

IceCube 実験による超高エネルギーニュートリノ検出

千葉大学大学院理学研究科

石原 安野

aya@hepburn.s.chiba-u.ac.jp

吉田 滋

syoshida@hepburn.s.chiba-u.ac.jp

2012 年 (平成 24 年) 9 月 5 日

1 はじめに

ニュートリノはここで述べるまでもなく非加速器物理を含む高エネルギー物理分野では重要な役割を果たしているが、宇宙物理・宇宙線物理において宇宙を調べるメッセンジャーとしては新参者である。長い歴史と実績を有する電磁波観測に立脚した天文学の圧倒的存在感と宇宙線本体の観測が主流を占める宇宙線物理において、ニュートリノは「これからの人」扱いに甘んじてきたと言える。その大きな理由は、1987 年の超新星 SN1987A および、太陽からのニュートリノ観測以外には宇宙ニュートリノ検出実績がなく、はたして宇宙を調べるツールとしてニュートリノが現実的に確立され得るのかという疑問符がついてまわったからである。

それにもかかわらず、ニュートリノ天文学を、特に SuperK ではカバーできない高エネルギー領域で目指そうではないかという、よく言えば野心的で怖いもの知らずの人間たちは脈々と生まれ出てついに IceCube という途方もなく巨大な実験装置を南極点という極限地域に打ち立てるに至った。これはやはりニュートリノが持つ巨大な潜在的可能性に賭けてみたいという熱病のようなものが絶えることなく世界中に流布しているから、ということになる。筆者もその(それも重度の)熱病患者の一員であるが、その熱こそが、ようやく大気ニュートリノから期待されるエネルギー流量を大きく上回る超高エネルギーニュートリノ事象の検出に結びついたと思っている。ニュートリノが実際の宇宙観測手段として最初の一步を踏み出した今夏の成果に至る熱病患者の顛末記が本稿の主題である。

2 宇宙線起源とニュートリノ

そもそもニュートリノをなぜ観測したいのであろうか? 多様な理由がある中で少なくとも筆者の理由の一

番手はニュートリノが長年解決していない高エネルギー宇宙線起源を解明する手段として他には置き換えの効かない優れものであるということにつきる。ご存知のようにいわゆる宇宙線は、宇宙放射の最も高エネルギー領域の担い手である。そのエネルギーは 10^{20} eV にも達するが、これがどこでどのようにして生まれたのかは宇宙線発見 100 年の節目の年である 2012 年になってもよく分かっていない。大きな障壁の一つが宇宙線は荷電粒子(陽子, 原子核)であり銀河磁場によって軌道が曲げられることにある。したがって到来方向から放射天体の位置にたどり着くのは容易ではない。さらに厄介なことに湾曲した軌道を決める銀河系内外の磁場の量や向き、そして宇宙線粒子の電荷量(すなわち原子核の種類)も不定性が大きい。何かを言うために必要な基本的物理量自体があやふやなのである。電荷のない粒子をきちんと同定して観測できればこの袋小路から脱却できる。ただし、電荷がないというだけならば X 線や γ 線といった電磁波でよいのだが、これらは残念ながら宇宙線とは無関係に電子から純粋な電磁相互作用過程(例えばシンクロトン放射)によって放射され、観測されている X 線や γ 線のほとんどはこちらのチャンネルに由来している。宇宙線陽子が加速領域周辺物質や輻射場と衝突して生まれる π^0 の崩壊から γ 線ができることが期待されており、また、最近一部の超新星残骸からの高エネルギー γ 線はこの過程で放射されたと示唆される結果もある。しかし、電磁過程で説明が付くというモデルも常に並び立つため、結論は出ていない。

しかし高エネルギーニュートリノは、荷電パイ中間子の崩壊で生成されるが電磁相互作用過程では作られない。すなわち、高エネルギーニュートリノの存在は高エネルギー宇宙線の起源に必ず関連しているのである。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

$$\gamma p \rightarrow \pi^\pm X \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu X \rightarrow e^\pm \nu_e \nu_\mu \bar{\nu}_\mu X \quad (1)$$

は、衝突断面積が共鳴構造を持ち (Δ 共鳴), 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、この反応は比較的容易に起こる。ニュートリノは宇宙線起源に対しての smoking gun であるといえる。

弱相互作用粒子であるというニュートリノの性質は、非常に遠方宇宙からエネルギーを失うことなくニュートリノは飛来するという帰結をもたらす。宇宙線粒子のエネルギーが十分高ければ上記の γp 衝突は、宇宙背景輻射 (CMB) との間でも起こる [1]。CMB は宇宙遠方では赤方偏移効果によってその密度もエネルギーも高いためにこの衝突はより頻繁に発生し、結果生じるニュートリノの量は増える。したがって GZK ニュートリノと呼ばれるこのニュートリノの流量が測定できれば、宇宙線放射天体がどこまで遠方に広がっているのか、宇宙線放射というものは宇宙論的存在なのか比較的局所的な現象なのか探ることができるのである。この意味で高エネルギーニュートリノ観測は到来方向など θ, ϕ 方向だけでなく、奥行き R 方向に関する情報をも引き出せるのである。対照的に、電磁波 (γ 線) では PeV を超えるような超高エネルギー領域では CMB との電子対生成のチャンネルが開いてしまうため我々の銀河系程度の大きさしか進むことができず、遠方宇宙を探索することはできない。

