

Fermi Bubble における Multi-shock モデルによる加速と高エネルギー宇宙線スペクトルの関係

佐々木 健斗 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

地上で観測される宇宙線のスペクトルは power-law の分布をしているが、この指数は $\sim 10^{15}$ eV 付近のエネルギーを境に緩やかに変化することが観測から分かっており、このエネルギー領域は”knee 領域”と呼ばれている。knee よりも低いエネルギーの宇宙線については、超新星残骸 (supernova remnants, 以下 SNR) による加速が起源と考えられているが、knee を超えるエネルギーの宇宙線の起源については、明確な理論は得られておらず、銀河系外をその起源とする説などが提唱されていた。

K.S.Cheng らは、Fermi 望遠鏡によって銀河中心に観測された”Fermi Bubble”と呼ばれる巨大構造にその起源を求めることで、knee 付近における幕の変化と、knee を超えるエネルギーの宇宙線のスペクトルを説明できるとした [Cheng et al. (2012)]。 ”Fermi Bubble”は、銀河中心において、銀河面から南北にハロー付近まで広がるガンマ線放射の巨大な双極構造である。Cheng らはこの”Fermi Bubble”は銀河中心の巨大ブラックホール ”Sgr A*”での周期的な質量降着によるエネルギー解放として解釈できるモデル (CCDKI モデル、以下 C-11 モデルとする) を構築した [Cheng et al. (2011)]。その上で、”Fermi Bubble”において、複数の衝撃波が次々伝播する”Multi-shock 構造”が形成され得ることを指摘し、この衝撃波の平均間隔 l_{sh} が $l_{sh} \sim 30\text{pc}$ であれば、knee 付近で指数が緩やかになることが自然に説明できるとした。さらに、”Multi-shock 構造”がある場合には、超音速乱流での統計加速によって、knee を超える $10^{15} \text{ eV} < E < 10^{19} \text{ eV}$ の範囲のエネルギーの宇宙線も説明できるとした。

本稿では、以下の論文のレビューを行い、Cheng らの提唱する”C-11 モデル”及びそこから考えられる加速機構での高エネルギー宇宙線スペクトルの説明に関して、実際の観測事実と照らし合わせることで、このモデルへの議論を深めることにする。

特に、このモデルにおいて、銀河中心における質量降着の割合の仮定が非常に重要な役割をしていることを見出し、この質量降着率の仮定の妥当性検証が、Cheng らのモデルの妥当性の判断に大きな影響を与えられる可能性があることを議論していく。

1 Introduction

現在観測されている宇宙線のエネルギースペクトルは、 $E^{-\nu}$ の形の power-law の分布をしている。しかし、この指数は $E \sim 10^{15}$ eV 付近のエネルギーを境として、 $\nu \sim 2.7$ から $\nu \sim 3.1$ へとゆるやかに変化している。このエネルギー領域は、”knee 領域”と呼ばれ、この領域を境に、宇宙線の起源に変化があると考えられている。このうち、knee 領域以下のエネルギー ($E < 10^{15} \text{ eV}$) の宇宙線については、超新星

残骸 (supernova remnants, 以下 SNR) を粒子の加速源とした説明が有力である [Bykov et al. (2009)]。しかし、knee 領域を超えるエネルギーの宇宙線の起源については、未だ明確な説明は得られておらず、銀河系外にその起源を求める説などが提唱されていた。

一方、Fermi 望遠鏡によるガンマ線観測の結果、銀河中心に ~ 10 kpc にも及ぶ巨大な双極構造が存在することが確認された。この構造は”Fermi Bubble”と呼ばれ、その構造を説明するモデルについての議論は現在でも結論を得られていない。Cheng らは、この Fermi Bubble を説明するため、”CCDKI モデル (以下 C-11 モデルと呼ぶ)”を考えた。そして、このモ

デルにおいて、複数の衝撃波が次々伝播する”Multi-shock 構造”が形成されることを見出し、さらに Fermi Bubble が非常に巨大な構造であることに注目して、knee 領域を超える宇宙線の加速源となるのではないかと考えた。

以下では、まず Cheng らの考えた”C-11 モデル”がどのようなものであるかを確認し、その後、”C-11 モデル”で形成される”Multi-shock 構造”が $E \sim 10^{15} \text{eV}$ のあたりでの加速機構が変化することをうまく説明できること、及び Fermi Bubble の巨大さ故に最大で $E \sim 10^{19} \text{eV}$ の宇宙線の加速源となりうる、という Cheng らのモデルを紹介していくことにする。

