

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)

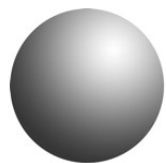
高エネルギーの世界

高エネルギー：相対論的な世界

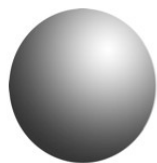
$$E = \Gamma mc^2, \quad \Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \gg 1$$

ローレンツ収縮

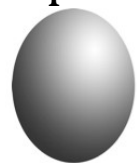
$$l = \frac{l_0}{\Gamma}$$



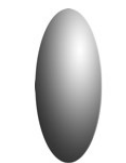
$v=0$



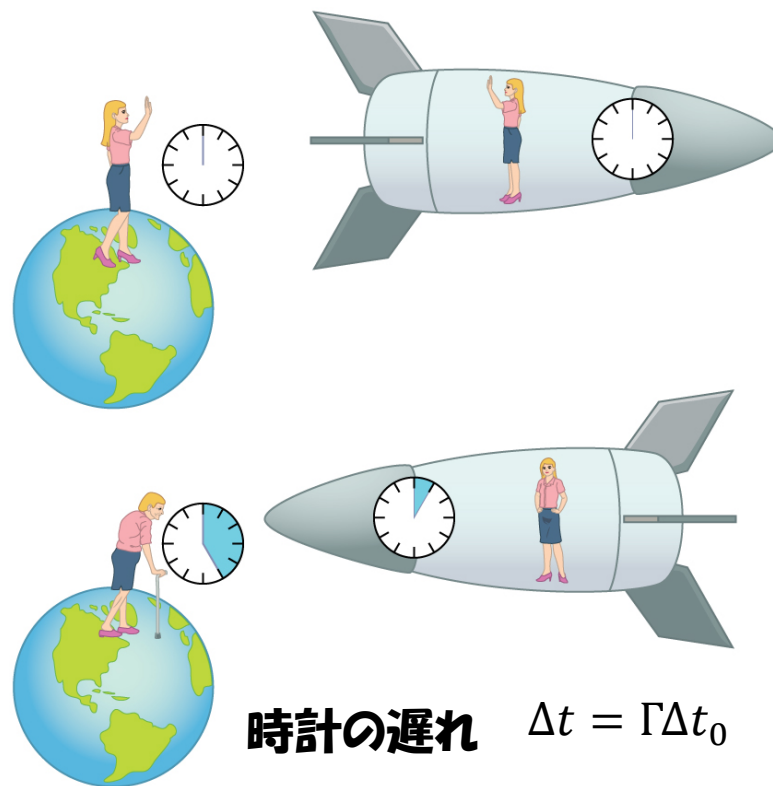
$\vec{v} = 0.3c$



$\vec{v} = 0.6c$



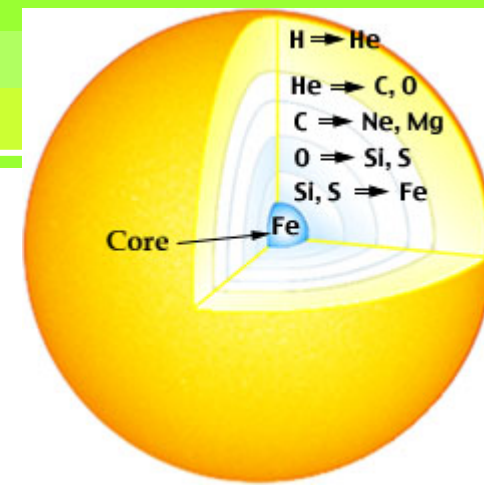
$\vec{v} = 0.9c$



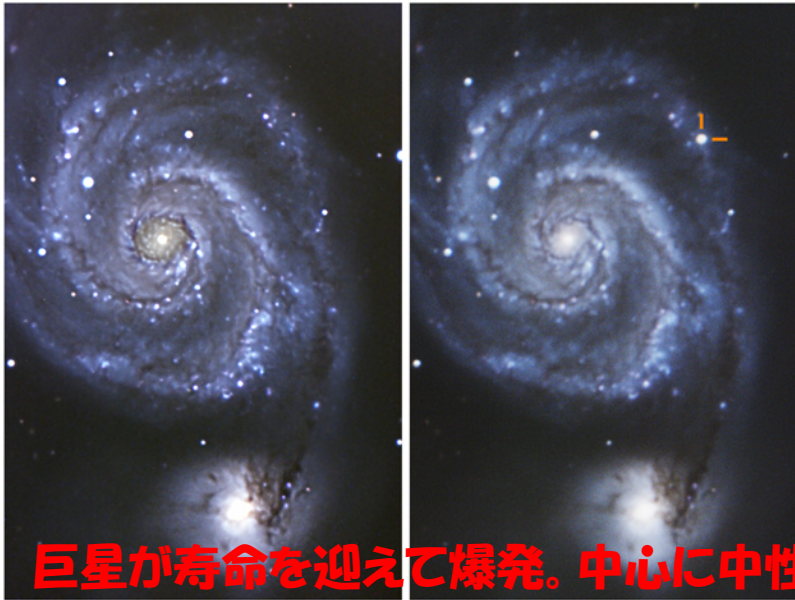
時計の遅れ $\Delta t = \Gamma \Delta t_0$

高エネルギー宇宙物理

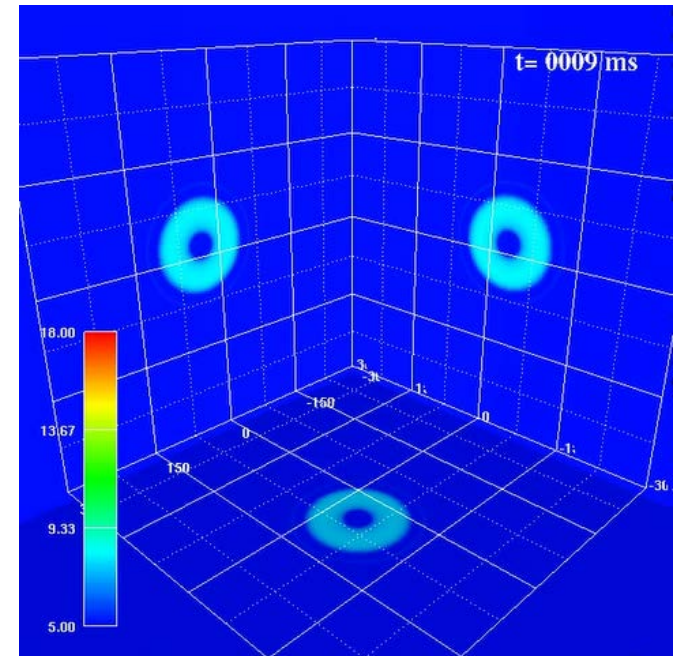
- 最もダイナミックに発展している分野
- 宇宙線研における主要な観測対象
- 多くの謎が残されている



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。

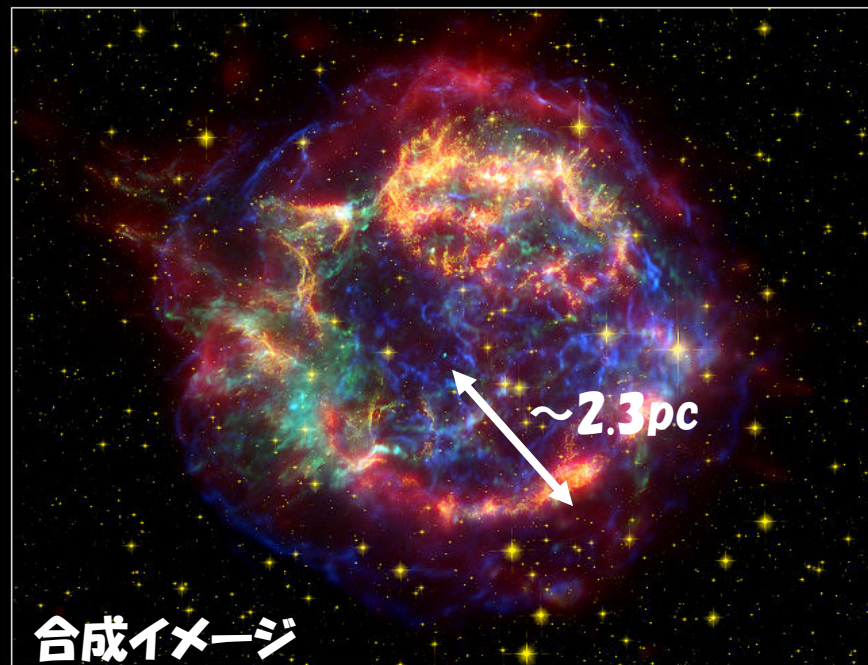


数値シミュレーションでは未だ爆発に成功していない！

原始中性子星から放たれるニュートリノと降り積もるガスとの相互作用が鍵

超新星残骸と宇宙線生成

1667年頃に爆発したCassiopeia A



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

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

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

距離: 3.4kpc

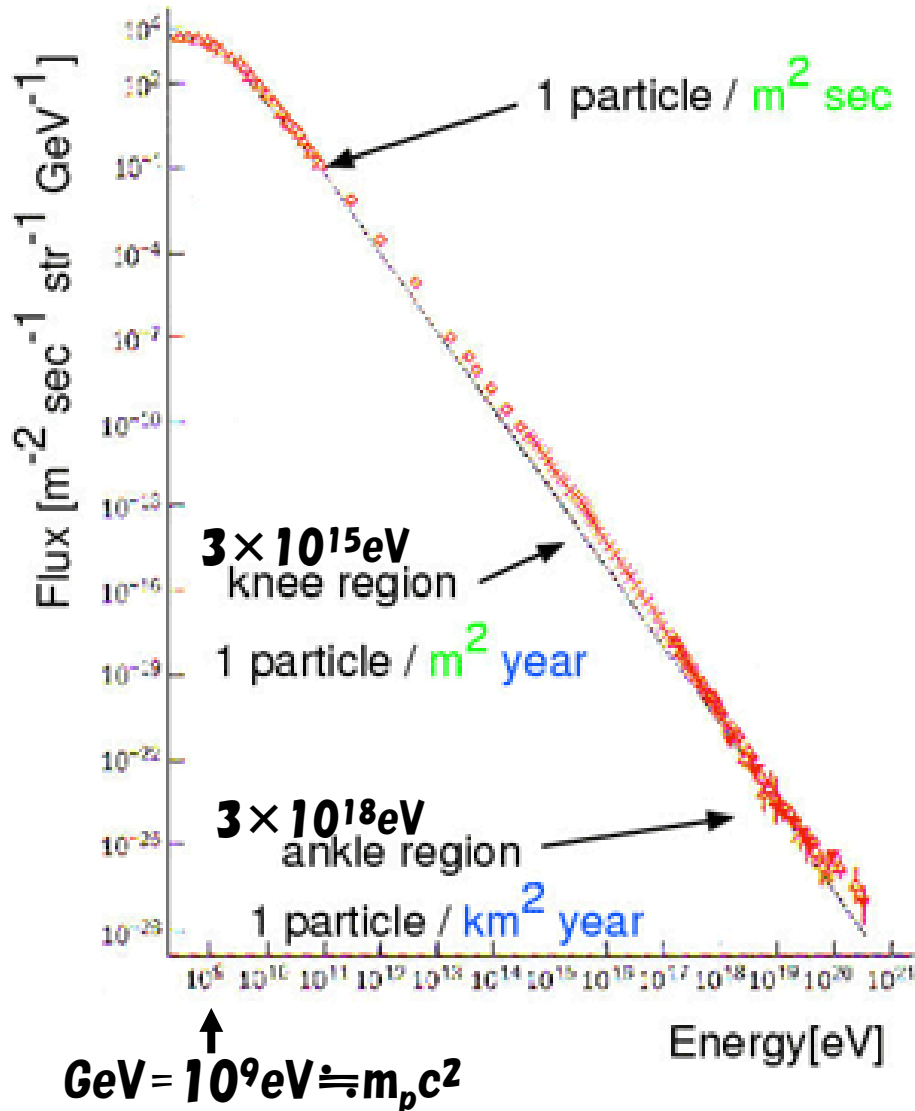
膨張速度: 4000-5000km/s

中心には中性子星が残される

超新星残骸と宇宙線生成

木: 最先端研究V「最高エネルギー宇宙線」
金: 最先端研究VI「ガンマ線・宇宙線物理」

Cosmic-Ray Spectrum

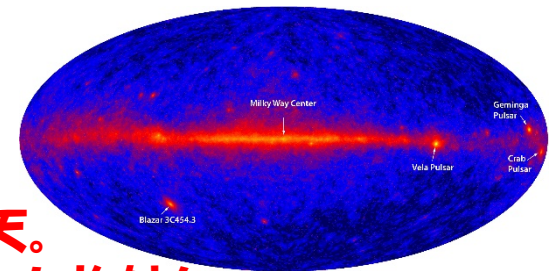


Knee以下のエネルギーの宇宙線は、
超新星残骸で加速されたと考えられている。

Kneeより上の宇宙線の起源は謎。

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。

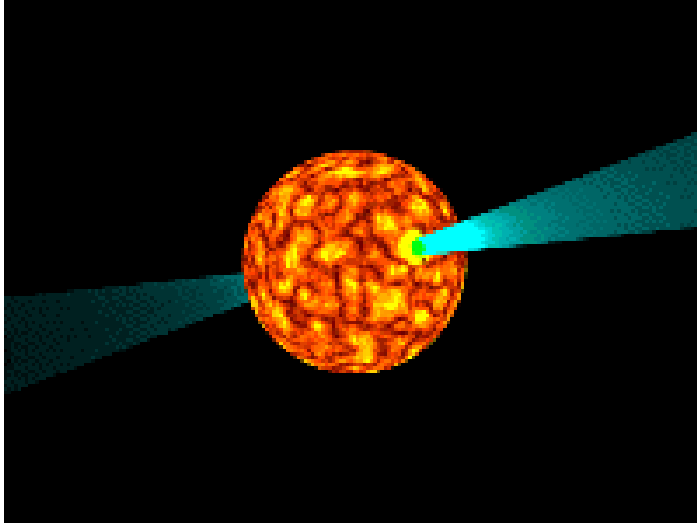
最高エネルギー宇宙線
加速天体は？



ガンマ線で見えた全天。
宇宙線起源の広がった放射も。

高エネルギー天体

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($\sim 10^{15}g/cm^3$)。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。

