

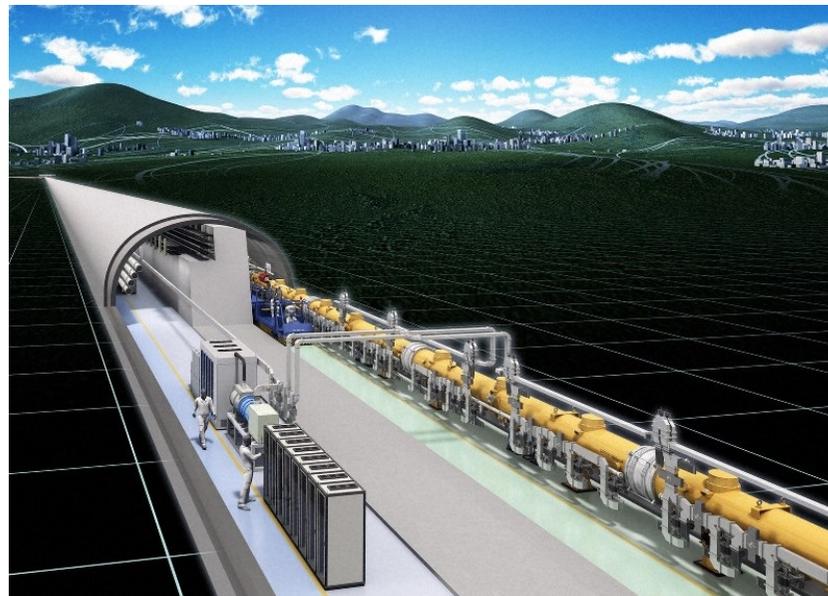
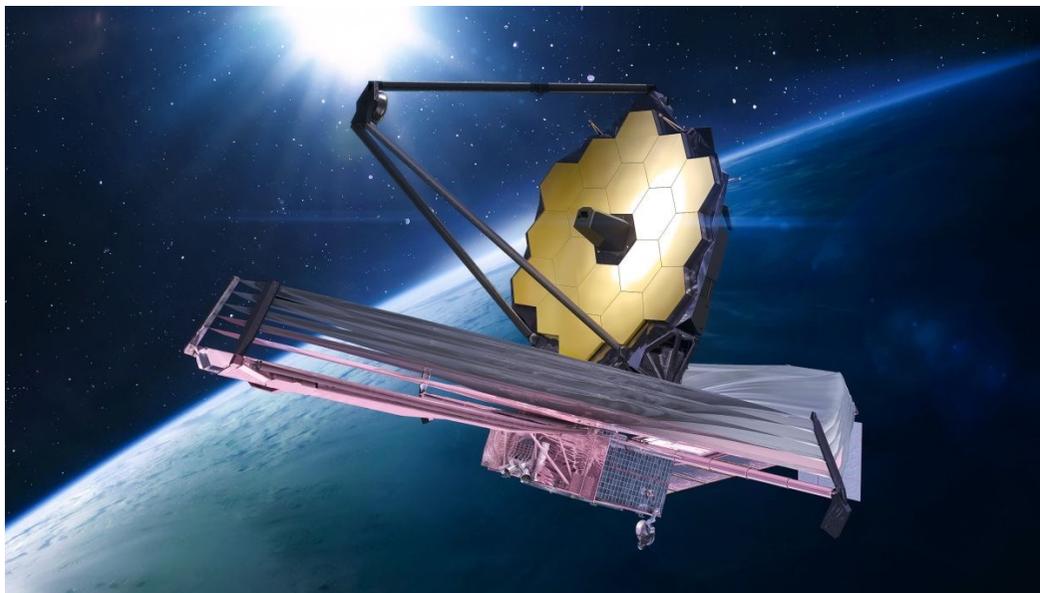
高エネルギー天体物理

浅野勝晃

(高エネルギー天体グループ)

宇宙物理と素粒子物理の質的な違い

どちらも巨大観測装置の開発、国際共同実験が主流



宇宙（天体）：一つの実験装置で観測する対象、素粒子：一つの実験装置でできることは限られる。
探る物理が多様

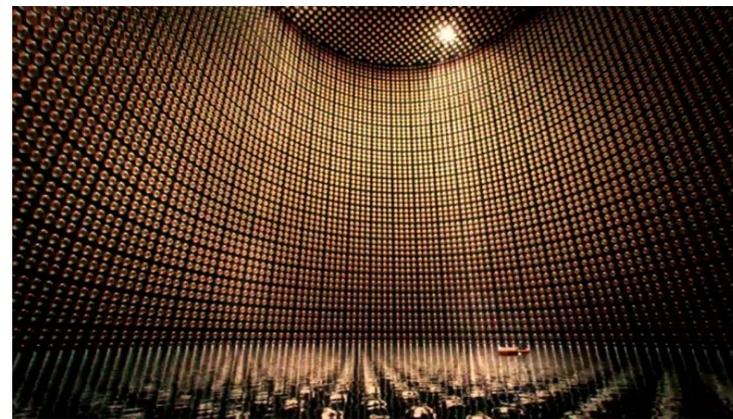
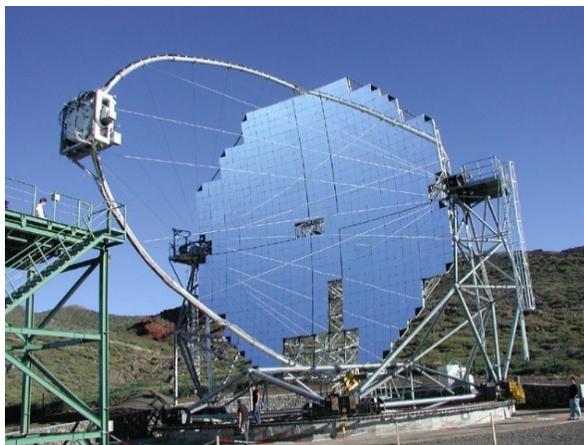
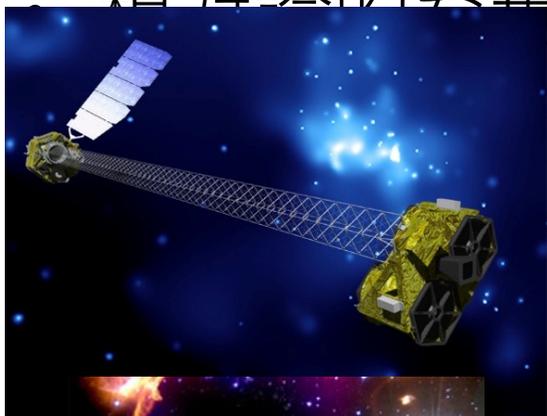
対象：星、銀河、銀河団、分子雲、星間ガス、基本、加速粒子の衝突
超新星、超新星残骸、パルサー、
ブラックホール連星、活動銀河核ジェット… 素粒子の質量、ニュートリノ振動の混合角
など、

物理：宇宙論、星形成・進化、粒子加速、
放射過程、プラズマ、暗黒物質、重力理論… 1つの実験で一つの物理定数を決めること
が目標

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。

相対論的の世界

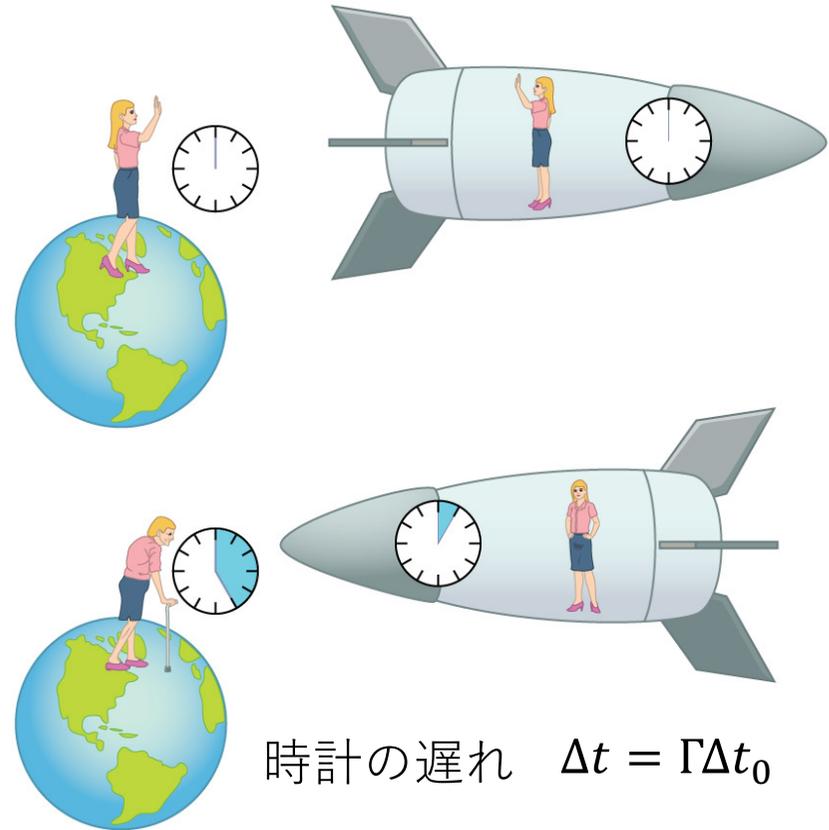
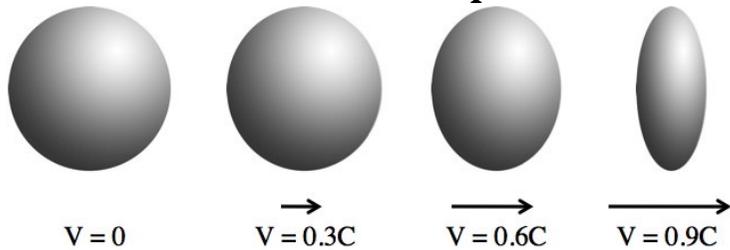


