



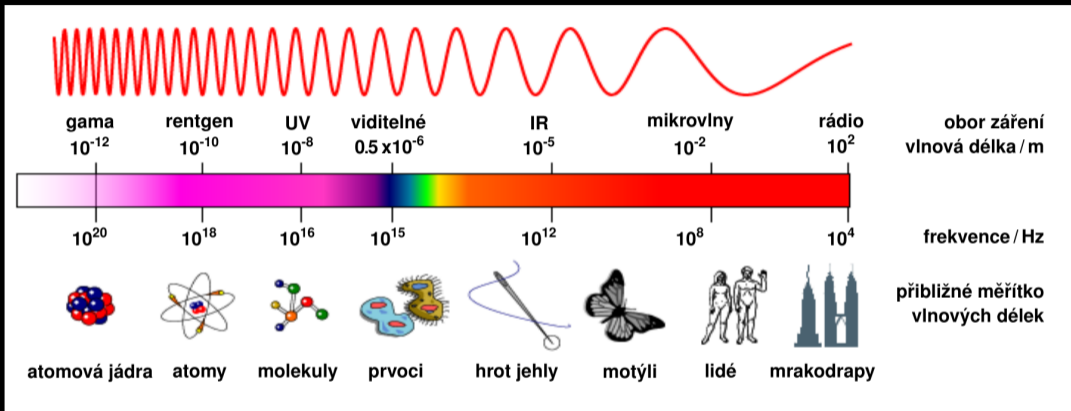
Gama záblesky - záhada nejmocnějších explozí ve vesmíru

Petr Kurfürst

U3V

26. března 2024

Co je záření gama?

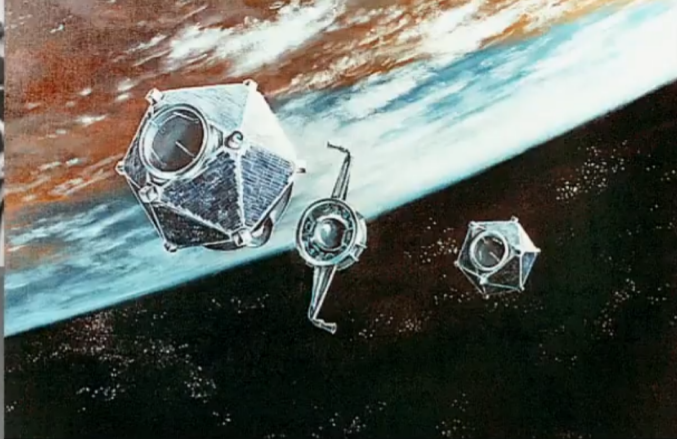
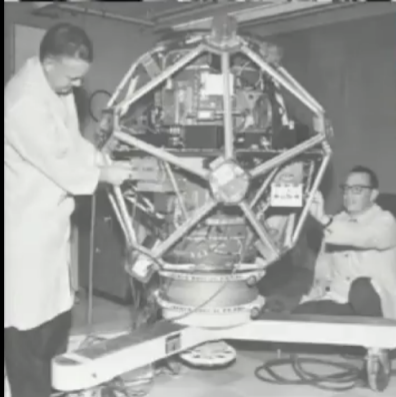
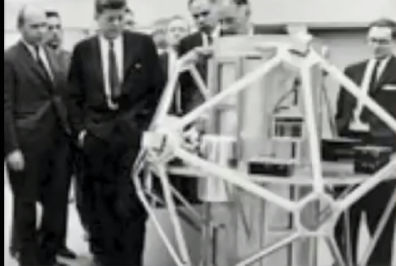


- gama záření je nejvíce energetickou formou „světla“
- wlnová délka je srovnatelná s velikostí atomového jádra

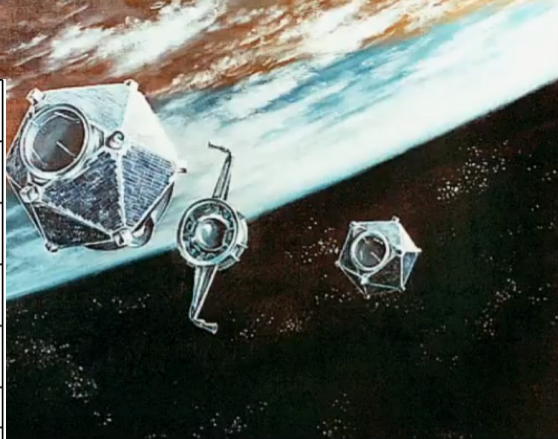
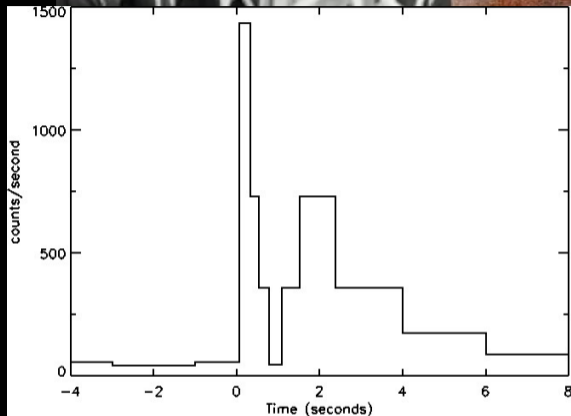
Smlouva o omezení zkoušek jaderných zbraní (1963)



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

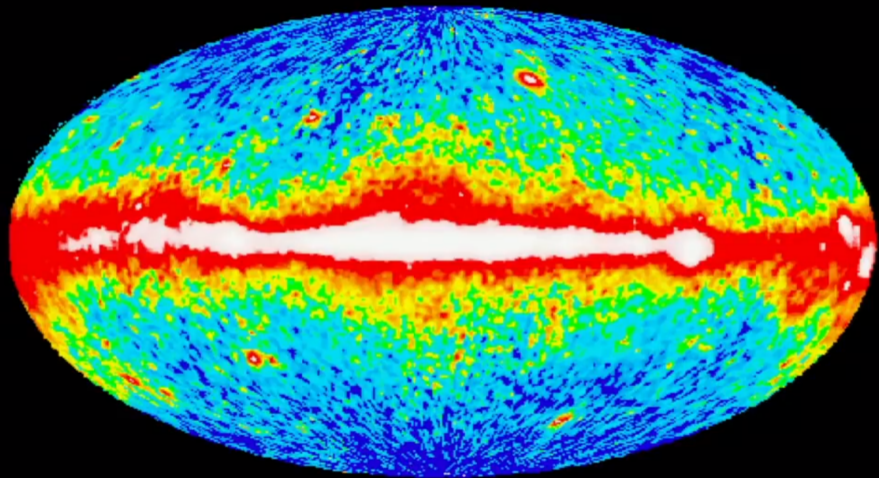


**2. 6. 1967: satelit Vela 4a (publikováno až v roce 1969)
(Zdroj: Klebsadel+ 1973)**



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

GRB: nejzářivější elmag jevy



max. 3-krát za den

(Zdroj: Compton Gamma-Ray satellite)

GRB: nejzářivější elmag jevy

max. 3-krát za den

(Zdroj: Compton Gamma-Ray satellite)

GRB: nejzářivější elmag jevy

OBSERVATIONS OF GAMMA-RAY BURSTS OF COSMIC ORIGIN

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

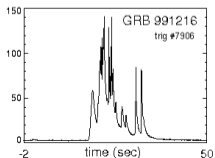
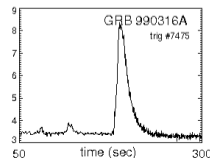
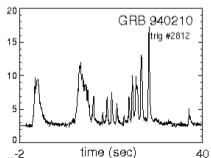
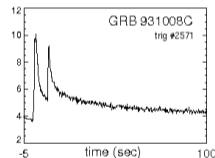
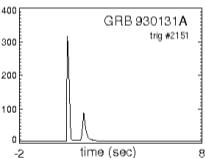
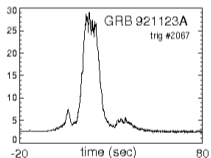
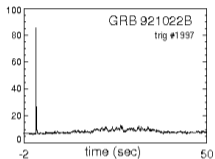
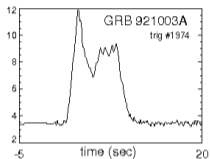
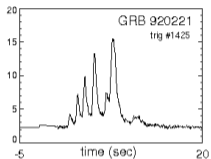
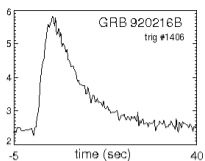
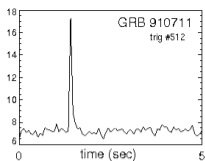
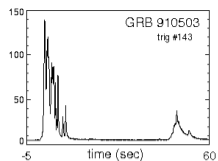
University of California, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico
Received 1973 March 16; revised 1973 April 2

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 ~ 30 s, and time-integrated flux densities from $\sim 10^{-5}$ ergs cm^{-2} to $\sim 2 \times 10^{-4}$ ergs cm^{-2} in the energy range given. Significant time structure within bursts was observed. Directional information eliminates the Earth and Sun as sources.

max. 3-krát za den

(Zdroj: Compton Gamma-Ray satellite)



- **BATSE GRB LCs: velká rozmanitost**

- **'Multimessengers'**

- **cca 3 detekce za den,**
pro srovnání - supernovy
(v průměru 1 za století
v MW) - 1 detekce za
sekundu

