

宇宙 MeV ガンマ線背景放射と 活動銀河核の硬 X 線スペクトル： AGN のホットコロナの起源への示唆



井上 芳 幸

〈京都大学宇宙物理学教室 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉
e-mail: yinoue@kusastro.kyoto-u.ac.jp

MeV 領域宇宙ガンマ線背景放射の起源は長い間謎とされている。宇宙 X 線背景放射起源が活動銀河核 (AGNs) であることは観測的に解明されているが、現在の AGN による背景放射モデルではスペクトルに指数関数的カットオフがかかり、MeV 背景放射を説明できない。カットオフがあるのは、AGN のコロナ電子が全て熱的分布であるという仮定によるが、コロナは磁気リコネクション加熱されていると考えられ、非熱的電子が存在していても自然である。そこでわれわれはコロナに非熱的電子も含まれているとし、コンプトン散乱による AGN スペクトルを詳細に計算した。結果、これまでの熱的モデルに非熱的電子分布を加えることで MeV 背景放射を自然に説明できた。また、この結果は太陽フレアや地球磁気圏の観測によって得られた磁気リコネクション加熱された非熱的電子分布の幅とよくあう結果となり、高温コロナの加熱起源が磁気リコネクションである説を支持する結果となった。

1. はじめに

宇宙背景放射というのは全方向からほぼ均等に観測される電磁波放射であり、その中でも COBE 衛星や WMAP 衛星の活躍により宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background) は非常に有名である。もちろん、宇宙はマイクロ波だけでなく電磁波の全領域である赤外線、可視光、紫外線、X 線そして γ 線の背景放射で満ちている。数多くの X 線衛星の活躍などにより数百 keV までの宇宙 X 線背景放射の起源は活動銀河核 (AGN) で説明できると考えられている^{1), 2)}。さらに、Compton Gamma Ray Observatory (CGRO 衛星) に搭載された Energetic Gamma Ray Experi-

ment Telescope (EGRET) の観測データなどから Blazar タイプの AGN からの放射が 100 MeV 以上の宇宙ガンマ線背景放射において大きな寄与があるということもよく知られている事実である^{3), 4), *1}。一方で X 線および 100 MeV 以上のガンマ線の谷間にあたる MeV 領域宇宙ガンマ線背景放射は Solar Maximum Mission (SMM) や CGRO 衛星に搭載された Imaging Compton Telescope (COMPTEL) によって観測されているが、「宇宙 MeV ガンマ線背景放射の起源は何であるか？」という問題はその観測精度向上の難しさから長い間、宇宙物理学の中において謎とされていた。本稿ではこの長い間謎とされてきた MeV エネルギー領域の宇宙 MeV ガンマ線背景放射の起源に

*1 しかしながら Blazar によって宇宙ガンマ線背景放射を完全に説明することは難しく、別の起源の可能性も考えられている⁴⁾。

ついでにわれわれの研究を紹介していきたい。

2. 宇宙 MeV ガンマ線背景放射

宇宙 MeV ガンマ線背景放射の起源を説明するためにさまざまな候補が考えられてきた。まず、(1) X線背景放射の起源である AGN である。しかし、これまでに仮定されてきた AGN のスペクトルモデルでは数百 keV 付近に指数関数的カットオフがかかってしまうため、MeV 背景放射を説明することはできない。次に (2) Ia 型超新星爆発中に重元素の原子核崩壊によって放出されるガンマ線の放射を起源とする考えがある⁵⁾。しかしながら近年の Ia 型超新星爆発の発生頻度の詳細な観測結果から Ia 型超新星爆発起源の MeV 背景放射フラックスは観測されている MeV 背景放射フラックスよりも 1 桁ほど小さいため完全に MeV 背景放射を説明することはできないことがわかっている⁶⁾。次に (3) MeV エネルギーにピークをもつ Blazar 天体、MeV Blazar が寄与しているという可能性もあるが、サンプルが少ないために定量的な議論をするのは難しい。そして (4) 質量が MeV 程度のダークマター対消滅によって説明しようという考えもある⁷⁾。しかしながら素粒子物理から MeV スケールのダークマターの候補となるものはない。また、この考えはわれわれの銀河中心の 511 keV 輝線を説明するために考えられたダークマター対消滅の考えに基づいているのだが、そもそも銀河中心の輝線の起源については他の起源も考えられており⁸⁾、いまだに議論がなされているのが現状である。

