

宇宙ガンマ線背景放射研究の進展と MeVガンマ線天文学への期待



井上 芳 幸

〈理化学研究所数理創造プログラム 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

e-mail: yoshiyuki.inoue@riken.jp

宇宙背景放射の中でもビッグバンの名残である宇宙マイクロ波背景放射は特に有名である。しかし、宇宙はマイクロ波だけでなく、電波、赤外線、可視光、X線そしてガンマ線で満たされている。本稿では電磁波観測のエネルギーフロンティアであるガンマ線領域での宇宙背景放射に関する研究の進展を紹介したい。2008年に打ち上げられたフェルミガンマ線衛星の圧倒的な感度により、宇宙GeVガンマ線背景放射はブレイザー・電波銀河・星形成銀河の3種族からなることがわかってきた。一方で、MeV帯域における宇宙ガンマ線背景放射の起源は謎に包まれたままである。また、宇宙ガンマ線背景放射に埋もれているとされる暗黒物質に起因するガンマ線の兆候はいまだに見えていない。さまざまな観測を組み合わせていくことで、宇宙ガンマ線背景放射の謎は着実に解き明かされつつあり、その理解までもう一步のところにならわかれは迫っている。また、本稿後半では、筆者が個人的に興味があるMeVガンマ線天文学についても簡単に紹介させていただきたい。

1. はじめに

夜空が暗いというのはわれわれにとっては当たり前前の事実である（都会では街明かりのためにそうはいかないのだが）。この当たり前前の事実には19世紀の天文学者オルバースは疑問を抱き、「なぜ夜空は暗いのか」と考えた。宇宙が無限に広がってれば、夜空全体は太陽面のように明るく輝くはずである、と。これは有名な「オルバースのパラドックス」と言われるものである。星の寿命も宇宙も有限であることから、このパラドックスは解決されている¹⁾。たしかに、夜空は暗いが、真っ暗ではない。微弱ながらも空一面に光っている放射が存在し、「宇宙背景放射」と呼ばれている。この空全体で輝く宇宙背景放射とは何であろうか？

宇宙背景放射の中でもビッグバンの名残である宇宙マイクロ波背景放射は特に有名である。しか

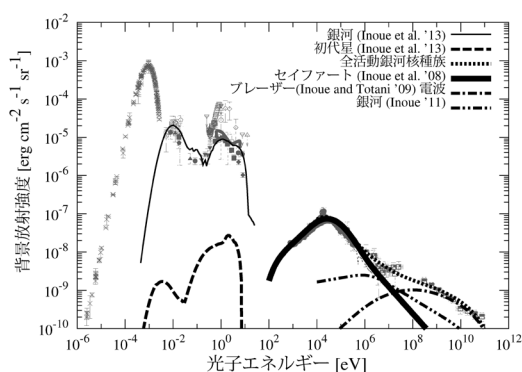


図1 電波からガンマ線に渡る宇宙背景放射スペクトル。実線は筆者のモデル。文献2より転載。

し、宇宙はマイクロ波だけでなく、電波、赤外線、可視光、X線そしてガンマ線で満たされている。図1に宇宙背景放射のスペクトルを示している。

宇宙背景放射の起源を解明できれば、各波長で宇宙の支配的種族天体の歴史を紐解ける。例えば、可視・赤外線の宇宙背景放射は、星や銀河の

形成史を、X線では活動銀河核すなわち超巨大ブラックホールの形成史を振り返れる。また、宇宙背景放射を個々の天体に分解していくことで、宇宙背景放射に埋れていた未知の天体や新しい物理に迫れる可能性も秘めている。本稿では電磁波観測のエネルギーフロンティアであるガンマ線領域に焦点をあて、さらに、筆者が思うガンマ線天文学の今後についての期待を述べさせていただきたい。

1.1 宇宙ガンマ線背景放射の観測

ガンマ線の検出原理の違いから、本稿では宇宙ガンマ線背景放射を MeV 領域と GeV 領域に分けて記述する。MeV 領域ではコンプトン散乱が、GeV 領域では対生成が主な検出原理である³⁾。大気チェレンコフ光が主な検出原理である TeV 領域については、そもそも宇宙ガンマ線背景放射の観測がないため、本稿では割愛させていただく。

宇宙 MeV ガンマ線背景放射は1970年代に日本の名古屋大学のグループによる気球実験⁴⁾などを中心に観測がすすみ、1990年代に太陽の高エネルギー現象観測衛星の Solar Maximum Mission (SMM)⁵⁾ やコンプトン衛星に搭載された The Imaging Compton Telescope (COMPTEL)⁶⁾ によって詳細に観測されている。COMPTELによって分解された天体数は全天で32天体であり、銀河系外の天体はそのうち僅か10天体である。現在でも MeV 帯域における全天観測データはCOMPTELによる観測が最良のデータである。すなわち、宇宙 MeV ガンマ線背景放射には未だ多くの天体が埋もれており、その起源は観測的に謎に包まれている。

