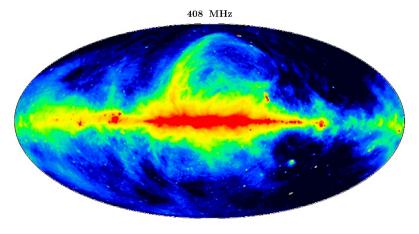
高エネルギー天体物理

浅野勝晃

(高エネルギー天体グループ)

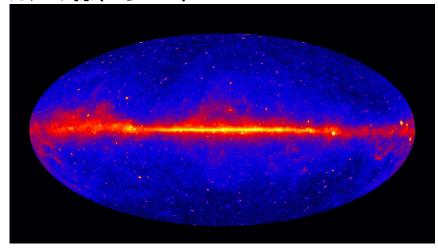
高エネルギーで輝く宇宙

電波(408MHz=1.7x10-6eV)



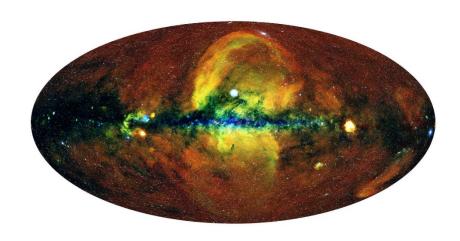
Jodrell-Bank 250-feet + Effelsberg 100-m + Parkes 64-m

ガンマ線(>1GeV)



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

X線(>0.3keV)



ガンマ線(>0.2TeV)

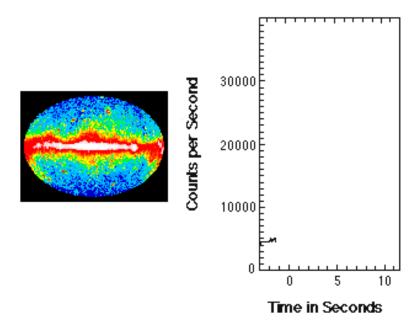


突発現象

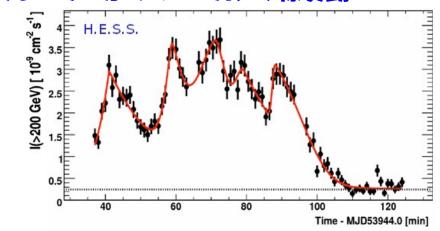
超新星爆発



ガンマ線バースト

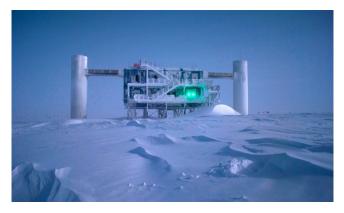


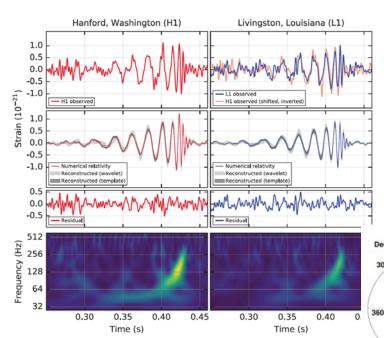
ブレーザーからのTeVガンマ線変動



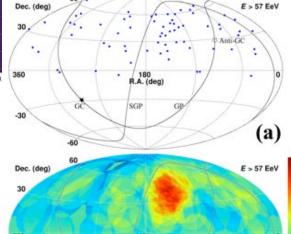
ニュートリノ・重力波・宇宙線

高エネルギー(PeV)ニュートリノ





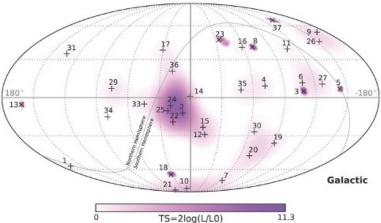
最高エネルギー宇宙線 (100 EeV)



R.A. (deg)

