

最高エネルギー宇宙線の起源

—マルチメッセンジャー観測への展望



村瀬 孔 大

〈オハイオ州立大学宇宙論・天体粒子物理学研究センター 191 West Woodruff Ave., Columbus, Ohio 43210, USA〉

e-mail: murase.2@mps.ohio-state.edu

宇宙線の中でも最も謎に包まれた存在が超高エネルギー宇宙線である。広大な宇宙のどこで、一体どうやって作られているのか？ 長い間全く手がかりがなかったが、近年の宇宙線観測の進歩により、超高エネルギー宇宙線の起源がどのような特徴をもった天体か、本格的に議論されるようになってきた。本稿では、活動銀河やガンマ線バーストなどの起源候補天体で起きる物理過程と理論的に期待されているシグナルを、宇宙線だけでなくガンマ線やニュートリノも利用するというマルチメッセンジャー観測の観点から概観する。特に、宇宙線が源で一時的に作られている可能性や鉄のような原子核である可能性をテストするのに有用な特徴的シグナルについて述べる。

1. はじめに

宇宙線とは宇宙空間を飛び交い、地球に降り注いでいる高エネルギー粒子の総称であり、地上で観測される高エネルギーの宇宙線は主に陽子と原子核からなっている。1912年のV. F. Hessによる発見以来、素粒子原子核物理・宇宙物理学的な見地から盛んに研究されてきた。地上にいる人類は大気のおかげで守られているが、いつか宇宙旅行に出かけたいと思っている人などには非常に脅威になる宇宙にありふれた放射線の一つ、それが宇宙線である。

宇宙線は 10^9 eV から 10^{20} eV まで幅広いエネルギー範囲にわたってべき型と呼ばれる分布をもち、その背後に何か共通の生成機構が働いているのではないかと想像したくなる。約 10^9 eV から 3×10^{15} eV あたりまでの宇宙線は超新星残骸などの銀河系内の天体起源だと広く考えられている。もっと高エネルギーの宇宙線、特に 3×10^{18} eV を超えるような超高エネルギー (ultrahigh-energy; UHE) 宇宙線は最高エネルギー宇宙線と呼ばれ、

おそらく銀河系外から飛来していると考えられてはいるものの、1962年の発見以来起源の手がかりはつかめておらず、宇宙物理学における最も大きな謎の一つとされてきた。 10^{20} eV というエネルギーは野球選手が投げるボールがもっている運動エネルギーに大体相当する。しかし、巨視的な数の粒子で構成されたボールではなく、目に見えない1個の粒子にこれほどのエネルギーが詰め込まれていることは驚くべきことだ。そのエネルギーは人類がもっている地上最大の加速器 Large Hadron Collider (LHC) で実現できるエネルギー (実験室系で約 10^{17} eV) をはるかに超えている。

広大な宇宙空間のどこで、どうやって、こんな極端なものが作られているのだろうか？ 宇宙には想像を超えるような天体がたくさんあるから簡単だろう、と思う人もいるかもしれないが、おそらくそうではない。宇宙線を加速するための必要条件として Hillas 条件というものがある。これは、粗っぽくいうと、あるエネルギーをもった宇宙線を加速するには少なくともそのエネルギーの宇宙線を源の中に閉じ込めておかねばならない、

という条件で、UHE 宇宙線を作る天体は十分磁場が強いサイズが大きくなければならないことを意味する。既知の天体で条件を満たすものは、高速回転マグネター、ガンマ線バースト (GRB)、活動銀河核 (AGN)、銀河団くらいである。マグネターは約 10^{14} G という宇宙最強の磁場をもつ中性子星である。GRB はガンマ線の瞬間的明るさが太陽の 10^{18} 乗倍にも達する宇宙最強の爆発現象であり、爆発の際に作られたジェットには強力な磁場が存在すると推測されている。AGN は 10^8 太陽質量にも達する宇宙最大級のブラックホールを中心にもつ天体であり、しばしば巨大なジェットが観測されている。銀河団は多数の銀河からなる宇宙最大の重力束縛天体であり、その大きさは Mpc (約 300 万光年) にもなる。つまり、宇宙の中で最も極限的な天体だけが UHE 宇宙線起源の候補になれるのである。もちろん Hillas 条件は条件の一つでしかなく、宇宙線の加速効率をもっと悪い可能性は理論的には十分考えられるし、宇宙線が UHE まで加速できたとしても、周囲の物質、光子や磁場との相互作用でエネルギーを失ってしまうかもしれない。UHE 宇宙線を説明するには、源で非常に効率のよい加速機構が働いており、かつ宇宙線は数あるエネルギー損失過程を生き残って、源を脱出して地球までたどり着く、という都合のいい状況が実現されることを理論的に説明する必要がある。

