超高エネルギーガンマ線天文学と “多波長解析”

森 正樹*
東京大学宇宙線研究所

1 はじめに

イメージング法の開発による TeV 領域ガンマ線のチェレンコフ望遠鏡観測の発展により、地上における高エネルギーガンマ線観測に関心が高まっているが、もとより天文学のブレークスルーは未知の波長を開拓することによりなされてきたのであり、歴史的必然ということもできよう。しかし、高エネルギー天体は高エネルギーにおいてのみ輝いているわけでなく、総合的な放射過程の理解のためにはあらゆる波長における観測が必要であることは論を待たない。ここでは銀河系内天体の広波長領域観測による理解の進展について概説する。系外天体、特に活動銀河核については他に譲ることにする。

2 パルサー [1]

EGRET でパルス成分が検出されている 7 つのパルサーのうち、PSR 1055-52 を除いた 6 つは $\dot{E}_{\rm sd}/(4\pi d^2)$ というパラメータ (ただし $\dot{E}_{\rm sd} = -I\Omega\dot{\Omega} = 4\pi^2 I\dot{P}P^{-3}$ は回転の減速によるエネルギー放射率、d はパルサーまでの距離。回転モーメント I はカタログ [2] では 10^{45} g cm^2 が用いられている) で電波パルサーに順序をつけたときの上位 6 つに対応し、このパラメータが 3×10^{-9} erg cm^{-2}s^{-1} より大きくなっている。すなわち、GeV 領域のガンマ線放射は回転駆動型である。電波パルサーのカタログからは、検出感度が一桁下がればあと 19 個のガンマ線パルサーが検出されることになる (図 1)。ガンマ線観測のように光子数が少ない場合は、電波などの観測によって回転のパラメータを決定し、その周期に合わせて解析をする必要がある。したがって、他の波長域の観測との協力が不可欠である。

GeV 領域の放射は、Polar cap モデルでも Outer gap モデルでも一応説明ができ、逆にこれらの優劣がはっきりしない。問題は、高エネルギー側まで延びているかどうかである。Polar cap モデルでは 10 GeV 付近で急激なカットオフが見られるはずであるが、Outer gap モデルではゆるやかである (図 2)。数十 GeV 領域の観測が重要であり、衛星観測のエネルギー上限値の拡大と地上観測のエネルギー閾値低下により、この領域がエネルギーのギャップなしに観測されることが必要である。

また、Outer gap モデルでは逆コンプトン散乱による TeV 付近のピークが予想されており、地上観測の感度が現在の 1/10 になればパルス成分が検出されるかもしれない [3](図 3)。

3 パルサー星雲 (Plerion)[4]

パルサーを主なエネルギー供給源として輝いている星雲は pulsar nebula (plerion) と呼ばれているが、最近 ASCA による X 線観測で多数例が見つかってきている [7]。X 線領域の放射はシンクロトロン放射であると考えられており、磁場の中で高エネルギー電子が運動している。このとき周囲の光子を逆コンプトン散乱す