高エネルギー宇宙線起源の有力候補天体である GRB (γ 線バースト) や AGN (活動的銀河核—中心に巨大なブラックホールがある) といった我々の銀河系外のエネルギーギッシュな天体周囲で作られるニュートリノは 100 TeV から 100 PeV くらいエネルギー領域に広がっていると思われ、100 EeV (1EeV = 10^{18} eV) にも達する超高エネルギー宇宙線陽子と CMB との衝突で作られる GZK ニュートリノは EeV の領域に主として存在するはずである [2]。しかもその量を決定する因子は宇宙論的遠方での宇宙線量である。これはニュートリノを観ることではかわからない。だからこそ野心的なテーマなのである。

3 IceCube 実験

狙うべき高エネルギー宇宙ニュートリノは希少とも言える存在である。この業界ではよくエネルギー流量 (energy flux) という物理量で、ニュートリノの存在量を議論する。微分スペクトル (dN/dE) つまり単位時間・単位面積・単位立体角・単位エネルギーあたりのニュートリノの数という量にエネルギーの 2 乗を乗じたもので ($E^2 dN/dE$), 大雑把に言ってあるエネルギー領域でニュートリノが総計でどのくらいのエネルギーを運んでいるか、という概念を語っている。これは天文学で広く使われる考え方である。ニュートリノ・宇宙線分野で通常使

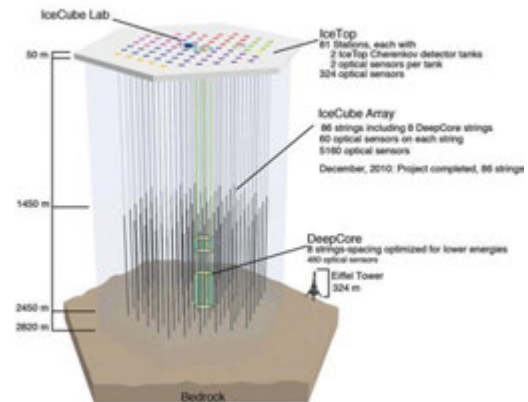


図 1: IceCube 観測装置の全体像。深さ 1450m から 2450m の位置に光検出器 (DOM) を埋め込む。

われる単位は $[\text{GeV}/\text{sec sr cm}^2]$ である。この単位で、予想される宇宙ニュートリノの量は $O(10^{-10}) \sim O(10^{-8})$ である。中心値は測定値が存在する宇宙線流量でほぼ決まるが、幅は宇宙線天体の種類 (天体で直接作られる場合) または宇宙線が宇宙の歴史に沿ってどのように分布するか (GZK ニュートリノの場合) という、まさに我々が知りたいと欲してやまない情報に依存しており測ってみなくてはわからない (逆にだからこそ測定すれば宇宙線起源がわかる)。この値を、SuperK で測られている大気ニュートリノの energy flux, すなわち GeV 領域で $O(10^{-3})$, と比較すればその量の少なさがわかる。このことから、高エネルギー宇宙ニュートリノ検出は極めて挑戦的な課題であることがお分かりいただけると思う。とにかくにも巨大な検出面積を持つ実験装置が必要不可欠であったのだ。ギガトンの容積を持つ IceCube 実験はそのような背景から提案・建設された。

3.1 実験の概観

アイスキューブ (IceCube) 実験は南極点直下の深氷河を衝突標的兼チェレンコフ輻射体として用いて 1 km^3 の検出容量を持たせたニュートリノ検出器である [3]。測定原理は水と氷の違いはあるものの SuperK と同じである。ただし、検出容量は SK の約 2 万倍である。その代わり自然の水河を使うため測定精度の精密さには限界があり、氷河内の不純物や気泡によりチェレンコフ光が散乱されながら検出器に届くためチェレンコフリングの個数やそのイメージからニュートリノフレーバーを識別するような芸当はできない。2002 年に国際コラボレーションが結成され、2005 年より本格的な建設を開始して 2010 年 12 月に建設が終了した。2011 年 5 月よりフル稼働して継続的な観測が行われている。

検出器は図 1 のように氷河内に 120m 間隔に縦穴を

79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個をストリング状に並べて配置し (実際に「ストリング」と呼ばれる), 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。中心部には密に配置された8本のストリングによってより高密度なアレイが組まれている。DeepCoreと呼ばれるこのサブコンポーネントは、主に低エネルギー (GeV -100 GeV) 領域のニュートリノ測定及び暗黒物質探索に用いられる。

DOMは耐圧ガラス球の中に10インチの光電子増倍管 (PMT) と高電圧回路、読み出し回路を収納した自立型のモジュールである。PMTは 10^7 のゲインでオペレーションされ、single photo electron (SPE) スペクトルのピークをとることでゲインキャリブレーションを行う。Discriminatorのしきい値は0.2 photo electron (p.e.) 前後であり、その意味でIceCubeはPhoton Counting実験であるとも言える。PMTの応答や光電面の一様性、光電子変換効率は詳細に測定され解析に取り込まれている [4]。建設時の日本グループの主要な寄与でもあった。耐圧ガラス球及び内部のサポート用ジェルの透過率の影響も考慮した photon 実効検出面積も日本側で測定とシミュレータ開発: 計算が行われ、10%の系統誤差で決定されている。この値が現在も解析・MCで使われている [5]。