ここで、MeV 背景放射の起源を理解するうえでそのスペクトルに一つ重要な特徴がある。それは、MeV 背景放射スペクトルが X 線背景放射スペクトルのピークから非常に滑らかにべき関数の形で伸びていることである。もし MeV 背景放射の起源が X 線背景放射の起源と全く異なるものであるとしたら、このような滑らかなつながりをもっているという特徴は非常に驚くべき偶然とい

うことになる。したがって X 線背景放射の起源とは異なるものという考えよりも、むしろ X 線背景放射を形づくっているもの、つまり AGN が MeV 背景放射の起源であると考えのほうがより自然である。

ではなぜこれまでの AGN のスペクトルモデルでは数百 keV でカットオフがかかって MeV 背景放射を説明できないのであろうか。AGN の硬 X 線スペクトルは AGN の中心にある超大質量ブラックホール (Super Massive Black Hole = SMBH) 近傍の降着円盤上のコロナ中にある高温電子が降着円盤から放射される UV 光子を逆コンプトン散乱することによってつくられており⁹⁾、数百 keV 付近にあるスペクトルの指数関数的カットオフはこの高温コロナ電子が熱的エネルギー分布をもっているという仮定を反映している。実際に観測などから AGN にはそのようなカットオフが存在することは確かめられている¹⁰⁾。しかしカットオフ後にべきテイルが MeV エネルギー領域まで伸びていれば、MeV 背景放射のべきスペクトルを再現できると考えられる。これは少量の非熱的電子がべき分布をもって AGN コロナ中にあることで形づくられると考えられる。現在の MeV ガンマ線の観測感度からは近傍の最も明るい AGN ですらそのような非熱的成分に対する制限はつけられていないので、そのような非熱的成分がある可能性は否定できない。ここでさらに興味深いことに、降着円盤上のコロナは太陽コロナと共通の性質をもっている可能性が理論的に示唆されている¹¹⁾。そのため現在 AGN コロナの高温電子の加熱源としては磁気リコネクションが有力な候補の一つとして考えられている¹²⁾。したがって、太陽フレア中で見られる磁気リコネクションによる非熱的電子加速が AGN コロナ中でも起こり非熱的電子が存在していると考えられる。

そこでわれわれは AGN のコロナ中に熱的電子と非熱的電子の両方が存在していると考え、コロナ中での逆コンプトン散乱過程をモンテカルロ・

シミュレーションで計算し AGN の X 線およびガンマ線スペクトルの新たなモデルをつかった。そしてわれわれの新たな AGN スペクトルモデルに基づいて最新の AGN の光度関数から X 線背景放射, MeV ガンマ線背景放射を計算し, MeV 背景放射を説明するために必要な非熱的電子の分布を決めた。さらに, この結果と太陽や地球磁気圏で観測されている磁気リコネクションによる粒子加速の結果と比較し, AGN のコロナが磁気リコネクションによって加熱されているというシナリオで自然に説明できることを示した。

3. AGN スペクトルモデル

AGN の硬 X 線スペクトルは光学的に厚い降着円盤上から出た UV 光子をコロナ中の高温電子が逆コンプトン散乱でエネルギーをたたき上げることで形づくられる (Comptonization プロセス)。われわれはこれまでの先行研究にあるような熱的電子に加えて, 高エネルギー非熱的電子が AGN コロナ中に存在すると仮定した。非熱的電子の性

質を決めるものとしては非熱的電子がどのような分布しているのか, そして全電子エネルギーに対してどの程度の割合で非熱的電子が含まれているかという二つである。分布については $dN_e/dE_e \propto E_e^{-\Gamma}$ というエネルギー分布を与えた。また, 後者の非熱的電子の量を考えるために変換ローレンツ因子 (transition electron Lorentz factor) γ_{tr} というものを導入した。この値は $E_e = \gamma_{tr} m_e c^2$ というエネルギーで熱的電子スペクトルと非熱的電子スペクトルが同じ値をとりこの値より小さければ熱的電子, 大きければ非熱的電子という分布の分かれ目となる値である。この値が“非熱的”分布の下限値となる。したがって, Γ と γ_{tr} の二つが非熱的電子の性質を決めるパラメーターとなる。

上記の仮定のもとにモンテカルロ・シミュレーションを用いて AGN コロナでの Comptonization プロセスを計算した。本計算は Pozdniakov, Sobol, & Siuniae¹³⁾ および Gorecki & Wilczewski¹⁴⁾ に基づいて行った。また, 温度が低く光学的に厚い物質 (降着円盤や分子雲トラス) からによる X

