

量子乱流でも起こっていることを示している。

5. 終わりに

乱流が渦のみで構成される量子乱流では、非線形・非平衡の複雑な動的現象を、渦の運動に帰着して理解することを可能にしている。数値シミュレーションによって、図3や図4のように個々の渦の運動を可視化することができるが、一方、渦の運動を実験的に捉えることは、これまで困難であった。このような中で我々は、渦フリー振動ワイヤを用いて、量子渦の揺らぎや、乱流から放出される渦輪を検出することに成功した。量子乱流の寿命は古典流体の乱流寿命と同じ傾向を示し、また古典乱流に見られる渦のカスケードが量子乱流でも観測された。これらは、乱流の持つ性質のいくつかを、渦の運動と密接に関係することを示している。量子乱流の寿命や、乱流から放出される渦輪の検出が確率分布に従うという観測結果は、乱流という複雑な現象をその構成要素である量子渦の運動に還元するという描像を支持していて、非常に興味深い。我々の開発した実験手法と数値シミュレーションによって、量子乱流のさらなる研究を進めていきたい。量子乱流で培われた知識が、乱流全体への理解を進展させることは間違いない。

参考文献

- 1) P. A. Davidson: *Turbulence: An Introduction for Scientists and Engineers* (Oxford Univ. Press, Oxford, 2004).
- 2) 木田重雄, 柳瀬眞一郎: 『乱流力学』(朝倉書店, 1999).
- 3) *Progress in Low Temperature Physics*, ed. W. P. Halperin and M. Tsubota (Elsevier, Amsterdam, 2009) Vol. 16.
- 4) 坪田 誠, 小林未知数: 日本物理学会誌 **62** (2007) 15.
- 5) H. Yano, N. Hashimoto, A. Handa, M. Nakagawa, K. Obara, O. Ishikawa and T. Hata: Phys. Rev. B **75** (2007) 012502.

- 6) N. Hashimoto, R. Goto, H. Yano, K. Obara, O. Ishikawa and T. Hata: Phys. Rev. B **76** (2007) 020504(R).
- 7) H. Yano, T. Ogawa, A. Mori, Y. Miura, Y. Nago, K. Obara, O. Ishikawa and T. Hata: J. Low Temp. Phys. **156** (2009) 132.
- 8) R. Goto, S. Fujiyama, H. Yano, Y. Nago, N. Hashimoto, K. Obara, O. Ishikawa, M. Tsubota and T. Hata: Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 045301.
- 9) 坪田 誠/西森 拓: 『量子渦のダイナミクス/砂丘と風紋の動力学』(培風館, 2008).
- 10) R. Hänninen, M. Tsubota and W. F. Vinen: Phys. Rev. B **75** (2007) 064502.
- 11) H. Yano, Y. Nago, R. Goto, K. Obara, O. Ishikawa and T. Hata: Phys. Rev. B **81** (2010) 220507(R).
- 12) W. Schoepe: Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 095301.
- 13) B. Hof, C. W. H. van Doorne, J. Westerweel, F. T. M. Nieuwstadt, H. Faisst, B. Eckhardt, H. Wedin, R. R. Kerswell and F. Waleffe: Science **305** (2004) 1594; B. Hof, A. de Lozar, D. J. Kuik and J. Westerweel: Phys. Rev. Lett. **101** (2008) 214501.
- 14) Y. Nago, A. Nishijima, H. Kubo, T. Ogawa, K. Obara, H. Yano, O. Ishikawa and T. Hata: Phys. Rev. B **87** (2013) 024511 (Editors' suggestions).

(2013年5月10日原稿受付)

Quantum Turbulence Driven by Object Motions in Superfluids

Hideo Yano and Makoto Tsubota

abstract: In superfluids with order parameters of an amplitude and a phase, superflows are driven by the gradient of the phase. Since only phase defects with a 2π rotation force the superflows turbulent, the superfluid turbulence (quantum turbulence) consists only of quantized circulations around the defects, namely quantized vortices. This characteristic enables to explore turbulence with respect to motions of quantized vortices. In experiments, quantum turbulence can be driven by object motions with attached vortices. Using this method, we have investigated the motions of quantized vortices in quantum turbulence, as well as the motions of vortex rings emitted from quantum turbulence. In this letter, we report vortex motions in superfluid ^4He turbulence from both experimental and numerical studies.

