

南極氷河を使った高エネルギー宇宙ニュートリノ観測実験 IceCube が始まる

吉田 滋¹

千葉大学理学部物理学科 千葉市稲毛区弥生町 1-33

概要

高エネルギー宇宙を探索する新たな窓としてニュートリノ放射を検出するアイデアが現実味を帯びてきた。頻度が極めて低いと予想される高エネルギーニュートリノを莫大な宇宙線雑音の中から拾い出す安価な大容量衝突標的として南極大陸の氷河が適していることが分かってきたからである。検出に必要な 1km^3 の標的容量を持つ IceCube 実験が日米欧の国際共同実験として本年度から建設が始まる。本稿では高エネルギーニュートリノ検出の意義と IceCube 実験の概観を南極現地の経験も踏まえて報告する。

1 なぜニュートリノ？

宇宙を探索する一般的な方法は電波や可視光、X線や γ 線といった電磁波を観測することである。異なる波長毎に様々な宇宙像が存在し、そのうちの幾つかは共通の物理現象にその起源を持つことが電波天文学 ($\sim 10^{-8}$ eV) から γ 線天文学 (10^8 eV 以上) に至る、エネルギーにして数十桁にも及ぶスペクトル領域の宇宙観測を産みだし発展させてきた。そこにニュートリノ放射を観測対象として加える意義は何だろうか？ 明白な理由の一つは、光を通さない高密度・高温の物質・放射場もニュートリノなら貫通するため、通常の電磁波観測では不可能な宇宙・天体深部の情報が得られることである。神岡実験による超新星・太陽ニュートリノの観測は正にこの特徴を生かし、星深部のダイナミクスを直接的に明らかにして我々に新しい知見をもたらしたのであった [1]。

こうしたニュートリノのエネルギーは、MeV (10^6 eV) 領域にあったが、もっと遙かにエネルギーの高い領域、具体的には TeV (10^{12} eV) 以上ではニュートリノ放射を測定する意義に新たな項目が二つ加わる。第一にこのエネルギー領域では宇宙空間自体が電磁波 (光子) に対して透明ではない。空間を満たす宇宙背景光子と高エネルギー光子は電子対生成過程により相互作用してしまい、宇宙空間を進むことができない。衝突の平均自由行程は超高エネルギー領域 (PeV= 10^{15} eV) では僅か 10 キロパーセク (約 3 万光年) のオーダー、すなわち我々の銀河の大きさほどでしかなく、銀河系外の広大な空間からの高エネルギー電磁放射を直接観測する術がない。弱い相互作用にしか関係しないニュートリノなら背景放射に邪魔されずに我々に信号を届けるだろうと考えるのは自然の帰結である。第二に高エネルギー領域でニュートリノを生成するためにはミューオン (μ) 崩壊によってニュートリノを生成する高エネルギーのパイ中間子が必要で、そのためにはパイ中間子を作り出す親のハドロン例えば陽子が高エネルギーに加速されている必要がある。すなわち、高エネルギーニュートリノの起源は高エネルギー宇宙線の起源に密接に関連しているのだ。例えば高エネルギー宇宙線の主成分である陽子が光子と光パイオン生成過程を介して衝突する反応

$$\gamma p \rightarrow \pi^\pm X \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu \rightarrow e^\pm \nu_e \nu_\mu. \quad (1)$$

は、衝突断面積が共鳴構造を持ち、ある衝突エネルギーで断面積が増大することが分かっているため、本命の生成過程として考えられてきた。例えば活動的銀河核やガンマ線バーストなどの莫大なエネルギー放射が見られる天体において何らかの機構で加速された高エネルギー陽子とその周辺の γ 線、X線や可視光、紫外線と衝突するといったシナリオである [2, 3, 4]。

¹<http://www.ppl.phys.chiba-u.jp/>

この場合、同様に生成される中性パイ中間子の電磁崩壊 ($\pi^0 \rightarrow 2\gamma$) で γ 線も生成されるが、 γ 線は電子との逆コンプトン散乱といった電磁過程でも生成されるため、 γ 線検出だけで宇宙線ハドロンが加速されている直接的証拠を掴むのは容易ではなく、ニュートリノ検出こそが宇宙線源の直接同定につながるのである²。