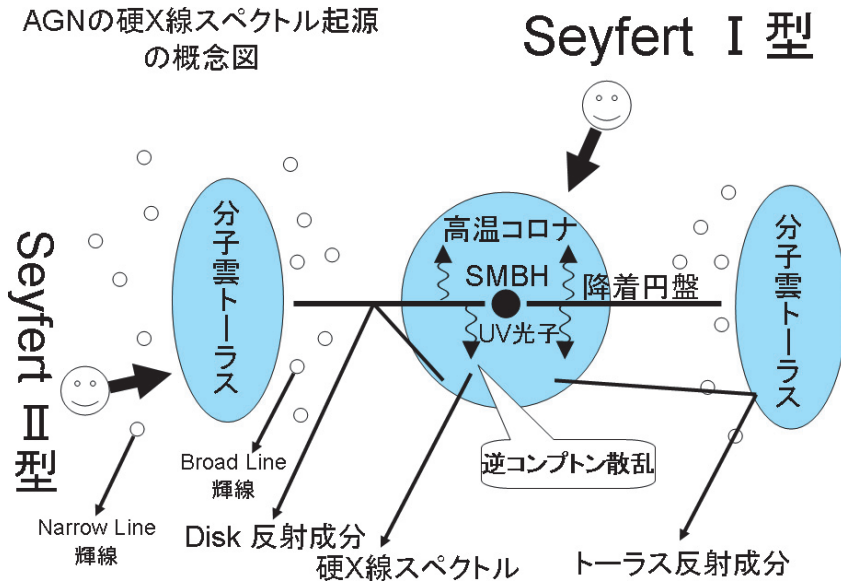


図1 AGN の概念図。硬 X 線スペクトルは降着円盤から放射される UV 光子が高温コロナ中で逆コンプトン散乱を受け出てきた X 線光子がおもに占めている。またディスクや分子雲トラスからの反射成分も観測される。概念図のため実際のスケールと異なる部分もある。

線光子の反射成分というものも AGN のスペクトルを考えるうえでは重要になってくる。この効果は Ueda ら¹⁾ (以下 U03) で計算されている方法に従って計算している。

宇宙背景放射スペクトルを計算するために U03 にある AGN の X 線光度関数を用いて今回のわれわれの AGN スペクトルモデルを光度空間、赤方偏移空間で積分し、宇宙 X 線、ガンマ線背景放射のスペクトルを計算した。U03 にあるように吸収の効果 (水素柱密度 N_H function) および, Compton-thick AGN からの寄与も考慮に入れている。また後述のように最近の AGN 光度関数²⁾ に基づいての計算でもわれわれの結果は変わらなかった。

4. 研究結果

図 2 は前節で述べたプロセスに基づいて計算した AGN のスペクトルモデルを示したものである。ただし、図中では Comptonization により生成されるスペクトルのみを示すために反射成分や、吸収の効果は示していない。以下では $\Gamma=3.8$, $\gamma_{tr}=4.4$ (青い太線) という値の組み合わせが MeV 背景放射を説明するためのベストフィットモデルであるので、これらの値をわれわれの標準モデルとして扱っている。この標準モデルでは非熱的電子が全電子エネルギーの約 3.5% を占めている。ベストフィットモデルからそれぞれの値を変えた際にできるスペクトルの結果も比較のために図中に示してある。またこれまでの熱的電子のみを含むモデルも示した。このモデルではやはり数百 keV 付近に指数関数的カットオフが見られる。

図 3 ではわれわれの新しい AGN スペクトルモデルを U03 の光度関数をもとに光度空間、赤方偏移空間で積分した背景放射スペクトルの図を示している。U03 モデルで予測される 100 keV 以下の宇宙 X 線背景放射スペクトルは HEAO-1 の

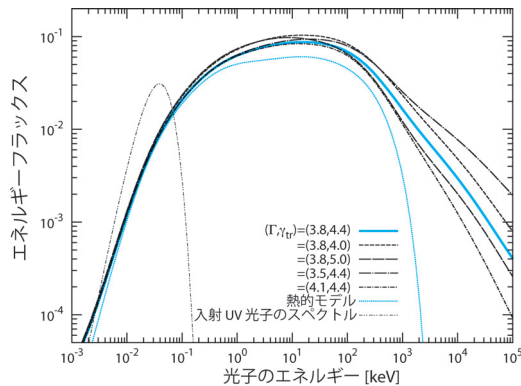


図 2 今回のわれわれのモデルをもとに計算した AGN の X 線、ガンマ線スペクトル。フラックスは $E^2 dN/dE$ の任意の単位系で記してある。 dN/dE は微分フォトンフラックス、反射成分と吸収の効果を除いた逆コンプトン散乱の結果のみを記してある。青い太線が $\Gamma=3.8$ で $\gamma_{tr}=4.4$ (エネルギー割合として 3.5%)、MeV 背景放射スペクトルに最もよくフィットするモデルである。他の曲線は異なるモデルパラメーターで計算した結果である。青い点線は熱的電子のみの存在を考えたこれまでのモデルの計算結果、黒い点線は入射 UV 光子スペクトルである。