宇宙 GeV ガンマ線背景放射は1960年代に Orbiting Solar Observatory 3 (OSO-3) 衛星によって初めて観測され⁷⁾、その後、Second Small Astronomy Satellite (SAS-2) 衛星、Cosmic Ray Satellite-B (COS-B) 衛星やコンプトン衛星に搭載された Energetic Gamma-Ray Experiment Telescope (EGRET) によって観測されている^{8), 9)}。

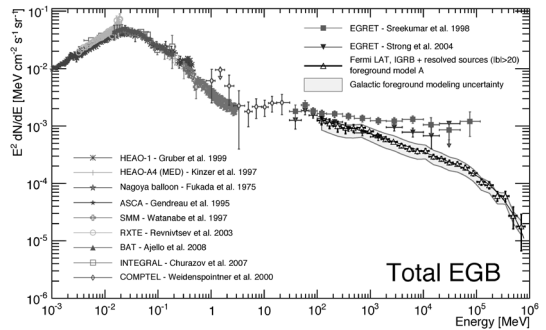


図2 宇宙X線・ガンマ線背景放射スペクトル。横軸は光子エネルギー、縦軸は背景放射強度。フェルミガンマ線衛星やX線衛星などによる宇宙X線・ガンマ線背景放射の観測データを示している。文献10より転載。

現在、宇宙 GeV ガンマ線背景放射は2008年に打ち上げられたフェルミガンマ線衛星に搭載された Large Area Telescope (LAT) によって100 MeV から820 MeVまでの詳細なスペクトルが得られている¹⁰⁾。宇宙 GeV ガンマ線背景放射に埋れていた点源の多くはフェルミ衛星によって次々に分解されており、1 GeV付近では宇宙 GeV ガンマ線背景放射の約30%が点源に分解され、より高いエネルギーではさらに分解されている。

図2に最新の宇宙X線・ガンマ線背景放射の観測データをまとめる。MeV帯域とGeV帯域では異なったスペクトル形状をもつことが見て取れる。すなわち、異なる起源であることが推測される。

1.2 活動銀河核

宇宙ガンマ線背景放射を紹介するうえで、欠かせない天体がある。活動銀河核である。X線・ガンマ線帯域で最も多く見つかっている銀河系外天体は、活動銀河核である^{12), 13)}。活動銀河核とは、銀河の中心に存在する超巨大ブラックホールに周辺物質が降着し、その莫大な重力エネルギーを解放することで、銀河よりも明るく輝き、時にほぼ光速で噴出する相対論的ジェットをもつ天体である。宇宙X線・ガンマ線背景放射の研究を通して、活動銀河核の降着史を解明できれば、宇宙最大の

ブラックホールがどのように形成され成長してきたか、その歴史に迫ることができる。

さて、活動銀河核は相対論的ジェットを噴き出している活動銀河核とジェットを噴き出していないセIFAート銀河（以降、セIFAートと略す）に大別できる。ジェットをもつ活動銀河核のうち、ジェットが観測者の視線方向に噴き出している種族は「ブレイザー」として分類されている。本稿では、ジェットが視線方向を向いていない活動銀河核を「電波銀河」として扱う。これら三つの活動銀河核種族が宇宙ガンマ線背景放射を理解する上で欠かせない。これら3種族のおおよその割合であるが、全銀河の数%程度が活動銀河核をもっており、そのうち90%程度が電波で暗い活動銀河核（セIFAート）、残りの10%程度が電波銀河、さらに電波銀河の数%程度がブレイザーであるとされている。活動銀河核の大多数を占めるセIFAートが数百keVまでの宇宙X線背景放射を説明することがX線観測からわかっている¹¹⁾。

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については、理論からさまざまな候補が考えられてきた。まず、Ia型超新星爆発中に生成される重元素の崩壊によって放出されるガンマ線の放射である。しかし、近年のIa型超新星爆発の発生頻度の研究から、Ia型超新星爆発だけではMeVガンマ線背景放射を説明できないことがわかっている¹⁴⁾。以下では、現在有力視されている「セIFAート説」と「ブレイザー説」を紹介する。

2.1 セIFAートと宇宙 MeV ガンマ線背景放射

宇宙X線背景放射の起源であるセIFAートのX線スペクトルモデルは、数百keV付近にカットオフをもつため、MeV領域への寄与は小さいとされていた。しかし、宇宙MeVガンマ線背景放射スペクトルは、宇宙X線背景放射スペクトルのピークから非常に滑らかに、冪関数の形で伸びている（図2）。つまり、宇宙X線背景放射を形作っ

