

かに星雲からのガンマ線放射

萩原 佳太 (立教大学大学院 理学研究科)

Abstract

かに星雲の中心には自転周期 33ms で回転する、強い磁場を持つかにパルサーがある。かにパルサーの周期はわずかではあるものの次第に増大し、回転エネルギーを周囲の環境に解放している。また、かにパルサーの周囲にはプラズマで満たされた磁気圏と呼ばれる構造が形成されており、粒子の加速現場の一つとなっている。一方、パルサー風と周囲の超新星残骸物質との相互作用から、かに星雲が形成され TeV を超えるエネルギーを持つガンマ線の放射が行われている。エネルギースペクトルは数百 MeV でカットオフのあるシンクロトロン成分と、数百 GeV にピークを持つ逆コンプトン成分とから成る。2010 年のフェルミ衛星チームによる論文をレビューすることでかに星雲の研究状況に関して議論し、そして現在我々が進めているガンマ線データ解析の現状を報告する。

1 Introduction

かに星雲はこれまで電波から TeV ガンマ線までのあらゆる波長帯域で研究が行われてきた天体である。また、様々なパルサーの電波や X 線帯域のライトカーブから、放射はパルサーの指向性に依存していることが明らかであった。このことは電波や X 線の放射機構はパルサー近傍に位置しているという事実を示し、ガンマ線についても同様の結果を示すことが期待された。しかし Fermi 衛星の観測データが明らかにしたのは、ガンマ線放射はパルサーの指向性には依存しないという事実であった。これによりガンマ線放射機構はパルサーから遠く離れた、磁気圏構造と呼ばれる領域に存在していると考えられるようになった。

ガンマ線の放射領域モデルは 2 つに大別される(図 1 参照)。一つはアウターギャップモデルである。このモデルではパルサーの極付近から吹き出した荷電粒子が、自身の磁力線に沿って曲げられることで起こる曲率放射によってガンマ線を放射するが、すぐに電磁シャワーを起しガンマ線は距離とともにエネルギーを失う。観測されるエネルギーの上限は 10GeV 程度になると予想される。もう一方はアウターギャップモデルである。このモデルは磁力線

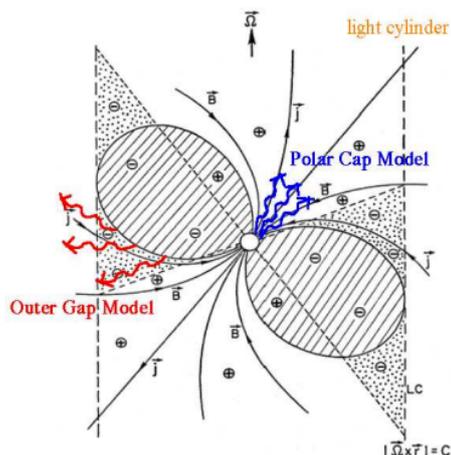


図 1 Polar cap vs. Outer gap

と光円柱*1で囲む細い領域で粒子が非熱的に加速され、ガンマ線を放射するメカニズムである。磁力線に沿って運動する荷電粒子はシンクロトロン放射によって \sim MeV ガンマ線領域の放射をする一方、磁場により加速された電子は逆コンプトン散乱によって CMB や赤外領域のバックグラウンドをガンマ線領域まで叩き上げる。以上から数百 MeV で落ち込んだ後、数百 GeV で再度ハードになるべきのスペクトルが予想される。

以上のようなモデルが台頭してきてはいるものの、未だ高エネルギー領域では統計の良い観測データが

*1 回転速度が光速を超える半径より内側の領域

得られておらず、観測的根拠に乏しいのが現状である。本研究は A. A. Abdo et al., 2010 (ApJ) をレビューし、かに星雲の現状の研究を報告する。

2 LAT Description and Observations

LAT は、Fermi 衛星に搭載された電子対生成型のシリコンストリップ検出器である。2008 年 6 月の打ち上げ以降、約 6 年もの間観測を行ってきた。広い視野角 (~ 2.4 sr) を持っており軌道周期は約 90 分であるため、数時間で全天の観測が可能である。観測エネルギー帯域は 20MeV \sim 300GeV と広く、角度分解能 (0.9° @1GeV) についても Fermi 衛星の前身である Compton 衛星に搭載された EGRET と比較するとその性能は格段に向上した。これにより以前は分解できなかった数多くの新たなガンマ線源の発見に貢献し、他波長観測との相補的な研究は新たな局面を迎えている。

