

宇宙物理入門

講義資料

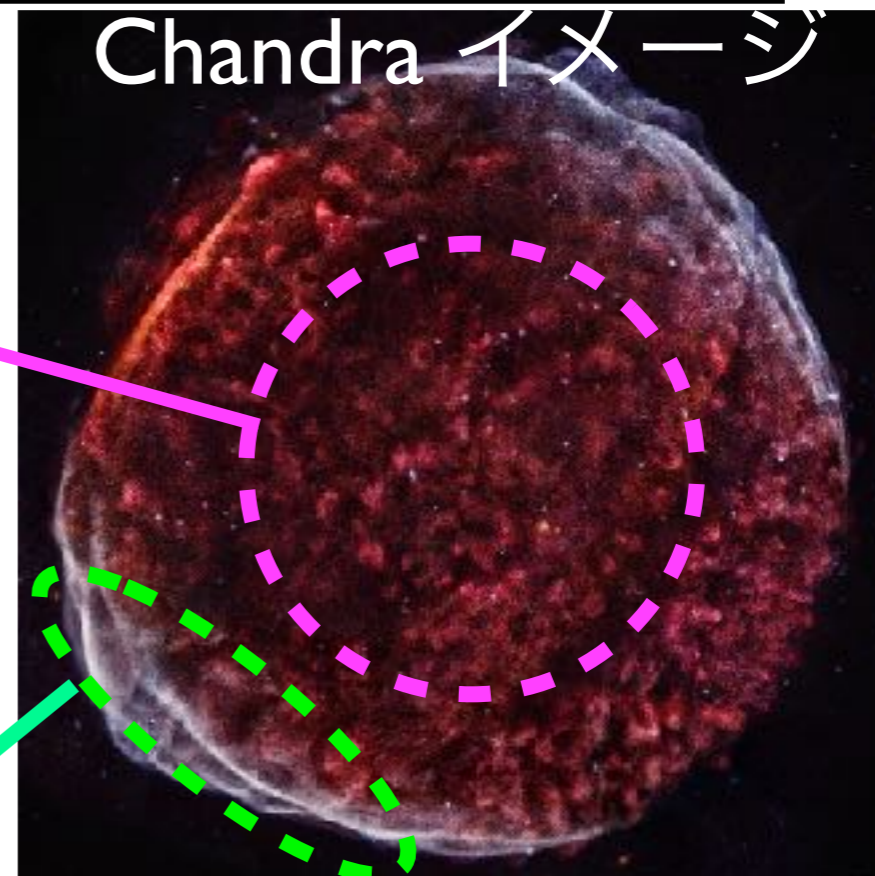
第11, 12章：非熱的宇宙・ビーミング

Ver. 1

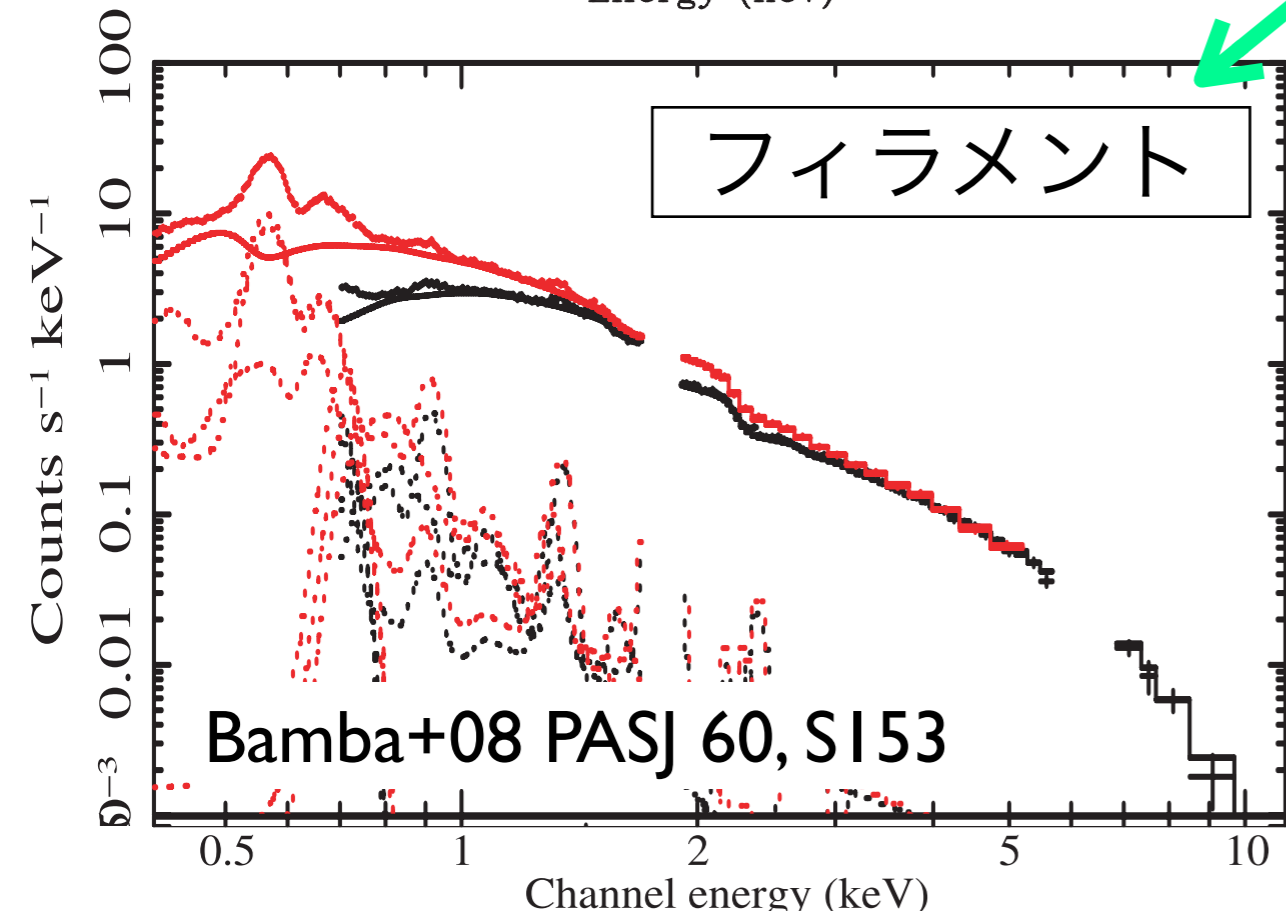
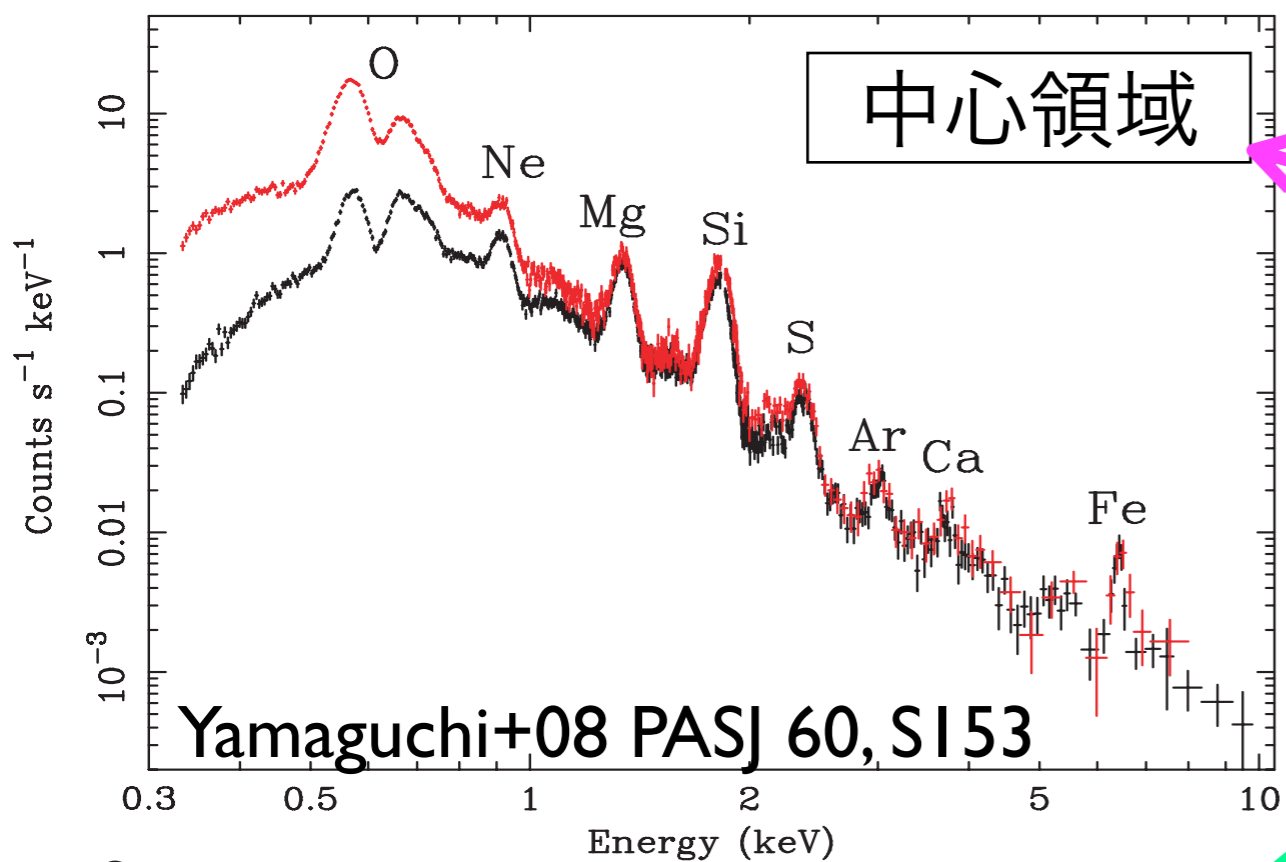
鶴 剛 (tsuru@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp)