Hojnost teorií v období 1973 - 1993

GRB	Peak time UTC	T_{90} [s]	δ_{rec} [s]	Hardness ratio log H
030922A	08:43:35.950	(2.28 ± 0.08E+1)	3.0E-1	(-1.07 ± 0.30E+1)
030922B	18:30:56.900	(1.08 ± 0.03E+1)	2.0E-1	(4.63 ± 1.41E+1)
030926	06:52:28.290	(2.80 ± 0.31E+1)	2.0E-2	(2.89 ± 0.77E+1)
031005	08:21:50.250	(1.60 ± 0.18E+1)	5.0E-1	(-4.44 ± 1.19E+1)
031019	22:00:57.175	(7.50 ± 0.71E+0)	1.5E-1	(-2.48 ± 0.70E+2)
031024	09:24:14.350	(4.00 ± 0.32E+0)	1.0E-1	(1.77 ± 0.58E+1)
031027	17:07:50.250	(3.90 ± 0.07E+1)	5.0E-1	(-1.03 ± 0.10E+1)
031107	18:24:07.400	(1.92 ± 0.06E+1)	4.0E-1	(1.02 ± 2.13E+2)
031108	14:11:19.250	(2.75 ± 0.07E+1)	5.0E-1	(1.67 ± 0.16E+1)
031111	16:45:20.920	(3.20 ± 0.08E+0)	1.0E-2	(1.50 ± 0.08E+1)
031118	06:26:16.410	(2.60 ± 0.27E+1)	2.0E-2	(2.01 ± 0.57E+1)
031120	05:52:38.250	(9.75 ± 0.30E+1)	1.5E+0	(4.24 ± 2.27E+2)
031127	18:58:55.050	(1.92 ± 0.17E+1)	3.0E-1	(-2.88 ± 0.83E+1)
031130	02:18:53.775	(4.65 ± 0.29E+0)	1.5E-1	(5.52 ± 4.44E+1)
031214	22:50:44.150	(8.30 ± 1.01E+0)	1.0E-1	(-6.98 ± 0.55E+2)
031218	06:28:09.370	(2.20 ± 0.24E+1)	2.0E-2	(1.46 ± 0.51E+1)
031219	05:39:05.850	(7.50 ± 0.21E+0)	1.0E-1	(-1.21 ± 0.21E+1)
031226A	15:43:08.750	(3.45 ± 0.29E+1)	5.0E-1	(-4.63 ± 1.03E+1)
031226B	17:51:39.750	(4.40 ± 0.23E+1)	5.0E-1	(-5.74 ± 4.22E+1)
040102	09:25:26.975	(7.80 ± 0.83E+0)	1.5E-1	(-4.43 ± 1.15E+1)
040108	07:46:39.900	(3.30 ± 0.37E+1)	6.0E-1	(-2.64 ± 1.03E+1)
040113	01:36:46.350	(1.62 ± 0.10E+1)	3.0E-1	(-4.60 ± 5.01E+2)
040115	18:30:11.550	(2.19 ± 0.24E+1)	3.0E-1	(-2.40 ± 0.94E+1)
040125	22:14:47.100	(1.60 ± 0.23E+1)	2.0E-1	(-1.67 ± 1.16E+1)
040205A	05:19:47.350	(5.00 ± 0.62E+0)	1.0E-1	(2.06 ± 1.20E+1)
040205B	09:27:45.750	(2.65 ± 0.33E+1)	5.0E-1	(2.19 ± 0.98E+1)
040207	22:12:22.600	(2.44 ± 0.06E+1)	4.0E-1	(1.07 ± 0.17E+1)
040211	15:02:08.050	(3.70 ± 0.52E+0)	1.0E-1	(-2.61 ± 1.25E+1)
040215	00:28:02.500	(5.00 ± 0.29E+1)	1.0E+0	(-3.57 ± 0.57E+1)
040220	00:55:18.800	(1.72 ± 0.09E+1)	4.0E-1	(-1.51 ± 0.40E+1)
040225A	05:30:53.850	(1.05 ± 0.11E+1)	3.0E-1	(-8.84 ± 8.12E+2)
040225B	10:02:12.200	(1.40 ± 0.16E+1)	4.0E-1	(-3.12 ± 1.10E+1)
040228	00:09:08.500	(2.73 ± 0.02E+2)	2.0E-1	(-1.58 ± 0.07E+1)
040302A	04:14:38.250	(2.37 ± 0.27E+1)	3.0E-1	(-2.76 ± 1.05E+1)
040302B	12:24:03.900	(1.08 ± 0.02E+1)	2.0E-1	(-7.71 ± 0.64E+2)
040303	15:32:37.750	(2.97 ± 0.27E+1)	3.0E-1	(-1.52 ± 0.76E+1)
040312	00:02:36.550	(1.60 ± 0.22E+1)	2.0E-2	(2.13 ± 0.48E+1)
040316	18:16:14.350	(1.50 ± 0.02E+1)	1.0E-1	(-4.87 ± 1.30E+2)
040323	13:03:04.750	(1.89 ± 0.19E+1)	3.0E-1	(-2.92 ± 0.94E+1)
040324	20:12:19.800	(2.55 ± 0.17E+1)	1.5E-2	(2.58 ± 0.20E+1)
040327	16:19:27.500	(2.00 ± 0.32E+1)	1.0E+0	(-4.06 ± 1.54E+1)
040329	11:10:51.965	(2.07 ± 0.04E+1)	3.0E-2	(3.06 ± 0.12E+1)
040330	13:14:42.150	(2.88 ± 0.41E+1)	3.0E-1	(0.04 ± 1.09E+1)
040404	10:58:52.150	(4.90 ± 0.29E+1)	4.0E-1	(-1.38 ± 0.60E+1)
040413	13:09:56.490	(2.80 ± 0.31E+1)	2.0E-1	(1.21 ± 0.68E+1)
040414	11:09:22.500	(7.70 ± 0.24E+1)	1.0E+0	(-1.63 ± 2.36E+2)
040421	02:30:27.300	(1.14 ± 0.02E+1)	2.0E-1	(2.73 ± 0.08E+1)
040423	02:23:30.350	(4.20 ± 0.53E+0)	3.0E-1	(-1.16 ± 0.87E+1)
040425	16:23:34.275	(8.00 ± 0.19E+0)	2.0E-2	(1.08 ± 0.20E+1)
040427	20:12:37.700	(8.00 ± 0.77E+0)	2.0E-1	(-4.57 ± 7.43E+2)
040429	10:53:04.400	(2.52 ± 0.19E+1)	4.0E-1	(2.85 ± 6.00E+2)
040502A	06:37:06.900	(1.86 ± 0.04E+1)	2.0E-1	(-2.97 ± 0.22E+1)
040502B	13:30:02.500	(1.66 ± 0.07E+2)	1.0E+0	(-2.32 ± 0.39E+1)
040506	23:45:18.800	(4.86 ± 0.42E+1)	8.0E-1	(-1.38 ± 0.60E+1)
040508	10:15:44.750	(4.05 ± 0.56E+1)	5.0E-1	(-0.95 ± 1.08E+1)
040510	09:59:37.300	(6.00 ± 0.57E+0)	2.0E-1	(-2.87 ± 0.83E+1)
040513	03:02:17.500	(5.30 ± 0.83E+1)	1.0E+0	(-0.78 ± 1.20E+1)
040526	20:21:13.350	(1.29 ± 0.19E+1)	3.0E-1	(-4.19 ± 1.53E+1)
040528	16:55:58.150	(2.16 ± 0.07E+1)	3.0E-1	(-1.08 ± 0.26E+1)
040531	23:15:04.750	(4.20 ± 0.33E+1)	4.0E-1	(-4.73 ± 0.91E+1)
040601	06:33:24.625	(2.73 ± 0.29E+1)	2.5E-1	(5.10 ± 8.45E+2)
040603A	15:40:58.700	(1.24 ± 0.13E+1)	2.0E-1	(-1.42 ± 0.84E+1)
040603B	19:15:38.500	(7.50 ± 1.00E+1)	3.0E+0	(-5.04 ± 1.49E+1)
040605A	04:31:44.500	(5.80 ± 0.73E+0)	2.0E-1	(3.22 ± 0.26E+1)
040605B	18:46:16.390	(1.80 ± 0.22E+1)	2.0E-2	(2.33 ± 0.48E+1)
040605C	23:58:45.000	(1.68 ± 0.08E+1)	4.0E-1	(-4.30 ± 5.50E+1)