ているセIFAートが宇宙MeVガンマ背景放射の起源でもあると考えるのは自然である。

セIFAートからの硬X線放射（10–100 keV）はどのように放射されているのであろうか？ これらの硬X線放射はブラックホール近傍の降着円盤上空に存在する高温コロナに由来する。コロナ中の100 keV程度の温度をもつ高温電子が、降着円盤からの放射を逆コンプトン散乱することによって、硬X線が放射されている。したがって、電子温度に対応する数百keV付近にスペクトルカットオフがあると考えられており、観測的にもカットオフの存在が示唆されている。

ここで、ごく少量の非熱的電子がコロナ中に存在すれば、カットオフ後にべきテイルがMeVエネルギー領域に現れる。すると、X線背景放射のピークからべき的に伸びる宇宙MeVガンマ背景放射も同じ活動銀河核種族で再現できると考えられる。また、降着円盤上のコロナは磁気リコネクションによって加熱されている可能性が理論的に示唆されている¹⁵⁾。磁気リコネクションによって粒子が加速されることはよく知られており、活動銀河核のコロナ中に非熱的電子が存在しているも不思議ではない。

筆者らは活動銀河核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れば、宇宙X線・MeVガンマ線背景放射がセIFAートによって説明できることを示している¹⁶⁾（図3参照）。興味深いことに、宇宙MeVガンマ線背景放射を説明するために必要な非熱的電子の分布関数のべきは、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加速された非熱的電子の分布関数のべきとよく一致している。

2.2 ブレイザーと宇宙 MeV ガンマ線背景放射

COMPTELにより、MeV領域にスペクトルピークをもつブレイザーが数天体発見されており、ブレイザーも必ず宇宙MeVガンマ線背景放射に寄与する。ビーミング効果のため、ブレイザーの空間数密度は他の活動銀河核種族と比べるとはるか

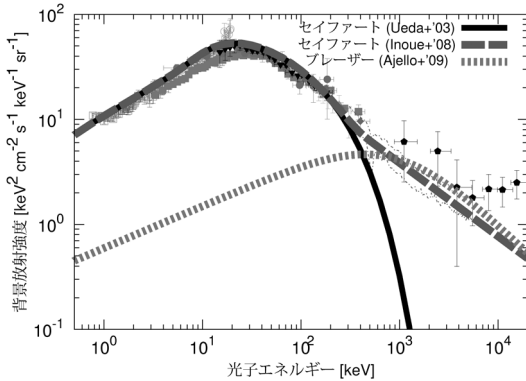


図3 宇宙X線・MeVガンマ線背景放射スペクトル。実線がセイファートモデル¹¹⁾。破線がセイファートに非熱的成分を加えたモデル¹⁶⁾。点線がブレーザーモデル¹⁷⁾。データはさまざまなX線衛星による観測結果。文献18より転載。

に小さい。したがって、定量的な議論のためには、全天観測を行い、できるだけ多くのブレーザーを観測する必要がある。

2004年に打ち上げられたガンマ線バースト観測衛星Swiftに搭載されたBurst Alert Telescope (BAT)は硬X線帯域(15-150 keV)に優れた感度を持ち、ガンマ線バーストを検出するために全天を観測している。現在、BATは硬X線帯域で全天で最も深いサーベイ観測を行っている。

BATの36カ月サーベイ観測の結果を用いて、ブレーザーの光度関数を構築すると、宇宙MeVガンマ背景放射はブレーザーによっても説明可能であることが示されている¹⁷⁾(図3参照)。ここでは、すべての明るいブレーザーは1 MeVにスペクトルピークをもつという仮定がされている。

図3にセイファートとブレーザーの宇宙MeVガンマ背景放射モデルを示す¹⁸⁾。MeV帯域での観測データが十分でなく、モデルの不定性も大きいため、セイファート説・ブレーザー説ともに棄却されておらず、今後の観測技術の進展が必要不可欠である。

3. 宇宙GeVガンマ線背景放射

GeVガンマ線で観測される銀河系外天体のほとんどはブレーザーである。そのため、宇宙GeVガンマ線背景放射の起源はブレーザーであると長く考えられてきた。しかし、ブレーザーだけでは宇宙ガンマ線背景放射は説明できない可能性が2000年代の多くの研究によって指摘されており、その起源は謎に包まれていた。

また、ガンマ線帯域ではGeV/TeVスケールの質量をもつ暗黒物質に起因するガンマ線が宇宙GeVガンマ線背景放射に埋もれている可能性が議論されている。宇宙GeVガンマ線背景放射に「埋もれた」暗黒物質の兆候を捉えることができれば、物理学における大きな謎の一つである暗黒物質の正体に迫ることが可能となる。背景放射に埋もれた暗黒物質等の未知の天体を捉えるためには、まず既知の天体種族の寄与を解明することが大前提となる。このような背景からも、宇宙GeVガンマ線背景放射の起源の解明は物理学において重要なテーマの一つとなっている。