起源天体で起きている物理過程を調べるためにも起源の同定が不可欠であるが、現在まで有力な証拠はない。しかし、近年の Auger 観測所などによる UHE 宇宙線観測や Fermi 衛星によるガンマ線観測の進展に加え、IceCube や CTA などによる近未来のニュートリノ・ガンマ線観測を含めたマルチメッセンジャー観測によりその究明が進展すると期待されている。本稿では UHE 宇宙線観測の現状を述べた後、宇宙線由来のニュートリ

ノ・ガンマ線放射について概観する。特に宇宙線が源でバースト・フレアの的に作られている可能性と鉄のような原子核である可能性について、筆者が得た理論的成果を紹介する。最後に将来への展望を述べる。

2. 荷電粒子観測の現状

UHE 宇宙線の起源を探るための最も直接的な方法は宇宙線そのものを測定することだろう。宇宙線が大気中で反応して起こす空気シャワーを測定することで、宇宙線の情報 (主にはスペクトル、到来方向分布、組成) を得ることができる*1。

理論的にはどんな兆候が期待されるだろうか? 十分高いエネルギーの宇宙線は光子と反応してエネルギーを失う。約 10^{20} eV の UHE 陽子は宇宙に満ちあふれている宇宙背景放射光子 (約 10^{-3} eV) と反応し、100 Mpc 程度しか伝播できない。したがって、約 10^{20} eV 以上では 100 Mpc より遠方の源は寄与しなくなり、スペクトルには Greisen-Zatsepin-Kuzmin (GZK) カットオフの存在が予測される*2。また、UHE 陽子や原子核は地球に到達するまでに宇宙空間の磁場によって進路を曲げられる。宇宙磁場の強さはよくわかっていないが、 10^{20} eV の陽子の曲がり角は典型的に数度程度で源の方向からのずれは大きくないと期待されている。一方、理論が正しければ UHE 宇宙線は主に 100 Mpc 以内からやってくるので、その半径内にある源の数が有限なら、源の位置や非一様な近傍の宇宙構造を反映した異方性を 10^{20} eV 付近で期待できる*3。

日本の AGASA やアメリカの HiRes など、これまで多くの実験が行なわれ、理論の検証が試みられてきた。なかでもアルゼンチンにある Auger 観測所は約 3,000 km² の面積を誇り、観測された UHE 宇宙線の統計は飛躍的に向上した。そのスペクトルの観測では、理論的に GZK カットオフ

*1 参考文献として山本常夏氏の記事¹⁾と高見 一氏らの記事²⁾を挙げておく。

*2 物理過程は異なるが鉄などの重い原子核でもカットオフは期待される。

が期待されるエネルギーで宇宙線フラックスが急激に減少していることが報告された。HiRes も同様の結果を報告しており、UHE 宇宙線が主に 100 Mpc 以内で作られるという理論予測と矛盾しない。また 2007 年の論文で、宇宙線の到来方向と AGN ないし銀河の間に相関があることを発見した^{*3}。組成についても、宇宙線と大気の実験では実現できないエネルギー領域で起きているために明確な結論を出せないながら、原子核が多く含まれることを示唆する結果を報告した⁵⁾。

異方性を説明するために、源の中でも特に AGN について多くの議論がなされたが、その解釈は容易ではなかった。前節で述べた Hillas 条件から UHE 陽子を加速できる AGN はジェット強度が太陽光度の 10^{13} 倍を超えるような AGN と考えられ、UHE 宇宙線の到来方向も強力なジェットをもつ明るい AGN と相関すると期待される。しかし、100 Mpc 以内ではそのような AGN は多くなく、有意な相関は見られなかった⁶⁾。この結果の解釈の一つとして、源で非定常的に宇宙線が作られている可能性が提案された。UHE 宇宙線は宇宙磁場で曲がるだけでなく、曲がったことでまっすぐやってくるより地球への到達時間が 100 年から数万年程度遅れる。宇宙線が作られたときの光が今見えている必要はなく、AGN のフレアなど一時的に明るくなったときに UHE 宇宙線が作られていてもよいだろう。もちろん GRB や高速回転マグネターのような他の非定常な源でも問題はない。宇宙線の情報（具体的には位置相関と自己相関）からは、バースト発生率やバースト 1 発あたりの宇宙線生成量を制限できる⁷⁾。しかし、非定常の場合に起源天体を具体的に突き止めるには、源で作られるガンマ線やニュートリノの検出がより重要になる。

