

# 2010年9月のかに星雲 $\gamma$ 線フレア -観測結果とフレア発生機構モデルの紹介-

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 修士1年

三上 諒

私は、2010年9月のかに星雲で発生した $\gamma$ 線フレアについて、観測結果とフレア発生機構のモデルを紹介する。以下では、まず、このフレアに関する具体的な観測結果を紹介し、次に、このフレアにおける注目点と問題点を紹介する。さらに、その問題点を解決するモデルを紹介し、最後に、全体のまとめと今後の課題を述べる。

## 1 2010年9月のかに星雲 $\gamma$ 線フレアに関する観測結果

### 1.1 かに星雲

まず初めに、かに星雲について紹介する。かに星雲は、1054年に爆発した超新星の残骸であり、地球から約2kpcのところの位置する。直径は約10光年で、中心には、かにパルサーが存在する。2010年9月、そのかに星雲からの $\gamma$ 線フレアが、AGILEとFermiで観測された。

### 1.2 具体的な観測結果 (AGILE に関して)

AGILEに関する具体的な観測結果を紹介する。図1は、フレア時のかに星雲における100MeV~5GeVの $\gamma$ 線のlight curveであるが、平均のフラックスの値が $(2.2 \pm 0.1) \times 10^{-6} \text{ photons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ なのに対し、フレア時は、 $(7.2 \pm 1.4) \times 10^{-6} \text{ photons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ まで上昇した。また、上昇したフラックスの値は、2、3日で通常の平均値に戻った。

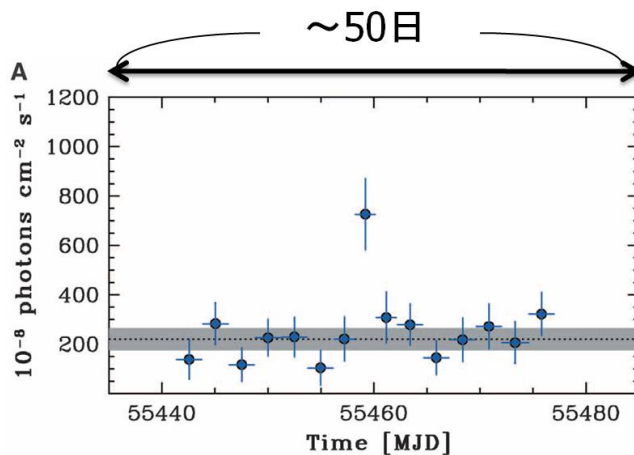


図1 フレア時のかに星雲における $\gamma$ 線のlight curve(100MeV~5GeV)([1], Fig.1.(A)より)

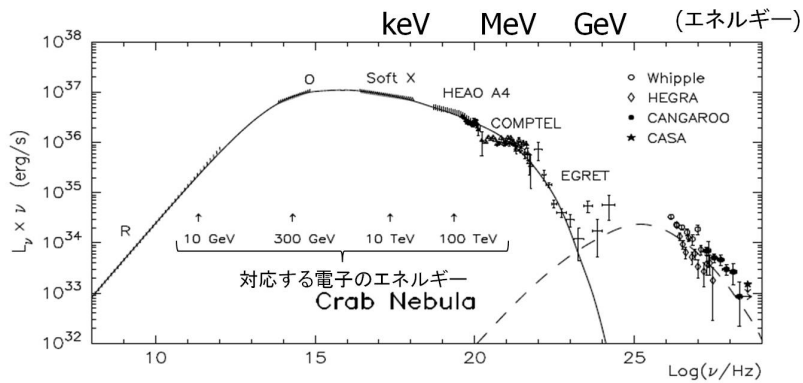


図2 かに星雲の通常時のスペクトル ([2] より)

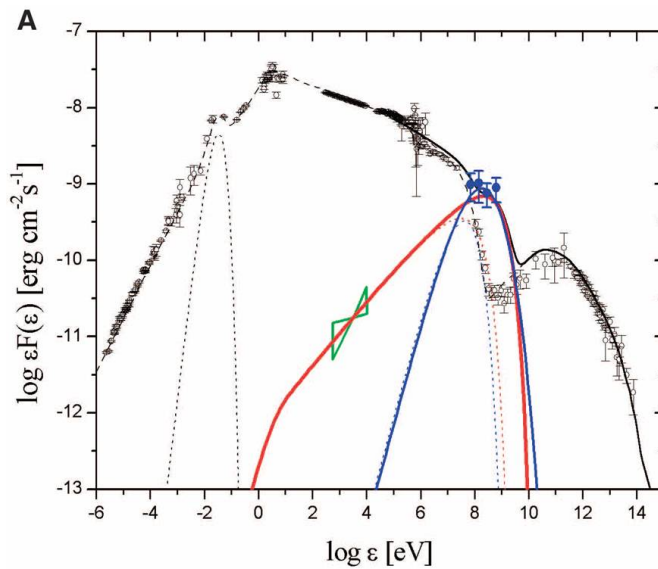


図3 2010年9月のフレア時のスペクトル ([1], Fig.3.(A) より)