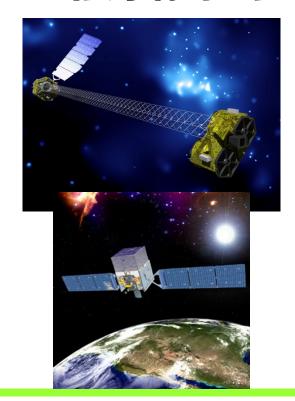
-60

BH+BH 重力波



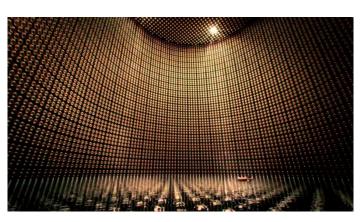
高エネルギー宇宙物理学

- ・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









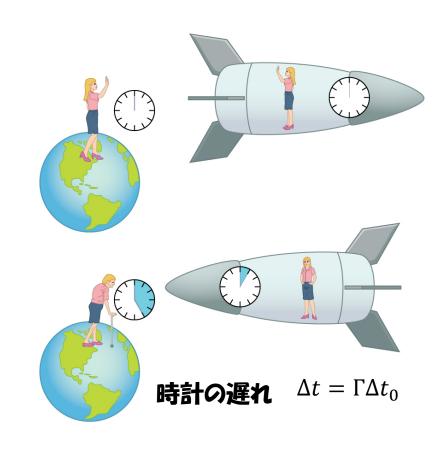


高エネルギーの世界

高エネルギー:相対論的な世界

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

ローレンツ収縮
$$l = \frac{l_0}{\Gamma}$$
 $V=0$ $V=0.3C$ $V=0.6C$ $V=0.9C$



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

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

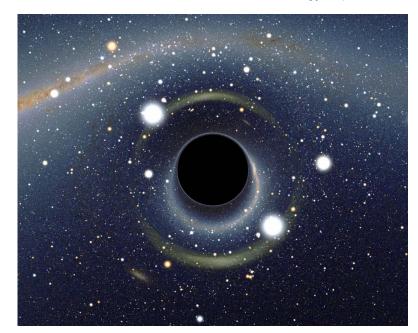
これよりも小さな半径の星はブラックホールになる。 太陽質量なら3kmほど。

回転するブラックホール

角運動量

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

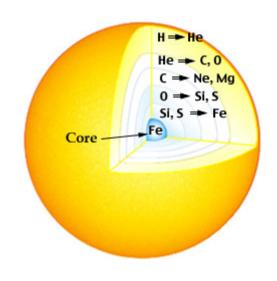
a < 1

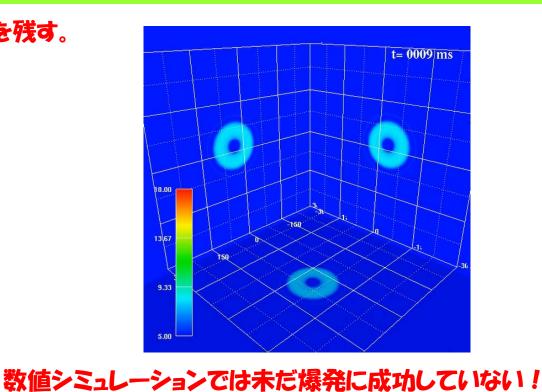


ブラックホールを特徴づける量は質量Mと 回転パラメーターaのみ。

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?