一方、Auger の組成の結果は原子核が多分に含まれていることを示唆している。同じエネルギーで考えたとき原子核イオンは陽子よりも電荷が大

きく、曲がりやすい。例えば鉄イオンは陽子の 26 倍曲がりやすく、銀河磁場だけでかなり曲がってしまう。つまり、宇宙線が原子核である場合に異方性を期待することは陽子よりずっと難しく、Auger の組成の結果は異方性の結果とは矛盾したセンスにある。この場合もガンマ線やニュートリノで源を探ることは重要だと考えられる。

近年荷電粒子観測は進歩した。しかし、その結果はまだ混沌としている。Auger の異方性と組成の結果を同時に説明する一致した見解はなく、北半球での HiRes の観測は到来方向分布が等方的であることと陽子優勢の組成を主張しており、両者の結果は食い違っている。今後 Auger の結果が覆える可能性もあり、日本の TA や、北 Auger 計画、JEM-EUSO 計画によるさらなる観測的進展が待たれる。一方で、源が非定常である可能性や宇宙線が重い原子核である可能性は理論的にも十分ありえることで、考えていくべき問題だろう。次節より、これらの問題に関し、ガンマ線・ニュートリノについての理論的予測を述べていこう。

3. 陽子加速の証拠としての ニュートリノ

天体で陽子が加速されると、源における物質との相互作用 (pp 反応) ないし光子との相互作用 ($p\gamma$ 反応) で荷電パイオンが作られ、その崩壊生成物として高エネルギーニュートリノができる (図 1 参照)。後述するガンマ線と違い、ニュートリノは相互作用が弱いため、源をほとんどそのまま抜けてまっすぐ地球まで到達でき、陽子加速の証拠としてはうってつけである。このニュートリノをとらえるため、南極では氷を利用した 1 km³ 検出器 IceCube の建設が進んでおり、2011 年完成予定である。地中海でも深海を利用した KM3Net 計画が進行している。約 10³ GeV (1 GeV = 10⁹ eV) から 10⁸ GeV においてこれらの検出器が数年で達成する感度は、積算フラックスにして、Fermi で観

*3 2010 年の論文では、2007 年に報告された相関度合 (69%) より弱い相関度合 (38%) が報告された⁴⁾。

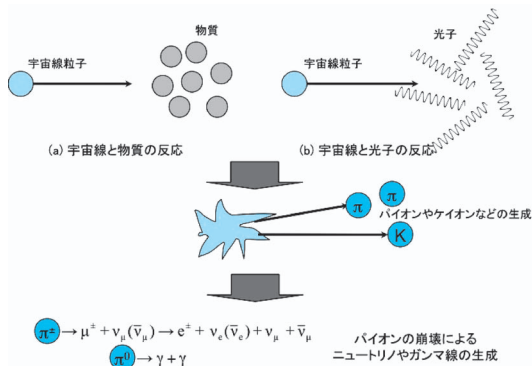


図1 宇宙線陽子や宇宙線原子核がニュートリノやガンマ線を作る過程の概念図。

測された数 GeV でのガンマ線背景放射フラックスの約 2 桁下であり、天体ニュートリノが検出されてもおかしくない。

天体ニュートリノをとらえる際に厄介な存在が地上に降り注ぐ宇宙線が大気と反応して作る大気ニュートリノである。しかし、GRB や AGN フレアなど源が非定常である場合は、ガンマ線や可視光などで同時観測をすることで空間および時間的な相関が期待できるため、有意なシグナルをずっと検出しやすい。例えば GRB の突発的ガンマ線放射は光速の 99.999% で動くジェット内で起きた衝撃波ないし磁場の散逸で加速された電子による放射であると考えられているが*4、もし GRB が UHE 宇宙線源で電子だけでなく陽子も加速されていれば、約 3×10^{16} eV の陽子がガンマ線（典型的に約 250 keV）として観測される光子と源の中で $p\gamma$ 反応を起こして、典型的に約 10^6 GeV のニュートリノが作られる*5。このシナリオでは、宇宙線のエネルギーフラックスの約 0.1% から 10% 程度が典型的にニュートリノに変換され、IceCube で年間 0.1 イベントから 10 イベント程度、GRB と関連したニュートリノの検出が期待される。AGN の場合も物理過程は同様であり、ブレイザー領域と呼ばれるジェット内での散逸が

