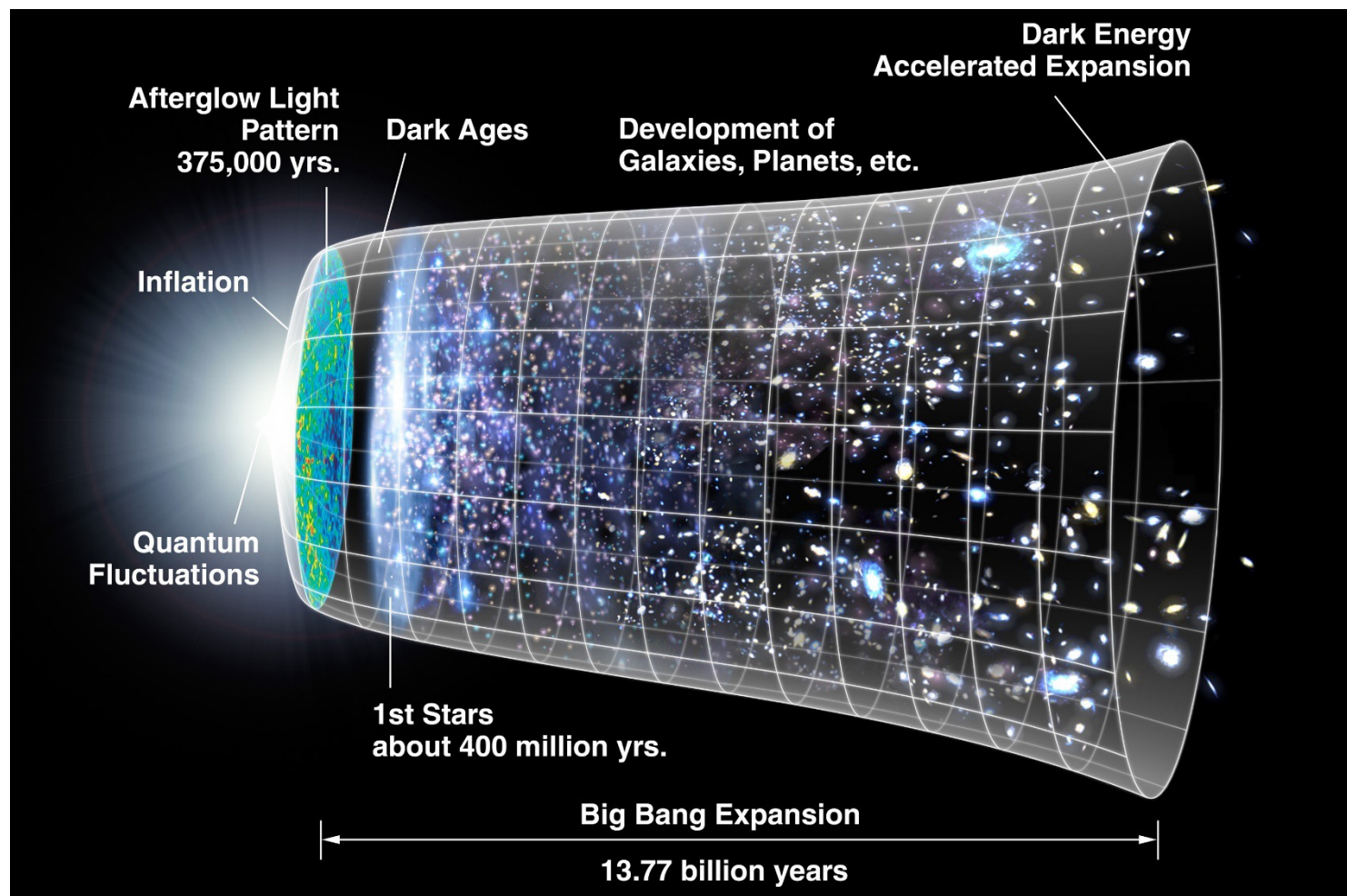


高エネルギー天体物理

浅野勝晃

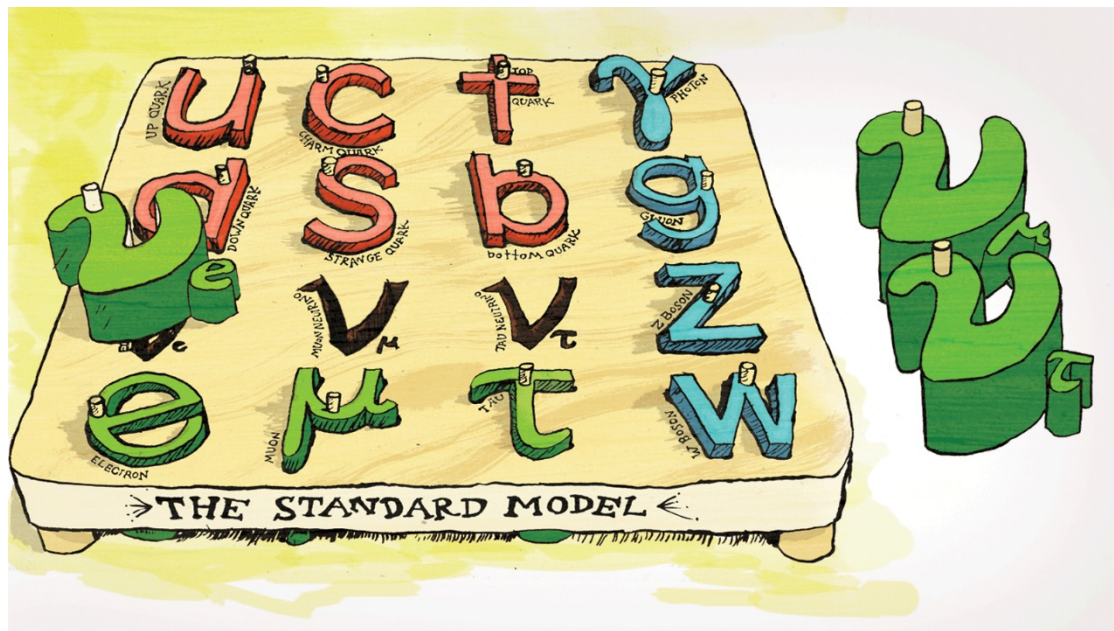
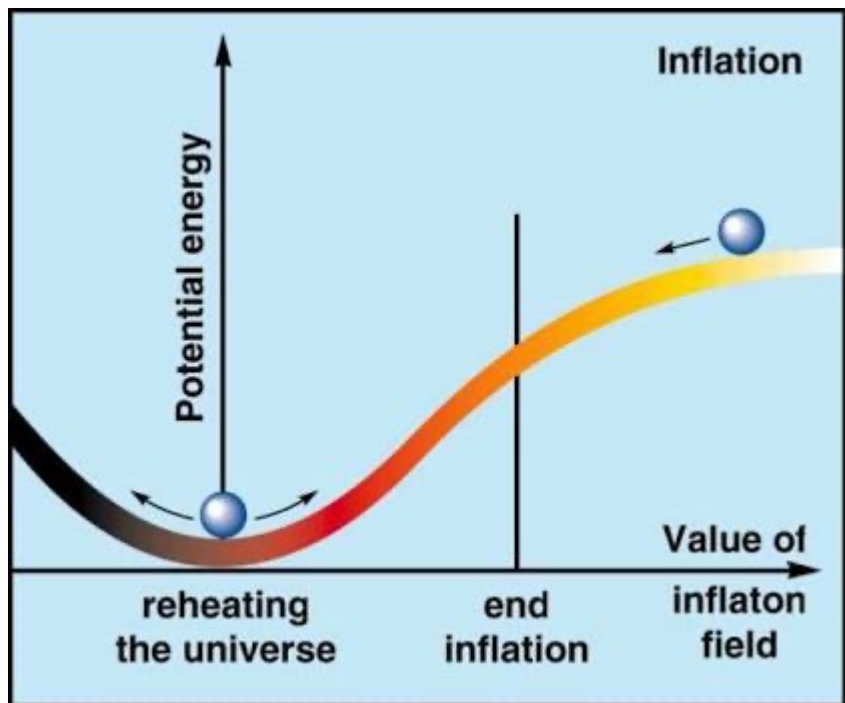
(高エネルギー天体グループ)

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られると整合的。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。

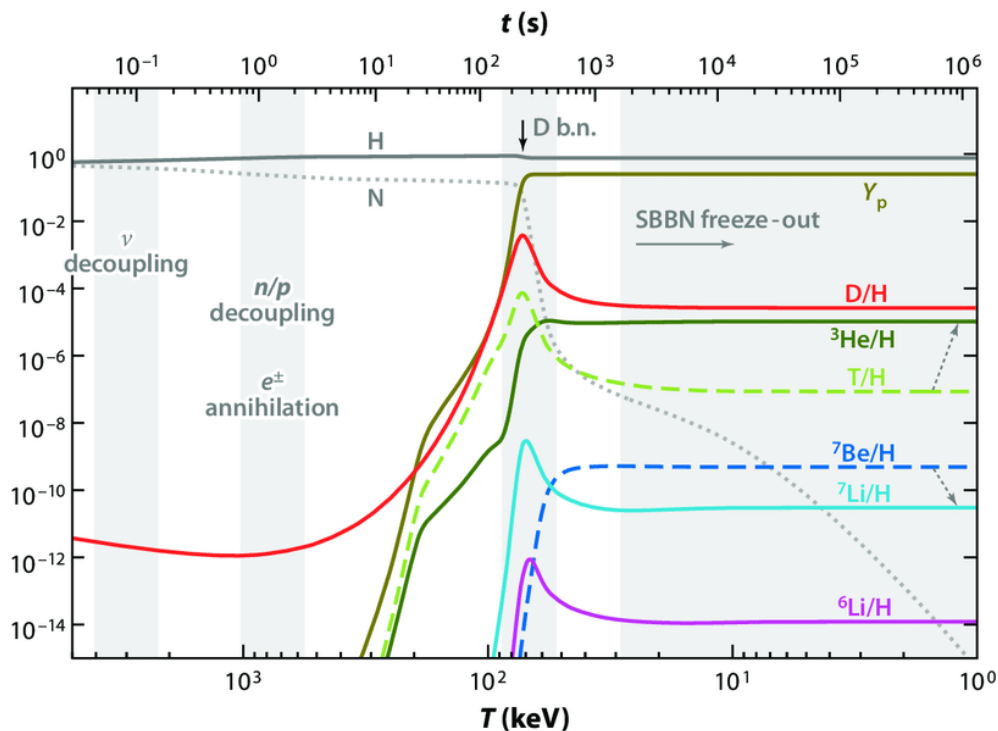
再加熱



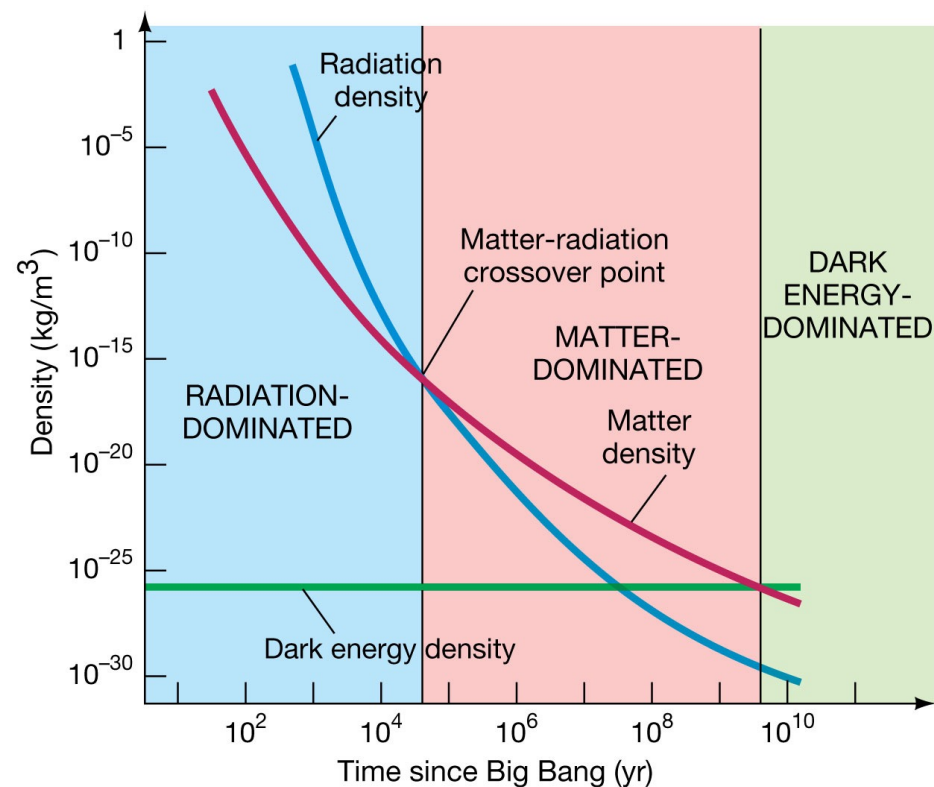
スカラー場のポテンシャルEが散逸、
様々な種類の粒子が生成。
非常な高温 (10^{30}K ?) で、ほぼ全ての
粒子は光速で飛び回っている。
(ここまで 10^{-32}s くらい?)