超新星残骸と宇宙線生成

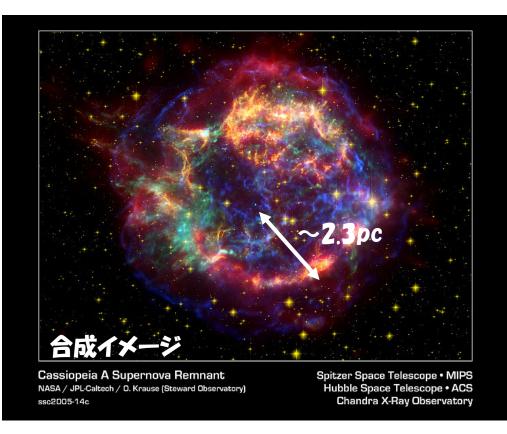


爆発による衝撃波が星間空間を伝播 ↓

衝撃波による粒子加速 高エネルギー粒子の生成

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

1667年頃に爆発したCassiopeia A

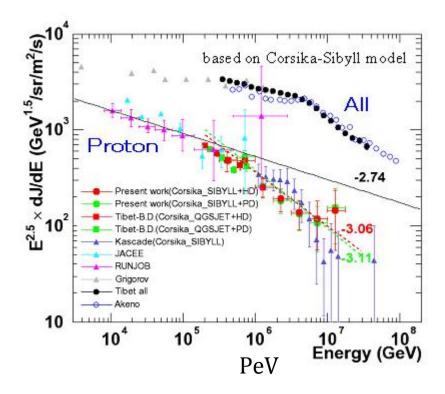


距離:3.4Kpc

膨張速度:4000-5000km/s

中心には中性子星が残される

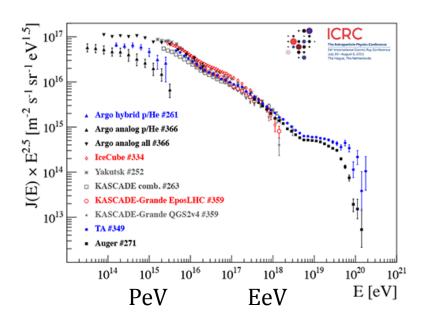
宇宙線



10¹⁵eV = 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。



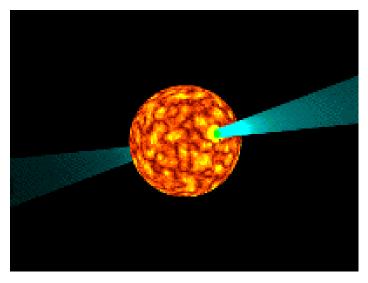
10¹⁸eV = EeV付近の折れ曲がり = Ankle

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

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。

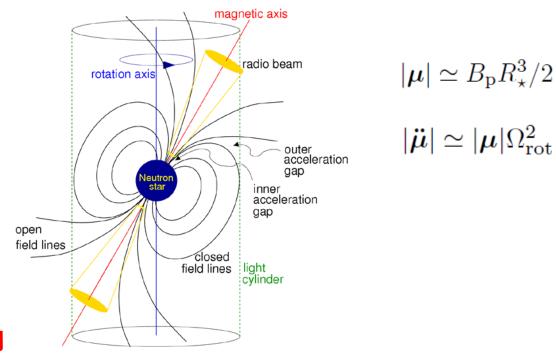
パルサー

パルサー



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(~10¹⁵g/cm³)。規則 正しいパルス放射。

典型的には10¹²G。中には10¹⁵Gき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。



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

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)

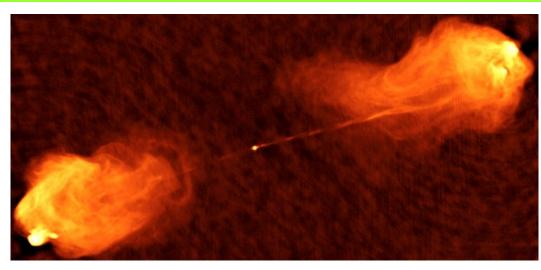
$$\alpha_B = \frac{1}{2} \frac{m_e e^2}{\hbar^2} \frac{B_\perp}{B_{cr}} \Xi(\chi), \quad \chi = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon}{m_e c^2} \frac{B_\perp}{B_{cr}}, \quad B_{cr} = \frac{m_e^2 c^3}{\hbar e} = 4.41 \times 10^{13} \quad G.$$

