



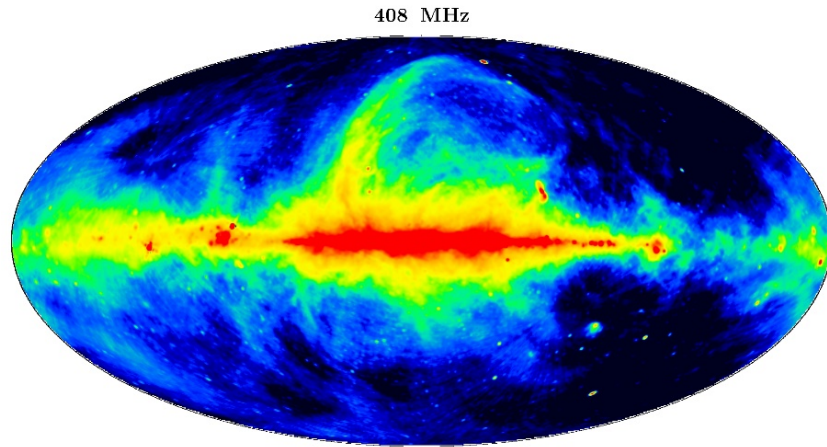
高エネルギー天体物理

浅野勝晃

(高エネルギー天体グループ)

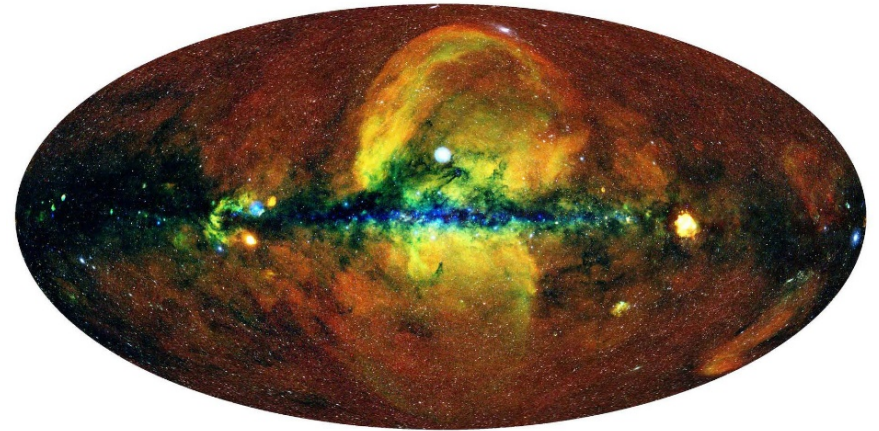
高エネルギーで輝く宇宙

電波 ($408\text{MHz} = 1.7 \times 10^{-6}\text{eV}$)

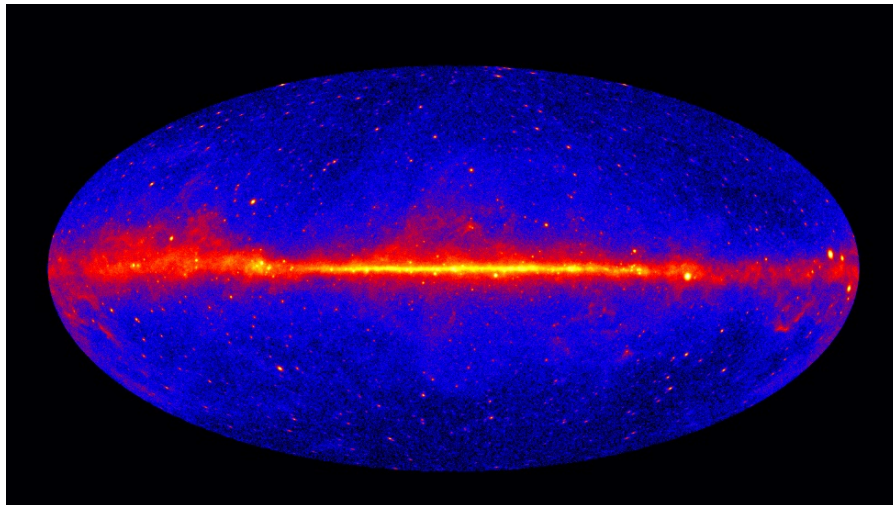


Jodrell-Bank 250-feet + Effelsberg 100-m + Parkes 64-m

X線 ($> 0.3\text{keV}$)



ガンマ線 ($> 1\text{GeV}$)



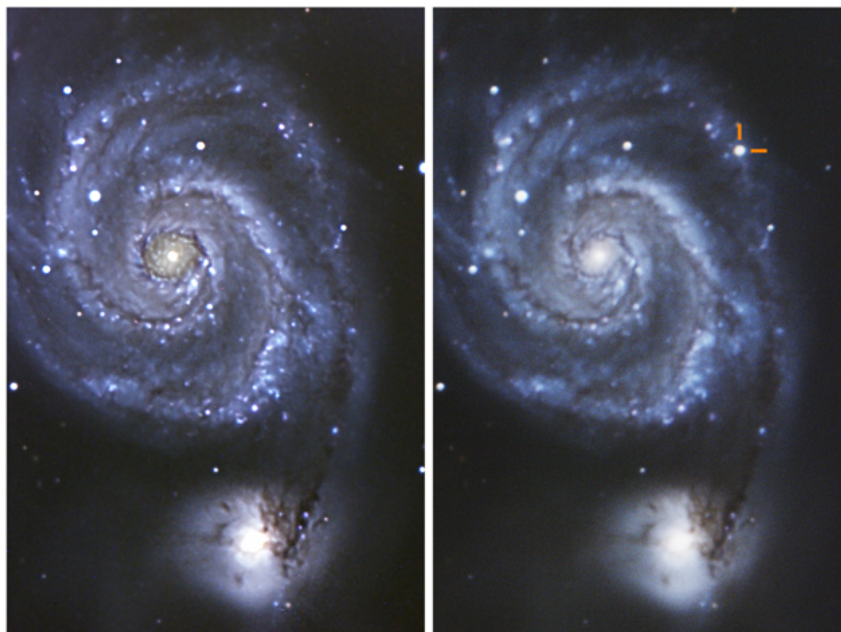
陽子質量 $m_p c^2 \sim 0.9\text{GeV}$

ガンマ線 ($> 0.2\text{TeV}$)

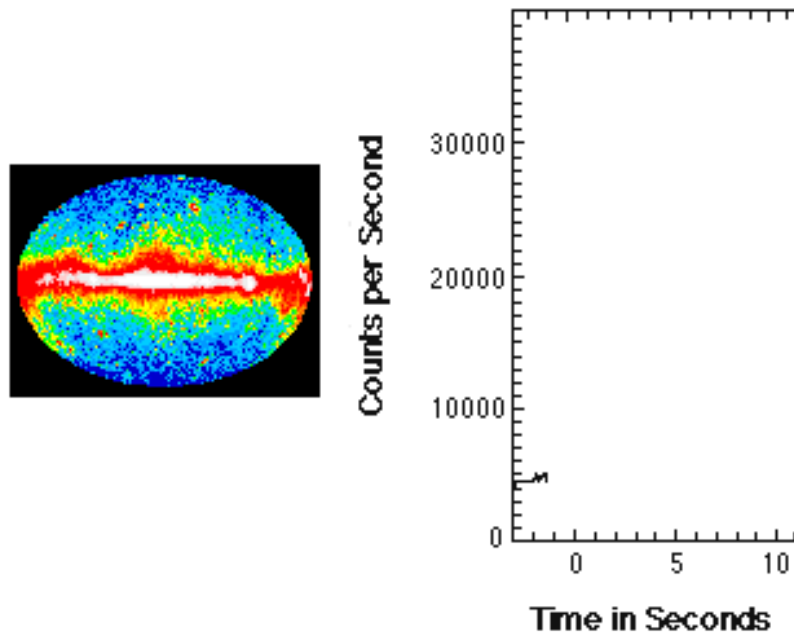


突発現象

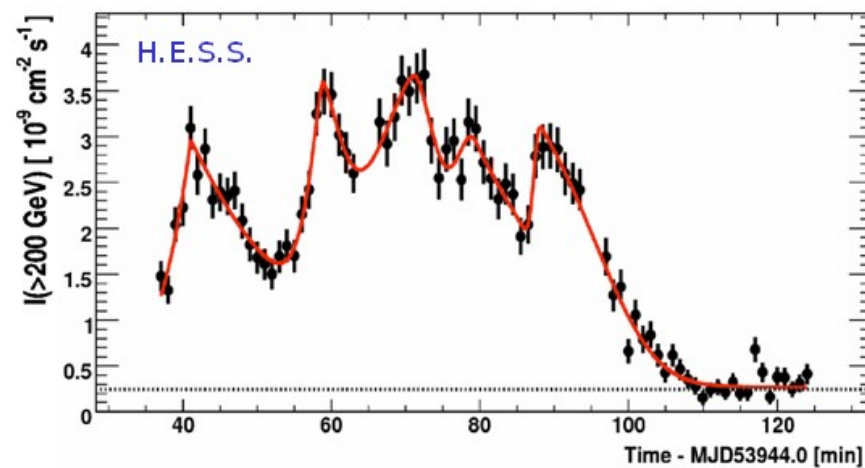
超新星爆発



ガンマ線バースト

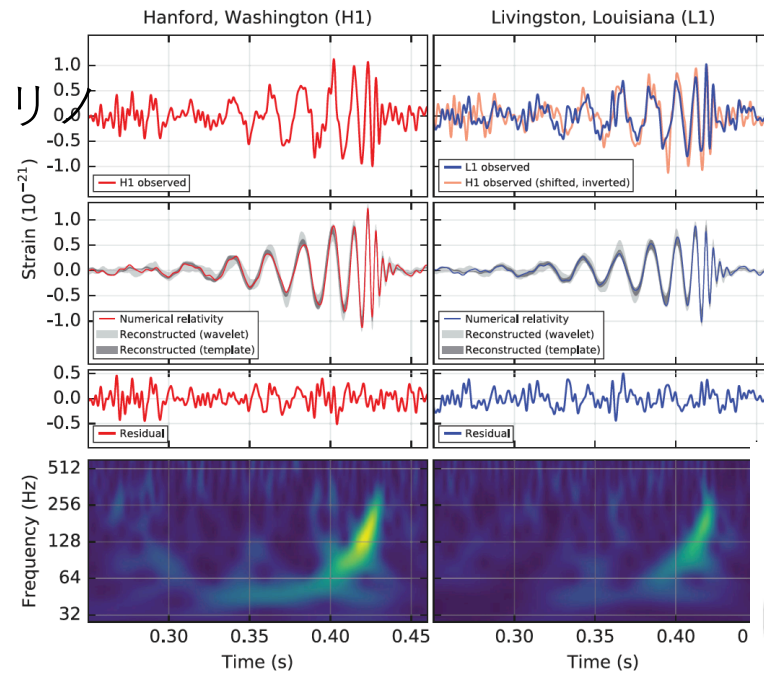
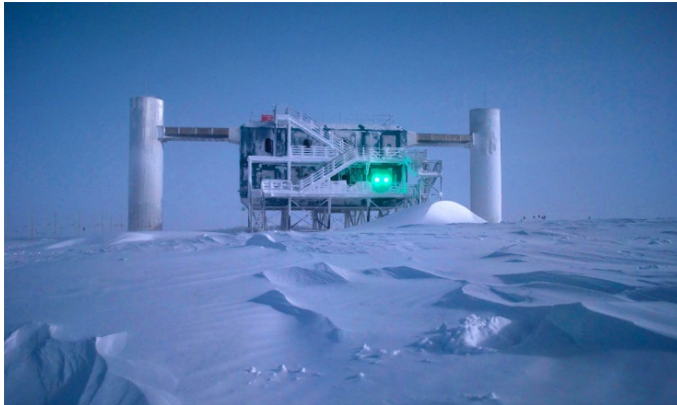


ブレーザーからのTeVガンマ線変動

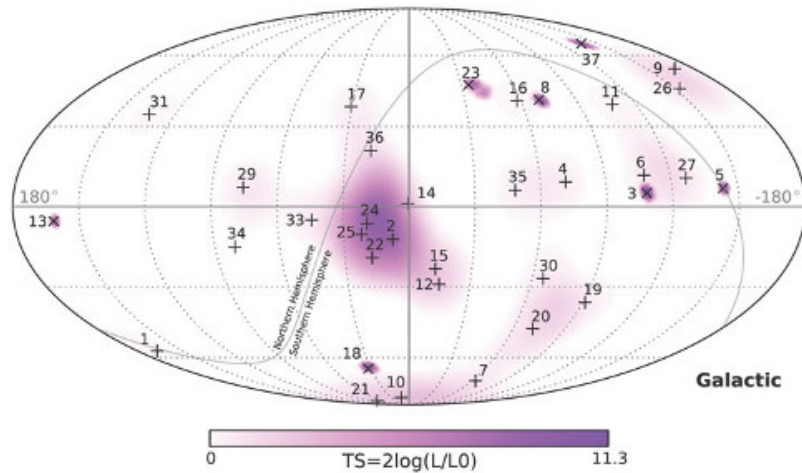


ニュートリノ・重力波・宇宙線

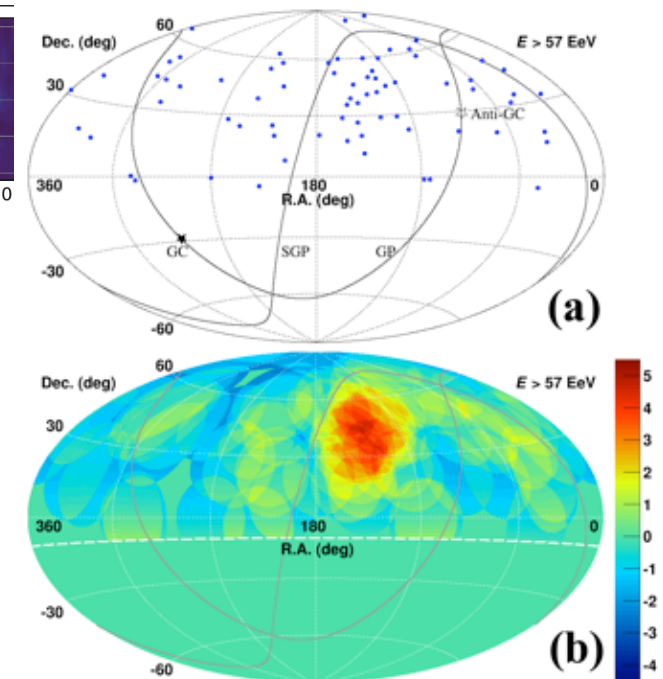
高エネルギー (PeV) ニュートリノ



最高エネルギー宇宙線
(100 EeV)



