

宇宙を観る新しい目

森 正樹 (立命館大学理工学部 morim@fc.ritsumeai.ac.jp)

はじめに

平成に元号が切り替わる2年ほど前の1987年2月、400年ぶりに肉眼で見える超新星1987Aが大マゼラン星雲に発見された。一銀河あたり30年に1回程度とされている頻度の期待からすれば間隔が空き過ぎで、しかも天の川銀河でなく大マゼラン星雲ではあったが、超新星爆発はビッグバン後の宇宙で、ガンマ線バーストに次ぐ大規模なエネルギー放出を伴う現象であり、観測的、理論的な天体物理学の多くの分野での飛躍的な発展が促されることとなった。電波、赤外、光学、X線での詳細な観測は言うまでもなく、爆発に伴うニュートリノ・バーストがKamiokande (Kamioka Nucleon Decay Experiment) とIMBの検出器でとらえられたことはニュートリノ天文学の夜明けにもなった。高エネルギーガンマ線についても、当時は南半球に感度の良い観測装置がなかったこともあり、急遽日本・ニュージーランド・オーストラリアの共同研究実験JANZOSがニュージーランド南島の山上に建設されてTeV以上のエネルギー領域での観測が始まり、またボリビア・チャカルタヤ山上での日本・ボリビア共同実験BASJE実験が専用装置を用意するなど、日本の宇宙線研究にとって大きな動きが始まった。残念ながら明確なガンマ線信号はとらえられなかったものの、JANZOSグループから分かれたメンバーにより、日本・オーストラリア共同の大気チェレンコフ望遠鏡実験CANGAROOと、日中共同チベット空気シャワー実験が開始され、その後十数年以上にわたる新しい高エネルギーガンマ線天体物理学の研究の流れがつくられたと言える。もちろん、この間にGeV領域のガンマ線観測衛星が活躍し、地上ガンマ線観測と合わせて、衛星X線観測の範囲を超えて非熱的放射を行う天体の研究が飛躍的に進歩することになった。Kamiokandeの検出成功はSuper-Kamiokandeの予算獲得につながり、実験愛称の元となった核子崩壊現象は未だに見つからないものの、太陽や大気からのニュートリノ検出器として大きな成果を挙げるようになっていったが、ニュートリノ物理については別記事に譲り、ここでは天体物理学としての、高エネルギーニュートリノ観測についてのみ触れる。

高エネルギーガンマ線観測

天体からのガンマ線観測は人工衛星を用いて1960年代に始まったが、地上からの大気チェレンコフ望遠鏡による観測の試みはそれより少し前、1960年から旧ソ連クリミアで始められた。しかし、アリゾナ・ホプキンス山上の

Whipple望遠鏡による観測が20年間の試行錯誤を経て実を結ぶには、1989年(平成元年)に発表された“かに”星雲からの信号の検出を待つこととなった。高エネルギーガンマ線が地球大気に入射すると、大気原子核の電場で電子・陽電子対生成を起こし、この電子・陽電子はさらに制動放射を起こしてガンマ線を放出し、というカスケード過程により、空気シャワー現象が引き起こされる。電子・陽電子が大気中の光速より速く走るとチェレンコフ光が放射されるので、この光をとらえることによりガンマ線の検出が可能になる。しかし、空気シャワーはガンマ線以外の高エネルギー宇宙線(陽子や原子核)によっても引き起こされ、ガンマ線検出にとっては圧倒的な雑音となる。この雑音の低減が初期のシンプルな検出器によっては困難であったため、検出成功まで長い年月を要することになったのである。

地上からのガンマ線観測成功の鍵となったのは、イメージング法と呼ぶ、チェレンコフ光の像をとらえて、電磁相互作用のみのガンマ線のシャワーと、原子核相互作用の関与する荷電宇宙線のシャワーを、像の特徴を利用して識別する方法が開発されたことである。この方法を実現したWhippleグループに続き、日豪共同のCANGAROOグループ、ドイツなどのHEGRAグループ、フランスなどのCATグループなどが次々と大気チェレンコフ望遠鏡を建設し、TeV領域の超高エネルギーガンマ線天文学という分野が開拓されることになった。¹⁾ 特に2000年代に入ってから進展は著しく、H.E.S.S.グループがナミビアに、MAGICグループがカナリア諸島に、VERITASグループがアリゾナに大型の装置を建設して観測を進め、現在TeV領域で検出された天体は200個を超えている。²⁾ 世界の多くの国が協力して大規模な装置を建設するCherenkov Telescope Array計画が進行中であり、さらなる発展が期待される。

GeV領域で大型のCompton衛星EGRET検出器の観測が始まったのは1991年(平成3年)であり、271個のガンマ線天体のカタログがつくられ、活動銀河核が多数検出されるとともに未同定天体も多く見つかり、より角度分解能の良い観測が必要であることが認識された。日本グループが大きく貢献した半導体検出器を搭載した次世代のFermi衛星は2008年に打ち上げられ、今やガンマ線天体のカタログには3,000個以上が収録されている。³⁾ 地上に並べた粒子検出器を用いる空気シャワー検出装置の感度も向上し、チベット実験やHAWC実験では10TeV領域で数十個の天体が検出されるに至った。このように、平成はガンマ線天体物理学が大きく花開いた時代となった。

