

IceCube ニュートリノ望遠鏡によるグラシヨウ共鳴反応の観測

グラシヨウ共鳴は電子と反電子ニュートリノによる W^- ゲージボソン生成相互作用である。この反応断面積は、重心系で $\sqrt{s} = 80.38 \text{ GeV}$ 、つまり W^- の質量で鋭いピークをもつ。このことを Sheldon Lee Glashow が 1960 年に出版した *Physical Review* 誌で初めて指摘したときは、¹⁾ この仮説ボソン粒子の質量を K 中間子から核子程度と仮定しており、大気ニュートリノ中の反電子ニュートリノ生成によりグラシヨウ共鳴の効果が見られる可能性を考察している。それから 20 年以上経ち 1983 年に発見された W ボソンは Glashow が想定したよりもはるかに重く、この共鳴反応のピークは電子の静止系で、反電子ニュートリノのエネルギーが 6.3 PeV のところにあることがわかった。6.3 PeV の反電子ニュートリノビームとは、人類が作り出すことのできるエネルギーとしてはあまりにも高すぎる。この反応を観測するのはまず不可能だ....

しかし、これでこのグラシヨウ共鳴のストーリーにピリオドが打たれたわけではないのが物理学の進展の面白さである。

IceCube 実験²⁾ は検出器容量一立方キロメートルをもつ、2021 年現在世界最大のニュートリノ検出器である。透明性の高い南極深氷河をチェレンコフ光媒体として利用する IceCube 検出器は、南極点直下の水中 1,450 m から 2,450 m の深さに 5,160 個の光検出器を横 125 m、縦 17 m の間隔で埋設している。宇宙から飛来する高エネルギーニュートリノ相互作用からの二次粒子が放つチェレンコフ光を、この光検出器の 3 次元配列により観測する。IceCube 検出器は、2004 年からその建設を開始し 2010 年 12 月にその建設を終了した。フル稼働の開始は 2011 年 5 月 13 日で、今年 2021 年は IceCube 実験のフル稼働開始の十周年である。IceCube 検出器の容量の大きさは、ターゲットとするエネルギー帯の高さに起因している。IceCube 実験はこれまでに 2012 年に報告した二つの約 1 PeV のエネルギーをもつニュートリノ事象の観測³⁾ を皮切りに、数十 TeV から 10 PeV といった高エネルギー宇宙ニュートリノの常時観測を行っている。また、2018 年には、宇宙ニュートリノ事象の追観測を可視光やガンマ線といった光で見る望遠鏡で行い、明るさの時間相関が観測されたことからニュートリノ天体の同定に成功した。⁴⁾

2016 年 12 月 8 日、IceCube 検出器は、あるニュートリノ事象からのチェレンコフ光を記録した。このときに各光検出器で記録されたチェレンコフ光信号の波形を積分し、光

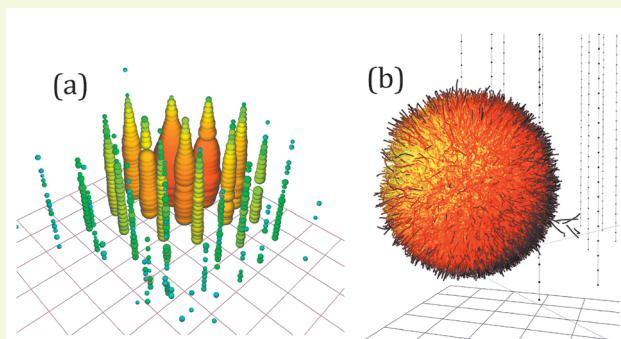


図1 (a) 2016 年 12 月 16 日に観測された 6 PeV に相当する事象。丸の一つ一つが光検出器を表している。色で光の観測された時間を表し、大きさで各光検出器が受けた光量の大きさを表す(目次口絵も参照)。⁵⁾ (b) この事象をシミュレーションで再現した図。線一本一本が、光子の軌跡を表している。球からはみ出ている光子は粒子シャワー中、生成された先導ミューオンからのチェレンコフ光である。

量に換算したものの分布が図 1(a) である。⁵⁾ 球で表されている一つ一つが深氷河に埋められている光検出器であり、丸の大きさが各光検出器で観測されたトータルの光量を表現している。赤色から青色で光が初めに届いた時間の時系列を表す。各光検出器の横方向の間隔は 125 m であるから、チェレンコフ光の広がり約 900 m にもわたる。このような球状に広がるチェレンコフ光の分布は、非常に高いエネルギーのニュートリノが地球と衝突し、氷河中に粒子シャワーが形成されたことを示している。この粒子シャワーから氷河中に放出されたエネルギーは、高エネルギー電子によって始まった電磁粒子シャワーであると仮定し、 $6.05 \pm 0.72 \text{ PeV}$ であると推定された。ただし、パイオンなどから始まるハドロン粒子シャワーの場合は、電荷中性粒子生成の影響で、粒子シャワーのエネルギーはこの値よりも約 5% 高くなる。⁶⁾