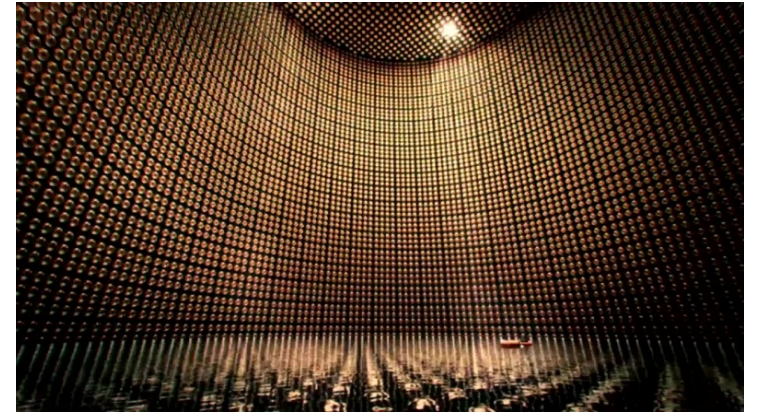
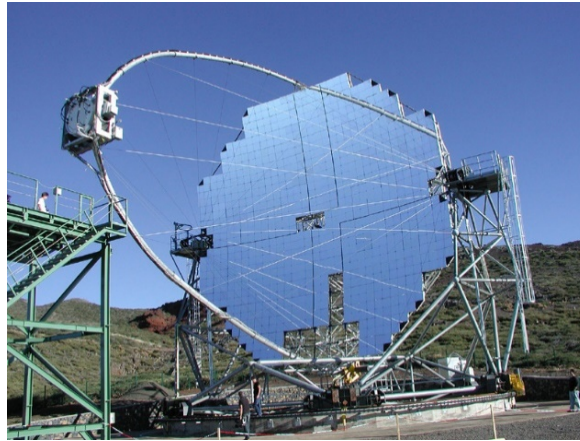
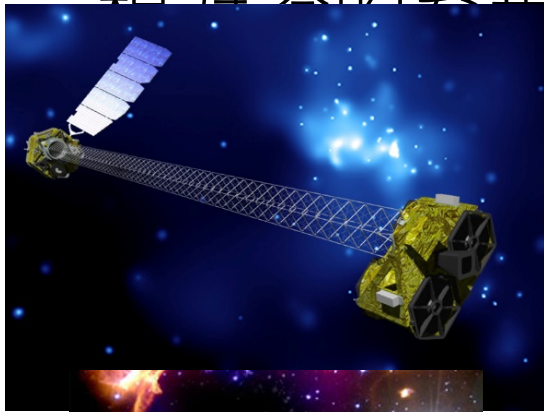
BH+BH 重力波



高エネルギー宇宙物理学

- 宇宙は静的ではなく、激しい活動に満ち溢れている。
- 高エネルギー粒子（光子・宇宙線・ニュートリノ）の起源は？
- 多様な現象。

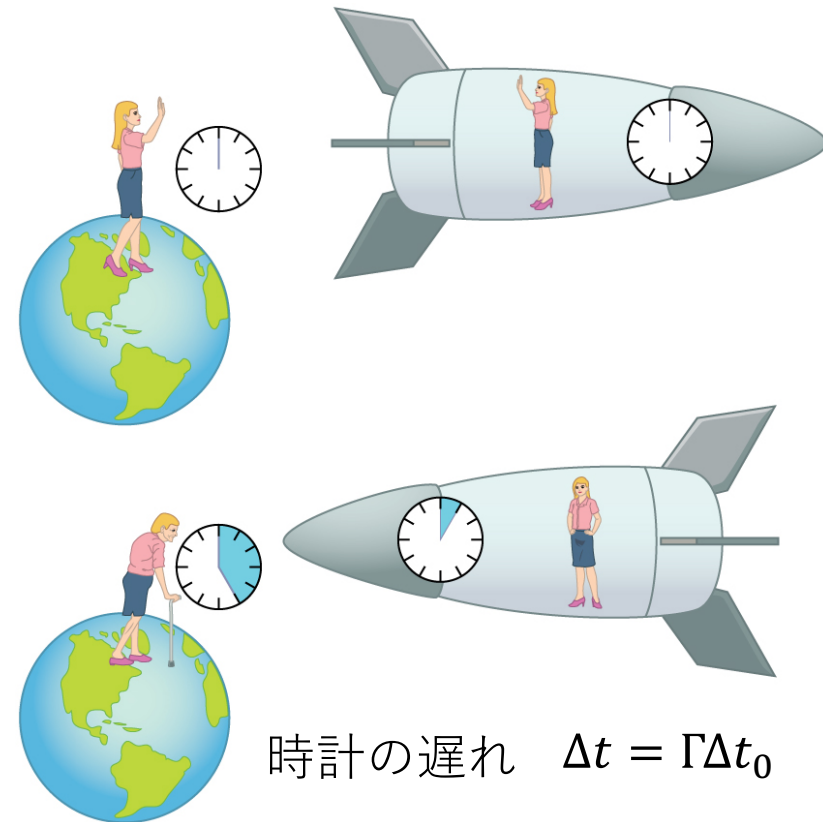
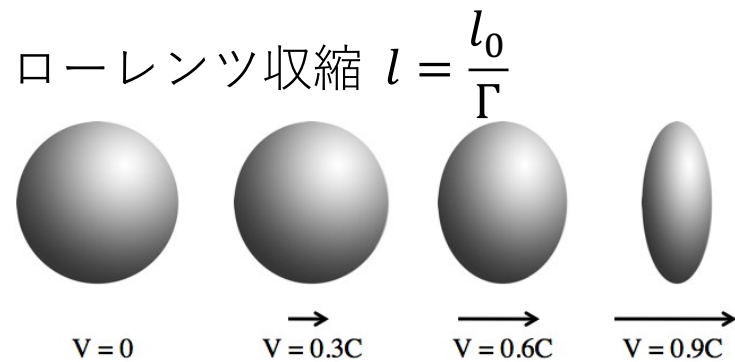
相対論的宇宙世界



高エネルギーの世界

高エネルギー：相対論的な世界

$$E = \Gamma mc^2, \quad \Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \gg 1$$



強重力の世界

半径R、質量Mの星からの脱出速度

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

脱出速度が光速になってしまう半径

$$R_g = \frac{2GM}{c^2} : \text{シュワルツシルト半径}$$

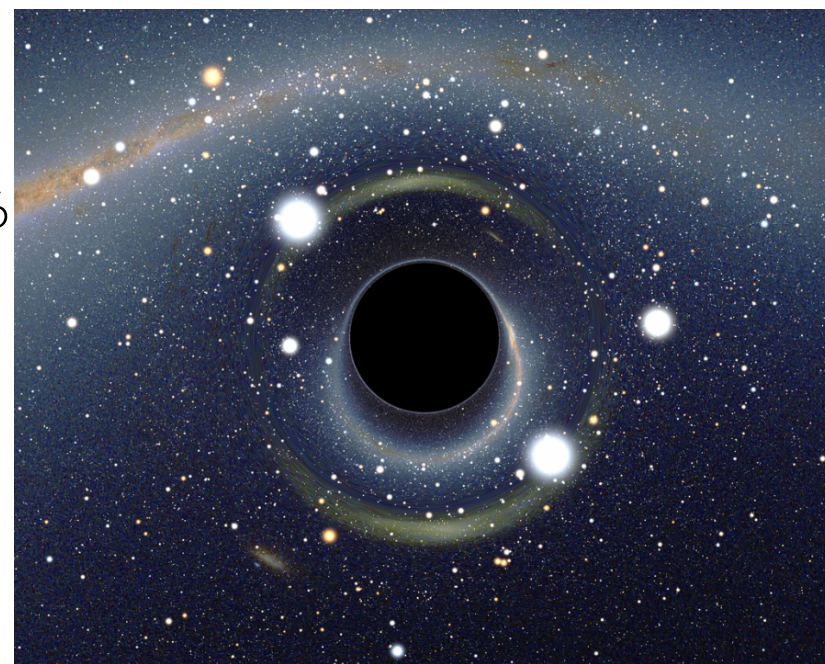
これよりも小さな半径の星はブラックホールになる
太陽質量なら3kmほど。

回転するブラックホール

角運動量

$$J_{\text{BH}} = a \frac{GM_{\text{BH}}^2}{c}$$

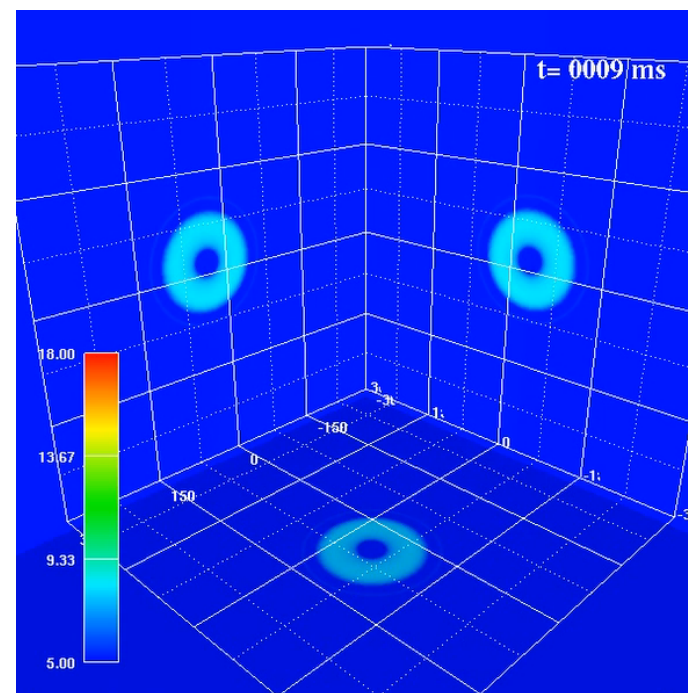
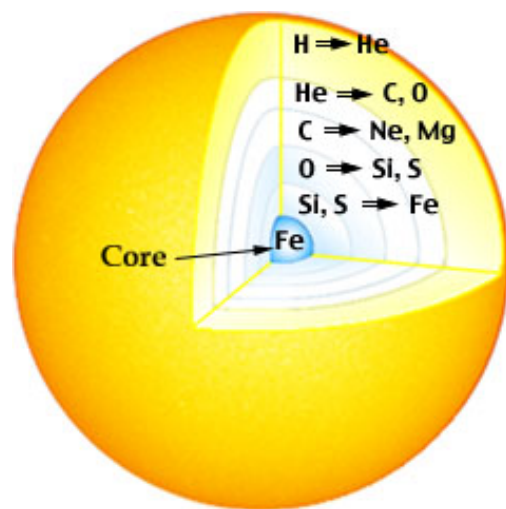
$$a < 1$$



ブラックホールを特徴づける量は質量Mと
回転パラメーターaのみ。

超新星爆発

巨星が寿命を迎えて爆発。中心に中性子星を残す。



- 鉄は最も安定な原子核
- 温度が上がると鉄が壊れる（吸熱反応）
- 圧力が下がり、鉄のコアが収縮
- 密度が原子核密度に達し、原始中性子星が形成
- 収縮が止まり、降り積もるガスに衝撃波が形成
- 高温の中性子星からのニュートリノでガスを加熱
- 爆発？