GRB	Peak time UTC	T_{90} [s]	δ_{rec} [s]	Hardness ratio log H
040611	13:30:00.600	(1.80 ± 0.10E+1)	4.0E-1	(2.02 ± 0.44E+1)
040619	15:15:52.250	(7.70 ± 0.27E+0)	1.0E-1	(-1.74 ± 0.28E+1)
040701	22:46:45.250	(9.60 ± 0.69E+0)	3.0E-1	(9.16 ± 5.34E+2)
040719	01:16:31.150	(7.00 ± 0.65E+0)	1.0E-1	(-1.77 ± 0.73E+1)
040723	04:06:38.150	(1.00 ± 0.04E+1)	1.0E-1	(-1.51 ± 0.27E+1)
040731	10:24:42.750	(2.45 ± 0.07E+1)	5.0E-1	(1.23 ± 0.18E+1)
040803	15:08:57.750	(1.14 ± 0.11E+2)	1.5E+0	(-3.95 ± 1.05E+1)
040810	14:15:42.650	(1.92 ± 0.05E+1)	3.0E-1	(-7.96 ± 1.96E+2)
040818	01:29:04.750	(8.00 ± 0.33E+0)	1.0E-1	(4.57 ± 0.42E+1)
040823	21:25:55.125	(1.38 ± 0.14E+0)	1.0E-1	(-2.05 ± 0.83E+1)
040824	05:16:07.500	(4.90 ± 0.50E+1)	1.0E+0	(-4.90 ± 7.92E+2)
040921	16:06:20.265	(2.80 ± 0.73E+1)	7.0E-2	(1.88 ± 0.64E+1)
040925	22:28:59.750	(4.75 ± 0.16E+1)	5.0E-1	(6.66 ± 2.68E+2)
040926	04:03:18.100	(1.52 ± 0.14E+1)	1.0E-1	(-1.93 ± 0.11E+1)
041003	09:17:56.250	(9.00 ± 0.78E+0)	5.0E-1	(-1.16 ± 0.53E+1)
041006	12:18:40.350	(1.11 ± 0.08E+1)	3.0E-1	(-4.71 ± 0.80E+1)
041007	02:02:08.350	(2.00 ± 0.13E+0)	1.0E-1	(5.52 ± 0.37E+1)
041009	06:30:21.250	(7.50 ± 0.70E+0)	3.0E-1	(-8.60 ± 7.65E+2)
041012	00:14:57.555	(2.50 ± 0.22E+1)	4.0E-1	(1.58 ± 0.40E+1)
041019	12:42:51.500	(6.60 ± 0.53E+1)	1.0E+0	(-3.90 ± 1.16E+1)
041013A	02:35:25.600	(1.84 ± 0.09E+2)	2.0E+0	(1.27 ± 3.84E+2)
041013B	22:56:27.865	(3.60 ± 0.46E+1)	3.0E-2	(6.92 ± 7.69E+2)
041015	10:22:18.950	(5.90 ± 0.29E+0)	1.0E-1	(-1.82 ± 0.60E+1)
041016	04:39:37.000	(1.80 ± 0.17E+1)	4.0E-1	(-1.90 ± 0.83E+1)
041018	13:38:19.500	(1.05 ± 0.19E+1)	2.0E-1	(1.19 ± 3.19E+2)
041101	01:49:36.150	(3.20 ± 0.34E+0)	1.0E-1	(2.28 ± 0.85E+1)
041102	11:12:23.750	(2.70 ± 0.22E+0)	1.0E-1	(1.69 ± 0.60E+1)
041107	15:49:29.250	(4.70 ± 0.45E+1)	5.0E-1	(-6.04 ± 7.68E+2)
041116	05:34:56.500	(5.00 ± 0.53E+1)	1.0E+0	(-3.38 ± 1.06E+1)
041117	15:18:00.950	(2.00 ± 0.20E+1)	1.0E-1	(-1.81 ± 0.34E+1)
041120	19:23:41.300	(8.60 ± 0.42E+0)	2.0E-1	(-3.20 ± 0.44E+1)
041125	16:07:27.400	(2.52 ± 0.04E+1)	4.0E-1	(-2.34 ± 0.06E+1)
041202	03:30:57.300	(1.66 ± 0.03E+1)	2.0E-1	(1.14 ± 0.12E+1)
041203A	07:49:56.450	(6.80 ± 0.08E+1)	1.0E-1	(-0.51 ± 0.21E+1)
041211B	11:31:53.400	(2.00 ± 0.09E+1)	4.0E-1	(-3.20 ± 3.24E+2)
041211C	23:57:42.925	(6.15 ± 0.16E+0)	1.5E-1	(4.46 ± 0.07E+1)
041213	06:59:36.300	(1.40 ± 0.24E+1)	2.0E-2	(3.19 ± 0.82E+1)
041218	15:45:50.500	(5.10 ± 0.57E+1)	1.0E+0	(-2.22 ± 0.98E+1)
041219	01:42:19.400	(1.00 ± 0.11E+1)	4.0E-1	(-1.32 ± 7.84E+2)
041223	14:06:22.500	(4.05 ± 0.11E+1)	5.0E-1	(8.55 ± 2.11E+2)
041224	20:20:58.250	(3.85 ± 0.58E+1)	5.0E-1	(-3.21 ± 1.42E+1)
041231	11:50:48.050	(1.00 ± 0.12E+1)	1.0E-1	(3.20 ± 0.56E+1)
041232	11:30:03.250	(2.80 ± 0.38E+0)	1.0E-1	(-2.24 ± 1.12E+1)
050126	21:07:37.700	(3.30 ± 0.10E+1)	6.0E-1	(-1.71 ± 0.22E+1)
050203	17:22:00.850	(3.80 ± 0.26E+0)	1.0E-1	(-0.85 ± 4.62E+2)
050213	19:24:04.750	(1.70 ± 0.09E+1)	5.0E-1	(2.43 ± 0.37E+1)
050214	11:38:33.500	(4.00 ± 0.66E+1)	1.0E+0	(-0.16 ± 1.23E+1)
050216	07:26:34.275	(5.00 ± 0.72E+1)	5.0E-2	(5.66 ± 1.00E+1)
050217	21:05:51.650	(9.40 ± 0.17E+0)	1.0E-1	(-3.01 ± 0.21E+1)
050311	17:06:58.850	(2.40 ± 0.44E+0)	2.0E-1	(-1.44 ± 1.09E+1)
050312	05:40:13.575	(1.50 ± 0.51E+1)	5.0E-2	(0.35 ± 0.82E+1)
050314	08:33:08.900	(8.00 ± 0.35E+0)	2.0E-1	(-4.77 ± 0.45E+1)
050320	08:04:26.900	(1.54 ± 0.13E+1)	2.0E-1	(5.51 ± 6.52E+2)
050323	22:11:51.500	(7.00 ± 0.78E+0)	2.0E-1	(-2.34 ± 0.41E+1)
050326	09:53:56.500	(2.70 ± 0.11E+1)	2.0E-1	(-2.54 ± 0.36E+1)
050328	03:25:14.875	(4.50 ± 0.51E+1)	5.0E-2	(-1.02 ± 0.20E+1)
050404	17:27:48.500	(1.14 ± 0.03E+1)	2.0E-1	(1.03 ± 0.18E+1)
050409	01:18:36.050	(1.26 ± 0.05E+0)	2.0E-2	(3.05 ± 0.30E+1)
050411	21:51:09.500	(6.80 ± 0.69E+0)	5.0E-1	(-1.18 ± 0.80E+1)
050412	18:58:45.000	(1.94 ± 0.08E+1)	2.0E-1	(-5.03 ± 0.51E+1)
050429	14:09:50.900	(1.94 ± 0.15E+1)	2.0E-1	(1.35 ± 0.63E+1)
050430	09:13:09.100	(1.42 ± 0.17E+1)	2.0E-1	(0.20 ± 9.23E+2)
050501	08:19:38.825	(2.40 ± 0.19E+0)	1.5E-1	(7.81 ± 4.03E+2)
050502	19:56:57.575	(1.60 ± 0.20E+1)	2.0E-1	(1.61 ± 0.92E+1)
050509	09:31:26.700	(2.00 ± 0.04E+1)	2.0E-1	(-6.35 ± 1.57E+2)
050516	12:58:05.200	(7.60 ± 1.16E+0)	4.0E-1	(1.16 ± 1.11E+1)

méně než 100 gama záblesků, 135 teorií!

krátké trvání & extrémní energie:

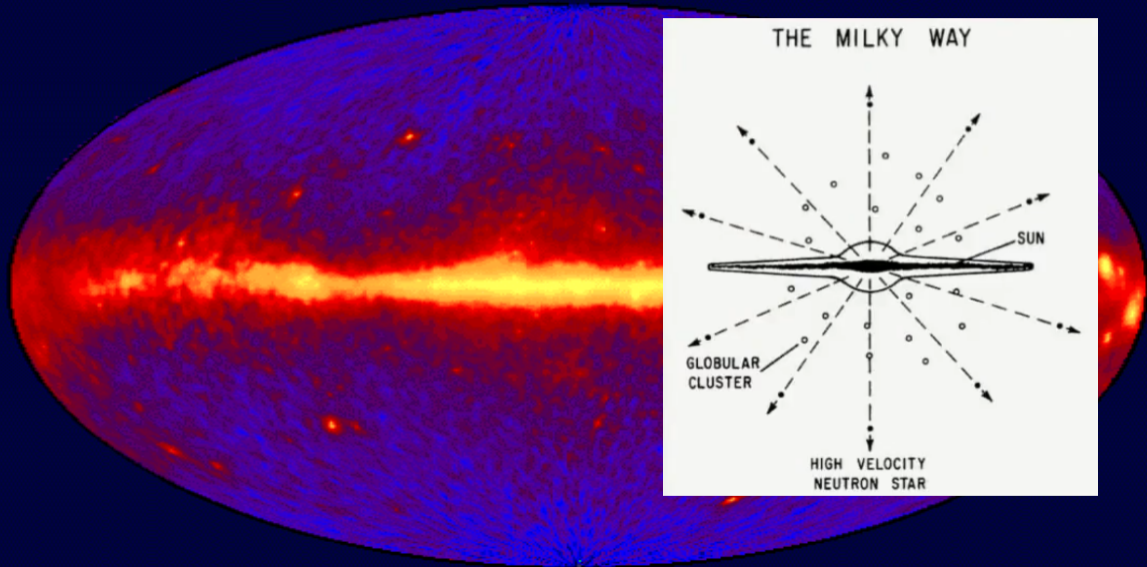
- neznámý typ explodujících hvězd?
- obří výtrysky mimořádně dalekých hvězd?
- anihilace s antihmotou?
- srážky černých děr?
- války mezi mimozemskými civilizacemi?

Problém: nejistota v určení vzdáleností, jsou srovnatelné s velikostí vesmíru?