SPEレベルで測定するPhoton Counting実験ではあるが、超高エネルギーニュートリノ事象では一つのPMTに数万のphotonが飛び込むことが予想されていたため、このような高輝度信号を記録するためのダイナミックレンジの確保も重要である。このためIceCubeでは読み出し回路にゲインが異なるデジタイザーを3種類用意して、切り替えながら信号を記録する。ATWDと呼ばれるこのチップはローレンスバークレー研究所で開発され、14ビットのレンジで3万 p.e. 相当の波形まで3.3ナノ秒毎のサンプリングで記録する。ただし記録できる時間幅は400ナノ秒であり、これ以上の遅い信号は、6.4マイクロ秒の記録窓を持つFADCで記録する。詳細は文献 [6] にある。PMT 応答の線形性は 10^7 ゲインでは約1000 p.e. 程度までであり、そこからは徐々にsaturationが始まる。この複数のデジタルシステムの信号をどのように解析にのせていくかという部分で解析者 (グループ) の思想と優劣が現れる。

トリガーは、最近いくつかの別の種類のものも付加されたが、基本はベーシックなマルチプリシテータートリガーである。隣り合うDOM同士が $\pm 1 \mu\text{sec}$ 以内に同期した信号があった場合にその情報は地表に送られる。8 μsec 内に8個以上の同期信号が存在した場合にトリガーがかかる。トリガーレートは現在約2.6 kHzであり、

大半の事象が大気 μ のトラックである。ここから高レベルトリガーとも言うべきフィルタリング解析を半リアルタイムにおこなって意味のある事象を北半球に送る。

IceCubeで検出されるイベントには μ トラックに沿ってDOMに光子がヒットするトラック事象と、例えば ν_e から生成された電子がカスケードを生成しほぼ点源状にチェレンコフ光を放射するカスケード事象の二つがある。また超高エネルギー領域では、 $\mu \cdot \tau$ トラックに多くのカスケード (その多くは e^+e^- あるいは制動放射からの γ) が付随する事象がメインとなる。これらイベントの形状に着目した解析がIceCubeでは多く実施され、ミュオントラックを抽出するような解析は、TeV領域のニュートリノ点源探索や大気ニュートリノ測定解析、100 TeV領域のdiffuseニュートリノ探索といった物理に供され、一方でカスケード事象を抽出して大気ニュートリノや宇宙ニュートリノを探索する解析も独立して行われている。ただし後述するように本稿の主要テーマである超高エネルギーニュートリノ探索ではこのようなイベント形状弁別は行わず、来るものは何でもこい、というポリシーで解析を進めていた。このやり方が今回の大きな成果につながった、と考えている。この点は学ぶところも多かったため6節で改めて触れる。

エネルギーが高くなるとニュートリノの衝突断面積は増えるため、検出器を埋設している場所に届く前にニュートリノが地球内で相互作用を引き起こす確率は増える。この結果生じたミュオン粒子が、1キロメートル以上も走りながらレンジアウトすることなく検出器に届きうる。極限の高エネルギー領域 ($\geq \text{EeV} = 10^{18}\text{eV}$) ではタウ粒子もミュオン粒子以上に長いレンジを持つ。このため実質的な衝突容量は検出器を埋設している容積よりも大きく、この増大量はエネルギーとともに増える。このおかげでIceCube実験で探索・検出を狙う宇宙ニュートリノのエネルギーは下はTeVから上はEeV以上まで6桁以上にもひろがっている。これほどのダイナミックレンジをカバーする宇宙物理・天文学の実験は他になく、高エネルギーニュートリノ望遠鏡としての大きな特徴の一つである。

3.2 データの流れとシミュレーション

南極からは衛星回線でデータを伝送するが、IceCube実験に割り当てられたバンド幅は88 GByte/dayという制限があるため、2.6 kHzで取得されたデータをさらに半オンライン解析し、選択された一部の事象を北半球に送っている。フィルタリングというこの過程は、一年に一度のアップデートが許されている以外は固定されているので下流の物理解析に最初の枠をはめる。例えば、「ミュオンフィルター」は、上向き事象と解析された

ミューオントラックを選択的に拾い上げる。オンラインで許容された計算時間内で可能な簡易解析で得られた「上向き」事象は、実際には下向きの大気 μ 事象が上向きに誤解析されたものが大半であるため、緩めのクオリティーカットをかけてオフラインでの詳細解析が可能なデータ量に落として伝送する。同様にカスケードフィルターと呼ばれるストリームはカスケード事象候補を形状等から弁別する。次節で述べる本稿の主題である、超高エネルギー ν 探索で使われるデータは Extremely High Energy (EHE) フィルターと呼ばれ、各 DOM で記録された photo-electron 数を足し上げ、1000 p.e. 以上のものを無条件で伝送する。日本グループが実質管理しているこのチャンネルのレートは現在 1 Hz 弱である。レベル 1 と呼ばれる全ての伝送されたデータは、更にレベル 2 と呼ばれるオフライン解析を経たのち、各物理ワーキンググループに卸される。後述する EHE 解析のアルゴリズムは比較的短時間の計算で実行可能であるため、データや MC をみながら様々な改良をすぐにフィードバックして実質的にレベル 2 を使わずレベル 1 からオフライン解析がおこなわれた。