$$B_{cr} = \frac{m_e^2 c^3}{\hbar e} = 4.41 \times 10^{13} \text{ G.}$$

回転エネルギーを電子・陽電子プラズマ風として解放。パルサー星雲を作る。

パルサー星雲

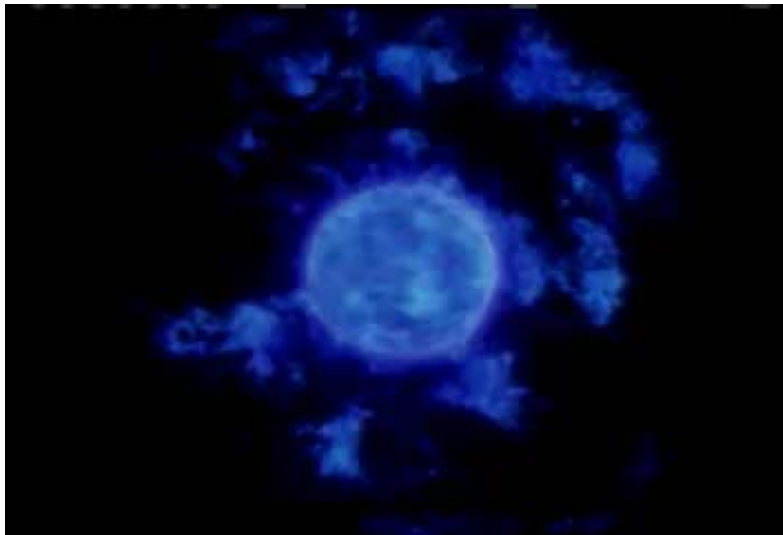


電子・陽電子プラズマがローレンツ因子 $\Gamma = 10^6$ 程度で噴き出している。

プラズマの加速機構は謎。

高エネルギー天体

ガンマ線バースト

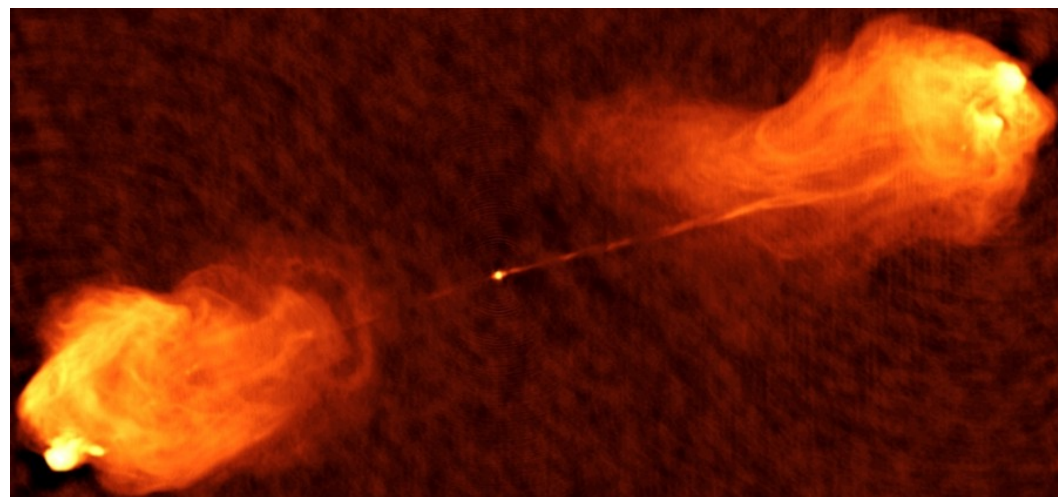


宇宙最大の爆発現象

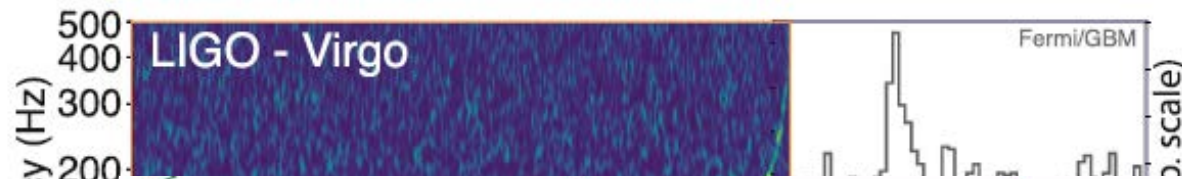
巨星の核がブラックホールに崩壊。

$\Gamma > 100$ の光速ジェットからガンマ線を放出。

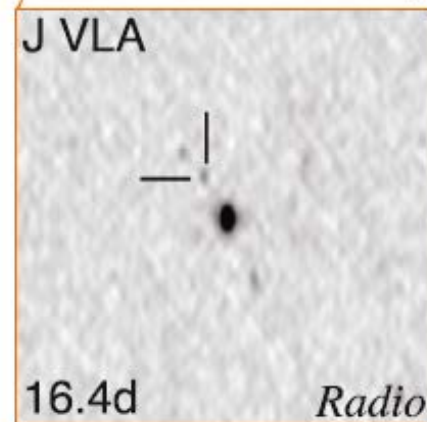
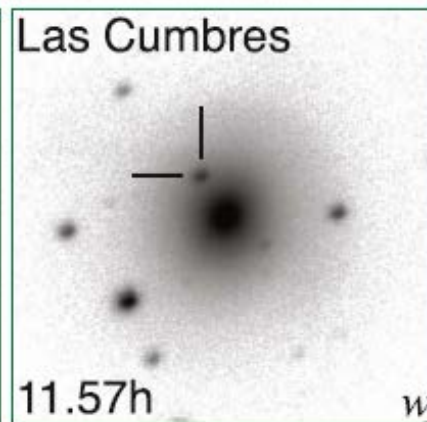
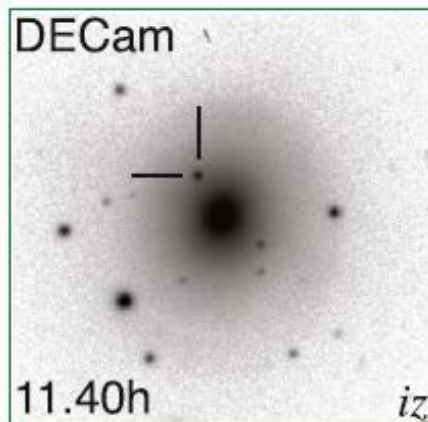
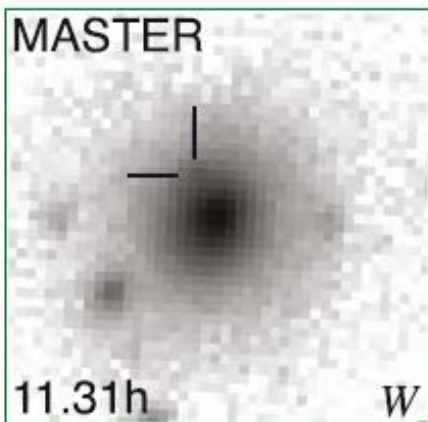
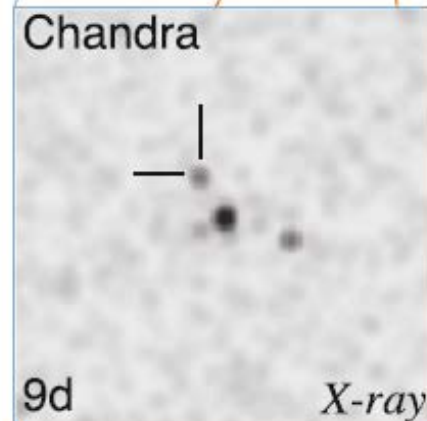
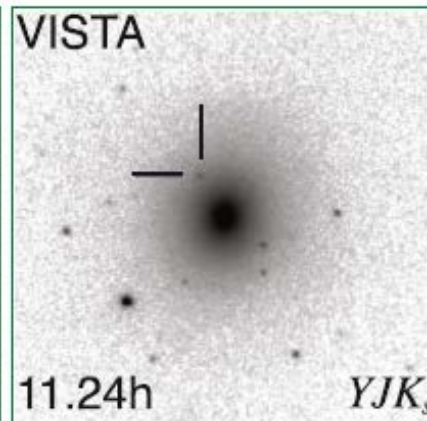
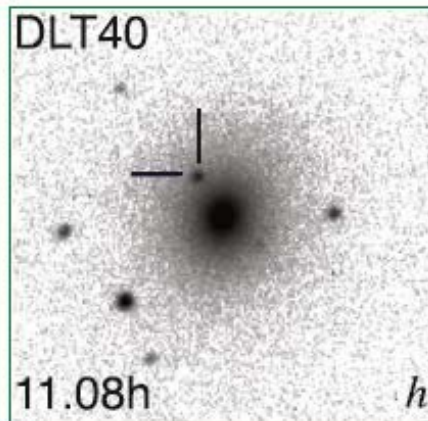
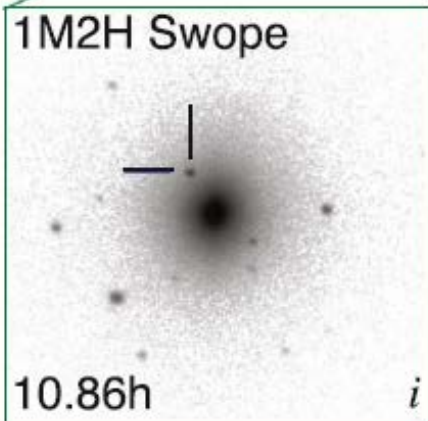
活動銀河核ジェット