宇宙が膨張し、温度が下がってくると、エネルギー
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



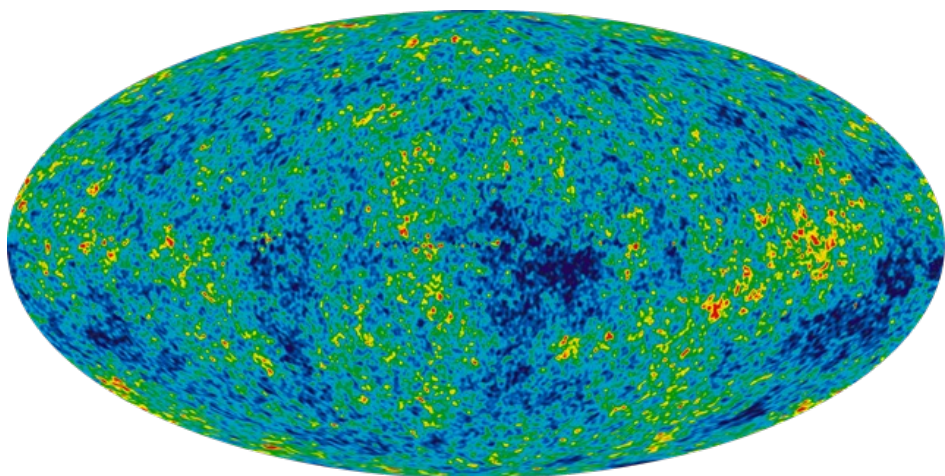
かすかすの量しかないバリオンは、数種の原子核へと落ち着く。暗黒物質の方が多いに注。
この頃はそもそも光子とニュートリノが支配的。



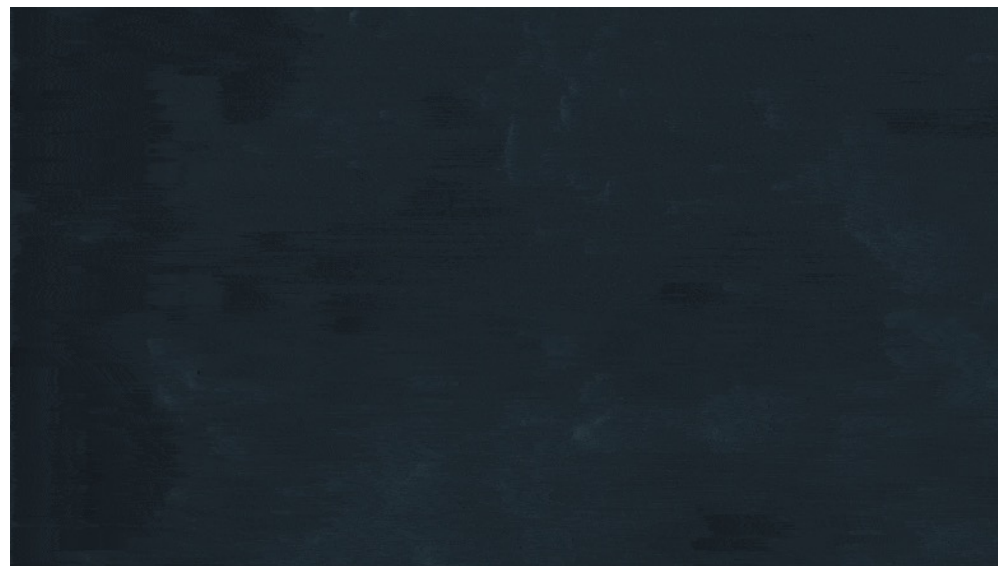
© 2011 Pearson Education, Inc.

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。

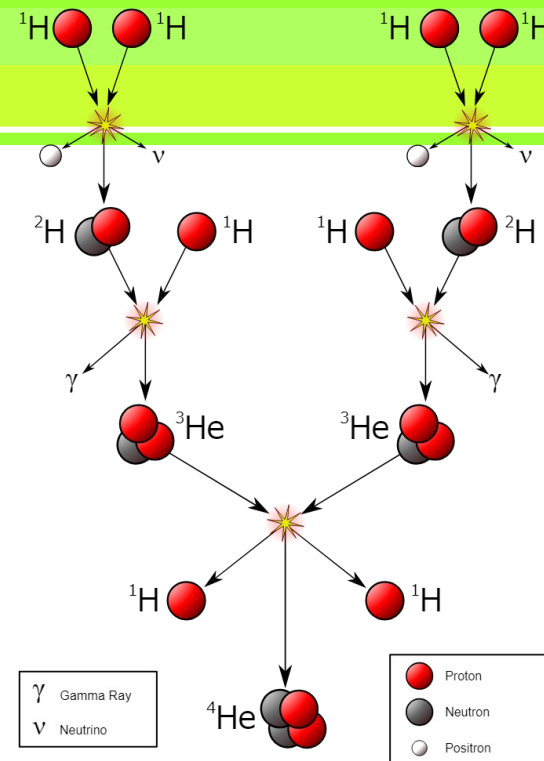
輻射優勢期はホライズンより大きなスケールだけ、ホライズンより小さなスケールでは、物質優勢期になって、密度揺らぎを成長させる。

初代星



分子雲

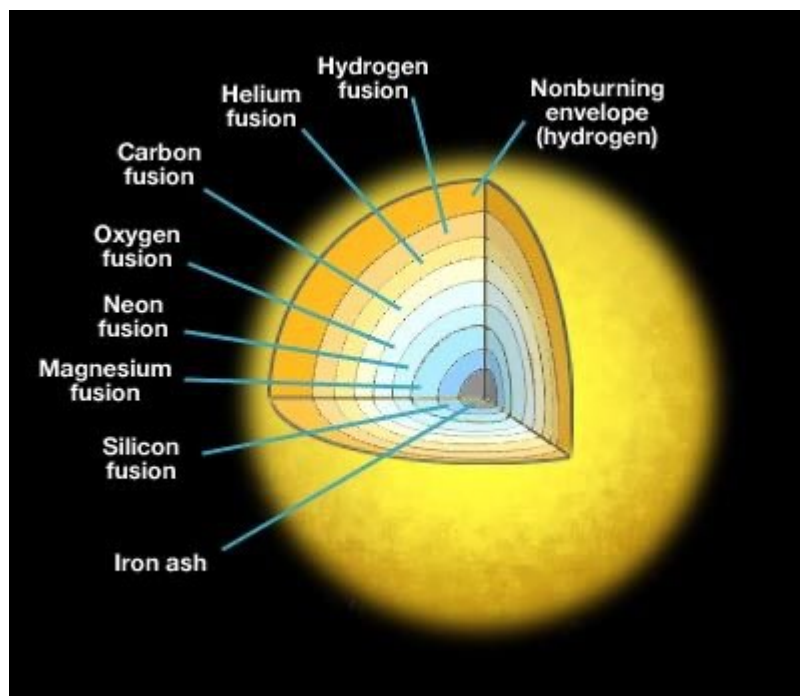
重力だけでガスを収縮させても、断熱的に温度が上がり、圧力で押し返される。ガスはH₂分子を作り、電磁波の放射などでエネルギーを抜きながら、密度を上げていく。分子雲は不安定で、分裂を繰り返すが、Heよりも重い元素の無い初期宇宙では、分子雲の温度が高く、大きな塊のまま進化。初代星は現在よりも大きな星が多かった？



恒星

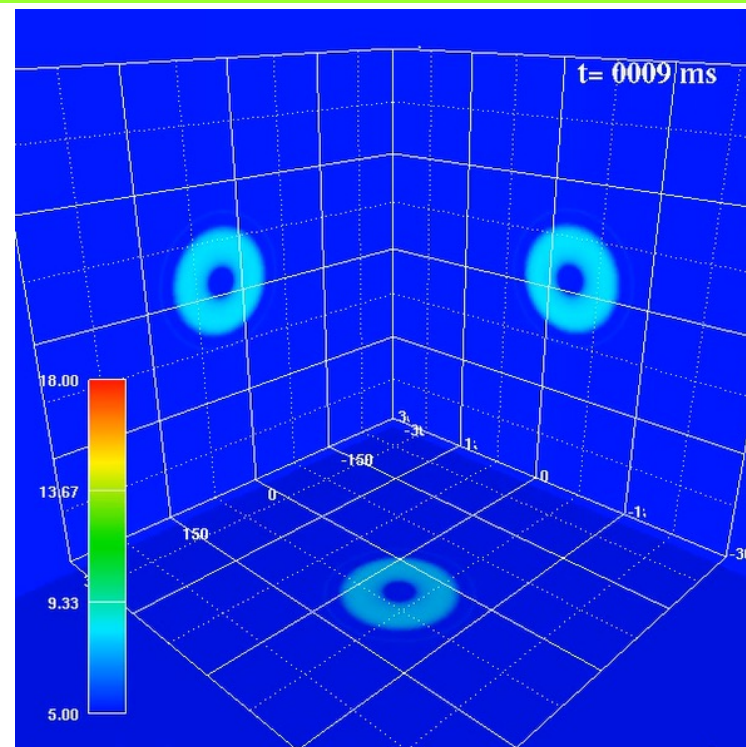
ガス雲の中心で温度が上がってくると、核融合反応がスタート。エネルギーを生成し、星として光り出す。

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。



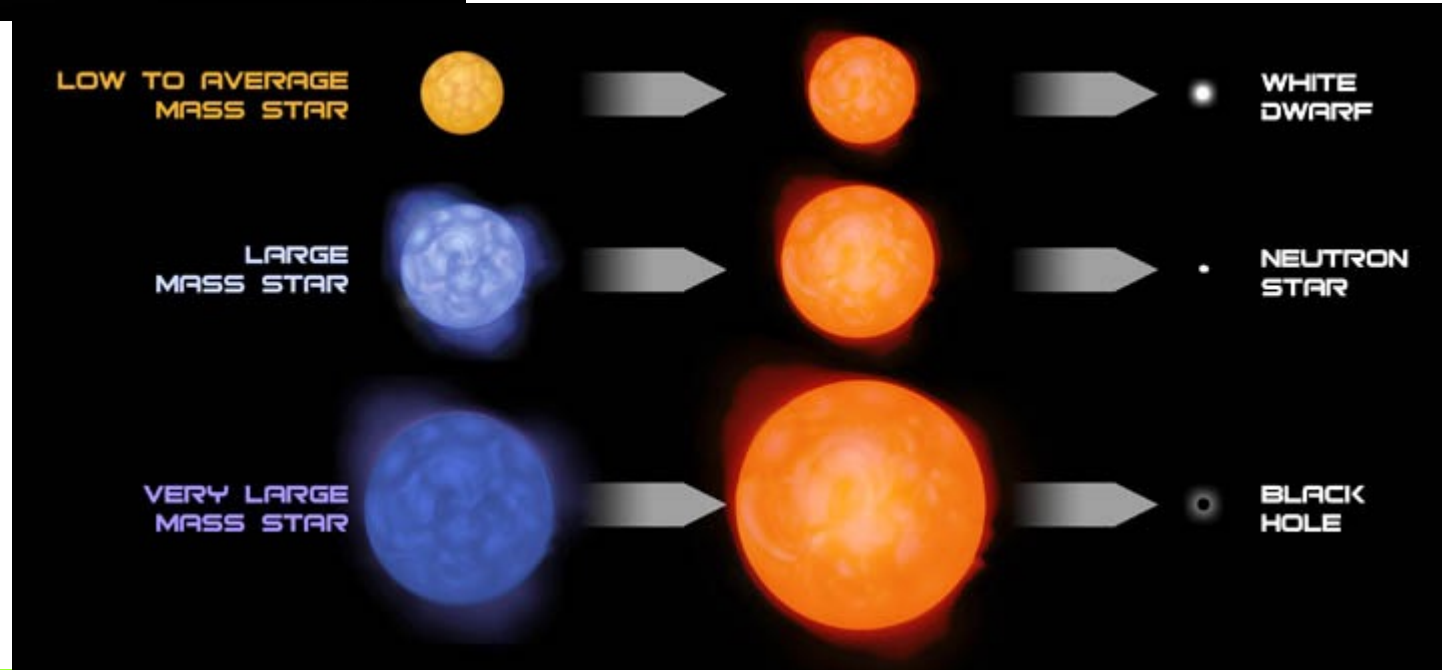
中心に原始中性子星が生まれ、そこから放たれるニュートリノが周りのガスにエネルギーを与え、爆発。

