

■ 研究紹介

ギガトン容量ニュートリノ検出器 IceCube プロジェクト 高エネルギーニュートリノ天文学確立への挑戦

千葉大学理学部物理学科

吉田 滋¹

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

2005年5月27日

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。日米欧の国際共同実験として $1\text{km}^3(\text{Gt})$ の標的容量を持つ IceCube 実験の建設が昨冬から始まった(図1)。IceCube 実験の概観と現況を南極現地の経験も踏まえて報告する。



図1 上空から見た IceCube 建設現場 (写真は全米科学財団の支援によりウイスクンシン大学提供)
中央上にドリルハウスおよび検出器埋設用ハットが見える。

1 なぜニュートリノ?

「素粒子物理学的宇宙像」という熟語?は10年以上も前から高エネルギー物理屋や宇宙線物理屋のコミュニティで語られてきた。筆者がまだ修士の学生であったときに、この名前の研究会に参加した記憶がある。初期宇宙や銀河系外の様々な巨大天体、近くは超新星や太陽といった舞台上「素粒子物理的反応」が起こっている。それを直接検出することで宇宙の成り立ち、天体での高エネルギー放射過程、

星の生成といった物理を理解し、あわよくば素粒子物理そのものの検証にも使えるのではないかと議論が交わされていたものである。

ニュートリノは、この文脈の中では当時「王者」の位置を占めていた。存在することは分かっているし、電荷もないので磁場で曲げられることもない。弱い相互作用にしかコミットしないので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とい

¹ <http://www.ppl.phys.chiba-u.jp>

ったメリットがすぐに思い浮かぶ。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、われわれに新しい知見をもたらしたのであった。

神岡実験で検出された超新星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、更なる可能性が開けている。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 ($\text{PeV} = 10^{15}$ eV) では僅か 10 キロパーセク (約 3 万年光年) のオーダー、すなわちわれわれ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われわれ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、たと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。たと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。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。

さらに極高エネルギー ($E \geq 10^{18}$ eV) 領域に目を向けると、 10^{20} eV 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与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と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[1]。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、われわれ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[2]。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

バーストモデル) [3]も論じられるなど話題は多い。またモノポールや宇宙ひもといった大統一理論が予言する粒子の崩壊で極高エネルギー宇宙線がつくられる可能性も数多く提案され、そのどれもがニュートリノ生成を予言する。「素粒子物理的宇宙像」の典型的な世界が広がっているのである。

2 ニュートリノ検出への挑戦

このように夢多い高エネルギーニュートリノ観測であるが、言うは易し行うは難しとはこのことであろう。予想される頻度が極めて低いことが諸悪の根元である。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[2]、その推定値はいずれもエネルギー流量にして $10^{-8} \sim 10^{-7} \text{GeV/cm}^2 \text{secsr}$ 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もっともエネルギーの高いサブ TeV グループ ($\geq 100 \text{GeV}$) 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一万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 $\nu_e N \rightarrow \ell^\pm X$ 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水中 1m 当たり約 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掘削機、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。AMANDA 実験はニュー

トリノ点源探索においても、90年代に花開いた TeV 領域の銀河系外 γ 線点源検出の感度に迫る上限値を発表し[5]、ニュートリノ「天文学」の確立にあと一步のところまで肉薄している。IceCube 実験 [6] 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二万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、昨冬より建設が始まった。

3 IceCube 実験の概観

IceCube は 4,800 個の光検出器を深さ 1400 m から 2400 m 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 2 上のように氷河内に 120 m 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 本をストリング状に配置し (実際に「ストリング」と呼ばれる)、17 m 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。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、たとえば 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が付随する (その多くは e^+e^- あるいは制動放射からの γ) 事象がメインとなる。

光検出器モジュール (DOM) を図 2 下に示した。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。 1×10^7 の増幅率で作動させるが、2000 V 以内で 5×10^7 の増幅率を稼げることがスペックの一つになっている。信号パルスはすべて光電子増倍管の直後に接続された電子回路において 300 MHz 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伝送される。前置ゲインの異なる三つのチャンネルを実装しており、dynamic range を二桁稼ぐ設計になっている。光電子増倍管本体は、 $\sim 1000\text{ p.e.}/30\text{ nsec}$ 程度までは線形応答が保たれている。

データ収集の流れを図 3 に示した。地表 (氷表?) に伝送されたデジタル信号は、DOM-Hub と呼ばれる PCI バスインターフェースを持ったモジュールに集められる。DOM-Hub が計 8 枚ささった PC が DAQ host の一つのユニットを構成する。トリガーはすべ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イベント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。一次トリガーは DOM 同士でロー

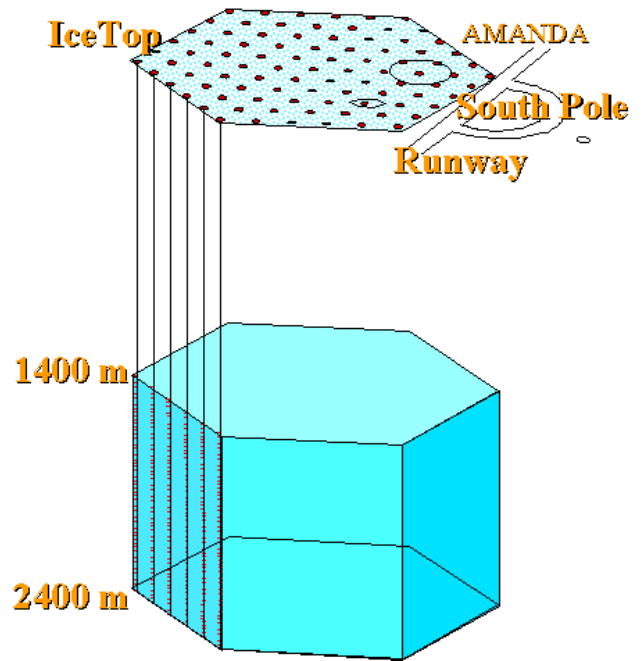


図 2 IceCube 観測装置

上に IceCube 観測装置の全体像を示す。深さ 1400 m から 2400 m の位置に計 4,800 本の光検出器 (DOM) を埋め込む。下は光検出器 (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。

