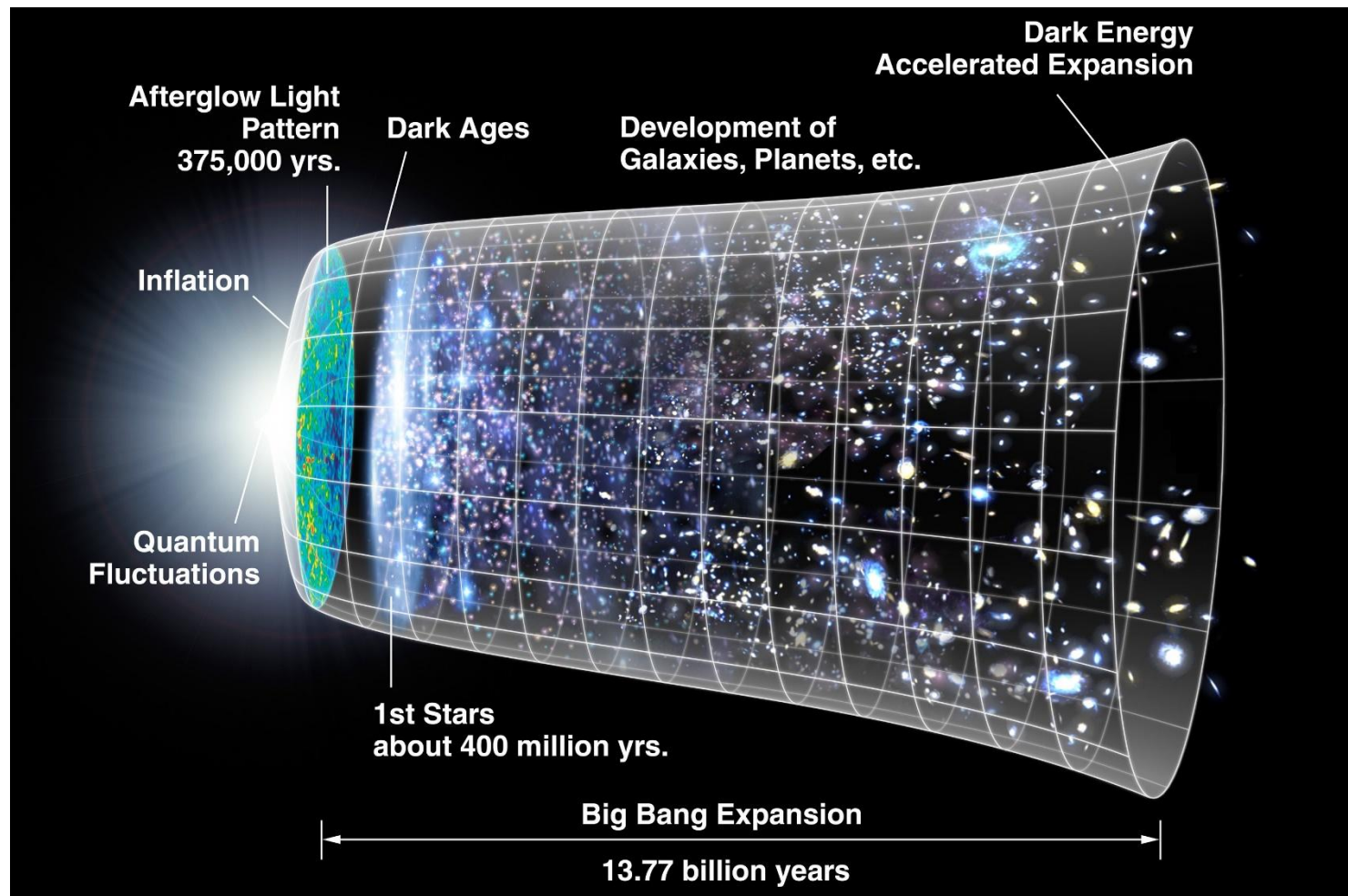


高エネルギー天体物理

浅野勝晃

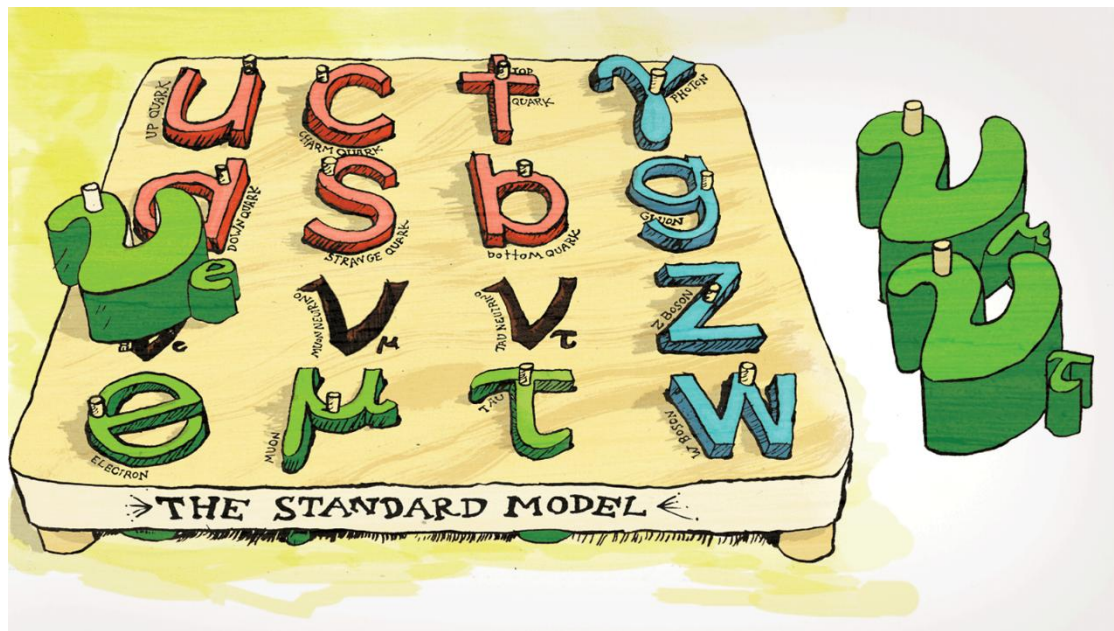
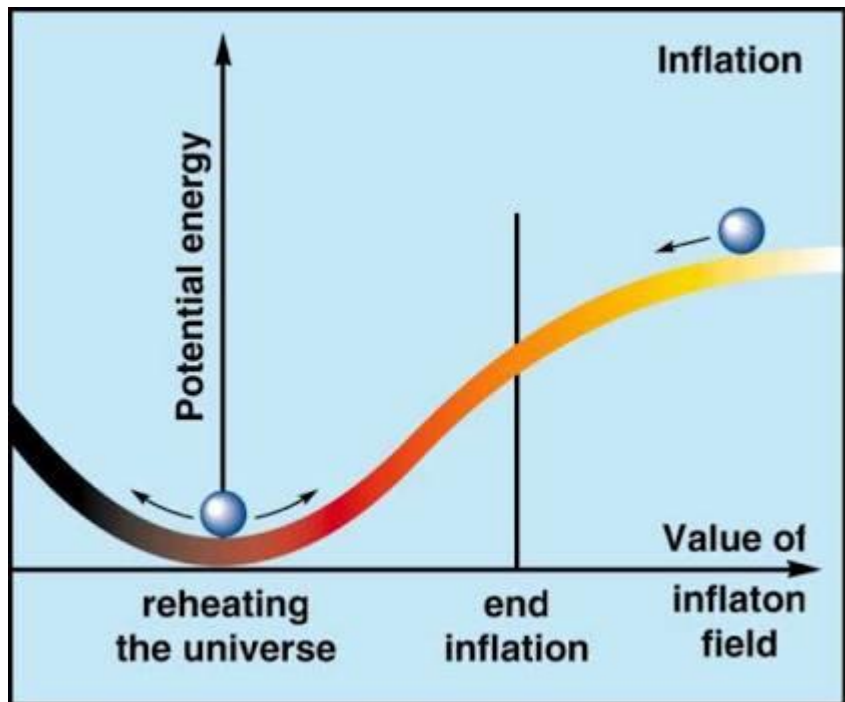
(高エネルギー天体グループ)

宇宙の歴史



宇宙の始まり: 137億年前。宇宙のごく初期には、一つのスカラー場が支配していたと考えると整合的。このスカラー場が急激な宇宙の膨張、インフレーションを引き起こすと共に、量子揺らぎが天体形成の種を与える。 **膨張宇宙: 遠くのものほど、速い速度で遠ざかる。**

再加熱

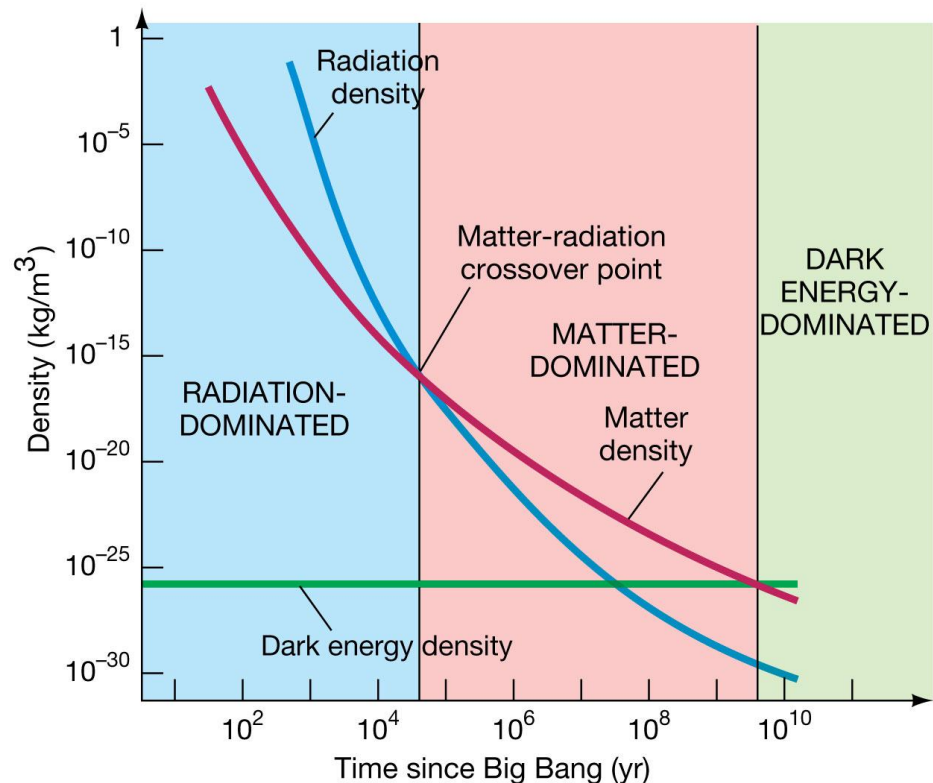
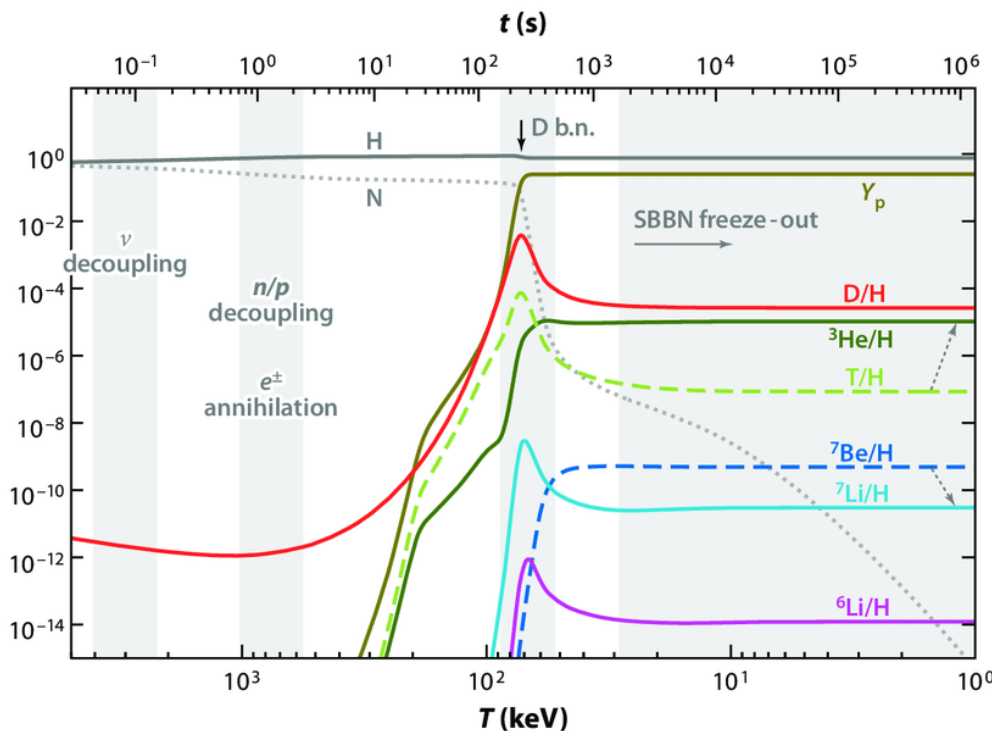


スカラー場のポテンシャルEが散逸、
様々な種類の粒子が生成。
非常な高温 (10^{30}K ?) で、ほぼ全ての
粒子は光速で飛び回っている。
(ここまで 10^{-32}s くらい?)

