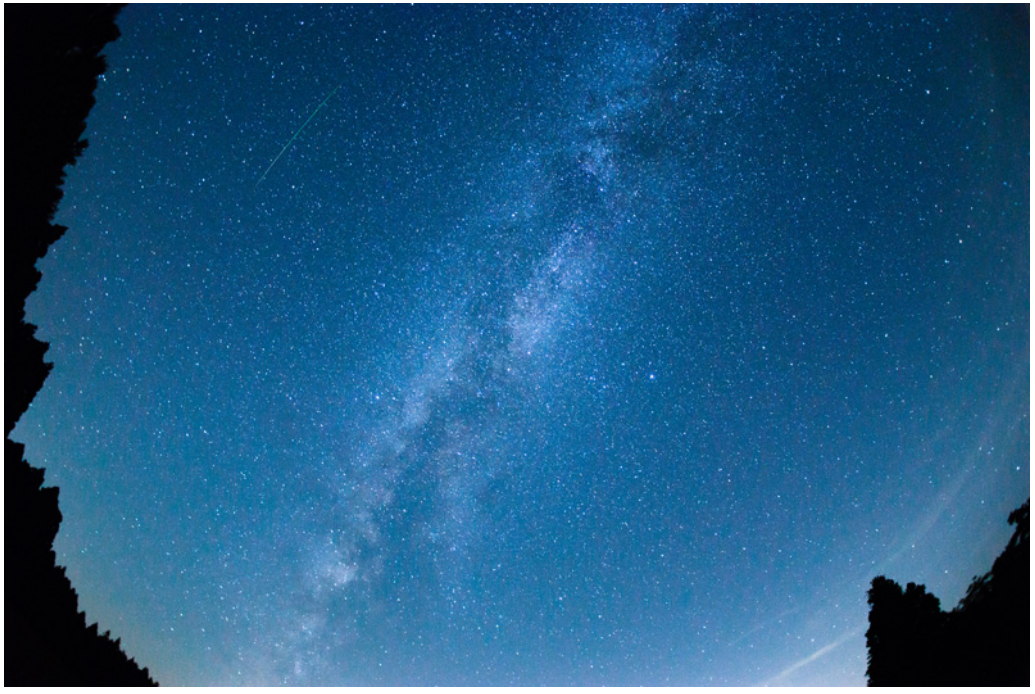
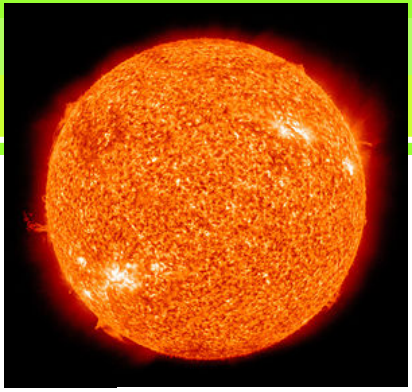
高エネルギー天体物理

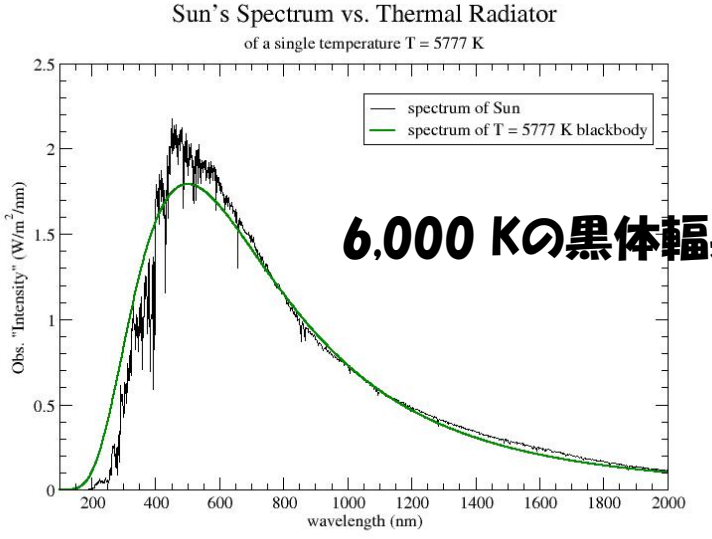
浅野勝晃
（高エネルギー天体グループ）

目で見る夜空





太陽：恒星の代表
核融合反応でエネルギーを
生み出している系



6,000 Kの黒体輻射

都会で見える星は惑星と近傍の恒星くらい。
上記写真では我々の銀河を形成する恒星がほとんど。
他には系外の銀河（これも恒星の集まり）。

宇宙＝静かに星が浮かんでいる世界
…と思える。

1912年にVictor Franz Hessが
上空から放射線が降り注いでいることを
発見。正体は目に見えない宇宙線。

宇宙線の起源は星？

何らかの高エネルギー現象を示唆。

エネルギーと温度

光度$=4\pi R^2\sigma T^4$

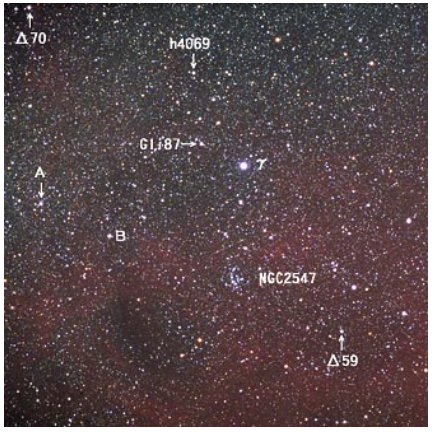
スピカ：青色巨星

温度 25,300 K
半径 太陽の7.5倍
質量 太陽の11倍
光度 太陽の2万倍

ベテルギウス：赤色超巨星

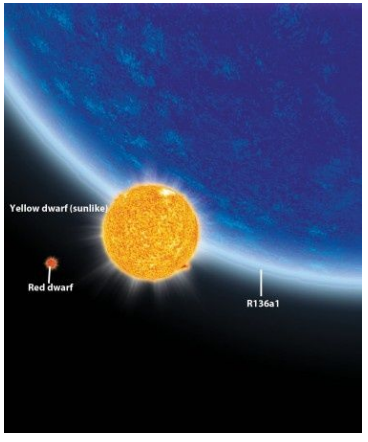
温度 3,600 K
半径 太陽の900倍
質量 太陽の12倍
光度 太陽の10万倍

ほ座ガンマ星：WR星



温度 57,000 K
半径 太陽の6倍
質量 太陽の9倍
光度 太陽の17万倍

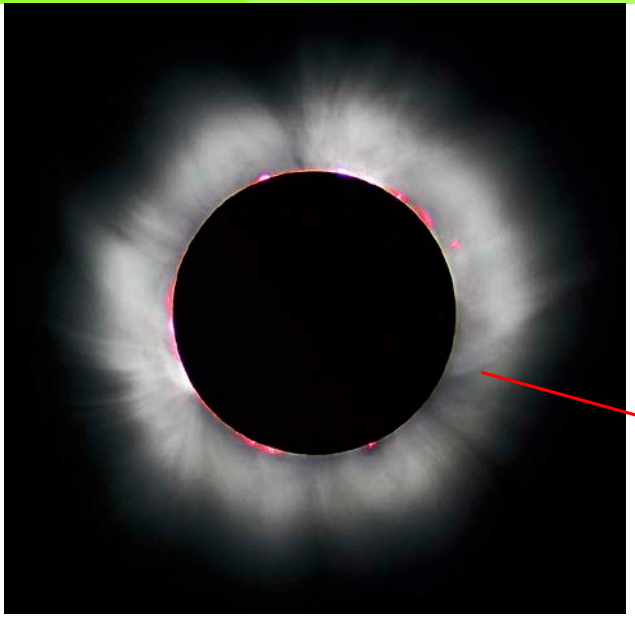
R136a1：青色巨星



温度 53,000 K
半径 太陽の30倍
質量 太陽の300倍
光度 太陽の900万倍

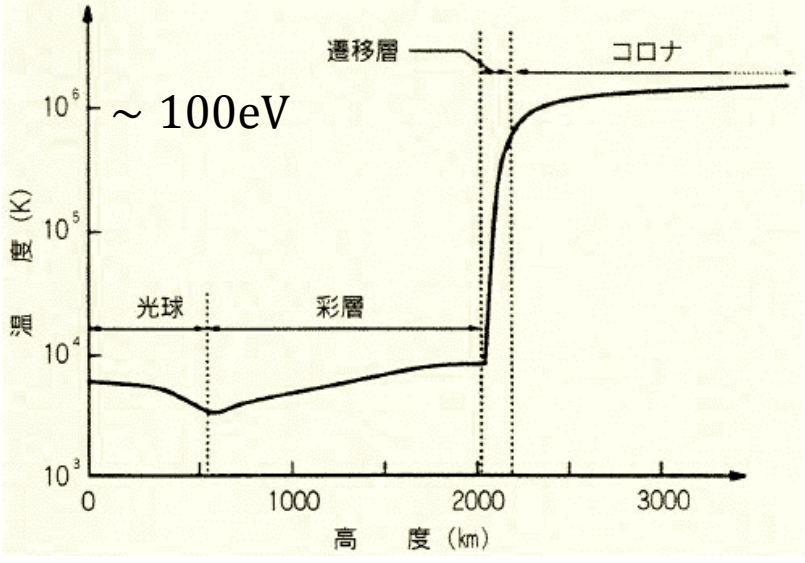
1eV＝1,2000 K（可視光）、酸素の電離エネルギー＝13.6eV（紫外線）、X線～1keV

太陽からのX線



$$L_{\mathrm{X}} \sim 10^{27}\,\mathrm{erg\,s^{-1}} \sim 10^{-6} L_{\odot}$$

コロナ加熱のメカニズムは未解明。
いずれにせよ、エネルギー的にはしょぼい。



反射X線

X線天体

1962年 Ricardo Giacconi

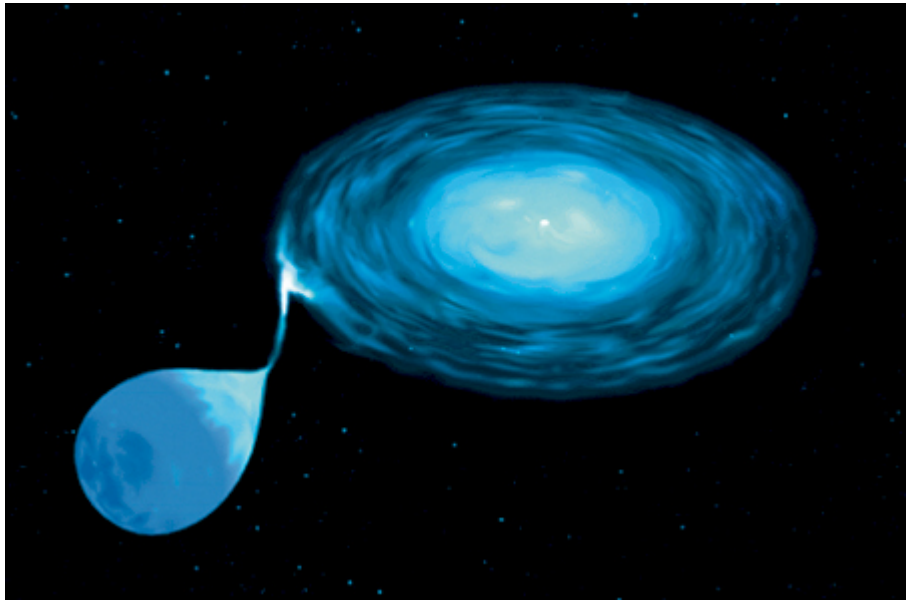
Aerobee 150によるX線観測

月からのX線は見つからなかったが…

X線源 Sco X-1を発見。

後の観測でX線光度＝太陽の6万倍！

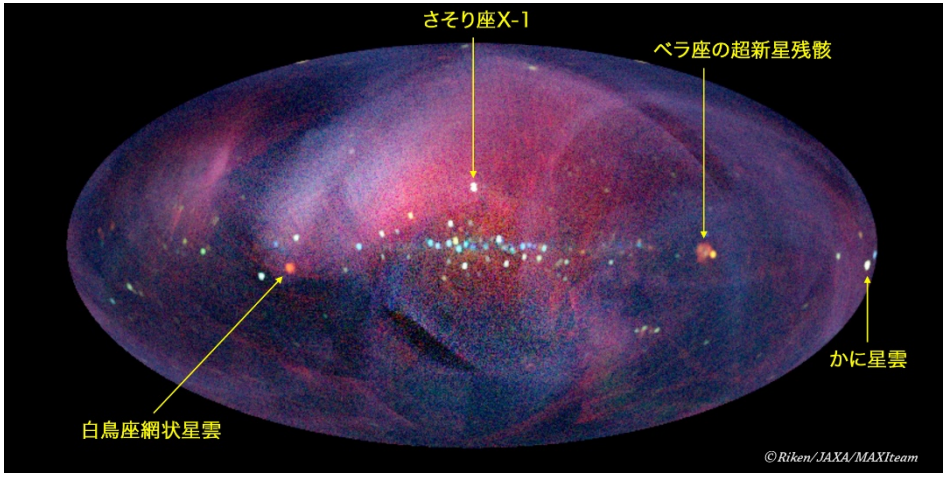
正体は



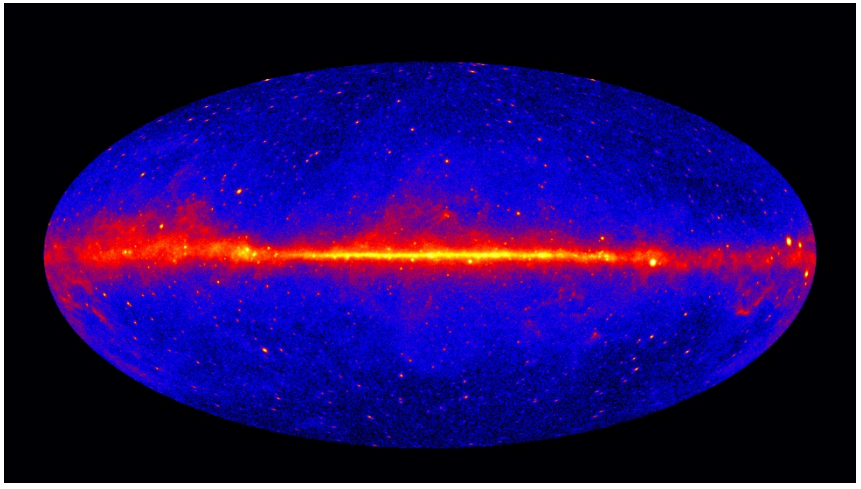
中性子星と恒星の連星

高エネルギーで輝く宇宙

X線(＞0.5keV)

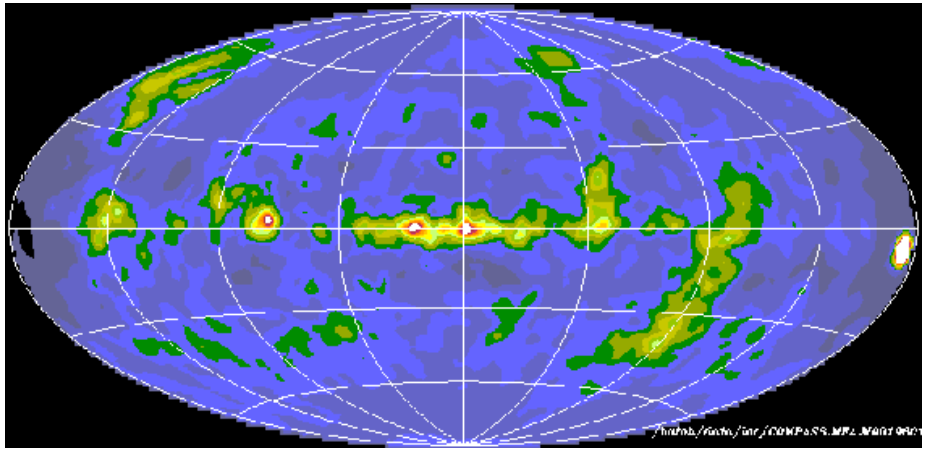


ガンマ線(＞1GeV)