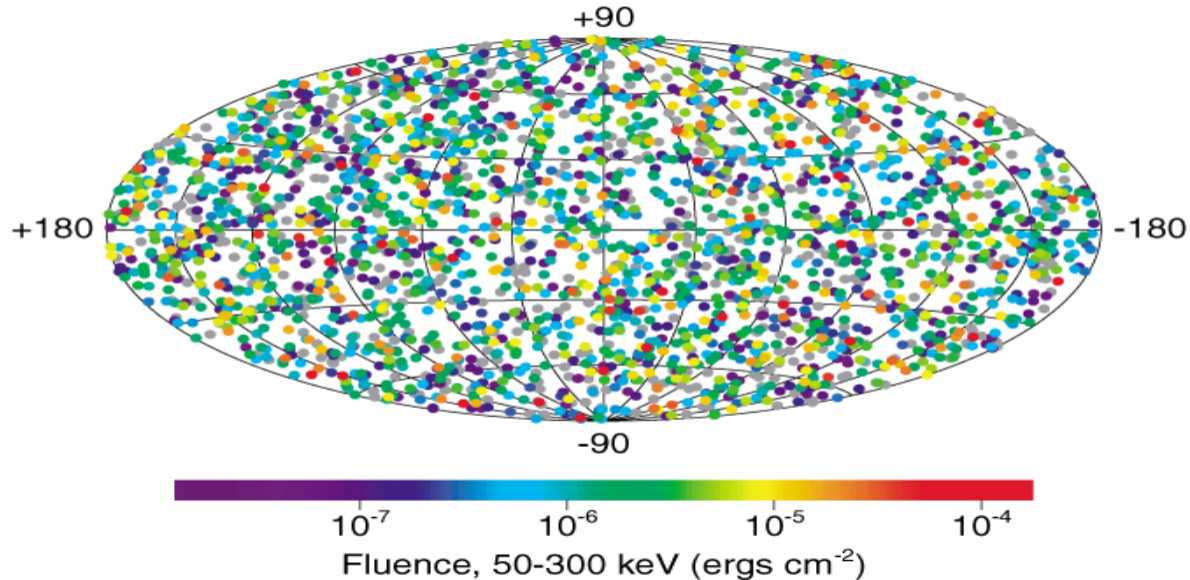
Compton Gamma-ray Observatory (1991)



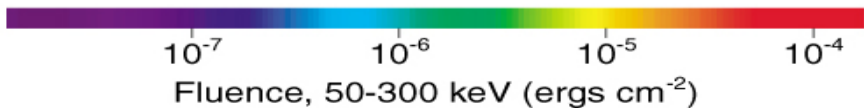
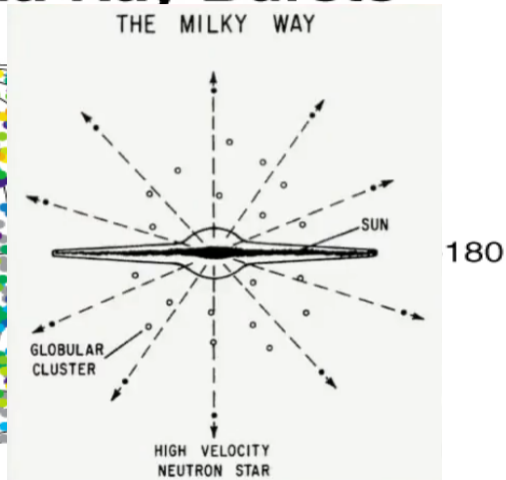
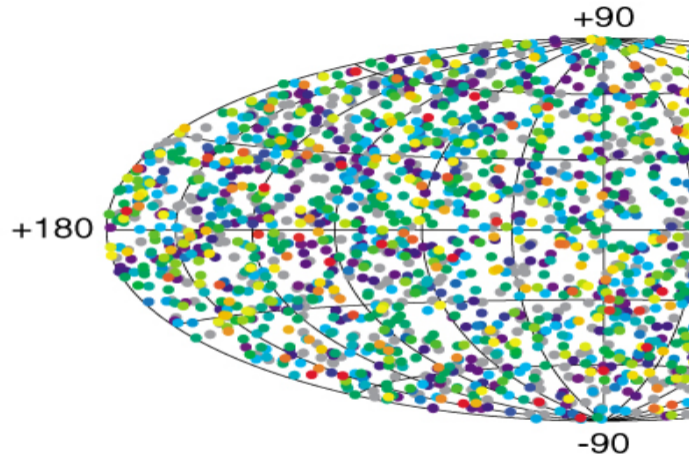
EGRET All-Sky Map Above 100 MeV



2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



„Velká debata“ (1995)

Velká debata Shapley - Curtis (1920)
o rozměrech vesmíru



„Vzdálenost ke zdrojům GRB“

Galaktická

kosmologická

Don Lamb



Bogdan Paczyński



Dosvity - „skomírající uhlíky“

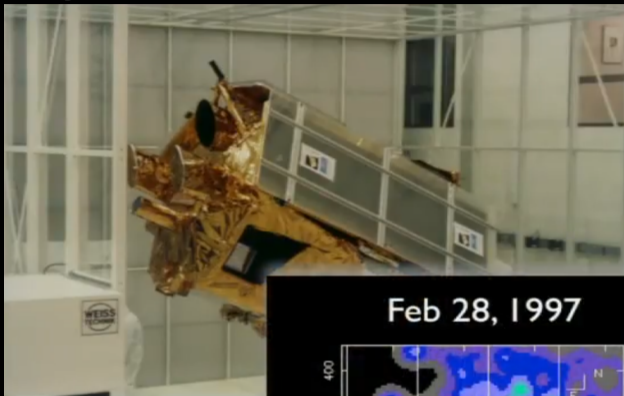


„prompt“ gama záblesk



dosvity

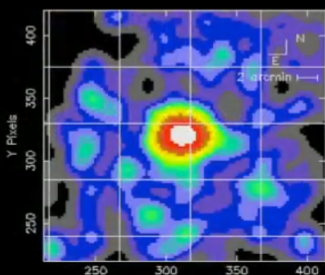
Objev dosvitů



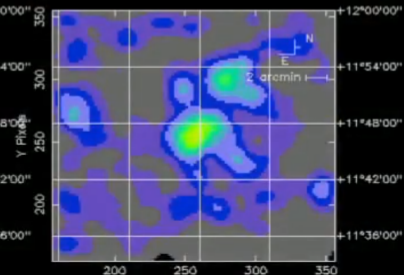
100 krát přesnější než *Compton*,
pořízení snímku ~hodiny