データよりも 10-20% 高く見積もられている*2。確認のために、U03 モデルの規格化の値を HEAO-1 のデータに合うように 20% 低くしてみると、このときのベストフィットの結果は γ_{tr} がわずかに 0.4 だけ小さくなり、 Γ の値はほとんど変化しなかった。

上述のように、われわれは X 線から 10 MeV までの宇宙背景放射スペクトルを $\Gamma=3.8$ と $\gamma_{tr}=4.4$ という値の組み合わせでわれわれの AGN スペクトルモデルによって説明することができた。では、これらのパラメーターは AGN コロナ中の高温電子の起源に対する理論の中においてどの程度自然な値なのであろうか？ この問題については次章にて説明する。

*2 このずれの原因についての詳しい議論は Inoue ら¹⁷⁾を参照のこと。

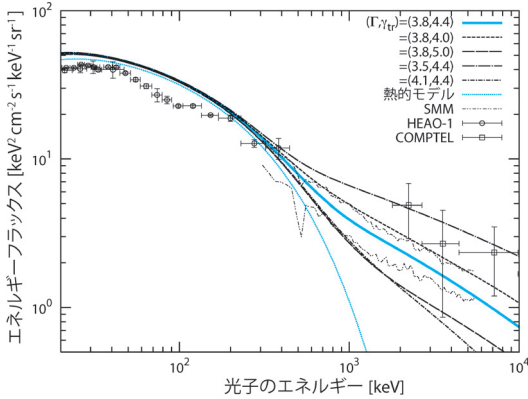


図3 われわれの図2に示したAGNスペクトルモデルに基づいて計算した宇宙X線/ガンマ線背景放射スペクトル図。各線は図2でのスペクトルに対応した背景放射である。またHEAO-1¹⁵⁾、SMM⁹⁾、そしてCOMPTEL¹⁶⁾の観測データ点も示してある。SMMのデータに関しては点線で $\pm 1\sigma$ のデータ不定性を示してある。

5. 非熱的電子の起源は何なのか？

§2で述べたように、磁気リコネクションはAGNコロナ中の非熱的電子の加速機構として有力な候補である。そこでわれわれはMeV背景放射を説明するために必要な非熱的電子成分と太陽フレアなどの別の天体現象において観測されている磁気リコネクション加速による電子スペクトルの結果とを比較してみた。すると、太陽の巨大フレア中などでは磁気リコネクション加速された非熱的電子のスペクトルのべきが $\Gamma \sim 4$ となっている⁹⁾。そして、地球磁気圏の磁気テイルと言われる磁気リコネクション領域では $\Gamma = 3.8$ という値がWind衛星によって直接観測されている¹⁹⁾。これらの値がMeV背景放射スペクトルをAGN起源で説明しようとしたときに必要とされる非熱的電子のべき分布($\Gamma = 3.8$)に非常に近いということは着目すべき事実である。また、地球磁気テイルにおける電子スペクトルの直接観測では、電子の非熱的成分は熱的電子スペクトルが指数関数的

カットオフにより減少するあたりから滑らかに非熱的電子へとつながっている。これはX線からMeVガンマ線へと移っていく際の宇宙背景放射のスペクトル形状によく似ている。したがって、MeV領域背景放射を説明するためにAGNコロナ中に必要な非熱的電子の成分は上記の太陽フレアや地球磁気圏での磁気リコネクションの観測と照らし合わせると非常にリーズナブルであると考えられる。以上のことから、これらの結果はAGNコロナの加熱起源が磁気リコネクションであるという説をサポートする結果にもなった。

6. 将来の観測への示唆

今回のわれわれの研究ではAGNコロナ中に少量の非熱的電子が存在すればAGNスペクトルにべきテイルが現れる可能性を示した。将来的に感度のよいMeVガンマ線観測ができればこのような非熱的成分が近傍AGNで実際に見つかるかもしれない。具体的な観測計画としてはAdvanced Compton Telescope (ACT)²⁰⁾という観測装置が2015年に打ち上げ予定である。ACTの場合、0.2–10 MeVで連続成分の感度として $E_\gamma^2 dF_\gamma / dE_\gamma \sim 1 \times 10^{-5} (E_\gamma / \text{MeV}) \text{ MeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (dF_γ / dE_γ は微分光子フラックス)、という感度をもつと期待されている。近傍で最も明るいセイファート銀河であるNGC 4151の硬X線スペクトルをもとに今回のわれわれのモデルからどの程度の非熱的成分がMeVエネルギー領域に見られるか計算してみたところ約 $3 \times 10^{-5} (E_\gamma / \text{MeV})^{-0.8} \text{ MeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 程度のフラックスが予測された。この値はACTの感度では観測可能な値である。このように将来的に近傍の明るいAGNでMeV領域において非熱的成分を観測することは今回のわれわれのモデルのテストにもなるであろう。

