

スーパーカミオカンデにおける高エネルギーニュートリノ研究

名古屋大学太陽地球環境研究所

伊藤好孝

1. イントロダクション

高エネルギー天体で陽子が加速されている場合、荷電 π 中間子が生成され、最終的にはニュートリノが放出されているはずである。一方地球上には太陽ニュートリノと大気ニュートリノが大量に降り注いでいる。このバックグラウンドから逃れるためにはできるかぎり高エネルギーのニュートリノを捕まえる必要がある。またニュートリノの反応断面積はエネルギーに比例し、核子あたり $\sigma \sim 10^{-38} \times E_{\nu} (\text{GeV}) \text{ cm}^2$ と高エネルギーほど検出に有利である。検出器周囲の岩盤で μ ニュートリノが反応した場合、生成された μ が岩盤を通り抜けて検出器に到達することがある。この場合、通常の下向き宇宙線 μ と区別するため上向き μ 事象が使われる。 μ の飛程は 1 TeV でおおよそ km 程度になり、検出体積はやはりエネルギーについて effective に増大することになる。加えて、高エネルギーであれば生成される μ と ν の角度相関がよくなり、点源探索に有利である。以上の理由で、天体ニュートリノ探索には上向き μ 事象がよく用いられている。

スーパーカミオカンデ（以下 SK）は神岡鉱山の地下 1000m に位置する 50kt（有効体積 22.5kt）の世界最大の水チエレンコフ検出器である。上向 μ の感度に関しては検出器の体積ではなく有効面積が効き、SK の場合約 1200m² である。南極には氷を使ったさらに巨大な有効面積 0.3km² を持つチエレンコフ検出器 AMANDA が稼動しており、さらに km³

の体積をもつ ICECUBE が現在建設中である。また湖や海を使った BAIKAL や ANTARES などの実験もある。SK は有効面積という意味では世界最大ではないが、ニュートリノ振動の研究の傍ら、上向き μ サンプルを中心に天体からのニュートリノ探索が様々な手法で行われてきた。本稿では SK での高エネルギーニュートリノ天体探索の現状について簡単にまとめる。

2. SK でのイベントカテゴリ

SK は直径約 34m 高さ約 36m の内水槽とその外側を覆う厚み約 2m の外水槽からなる。内水槽では 50cm 径 PMT を約 1 万 1 千本用いてチエレンコフリングのイメージングを行い、ニュートリノ反応点や放出粒子のエネルギー、運動量等を求めている。反応点が内水槽壁から 2m 以上内側を有効体積とし、そのうち全粒子が内水槽で stop したものを fully-contained event、 μ 等が内水槽から飛び出し外水槽に検出されたものを partially-contained event と呼ぶ。その境界はニュートリノエネルギーでおよそ 10GeV である [1][2]。大気ニュートリノの場合、Fully-contained event は約 8 event/day、partially contained event は約 0.5 event/day である。

太陽ニュートリノサンプルは大気ニュートリノよりも低エネルギー（およそ 5~100MeV）事象について行われる別系統の解析であるが、ほぼ同様にチエレンコフ光からニュートリノ

反応点を求め、内水槽壁から 2m の 22.5kt を有効体積としている。この後 spallation や noise などのバックグラウンドを落とす処理をして最終サンプルが得られる。太陽ニュートリノ数計測のためにはさらに太陽方向との相関を取るが、天体ニュートリノ探索には太陽方向との相関をとる前の最終サンプルが使われる。これはおよそ 150event/day 程度の頻度となっている。

2001 年の増倍管破損事故以後は内水槽増倍管は約半分の約 5000 本となっているが、2005 年のフル再建作業を経て 2006 年度からは本来の 1 万 1 千本に戻る予定である。2001 年の事故以前のデータを SK-I、2002 年以後の増倍管半数のデータを SK-II と呼ぶ。増倍管数が半減しても、太陽ニュートリノサンプルの最低検出エネルギーが 4.5MeV から 7MeV に上がった以外は検出器としての性能は大きくは劣化していない。