2 Methods

銀河中心に Fermi Bubble のような巨大構造が存在するということは、銀河中心でそのエネルギーの源となるような活動を考えなくてはならない。そこで Cheng らは、”C-11 モデル”を考えて Fermi Bubble に対する説明を試みた [Cheng et al. (2011)]。C-11 モデルでは、エネルギー源として、過去 $\sim 10 \text{Myr}$ に起きた、銀河中心の超巨大ブラックホール Sgr A* における準周期的な star capture を考えている。このモデルでは、 $\tau_{\text{cap}} \sim 3 \times 10^4 [\text{yr}]$ に一回 star capture が起き、capture 一回につき、 $W \sim 3 \times 10^{52} [\text{erg}]$ のエネルギーが解放されると仮定している。これは τ_{cap} よりもずっと長い時間スケールでみれば、平均的に $\dot{W} \sim 3 \times 10^{40} [\text{erg/s}]$ の割合でのエネルギー源を仮定したことに対応する。こうしたエネルギー解放によって Sgr A* 周辺 $30 \sim 50 \text{pc}$ のプラズマが 10keV 程度まであたためられ、ハローへと広がって shock を形成する。shock front の伝播速度としては、 $u \sim 10^8 [\text{cm/s}]$ を仮定し、この shock がハローのガスを $\sim 1 \text{keV}$ 程にあたためながら拡散していくとしている。こうしてあたためられたハローにおいて、熱放射などによって X 線が発生する。この描像は、ROSAT による X 線領域での観測で Fermi Bubble と同じ銀河中心に見えている ”ROSAT structure” というシャープな edge 構造 [Bland-Hawthorn and Cohen. (2003)] を説明する。そして、この shock で加速された proton が、ハロー中の星間 proton との p-p collision により π^0 が生成

し、それが崩壊する際に発生するガンマ線が Fermi Bubble として観測されるというのがこのモデルの大まかな過程となる。

ここで、proton が電離損失によってエネルギーを失う時間スケールとして、

$$\tau_{\text{diss}} \simeq 10^6 \left(\frac{n}{1 \text{ cm}^{-3}} \right) \sqrt{\frac{E_p}{100 \text{ MeV}}} \text{ yr} \quad (1)$$

を考えると、 $\tau_{\text{cap}} \gg \tau_{\text{diss}}$ となる場合には、”Multi-shock 構造”がハロー中に形成される。 E_p は proton のエネルギーである。この過程でプラズマがあたためられていくことになる。このモデルにおいて Cheng らが Kompaneets の方法によって得た波面は図 1 のようになる。C-11 モデルにおける shock の間の平均間隔 l_{sh} は、 $l_{\text{sh}} \sim u \tau_{\text{cap}} \sim 30 [\text{pc}]$ となり、このような shock が次々と Fermi Bubble 内部を伝播していくこととなる。この Cheng らのモデルによって、観測さ

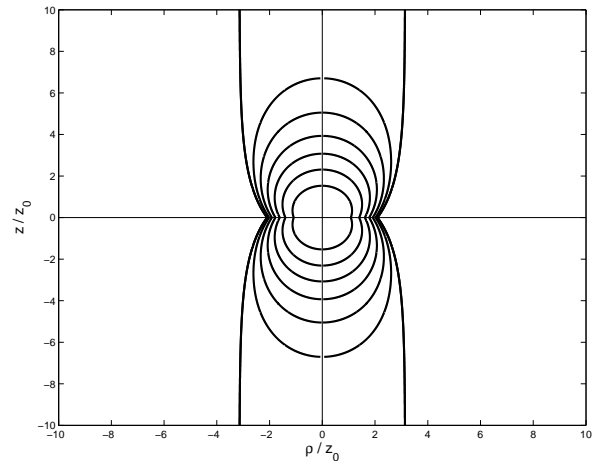


図 1: Kompaneets 解による Multi-shock 構造 [Cheng et al. (2012)]

れているスペクトルがうまく説明できることを、次の章で見ていくことにする。これは、Multi-shock 構造を考えたことにより、統計加速での加速が考えられたこと、及び統計加速が非常に高エネルギーまで適用できるほどに Fermi Bubble が巨大な構造であったことが本質的な理由ではないかと推測される。

3 Results

C-11 モデルにより、Fermi Bubble において”Multi-shock 構造”が形成されると、 $E \sim 10^{15}$ eV 付近で加速機構が変化することを説明できると Cheng らは考えた。以下でその考えを見ていくこととする。

shock を特徴づける量として、 $l_{\text{sh}} \sim u\tau_{\text{cap}} \sim 30$ [pc] があったが、もうひとつ single shock による粒子加速を特徴づける量として、拡散距離: $l_D \sim D/u$ を考える。ここで、 D は shock 付近の粒子の空間拡散係数であり、Bohm 拡散を考えると、 $D \sim cr_L(E)/3$ と表される。 $r_L(E) = E/ZeB$ は粒子の Larmor 半径である。すなわち、Bohm 拡散の場合は、