7. まとめ

本研究で、われわれはAGNコロナ中に理論的に存在が予測される非熱的電子によるComptoni-

zation 効果を考えることによって MeV 領域宇宙ガンマ線背景放射が宇宙 X 線背景放射の起源である AGN によって説明できることを示した。そして MeV ガンマ線背景放射を説明するために必要なベストフィットの非熱的電子成分は電子の全エネルギーの $\sim 3.5\%$ で $dN_e/dE_e \propto E_e^{-3.8}$ という電子スペクトルをもつ。この非熱的電子分布のべきは太陽フレアや地球磁気圏で観測される磁気リコネクション加熱を受けた電子のべきに近い値である^{18), 19)}。これは AGN コロナが磁気リコネクション加熱されているという考え¹²⁾を支持する結果となった。また、将来の MeV ガンマ線検出器の感度の向上によって近傍の明るい AGN でわれわれの予測する非熱的成分を直接観測する可能性もある。

謝 辞

本稿は戸谷友則准教授、上田佳宏准教授との共同研究¹⁷⁾の内容をまとめたものです。特に指導教員である戸谷友則准教授に感謝を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Ueda Y., Akiyama M., Ohta K., Miyaji T., 2003, ApJ 598, 886
- 2) Gilli R., Comastri A., Hasinger G., 2007, A&A 463, 79
- 3) Sreekumar P., et al., 1998, ApJ 494, 523
- 4) Narumoto T., Totani T., 2006, ApJ 643, 81
- 5) Watanabe K., Hartmann D. H., Leising M. D., The L.-S., 1999, ApJ 516, 285
- 6) Strigari L. E., Beacom J. F., Walker T. P., Zhang P., 2005, J. Cosmol. Astropart. Phys. 4, 17
- 7) Ahn K., Komatsu E., 2005, Phys. Rev. D 71, 021303
- 8) Totani T., 2006, PASJ 58, 965
- 9) Zdziarski A. A., Fabian A. C., Nandra K., Celotti A., Rees M. J., Done C., Coppi P. S., Madejski G. M., 1994, MNRAS 269, L55
- 10) Zdziarski A. A., Poutanen J., Johnson W. N., 2000, ApJ 542, 703

- 11) Galeev A. A., Rosner R., Vaiana G. S., 1979, ApJ 229, 318
- 12) Liu B. F., Mineshige S., Shibata K., 2002, ApJ 572, L173
- 13) Pozdniakov L. A., Sobol I. M., Siuniae R. A., 1977, AZh 54, 1246
- 14) Gorecki A., Wilczewski W., 1984, Acta Astron. 34, 141
- 15) Gruber D. E., Matteson J. L., Peterson L. E., Jung G. V., 1999, ApJ 520, 124
- 16) Kappadath S. C., et al., 1996, A&AS 120, 619
- 17) Inoue Y., Totani T., Ueda Y., 2008, ApJ 672, L5
- 18) Lin R. P., 2006, Space Sci. Rev. 124, 233
- 19) Øieroset M., Lin R. P., Phan T. D., Larson D. E., Bale S. D., 2002, Phys. Rev. Lett. 89, 195001
- 20) Boggs S. E., 2006, NewA Rev. 50, 604

The Cosmic MeV Gamma-ray Background and Hard X-ray Spectra of Active Galactic Nuclei: Implications for the Origin of Hot AGN Coronae

Yoshiyuki INOUE

Department of Astronomy, Kyoto University, Oiwake-cho, Kitashirakawa, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

Abstract: The origin of the extragalactic MeV gamma-ray background radiation is still unknown. Current AGN spectrum models which explain the cosmic X-ray background cannot explain the MeV background spectrum, because of the thermal exponential cutoff. Here we construct a new spectral model including nonthermal coronal electrons, which are expected to exist in a magnetic reconnection heating corona. We show that the MeV background spectrum can nicely be explained by our model and discussed the properties of such nonthermal electrons comparing with those in solar flares and the Earth magnetosphere.