宇宙が膨張し、温度が下がってくると、エネルギーの
大部分は光子とニュートリノ、電子・陽電子が担う。
ごくわずかの暗黒物質とバリオンが混ざっている。

元素合成・物質優勢への移行

**赤方偏移 z : 速い速度で遠ざかる遠くの天体の光の波長が $(1+z)$ 倍になる。
遠くほど z は大きく、光速は有限なので、大きい z は昔の宇宙を表す。**

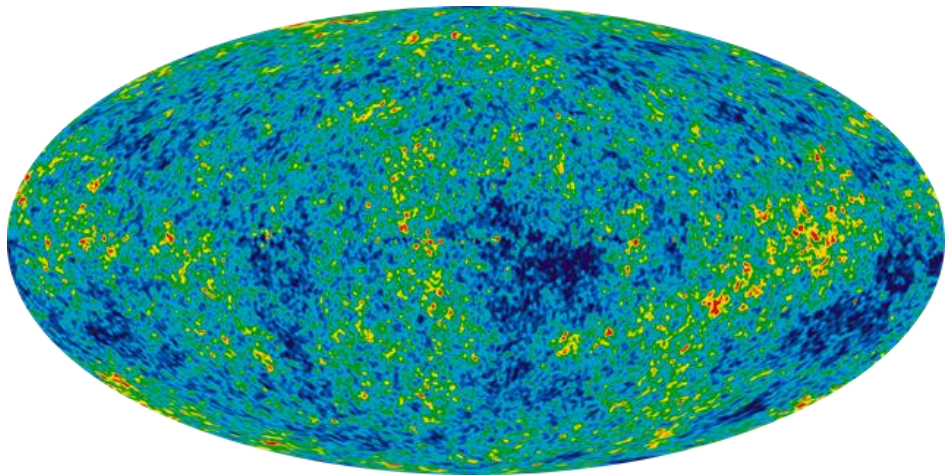


© 2011 Pearson Education, Inc.

かすかすの量しかないバリオンは、数種の原子核へと落ち着く。暗黒物質の方が多いことに注。この頃はそもそも光子とニュートリノが支配的。

赤方偏移3200、宇宙年齢7万年、温度8千Kくらい。

密度揺らぎの成長・天体形成



赤方偏移1000の時代の密度揺らぎ
 10^{-5} 程度しかない。



重力によって暗黒物質が引き合い、徐々に密度揺らぎが大きくなる。バリオンもそこに落ち込んでいき、目に見える天体が形成される。

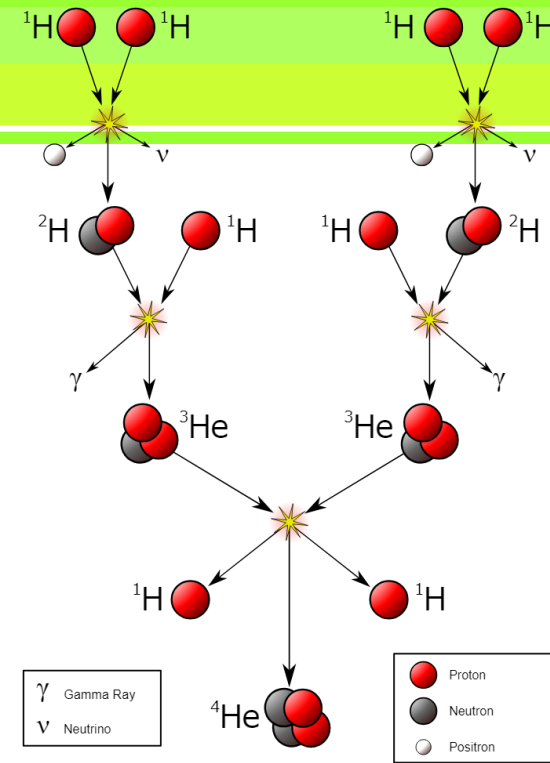
輻射優勢期はホライズンより大きなスケールだけ、ホライズンより小さなスケールでは、物質優勢期になって、密度揺らぎを成長させる。

初代星



分子雲

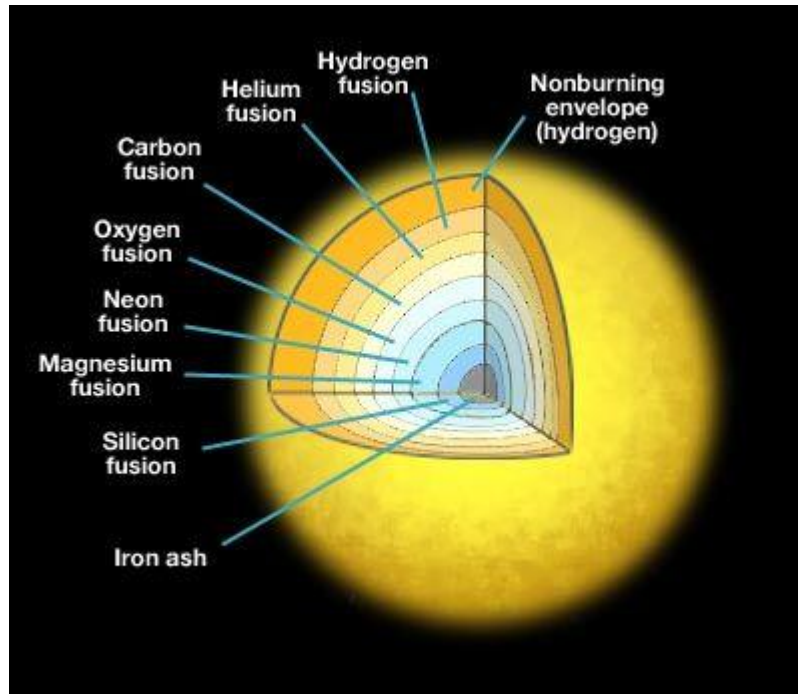
重力だけでガスを収縮させても、断熱的に温度が上がり、圧力で押し返される。ガスはH₂分子を作り、電磁波の放射などでエネルギーを抜きながら、密度を上げていく。分子雲は不安定で、分裂を繰り返すが、Heよりも重い元素の無い初期宇宙では、分子雲の温度が高く、大きな塊のまま進化。初代星は現在よりも大きな星が多かった？