陽子質量 $m_{\mathrm{p}}c^2 \sim 0.9\mathrm{GeV}$

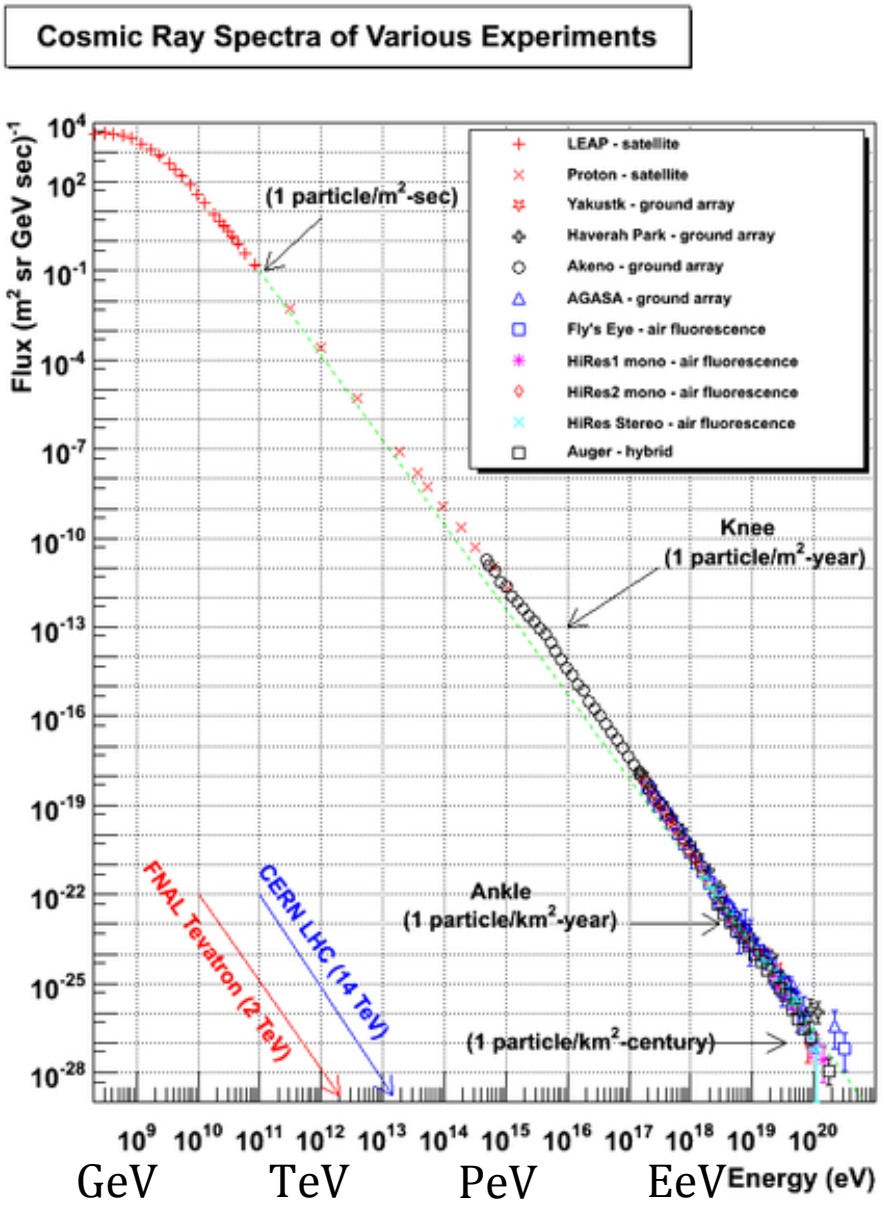
ガンマ線(＞0.8MeV)



電子質量 $m_{\mathrm{e}}c^2 \sim 0.5\mathrm{MeV}$

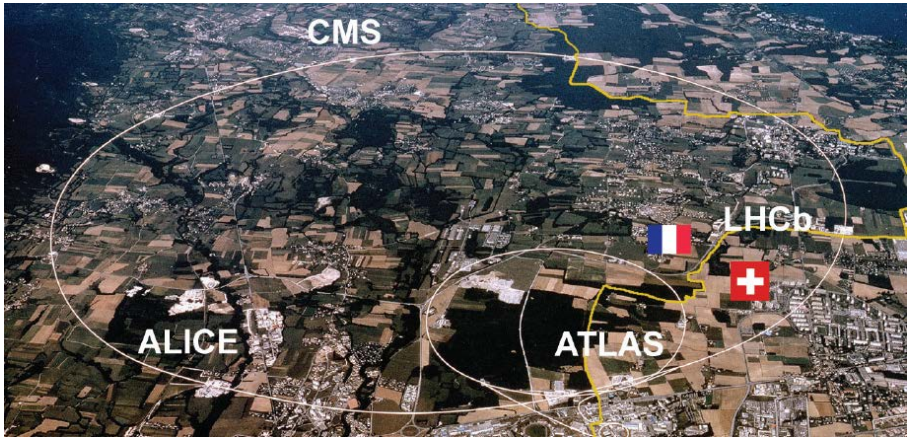
ガンマ線(＞0.2TeV)