*E-mail: morim@icrr.u-tokyo.ac.jp

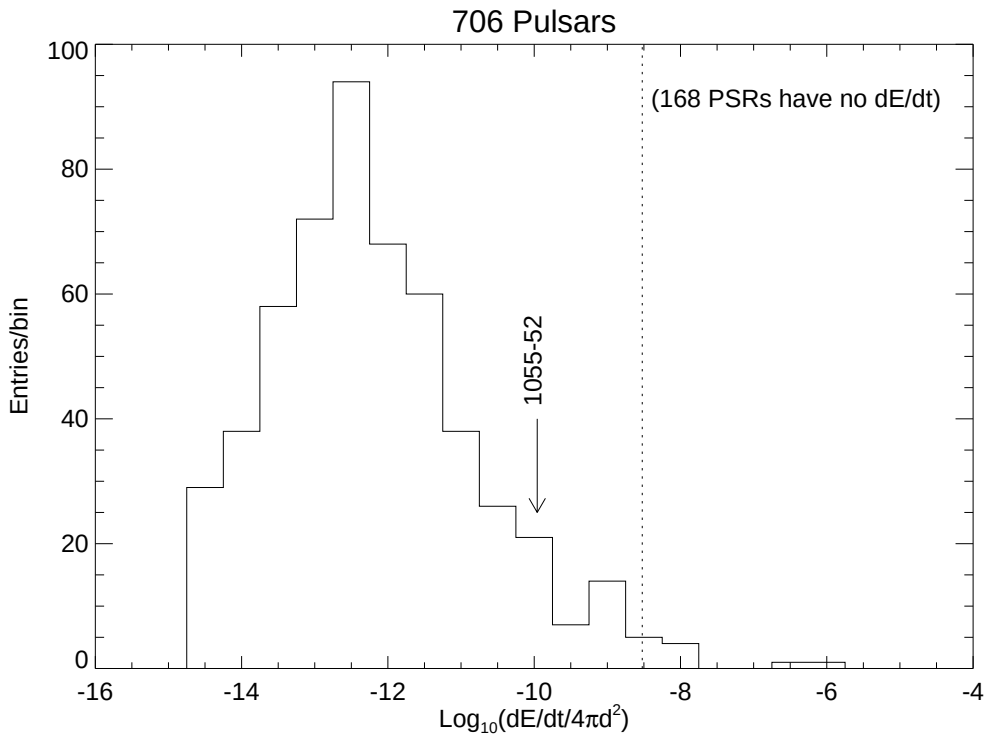

図 1: 706 個の電波パルサーの「回転エネルギーフラックス」$\dot{E}_{\rm sd}/(4\pi d^2)$ の分布。横軸の単位は $\mathrm{erg\ cm^{-2}s^{-1}}$ (データは `http://pulsar.princeton.edu` より)

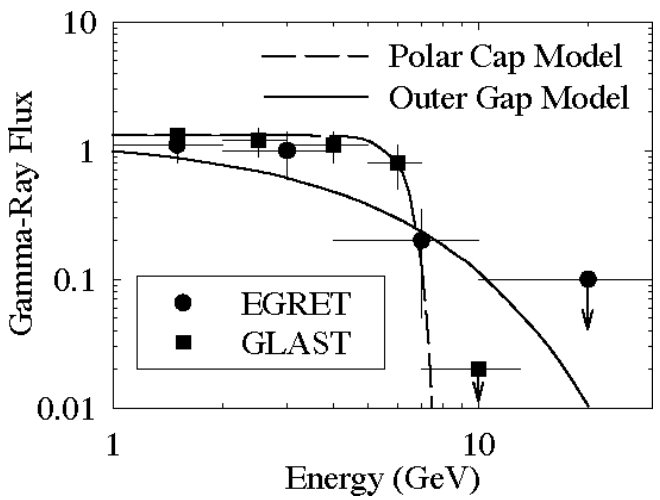

図 2: エネルギースペクトルによるパルサーの放射モデルの識別。(GLAST ホームページ `http://cossc.gsfc.nasa.gov/gamma/glast/glasthome.html` より)