3 Results

本研究では、2008 年 8 月から 2009 年 4 月までの 8 ヶ月間のデータの解析を行った。横軸をパルス位相、縦軸をカウント数としてライトカーブを作成すると図 2 のようなカーブが描ける。ここでは 2 つのはっきりとしたパルスが観測されており、天体が一回転する間にピークを持ったガンマ線放射が 2 回行われていることを示している。さらに GeV 領域までエネルギーを上げると放射は次第にソフトになるので、バックグラウンドの寄与が顕著になる。そのため GeV ガンマ線の観測には、相応の統計精度を持ったデータを得るための長時間観測が必要となる。ここで、高い方のパルスを P1 (位相間隔は $0.82 - 1, 0 - 0.08$)、低い方のパルスを P2 (位相間隔は $0.22 - 0.43$) と定義した。また P1 と P2 の間に存在している領域は off-pulse と呼ばれ、パルサー星雲からの放射成分であると仮定した。なお off-pulse の放射は、全体の放射の約 35% であった。P1, P2 はローレンツ関数でモデル化することができ、上で定義したそれぞれのピーク内に含まれる光子数を求められる。それらの比を取ったものを P1/P2 ratio とする。こ

れを他のエネルギー帯域でも同様の作業を行った。

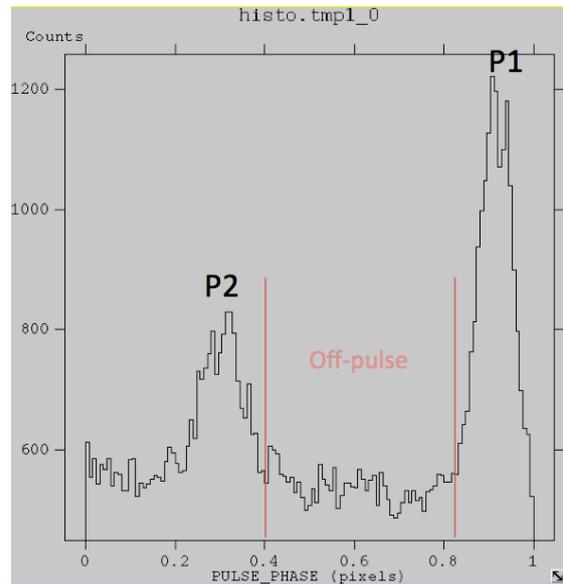


図 2 Pulse phase@100-300MeV

表 1 かにパルサーの P1/P2 ratio

Energy Interval (GeV)	ϕ_1 ($\times 10^{-2}$)	ϕ_2 ($\times 10^{-2}$)	P1/P2 ratio
0.1 - 300	91.8 ± 0.3	30.7 ± 0.8	2.50 ± 0.25
0.1 - 0.3	92.1 ± 0.4	31.8 ± 0.4	1.89 ± 0.29
0.3 - 1	92.0 ± 0.3	31.1 ± 0.7	1.60 ± 0.18
1 - 300	92.1 ± 0.4	29.8 ± 0.4	2.24 ± 0.19

図 3 に関して左は 0.1 - 0.3GeV、中央は 0.3 - 1GeV、右は $> 1\text{GeV}$ でのカウントマップである。また上段と下段はそれぞれ、パルサーからの放射成分を含んだカウントマップとパルス成分をカットした (星雲からの放射) 成分のカウントマップを示している。

on-pulse と off-pulse とで比較すると、off-pulse に関して線源が広がるのはパルス成分をカットすることで、全体として弱い放射まで底上げされて見えるためである。低エネルギー側での星雲からの放射は比較的広がった線源となる一方で、高エネルギー側の線源はシャープになる。