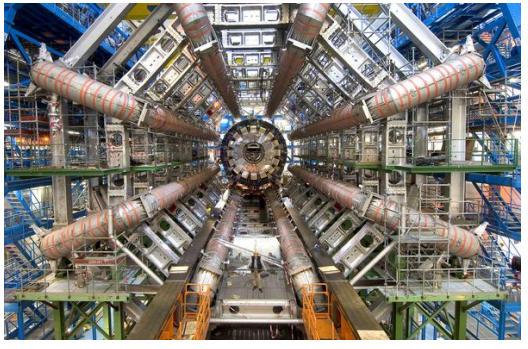
宇宙線



ほとんどは高エネルギー陽子だが、
He、C、N、O、Feなどの原子核も含む。

加速器Large Hadron Collider

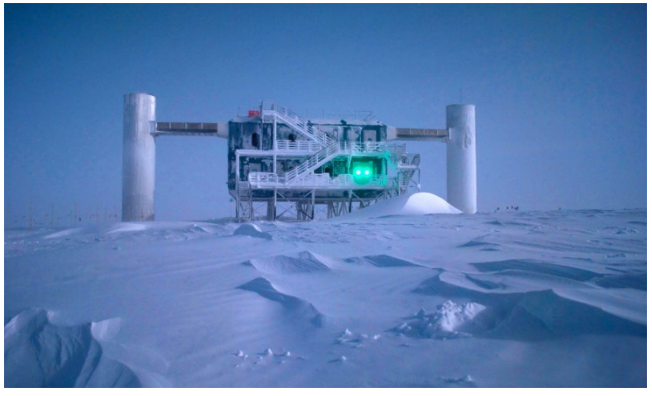


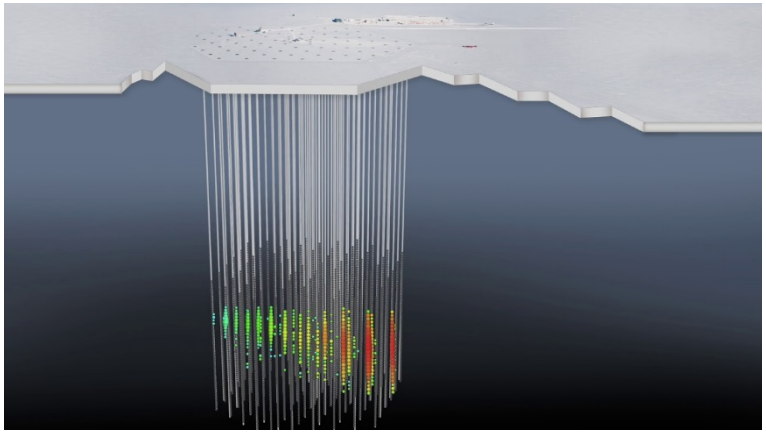


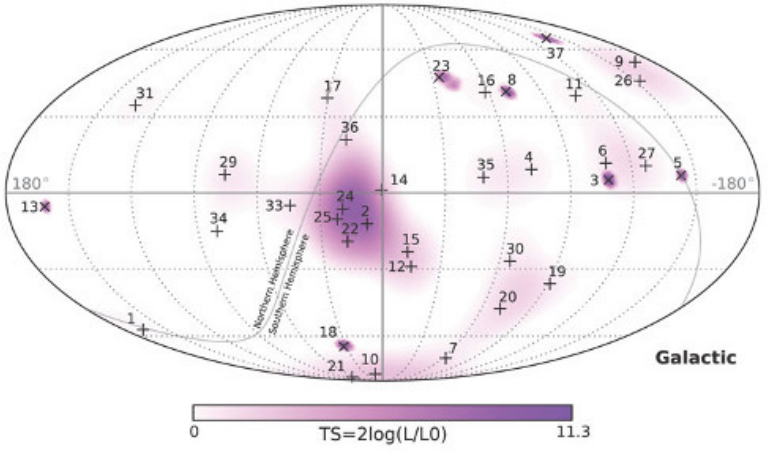
達成エネルギーは7TeV

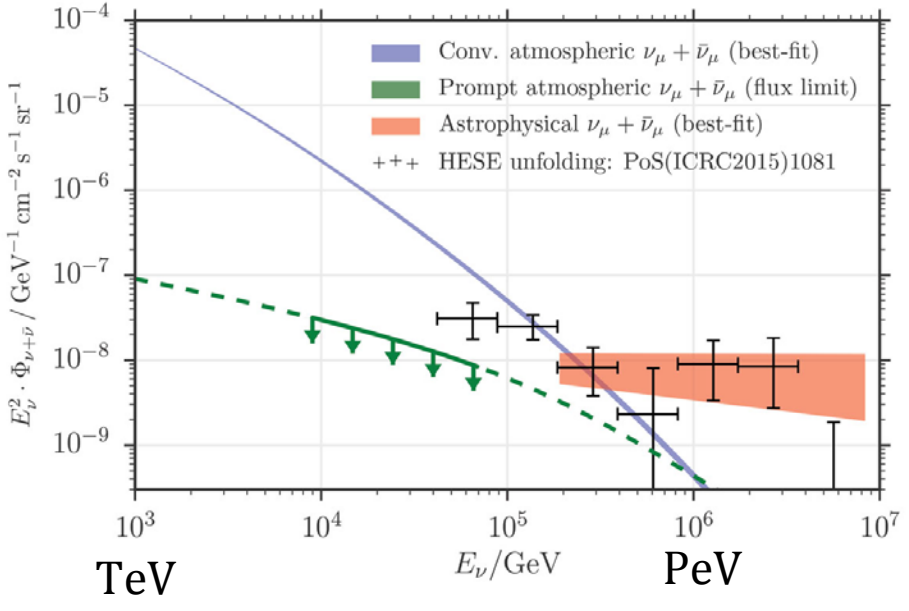
ニュートリノ

IceCube



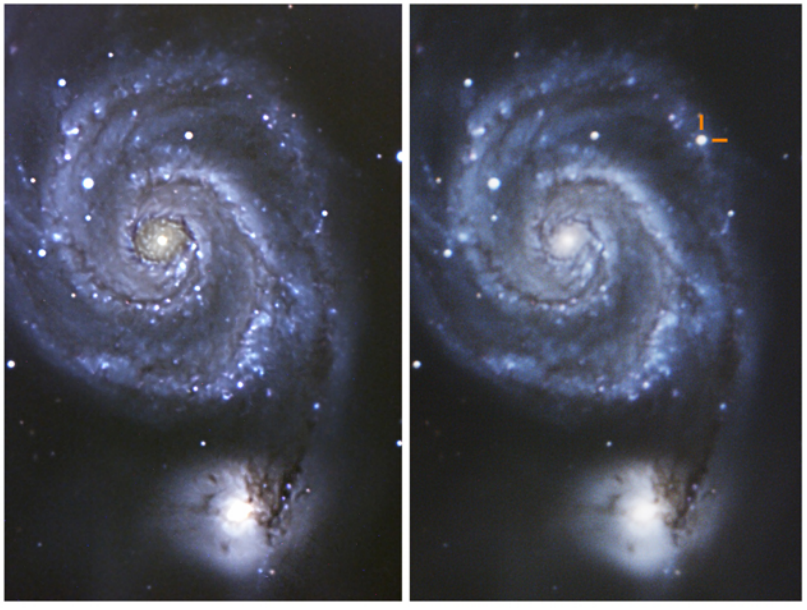




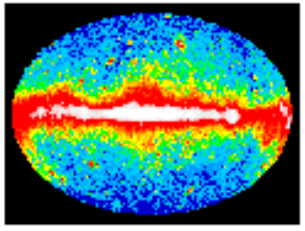


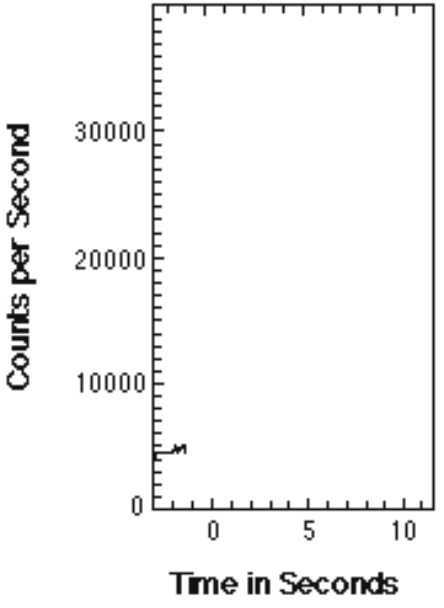
突発現象

超新星爆発

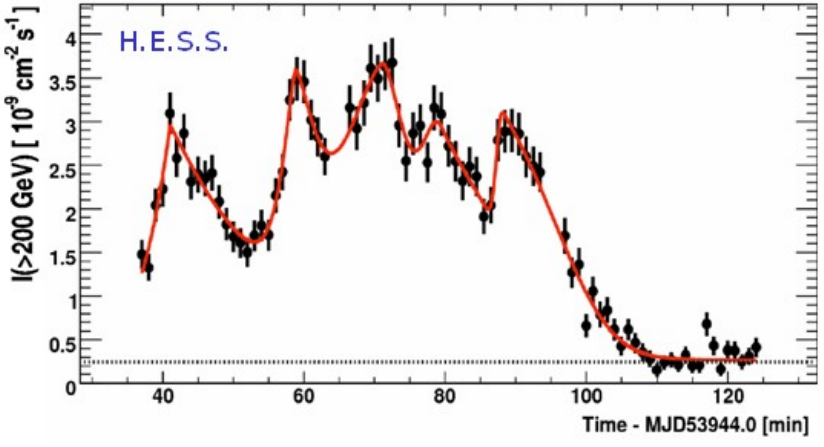


ガンマ線バースト



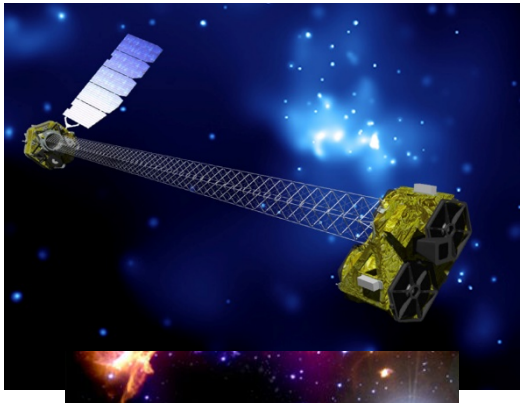


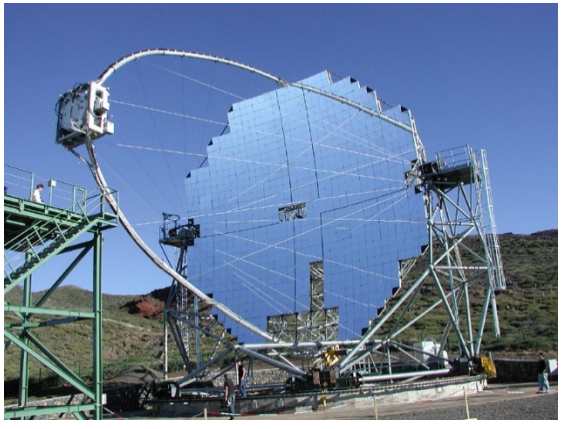
ブレーザーからのTeVガンマ線変動

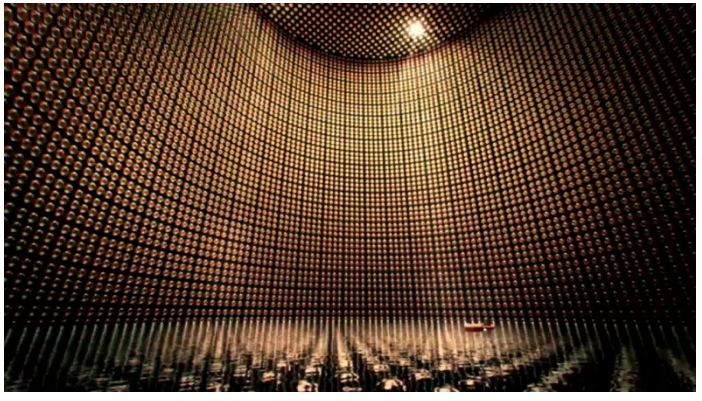


高エネルギー宇宙物理学

- 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。
- 相対論的な世界



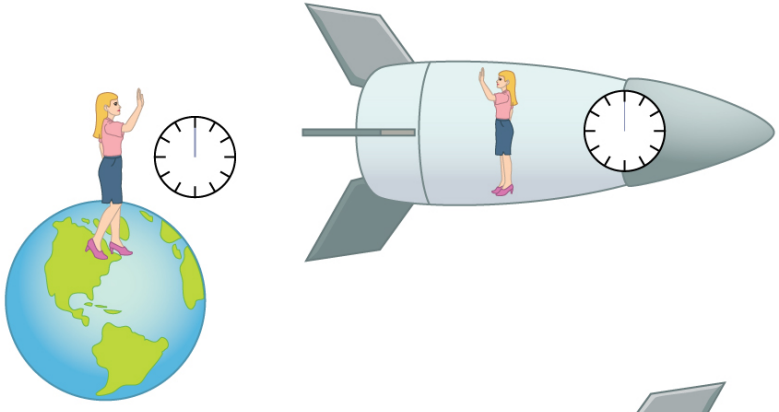




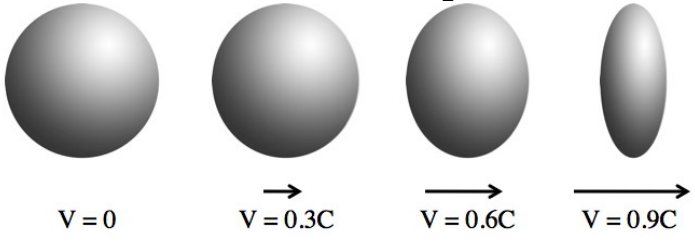
高エネルギーの世界

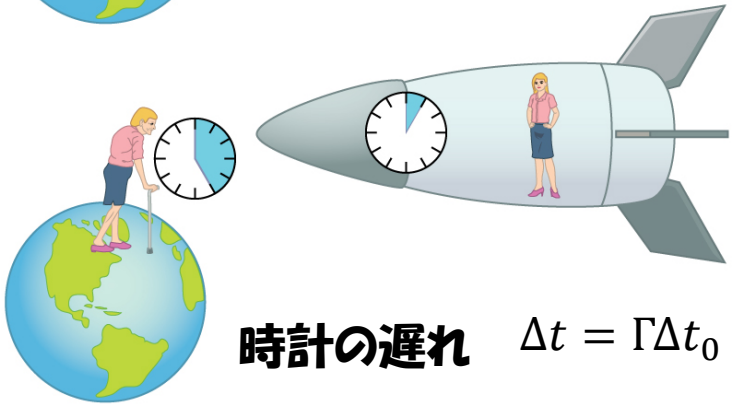
高エネルギー：相対論的な世界

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



ローレンツ収縮 $l = \frac{l_0}{\Gamma}$





時計の遅れ $\Delta t = \Gamma \Delta t_0$

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

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

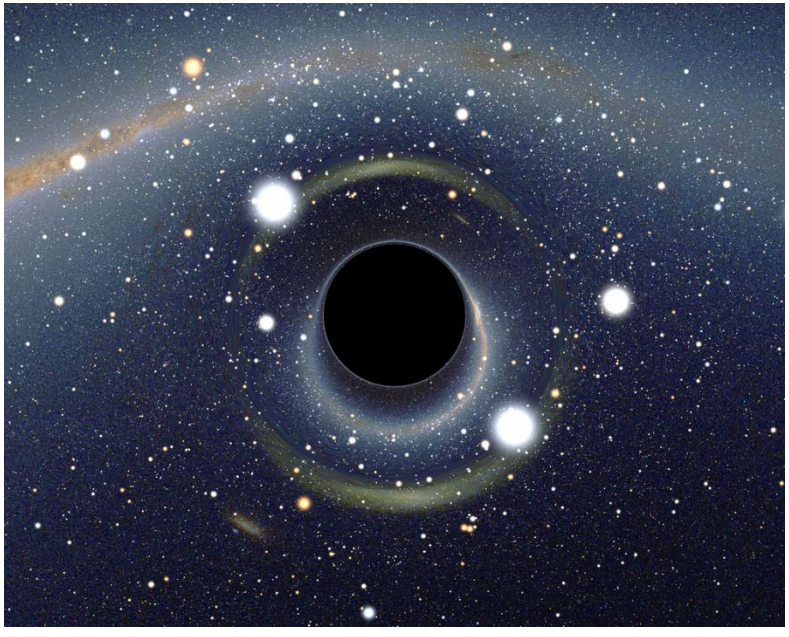
これよりも小さな半径の星はブラックホールになる。
太陽質量なら3kmほど。

回転するブラックホール

角運動量

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

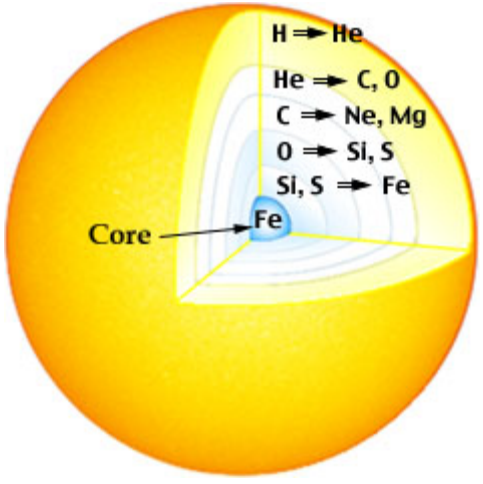
$a < 1$

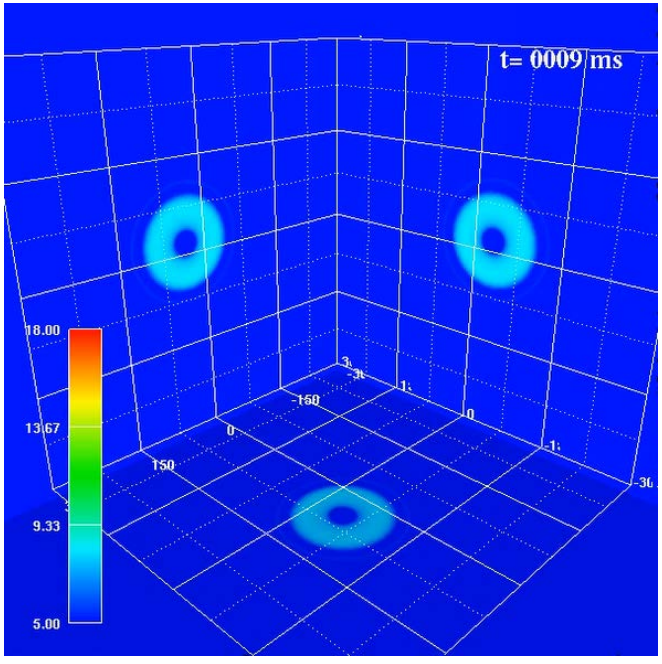


ブラックホールを特徴づける量は質量Mと
回転パラメーターaのみ。

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

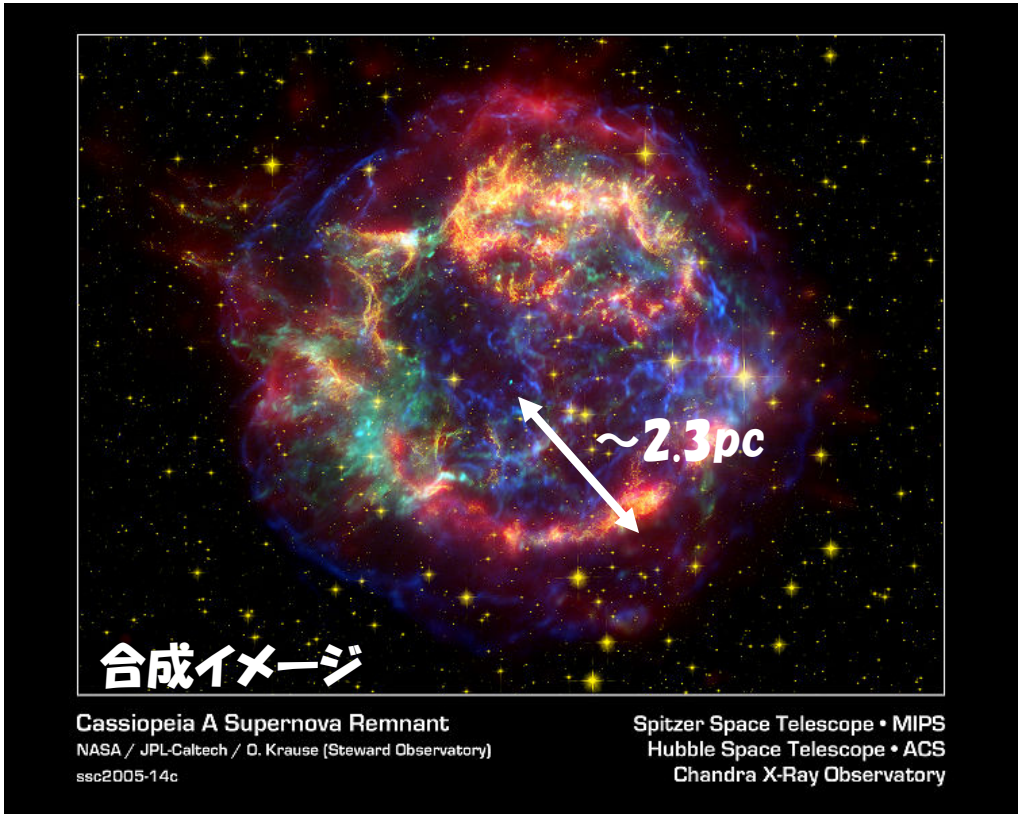
爆発による衝撃波が星間空間を伝播

↓

衝撃波による粒子加速
高エネルギー粒子の生成

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

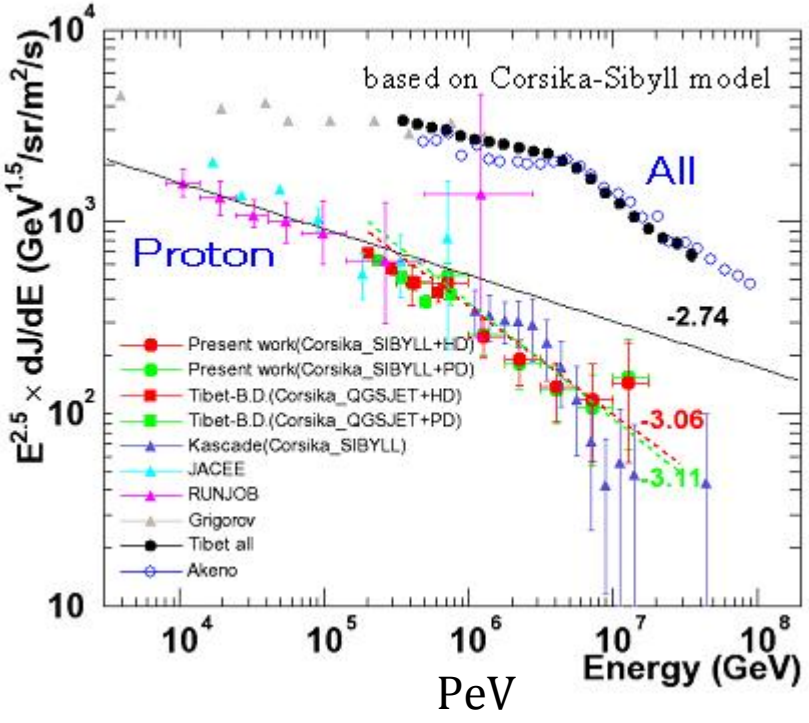
1667年頃に爆発したCassiopeia A



距離：3.4kpc
膨張速度：4000-5000km/s

中心には中性子星が残される

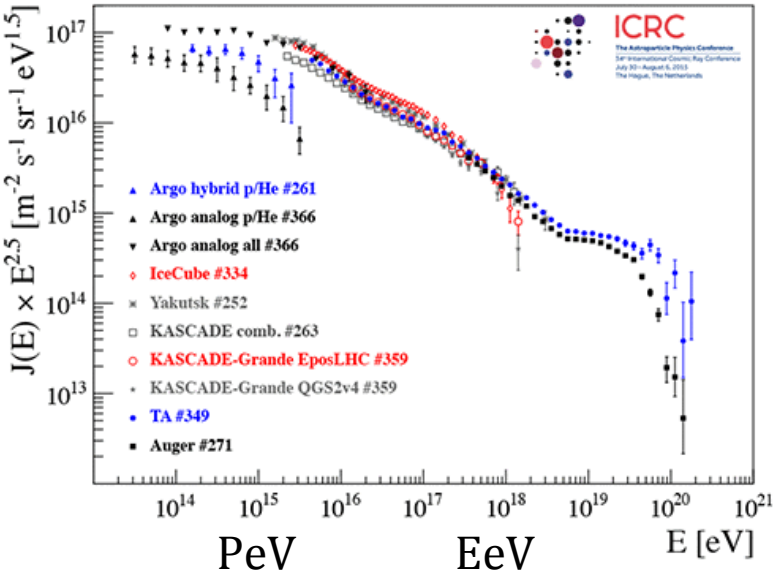
宇宙線



10^{15}eV = 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。



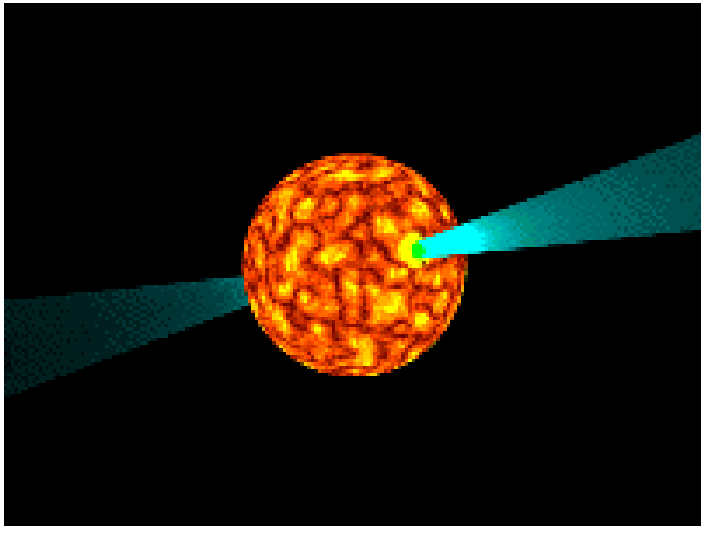
10^{18}eV = EeV**付近の折れ曲がり**
＝Ankle

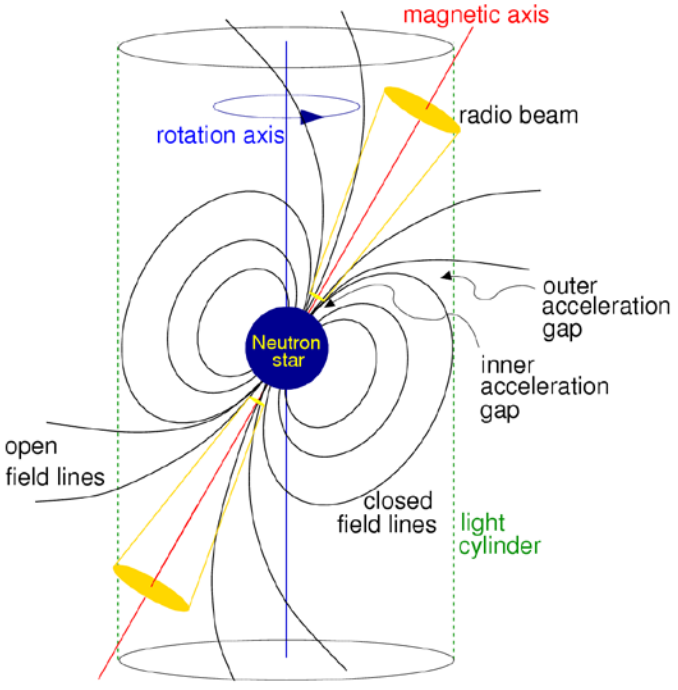
$$r_L = \frac{E}{eB} \simeq 1\left(\frac{E}{10^{18}\mathrm{eV}}\right)\left(\frac{B}{10^{-6}\mathrm{G}}\right)^{-1}\ \mathrm{kpc}$$