高エネルギーニュートリノ観測

高エネルギーニュートリノの検出には、検出器内で突然起こる相互作用を検出する方法と、検出器外でのニュートリノと物質の相互作用で発生したミュオンを検出する方法が用いられる。ミュオンは宇宙線と大気との相互作用でも生成され、透過力が強いので、バックグラウンドとなるこれらのミュオンが吸収されてしまうような厚い物質量が検出器の前に必要である。すなわち、地球の反対側から到来し、検出器を上向きに通過するミュオンであればニュートリノ起源であるといえることになる。また、天体からのニュートリノの検出には、宇宙線と大気との相互作用から放出される大気ニュートリノもバックグラウンドとなるが、天体ニュートリノは一般にハードなスペクトル^{*1}であることが予想されているため、エネルギーが高いほど信号雑音比が高くなると考えられる。しかし、エネルギーが高い分期待されるニュートリノのフラックスも減少し、その検出には膨大な体積の検出器が必要となる。

深海を天然の水チェレンコフ検出器として利用して巨大な検出体積を確保し、天体からの超高エネルギーニュートリノを検出しようとするDUMANDの概念は、1970年代半ばから構想されて研究開発が進められ、1990年に米DOEで予算化されたものの、深海での建設作業は困難が多く、1996年にプロジェクトは打ち切られることとなった。入れ替わるように1997年(平成9年)から観測を始めたのは南極の氷を利用したAMANDAプロジェクトであり、その装置稼働成功を受けて、本格的な天体からの高エネルギーニュートリノ観測を目指してIceCubeの建設が2005年から進められ、2010年に完成した。IceCubeは2012年にPeV領域の超高エネルギー天体ニュートリノを初めてとらえたと報告し、翌年には50 TeV以上のニュートリノを28個検出したと発表した。これらのニュートリノの対応天体は、IceCubeの限られた角度分解能もあり明らかでないが、2017年9月22日のイベントがTXS 0506+056と呼ばれる活動銀河核近傍から到来しており、同時期にこの天体がガンマ線領域でフレアを起こしていることが報告され、話題となった。⁴⁾ この同定が事実なら、この活動銀河核で陽子が加速されていることを意味し、多くの活動銀河核からのガンマ線フレアが加速された電子に由来するとされていることは矛盾し、高エネルギー宇宙線の起源の解明に新たな一石を投じることになる。事例が積み上げられていくことに期待したい。

IceCubeは南極にあるため、上述の理由でミュオンニュートリノでは北半球の天体しか観測することができない。DUMANDのように深海を利用するEUのプロジェクトKM3NeTは、フランス・イタリア・ギリシャ近海の地中海の3か所に分散して建設され、南半球の観測を行うことができる。IceCubeとは相補的な実験であり、両者を合わせて全天をカバーすることが可能になる。

最高エネルギー宇宙線観測

荷電宇宙線は銀河磁場によって曲げられるため、その到来方向は発生源の情報を失っているが、 10^{20} eVのエネルギーになると、ジャイロ半径が銀河系の半径を超え、ほぼ方向を保ったまま地球に飛来する。このような最高エネルギー宇宙線の到来方向は発生天体を指し示しているはずであり、「天文学」が成立し得ることになる。しかし、宇宙線のエネルギースペクトルはほぼエネルギーの3乗に反比例して減少するため、最高エネルギー宇宙線の観測には広大な面積をカバーする検出器が必要である。それまでの実験規模を一桁以上拡大し、南天をカバーするPierre Auger実験はアルゼンチンの草原地帯に、北天をカバーするTelescope Array実験はユタ州の砂漠地帯にそれぞれ建設され、前者は2004年(平成16年)、後者は2008年から観測を続けている。発生天体を特定するには至っていないが、最高エネルギー宇宙線の到来方向が一律でない結果が報告されており、⁵⁾このような超高エネルギーまで粒子を加速する起源天体についてのヒントが含まれているはずである。解明にはさらなる高統計が必要とされており、より大きな検出面積を目指して、人工衛星からの観測計画なども進められている。

おわりに

以上、高エネルギーガンマ線、高エネルギーニュートリノ、最高エネルギー宇宙線という平成に入って大きく進展した「宇宙を観る新しい目」について概説した。平成の(少し手前から)の30年間は、観測的天体物理学が観測手段をガンマ線やニュートリノ、そして重力波へと、幅広く間口を広げてきた(“マルチメッセンジャー”という用語が使われるようになった)時代といえるのではないか。また、平成の終盤、2015年9月にLIGOが報告した重力波信号の検出は、その後の中性子星連星合体からの信号とその対応天体の多波長観測の盛り上がりとともに、超新星1987A出現時の熱狂を思い起こさせてくれる。この検出が新時代の始まりを告げる契機になって、宇宙の観測手段がますます発展することを期待している。

参考文献

- 1) 森 正樹, パリティ **13**, 14 (1998).
- 2) TeVCat, <http://tevcat.uchicago.edu/>
- 3) Fermi-LAT Collaboration, *Astrophys. J. Suppl.* **218**, 218 (2015).
- 4) IceCube Collaboration, *Science* **361**, 147 (2018); 吉田 滋, *日本物理学会誌* **74**, 215 (2019).
- 5) 最近のレビューとしてL. A. Anchordoqui, *Phys. Rep.* (in press; astro-ph/1807.09645).

(2018年10月5日原稿受付)

*1 一般にエネルギー(E)スペクトルはべき乗分布 $E^{-\alpha}$ で表されるが、大気ニュートリノでは $\alpha \approx 2.7$ であるのに対し、天体ニュートリノでは多くの場合 α は2.7より小さい(より“ハード”)と考えられる。