解析に使われる MC シミュレーションは、多岐にわたる。主要雑音である大気 μ は Corsika という空気シャワーシミュレーターに SIBYLL, QGSJET といったハドロン衝突モデルジェネレーターを挿してシミュレートする。主として宇宙線分野で使われるこれらのジェネレーターは、例えば GEISHA といった高エネルギー分野で多用されたものよりも LHC データとの合いがよい、というのが最近話題になっている。ニュートリノのシミュレーターは IceCube 用に開発したものを使い、 E^{-2} のエネルギー分布にしたがってデータを生成しておいて、各イベントにエネルギー毎に違う「ウエイト」を与えることによって大気ニュートリノスペクトル、あるいは宇宙ニュートリノ予想スペクトルを再現するデータセットをつくるというテクニックを使っている。もう一つの主要な雑音である大気ニュートリノはこの手法によってシミュレートしている。EHE 分野では、ニュートリノが地球内でより頻繁に相互作用して μ や τ に変わることから、 μ や τ の伝播計算と統合されたニュートリノシミュレータを別途開発し [7]、やはり「ウエイト」手法を用いることで超高エネルギー領域で卓越する多様なエネルギー分布の宇宙ニュートリノをシミュレートしている。

4 超高エネルギーニュートリノ解析

超高エネルギーニュートリノの解析において信号となるのは PeV 以上のエネルギーのニュートリノが地球の中で二次的に生成する荷電粒子から出るチェレンコフ光である。この時、信号として期待される PeV 以上の

ニュートリノの候補としてはすでに述べたように主に 2 つに分けられる。一つの候補は宇宙線を加速している天体から直接やってくるニュートリノであり、もう一つの候補はすでに述べたように宇宙線が宇宙空間を伝搬中に CMB との衝突を介して作る二次生成 GZK ニュートリノである。

それでは背景事象として排除しなくてはいけないのはどのようなものであろうか。これも大きく 2 つに分けることができる。大気ミューオンと大気ニュートリノである。大気ミューオンと大気ニュートリノも宇宙線が大気と相互作用をおこす中で生成される粒子であるが、その粒子の性質の違いからその扱いが変わってくる。数としては大気ミューオンが圧倒的に多く IceCube で取得されるデータのほとんどが大気ミューオンであるが、我々がターゲットする領域では高エネルギー宇宙線のフォワード領域に $O(100\sim 1000)$ のミューオンのトラックがほとんど重なった状態でやってくるミューオン束という状態で検出器に到達する。検出器は深さ 1500m にあるので低いエネルギーのミューオンは当然検出器に到達する前にエネルギーを失ってしまいレンジアウトしてしまうのだがそれでも 100 をこえるミューオンがアイスキューブ氷河中明るい軌跡を描く。数としては圧倒するこれらの事象であるが、排除は比較的シンプルに行うことが出来る。なぜなら、これらの事象のスペクトラムは $E^{-3.7}$ 程度の傾きをもちこれは信号から期待される傾きよりかなりソフトであるため、信号の期待されるエネルギー領域に近づくとつれ、その数を減らす。また、ミューオン束の事象数は下向きの方向にピークをもち、水平に近くなるにつれその数を大きく減らす。これは角度によって検出器に到達するまでに要する距離の違いに起因する。ミューオン束は非常に明るいトラック状の光の軌跡を持つため、事象角度再構築が比較的容易に行えるのでミューオン束角度分布に依存したエネルギーしきい値を設けることで、背景大気ミューオンを効率良く排除することが出来る。これに対し、信号である PeV を越えるエネルギーのニュートリノは主に水平方向に分布のピークを持つため、あまりその数を減らすことがない。

背景大気ニュートリノの排除も同様の方針によって行うのであるがその角度分布の違いに注意が必要である。大気ニュートリノも宇宙ニュートリノもニュートリノであるので、地球を突き抜けてやってくる。信号であるニュートリノであるか背景事象である大気ニュートリノであるかの区別はそのエネルギーからのみ推定する必要がある。大気ミューオンと同様に大気ニュートリノスペクトラムも $E^{-3.7}$ 程度の傾きを持つことが知られている。これに加え PeV の領域ではチャームを含む中間子の崩壊から作られる大気ニュートリノが存在すると考えられる。この「プロンプト」大気ニュートリノの流量予