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

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

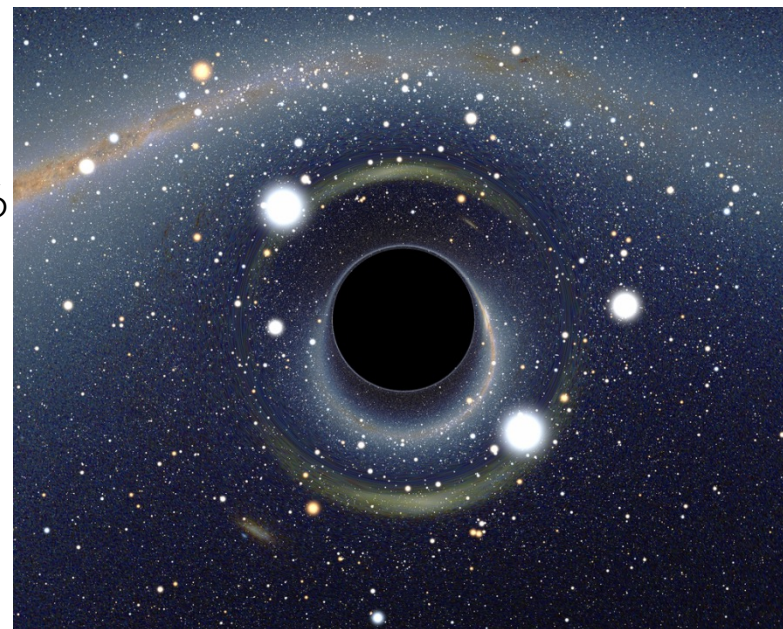
これよりも小さな半径の星はブラックホールになる
太陽質量なら3kmほど。

回転するブラックホール

角運動量

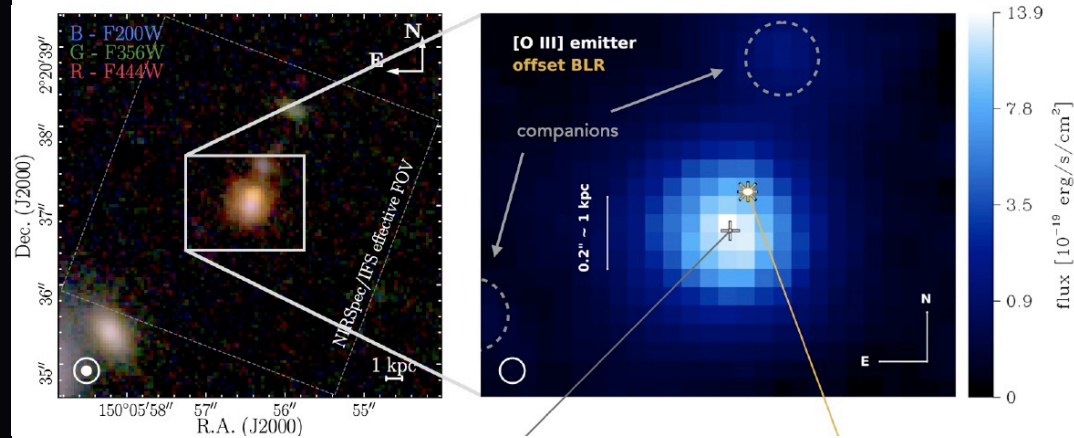
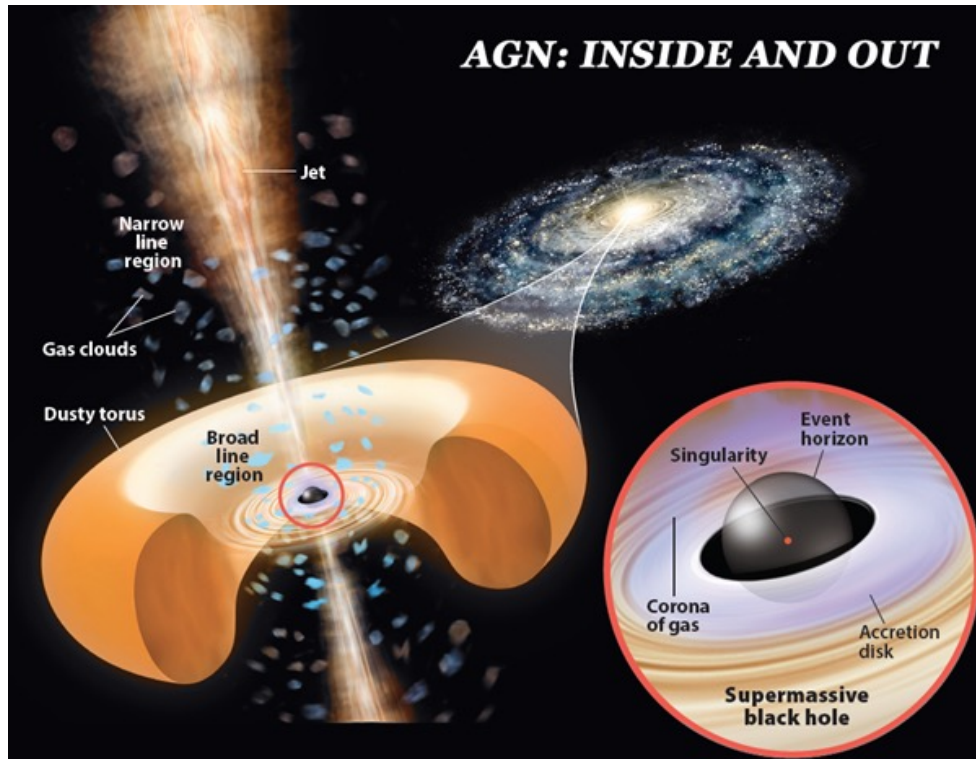
$$J_{\text{BH}} = a \frac{GM_{\text{BH}}^2}{c}$$

$$a < 1$$



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aのみ。

巨大ブラックホール

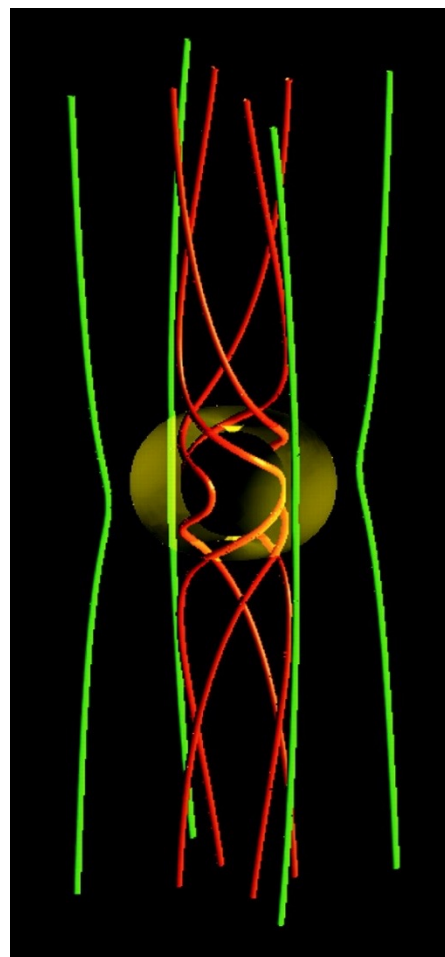
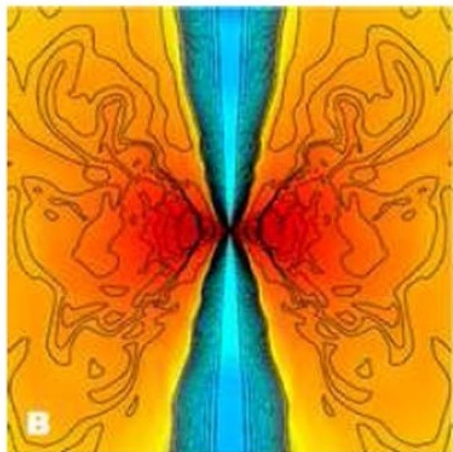
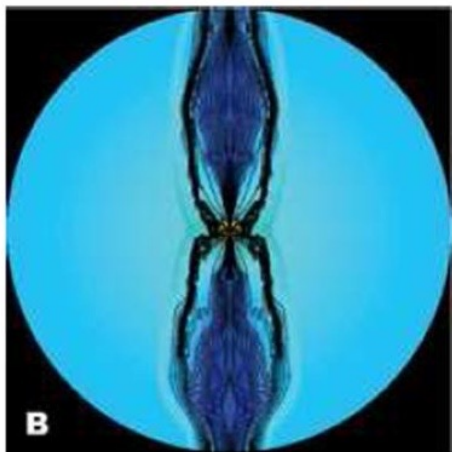
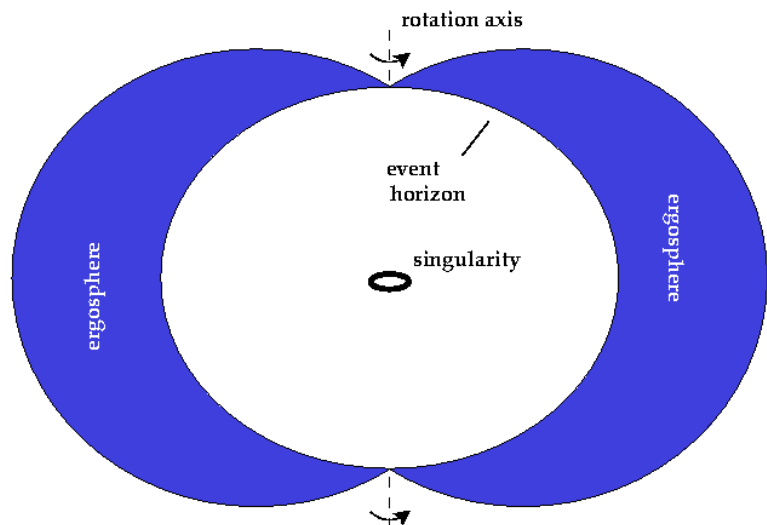


赤方偏移 ~ 7 （宇宙年齢7.4億年）で既に太陽質量の約 10^8 倍のブラックホールが発見。そんなに大きなブラックホールを如何にして作るか？

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。

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



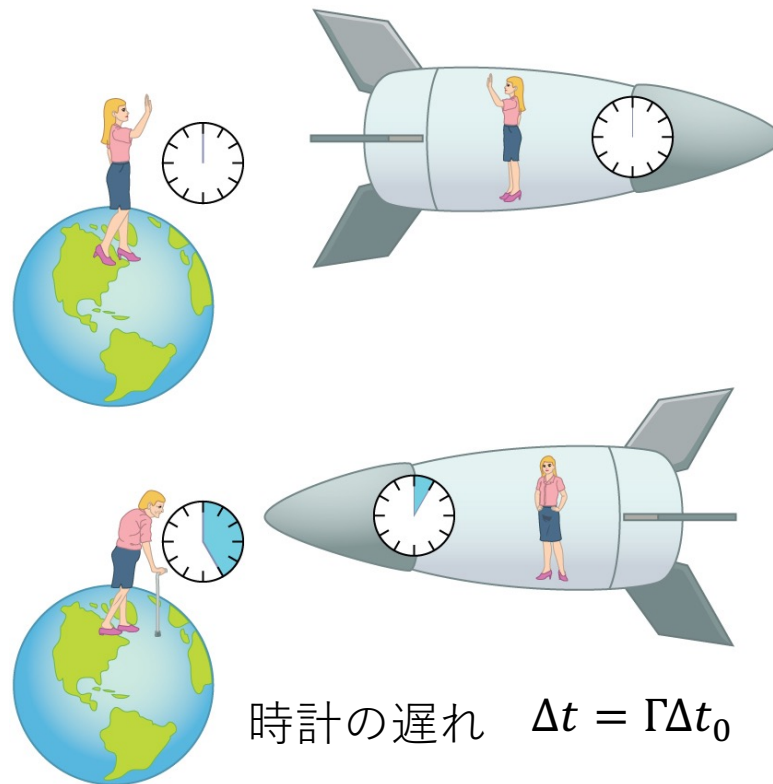
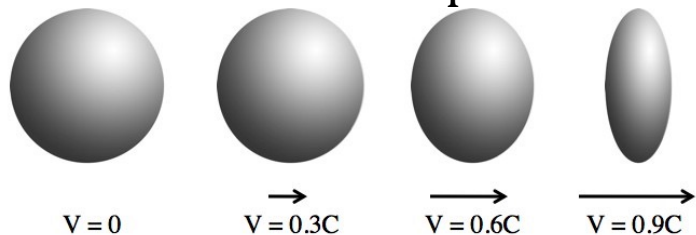
電磁場によるエネルギーの流れ

