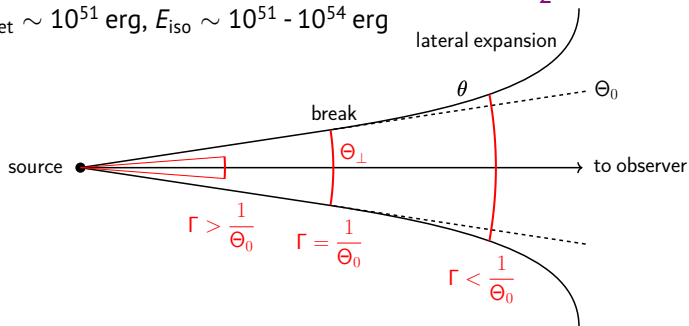
## GRB: nejjasnější elmag jevy:

- Co když expanze nebude sférická → pouze jet s počátečním úhlem rozevření  $\Theta_0$ :
- Pokud  $\Gamma \gg 1$  → střed (osa) jetu „neví“ o okrajích; pouze omezené množství materiálu „cítí“ prázdný prostor vně jetu
- Časová škála expanze jetu v lokální soustavě:  $t = R/\Gamma c$
- Délka letu fotonu z okrajů jetu do jeho středu:  $R_{\perp} = ct = \frac{R}{\Gamma}$  (kauzální spojení)



## GRB: nejjasnější elmag jevy:

- Co když expanze nebude sférická  $\rightarrow$  pouze jet s počátečním úhlem rozevření  $\Theta_0$ :
- Odpovídající „příletový úhel“:  $\Theta_{\perp} = \frac{R_{\perp}}{R} = \frac{1}{\Gamma}$ ; pokud  $\Theta_{\perp} \geq \Theta_0 \rightarrow$  celý jet začne „vnímat“ okraje  $\rightarrow$  rozšíří se a urychlí se jeho zpomalování; okamžik kdy se to stane  $\approx 6 \text{ hrs } (E_{52}/\rho [\text{p}^+ \text{ cm}^{-3}])^{1/3} \Theta_0^{8/3}$ , ( $\Theta_0$  mezi 1 - 10 stupni)
- Energie sférické exploze  $E_{\text{iso}}$ , energie jetu  $E_{\text{jet}} = \frac{\Theta_0^2}{2} E_{\text{iso}}$ , kanonické hodnoty:  
 $E_{\text{jet}} \sim 10^{51} \text{ erg}$ ,  $E_{\text{iso}} \sim 10^{51} - 10^{54} \text{ erg}$