3.1 ブレーザーと宇宙GeVガンマ線背景放射

フェルミ衛星によって約3,000個のガンマ線天体が観測されており、このうち約2,000天体が銀河系外天体である¹²⁾。その中で約1,600個はブレーザーであり、残りの400天体もブレーザーが多くを占めていると考えられている。このように、ブレーザーは観測された銀河系外ガンマ線天体の大多数を占める。したがって、ブレーザーを宇宙ガンマ線背景放射起源の最有力候補として考えるのはごく自然なことである。

フェルミ衛星打ち上げ以前は、EGRETにより同定されたおよそ50個のブレーザーサンプルを用いて、ブレーザーの背景放射への寄与が調べられていた。しかし、期待されるブレーザーの寄与は20-100%と論文によって結果が大きく異なっていた。また、ブレーザースペクトルも単純なべき関数のみが考慮されており、背景放射スペクト

ルへの予言の不定性も大きかった。一方で、イタリアや日本のグループによる研究により、明るいブレーザーほどスペクトルピークが低エネルギーにくるブレーザーシークエンスと呼ばれる傾向があることがわかってきた^{19), 20)}。そこでわれわれはこのブレーザーシークエンスを取り込むことで、ブレーザーに由来する宇宙ガンマ線背景放射スペクトルの予言を行い、ブレーザーの0.1 GeV以上の宇宙ガンマ線背景放射への寄与は40%程度であると、定量的な予言をすることに成功した²¹⁾。筆者のこの研究以降は、ブレーザー進化計算においてブレーザーのスペクトルモデルもきちんと考慮されるようになってきている。とはいえ、EGRETで観測されたブレーザーは僅か50個ほどであり、ブレーザーの光度関数には大きな不定性が残されていた。

余談ではあるが、当時、上田佳宏氏らによるX線セイファートの研究からセイファートは光度に依存した密度進化(Luminosity Dependent Density Evolution; LDDE)を示すことがわかってきた時代でもあった¹¹⁾。また、筆者が所属していた京大宇宙物理学教室の戸谷研究室(当時)の先輩である成本拓郎氏が、ブレーザーの光度関数においてもLDDEがもっともらしいことを示しており²²⁾、(当時の)最新のスペクトルモデルと最新の光度関数モデルを組み合わせることができたゆえに、この定量的な予言ができたことを述べておきたい。

2010年代に入ると、フェルミ衛星で観測された数百天体のブレーザーサンプルが使えるようになった。最新のフェルミ衛星の結果を元にしたブレーザーのスペクトルモデルを用いて、筆者含めフェルミ衛星のチームによって宇宙ガンマ線背景放射スペクトルへの寄与が調べられている²³⁾。これらの結果に基づくと、ブレーザーが0.1 GeV以上の宇宙ガンマ線背景放射の約40%を説明することがわかっている。これはわれわれのEGRET時代の予言とほぼ一致している。しかしながら、

光度関数に関しては高赤方偏移・低光度にいくほど、EGRET時代の予言と異なる結果となっている。これはひとえにフェルミ衛星がEGRETよりも圧倒的に優れた感度をもつため、より遠方、より低光度の天体を探れるようになり、正確に光度関数を解明できるようになったからであろう。

3.2 星形成銀河と宇宙 GeV ガンマ線背景放射

ブレーザーでは宇宙GeVガンマ線背景放射は40%程度しか説明できない。が、まだ暗黒物質に飛びつくのは拙速である。われわれの銀河、天の川銀河はガンマ線で明るく輝いている。OSO-3やSAS-2の時代からわれわれの銀河内の拡散ガンマ線成分は観測されており、銀河がガンマ線を放射することはよく知られている。銀河内の拡散ガンマ線は、超新星残骸等の銀河系内天体で加速された宇宙線が、その伝播中に銀河内のガスや光子と反応することで生成されている。銀河系外の星形成銀河も同様の機構でガンマ線で光っており、フェルミ衛星や地上ガンマ線望遠鏡によって、これまで七つの銀河からのガンマ線が確認されている²⁴⁾。星形成率の指標となる赤外線とガンマ線の光度相関を用いて、宇宙GeVガンマ線背景放射への寄与が調べられており、フェルミ衛星の結果に基づく宇宙GeVガンマ線背景放射の約30%を星形成銀河が説明することが判明している^{24), 25)}。

3.3 電波銀河と宇宙 GeV ガンマ線背景放射

ブレーザー・星形成銀河で宇宙GeVガンマ線背景放射の約70%は説明できそうであることがわかった。天文学的感覚でいえば、もう十分であろう。残りの30%はモデルや観測の誤差の範囲と推測したくなる。いよいよ暗黒物質の出番と思いたくなるが、観測結果には真摯に向き合うべきである。

フェルミ衛星はブレーザーや系外銀河だけでなく、電波銀河も多数検出している。電波銀河では、相対論的ビーミング効果が弱いため、電波銀河はそんなにたくさん検出されないであろうというのが大方の予想であったように思う。しかし、

