

研究紹介

カンガルーによる近傍銀河 NGC253 からの TeV ガンマ線観測結果とその解釈 “ 後光差す銀河 ”

東京大学 宇宙線研究所 (ICRR)

榎本 良治

enomoto@icrr.u-tokyo.ac.jp

2003 年 3 月 20 日

先日、某新聞社に勤める昔の同級生が、“神岡”関係者に私がなにをやっているのか尋ねたところ、“ああ、オーストラリアでカンガルーやっている人ですね”という答えが返って来たそうです。間違っていないかもしれませんが、より正しい紹介をした方がどうもよさそうです。

カンガルー望遠鏡は南オーストラリアの砂漠地帯ウーメラに建設された世界最大クラスの解像型チェレンコフ望遠鏡である。高エネルギーガンマ線 (TeV 程度) は地球大気に入射すると電磁シャワーを形成し、その二次電子はチェレンコフ光を発する。解像型チェレンコフ望遠鏡はその針のようなシャワーイメージを捕らえ、その入射方向およびエネルギーを決定することができる。口径 10m クラスのチェレンコフ望遠鏡は 2002 年時点で世界に二台しかなく、天体が集中する南半球にあるのはカンガルーのみである。

TeV のガンマ線の形成するシャワー極大は高度 10km 程度にあり、そこでのチェレンコフ角から考えると半径約 120m のリング状の光が瞬時に地上に到達することになる。この円内のどこからでもシャワー形状を観測することができる (中心を除いて)。したがって一台の望遠鏡の有効面積はこのリングの面積になり、ガンマ線衛星の有効面積 1m^2 に比べて格段の感度を持つことになる。

また宇宙線の加速起源を知る上で TeV というエネルギーは極めて意味深い。超新星残骸における宇宙線の加速限界は 100TeV くらいと考えられ、これによるガンマ線は TeV くらいになるからである。さらにエネルギー流量に物理があるなら、それは宇宙線フラックスにエネルギーを掛け積分したもの (近似的にはフラックスにエネルギーの二乗を掛けたものに近い) なので、エネルギーは高ければ高いほど、より深い研究ができる。したがって将来大型衛星が打ち上げられても、われわれの存在価値を脅かすものではない。

最近カンガルーによる NGC253 からの広がったガンマ線検出およびその解釈についての論文が *Astronomy & As-*

trophysics (文献[1], [2]: カンガルー実験グループによる論文) および *Astrophysical Journal* (文献[3]: その解釈に関する他分野の研究者との共著論文) に掲載されたので、それを紹介したい。

NGC253 は太陽系から 2.5Mpc の位置にある、わが銀河の近傍銀河である (彫刻室座群)。その可視光による写真を図 1 に示す。



図 1 可視光で見た NGC253

見ての通り、われわれの銀河に極めて近い形状を持った渦巻き銀河である。これはカンガルーの実験サイト (南オーストラリアの砂漠地帯ウーメラ) では、10 - 11 月に天頂に見える天体であり、約 8 等の明るさである。視直径は約 $0.3^\circ \sim 0.4^\circ$ であり、大変美しく見える。

この銀河はその形状、明るさから当然メシエカタログに載るべきものだったが、発見は遅れ、後年キャロライン・ハーシェル (こういう言い方はよくないが、ウィリアム・ハーシエルの妹) により見出された (メシエが逸した銀河としても有名である)。女性科学者が見出したものとして、今回の伊藤千枝 (茨城大大学院博士課程) その他による

NGC253 からのガンマ線放射の発見は、意味深いものを感じる。

NGC253 は、近傍の銀河を横から見たもの (edge-on) としては、類を見ない格好のターゲットである。さらにこれはスターバースト銀河と呼ばれ、超新星爆発のレートがわが銀河の 10 - 100 倍と考えられている銀河であり、われわれの銀河よりも強い宇宙線強度が期待されていた。活動銀河核 (AGN) のジェットからのガンマ線は多数報告されているが、わが銀河に似た他銀河からのガンマ線の検出は、これまでなかった。

近年銀河宇宙線の空間分布に関しては、ガンマ線衛星によるわが銀河内の観測から、間接的にその形状などを類推していた。茨城大 (柳田、吉田、伊藤) と東大宇宙線研 (榎本) のグループは、他銀河からの宇宙線の検出を目指すべくカンガルー実験を提案し、今回の観測にいたった。“森の中から森の形は分からない (柳田後日談)”。さらに宇宙線の本来の姿を太陽系内からの観測 (ガンマ線衛星によるわれわれの銀河ディスクの観測) と関連させながら議論するなら、やはりそれを横から、しかも遠くなく近くもない場所から見なくてははいけない。