連星中性子星合体



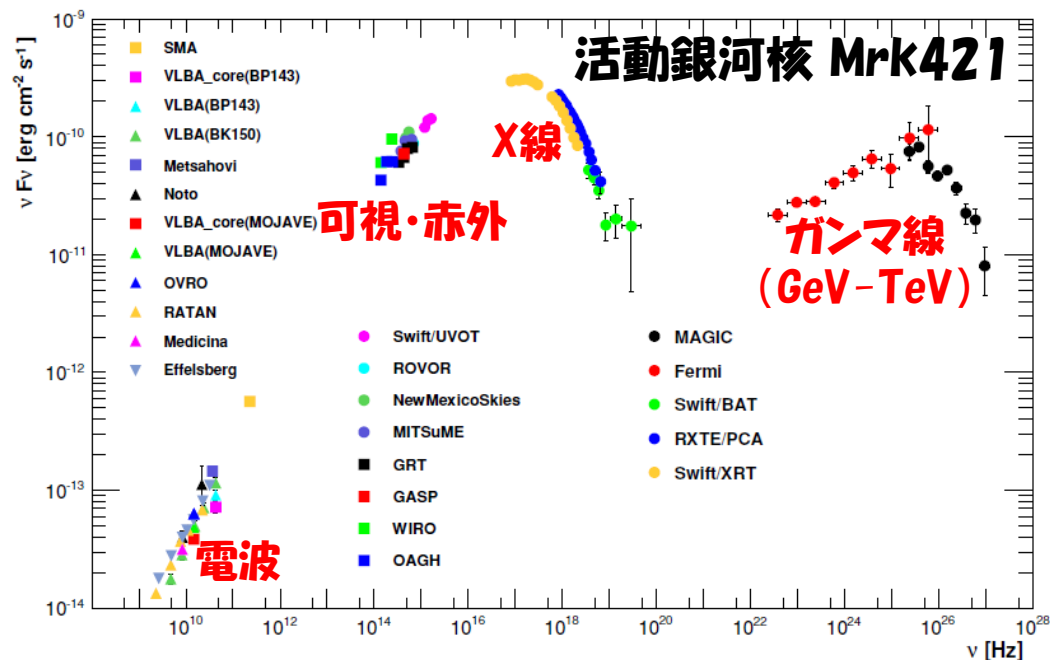
2017年8月のイベント



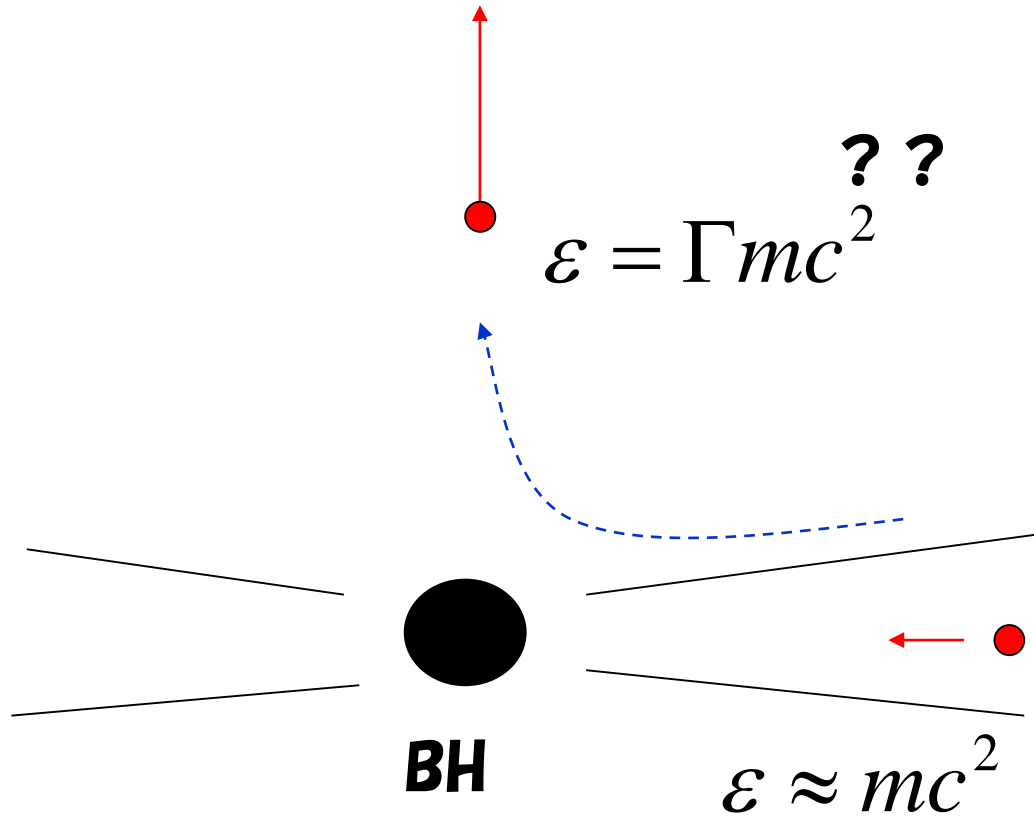
中性子星はどのくらい硬いのか？
磁場や輻射・ニュートリノの役割は？

高エネルギー天体物理の目標

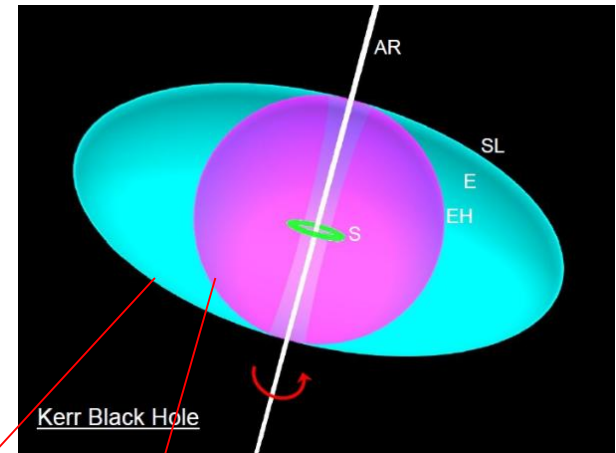
- 電波からX線・ガンマ線にいたる放射メカニズム
- 高エネルギーまで粒子を加速するメカニズム
- ブラックホールから噴出するジェット生成メカニズム
- 超新星爆発のメカニズム
- 10^{20} eVを超える最高エネルギー宇宙線の加速源天体
- 天体からのニュートリノや重力波の放射
- 暗黒物質探査



ジェットの加速



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”



- 多数の粒子が解放した重力エネルギー(熱・輻射・磁場)を少数の粒子に配分
- BHそのものからエネルギーを引き抜く

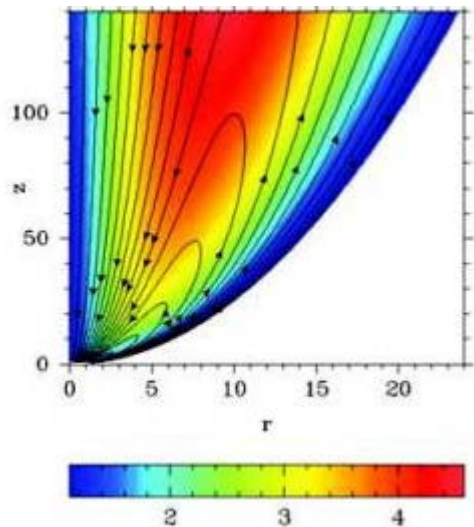
$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_g r}{\Sigma}\right) c^2 dt^2 - \frac{\Sigma}{\Delta} dr^2 - \left(\frac{r_g r}{\Sigma} a^2 \sin^2 \theta + r^2 + a^2\right) \sin^2 \theta d\varphi^2 - \Sigma d\theta^2$$

$$= 0 \quad = \infty \quad + 2 \frac{r_g r}{\Sigma} a \sin^2 \theta c dt d\varphi,$$

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

磁場駆動ジェット 輻射駆動ジェット

ローレンツ因子と電流



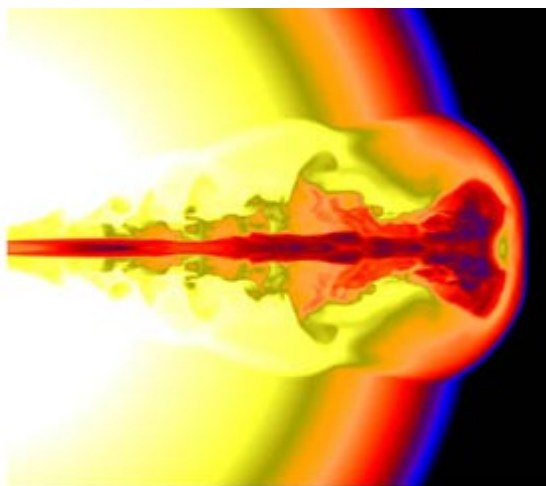
相対論的理想磁気流体力学 $E = -\frac{1}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B}$

質量保存 $\frac{\partial}{\partial t}(\Gamma \rho) + \nabla \cdot (\Gamma \rho \mathbf{v}) = 0$

エネルギー保存 $\frac{\partial}{\partial t} \left[(e + P)\Gamma^2 - P + \frac{1}{8\pi} (B^2 + E^2) \right] + \nabla \cdot \left[(e + P)\Gamma^2 \mathbf{v} + \frac{c}{4\pi} \mathbf{E} \times \mathbf{B} \right] = 0$

運動量保存 $\frac{\partial}{\partial t} \left[(e + P)\Gamma^2 \mathbf{v} + \frac{c}{4\pi} \mathbf{E} \times \mathbf{B} \right] + \nabla \cdot \left[(e + P)\Gamma^2 \mathbf{v} \otimes \mathbf{v} - \frac{c^2}{4\pi} (\mathbf{E} \otimes \mathbf{E} + \mathbf{B} \otimes \mathbf{B}) \right] + \nabla \left[Pc^2 + \frac{c^2}{8\pi} (B^2 + E^2) \right] = 0$

誘導方程式 $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = 0$



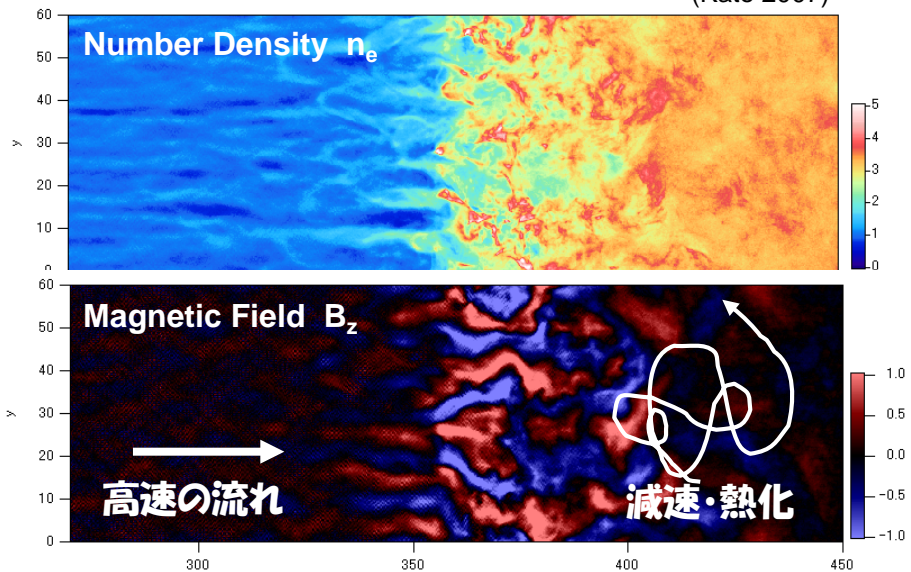
相対論的輻射流体力学

$$P = \frac{1}{3} e$$

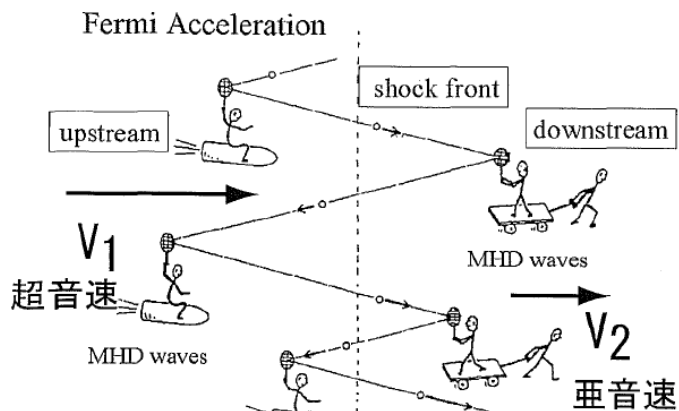
$$\Gamma \propto r, \quad n \propto r^{-3}, \quad e \propto r^{-4}$$

衝撃波による粒子加速

(Kato 2007)

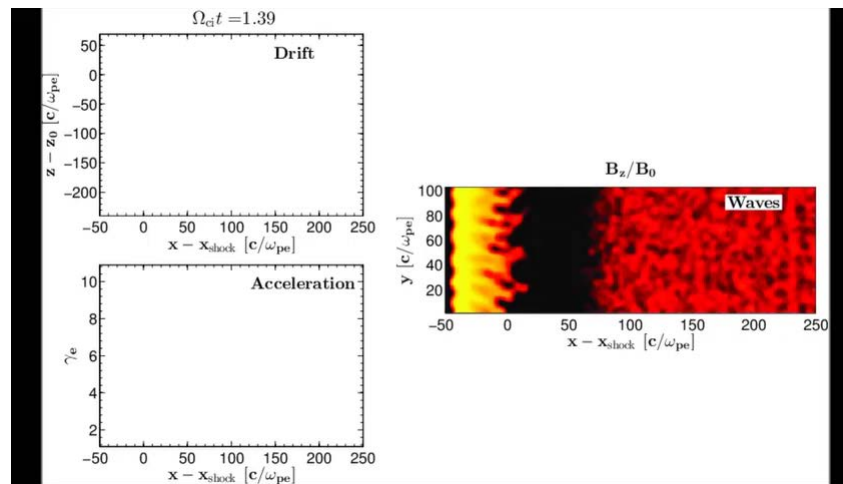


↑
衝撃波面



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。

シミュレーション



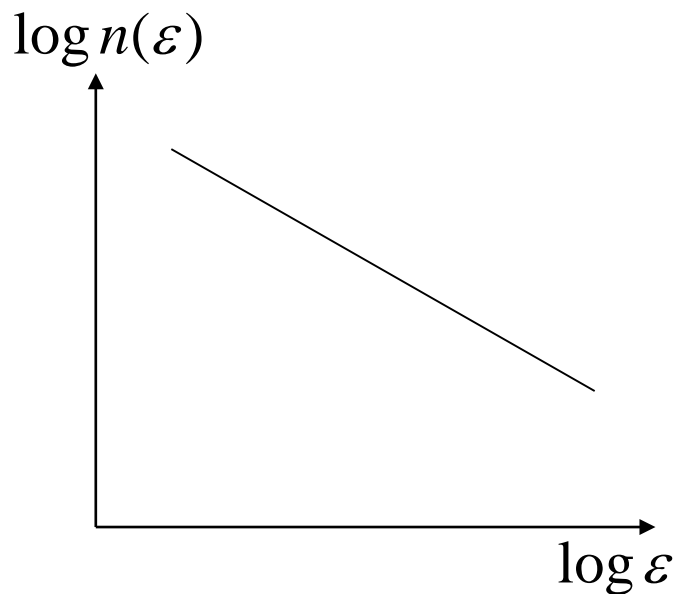
一回往復する毎に得るエネルギー $\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \approx \frac{4}{3} \frac{v_{rel}}{c}$