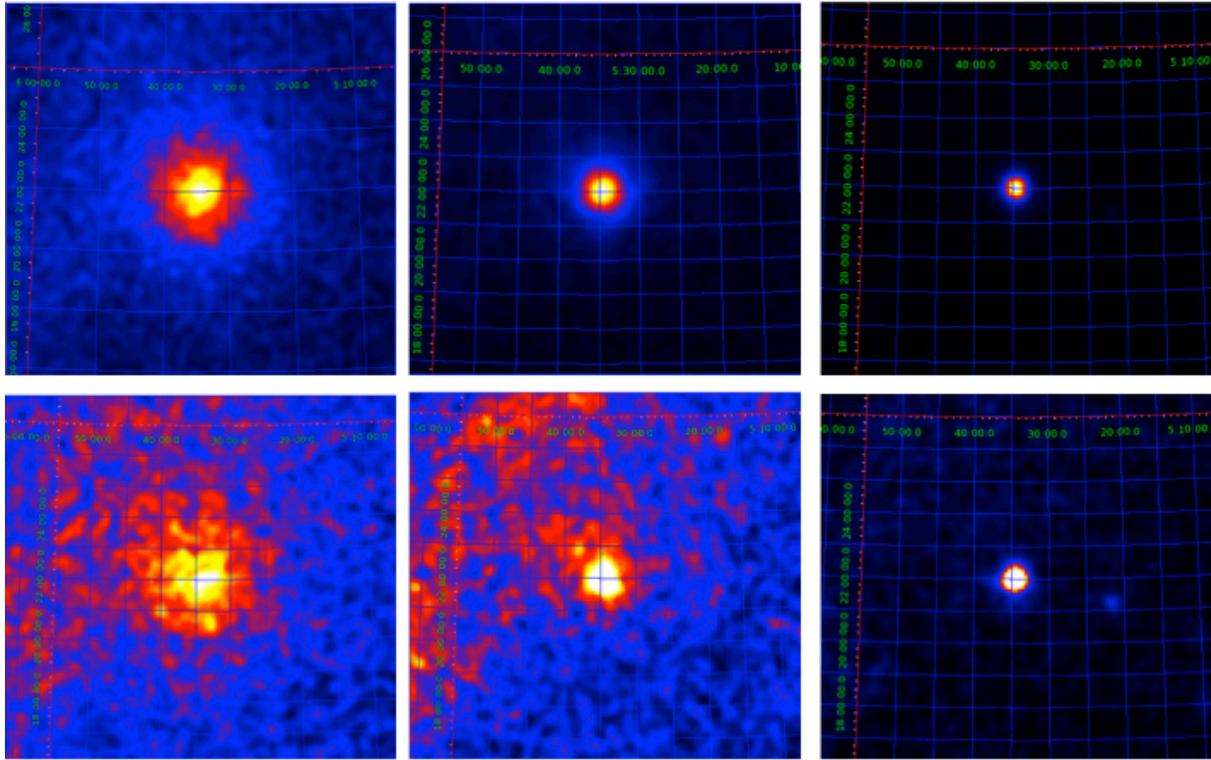


図 3 各エネルギー帯域における on-pulse (上段) と off-pulse (下段) のカウントマップ

かに星雲のエネルギースペクトルは、シンクロトロンで一旦落ち込み逆コンプトンで再び上向きになるスペクトルを予想した。これはあるエネルギー (Break Energy: E_b) までシンクロトロン放射が優勢であるが、そのエネルギーを超えると逆コンプトン散乱が優勢になるべき関数の分布になると言える。よって以下のモデルでのフィッティングした。

$$\frac{dN}{dE} = N_{syn}(E_{GeV})^{-\Gamma_{syn}} + N_{IC}(E_{GeV})^{\Gamma_{IC}} cm^{-2} s^{-1} MeV^{-1}$$

Likelihood 実行後の最適化パラメータは、 $\Gamma_{syn} = (3.97 \pm 0.12)$, $\Gamma_{IC} = (1.72 \pm 0.04)$, $E_b = 379.7 \pm 26.6 MeV$ となった。400MeV 付近で逆コンプトン散乱優勢のスペクトルに変化することが分かる。図 4 は、この結果をもとに作成した SED である。黒のプロットは観測データ、赤の実線はモデルフィッティングを示している。