BeppoSAX

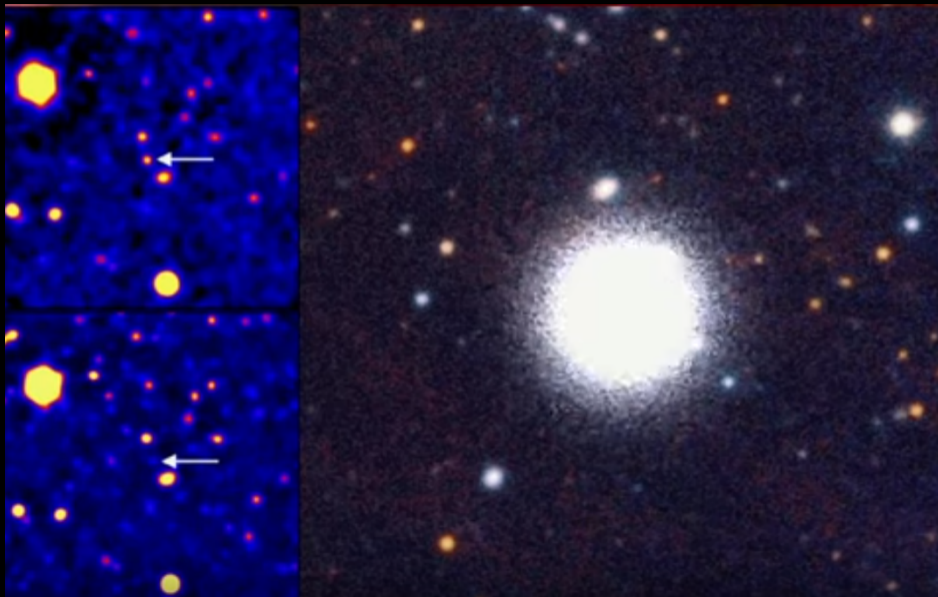
Feb 28, 1997



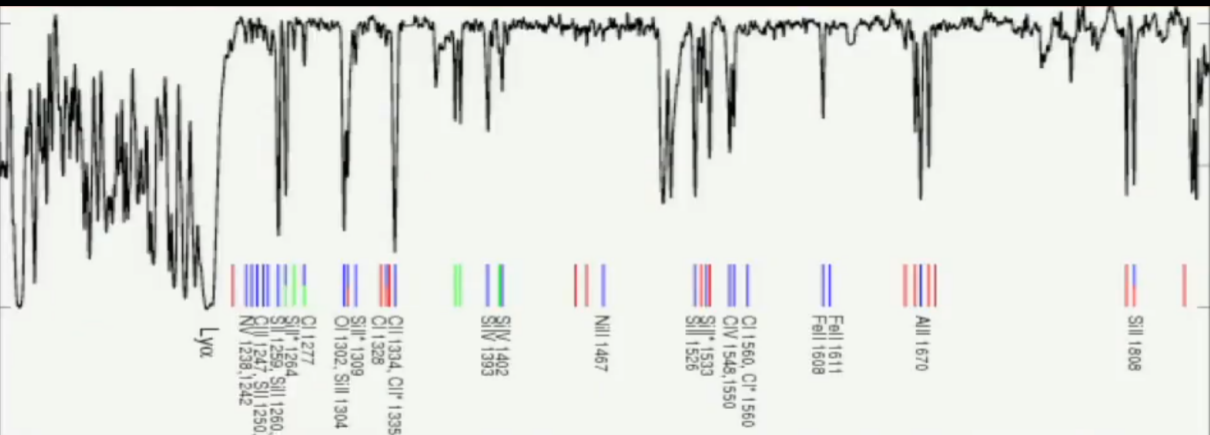
Mar 3, 1997



Objev dosvitů - viditelné světlo



Gama záblesky z „okraje“ vesmíru



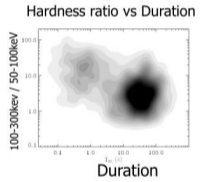
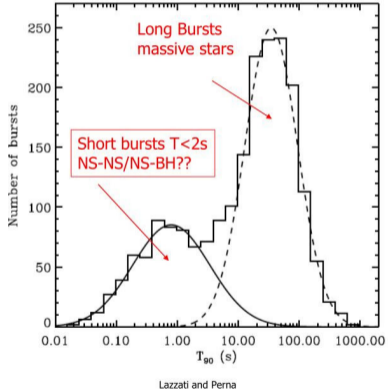
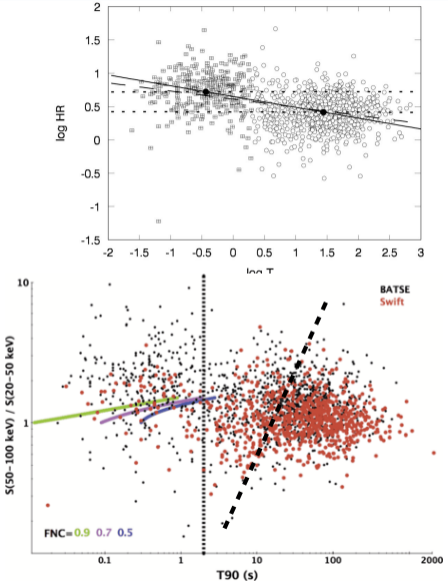
ze vzdálenosti 12,1 miliardy světelných let !

celková energie GRB = úplná přeměna Slunce na energii ($E = M_{\odot}c^2$)

Gama záblesky: nejjasnější elmag jevy

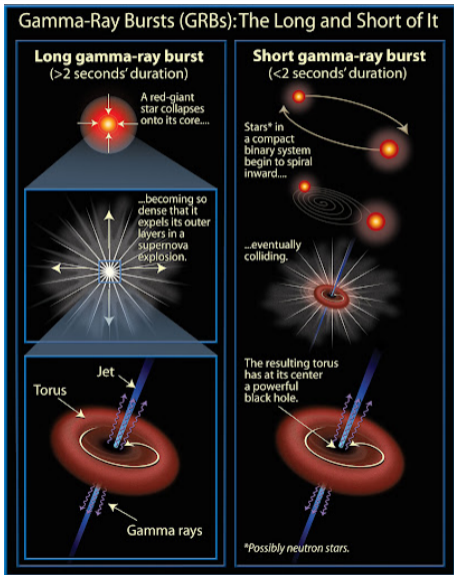
Krátké & dlouhé GRB

GRB duration distribution



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

Gama záblesky: nejjasnější elmag jevy



Krátké & dlouhé GRB

různé zárodečné hvězdy

< 2 s

ultra
dlouhé?

krátké GRB

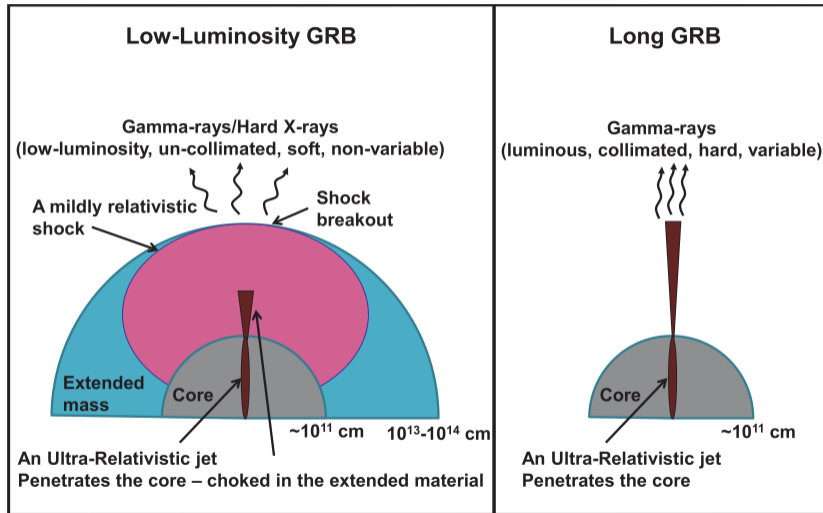
dlouhé GRB

různé fyzikální mechanismy

slabší krátké
GRB → jem-
nější & jiný
spektrální vý-
voj

slabší dlouhé
GRB →
jemnější a
„hladší“

Gama záblesky: nejjasnější elmag jevy



Dlouhé GRB & „slabší“ dlouhé GRB

Nezbytná podmínka pro GRB: pracovní doba „motoru“ exploze je dostatečně dlouhá aby jet mohl prorazit obálku hvězdy

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

Gama záblesky: nejjasnější elmag jevy

- 🕒 **Čas vs. energie** \Rightarrow kompaktní objekt \Rightarrow BH nebo NS
- 🕒 **Velikost „hnacího motoru“ GRB:** $\lesssim 10^4$ m
- 🕒 **Hustota energie:** $\sim 10^{32} \text{ J m}^{-3} \Leftrightarrow$ hustota hmoty $\sim 10^{16} \text{ kg m}^{-3}$
- 🕒 **Teplota:** $\sim 10^{11} \text{ K}$ \rightarrow mnohem vyšší než prahová T pro tvorbu e^+e^- párů \Rightarrow téměř stejný počet fotonů a párů
- 🕒 Plasma dominované páry nebo Poyntingův tok
- 🕒 \Rightarrow **BH s akrečním diskem?**
- 🕒 \Rightarrow **Magnetary?**
- 🕒 Dlouhé GRB pozorovány v galaxiích s tvorbou hvězd \rightarrow modely kolapsarů
- 🕒 Krátké GRB pozorujeme ve všech typech galaxií

Problém „kompaktnosti“:

- 🔵 **Energie GRB:** $\sim 10^{44}$ J (i více)
- 🔵 **Doba trvání:** $\delta t \cong 0.1$ s (i méně!)
- 🔵 Můžeme stanovit **velikost vyzařující oblasti:** $R \leq c \delta t \lesssim 3 \times 10^7$ m $\approx 10^8$ m
- 🔵 Měřená **energie fotonů:** ~ 300 keV - 1 MeV, **okraj vysokých energií daleko nad** (1 MeV $\approx 10^{-13}$ J)
↓
- 🔵 Odhadněme **číselnou hustotu fotonů** uvnitř zdrojového objektu jako
 $\sim E/R^3 \rightarrow 10^{44+13}/(10^8)^3 \approx 10^{33}$ fotonů m^{-3}
- 🔵 **Účinný průřez** pro $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ je řádově $\sigma_T \sim 10^{-28}$ m^2
- 🔵 **Optická hloubka** $\tau_{\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-} \sim n_e \sigma_T R \cong 10^{33} \times 10^{-28} \times 10^8 \approx 10^{13}$
- 🔵 Tedy: **optická hloubka** brání úniku fotonů z této „ohnivé koule“ **musí být také 10^{13}** (spíše více)
→ fotony **nemohou uniknout**
- 🔵 **To znamená: spektrum** musí být **termální!**

Problém „kompaktnosti“:

- 🔵 **Ale:** pozorujeme jasné **netermální spektrum** (synchrotron)!
- 🔵 Potřeba „nové fyziky“ pro vysvětlení? Jistě, ovšem „nová fyzika“ vznikla v roce 1905: **speciální relativita! (STR)**
- 🔵 E_{ph} (pozorovaná) = ΓE_{ph} (emitovaná), $R \leq \Gamma^2 c \delta t$
- 🔵 Integrované **mocninné energiové spektrum** $dn(\epsilon)/d\epsilon \sim \epsilon^{-\alpha}$ snižuje počet fotonů N_{ph} nad $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ prahem pro párovou produkci: $\epsilon^{-\alpha+1} = \Gamma^{-2\alpha+2} \Rightarrow \tau_{\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-} \sim \frac{N_{\text{ph}}}{R^3} \sigma_t R$
- 🔵 V tom případě se **optická hloubka** transformuje jako
$$\tau_{\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-} \sim \Gamma^{-(2+2\alpha)} n_e \sigma_t R \approx 10^{13} / \Gamma^{2+2\alpha}$$
- 🔵 Mocninný koeficient $\alpha \sim 2 \rightarrow \Gamma \gtrsim 100 - 150$ **řeší tuto „záhadu“!**
- 🔵 Výpočty mohou zpřesnit **požadavky na Γ** pro krátké a dlouhé GRB
- 🔵 Existence **jetů** s vysokým Γ , tedy s velkým „beaming“ faktorem, **vysvětluje $E \gtrsim 10^{52}$ ergs**

Relativistické efekty:

- Připomínka **STR** formalismu (**čárkovaně = klidová soustava částice**):

$$E = \Gamma m_0 c^2, \quad \text{kde } \Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \beta = \frac{v}{c} \text{ a } m_0 = m \text{ klidová}$$