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

もう一度往復する確率 $1 - 4 \frac{v_d}{c}$

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

衝撃波による粒子加速



Non-thermal particles

典型的には $n(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-2}$

観測的にベキ指数は様々な値を取りえるが、その理由は不明。

加速される粒子の割合(数・エネルギー)を決める物理も不明。

(長時間の大規模simulationが必要)

電子と陽子の比は $\sim 1:100$

加速可能な最大エネルギーは？

加速領域のサイズか、拮抗する放射冷却で決まる？

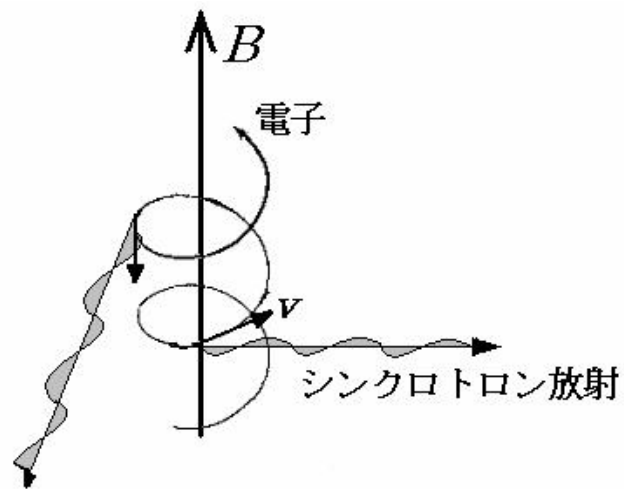
衝撃波面の前後では磁場の増幅があるかも。

その機構として最も有力なのは？

(乱流、プラズマ不安定性、宇宙線の反作用etc.)

放射過程

シンクロトロン放射



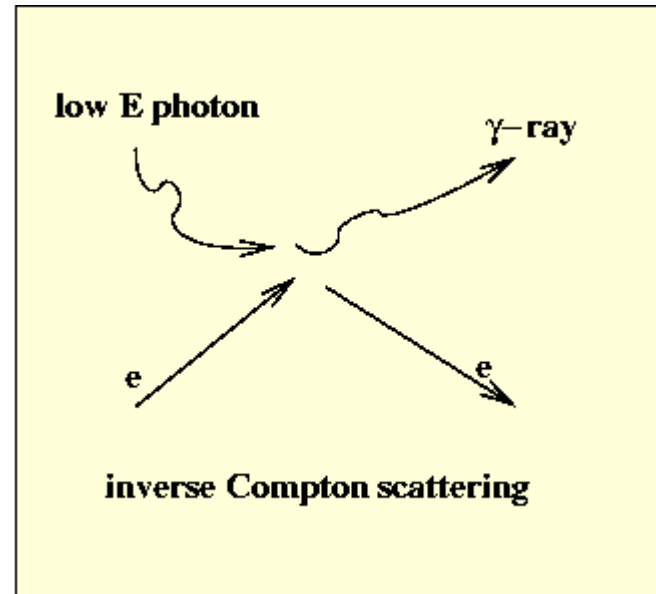
シンクロトロン放射。vは電子の速度ベクトルを表す。シンクロトロン放射は、磁力線に垂直に直線偏波しており、磁場に垂直な速度成分 v_{\perp} 方向のごく狭い領域にのみ放射される。

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 $\varepsilon_{\text{typ}} = \gamma^2 \varepsilon_0$

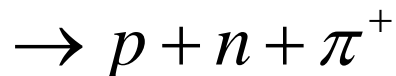
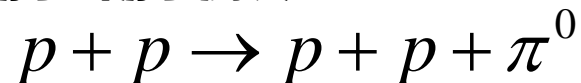
放射率 $\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{4}{3} c \sigma_T \gamma^2 U_{\text{ph}}$

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

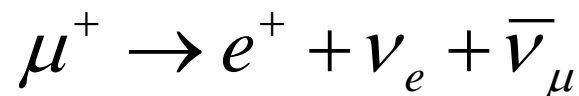
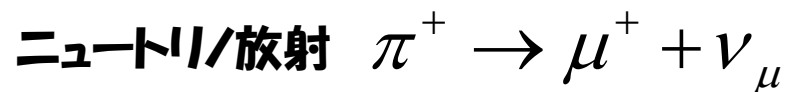
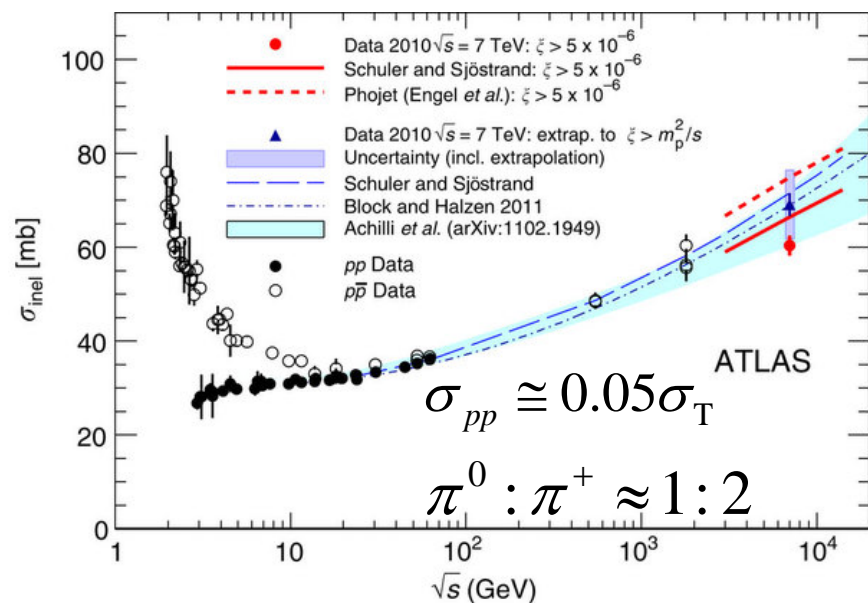
放射過程

陽子起源放射

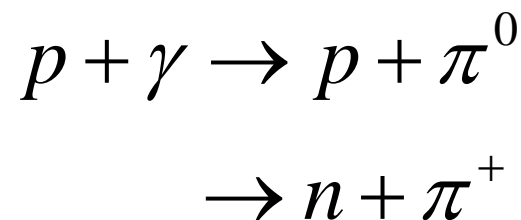
陽子-陽子衝突



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



他にも

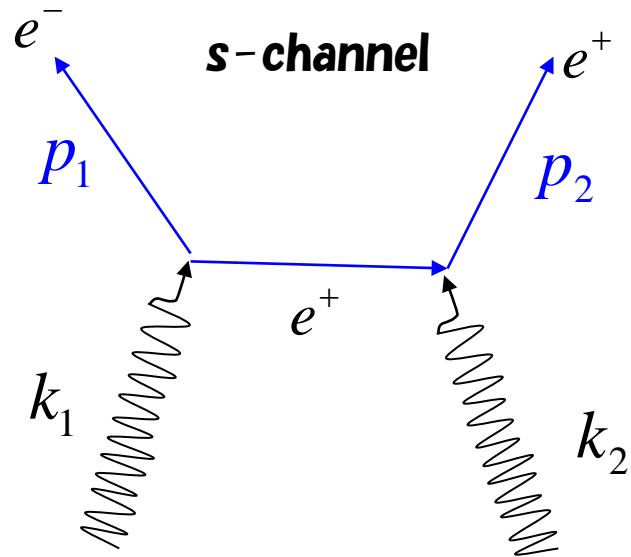


という反応もある。

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。

電子・陽電子対生成

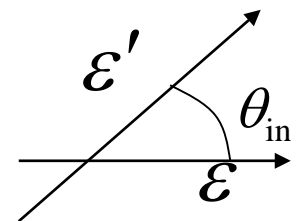
$$\gamma + \gamma \leftrightarrow e^- + e^+$$



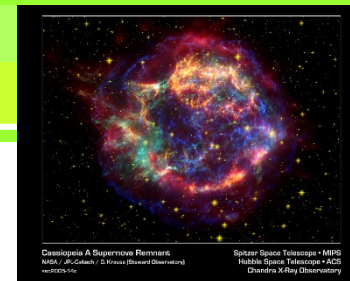
$$\sigma_{\gamma\gamma} = \frac{3\sigma_T}{16} (1 - y^2) \left[(3 - y^4) \ln \frac{1 + y}{1 - y} - 2y(2 - y^2) \right]$$

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

$\varepsilon \varepsilon' (1 - \cos \theta_{\text{in}}) > 2m_e^2 c^4$ の時だけ起こる反応。

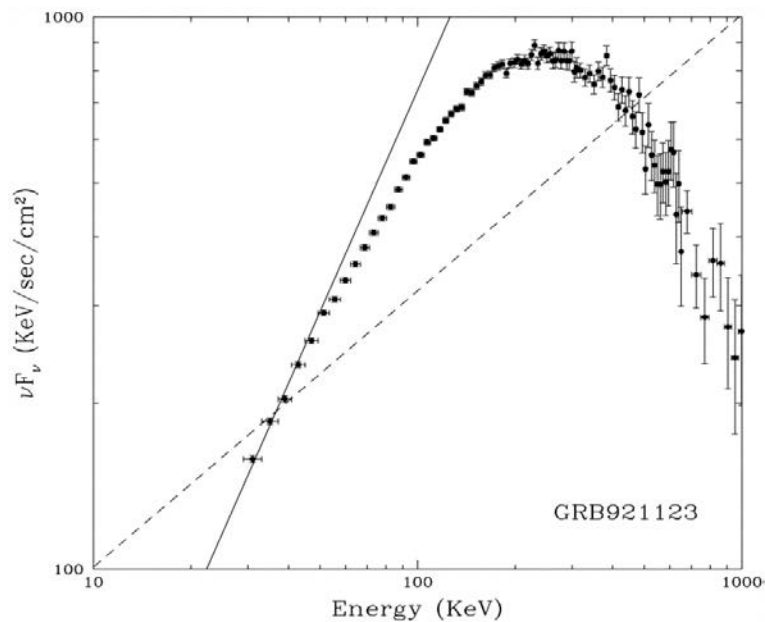


天体の放射スペクトル

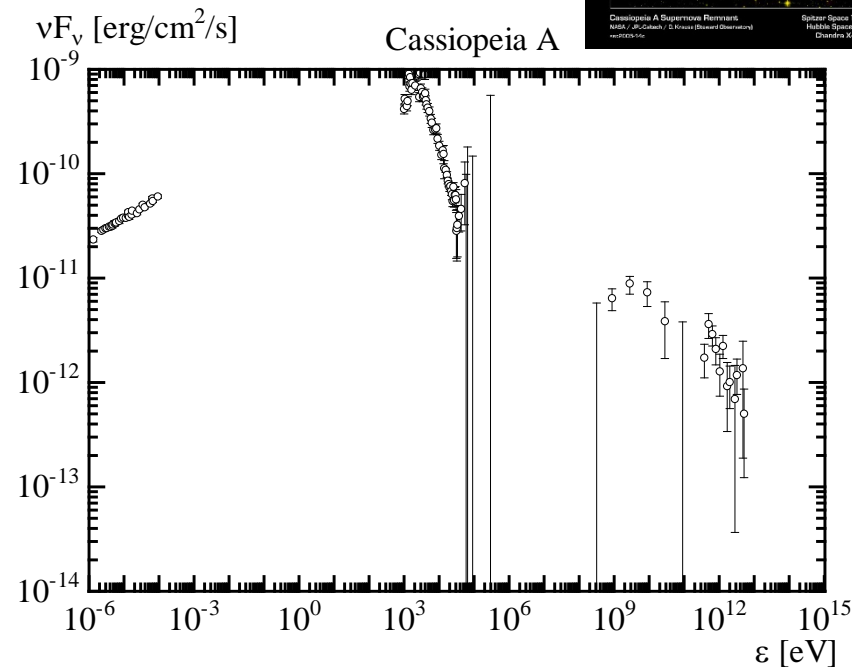


Cassiopeia A Supernova Remnant
NASA / JPL-Caltech / D. Krause (Baylor University)
Spitzer Space Telescope • MIPS
Hubble Space Telescope • ACS
Chandra X-ray Observatory