高エネルギーの世界

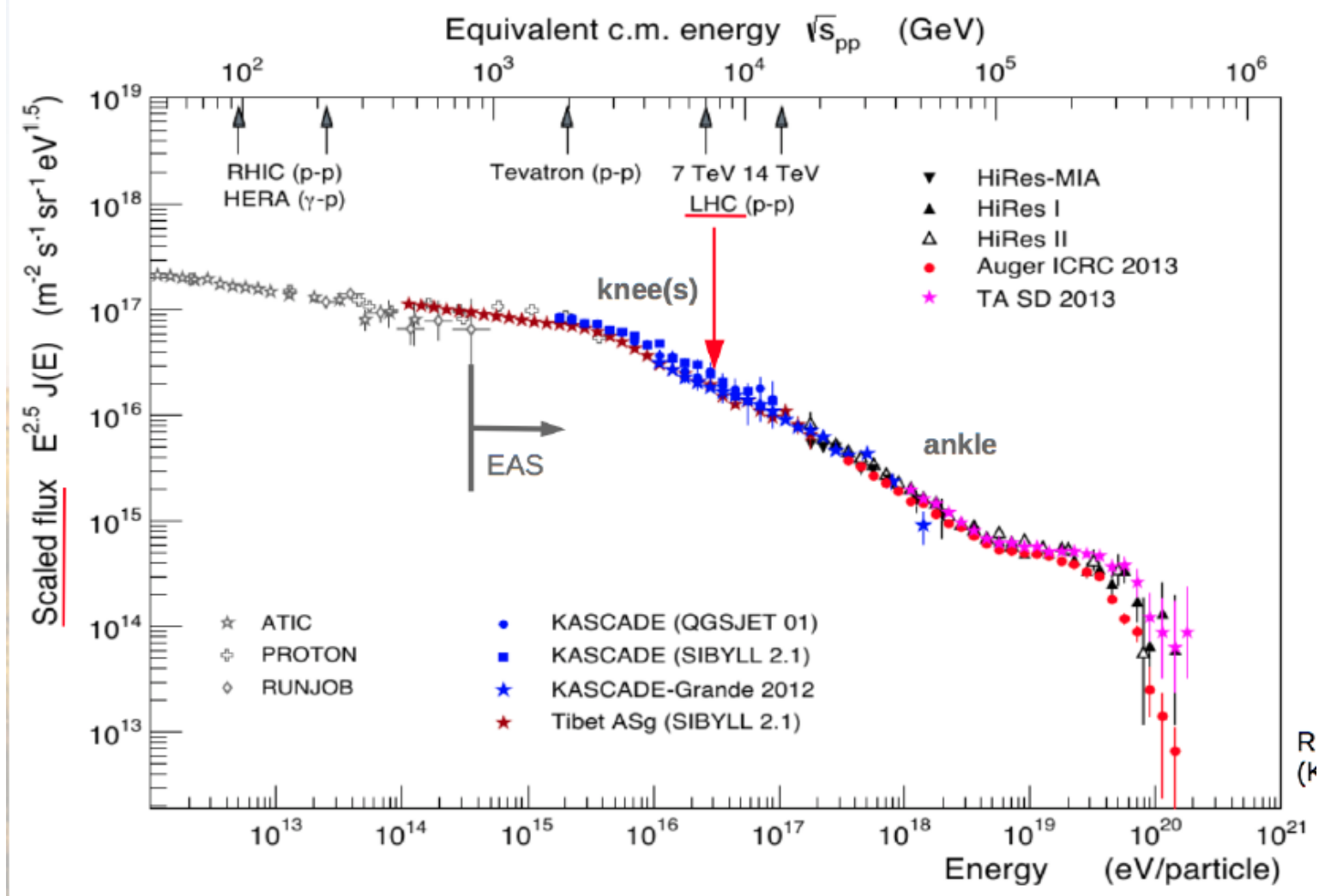
高エネルギー：相対論的な世界

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

ローレンツ収縮 $l = \frac{l_0}{\Gamma}$

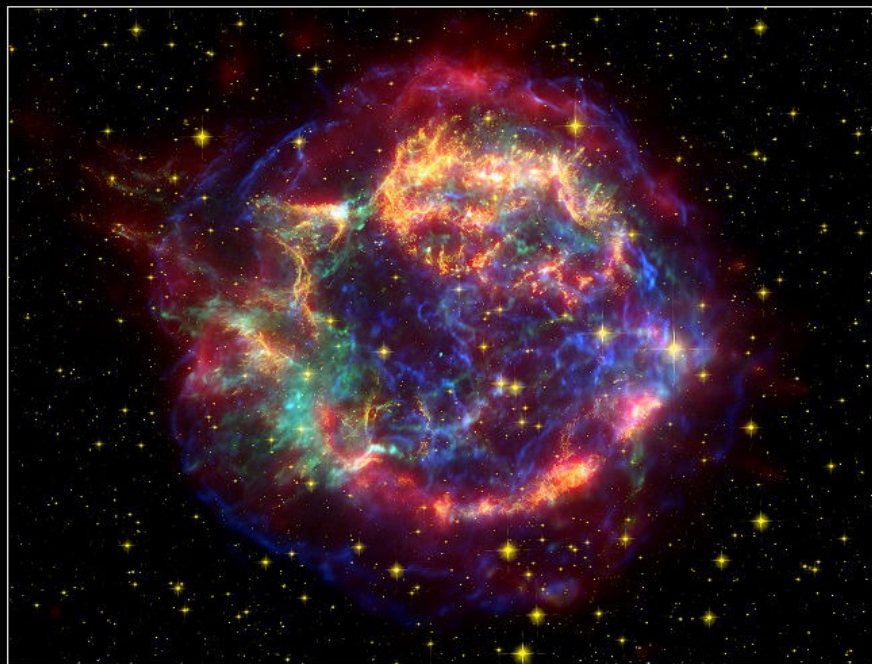


宇宙線



$\Gamma \gg 1$ 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

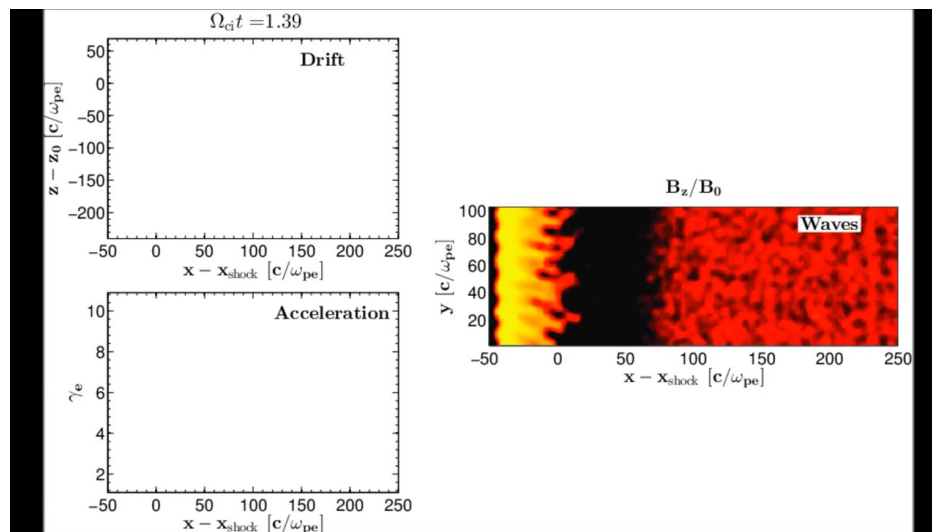
Spitzer Space Telescope • MIPS
Hubble Space Telescope • ACS
Chandra X-Ray Observatory

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



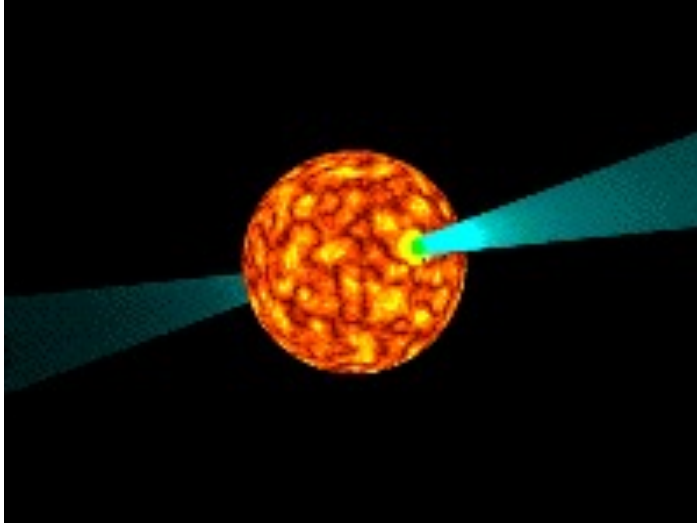
衝撃波による粒子加速
高エネルギー粒子の生成

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

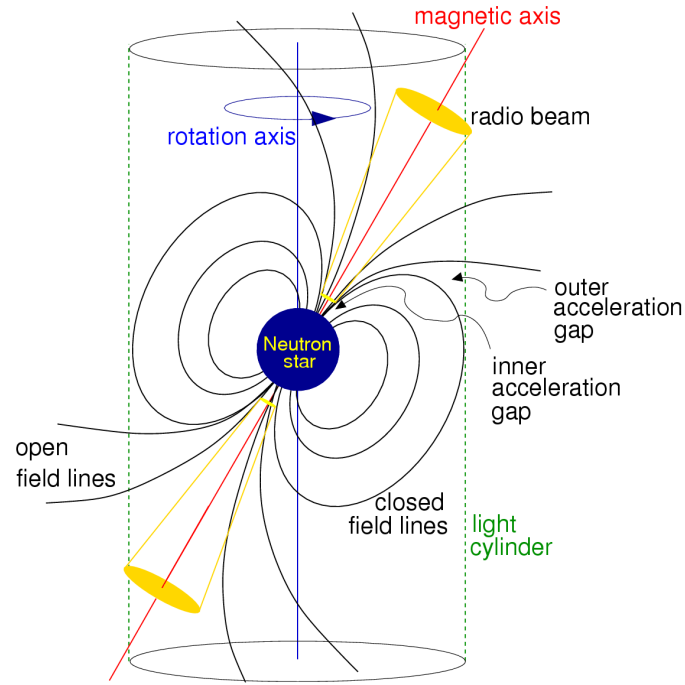
プラズマ波動による散乱

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。



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

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

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

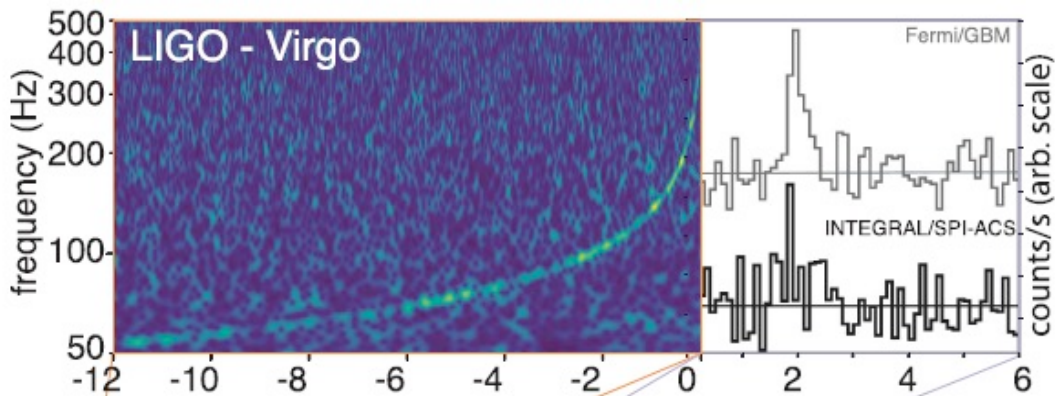
吸収係数 (エネルギー ε の光子が単位距離進んだ時に電子・陽電子を作る確率)