かにパルサーからのガンマ線放射は、あるエネルギーより大きくなると電磁シャワーによりスペクト

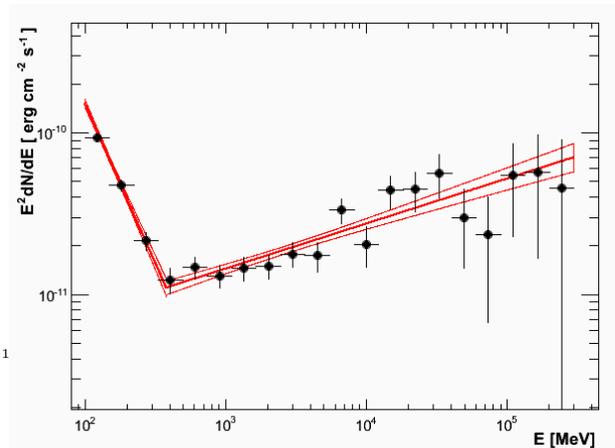


図 4 かに星雲のエネルギースペクトル

ルがカットオフを持つようなモデルを考えた。指数関数的なカットオフを仮定すると

$$\frac{dN}{dE} = N_0(E_{GeV})^{\Gamma} exp\left(-\frac{E}{E_c}\right) cm^{-2} s^{-1} MeV^{-1}$$

でモデル化できる。このモデルによって作成した

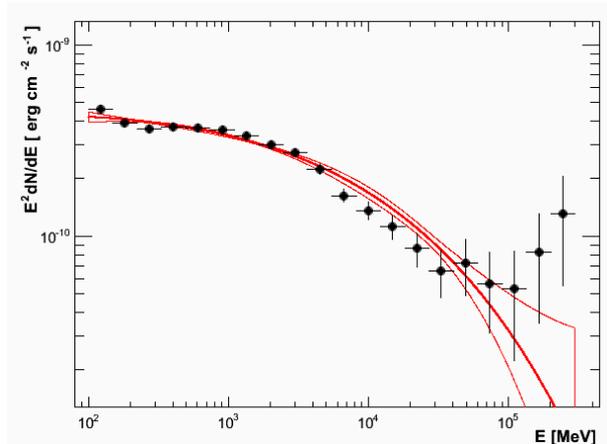


図5 かにパルサーのエネルギースペクトル

SED を図 5 に示す。これも星雲の SED と同様に、黒のプロットが観測データ、赤の実線がモデルフィッティングを表している。

4 Discussion

パルスの放射に関して、図 2 から分かるように P1/P2 ratio はエネルギー増加とともに減少しているが GeV 領域で再び上昇している。A. A. Abdo et al.,2010 (ApJ) の P1/P2 ratio は GeV 領域でも減少していたため、本研究においてはパルサーのライトカーブを作成する際にさらに精度の良いスピンドウンを考慮する必要があると考えられる。

かに星雲のエネルギースペクトル (図 4 参照) は、モデルは観測データをよく表していることが分かる。高エネルギー側ではガンマ線飛来数の少なさ故に統計が良くないので、今後、Fermi の 6 年間の観測データを使用することで、これまで見ることはできなかった空間構造を明らかにできるかもしれない。また大気チェレンコフ望遠鏡を用いた TeV ガンマ線の観測との相補的な研究を行うことでも、更に興味深い星間現象を理解する手がかりを得られることが期待される。

パルサーのスペクトルはモデルのカットオフを再現できたものの、数百 GeV の領域でハードになる。誤差も大きいことから、統計の悪さが表れている可能性が高く、今後は慎重に議論しなければならない。

またパルス位相をさらに細かく分解したスペクトルを見ることで、パルサーの各位相でどのような放射が優勢かを議論する必要もある。

5 Conclusion

Fermi の 8 ヶ月分の観測データに関して、A. A. Abdo et al.,2010 (ApJ) とほぼ同様な結果が得られた。特に特徴的なのは、かに星雲のスペクトルはシンクロトロン放射成分と逆コンプトン散乱成分によって説明できる点である。さらに統計が良いデータを使用すれば、予想される理論モデルに新たな制限を与えることができるだろう。

Reference

- A. A. Abdo et al., 2010, ApJ, 708, 1254
- Y. E. Lyubarsky, 2002, Soc. 329, L34-L36
- J. Chiang, R. W. Romani, 1994, arXiv:astro-ph/9401034v1