

Failed GRBからの高エネルギーニュートリノ

安藤 真一郎

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

近年、重力崩壊型超新星爆発とガンマ線バースト (GRB) の相関が、観測的に確立してきた。この事実は、我々のGRBに対する理解を大きく深めると同時に、新たな疑問を投げかけている。すなわち「全ての超新星はGRBにみられるような、相対論的ジェットを伴っているのか?」という事である。この疑問に対する完全な答えは、光による観測からだけでは得ることができない。この記事では、ジェット中の粒子加速により作られるニュートリノを検出する事により、この疑問に答えることができ、さらにいくつかの物理的示唆が得られる事を示す。具体的には、10 Mpcの距離で起こった超新星にローレンツ因子が3程度のジェットが付随していれば、IceCubeで30イベント程度とらえる事が可能である事を示す[1]。

1. はじめに

ガンマ線バースト (GRB) のうち継続時間が2秒を超えるようなものは、重力崩壊型超新星爆発と確かな相関がある事が確立した。GRBの様々な観測事実は、エネルギーとして $E_j = 10^{51}$ erg、ローレンツ因子として $\Gamma = 100\text{--}1000$ のジェットを仮定する事で非常に良く説明できる。一方超新星にも近年非対称な爆発の証拠が見つかるなど、二つの間の相関はごく自然な帰結として考えられる。しかしながら現在の大規模数値計算においても、いかにしてGRBを起こすかという大問題が未解決のまま残されている。とりわけ、GRBにみられるような極端にバリオンの少ないジェットを作る事が困難とされている。このような超相対論的なジェットはGRBからの放射スペクトルを説明するために必要であるが、逆に言うと仮にそれよりもバリオンを多く含んだようなジェットが存在したとしても、GRBとしては観測されない事を示している。このように、我々の超新星-GRB相関に関する理解はまだまだ完全とは言えず、さらに光による観測だけでは限界がある事もまた事実として認識しなくてはならない。

GRBジェットでは衝撃波が形成され、そこで粒子加速が起こっていると考えられる。通常のガンマ線放射は、加速された電子からのシンクロトロン放射などで説明できると考えられている。一方衝撃波中では陽子も同時に加速され、そこから起因して起こる相互作用により、高エネルギーのニュートリノが大量に作られる事が考えられる。ニュートリノは生成されると同時に天体から逃げていくため、ガンマ線などの光子では見通す事の出来ない、光学的に厚い領域を見通すことができる。これにより、「隠された」超新星-GRB相関への新たな示唆を得ることができると期待できる。

Razzaque, Meszaros, and Waxman (RMW) [2]はGRBジェットよりバリオンをより多く含んだ $\Gamma = 3$ のジェット内でのニュートリノ生成のモデルを用い、南極に建設中のニュートリノ検出器IceCubeでの検出可能性の議論を行った。今回我々は、彼らのモデルを改良する事により、期待されるニュートリノフラックスが大幅に改善される事を示した[1]。もっとも重要な点は、RMWが π 中間子起源のニュートリノしか考えていなかったのに対して、K中間子も考慮に

入れた点である。結果として、期待されるニュートリノフラックスは一桁程度向上する事が示される。また、このようなジェットが10 Mpc離れた銀河内で起こった超新星に付随していれば、IceCubeで30イベント程度が検出可能であり、多くの物理的示唆を与えることが期待できる。

2. ジェットダイナミクス、陽子加速、中間子生成と冷却過程

RMWに従い、具体的な例として $E_j = 3 \times 10^{51}$ erg, $\Gamma = 3$ のマイルドに相対論的なジェットを考える。通常のGRBのプロンプト放射メカニズムでみられるように、ジェットのシェル同士の内部衝撃波は、 $r_j = 2\Gamma^2 c t_v = 5 \times 10^{10}$ cm の位置で起こる（これはヘリウム層が残っている場合にはその内側にあたる）。いま t_v は変動の時間スケールであり、0.1秒とした。そこで電子および陽子の数密度は、ジェットの開き角を0.3ラジアン、バーストの継続時間を10秒程度として、 4×10^{20} cm⁻³と評価（ジェットの静止系での量）できる。いま、もともとのジェットが持っていた運動エネルギーの10%が電子と磁場にそれぞれ分配されるとすると、磁場の大きさは、10⁹ G程度となる。加速された電子は、この強い磁場中でシンクロトロン放射を行うが、今の場合光学的厚みが10⁶程度と非常に大きいため、直ちに熱化しその温度は、4 keV程度となる。