カンガルーグループは NGC253 を 2000 年および 2001 年の通算 2 年、総時間 150 時間という deep observation を取行した。その結果を図 2 に示す。

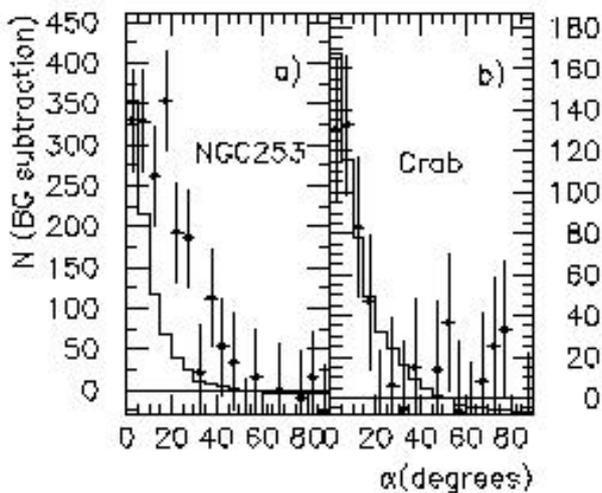


図 2 アルファ角の分布 (シャワー重心と視野中心を結んだ線とシャワー長軸とのなす角)

ターゲットからの信号はゼロ度にピークを持つべきである。

これは通称アルファ分布といい、ガンマ線の到来方向分布を示す。ゼロ度が NGC253 の方向である。図 2 左が NGC253 の観測であり、図 2 右がかに星雲の観測である。かに星雲はガンマ線点源としての standard candle として示してある。実線のヒストグラムはいわゆるポイントプレ

ッド関数といい、ガンマ線源が点状であった場合の予想分布である。この図から分かるように、明らかに点状のガンマ線天体ではない。ただし現状のカンガルーはこれ以上の到来方向分布に関する言及は技術的に無理で、今年以降の二台の望遠鏡連動によるステレオ観測が期待される。

どうも NGC253 から広がったガンマ線が放射されているらしい。われわれは proposal の段階では中心からの放射を期待していたわけなので (というのは、スターバースト領域は中心数百 pc 領域であった)、これはかなり悩ましい結果であった。この結果はすでに一年目の観測で得られていたが、二年目の追観測を行った理由の一つはここにある。ここまでの詳細は参考文献[1], [2]を参照されたい。

ここから、このガンマ線発生機構に関する解釈に移りたい。図 3 に示すのがいわゆるマルチバンドスペクトル (SED: スペクトラルエネルギー分布) である。これは各波長における発生源でのエネルギー寄与と考えられる。

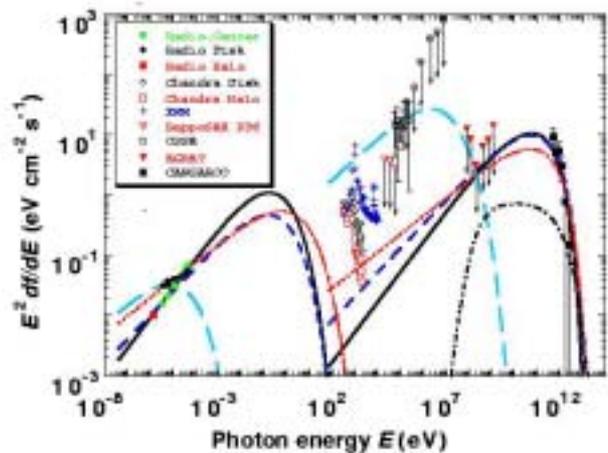


図 3 各波長領域の光のエネルギー流量 (フラックスにエネルギーの二乗を掛けたもの)

もっとも低エネルギーなのが電波であり、高エネルギーが TeV ガンマ線である。GeV 近辺の上限値はガンマ線衛星による観測で、中間は X 線衛星による観測である。X 線は、ほぼすべてが熱的放射と考えられているので (高温プラズマなどによる輝線が豊富) いま考える宇宙線の寄与ではなく、上限値と考えられる。線は各種理論計算による推測である (本文に記述)。

図中に示す線は後ほど説明する。まず観測結果について述べよう。これらは京大の鶴によりコンパイルされたものであるが、大変興味深い。まず分かることは、これらを単純に一つのメカニズムで記述することは無理らしい。それなら、次のチャレンジは二つにすることである。一つはもちろん中心における熱的な放射であり、われわれの興味の対象ではない。図の説明に書いたように宇宙線による寄与はこれより小さいと考えられる。もうひとつは? これまで