- **Energie rázové vlny tak bude** (Blandford - McKee řešení):

$$E \sim \rho R^3 c^2 \Gamma^2 \rightarrow \Gamma \propto R^{-3/2} \text{ pro } \rho = \text{konst.} \quad (\Gamma^2 \text{ díky } v_{\text{th}})$$

- Z **aberrace světla** (4-rychlost s $u' \equiv u \equiv c$):

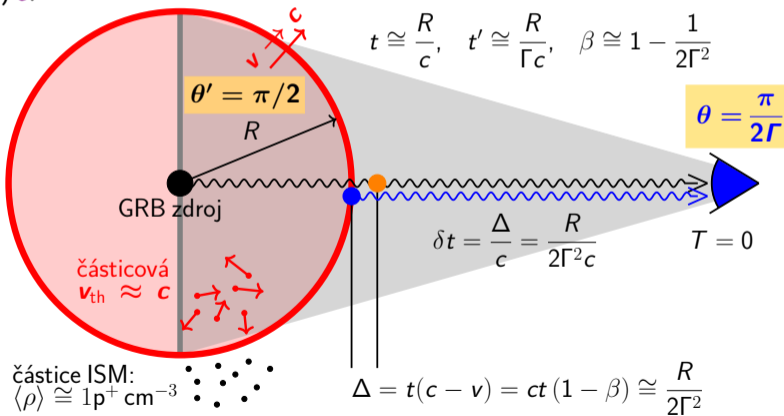
$$\sin \theta = \frac{\sin \theta'}{\Gamma (1 + \beta \cos \theta')} \Rightarrow \text{pro } \theta' = \pi/2 \text{ (foton emitovaný } \perp \text{ k } v \text{ v } \mathcal{K}') \rightarrow$$

$$\sin \theta = \frac{1}{\Gamma} \Rightarrow \text{pro } \Gamma \gg 1 \rightarrow \theta \sim \frac{1}{\Gamma}$$

- **„Beaming“ efekt:** pokud jsou fotony vyzářeny v \mathcal{K}' izotropně \rightarrow pro polovinu z nich $\theta' < \pi/2 \Rightarrow$ v \mathcal{K} **polovina z nich v kuželu s úhlem** $1/\Gamma$, zatímco pro menšinu $\theta \gg 1/\Gamma$

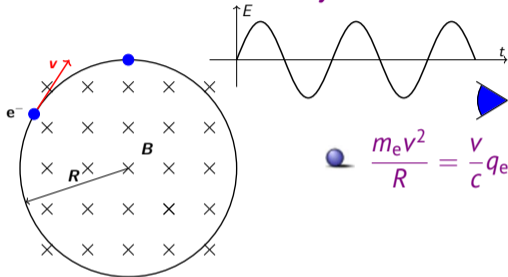
Relativistické efekty:

- Jaká je (ultra)relativistická obdoba přechodu $v_{\text{shock}} \rightarrow c$?
- Kulová silná rázová vlna v čase t (v soustavě pozorovatele) s "velikostí" R a rychlostí rozpínání $v =$ (téměř) c :



„Dovysvětlení“: synchrotronové záření:

🌐 Většina dosvitů GRB: **synchrotronové** nebo **IC (inverse-Compton) záření**

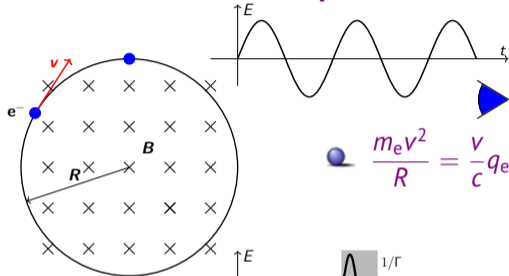


🌐 NR: **cyklotronové záření**

$$\frac{m_e v^2}{R} = \frac{v}{c} q_e B \Rightarrow \omega_{\text{cyc}} = \frac{v}{R} = \frac{q_e B}{m_e c}$$

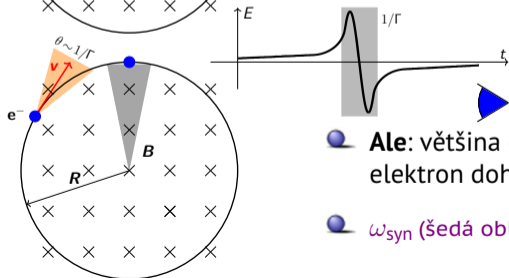
„Dovysvětlení“: synchrotronové záření:

🌐 Většina dosvitů GRB: **synchrotronové** nebo **IC (inverse-Compton) záření**



🌐 NR: cyklotronové záření

$$\frac{m_e v^2}{R} = \frac{v}{c} q_e B \Rightarrow \omega_{\text{cyc}} = \frac{v}{R} = \frac{q_e B}{m_e c}$$



🌐 UR: synchrotronové záření

$$\omega_{\text{syn}} = \frac{q_e B}{\Gamma_e m_e c} (< \omega_{\text{cyc}})$$

🌐 **Ale:** většina doby vyzařování E pole je zúžena poměrem $1/\Gamma$ + elektron dohání E pole rychlostí $\sim v \rightarrow c$, potom **pozorovatel vidí:**

$$\omega_{\text{syn}} (\text{šedá oblast}) = \frac{q_e B}{\Gamma_e m_e c} \Gamma_e^3 \rightarrow \nu_{\text{syn}} \sim \nu_{\text{cyc}} \Gamma_e^2$$

„Dovysvětlení“: synchrotronové záření:

- Heuristický odhad **výkonu synchrotronové emise P** (na jednotku času):
(přesné řešení s použitím Larmorova vztahu, atd., v tuto chvíli příliš složité)



- IC rozptyl** na relativistických elektronech:
- NR analogie: ΔV míčku $\rightarrow 2V$ (ověříme v klidové soustavě míčku)
- UR IC rozptyl** čelně přilétajícími e^- s $v \rightarrow c$: frekvence blížího se fotonu $h\nu \rightarrow$ energie zpětně roztýleného fotonu $h\nu = \Gamma_e^2 h\nu'$ (stejný Γ^2 jako v předchozí energiové rovnici)

„Dovysvětlení“: synchrotronové záření:

- Heuristický odhad **výkonu synchrotronové emise P** (na jednotku času):
(přesné řešení s použitím Larmorova vztahu, atd., v tuto chvíli příliš složité)



- IC rozptyl** na relativistických elektronech:
 - NR analogie: ΔV míčku $\rightarrow 2V$ (ověříme v klidové soustavě míčku)
 - UR IC rozptyl** čelně přilétajícími e^- s $v \rightarrow c$: frekvence blížího se fotonu $h\nu \rightarrow$ energie zpětně rozptýleného fotonu $h\nu = \Gamma_e^2 h\nu'$ (stejný Γ^2 jako v předchozí energiové rovnici)
-
- Objem „válc“ účinného průřezu (mezi relativistickými e^- a fotony, na jednotku času):
 $\beta c \sigma_T \Rightarrow E_{IC} = \beta c \sigma_T U_{ph} \Gamma_e^2$ (U_{ph} je hustota energie fotonů uvnitř $\beta c \sigma_T$)
 - Můžeme uvažovat synchrotronové záření jakoby U_{ph} byla hustotou energie **B -pole**:
 $P_e = \beta c \sigma_T \Gamma_e^2 B^2 / (8\pi)$ (výkon vyzářeného UR electronu za jednotku času)

„Dovysvětlení“: synchrotronové záření:

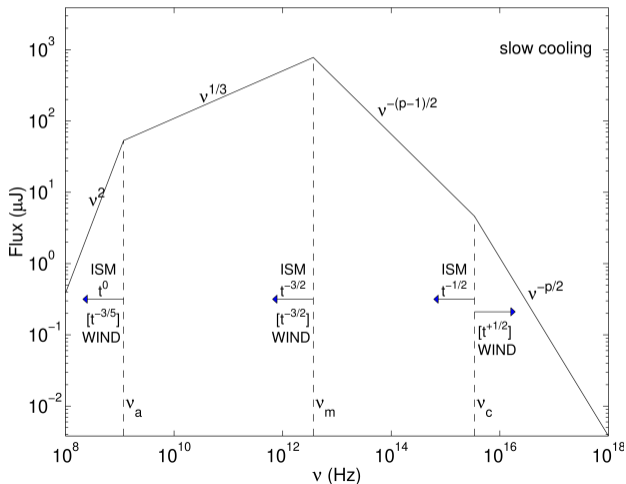
- Jaká je emise z “oblaku” elektronů?
- Předpokládejme **rázovou vlnu**, která obsahuje hmotu $\sim \rho R^3$, přičemž urychluje shromážděné elektrony na všechny energie:
- Dále, uvažujme klesající **mocinné rozložení** # elektronů na jednotku Γ_e (závislost veličiny $\frac{dn_e}{d\Gamma_e}$ na Γ_e): $\frac{dn_e}{d\Gamma_e} \sim \Gamma_e^{-p}$
- Stejně rozložení jako **funkce frekvence** ν : # elektronů v určitém rozsahu $\Gamma_e \rightarrow \Gamma_e \frac{dn_e}{d\Gamma_e}$
- Vynásobíme výkonem a vydělíme frekvencí pro tento Γ_e :

$$\frac{\Gamma_e \frac{dn_e}{d\Gamma_e} \beta c \sigma_T \Gamma_e^2 \frac{B^2}{8\pi}}{\frac{q_e B}{m_e c} \Gamma_e^2} \sim \Gamma_e \frac{dn_e}{d\Gamma_e} = \text{výkon (energie za jednotku času) na jednotku frekvence}$$