非熱的宇宙の発見：超新星残骸 SN1006

「すざく」 スペクトル

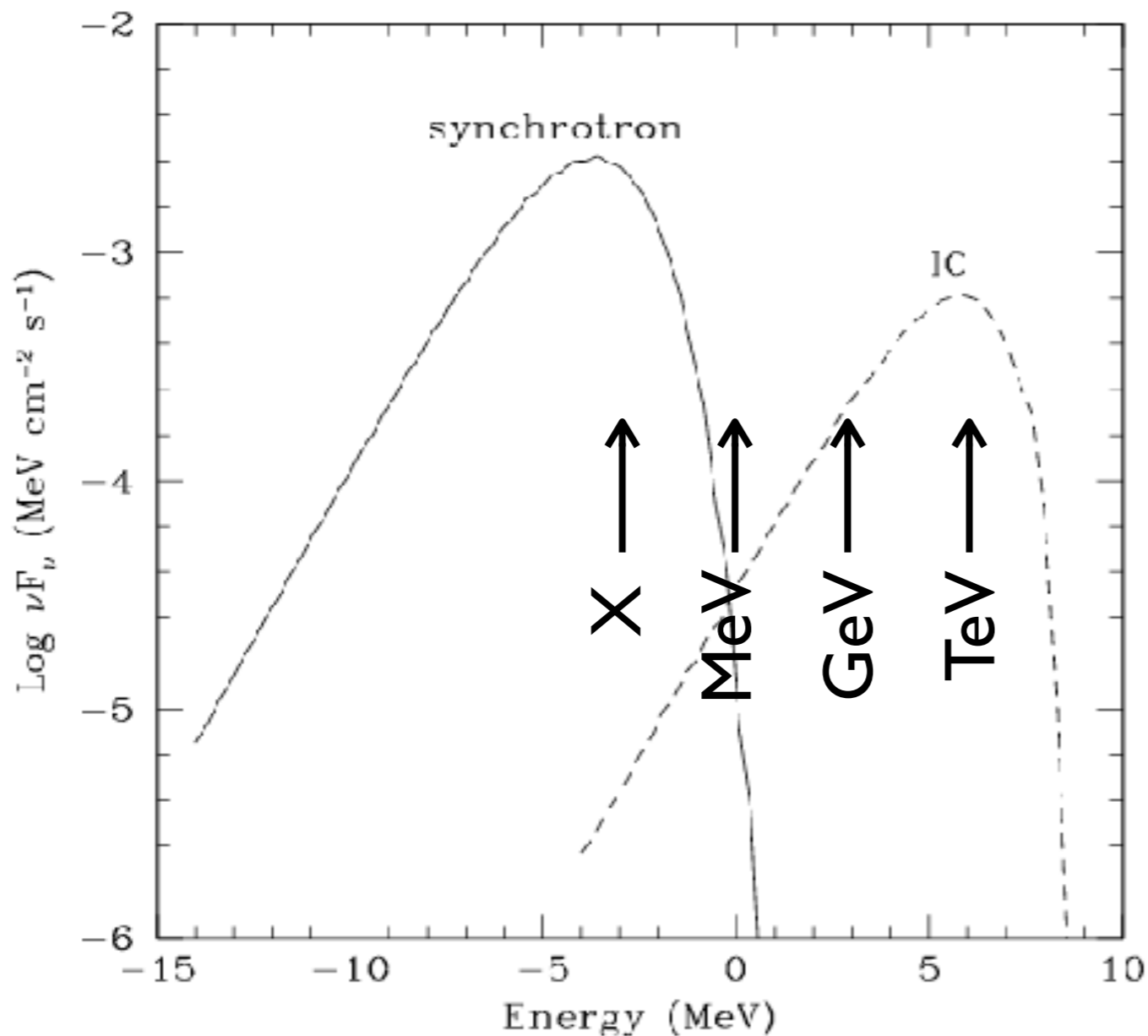


NASA/CXC/Middlebury College/F.Winkler

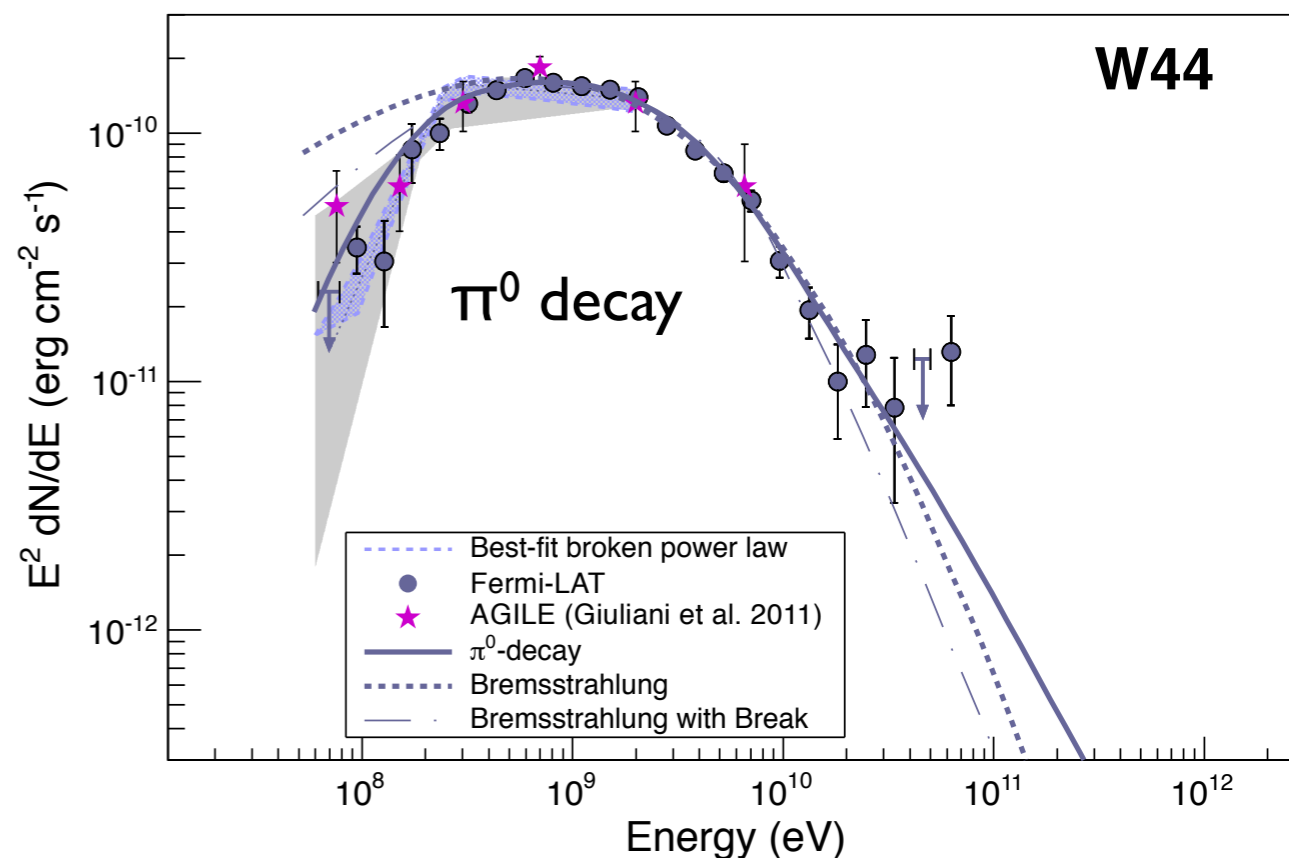


- 中心領域：熱制動放射，熱的輝線
 - X線熱プラズマ
- フィラメント：シンクロトロンX線
 - ~10TeV 電子の存在
 - 宇宙の加速器

TeV電子からの放射



陽子加速の証拠 (田中, 2013)