期待される場所で UHE 宇宙線が作られるとするシナリオでは、ジェット内の衝撃波や磁場の散逸で加速された陽子が可視光や X 線で観測される光子と $p\gamma$ 反応して、典型的に 3×10^8 GeV のニュートリノが作られる。このシナリオで期待される AGN ニュートリノは典型的には IceCube による検出は難しいと予測されるが、GeV 領域で明るいブレイザーなど非常に明るい AGN からのニュートリノは検出できる可能性がある。GRB や AGN の放射機構がよくわかっていないため、GRB や AGN を UHE 宇宙線の起源とするシナリオでのニュートリノに対する予言は不定性が大きいですが、ニュートリノが検出されれば、宇宙線加速の情報だけでなく放射機構やジェットの情報（磁場優勢か陽子優勢かなど）について重要な知見が得られると期待される。

大質量星が超新星爆発を起こした直後に残されたマグネターが高速回転している場合、UHE 宇宙線源となっている可能性がある。マグネターによって宇宙線が加速されると、マグネターの周囲に存在する超新星残骸と pp 反応を起こすはずである*9。その結果、宇宙線のエネルギーの殆どがパイオン生成に使われ、崩壊生成物のうちニュートリノだけがそのまま地球に到達できる。このシナリオでは年間数イベント程度ニュートリノが検出されると期待され、IceCube によって検証可能である。

最後に、AGN 以外の定常的な源の例として銀河団を挙げておく。銀河団はそれ自身が潜在的な宇宙線加速器であるだけでなく、なかには AGN や銀河が多数含まれるため、巨大な宇宙線の貯蔵庫となっている可能性が高い。 10^{17} eV 程度の宇宙線が銀河団内を漂う時間は 10^9 年にも達し、漂う間に銀河団内に存在するガスや光子と反応してニュートリノやガンマ線を出している可能性は十二分に考えられる。このシナリオでは、銀河団が地上で観測される 3×10^{17} eV 程度の宇宙線の起

*4 熱的な放射が重要な寄与をしている可能性もある。

*5 詳しくは筆者の 2007 年の記事を参照されたい*9)。

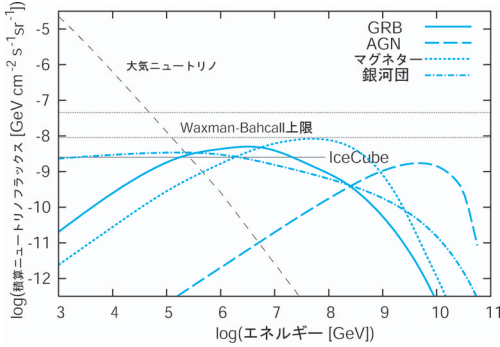


図2 理論で期待される、さまざまな銀河系外の天体で作られるニュートリノ積算フラックス⁸⁾⁻¹⁰⁾。もしこれらの天体が本当にUHE宇宙線源であるならば、IceCubeで検出できる可能性があることを示している。

源であるならば、IceCubeで年間0.1イベントから数イベント程度検出を期待できる¹⁰⁾。

図2に、それぞれのシナリオにおける、宇宙にある源の寄与をすべて足し合わせた積算フラックスについての筆者らの計算結果を示す。 $p\gamma$ 反応、パイオンやミュオン冷却など主要な素過程はすべて考慮してある。

4. 陽子加速の証拠としてのガンマ線

ガンマ線はFermiなどの衛星やMAGICなどの地上のガンマ線望遠鏡で観測することができ、実際にGRBやAGNからGeVガンマ線やTeV (1 TeV = 10^{12} eV)ガンマ線が検出されている。陽子由来のガンマ線を生成する過程は複数存在し、代表的なものが $p\gamma$ 反応や pp 反応で作られた中性パイオンの崩壊ガンマ線である。また、荷電パイオンの崩壊を通して生まれた電子や陽電子、 $photopair$ 反応(陽子と光子が反応して電子陽電子対ができる)で作られた電子陽電子^{*6)}も、シンクロトロン放射(荷電粒子が磁場と相互作用して加速度運動する際に出す放射)や逆コンプトン放射(高エネルギー電子が光子にエネルギーを渡すことで出る放射)によってガンマ線を作る。磁場が

