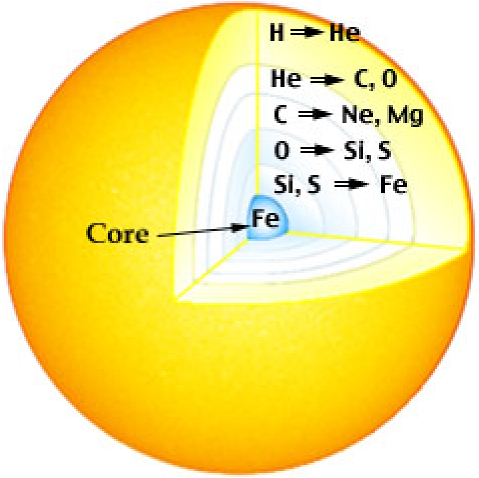
高エネルギー天体物理

浅野勝晃
（高エネルギー天体グループ）

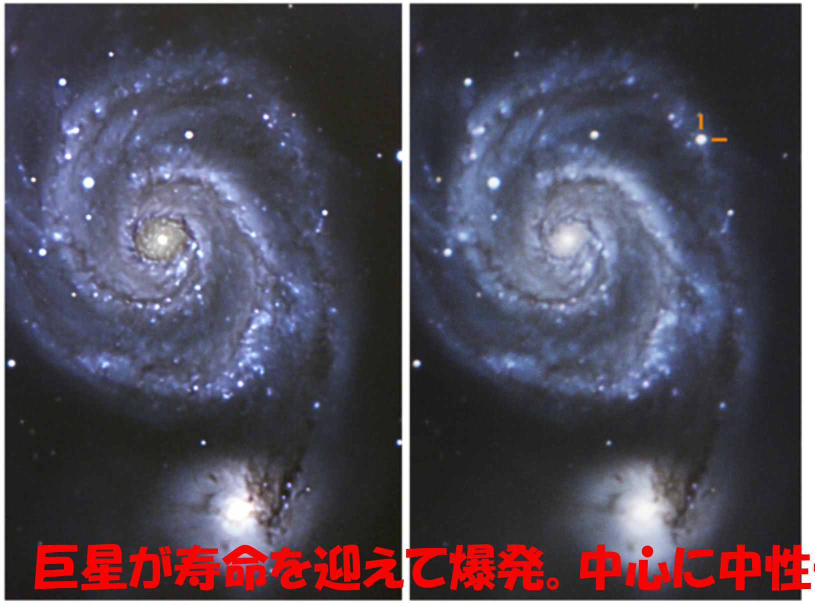
宇宙科学の趨勢

高エネルギー宇宙物理

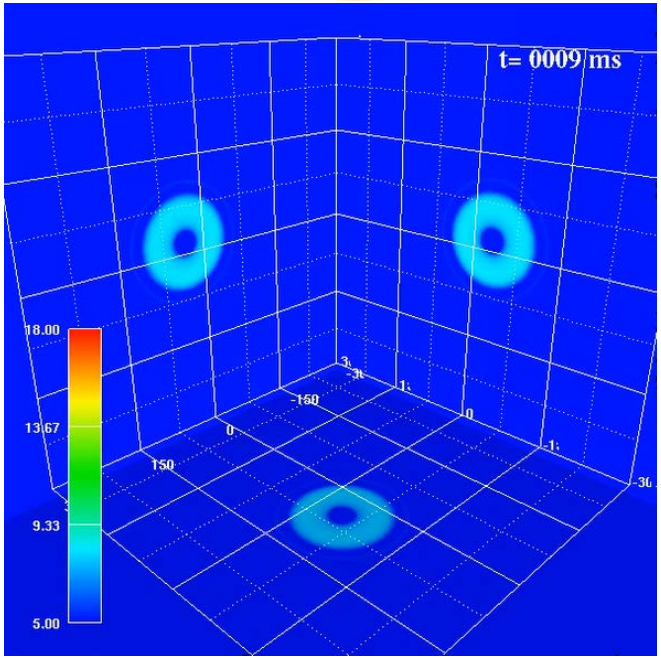
- 最もダイナミックに発展している分野
- 宇宙線研における主要な観測対象
- 多くの謎が残されている



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！

超新星残骸と宇宙線生成

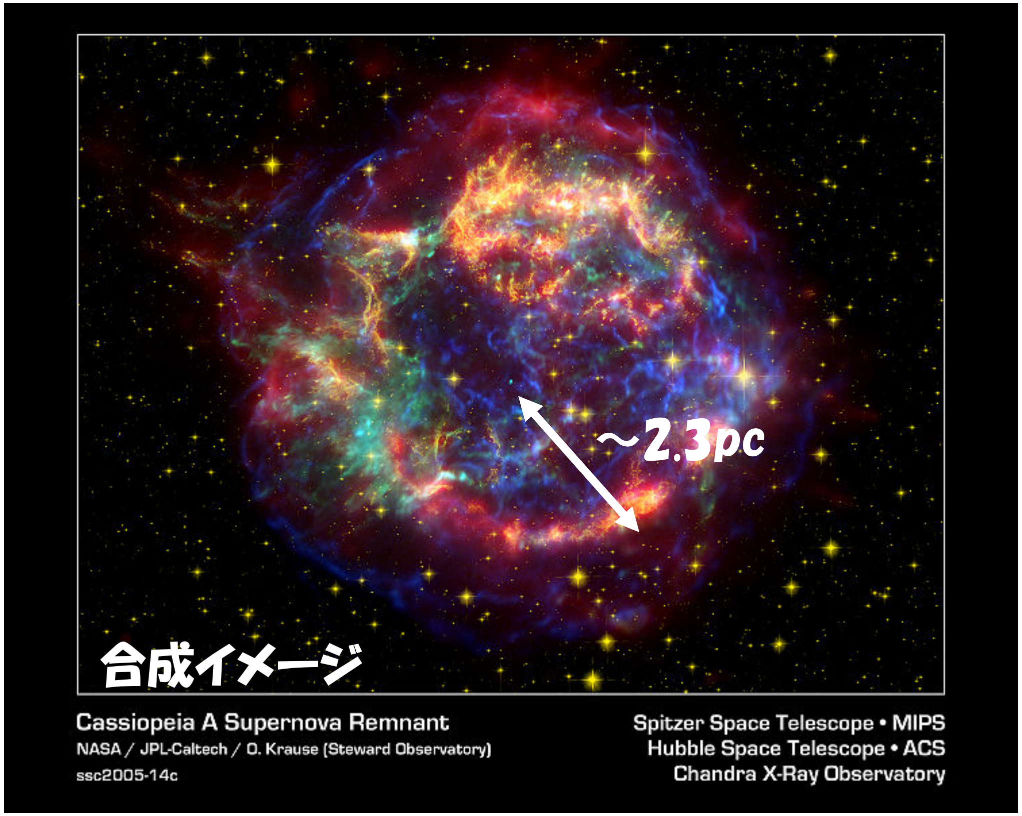
爆発による衝撃波が星間空間を伝播

↓

衝撃波による粒子加速
高エネルギー粒子の生成

$$\varepsilon >> m_{\mathrm{e}}c^2, m_{\mathrm{p}}c^2$$

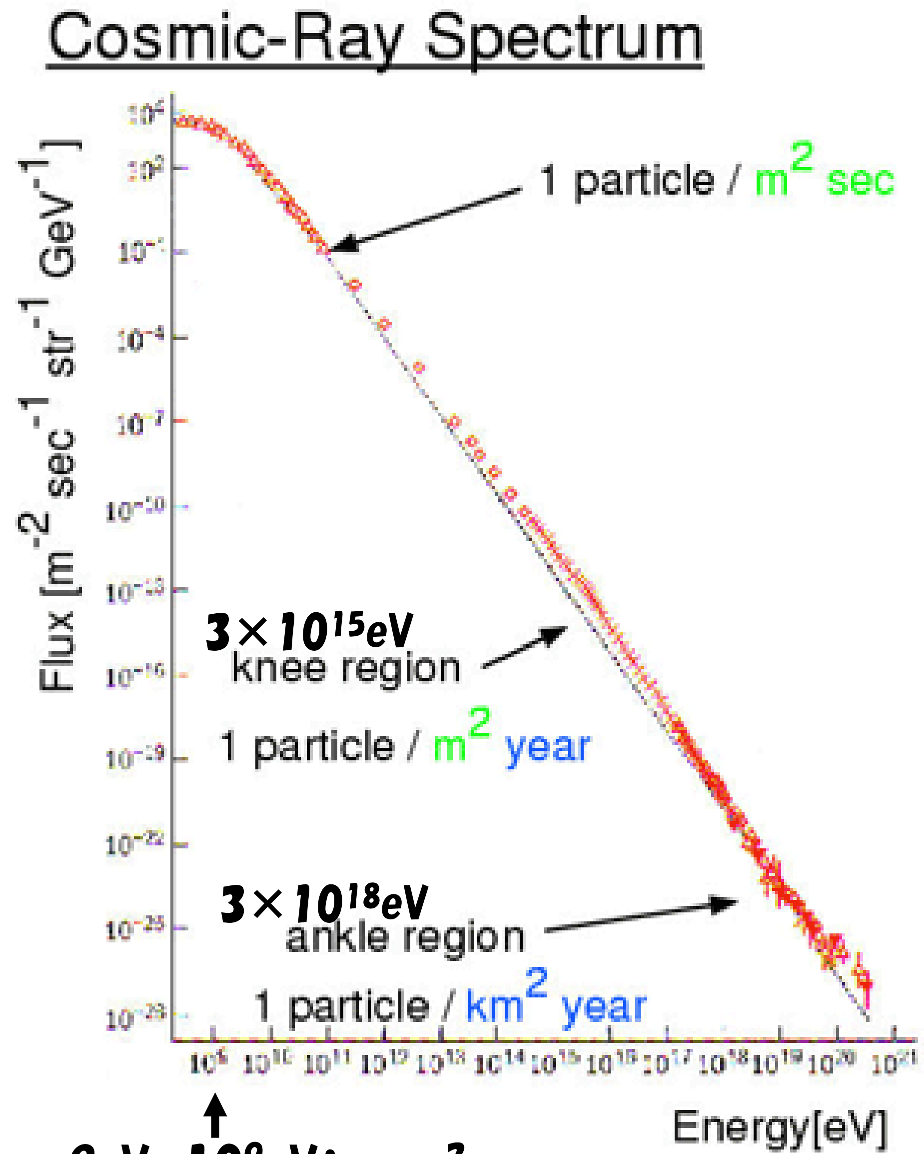
1667年頃に爆発したCassiopeia A



距離：3.4Kpc
膨張速度：4000−5000km/s

中心には中性子星が残される

超新星残骸と宇宙線生成



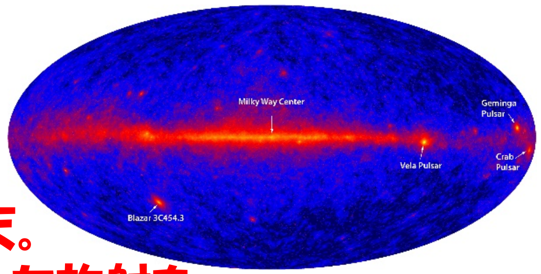
GeV = 10^9eV ≒ $m_p c^2$

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。

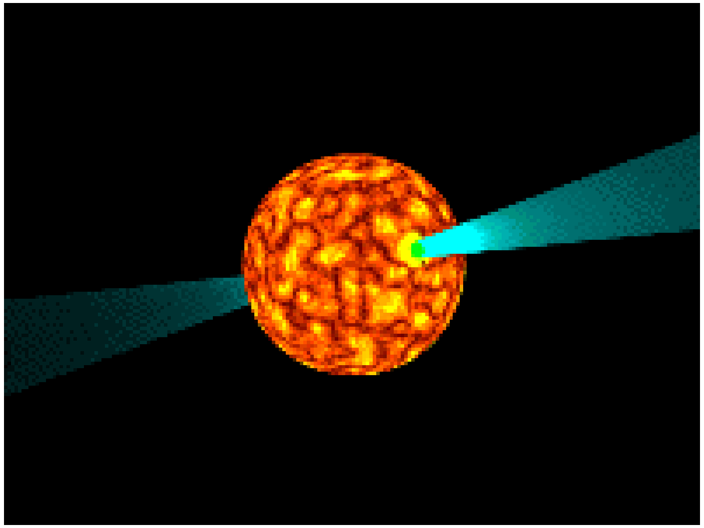
最高エネルギー宇宙線
加速天体は？



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(～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。