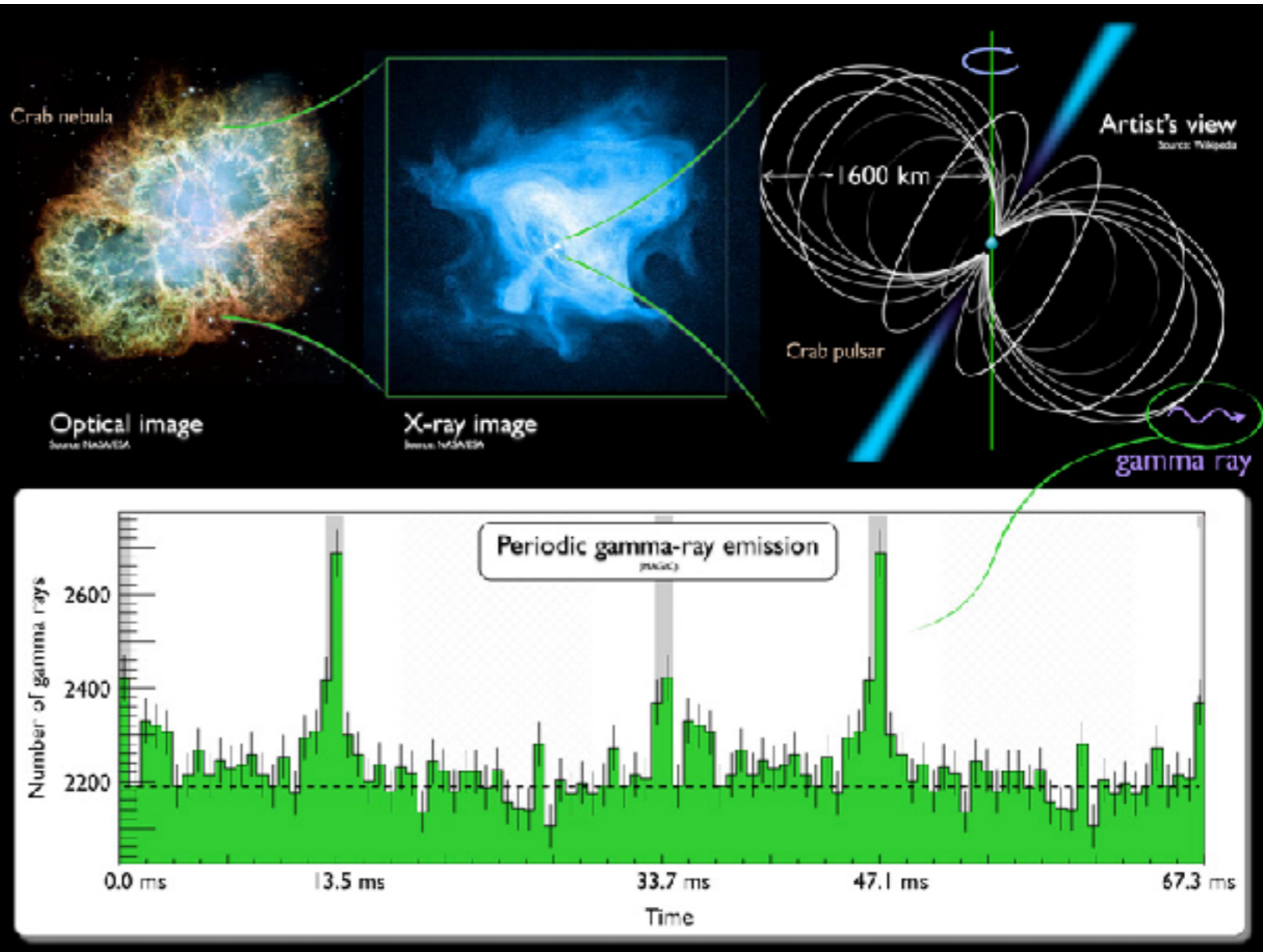


磁場と衝突 \Rightarrow 強いX線放射

パルサー風星雲：宇宙高エネルギー粒子の加速源 (I)⁴

The Crab Nebula

Radio Optical X-ray
(synchrotron)



<http://apod.nasa.gov/apod/ap020920.html>

<http://phys.org/news/2012-03-powerhouse-crab-nebula.html>

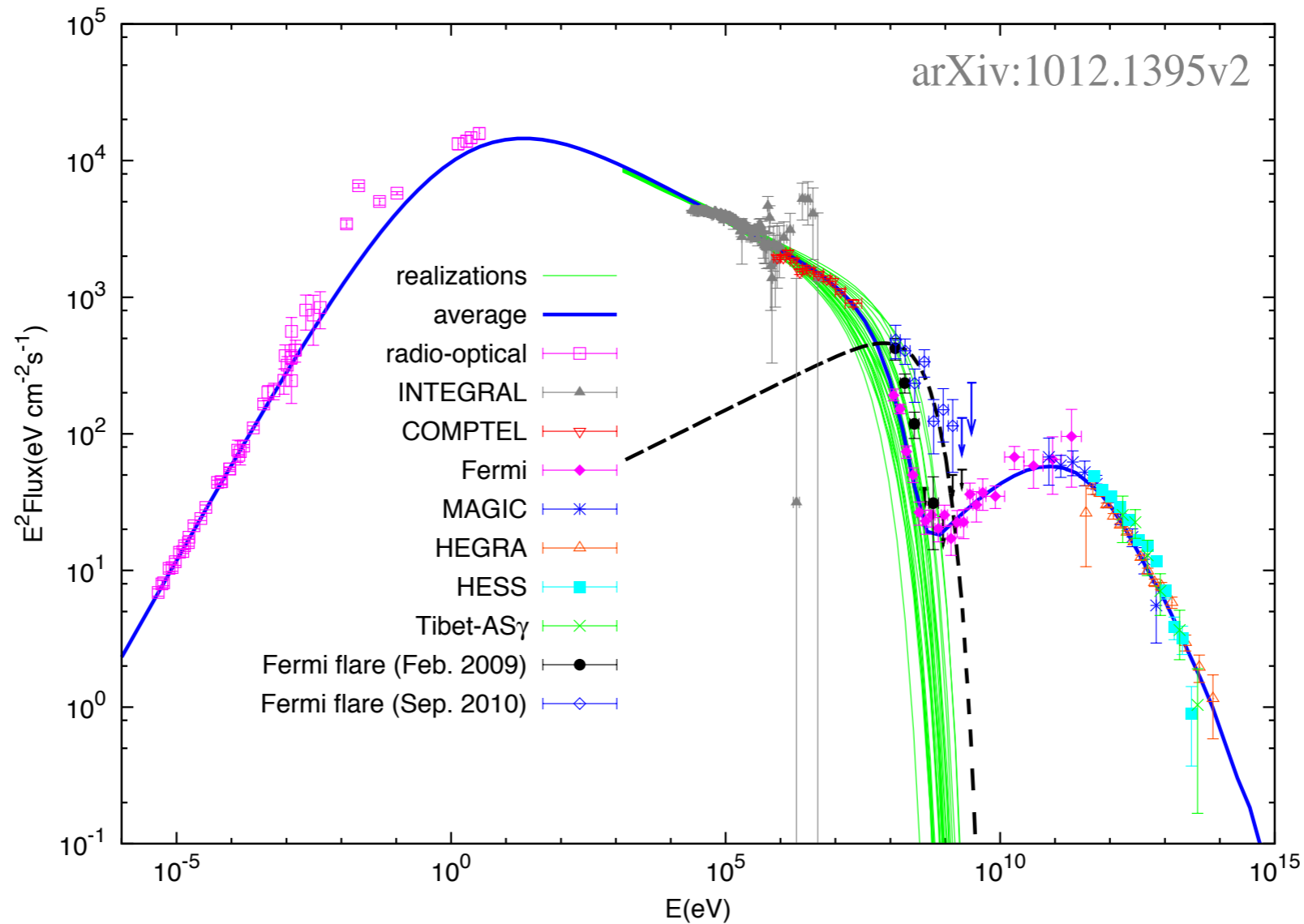


Fig. 1.— Spectral energy distribution of the Crab nebula. The thin green lines denote the simulated synchrotron spectra of 30 realizations. The thick blue line denote the fit to the multi-wavelength steady state observational data, which can be understood as the average result of many realizations in our model. The black-dashed curve denotes the contribution from a maximum size knot with slightly specific parameters (see the text), which is shown to be able to explain the large flare in September 2010. The references of the observational data are: radio-optical (Macías-Pérez et al. 2010), INTEGRAL (Jourdain & Roques 2009), COMPTEL (Kuiper et al. 2001), Fermi/LAT (Abdo et al. 2010b), MAGIC (Albert et al. 2008), HEGRA (Aharonian et al. 2004), HESS (Aharonian et al. 2006), Tibet-AS γ (Amenomori et al. 2009), and Fermi/LAT flares (Abdo et al. 2010a).