高エネルギーの世界

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



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

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

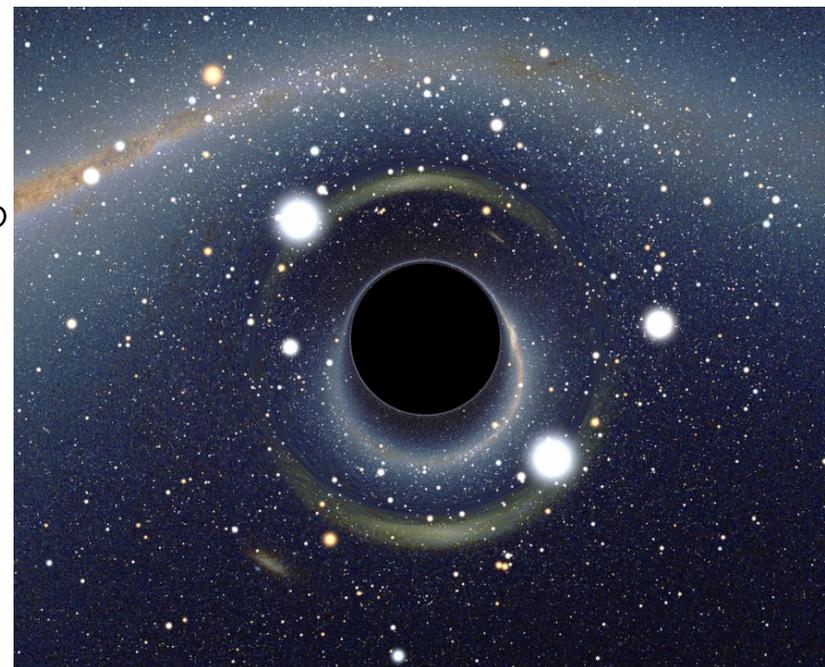
これよりも小さな半径の星はブラックホールになる
太陽質量なら3kmほど。

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。

超新星残骸と宇宙線生成



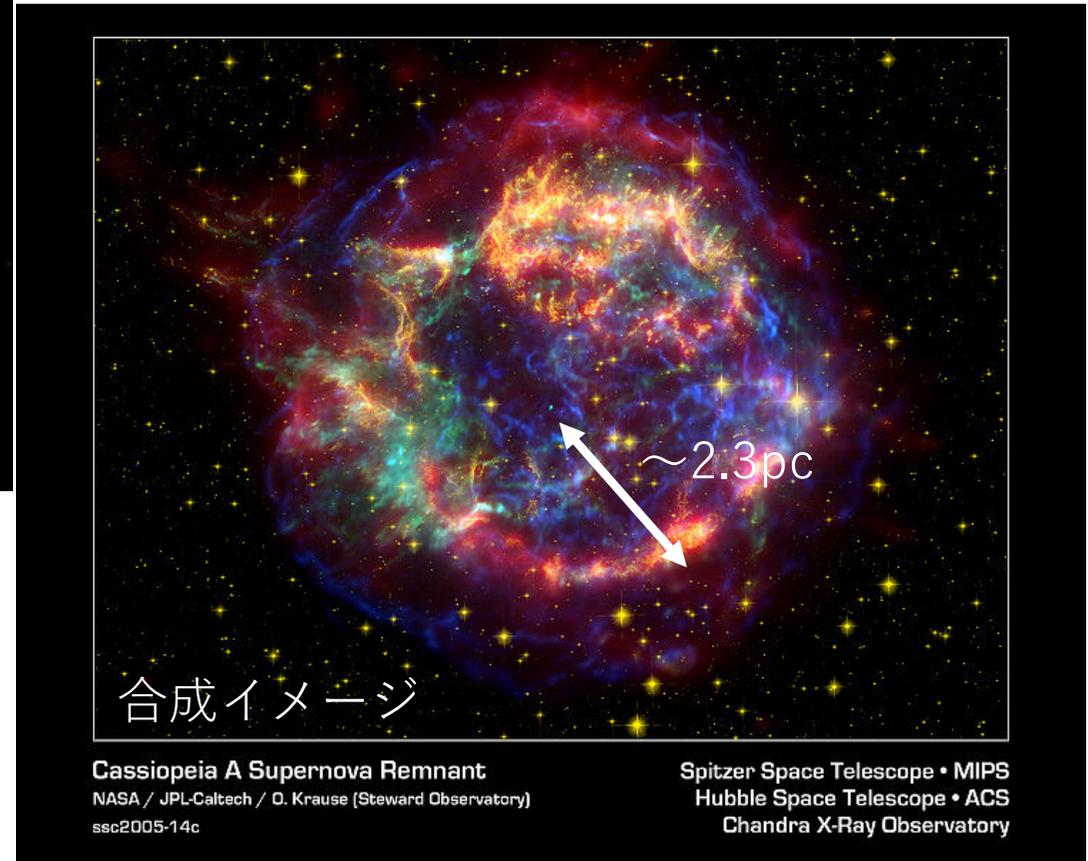
爆発による衝撃波が星間空間を伝播



衝撃波による粒子加速
高エネルギー粒子の生成

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

1667年頃に爆発したCassiopeia A



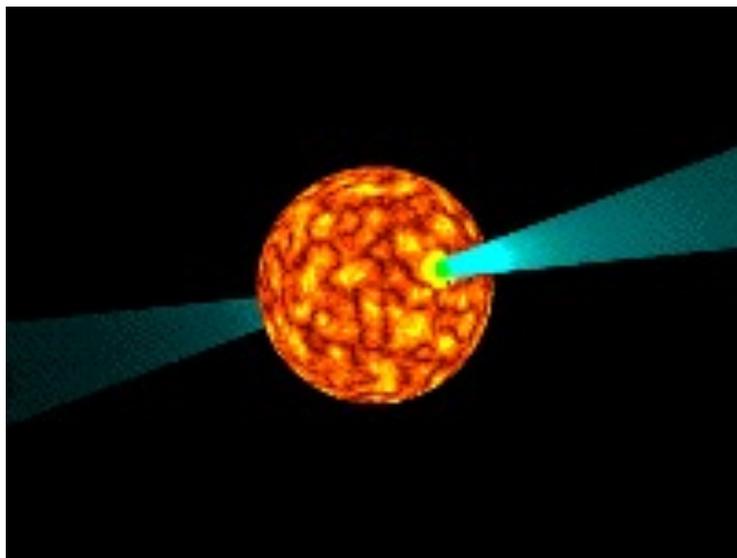
距離：3.4kpc

膨張速度：4000-5000km/s

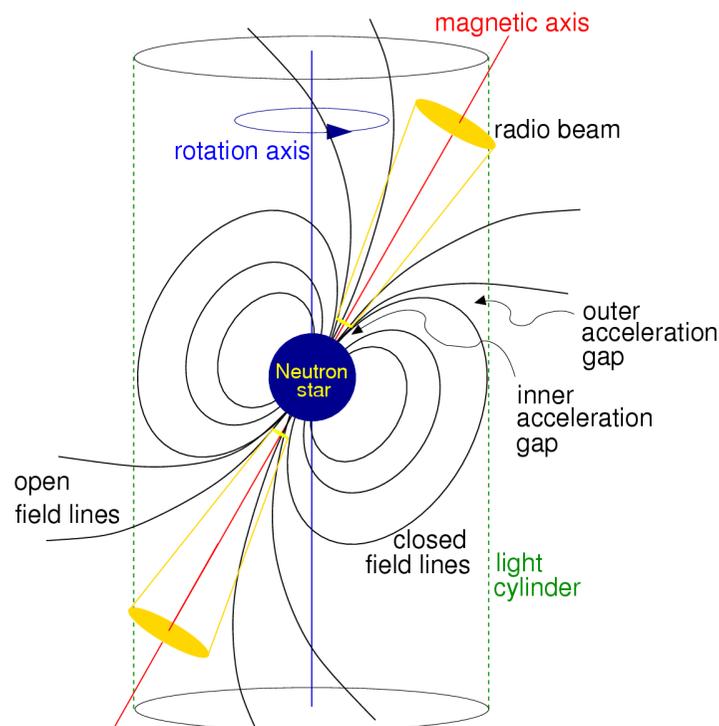
中心には中性子星が残される

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。