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

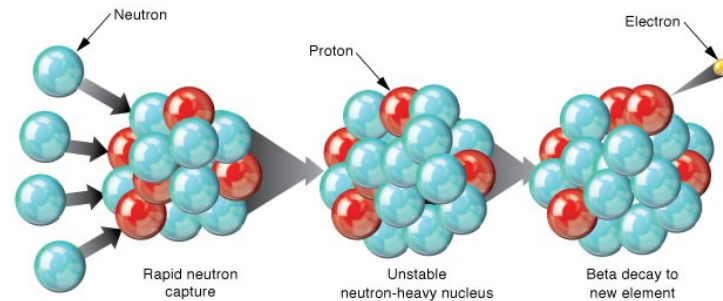
中性子星連星合体

r-過程元素合成

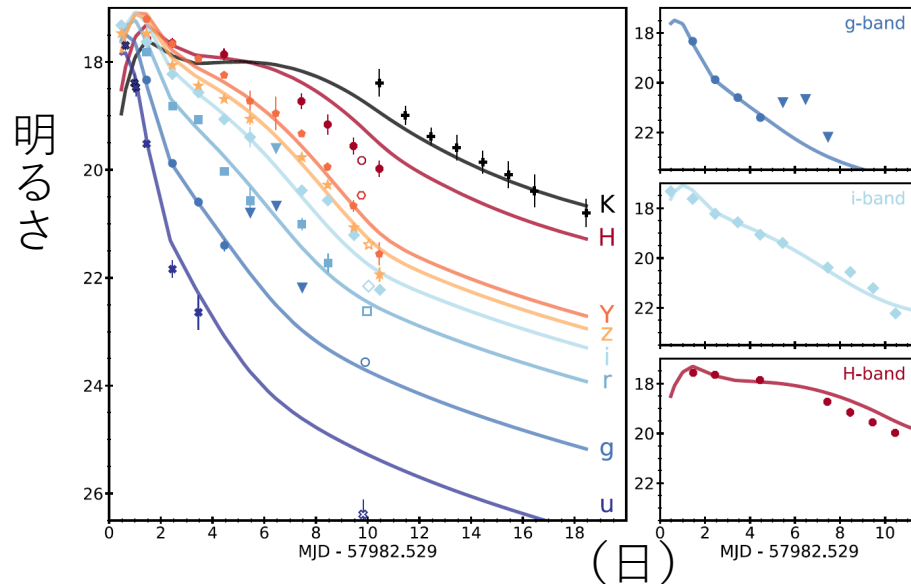
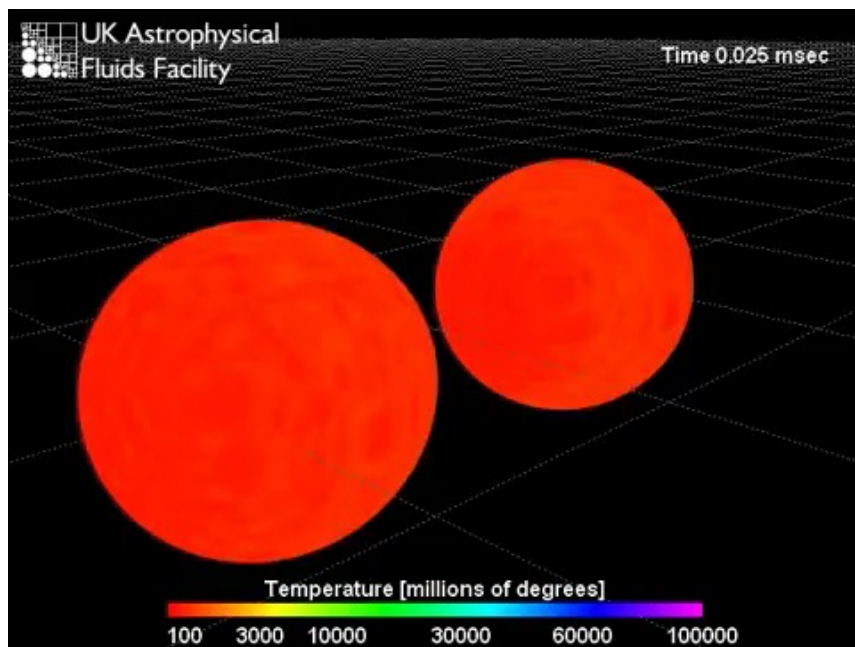
⇒ 不安定核（放射性元素）の生成



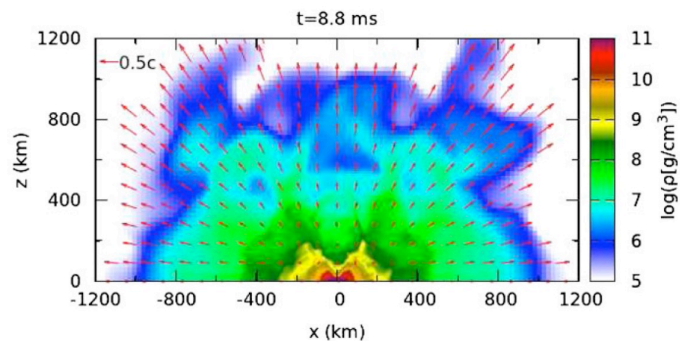
弱いガンマ線放射を伴う、中性子星連星合体



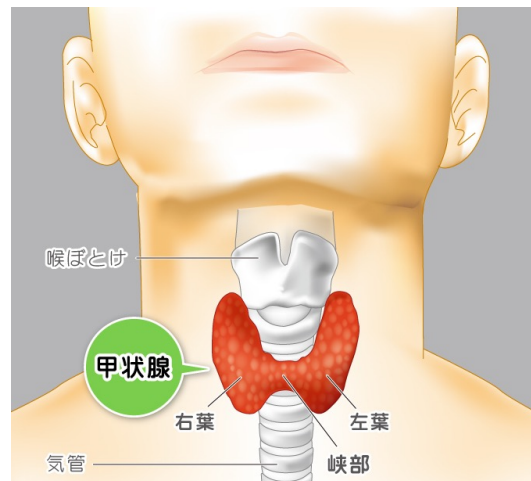
放射線を熱源として、可視光、赤外、紫外線で光る。



中性子連星合体に伴う重元素合成



Iodine

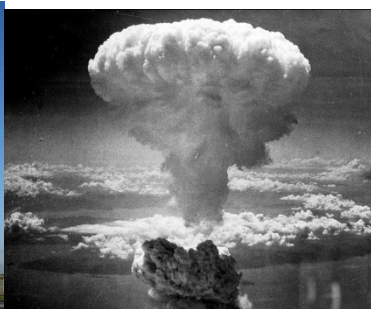


Thyroid hormone

Gold

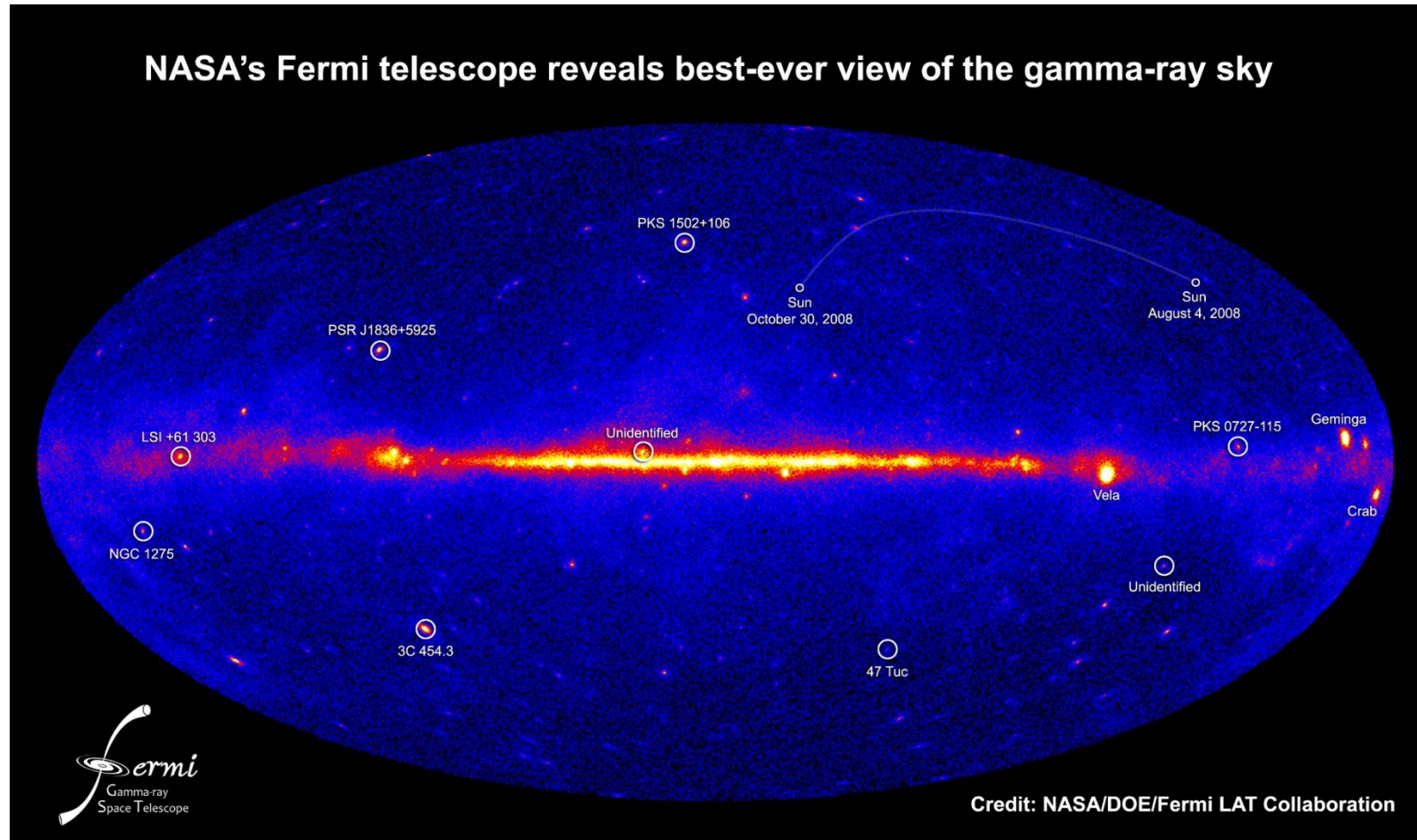


Uran



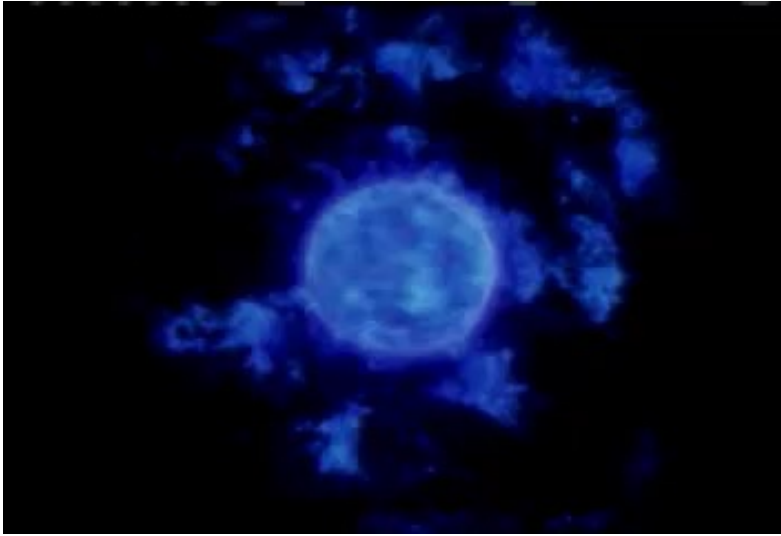
H		Big Bang fusion																He																																																																																																					
Li		Dying low-mass stars																Be																																																																																																					
Na		Expanding massive stars																Mg																																																																																																					
K		Human synthesis																Ca																																																																																																					
Rb		No stable isotopes																Sr																																																																																																					
Cs		Cosmic ray fission																Ba																																																																																																					
Fr		Merging neutron stars																Ra																																																																																																					
		Expanding white dwarfs																																																																																																																					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120