非熱的宇宙の発見

X線などの高エネルギー観測により高温プラズマが発見され、従来の冷たい宇宙観は書き換えられた。これを”The Hot Universe”と呼ぼう。これは、基本的には重力によって得られたエネルギーが準静的な平衡状態に落ちた時の状態である。重力がエネルギー源である以上、粒子エネルギーは重力で得られるエネルギーを越えることはできない。

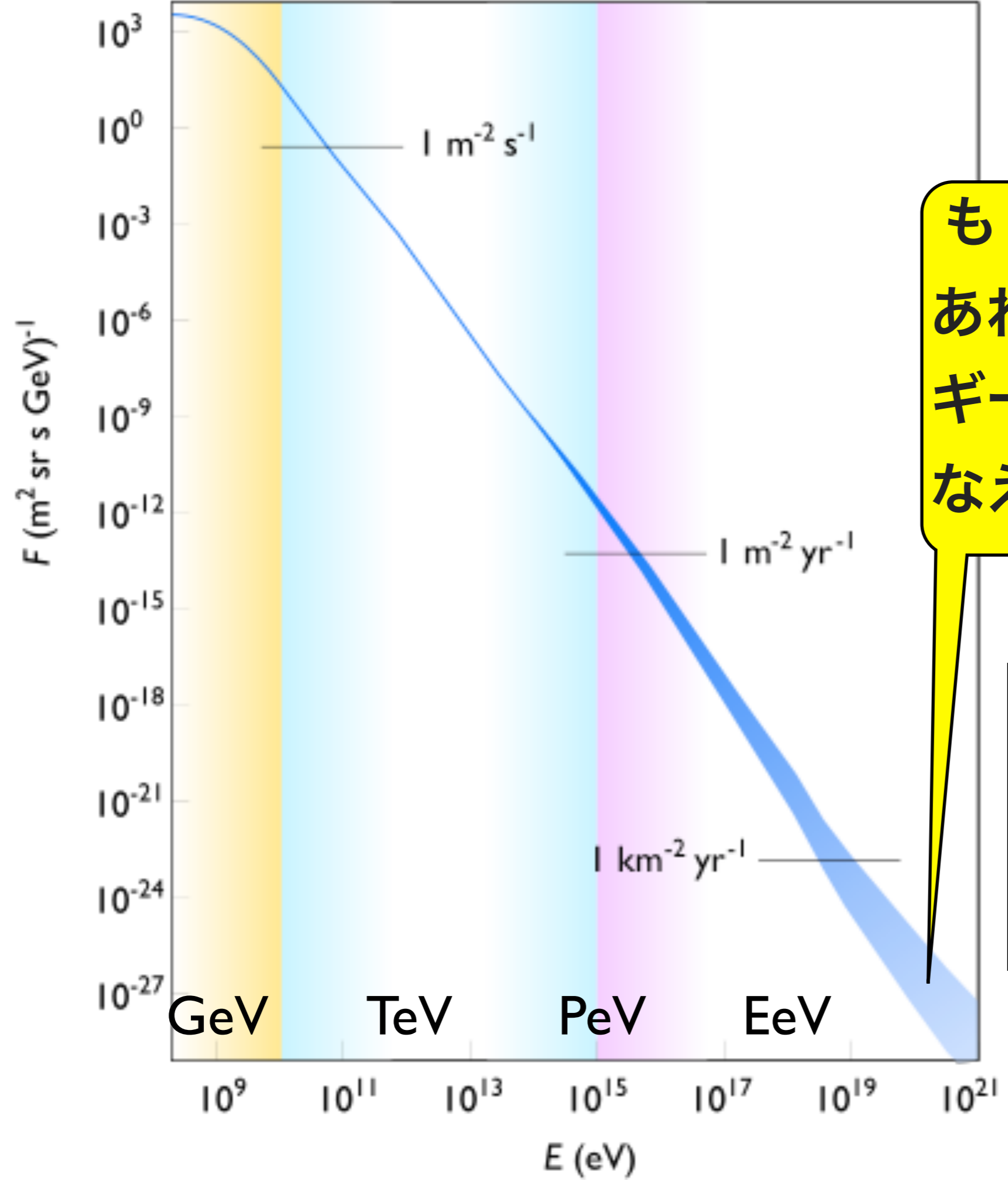
最大のエネルギーを得られる重力系はもちろんブラックホールであり、その最大エネルギーは静止質量の1/2であった。すなわち、

$$(11.1) \quad E_p < \frac{1}{2}m_p c^2 = \frac{1}{2}938\text{MeV}$$

である。つまり、”Hot Universe”では $kT \sim 500\text{MeV}$ を越えることはないのである。

しかし実際には、超新星残骸でのシンクロトロンX線やコンプトンガンマ線、高速回転するブラックホールから放射される鋭く絞られた宇宙ジェット、そして宇宙線の観測からそれをはるかに越える超高エネルギー粒子を持つ粒子が次々発見された。これは重力では説明できない。