現実にはフェルミ衛星によって10個ほどの電波銀河からのガンマ線が報告され、電波銀河がガンマ線を放射していることが確立されてきた²⁶⁾。

電波銀河はブレーザーと比べると暗いが、数は圧倒的に多い。暗いはずの電波銀河がフェルミ衛星でいくつも観測されるということは、宇宙GeVガンマ線背景放射に重要な寄与をしている天体である可能性を示唆している。しかし、フェルミ衛星によって電波銀河が検出されたとはいっても、その数は10個程度であり、ガンマ線観測から電波銀河の光度関数を調べるには不定性が大きい。一方、電波観測によって電波銀河の光度関数は詳細に調べられている。そこで、筆者は電波銀河の電波とガンマ線の光度相関関係を確立することで、電波銀河の0.1 GeV以上の宇宙ガンマ線背景放射への寄与が約25%もあることを示した²⁷⁾。

図4にブレーザー・電波銀河・星形成銀河の宇宙GeVガンマ線背景放射への寄与をまとめたものを示す²³⁾。これら3種族を足し合わせることで、0.1 GeV-1 TeV帯域という4桁にわたるエネル

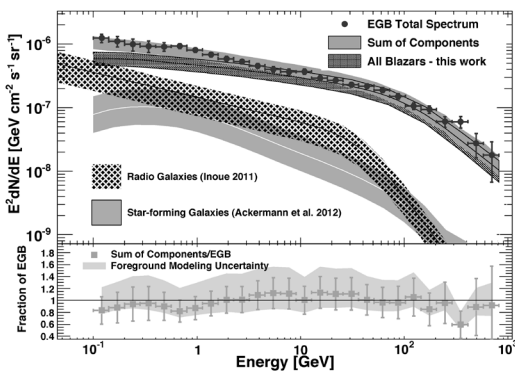


図4 上パネル: 宇宙GeVガンマ線背景放射スペクトルと各成分。横軸は光子エネルギー、縦軸は背景放射強度。フェルミガンマ線衛星による宇宙GeVガンマ線背景放射の観測データを示している。各線は、下から星形成銀河、電波銀河、ブレーザー、全3種族の合計を示している。下パネル: ブレーザー・電波銀河・星形成銀河を足し合わせた成分が宇宙GeVガンマ線背景放射を説明する割合。データ点がモデルと観測データの比。文献23より転載。

ギー領域で宇宙ガンマ線背景放射を説明できることがわかる。宇宙GeVガンマ線背景放射の起源に関しては、筆者らの研究などにより大枠は解決したと言えるだろう。しかし、電波銀河・星形成銀河に関しては、サンプル数が少なく、モデルも単純であり、(筆者のモデルも含めて)不定性は大きい。今後、より多くの電波銀河・星形成銀河を見つけることが重要であろう。

さて、宇宙MeV-GeVガンマ線背景放射について、わかってきたことをまとめると以下のようになる。

- 宇宙MeVガンマ線背景放射はセイファートもしくはブレーザーで数百keVから10 MeVの範囲で説明可能。
- 宇宙GeVガンマ線背景放射はブレーザー・電波銀河・星形成銀河の3種族で0.1 GeVから1 TeVの範囲で説明可能。

われわれは宇宙ガンマ線背景放射を完全に理解できたのかと問われると答えは“No”である。今後取り組むべき課題としては、宇宙MeVガンマ線背景放射の起源がセイファートなのかブレーザーなのか、TeVガンマ線背景放射の決定と高エネルギーニュートリノとの関係、宇宙ガンマ線背景放射の非等方性などが挙げられる。紙面の都合上、割愛させていただきたい。興味のある方は、筆者のレビュー記事¹⁰⁾などを参照していただきたい。

4. MeVガンマ線天文学の展開に向けて

フェルミ衛星や地上ガンマ線望遠鏡の活躍により、GeV-TeVガンマ線天文学は大きく発展し、宇宙に満ちたさまざまな高エネルギー現象を観測できるようになった。そして、Cherenkov Telescope Array (CTA)によって、20 GeV-100 TeV帯域でこれまでよりも1桁優れた感度での観測が始まろうとしている²⁸⁾。さらに、今や高エネルギーニュートリノや重力波の観測も可能となり、激動