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

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。

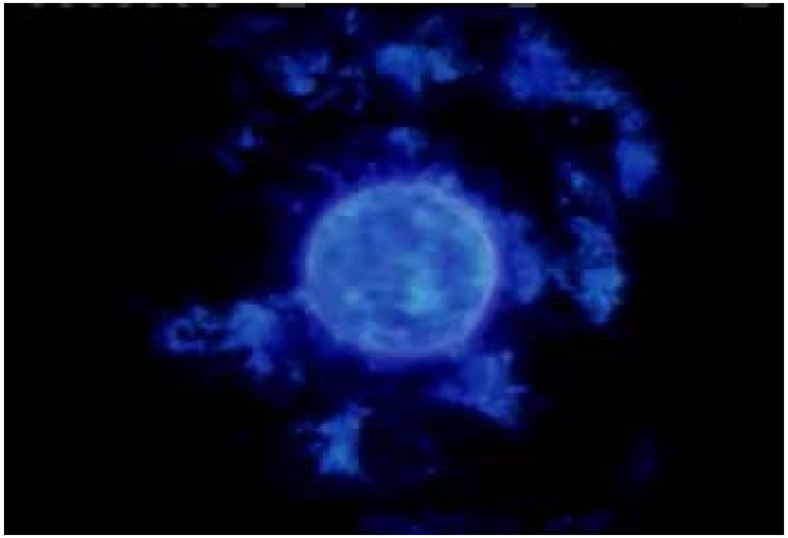
パルサー星雲

電子・陽電子プラズマがローレンツ因子Γ=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

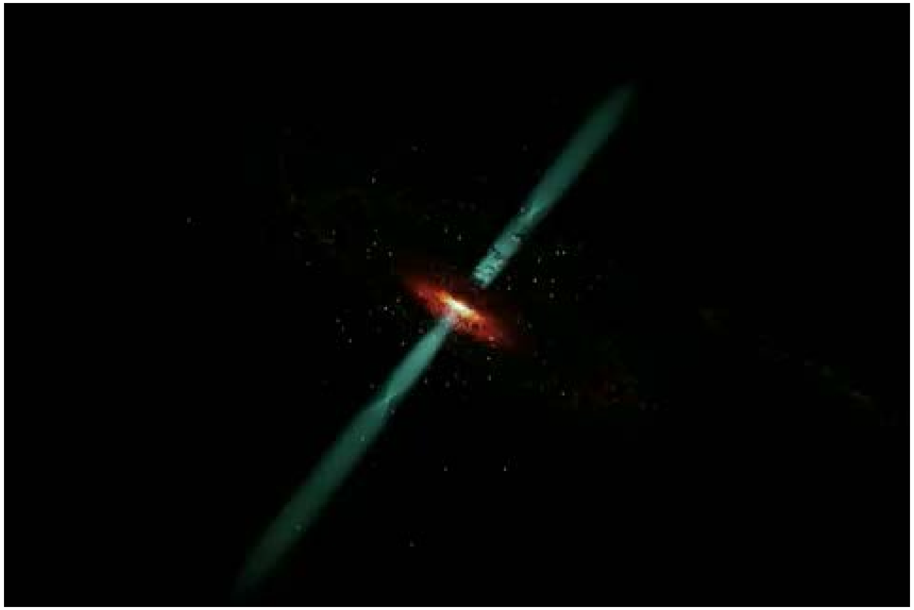


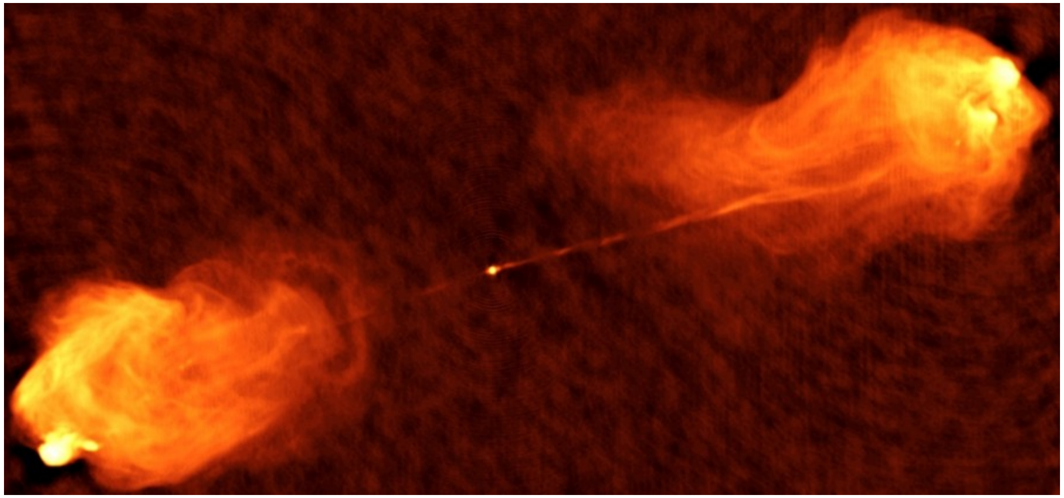
宇宙最大の爆発現象

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。

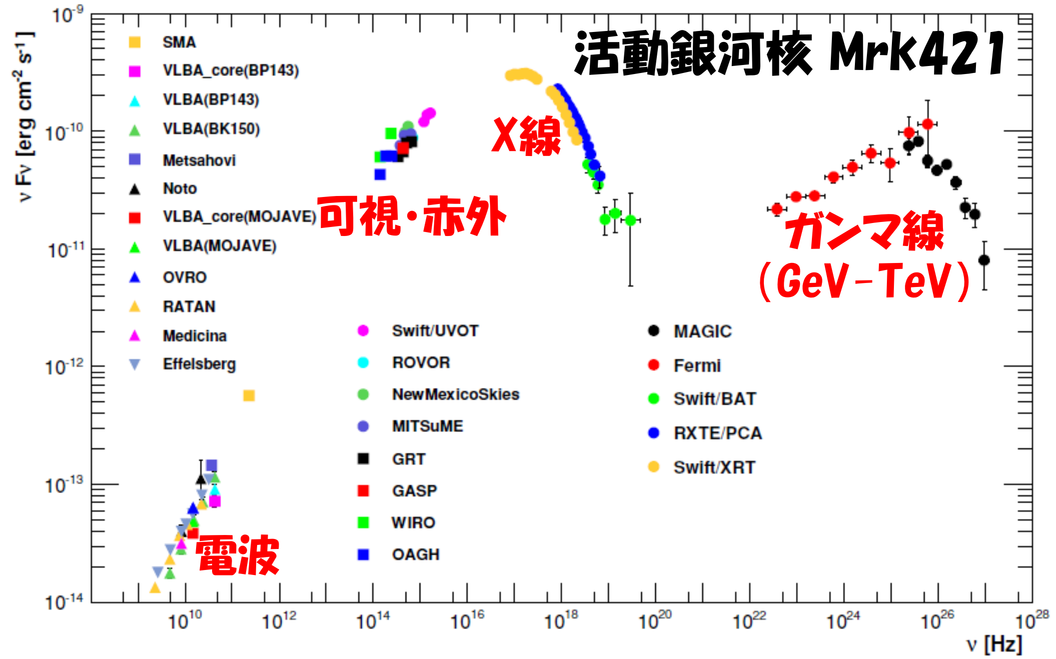
活動銀河核ジェット



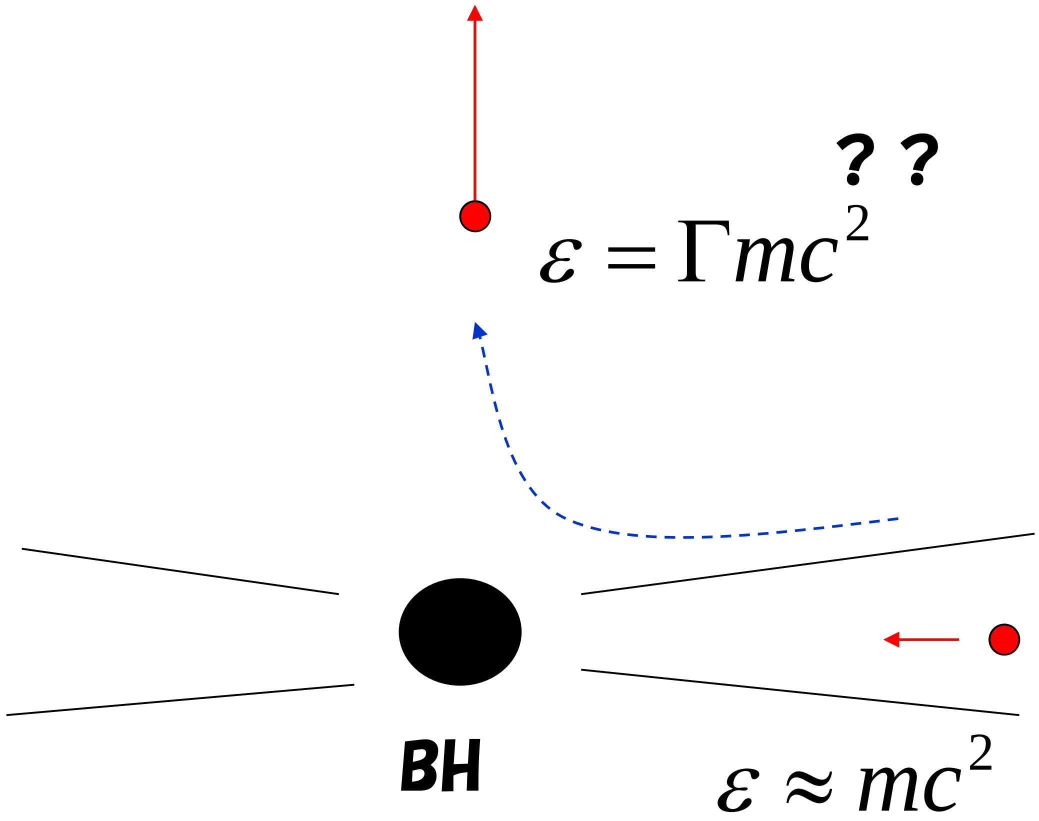


高エネルギー天体物理の目標

- 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



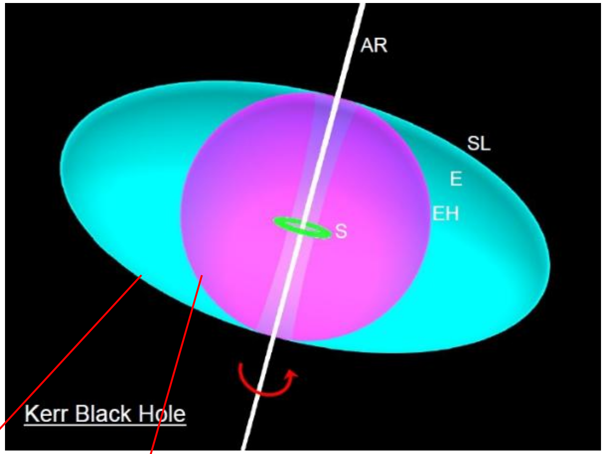
ジェットの加速



エネルギー源は…

降着円盤の重力エネルギー
1粒子あたり～GM/r_g

あるいはBHの回転エネルギー
（磁場を介して引抜き可）



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

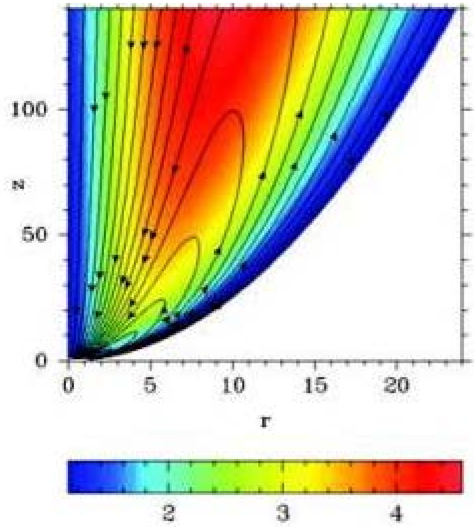
$=0$ $\quad$ $=\infty$

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

- 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

磁場によるジェット駆動

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

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

しかし、活動銀河核ジェットからの放射を基に、磁場の値を見積もると、磁場のエネルギーはジェットのエネルギー全体のほんの一部であることがわかっている。