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

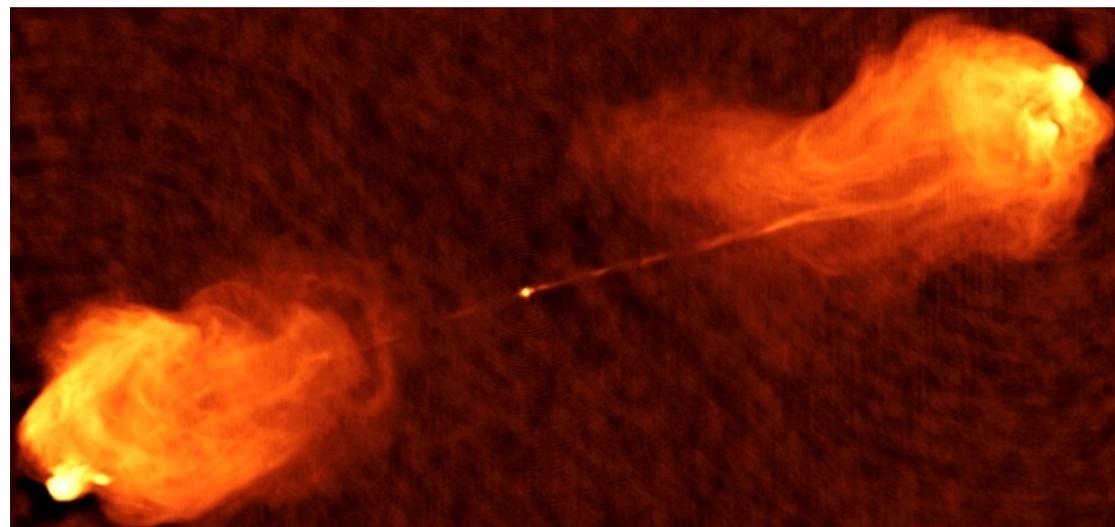
$$|\ddot{\mu}| \simeq |\mu| \Omega_{\text{rot}}^2$$

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

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)

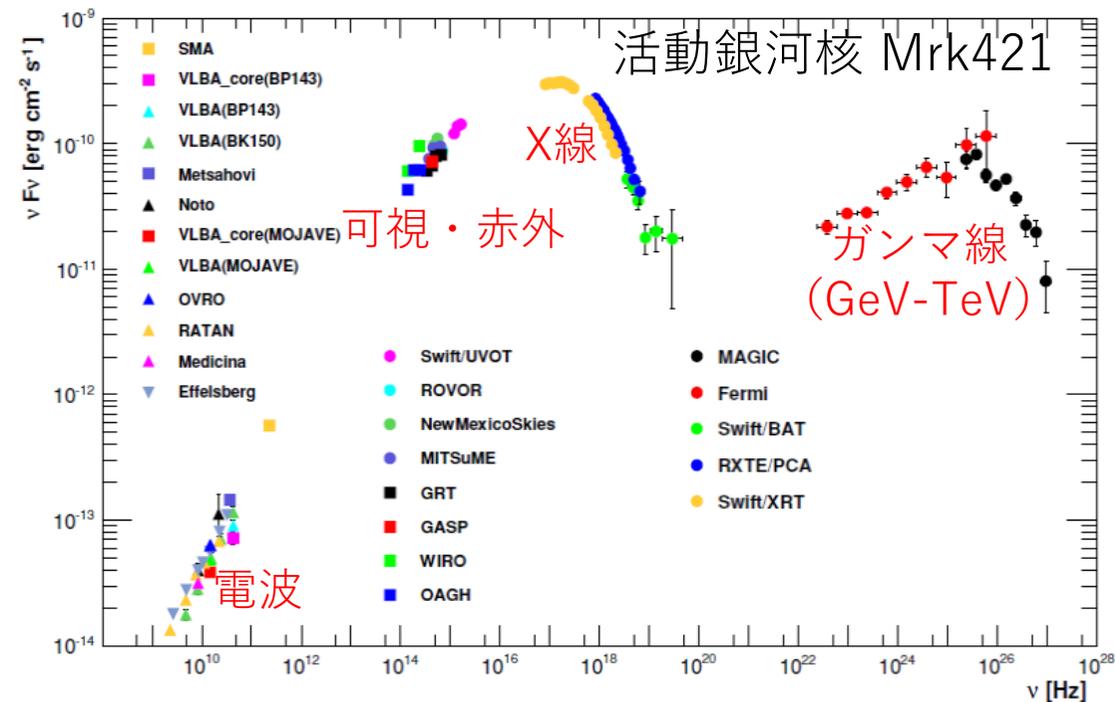
$$\alpha_B = \frac{1}{2} \frac{m_e e^2}{\hbar^2} \frac{B_{\perp}}{B_{\text{cr}}} \Xi(\chi), \quad \chi = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon}{m_e c^2} \frac{B_{\perp}}{B_{\text{cr}}}, \quad B_{\text{cr}} = \frac{m_e^2 c^3}{\hbar e} = 4.41 \times 10^{13} \text{ G}.$$

活動銀河核ジェット



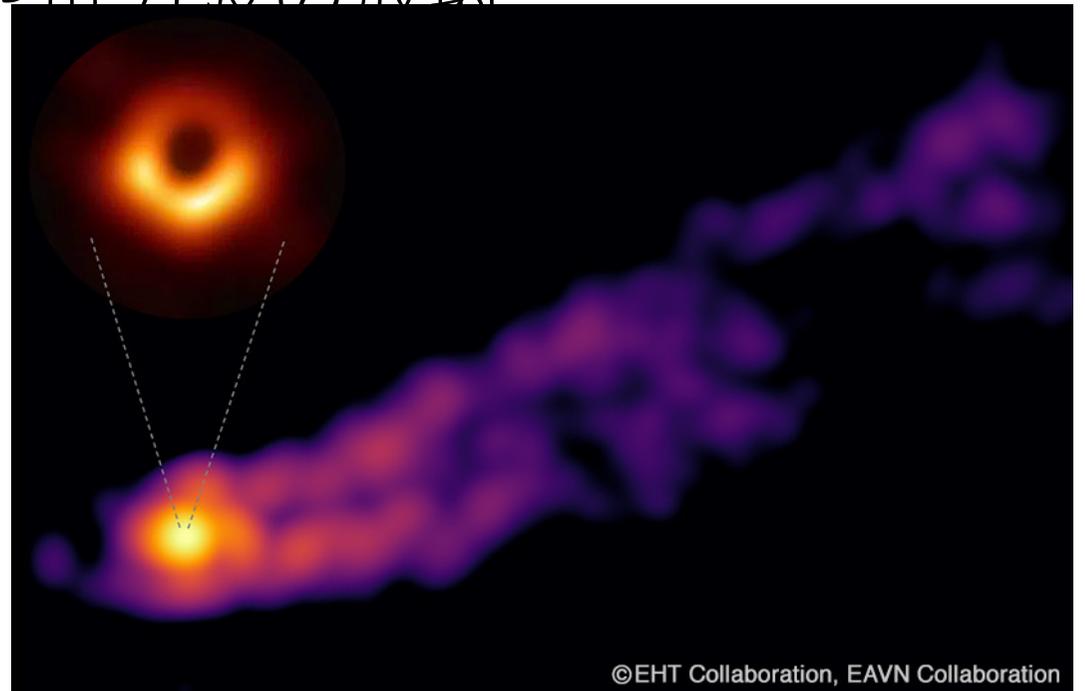
宇宙最大のブラックホール ($10^7 - 10^9$ 太陽質量)
からのジェット噴出