$$l_D \sim \frac{cr_L}{u} = \frac{cE}{ZeBu} \quad (2)$$

となる。Bykov らの解析によると、この l_D と l_{sh} の大小関係によって、加速の機構が変化することになる [Bykov and Toptygin. (1993)]。すなわち、無次元パラメータとして、

$$\Psi = \frac{l_{\text{sh}}}{l_D} \sim \frac{ul_{\text{sh}}}{cr_L} \quad (3)$$

を考えると、 $\Psi \sim 1$ (すなわち $l_D(E_1) \sim l_{\text{sh}}$) となるようなエネルギー E_1 が加速機構の変化する境界点となると考えられる。Fermi Bubble における E_1 は、C-11 モデルのもとでは、

$$\begin{aligned} E_1 &\approx \frac{ZeBul_{\text{sh}}}{c} \\ &= 10^{15} Z \left(\frac{B}{5 \mu\text{G}} \right) \left(\frac{l_{\text{sh}}}{30 \text{ pc}} \right) \left(\frac{u}{10^8 \text{ cm s}^{-1}} \right) \text{ eV} \end{aligned} \quad (4)$$

となる。C-11 モデルで $B \sim 5 \mu\text{G}$ とすると、 $E_1 \sim 10^{15}$ eV が境界となることがわかる。

$\Psi \gg 1$ ($E \ll E_1$) の場合は、Multi-shock による加速は single shock による加速を組み合わせたものとなるため、スペクトルは E^{-2} のものから E^{-1} のハードなスペクトルへと徐々に変化していく。そのため、このエネルギー領域では、SNR による加速が支配的と考え、Fermi Bubble の影響は小さいと考えられる。一方、 $\Psi \ll 1$ ($E \gg E_1$) の場合は、超音速の乱流の影響によって、加速は純粋な統計加速となる。この場合、Fermi Bubble による加速は最大でどの程度

まで行われるかを考えると、proton の Larmor 半径 $r_L = E/eB$ が Fermi Bubble の半径 $H/2$ よりも大きくなってしまいうエネルギー E_2 が限界だと考えて、

$$E_2 \approx 10^{19} \left(\frac{B}{5 \mu\text{G}} \right) \left(\frac{H}{10 \text{ kpc}} \right) \text{ eV} \quad (5)$$

と見積もれる。

さて、Fermi Bubble 内部のスペクトルが power-law の分布をしているとすると、

$$\frac{d\dot{N}}{dE} = \frac{\dot{N}_0}{E_1} \left(\frac{E}{E_1} \right)^{-\nu} \quad (6)$$

と表され、 $E_1 < E < E_2$ の領域においては、 ν は、

$$\nu = -\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{9}{4} + \frac{\pi^2 D_B^2}{u^2 H^2}} \quad (7)$$

と表される。ここで、 D_B は Fermi Bubble 内部の平均拡散係数である。

この Cheng らのモデルでは、 E_1 、 E_2 、 ν 、 \dot{N}_0 という 4 つのパラメーターが存在することとなる。C-11 モデルにおいては、 $B = 5 \mu\text{G}$ 、 $u = 10^8 \text{ cm s}^{-1}$ 、 $H = 10 \text{ kpc}$ という値を採用したため、 $E_1 = 10^{15}$ eV、 $E_2 = 10^{19}$ eV となる。一方、 ν 、 \dot{N}_0 を見積もることは困難なため、Cheng らはこの 2 つの値を様々に変えてフィッティングを行った。その結果を、図 2 に記す。フィッティングから、 $\nu = 3.12$ という値が最も良く観測データとあうことが求められたと Cheng らは結論付けている。この値は、地球まで伝播する間のスペクトルへの影響を無視すれば、地球における宇宙線のスペクトルが $E_1 < E < E_2$ の領域で $\nu \sim 3.1$ という指数となっているという観測をうまく説明できる。また、 $\nu = 3.12$ は $D_B \sim 3 \times 10^{30} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ という値に対応するが、これは $D_B \sim cl_{\text{sh}}/3$ とすると、 $l_{\text{sh}} \sim 100 \text{ pc}$ に対応し、このモデルの仮定 $l_{\text{sh}} \sim 30 \text{ pc}$ と大きな矛盾なく説明できる。

4 Discussion

ここまでの Cheng らの提唱する C-11 モデルに基づいた Fermi Bubble の描像により、地球での宇宙線スペクトルに見える”knee”がうまく説明でき、”knee”を超える領域の宇宙線源ともなりうることを見てきた。しかし、この Cheng らの描像だけでは説明がつか