更に極高エネルギー (EeV=10¹⁸eV 以上) 領域に目を向けると、10²⁰eV にも達する最高エネルギーの宇宙線起源にニュートリノ生成が深く関連することが予想されている。式 (1) の過程が最高エネルギー宇宙線陽子と宇宙背景輻射光子の間でも引き起こされるため、天体のみならず宇宙空間至るところでニュートリノが生成され得るからだ [5]。GZK ν と呼ばれるこのニュートリノはその存在がほぼ確実視されているのみならず、我々の宇宙はどこまで粒子を加速できるのかという根源課題を追求する手段にもなる [6]。また Z ボゾンの共鳴過程を通じて極高エネルギーニュートリノがビックバン起源背景ニュートリノと衝突する可能性 (Z パーストモデル)[7] も論じられるなど話題は多い。

2 ニュートリノ検出への挑戦

このようにメリットの多い高エネルギーニュートリノ観測であるが、永きに渡りその実現は果たされていない。予想される頻度が極めて低い事が大きな困難の元である。高エネルギーニュートリノフラックスの正確な推定は困難であるが、式 (1) における宇宙線陽子が、観測されている宇宙線の量を超えてはいけないといったナイーブな仮定を置くことで、存在し得るニュートリノ量の目安を付けることができる (Waxman-Bahcall 限界 [4])。また極高エネルギーにおける GZK ν の量は最高エネルギー宇宙線強度と背景輻射光子数密度からある程度正確に計算可能で [6]、その推定値はいずれもエネルギー流量にして 10⁻⁸ ~ 10⁻⁷ GeV/cm² sec sr 程度である。この量はスーパー神岡実験で観測している大気ニュートリノの最もエネルギーの高いサブ TeV グループ (~ 100 GeV 以上) 事象の約 5 桁下、数の強度にして約 9 桁弱い。ニュートリノ反応断面積が超高エネルギー領域では GeV 領域の約千倍に増えることを考慮したとしてもスーパー神岡実験におけるニュートリノ衝突標的である地下タンク内純水の 1 万倍の容量はないと検出は望めない。この桁違いの衝突容量を莫大な宇宙線雑音を遮蔽できる深度に求めるために、深海を利用するなど過去に様々な試みがあった。その中で最も最初にその実現性を大気ニュートリノ事象の検出という形で実証したのが、南極の深氷河を衝突標的に使った AMANDA 実験である。南極氷河を衝突標的兼発光体として利用し、荷電弱相互作用 $\nu_l N \rightarrow l^\pm X$ で生成された荷電レプトン (l^\pm) が氷河内で生成するチェレンコフ光を検出した。高エネルギー領域では μ も崩壊せずに数十キロを走り抜け検出容積内に達する。大気 ν_μ が生成した 100GeV から 10TeV の μ を測定し、その到来方向とエネルギースペクトルを測定することに成功したのである。相対論的な荷電粒子は氷中 1m あたり約 3 万個のチェレンコフ紫外光子を放射する。南極氷河の紫外光減衰長は約 100m と長いために、氷河内に極めてまばらに配置された光検出器モジュールにも光子が届く。加えて、氷河の短所である光散乱長の短さを補う解析方法を確立したこと、そして何より氷河は固体であるため検出器設置時に人と切削機、検出器を現場に長時間安定的に設営する手段が容易であったことなどが、深海や湖などでの試みに比べて AMANDA 実験が一步先を歩むことになった原因であろう。IceCube 実験 [8] は、この AMANDA 実験の成功を経て高エネルギーニュートリノ検出に必要なスーパー神岡実験の 2 万倍以上の大きさを持つニュートリノ望遠鏡として立案され、本年度より建設が始まる。

²宇宙線自体は電荷をもっているため銀河磁場中で曲げられてしまう。そのため宇宙線信号が放射天体の方向を直接指し示すことはない。宇宙線源の同定を極めて困難にしている主要因である