数値シミュレーションでは未だ爆発に成功していない

超新星残骸と宇宙線生成



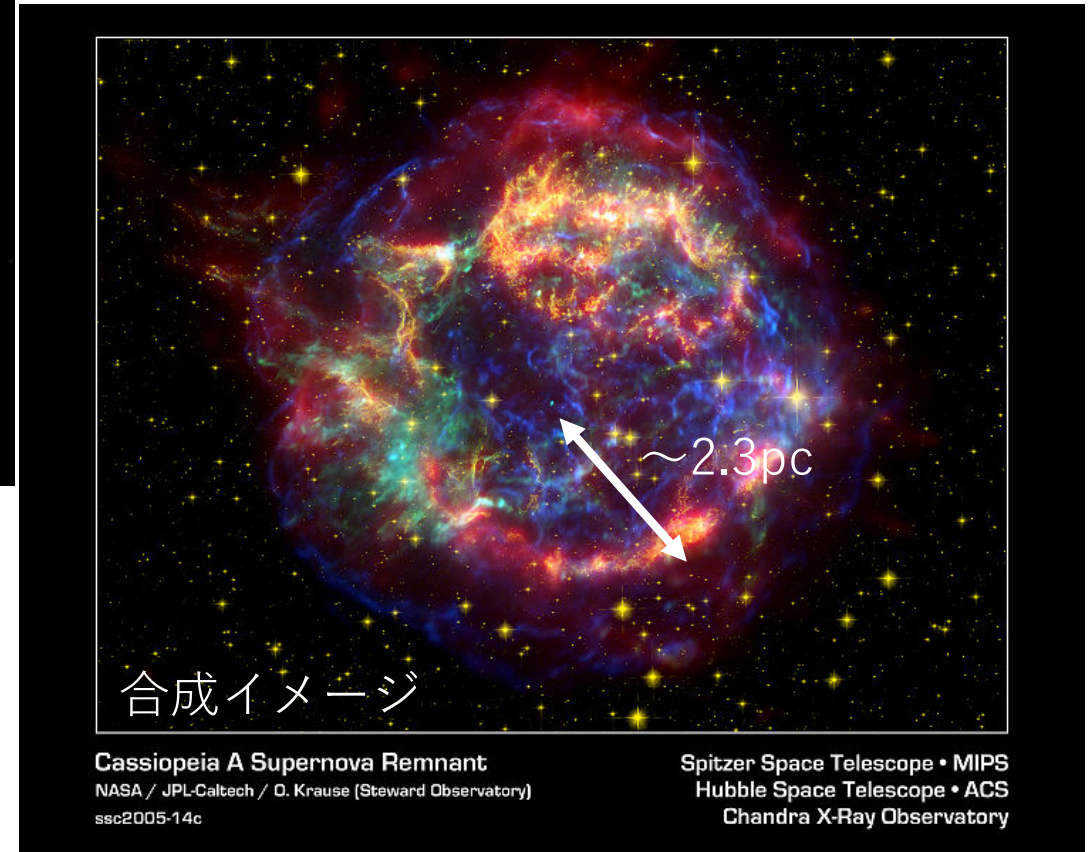
爆発による衝撃波が星間空間を伝播



衝撃波による粒子加速
高エネルギー粒子の生成

$$\varepsilon \gg m_e c^2, m_p c^2$$

1667年頃に爆発したCassiopeia A

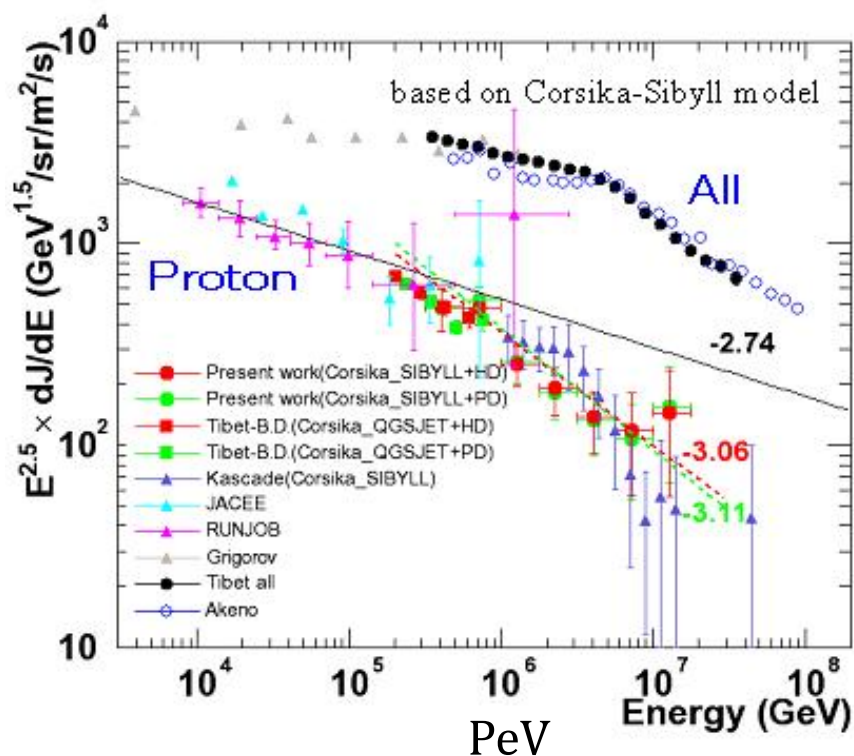


距離：3.4kpc

膨張速度：4000-5000km/s

中心には中性子星が残される

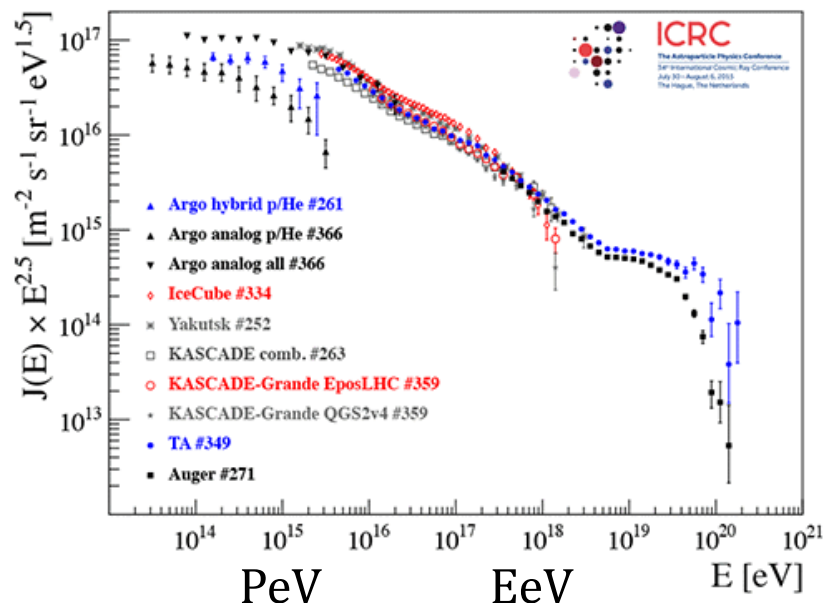
宇宙線



$10^{15}\text{eV} = \text{PeV}$ 付近の折れ曲がり
= Knee

Knee以下のエネルギーの宇宙線は、
超新星残骸で加速されたと考えられている。

Kneeより上の宇宙線の起源は謎。



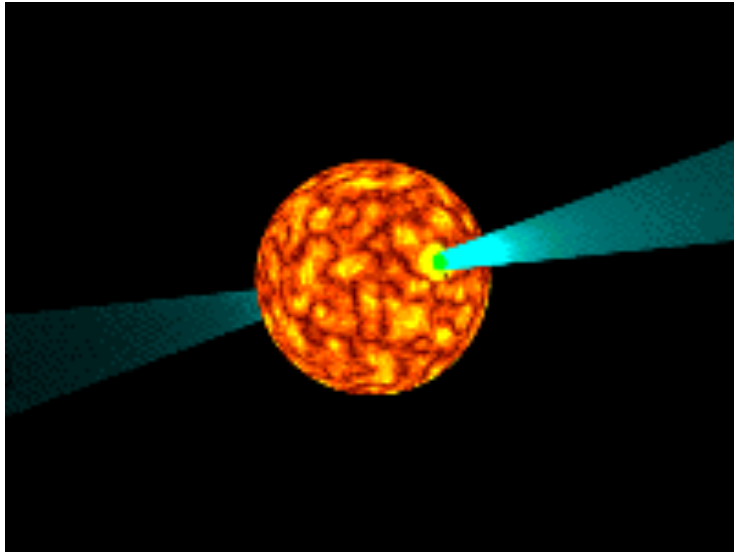
$10^{18}\text{eV} = \text{EeV}$ 付近の折れ曲がり
= Ankle

$$r_L = \frac{E}{eB} \simeq 1 \left(\frac{E}{10^{18}\text{eV}} \right) \left(\frac{B}{10^{-6}\text{G}} \right)^{-1} \text{ kpc}$$

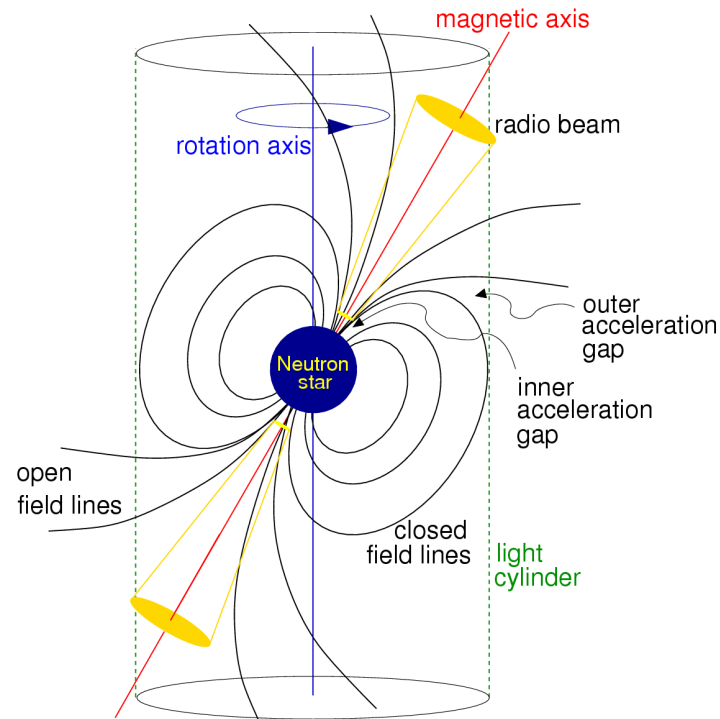
Ankleより上の宇宙線は銀河磁場では
閉じ込めておく事ができない。
銀河系外起源と考えられている。

パルサー

パルサー



強磁場中性子星。周期1ms-1sで自転する半径10kmの高密度天体（ $\sim 10^{15}\text{g/cm}^3$ ）。規則正しいパルス放射。典型的には 10^{12}G 。中には 10^{15}G までにも達するものもあり、マグネターと呼ばれる。QEDの効果が無視できない。



$$|\mu| \simeq B_p R_\star^3 / 2$$

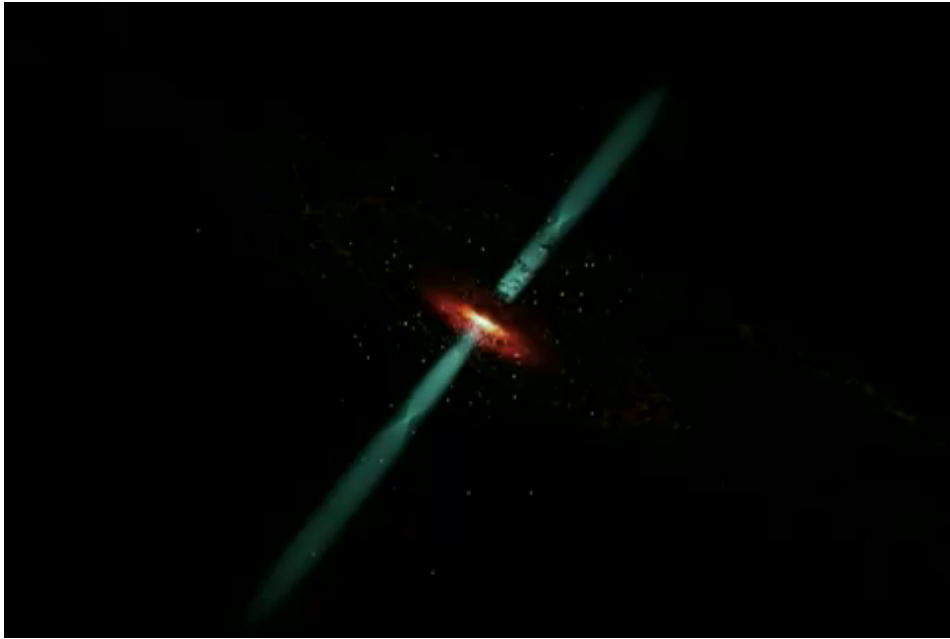
$$|\ddot{\mu}| \simeq |\mu| \Omega_{\text{rot}}^2$$

$$\left. \frac{dE}{dt} \right|_{\text{SD}} = I \Omega_{\text{rot}} \dot{\Omega}_{\text{rot}} = -\frac{2}{3} \frac{|\ddot{\mu}|^2}{c^3} \simeq -\frac{B_p^2 R_\star^6 \Omega_{\text{rot}}^4}{6c^3}$$

吸収係数（エネルギー ε の光子が単位距離進んだ時に電子・陽電子を作る確率）

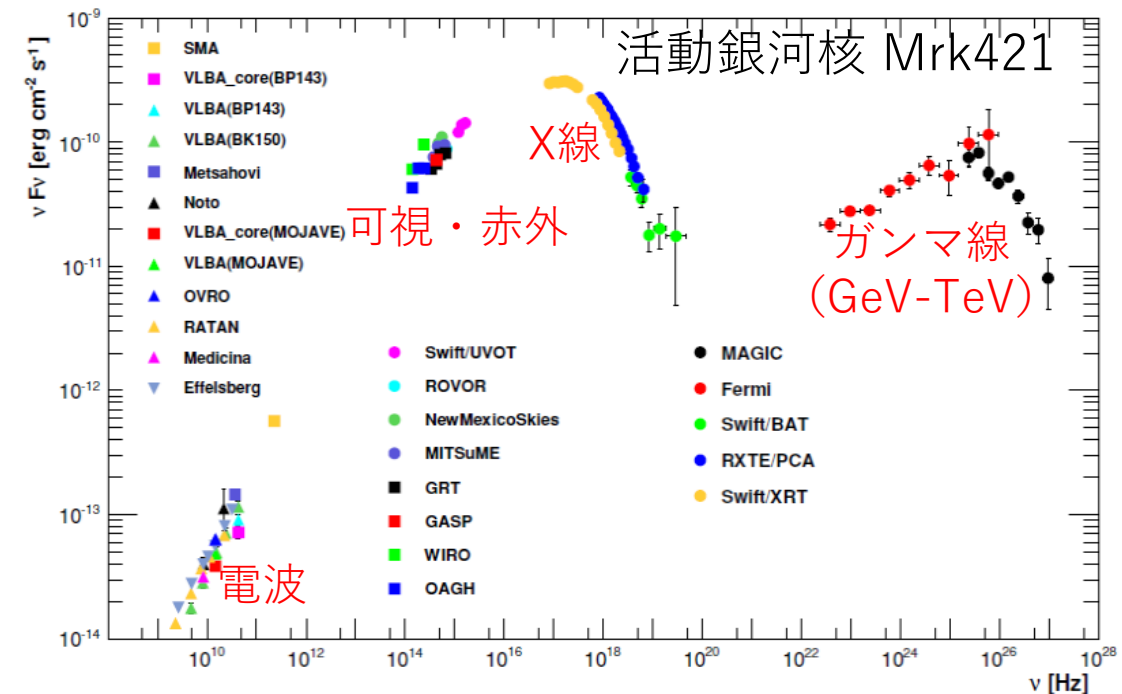
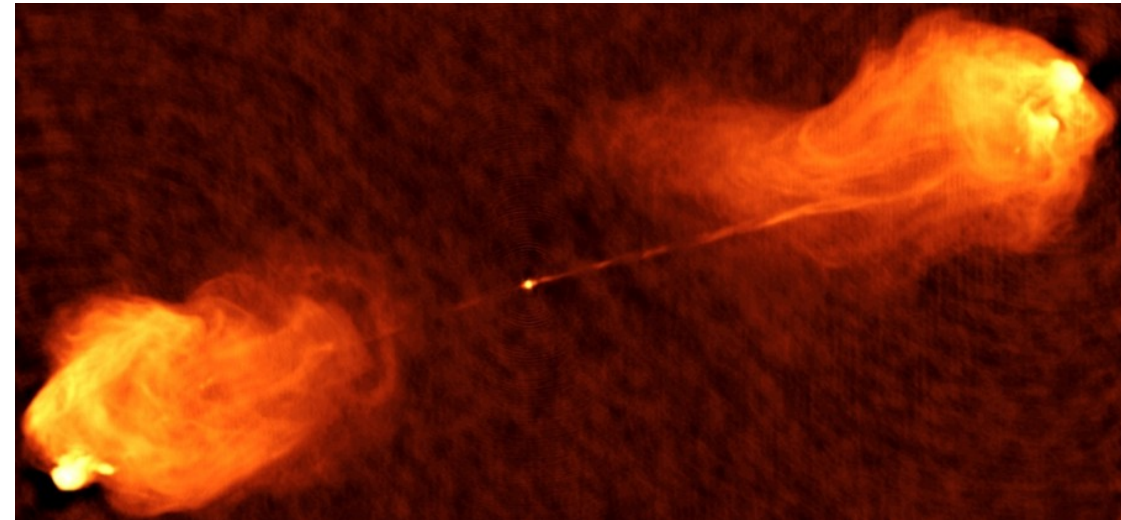
$$\alpha_B = \frac{1}{2} \frac{m_e e^2}{\hbar^2} \frac{B_\perp}{B_{\text{cr}}} \Xi(\chi), \quad \chi = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon}{m_e c^2} \frac{B_\perp}{B_{\text{cr}}}, \quad B_{\text{cr}} = \frac{m_e^2 c^3}{\hbar e} = 4.41 \times 10^{13} \text{ G}.$$