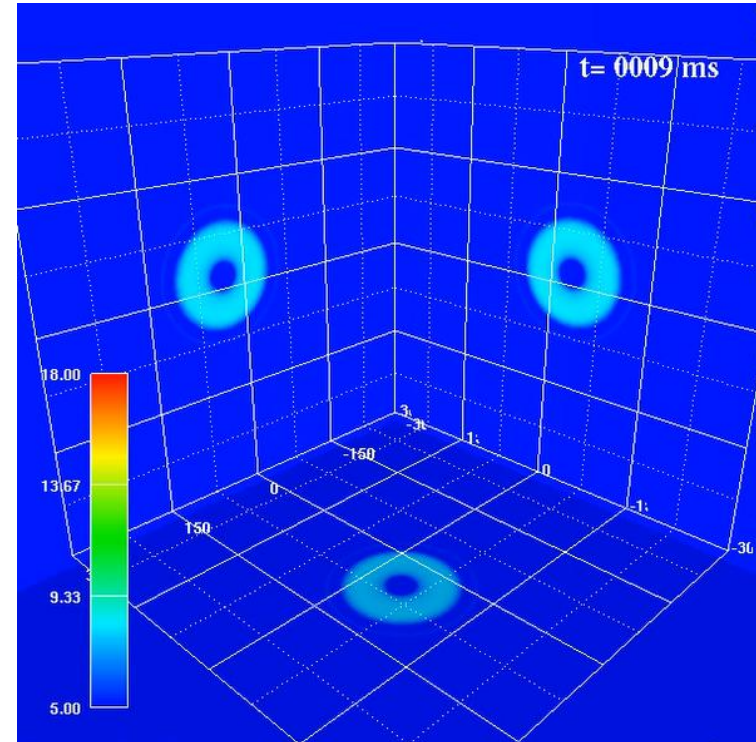
恒星

ガス雲の中心で温度が上がってくると、核融合反応がスタート。エネルギーを生成し、星として光り出す。

星の進化・超新星爆発



星の中ではどんどん重い元素が合成され、最も安定な鉄のコアが中心に残る。さらに温度を上げると、鉄が光分解される。吸熱反応なので、圧力が下がり、コアが重力崩壊する。

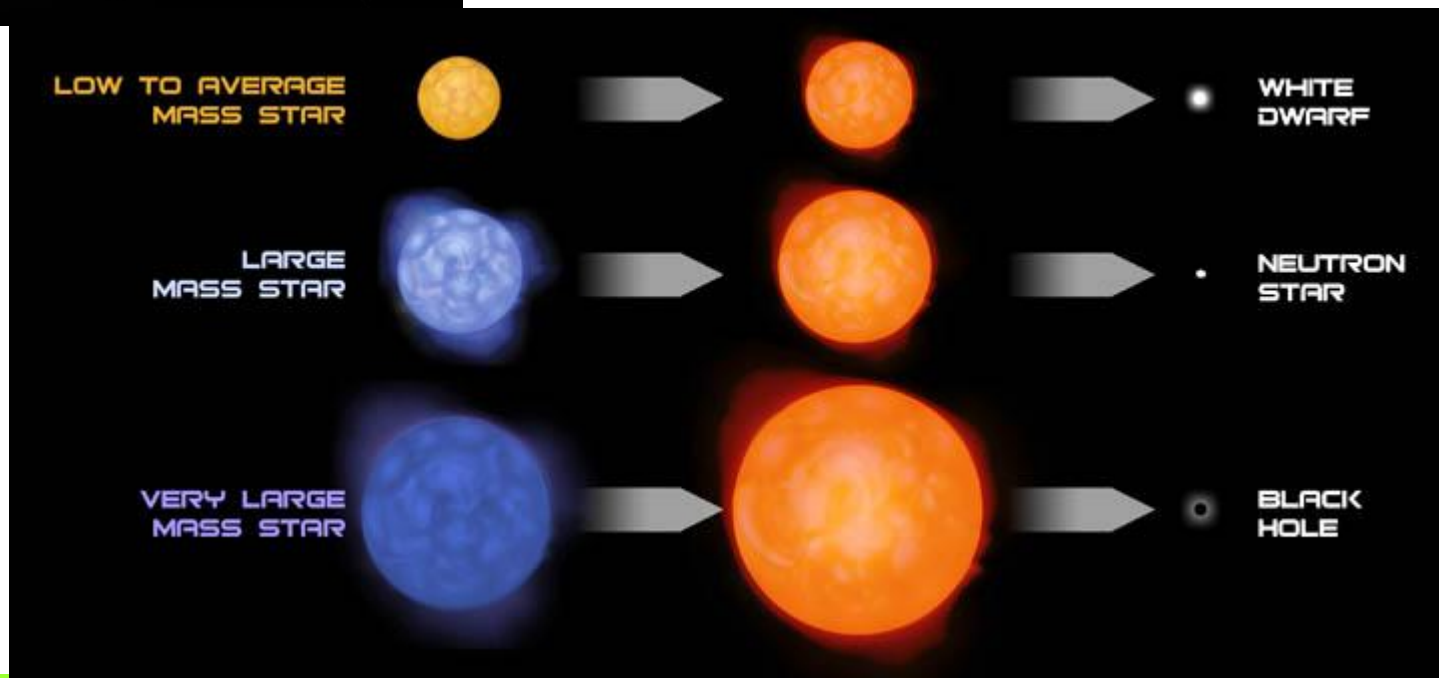


中心に原始中性子星が生まれ、そこから放たれるニュートリノが周りのガスにエネルギーを与え、爆発。

中性子星・ブラックホール



中心に中性子星が残され、ガスは吹き飛ぶ。
中性子星の限界質量は太陽の2倍程度。
それよりも重いコアを持つ場合は、ブラックホールが生まれると考えられている。



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

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

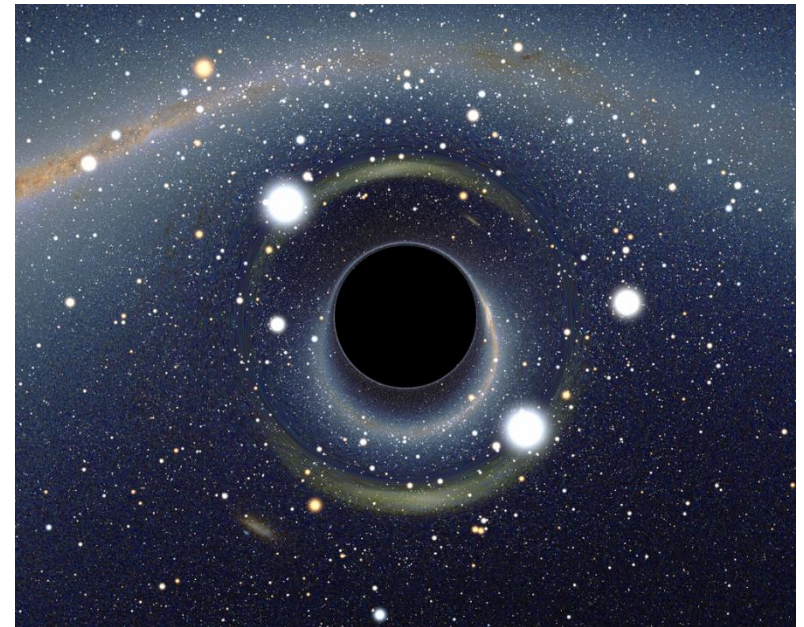
これよりも小さな半径の星はブラックホールになる。
太陽質量なら3kmほど。

回転するブラックホール

角運動量

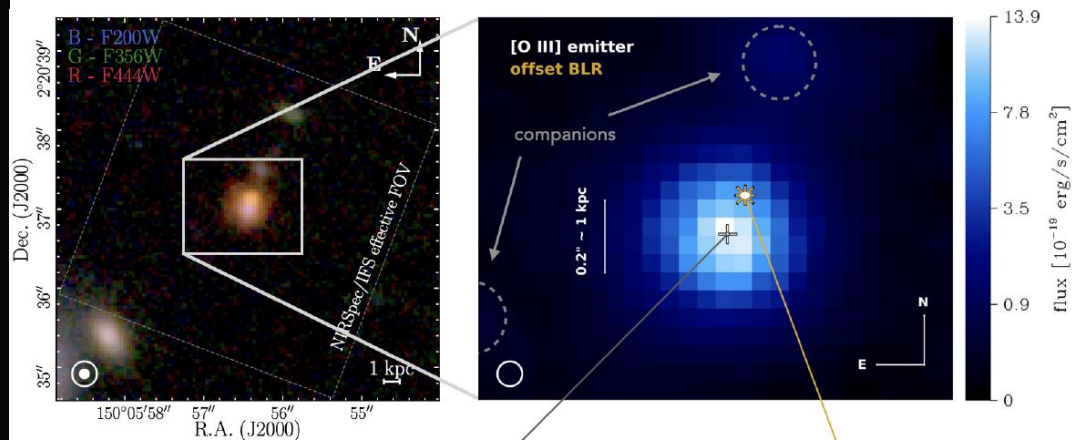
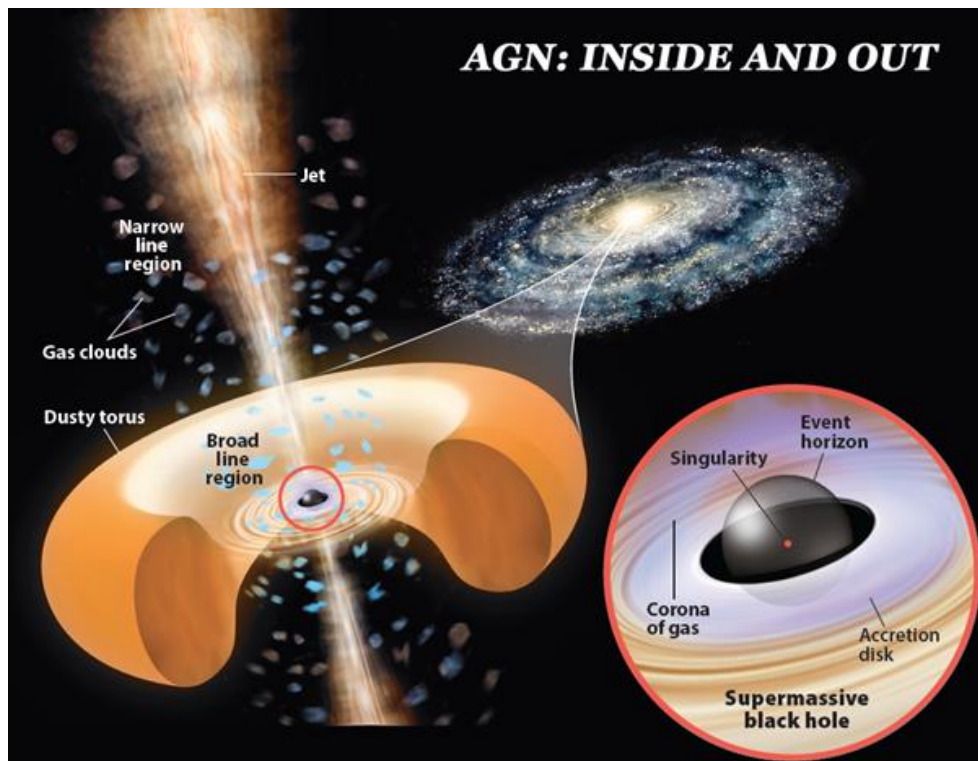
$$J_{\text{BH}} = a \frac{GM_{\text{BH}}^2}{c}$$

$$a < 1$$



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。

巨大ブラックホール

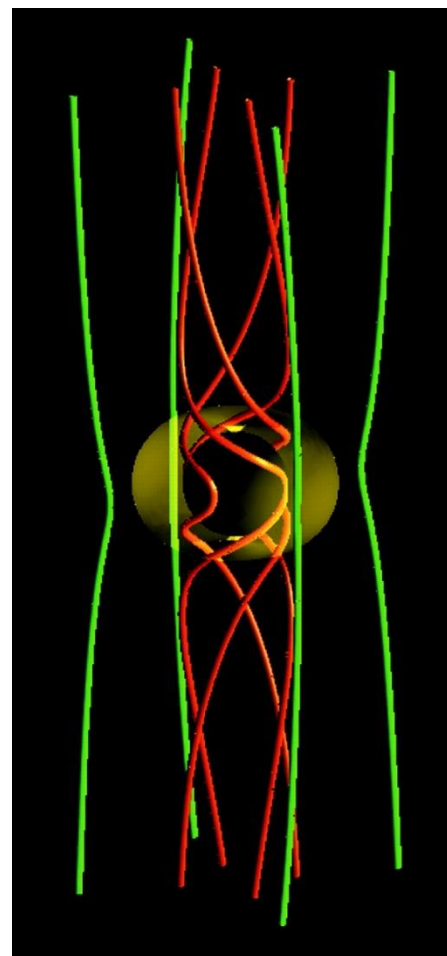
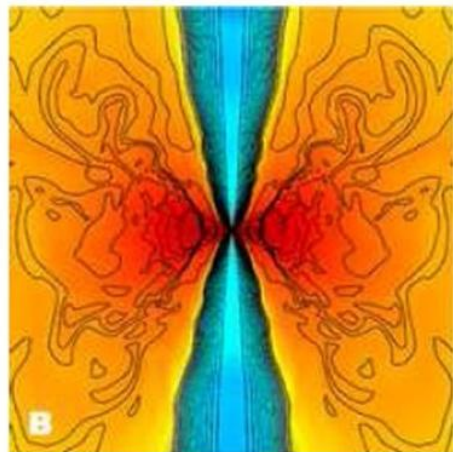
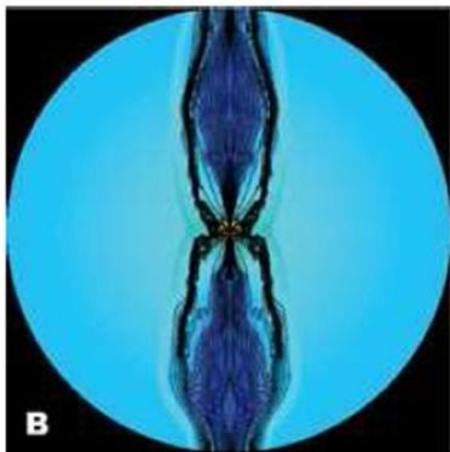
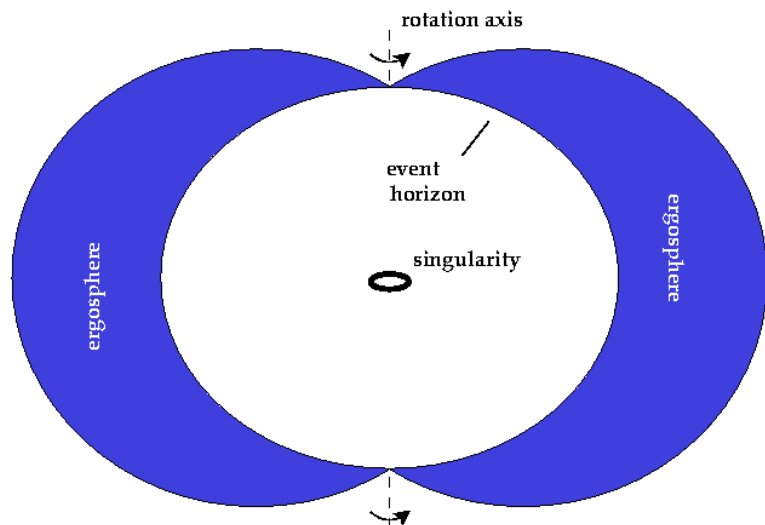


赤方偏移 ~ 7 (宇宙年齢1.4億年)で既に太陽質量の約 10^8 倍のブラックホールが発見。そんなに大きなブラックホールを如何にして作るか？

銀河の中心には太陽質量の $10^6 - 10^9$ 倍のブラックホールが鎮座。落ち込むガスが重力エネルギーを放ち、明るく輝く。相対論的速度のジェットを噴き出す場合も。ブレイザーと呼ばれる。