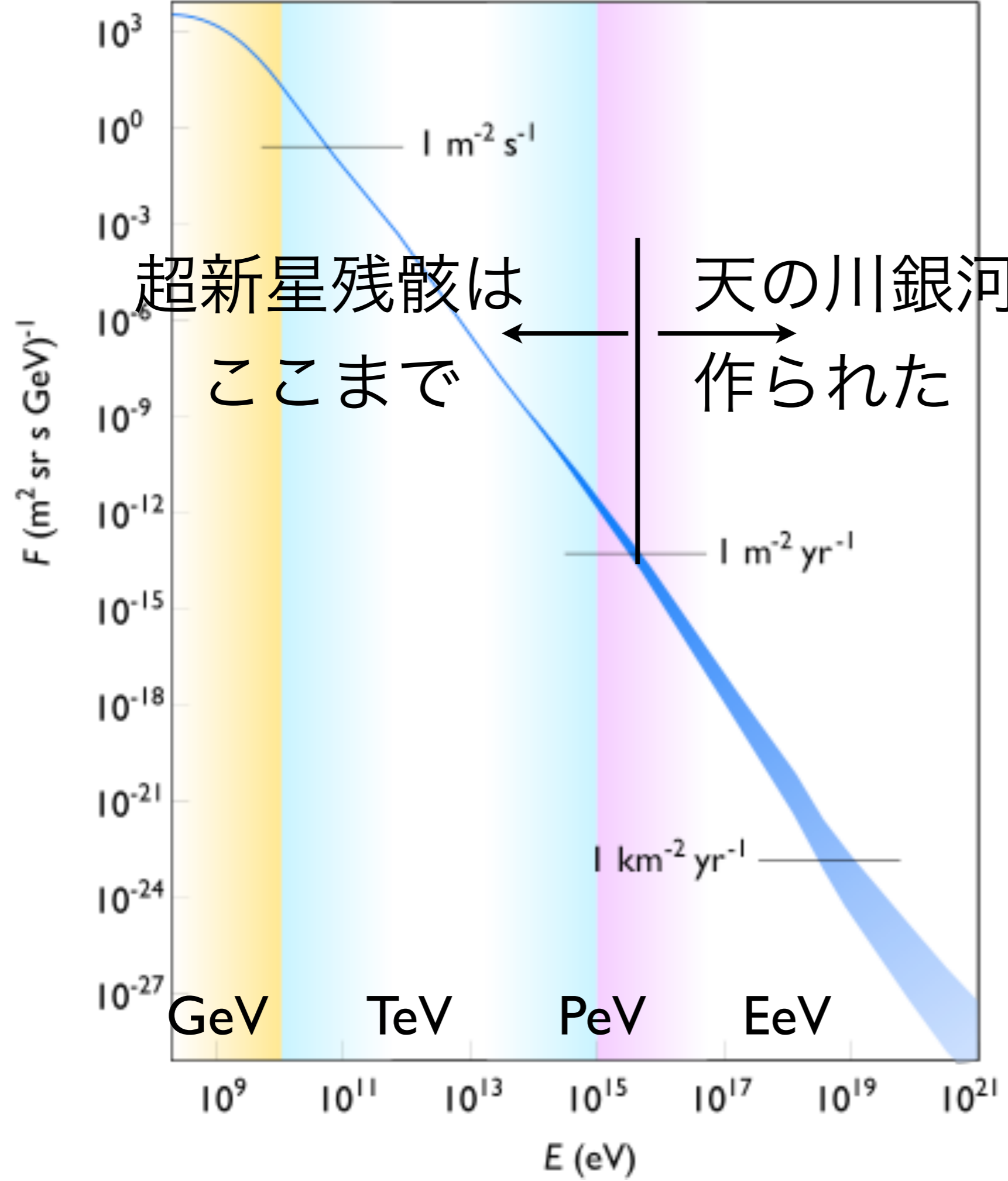
宇宙線

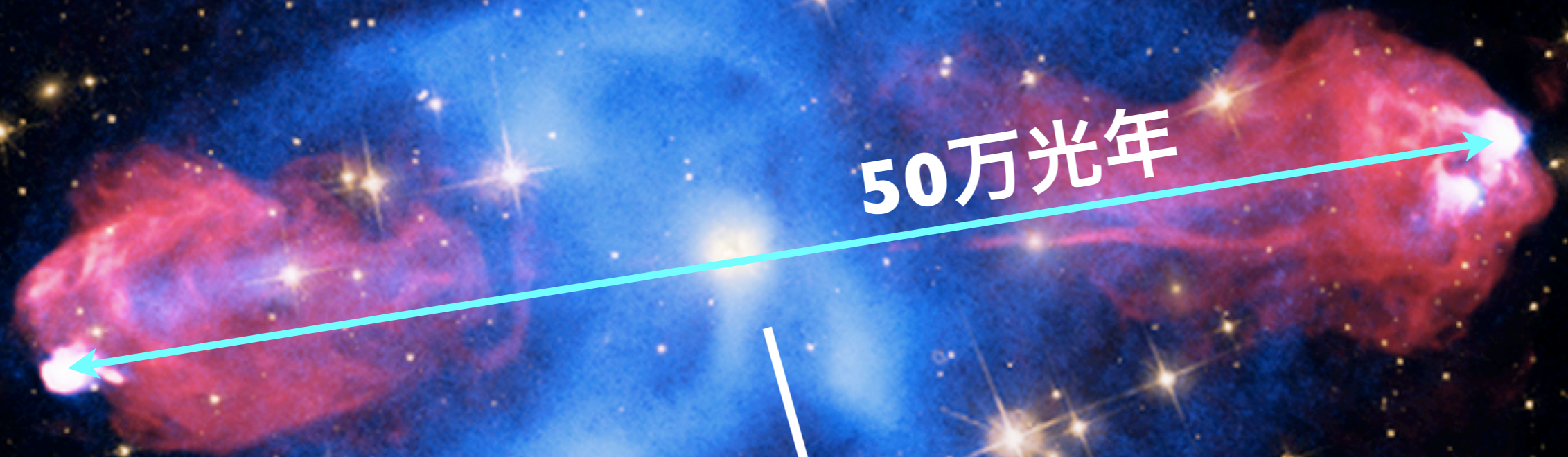


もしこの粒子が1g
あれば世界のエネル
ギーを1000年分まか
なえる。

こんな高エネル
ギー粒子はどこ
で作られる？

宇宙線



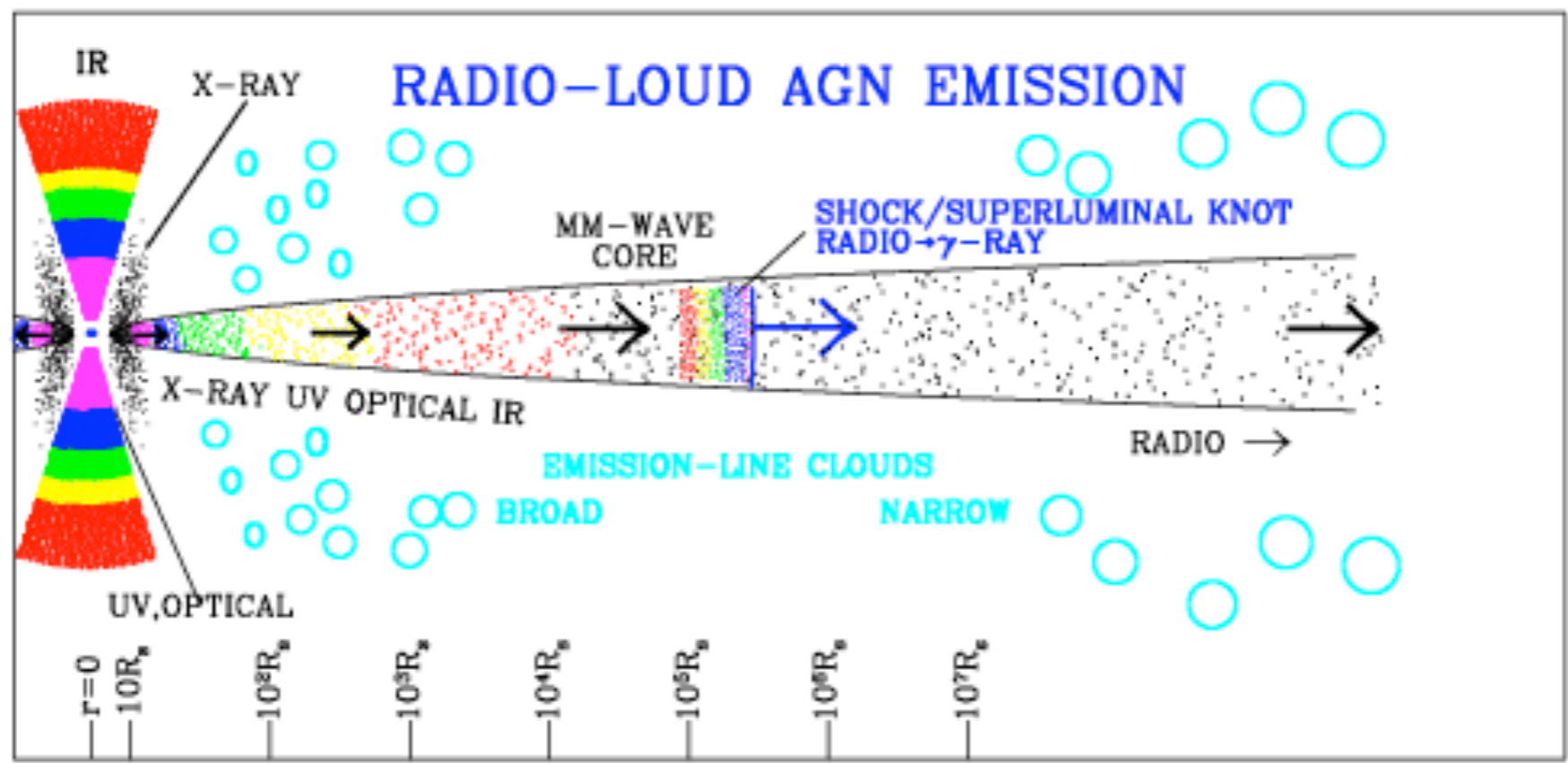
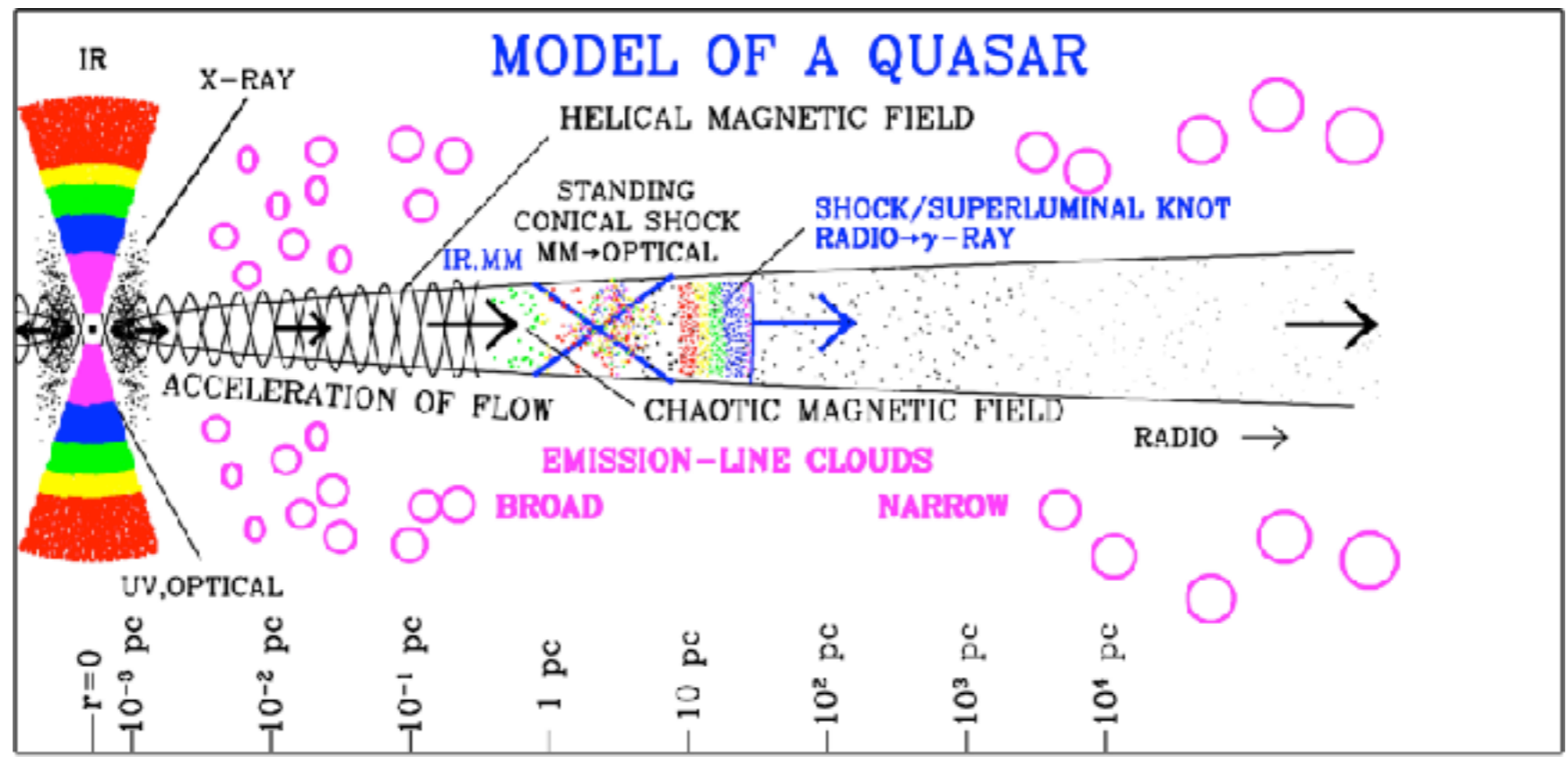