- Připomeňme $\Gamma_e \sim \nu^{1/2}$: $F_\nu \sim \nu^{-(p-1)/2}$

„Dovysvětlení“: synchrotronové záření:

- Širokopásmé synchrotronové spektrum dosvitů ze sférického zdroje exploze s konstantní hustotou (“ISM” model) a prostředí s $\rho \propto r^{-2}$ (“wind” model):



Ukázka
pozorovaného
spektra několik dní
po záblesku

Zdroj: Kulkarni+ 2000

„Dovysvětlení“: synchrotronové záření:

- Odvození doby ochlazování z předchozího:

$$t_{\text{cool}} \sim \frac{E_e}{P_e} \sim \frac{\Gamma_e m_e c^2}{\beta c \sigma_T \Gamma_e^2 B^2 / (8\pi)} \sim \frac{1}{\Gamma_e} \sim \frac{1}{\sqrt{\nu}}$$

- Elektrony mezi frekvencemi $\nu_m < \nu < \nu_c$ „žijí“ věčně (= déle než daný systém)
- Elektrony s frekvencemi $\nu > \nu_c$ jsou tak účinně chlazené, že „žijí“ po kratší dobu než daný systém: $F_\nu \sim \nu^{-(p-1)/2} \cdot \nu^{-1/2} \propto \nu^{-p/2}$
- Ještě jednodušší úvaha využije faktu, že během svého kratšího „života“ tyto elektrony vyzáří veškerou svoji energii:

$$\left(\Gamma_e \frac{dn_e}{d\Gamma_e} \Gamma_e m_e c^2 \right) / \left(\frac{q_e B}{m_e c} \Gamma_e^2 \right) \sim \Gamma_e^{-p} \propto \nu^{-p/2}$$

- Elektrony mezi frekvencemi $\nu_a < \nu < \nu_m$ (nízkoenergiový okraj, komplikované na odvození): $F_\nu \propto \nu^{1/3} \rightarrow$ i pro „monoenergetické“ elektrony
- Při ještě nižších energiích, $\nu < \nu_a$, je synchrotronová emise tak účinná, že absorbuje fotony, které emituje: samo-absorpční („černé těleso“) spektrum $\rightarrow F_\nu \sim \frac{\nu^2}{c^2} \Gamma_{\min} m_e c^2 \frac{R^2}{D^2}$
(E namísto $kT \rightarrow$ ne zcela termální)

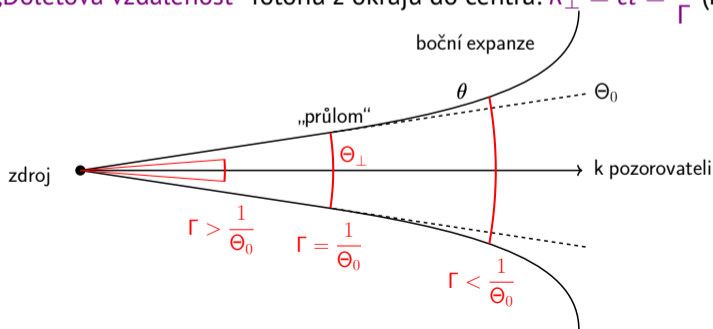
„Dovysvětlení“: synchrotronové záření:

Co potřebujeme znát pro skutečné výpočty:

- # elektronů
 - Jaký je Γ_{\min}
 - Parametry B -pole
 - Distribuce energie p elektronů
- $n_e \sim \frac{\rho R^3}{m_p}$
- $\Gamma_{\min} \rightarrow \varepsilon_e \Gamma m_p c^2 \Rightarrow \Gamma_e m_e c^2 = \Gamma m_p c^2$ (stejné rozdělení mezi e^- a p^+ ?) $\Rightarrow \Gamma_{\min} \sim \varepsilon_e \frac{m_p}{m_e} \Gamma$ (ε_e je „ad hoc“ faktor, Γ je Lorentzův faktor rázové vlny)
- $R^3 \frac{B^2}{8\pi} \sim \varepsilon_B E$
- Ovšem: všechno se vyvíjí v čase, hodnoty se mění; zde načrtnutý obraz platí pouze v počátečním období (viz Granot+ 2000)
- Dokonce i pořadí mezních frekvencí se může měnit, například ν_c může poklesnout pod ν_m , potom bude mocninný vztah vypadat $\nu^{-p/2}$ pro $\nu > \nu_m$ a $\nu^{-1/2}$ pro $\nu_c < \nu < \nu_m$, atd.

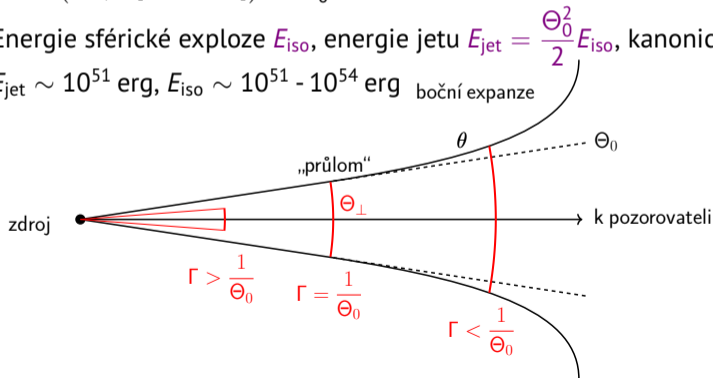
GRB: nejjasnější elmag tranzienty:

- Co když exploze nebude sférická → pouze jet s počátečním úhlem rozevření Θ_0 :
(pozorovací omezení pro geometrii)
- Pokud $\Gamma \gg 1$ → střed jetu „neví“ o okrajích; pouze malá vrstva materiálu, která „ví“ o prázdném prostoru vně jetu
- Doba expanze jetu v lokální soustavě: $t = R/\Gamma c$
- „Doletová vzdálenost“ fotonu z okrajů do centra: $R_{\perp} = ct = \frac{R}{\Gamma}$ (kauzální propojení)



GRB: nejjasnější elmag tranzienty:

- Co když exploze nebude sférická → pouze jet s počátečním úhlem rozevření Θ_0 :
(pozorovací omezení pro geometrii)
- Odpovídající „úhel doletu“: $\Theta_{\perp} = \frac{R_{\perp}}{R} = \frac{1}{\Gamma}$; pokud $\Theta_{\perp} \geq \Theta_0 \rightarrow$ jet začíná „vnímat“ okraje
→ rozšiřuje se a zrychluje své zpomalování; čas kdy se to stane
 $\approx 6 \text{ h } (E_{52}/\rho [\text{p}^+ \text{ cm}^{-3}])^{1/3} \Theta_0^{8/3}$, (Θ_0 mez 1 - 10 stupni)
- Energie sférické exploze E_{iso} , energie jetu $E_{\text{jet}} = \frac{\Theta_0^2}{2} E_{\text{iso}}$, kanonické hodnoty:
 $E_{\text{jet}} \sim 10^{51} \text{ erg}$, $E_{\text{iso}} \sim 10^{51} - 10^{54} \text{ erg}$ boční expanze



Splynutí NS - NS: krátký gama záblesk

Krátké GRB: splynutí neutronových hvězd



**Pokud jsou krátké GRB produ-
kovány splynutím (srážkami)
neutronových hvězd →**

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

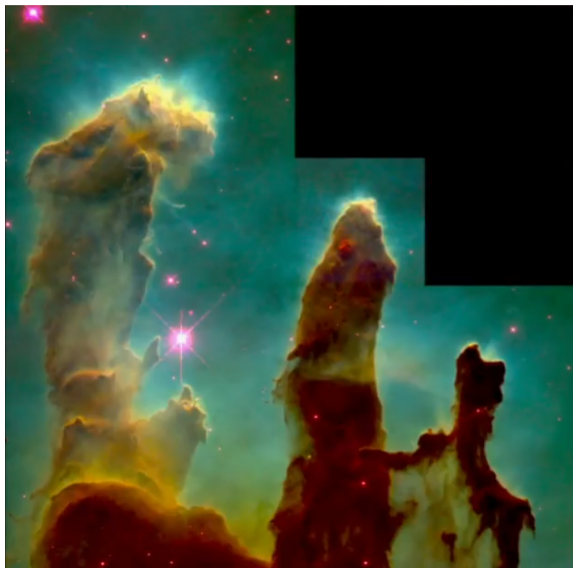


„Mrtvé“ eliptické galaxie

Hypernova (kolapsar): dlouhý gama záblesk

Hypernova (kolapsar): dlouhý gama záblesk

Dlouhé GRB: „explodující“ velmi hmotné hvězdy

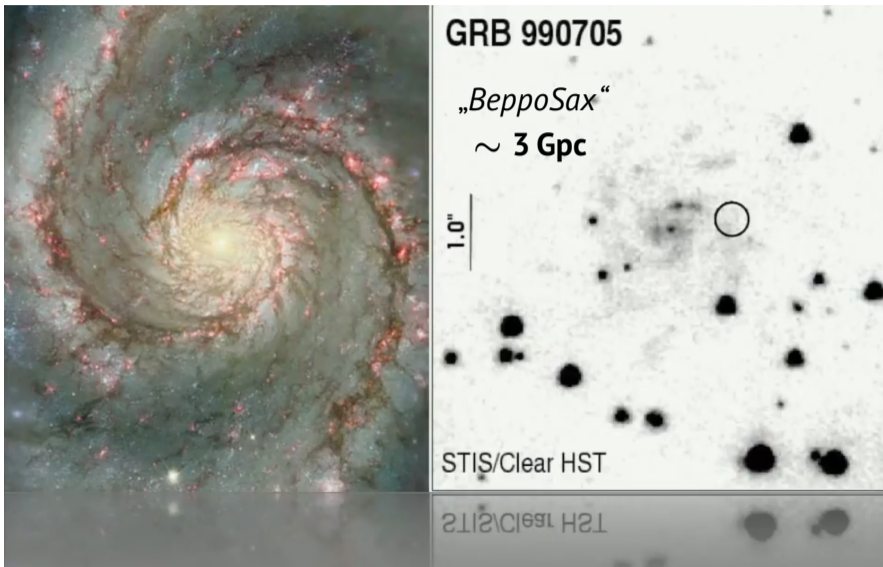


Pokud jsou dlouhé GRB produkovány těmi nejhmotnějšími hvězdami ve vesmíru → očekáváme jejich výskyt v oblastech, kde se nejhmotnější hvězdy nacházejí