AGNジェット

自転するブラックホールの回転エネルギーを磁場を介して引き抜く



電磁場によるエネルギーの流れ

高エネルギーの世界

高エネルギー：相対論的な世界

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

ローレンツ収縮

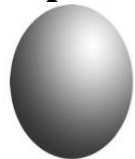
$$l = \frac{l_0}{\Gamma}$$



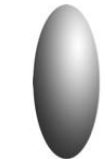
$v=0$



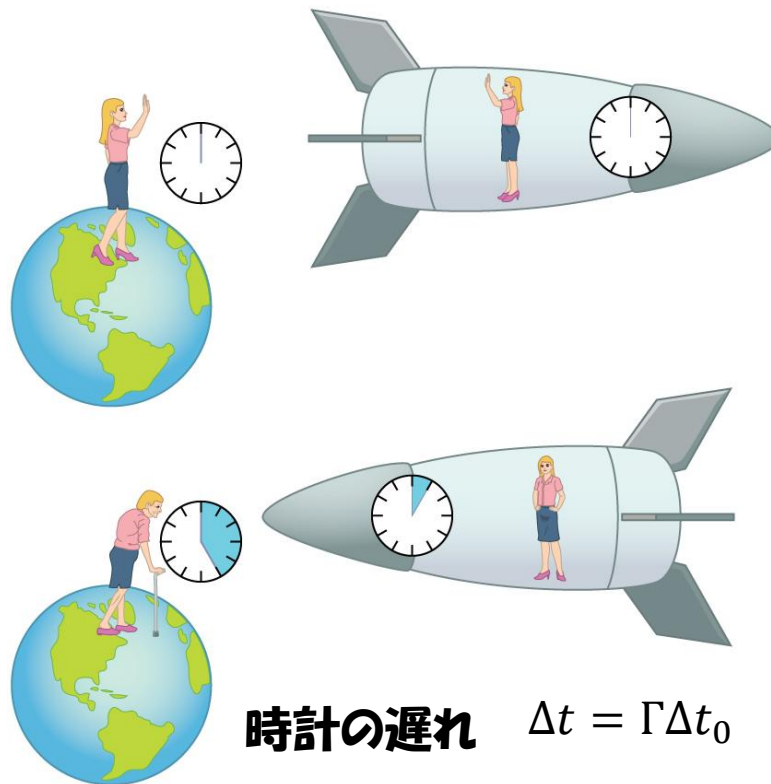
$\vec{v}=0.3c$



$\vec{v}=0.6c$

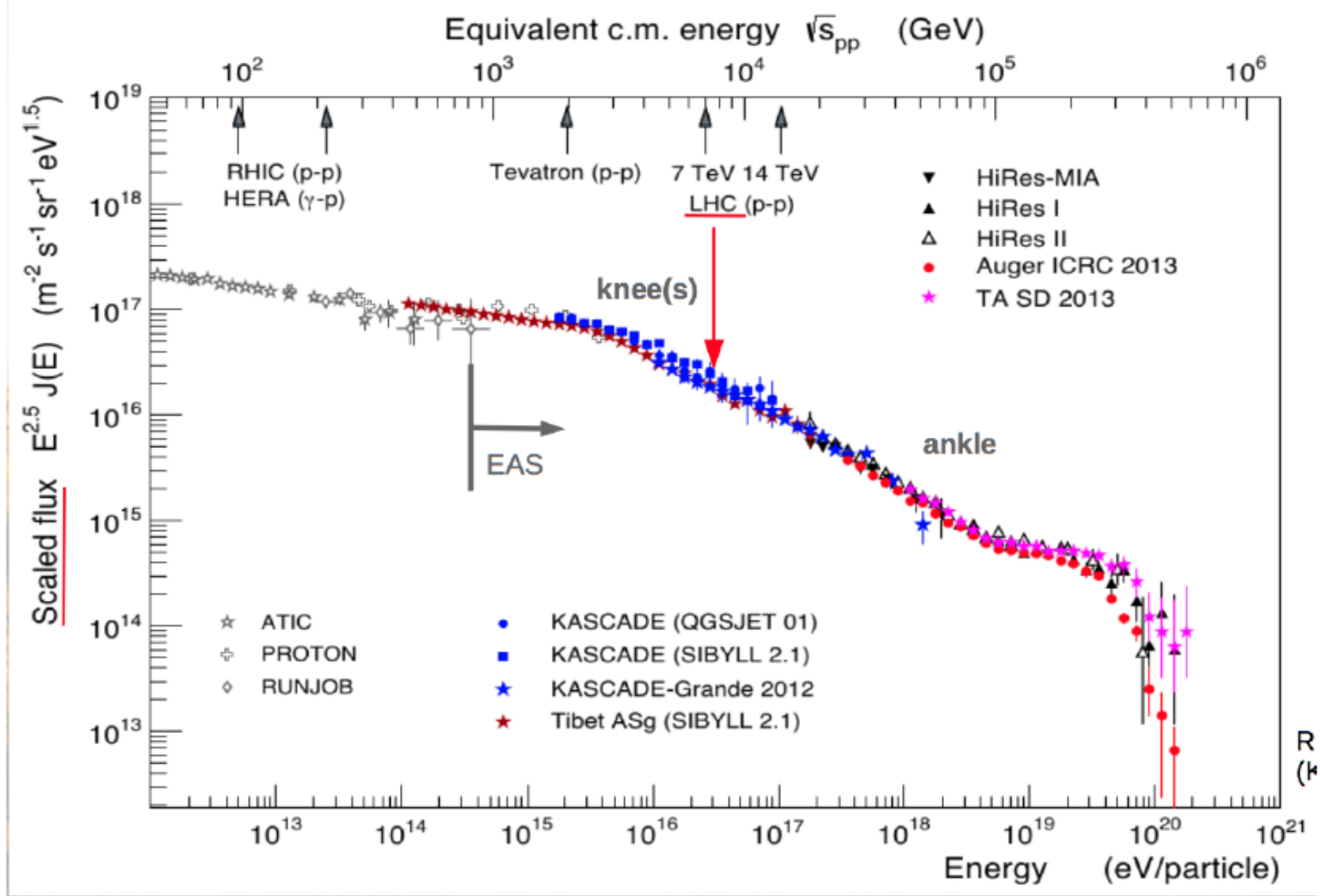


$\vec{v}=0.9c$



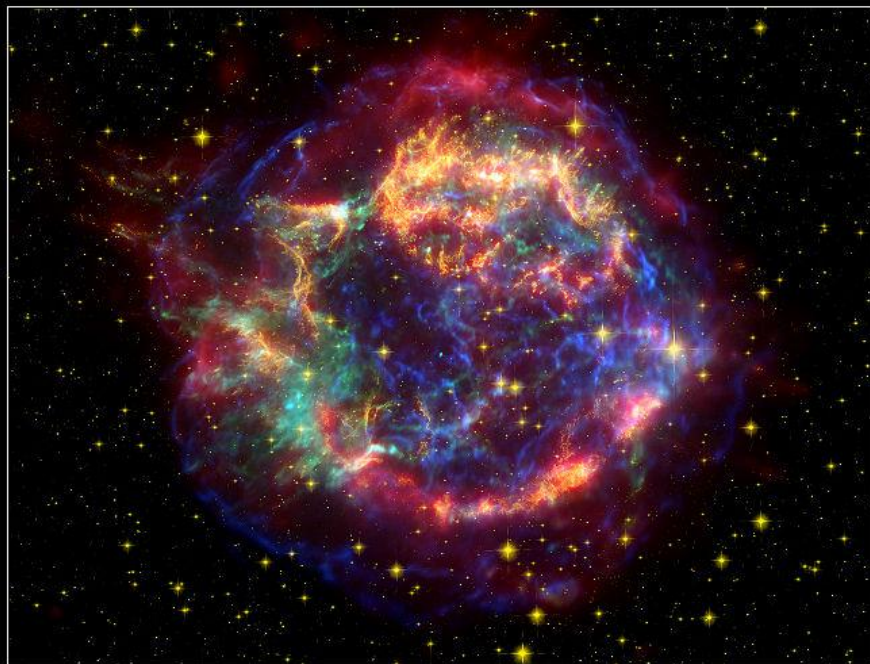
時計の遅れ $\Delta t = \Gamma \Delta t_0$

宇宙線



$\Gamma \gg 1$ の原子核。最高エネルギー宇宙線は 10^{20} eVを超える。
人類が作れる加速器では到達できないエネルギー。

超新星残骸と宇宙線生成



Cassiopeia A Supernova Remnant
NASA / JPL-Caltech / D. Krause (Steward Observatory)
ssc2005-14c

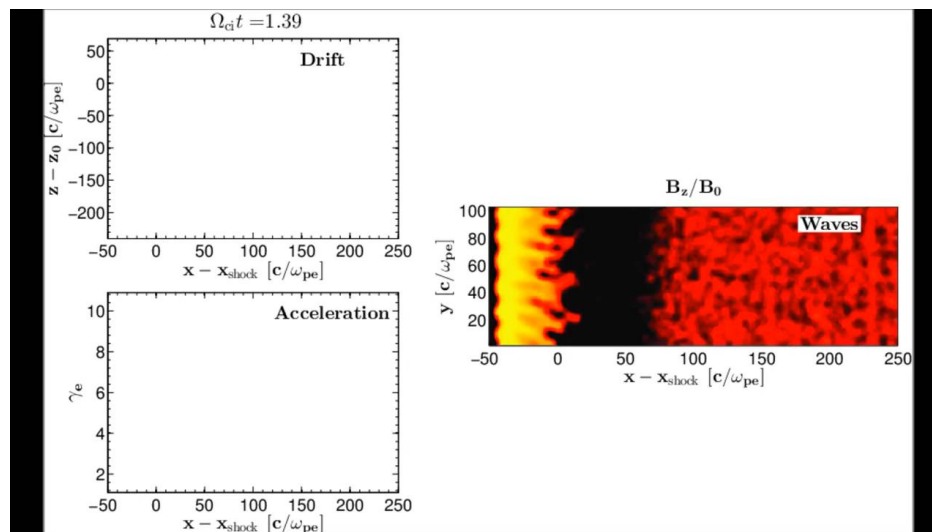
Spitzer Space Telescope • MIPS
Hubble Space Telescope • ACS
Chandra X-Ray Observatory

1667年頃に爆発したCassiopeia A

距離: 3.4kpc

膨張速度: 4000-5000km/s

衝撃波による粒子加速シミュレーション



爆発による衝撃波が星間空間を伝播



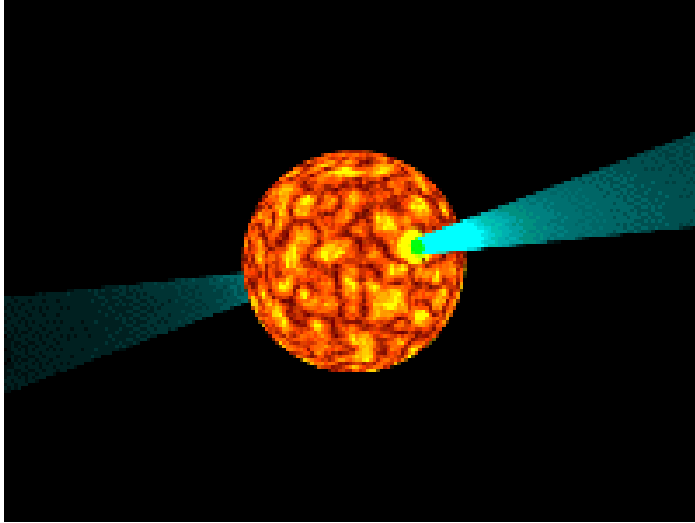
衝撃波による粒子加速
高エネルギー粒子の生成

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

プラズマ波動による散乱

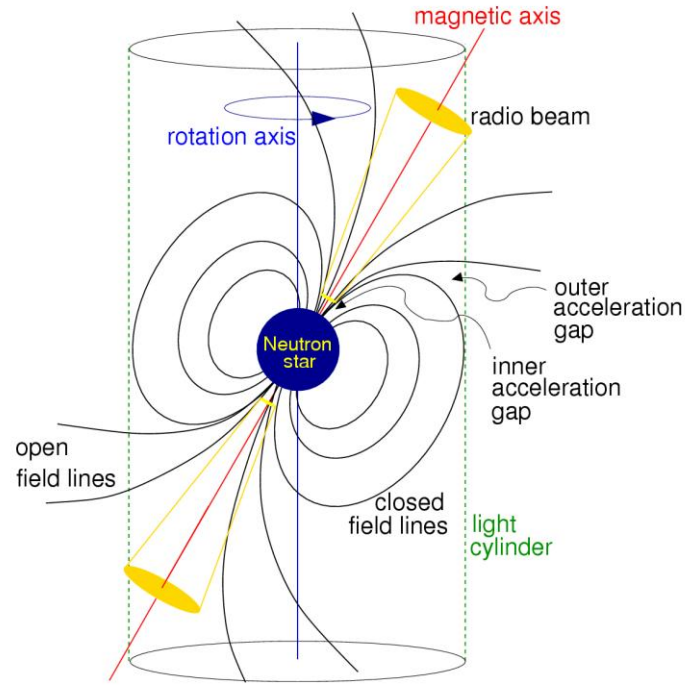
パルサー

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。



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

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

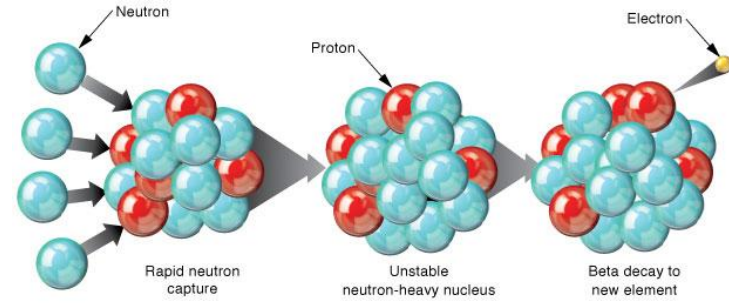
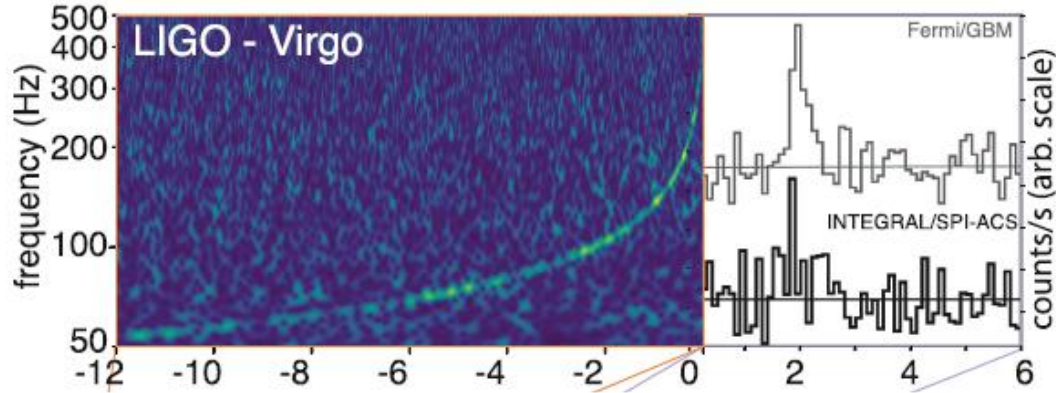
$$\left. \frac{dE}{dt} \right|_{\text{SD}} = I \Omega_{\text{rot}} \dot{\Omega}_{\text{rot}} = -\frac{2}{3} \frac{|\ddot{\mu}|^2}{c^3} \simeq -\frac{B_p^2 R_*^6 \Omega_{\text{rot}}^4}{6c^3}$$