## Splývající NS: krátký GRB



## Splývající NS: krátký GRB



## Krátké GRB: splynutí neutronových hvězd



**Pokud jsou krátké GRB produ-  
kované splynutím NS →**

**očekáváme jejich výskyt tam  
kde „žijí“ staré hvězdy**



**„Mrtvé“ eliptické galaxie**

# Hypernova (kolapsar): dlouhé GRB



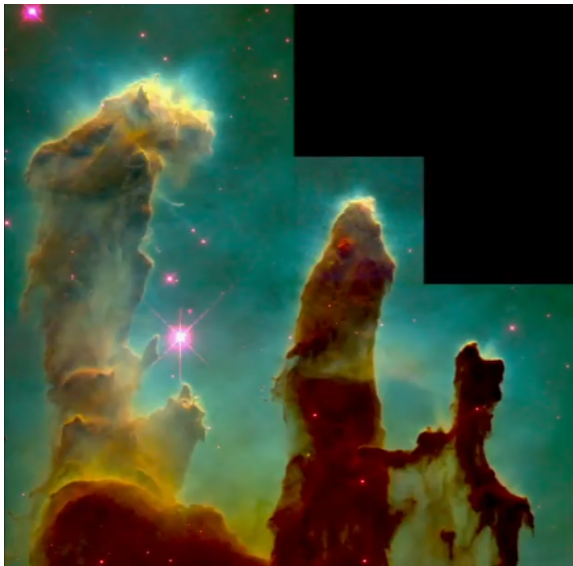
Zdroj: Ore Gottlieb 2020



# Hypernova (kolapsar): dlouhé GRB



## Dlouhé GRB: „explodující“ velmi hmotné hvězdy



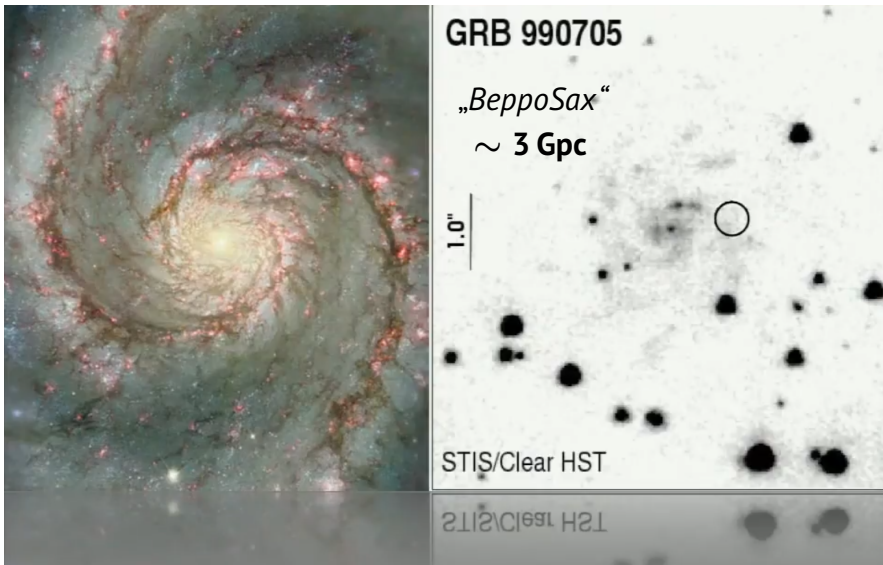
Pokud jsou dlouhé GRB produkovány nejhmotnějšími hvězdami ve vesmíru →