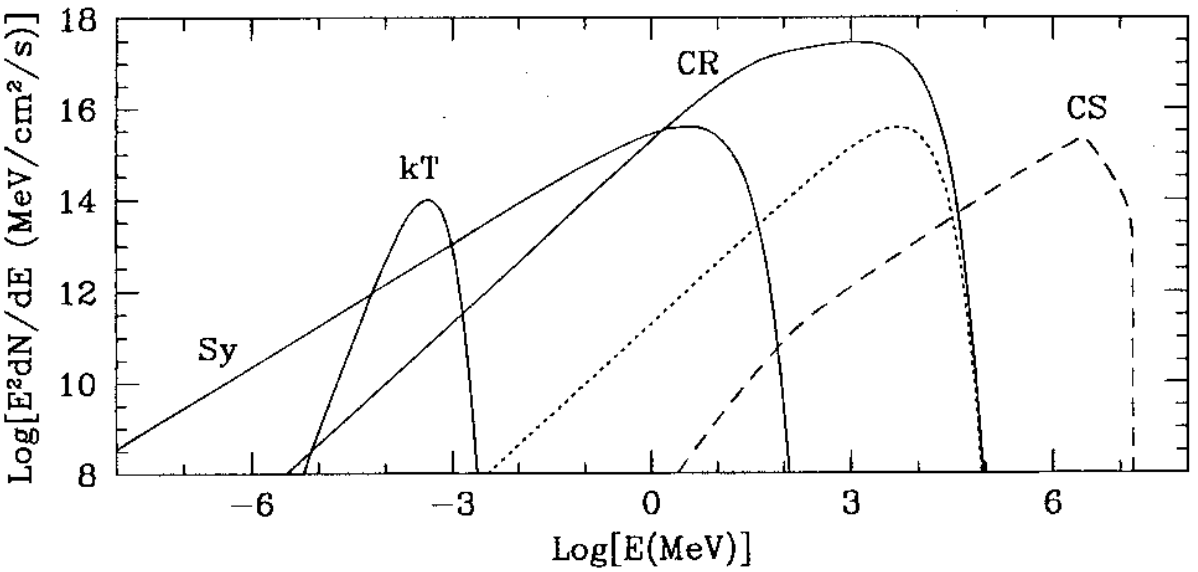

図 3: 若いガンマ線パルサーの位相平均スペクトル。CS が電子により逆コンプトンされた TeV 領域のパルス成分である。[3]

ると、TeV 領域のガンマ線が発生する。シンクロトロン光子のエネルギー ϵ は磁場を B、電子のエネルギーを $E_{\rm e}$ として $\epsilon \sim 0.2(B/10^{-5}{\rm G})(E_{\rm e}/1\,{\rm TeV})^2$、逆コンプトン光子のエネルギー E は標的光子のエネルギーを $h\nu_0$ として $E \sim 5(h\nu_0/10^{-3}{\rm eV})(E_{\rm e}/1\,{\rm TeV})^2$ であるから、標的として背景輻射の光子 ($h\nu_0 \sim 6\times10^{-4}{\rm eV}$) をとると、両者の関係は $\epsilon \sim 0.07(E/1\,{\rm TeV})(B/10^{-5}{\rm G})$ keV となり、磁場にもよるが X 線を放射している電子は TeV ガンマ線も出すことがわかる (図 4)。(磁場は星間物質で典型的な $\sim 3\times10^{-6}$G から、かに星雲の $\sim 3\times10^{-4}$G くらいまでの値ががここでは問題になる。) 両者の強度の比は磁場のエネルギー密度 ($w_B = B^2/8\pi = 2.4\,{\rm eV}(B/10^{-5}{\rm G})^2$) と標的光子のエネルギー密度 ($w_{\rm ph}$) の比で決定される。標的光子としては、星雲内部のシンクロトロン光子はかに星雲の場合以外はほとんど問題にならないので、宇宙背景放射の光子 (0.25 eV cm^{-3}) が主になる。磁場が強いと電子はエネルギーを損失するので、逆コンプトンによるガンマ線は $h\nu_0[12\,{\rm TeV}(B/10^{-5}{\rm G})^{-2}(t_0/10^4{\rm yr})/m_{\rm e}c^2]^2$ 以上のエネルギーで (t_0 はパルサーの年齢) 減少していく (図 5)。

また、ここでは電子の入射が $E^{-2}\exp(-E/E_0)$ の形のスペクトルで連続的に行われると仮定するが、カットオフエネルギー E_0 により逆コンプトンピークは図 6 のように変化し、またシンクロトロン放射と逆コンプトン過程によるエネルギー損失のため、電子の寿命は $3\times10^5(E_{\rm e}/1\,{\rm TeV})^{-1}[(w_B+w_{\rm ph})/1\,{\rm eV\,cm^{-3}}]^{-1}$ yr となり、パルサーの年齢が古いほど高いエネルギーの電子は減少していく (図 7)。

かに星雲 [5]、Vela [6] および PSR1706-44 [4] の TeV までの連続的な放射は、以上のようなシンクロトロン・逆コンプトンスペクトルで説明できる。ただし、かに星雲の場合は磁場が強いため、逆コンプトンの標的光子はシンクロトロン放射の光子が主となる (Synchroton Self-Compton model [5])。

こうして、$0.1 \sim 10^{14}$ eV まで広い範囲にわたってエネルギースペクトルを観測することで、パルサー星雲の磁場、年齢、電子の入射スペクトルと最大エネルギーの情報が得られることになる。現在より TeV 領域における検出感度が 10 倍向上すれば、このような研究が統計的に行なえるようになり、パルサー星雲における物理過程の理解が進むであろう。