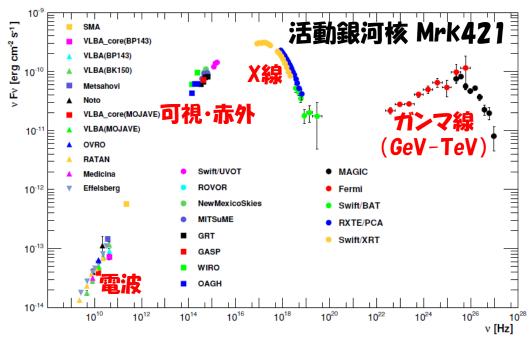
活動銀河核ジェット



宇宙最大のブラックホール(107-109太陽質量) からのジェット噴出

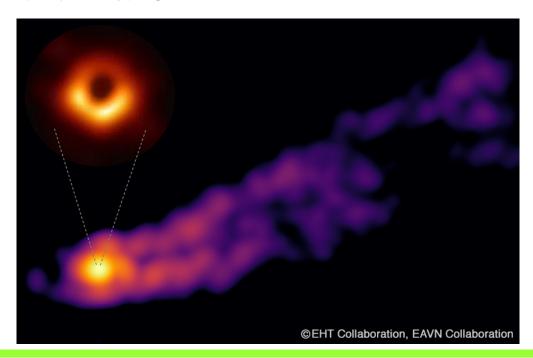
「>10の光速ジェットから電波、X線、ガンマ線を放出。



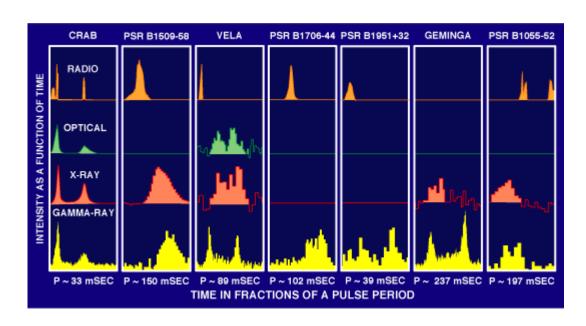


高エネルギー天体物理の目標

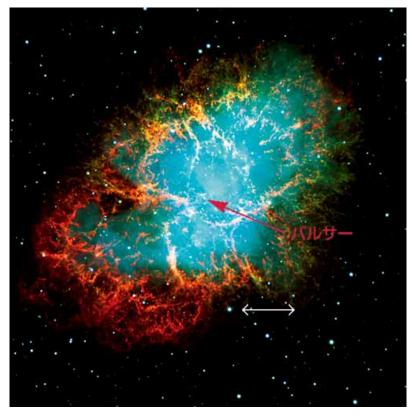
- ・電波からX線・ガンマ線にいたる放射メカニズム
- 高エネルギーまで粒子を加速するメカニズム
- ・ブラックホールから噴出するジェットの生成メカニズム
- ・超新星爆発のメカニズム
- 10²⁰eVを超える最高エネルギー宇宙線の加速源天体
- ・天体からのニュートリノや重力波の放射
- 暗黑物質探査



パルサー



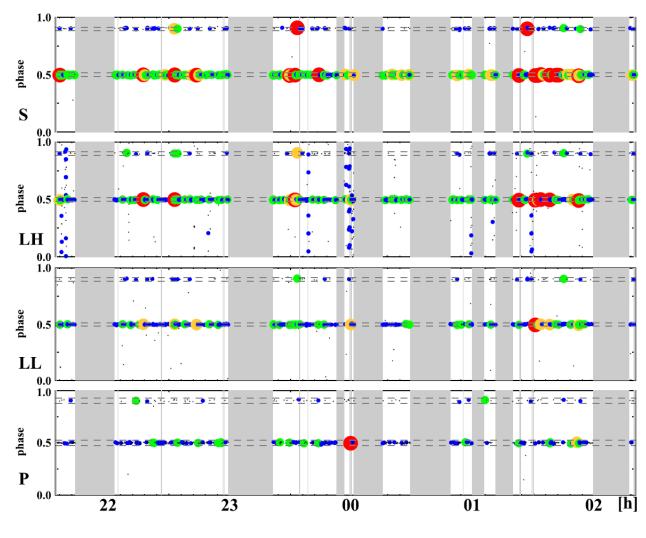
周期的なパルスを発する。主に電波で見つかるが、 X線やガンマ線パルスを放つものも見つかる。