輻射によるジェット駆動

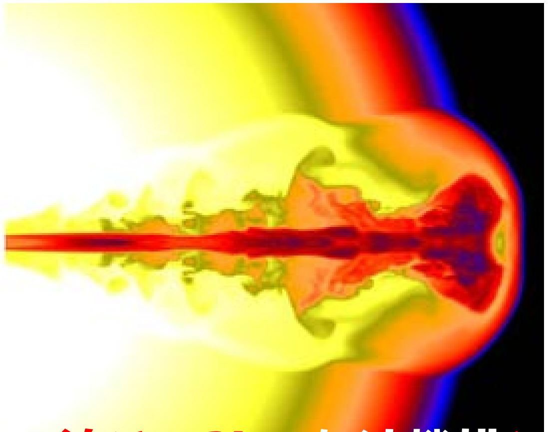
ガス密度が濃ければ、輻射はトムソン散乱を通じて、ガスと一体化する。輻射優勢一流体
＝火の玉

輻射のエネルギー密度が支配的なら、

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

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

確実に加速する。
⇒ 火の玉モデル

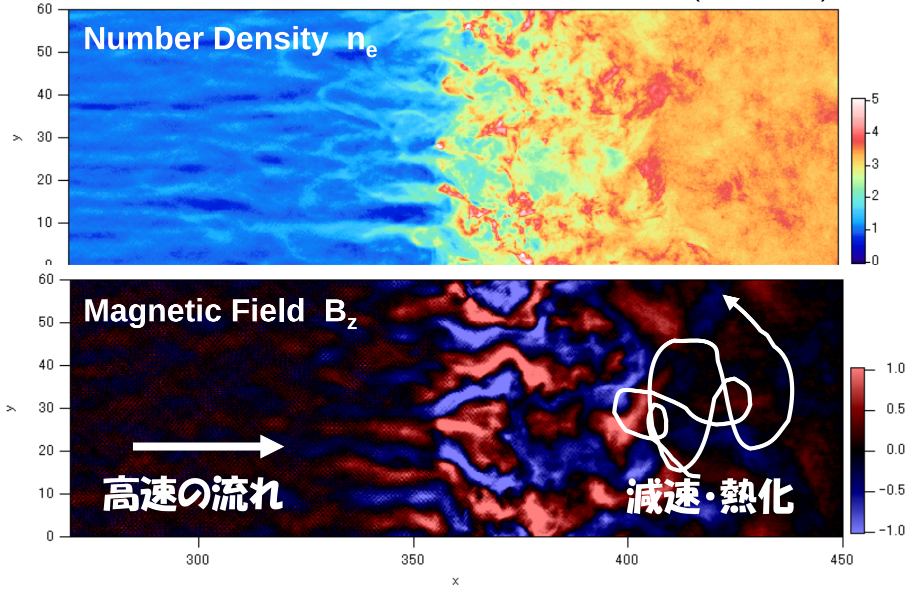


ガンマ線バーストの加速機構として有望

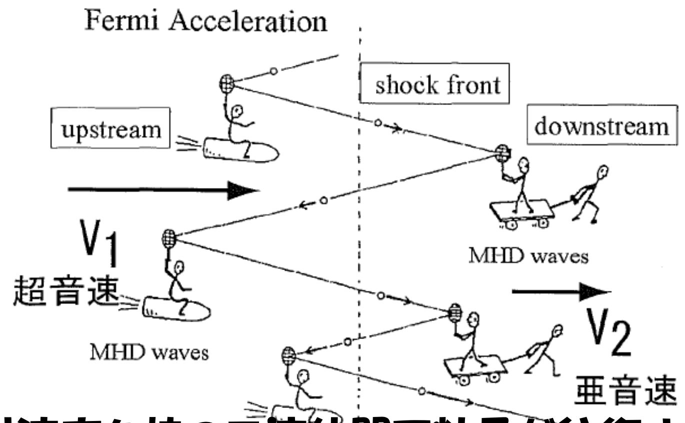
活動銀河核ジェットでは、密度が薄すぎ、火の玉を形成するのは困難。

衝撃波による粒子加速

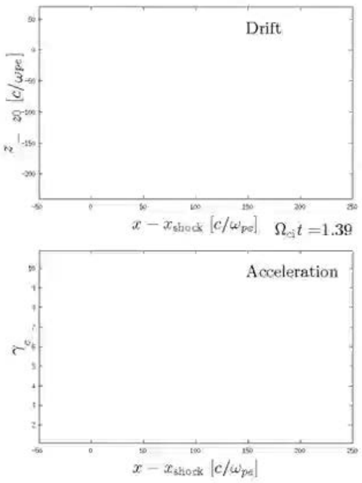
(Kato 2007)

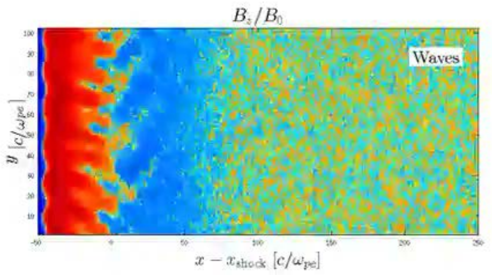


衝撃波面



シミュレーション





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

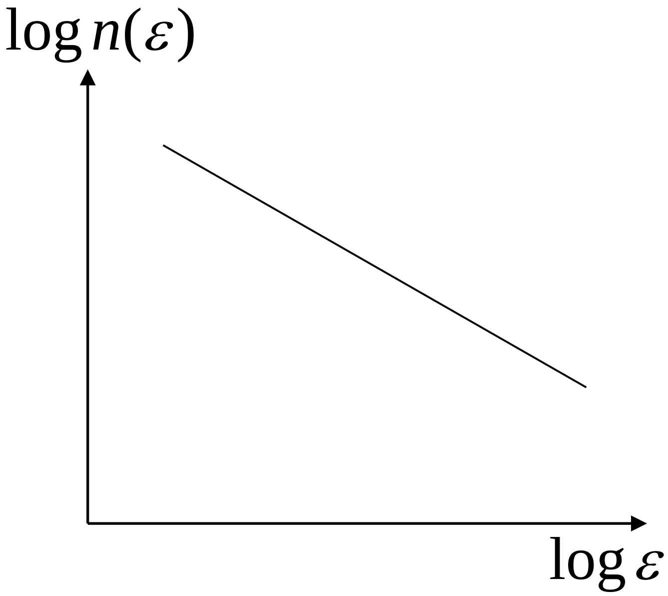
$$\varepsilon \approx \varepsilon_0 \exp\left(n\frac{4}{3}\frac{v_{\mathrm{rel}}}{c}\right)$$

もう一度往復する確率 $1-4\frac{v_{\mathrm{d}}}{c}$

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

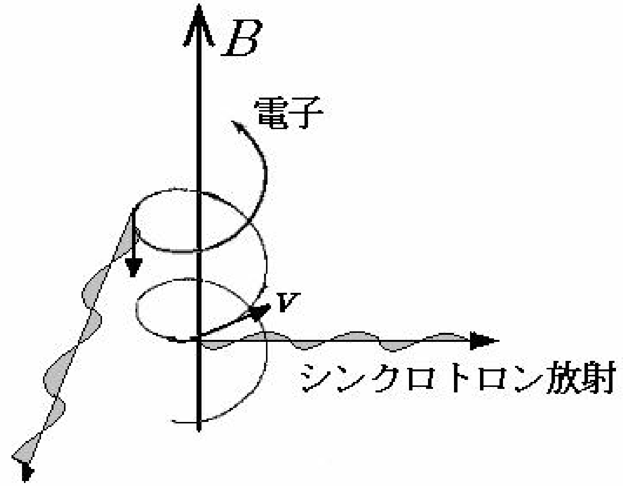
加速される粒子の割合（数・エネルギー）を
決める物理も不明。
（長時間の大規模simulationが必要）
電子と陽子の比は～1：100

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



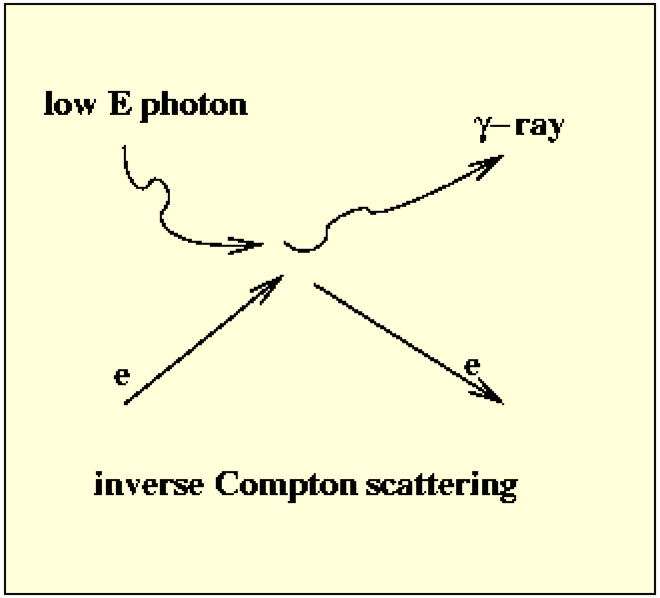
シンクロトロン放射。νは電子の速度ベクトルを表す。シンクロトロン放射は、磁力線に垂直に直線偏波しており、磁場に垂直な速度成分$\nu_\perp$方向のごく狭い領域にのみ放射される。