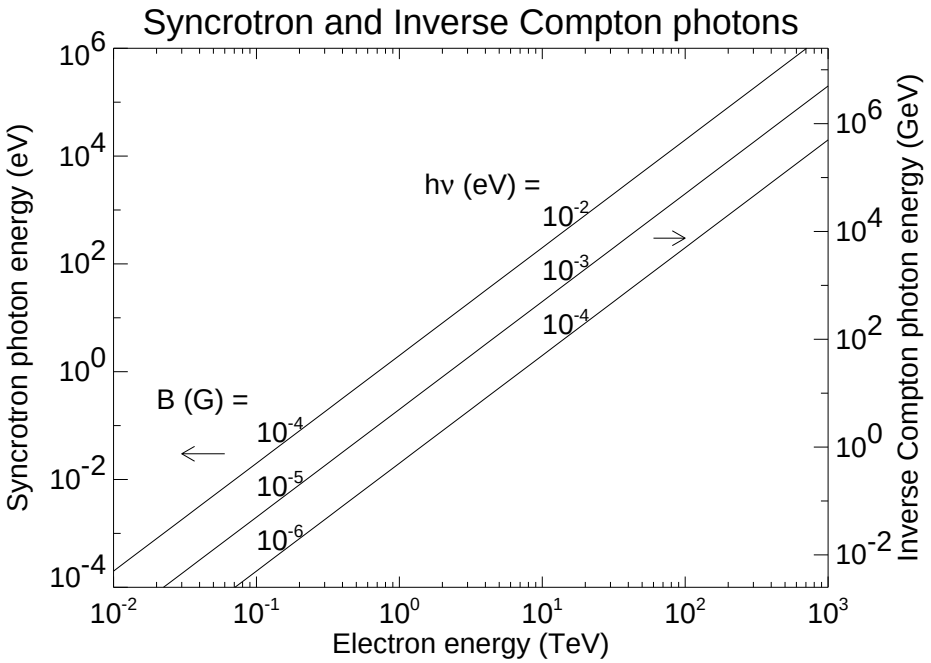

図 4: シンクロトロン光子 / 逆コンプトン光子 / 電子のエネルギーの関係。

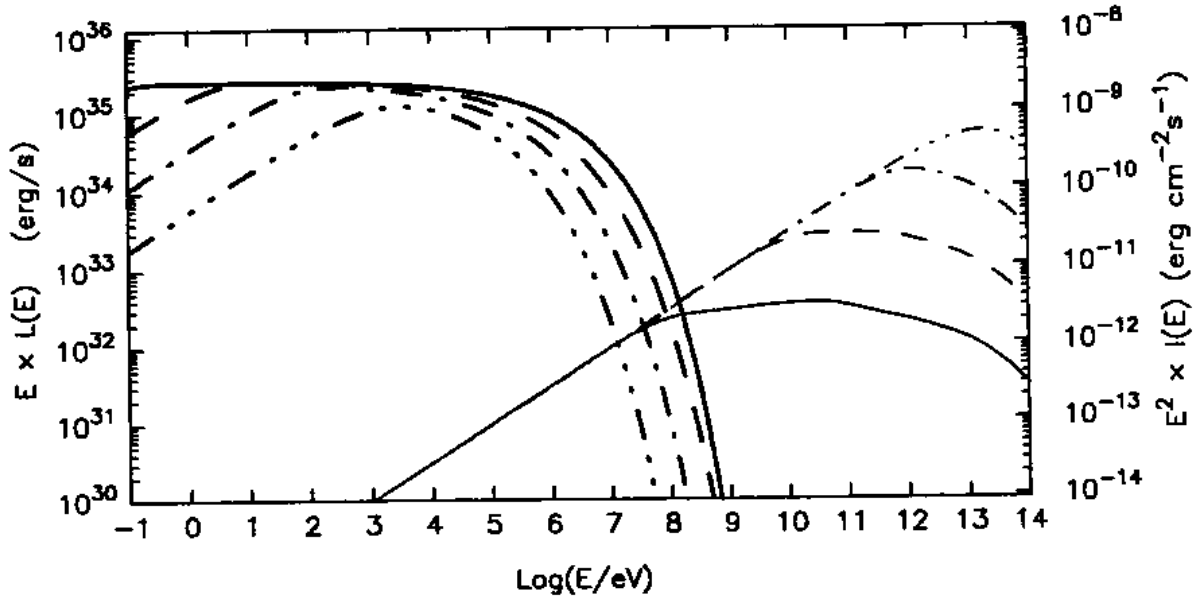

図 5: パルサー星雲の磁場とシンクロトロン・逆コンプトンスペクトルの関係。100(実線), 30(破線), 10(一点鎖線), 3(三点鎖線)μG について示されている。左側がシンクロトロン、右側が逆コンプトンのスペクトルである。電子は 10^{37} erg/s で 10000 年間 $E^{-2}\exp(-E/10^{15}\mathrm{eV})$ の形のスペクトルで入射したと仮定している。逆コンプトンは主に背景輻射の光子が標的である。[4]