ガンマ線バーストのスペクトル



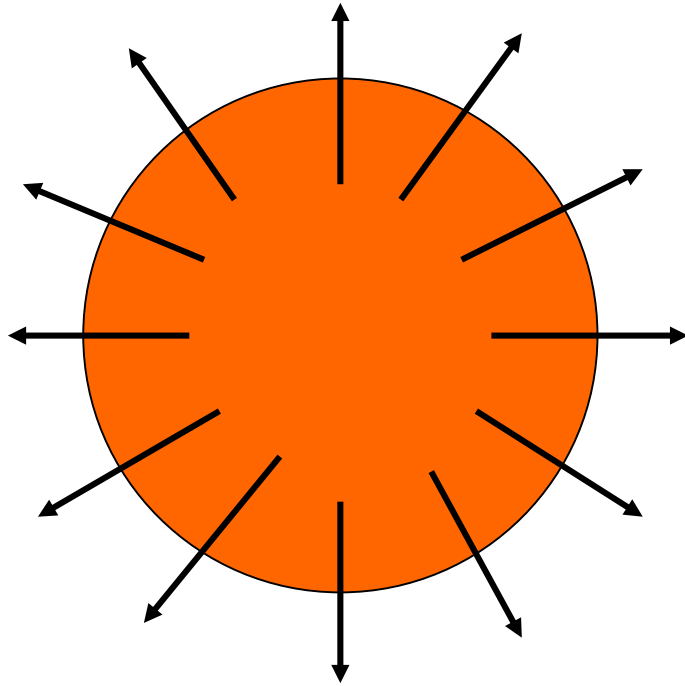
放射メカニズムは不明。
スペクトルのピークは何を反映しているのか？



超新星残骸からのガンマ線
電子起源か陽子起源か論争が続いている。

観測量に対する相対論的效果

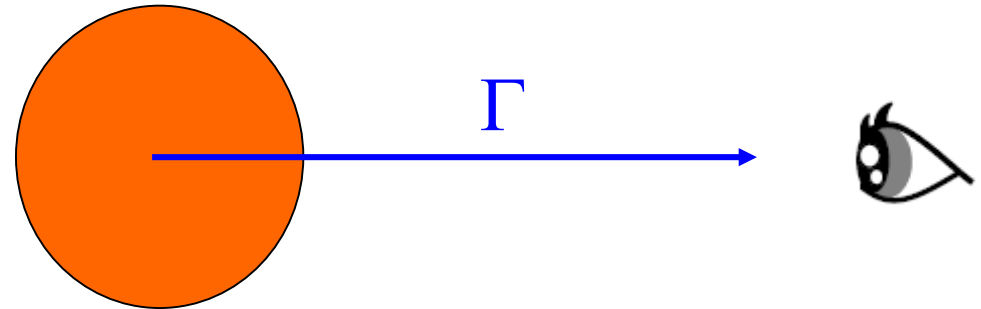
プラズマ静止系



$\Delta t'$ の時間、エネルギー E' の放射を放つ。

光度 $L' = \frac{E'}{\Delta t'}$

プラズマがローレンツ因子 Γ で運動している。



$$\Delta t = \Gamma \Delta t'$$

$$R \cong c \Delta t = c \Gamma \Delta t'$$

色々な方向に飛んでいる光子のエネルギー

$$\varepsilon = \Gamma \varepsilon' (1 + \beta \cos \theta')$$

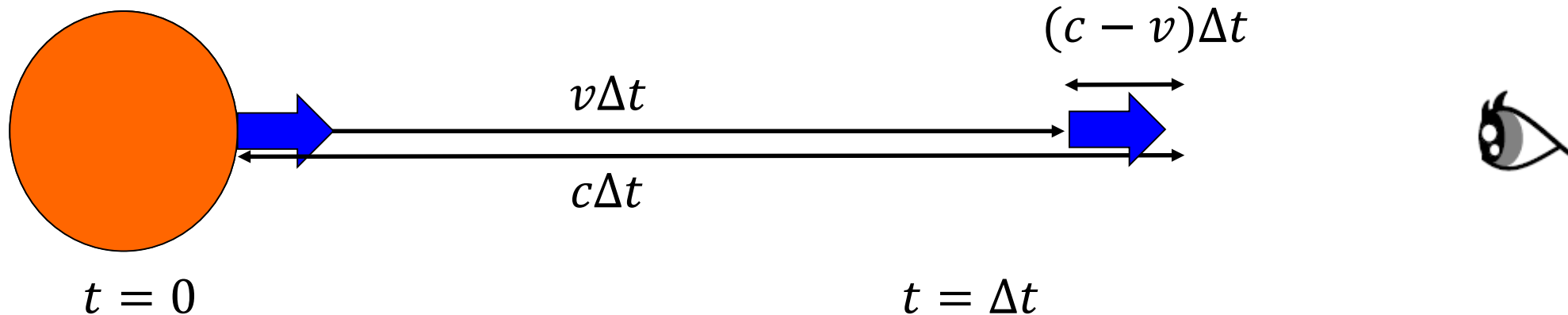
を平均すると、

$$E = \Gamma E'$$

観測者にとっては、

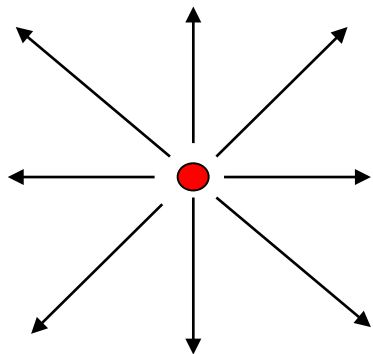
$$\Delta t_{\text{obs}} = \Delta t, \quad L_{\text{obs}} = \frac{E}{\Delta t} = \frac{E'}{\Delta t'} \quad ?$$

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



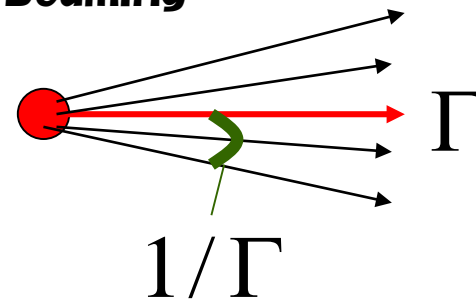
プラズマ静止系

角度のローレンツ変換

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

$(\mu = \cos \theta)$

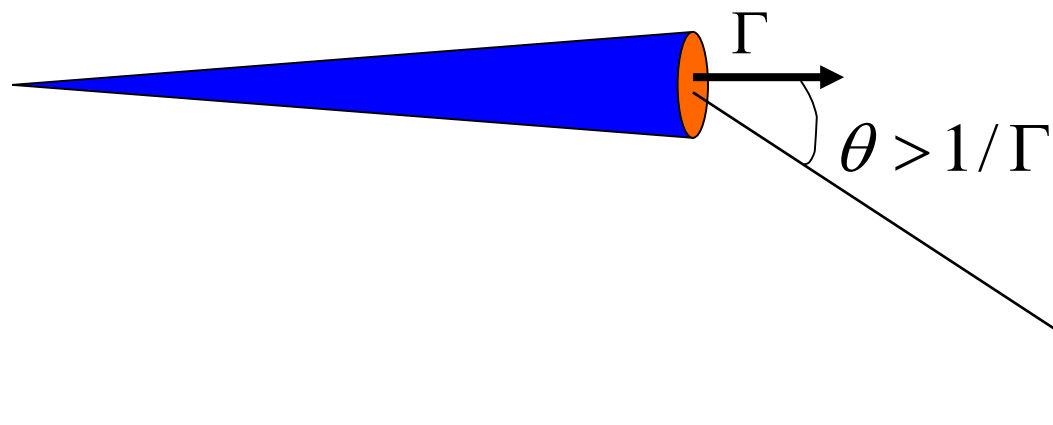
Beaming



立体角 $d\Omega \approx 1/\Gamma^2$

観測量に対する相対論的效果

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



明るい
(DAZZLING)

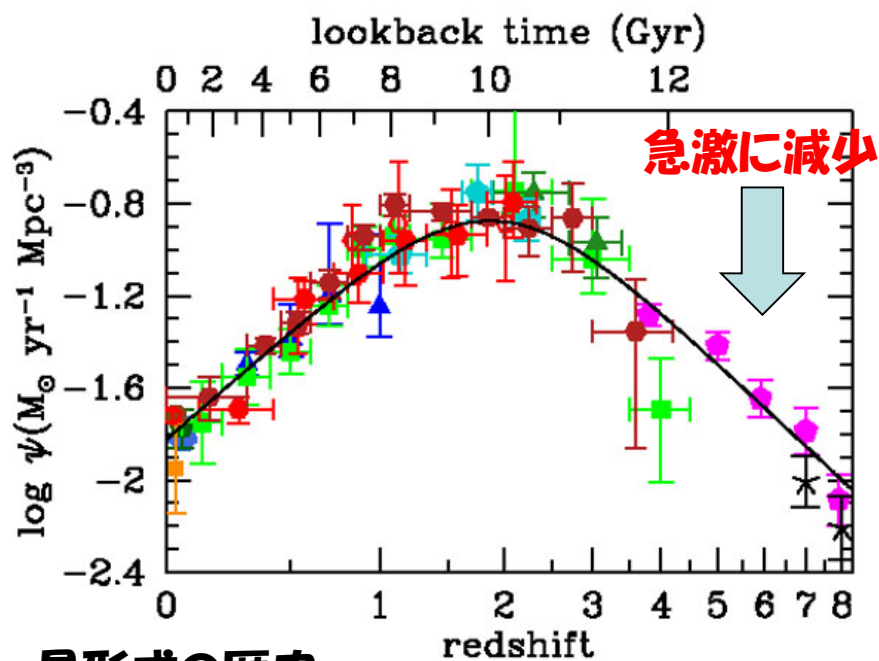


(DARK!)
暗い!



総合的な知の連携

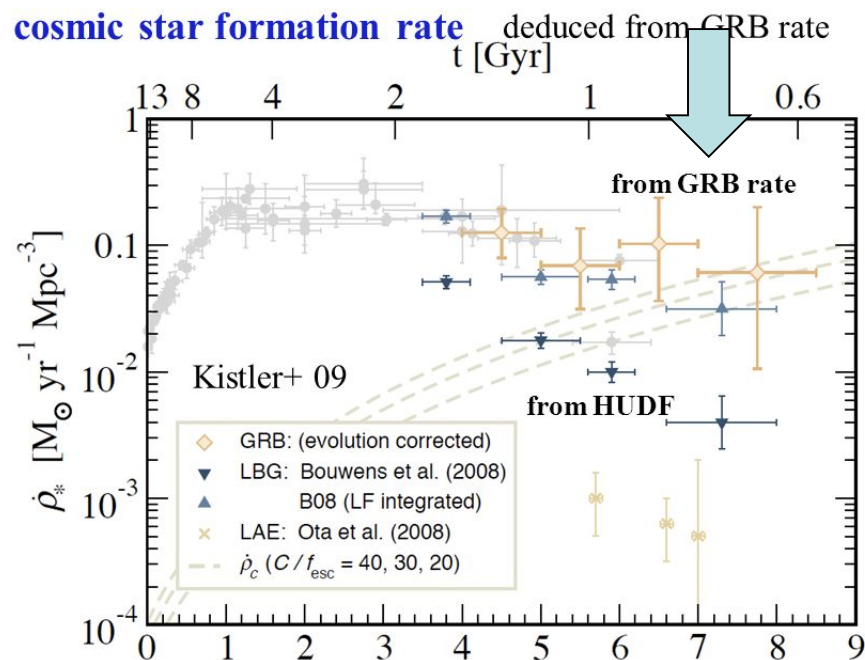
宇宙の星形成の歴史⇒重いブラックホール連星の親星は？
 そうした親星はいつ生まれたのか？