*6) もともとある一次的な電子と区別して二次的な電子陽電子と呼ばれる。

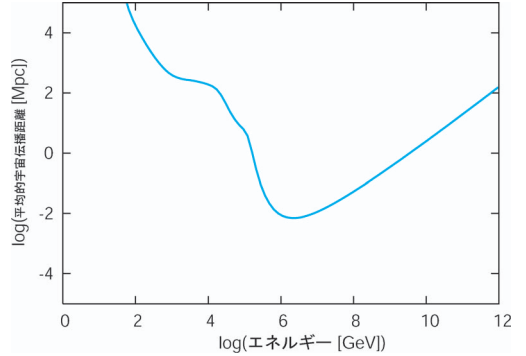


図3 ガンマ線の平均的な宇宙伝播距離。系外背景放射の不定性はあるが、TeVでは数百Mpc程度伝播するとわかる。

強い天体ではUHE陽子によるシンクロトロン放射も起きうる。

しかし、これらの過程で作られたガンマ線の検出から陽子加速の証拠を得るには、I. 源を出た高エネルギーガンマ線と系外背景放射光子の反応($\gamma\gamma$ 対消滅反応)による吸収、II. ガンマ線が源に存在する光子と $\gamma\gamma$ 反応することで引き起こされる種々の影響、III. 源で加速された一次的な電子によるシンクロトロン放射や逆コンプトン放射との区別、という3点の問題に留意せねばならない。まずIであるが、図3に示したようにガンマ線が宇宙空間を伝播できる距離はTeVでは約300 Mpc、 10^3 TeVでは約0.01 Mpcであり、遠方の源では吸収が無視できないことがわかる。IIはGRBやブレイザーからのガンマ線放射を考えたときにしばしば重要になる点で、高エネルギーガンマ線が源の光子と相互作用した結果、 $\gamma\gamma$ 反応やシンクロトロン放射、逆コンプトン散乱などの過程が繰り返され(電磁カスケード)、観測されるスペクトルは一般に複雑なものになる。IIIはよく問題になる点であり、特に電磁カスケードが起きるような場合は一般に陽子由来と電子由来のガンマ線を区別することは容易ではない(実際GRBやAGNで観測されたスペクトルを陽子由来で説明できるときは大抵電子だけでも説明可能であ

る^{11), 12)}). これらの問題も相まって、陽子加速の証拠は得られていない。陽子加速の兆候を見いだすには、時間ないし空間的な情報や多波長の光での詳細なスペクトル観測が必要であり、現在計画中の TeV ガンマ線望遠鏡 CTA などに期待が寄せられている。

上に述べたように、GeV や TeV ガンマ線は重要であるが、UHE よりも低いエネルギーの陽子でも大抵作れるため、UHE 宇宙線加速の直接的な証拠とはなりにくい。ではもっと高エネルギーではどうだろうか？ 10^{20} eV の陽子の $p\gamma$ 反応で生成された中性パイオンの崩壊ガンマ線は、典型的なエネルギーが 10^{19} eV にもなる。このような UHE ガンマ線は一次的な電子からでは作れず、まさに 10^{20} eV の UHE 陽子のスモッキングガンとなりえる¹³⁾。(GRB などで期待される約 10^6 GeV のニュートリノは UHE より低いエネルギーの陽子に対応することに注意。) ここで気になるのが上述した I と II の点である。まず I だが、図 3 よりガンマ線の平均的な宇宙伝播距離は高エネルギーで増加し、 10^{19} eV で数 Mpc になるとわかる。しかし、実は UHE ガンマ線は実効的により長い距離を伝播できる。UHE ガンマ線は宇宙背景放射光子と反応して電子と陽電子を作るが、UHE 領域では片方がほとんどのエネルギーを持ち去り、それが宇宙背景放射光子との逆コンプトン散乱で、再び一つの光子に大半のエネルギーを渡す。結果、UHE ガンマ線はエネルギーをほぼ保ったまま宇宙空間を伝播し、実効的な伝播距離は 10 Mpc から 100 Mpc にもなる。図 4 より UHE ガンマ線はカスケードによって平均伝播距離よりも長い距離を実効的に伝播できることがわかる。II の点も、 $\gamma\gamma$ 反応が高エネルギーでは抑制されるため、GRB や AGN の場合では UHE ガンマ線はカスケードせずに源を抜けられると期待される。したがって、UHE ガンマ線は UHE 宇宙線源のプロブとして有効であり、もし 100 Mpc 以内で GRB や AGN フレアが起きれば時間および空間