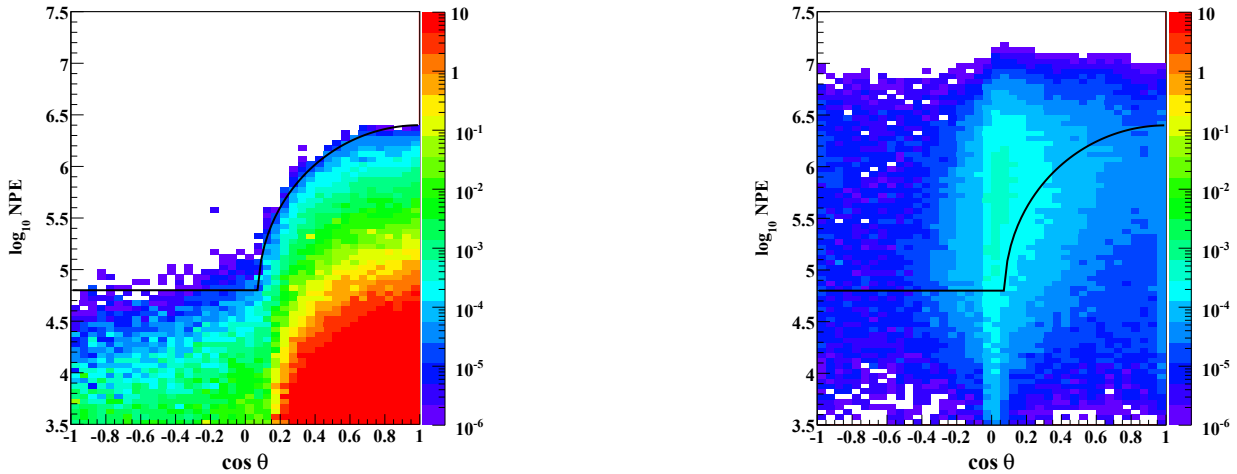


図 2: 背景事象 (左図) 及び信号である GZK ニュートリノ (右図) から期待される事象数を再構築された天頂角 ($\cos \theta$) と NPE の関数として示す。NPE が大きいほどエネルギーは高い。NPE = 10^6 の事象は 100 PeV 程度のエネルギーを持っている。信号ニュートリノ事象は、ニュートリノ振動の効果によって $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 1 : 1$ となることを考慮したうえで、3つのフレーバーを全て足し上げている。黒の曲線の上にある事象が背景雑音に卓越した信号事象として同定される。

測には不定性が大きくその扱いに注意が必要である。

検出器内に粒子のエネルギー損失として放出されるエネルギーデポジットは粒子のエネルギーに比例する。このエネルギーデポジットは事象の全光電子数 (NPE) として観測できる。信号ニュートリノから期待される NPE は背景事象に比べ非常に大きい。本解析では事象再構築天頂角に依存した NPE しきい値を設けることで背景ミューオン事象を排除し、角度に依存しない NPE しきい値を設けることで背景大気ニュートリノ事象を排除する。2011 年度データに対するこの NPE しきい値は図 2 での太線で示す。図 2 では、背景事象及び信号である GZK ニュートリノから期待される事象数が再構築された角度と NPE の関数として示されている。我々は少数検出が期待される信号の信頼性を確保するためブラインド解析を行っている。しきい値の最適化はシミュレーション分布に対して行い、シミュレーションとデータの整合性は全統計数の一割に当たるデータをテストサンプル (Burn Sample と呼ばれる) として比較してチェックしている。

5 解析結果

2010 年 5 月から 2012 年 5 月までに取得されたデータを用い、有効観測時間 670.1 日分に相当するデータに置ける信号ニュートリノの探査の結果、2 事象のニュートリノ候補が検出された。この時大気ニュートリノ及び大気 μ 束から期待される背景事象は 0.057 であり、系統誤差を含まない preliminary の p-value は 1.6×10^{-3} (2.95σ

相当) となった。また、現在の上限值に近い量の「プロンプト」大気ニュートリノの寄与を含めると、 2.18σ 相当の有意性となる。背景雑音の内訳を表 1 に示した。一つの事象は 2011 年 8 月 8 日、もう一つの事象は 2012 年 1 月 3 日に観測された。この 2 事象の大きな特徴は、観測されたチェレンコフ光の分布が非常に美しい球状をしているということと、NPE の値が比較的しきい値に近いという点である。図 3 に観測された 2 事象のうち一つのイベントの光子分布を示す。丸の一つ一つが光電子を検出した DOM を表し、丸の大きさでその光量を表す。色は検出された光子のタイミングを表す。事象の中心にあるもっとも大きな光量を受けた DOM が最初に光を検出した DOM でもある。

観測された球状チェレンコフ光の分布は検出器内に生成された粒子カスケードが作るチェレンコフ光子分布とよく一致する。粒子カスケードはニュートリノが中性カレント相互作用や荷電カレント相互作用をおこすときに相互作用点近くに作られる。ただしミューオンニュートリノやタウニュートリノの場合、荷電カレント相互作用をおこすとミューオンやタウを作りその軌跡が観測されるはずであるのでこの事象とは矛盾する。この検出された 2 事象に対しては様々なカスケード事象再構築アルゴリズムが試された。その結果、粒子カスケードとして検出器内に放出されたエネルギーの量は、それぞれ 1.1 PeV 及び 1.3 PeV と推定されている。決定精度は 30% 程度であり、チェレンコフ光の氷河内における散乱：吸収過程の理解不足に起因している。

このエネルギー放出量は、観測された事象が ν_e が引

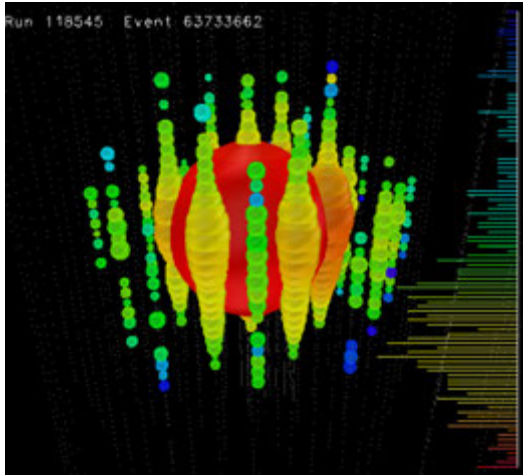


図 3: 8月に観測された事象のイベントビュー。丸の大きさでその光量を表し、色は検出された光子のタイミングを表す。

き起こした荷電カレント相互作用によるものであるとすると、100%のエネルギーが放出されるので、ニュートリノエネルギーそのものに相当する。中性カレント相互作用によって引き起こされたとする場合には、非弾性量、すなわちニュートリノから核子に移行したエネルギー量の分布を考慮する必要がある。これら二つのケースを考慮すると信頼度 90% で一つの事象は 1.0-3.9 PeV、もう一つは 1.2-5.7 PeV のエネルギーを持つニュートリノ事象であると見積もられている。