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

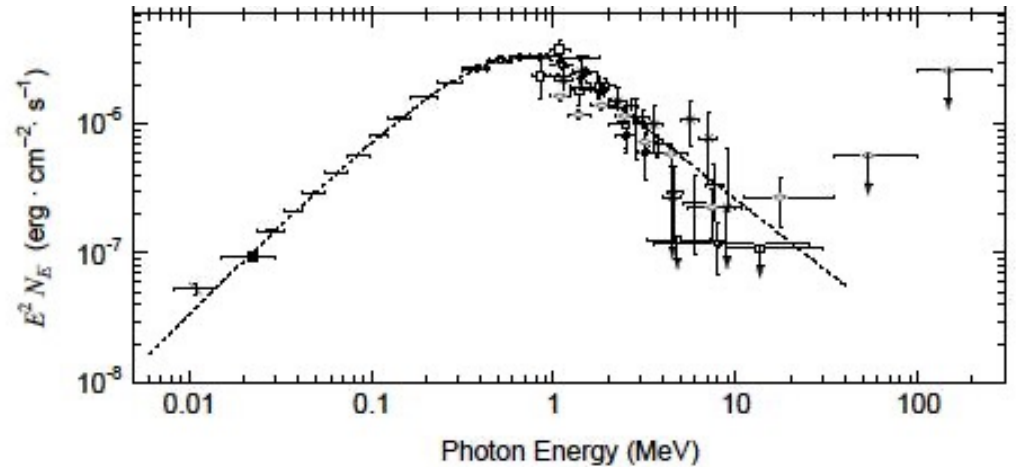
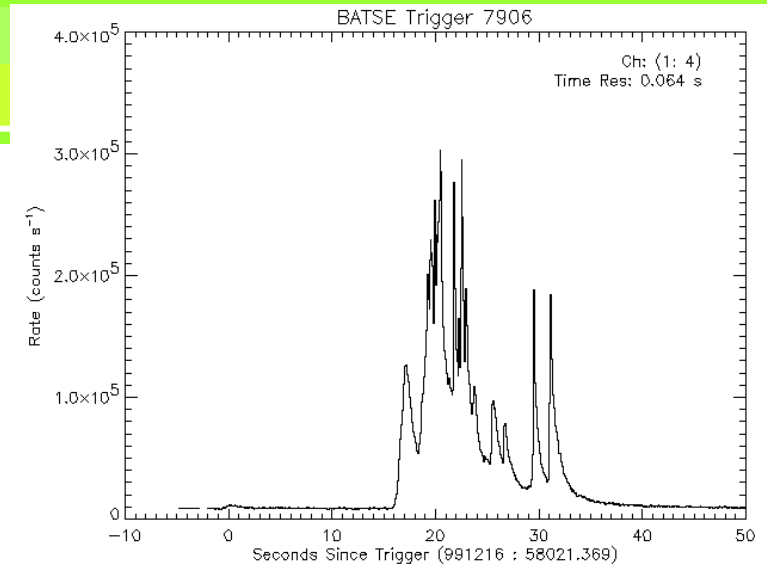


宇宙最大の爆発現象

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

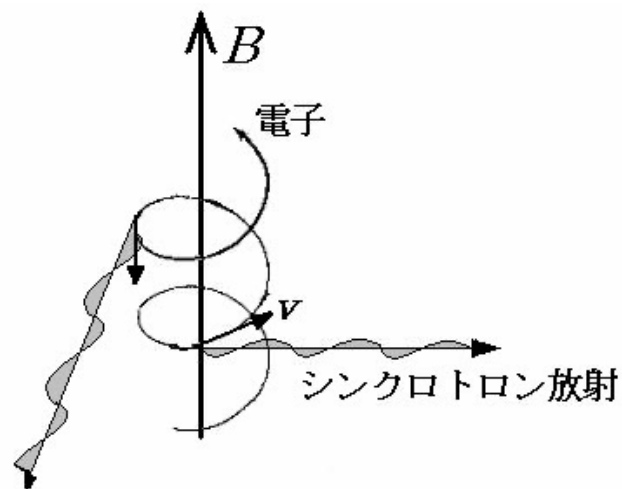
最も明るいものの解放エネルギーは
 $\sim M_{\odot} c^2$ に達する。



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



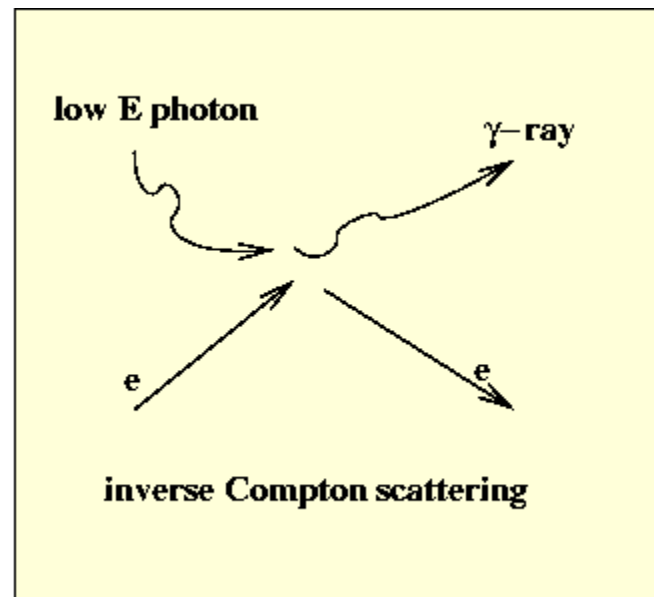
シンクロトロン放射。 v は電子の速度ベクトルを表す。シンクロトロン放射は、磁力線に垂直に直線偏波しており、磁場に垂直な速度成分 v_{\perp} 方向のごく狭い領域にのみ放射される。

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



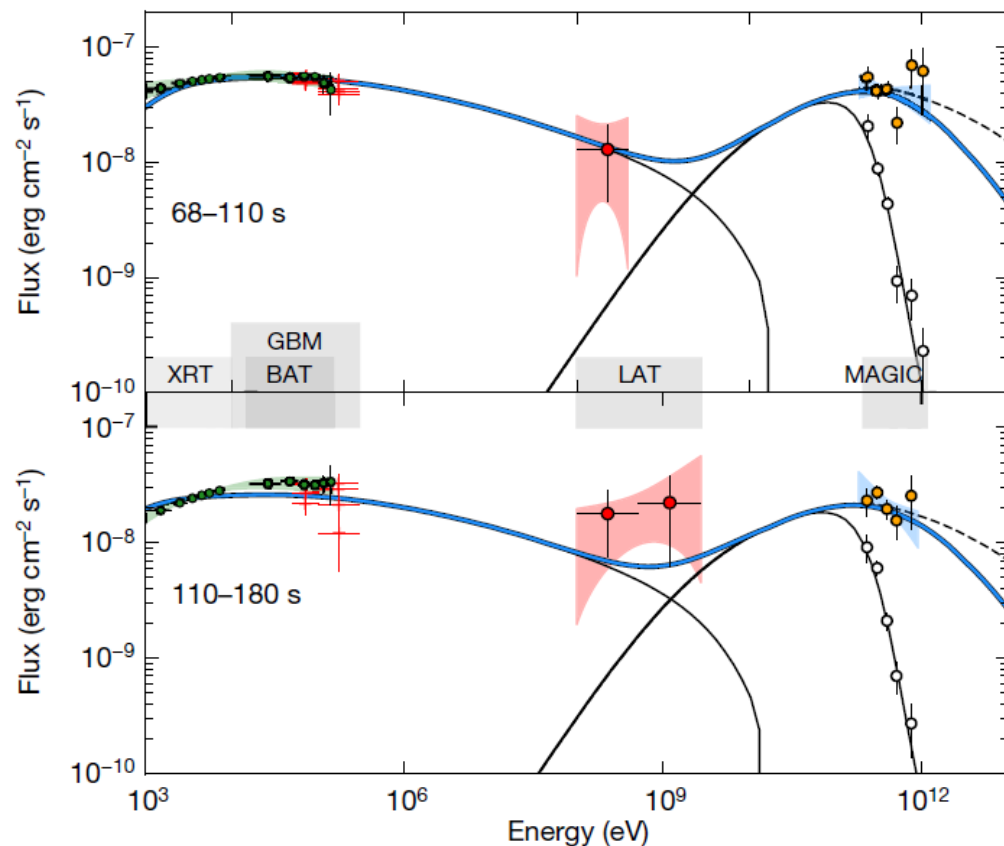
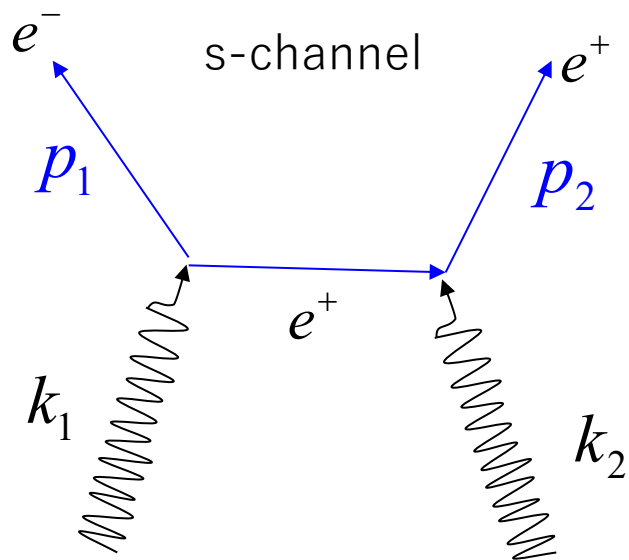
典型的な光子のエネルギー $\varepsilon_{\text{typ}} = \gamma^2 \varepsilon_0$

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

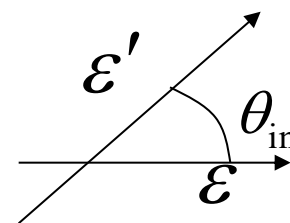
$$\gamma + \gamma \leftrightarrow e^- + e^+$$



ガンマ線バースト残光のスペクトル

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

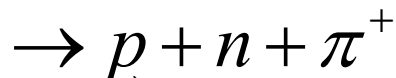
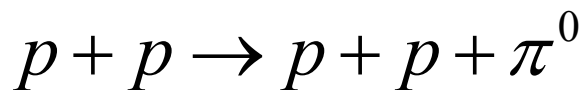
$$y^2 \equiv 1 - \frac{2m_e^2 c^4}{\varepsilon \varepsilon' (1 - \cos \theta_{in})} < 1$$



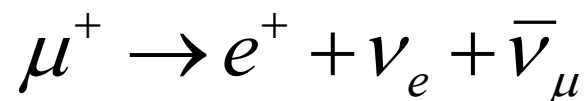
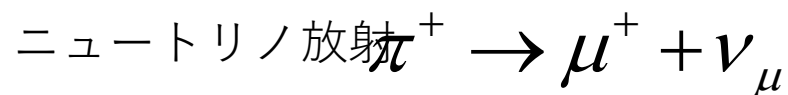
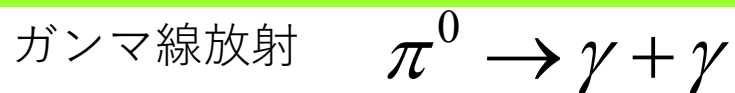
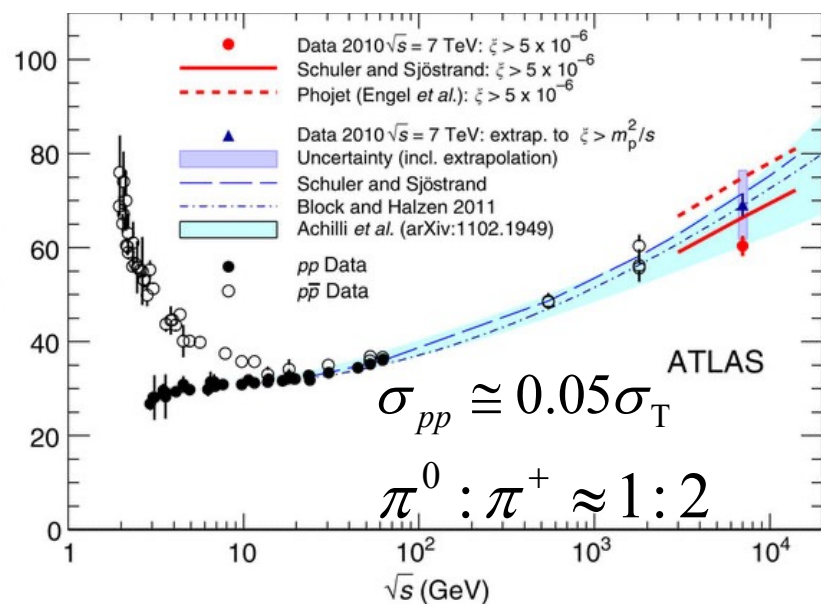
放射過程