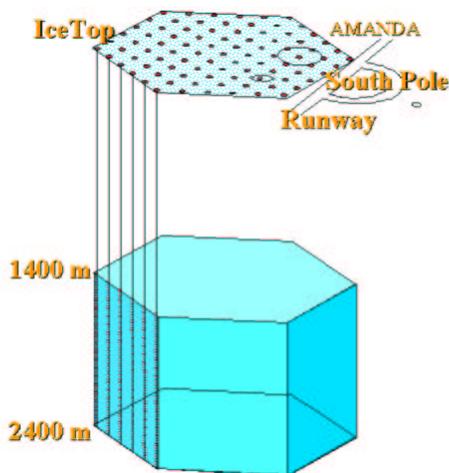


図 1: 左図に IceCube 観測装置の全体像を示した。深さ 1400m から 2400m の位置に計 4800 本の光検出器 (DOM) を埋め込む。右図は、光検出器 (DOM)。耐圧球の中に光電子増倍管、データ収集回路、電源、地磁気シールドなどが入っている。

3 IceCube 実験

IceCube は 4800 個の光検出器を深さ 1400m から 2400m の南極氷河に埋め込むことで総容量 1km^3 を持たせるニュートリノ観測網である。検出器は図 1 のように氷河内に 120m 間隔に縦穴を 80 本掘って配置される。縦穴の中には、チェレンコフ光を検出する光検出器モジュール (DOM: Digital Optical Module) 60 本を 17m 間隔に埋め込んでいく。いわば三次元の広がりを持たせた検出器アレイと言える。光検出器は図 1 右図に示した。深氷河の圧力は 400 気圧に及ぶため、紫外光透過の耐圧ガラス球の中に装置を格納する。装置の心臓部分は浜松ホトニクス製の 10 インチ口径の光電子増倍管である。 5×10^7 の増幅率で作動させる予定であり、必要な技術開発を終えたところである。信号パルスは全て、光電子増倍管の直後に接続された電子回路において 300MHz サンプリングでデジタル化されツイストペアケーブルを経て電送される。トリガーは全てソフト的に行われ、近隣の光検出器との時系列同期を見る一次トリガーと全検出器アレイのイベントヒットパターンを見る二次トリガーで構成される。

技術開発課題は多岐にわたる。特に IceCube 実験では検出器キャリブレーションを十分に行い、系統誤差の生まれる余地を可能な限り低くするための努力が払われている。心臓部の光電子増倍管は波形応答を光電面の場所毎に測定し検出器シミュレーションに組み込む、光電変換効率の絶対更正を入念に行う、想定増幅率下での荷電分解能をモデル化するなど、検出系そのものを完全に理解するための測定が日本グループにより遂行されている。また、氷河の紫外光透過率、検出器の設置位置の掌握のための人工光源装置として各光検出器モジュールから 8 方向に向けて紫外光を照射する LED フラッシャーが実装される。こうしたキャリブレーション能力は過去の高エネルギー宇宙ニュートリノ観測実験には無かったもので、一段質を上げたデータを出すことが共同実験グループの目標となっている。また氷河中約 -30°C の低温下で電子雑音ノイズが減るメリットをさらに追求すべく、光電面や耐圧ガラスの材質を吟味し、最終ノイズ頻度を光検出器あたり 500Hz に下げることを目指している。関連するソフトウェア開発も格段に大規模になる見込みで、ニュートリノ・荷電レプトンの伝搬シミュレーター、チェレンコフ光の氷河内伝搬シミュレーター、検出器応答シミュレーター、事象再構成解析ルーチンが ROOT をベースにした IceCube 実験専用解析コンテナの制御のもとに C++/Java で開発進行中である。IceCube では宇宙線ミューオンの頻度が 5kHz 程度になると推定されるため、複数のミューオントラックが検出容積内にほぼ同時に入射される場合が無視できない。そのため同一トリガーデータ内で異なる時系列事象をより分けながら