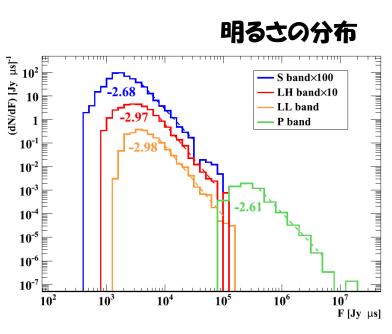


超新星爆発の後に残される。 半径10km、密度~1 G+/cm³ 自転周期 10ms~1s

周期的な放射だけではない

巨大電波パルス





時々ドカンと明るくなる。

Fast Radio Burst

パルサーは基本的に銀河系内天体

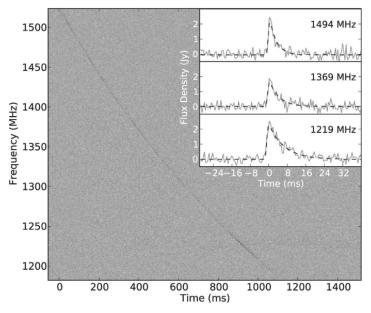
銀河系の外、はるか遠方宇宙で、シノ砂の明るい電波バーストが突然起きる。



今一番盛り上がっている新天体

正体不明だが、巨大電波バーストに似ている。 パルサーに近い種族か。 マグネター(磁場が10¹⁵Gにも達するパルサー) のような天体か。

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

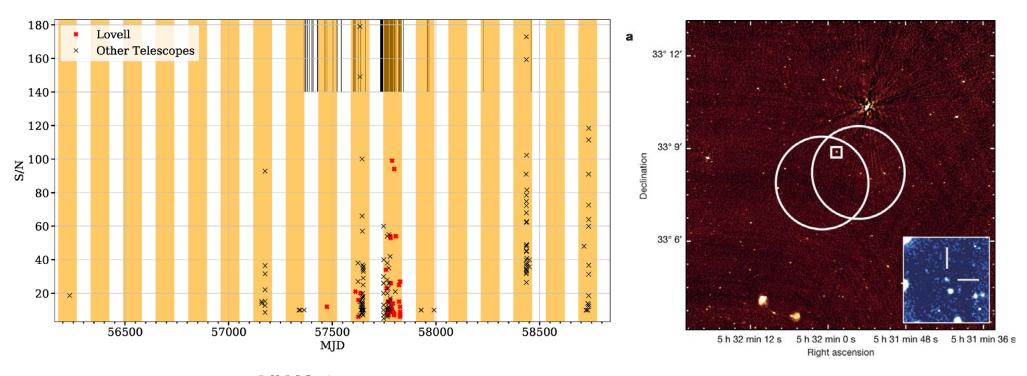


電波の振動数と到着時刻の遅れから、 プラズマ中を長い距離伝播してきたことがわかる。 Gpc はるか遠方宇宙。

繰り返すやつもいる

性質が1発だけのものとは違うので、別種族?

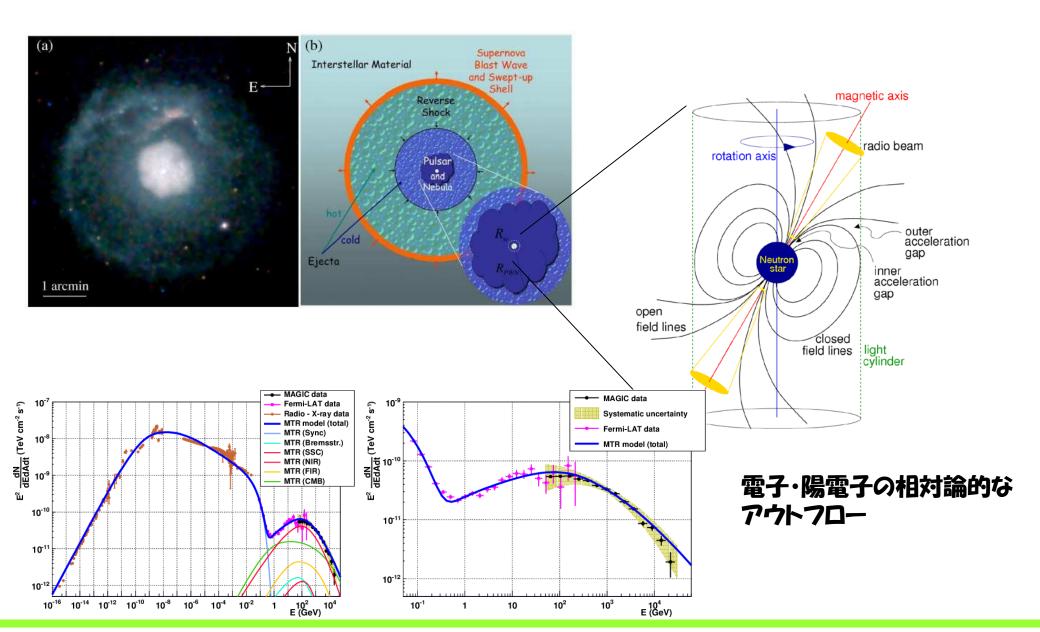
FRB121102



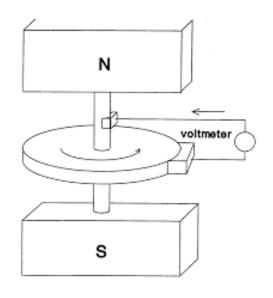
157日の周期性? 連星周期?