陽子起源放射

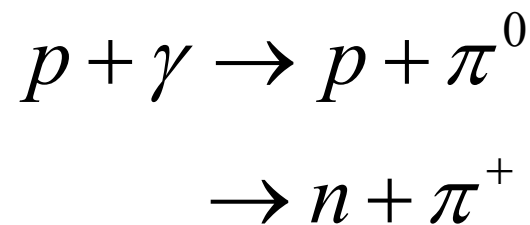
陽子-陽子衝突



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



他にも

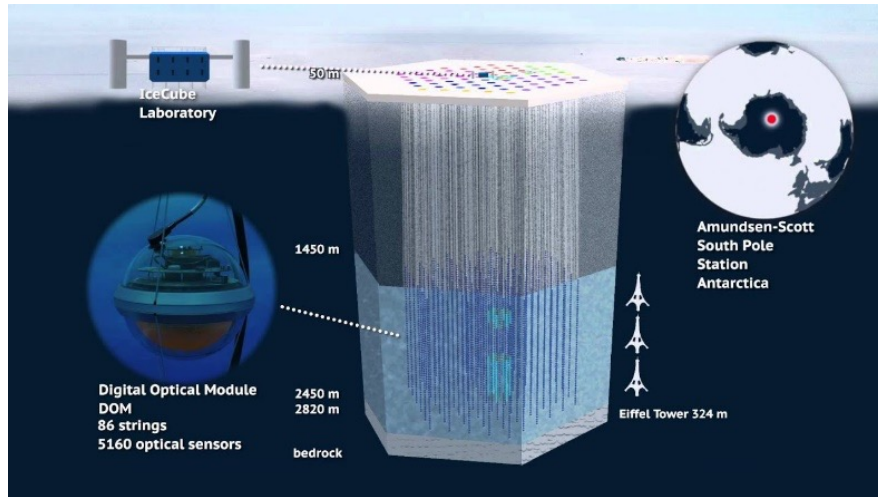


という反応もある。

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。

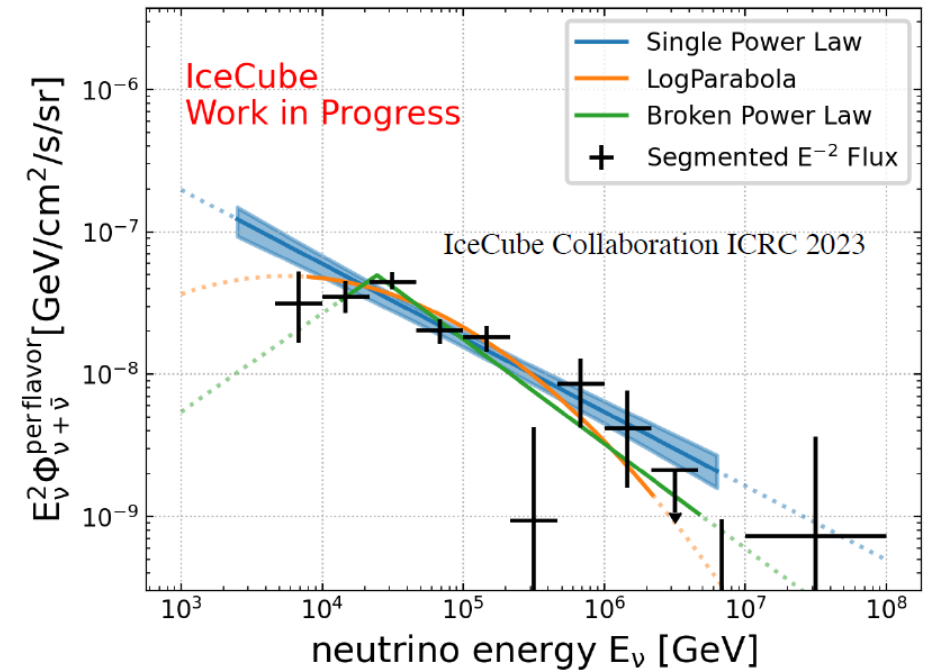
ニュートリノ

IceCube



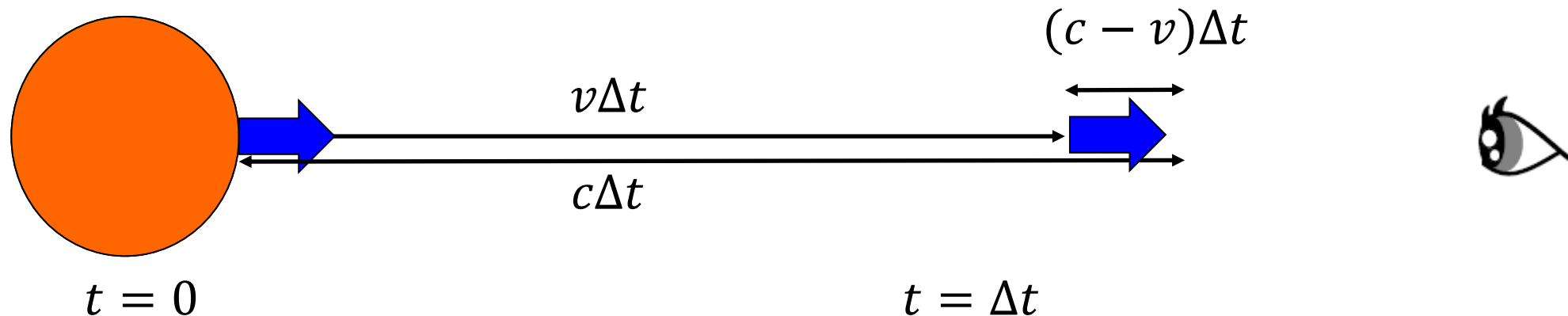
南極にあるニュートリノ検出器

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



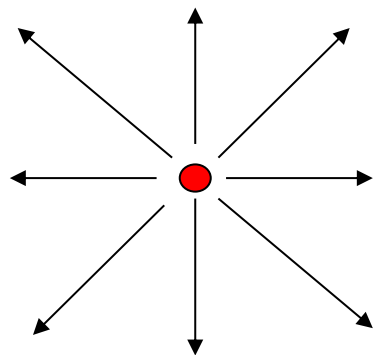
宇宙からそれなりの頻度で降り注ぐ。
起源は謎

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



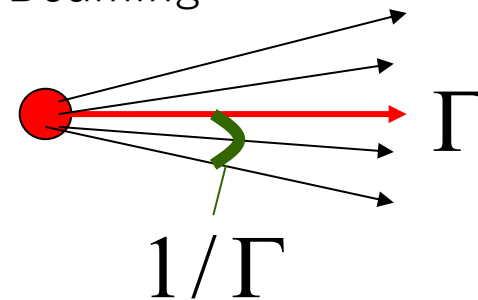
プラズマ静止系

角度のローレンツ変換

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

$(\mu = \cos\theta)$

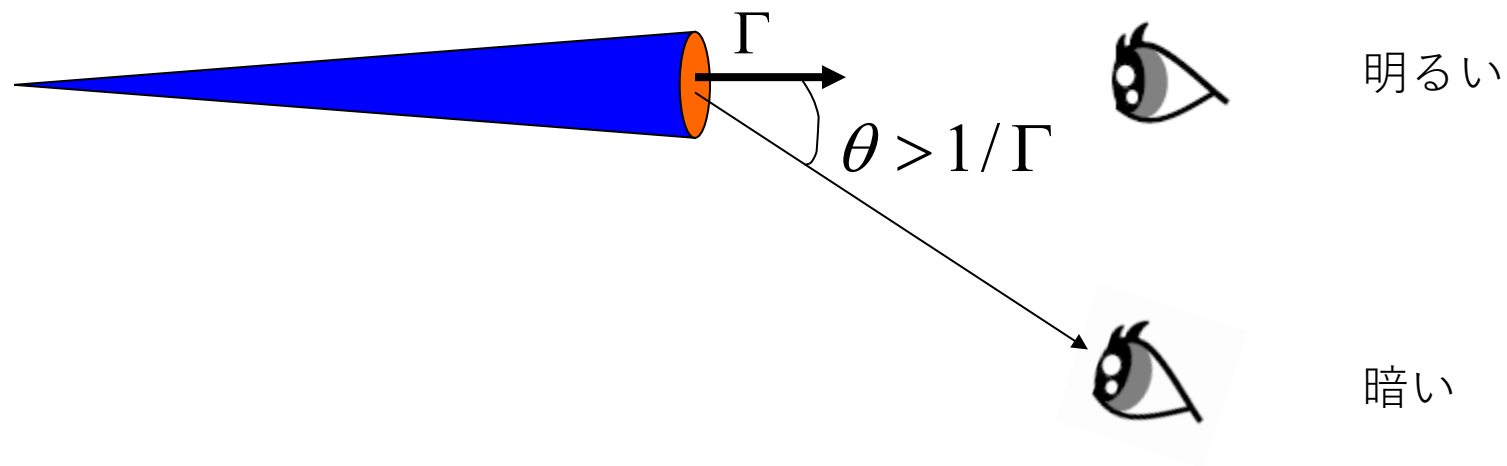
Beaming



立体角 $d\Omega \approx 1/\Gamma^2$

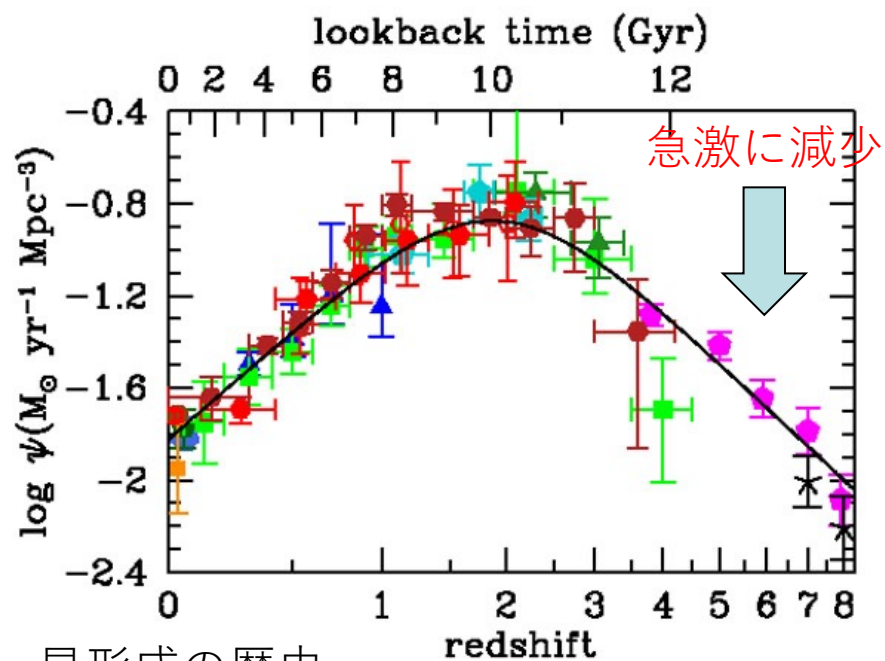
観測量に対する相対論的効果

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