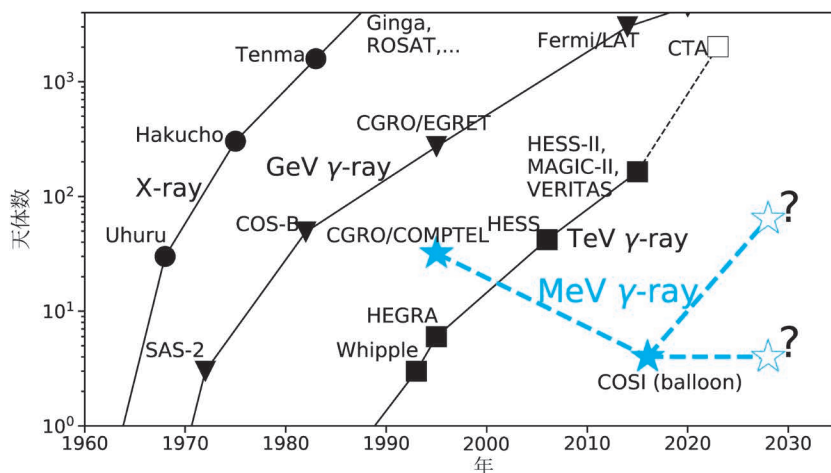


図5 X線・ガンマ線源の天体数の推移（通称：木舟プロット）。横軸が西暦。縦軸が発見された天体数。COSIは気球実験のため観測期間が衛星ミッションに比べて短いこととデータ解析継続中であることに留意。白抜きは将来予想。MeVガンマ線の予測は筆者が勝手に記したものの。

する宇宙の姿をあらゆる波長・粒子で捉えることができる時代となった。

しかし、MeVガンマ線に目を向けると、全く異なる状況が見えてくる。図5にX線・ガンマ線源の天体数の推移（木舟プロット）を示す。この図をみると、MeVガンマ線帯域だけ1990年代のCOMPTEL以降、大きな進展がないのが見て取れる。近年、アメリカの気球実験The Compton Spectrometer and Imager (COSI)²⁹によって、数天体が報告されており、気球実験ではあるが図に加えてある。

MeVガンマ線帯域は熱的宇宙と非熱的宇宙をつなぐエネルギー帯域であり、宇宙の諸現象を理解するうえで最も根本的なエネルギー帯域の一つである。にもかかわらず、MeVガンマ線観測の不足により、多くの天体現象の物理を解明できないままである。筆者としては、是非ともMeVガンマ線による観測を発展させていきたいと考えている（筆者自身はハンダ付けすらまともにできないのだが）。

MeV領域（数百keVから数十MeV）では、ガンマ線と電子の弾性散乱であるコンプトン散乱が主な検出原理となる。コンプトン散乱の原理を簡

単に紹介しよう。エネルギー E_1 の入射ガンマ線が静止している電子とコンプトン散乱を起こし、エネルギー E_2 になる場合、散乱角は以下のよう

$$\cos\phi = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right) \quad (1)$$

したがって、コンプトン散乱の原理に従えば、入射ガンマ線の方向を円環状（電子の飛跡も追跡できれば、円弧）に得ることができる。多数のリングを重ね合わせることで、ガンマ線源の位置を決定できる。検出原理の物理自体はシンプルであるが、実際には宇宙線と検出器との相互作用から生じるガンマ線・ベータ線や地球大気からのガンマ線などが存在し、これらがバックグラウンドとなる。また、エネルギー決定精度も、位置決定精度に影響を及ぼす。これらさまざまな理由が天体由来のMeVガンマ線観測を難しくしている。

そもそも、MeV帯域ではどのようなサイエンスが期待できるのであろうか。紙面の都合上、気球実験でも実現可能であり、かつ、筆者が個人的に興味がある宇宙ガンマ線背景放射や活動銀河核に焦点を絞って紹介したい。より詳しい内容を知りたい方は、アメリカやヨーロッパで進められている

MeVガンマ線衛星計画AMEGO³⁰⁾やe-Astrogam³¹⁾のホームページなどを参照されたい。

4.1 宇宙MeVガンマ線背景放射の非等方性

宇宙MeVガンマ線背景放射の起源を解明するには背景放射を点源に分解する必要がある。しかし、宇宙MeVガンマ線背景放射を点源分解するにはCOMPTELよりも2桁3桁感度を良くした装置が必要であり、気を長くして待つ必要がある。では、もっと手早く起源を解明することはできないのであろうか？ 上で紹介したように、宇宙MeVガンマ線背景放射の起源候補はセイファートとブレーザーである。この二つは同じ活動銀河核種族であるが、その性質は大きくことなる。特に、個数密度の違いが重要となる。セイファートの場合、各天体は暗いが、数が多い。一方でブレーザーは明いが、数が少ない。この違いは宇宙MeVガンマ線背景放射に統計揺らぎとなって現れる。ブレーザーはセイファートよりも大きなポアソン揺らぎを予言する¹⁸⁾(図6)。これは、COMPTEL程度の感度があれば十分に切り分けられると考えられる。天球面のさまざまな場所を観測し、その揺らぎからセイファート説・ブレーザー説に決着をつけることが可能となる。