カルに行われ、二次トリガーは地表の DAQ で行われる。IceCube 全体のトリガー頻度は 5kHz を想定しており、そのほとんどは下向きに IceCube 内を通過する大気 μ イベントである。すべての DOM クロックの同期は、地表から送るマスターパルスの信号伝播時間を元にしたキャリブレーションで補正される。“RapCal”と呼ばれるこのプログラムで約 2nsec の幅で同期が取れていることが確認されている。

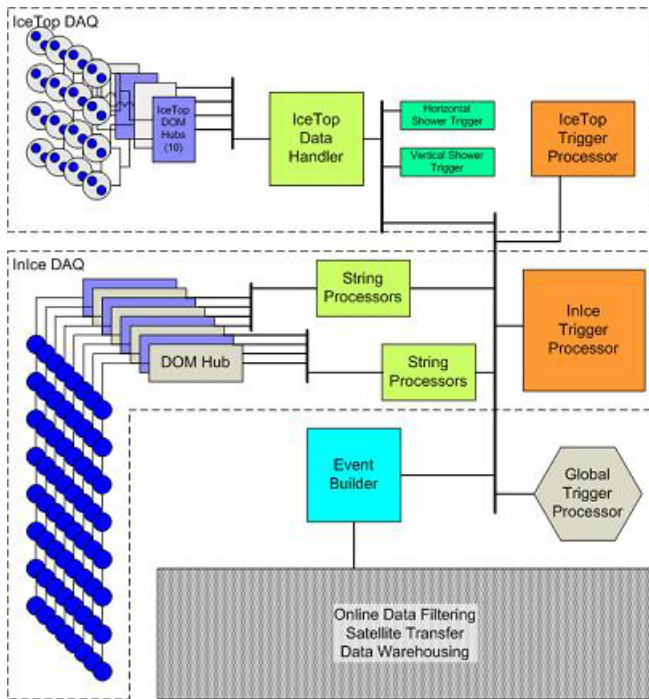


図3 IceCube DAQ ブロックダイアグラム

4 プロジェクト参画の経緯

ここで少し脇道にそれて、そもそも筆者がこの巨大プロジェクトに参画した経緯をお話しようと思う。2002年の春から筆者はそれまで勤めていた東京大学宇宙線研究所から千葉大学に移ることになっていた。その噂は2001年冬の時点で世界中の高エネルギー宇宙線業界の同業者の耳に入っていたと後になって聞かされたが、そんなときに米国アスペンで国際会議があり、筆者も出席していた。そこに来ているのがAMANDA実験でPIを務めていたFrancis Halzenで、彼はその類い希な「人たらし」の能力を発揮し、IceCube実験のプロポーザルがNSF(全米科学財団)の最終承認の一手手前にあること、公式な国際共同実験グループ発足が数ヶ月後に予定されていること、筆者の参加がグループの力を大きくすること云々と語りはじめ「久しぶりだからちよっとワインでも飲まないか」というお気楽な夕べはあらぬ方向へ転がりはじめたのであった。

IceCube実験の物理は魅力的である。筆者もニュートリノ実験は未経験であったが、それまでの超高エネルギー宇宙線分野での研究を通じ宇宙ニュートリノ関連の仕事も多少していた。ただ、この大規模国際実験に小さな千葉グループでも重要な貢献ができると確信できなくては参加する意味がない。やるからにはコラボレーション内にただいだけの存在に甘んじる気は毛頭なかった。この悩みは、外国での大きな国際共同実験に小さなグループを率いて参加した経験のある方には分かっていただけだと思う。まし

てや、それまでの日本の宇宙線業界では予算的にも人員的にも外国グループが大きな役割を担うところに日本のグループが参画するといったことはあまりなかった。しかし世の中は国際化、ボーダレスの時代である。日本が少なくとも予算面でIceCube規模の実験を立ち上げるという夢を抱くよりも、国際グループに入り、そこで個性的な貢献をするという方向性があったてもよいと考えた。ただし明確な戦略が必要である。

そうした観点から、IceCube実験のプロジェクトオフィスが置かれるウイスコンシン大学を2002年5月に訪問し、次いで6月にストックホルムで開催されたグループ会議に参加しプランを考えた。分かったことがいくつかあった。グループ内のかなりの人間は、IceCube実験の前身ともいえるAMANDA実験 - IceCube実験の1/30の規模ながら南極氷河を利用したニュートリノ検出に初めて成功した - のデータ解析に忙しくIceCube検出器の開発にまで手が回っていないこと、さらにIceCube検出器(DOM - Digital Optical Module)の中核である大口径光電子増倍管は浜松ホトニクスとEMIが候補に挙がっており、これを浜松ホトニクスに決定することができれば、日本グループとして大きな貢献が可能になることなど。光電子増倍管の扱いは自信があったので、ここを突破口にすることにした。大口径のものを扱ったことはなかったが、そこは古巣の宇宙線研究所の神岡グループの皆さんに教えを乞うことにしよう、と夤々しくも考えた。そうして、浜松ホトニクスとEMIの球の詳細なデータを取り、浜松の球が明らかに優れていることをグループ内に示して、IceCube実験の光電子増倍管は浜松ホトニクスに決定され、小さな千葉大グループがハードウェアで貢献する足掛かりが得られた。