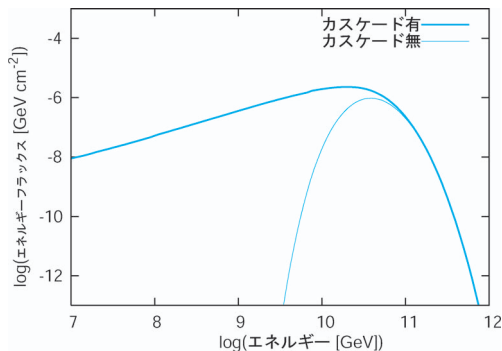


図 4 近傍 20 Mpc で GRB や AGN フレアが起きた場合に想定される UHE ガンマ線のエネルギースペクトルの例¹³⁾。

的にほぼ同期した UHE ガンマ線を期待でき、北 Auger や JEM-EUSO などで検出可能である。

UHE ガンマ線は定常な源に対してもプロブとして有用である。最近傍の AGN である Cen A など近傍に UHE 陽子源が存在すれば、UHE 陽子が宇宙空間を伝播する間に宇宙背景放射光子と $p\gamma$ 反応して作る UHE ガンマ線を北 Auger などととらえられる可能性がある¹⁴⁾。また、UHE 宇宙線が陽子ではなく重い原子核だと検出が難しいため、その検出は UHE 宇宙線が陽子起源であることを強く示唆するだろう。

5. 原子核由来の高エネルギー放射

ここまで主に UHE 陽子の加速源で期待される特徴的なシグナルを議論してきたが、2 節で述べたように Auger による組成の結果は UHE 宇宙線中に重い原子核が多分に含まれていることを示唆している。原子核も陽子と同様に、物質、光子や磁場と相互作用してガンマ線やニュートリノを生成する。しかし、原子核は物質や光子と分解反応も起こし、1 個ないし複数の核子を放出してより軽い原子核に壊れる。この反応はガンマ線やニュートリノを作る反応よりも大抵起こりやすいので、AGN や GRB などの天体で UHE 原子核が作られるためには、原子核が源を脱出するまでに壊れてしまわないかどうか吟味しなければなら

い*7. 筆者らの研究によると、GRB や AGN のシナリオでは、理論の不定性の範囲で UHE 原子核の存在は可能であり^{15), 16)}, マグネターシナリオでは壊れてしまうことがわかった⁹⁾.

では、期待されるガンマ線やニュートリノのフラックスは UHE 陽子の源のときと比べてどうであろうか? UHE 原子核が分解反応に対して生き残るためには、加速が起きている場所での物質や光子の密度が十分低くなければならない。一方、ニュートリノやガンマ線も源の中での物質や光子との相互作用により生成されるから、分解反応に対する原子核生存条件は源でのニュートリノやガンマ線を作る効率が低いことを意味する。

筆者らは UHE 宇宙線源が作るニュートリノ放射についての一般的な考察を行い、原子核生存条件からニュートリノ積算フラックスに対する上限を導出した¹⁷⁾. UHE 宇宙線が陽子の場合、天体からのニュートリノ積算フラックスのほどよい上限として Waxman-Bahcall 上限と呼ばれるよく知られた指標があるが¹⁸⁾ (図 2 参照), 導かれた原子核生存上限はそれよりも 1 桁以上も下である。これは観測される UHE 宇宙線の組成、源やそのモデルにもあまりよらない結論であり、源で一般に UHE 原子核が作られている場合、陽子や原子核が光子と相互作用して作るニュートリノを検出するには IceCube や KM3Net を超える検出器が必要だと考えられる。

UHE 原子核の源では陽子や原子核由来のガンマ線が作られる効率も低いので、一次的な電子による逆コンプトン放射などによって隠されやすくなり、陽子・原子核加速の証拠を見いだすことはずっと難しくなる。一方で、光子の密度が十分低いことから $\gamma\gamma$ 反応も起きにくく、厄介な源の中での電磁カスケードが効かない状況が期待できる¹⁵⁾. したがって、系外背景放射による吸収があまり重要にならない近傍の源に対してガンマ線の