活動銀河核ジェット



宇宙最大のブラックホール ($10^7 - 10^9$ 太陽質量)
からのジェット噴出

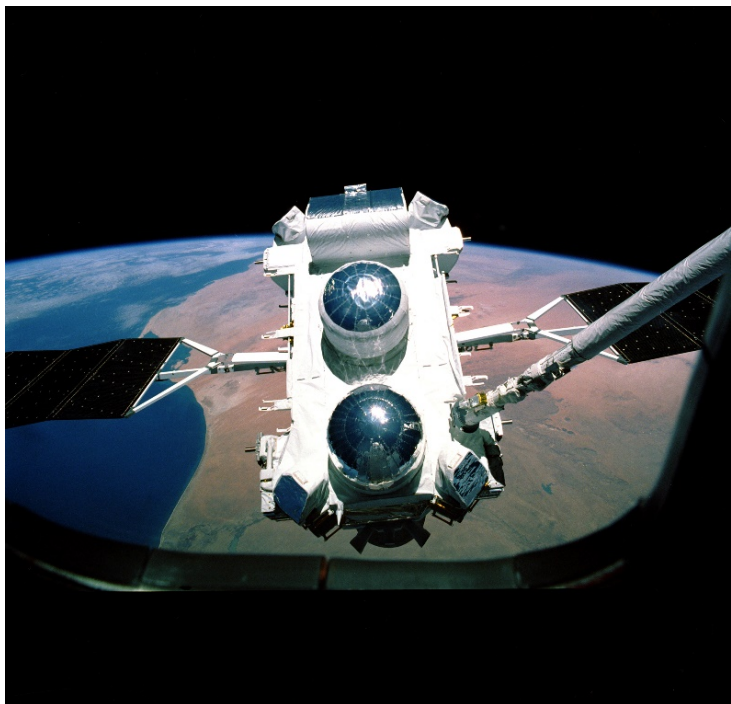
「 >10 の光速ジェットから電波、X線、ガンマ線を放出。



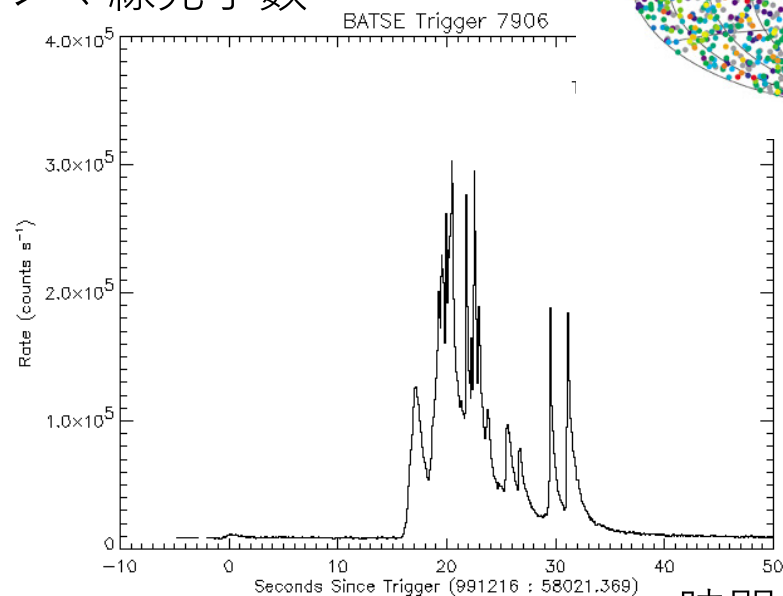
高エネルギー天体物理の目標

- 電波からX線・ガンマ線にいたる放射メカニズム
- 高エネルギーまで粒子を加速するメカニズム
- ブラックホールから噴出するジェット生成メカニズム
- 超新星爆発のメカニズム
- 10^{20}eV を超える最高エネルギー宇宙線の加速源天体
- 天体からのニュートリノや重力波の放射
- 暗黒物質探査

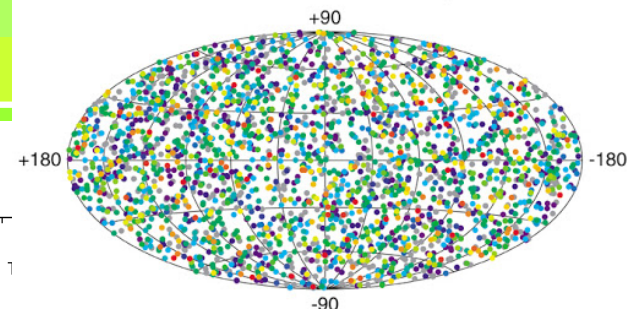
ガンマ線バースト



ガンマ線光子数



2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



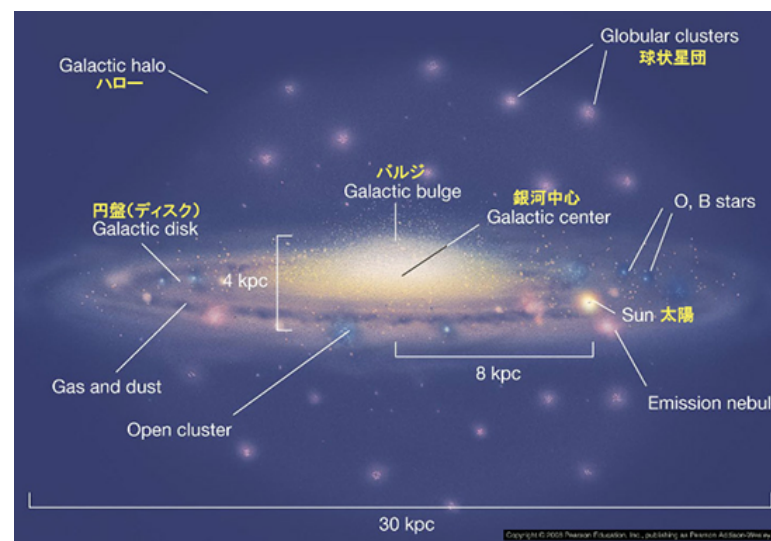
等方に起きている

時間 (秒)

時間変動は最短で1/1000秒
→光源の大きさは $< c \times 1/1000 = 300\text{km}$

距離が判らない。

- 太陽系内 ($\sim 1\text{AU} \sim 10^{13}\text{cm}$)
- 太陽系近傍 ($\sim 100\text{pc} \sim 10^{20}\text{cm}$)
- 銀河中心 ($\sim 10\text{kpc} \sim 10^{22}\text{cm}$)
- 近傍銀河 ($\sim \text{Mpc} \sim 10^{24}\text{cm}$)
- 遠方宇宙 ($\sim \text{Gpc} \sim 10^{27}\text{cm}$)



爆発の規模

典型的な明るさ $f \sim 10^{-7} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 継続時間 10s

ガンマ線の解放エネルギー $E = 4\pi D^2 f 10\text{s}$

$$= 10^{26} \left(\frac{D}{10^{13} \text{cm}} \right)^2 \text{erg}$$

$$= 10^{54} \left(\frac{D}{10^{27} \text{cm}} \right)^2 \text{erg}$$

広島型原爆 $\sim 10^{21} \text{erg}$

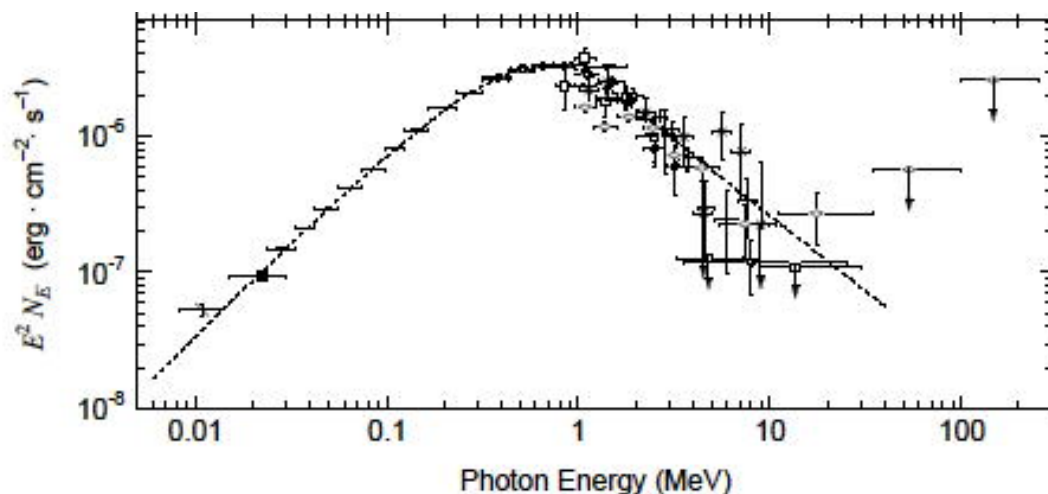
東日本大震災 $\sim 10^{25} \text{erg}$

恐竜絶滅時の隕石衝突 $\sim 10^{30} \text{erg}$

超新星の放射光 $\sim 10^{48} \text{erg}$

超新星爆発 $\sim 10^{51} \text{erg}$

太陽の質量 $\sim 10^{54} \text{erg}$



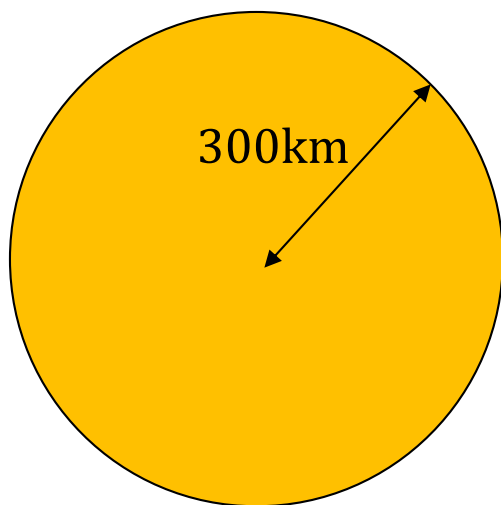
光子の典型的エネルギー $\sim \text{MeV} \sim m_e c^2$



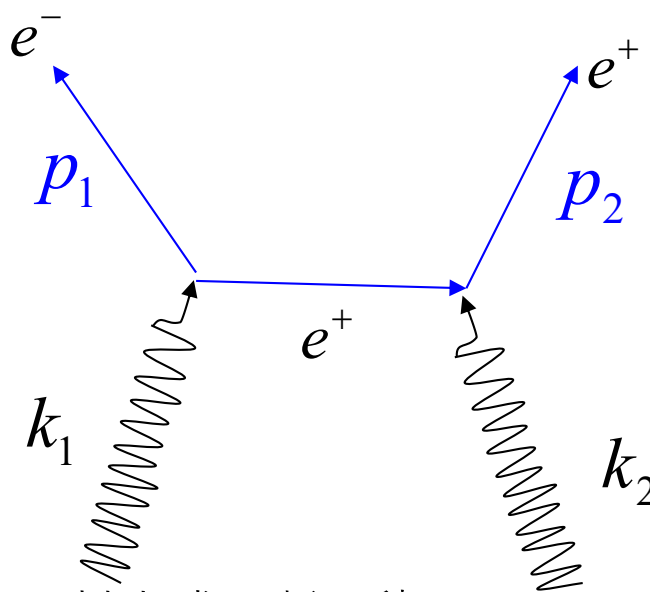
距離が宇宙論的だったら…

$$\text{光子数 } \frac{10^{54} \text{erg}}{1 \text{MeV}} \sim 10^{60}$$

$$\text{密度 } n \sim \frac{10^{60}}{(300 \text{km})^3} \sim 10^{37} \text{cm}^{-3}$$



$$\gamma + \gamma \leftrightarrow e^- + e^+$$



電子陽電子対生成の断面積

$$y^2 \equiv 1 - \frac{2m_e^2 c^4}{\varepsilon \varepsilon' (1 - \cos \theta_{\text{in}})} < 1$$

$$\sigma_{\gamma\gamma} = \frac{3\sigma_T}{16} (1 - y^2) \left[(3 - y^4) \ln \frac{1 + y}{1 - y} - 2y(2 - y^2) \right] \sim 10^{-25} \text{cm}^2$$

光学的深さ

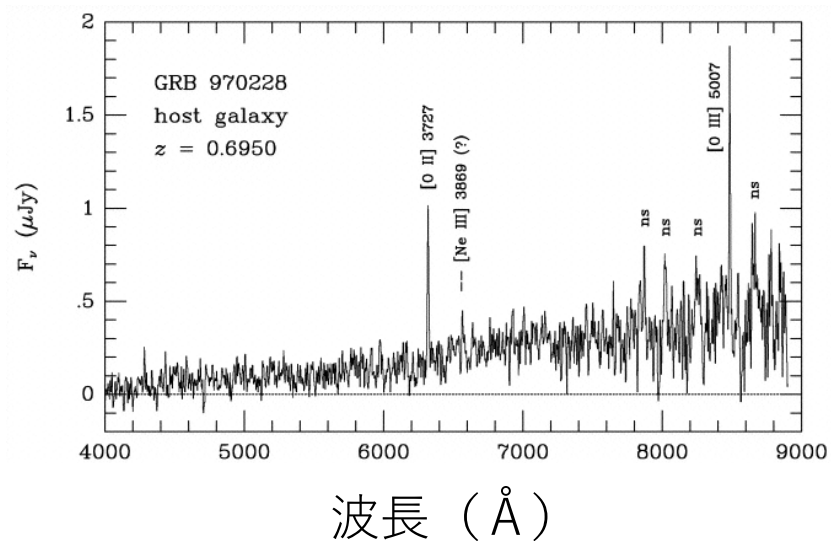
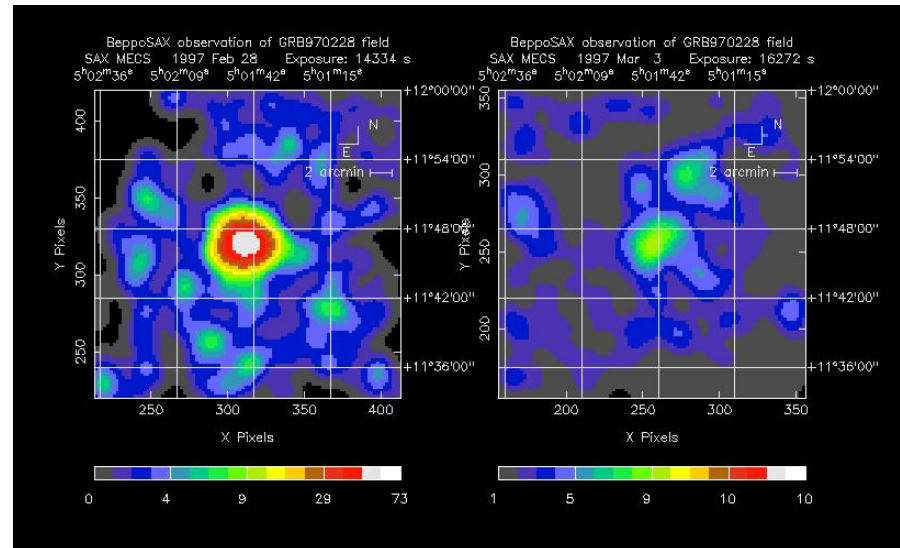
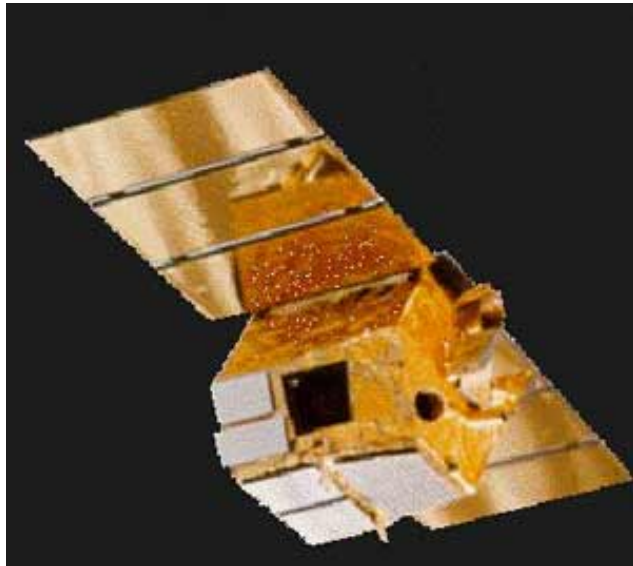
$$\tau = n \sigma_{\gamma\gamma} 300 \text{km} \sim 10^{19} \gg 1$$