最近の研究から

IceCube 実験による超高エネルギーニュートリノ事象の初検出

石原 安野 〈千葉大学大学院理学研究科 263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33 e-mail: aya@hepburn.s.chiba-u.ac.jp〉

吉田 滋 〈千葉大学大学院理学研究科 263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33 e-mail: syoshida@hepburn.s.chiba-u.ac.jp〉

高エネルギーニュートリノは、遠い宇宙に存在する莫大なエネルギーの放出を伴う天体で作られる。この高エネルギー宇宙ニュートリノを検出し、その分布及び発生源を特定することによってニュートリノ天文学を確立することが、IceCube (アイスキューブ) 実験の目的である。2011年8月と2012年1月、1 PeV (=1 GeVの百万倍) を超えるエネルギーのニュートリノ事象がIceCubeによって高い信頼度で検出された。この高エネルギーニュートリノ事象の発見により、ニュートリノ天文学が大きく進展している。

1. 高エネルギー宇宙ニュートリノ

これまで観測されてきた宇宙からの放射の中で最もエネルギーの高いものは陽子や原子核などの宇宙線である。こ

れらの宇宙線の中には 10^{20} eVを超える莫大なエネルギーを持つものが観測されているが、これに匹敵するエネルギーを宇宙ニュートリノも持つ。これは、高エネルギー宇宙

線が天体内外の光子や物質と相互作用を起こす際にパイ中間子を生成し、この高エネルギーパイ中間子の崩壊から宇宙ニュートリノが生成されるためである。

“このような高エネルギー粒子を生成する極限天体がどこにあるのか”は、物理学者を長く悩ませ続けている謎である。超高エネルギー宇宙線発生源は、銀河系内に条件を満たす天体が見つからないことや、観測される宇宙線分布が等方性を持つことなどから、銀河系外の比較的遠方の宇宙で起きている高エネルギー現象と考えられている。荷電粒子でありその軌跡が宇宙磁場の影響を受け易い宇宙線は、未だその電荷数も明らかでないこともあり、遠方宇宙における放射天体同定を目指すには不向きである。また、宇宙には2.7 Kの宇宙背景輻射光子が充満しているが、この 10^{-3} eV程度の宇宙背景輻射光子は天体から放出される高エネルギーガンマ線から見ると電子陽電子対生成反応を起こすのに十分なエネルギーを持つ。つまり100 TeV (10^{14} eV)を超えるようなガンマ線にとって宇宙は不透明な空間であり、光による高エネルギー遠方宇宙の直接観測もまた難しい。これに対しニュートリノは放出天体から長距離を直線的に進むことができ、遠方高エネルギー宇宙をより直接的に探ることができる。さらに 10^{20} eV近くの宇宙線にとってこの宇宙背景輻射光子は、パイ中間子生成(光パイオン生成反応)を可能とするターゲットとなる。この光パイオン生成反応により、高エネルギー宇宙線は急激にそのエネルギーを損失する(GZK機構¹⁾)。しかし、このエネルギー損失の一部は新たな高エネルギーニュートリノ生成に使われるため、宇宙ニュートリノのエネルギーは地球で観測されているGZK機構によるエネルギー損失後の宇宙線の最高エネルギーをも超えることが期待されている。このGZK機構によって二次的に生成される最高エネルギーニュートリノを本稿ではGZKニュートリノと呼ぶ。宇宙ニュートリノこそが、生成時の高いエネルギーを保ちながら、非常に遠方の宇宙にまで伝搬することができ、さらに到来方向情報からその生成天体同定を可能とするメッセンジャー宇宙粒子なのである。

高エネルギー宇宙ニュートリノは長い間様々な観測及び議論が行われてきた宇宙線とその起源を共にする。つまり、宇宙線起源の候補天体であるガンマ線バースト(GRB)のような爆発現象や活動銀河核(AGN)といった巨大ブラックホールがそのエネルギー源であると考えられている。宇宙線が光や物質と相互作用をすることで生成されるパイ中間子の崩壊からニュートリノが作られるため、宇宙ニュートリノのエネルギースペクトルは加速天体での宇宙線エネルギースペクトルに近く、その流量は一般的に $\phi \propto E^{-\alpha}$ という形の冪関数で表される。この時 α は、加速機構の理論から2に近い値を持つと予想されている。つまり、エネルギーが1桁上がる毎にその流量は2桁下がる。図1に地球でのニュートリノの流量分布を示す。図中“天体起源宇宙ニュートリノ”で示される分布が宇宙線起源天体から期待さ