図 4 で示すのは、解析で定義された最終信号領域における事象の NPE 分布である。実験データを黒丸で表す。背景事象である大気ミュオン、大気ニュートリノのシミュレーションの結果をシェードで示し、信号分布は線で示す。信号としてはここでは、3つの GZK ニュートリノモデルと、天体から直接やってくるニュートリノのモデルとして冪乗関数分布 E^{-2} で表されるニュートリノ流量 (前回の解析から IceCube で得られた上限値 [8]) を比較として描いた。GZK ニュートリノモデルと実験データとの比較から、この事象を GZK ニュートリノで説明するには宇宙線スペクトラムのいわゆるアングルと呼ばれる折れ曲がりのある $10^{18.5}$ eV より低いエネルギー領域から銀河系外起源の宇宙線が我々の銀河系内起源の宇宙線にたいしてすでに卓越し、その宇宙線が CMB でなく可視光や赤外線と衝突をして作るニュートリノが多く存在するというやや極端な仮定が必要であることがわかった。そうでなければ、GZK ではなく、宇宙線加速天体での生成を含む何か別の機構である可能性が高い。微分流量上限値としては 10^8 GeV を越えるエネルギー領域で前回の結果 [8] よりも約 4 倍厳しい値となり、遠方宇宙や初期宇宙における高エネルギー粒子放射に対する強い制限をあたえている。最後に最終レベル

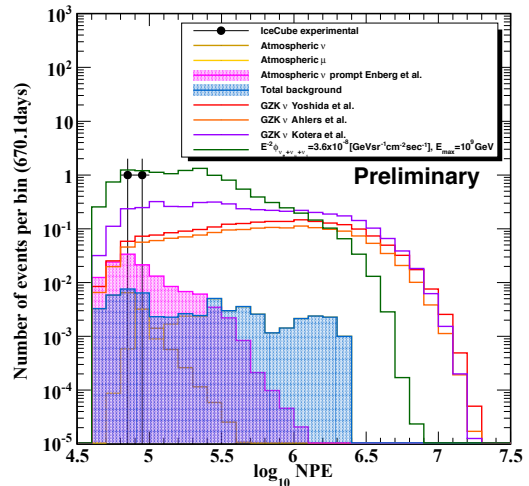


図 4: 事象の NPE 分布。一種のエネルギー分布に相当する。黒点が検出された 2 事象で各ヒストグラムが背景雑音または信号ニュートリノから期待される分布である。

表 1: 各雑音事象数の期待値。誤差は統計誤差だけを表記している。

Background Contributions	Event Rates in 670 days
Atmospheric muons	0.036 ± 0.0062
Conventional atmospheric neutrinos	0.021 ± 0.001
Total background	0.0573 ± 0.0063
Total background with prompt ν Enberg et al. [9]	0.190 ± 0.01

における事象数を表 2 として示す。

6 表立っては語られないよもやま話

今年 6 月に開催されたニュートリノ国際会議での発表をターゲットに進めてきた解析であったが、決して順風に来たわけではなかった。IceCube は 2010 年末に完成し、周囲にそう喧伝してきた。当然、今年の会議では少なくとも完成前後の時期の観測データを公表すると業界は期待する。当たり前の話だ。しかし、IceCube 内での実態はというところの物理解析は 2009 年 (7 割程度の検出器が埋設・稼働) 下手をすると 2008 年データ (半分が稼働) を延々といじくっていた。なまじライブルがないだけに、グイグイと押しまくるアグレッシブな雰囲気欠けていたのだ。誰よりも早く一番良い結果を出す、ということをも最要命題として育てられてきた筆者には考えられないことである。言うまでもなく我々 EHE 超高エネルギー解析ワーキンググループでは、周囲のペースに合わせることなく着々と 2010 年データ解析を推し

表 2: 宇宙ニュートリノ信号事象数の期待値

Signal Models	Event Rates	
	All	$E_\nu \geq 100$ PeV
GZK Yoshida et al. [10]	2.1	1.7
GZK Kotera et al. (FRII) [11]	4.1	2.4
GZK Ahlers et al. (maximal) [12]	3.2	2.7
GZK Ahlers et al. (the best fit) [12]	1.6	1.3
$E^2 \frac{dN}{dE} = 3.6 \times 10^{-8} \text{ GeVsec}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$ [8]	12.0	1.7

IceCube Experimental	Event Rates	
	All	$E_\nu \geq 100$ PeV
2010-2011	2	0

進め、2009年データと合せて少なくとも世界最高でかつ信号に手が届く感度での探索結果を公表する予定であった。しかし、二つの出来事が大いなる危機感に我々を駆り立て、さらにアグレッシブに最新の2011-2012年データ、すなわちIceCube完成後の最も統計の良いデータも解析に加え、ニュートリノ国際会議直前の最新イベントまでをも取り込むことを決断したのだった。一つは解析の進行の遅さに業を煮やした筆者の一人(吉田)がコラボレーション会議中の非公式な酒席で、我々は遅すぎる、これではダメだという、複数のヨーロッパ人が「Shigeru, 数年遅れようと正確な結果を出すほうが重要だよ」とのたまったことだった。「正確」の定義にもよるが、例えば系統誤差を30%減らせばより「正確」な結果ではあるが、そのために結果の公表が周囲の期待よりも2年遅れていいとはとても思えない。そしてもう一つは超高エネルギー解析においても2009年データの解析を任せていた人間(日本ではない)の仕事が遅く、とてもニュートリノ国際会議のある6月に間に合いそうにないことが判明したことであった。ワーキンググループのconvenerである筆者(石原)の危機感は最高潮に達し、自ら最新データの解析をやって結果をニュートリノ国際会議に間に合わせることを優先順位トップに持つことにしたのであった。今年1月のことであり、その時点で最新データ解析のためのMCデータプロダクションすら公式には走っていなかったのである!当然レベル2など予定すらまだ立てられていなかった。全てを日本側で自力でやり抜くことにしたのである。ライバルの不在云々というよりもこれは我々自身との戦いであった。