$\Gamma > 10$ の光速ジェットから電波、X線、ガンマ線を放出。



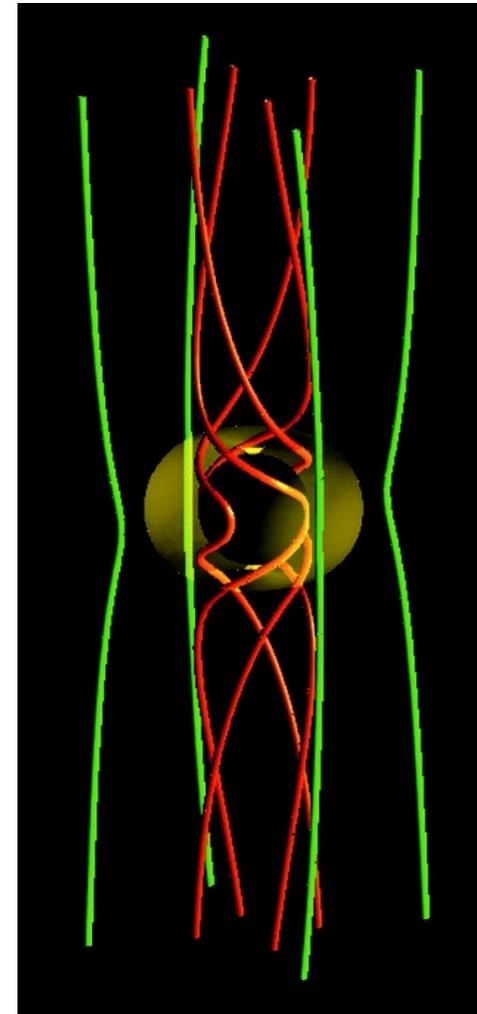
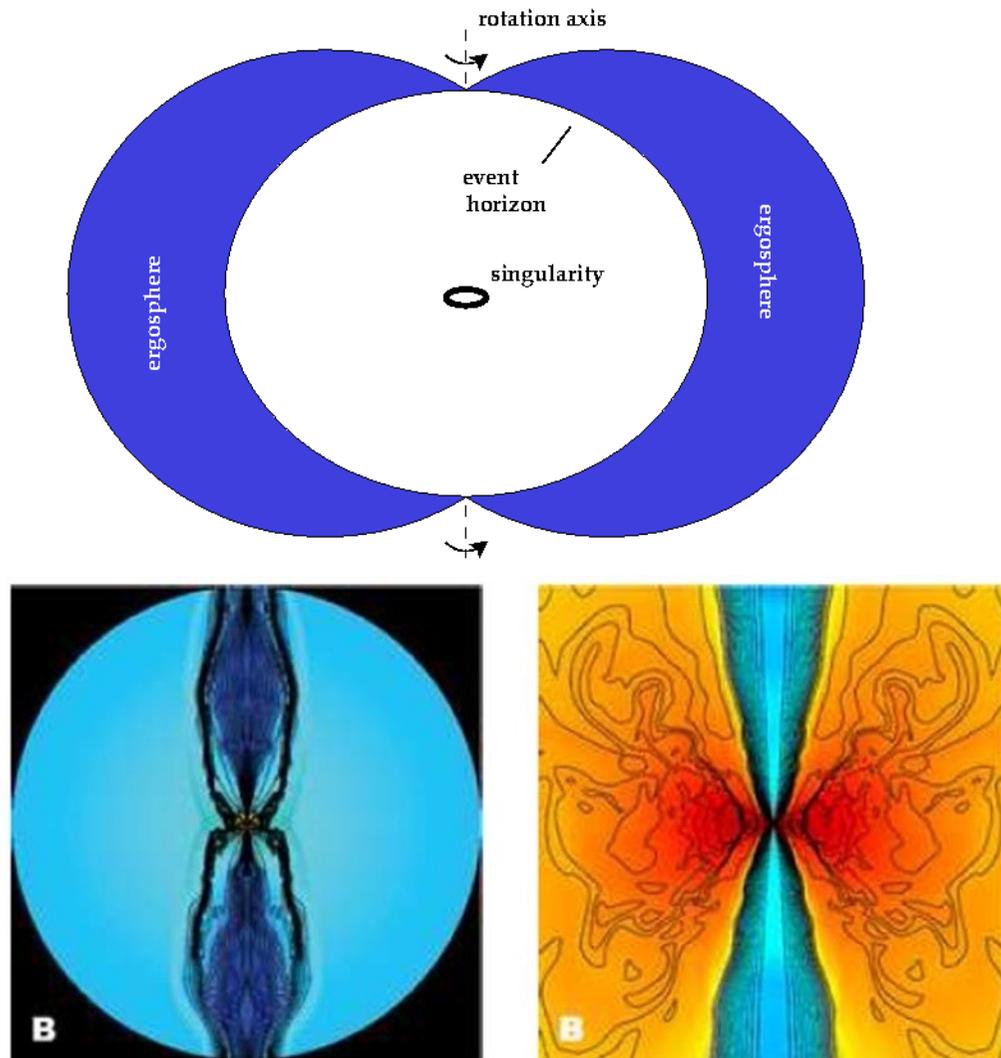
高エネルギー天体物理の目標