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





$$|\boldsymbol{\mu}| \simeq B_{\rm p} R_\star^3/2$$

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

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(～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。

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

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)

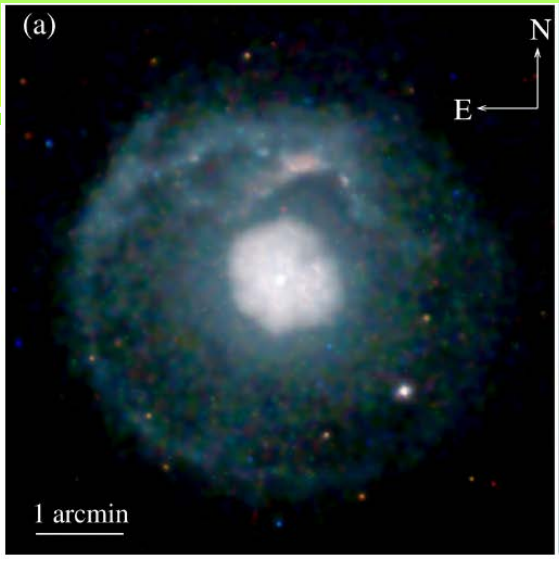
$$\alpha_B = \frac{1}{2}\frac{m_{\rm e}e^2}{\hbar^2}\frac{B_\perp}{B_{\rm cr}}\Xi(\chi), \quad \chi = \frac{1}{2}\frac{\varepsilon}{m_{\rm e}c^2}\frac{B_\perp}{B_{\rm cr}}, \quad B_{\rm cr} = \frac{m_{\rm e}^2c^3}{\hbar e} = 4.41\times10^{13} \quad {\rm G}.$$

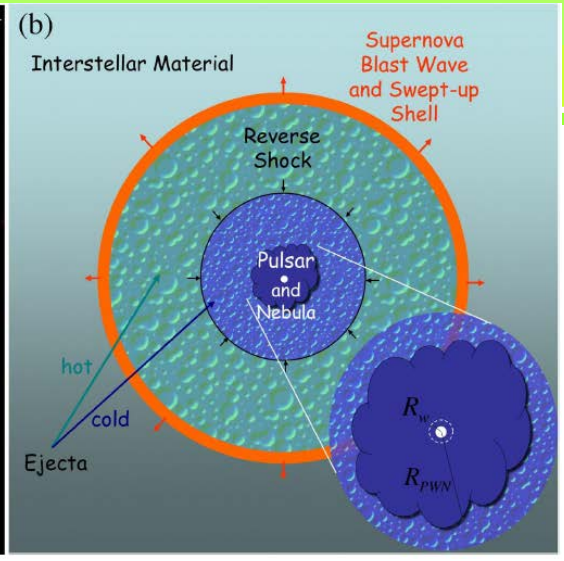
パルサー星雲

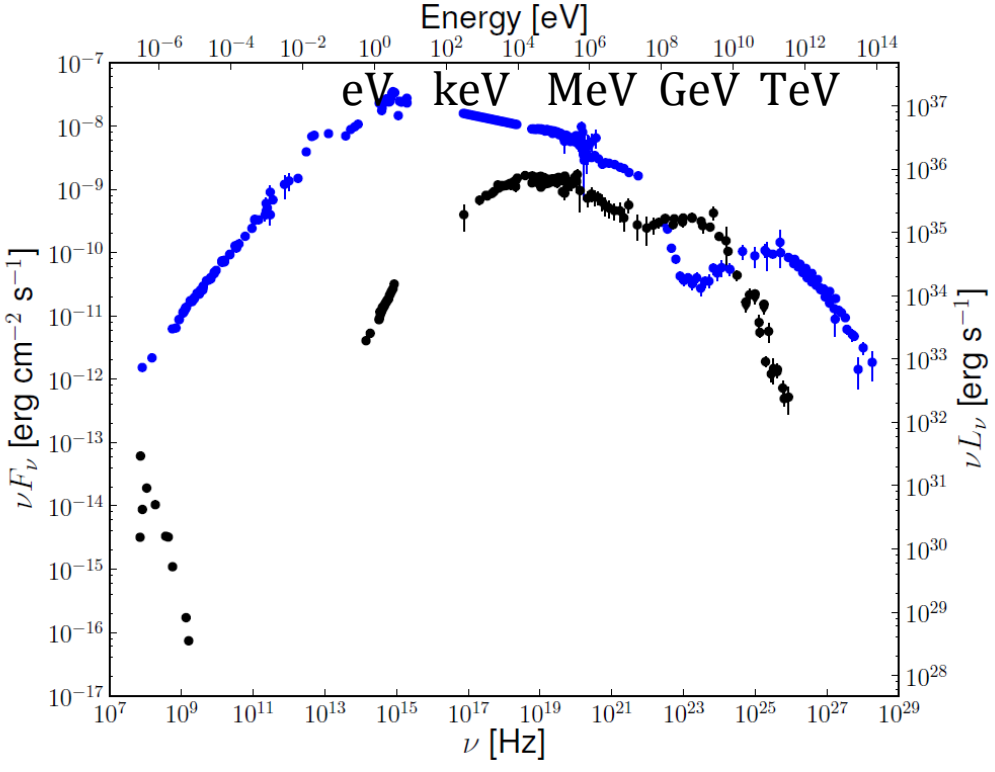
カニ星雲

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

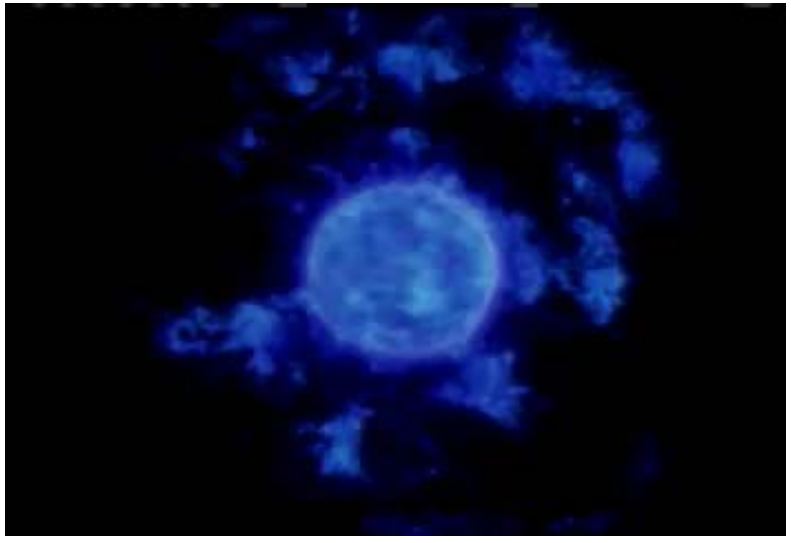
プラズマの加速機構は謎。







ガンマ線バースト

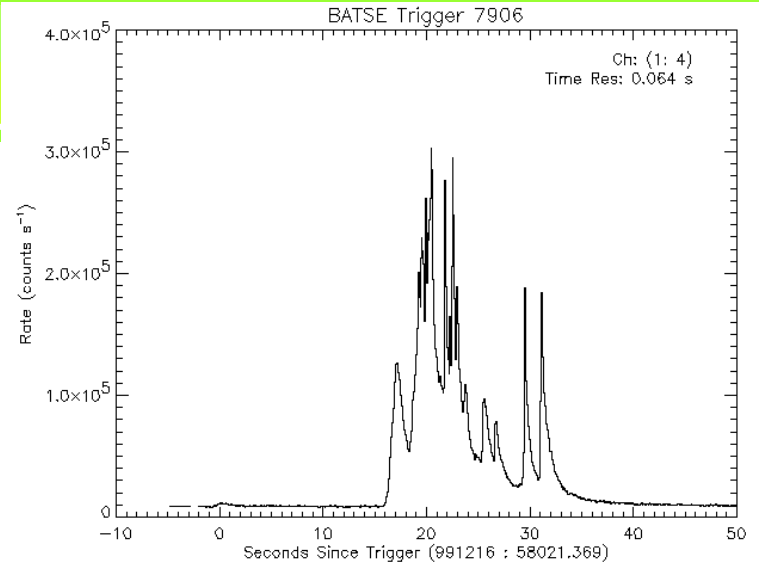


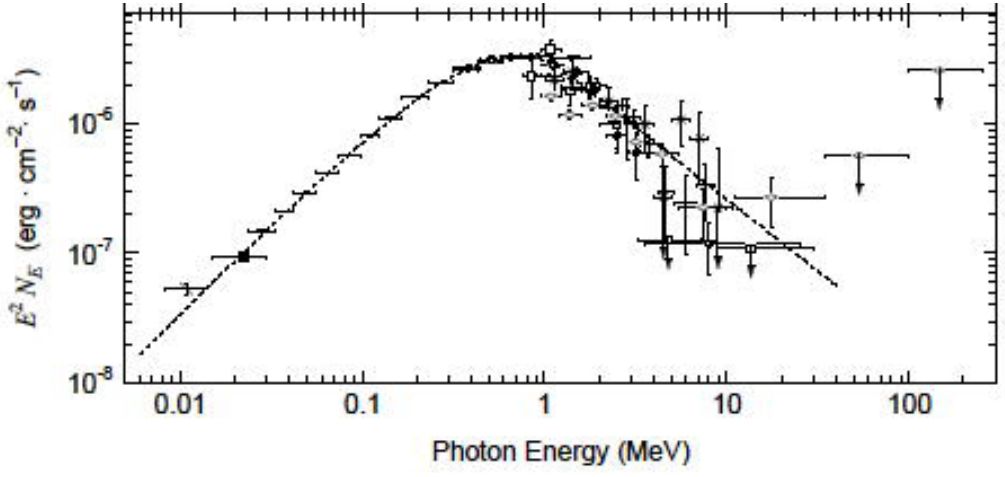
宇宙最大の爆発現象

巨星の核がブラックホールに崩壊。

「＞100の光速ジェットからガンマ線を放出。

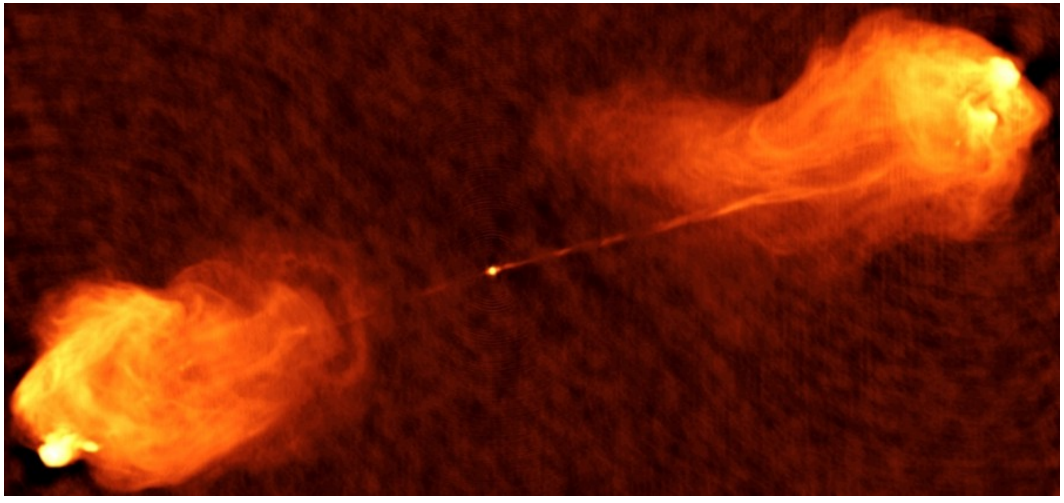
最も明るいものの解放エネルギーは
$\sim M_{\odot}\, c^2$に達する。





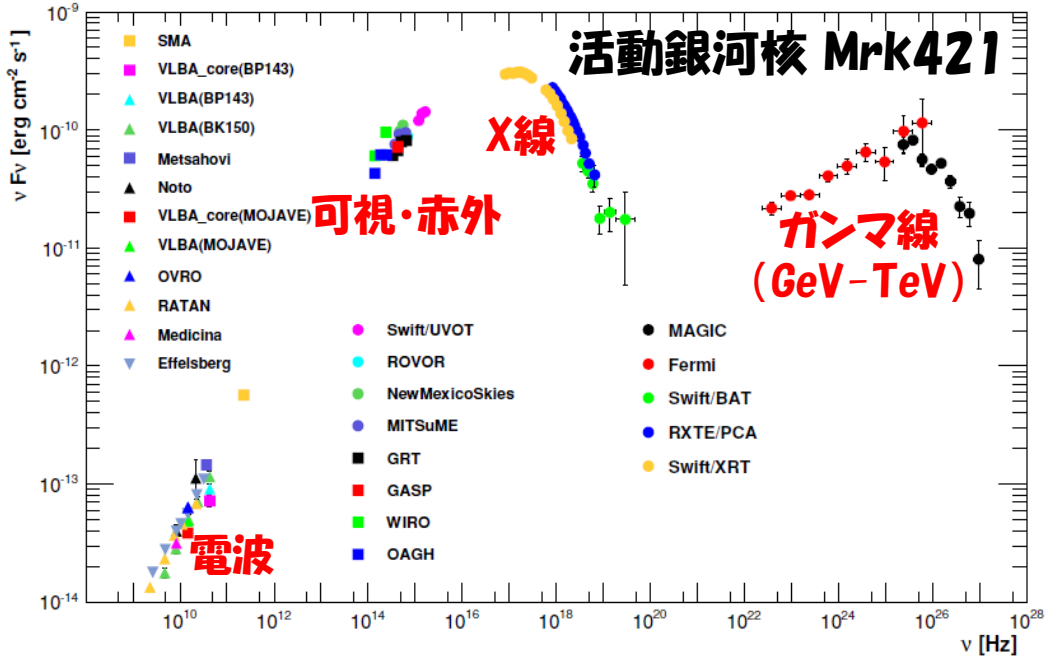
相対論的ジェットの運動エネルギーを如何に
ガンマ線へと転換するか？
衝撃波？磁場散逸？