星形成の歴史

水:最先端研究II「観測的宇宙論」

大昔でも起きている

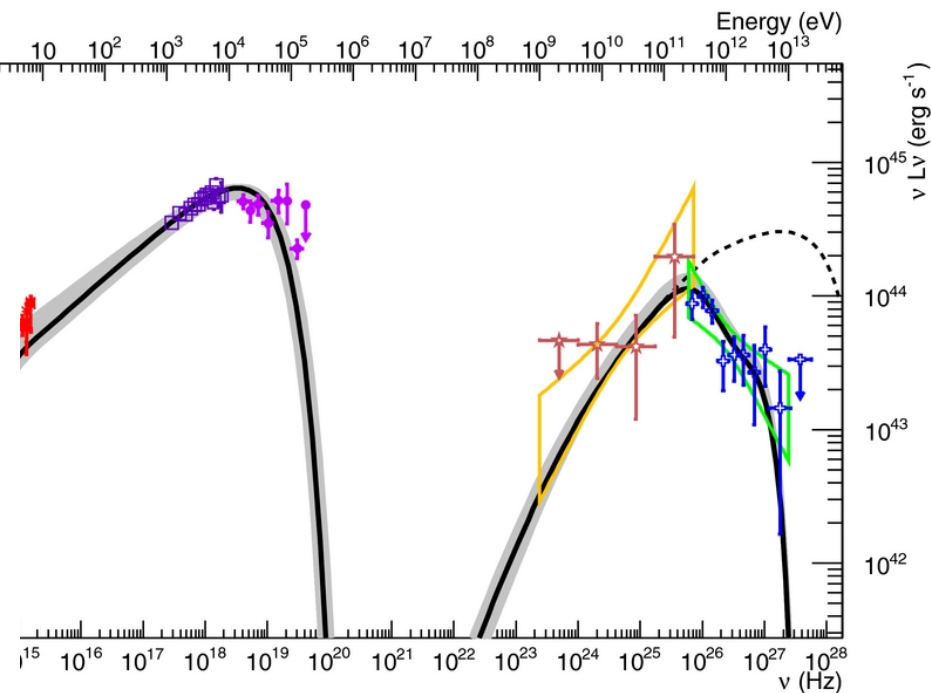
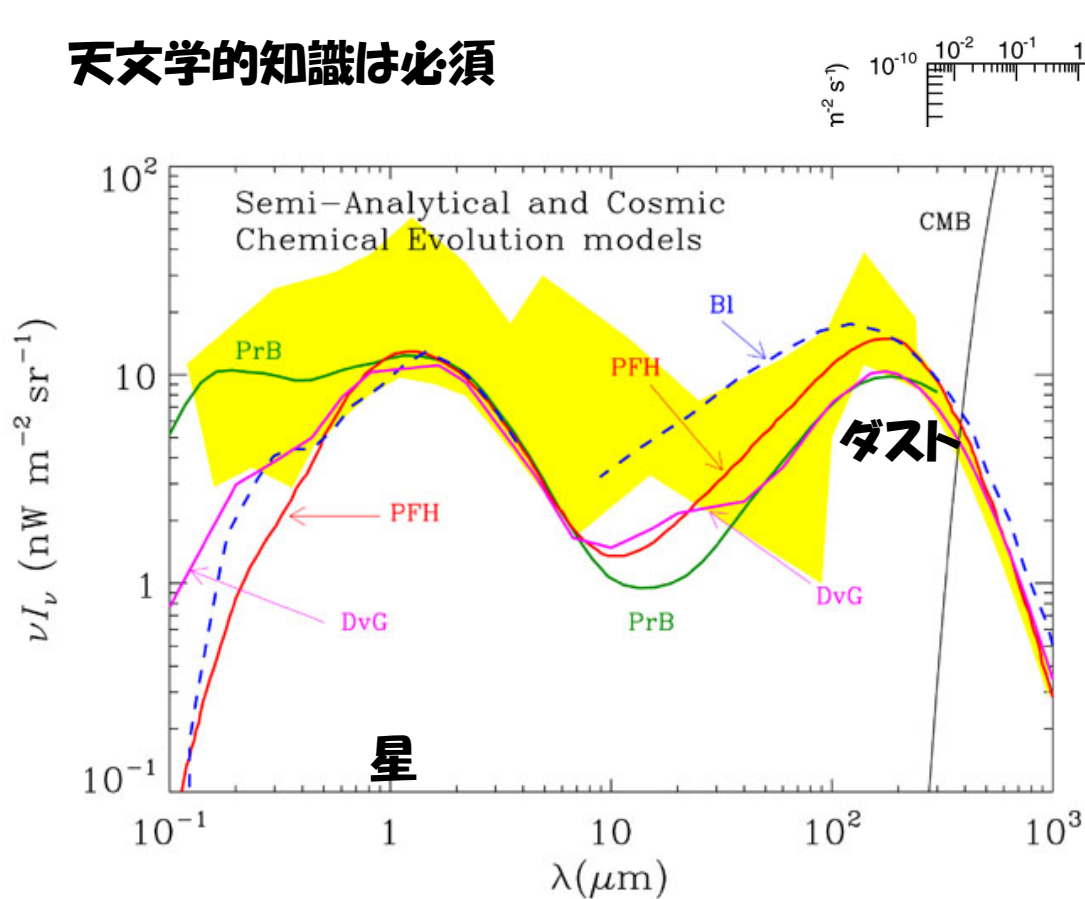


JANUS/GUNDAMでよりhigh- z へ
 直接観測と相補的

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



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。

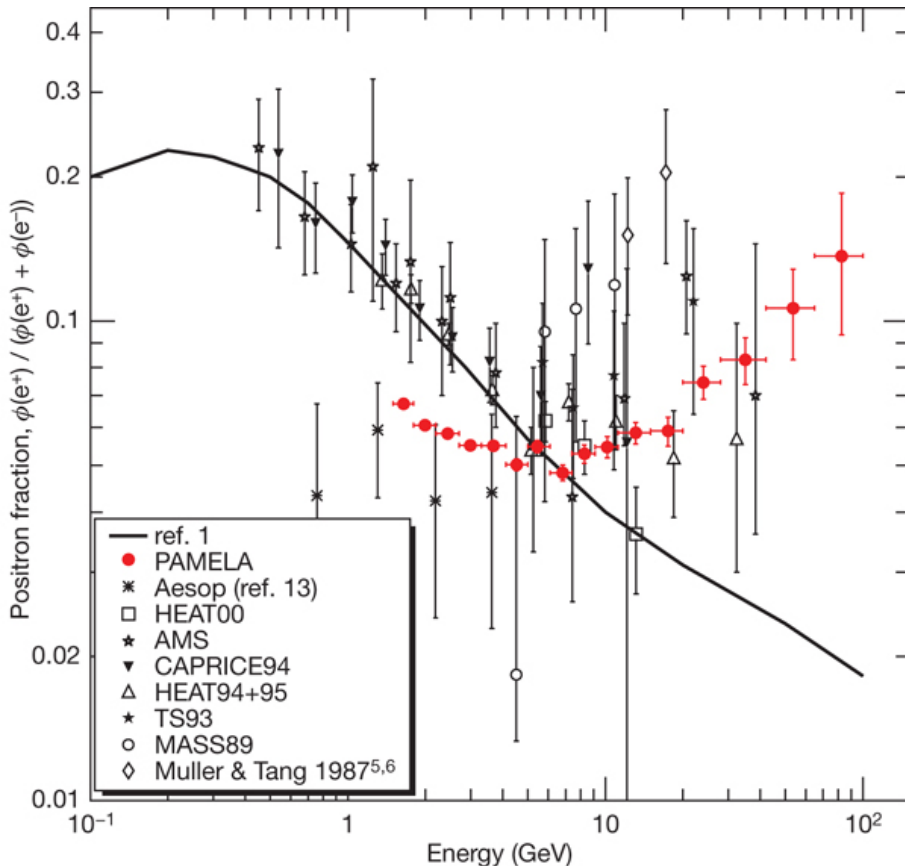
木:最先端研究IV「高エネルギー・ガンマ線天文学」
金:最先端研究VI「ガンマ線・宇宙線物理」

宇宙背景放射

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

ここ10年くらいの観測的進展

2009



陽電子宇宙線が高エネルギーで過剰

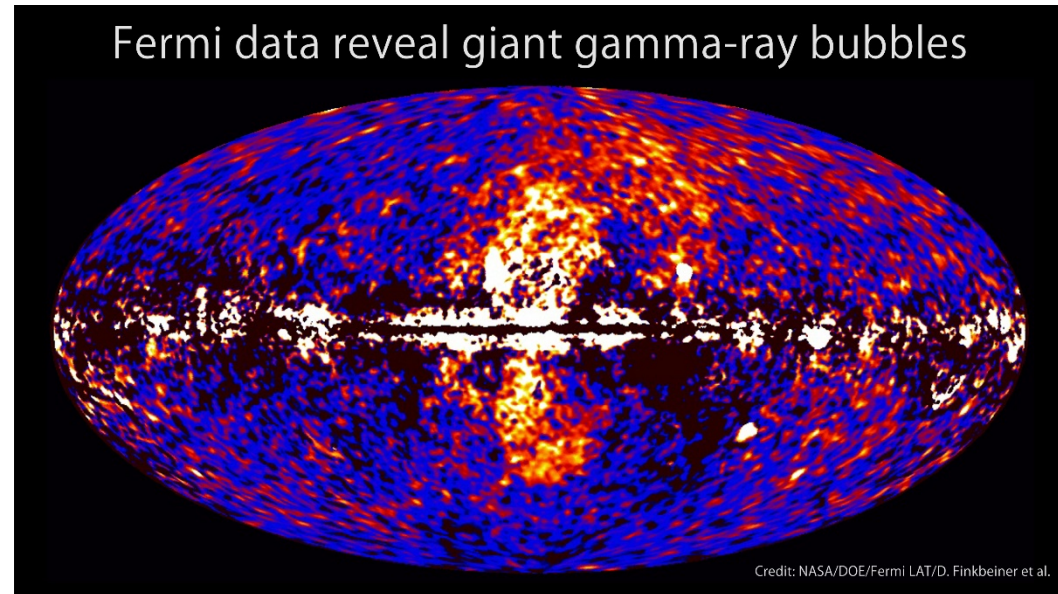
暗黒物質起源か? $\chi + \chi \rightarrow e^- + e^+$