- 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



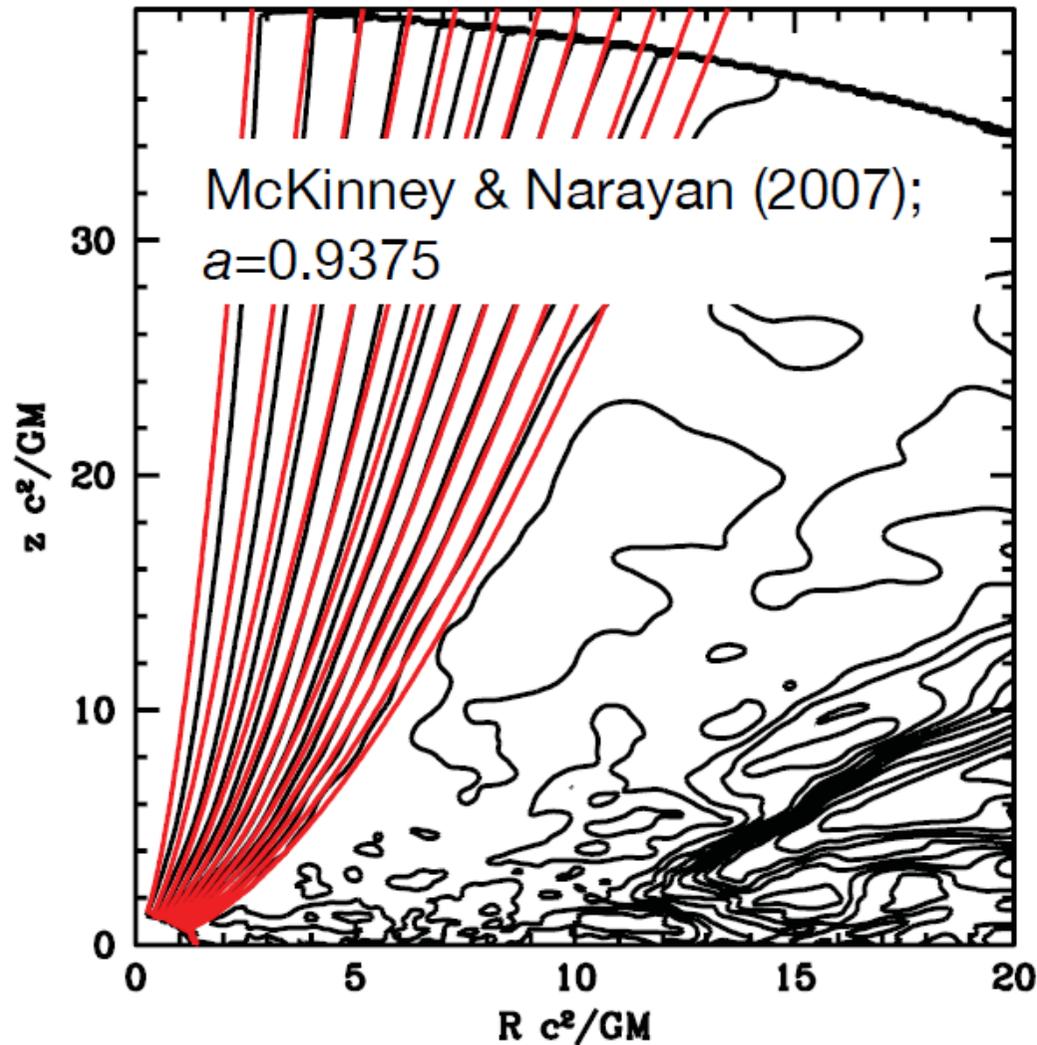
AGNジェット

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



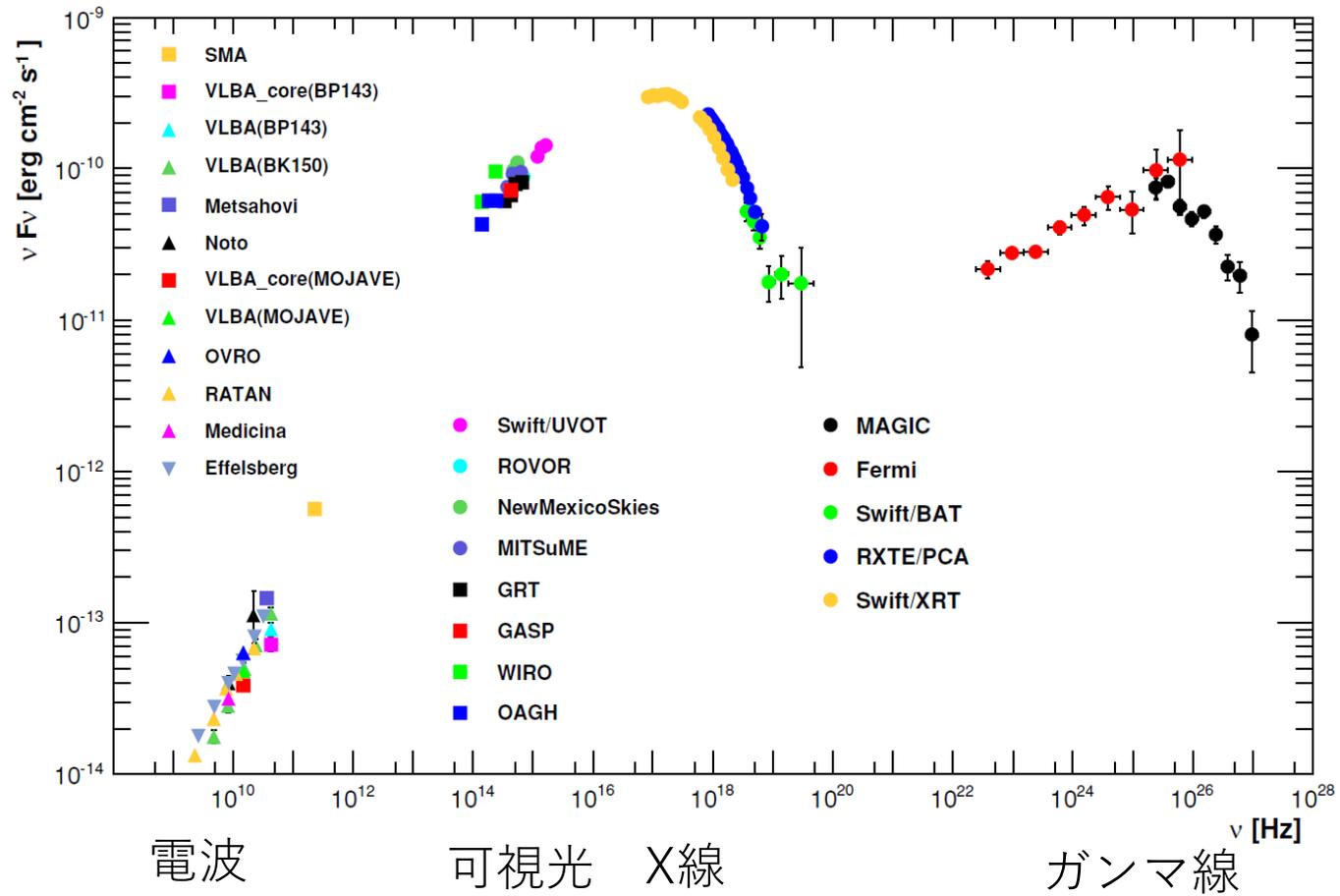
電磁場によるエネルギーの流れ

磁場による加速



- 磁気流体力学
- ジェット内のプラズマ密度を決める物理は不明
- 磁気圧・磁気張力で加速
- ローレンツ因子 > 10 となるかは非自明
- 降着円盤が磁場の源
- 円盤風がジェットを絞る

ジェットからの放射



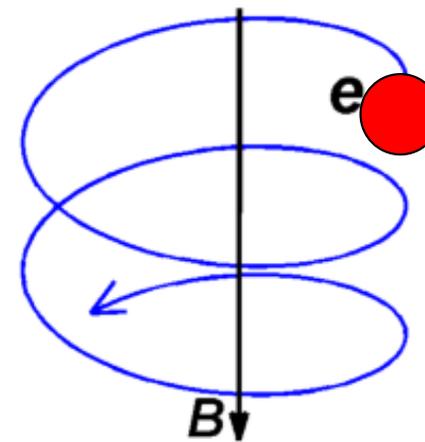
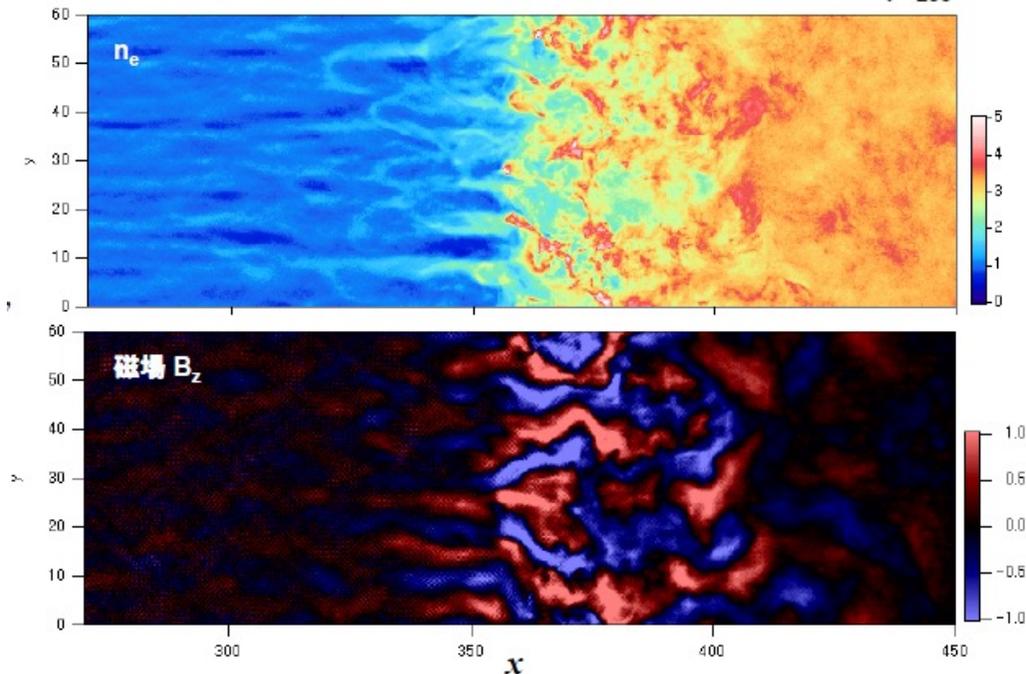
シンクロトロン