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。

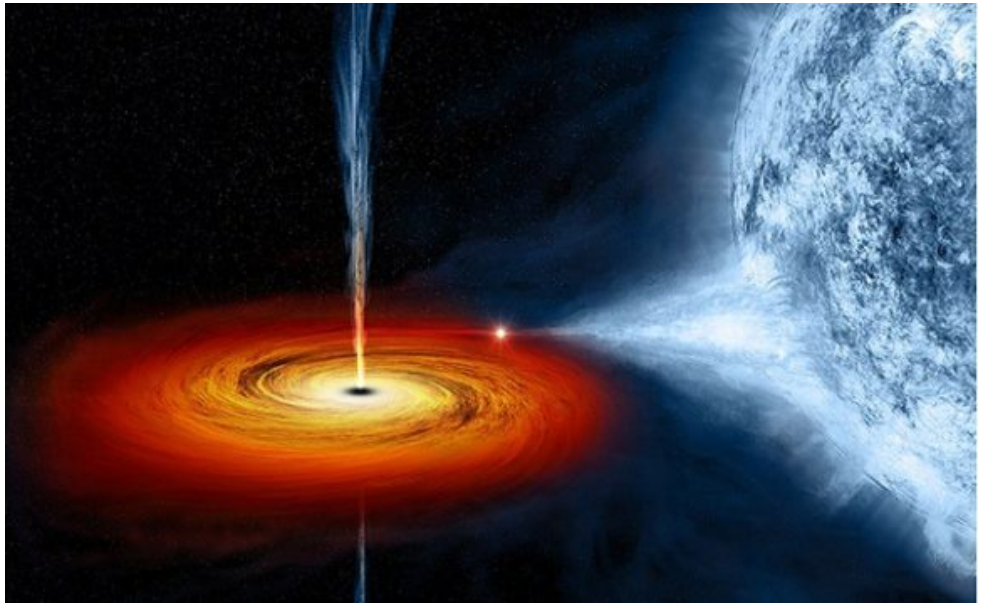


高エネルギー天体物理の目標

- 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

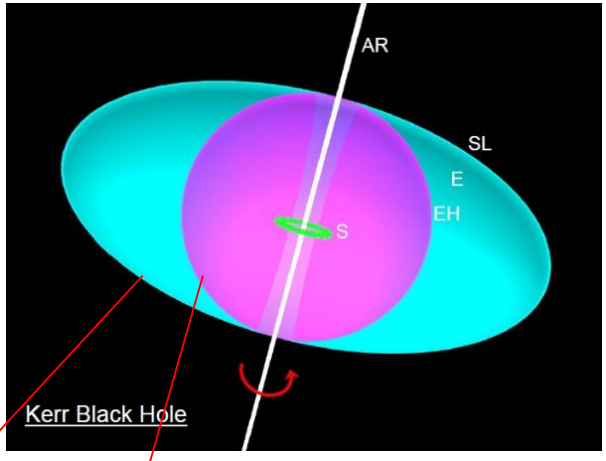
ジェットのエネルギー源

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”

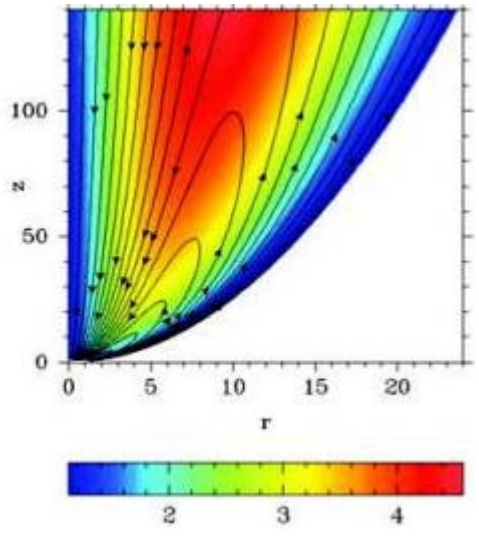


$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_g r}{\Sigma}\right) c^2 dt^2 - \frac{\Sigma}{\Delta} dr^2 - \left(\frac{r_g r}{\Sigma} a^2 \sin^2\theta + r^2 + a^2\right) \sin^2\theta d\varphi^2 - \Sigma d\theta^2$$
$$= 0 \qquad = \infty$$
$$+ 2\frac{r_g r}{\Sigma} a \sin^2\theta c dt d\varphi,$$

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

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

$$\boldsymbol{E} = -\frac{1}{c}\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}$$

質量保存

$$\frac{\partial}{\partial t}(\Gamma\rho)+\nabla\cdot(\Gamma\rho\boldsymbol{v})=0$$

エネルギー保存

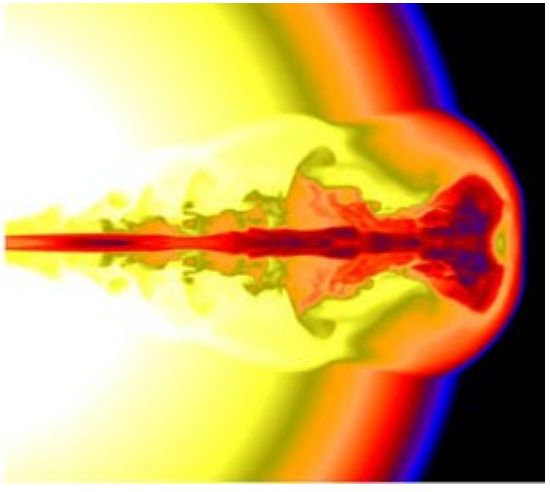
$$\frac{\partial}{\partial t}\left[(e+P)\Gamma^2-P+\frac{1}{8\pi}(B^2+E^2)\right]+\nabla\cdot\left[(e+P)\Gamma^2\boldsymbol{v}+\frac{c}{4\pi}\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}\right]=0$$

運動量保存

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

誘導方程式

$$\frac{\partial\boldsymbol{B}}{\partial t}-\nabla\times(\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B})=0$$



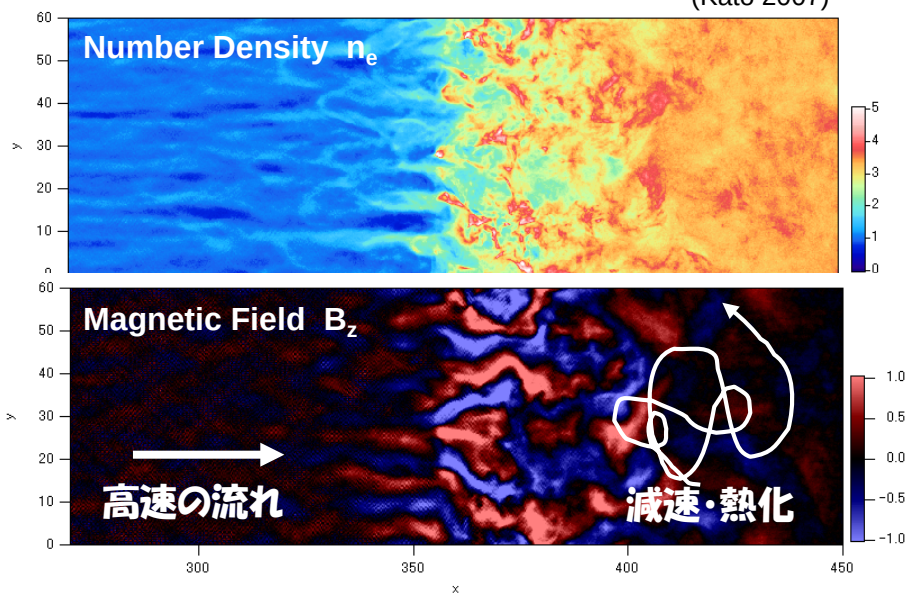
相対論的輻射流体力学

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

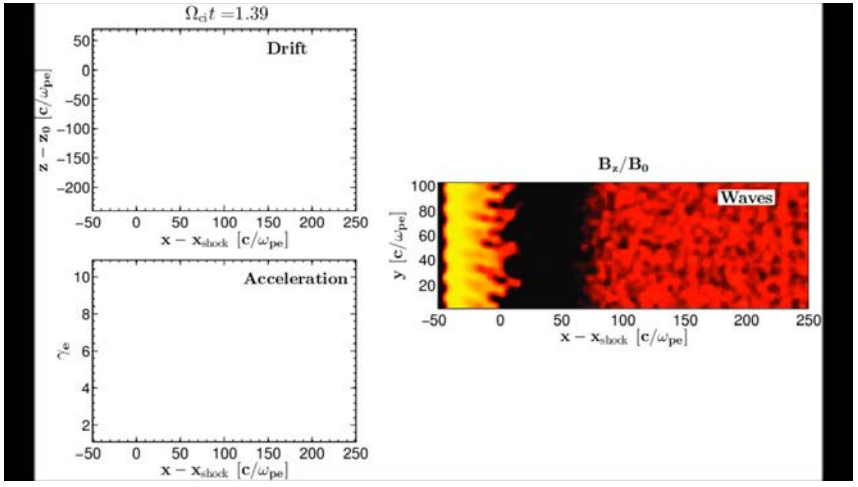
$$\Gamma\propto r,\ n\propto r^{-3},\ e\propto r^{-4}$$

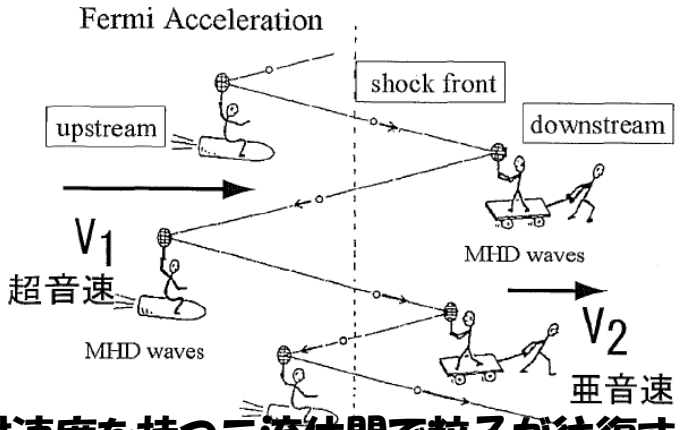
衝撃波による粒子加速

(Kato 2007)



シミュレーション





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

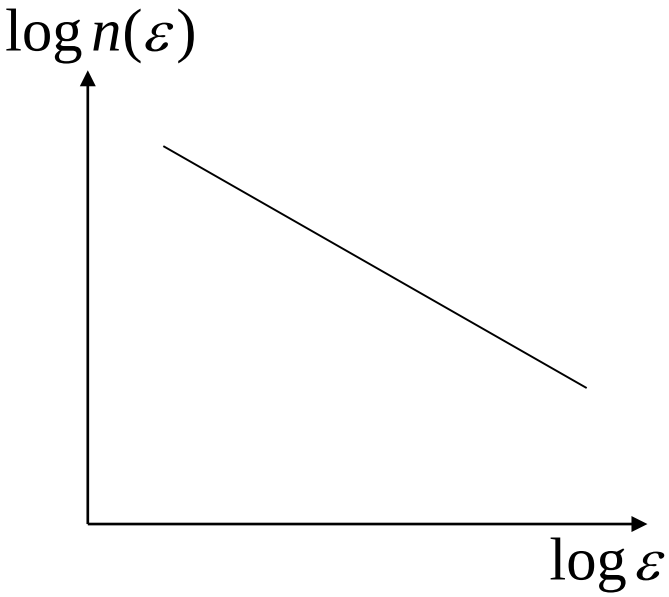
$$\varepsilon \approx \varepsilon_0 \exp\left(n\frac{4}{3}\frac{v_{\rm rel}}{c}\right)$$

もう一度往復する確率 $1-4\frac{v_{\rm d}}{c}$

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

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。

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。

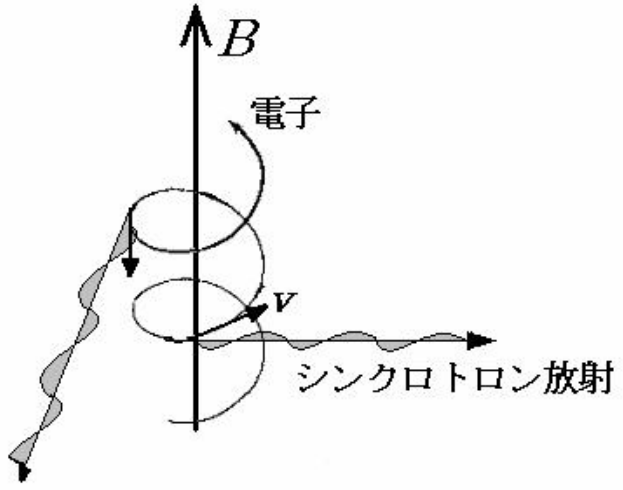
加速される粒子の割合(数・エネルギー)を
決める物理も不明。
（長時間の大規模simulationが必要）
電子と陽子の比は～1:100

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



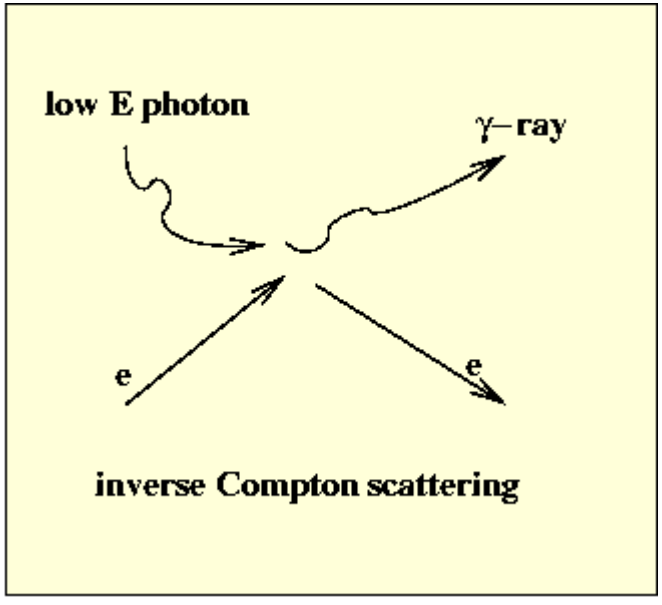
シンクロトロン放射。vは電子の速度ベクトルを表す。シンクロトロン放射は、磁力線に垂直に直線偏波しており、磁場に垂直な速度成分$v_{\perp}$方向のごく狭い領域にのみ放射される。

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 $\varepsilon_{\mathrm{typ}} = \dfrac{3\hbar\gamma^2 eB}{2mc}$

放射率 $\dfrac{d\varepsilon}{dt} = \dfrac{4}{3} c\sigma_{\mathrm{T}}\gamma^2 U_B$

逆コンプトン散乱



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

放射率 $\dfrac{d\varepsilon}{dt} = \dfrac{4}{3} c\sigma_{\mathrm{T}}\gamma^2 U_{\mathrm{ph}}$

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

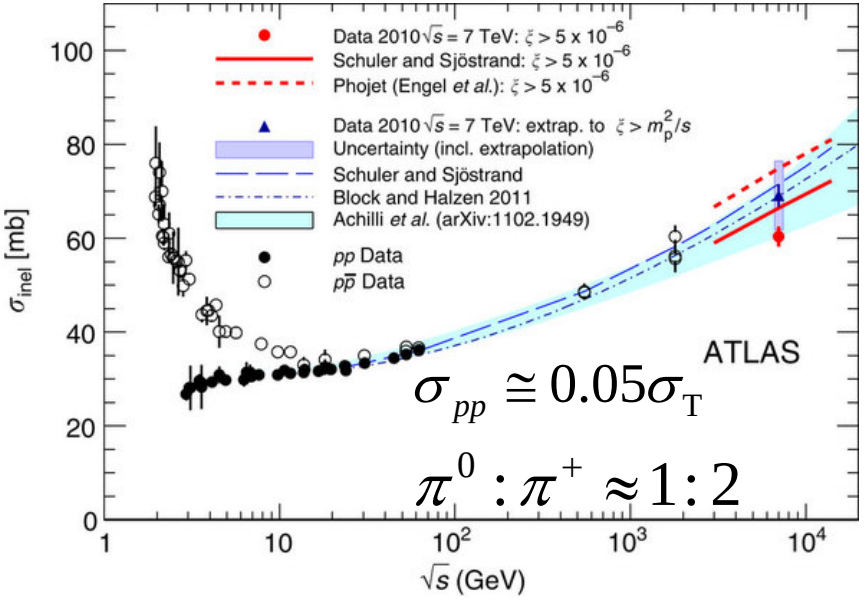
陽子起源放射

陽子-陽子衝突

$$p + p \rightarrow p + p + \pi^0$$

$$\rightarrow p + n + \pi^+$$

(m_π = 135MeV)