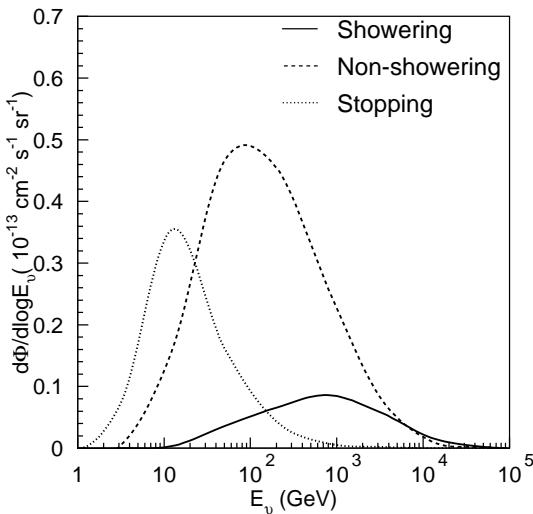


図 1 大気ニュートリノの場合の upward stopping, non-showering, showering muon の parent neutrino energy 分布

一方、上向き μ 事象では、タンク外側の岩盤で生成された μ が検出器に到来する。タン

クを完全に突き抜けるものを upward through-going muon、内水槽で stop するものを upgoing stopping muon と呼ぶ。反応点が不明なため親の neutrino energy は測定できないが、大気ニュートリノでは upward stopping muon の親ニュートリノは約 10GeV、upward through-going muon の親ニュートリノは 10GeV~10TeV である。両者あわせて約 1.5event/day の event rate である。

近年、 μ が内水槽で radiative なプロセスを起こし電磁シャワーを起こした upward showering muon をタグすることで、upward through-going muon の中でも親のニュートリノが TeV 程度の高エネルギーサンプルを抽出する方法が確立された。電磁シャワーを伴った μ によるチエレンコフリングは局所的に余分な光量を放出することを利用して識別が可能である。図 1 に大気ニュートリノフラックスの場合の upward stopping muon, through-going (non-showering) muon, showering muon の親のニュートリノエネルギー分布を示す。

今回主に使用される SK-I データは 1680 live-days (April 1996 ~ Jul 2001) で 467 upward stopping muon と 1892 upward through-going muon が観測された。このうち 309event が upward showering muon である。

3. 点源から定常的なニュートリノの探索

SK-I の上向き μ サンプルでは様々な方法で高エネルギー天体からのニュートリノ探索が行われている。

まず天球の特定点源からの定常的フラックスの探索である。図 2 は、各上向き μ 事象の方向から 3 度 cone をとった場合に、その中にクラスターする上向きミュー事象数の頻度分

布である。データは点源がないとした場合の予想とよく一致している。同様の解析を upward showering muon に限って行った場合でも同様に有意な点源は見つかっていない。

CygX-1 や Mrk421 等の高エネルギー天体

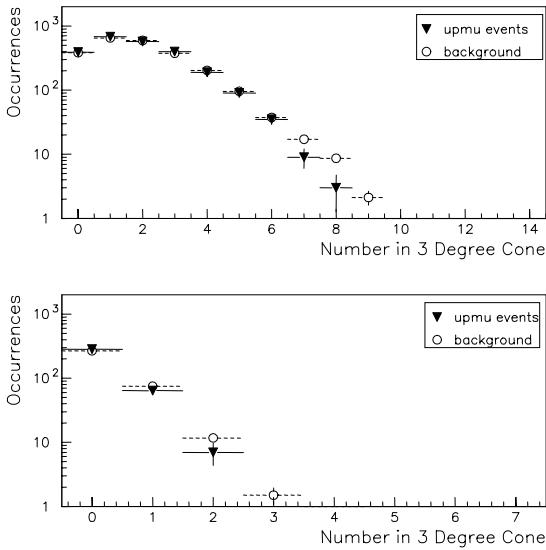


図 2 各上向き μ 到来方向について 3 度 cone 内にクラスターする上向きミュー数の分布。上が全上向き μ 、下が upward going showering muon のみのサンプル。

の方向のクラスターも調べられているが、いずれも有意な excess は見つかっていない。

WIMP 対消滅によるニュートリノ探索に関して、地球中心、太陽、銀河中心からの excess も探索されている[3]。暗黒物質としてのニュートラリーノは、宇宙を漂ううちに銀河系や太陽、地球の物質と散乱を起こして運動量を失ってその重力場にトラップされ、やがて対消滅を起こして γ 線やニュートリノを生成すると考えられている。地球中心、太陽、銀河中心についていずれの方向からも上向き μ に有意な excess はなく、ニュートリノフラックスの上限値が得られている。この結果を M.Kamionkowski[4]の考察を元に、ニュートラリーノの散乱断面積に対する上限値に焼直し、直接測定と比較できる形にした結果が図