očekáváme jejich výskyt tam kde „žijí“ nejhmotnější hvězdy



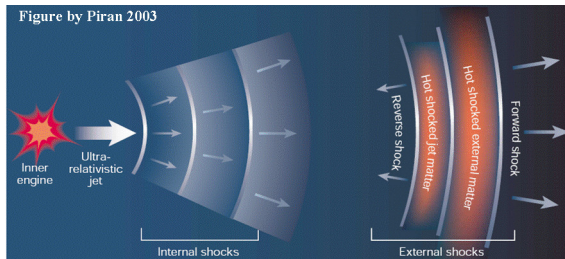
„Hvězdné porodnice“

## Odkud přicházejí dlouhé GRB ?



## Struktura GRB jetu:

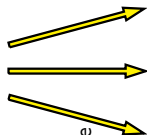
zdroj GRB



Central  
engine

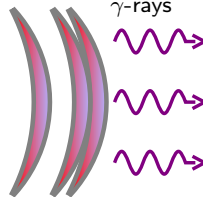


$10^6$  cm



photosphere  
 $\leq 10^{12}$  cm

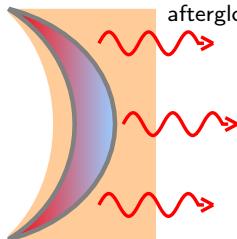
Inner  
shocks



internal dissipation  
 $10^{13}-10^{15}$  cm

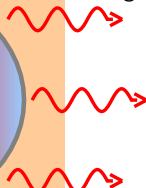


Outer  
shocks



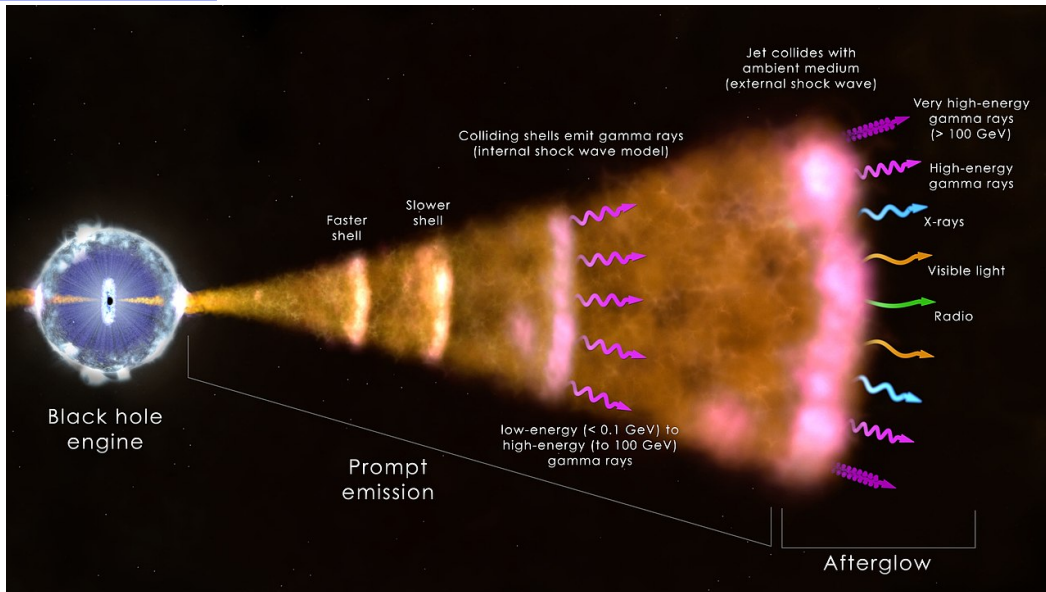
$10^{16}-10^{18}$  cm

afterglows

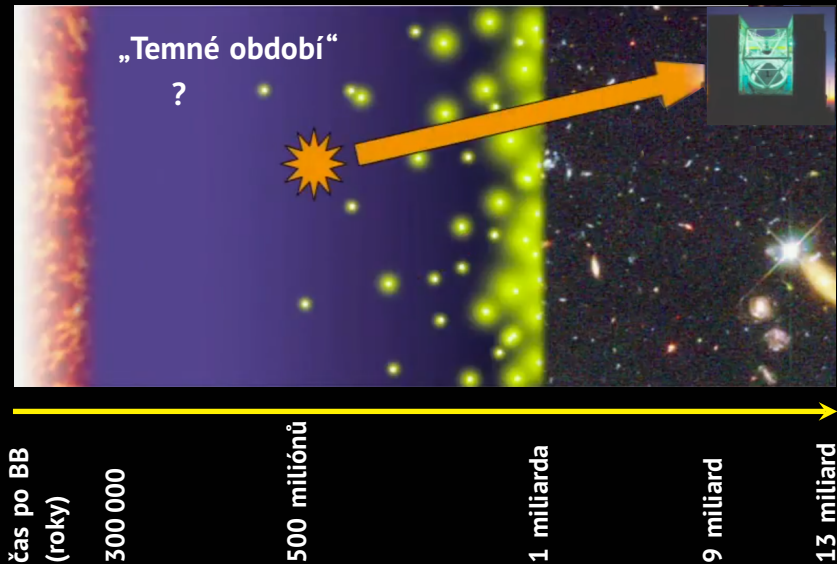


## Struktura GRB jetu:

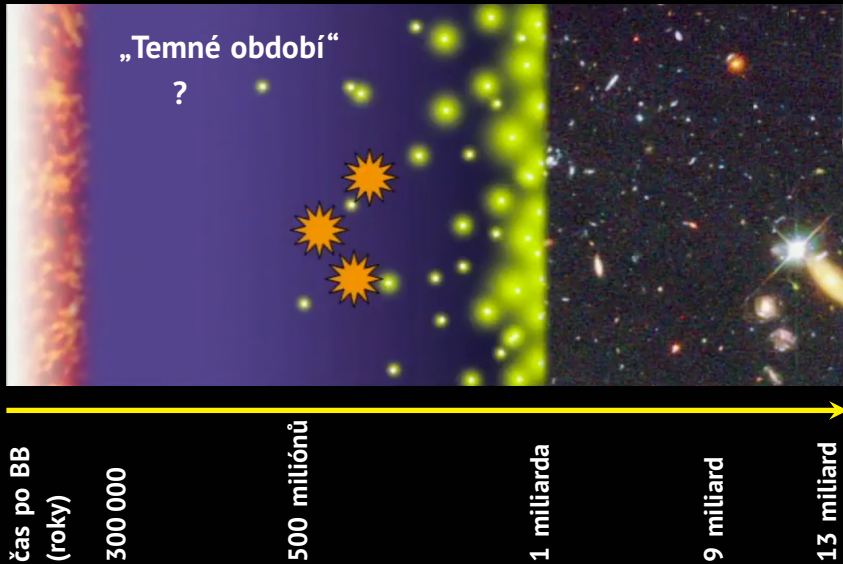
## Struktura GRB jetu:



## GRB jako sondy do rodícího se vesmíru :

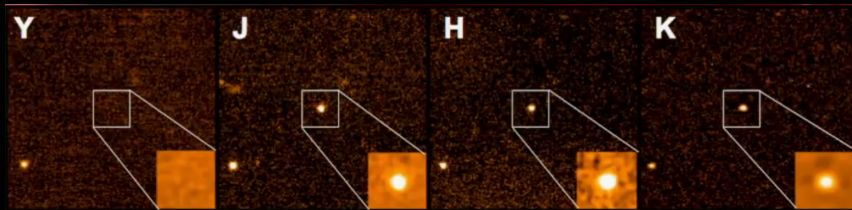


## GRB jako sondy do rodícího se vesmíru :



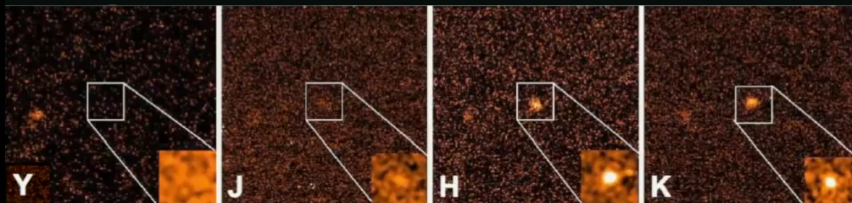


## Překonání rekordu kosmické vzdálenosti:



630 miliónů let po BB

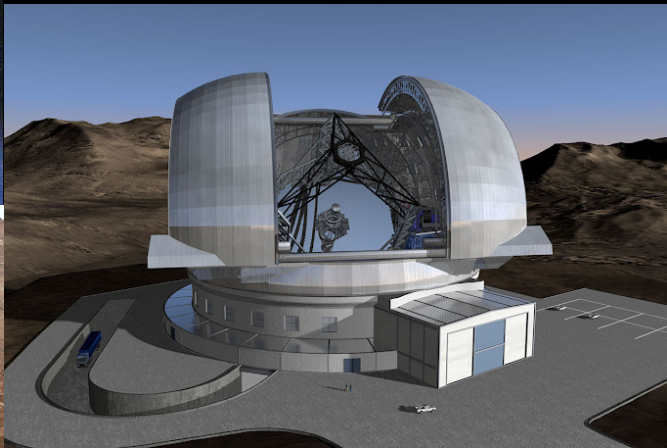
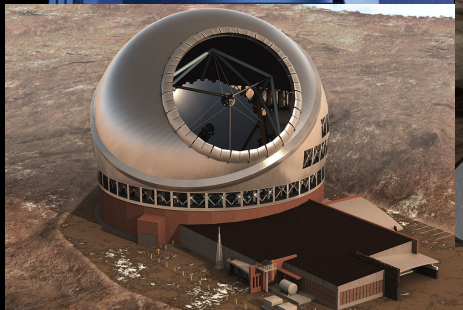
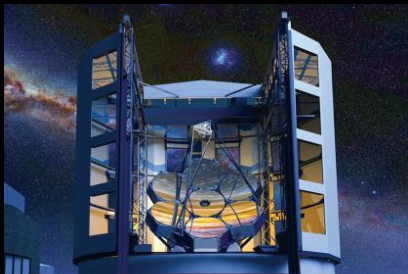
525 miliónů let po BB



původ GRB detekován v „temném období“ -

kdy věk vesmíru byl pouhá 4 % dnešního

## Budoucnost: Nová generace „obřích“ teleskopů



**Děkuji za pozornost**