定常的に輝く電波源も発見

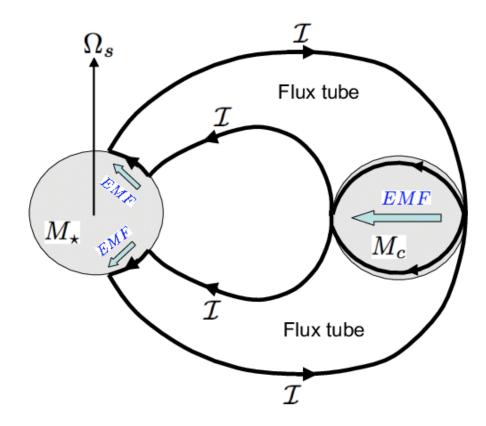
パルサー星雲



Unipolar Induction



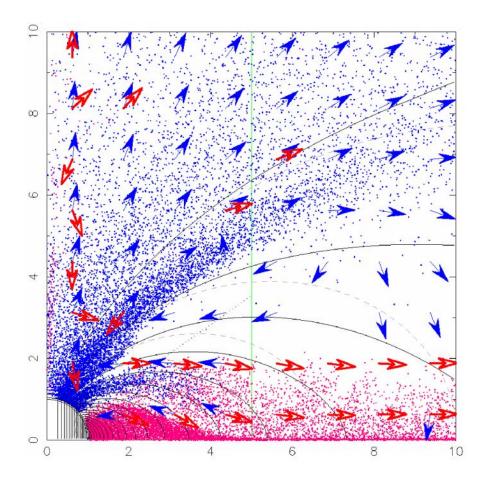
磁化した導体を自転させると、真ん中と外側に電位差が生じる。



パルサーでも同じ。
電位差
$$\Delta \phi = \frac{B\Omega_S^2 R_S^3}{2c^2}$$

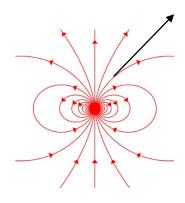
原理的には電荷eの粒子に最大e $\Delta \phi$ のエネルギーを与えられる。

パルサー磁気圏



磁気圏の中は中性ではなく、 電場がある。その構造は未確定。 そうした電場で電荷が加速。 エネルギー源は中性子星の自転 →先ほどのUnipolar Inductionを介する

曲率放射



$$\varepsilon_{\text{typ}} = \frac{\hbar c \gamma^3}{R_{\text{curv}}}, \frac{dE_e}{dt} = \frac{2e^2 c \gamma^4}{3R_{\text{curv}}^2}$$

強力な電位差で、星表面から電荷が引きずり出され、 加速した電子がガンマ線を放ち、そこから 二次的に電子・陽電子が生まれる。 磁気圏はプラズマで満たされる。

Magnetic Pair Cration

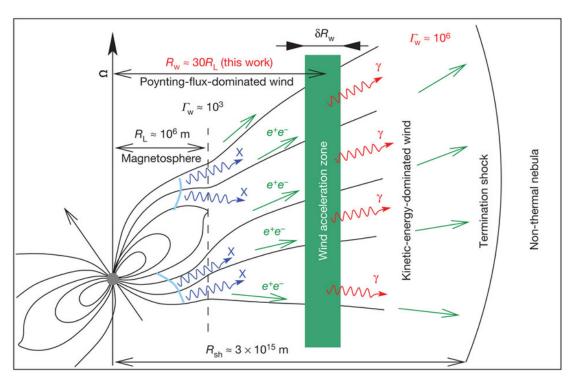
$$\gamma + B \rightarrow e^- + e^+$$

Photon-photon

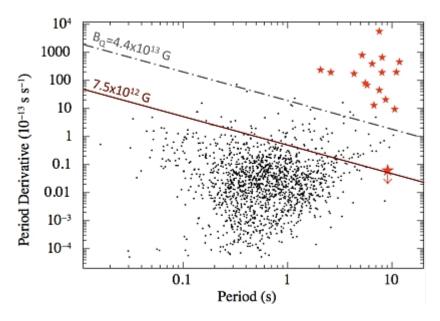
$$\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+$$

パルサー風

プラズマはローレンツ因子Γ > 10³の相対論的速度で 放出され、パルサーはエネルギーと角運動量を失う。 エネルギーの一部はパルス放射に。大部分はパルサー星雲に。



$$B_p = 3 \times 10^{12} \sqrt{\frac{P}{1s}} \sqrt{\frac{\dot{P}}{10^{-15}}} \sqrt{\frac{I}{10^{45} \text{ g cm}^2}} \left(\frac{R_*}{10 \text{km}}\right)^{-3} \text{G}$$