のガンマ線天体における研究においては、シンクロトロン放射と逆コンプトン散乱による高エネルギーガンマ線を結びつけるのが普通であった。それでは電波観測と TeV ガンマ線を結びつけてみよう。一般に逆コンプトン散乱のターゲット光を宇宙背景放射と考えると、電波より TeV ガンマ線の強度を高くするためには、空間磁場を数マイクロガウスに抑えなくてはならない(最高加速エネルギーによるが)。銀河中心、あるいはディスクではおそらく磁場は強く、ハローでは弱いであろう。中心という仮定はもちろん TeV ガンマ線観測と食い違うので無意味である。ディスクかハローかはむずかしい。電波をシンクロトロン放射、TeV ガンマ線を可視光、赤外光、宇宙背景放射との逆コンプトンと考えると、そこでの磁場、宇宙線強度を計算することができる。ディスクと仮定して詳しい計算をすると、ここでの宇宙線の全エネルギーがスターバースト現象を考えても“ばかでかく”になってしまう(もちろんこの仮定は NGC253 を特殊な銀河と考えるなら受け入れ可能である)。スペクトルも微妙に観測と食い違う(点線:これによれば X 線で非熱的成分が見えなくてはならず、観測と矛盾する)。

それではハローと考えてみよう。ハローは磁場が弱く X 線でシンクロトロン放射はまず見えないので、観測と矛盾しない。ハローに高エネルギー電子があり、それが 2.7K 背景放射と逆コンプトン散乱をしてカンガルーの見えるガンマ線になると考えてみよう。ハローには背景放射が満ち満ちており、より小さい宇宙線密度でよい(実線)。果たしてハローに宇宙線は広がるのか? 拡散の理論では、どうもありえるらしい。電波観測ではもともとハローは見えていた(NGC253 はもっとも大きな電波ハローを持つ天体であった)。こう考えると NGC253 の電子宇宙線密度(単位体積当たり)はわが銀河のたったの 10 倍程度に留まることになる。ハローでの全エネルギーで考えると、われわれの銀河宇宙線がディスクのみに存在すると考えた場合の約百倍である。われわれの銀河宇宙線もハローの一部と考えればこの差は縮まる。

ハローに高エネルギー電子があるのなら、太陽系での宇宙線観測の結果から考えると、陽子成分はその百倍以上あるはずである。上記計算は電子成分しか考えていなかった。宇宙線陽子がディスクにある分子雲と散乱し、中性パイ中間子を形成してしまうからである。これにより GeV-TeV ガンマ線強度が上がってしまうと、また自己矛盾に陥ってしまう。計算によれば高エネルギー陽子の寄与は図 3 の一点鎖線程度であり、宇宙線のハローに NGC253 がすっぽり埋まっているという解釈に矛盾がないことも分かった。以上がマルチバンドスペクトルに示される線(吉田、伊藤の計算による)の説明であるが、詳しくは参考論文[3]を参照されたい。

われわれはこの一連の論文により、以下の理解を深めた。まず観測に関しては宇宙線観測史上最大スケールの宇宙線の存在を実証した。そしてわれわれの銀河以外の銀河にも宇宙線が付随していることも。われわれの銀河にもハローがある可能性も類推される。ハローがあるなら、これまでの宇宙線の解釈に関して大きな修正が必要である。宇宙線は本当に超新星のみが発生源か? それとも別のところから来たのか? ディスク、ハローでの加速はあるのか? 宇宙線の寿命、伝播の議論はこれまでのもので OK か?

またもっと別の観点から考えるなら、銀河が宇宙線ハローを作ったのか? 宇宙線ハロー(ハローの語源:後光)の中に銀河があるのか? 宇宙論的宇宙線(cosmological cosmic-rays)があるのか? それなら大構造に付随するのか? 銀河間に磁場があることは、すでに知られている。それはどうやってできたのか? いま初めて、宇宙線の宇宙物理的意義が感じられる。宇宙線物理学はおそらくわが銀河内には留まらない。

これらの研究は、伊藤千枝、柳田昭平、吉田龍生(以上茨城大)、鶴剛(京都大)、およびカンガルー実験メンバーにより行われた。共に楽しく研究に励めたことに、感謝の意を表します。

参考文献

- [1] C. Itoh, R. Enomoto, S. Yanagita, T. Yoshida, *et al.*, *A&A*, **L1-4** 396 (2002).
- [2] C. Itoh, R. Enomoto, S. Yanagita, T. Yoshida, *et al.*, *A&A*, **402** 443 (2003).
- [3] C. Itoh, R. Enomoto, S. Yanagita, T. Yoshida, T. G. Tsuru, *ApJL*, **L65-68** 584 (2003).