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)

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

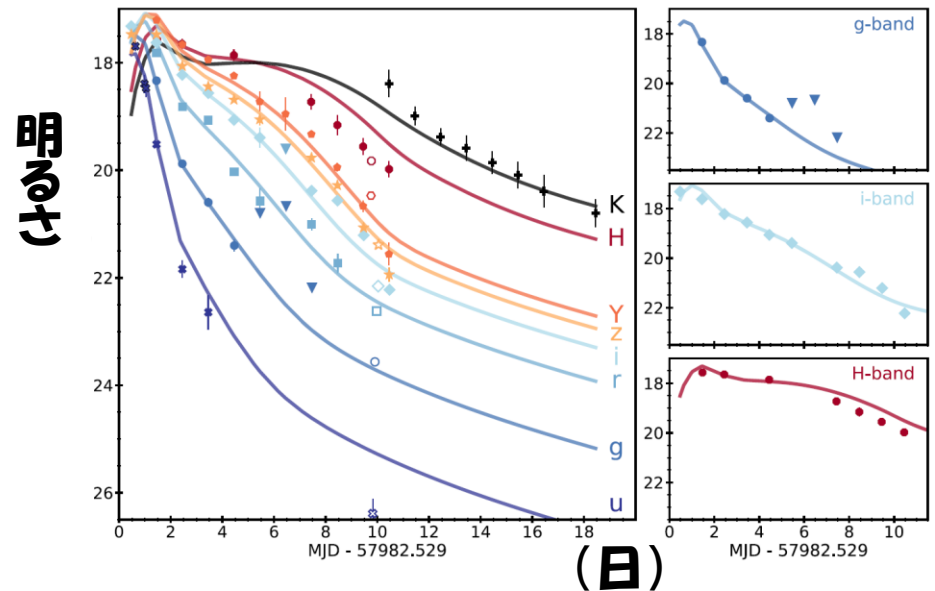
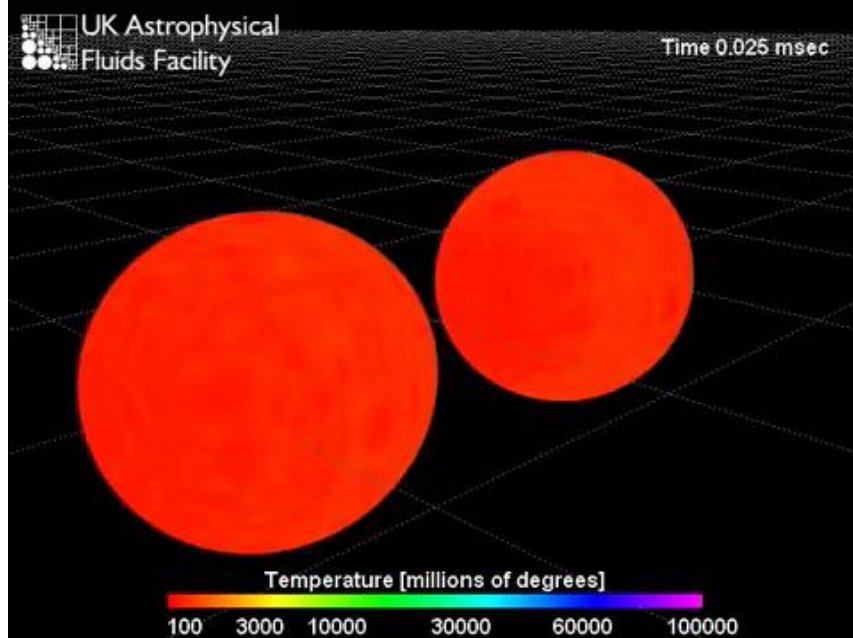
中性子星連星合体

r-過程元素合成 ⇒不安定核(放射性元素)の生成

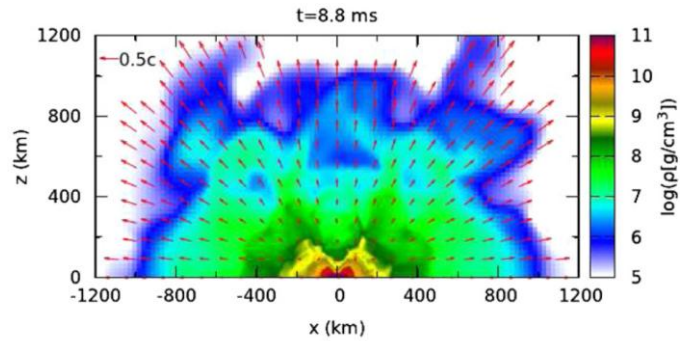


放射線を熱源として、可視光、赤外、紫外線で光る。

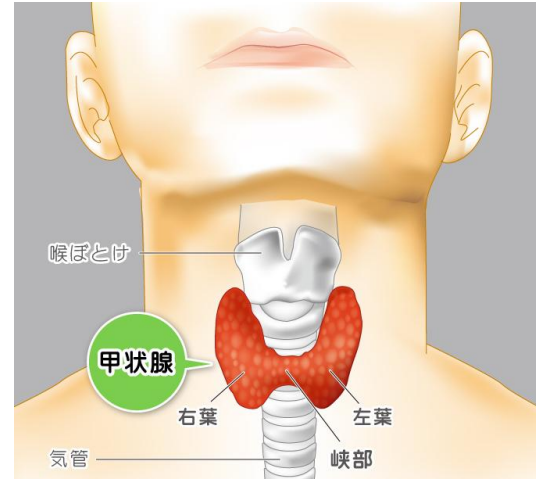
弱いガンマ線放射を伴う、中性子星連星合体



中性子連星合体に伴う重元素合成



Iodine

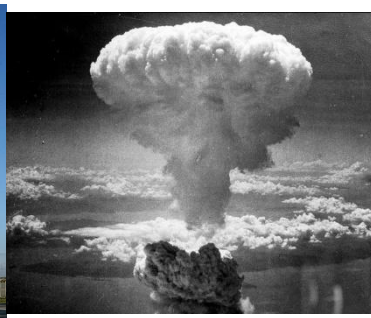


Thyroid hormone

Gold

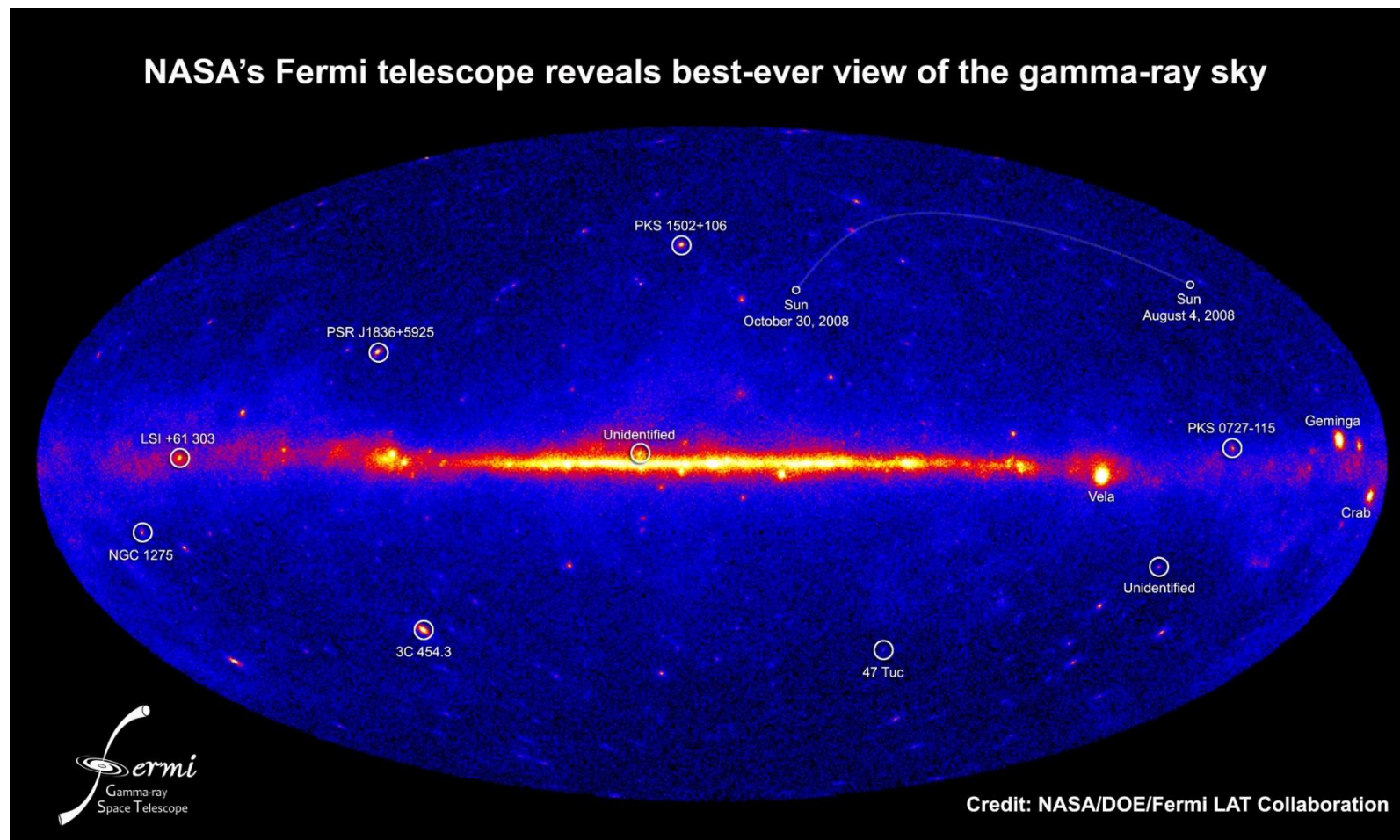


Uran



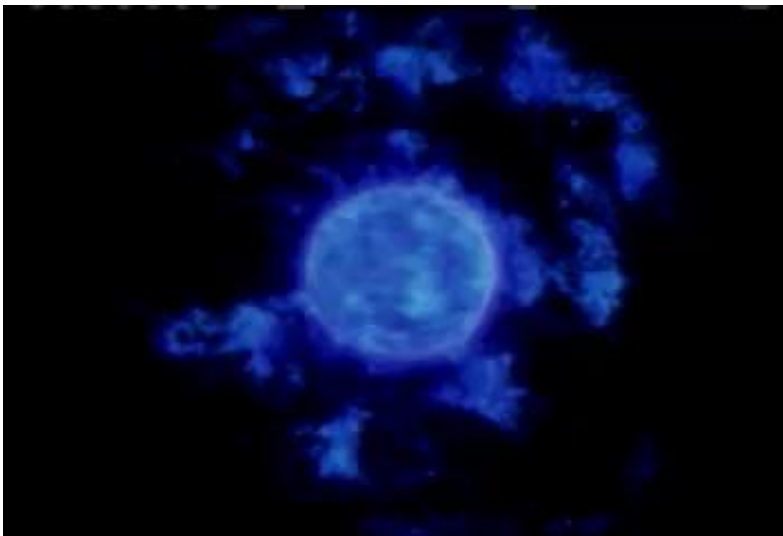
Big Bang fusion		Dying low-mass stars		Exploding massive stars		Human synthesis No stable isotopes											
H									He								
Li	Be																
Na	Mg																
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra																
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