ソフトウェアでも同様の発見があった。前身のAMANDA実験では、 $100 \text{ PeV} (= 10^{17} \text{ eV})$ を越えるような極高エネルギーのニュートリノ探索はきわめて難しく、したがって必要となるシミュレーターもなかった。IceCube実験ではサイズの点からも検出器の性能の点からもこのエネルギー領域に切り込むことが可能であり、そしてこのエネルギー領域なら筆者がそれまでやってきた物理の守備範囲だ。この領域に特有な現象(たとえばニュートリノは必ず地球内で荷電カレント相互作用を起し、生成された μ や τ は崩壊よりも他の素過程 - bremsstrahlung など - が勝る)を盛り込んだ計算ソフトを開発すれば、ユニークな貢献である。また光電子増倍管に関わっているのだから検出器シミュレーションも手掛けられる。AMANDA実験の検出器シミュレーションは、きわめて簡略化されたものに過ぎなかった。こうしてソフトウェア開発においても重要な貢献ができ、その流れは現在まで続いている。

5 IceCube 検出器

IceCube の検出器の基本ユニットは、前述したように DOM と呼ばれる光電子増倍管と回路、高電圧電源を収納したモジュールである。外部から $\pm 50\text{VDC}$ の電圧を供給し動作する。この電圧供給線は信号線も兼ねており、計 2 本の線が本ケーブルから DOM に接続されている。図 4 に示したメイン回路のダイアグラムに明示されているように、AMANDA 実験との大きな違いは、信号を FPGA プログラミングでコントロールされる ATWD と呼ばれる素子ですぐにデジタル化し(分解能は 10bits) 伝送することである。このため、2km を越えるケーブル長にもかかわらず、信号の鈍りという問題はない。しかし信号伝送のバンド幅は 1Mbps 程度であり、伝送情報を選択的に選んで効率化を図る必要がある。IceCube 実験は基本的に SPE (Single Photo Electron) レベルの測定であり、1st trigger の threshold は 0.3 p.e. レベルに設定され、レートはおよそ 800Hz 程度である(そのほとんどが dark count)。一方で 1000 TeV 程度の高エネルギーニュートリノ事象では、 10^4 p.e. 程度のヒットが予想されるため、SPE 波形とはまったく異なる信号となる。したがって伝送する情報は、SPE レベルの信号では、波形そのものでなく、より簡略化された情報、たとえばある閾値で定義したタイミング情報と電荷のみを伝送し、大きな信号のみ波形情報を伝送するといった信号圧縮機構が必要となる。この機構は開発途上であり、現在南極に埋設されている最初のストリングは、単純にすべての波形を伝送している。

ATWD チップは、default setting では、サンプリングレート 300MHz で光電子増倍管からの波形をデジタル化し、128 ワード分を FPGA 内のメモリーに伝送する。したがって波形記録の幅は 422.4nsec となる。高エネルギーイベントでは、さらに遅れてくる信号も予想されるため 10bits/40MHz の FADC も搭載され 256 サンプル (= $6.4\mu\text{sec}$) 相当の波形情報が記録、伝送される。消費電力は DOM モジュール一つ当たりわずか 5W である。

ATWD/FADC および trigger threshold 用の DAC は回路基盤に搭載されている pulser を利用して随時キャリブレーションされる。PMT を含めた全体の信号増幅率は dark noise からの SPE の電荷分布を見ることで測定される。図 4 下に実際のデータを示したが SPE ピークが綺麗に見えており、HV との相関を見ることで DOM 毎に 10^7 ゲインを与える HV 値を決定しオペレーションを行う。現在の設定では、一週間に一度“DOMCAL”と呼ばれるキャリブレーションプログラムを走らせゲインなどのデータベースを更新している。

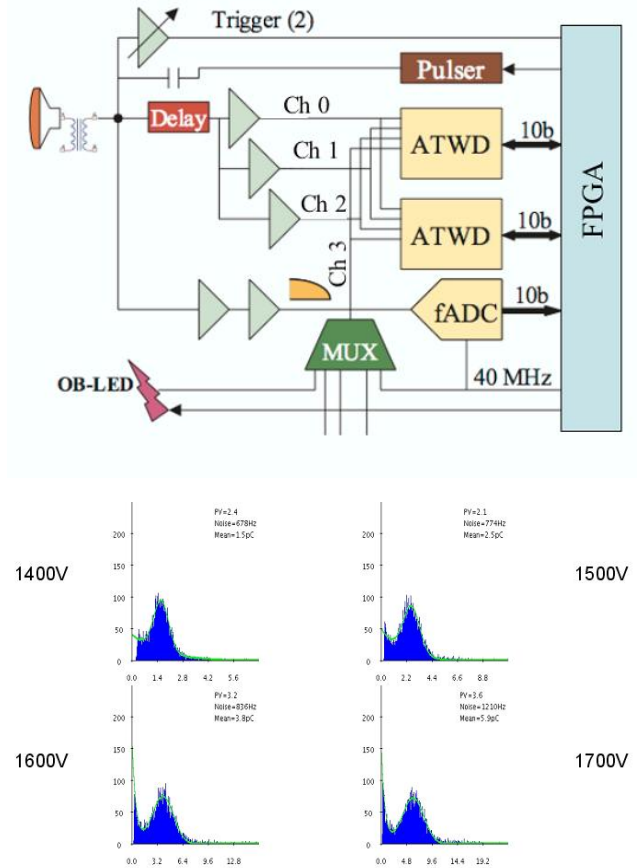


図 4 DOM のメイン電子回路

上は DOM に搭載されたメイン電子回路のダイアグラムで、ゲインの異なる計 3 channels の ATWD 入力と 680 nsec を越える長い信号 profile 記録用である FADC の入力を有する。下に各 HV 値における電荷istogramを示す。ピークは SPE によるものである。