4.2 活動銀河核におけるジェットと円盤の関係

最も近傍で明るい活動銀河核は電波銀河Centaurus Aである。Centaurus Aの多波長スペクトルを図7に示す³²⁾。Centaurus Aは電波銀河であり、降着円盤とジェットの研究の上でも重要な天体である。しかし、Centaurus Aの放射機構はよくわかっていない。可視光やX線の研究者の方々は円盤放射で可視・X線データを解釈するが、ガンマ線の研究者の方々はジェットで全波長データを解釈する傾向にある³²⁾。さらに、TeV帯域にはGeV帯域で見られる放射とは別の放射成分が見えている。MeVガンマ線をX線・GeVガンマ線と同時に観測することができれば、その放射機構を特定することができるかもしれない。筆者としては、MeV背景放射を説明するために提

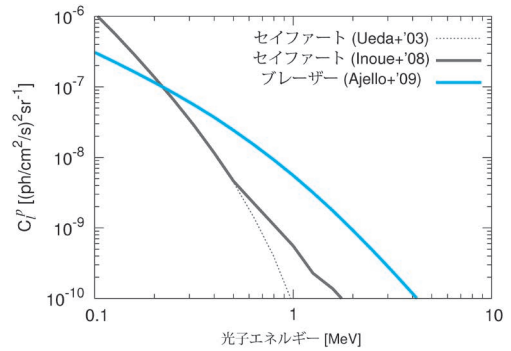


図6 MeV帯域におけるセイファートおよびブレーザーから期待されるポアソン揺らぎ。縦軸は角度パワースペクトルにおけるポアソン成分。MeVガンマ線検出器の感度はCOMPTEL程度を想定。黒線がセイファート説¹⁶⁾、青線がブレーザー説¹⁷⁾。点線は非熱的成分を含んでいないセイファート¹¹⁾。文献18より転載。

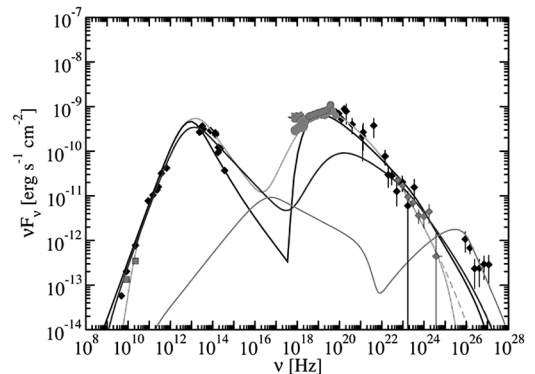


図7 Centaurus Aの多波長スペクトル。横軸は光子エネルギー、縦軸はエネルギーフラックス。フェルミガンマ線衛星はじめ多波長での観測データを示している。各実線はさまざまなジェット放射過程を考えたモデル曲線。文献32より転載。

案したコロナに存在する非熱的電子¹⁶⁾がMeV・Sub-GeV放射を作っているのではないかと考えている。

4.3 MeVガンマ線天文学の現状と今後

COMPTEL以降のMeVガンマ線観測の状況はどうであろうか。まず、NASAのスーパープレッシャー気球(浮力を昼夜問わず維持し、100日間

ほどのフライトを可能とする)によって、2016年にアメリカの気球実験(COSI)²⁹⁾が南極周辺で46日間のフライトを行い、いくつかの定常天体とガンマ線バーストの観測に成功している。また、JAXA Hitomi衛星に搭載されたSoft Gamma-ray Detector (SGD)は、かに星雲の観測に成功している。残念ながらHitomi衛星は損失されたが、SGDはCOMPTEL以後初めて、コンプトンカメラを衛星軌道上で実証し、非常に短い観測時間であったにもかかわらず天体観測を成功させたことは特筆すべき点であると言えよう。さらに、京都大学のグループがオーストラリアでのコンプトンカメラの気球実験に2018年4月に成功している³³⁾。このように、日本はコンプトンカメラの技術において、世界をリードしている国の一つと言えよう。

将来の衛星計画に目を向けると、ESA M5 Missionに提案されていたe-Astrogamは残念ながら採択されなかった。NASAではフェルミ衛星の後継機として、MeV-GeV検出を狙ったAMEGOが提案されている。しかし、仮に採択されたとしても2030年代であろう。あまりにも遠い。それよりも、気球実験で着実に成果を短期的に狙うことが必要であると筆者は考えている。スーパープレッシャー気球であれば、100日間程度のフライトが可能であり、衛星と比べても予算・搭載質量の観点から見ても十分優位性があるであろう。すでにアメリカではCOSIの後継機としてCOSI-Xが気球実験で提案されている。今後、多数のMeVガンマ線気球実験が開行されることを期待したい。

5. まとめ

フェルミ衛星による0.1–820 GeVの広帯域にわたる宇宙GeVガンマ線背景放射スペクトルが報告され、宇宙ガンマ線背景放射の研究は大きく進んだ。フェルミ衛星は~1 GeV付近で宇宙背景放射のおおよそ3割を点源に分解し、より高いエネ