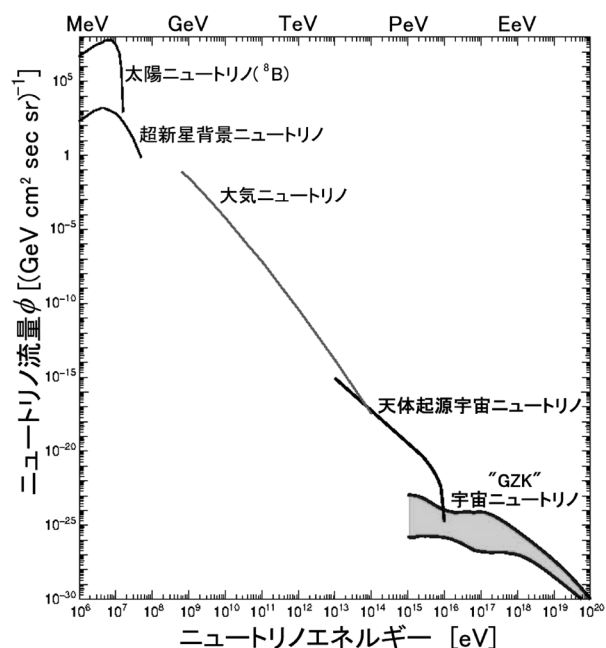


図1 高エネルギーニュートリノ流量分布。太陽ニュートリノは ^8B からのニュートリノ²⁾。超新星背景ニュートリノは文献3、大気ニュートリノは文献4を元にまとめた。天体起源宇宙ニュートリノは文献5を元に現在のIceCube実験の観測結果に合うようにパラメータを修正したもの。“GZK”宇宙ニュートリノは文献6のうち、超高エネルギー宇宙線放射の進化の仮定による最大流量と最小流量の予測を挟んだ領域を帯で示した。

れるニュートリノ流量である。さらに高エネルギー領域に超高エネルギー宇宙線伝搬中に生成されるGZK宇宙ニュートリノが分布する。これら宇宙ニュートリノ信号に被さるように、宇宙線が大気中相互作用を起こす中で生成する大気ニュートリノが数百MeVから数十TeV領域にわたって、宇宙ニュートリノ信号より傾きのある冪($\alpha \sim 3.7$)で分布する。20 MeV以下領域に太陽ニュートリノが分布し、超新星爆発からのニュートリノは数MeVから数十MeV領域に分布する。図には、過去様々な時代の超新星爆発から飛来する超新星背景ニュートリノの流量を示している。

これまで人類が太陽系外ニュートリノを観測したのは、日本のカミオカンデ実験等による1987年の超新星爆発からの $O(10 \text{ MeV})$ エネルギーのニュートリノのみである。さらなる宇宙ニュートリノ観測に対して壁となって立ちはだかってきたのは、流量の大きい大気ニュートリノである。高エネルギーニュートリノ天文学を開拓するためにはこの大気ニュートリノなどの背景事象が問題とならないような高エネルギー領域で宇宙ニュートリノ観測を行うしかない。ただし、図1から分かるように、100 TeV以上のエネルギー領域における宇宙ニュートリノ流量は非常に小さい。スーパーカミオカンデで測られている例えばGeV領域の大気ニュートリノ流量と比較すると予測される宇宙ニュートリノの流量は15桁以上も小さいのである。宇宙ニュートリノを観測するためには、この流量の小ささを補うほど大きな実効検出体積を持つ検出器が必要となる。

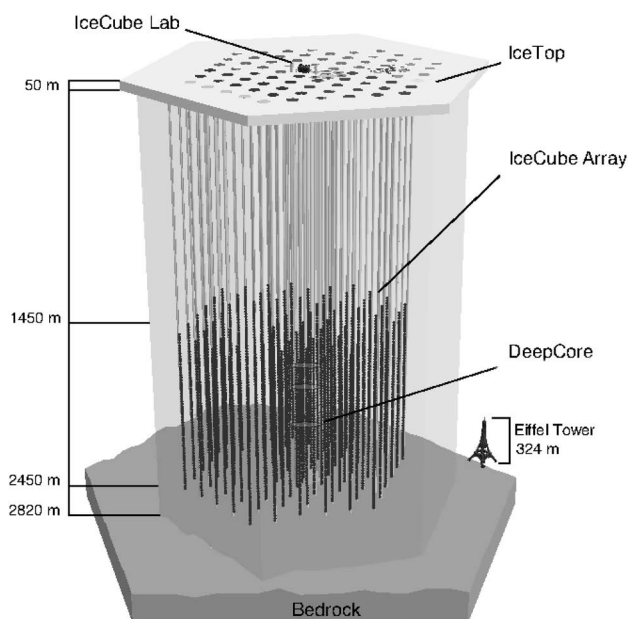


図2 アイスキューブ検出器全体図。南極氷河中地下1,450 mから2,450 mに分布する黒い点の一つ一つが光検出器モジュールを表す。(フルカラー口絵参照。)