比較的短期間で解析を完遂できた大きな理由は、すでに過去のデータを解析・出版した際に得た経験値があったということと、解析のアルゴリズムを凝りすぎない、信号を発見したときに誰もが納得できるようなわかりやすい指標を解析に用いる、という我々の哲学にあったと

思っている。IceCubeはいったん検出器を埋設してしまうと再び取り出すことは不可能であるため、ハードウェアに工夫や改善を施すことができない。そこで改善は主としてソフトウェア面に偏ってしまい、それはえてして、我々の検出器の理解に限りがあることを忘れた凝りすぎた解析手法の開発という形で現れてしまう。何かというところすぐ「likelihood」を万能選手であるかのように振り回し、すぐに「Boost Decision Tree」などのラーニングマシン法に行ってしまう。これらはMCがデータをあらゆる面で綺麗に再現する、線源を自在に吊るすなどの能動的なキャリブレーションデータが豊富にあり解析を実際のデータに則してチューンできる、といった環境では威力を発揮できようが、IceCubeの環境では結局、複雑なことをしても解析のバグだしや解析結果の系統誤差がどこに由来しているのかという作業に時間が取られてしまう。最初はなるべく単純に、ロバストに、というのが超高エネルギー解析での合言葉であった。

とは言うものの、unblinding proposalをワーキンググループレベルの同意を得てコラボレーション全体に提出したのは5月3日、ブラインド解除が認められたのは5月21日、国際会議発表日のわずか2週間前のことである。IceCubeではAnalysis callと呼ばれる会議で、原則として全collaborator参加の元で集中審議を行うルールである。日本時間で夜中12時半に開始されるこの電話会議ではしばしば論議は紛糾し、終わるのは朝の3時、という過酷な日々であった。今回の超高エネルギー解析で問題となったのは、あるパラメータスペースでMCとデータの合いが良くないように見える点であった。現在は、二つの独立した大気 μ が偶然同じタイムウインドウ内に入る確率をシミュレートするMCが宇宙線スペクトルに由来する不定性を被ってデータを記述しきれいになかったという原因であることが分かっているが、当時はそんなことを調べる時間的猶予はない。

実験屋として取るべき次善の策は、そのパラメータスペースに入り込むデータの統計を上げてより詳細な分布をとり、そこから宇宙ニュートリノ信号領域に染み出すバックグラウンドの数を推定して、系統誤差が最終結果に影響を及ぼさないということを示せばよい。しかしそこに通常全データの 10% (Burn Sample) を調べることにしか許さない IceCube ブラインド解析の規定が立ちはだかった。我々は統計をあげるため、Burn Sample に適用していたクオリティーカットを緩めて数を稼ぎ分布をとって、信号領域への染みだしは無視できるレベルであることを示したが、少数の反対意見を覆せない。ならば我々は全てのデータを見てチェックしたいと主張する一方で、我々が呼ぶところの「ブラインド解析原理主義者」(コラボレーション内に主としてヨーロッパ方面に少なからず生息する)は一切まかりならん、解析をやり直せという。信号領域ではないパラメータスペースにあるデータならスタディーに使ってもよいではないかという良識派に手を回して、ある厳密に定義された条件を満たす事象は全て使って分布をとってもよろしいという妥協案をつくり、これが無事認められたのが前半の山場であった。

後半の山場は、言うまでもなく 2 事象が信号領域にあったことをコラボレーションに報告したときにはじまった。検出されたイベントが μ あるいは τ のトラック事象ではなくカスケードであったことは想定外ではあったが、どんな形状のものでも条件さえ満たせば検出できるように網を張っていたわけであるから、十分あり得る状況である。イベントをみるとそれは綺麗なカスケードで、目をさらのようにしてディスプレイを繰り返し眺めたものである。これがニュートリノでなくて一体なんであろうか、というほどの美しいイベントであったが、それを実際に種々の分布をとって示さなくてはならない。コラボレーション内は興奮の嵐の中、俺にもこのイベントを解析させてくれ、俺の仮説はこうだ、と積極的に手を貸してくれる一団と、懐疑的あるいはブラインド解除後の追加解析は認めないとする「原理主義者」の一団に分かれた。後者のネガティブ派にとって、我々超高エネルギーグループはカスケード事象を専門にやってきたわけではないということがマイナスに映っていたと思われる。しかし、こうした連中の存在は心理的にはストレス要因ではあるものの、結局自分ではなにも手を動かさないのでジリ貧になってゆく。一方でカスケードグループは、中核の何人かが色々と手助けをしてくれ、この 2 事象は紛れもなくニュートリノからのカスケードであることを示してくれた。ワーキンググループの枠を超えた協力は非常にありがたく、最後は物理が勝つ、という原則が生きていたことは嬉しい発見であった。2 イベントの検出を国際会議で公表するというゴーサインがでたの