### 1.3 かに星雲の通常時のスペクトルと、フレア時のスペクトル

かに星雲の通常時のスペクトルは、図2のようになっている。～1GeV以下はシンクロトロン放射、～1GeV以上は逆コンプトン散乱によるものと考えられている。

それが、2010年9月のフレア時にはどのように変わったかを示すのが図3である。黒いデータ点が通常時のスペクトルデータ、青いデータ点がフレア時のスペクトルデータであるが、観測された1GeV付近でのエネルギーの増加がはっきりと見てとれる。

## 1.4 その他の観測結果

その他の観測結果としては、フレア中、フレア後に、パルス成分の $\gamma$ 線のシグナルに変動の兆候は見られなかった。このことから、フレア現象は、パルサーからのパルス放射に起因するものではないと言える。

## 2 フレアにおける注目点・問題点と、それを解決するモデル

### 2.1 このフレアにおける注目点

この2010年9月のフレアにおける大きな注目点は、観測されたフレアの持続時間の短さである。かに星雲の約10光年という大きさを考えると、フレアの放射に関わった領域は、かに星雲全体ではなく、その中の小さな一部領域のみである、と考えられる。このことについて、以下で考えていく。

#### 2.1.1 考えられる問題点:フレア発生に伴うスペクトルの変化

「フレア観測時間の短さ」という注目点から考えられる問題点として、フレア発生に伴って起こったスペクトルの変化が、数日程度というフレアの持続時間の間に元に戻るか、という点がある。これについては、何らかの理由で、観測されたエネルギー帯の放射を行う加速電子が inject され(つまり、一時的に増加し)、局所的に、かに星雲の平均磁場より約5倍強い1mG程度の磁場が存在すれば、フレア発生に伴うスペクトルの変化が、通常のシンクロトロン放射による冷却で、数日の間に元に戻ることが論文[3]により紹介されている\*1。

図4は、この仮定のもと、スペクトル変化を計算したものである。確かに、初め赤い線のスペクトルが、1日後(緑)、2日後(紫)、3日後(ピンク)と経るに従い、通常時のスペクトルに戻っていくのが見てとれる。

#### 2.1.2 「小さな一部領域」としての「inner knot」

この節の初めに、フレア観測時間の短さから、放射に関わった領域は、かに星雲中の小さな一部領域と考えられる、ということを述べた。その「小さな一部領域」として、かに星雲中の inner knot を考え、この inner knot で $\gamma$ 線フレアが生じたと考えるモデル[4]を紹介する。

inner knot は、かにパルサーから0.65arcsecだけ、ジェット方向に離れた場所で以前から観測されていた、他の場所より明るい特徴的な領域である。観測されていた inner knot のサイズは、数

---

\*1 シンクロトロン放射による冷却のタイムスケールは、

$$\tau \sim 8 \times 10^5 \text{sec} \times (B[\text{mG}])^{-2} \times \gamma_9^{-1}$$

と表される。ただし、ここでBは磁場強度、 $\gamma$ は放射に関わる荷電粒子のローレンツ因子で、 $\gamma = \gamma_9 \times 10^9$ の関係がある。この式より、ローレンツ因子が大きい程、つまり放射に関わる粒子のエネルギーが大きい程、粒子は早く冷却される、つまり早くエネルギーを失うことが分かる。

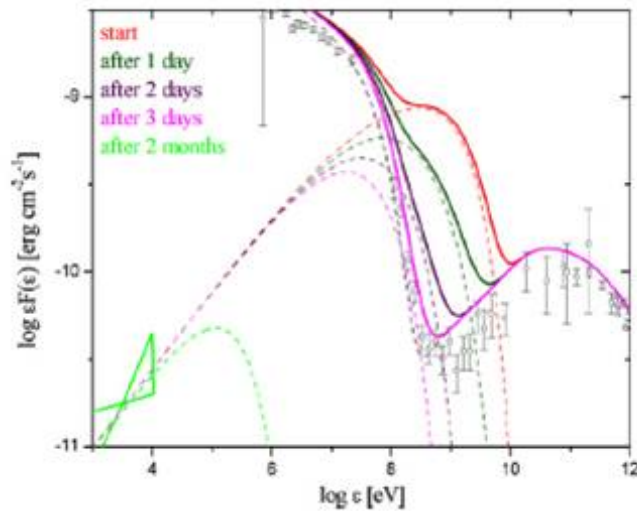


図4 フレア発生に伴うスペクトル変化の計算 ([3],Figure 3 より)

light days 程度であることから、inner knot やその周辺で放射強度の増強が一時的、瞬間的に起き、我々が inner knot 領域を常に観測しているとすれば、その放射強度の増強を「フレア現象」として観測できる、と言える。