ガンマ線は脱出できない！→多分近傍の現象だろう…

やばい奴だった

BeppoSaxが追観測に成功

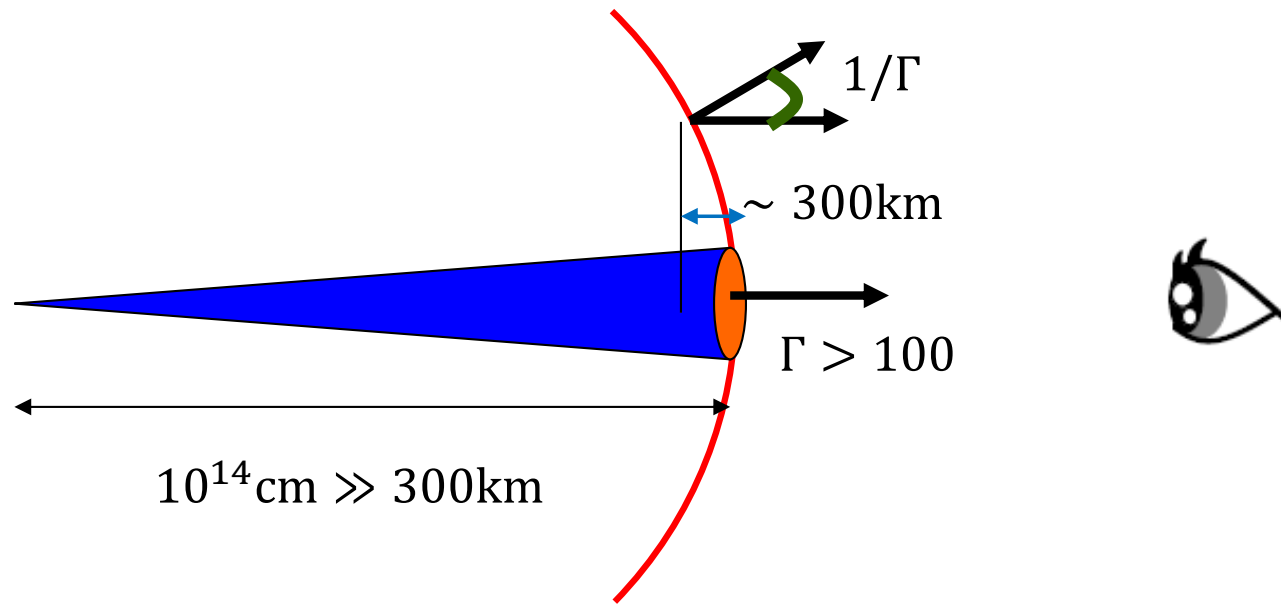
徐々に暗くなるX線



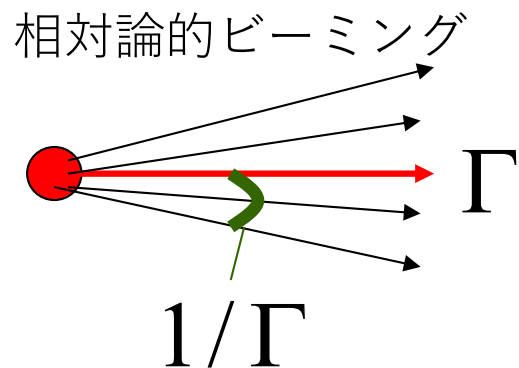
母銀河を発見->Gpc

巨大な爆発エネルギー、
電子・陽電子対生成の問題は？

相対論の効果

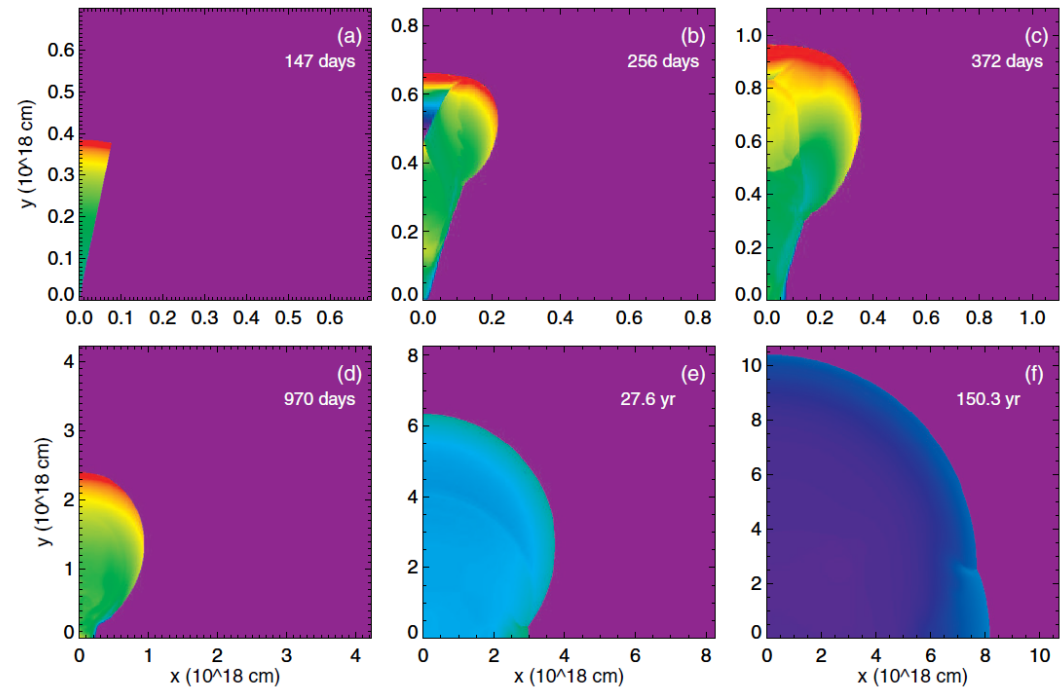
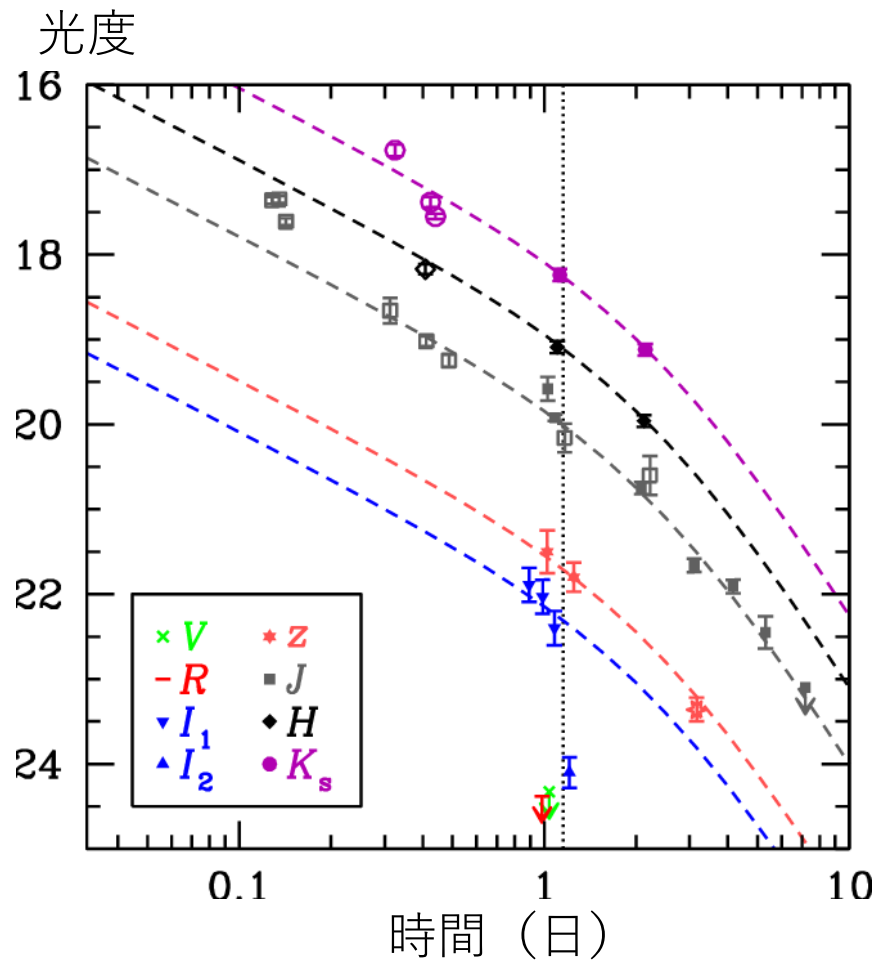


放射体が $\Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} > 100$ でこちらに運動していれば良い。



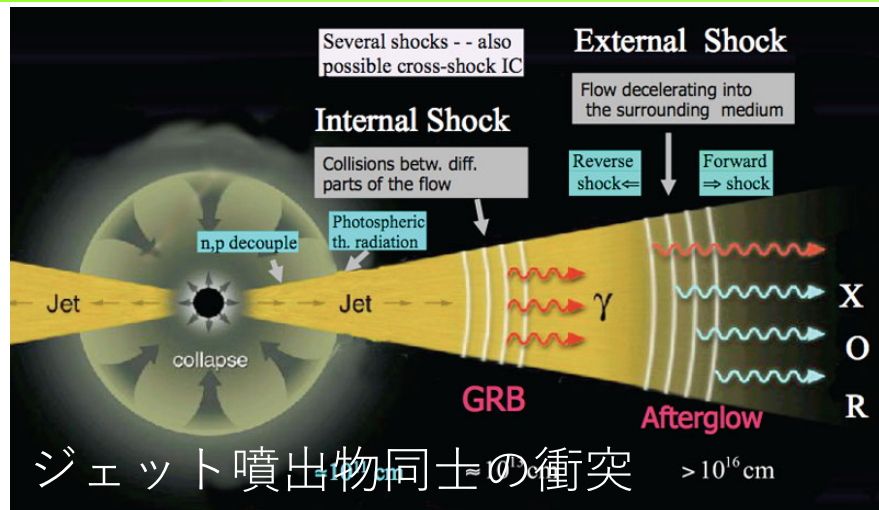
光子の運動方向が揃い、衝突しにくい。

残光 = 減速する相対論的ジェット

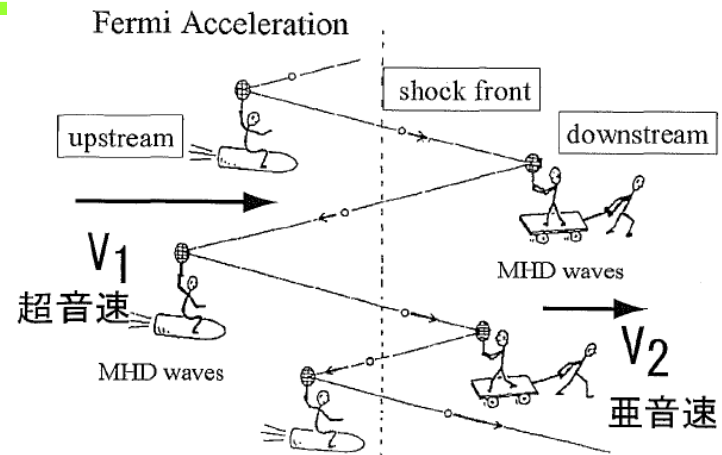
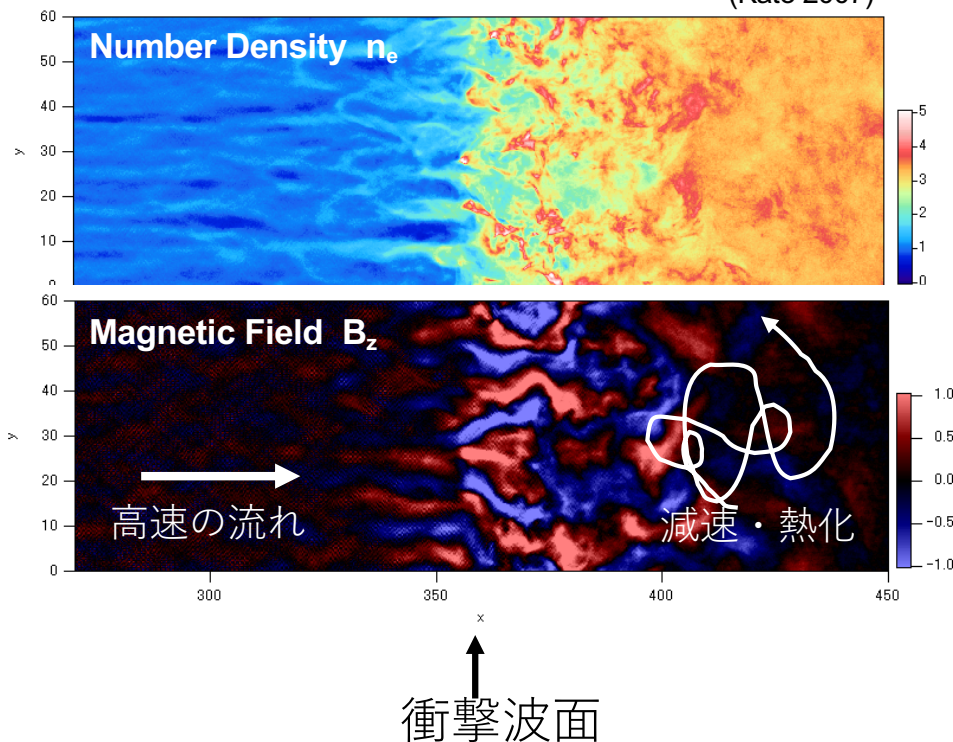


徐々に減光するX線・可視光・電波＝残光
は、徐々に減速する相対論的ジェットからの
放射考えて無矛盾。
ジェットが横に広がる、ジェットブレークが、
残光の光度曲線にも表れている。