ガンマ線放射 $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$

ニュートリノ放射 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

他にも

$$p + \gamma \rightarrow p + \pi^0$$

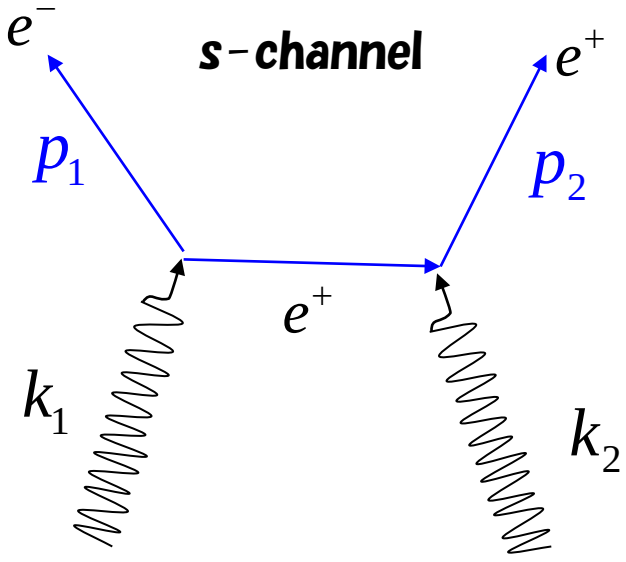
$$\rightarrow n + \pi^+$$

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

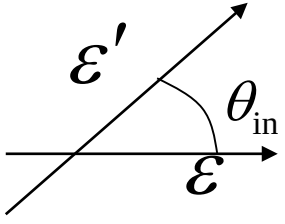
$$\gamma + \gamma \leftrightarrow e^- + e^+$$



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

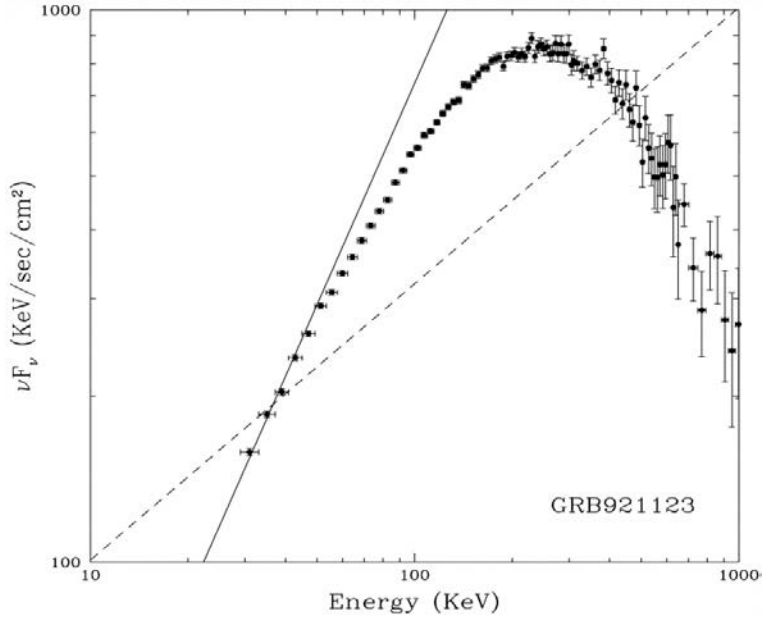
$$y^2 \equiv 1 - \frac{2m_{\mathrm{e}}^2c^4}{\varepsilon\acute{\varepsilon}(1-\cos\theta_{\mathrm{in}})} < 1$$