この仮説を裏付けるシミュレーション結果が、同じ論文 [4] 内で紹介されている。図5は、かに星雲内部に観測されうる、可視光帯でのシンクロトロン放射のシミュレーションで、中心(原点)にパルサーがあると仮定している。色の違いは放射強度の違いを対数で表しているが、原点付近、つまり、パルサー付近に、knot 状の構造が顕著に見てとれる。この結果は、今回のフレア現象が inner knot で生じ、それを観測したことを支持している、と言える。

### 2.1.3 新たな観測事実

ここで、この話題に関して、2011年7月に発表された新しい観測事実を紹介する ([5])。

この論文では、VLBIでの観測において、かに星雲中の「C1」領域でフレアが生じたことを示唆する結果が出たことについて述べられている。C1領域について、2つの図で示す。図6の左は、電波観測に基づくイメージング、右は、可視光観測のイメージングに、電波観測のデータを等高線で表したものを重ねたものであり、C1領域は、図6中にそれぞれ示されている。

次に示した図7は、C1領域でのスペクトル測定値と、かに星雲のスペクトルを表したものである。図左端に見られる、2つの赤いデータ点(1.6GHzでの測定値と、5GHzでのupper limit)に関して、それがシンクロトロン放射によるものと仮定した場合のスペクトルが赤線で示されているが、それが、かに星雲の平均のスペクトルに加わったと考え、今回のフレアにおけるγ線領域のスペクトルを説明できることが分かる。

先程脚注1の中で述べたが、シンクロトロン放射では、放射に関わる荷電粒子のエネルギーが高い程、早く冷却される、つまり早くエネルギーを失う。そのため、γ線を放射する電子に対し、電

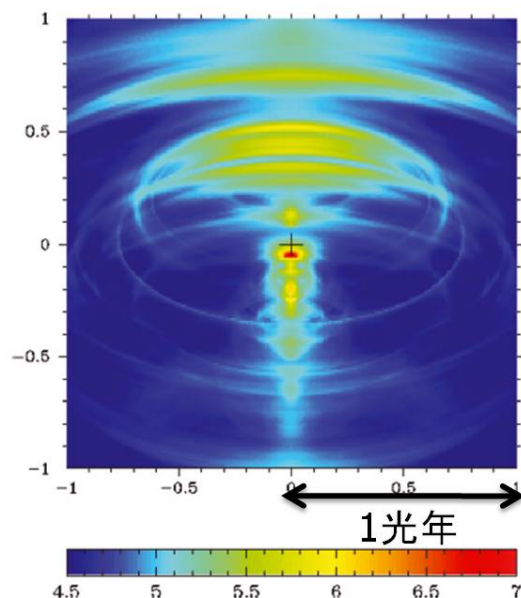


図5 かに星雲内部に観測されうる、可視光帯でのシンクロトロン放射のイメージ (シミュレーション、観測者に対するドップラー効果も考慮、[4] より)

波を放射する電子は、冷却が遅いと言える。この C1 領域の観測は、 $\gamma$  線フレアの後の 2010 年 11 月に行われたことから、9 月に  $\gamma$  線で数日間だけ観測されたフレアが、電波では 11 月になっても観測された、そしてそのフレアが C1 領域で起こった、と見ることができる。

ところで、C1 領域と、前に紹介した inner knot は異なる領域であるが、このことは、上で述べた「C1 領域がフレア発生源」とする観測事実が、前に紹介した inner knot でフレアが発生したというモデルを否定するものではない。なぜなら、シミュレーションはかに星雲における特定の領域を同定できるわけではないからである。シミュレーションで分かるのは、「パルサー付近に knot 状の構造がある」ということであり、これまで知られていた「パルサー付近の knot 状の構造」は inner knot であったために、論文 [4] では inner knot でフレアが起こったと結論づけられたが、同じような領域が別に見つかればそこでフレアが起こってもよいわけで、それが C1 領域だと考えれば、モデルと観測は矛盾していないとすることができる。

### 3 まとめと課題

最後に、全体のまとめと課題を述べる。2.1.1 節で、フレア発生に伴うスペクトルの変化について述べた際、「何らかの理由で、観測されたエネルギー帯の放射を行う加速電子が inject され…」と述べたが、なぜ、加速電子の量が増加するかについては、論文中でははっきりと述べられていなかった。これについては、今後解決していきたい課題と考えている。