図3 アイスキューブ光検出器モジュールの図。球形の耐圧ガラス内、ワイヤ状の磁気シールドの内側に光電子増倍管が下向きに設置されている。上部2枚のドーナツ型円盤上に電子回路やキャリブレーション用のLED光源等が置かれている。(フルカラー口絵参照。)

2. IceCube (アイスクューブ) 実験

IceCube 実験は南極点にある約3 kmの深さの氷河を検出器の一部として取り入れた世界最大級のチェレンコフ・ニュートリノ望遠鏡である。⁷⁾ 2010年12月に建設が終了し、2005年に始まった部分的な検出器でのデータ取得に引き続き、2011年5月より完成した検出器をフルに稼働して連続的な観測が行われている。図2に示すように検出器は南極氷河の地下1.5 kmから2.5 kmの深さに埋設された5,160個の直径25 cmの光電子増倍管からなる光検出器モジュール(図3)である。光検出器モジュールは縦17 m、横125 m間隔で南極氷河中に格子状に約1立方キロメートルにわたって設置されており、この光検出器によって、ニュートリノが地中相互作用を起こした際に二次的に生成されるミュー

オンやタウといった荷電レプトン及び電子やハドロンによって生成される粒子シャワーが放つチェレンコフ光を検出する。図3にIceCube光検出器モジュールを示す。光電子増倍管によって検出された光電子信号は、デジタル化されその信号の大きさとタイミング情報が波形として記録される。IceCube検出器の大きな特徴と言える幅広いエネルギー領域でのニュートリノ(大気ニュートリノから宇宙ニュートリノまで)の観測のために、この個々の光電子信号の記録には約3桁以上にわたるダイナミックレンジが確保されている。

3. PeV超エネルギーニュートリノ事象の発見

宇宙ニュートリノ信号に対する背景事象は大気と宇宙線が相互作用を起こす中で作られる大気ミューオン及び先に述べた大気ニュートリノである。検出器は地下1.5 kmより下にあるので、宇宙線空気シャワー中で生成される大気ミューオンのうち低エネルギーのものは検出器に届く前にそのエネルギーを失う。しかし、高エネルギーミューオンの多くは検出器まで到達することができる。大気ミューオンや大気ニュートリノのエネルギースペクトルは $\phi \propto E^{-\alpha}$ の冪関数の $\alpha \sim 3.7$ で表される。これは $\alpha \sim 2$ で表される宇宙ニュートリノ信号分布よりかなり急な分布である。これはエネルギーが高くなるにつれ、背景事象は信号事象よりも急激にその数を減らし、あるエネルギー以上で宇宙ニュートリノ流量が背景事象流量を超えることを意味する。つまり、エネルギー閾値を設けることによる背景事象の除去が可能となる。また、大気ミューオンは事象到来方向が水平に近づくにつれ地球表面から検出器までの到達距離が伸びるため、その数は急激に減少する。大気ミューオン事象は高エネルギー領域においては、多数のミューオンがミューオン束となり一度に検出器に到達し、非常に明るい線状の光の軌跡として観測される。このためこれらの事象は到来方向決定を比較的容易に行うことができるのである。大気ミューオン背景事象を排除するためのミューオン束角度分布に依存したエネルギー閾値と、大気ニュートリノを排除するための角度によらないエネルギー閾値を合わせることで、効率良く背景事象を排除することができる。図4に、解析レベルでの再構築された事象の天頂角 θ と光電子数(NPE)の平面上での分布を示す。左図が背景事象のMCシミュレーションから予測される分布であり、右が同様にGZK宇宙ニュートリノから予測される分布である。最終信号領域を定義する光電子数閾値を実線で示す。粒子のエネルギーと観測される光電子数の間には相関があるので、実線のような光電子数閾値を設けることにより、期待される宇宙ニュートリノ信号事象数を十分に保ちながら背景事象の排除された最終信号領域を定義することができる。

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おける宇宙ニュートリノ探索解析の結果、2つの宇宙ニュートリ