どうやってガンマ線を放つか？



(Kato 2007)



相対速度を持つ二流体間で粒子が往復することで、エネルギーを得る。

$$\text{一回往復する毎に得るエネルギー} \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \approx \frac{4}{3} \frac{v_{\text{rel}}}{c}$$

$$\varepsilon \approx \varepsilon_0 \exp \left(n \frac{4}{3} \frac{v_{\text{rel}}}{c} \right)$$

$$\text{もう一度往復する確率} 1 - 4 \frac{v_d}{c}$$

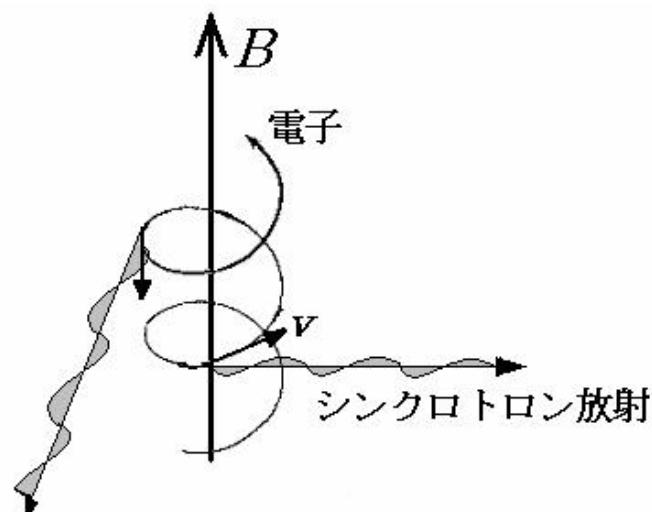
$$P(> n) \approx \exp \left(-4n \frac{v_d}{c} \right) \propto \varepsilon^{-3v_d/v_{\text{rel}}} \quad \text{ベキ分布}$$

高エネルギー電子の生成

陽子も同様に加速→最高エネルギー宇宙線源？

放射過程

シンクロトロン放射



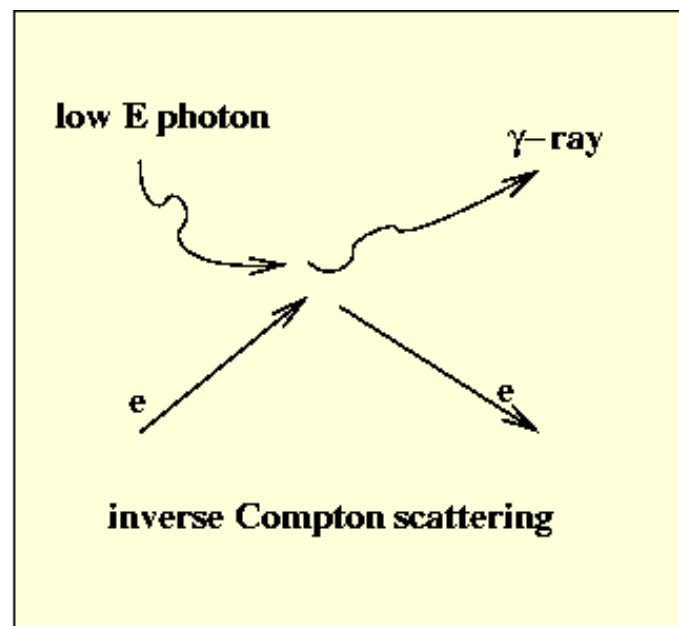
シンクロトロン放射。vは電子の速度ベクトルを表す。シンクロトロン放射は、磁力線に垂直に直線偏波しており、磁場に垂直な速度成分 $v_{\perp}$ 方向のごく狭い領域にのみ放射される。

電子のエネルギー $\varepsilon = \gamma m_e c^2$

典型的な光子のエネルギー $\varepsilon_{\text{typ}} = \frac{3\hbar\gamma^2 eB}{2mc}$

放射率 $\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{4}{3} c \sigma_T \gamma^2 U_B$

逆コンプトン散乱



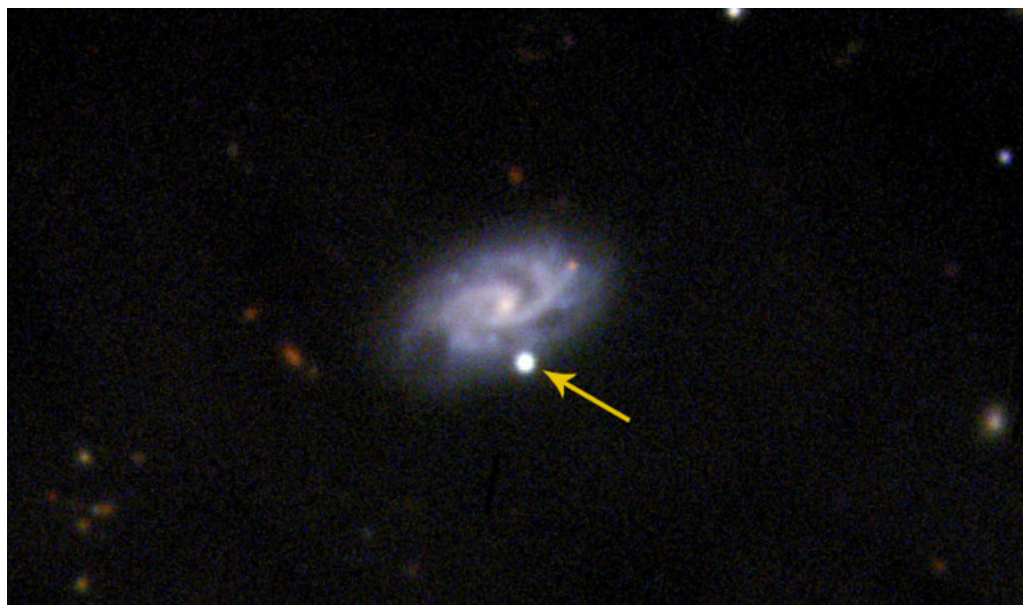
典型的な光子のエネルギー $\varepsilon_{\text{typ}} = \gamma^2 \varepsilon_0$

放射率 $\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{4}{3} c \sigma_T \gamma^2 U_{\text{ph}}$

種光子が自ら放ったシンクロトロン光子
⇒ シンクロトロン自己コンプトン
3K背景放射などの外部光子
⇒ 外部コンプトン

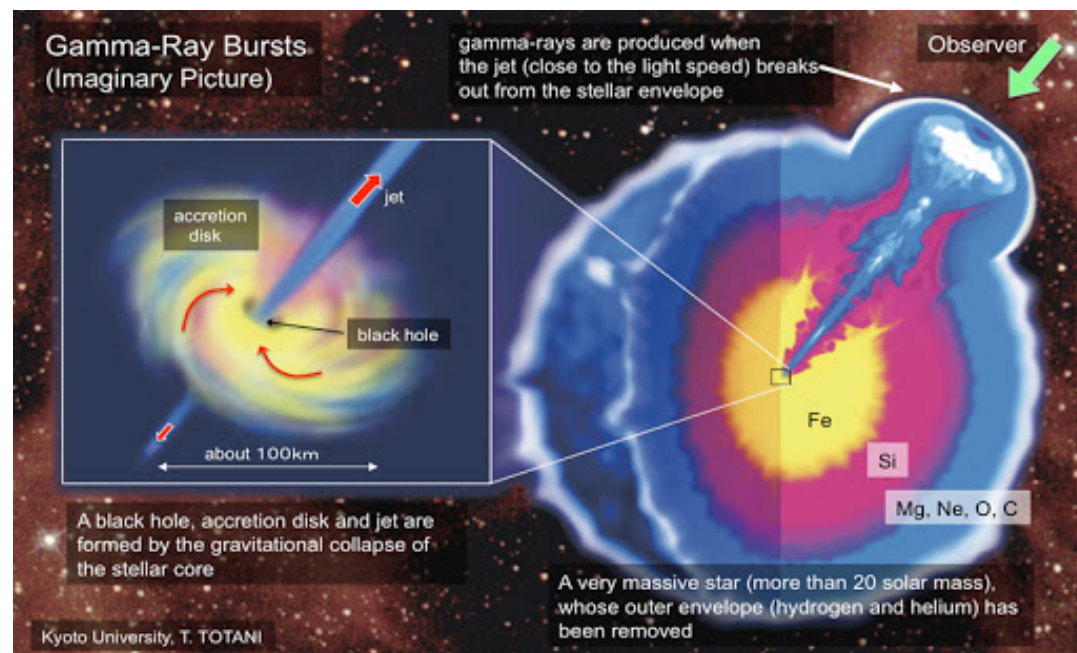
ジェットの源は？

ガンマ線バーストが起きた場所で
異常に明るい超新星が見つかる。



GRB 171205A

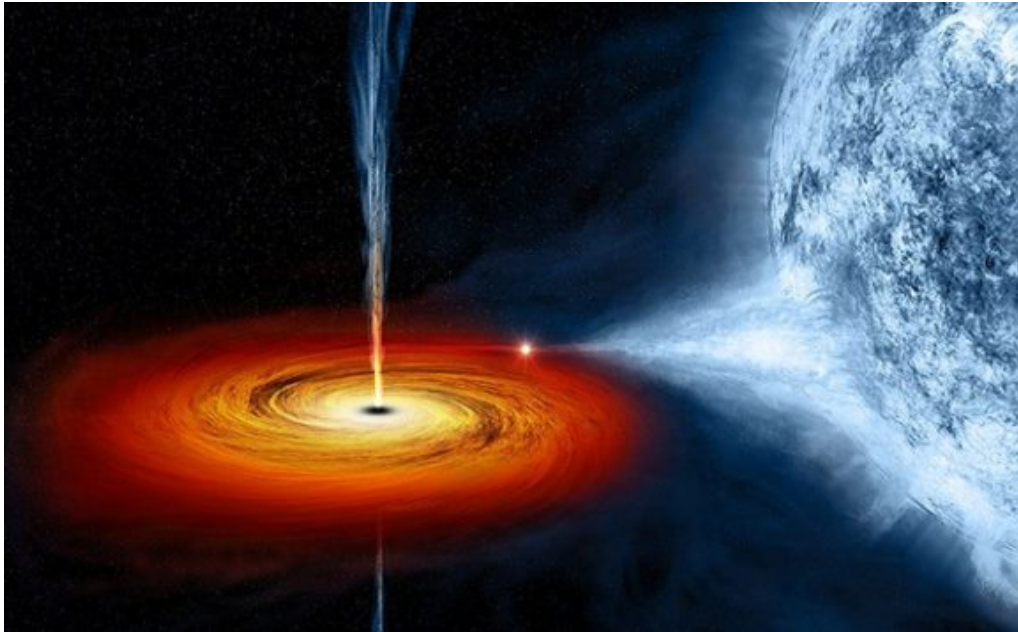
Collapser シナリオ



回転する巨星の死→ブラックホールと
降着円盤
あるいは超強磁場中性子星＝マグネター

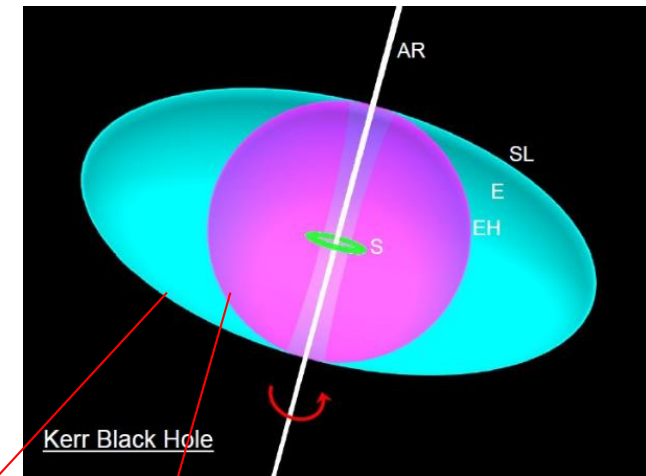
ジェットのエネルギー源

降着円盤



実効的な粘性（乱流磁場）を介して、
角運動量を失ってブラックホールに落ち込むガス。
ポテンシャルエネルギー($\sim \frac{GM}{R}$) → 熱エネルギー
→ 放射

BHの回転エネルギーを磁場を介して引抜く
“負のエネルギー”

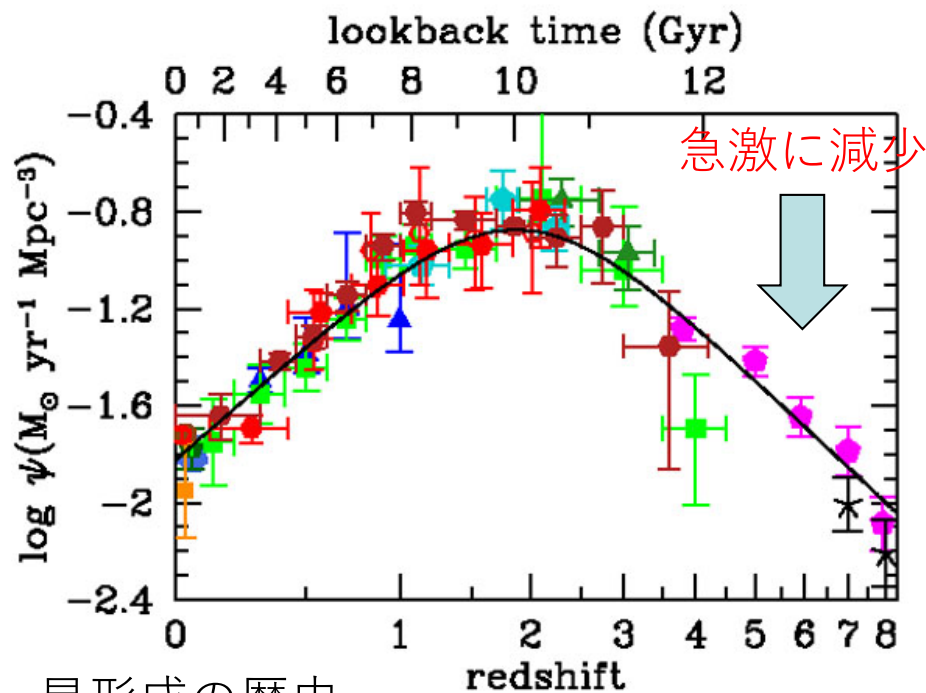


$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_g r}{\Sigma}\right) c^2 dt^2 - \frac{\Sigma}{\Delta} dr^2 - \left(\frac{r_g r}{\Sigma} a^2 \sin^2 \theta + r^2 + a^2\right) \sin^2 \theta d\varphi^2 - \Sigma d\theta^2 + 2 \frac{r_g r}{\Sigma} a \sin^2 \theta c dt d\varphi,$$