内部衝撃波により陽子も加速され、そのスペクトルは E^{-2} のベキ型関数に従うと期待される。陽子の最大加速エネルギーは、加速と冷却の時間スケールの比較から導けるが、今の場合冷却過程としては、主に熱的光子との衝突による π 中間子生成が効いてくる。簡単な計算により、 $E_{\max} = 7 \times 10^4$ GeV と見積もれる。

衝撃波により加速された陽子は、他の陽子との衝突により、 π 中間子、K中間子を生成する。これら中間子がただちに崩壊するか、様々な過程により冷却してから崩壊するか（エネルギーによってどちらになるかが変わる）を議論する事によって崩壊して得られるニュートリノのスペクトルを求めることができる。冷却過程としては、生成された中間子と周りに大量にある陽子の衝突によるハドロン冷却と、磁場によるシンクロトロン放射や熱的光子を逆コンプトン散乱するといった放射冷却が考えられる。エネルギーが充分低い場合には、崩壊が最も速やかに起こるため、ニュートリノのスペクトルはもともと陽子が持っていたスペクトルを良く保つと考えられる。ある閾値よりエネルギーが高い場合は、冷却過程が効き出すため、スペクトルはより柔らかくなる。具体的には図1に示したように、二つの特徴的な折れ曲がりを持ったような形で表されることになる。

ここで π 中間子とK中間子の比較を行う。まず、最初の生成の際には π 中間子の方がおよそ10倍程度数多く作られるという事が実験的にも知られている。しかしながら今回の場合K中間子には、それを補ってあまりある効果が期待できる。まず固有寿命が π 中間子に比べてファクター2ほど短いため、より速やかにニュートリノに崩壊できる。また、質量が4倍程度大きいため、同じエネルギーでもローレンツ因子が小さくなり、寿命がより短くなる。さらに同じく重いという性質から、放射冷却の効率が極めて悪いという事がある。これら全ての性質が、より速やかな崩壊を促進し、スペクトルを陽子のそれにより近い状態に保ってくれるのである。表1にこれらの折れ曲がりのエネルギーの典型的な値を π 、K起源のそれぞれの場合においてまとめてある。K起源の場合、明らかに高エネルギー側で折れ曲がりが起こることがわかる。

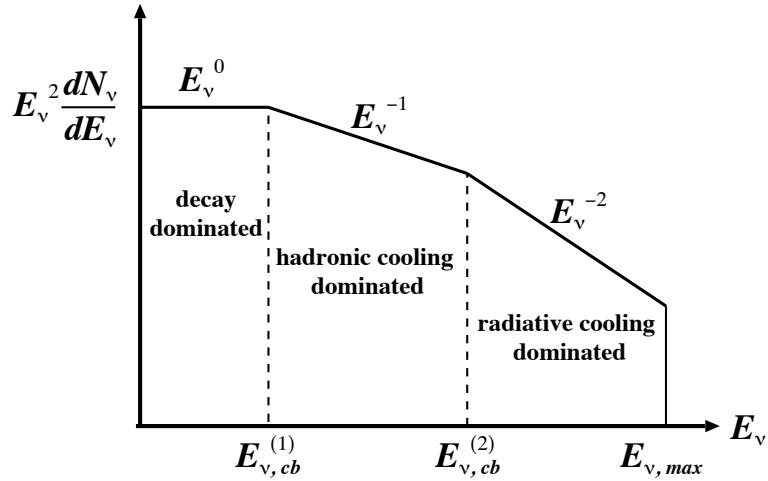


図1. ニュートリノスペクトルの模式図. 最小エネルギー領域では崩壊優勢, 中間領域ではハドロン冷却優勢, 最大エネルギー領域では放射冷却優勢である.

表1. 特徴的なスペクトルのエネルギー.