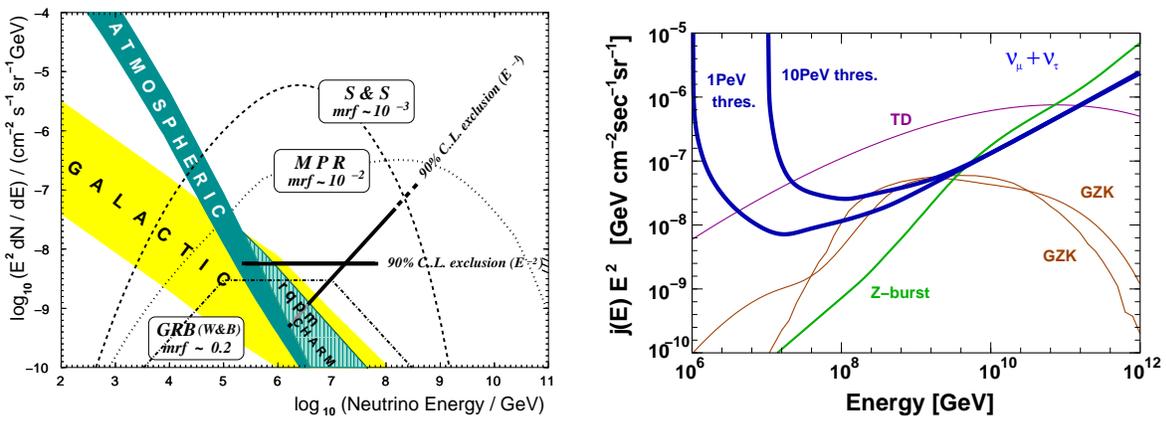


図 2: IceCube の宇宙ニュートリノにたいする感度をエネルギー流量に対してプロットした。右は上向き事象を使った高エネルギー領域における 90% 信頼度に対する感度 (太線, 3 年の観測時間)、左は下向き事象を使った極高エネルギー領域における感度 (太線, 同 10 年) である。様々なモデルによる予測曲線も合わせて示した。詳細は文献 [9, 10] を参照。

解析する柔軟性が求められることがソフトウェア開発における挑戦的課題である。また測定対象ニュートリノエネルギーレンジが PeV 領域を中心としながらも GeV から EeV 以上まで 10 桁以上に及ぶため、粒子衝突・伝播過程をそれぞれのエネルギー領域での実用に耐えうる形式でシミュレーションする必要があることもソフト開発を大きなものにしていく。

IceCube は AMANDA 実験の単なる拡張ではない。AMANDA の検出容量の形状は細い縦長であったが IceCube は図 1 に示したように立方体形状である。このため地球を貫通して飛来する下方向から上向きに通過する事象のみならず水平方向から横向きに走る事象にも同様の感度がある 4π 検出器である。極高エネルギー領域では衝突断面積が増大しニュートリノといえど地球を貫通することはないため、水平方向または上から下向きに通過する事象が多数を占めるはずであり、 4π 検出器であるというのは本質的メリットである。またパルス波形そのものをデジタル化して記録するため角度分解能やエネルギー分解能の大幅な向上が期待されるだけでなく、崩壊を伴うタウ事象の同定といったイベント形状に異存する解析能力が格段に改善するため ν_τ に対して識別能力が備わる³。IceCube 検出器が実装される氷河表面は IceTop と呼ばれる宇宙線地表検出器アレイで覆われるため、両者の同期をとることで大気ミュオン信号をキャリブレーションに使う、また逆に除去してニュートリノ信号探索を容易にするといったことがデータ解析の信頼度向上に寄与するはずである。

実際のデータ解析は検出容積内を下向きに通過する大気ニュートリノ・大気ミュオンの信号を除去するため何段階ものフィルタリング作業が必要となる。事象の形状、信号の検出器におけるヒットパターン、上向き事象対下向き事象の仮説検定比などを組み合わせる。AMANDA 実験ではニューラルネットの手法を導入した解析も実行されている。最終的には各事象のエネルギーを推定することで大気ニュートリノ・ミュオンを完全に取り除く。宇宙ニュートリノのスペクトル ($\sim E^{-2}$) は大気ニュートリノ・大気ミュオンスペクトル ($\sim E^{-3.7}$) よりも硬いという予測を利用している。エネルギー推定方法は AMANDA では検出器のヒット数というナイーブな方法に基づいているが IceCube では波形データを使えるため別の方法が採られるであろう。その手法は開発途上にある。AMANDA での手法を予備的に適用した場合の IceCube での高エネルギー宇宙ニュートリノに関する感度を図 2 左側に示した。様々な宇宙ニュートリノ生成モデルの予測も比較のために示している。IceCube は