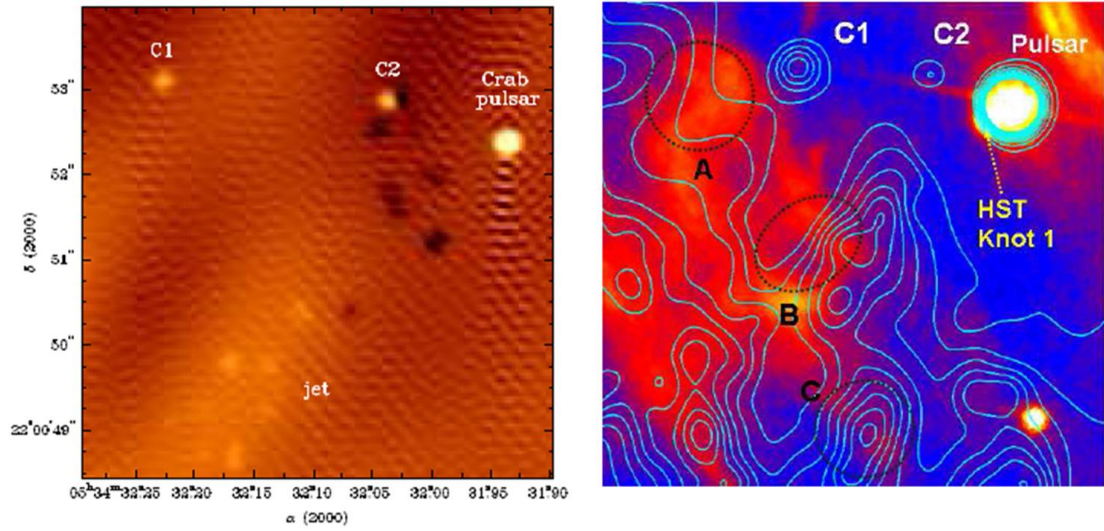


図6 C1領域 (左:電波観測に基づくイメージング、右:可視光観測のイメージングに電波観測のデータ(等高線)を重ねたもの、[5]より)

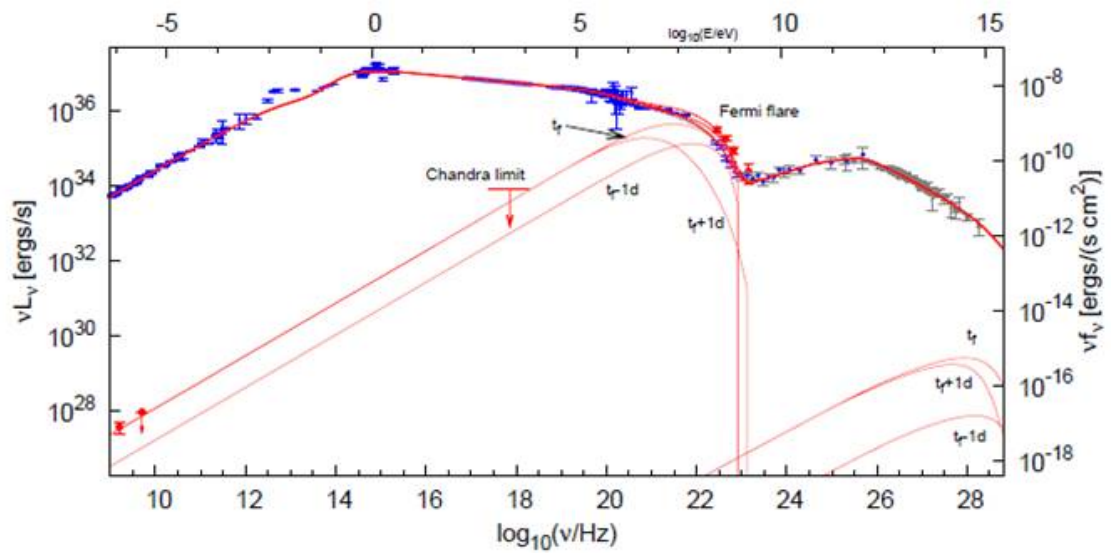


図7 C1領域でのスペクトル測定値と、かに星雲のスペクトル ([7]より)

## 参考文献

- [1] M.Tavani et al.,*Science*,331,736
- [2] Aharonian,arXiv:astro-ph/9803091v1
- [3] V.Vittorini et al. ,*ApJL*,732,L22
- [4] S.S.Komissarov,M.Lyutikov,2011,*MNRAS*,414,2017-2028
- [5] A.P.Lobanov, D.Horns, and T.W.B.Muxlow,arXiv:1107.0182v1