3 である。Spin-independent 相互作用について DAMA の結果に迫っている、Spin-dependent 相互作用に関しては現行の直接実験よりもよい一桁以上よい上限値を与えている。

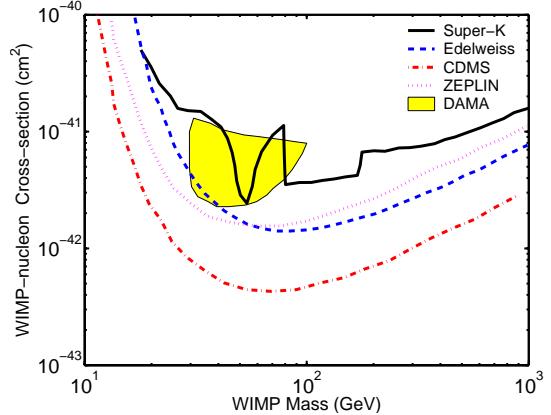


図 3 地球中心、太陽、銀河中心からのニュートリノフラックス上限値から得られた WIMP-核子断面積に対する上限値

4. GRB からのニュートリノ探索

GRB 起因のニュートリノの場合、バーストの時間情報が使えるため、バックグラウンドの低い探索が可能となる。SK-I では上向き μ だけでなく、大気ニュートリノサンプル、太陽ニュートリノサンプルも用いて、BATSE2000 カタログの GRB ソースとの相関がチェックされている[5]。BATSE と SK-I の同時観測期間 (Apr 1, 1999 ~ May 2000) について、カタログより 1454 GRB が select され、それぞれに GRB バースト時刻から ± 10 秒、 ± 100 秒、 ± 1000 秒の window 中に起こった太陽ニュートリノ、大気ニュートリノ (vertex contained events) がカウントされた。上向き μ に関しては角度相関のよさを考慮して、GRB との角度 15 度以内、GRB バースト時刻から ± 1000 秒の event がカウントされた。結果はすべて大気ニュートリノバックグラウンドから予想される数と consistent であった。

この結果をニュートリノ fluence に対する upper limit に焼直すためには元のニュート

リノエネルギースペクトラムを仮定しなければならない。ここでは単色スペクトラムを仮定してニュートリノフラックスリミットを各ニュートリノエネルギーごとに計算した fluence "Green function" upper limit $\Phi(E_\nu)$ を求めている。すなわち、

$$\Phi(E_\nu) = \frac{N_{90}}{N_T \int \sigma(E') \epsilon(E') \delta(E_\nu - E') dE'} \quad (1)$$

ここで N_{90} は得られたニュートリノ事象数の 90%CL 上限値、 N_T は有効体積中の核子数、 σ は核子あたりのニュートリノ反応断面積、 ϵ は検出効率である。 $\Phi(E_\nu)$ を用いれば任意のスペクトラム形 $\lambda(E_\nu)$ に対する fluence upper limit F は、

$$F = \left[\int \frac{\lambda(E_\nu)}{\Phi(E_\nu)} dE_\nu \right]^{-1} \quad (2)$$

と求めることができる。上向き μ サンプルから求められた fluence Green function upper limit を図 4 に示す。

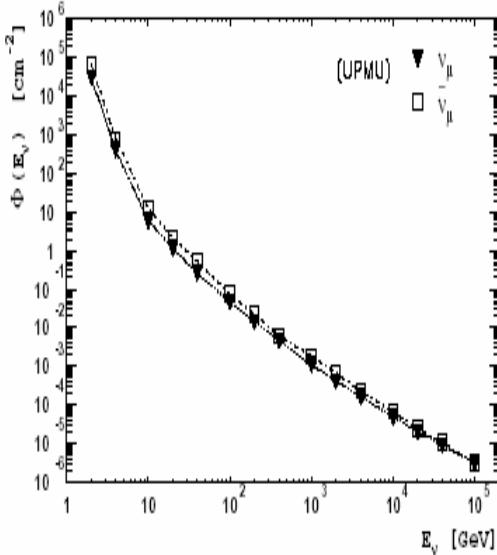


図 4 上向き μ サンプルから得られた GRB からのニュートリノ fluence に対する Green function upper limit (90%CL)