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

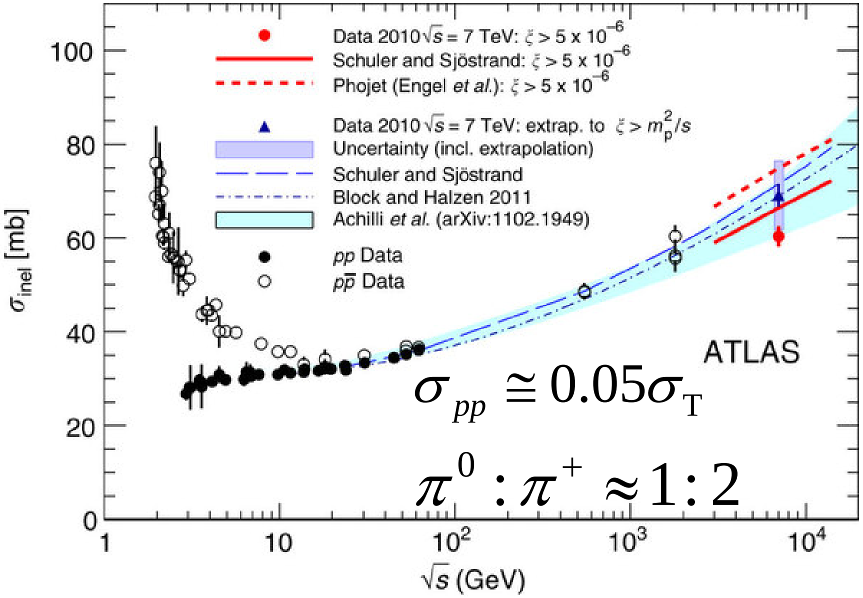
陽子起源放射

陽子-陽子衝突

$$p+p \to p+p+\pi^0$$

$$\to p+n+\pi^+$$

(m_π = 135MeV)



$$\sigma_{pp} \cong 0.05\sigma_T$$

$$\pi^0 : \pi^+ \approx 1:2$$

ガンマ線放射 $\pi^0 \to \gamma+\gamma$

ニュートリノ放射 $\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$

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

他にも

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

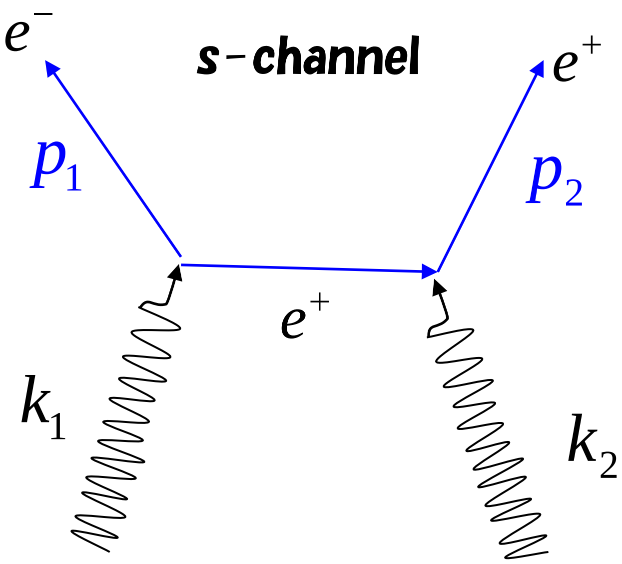
$$\to n+\pi^+$$

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。

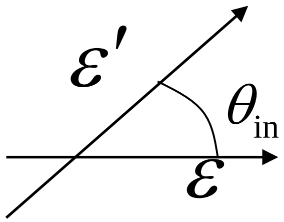
電子・陽電子対生成

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



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

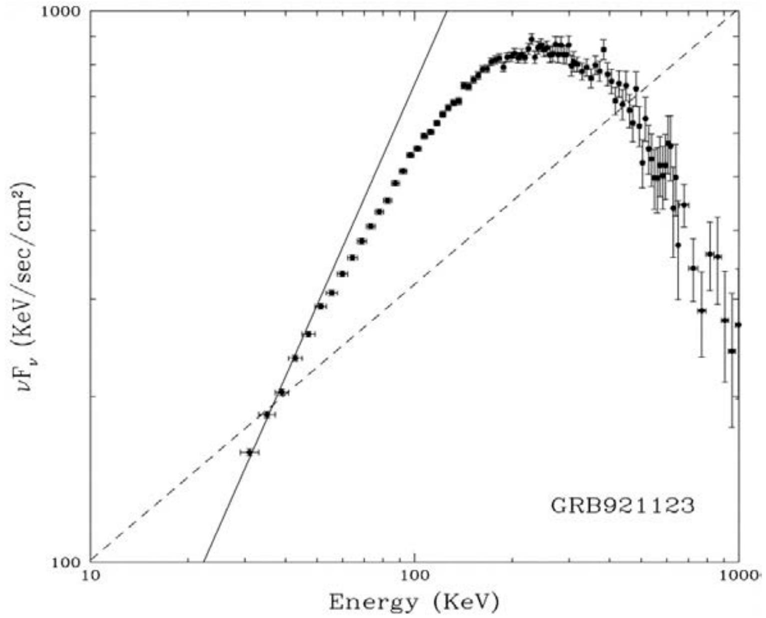
$$y^2 \equiv 1 - \frac{2m_{\mathrm{e}}^2c^4}{\varepsilon\acute{\varepsilon}(1-\cos\theta_{\mathrm{in}})} < 1$$



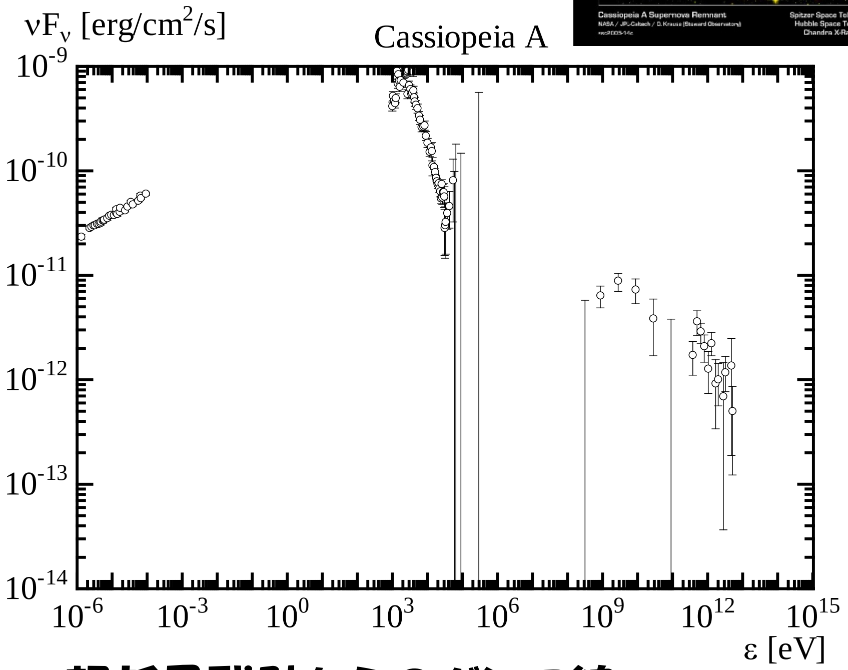
$\varepsilon\varepsilon'(1-\cos\theta_{\mathrm{in}}) > 2m_{\mathrm{e}}^2c^4$ の時だけ起こる反応。

天体の放射スペクトル

ガンマ線バーストのスペクトル



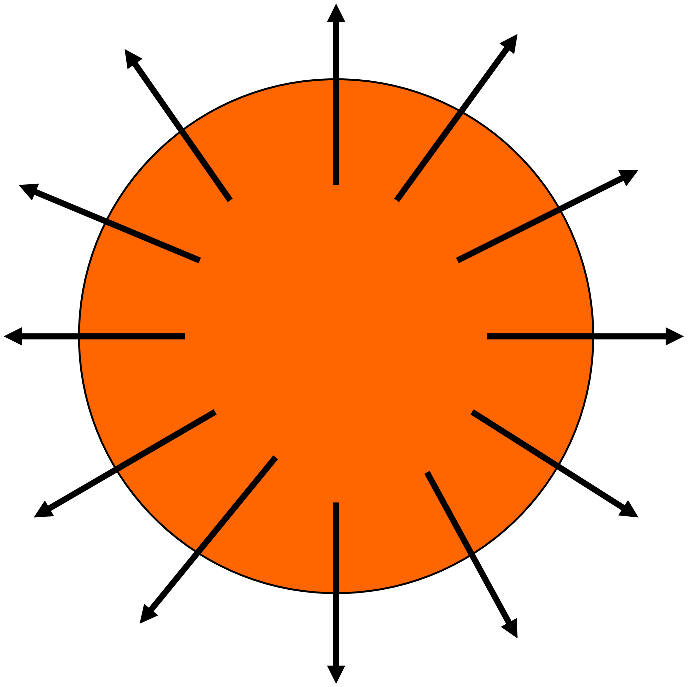
放射メカニズムは不明。
スペクトルのピークは何を反映しているのか？



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

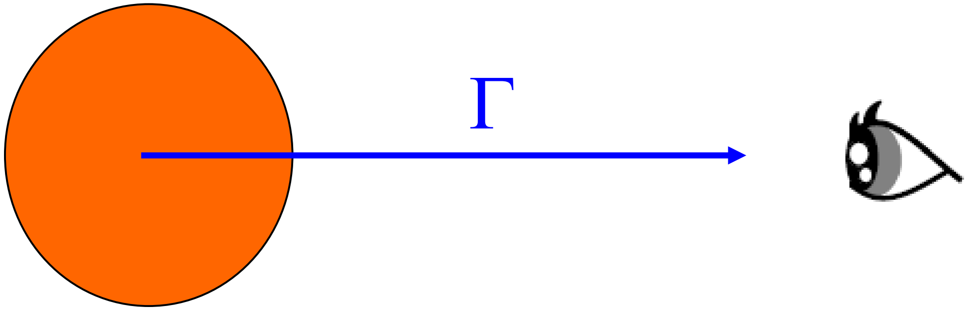
プラズマ静止系



$\Delta t'$ の時間、エネルギー E' の放射を放つ。

光度 $L' = \dfrac{E'}{\Delta t'}$

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

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

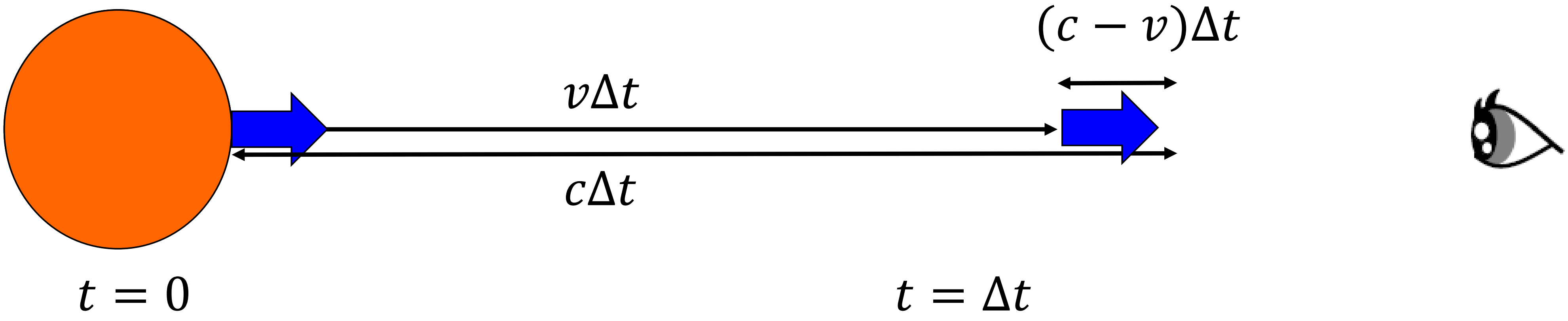
を平均すると、

$$E = \Gamma E'$$

観測者にとっては、

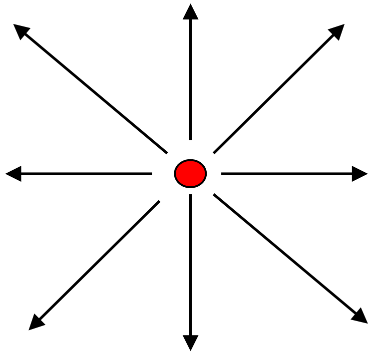
$$\Delta t_{\rm obs} = \Delta t,\ L_{\rm obs} = \frac{E}{\Delta t} = \frac{E'}{\Delta t'}\quad ?$$