ガンマ線



広がった成分、パルサー、系外活動銀河ジェット
宇宙線がガスと衝突して放つガンマ線。電子が宇宙背景放射を散乱して作るガンマ線

ガンマ線バースト

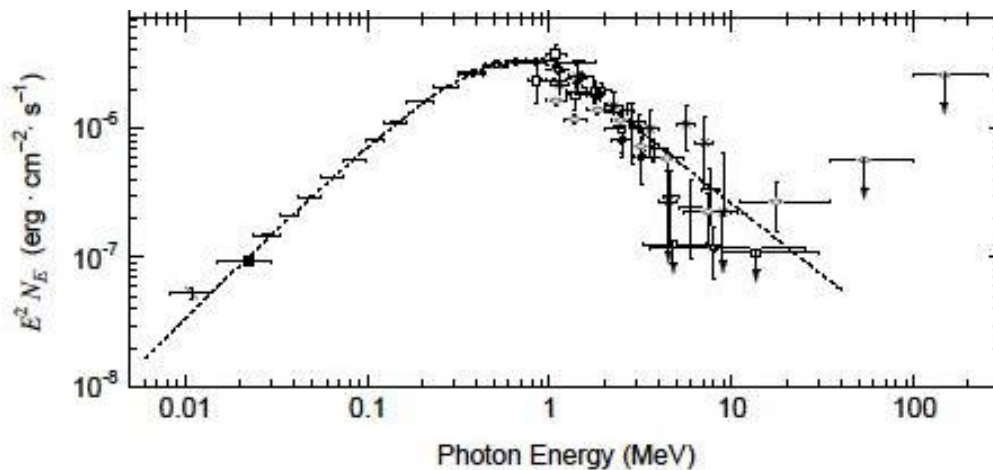
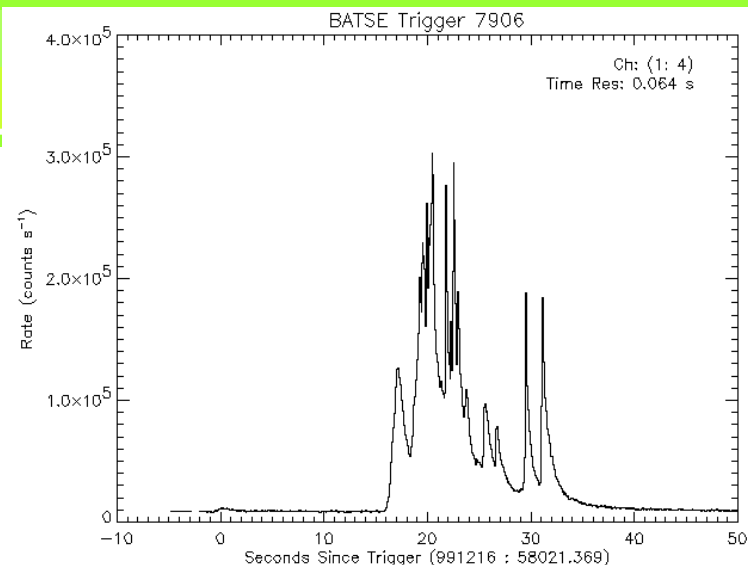


宇宙最大の爆発現象

巨星の核がブラックホールに崩壊。

$\Gamma > 100$ の光速ジェットからガンマ線を放出。

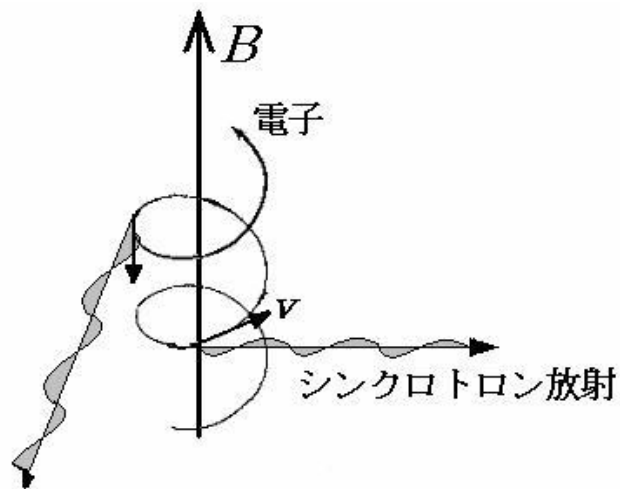
最も明るいものの解放エネルギーは
 $\sim M_{\odot} c^2$ に達する。



相対論的ジェットの運動エネルギーを如何に
ガンマ線へと転換するか？
衝撃波？磁場散逸？

放射過程

シンクロトロン放射



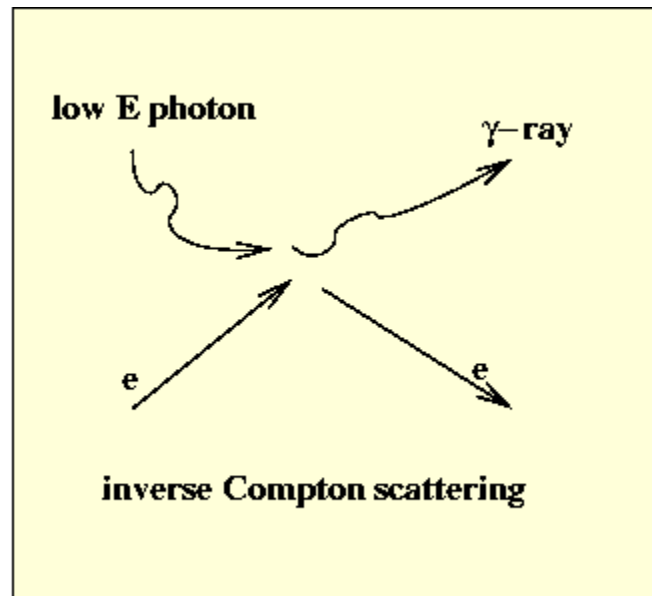
シンクロトロン放射。vは電子の速度ベクトルを表す。シンクロトロン放射は、磁力線に垂直に直線偏波しており、磁場に垂直な速度成分 v_{\perp} 方向のごく狭い領域にのみ放射される。

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



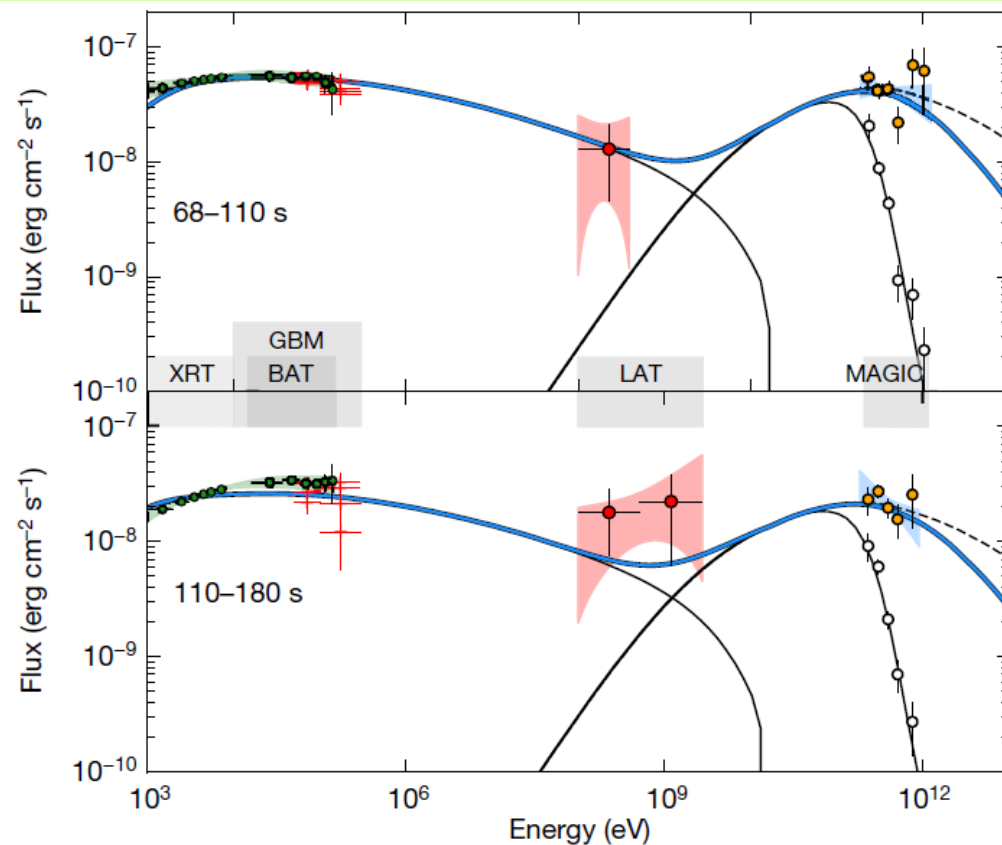
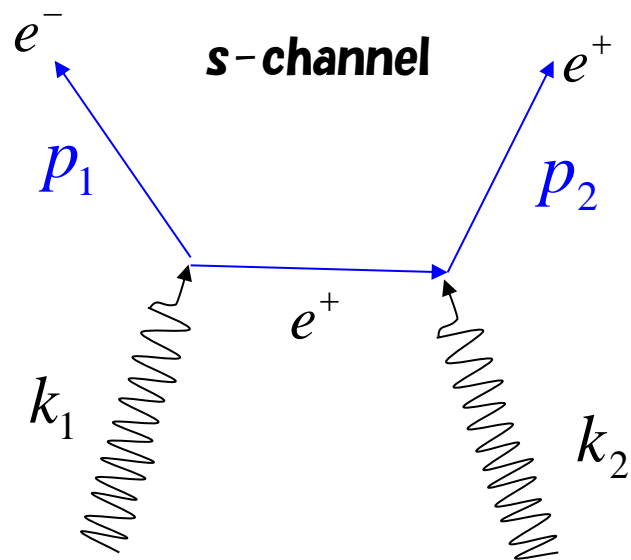
典型的な光子のエネルギー $\varepsilon_{\text{typ}} = \gamma^2 \varepsilon_0$

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

電子・陽電子対生成

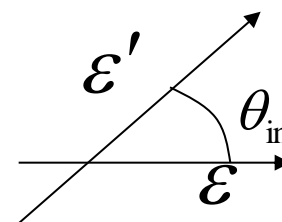
$$\gamma + \gamma \leftrightarrow e^- + e^+$$



ガンマ線バースト残光のスペクトル

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

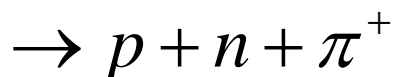
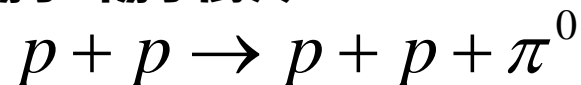
$$y^2 \equiv 1 - \frac{2m_e^2 c^4}{\varepsilon \varepsilon' (1 - \cos \theta_{in})} < 1$$



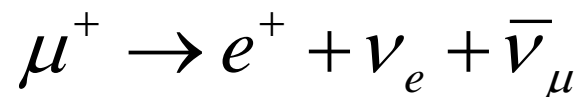
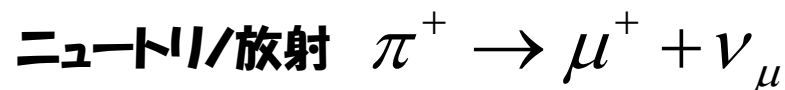
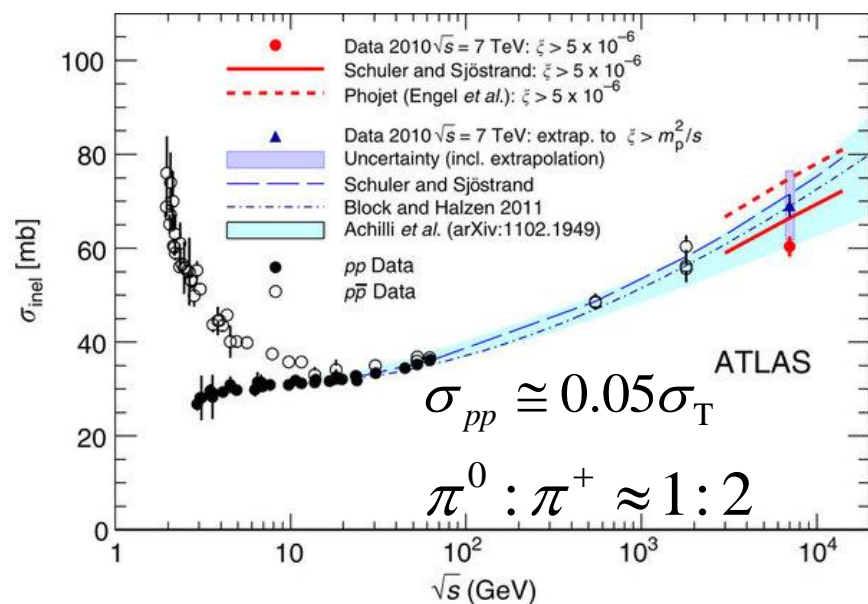
放射過程

陽子起源放射

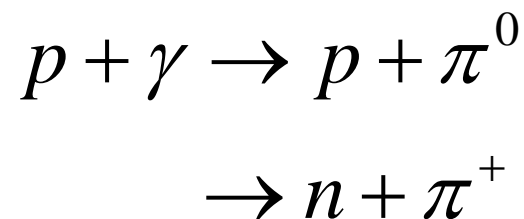
陽子-陽子衝突



($m_\pi = 135\text{MeV}$)