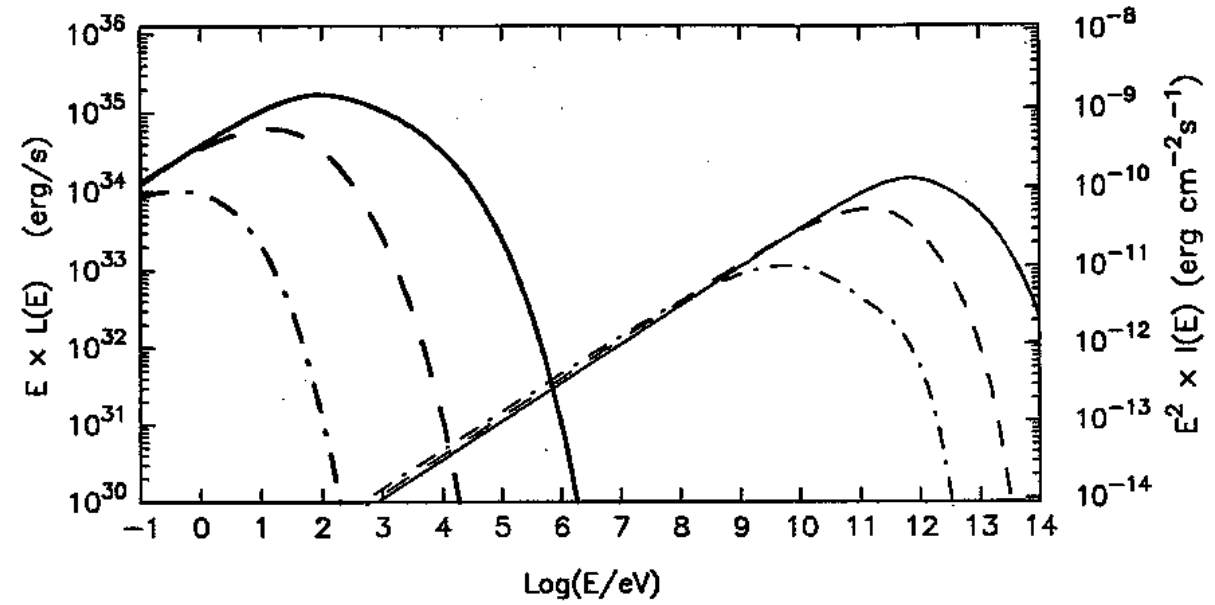

図 6: 図 5 と同様だが、磁場を 10μG とし、カットオフエネルギーを 100(実線), 10(破線), 1(一点鎖線)TeV とした場合。[4]