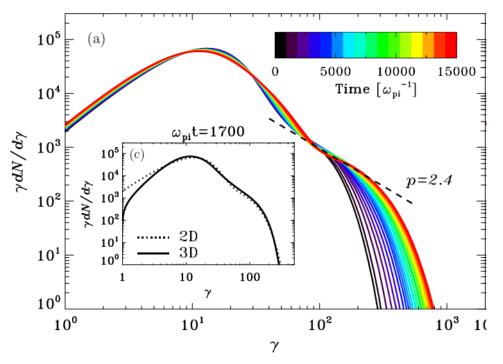


$$\frac{dE}{dt} = \frac{B^2 \Omega_{\rm s}^4 R_{\rm s}^6}{16c^3}$$

自転エネルギーの減少→スピンダウン

粒子加速

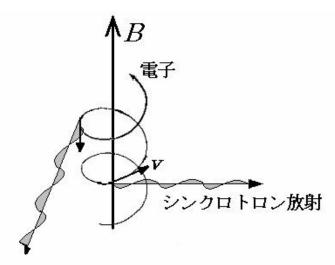




シミュレーション中の加速粒子スペクトル

放射過程

シンクロトロン放射

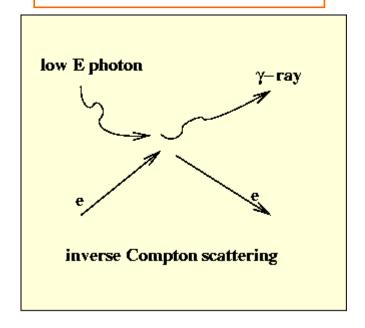


シンクロトロン放射。Vは電子の速度ベクトルを表す。シンクロトロン放射は、磁力線 に垂直に直線偏波しており、磁場に垂直な速度成分 V_\perp 方向のごく狭い領域にのみ放射 される。

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 $\varepsilon_{\rm typ} = \frac{3\hbar \gamma^2 eB}{2mc}$

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

逆コンプトン散乱



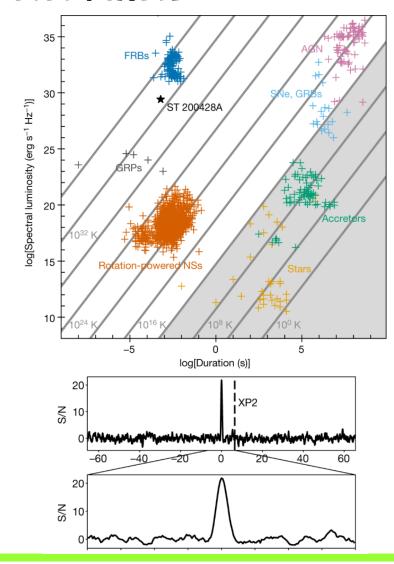
典型的な光子のエネルギー $\varepsilon_{\rm typ} = \gamma^2 \varepsilon_0$

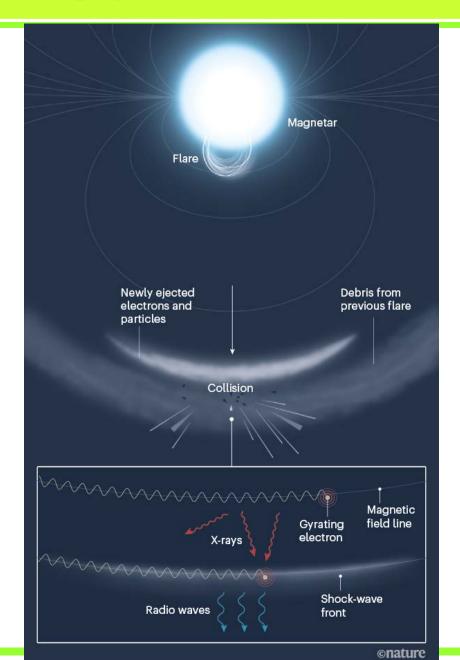
放射率
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{4}{3}c\sigma_{\rm T}\gamma^2 U_{\rm ph}$$

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

銀河系内のマグネターからのFRBの発見

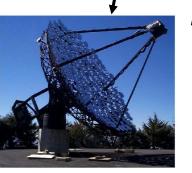
通常銀河系内マグネターはX線で光り、電波は暗い。 2020年4月27日





まとめ





天文学 宇宙論





- ・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)