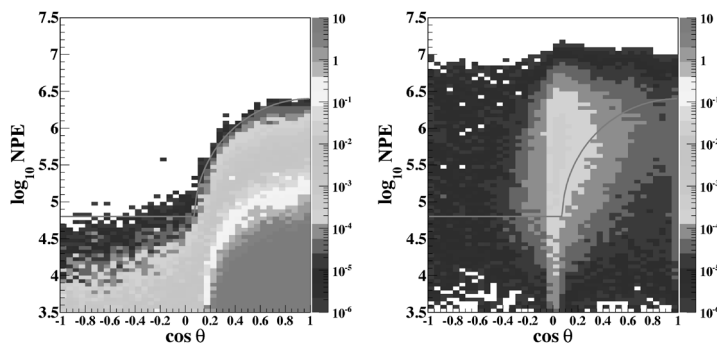


図4 再構築された天頂角 θ と光電子数 (NPE) の平面上での事象分布. 左に背景事象の分布, 右に予測される GZK ニュートリノ信号を示す. 分布は 21 日分のデータに規格化されている. 実線が定義された最終信号領域を示す. 線の上の領域を最終信号領域とする.

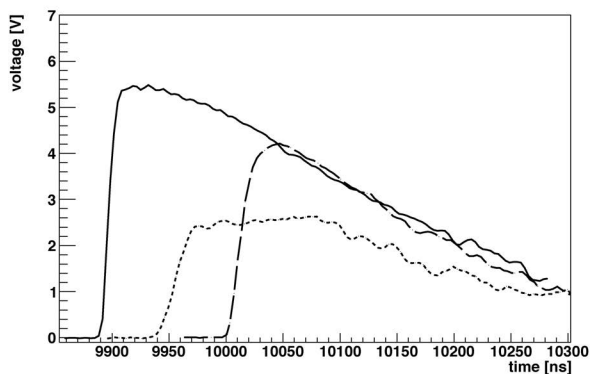
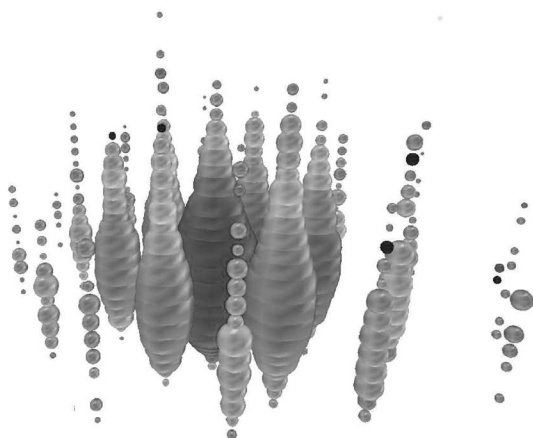


図5 上に 2012 年 1 月に観測された事象の光電子信号分布を示す. 丸の大きさがその光量を表し, 色は検出された光子のタイミングを表す. (フルカラー口絵参照.) 下が事象中心近くにある光検出器によって記録された波形である. 実線で示される波形が再構築された粒子シャワーの位置に最も近く, 最もチェレンコフ光を受けた光検出器によって計測されたものである. この検出器の次に近く, 上下 17 m にある光検出器によって計測された波形をそれぞれ点線及び破線で示す.

ノ候補事象が検出された.⁸⁾ この時, 期待される背景事象は 0.082 ± 0.004 (stat) $^{+0.041}_{-0.051}$ (syst) であり, 背景事象のみでこの 2 事象の観測を説明できる確率は 0.29% である. ここから 2.8σ のレベルで, 背景事象ではない宇宙ニュートリノフラックスの観測ということが言える. 最初の事象は 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である.

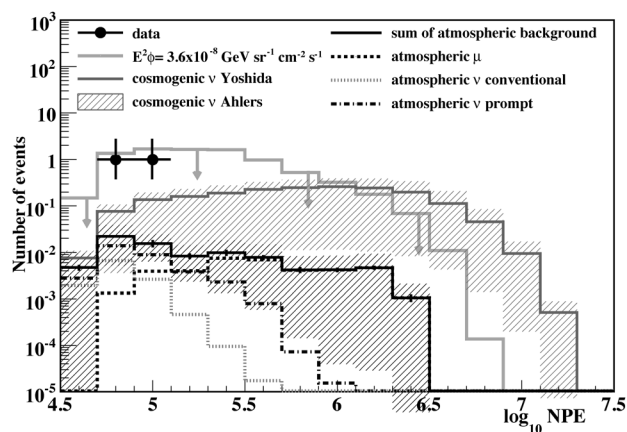


図6 観測された光電子数 (NPE) 分布. 黒丸が実験データ. 大気ミューオン及び大気ニュートリノのフラックスから予測される背景事象総数を黒線, GZK 宇宙ニュートリノ信号モデルを濃い灰色の実線及び斜線領域. 天体起源ニュートリノとして流量 ϕ が E^{-2} で表されるモデルが薄い灰色の線. (フルカラー口絵参照.)