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

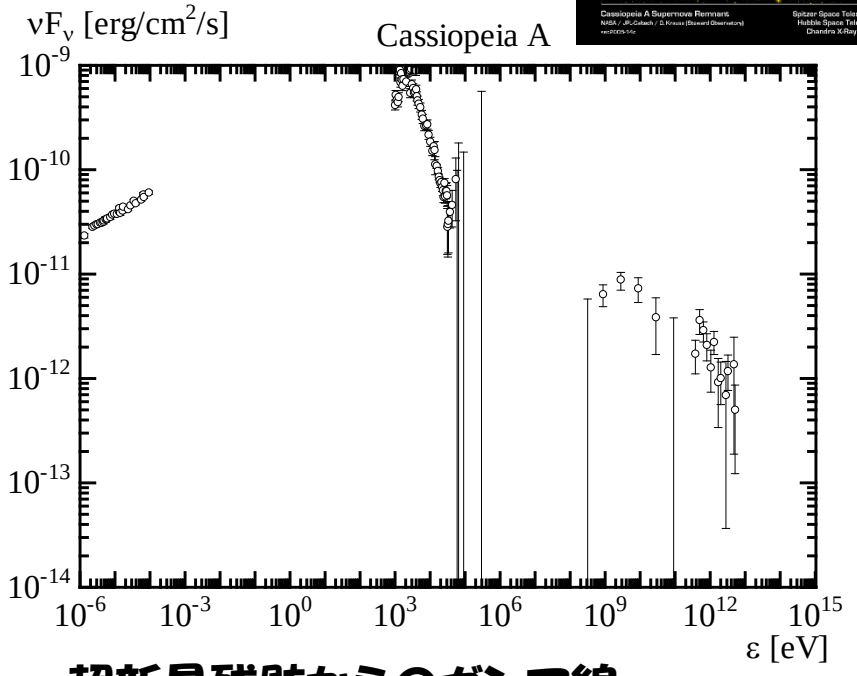


天体の放射スペクトル

ガンマ線バーストのスペクトル

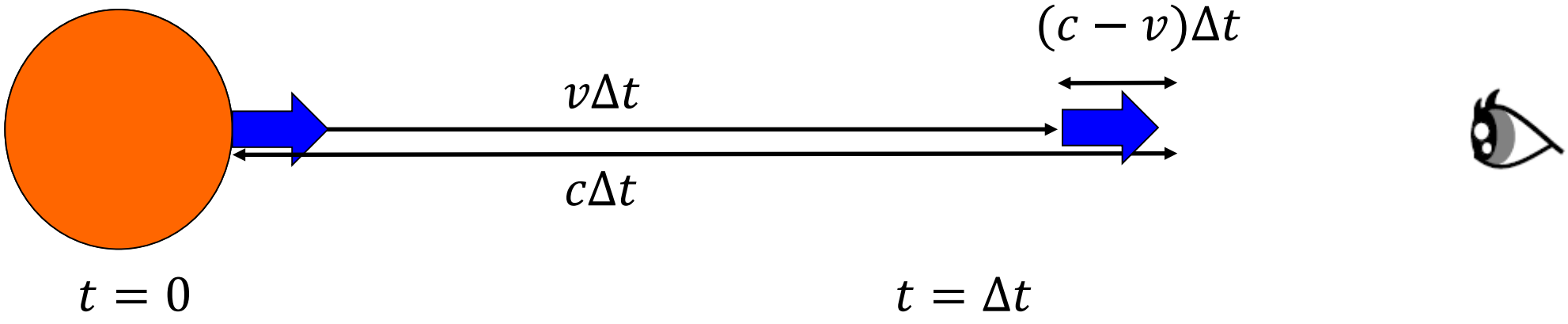


放射メカニズムは不明。
スペクトルのピークは何を反映しているのか？



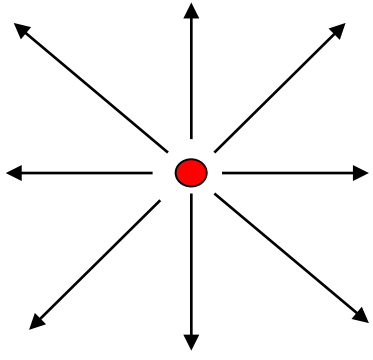
超新星残骸からのガンマ線
電子起源か陽子起源か論争が続いている。

観測量に対する相対論的効果



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

等方放射 立体角 4π



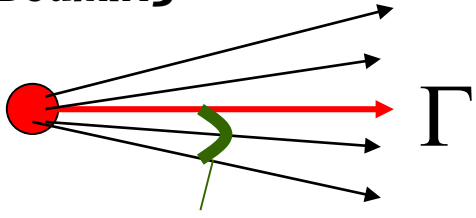
プラズマ静止系

角度のローレンツ変換

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

$$(\mu = \cos\theta)$$

Beaming

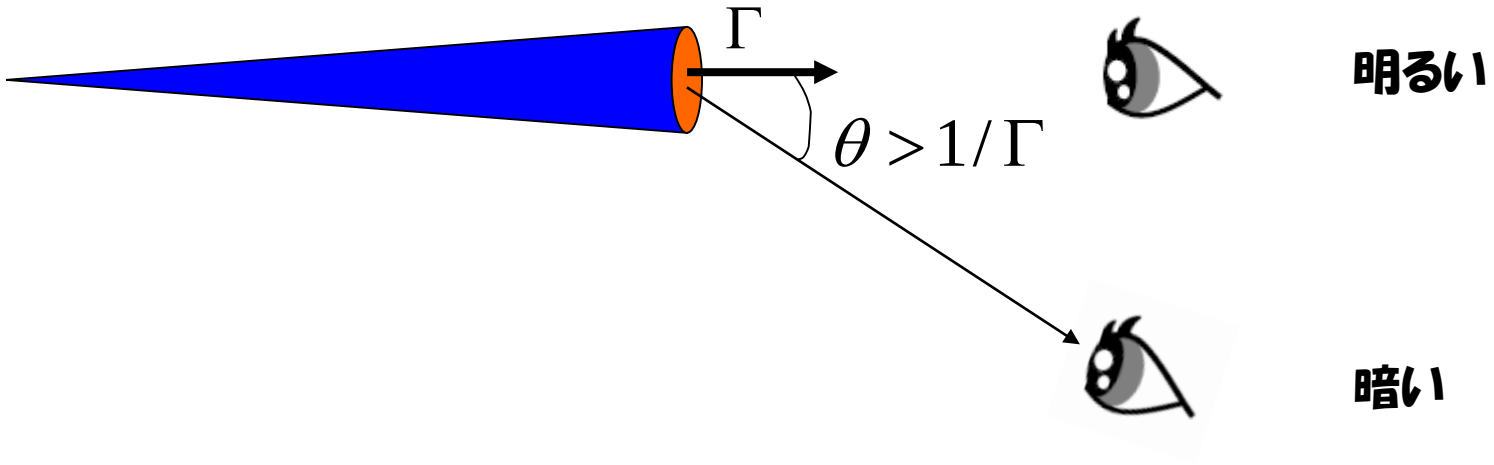


$1/\Gamma$

立体角 $d\Omega \approx 1/\Gamma^2$

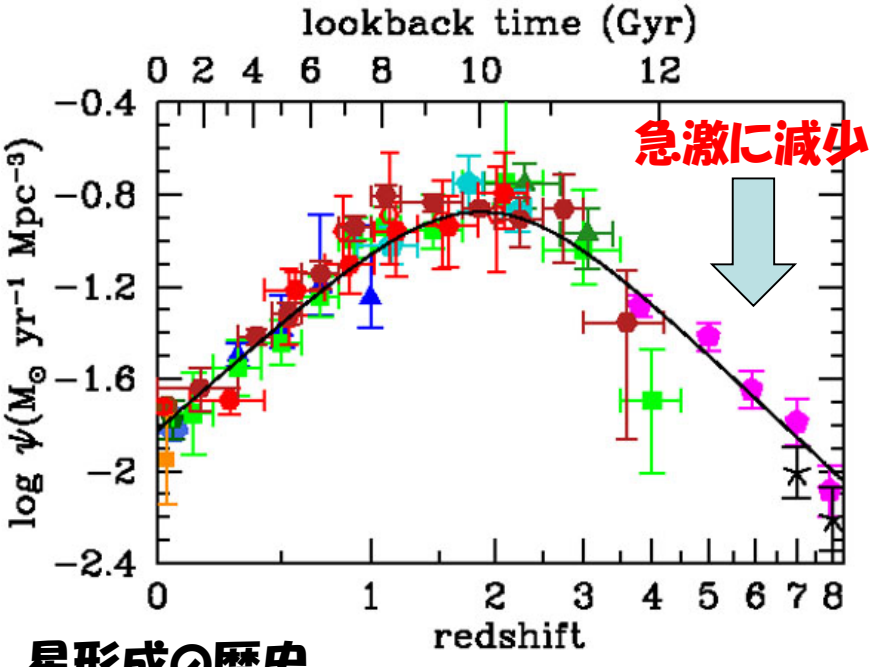
観測量に対する相対論的効果

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



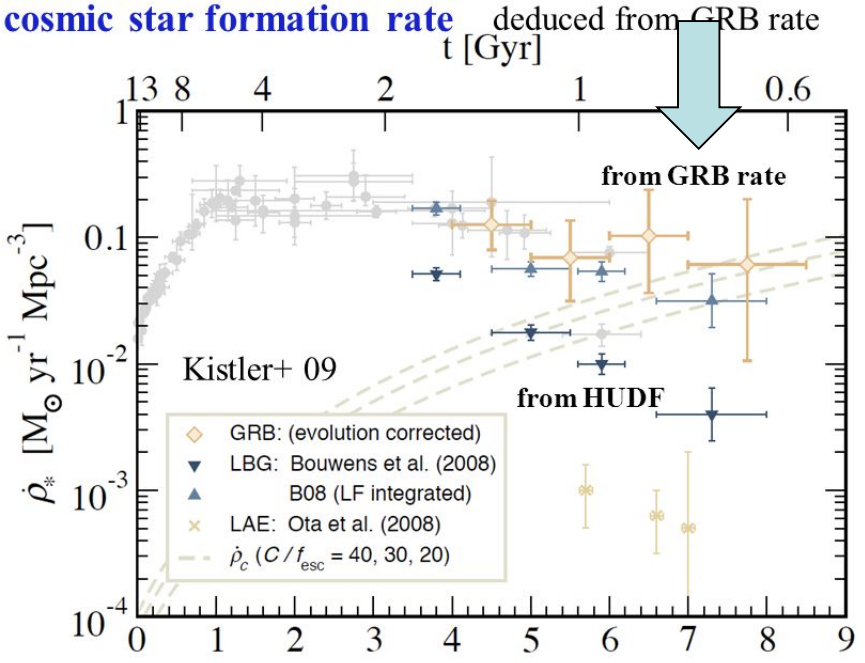
綜合的な知の連携

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

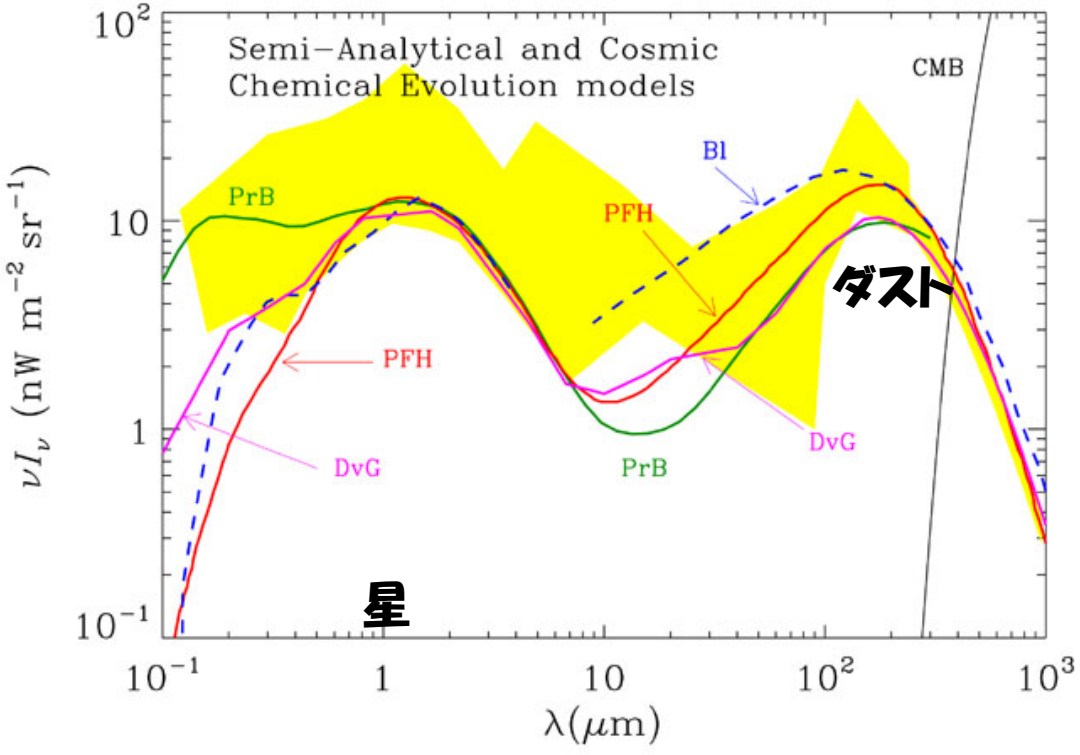


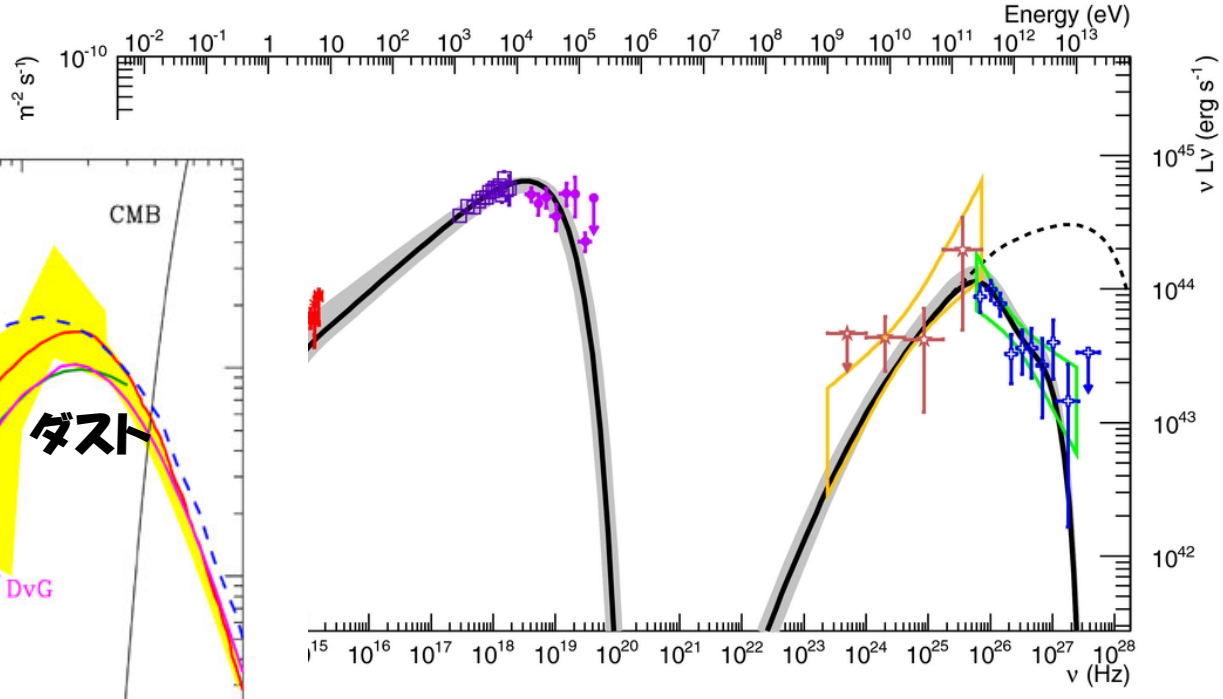
JANUS/GUNDAMでより high-z へ
直接観測と相補的

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）

綜合的な知の連携

天文学的知識は必須





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。

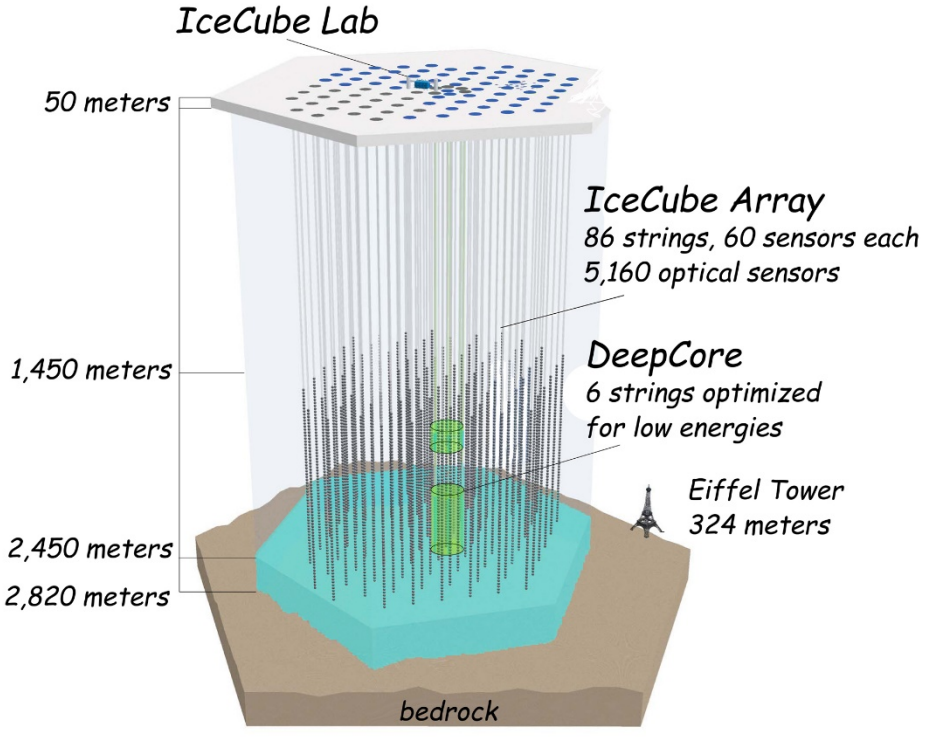
宇宙背景放射

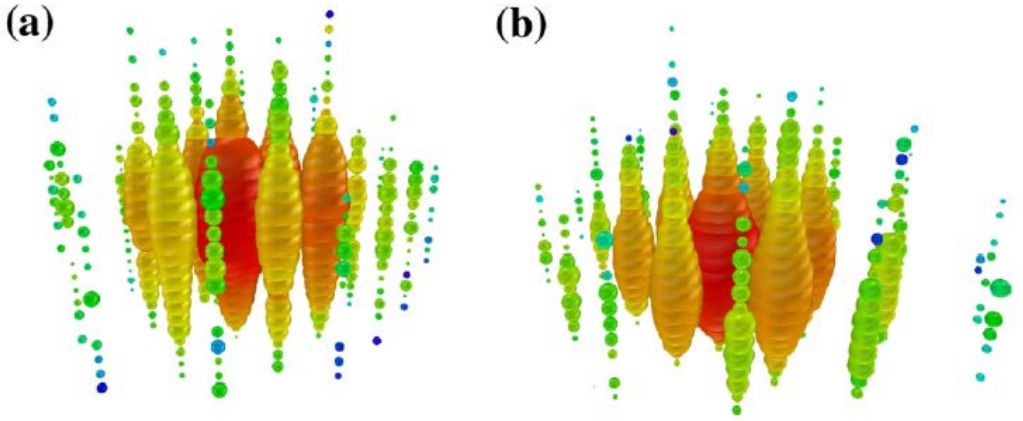
$$\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$$