逆コンプトン散乱

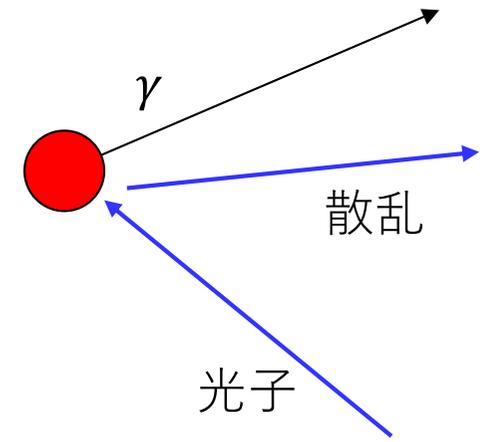
電子の加速と放射

衝撃波中の乱流で電子が散乱→加速

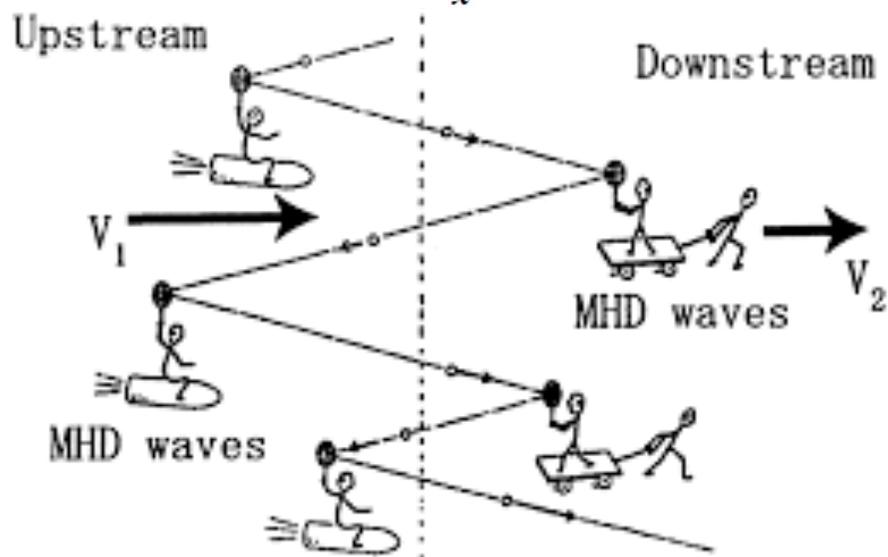
t = 233



シンクロトロン



逆コンプトン散乱

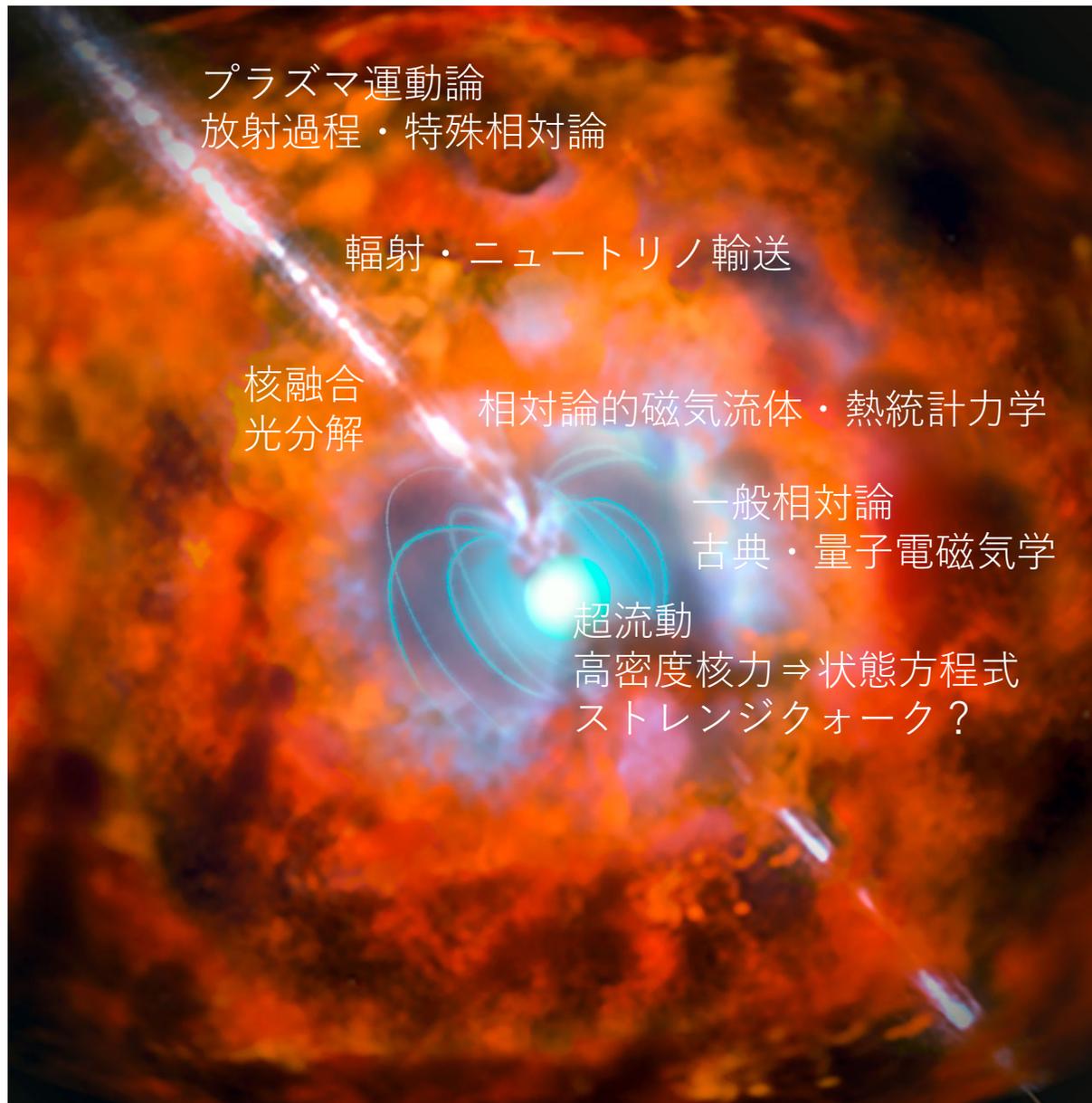


- 相対論的衝撃波での粒子加速の詳細は不明
- 磁場の増幅（プラズマ物理）
- ガンマ線放射領域の磁場は小さい（ジェットの本元の物理と矛盾）
- ガンマ線の短い時間の変動は謎

まとめ

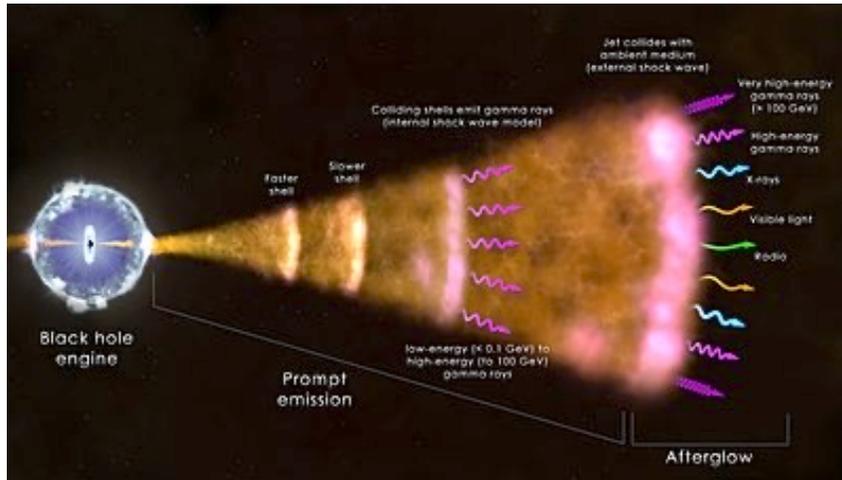


天文学
宇宙論

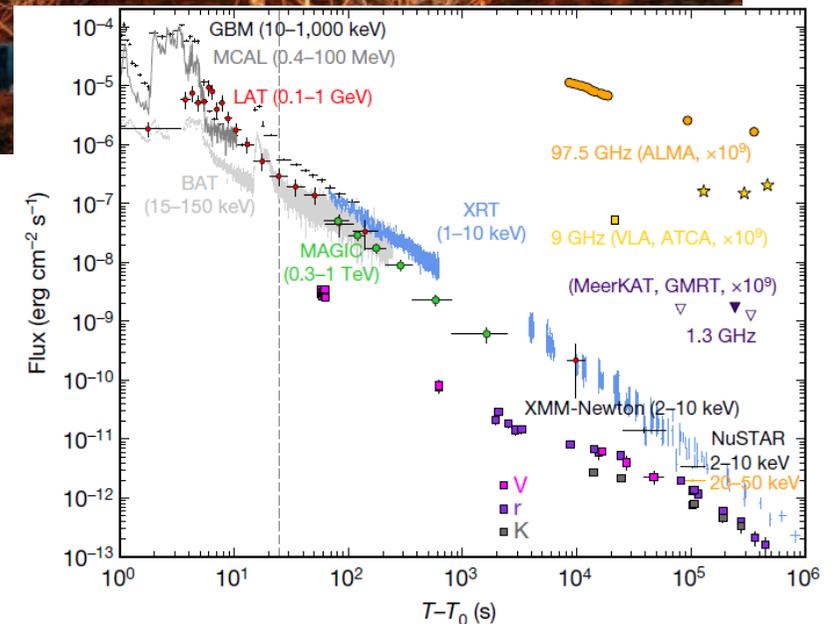
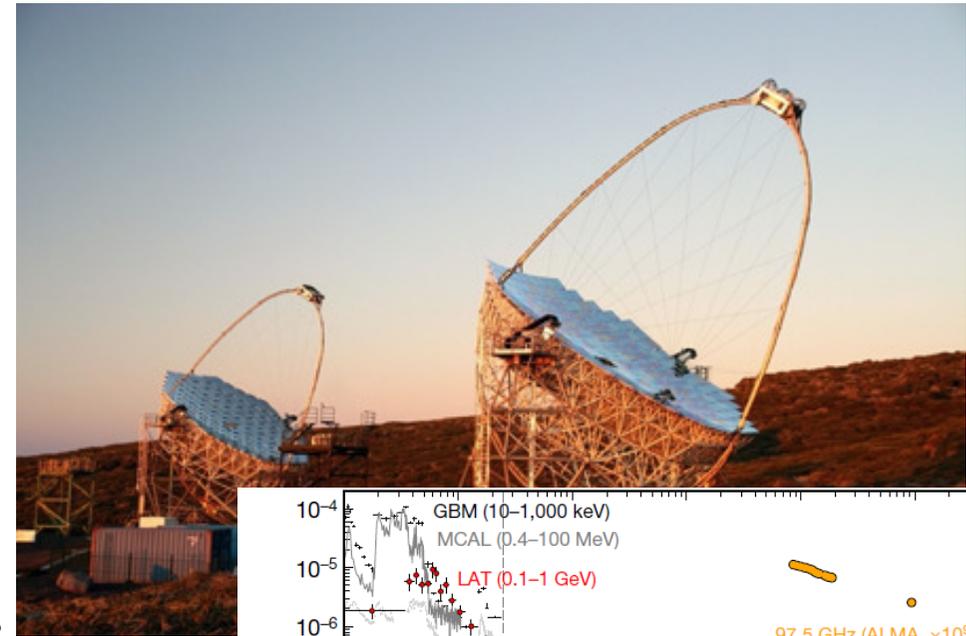
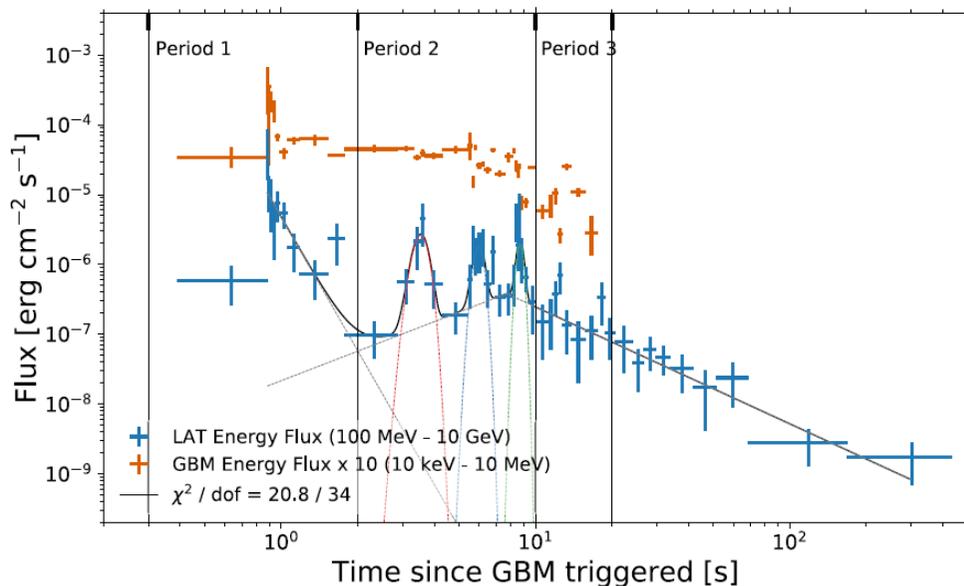