図5上に観測された2つの事象のうちの1月に観測された事象の光電子信号分布を示す. 図中, マーカーの一つ一つが光電子を検出した光検出器信号を表し, 球の大きさでその観測光電子量 (観測された信号の大きさ) を表す. 球の色は検出された光電子のタイミングを表し, 赤から青 (フルカラー口絵参照) で時系列を示す. 事象の中心にある最も大きな光電子信号を捕らえた光検出器が最初に光を検出した光検出器である. このことは図5下に示される事象中心部近くの光検出器からの信号波形からわかる. 観測された球状のチェレンコフ光分布は検出器内でのニュートリノの核子衝突によって生成された電子やハドロンによって引き起こされる粒子シャワーから予測されるチェレンコフ光分布とよく一致する. 粒子シャワーはニュートリノが氷河中, 中性カレント及び荷電カレント相互作用を起こした際, 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の場合, 荷電カレント相互作用を起こすとミューオンが生成されるが, その軌跡は観測されておらずこの事象とは矛盾する. この検出された2事象に対しては条件を変化させながら, 様々な事象再構築を行った. 観測された2事象において, 粒子シャワーとして検出器内に放出されたエネルギーの量は, 15%の精度でそれぞれ 1.04 PeV 及び 1.14 PeV と推定できる. 観測された事象が ν_e が引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, このエネルギー放出量は親ニュートリノの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場合は, 広い分布を持つが平均して約 20% の親ニュートリノエネルギーが粒子シャワーとして放出される. この確率分布及びエネルギー再構築値の系統誤差を考慮した結果, 90%の確率で 2011 年 8 月と 2012 年 1 月の事象は親ニュートリノエネルギーがそれぞれ 0.8–7.6 PeV, 及び 0.9–8.9 PeV であると見積もることができる.

図6に示すのは, 解析で定義された信号領域における事象の光電子信号 (NPE) 分布である. 実験データを黒丸で

表し、大気ミューオン及び大気ニュートリノから予測される背景事象総数を黒線、GZK 宇宙ニュートリノ信号モデルを濃い灰色の実線及び斜線領域で示す。薄い灰色の線は、天体起源ニュートリノとして一般的な流量 ϕ が E^{-2} に比例する形で表されるモデルから期待される分布を表す。この時の流量の絶対値は、以前の解析から同様のエネルギー領域で IceCube 実験が得た上限値⁹⁾を用いている。GZK 宇宙ニュートリノ流量からは、より光量の多い領域での事象が期待されるため、今回の観測とは矛盾する。天体起源宇宙ニュートリノモデルに対しては、今回の観測はこれまで得られた上限値と矛盾はない。また、図6からも見て取れるように今回の観測からは、PeV のエネルギー領域で現在得られている流量上限値の $E^2\phi_{\nu_e+\nu_\mu+\nu_\tau} \leq 3.6 \times 10^{-8} [\text{GeV sr}^{-1} \text{sec}^{-1} \text{cm}^{-2}]$ に比べてあまり低くない流量の信号を期待することができる。