IceCube 実験での主要なバックグラウンドは、大気 ν および μ である。 μ は極高エネルギー領域を除き(後述)、上向き事象を選択的に選び出すことでほぼ除去できるが、大気 ν についてはエネルギー測定に依存せざるを得ない。大気 ν のエネルギースペクトルは極めてソフト ($\sim E^{-3.7}$) であるのに対し、宇宙ニュートリノのスペクトルはハード ($\sim E^{-2}$) であると予想されているため、エネルギーが高めの事象を選択的に取り出す必要がある。このため検出器のキャリブレーションや信号応答の正確な理解は本質的に重要である。千葉大グループでは詳細な検出器測定を建設前に実験室で行うプログラムを確立し実施中である。

- 基本となる光電子増倍管の応答を $-30 \sim -50^\circ\text{C}$ に冷やした冷凍庫の中で測定し、要求するスペックを満たしているかをチェックするとともに、後に検出器モンテカルロに取り込み可能な形でデータベースを作成している。一例を図 5 上に示した。

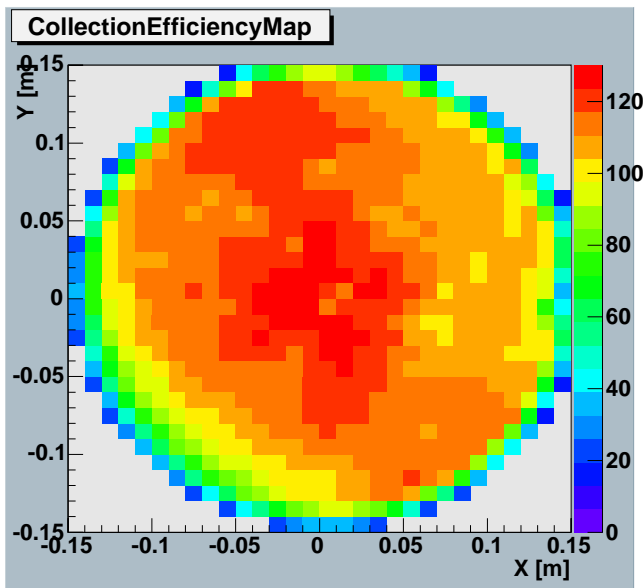
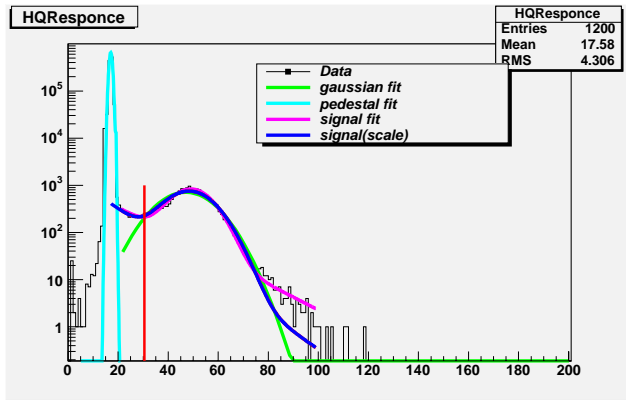


図5 IceCube 光電子増倍管の -35°C における特性

上は信号の荷電ヒストグラム。PSE のピークを構成している gaussian 成分と exponential 型で再現される成分の重ね合わせになっている。これらの応答は検出器シミュレーションに取り込まれている。下に光電子増倍管光電面における場所毎の荷電収集効率を二次元マップに示した。全面の平均を 100 としたときの相対値を使用している。

- 10 インチ光電子増倍管の光電面上での応答には位置依存性がある。第一ダイノードの形状などを工夫し、当初の状態より一様性は保たれているものの、その理解はチェレンコフ信号が光電面のどこに飛び込むかが分からないだけに重要である。UV LED を R 軸上にスキャンさせ、光電面の場所毎にゲイン、荷電収集効率のマップングを行いデータベース化している (図5下)。
- 窒素レーザーをチェンバー内でレーザー散乱させることで SPE レベルの絶対光源を作成し、光電子増倍管の絶対キャリブレーションを実行している。337nm 域で、10% 以内の精度で $\text{QE} \times \text{CE}$ が押さえられている。今年には色素レーザーを導入し波長依存性を調べ上げる予定である。

- 光電子増倍管を収納した DOM モジュール自体の応答位置依存性も、耐圧ガラス球面を紫外光光源で 4π スキャンする装置 (図6) を開発し、マップングを始めた。DOM の絶対キャリブレーションも光電子増倍管と同様に上述の方法で行う予定である。