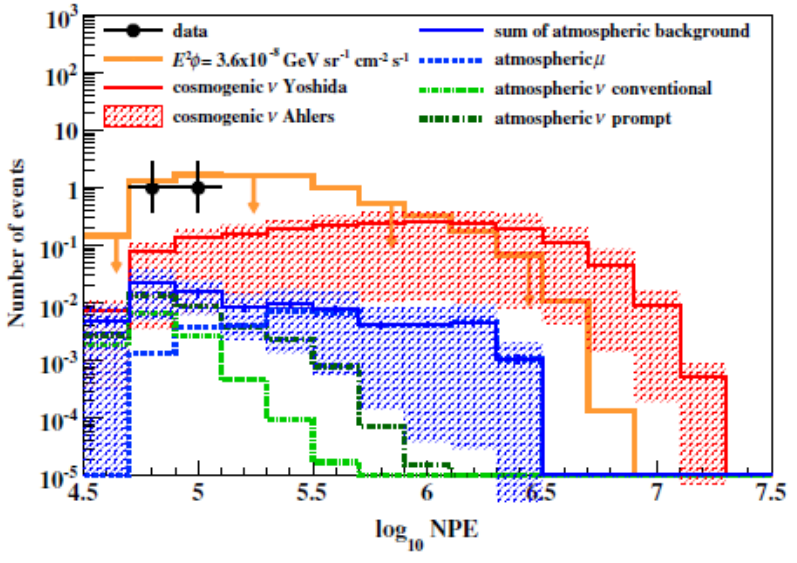
ここ5年くらいの観測的進展

2013

PeV＝10^{15}eVニュートリノの検出



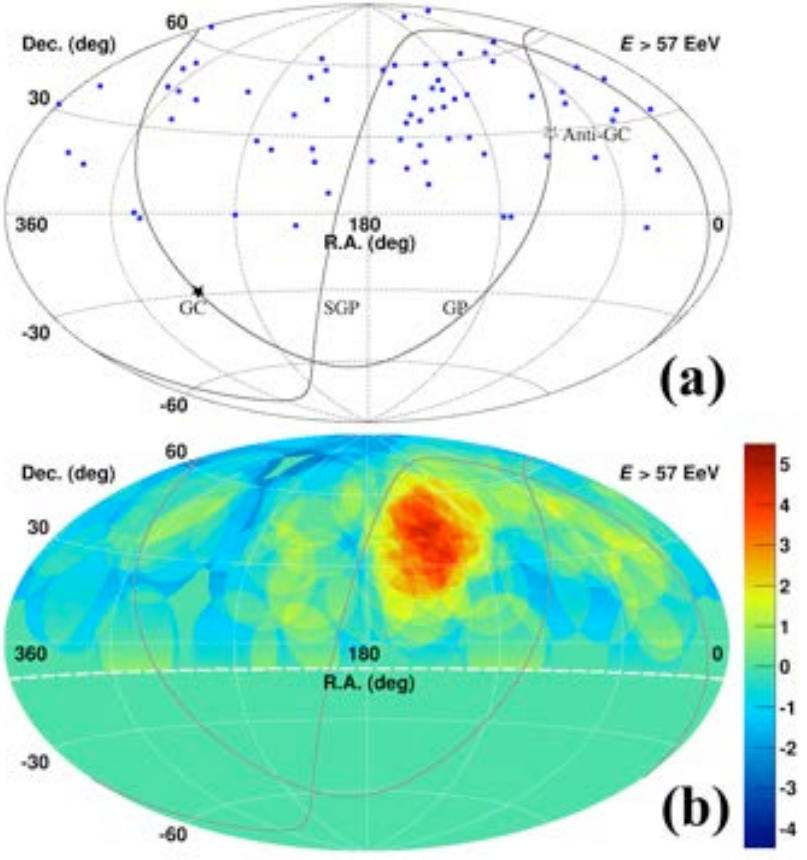




恐らく銀河系外起源。源は不明。
理論家の予想を上回るFlux！

ここ5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



宇宙線研究所TAグループ

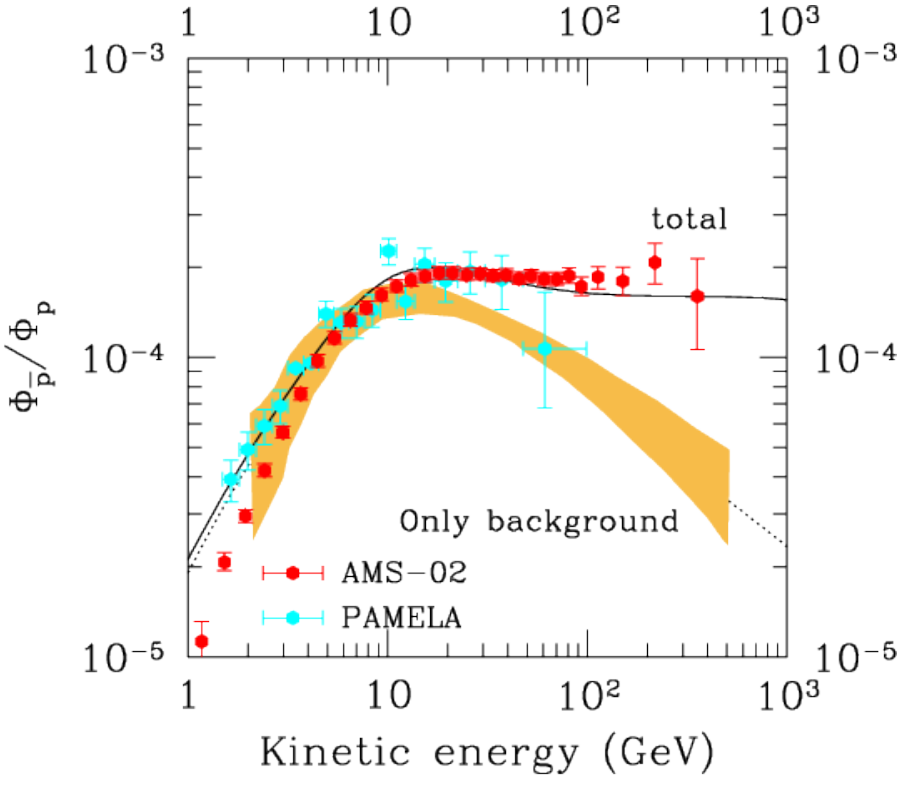
起源天体のヒント

活動銀河核ジェットではなさそう。

星形成銀河？（意外！）

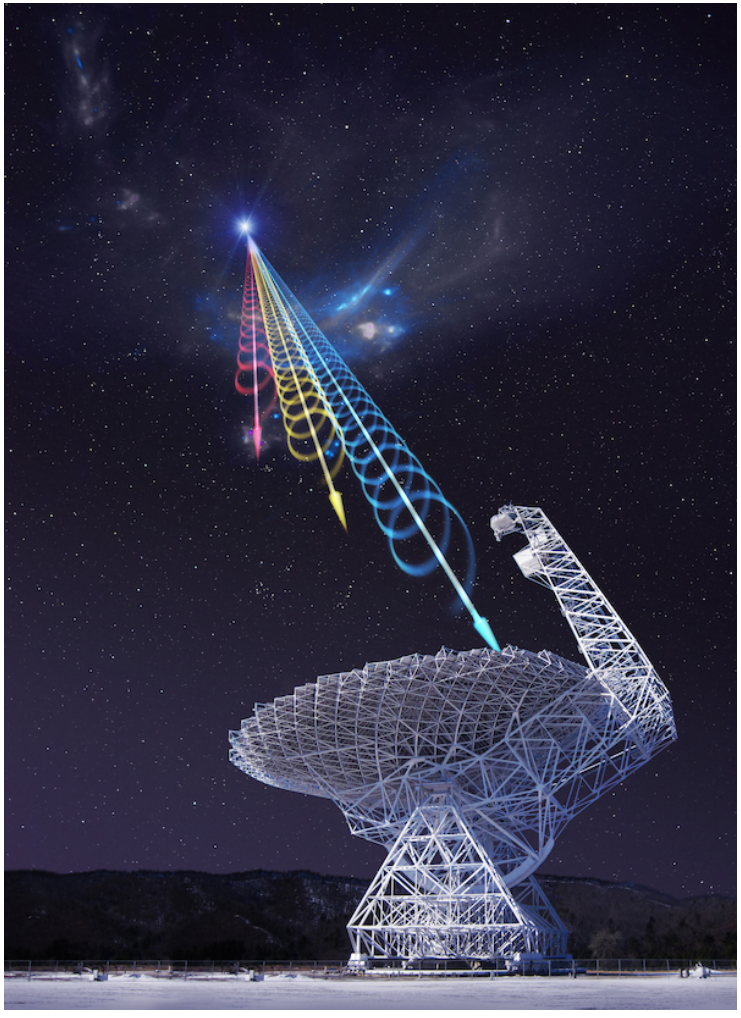
ここ5年くらいの観測的進展

2015 高エネルギーで
反陽子宇宙線の過剰

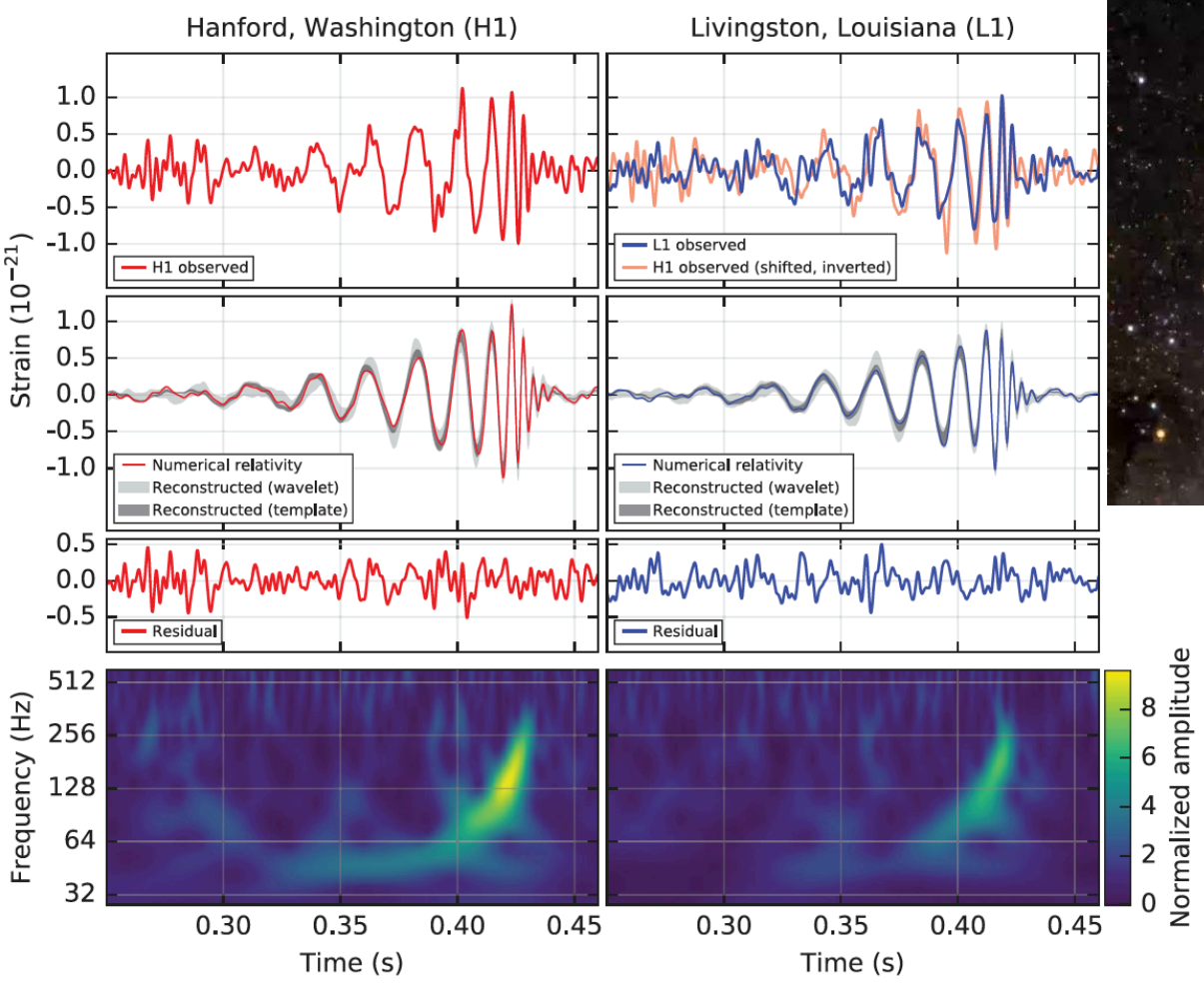


暗黒物質起源？

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5年くらいの観測的進展

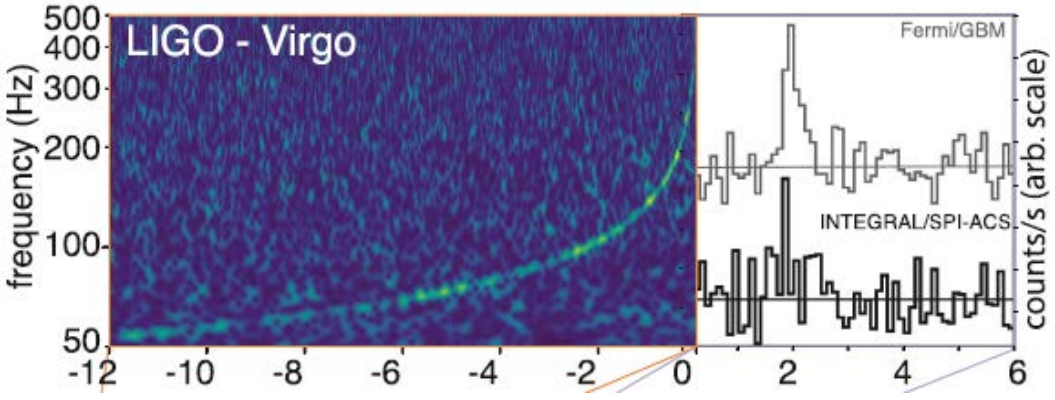


重力理論はOK。重いBHの親星は？
天文学的議論が盛り上がる。

2016
重力波の検出！
30Msun＋30MsunのBH+BH合体

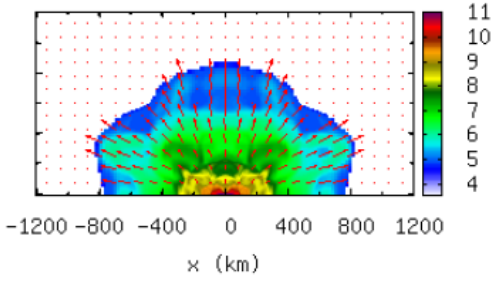
連星中性子星合体！

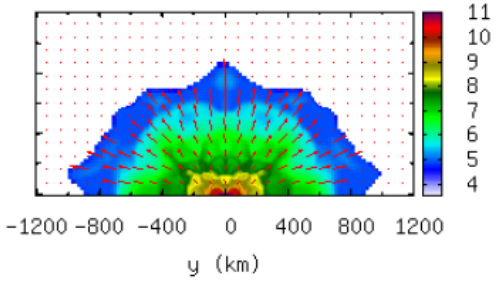
r-process



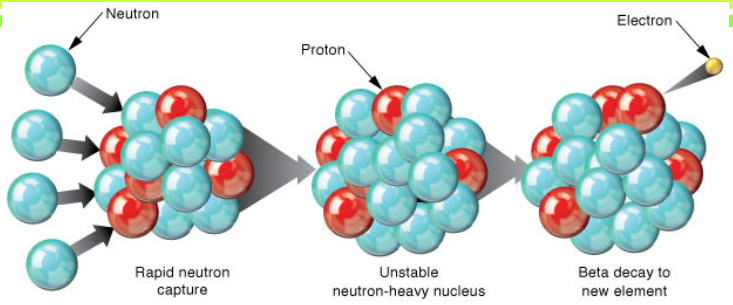
2017

NGC4993 @ 40Mpc

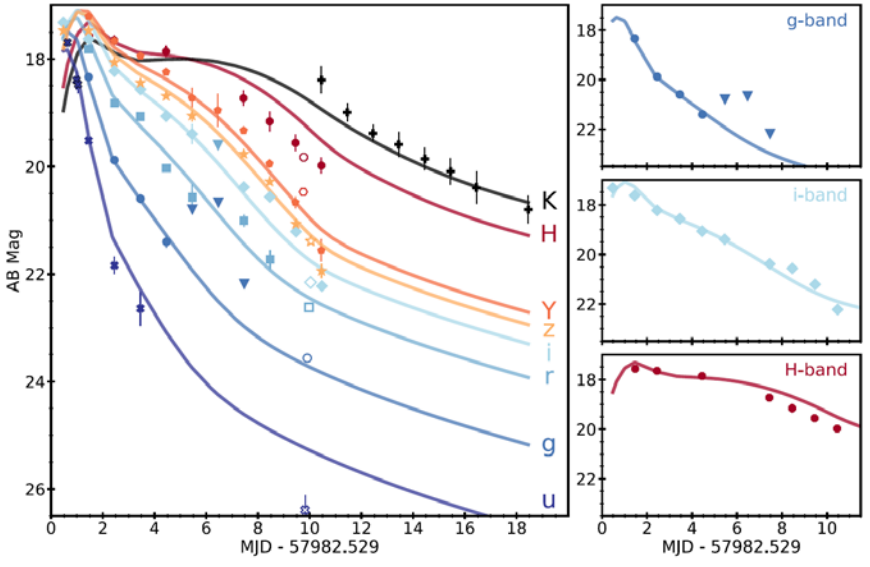




中性子が豊富な放出物
→重元素の核融合
→ 不安定核が崩壊
→ガスを加熱
→赤外線で光る



Optical Obs. of kilonova



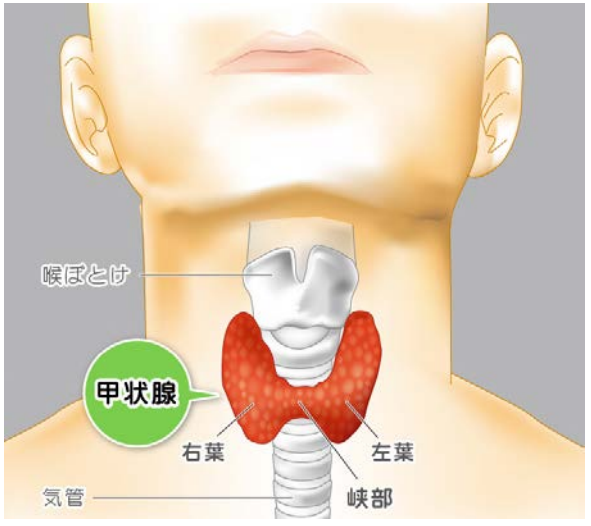
Ejecta

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

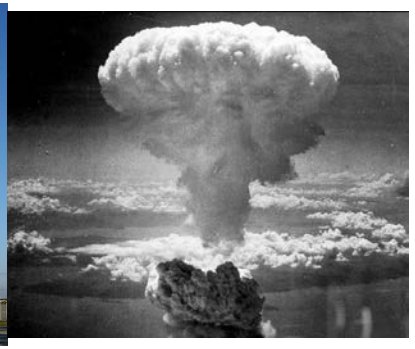
重元素の起源

金

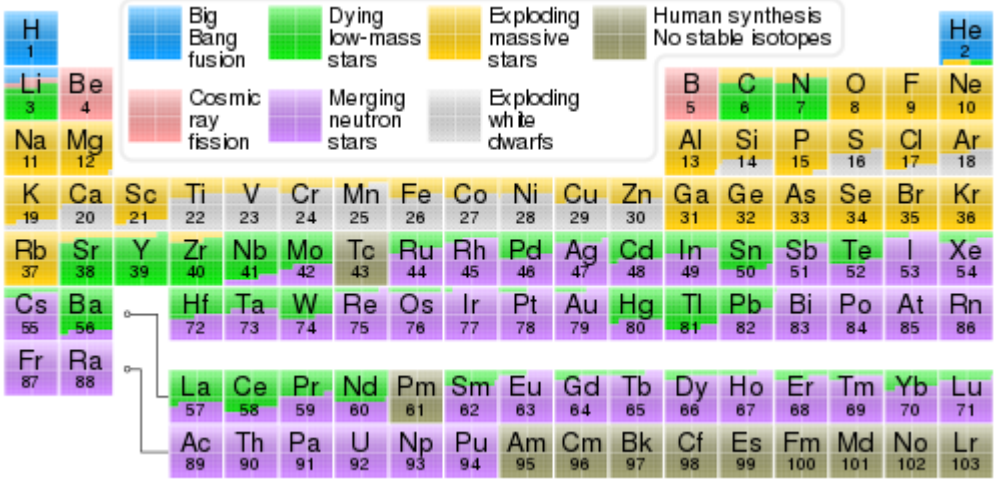
ヨウ素



ウラン

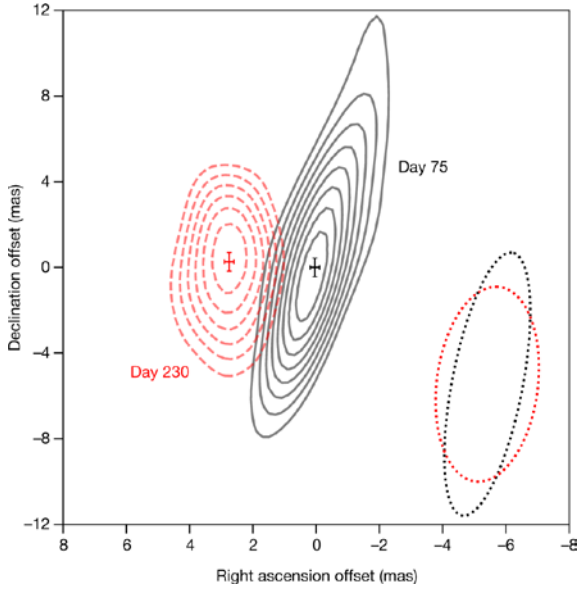


甲状腺ホルモン



ここ5年くらいの観測的進展

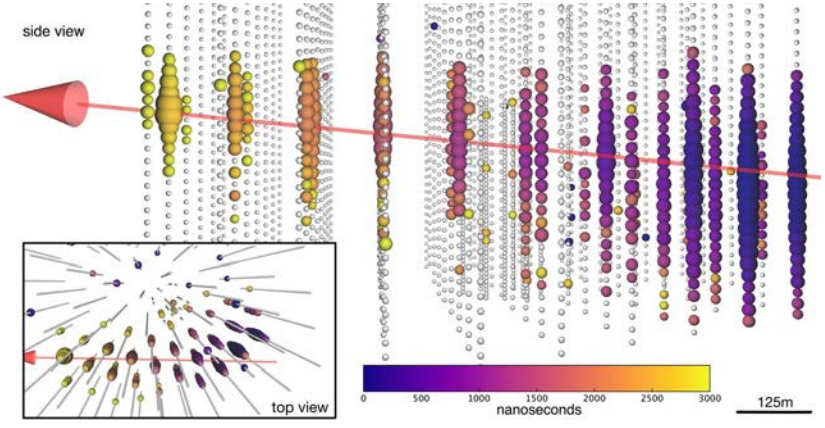
2018

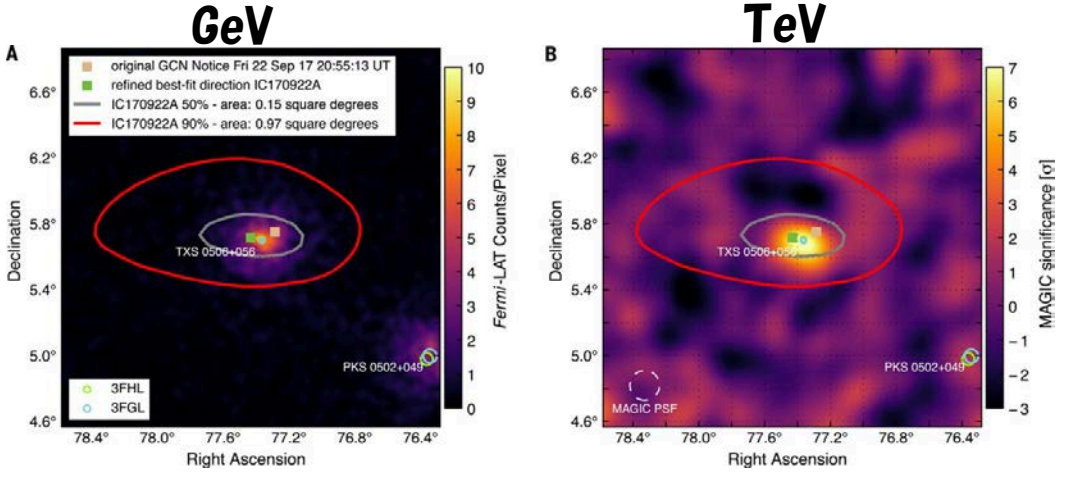


GW170817からの電波源の
超光速運動が確認。

相対論的なジェットが出ていた証拠かも。

高エネルギーニュートリノの到来方向にブレーザーを発見





ただし光子スペクトルと整合的なモデルができていない。

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）