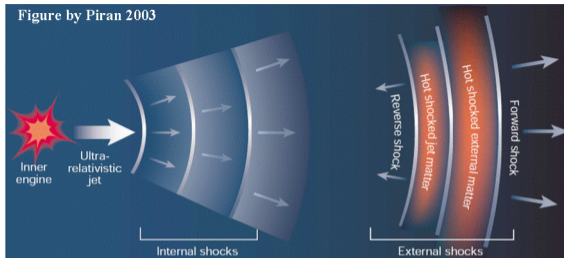


„Hvězdné porodnice“

Kde se dlouhé GRB vyskytují ?



Struktura GRB jetu:

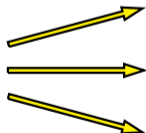


zdroj GRB

Centrální zdroj

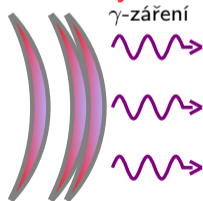


10^4 m



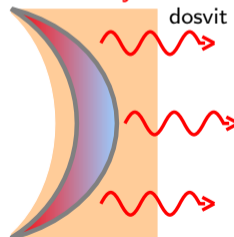
fotosféra
 $< 10^{10}$ m

Vnitřní rázové vlny



vnitřní disipace
 $10^{11}-10^{13}$ m

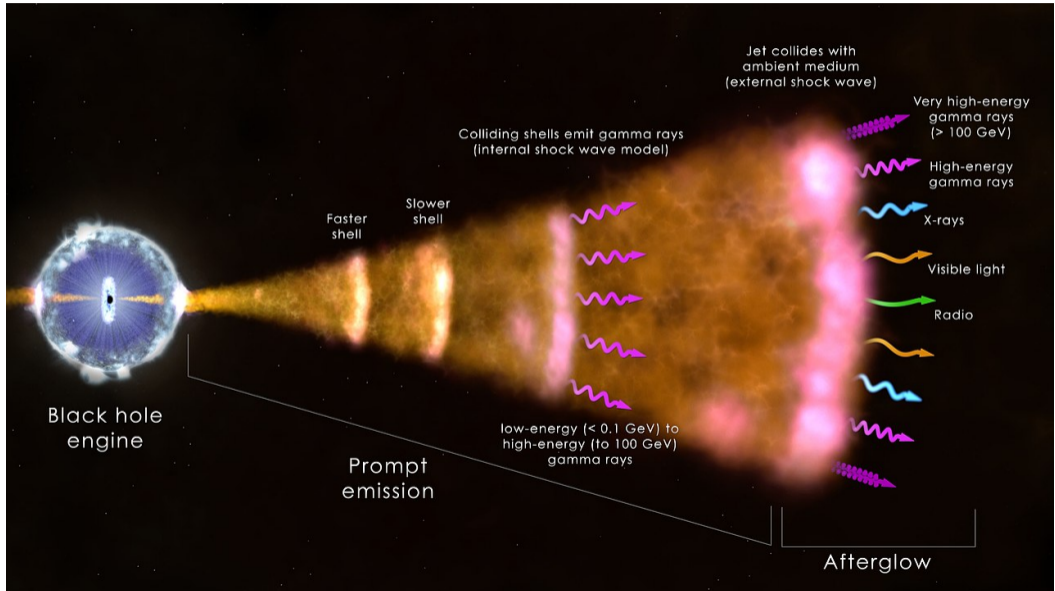
Vnější rázové vlny



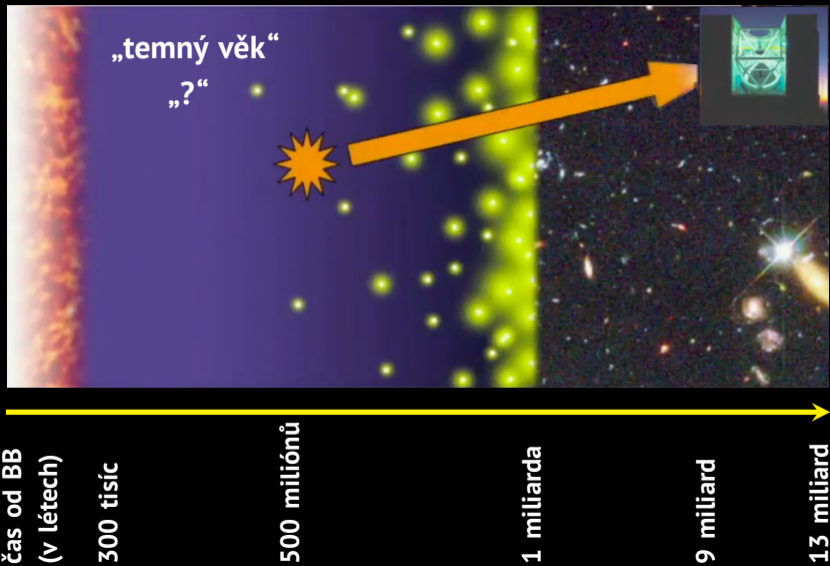
$10^{14}-10^{16}$ m

Struktura GRB jetu:

Struktura GRB jetu:



Záblesky gama záření jako „sondy“ do rodičího se vesmíru :



Záblesky gama záření jako „sondy“ do rodičího se vesmíru :



čas od BB
(v letech)

300 tisíc

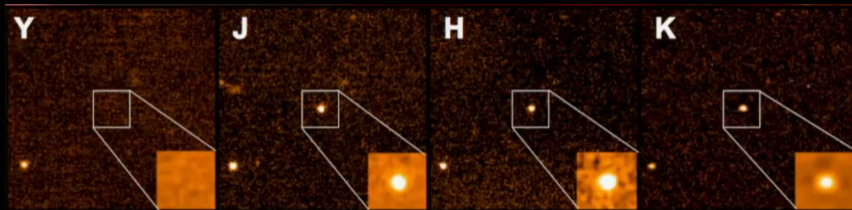
500 miliónů

1 miliarda

9 miliard

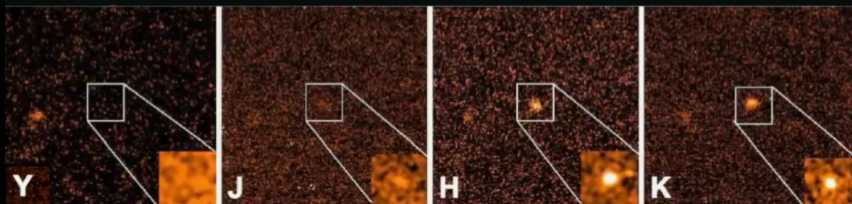
13 miliard

Překonávání rekordu pozorované vesmírné vzdálenosti:



630 miliónů let po Velkém třesku

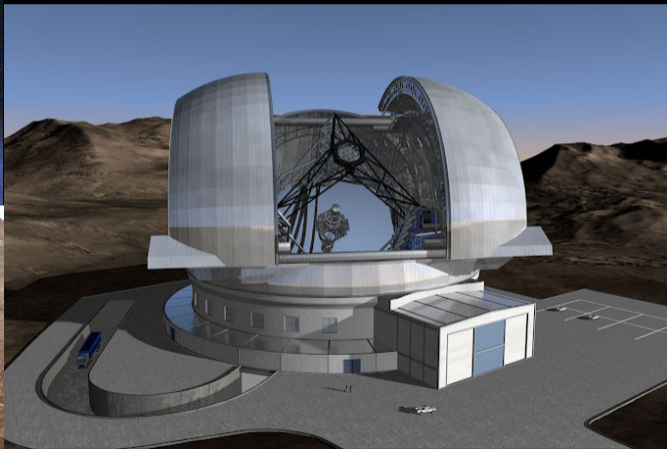
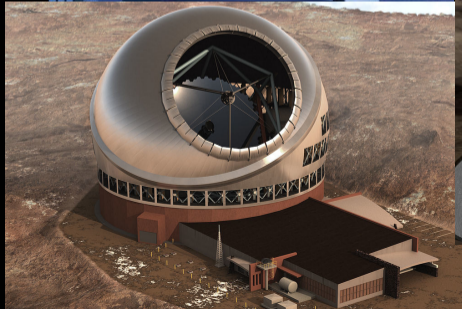
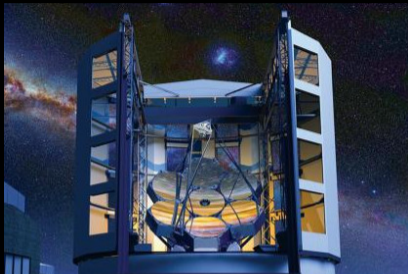
525 miliónů let po Velkém třesku



původ GRB detekován v „temném období“ -

stáří vesmíru pouze 4 % dnešního

Budoucnost: „obří“ teleskopy nové generace



Děkuji za pozornost