4. PeV 事象が示唆すること

検出された2事象が宇宙ニュートリノであり宇宙線起源天体から飛来しているならば、そのPeVというエネルギーは幾つかの重要な示唆を与える。先に述べたように、高エネルギー宇宙線陽子が加速源天体から放射される際に周囲の光子と衝突してパイ中間子を生成する反応が、ニュートリノ生成機構として最も考えやすい。この反応では最大で陽子の約1割のエネルギーがニュートリノ生成に使われる。このことからこのニュートリノの親粒子として期待される陽子のエネルギーは少なくとも10 PeV以上なくてはならない。10 PeVの陽子が光パイオン生成反応を起こすためには、衝突相手の光子は少なくとも $O(10 \text{ eV})$ 以上のエネルギーを持つ必要があるが、このエネルギーの光はいわゆる紫外線である。天体の大きさやその磁場の条件から10 PeV以上まで陽子を加速することが可能であり、かつ紫外光を放射する天体を考えると活動銀河核 (AGN) がある。¹⁰⁾ 活動的なブラックホールを中心に持つ、銀河系外大輝度天体を代表するこれらの遠方銀河は、超高エネルギー宇宙線の起源の有力な候補の一つであり、1 PeVを超えるエネルギーを持つニュートリノはこの描像と矛盾しない。しかし、可能性は他にもある。宇宙線陽子を加速する衝撃波の伝搬するプラズマ流が天体から光速に近いスピードで噴射していた場合、相対論的效果による加速エネルギーの増大も無視はできない。このとき光パイオン生成の衝突相手である光子の観測エネルギーはプラズマ流のローレンツ因子 Γ 倍だけ増大する。仮に $\Gamma = 10^3$ 程度の超相対論的プラズマ流を作り出す天体を考えると、放射光子のエネルギーはX線からガンマ線の帯域に相当する。この描像に良くあてはまる天体にはガンマ線バースト (GRB) を起こすような天体がある。¹¹⁾ 活動銀河核やガンマ線バーストは共に銀河系外天体であり、観測された2事象の起源が銀河系外の超高エネルギー宇宙線放射天体であるという仮説は、有力な考え方である。しかしこの2事象に同期したガンマ線

バーストはこれまでに検出されておらず、また銀河系内起源の可能性が否定されているわけでもない。再構築された事象の到来方向からは、2事象は南天の別々の方向からやってきたと考えられる。一つ目の事象は銀河中心に近い到来方向を持ち、もう一つの事象は銀河面から 30° 以上離れた角度にその到来方向を持つ。これら粒子シャワー事象の再構築到来方向角分解能は 10° 程度であり、現時点で既知天体との角度相関をとることは難しい。宇宙を探る手段としてのニュートリノのポテンシャルを最大限利用するためにも、統計量を増やした上での到来方向分布の解析が今後重要である。このような超高エネルギー領域まで陽子等宇宙線を加速する機構について未だ我々の知識は極めて限られたものであり、宇宙ニュートリノによるさらなる加速機構の解明によって、近い将来、思いもかけないような現象が解き明かされる可能性もある。

また、観測された2事象の親粒子である宇宙線の情報をニュートリノ流量から推測するといった試みも始まっている。2事象という限定された統計量では流量を正確に見積もることは難しいが、IceCube 実験のPeV領域における有効観測面積等より、図6で見たように宇宙ニュートリノ流量は $E^2\phi_{\nu_e+\nu_\mu+\nu_\tau} \sim O(10^{-8}) [\text{GeV sr}^{-1} \text{sec}^{-1} \text{cm}^{-2}]$ 程度であると期待することができる。このニュートリノを銀河系外起源だと考えると、ここから未だに測定が難しい10 PeV領域での銀河系外宇宙線について、言及することができる。これまで地球上で観測されてきたPeV領域の宇宙線の多くは銀河系内起源であると考えられている。このため、流量の多い銀河系内起源の宇宙線によって銀河系外宇宙線の情報は覆い隠されてしまっている。仮に10 PeVのエネルギーで系内宇宙線と系外宇宙線が同じ流量で飛来しているモデルを考えると、極端な仮定をとらない限り期待されるニュートリノの流量は観測から示唆される値よりも一桁以上多くなり観測と矛盾をするため、このようなモデルは棄却される。このようにして10 PeV領域における銀河系外宇宙線の量に制限を付けることができる。

さらに、このような高エネルギー宇宙ニュートリノは、 10^{20} eV までのエネルギーを持つ高エネルギー宇宙線放射が宇宙の歴史とともにどのように変化してきたのかといった疑問にまで答えることができる。宇宙ニュートリノは遠方宇宙からも (赤方偏移を除けば) エネルギーを損失することなく地球まで届く。これは遠方宇宙、言葉を換えれば過去の若い宇宙の時代に、より放射が盛んであれば現在地球で観測されるGZK 宇宙ニュートリノの量が増えるということでもある。このようにGZK 宇宙ニュートリノの分布から若い宇宙における最高エネルギー放射現象に迫っていく¹²⁾ といった研究もニュートリノ天文学の重要なテーマである。IceCube 実験は現時点では100 PeVを超えるニュートリノを観測していない。ここからすでに遠方宇宙での相対的な放射輝度及び、最高エネルギー宇宙線放射天体モデルに対し世界最高感度での制限を与えている。