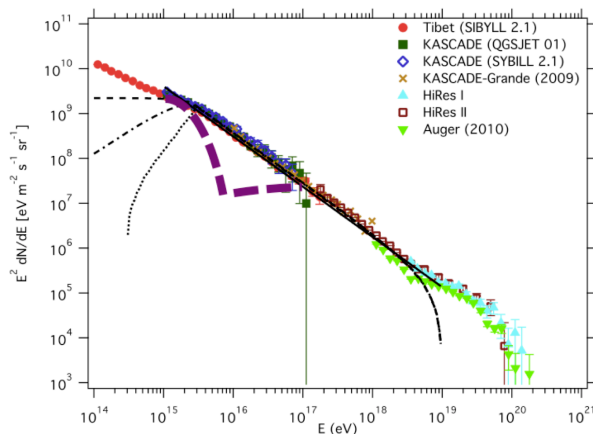


図 2: Cheng らの得たフィッティングの結果 [Cheng et al. (2012), 一部改変あり]

かないこと、今後の議論・追証の必要もあるのではないかと考えられる。

まずは、C-11 モデルで用いた仮定が本当に妥当といえるかどうか、ということがあげられる。Cheng らは、過去 10Myr 銀河中心の巨大ブラックホール SgrA* において $\tau_{\text{cap}} \sim 3 \times 10^4 [\text{yr}]$ に一回という割合での star capture を仮定しているがこの割合は現在の SgrA* における降着率と比べて非常に大きい値である。この降着率の検証が、このモデルの検証において非常に重要となることを議論してみる。

例えば、降着率が Cheng らの仮定よりも 100 倍ほど小さかった、すなわち $\tau_{\text{cap}} \sim 3 \times 10^6 \text{ yr}$ に一回の capture であったとし、その他の値は Cheng らと同様であると仮定してみる。するとまず、 $\dot{W} \sim 3 \times 10^{38} [\text{erg/s}]$ とエネルギー解放率は $\frac{1}{100}$ になり、周辺のプラズマを温めるのに十分なエネルギーが得られなくなってしまう。この問題だけならば capture 一回につき、100 倍の $W \sim 3 \times 10^{54} [\text{erg}]$ のエネルギーが解放されると仮定すれば解決できるが、さらに l_{sh} の変化という問題が残る。観測結果を説明するため、shock front の速度 $u \sim 10^8 [\text{cm/s}]$ には大きな変化を与えられないと推測される。すると、 $l_{\text{sh}} \sim 3 \times 10^3 \text{ pc}$ と shock の平均間隔が 100 倍程度大きくなってしまいが、このとき式 (4) から $E_1 \approx 10^{17} \text{ eV}$ と、指数の変化するポイントがずれてしまう。図 2 の紫の太破線で”knee”とみられる指

数変化の境界点と、 $E_1 \approx 10^{17} \text{ eV}$ とのずれを示した。そのうえ、 $\nu \sim 3.1 (D_B \sim 3 \times 10^{30} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1})$ は $l_{\text{sh}} \sim 100 \text{ pc}$ に対応していたのだが、これとも大きくずれてしまい、観測とよくあう指数を説明するには適さなくなってしまう。したがって、過去 10Myr での SgrA* における τ_{cap} の検証が、このモデルの妥当性を図る上で非常に重要となってくるといえる。

さらに、もし Cheng らの主張通りに、Fermi Bubble が $10^{15} \text{ eV} < E < 10^{19} \text{ eV}$ の領域の宇宙線源となっているならば、この領域の宇宙線は、地球から見て Fermi Bubble の方向、すなわち銀河中心方向由来のものが多くなるような異方性をもつのが自然ではないかと考えられる。しかし、現時点では、そのような観測事実は認められていない。

このような Cheng らのモデルの様々な点についての疑問を解決するために、今後 CTA (Cherenkov Telescope Array) などを用いたさらに広いエネルギー領域での観測 (特に TeV 以上のガンマ線の様子) や、また他の銀河における Fermi Bubble に対応するような構造、過去 10Myr での SgrA* における活動などについての研究が進められることが重要である。

Acknowledgement

この度、「2013 年度 第 43 回 天文・天体物理学若手夏の学校」の開催に当たって、京都大学基礎物理学研究所より「基研研究会」(研究会番号: WITP-W-13-07) として援助いただいたことに、この場をかりまして謝辞を申し上げます。

また、今回の発表にあたってご指導・ご助言いただいた方々にも、この場を借りまして深くお礼申し上げます。

Reference

- Cheng et al. 2012. The Astrophysical Journal, 746:116
- Cheng et al. 2011. The Astrophysical Journal, 731:L17
- Bykov et al. 2009. Astron.Lett.,35,555
- Bland-Hawthorn and Cohen. 2003. The Astrophysical Journal, 582:246
- Bykov and Toptygin. 1993. Phys.-Usp., 36,1020