スペクトルが観測できれば、源での物理過程による来たスペクトルを見ることができ、電子由来の成分との区別も可能であろう。原子核も陽子同様、パイオン生成反応や photopair 反応、シンクロトロン放射によりガンマ線を出す、原子核特有の物理過程も存在する。それは励起状態にある原子核が基底状態になる際に出す脱励起ガンマ線である。原子核は物質や光子と分解反応をした後に、励起された状態にあるのが普通であり、励起状態にある原子核は速やかに原子核静止系で MeV 程度のガンマ線を出して脱励起する。もちろん原子核は相対論的に動いているので、脱励起ガンマ線のエネルギーもドップラーシフトを受ける。その結果脱励起ガンマ線は TeV から 10^3 TeV で放射され、そのスペクトルは原子核の反応相手である低エネルギー光子のスペクトルを反映した特徴的なものになる (図 5 参照)¹⁹⁾. したがって、低エネルギー光子のスペクトルを可視光や X 線などで同時観測していれば、脱励起ガンマ線であるかどうか確かめられるであろう。MAGIC や CTA などガンマ線望遠鏡を用いて UHE 原子核の源を探る場合には、脱励起ガンマ線はパイオン生成反応や photopair 反応で作られるガンマ線とともに貴重なプローブとなりうる。

6. 今後の展望

本稿では、宇宙物理学における最大の謎の一つである UHE 宇宙線の起源について、最近の UHE 宇宙線観測の進展を踏まえて、起源天体において宇宙線が引き起こす物理過程と期待される特徴的なシグナルを概観した。近年の UHE 宇宙線観測における異方性と組成の結果についての混乱した状況や、GeV-TeV ガンマ線観測における陽子加速源の同定の難しさを考えると、決着をつけるにはスモーキングガンとなるようなシグナルの検出が渴望される。その一つがニュートリノであり、

*7 源で加速された宇宙線の中で重い原子核の占める割合が大きいことも自然ではなく、組成が原子核優勢の場合における問題点の一つである。

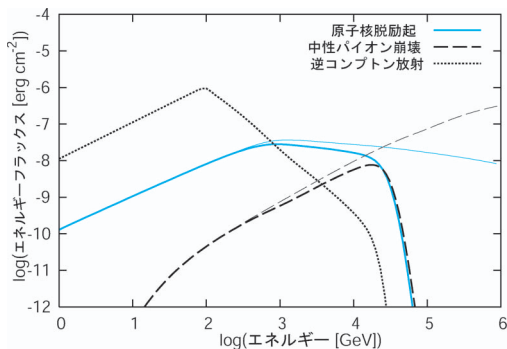


図5 近傍 100 Mpc で GRB が起きた場合に想定される、原子核脱励起、パイオン生成で作られた中性パイオンの崩壊、逆コンプトン放射、それぞれの過程で作られるガンマ線のエネルギースペクトルの例¹⁷⁾。細い線は系外背景放射光による吸収を考慮しない場合、太い線は考慮した場合を示す。

筆者らは GRB や AGN をはじめとする種々の UHE 宇宙線起源の候補天体からのニュートリノ放射について定量的な計算を行った。ニュートリノ源としてのマグネターや銀河団はあまり注目されていなかったが、これらが地上で観測される宇宙線に重要な寄与をしていれば有望なニュートリノ源であることを示した。また、UHE 宇宙線のより直接的なプローブとして UHE ガンマ線の有効性を指摘し、非定常な UHE 宇宙線源から時間・空間的に相関した特徴的シグナルとして次世代の検出器により観測される可能性があることを示した。UHE ガンマ線はまた UHE 宇宙線が陽子であることの間接的な証拠にもなるだろう。筆者らは UHE 宇宙線が原子核である場合のシナリオについても一般的に調べ、原子核生存条件によるニュートリノ積算フラックスの上限を導出した。また、UHE 原子核の源を探るプローブとして脱励起ガンマ線や photopair 反応によるガンマ線の重要性を指摘した。

将来特徴的なシグナルを検出できれば、起源の同定だけでなく、起源天体でおきている物理過程についても貴重な示唆が得られる。UHE 宇宙線の加速機構はよくわかっていないが、一部の理論

家は宇宙線は衝撃波付近で粒子が確率的にエネルギーを得ることで加速されると考えている。たくさんの粒子の中で一部の者だけが当たりくじを引いて加速される。そのうち一部の者だけが次のくじでも当たりくじを引く。はずれしか引かなかった者は不条理に思うかもしれないが、最後まで生き残った者のみが UHE 宇宙線になれるのである。しかし、現在の理論は当たりくじを引いた粒子がどれほどいるか予言できない。もし GRB からニュートリノやガンマ線が受ければ、源では当たりくじが大判振る舞いされた状況が実現されているとわかる。また、GRB や AGN などの天体では、放射機構などに不明な点が多く、磁場や放射半径などがわかれば貴重な情報となるし、放射を担うジェットの性質に示唆を与えてくれる。マグネターの場合は、マグネターの生成機構の手がかりにもなるだろう。