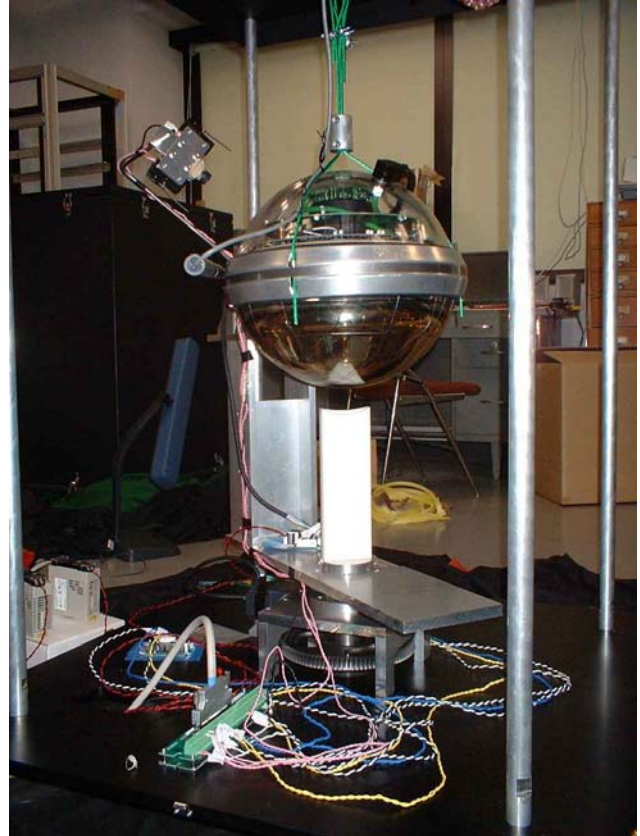


図6 光検出器 (DOM) の全面スキャン装置

中空に吊るされた DOM のガラス球全面を、二軸モーターで制御される L 字型バーの先端に取り付けられた LED がスキャンする。

6 IceCube ソフトウェア

IceCube のシミュレーション・解析ソフトウェアは IceTray と名付けられた解析コンテナ・フレームワークの中に組み込まれて実行される。各モジュールを IceTray の中でユーザーの目的に応じ自在に組み合わせて走らすことで汎用性を持たせてある。図7に構造を模式的に示した。粒子 Generator または Propagator を始点に、粒子事象を生成する。その事象は、チェレンコフ光発生および氷河内での伝播を計算するモジュール“Photonics”に連結され、各 DOM に光子が到達するまでをトレースする。各検出器における光子の「ヒット」情報がビルドされると Detector モンテカルロに引き継がれ、パルス信号および後段回路のデジタル化がシミュレートされる。トリガーモジュールは現実のトリガーロジックをシミュレートするが、現在は単純な multiplicity トリガーのみが実装されている。

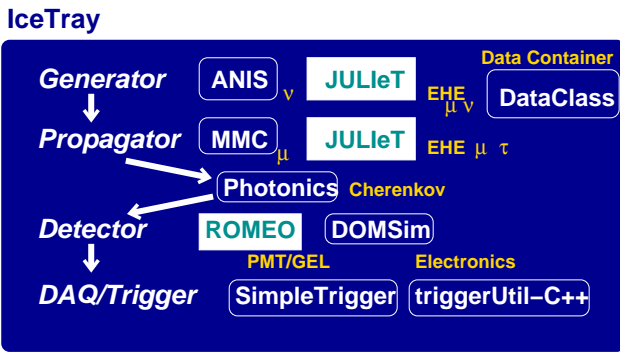


図7 シミュレーションソフトウェア構造の模式図

JULieT (超高エネルギーニュートリノ・レプトン計算) ROMEo (PMTをはじめとする DOM 検出器のシミュレーターで、アナログ信号出力までを担当) が日本グループの開発したものである。こうしたモジュールは“IceTray”と呼ばれるフレームワークで制御される。それぞれのモジュールでシミュレートされたデータは DataClass に格納される。

各モジュールは世界各地のコラボレーターが分担して製作しており、千葉大グループでは、検出器シミュレーター“ROMEo”と超高エネルギー粒子生成・伝播シミュレーター“JULieT”の開発を請け負っている。ROMEo は、千葉大で測定している光電子増倍管・DOM のキャリブレーションデータをそのまま生かし、光子が DOM のガラス球面に衝突して以降、光電子増倍管がパルス信号を生成するまでのいわば検出器アナログ部分をすべて取り扱う。DOM のレスポンスは一様ではない。ガラス球面のどの部分に光子が入射したかによって PMT 光電面上の光子ヒット位置が異なり、したがってそのレスポンスも図 5 下に示したようにばらつきを示す。ROMEo はこうした過程を高速かつ柔軟にシミュレートする機能を備えており、IceCube モンテカルロチェーンの基幹部を構成している。シミュレートされたデータは後段メイン電子回路の開発元である LBNL (ローレンスバークレー研究所) のグループの手になる電子回路シミュレーターへと引き継がれる。

日本グループが開発元であるもう一つのモジュール JULieT は $10\text{PeV}(=10^{16}\text{eV})$ 以上の極高エネルギー領域に的を絞った粒子生成・伝播計算モジュールである。このエネルギー領域では、ニュートリノは地球内で必ず相互作用をおこし、 μ や τ に化ける。これらのレプトンは、崩壊や放射過程のチェーンを引き起こしながら伝播するため、その様相は複雑である。このため、ニュートリノ、 μ 、 τ を統合的に取り扱うシミュレーターが必要となり、それが JULieT というモジュールに結実した。Java 言語で書かれたこのモジュールのもう一つの特徴は、複雑な地球内伝播過程を高速で扱うために輸送方程式を数値的に解くという機能も兼ね備えている点で、いわゆるモンテカルロ生成法とともに、二つの相補的な能力を切り替えながら最適な計