は、5月29日(日本時間5月30日)、国際会議発表のわずか1週間前のことである。

今回の結果を受けて、MCばかりを見て複雑な解析を組み上げていく従来のやり方をやめて、この 2 イベントに類似したニュートリノイベントをもっとダイレクトに探索しようという動きが最近、米ウイスコンシン大学から出てきた。解析手法は比較的単純であり、MCよりはデータに重きをおいて探索条件を決めている。我々が EHE でとってきた解析哲学に近く、実際彼らは EHE ワーキンググループで、解析の進展を議論している。アメリカ人らしいアグレッシブさで突き進む彼らは見ていて心地よく、結果が楽しみである。この 2 事象の検出を期に、IceCube 内に健全な競争心が芽生えたのだとしたら、それはまさに予期せぬうれしい副産物である。

7 今後の展望

2 事象の検出と関連する解析結果は現在論文として出版すべくコラボレーション内で最終解析が進められている。背景雑音事象数とその系統的不定性についてはほぼ最終の数値がまとまり、本稿で載せているものとかかなり近い数字になるはずである。検出されたカスケードのエネルギー及び到来方向については、異なる解析手法による違いが多少ありその原因を煮詰めている。その差はたいした大きさではないのだが延々と議論ばかりが続いているため、どこかで決断して系統誤差に入れろ、と言いつつ続けている。ここの数値が最終的に決まらなると各宇宙ニュートリノ模型の検定やニュートリノ流量の上限及び下限値といった重要な物理量をファイナライズできないため、筆者はやきもきしているが秋までには全て収束するであろう。

5 章に記したようにこの 2 イベントは PeV のエネルギーを持つが EeV (= 10^3 PeV) 領域の極高エネルギー領域ではニュートリノは未検出で流量上限値のみが得られている。最高エネルギー宇宙線放射をつかさどる天体として有力候補であった明るいジェットを持つ電波銀河を主要起源とする考え方に修正をうながすものになるかもしれない。この天体は遠方により多く存在するため GZK ニュートリノとして IceCube の観測にかかっても良い程度の流量が予測されていたためだ。一方 PeV のスケールでは γ 線バースト天体が最も有力視されているが、検出されたイベントを含め IceCube のデータがバースト時刻と同期していたことはなく、これもすんなりとは説明できない。我々は何かを見落としているのであろうか? 明らかなことは、 3σ 弱に過ぎない有意性を上げ大気ニュートリノを上回る強度の超高エネルギーニュートリノの存在を確定し、検出数をあげることでより広範な情報を得る必要があるということだ。このために我々

は二つの方向に向けて展開しようとしている。IceCube のフルデータはこれから安定的に供給されるため、より感度の高い解析を実現することは統計的にも大きな改善を意味する。とくに PMT 応答が線形性をはずれサチュレーションをおこすような事象に対して適切な補正をかけることができれば超高エネルギーニュートリノ検出感度が格段に向上することがわかっている。IceCube の解析をこのように強化していくことが一つの方向である。もう一つは IceCube をはるかに上回る検出面積をもつ将来実験を実現していくという方向だ。実際に我々は ARA 実験という将来構想を持ち、チェレンコフ放射を UHF 電波領域で捕らえることで、検出器のコストを抑え面積を IceCube の百倍に広げることを目指している。R&D はすでに 3 年前からはじまり、試験検出器を今冬に南極点の IceCube サイトに隣接した場所に埋設する。この試験検出器からのデータ解析を完遂させて、2013 年度から第一フェーズの本格建設を開始すべく努力を続けている。

長年待ち望んだニュートリノはようやく検出されました。我々は入り口にたちましたが、そこから目的地にたどり着くか否かはこれからの努力にかかっているといえます。私たちと一緒にこの野心的な旅をつづける新しい仲間も募集しています。興味ある方はぜひ御一報ください。

参考文献

- [1] K. Greisen, Phys. Rev. Lett. **16**, 748 (1966); G. T. Zatsepin and V. A. Kuzmin, Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **4**, 114 (1966) [JETP. Lett. **4**, 78 (1966)].
- [2] S. Yoshida, A. Ishihara, Phys. Rev. D **85** 063002 (2012)
- [3] IceCube collaboration, A. Achterberg *et al.*, Astropart. Phys. **26**, 155 (2006).
- [4] R. Abbasi *et al.* (IceCube Collaboration), Nucl. Instr. Meth. A **618**, 139 (2010).
- [5] 吉田 滋, 高エネルギーニューズ **24-1**, 1 (2005).
- [6] R. Abbasi *et al.* (IceCube Collaboration), Nucl. Instr. Meth. A **601**, 294 (2009)
- [7] S. Yoshida *et al.*, Phys. Rev. D **69**, 103004 (2004).
- [8] IceCube collaboration, R. Abbasi *et al.*, Phys. Rev. D **83**, 092003 (2011).
- [9] R. Enberg, M.H. Reno, and I. Sarcevic. Phys. Rev. D **78**, 043005 (2008).
- [10] S. Yoshida and M. Teshima, Prog. Theor. Phys. **89**, 833 (1993); The model with the source evolution $(z_{max} + 1)^m$ with $m = 4$ extending to $z_{max} = 4.0$.
- [11] K. Kotera, D. Allard, and A. V. Olinto, J. Cosmol. Astropart. Phys. **10** 013 (2010).
- [12] M. Ahlers, *et al.*, Astropart. Phys. **34**, 106 (2010).