³ タウ崩壊で生成される電磁シャワーまたはハドロンシャワーからの波形振幅は大きいと、通常のエネ

3年で2節で述べた Waxman-Bahcall 限界に達する。詳細は文献 [9] を参照されたい。

一方 100PeV を越える極高エネルギーでは、宇宙ニュートリノ自体が増大した衝突断面積の影響で地球に吸収されてしまい、ニュートリノから荷電弱相互作用で生成された 2 次ミュオンまたはタウ粒子が水平もしくは下向きに検出容積内を通過する事象が主となる。従って同じく下向きの事象である宇宙線大気ミュオンとの識別にはエネルギーの大きさを使うしかない。幸いなことに IceCube では少なくとも 1km^3 の検出容量内に落とされた $\mu\cdot\tau$ トラックのエネルギー損失の総量について最低でも 100% 程度の分解能を有することがわかっている。エネルギー損失総量が 10PeV 以上という条件でカットすると大気ミュオンを完全に除去でき、宇宙線の化学組成次第では 1PeV まで下げることが可能である。その場合の水平または下向き事象を使った極高エネルギーニュートリノの感度が図 2 右である [10]。GZK ν に対して検出感度を有することがわかる。

4 建設に向けて

南極の建設シーズンは夏季にあたる 10 月終わりから 2 月中旬である。昨年度は、氷河切削用ドリルの搬入と IceTop 検出器プロトタイプの設定・試験が現地で行われ、筆者も現地で活動を行った。南極点には米国の Amundsen-Scott 基地があり、基本的なインフラはこの基地から供給する。基地は 2 億ドルをかけたアップグレード工事のまただ中であり、建設労働者も含めて約 200 人が滞在している。資材も含めた大量の物資はニュージーランド・クライストチャーチにあるベース施設から南極沿岸部の米国 McMurdo 基地を経由して空軍の輸送機で空輸される。この大規模な物量作戦があるからこそ、南極点でこの規模の観測装置が建設可能であることが実感される。

IceCube は全米科学財団南極プログラムの基幹プロジェクトとして現地で支援を受けている。他にも約 50 ほどの大小の科学プロジェクトが走っており、物理に関係したところでは宇宙背景輻射の偏極測定を行っているシカゴ大学の DASI、同じく背景輻射揺らぎの精密測定を目指しているパークレーの ACBAR などがある。これらの天文プロジェクトは、南極点周辺の大気が乾燥しており極めて安定であることを利用している。実際、筆者の滞在時の気温は -30C° 前後であったが湿度が無いので、数字ほどには寒さを感じなかった。天気も常に晴天で、立派な砂漠だと言える。

IceCube 建設 1 年目である本年度は、縦穴を 4 本切削し、計 240 個の光検出器を埋め込みデータ取得を開始する。現存の検出器である AMANDA と隣接するので、トリガーを互いに交換して 1 年目から物理データを出すことを目標にしている。楽しみを前にした子供のような心境である。

本研究は、IceCube Collaboration 全体の成果に基づくものである。ここに深く感謝する。

参考文献

- [1] 戸塚洋二: 日本物理学会誌 58 (2003)
- [2] K. Mannheim, R. J. Protheroe, J. P. Rachen, Phys. Rev. D (2001) 023003
- [3] F. W. Stecker, M. H. Salomon, Space Sci. Rev. 75 (1996) 341.
- [4] E. Waxman and J. Bahcall, Phys. Rev. D59 (1999) 023002.
- [5] V. S. Beresinsky and G. T. Zatsepin, Phys. Lett. 28B (1969) 423.

- [6] S. Yoshida and M. Teshima, Prog. Theor. Phys. **89**, (1993) 833.
- [7] S. Yoshida, G. Sigl, and S. Lee, Phys. Rev. Lett. **81**, (1998) 5505.
- [8] <http://icecube.wisc.edu/>.
- [9] IceCube Collaboration, J. Ahrens, et al., Astropart. Phys. **20** (2004) 507.
- [10] S. Yoshida, R. Ishibashi, H. Miyamoto, astro-ph/0312078, accepted for publication in Phys. Rev. D **69** (2004).