観測量に対する相対論的効果



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

等方放射 立体角 4π



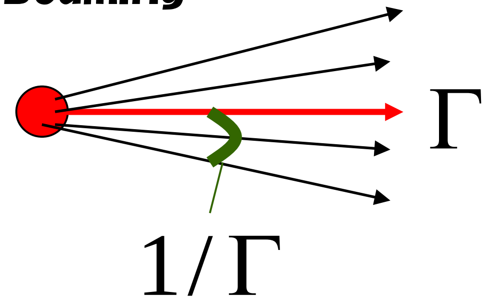
プラズマ静止系

角度のローレンツ変換

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

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

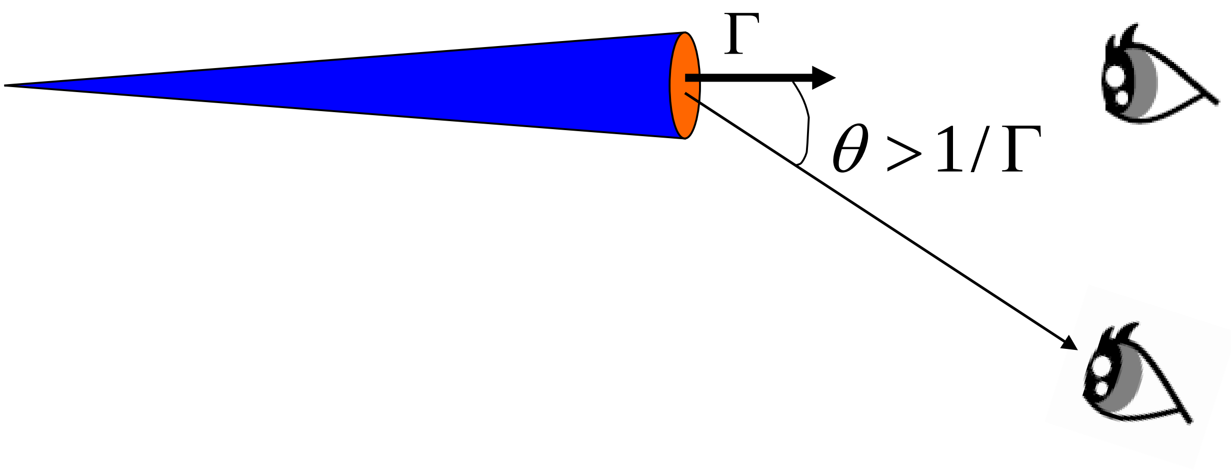
Beaming



立体角 $d\Omega \approx 1/\Gamma^2$

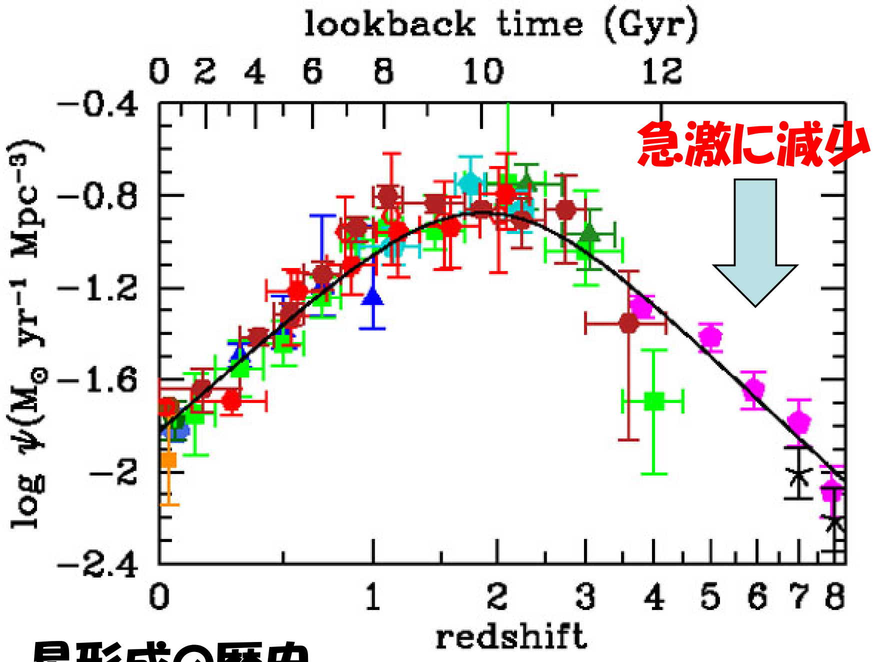
観測量に対する相対論的効果

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



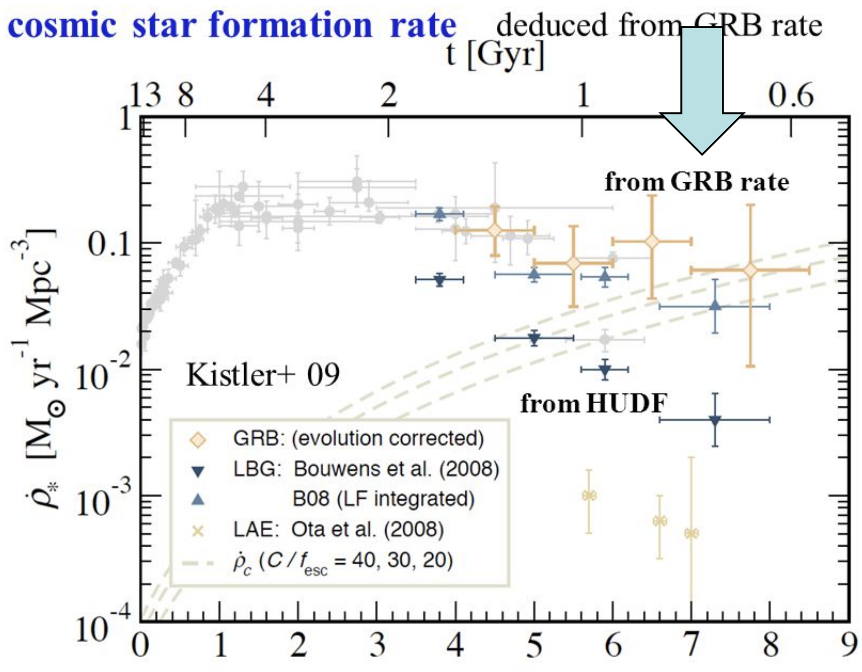
綜合的な知の連携

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



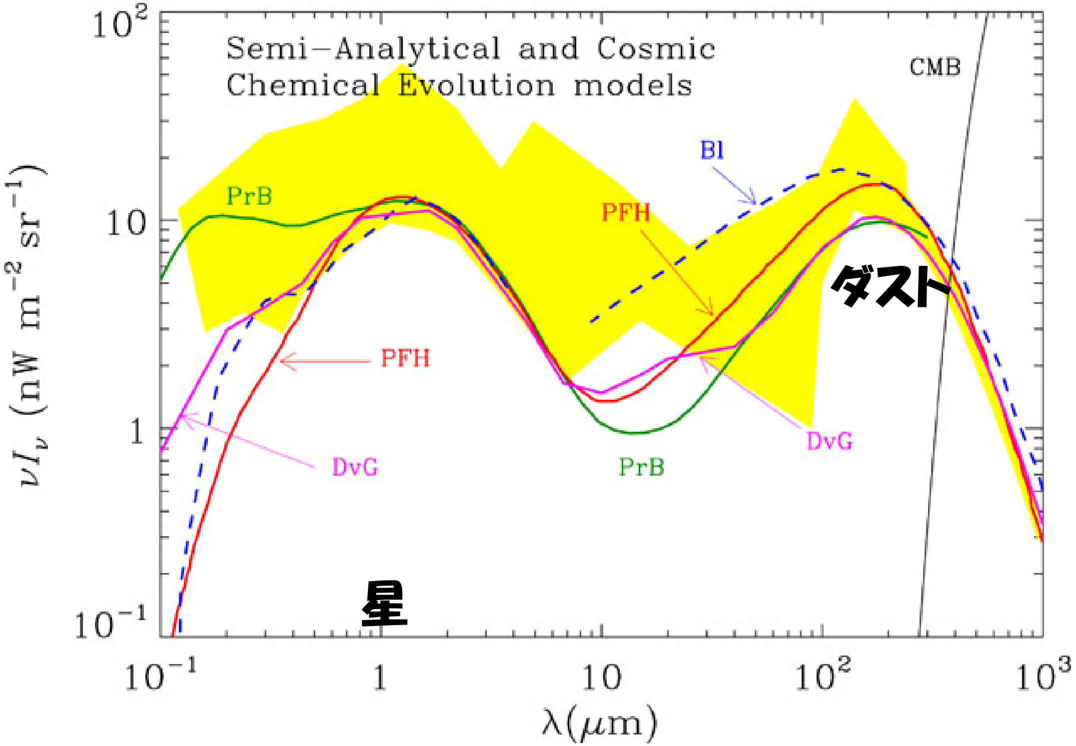
JANUS/GUNDAMでよりhigh-Zへ