$$\Sigma = r^2 + a^2 \cos^2 \theta, \Delta = r^2 + a^2 - r_g r, r_g = 2GM/c^2$$

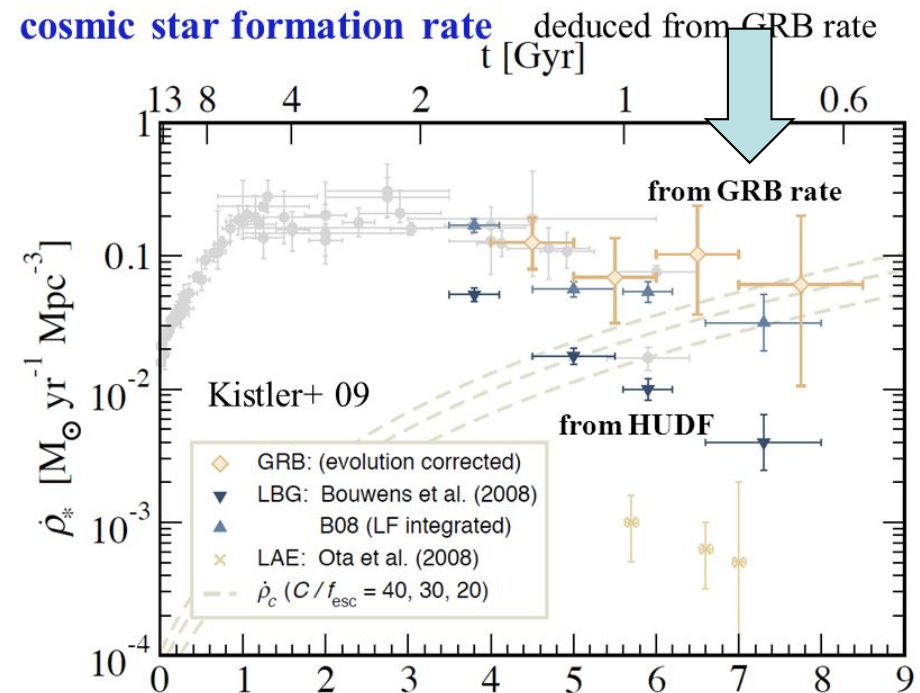
総合的な知の連携

宇宙の星形成の歴史⇒ガンマ線バーストの親星は特殊な巨星？
そうした親星はいつ生まれたのか？



星形成の歴史

大昔でも起きている
cosmic star formation rate deduced from GRB rate

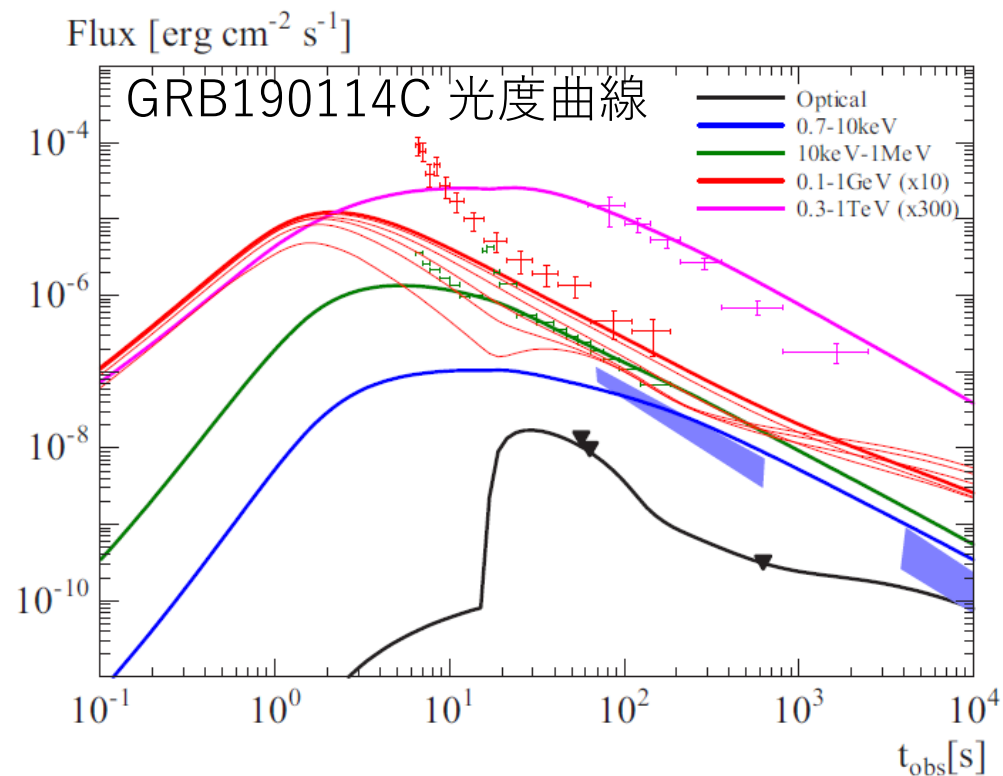


JANUS/GUNDAMにより high- z へ
直接観測と相補的

ガンマ線バーストの発生率
(ブラックホール形成史・重力波源)

近年のニュース

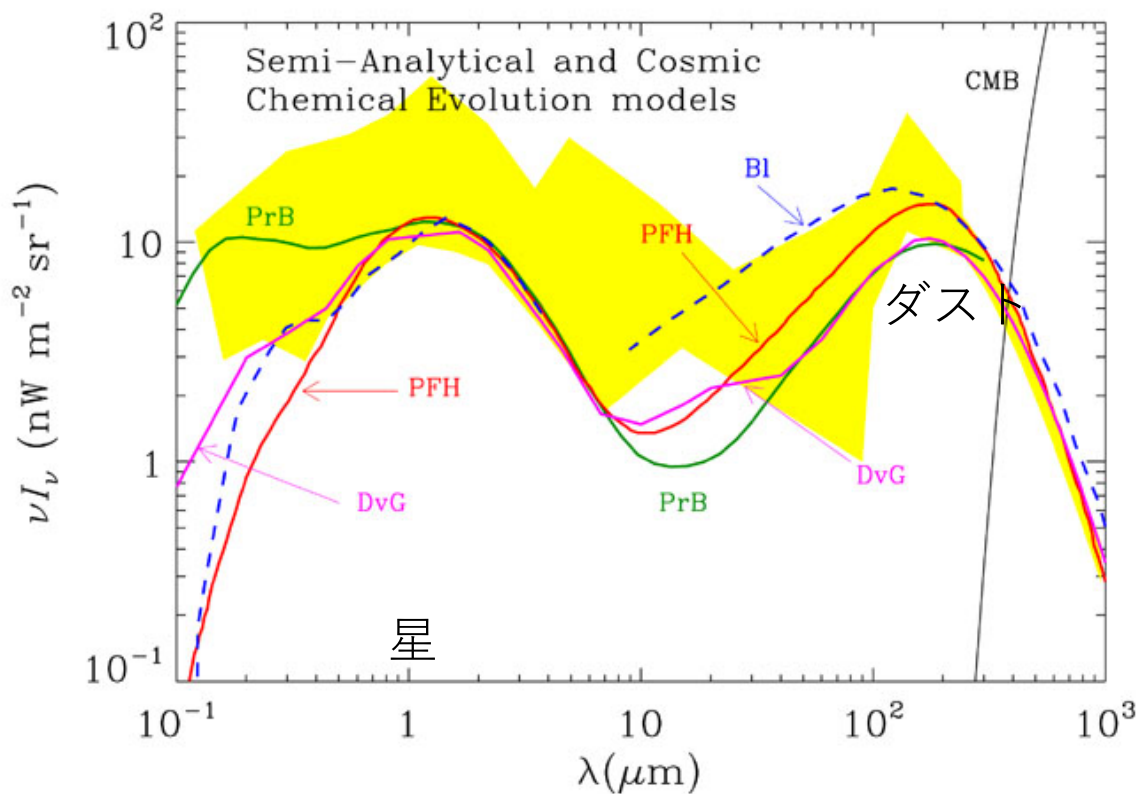
地上チェレンコフ望遠鏡による、
残光からの高エネルギーガンマ線の検出。



シンクロトロン放射では無く、
逆コンプトン散乱による放射！

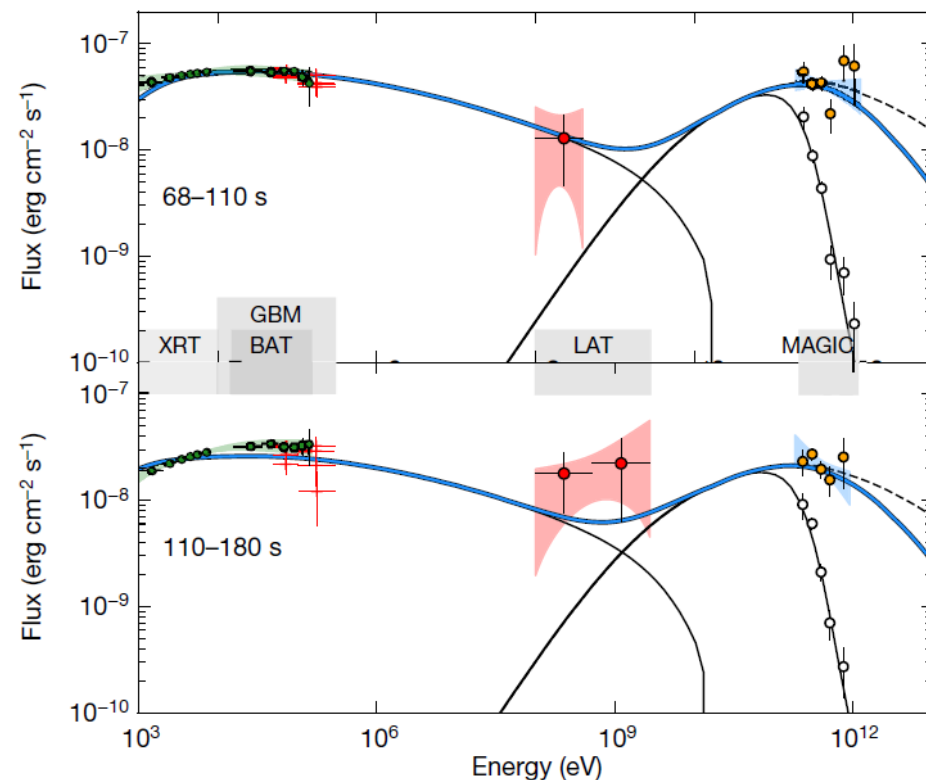
宇宙論とガンマ線バースト

天文学的知識は必須



宇宙背景放射

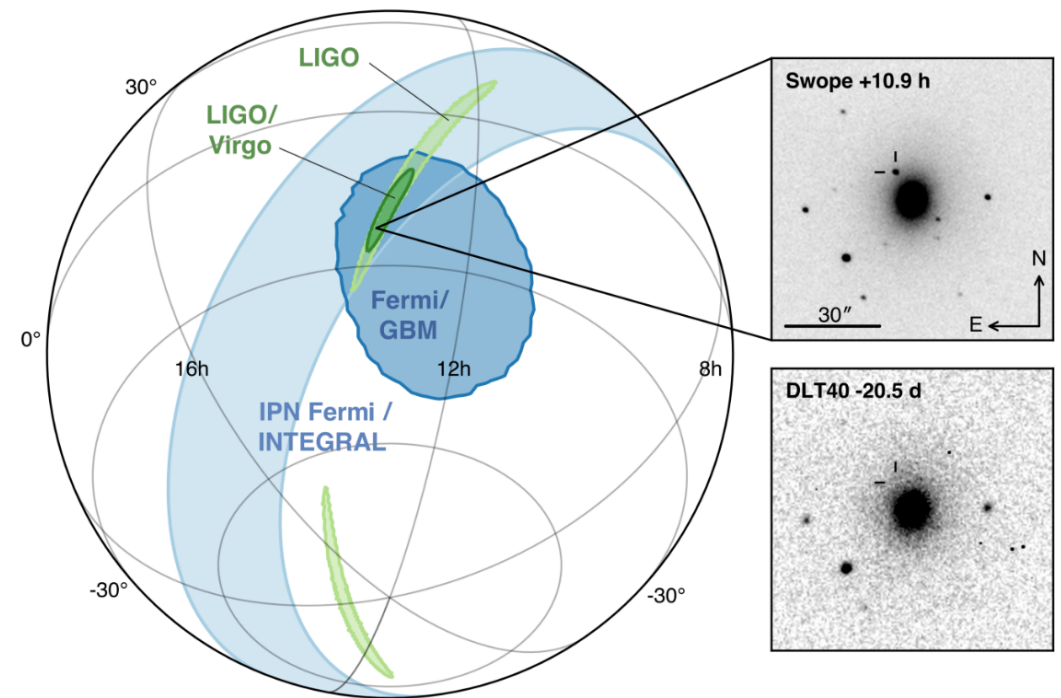
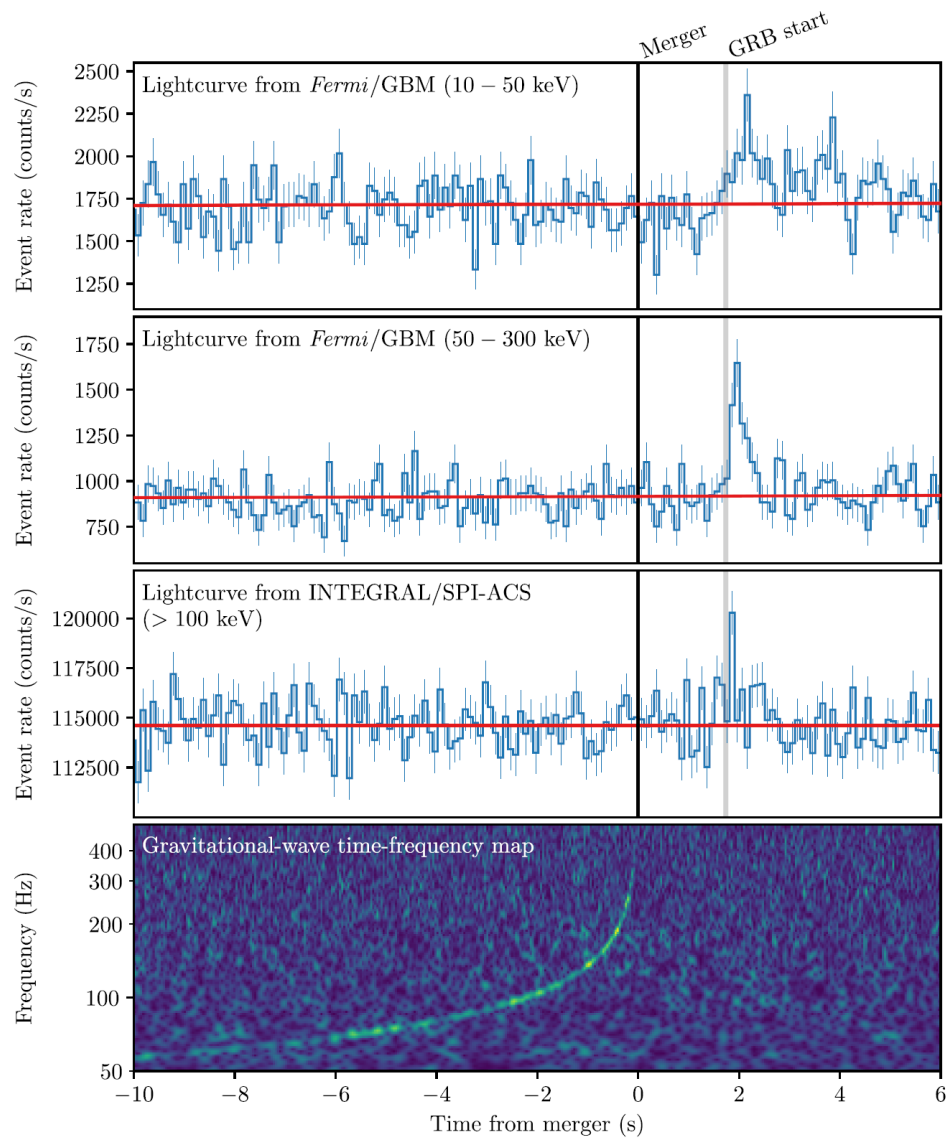
$$\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$$