**超巨大ブラックホール
(太陽の100万倍から10億倍)**

<http://chandra.harvard.edu/photo/2015/iyl/more.html>

(Credit: X-ray: NASA/CXC/SAO; Optical: NASA/STScI; Radio: NSF/NRAO/AUI/VLA)

ブラックホールからのジェット



Blazar: ブラックホールからのジェット

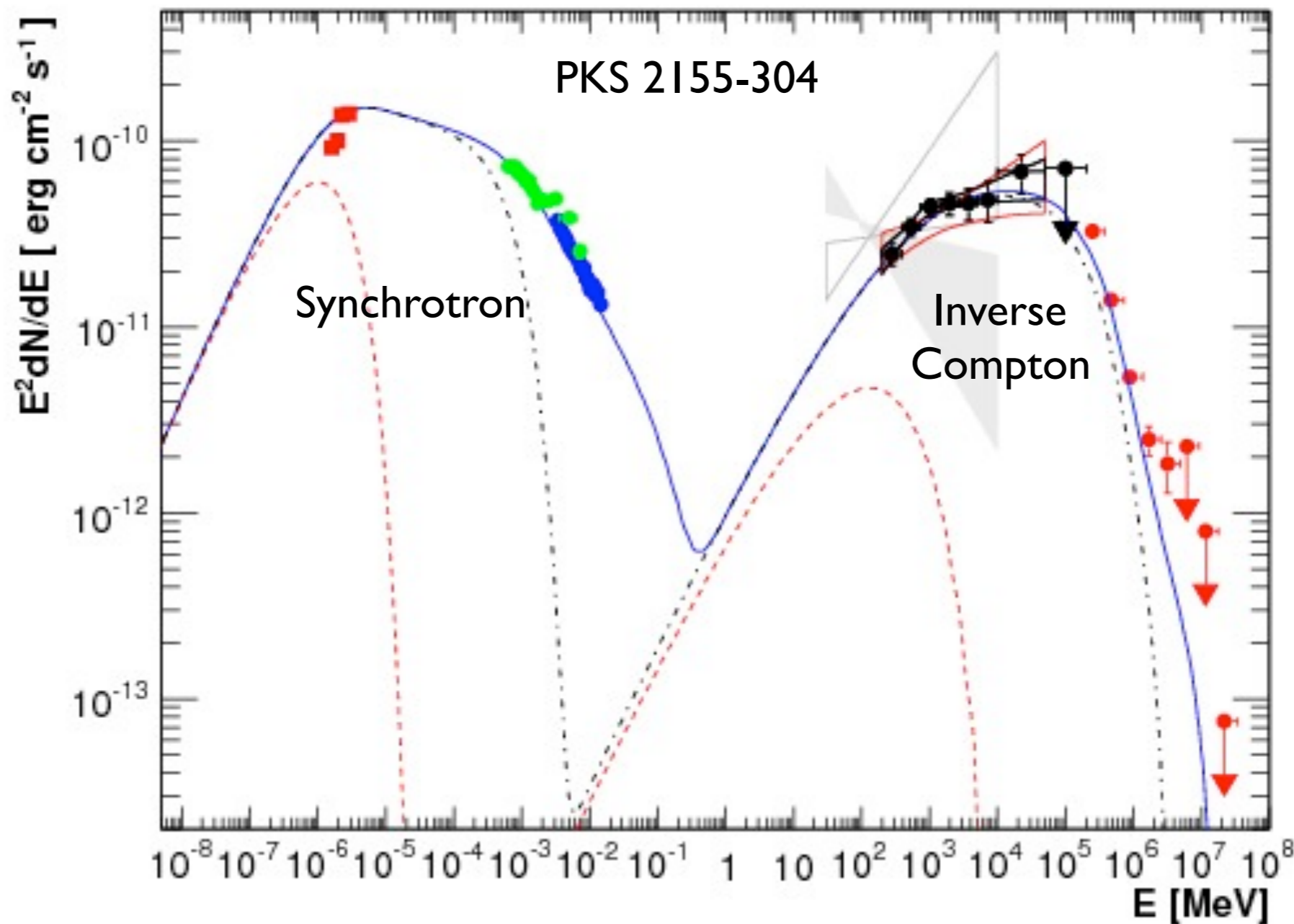


Fig. 3: Broad-band emission spectrum of PKS 2155-304, with simultaneous measurements in the optical band from the ATOM telescope, in the X-ray band by RXTE and Swift, in the high energy band by Fermi, and at very high energies by H.E.S.S. The red band corresponds to Fermi observations during the joint campaign (MJD 54704-54715), the black data points cover an enlarged time frame (MJD 54682-54743). Grey bands are archival EGRET data. The full line illustrates the spectrum obtained with a synchrotron self-Compton (SSC) model. The red and blue dashed lines indicate the spectra obtained when electrons above high (red) and very high (blue) energies are omitted, illustrating that in this model highest-energy electrons are responsible for X-ray emission, but contribute little to emission in the Fermi and H.E.S.S. bands.