直接観測と相補的

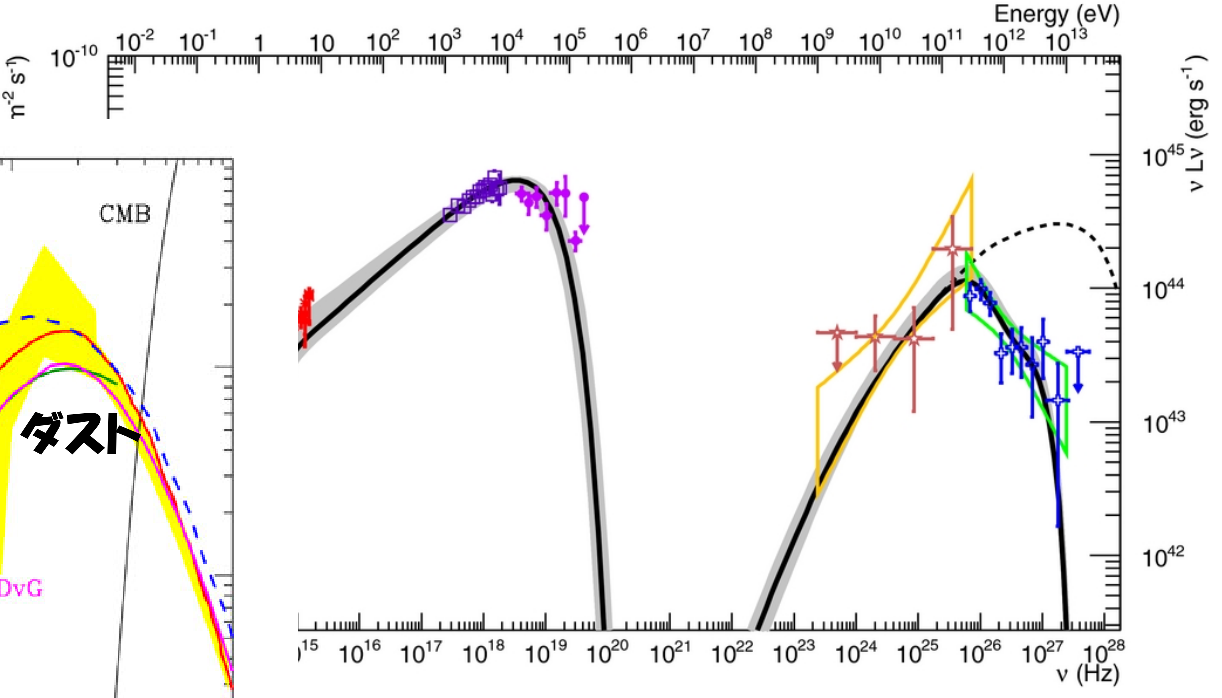
ガンマ線バーストの発生率
（ブラックホール形成史・重力波源）

水：最先端研究II「観測的宇宙論」

綜合的な知の連携

天文学的知識は必須





宇宙背景放射

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

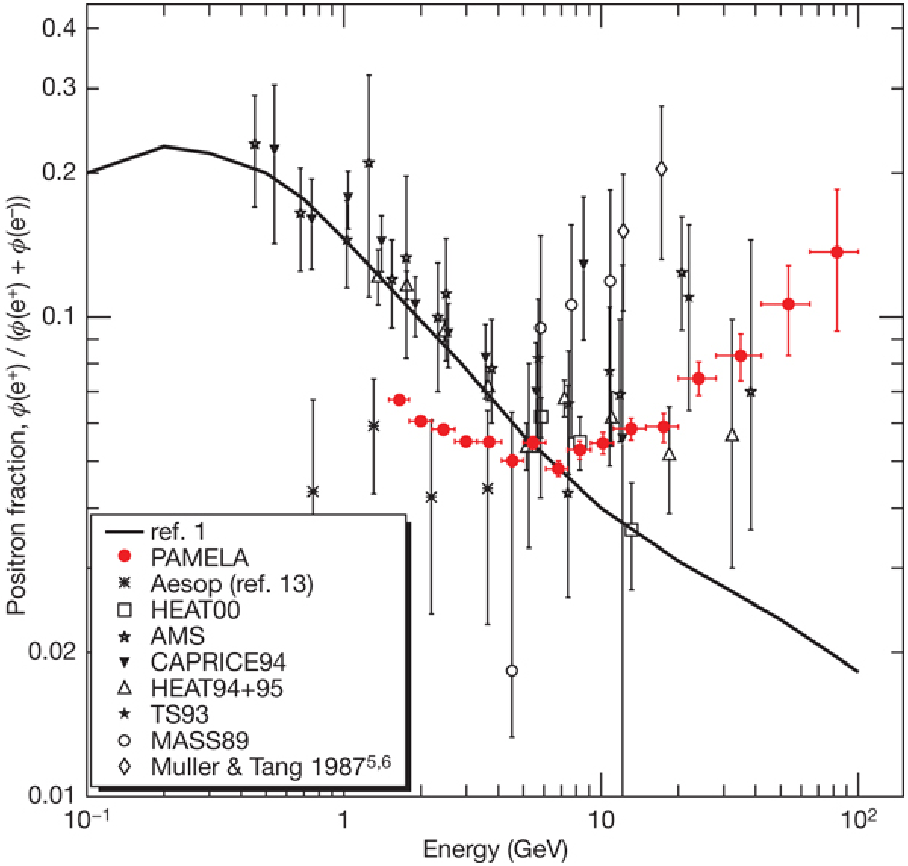
ブレーザーのTeVガンマ線は吸収
されているはず。

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。

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」

ここ10年くらいの観測的進展

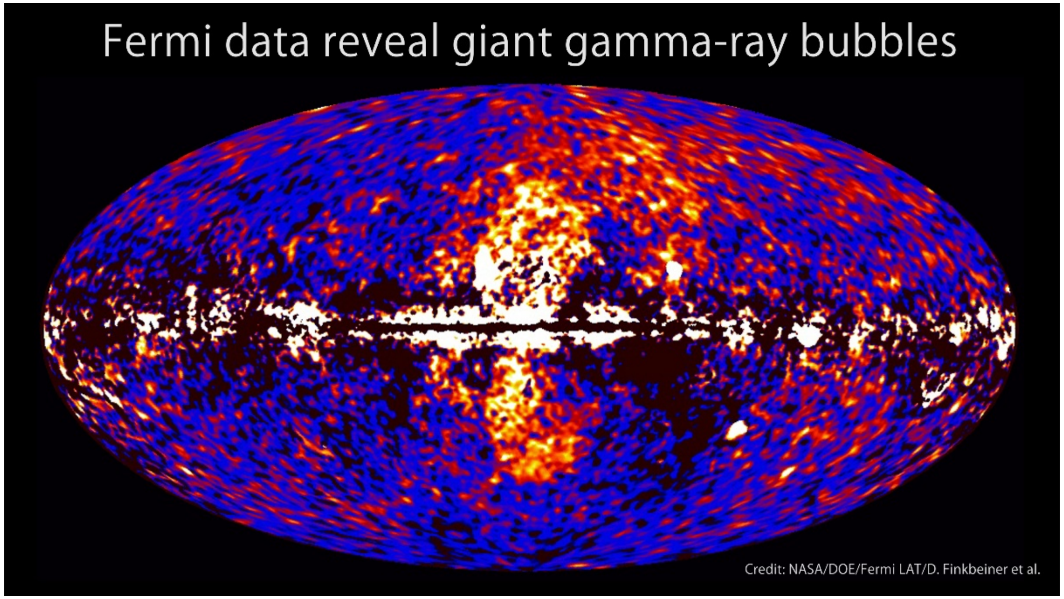
2009



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？ $\chi \rightarrow e^- + e^+$

2010

フェルミバブル



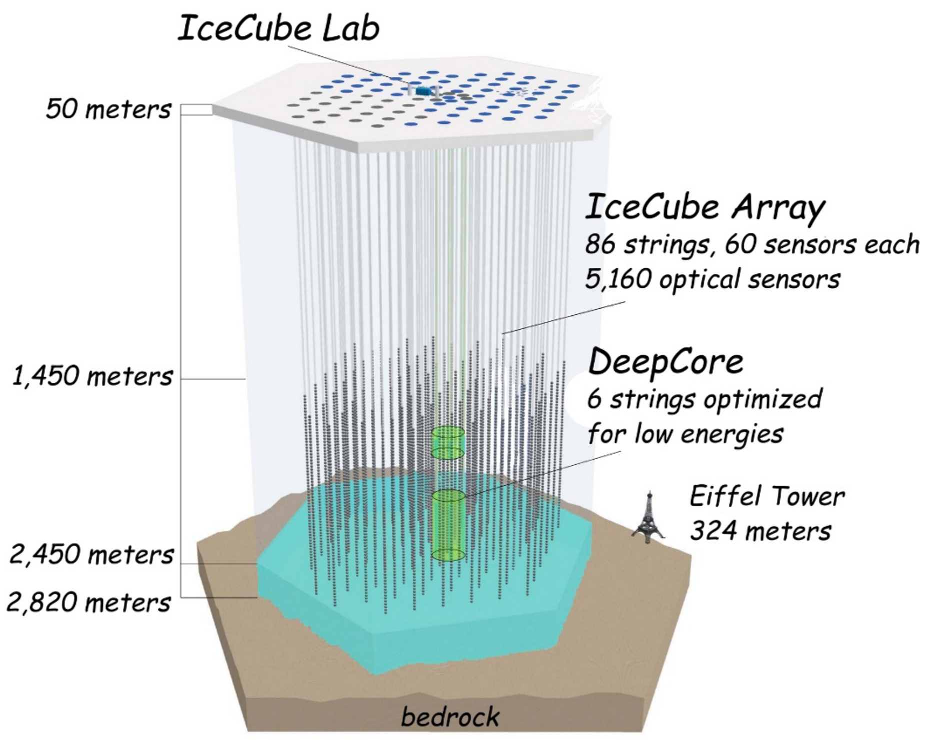
銀河中心上下方向にガンマ線で輝くバブル
過去の銀河中心ブラックホールの活動の痕跡？
過去の爆発的星形成の名残？