どの天体からどんなデータを取りたいか

ガンマ線バースト



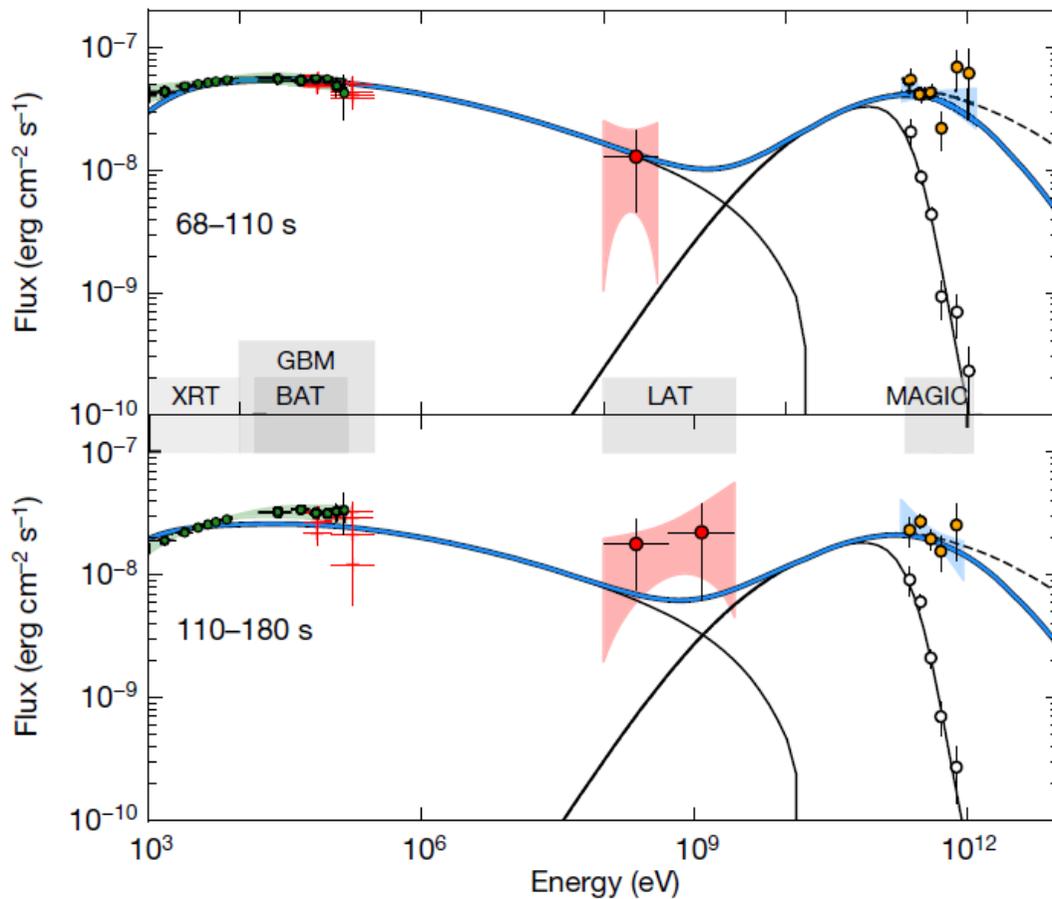
1日1-2発程度、全天のどこかで突然起きる。
10秒くらいの継続時間。普段は100keV-GeV帯域



2019年TeVでの初検出
衛星からの速報に応じ、素早く望遠鏡を向ける

どんなサイエンスが潜んでいそうか

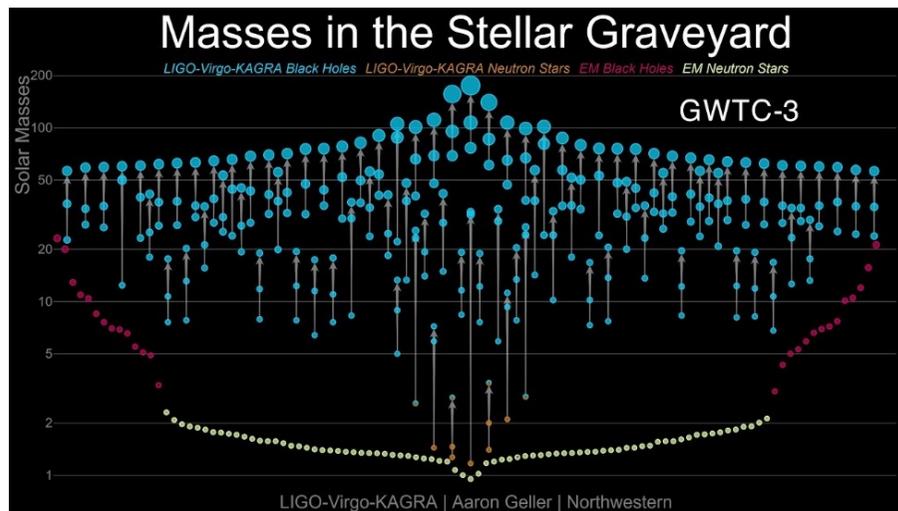
先ほどのガンマ線バースト



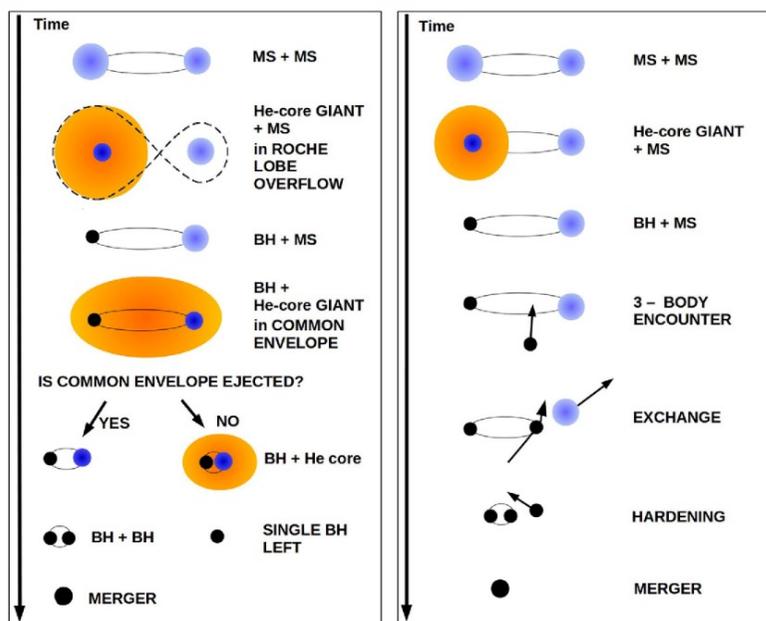
- 低エネルギーはシンクロトロン
- TeVは逆コンプトン散乱による放射
- 相対論的衝撃波での電子の加速
- 衝撃波や加速効率の時間進化
- TeVはガンマ線と赤外放射の衝突による吸収が見えている
- 衝突相手の光子数密度は宇宙の星形成史を反映している