算結果を導出する。後で述べる IceCube 実験における超高エネルギーニュートリノの探索方法の研究においてはこの JULieT の能力に負うところが大きい。

これらのすべてのソフトウェアはメリーランド大学のグループがバージョン管理とコーディネーションを行っており、彼らのサーバーから全コラボレータに配布される。5 月中に初の公式版 version 1.0 のリリースを行い、シミュレーションデータの最初の大量生成に入る予定である。図 8 に τ 粒子のイベント例を示した。崩壊の有無で、同じエネルギーの事象でも topology がまったく異なることが分かる。こうした事象をどのように解析するかのアプローチ開発が千葉大グループの次なるターゲットである。

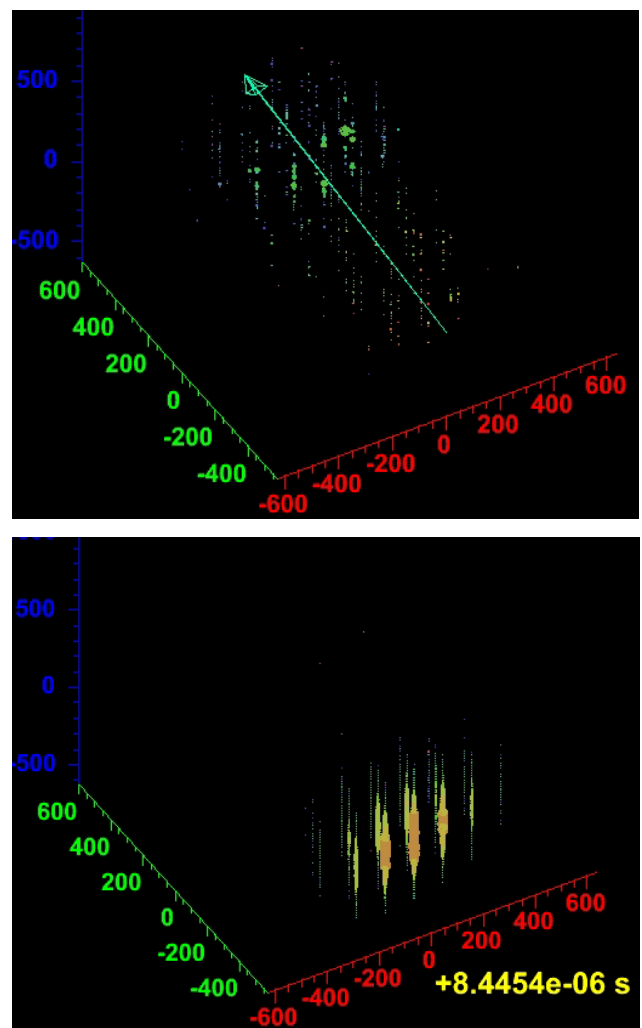


図8 JULieT で生成された $300\text{PeV}(=3\times 10^8\text{GeV})$ の τ 粒子モンテカルロイベント

ストリングに連なって DOM がチェレンコフ光を検出している。各円の大きさが光量に比例している。矢印は τ 粒子の軌道を示している。上は τ が崩壊せずに IceCube を通過したイベント。下は崩壊した場合の事象。このイベントでは τ は電子に崩壊し、すぐさま電磁カスケードを起こした。 τ 粒子のエネルギーのかなりの部分が電子にチャンネルされるため光量は多い。XYZ 軸の単位は[m]。

7 IceCube の物理

IceCube は AMANDA 実験の単なる拡張ではない。AMANDA の検出部の形状は細く縦長であったが IceCube は図 2 に示したように立方体形状である。このため検出器容積内を縦方向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、崩壊を伴うタウ (τ) 事象の同定といったイベント形状に依存する解析能力が格段に改善し、 ν_τ に対して識別能力が備わる。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宇宙線大気ミュオン信号の実験的同定能力が備わり、信頼度向上に寄与するはずである。

実際のデータ解析では、主雑音である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ので、事象の形状、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。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・大気ミュオンスペクトル ($\sim E^{-3.7}$) を越えた高エネルギー事象を拾い出す。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。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 9 左に示した。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 年の観測で 2 節で述べた理論的予測値 (Waxman-Bahcall 限界) に感度が達する。詳細は文献[7]を参照されたい。

一方 100 PeV を越える極高エネルギーでは衝突断面積が増大するため、ニュートリノから荷電弱相互作用で生成された二次ミュオンまたはタウ粒子が水平または下向きに検出容積内を通過する事象が主となる。したがって同じ下向きの事象である宇宙線大気ミュオンとの識別には注意を要する。図 10 に IceCube 深度での超高エネルギー宇宙ニュートリノ (“GZK” ν) 信号と大気 μ 雑音の予想 flux をイベントの向きおよびエネルギーの関数としてプロットした。「信号」は 10^7 GeV 周辺の水平方向の事象が多く、その領域に大気 μ 雑音はないことが分かる。すなわち信号ドメインをうまく定義すれば、高信頼度で探索が可能となることを示している。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を図 9 右に示した[8]。これが絵に描いた餅にならないためには、図 8 のようなイベントの方向とエネルギー損失量を確実に決定することが必要で、今年から解析手法の検討に入っている。

「低」エネルギーサイド (~ 100 GeV) ではニュートラリーノ探索という物理が可能である。地球内または太陽内に蓄積されたニュートラリーノが対消滅し二つのニュートリノを生成する。IceCube では真下から、あるいは太陽方向から来る低エネルギー μ 粒子を探索する。このエネルギー領域では μ が途中で崩壊する、いわゆる stopping μ の割合も高く、トラックが短い事象に対し角度分解能を上げることが重要である。ここでも波形情報を駆使した解析手法の開発が重要テーマになる。