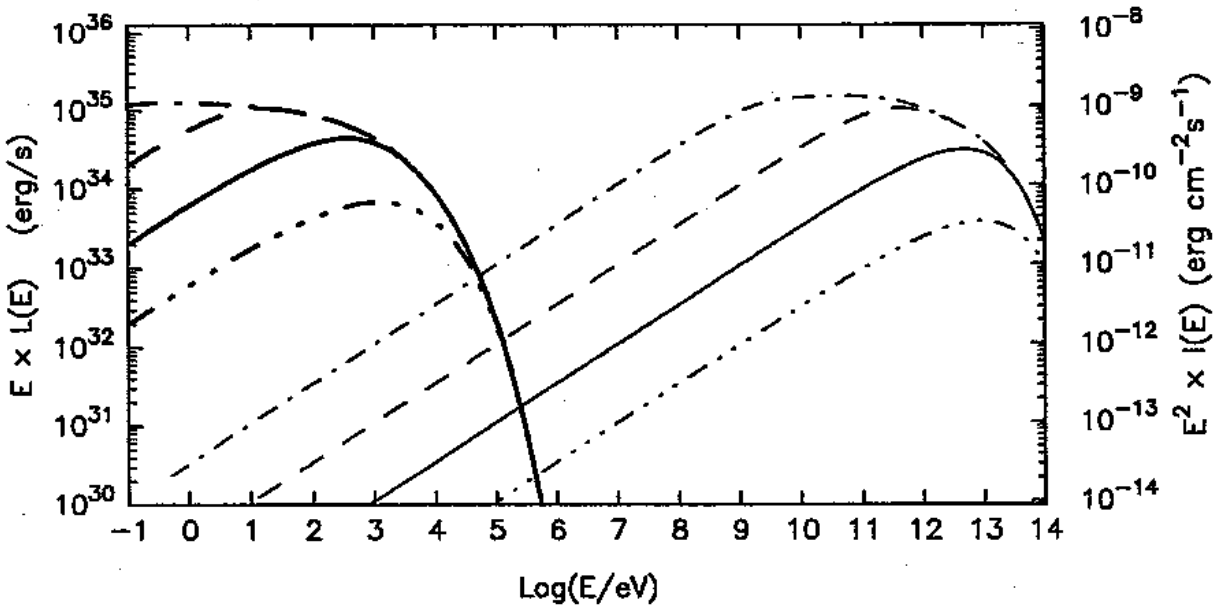

図 7: 図 5 と同様だが、磁場を 10μG、カットオフエネルギーを 100 TeV とし、パルサーの年齢を 10^3(三点鎖線)、10^4(実線), 10^5(破線), 10^6(一点鎖線) 年とした場合。[4]

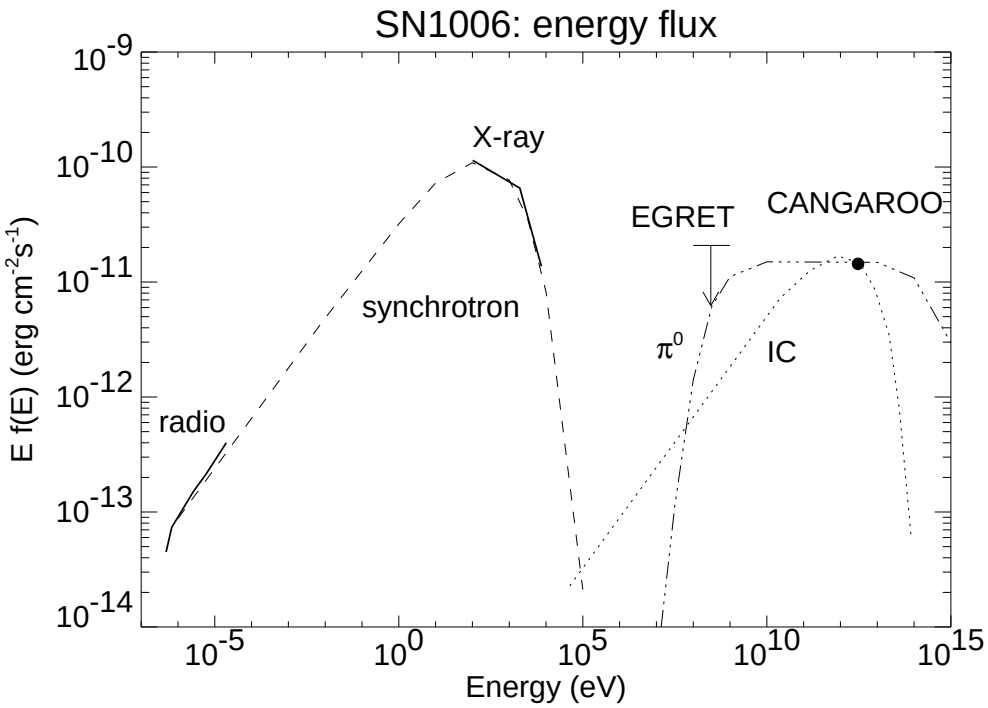

図 8: SN1006 のスペクトルエネルギー分布。シンクロトロンと逆コンプトンのスペクトルは文献 [14] より、π^0 成分は文献 [16] の計算を 1.8 倍して実験点に合わせた。

4 超新星残骸 [8, 9]