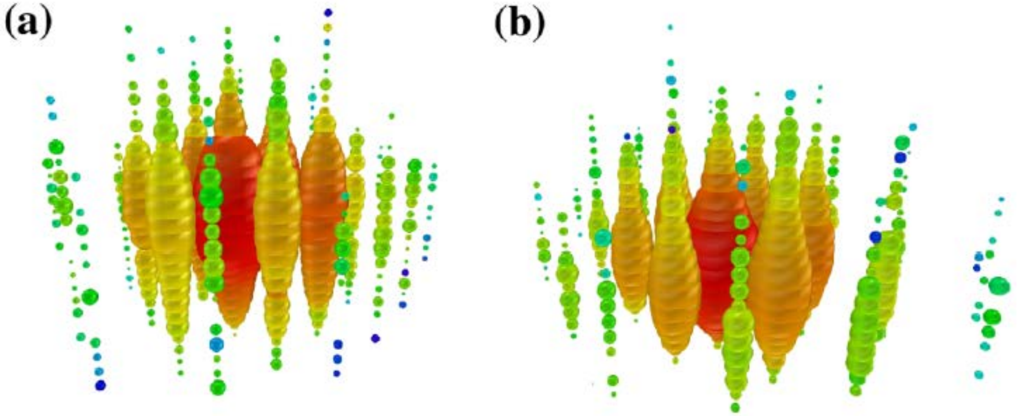
水：最先端研究II「暗黒物質」
金：講義III「宇宙・素粒子」

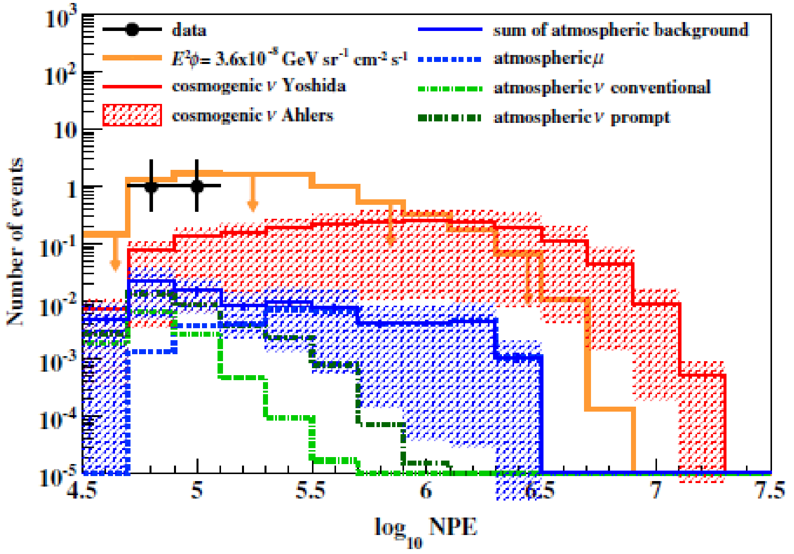
ここ10年くらいの観測的進展

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！

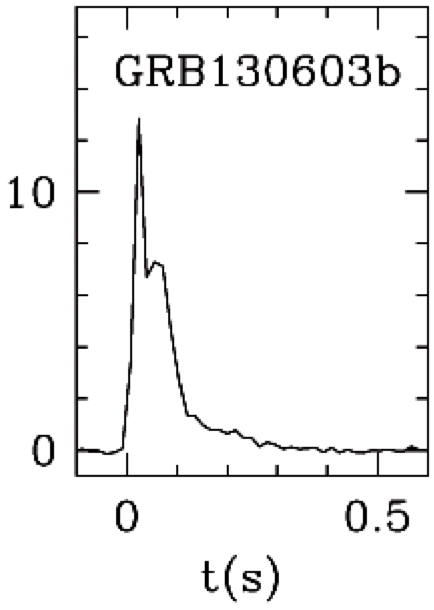
金：最先端研究VII「高エネルギー・ニュートリノ天文学」

ここ10年くらいの観測的進展

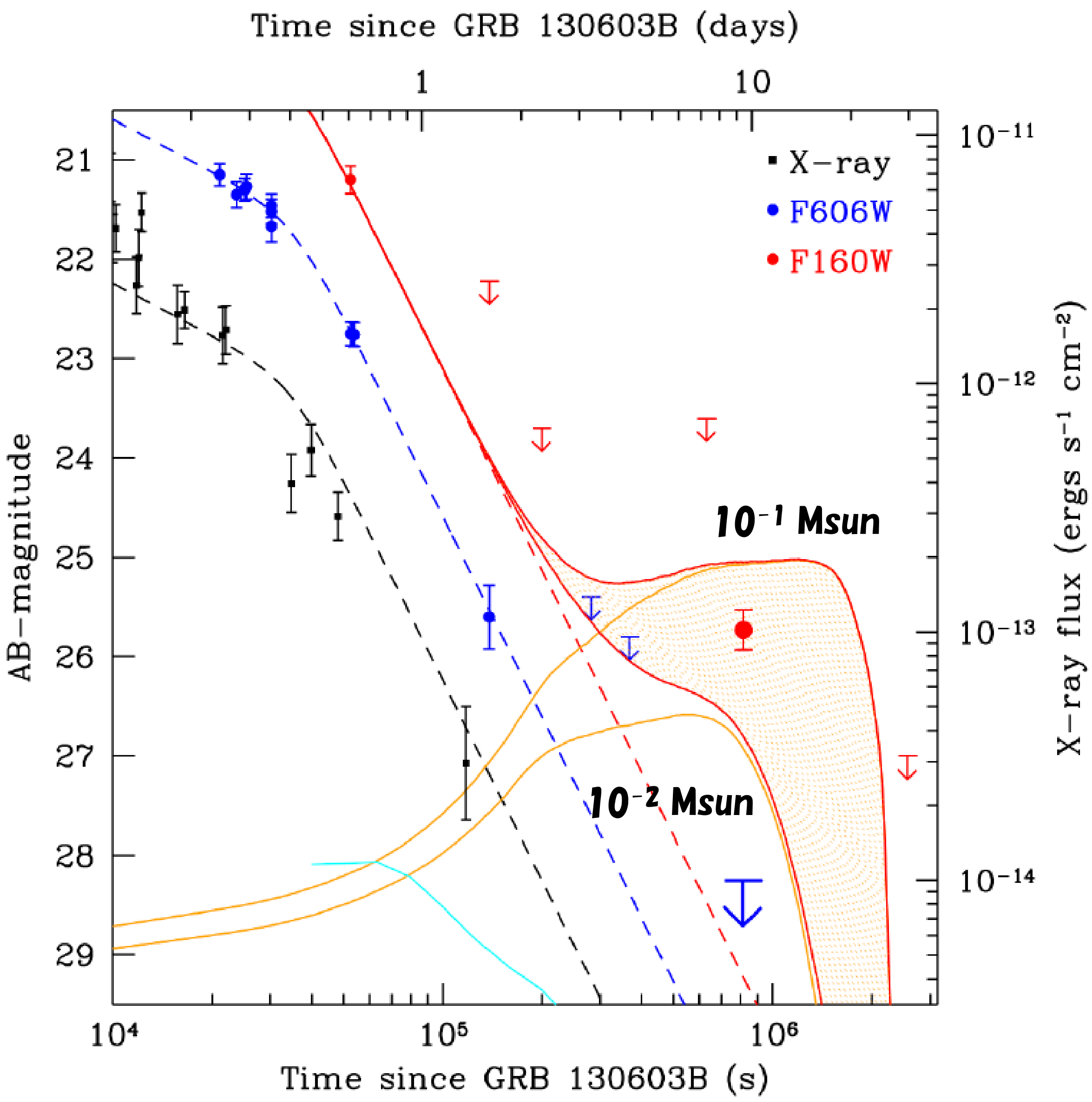
2013

Macronova/Kilonovaの発見？

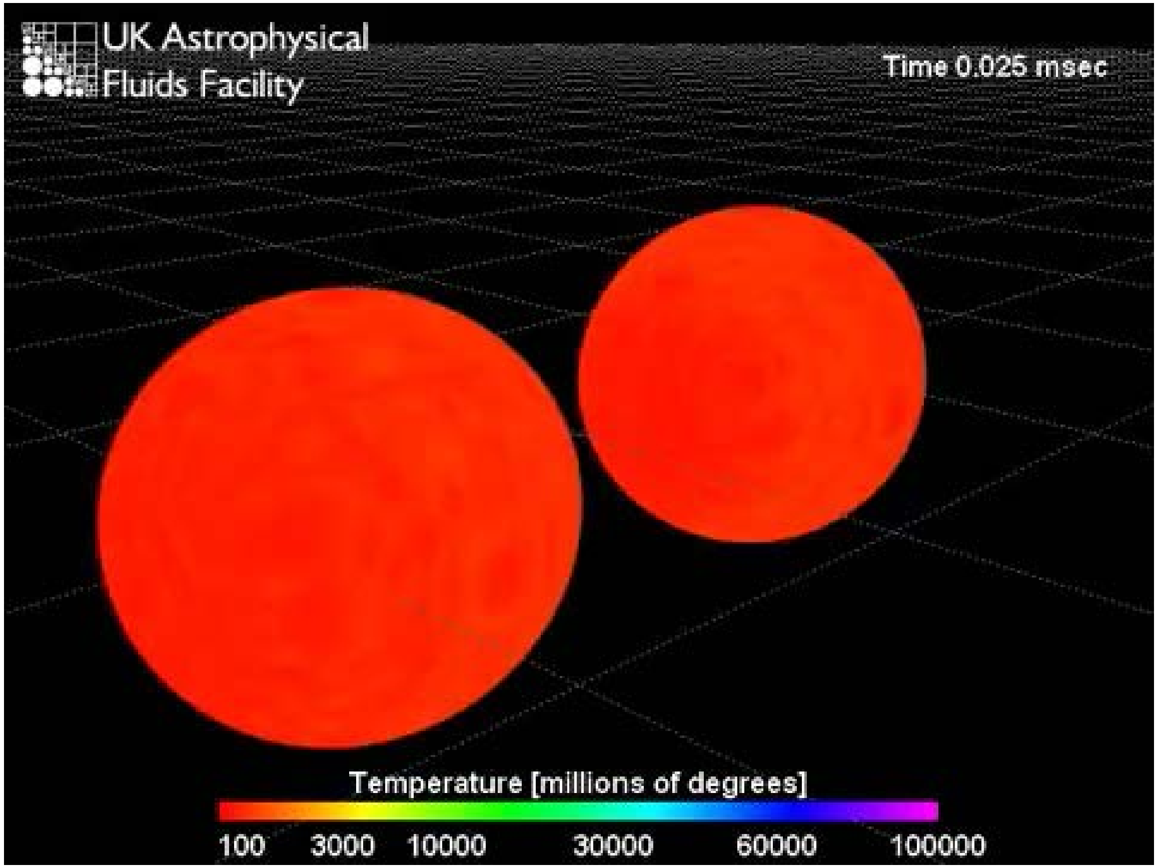
Short gamma-ray burst

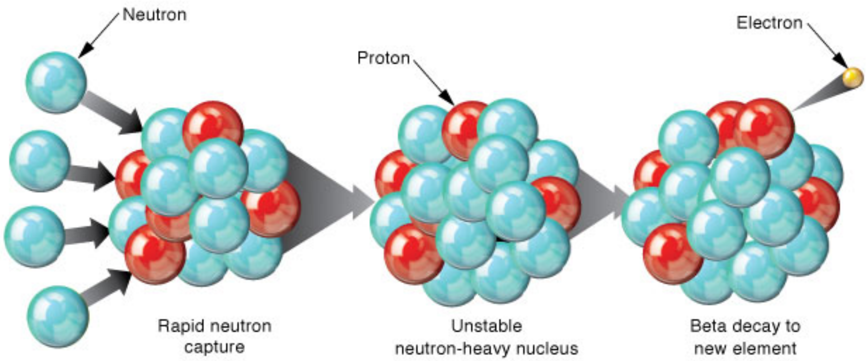


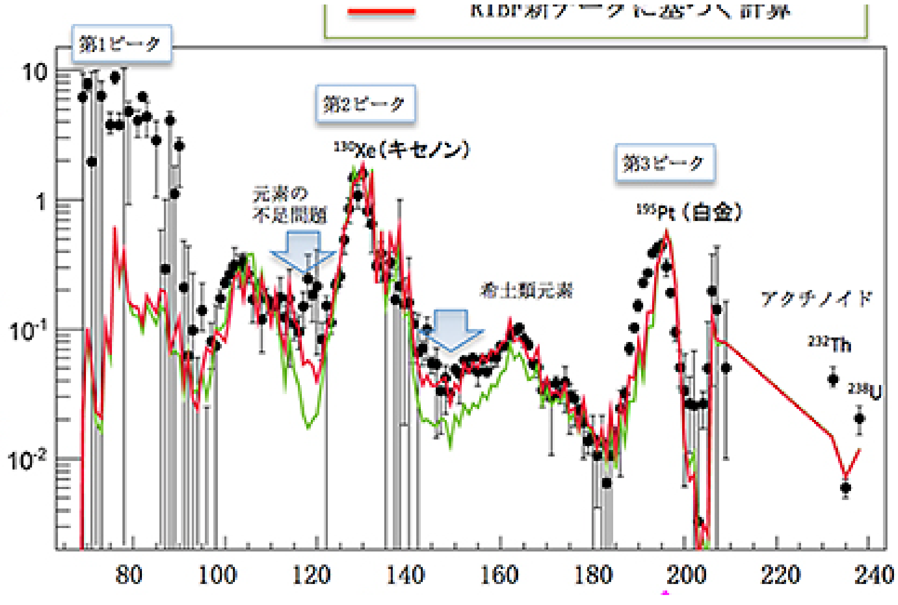
赤外線だけで一瞬明るくなる。



Kilonova





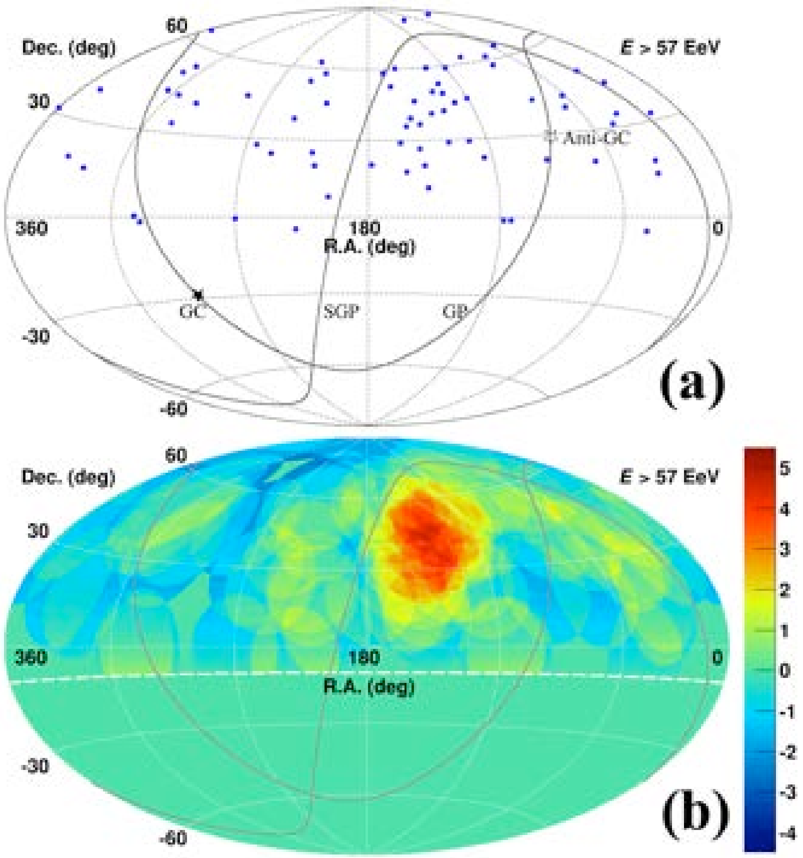


先ほどの赤外線放射は、連星中性子星合体に伴う、放出物からの放射かもしれない。

大量の不安定核：赤外放射の熱源

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

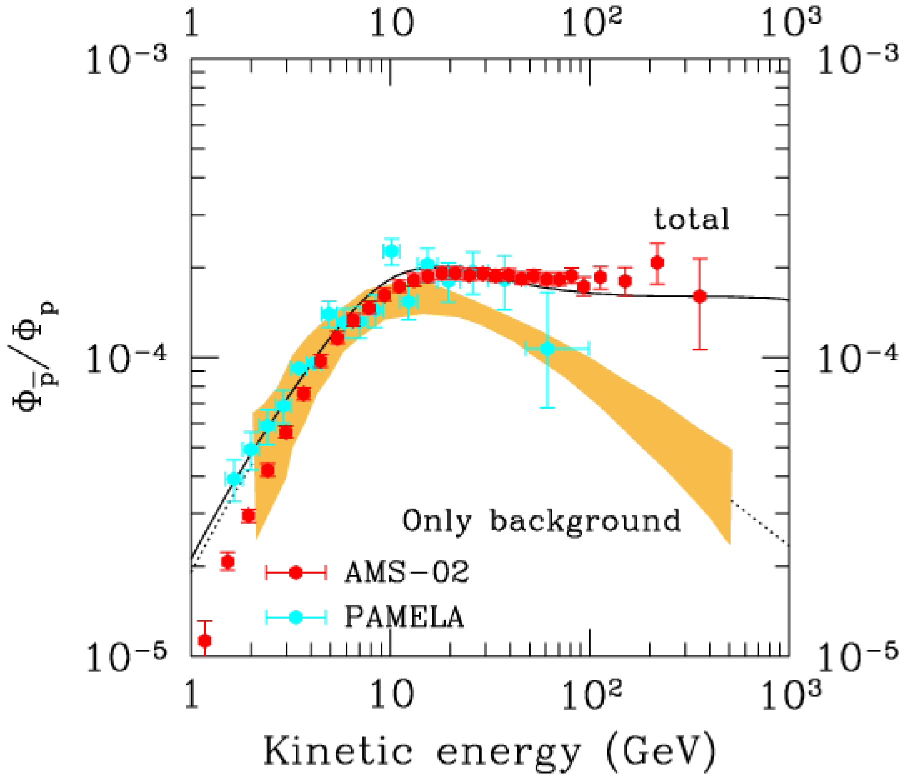


宇宙線研究所TAグループ

木：最先端研究V「最高エネルギー宇宙線」

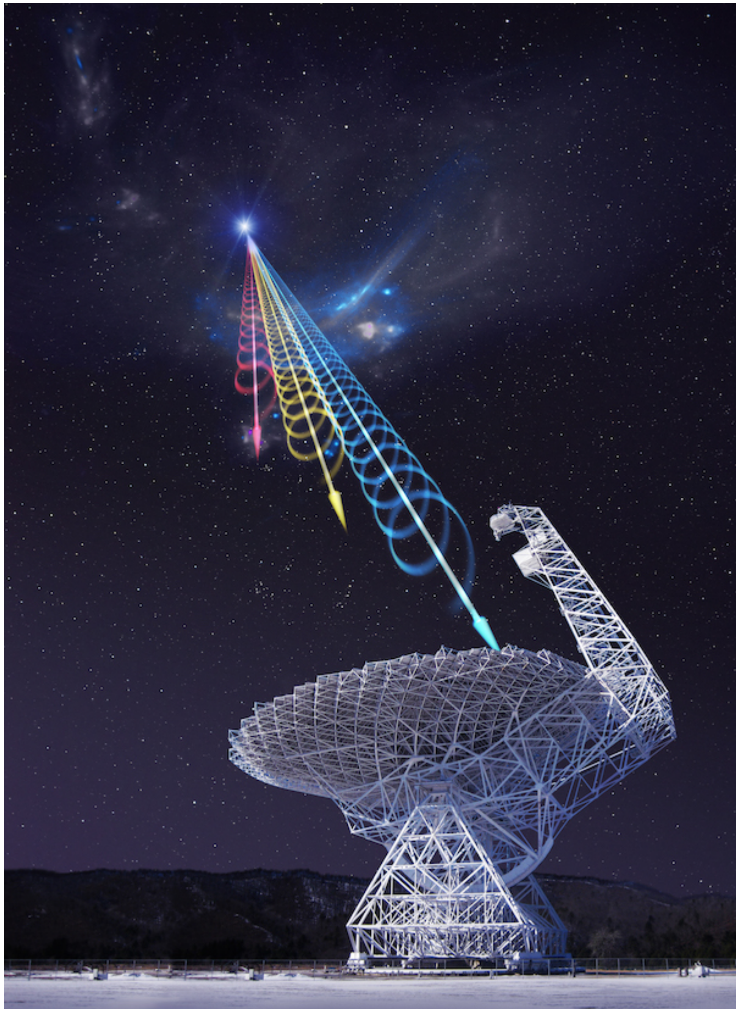
ここ10年くらいの観測的進展

2015 高エネルギーで反陽子宇宙線の過剰

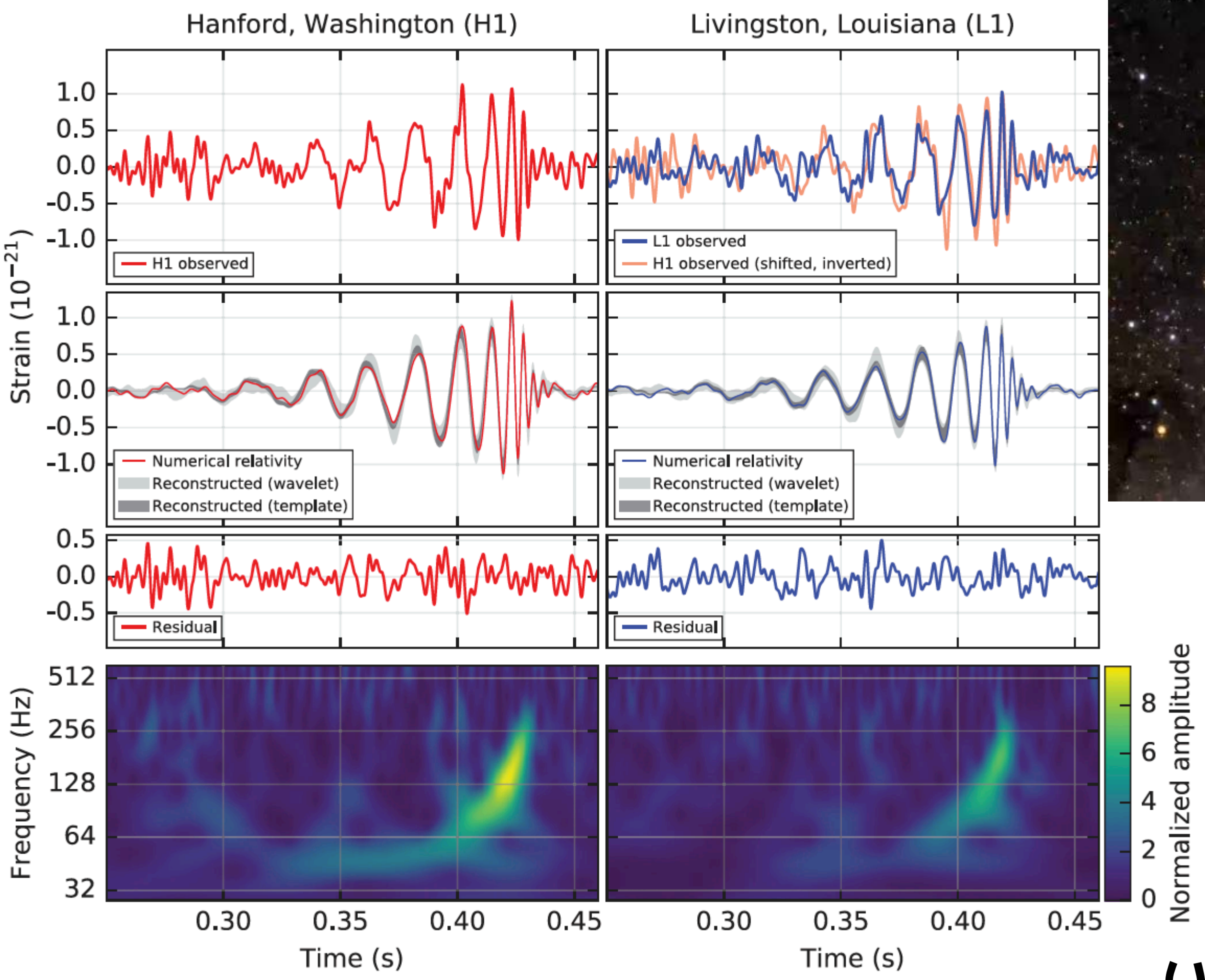


暗黒物質起源？

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！

いずれにせよ、重力波が検出された後の、
電磁波による対応天体探索は必須。

2016
重力波の検出！
30Msun＋30MsunのBH+BH合体

火：最先端研究「重力波天文学」

いっぱい勉強しましょう！

Summary of elementary plasma waves

EM character	oscillating species	conditions	dispersion relation	name
electrostatic	electrons	$\vec{B}_0 = 0$ or $\vec{k} \parallel \vec{B}_0$	$\omega^2 = \omega_p^2 + 3k^2 v_{th}^2$	plasma oscillation (or Langmuir wave)
		$\vec{k} \perp \vec{B}_0$	$\omega^2 = \omega_p^2 + \omega_c^2 = \omega_h^2$	upper hybrid oscillation
	ions	$\vec{B}_0 = 0$ or $\vec{k} \parallel \vec{B}_0$	$\omega^2 = k^2 v_s^2 = k^2 \frac{\gamma_e K T_e + \gamma_i K T_i}{M}$	ion acoustic wave
		$\vec{k} \perp \vec{B}_0$ (nearly)	$\omega^2 = \Omega_c^2 + k^2 v_s^2$	electrostatic ion cyclotron wave
		$\vec{k} \perp \vec{B}_0$ (exactly)	$\omega^2 = [(\Omega_c \omega_c)^{-1} + \omega_i^{-2}]^{-1}$	lower hybrid oscillation
electromagnetic	electrons	$\vec{B}_0 = 0$	$\omega^2 = \omega_p^2 + k^2 c^2$	light wave
		$\vec{k} \perp \vec{B}_0,\ \vec{E}_1 \parallel \vec{B}_0$	$\frac{c^2 k^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$	O wave
		$\vec{k} \perp \vec{B}_0,\ \vec{E}_1 \perp \vec{B}_0$	$\frac{c^2 k^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \frac{\omega^2 - \omega_p^2}{\omega^2 - \omega_h^2}$	X wave
		$\vec{k} \parallel \vec{B}_0$ (right circ. pol.)	$\frac{c^2 k^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2/\omega^2}{1 - (\omega_c/\omega)}$	R wave (whistler mode)