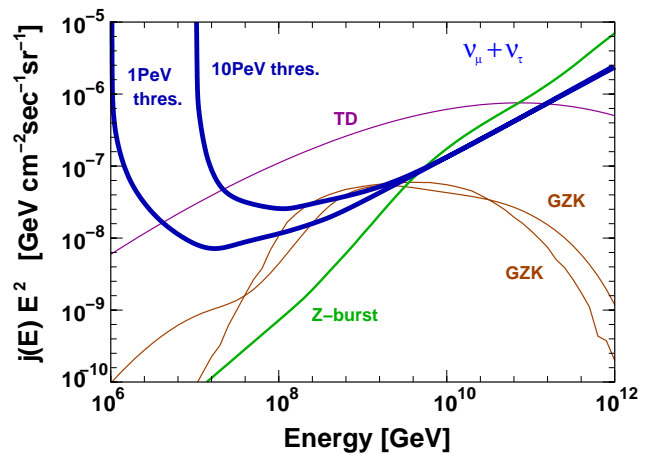
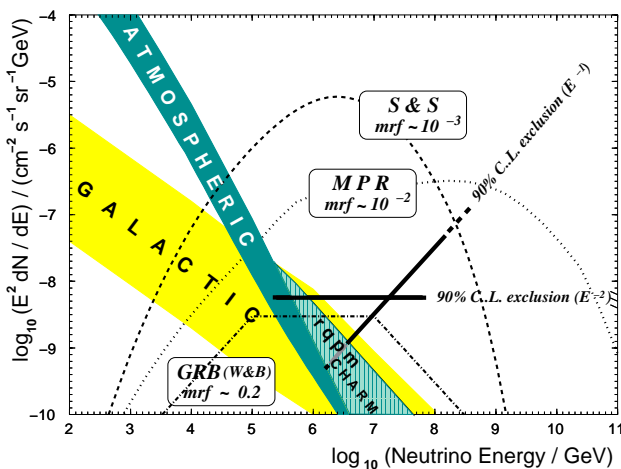


図 9 IceCube の宇宙ニュートリノ感度のエネルギー流量に対するプロット

左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、観測時間 3 年)、右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[7,8]を参照。

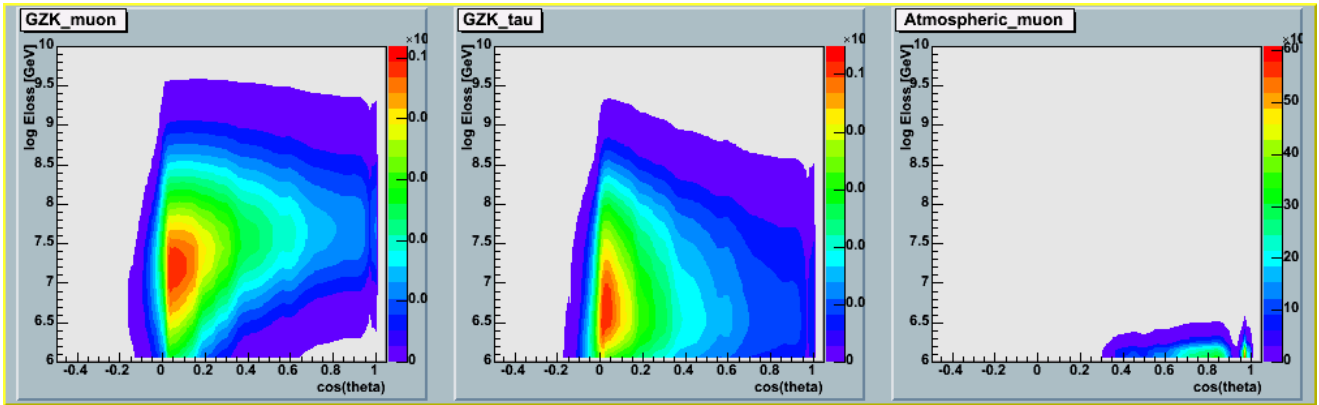


図 10 GZK 機構起源の超高エネルギーニュートリノから生成された μ 、 τ 粒子の IceCube 深度での flux $[dF/d\text{Log}E \text{ } 10^{-18} / \text{cm}^2 \text{ sec st}]$ の $\cos(\theta) - \text{Log}E_{\text{loss}}$ 平面プロット

$\cos(\theta) = 1$ は IceCube 容積内を真下に通過する downgoing の向きに相当する。 $\cos(\theta) = 0$ は真横である。 E_{loss} は IceCube 容積内での energy loss の量。チェレンコフ光の総量に比例すると考えられる。右端に大気 μ の場合を示した。

8 建設

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。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っただ中であり、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。南極点周辺の大気は乾燥しており極めて安定である。実際、筆者の滞在時の気温は -30°C 前後であったが湿気がないため、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 建設一年目である昨年度は、縦穴を 4 本掘削し、計 240 個の光検出器を埋め込みデータ取得を開始する予定であった。しかし、掘削ドリルにトラブルが続出した。エンジン周辺、回路部品の故障が相次ぎ、1 月中旬になってようやく掘削を開始した。ところが約 2km ほど掘り進んだところでドリルがストップしてしまった。そこでドリルを引き上げる作業を始めたが、悪いことは重なるものでドリル技術者が駆動ケーブルによって投げ飛ばされ大怪我を負うという事故が発生、安全確認 (“safety review”) に一週間が費やされ、基地閉鎖まで二週間という瀬戸際まで追い込まれた。一本でも検出器が埋められるか否かでは、今後の経験の積み重ね方に雲泥の差がある。最初の穴から約 10m 離