非熱的宇宙の発見

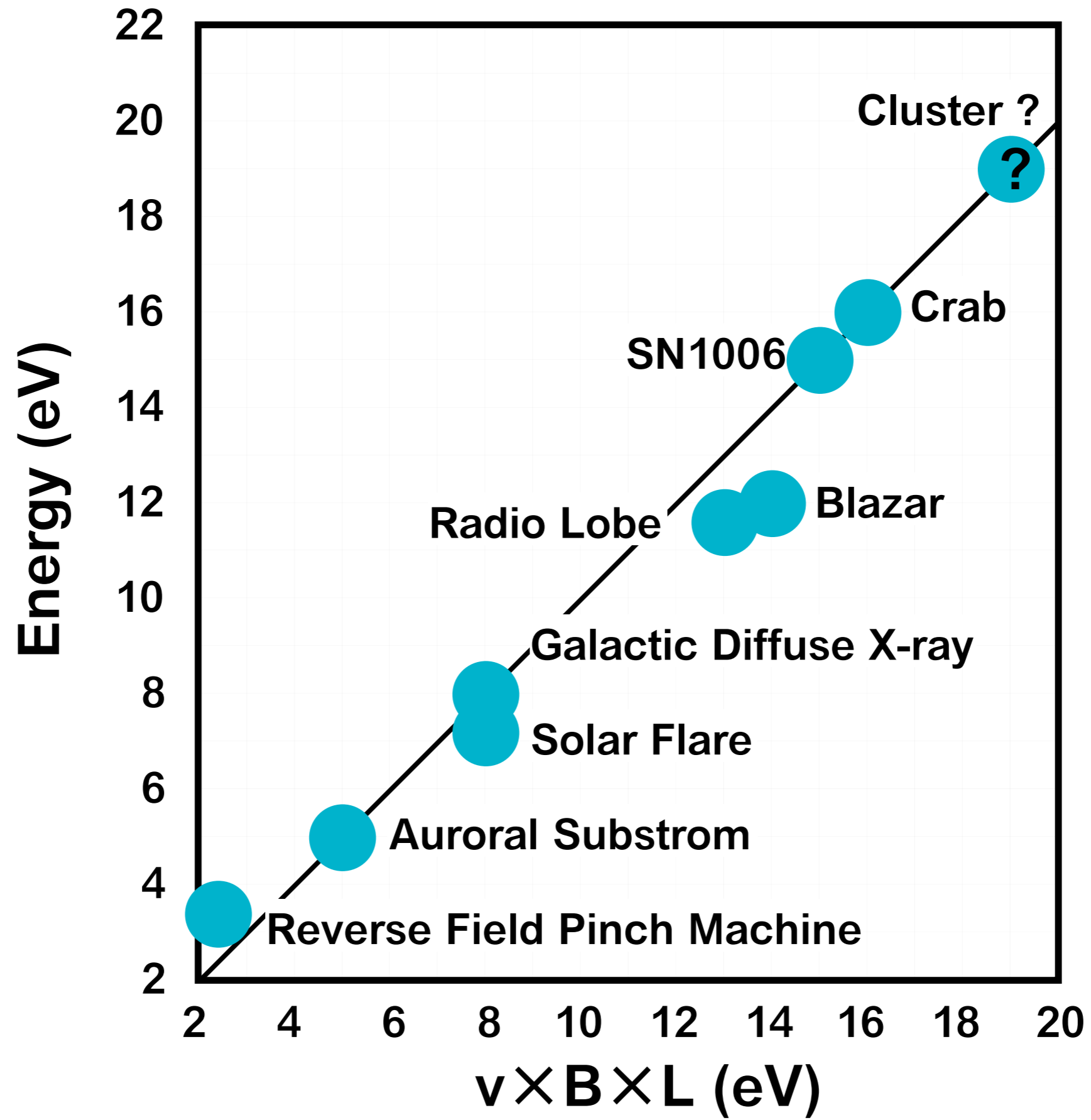
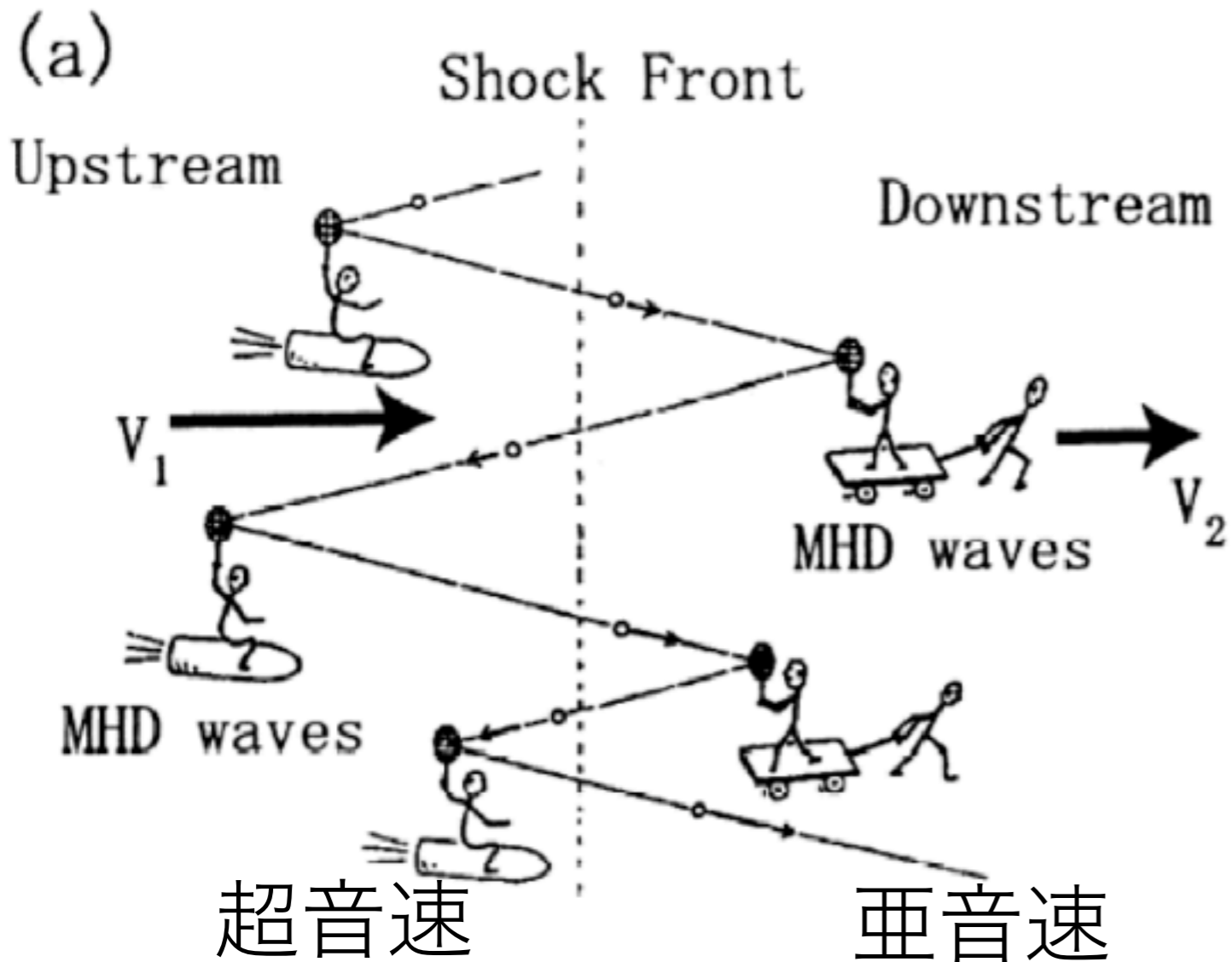


図 11.5: 誘導起電力と観測されている粒子エネルギー

衝撃波加速(1)

衝撃波静止系



Fermi加速

上流の速度の大きな散乱体と正面衝突する

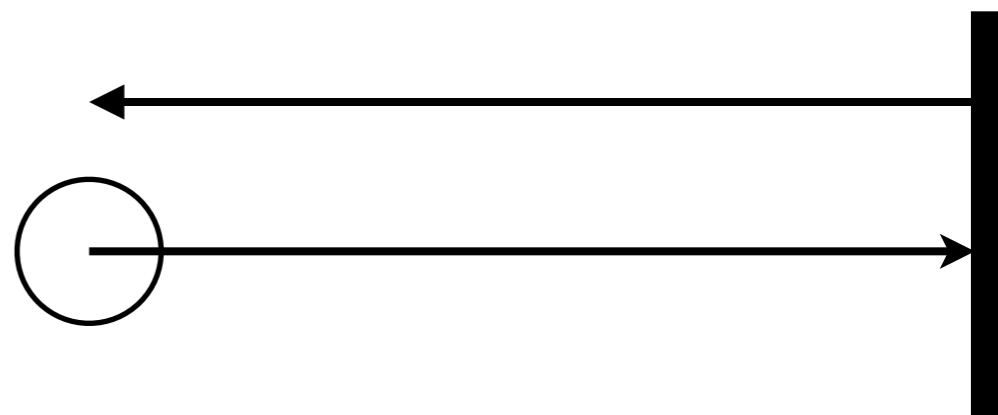
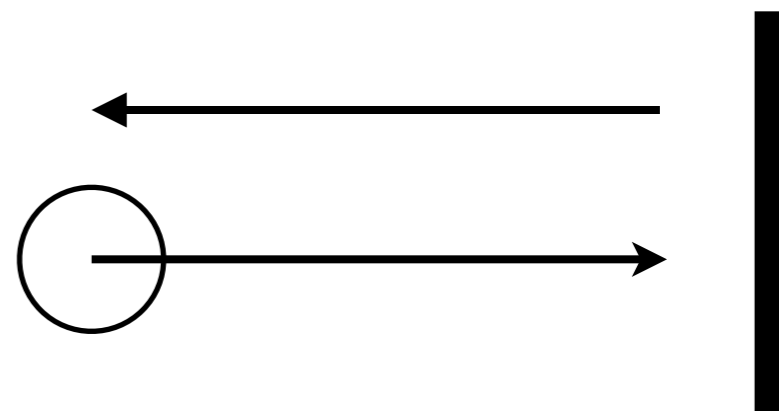
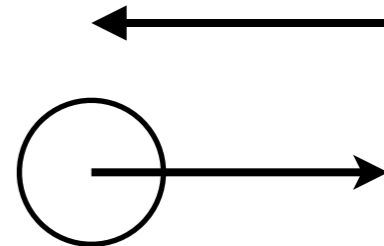
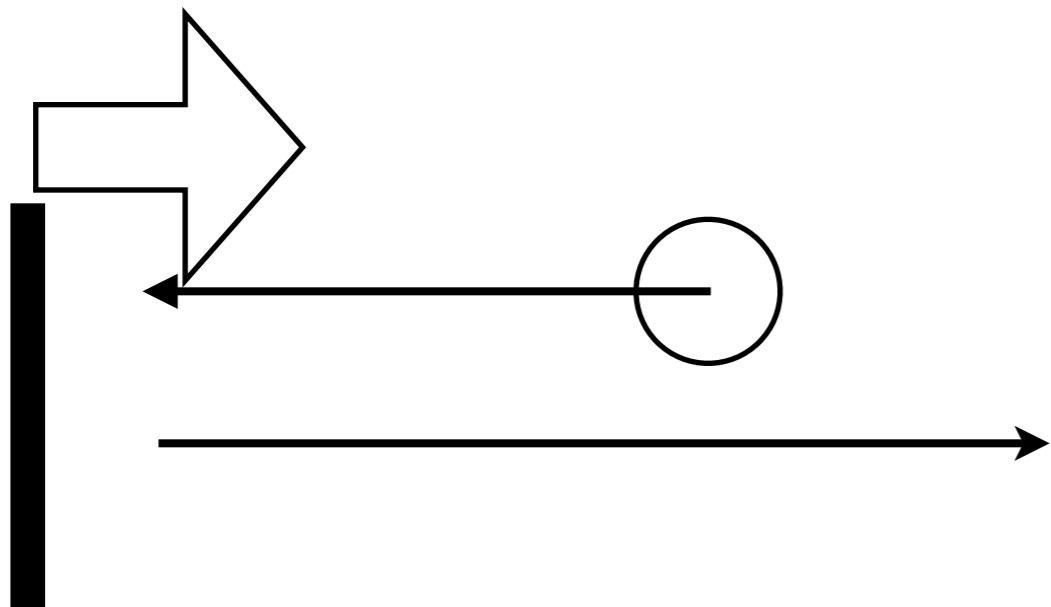
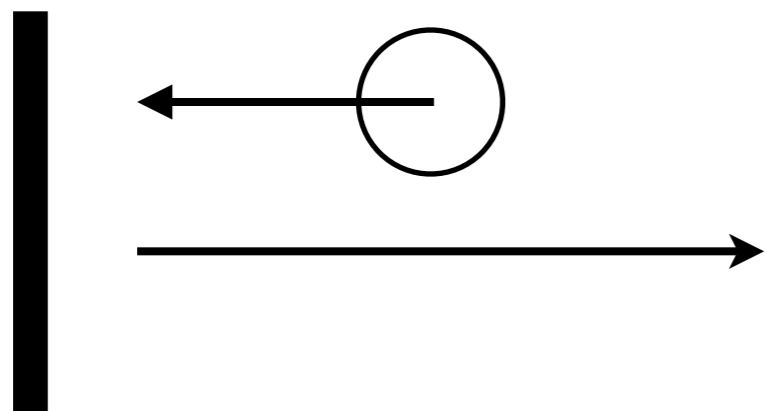
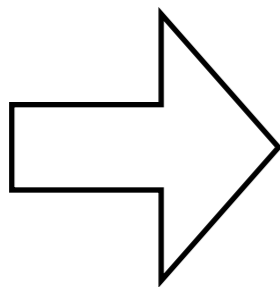
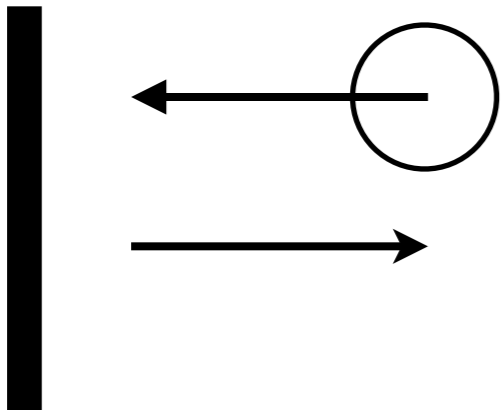
下流に飛ぶ