UHE 宇宙線は地上の加速器では達成できないエネルギーをもつため、基礎物理を調べる目的にも利用できる。例えば UHE ガンマ線やニュートリノを用いて相対論の検証を行うことができ、GeV や TeV でのガンマ線観測で現在得られているよりはるかに強い制限を得ることが可能である^{13), 20)}。また UHE 宇宙線の組成を明らかにすることは、よくわかっていない UHE 領域でのハドロン相互作用の解明にもつながる。UHE より少し低い 10^{17} eV は地上の加速器 LHC で調べられるエネルギーに相当しており、関連分野の進展が期待される。

本稿で述べたような特徴的なシグナルをとらえるにはマルチメッセンジャーおよび光での多波長同時観測が必要不可欠である。Cen A など近傍の UHE 宇宙線源については、宇宙線観測から特に重要な手がかりをつかめる可能性があるし、陽子・原子核由来の二次的な電子や陽電子はガンマ線ではなく、X 線や可視光、電波でしばしば放射が期待され、シナリオの間接的な証拠として重要になる。今後は理論と観測データを多粒子・多波長で比較することで、UHE 宇宙線の起源に迫る

ことになる。さらなる進展に期待したい。

謝 辞

本稿は筆者の博士論文の内容を拡張したものです。共同研究者の井岡邦仁氏, 井上 進氏, 佐藤勝彦氏, 高見 一氏, 中村卓史氏, 長瀧重博氏, J. F. Beacom 氏, P. Mészáros 氏, A. Peer 氏, B. Zhang 氏に感謝いたします。また有益なコメントをくださった井岡邦仁氏, 高見 一氏, 当真賢二氏, 山崎 了氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 山本常夏, 2007, 天文月報 101, 256
- 2) 高見 一, 村瀬孔大, 佐藤勝彦, 2010, 日本物理学会会誌 65, 634
- 3) Takami, H., et al., 2006, *Astrophys. J.* 639, 803
- 4) Abraham J., et al., 2010, *Astroparticle Physics*, 34, 314
- 5) Abraham J., et al., 2010, *Phys. Rev. Lett.* 104, 091101
- 6) Zaw I., Farrar G. R., Greene J. E., 2009, *Astrophys. J.* 696 1218
- 7) Murase K., Takami H., 2009, *Astrophys. J.* 690, L14
- 8) 村瀬孔大, 2007, 天文月報 100, 473
- 9) Murase K., Mészáros, P., Zhang B., 2009, *Phys. Rev. D* 79, 103001
- 10) Murase K., Inoue S., Nagataki, S., 2008, *Astrophys. J.* 689, L105
- 11) Asano K., Guiriec, S., Mészáros P., 2009, *Astrophys. J.* 705, L191
- 12) Böttcher M., 2010, in *Fermi Meets Jansky—AGN at Radio and Gamma-Rays*, eds. Savolainen T., et al., p. 41
- 13) Murase K., 2009, *Phys. Rev. Lett.* 103, 081102
- 14) Taylor A. M., et al., 2009, *Phys. Rev. Lett.* 103, 051102
- 15) Murase K., et al., 2008, *Phys. Rev. D* 78, 023005
- 16) Peer A., Murase K., Mészáros P., 2009, *Phys. Rev. D* 80, 123018

- 17) Murase K., Beacom J. F., 2010, *Phys. Rev. D* 81, 123001
- 18) Waxman E. Bahcall J., 1998, *Phys. Rev. D* 59, 023002
- 19) Murase K., Beacom J. F., 2010, *Phys. Rev. D* 82, 043008
- 20) Galaverni M., Sigl G., 2008, *Phys. Rev. Lett.* 100, 021102

**Origin of Ultrahigh-Energy Cosmic Rays
—Prospects for Multi-Messenger Astronomy
Kohta MURASE**

*Center for Cosmology and AstroParticle Physics,
Ohio State University, 191 West Woodruff Ave.,
Columbus, Ohio 43210, USA*

Abstract: One of the biggest mysteries in astronomy and astrophysics is the origin and generation mechanism of ultrahigh-energy (UHE) cosmic rays. Recent observations of UHE cosmic rays have given us some clues on this long-standing mystery, which may suggest that the sources are transient and/or UHE cosmic rays are largely nuclei. We consider relevant physical processes in candidates of the sources (*e.g.*, active galactic nuclei and gamma-ray bursts) and expected signals, in view of the multi-messenger astronomy utilizing gamma rays and neutrinos as well as cosmic rays. Especially, we discuss characteristic signals which are useful to probe transient UHE proton sources and UHE nuclei sources.