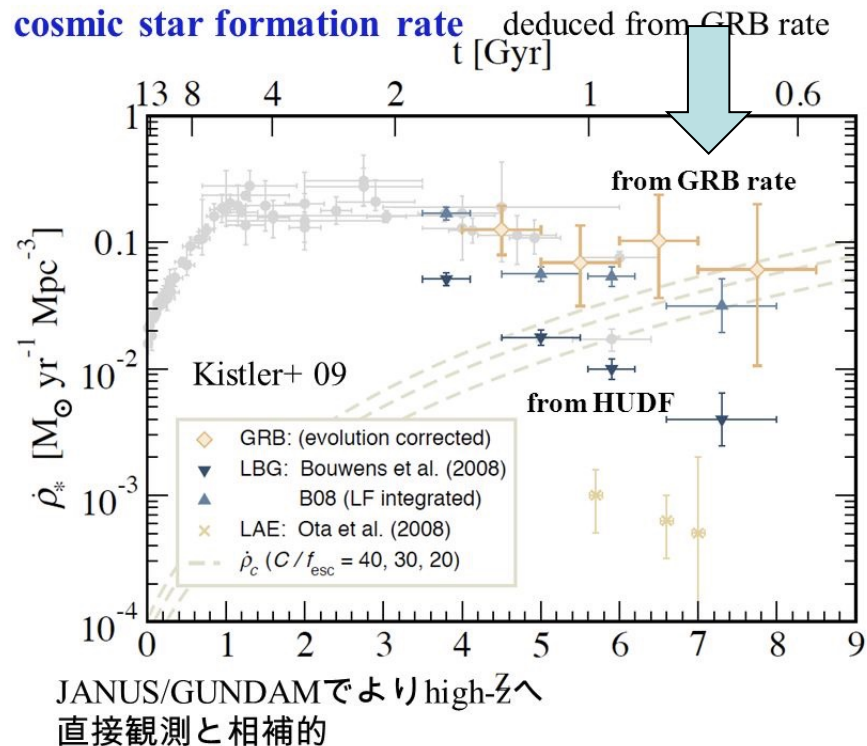
総合的な知の連携

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

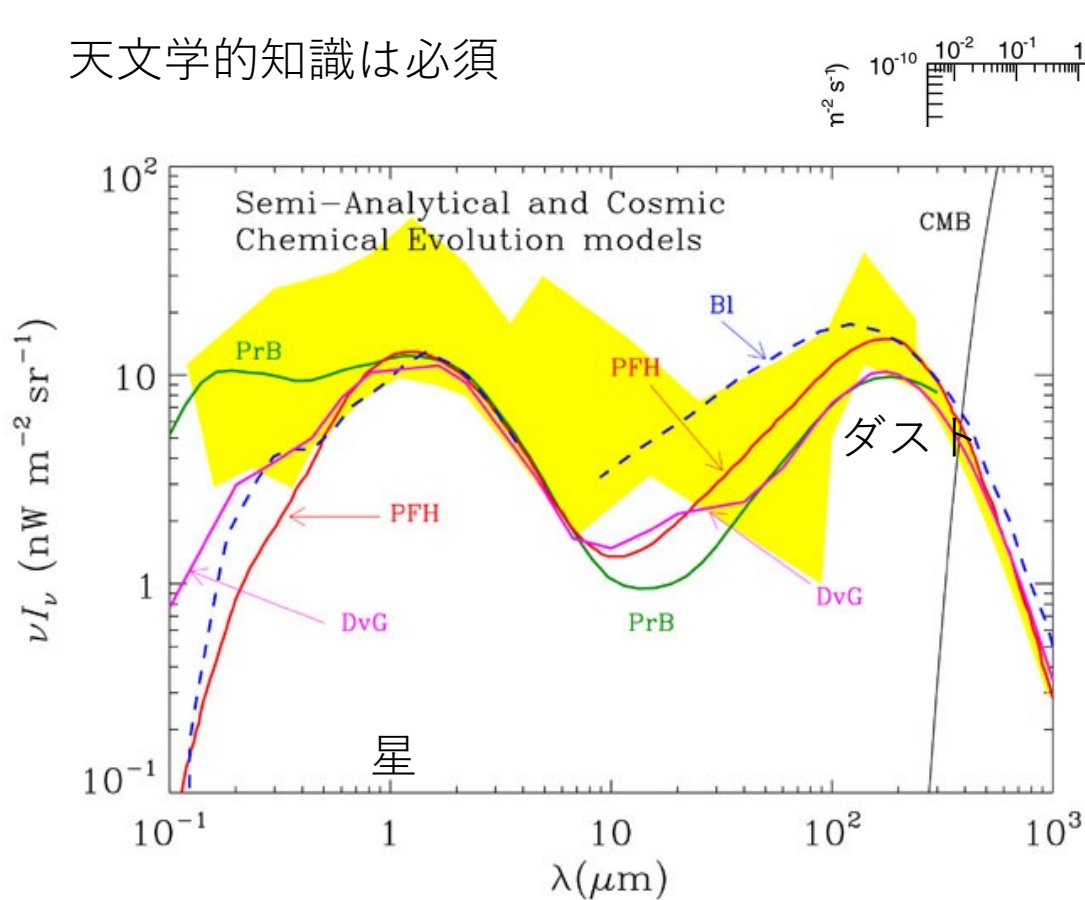
大昔でも起きている
 cosmic star formation rate deduced from GRB rate



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)

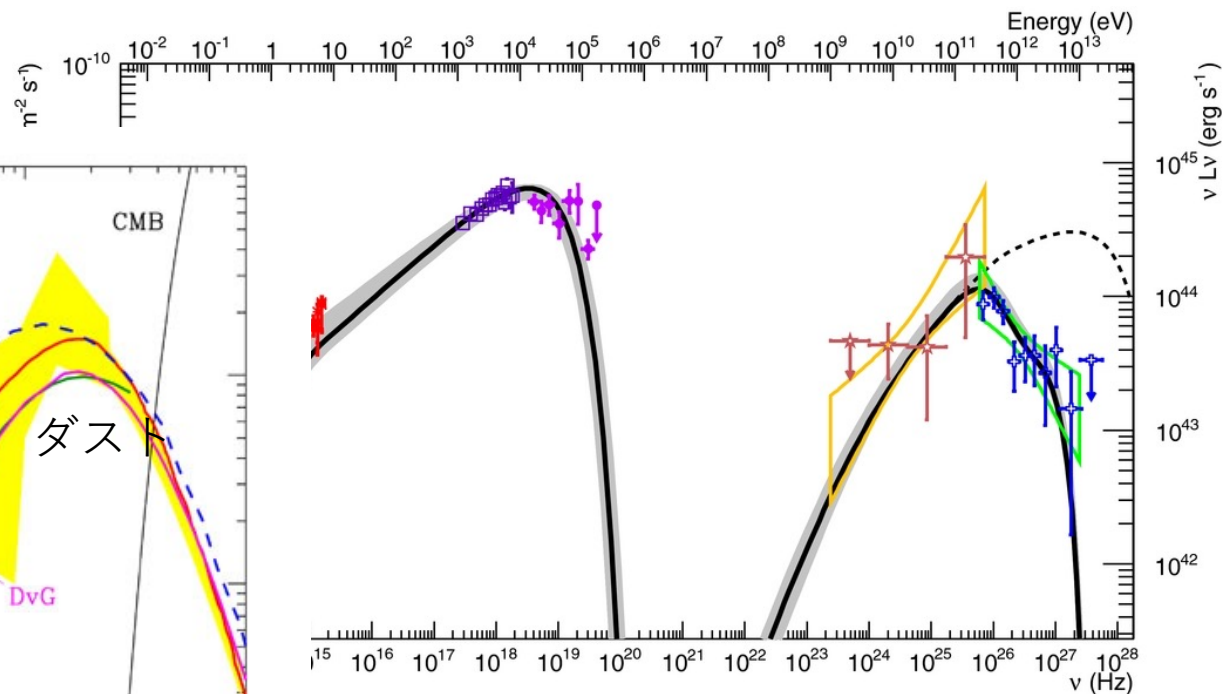
総合的な知の連携

天文学的知識は必須



宇宙背景放射

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

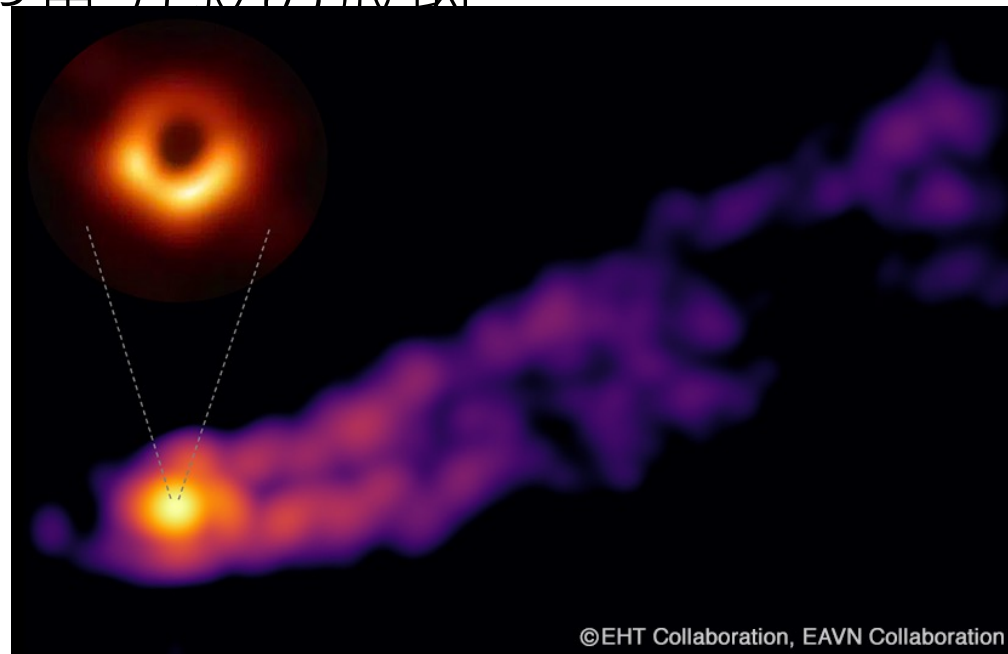


ブレーザーのTeVガンマ線は吸収
されているはず。

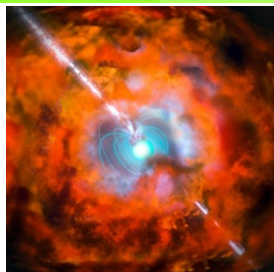
ブレーザーの放射機構と星形成史
両方を同時に議論する。

高エネルギー天体物理の目標

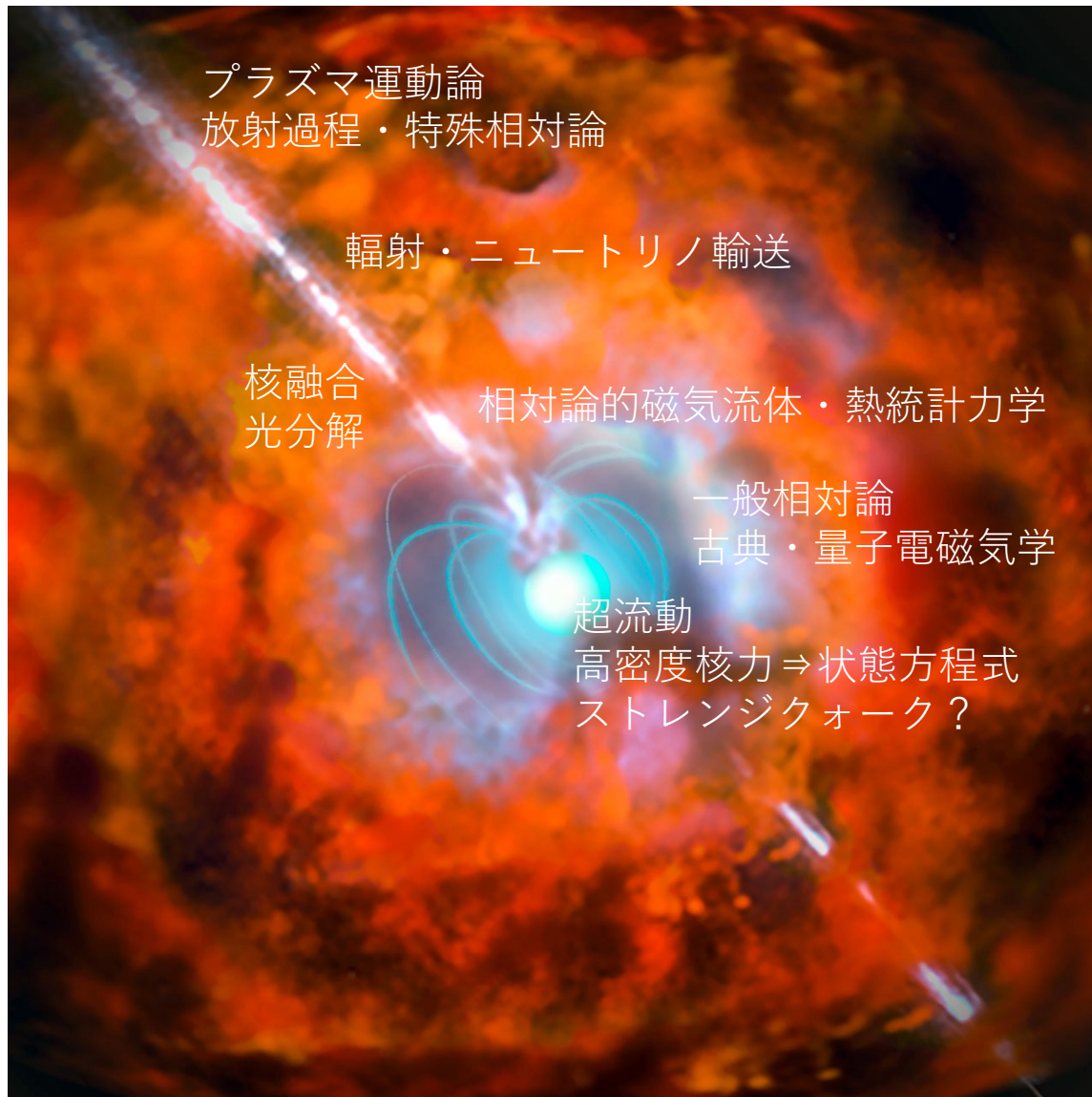
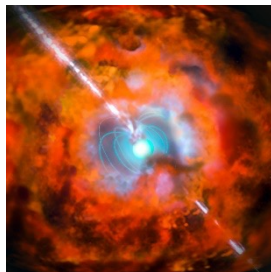
- 電波からX線・ガンマ線にいたる放射メカニズム
- 高エネルギーまで粒子を加速するメカニズム
- ブラックホールから噴出するジェットとの生成メカニズム
- 超新星爆発のメカニズム
- 10^{20} eVを超える最高エネルギー宇宙線の加速源天体
- 天体からのニュートリノや重力波の放射
- 暗黒物質探査



学問体系



天文学
宇宙論



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)