パルサー起源か? $\chi \rightarrow e^- + e^+$

水:最先端研究II「暗黒物質」
 金:講義III「宇宙・素粒子」

2010

フェルミバブル



Fermi data reveal giant gamma-ray bubbles

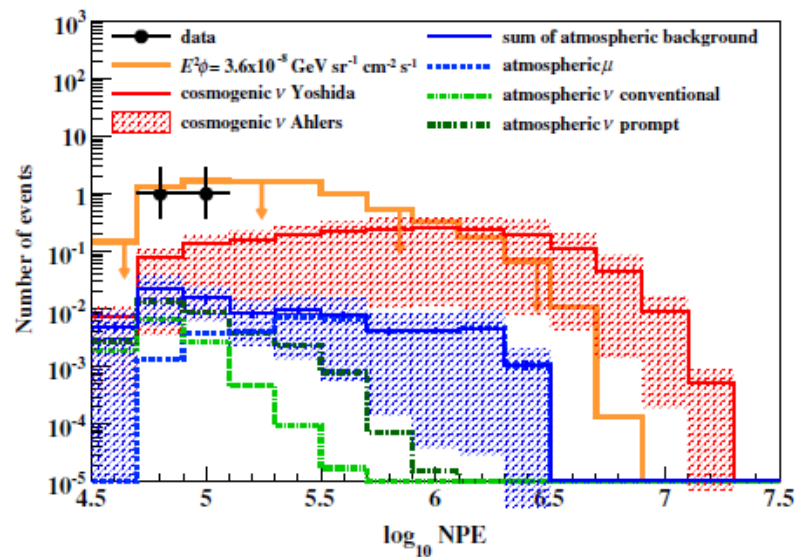
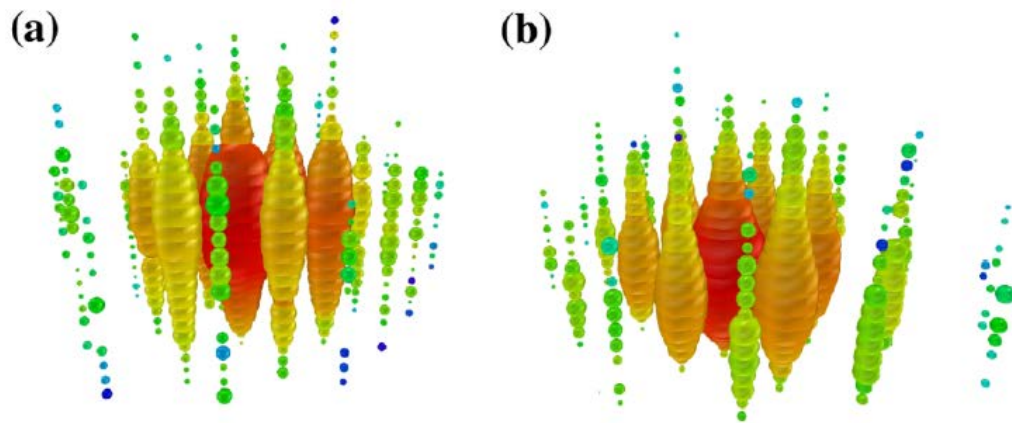
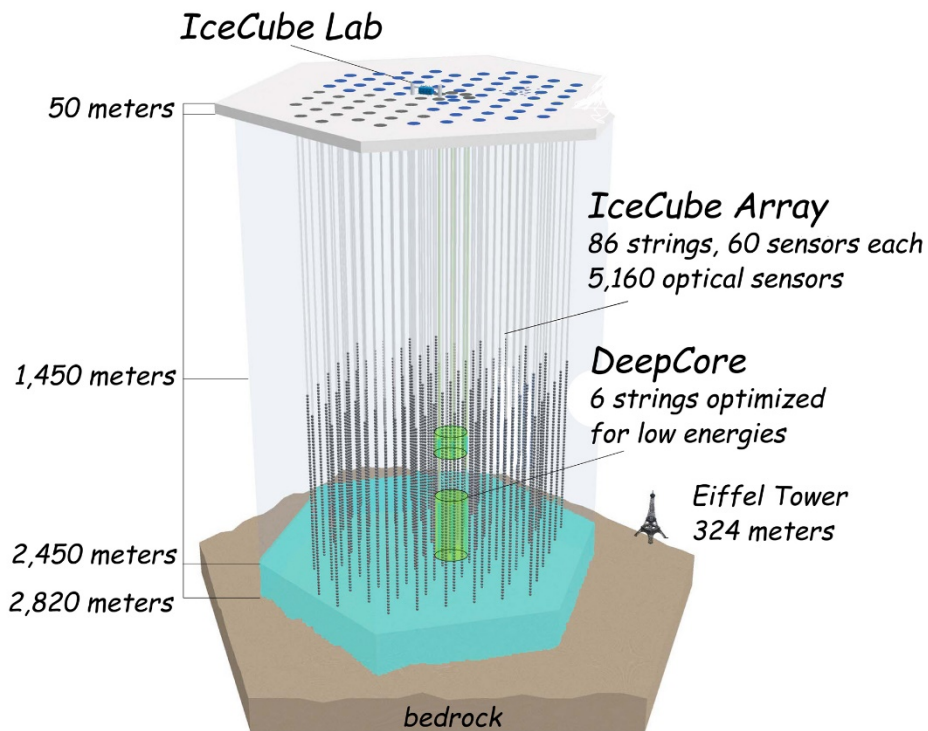
Credit: NASA/DOE/Fermi LAT/D. Finkbeiner et al.

銀河中心上下方向にガンマ線で輝くバブル
 過去の銀河中心ブラックホールの活動の痕跡?
 過去の爆発的星形成の名残?

ここ10年くらいの観測的進展

2013

PeV = 10^{15} eVニュートリノの検出

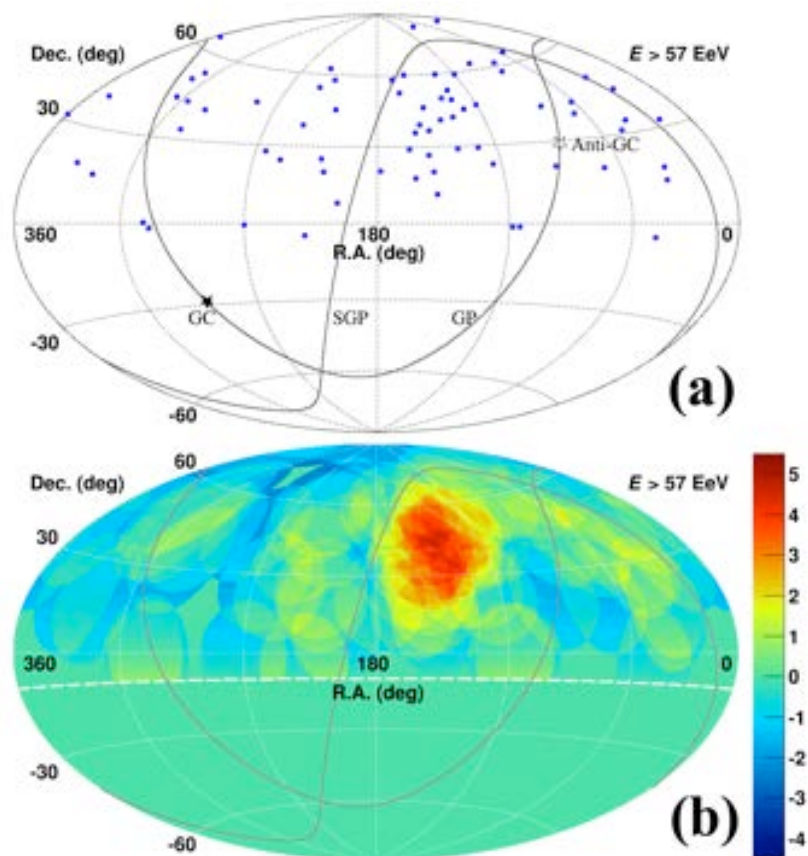


恐らく銀河系外起源。源は不明。
理論家の予想を上回るFlux!

金:最先端研究VII「高エネルギー・ニュートリノ天文学」

ここ10年くらいの観測的進展

2014 最高エネルギー宇宙線の異方性の発見



起源天体のヒント

活動銀河核ジェットではなさそう。

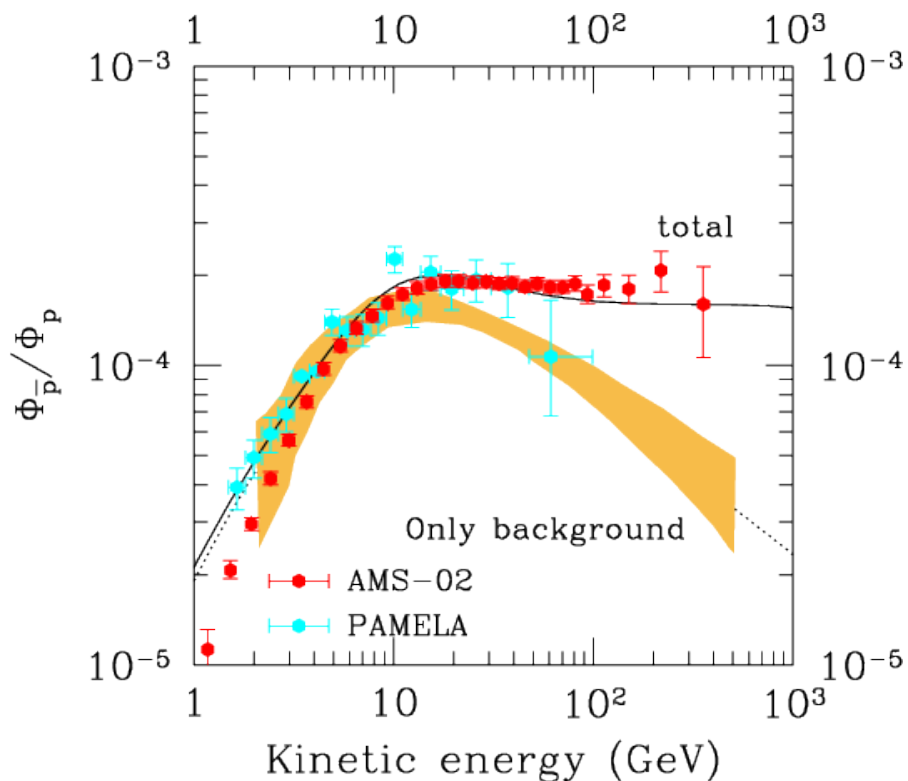
星形成銀河？(意外！)

宇宙線研究所TAグループ

木:最先端研究V「最高エネルギー宇宙線」

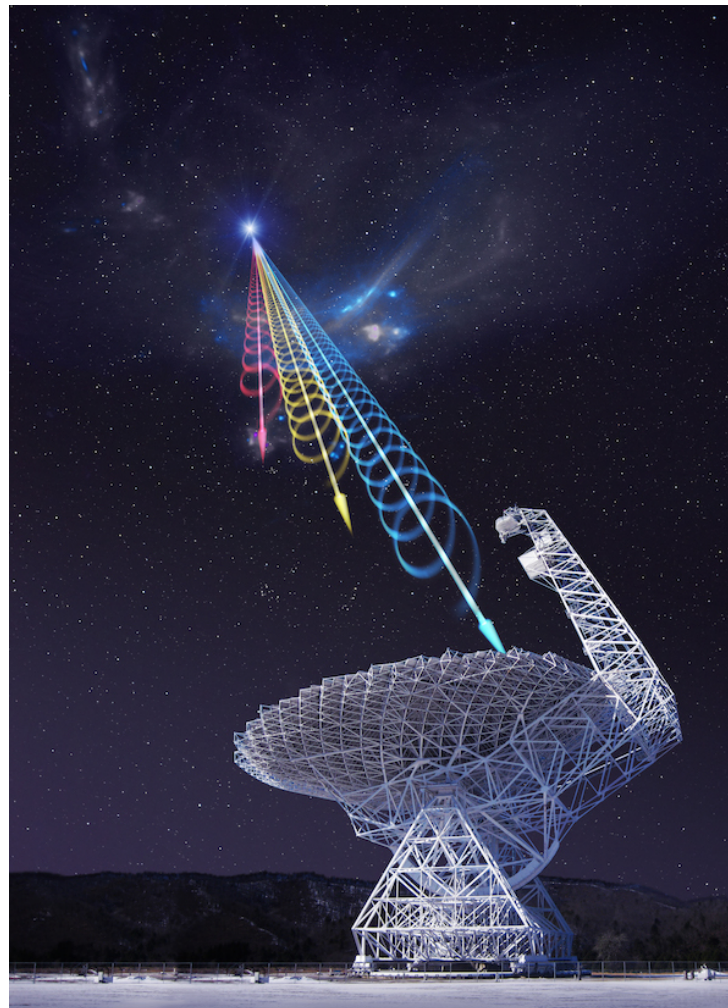
ここ10年くらいの観測的進展

2015 高エネルギーで反陽子宇宙線の過剰

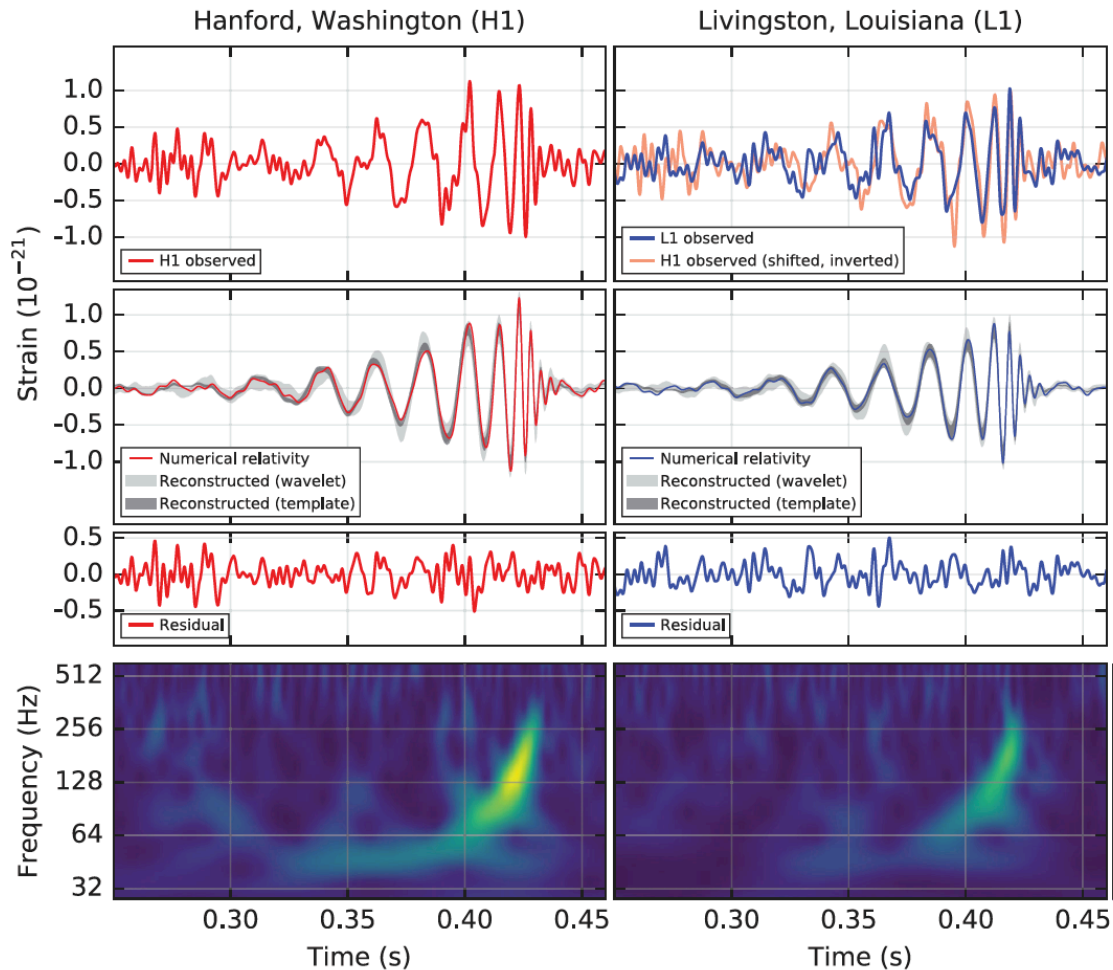


暗黒物質起源？

2016 謎の天体現象: Fast Radio Burst 繰り返しバーストしている⇒超強磁場パルサー？



ここ10年くらいの観測的進展



次のターゲットは中性子連星
ブラックホールと違って光るはず！
(去年のスライドに書いた言葉)