5. 今後の進展

今回の2事象の発見から、アイスキューブで観測可能な宇宙ニュートリノ流量分布が強く示唆された。これは、今後PeVを超えるエネルギーを持つ宇宙線の起源を理解するための、新たな、しかし確実な道のりの出発点であるといえる。今回の観測の最大の意義は、この道のりが確かに存在することを示した、という点にある。今後は観測事象数の増大、及び実験の系統誤差の減少から、宇宙ニュートリノエネルギースペクトル測定精度向上を行っていく。これらの情報から宇宙粒子加速機構の物理解明に向けた研究を行うとともに、再構築された事象方向情報の解析からもその放射天体同定を進めていく。ニュートリノ天文学の創始期であるといえる今は、様々なニュートリノ観測チャンネルから一貫した宇宙ニュートリノ像を構築していくことが重要である。また、他の観測手段、例えばX線、ガンマ線望遠鏡等との連携からも、新たな現象の発見を目指すことも重要な課題であろう。

相互作用断面積が小さく、また非常に流量の少ない、高エネルギー宇宙ニュートリノの観測は、容易なことではない。その可能性を疑問視する声もあった。しかしニュートリノ天文学のアイデアが提唱された1970年代から約40年かけ、ついに実現しようとしている。ニュートリノは他の手段ではみることのできない、高エネルギー宇宙の姿を映し出す。ニュートリノで拓く超高エネルギー宇宙探査の未来は明るい。

参考文献

- 1) K. Greisen: Phys. Rev. Lett. **16** (1966) 748; G. T. Zatsepin and V. A. Kuzmin: Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **4** (1966) 114 [JETP Lett. **4** (1966) 78].
- 2) J. N. Bahcall, *et al.*: Astrophys. J. **626** (2005) 530.
- 3) S. Ando: Astrophys. J. **607** (2004) 20.
- 4) M. C. Gonzalez-Garcia, *et al.*: arXiv: hep-ph/0607324v2 (2006); R. Abbasi, *et al.* (IceCube Collaboration): Phys. Rev. D **84** (2011) 082001.
- 5) E. Waxman and J. Bahcall: Phys. Rev. D **59** (1998) 023002.
- 6) S. Yoshida and M. Teshima: Prog. Theor. Phys. **89** (1993) 833.
- 7) A. Achterberg, *et al.* (IceCube Collaboration): Astropart. Phys. **26** (2006) 155.
- 8) M. G. Aartsen, *et al.* (IceCube Collaboration): Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 021103.
- 9) R. Abbasi, *et al.* (IceCube Collaboration): Phys. Rev. D **83** (2011) 092003.
- 10) F. W. Stecker: Phys. Rev. D **72** (2005) 107301.
- 11) E. Waxman and J. Bahcall: Phys. Rev. Lett. **78** (1997) 2292; K. Murase and S. Nagataki: Phys. Rev. D **73** (2006) 063002.
- 12) S. Yoshida and A. Ishihara: Phys. Rev. D (2012) 063002.

(2013年8月10日原稿受付)

First Observation of PeV-Energy Neutrinos with IceCube

Aya Ishihara and Shigeru Yoshida

abstract: Ultra-high energy neutrinos are produced in the extreme objects in a far Universe. The IceCube neutrino observatory is the experiment to establish the cosmic neutrinos as the astronomical messenger. IceCube has recently detected 2 ultra-high energy neutrinos of ~ 1 PeV ($= 10^{15}$ eV). The probability these events are fully explained by the atmospheric background is 0.3%. This is a first indication of the extraterrestrial neutrinos associated with ultra-high energy cosmic ray emissions. This detection marks a milestone in the field of neutrino astrophysics.

日本物理学会誌 第68巻 第12号 (2013年12月号) 予定目次

口絵: 今月号の記事から

巻頭言

会費の使い道……………野崎光昭

解説

極紫外自由電子レーザー場における原子の非線形過程

……………伏谷瑞穂, 彦坂泰正, 菱川明栄

超弦理論と結び目ホモロジーの統一理論……………藤 博之

実験技術

不安定核構造を映す電子顕微鏡をつくる

……………若杉昌徳, 大西哲哉, 須田利美, 栗田和好

最近の研究から

実験室加速器物理……………岡本宏己, 伊藤清一, 檜垣浩之
多種多様なRIビームのスピンを操る ……市川雄一, 上野秀樹
JPSJの最近の注目論文から 8月の編集委員会より

……………安藤恒也

談話室

成田倉庫の物理学会所蔵の文書について……………岡本拓司

学生とマルチメディア入り電子書籍を作る……………小方 厚

新著紹介