ルギー帯域ではさらに分解している。また、フェルミ衛星の点源観測に基づいた研究によって、長年の謎であった宇宙GeVガンマ線背景放射の起源はブレーザー、電波銀河、星形成銀河の3種族によって説明できることがわかってきた。フェルミ衛星が宇宙GeVガンマ線背景放射の起源を解き明かしたとはいえ、宇宙ガンマ線背景放射における諸問題はいくつか残されたままである。特に、MeVガンマ線帯域においては、セイファートかブレーザーかどちらが起源なのかまだわかっていない。MeVガンマ線背景放射の起源解明にとどまらず、閉ざされたMeVガンマ線という観測窓をこじ開けるためにも、そこに隠された豊富なサイエンスを知るためにも、今後のMeVガンマ線帯域における技術開発とその実証が重要である。

謝辞

本稿の内容は筆者が京都大学理学研究科宇宙物理学教室で研究を始めてから、スタンフォード大学/SLAC加速器研究所KIPAC、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所で行った研究の成果をまとめたものです。その中で多くの皆様にご指導いただきながら共同研究させていただきました。特に、指導教官であった戸谷友則氏をはじめ、上田佳宏氏、片岡淳氏、森正樹氏、手嶋政廣氏、釜江常好氏、高橋忠幸氏、Greg Madejski氏の各氏に感謝いたします。また、MeVガンマ線に関する検討については、小高裕和氏、荒牧嗣夫氏から有益なコメントをいただきました。

参考文献

- 1) 津村耕司, 2017, 宇宙はなぜ「暗い」のか? — オルバースのパラドックスと宇宙の姿 — (ベレ出版)
- 2) Inoue, Y., 2014, arXiv:1412.3886
- 3) Longair, M., 2011, High Energy Astrophysics (Cambridge University Press)
- 4) Fukada, Y., et al., 1975, Nature, 254, 398
- 5) Watanabe, K., et al., 1997, Proceedings of the Fourth Compton Symposium, 410, 1223

- 6) Weidenspointner, G., et al., 2000, AIPC Series, 510, 467
- 7) Kraushaar, W. L., et al., 1972, ApJ, 177, 341
- 8) Fichtel, C. E., et al., 1978, ApJ, 222, 833
- 9) Sreekumar, P., et al., 1998, ApJ, 494, 523
- 10) Ackermann, M., et al., 2015, ApJ, 799, 86
- 11) Ueda, Y., et al., 2003, ApJ, 598, 886
- 12) Acero, F., et al., 2015, ApJS, 218, 23
- 13) Kawamuro, T., et al., 2018, arXiv:1807.00874
- 14) Ahn, K., et al., 2005, PRD, 71, 121301
- 15) Liu, B. F., et al., 2002, ApJ, 572, L173
- 16) Inoue, Y., et al., 2008, ApJ, 672, L5
- 17) Ajello, M., et al., 2009, ApJ, 699, 603
- 18) Inoue, Y., et al., 2013, ApJ, 776, 33
- 19) Fossati, G., et al., 1998, MNRAS, 299, 433
- 20) Kubo, H., et al., 1998, ApJ, 504, 693
- 21) Inoue, Y., & Totani, T., 2009, ApJ, 702, 523
- 22) Narumoto, T., & Totani, T., 2006, ApJ, 643, 81
- 23) Ajello, M., et al., 2015, ApJ, 800, L27
- 24) Ackermann, M., et al., 2012, ApJ, 755, 164
- 25) Makiya, R., et al., 2011, ApJ, 728, 158
- 26) Abdo, A.A., et al., 2010, ApJ, 720, 912
- 27) Inoue, Y., 2011, ApJ, 733, 66
- 28) 手嶋政廣, 2011, 天文月報, 104, 333
- 29) <http://cosi.ssl.berkeley.edu/> (2018.8.17)
- 30) <https://asd.gsfc.nasa.gov/amego/> (2018.8.17)
- 31) <http://eastrogam.iaps.inaf.it/> (2018.8.17)
- 32) Abdo, A. A., et al., 2010, ApJ, 719, 1433
- 33) <http://www.isas.jaxa.jp/topics/001310.html> (2018.8.17)

Cosmic Gamma-ray Background Radiation Yoshiyuki INOUE

*iTHEMS, RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama
351-0198, Japan*

Abstract: The cosmic gamma-ray background radiation is one of the most fundamental observables in the gamma-ray band. Although the origin of the cosmic gamma-ray background radiation has been a mystery for a long time, the Fermi gamma-ray space telescope has recently measured it at 0.1–820 GeV and revealed that the cosmic GeV gamma-ray background is composed of blazars, radio galaxies, and star-forming galaxies. I will briefly review our current understandings of the cosmic gamma-ray background radiation. I will also discuss prospect for future MeV gamma-ray astronomy.