れた場所を急遽測量し掘削を開始、検出器を無事沈め終えた頃には基地閉鎖予定まで数日を残すのみというアクロバットの展開となった。結果として一本の縦穴を掘削、60 本の DOM を埋設し、地表には 8 台の IceTop 検出器を設置という結末になった。

今後の建設の成否はドリルの信頼性が握っている。ゆっくりとした速度ならば確実に掘削できるが、年に 10 本ペースの掘削をこなすためには高速掘削 (1m/分) が必須である (2 日/本以内)。この分野はわれわれ物理学者にできることは何もなくドリル技術者の腕前にかかっている。高エネルギー物理分野における加速器に相当するものかもしれない。検出器を作ってもビームが出なければ仕事にならないように、IceCube 実験では検出器が氷河に埋め込まなければならない意味をなさないのである。

一方検出器サイドはわれわれ物理屋の責任である。全体として検出器自体はよく動いている。String 21 と呼ばれる、昨年度掘削した縦穴に埋め込んだ検出器から、明らかな μ 事象が順調に取得されている。図 11 に一例を示した。各検出器のヒット時刻が地表からの深さに直線的に分布していることが分かる。この傾きが光速よりも小さいのは、チェレンコフ光が氷河内で散乱され、到着が遅れるからである。検出器同士の時刻同期も目標通りに達成されているしゲインのキャリブレーションも順調である。

しかし問題がない訳ではない。DC 信号成分レベルがシフトし、そのシフト幅がパルスの頻度に依存しているらしい問題は最近認識され、キャリブレーションを複雑にしている。String 21 の DAQ は “Test DAQ” と呼ばれているが動作が不安定ではほぼ毎日データ収集を停止してしまう。DAQ プログラムの upgrade は北半球から衛星回線を通じて行っているが、安定までには紆余曲折が予想される。

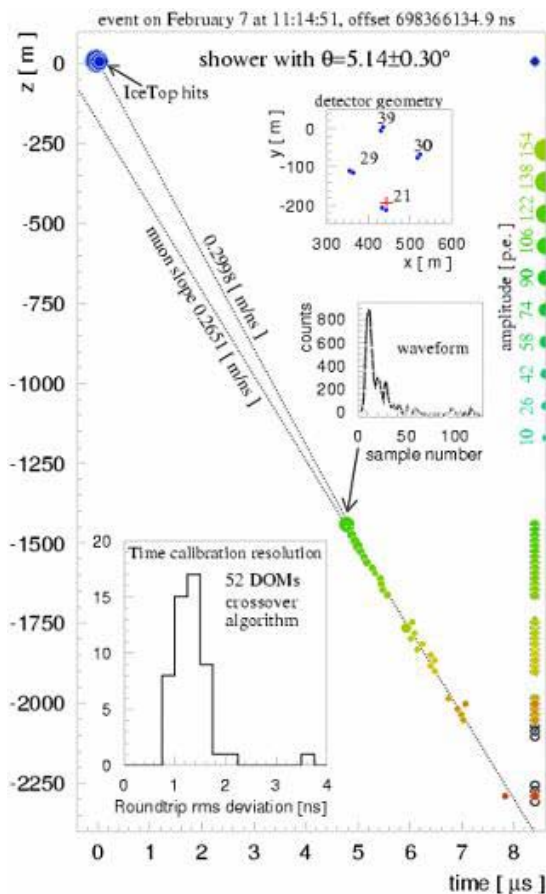


図 11 南極に埋め込まれた String 21 のイベント例

地表の IceTop 検出器にヒットした時間からの差を横軸に、各検出器の深さを縦軸にとった。波形データの例も示している。

こうした問題を抱えながらも、String 21 の成功のおかげでわれわれは楽観的である。今年度は最高 12 本の string 設置を目標にしており、すでに検出器製作、試験が佳境に入っている。千葉大グループでは、絶対キャリブレーションを施した 8 台の“Golden DOM”の製作をウイコンシン大学と共同で行っており、現在このための光電子増倍管のキャリブレーションデータ取得に入っている。これらをアメリカに輸送、7 月に検出器組立・試験を現地で共同で実施した後、8 月に千葉大に送り返して DOM 全体の絶対キャリブレーションを行い、9 月に南極に発送というスケジュールが進行中である。

2010 年初頭には、IceCube すべての建設を終える。データ解析はそれまでに埋設した検出器を利用して今年から開始される。果たして 5 年後に現在の苦勞が報われるのか、「素粒子物理学的宇宙像」という題目に大きな一ページを書き入れることができるのか、今はただ信じるしかない。

本研究は、IceCube Collaboration 全体の成果に基づくものである。IceCube Collaboration は、アメリカ、イギリス、オランダ、ドイツ、スウェーデン、ニュージーランド、ベルギー、日本の各国で構成されている。本稿でご紹介した日本グループの成果は千葉大グループの若手である保科琴代、宮本寛子両氏に負うところが大きい。ここに改めて敬意を表します。

参考文献

- [1] V. S. Beresinsky and G. T. Zatsepin, Phys. Lett. **28B** (1969) 423.
- [2] S. Yoshida and M. Teshima, Prog. Theor. Phys. **89** (1993) 833.
- [3] S. Yoshida, G. Sigl, and S. Lee, Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 5505.
- [4] E. Waxman and J. Bahcall, Phys. Rev. **D59** (1999) 023002.
- [5] AMANDA Collaboration, J. Ahrens *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 071102.
- [6] <http://icecube.wisc.edu/>.
- [7] IceCube Collaboration, J. Ahrens *et al.* Astropart. Phys. **20** (2004) 507.
- [8] S. Yoshida, R. Ishibashi, H. Miyamoto, Phys. Rev. **D69** (2004) 103004.