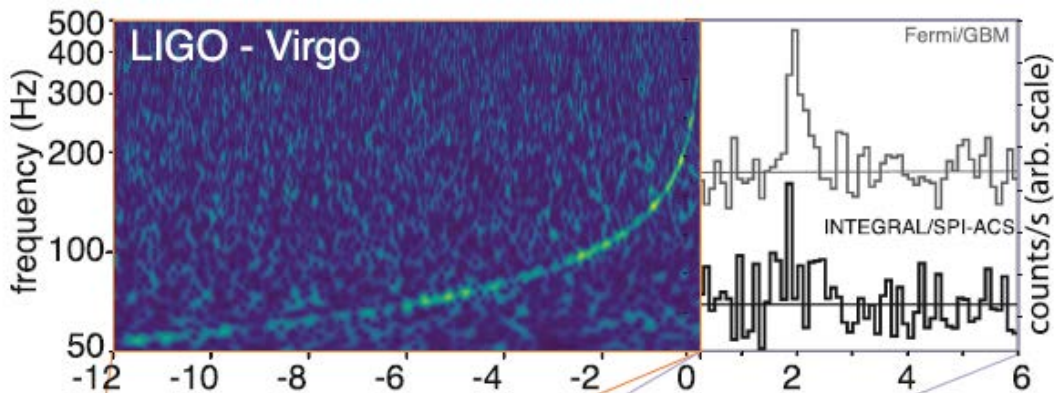
重力理論はOK。重いBHの親星は？
天文学的議論が盛り上がる。

火:最先端研究「重力波天文学」

2016
重力波の検出！
30Msun + 30MsunのBH+ BH合体

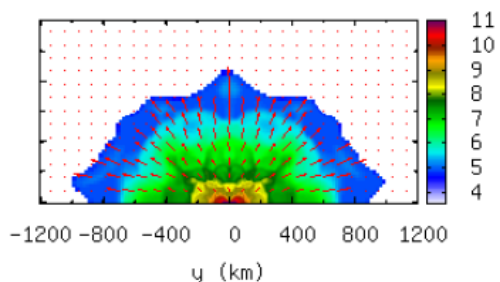
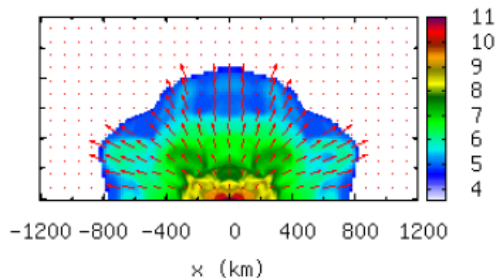
連星中性子星合体！

r-process

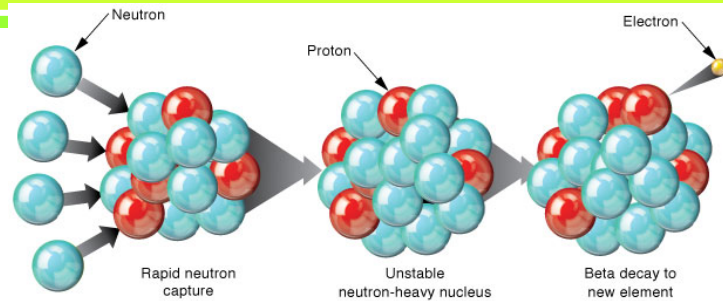


2017

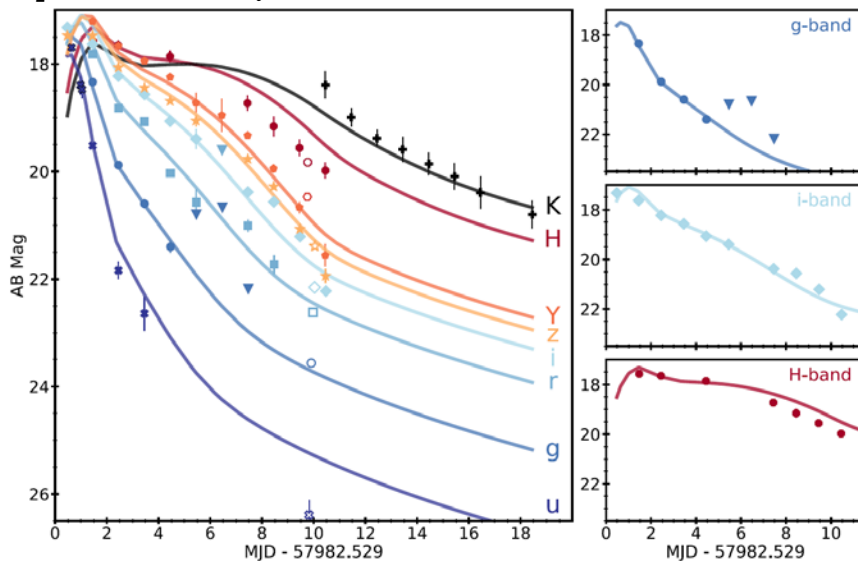
NGC4993 @ 40Mpc



中性子が豊富な放出物
 → 重元素の核融合
 → 不安定核が崩壊
 → ガスを加熱
 → 赤外線で光る



Optical Obs. of Kilonova



Ejecta

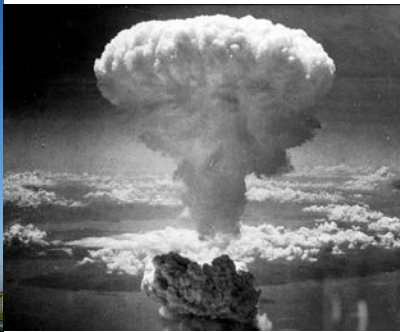
(mass $0.01M_{\odot}$ and velocity $v = 0.27c$)

重元素の起源

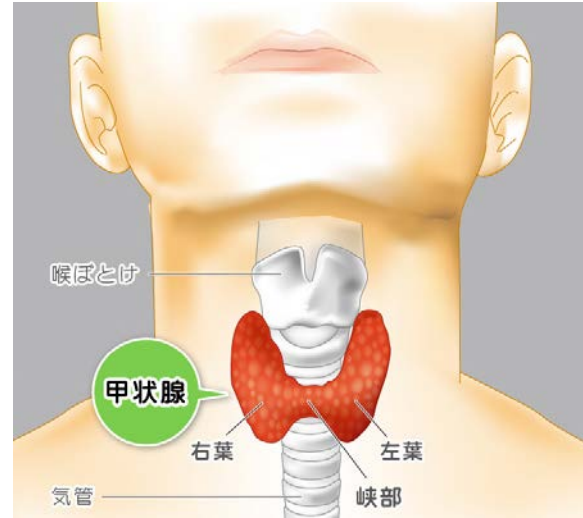
金



ウラン



ヨウ素

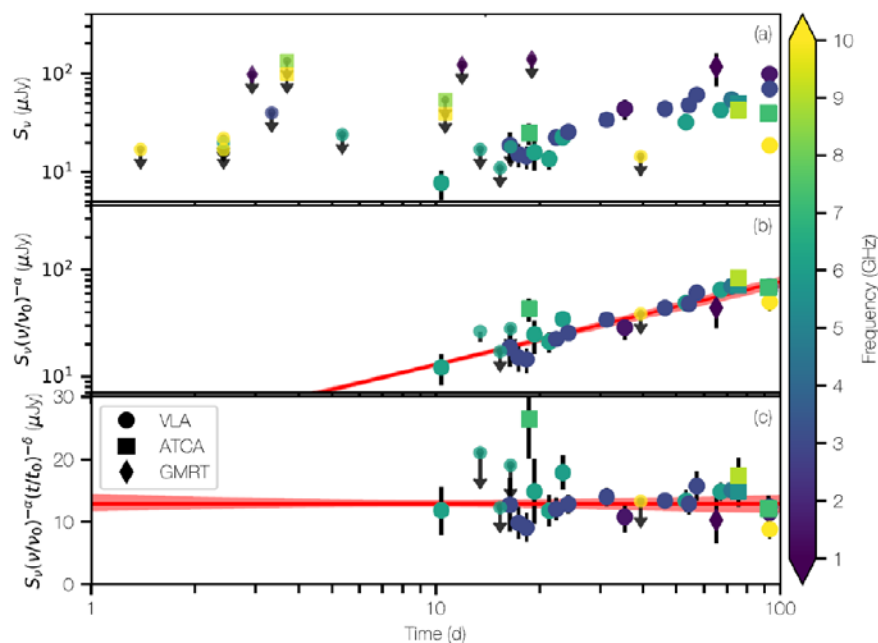


甲状腺ホルモン

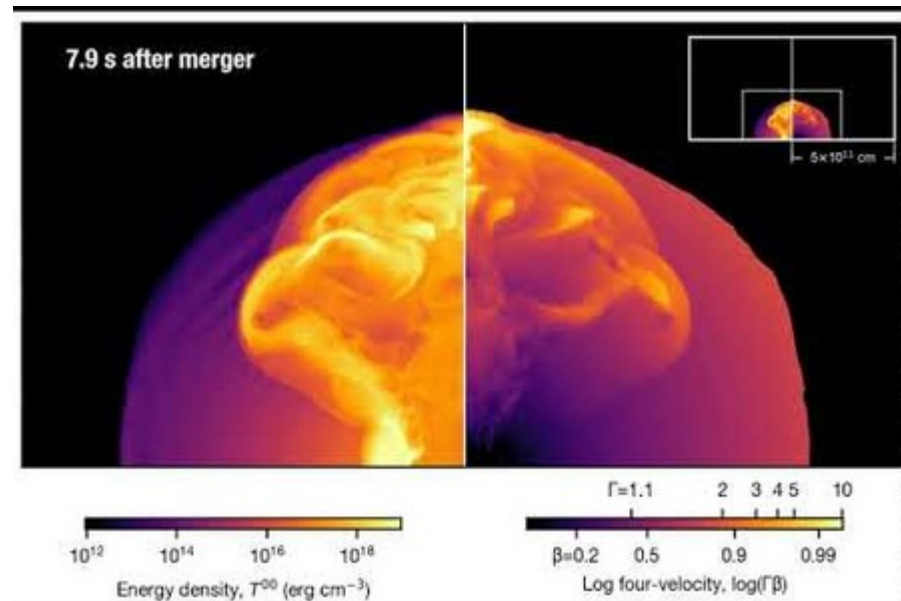
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="display: flex; flex-wrap: wrap;"> <div style="width: 20%;">Big Bang fusion</div> <div style="width: 20%;">Dying low-mass stars</div> <div style="width: 20%;">Exploding massive stars</div> <div style="width: 20%;">Human synthesis No stable isotopes</div> <div style="width: 20%;">Cosmic ray fission</div> <div style="width: 20%;">Merging neutron stars</div> <div style="width: 20%;">Exploding white dwarfs</div> </div> </div>																He 2															
H 1	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	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 20%;">La 57</div></div>																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

多くの謎

中性子星連星の合体からはガンマ線バーストが起きると思われていたが、やたら暗かった。



電波やX線は100日以上にも渡って増光している。予想もしていなかった振舞い。



相対論的なガスが衝撃波を作り、電子を加速し、シンクロトン放射。

シミュレーションでは分解できていない、何か速い成分がある。電子の加速効率も超新星残骸と比較すると高い。

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)