	$E_{cb}^{(1)} [\text{GeV}]$	$E_{cb}^{(2)} [\text{GeV}]$
π	30	100
K	200	20,000

3. ニュートリノバーストの検出可能性

地上でのニュートリノフラックスは, エネルギー, バルクローレンツ因子, ジェットの開き角を既に述べたような値に固定すれば, あとは距離を与える事により計算が可能である. これらTeV領域にエネルギーを持つニュートリノにはいくつかの検出計画が存在する. 現在南極で建設中のIceCubeはその最たるものである. これはほぼ1 km²の有効面積を持ち, あらゆる角度方向に感度を持つ. いま考えているマイルドに相対論的なジェットを伴った超新星が, 10 Mpcの銀河で起こった場合に, IceCubeで期待されるニュートリノのイベントスペクトルを図2に示す. これをみるとエネルギーの小さい領域では π 中間子の寄与が卓越するが, エネルギーをあげていくに従い, π 中間子が冷却によりエネルギーを失うため, イベント数が減少する事が明らかである. 他方K中間子は, 先に述べた通り冷却が効きにくく, 寿命も短いという事から, 最終的なスペクトルも π 中間子起源のものに比べて, より固いものとなっている. 主にこの効果のため, 期待されるイベント数が現実的に検出可能な数にまでなっていると言うことができよう. いま, IceCubeのエネルギー閾値を100 GeVだとすると, 10 Mpcのバーストから30イベント程度が期待される. この全てのイベントがバーストの継続時間である10秒のうちに, さらには超新星方向からおよそ3度程度の角度内に集中する. バックグラウンドとして考えなくてはならないのは, 大気ニュートリノであるが, このような制約を課す事により, 本質的にはバックグラウンドが完全に無視できる状況が実現すると期待できる. 図2には, 1日の時間間隔で積分した大気ニュートリノのイベント数を示してあるが, 実際にはこれよりも遥かに小さい(ファクター10⁻⁴倍の)寄与を考えるだけでよい.

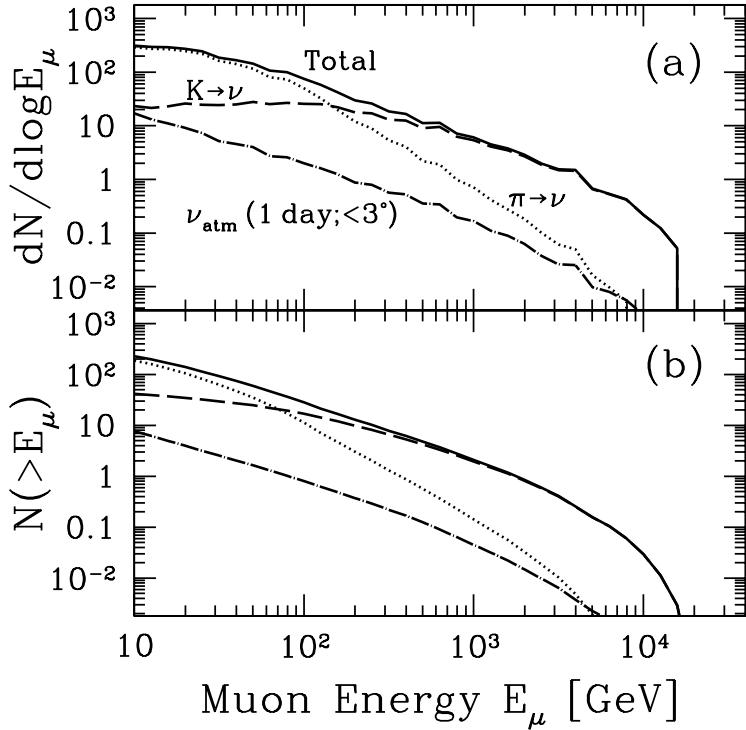


図2. 距離10 Mpcの超新星からIceCubeで期待できるニュートリノイベント. (a) スペクトル, (b) あるエネルギー以上のイベント数. π , K 中間子からの寄与と, 大気ニュートリノによるバックグラウンドがそれぞれ示されている.

4. 議論

このように, 近傍の超新星に相対論的ジェットが普遍的に存在しているとするならば, ニュートリノを検出することでのみその検証が可能となる. 我々から10 Mpc以内で期待される超新星の発生率は, 年間3個程度であると考えられる[3]. また, このモデルでは数多くのイベント数が期待されるため, たとえ30 Mpcで起こったとしても検出可能であるかもしれない. このため, IceCubeが稼働を開始してから間もなくのうちに, このようなジェットからのニュートリノを検出したとの報告を, 我々は耳にするかもしれない. 銀河系外ニュートリノの初検出というだけでなく, 物理的にも様々な意義がある. それは, ガンマ線だけでは不可能な, より一般的な超新星-GRB相関への示唆であったり, 関連する重力波探査に有用な重力崩壊の正確な時間を与えてくれる事であったり, 星全体の爆発の方向を数時間前に予言してくれる事であったりするであろう. 最後に, 我々の研究[1]に刺激を受けて, IceCubeの前身であるAMANDAグループがデータの解析を開始した事を言及しておく.

参考文献

- [1] S. Ando and J. F. Beacom, Phys. Rev. Lett. **95**, 061103 (2005)
- [2] S. Razzaque, P. Meszaros, and E. Waxman, Phys. Rev. Lett. **93**, 181101 (2004); **94**, 109903(E) (2005)
- [3] S. Ando, J. F. Beacom, and H. Yüksel, Phys. Rev. Lett. **95**, 171101 (2005)