先ほどのGRBの1eVガンマ線は吸収されているはず。

GRBの放射機構と星形成史
両方を同時に議論する。

GW170817

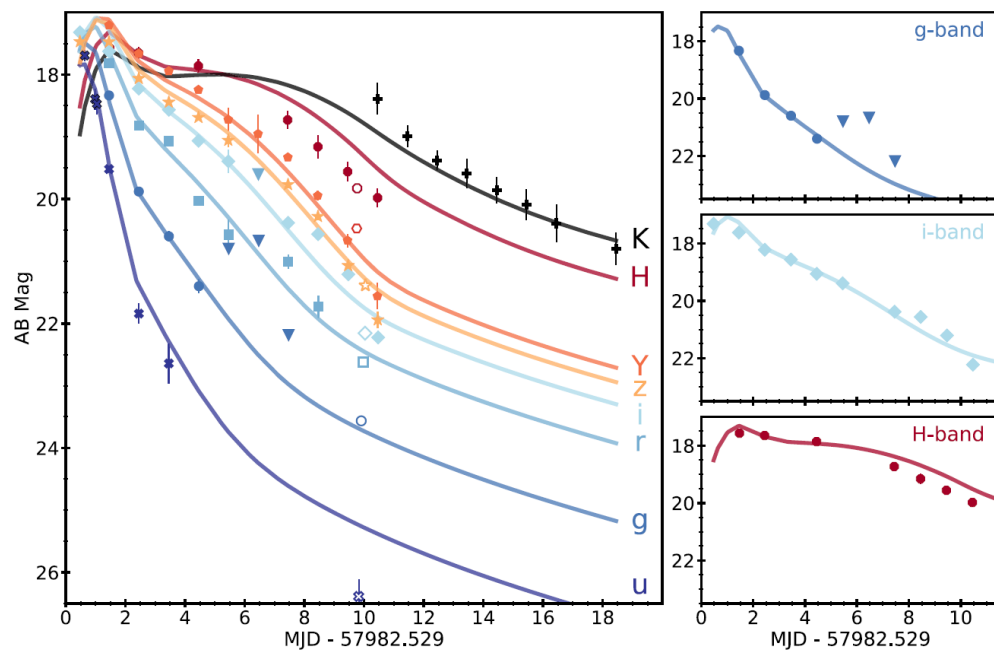
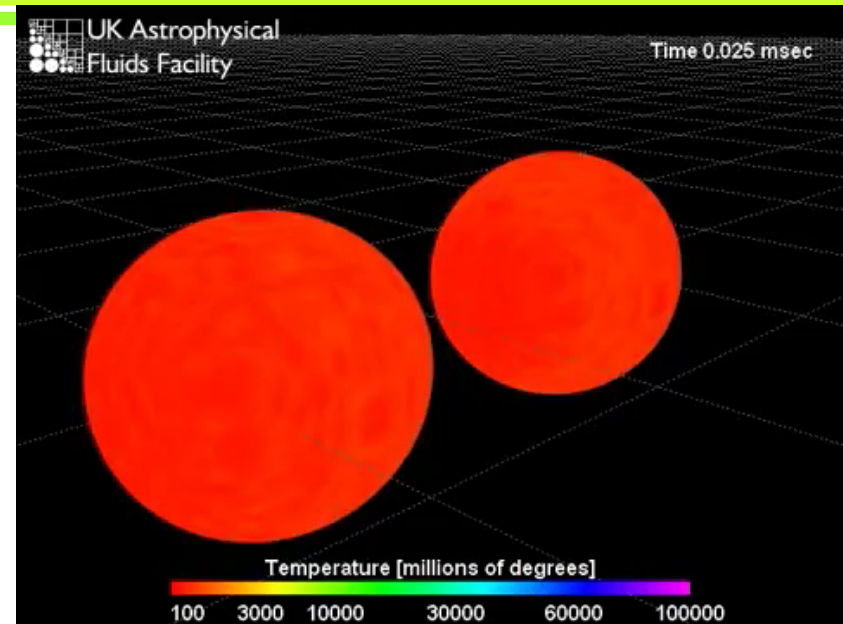
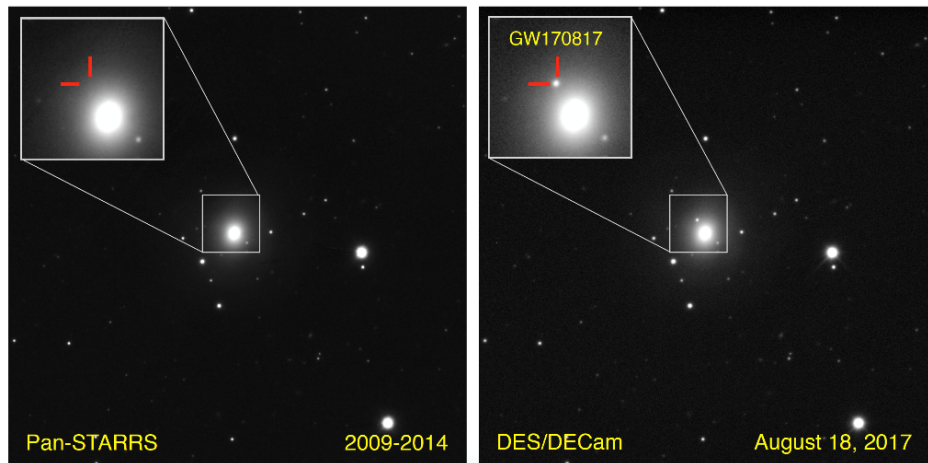


重力波観測

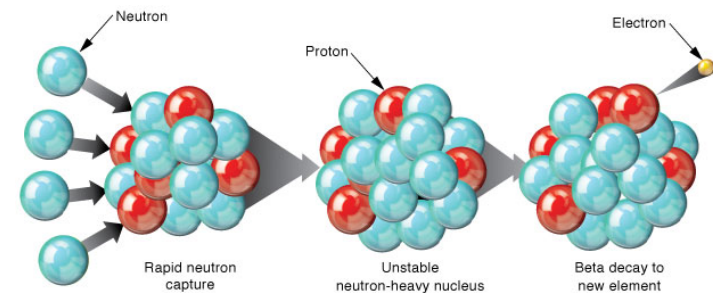
Very weak short gamma-ray burst.

短いバースト = 連星中性子星合体！

NGC 4993 40Mpc

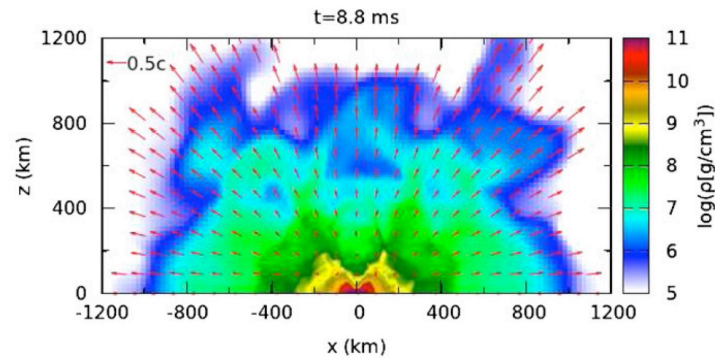


r-process nucleosynthesis



Unstable nuclei. Heat source.

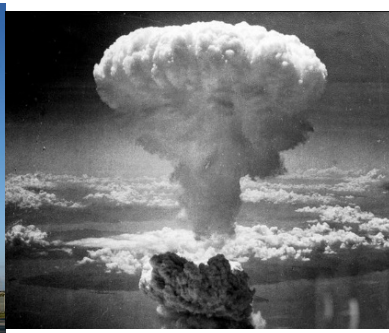
Heavy nuclei produced in binary merger



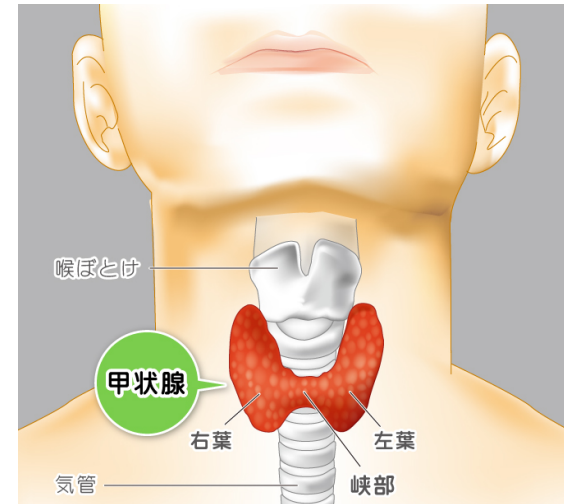
Gold



Uran



Iodine



Thyroid hormone

H 1																	He 2				
Li 3	Be 4															B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12															Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36				
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54				
Cs 55	Ba 56			Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86			
Fr 87	Ra 88																				
		La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71					
		Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103					

Big Bang fusion

Cosmic ray fission

Dying low-mass stars

Merging neutron stars

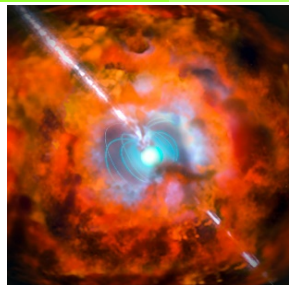
Exploding massive stars

Exploding white dwarfs

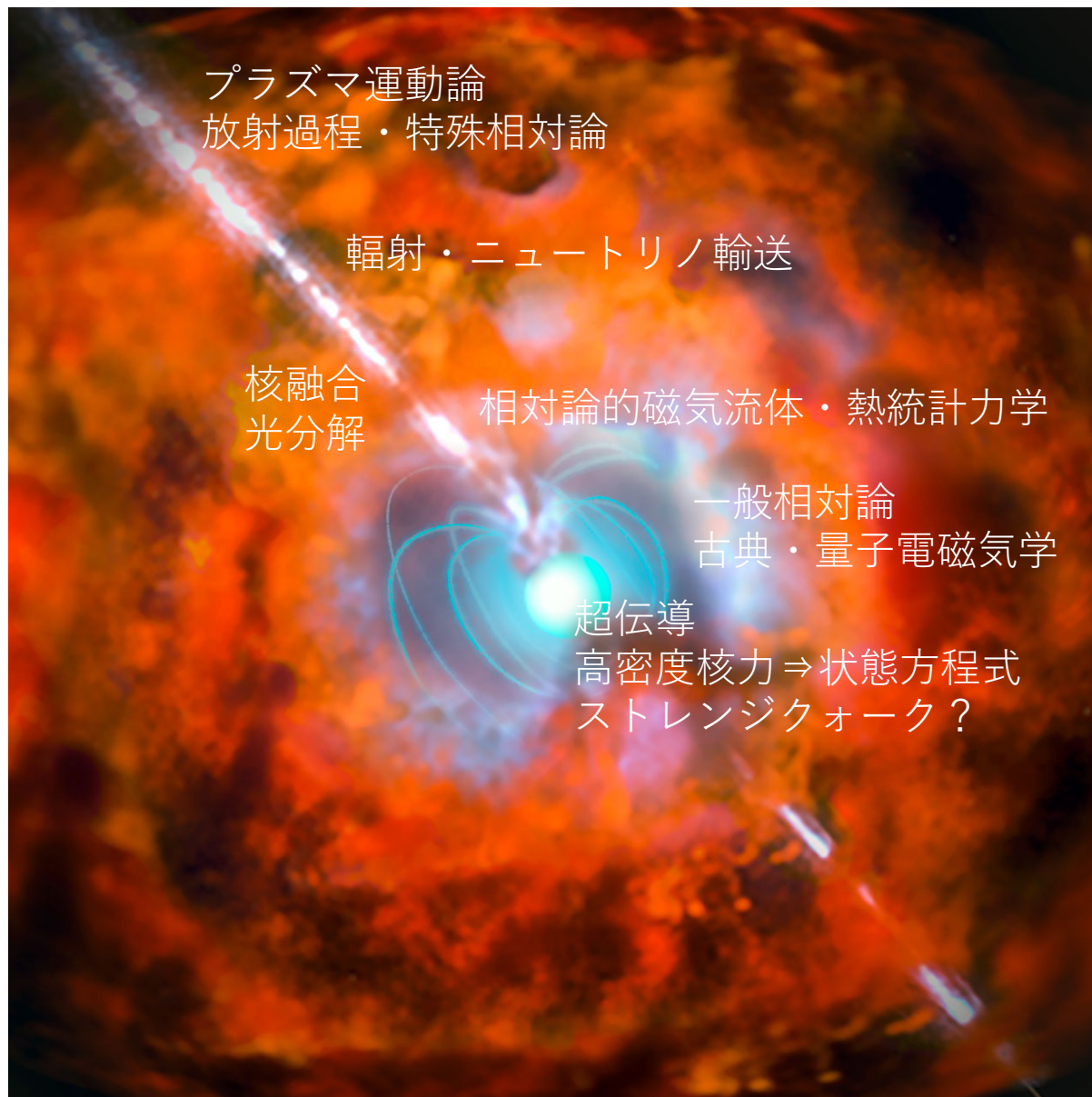
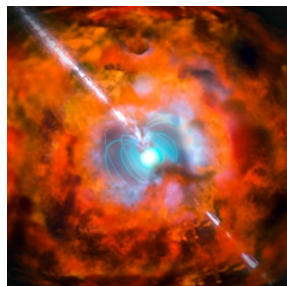
Human synthesis

No stable isotopes

まとめ



天文学
宇宙論



まとめ

- 高エネルギー天体物理は今最も熱い分野
- 毎年のように新現象が発見され続けている
- 多くの解かれるべき課題が残されている
 - ジェット加速
 - 粒子加速
 - 放射機構
- ニュートリノ・重力波などの多粒子・多波長観測の時代
- 何か感じたら是非この分野に！
(理論家の卵も募集中)