5. SGR からニュートリノ探索

SGR (Soft Gamma-ray Repeater) は X 線

フレアを定常的に起こしている天体で、非常に強磁場のパルサー (magnetar) ではないかと言われている。SGR は銀河系内か近傍の天体である。SK-I の時期には 4 つの SGR から 74 回のアクティブな期間が観測されている。それぞれについて ±1 日の window 中に SGR の方向から 5 度以内に到来した上向き μ は 1 event であった。その時のフレアは SGR1900+14 によるもので 26May1998, 21:30:29UT から 27May1998, 04:22:01UT にかけて 4 度のフレアがあった。一方大気ニュートリノから予想されるバックグラウンドは 0.96 event で、有意な excess ではない。

SGR のうち SGR1806-20 は 2004 年 12 月 27 日 21 時 30 分 26 秒 (UT) にこれまで知られた最大フレアのさらに 100 倍の巨大フレアを起こし話題になった。このフレアは X 線の観測からバースト時の 0.125 秒に 1.8×10^{47} erg/s のエネルギー放出があったと推測されている[6]。この時この天体は神岡ではちょうど地平線の下 ($\cos\theta_{\text{zenith}} = -0.02$) で、ぎりぎり上向き μ 事象の範囲内であった

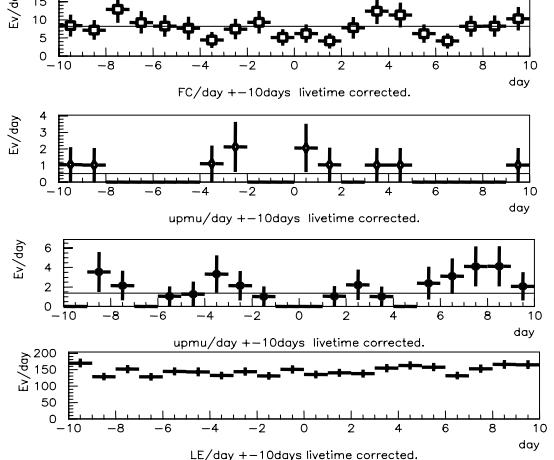


図 5 2004 年 12 月 27 日の SGR1806-20 のバースト前後 10 日間に観測された 1 日あたりニュートリノイベント数。Livetime は correction されている。上から fully-contained, partially contained, 上向き μ 、太陽ニュートリノ、の各サンプル。実線は 1 日あたりのイベント数の typical な値を示す

。図 5 は SGR のバースト前後の各ニュートリノサンプル、大気 ν fully-contained、大域 ν partially contained、upward muon、太陽 ν 最終サンプルでのニュートリノの到来時間差である。バースト時の 1 秒間に観測されたニュートリノはなく、バースト後 10 日間に有意なニュートリノの増加もなかった。バースト時 1 秒間で 0 イベント観測から flux upper limit (90% C.L.) を GRB の時と同様に green function upper limit の手法で求めたものが図 6 である。これとは独立に大気ニュートリノシミュレーションを用いて E^2 のスペクトルを持つ場合の upper limit を求めると $E^2 \Phi_\nu < 8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ GeV}$ となる。ただしこれは 1GeV~10TeV 領域のニュートリノに対して求めた値である。

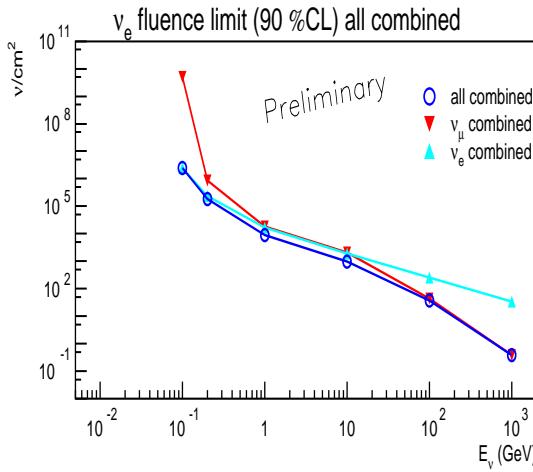


図 6 2004 年 12 月 27 日の SGR1806-20 のバースト時に 1 秒間でのニュートリノフラックス ($\nu/\text{cm}^2\text{s}$) の Green function upper limit。各サンプルは combine され、 ν_μ (下向き三角)、 ν_e (上向き三角)、 $\nu_\mu + \nu_e$ (丸印) で表されている。