下流の速度の小さな散乱体に追突する

上流に飛ぶ

⋮

衝擊波加速(2)



ビーミング(1)

速度 $V = \beta c$ で進む物体を進行方向と θ をなす角度から観測する場合を考える。

放射源の固有系で測定した周波数を ν_s 、観測者の系で測定した周波数を ν_{obs} 、

ローレンツ変換より

$$V = \beta c, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$\nu_s = \gamma(\nu_{\text{obs}} - \beta \nu_{\text{obs}} \cos \theta_{\text{obs}})$$

$$\nu_{\text{obs}} = \nu_s \delta$$

$$\delta \equiv \frac{1}{\gamma(1 - \beta \cos \theta_{\text{obs}})} = \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \beta \cos \theta_{\text{obs}}}$$

となる。

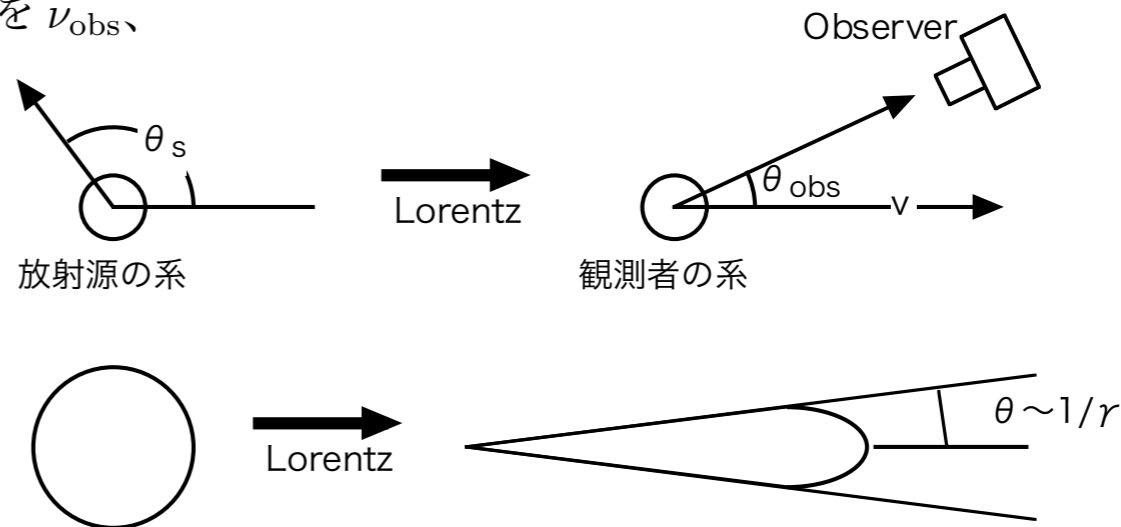


図 12.6: ビーミング

δ はビーミング因子と呼ばれるものである。 γ はビーミングする物体固有の値であるのに対し、 δ は見掛けの値である。

時間は周波数の逆数なので、放射源での時間間隔 Δt_s と観測者での時間間隔 Δt_{obs} は

$$\Delta t_{\text{obs}} = \Delta t_s / \delta \quad \text{となる。}$$

放射が放射源で 1 秒間続いたとすると、観測者では $1/\delta$ 秒間に圧縮されて観測されることになる。

δ は θ の関数である。よって、同じ放射源を観測しても真正面および後方から観測した場合はそれぞれ

$$\delta(\text{head-on}) = \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} \quad \delta(\text{tail-on}) = \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}} \quad \text{となる。}$$

同じ放射源からの光子を見ても、見る方向によって見え方が違うということである。

さらに、放射源の固有系で放射される光子の方向 θ_s と、観測者の方向 θ には次の関係がある。

$$\cos \theta_s = \frac{\cos \theta_{\text{obs}} - \beta}{1 - \beta \cos \theta_{\text{obs}}}$$

その結果、放射源での立体角 $\Delta \Omega_s = 2\pi \Delta \cos \theta_s$ の範囲で放射された光は、

$$\Delta \Omega_{\text{obs}} = \Delta \Omega_s / \delta^2 \quad \text{の狭い範囲に集中することになる。}$$

ビーミング(2)

放射源では等方に放出していても、観測者の系では放射源の進行方向に集中することとなる。集中する角度を求める。

$$\cos \theta_{\text{obs}} = \frac{\cos \theta_s + \beta}{1 + \beta \cos \theta_s} \quad \text{なので、} \quad \theta_s = \frac{\pi}{2} \quad \text{ならば、} \quad \cos \theta_{\text{obs}} = \beta \quad \text{である。}$$

$$\text{よって、} \quad \sin \theta_{\text{obs}} = \sqrt{1 - \beta^2} = \frac{1}{\gamma}$$

おおざっぱに言って光子は $\theta_{\text{obs}} < 1/\gamma$ に集中すると考えて良い。これをビーミングと呼ぶ。

放射源でも観測者でも光子数は保存される。放射源は、放射源の系で等方に単一周波数 ν_s で光度 L_s を δt_s 間放射した光子数と、観測者での光子数を比較すると、観測者と放射源の距離を D とし、観測者の受けるエネルギーフラックスと光子の周波数を F_{obs} 、 ν_{obs} とすると

$$\begin{aligned} \frac{L_s}{\nu_s} \Delta t_s \frac{\Delta \Omega_s}{4\pi} &= \frac{F_{\text{obs}}}{\nu_{\text{obs}}} D^2 \Delta \Omega_{\text{obs}} \Delta t_{\text{obs}} \\ F_{\text{obs}} &= \frac{\nu_{\text{obs}}}{\nu_s} \frac{\Delta t_s}{\Delta t_{\text{obs}}} \frac{\Delta \Omega_s}{\Delta \Omega_{\text{obs}}} \frac{L_s}{4\pi D^2} = \delta^4 \frac{L_s}{4\pi D^2} \end{aligned}$$

つまり、ビーミングなしに対して ビーミング因子 δ の 4 乗に比例する。

内訳は、上で示した通り光子の周波数が δ 倍、立体角が δ^2 倍、さらに時間の圧縮により光子が一度に δ 倍に来る。

一方で、例えばフレアの持続時間は $1/\delta$ に短くなるので、フレアな

どのイベントを時間積分した総エネルギーの場合には δ の 3 乗となる。

上は、 δ 関数的なスペクトルを仮定した。つまり、全スペクトルを積分した光度での比較と考えられる。

一般的にはスペクトルには幅がある。スペクトルの中心値がビーミングにより高い周波数に移ると同時に、

その幅は δ ほど広がるよって、単位立体角、単位周波数当たりの Specific Intensity で比較する場合は、周波数幅のことを考えて、

$$S_{\text{obs}}(\nu) = \delta^3 S_s(\nu) [\text{ergs/sec} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{Hz} \cdot \text{str}]$$

これは、Phase Space の要素が Lorentz Invariant であることから導かれる

$$\frac{S(\nu')}{\nu'^3} = \frac{S(\nu)}{\nu^3}, \nu = \delta \nu'$$

ガンマ線バースト ($\delta = 10^3$)、BLASAR ($\gamma \sim 10$)、電波銀河 ($\gamma \sim \text{several}$) などでビーミングが観測されている。