他にも

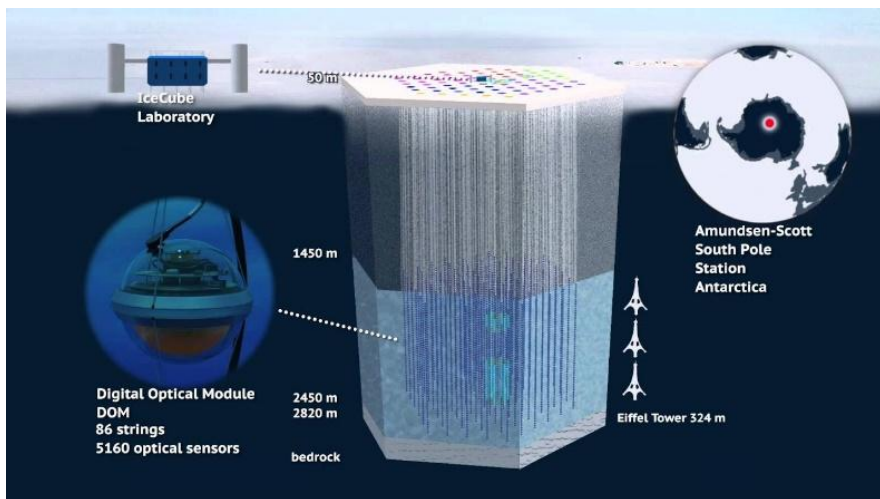


という反応もある。

最高エネルギー宇宙線は3K背景放射とこの反応を起こし、100Mpcほど宇宙空間を漂っているうちにエネルギーを失う。

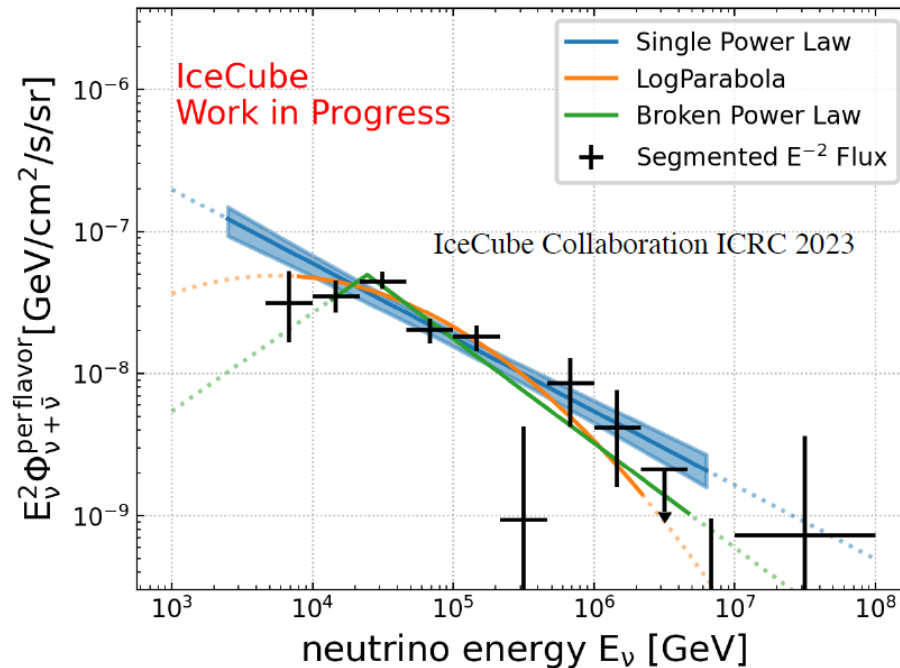
ニュートリノ

IceCube



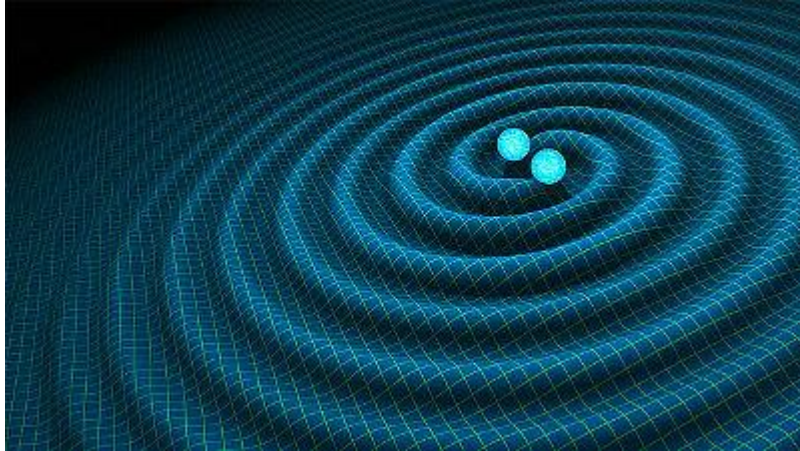
南極にあるニュートリノ検出器

$10^{14} - 10^{15} \text{ eV}$



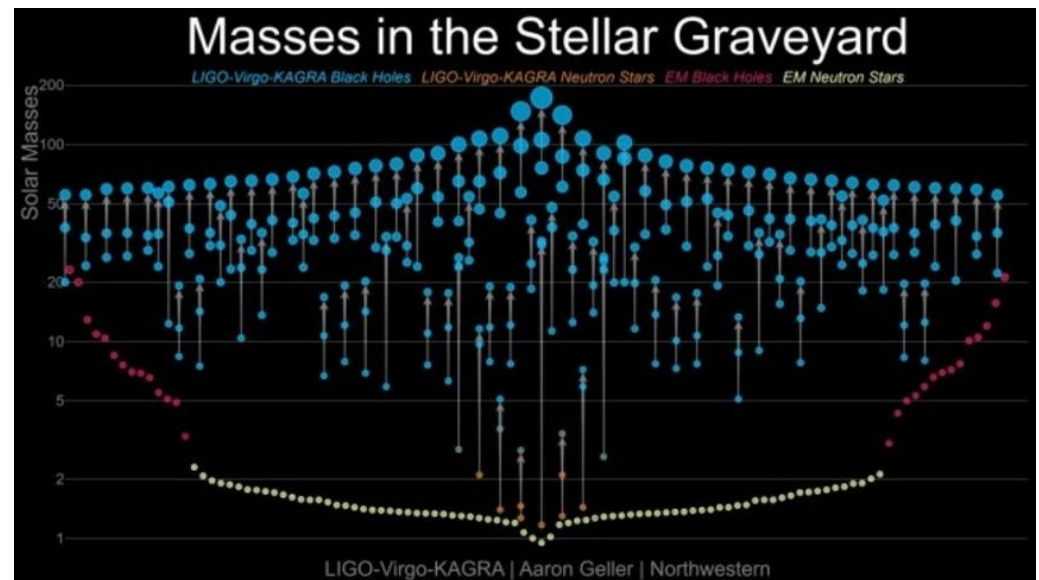
宇宙からそれなりの頻度で降り注ぐ。
起源は謎

重力波

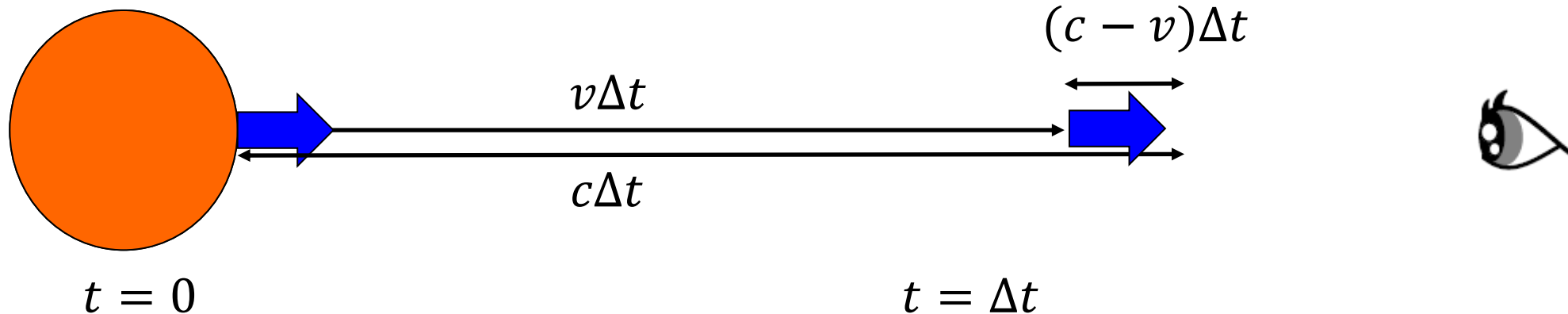


ブラックホール・中性子星連星は、重力波を放ちながら、軌道を縮め、最後は合体する。

太陽質量の30倍などの重いブラックホール連星が多数検出されている。
ガンマ線バーストの残滓？

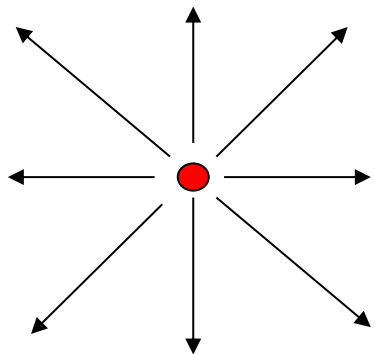


観測量に対する相対論的効果



$$\Delta t_{\text{obs}} = \frac{c - v}{c} \Delta t \simeq \frac{\Delta t}{2\Gamma^2} < \Delta t' = \frac{\Delta t}{\Gamma}$$

等方放射 立体角 4π



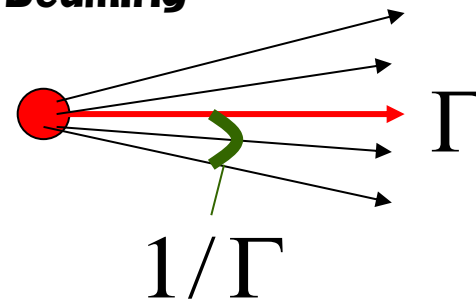
プラズマ静止系

角度のローレンツ変換

$$\mu = \frac{\mu' + \beta}{1 + \beta\mu'}$$

$(\mu = \cos\theta)$

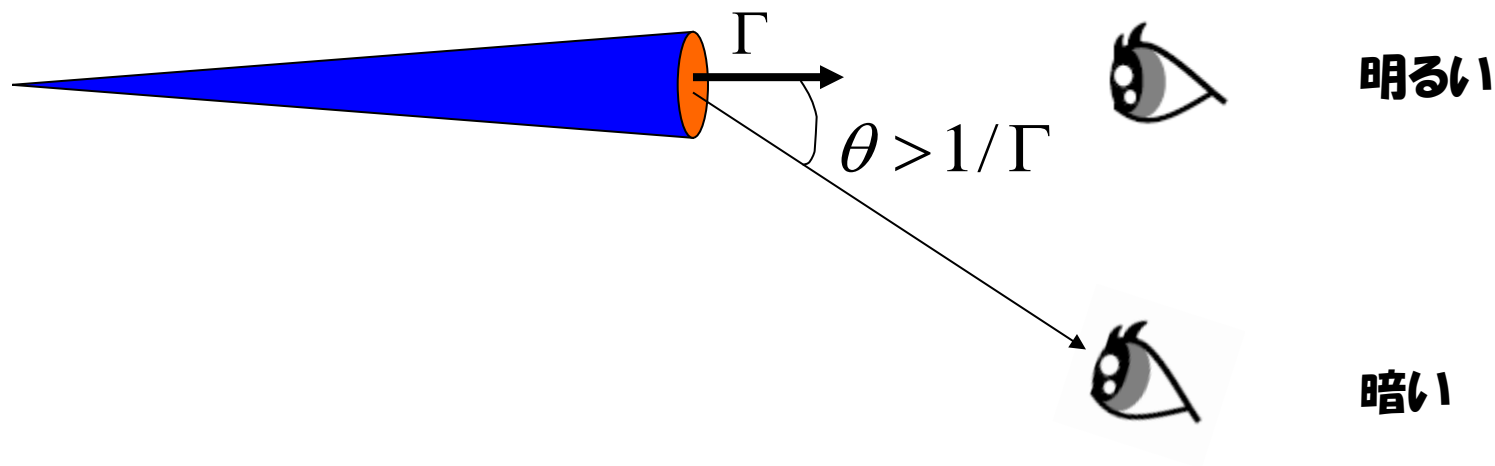
Beaming



立体角 $d\Omega \approx 1/\Gamma^2$

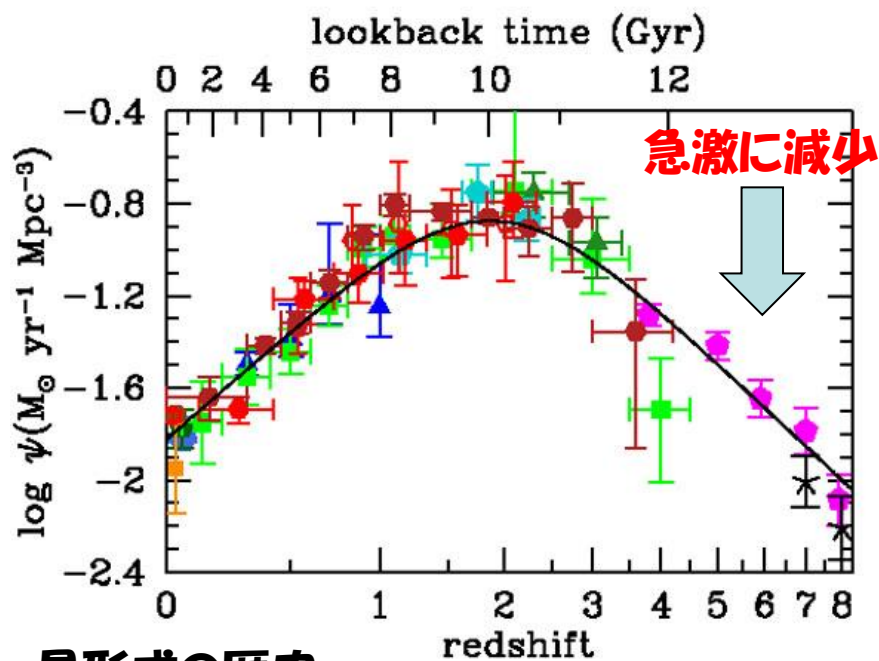
観測量に対する相対論的效果

$$L_{\text{obs}} = \frac{4\pi}{d\Omega} \frac{E}{\Delta t_{\text{obs}}} \cong \Gamma^4 L'$$