長い間超新星残骸は宇宙線の源と考えられてきた。超新星爆発による爆風が周囲の物質を圧縮して衝撃波をつくり、この衝撃波による加速が理論的に研究されてきた。しかし、理論からは加速できる最大エネルギーは数百 TeV 程度とされ、宇宙線のエネルギースペクトルの折れ曲がり (いわゆる "knee") との関連が議論されてきた。宇宙線が加速されているならば、周囲の物質と衝突してパイオンを生成し、その崩壊からガンマ線が放出されるはずである。こうして超新星残骸は古くから超高エネルギーガンマ線源候補と考えられてきた [10]。

ASCA による超新星残骸 SN1006 からの非熱的 X 線放射の発見 [11] は、シンクロトロン放射を行う数百 TeV の電子の存在を強く示唆し、超新星残骸が実際にこのエネルギーまでの宇宙線の加速器として働いていることを示し、衝撃波加速理論を実証した。このような超高エネルギー電子は、宇宙背景放射などの周囲の光子と逆コンプトン散乱を起こし、光子を超高エネルギーに叩き上げるはずである。Whipple グループはいくつかの超新星残骸を観測したが、上限値しか得られなかった [12]。最近 CANGAROO グループはこの天体からのガンマ線の証拠を発見した [13]。ガンマ線のピークは X 線観測で非熱的放射の見られるリムと一致しており、またフラックスがパイオン起源とするにはやや大きいことからも、この結果は逆コンプトン散乱によるガンマ線であるとして解釈するのが自然である [14]。シンクロトロン成分との比較から磁場の値として 6 μG 程度の値が得られたことも重要である [15, 13]。

しかし、電子だけでなく宇宙線が加速されている直接の証拠はまだない。宇宙線と周囲の物質の衝突で生じる中性パイオンの崩壊を起源とするガンマ線を検出すればよいが、そのためには約 1 GeV 以上で数桁にわたってスペクトルがべき状に延びていることを示す必要があり [16](図 8)、感度を上げた衛星と地上の観測が待望される。

5　終わりに

以上で議論しなかった銀河系内超高エネルギーガンマ線天体候補としては、分子雲、超高速天体、EGRET未同定天体などが、銀河系外候補としては活動銀河核以外にスターバースト銀河、銀河団、topological defects、ガンマ線バーストなどが挙げられるが、詳しくは文献 [17] などのレビューをご覧いただきたい。

参考文献

[1] D. J. Thompson et al., in Proc. of the Fourth Compton Symposium (eds. C. D. Dermer et al., AIP Conf. Proc. 410) p. 39

[2] J. H. Taylor, R. N. Manchester and A. G. Lyne 1993, Astrophys. J. Suppl., 88, 568

[3] R. W. Romani 1996, Astrophys. J., 470, 469

[4] F. A. Aharonian, A. M. Atoyan and T. Kifune 1997, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 291, 162

[5] O. C. De Jager et al. 1997, Astrophys. J., 457, 253 and references therein

[6] A. Harding and O. C. De Jager 1997, Proc. 32nd Rencontres de Modiond, 'High-Energy Phenomena in Astrophysics' (January 18–25, 1997, Les Arcs, France)

[7] N. Kawai et al. 1997, submitted to Astrophys. J.

[8] L. O'C. Drury et al. 1994, Astron. Astrophys., 287, 959

[9] T. K. Gaisser et al. 1998, Astrophys. J., 492, 219

[10] G. Cocconi 1959, Proc. of the 7th Int. Cosmic Ray Conf. (Moscow) 2, 309

[11] K. Koyama et al. 1995, Nature, 378, 255

[12] J. H. Buckley et al. 1998, Astron. Astrophys., 329, 639

[13] T. Tanimori et al. 1997, IAUC 6706, 2; 1998, Astrophys. J. Lett.(in press)

[14] A. Mastichiadis and O. C. de Jager 1996, Astron. Astrophys., 311, L5

[15] T. Yoshida and S. Yanagita 1997, Proc. 2nd INTEGRAL Workshop 'The Transparent Universe' (St. Malo, France, 16–20 September 1996, ESA SP-382) p. 85

[16] T. Naito and F. Takahara 1994, J. Phys. G: Nucl. Phys. 20, 477

[17] F. A. Aharonian, Proc. XVIII Int. Symp. on Lepton-Photon Interactions, (July 28–August 1, 1997, Hamburg, Germany) (preprint astro-ph/9712089)