6. 時間的空間的に偏った事象の探索

上記のような GRB や SGR からのニュートリノ探索では、衛星など他の検出器で γ 線や X 線のバーストが確認され、バースト時刻と

ソースの場所が特定されている。このような visible なバーストを持たずまったくニュートリノだけのフレアを探索するため、同方向から連続してニュートリノが来ていないかのチェックも行われている。時間的に前後して到来した上向き μ 事象の doublet に対してその時間差と方向差を調べると、最近接のものは 19 分の時間差で到来方向のずれは 2.7 度であった。角度相関の不定性を考慮すると、これは同一方向から 19 分の間隔で 2 発ニュートリノが飛来したとも言える。無関係な二つの上向き μ 事象がたまたまこのような相関を持つ確率は $2 \times 10^{-5}/\text{doublet}$ と見積もられ、全 doublet に対しては約 5 % の確率と起こると考えられる。したがって、この doublet の存在も、未知の天体からのニュートリノフレアの有意な証拠とは言えない。

7. 超高エネルギー上向き μ 探索

これまで述べてきた SK での上向き μ 事象の解析では、内水槽でのチエレンコフ光量が 175 万 p.e. を超えるような大光量イベントは解析されていなかった。これは内水槽があまりに大光量だと μ の方向を決める fitting program が動作しなくなるためである。このような大光量は数 TeV から数 100TeV の超高エネルギー μ が、内水槽で激しい radiative process を起こしたためと考えられる。最近このようなイベントで μ の方向を外水槽の情報を元に再構成する解析が行われている。SK-I での約 50000 event の >175 万 p.e. イベントのうち、343 イベントが外水槽の解析から「上向き」と判定され、eye scan その他の解析によって、1 イベントが超高エネルギー上向き μ の candidate として残った。これに対し大気ニュートリノフラックスから予想されるバ

ックグランドは 0.48 ± 0.23 イベントであり、観測値と consistent である。このイベントをバックグランドとして得られた超高エネルギーニュートリノフラックスの 90%CL upper limit を図 7 に示す。ここでは E^2 タイプのスペクトラムを仮定している。

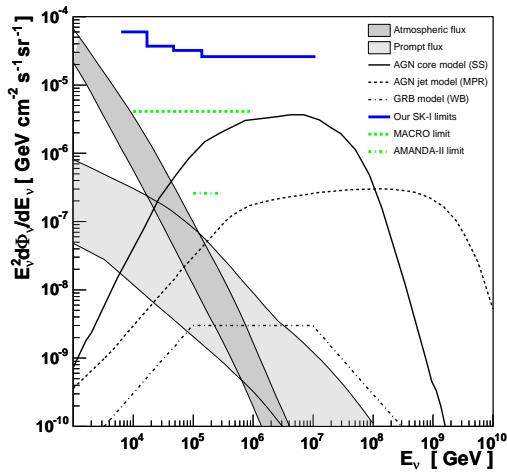


図 7 超高エネルギー上向き μ 事象から得られた E^2 タイプのニュートリノフラックスに対する upper limit (90%CL)。 3×10^{-5} 付近の実線が SK の結果。 10^{-6} 付近の点線が AMANDA の結果

AMANDA による limit に比べ一桁近く悪いが、それでもなお ~ 10 TeV 以上の超高エネルギー フラックスについて SK も upper limit を与えている。

8. まとめ

SK でのこれまでの探索では天体ニュートリノの証拠は見つからなかった。

10 年前には SK がいかに巨大かという話をしていたものであるが、学問の進歩は早く、あっという間に、SK はいかに小さいか、という状況になってしまった。しかしながら SK は 5 MeV から超高エネルギーまで幅広いエネルギー領域に感度を持ち、数十 GeV 以下の領域では今後も世界最大である。また SK に

は他の高エネルギー ニュートリノ レス コードにはない、fine grain な photo-sensor による精密測定の利点もある。今後はこのような特徴を生かしたアプローチが期待される。

Reference

- [1] Y.Fukuda et al, Published in Nucl.Instrum.Meth.A501:418-462,2003
- [2] Y.Ashie et al, Published in Phys.Rev.D71:112005,2005
- [3] S.Desai et al, Published in Phys.Rev.D70:083523,2004, Erratum ibid.D70:109901,2004
- [4] M.Kamionkowski et al, Published in Phys.Rev.Lett.74 5174,1995
- [5] S. Fukuda et al, Published in Astrophys. J. 578:317-324, 2002
- [6] K.Hurley et al, astro-ph/0502329