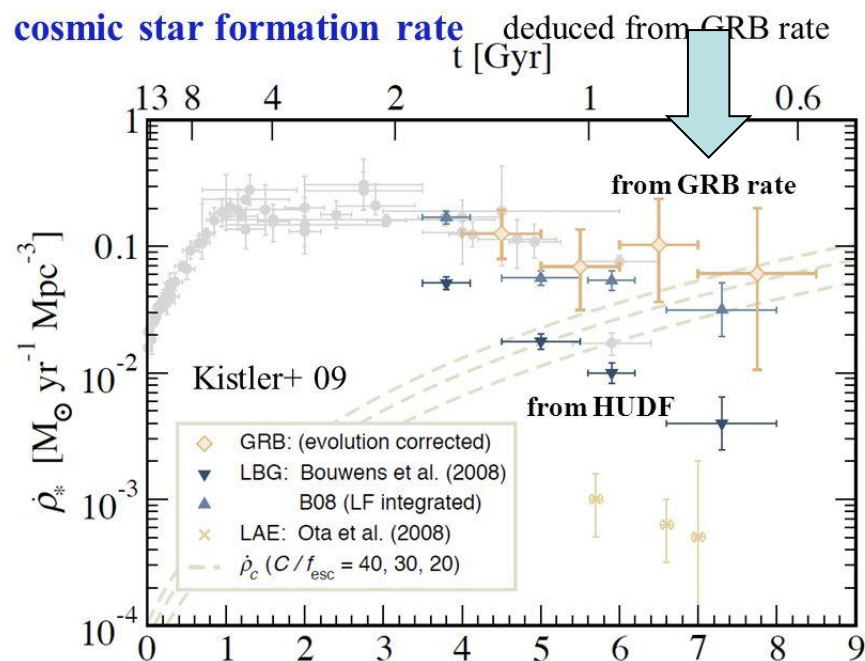
総合的な知の連携

宇宙の星形成の歴史⇒重いブラックホール連星の親星は？
 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

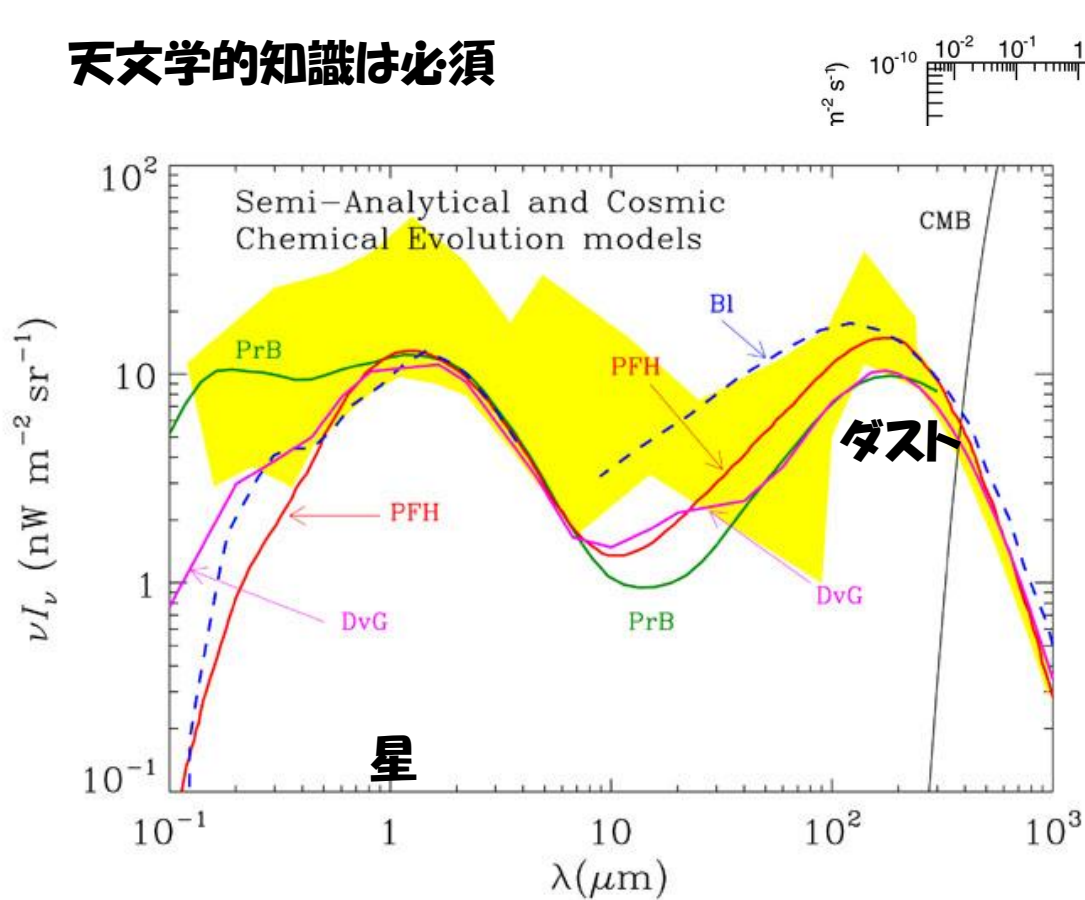


JANUS/GUNDAMでよりhigh- z へ
 直接観測と相補的

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)

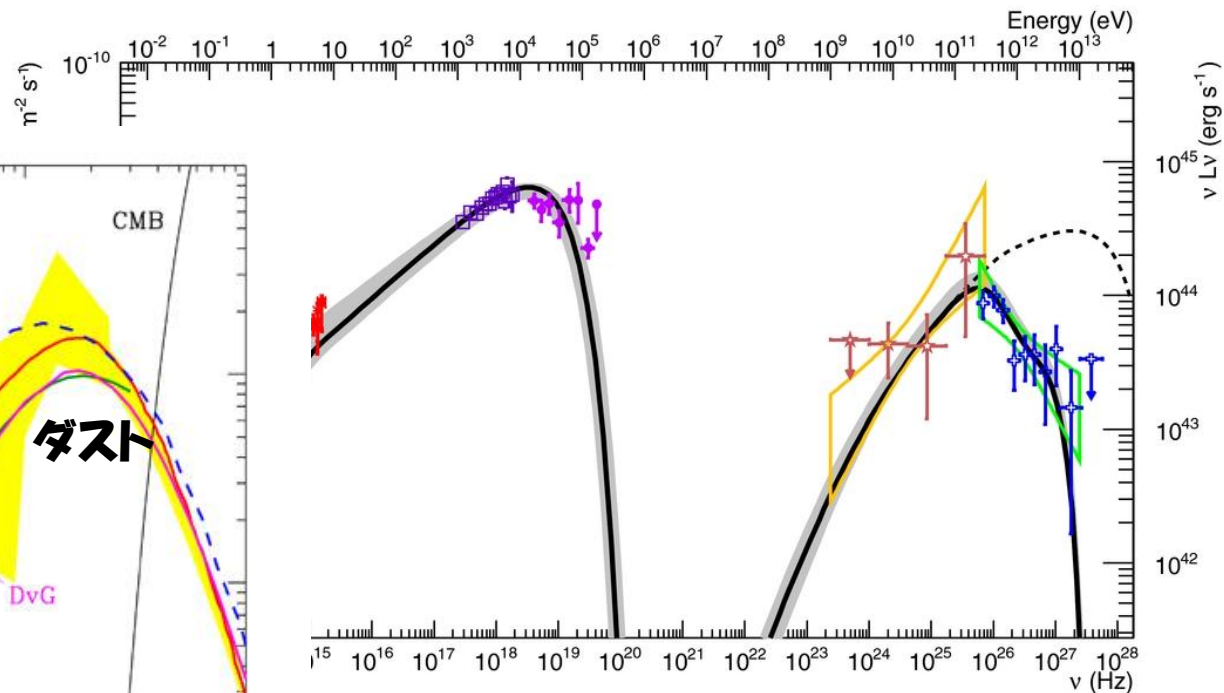
総合的な知の連携

天文学的知識は必須



宇宙背景放射

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

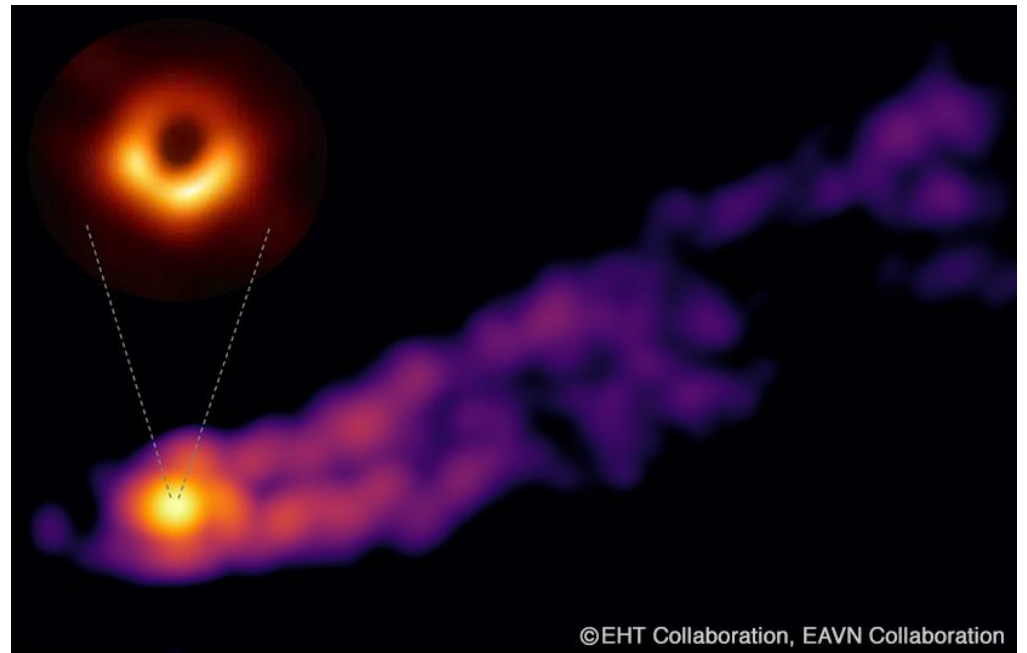


フレージャーのTeVガンマ線は吸収
されているはず。

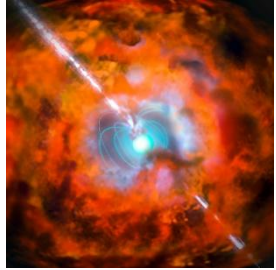
フレージャーの放射機構と星形成史
両方を同時に議論する。

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



学問体系



天文学
宇宙論



プラズマ運動論
放射過程・特殊相対論

輻射・ニュートリノ輸送

核融合
光分解

相対論的磁気流体・熱統計力学

一般相対論
古典・量子電磁気学

超流動
高密度核力⇒状態方程式
ストレンジクォーク?



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→**浅野 5階503号室**)