		$\vec{k} \parallel \vec{B}_0$ (left circ. pol.)	$\frac{c^2 k^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2/\omega^2}{1 + (\omega_c/\omega)}$	L wave
	ions	$\vec{B}_0 = 0$		none
		$\vec{k} \parallel \vec{B}_0$	$\omega^2 = k^2 v_A^2$	Alfvén wave
		$\vec{k} \perp \vec{B}_0$	$\frac{\omega^2}{k^2} = c^2 \frac{v_s^2 + v_A^2}{c^2 + v_A^2}$	magnetosonic wave

List of plasma instabilities [edit]

- Bennett pinch instability (also called the z-pinch instability)
- Beam acoustic instability
- Bump-in-tail instability
- Buneman instability,[2]
- Cherenkov instability,[3]
- Chute instability
- Coalescence instability,[4]
- Collapse instability
- Counter-streaming instability
- Cyclotron instabilities, including:
  - Alfven cyclotron instability
  - Electron cyclotron instability
  - Electrostatic ion cyclotron Instability
  - Ion cyclotron instability
  - Magnetoacoustic cyclotron instability
  - Proton cyclotron instability
  - Nonresonant Beam-Type cyclotron instability
  - Relativistic ion cyclotron instability
  - Whistler cyclotron instability
- Diocotron instability,[5] (similar to the Kelvin-Helmholtz fluid instability).
- Disruptive instability (in tokamaks)
- Double emission instability
- Drift wave instability
- Edge-localized modes[6]
- Electrothermal instability
- Farley-Buneman instability,[7]
- Fan instability
- Filamentation instability
- Firehose instability (also called Hose instability)
- Flute instability
- Free electron maser instability
- Gyrotron instability
- Helical instability (helix instability)
- Helical kink instability
- Hose instability (also called Firehose instability)
- Interchange instability
- Ion beam instability
- Kink instability
- Lower hybrid (drift) instability (in the Critical ionization velocity mechanism)
- Magnetic drift instability
- Magnetorotational instability (in accretion disks)
- Magnetothermal instability (Laser-plasmas)[8]
- Modulation instability
- Non-abelian instability (see also Chromo-Weibel instability)
- Chromo–Weibel instability
- Non-linear coalescence instability
- Oscillating two stream instability, see two stream instability
- Pair instability
- Parker instability (magnetic buoyancy instability)
- Peratt instability (stacked toroids)
- Pinch instability
- Rotating instability,[9]
- Sausage instability
- Slow Drift Instability
- Tearing mode instability
- Two-stream instability
- Weak beam instability
- Weibel instability

・プラズマ（古典電磁気学）

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・多波長観測の時代へ