最近どんな研究テーマが脚光を浴びているか

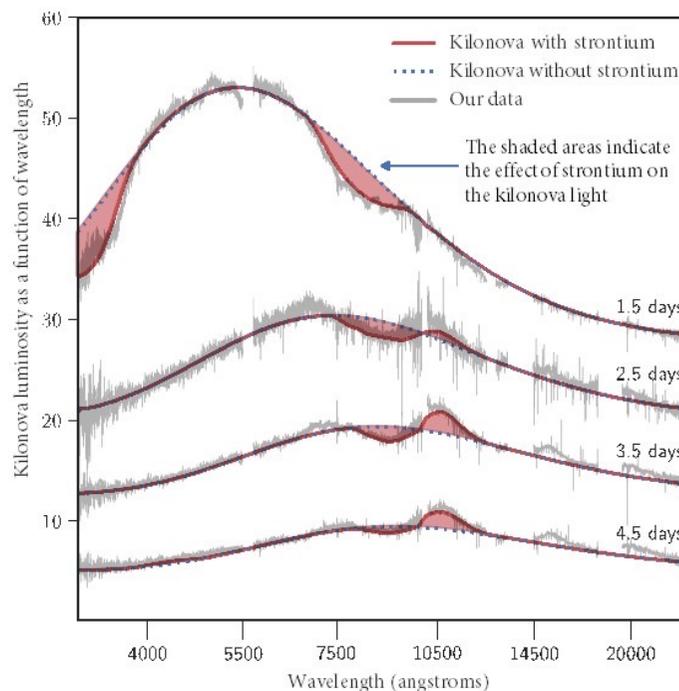
重力波による大量のBH連星合体の検出



連星進化の研究が大流行り



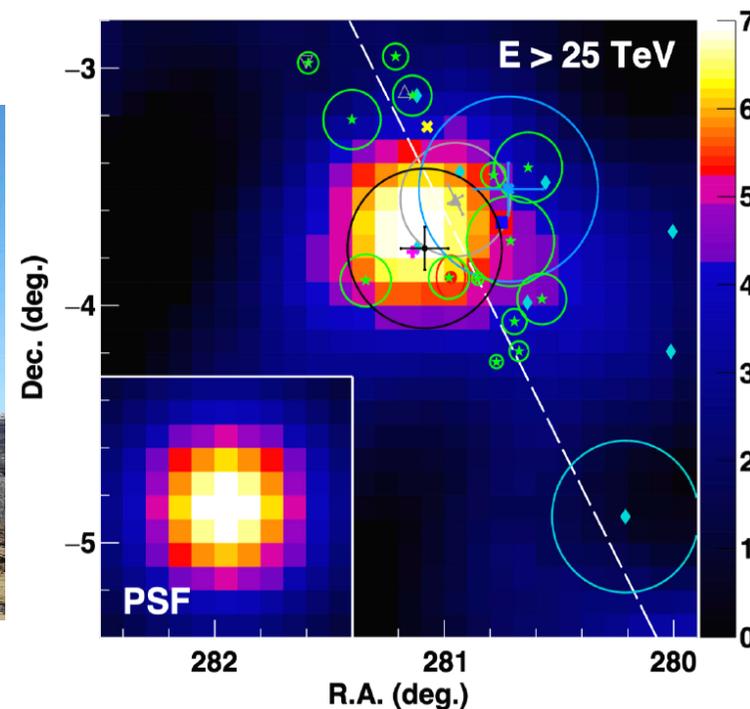
中性子星連星合体後からの放射スペクトル



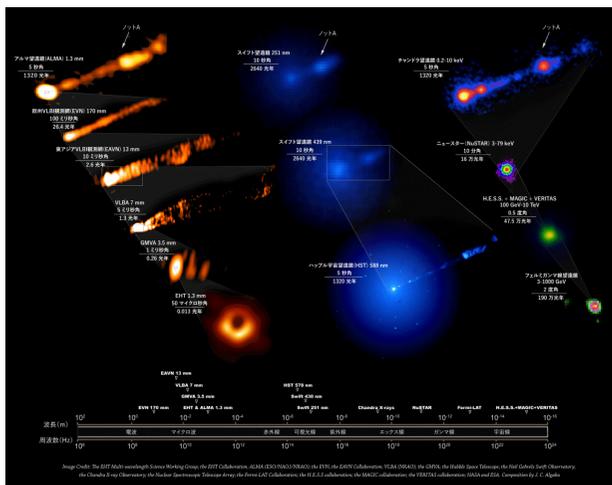
ストロンチウムによる吸収？
 重元素合成研究が大流行り
 (宇宙における金やウランの起源)

次にどんなテーマが流行りそうなのか

• 新しい検出装置



• 未解決問題



ブラックホールからの相対論的ジェット

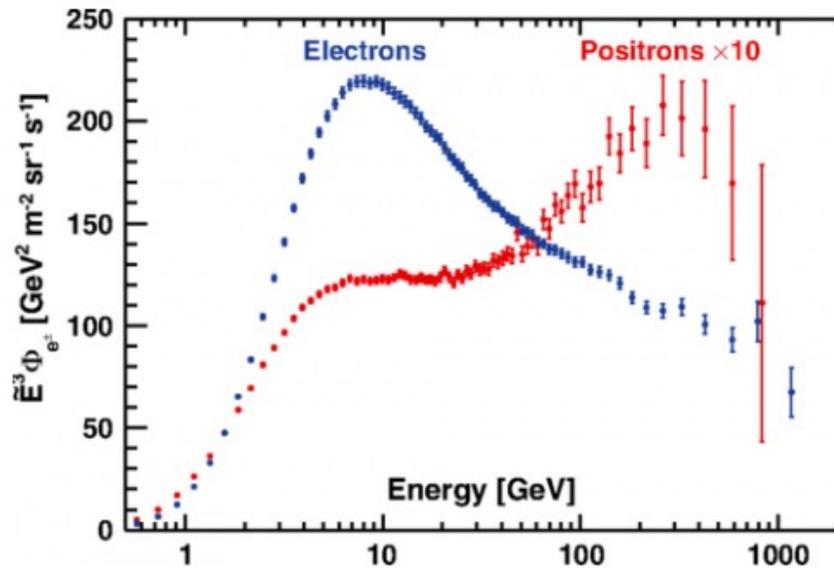
電波でブラックホールの影は見えてきた
でもジェットの根元は不明

別な手法で解明できないか??

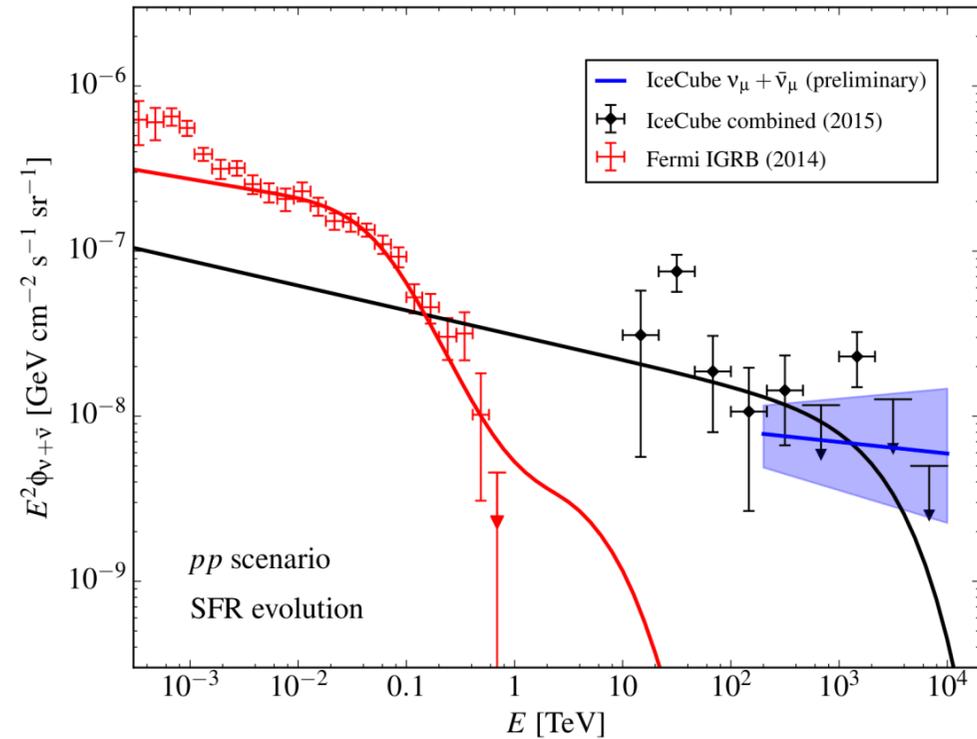
ブラックホール自転の兆候を観測データから探る

誰も気づいていない「何か」が無いのか

陽電子宇宙線
謎の高エネルギー成分



ニュートリノ
誰も予想していなかった宇宙背景成分



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)