IceCube 実験の光検出器モジュールはその内部に 300 Msps と 40 Msps の二種類の A/D コンバータを搭載しており、PMT の信号を即時にデジタル信号に変換し保存する。このため、IceCube ではトータルの光量のみならず、各光検出器が 2 ns 精度で、いつでもどれくらいの光を受けたかの詳細な記録をもっている。²⁾ 粒子シャワーの大きさに比べ、光検出器の埋設間隔が大きいため、IceCube 実験では粒子シャワーは点源に見える。この点源から、チェレンコフ光が氷中の光速 ($v = 2.19 \times 10^8 \text{ m/s}$) で伝播する。点源から各光検出器が初めに光子を受ける時間は、光がほとんど散乱されずにたどり着いた時刻であるので重要な情報である。同じ時間に光を受けた光検出器をつないでいくと球形

になり、端的に言えばその中心が粒子シャワーの起点である。実際には水中の光の散乱の影響をより正確に取り入れるため、シャワー起点候補周辺で大量の事象シミュレーションを行い、全ての光検出器が受けた波形を最もよく再現する値を再構築の値として採用している。

このような再構築から、本事象は最も近い光検出器から80 mのところで起きた粒子シャワーであることがわかった。しかし、ほぼすべての光検出器の波形の立ち上がり時間が、この粒子シャワーの位置を矛盾なく示唆するのにに対し、粒子シャワーから最も近い三つの光検出器だけは、このチェレンコフ光が到来するよりも約50 ns早く到来する光をとらえていたのである。これはどのような意味をもつのであろうか。その後の事象解析から、この三つの近傍光検出器は粒子シャワーからシャワーを先導するミューオンが飛び出てきたところを観測していたということが判明した。この事象のある瞬間の様子をシミュレーションにより再現したのが図1(b)である。ミューオンは水中での光の速さを超えてほぼ真空の光速で伝播する。一方、光は水中の光速を超えることができない。このため、ミューオンの進行方向にある光検出器では、粒子シャワーからのチェレンコフ光よりも早い時刻の光を観測するのである。ハドロンシャワー中のパイオンの崩壊によって、このような高エネルギーミューオン（今回の事象の先導ミューオンのエネルギー推定値は $26.4^{+28.6}_{-12.4}$ GeV）は生成されるため、これはグラシヨウ共鳴反応では68%の崩壊比をもつハドロン粒子シャワーの特徴である。そして、ハドロン粒子シャワーのエネルギー補正を考慮にいと観測された粒子シャワーは、まさにグラシヨウ共鳴断面積のピークのエネルギーをもつ。

地球上の人工加速器では生成が不可能であると考えられていた反電子ニュートリノによるグラシヨウ共鳴反応事象が報告された。宇宙に目を向ければ確かに、人類では到達不可能なほど高エネルギーの粒子が飛び交っている。本グラシヨウ共鳴事象の観測は、今後も、人工的に加速するには難しいほど高いエネルギー領域での物理の示唆を、より直接的に宇宙から得ることができる可能性が高いことを示している。さらに本研究では、これまで難しいとされていた高エネルギー宇宙ニュートリノとその反粒子の区別を初

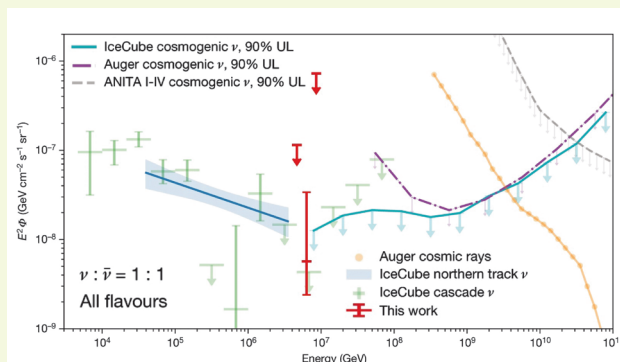


図2 これまでに観測されている宇宙ニュートリノ流量の分布と上限値。今回の観測により誤差は大きいものの新たに最高エネルギー領域での流量見積もりが加えられた。文献5より転載。

めて可能とした。宇宙ニュートリノ生成モデルによっては全ニュートリノ流量に対して異なる反電子ニュートリノ生成比率を予測する。このため、より多くのグラシヨウ共鳴事象の観測から、宇宙ニュートリノ発生機構に新たな知見をもたらすことが期待される。

図2に、宇宙に拡散して分布する宇宙ニュートリノ流量の測定値を示す。素粒子であるニュートリノによって、宇宙のエネルギーフロンティアの探査が進んでいることがわかる。また、現在はIceCube検出器の容量を約8倍に拡大するIceCube-Gen2計画⁷⁾が進行中である。統計量を格段に向上させ、宇宙のさらに高いエネルギー領域の探査を目指す。素粒子物理学と宇宙物理学とを行き来するような、また新たな発見が待ち受けているだろう。今後も宇宙ニュートリノにまつわるワクワクする展開が楽しみである。

参考文献

- 1) S. L. Glashow, Phys. Rev. **118**, 316 (1960).
- 2) IceCube Collaboration, J. Instrum. **12**, P03012 (2017).
- 3) IceCube Collaboration, Phys. Rev. Lett. **111**, 021103 (2013).
- 4) IceCube Collaboration, Science **361**, eaat1378 (2018).
- 5) IceCube Collaboration, Nature, **591**, 220 (2021).
- 6) IceCube Collaboration, J. Instrum. **9**, P03009 (2014).
- 7) IceCube-Gen2 collaboration, J. Phys. G **48**, 060501 (2021).

石原安野 (千葉大学グローバルプロミネント研究基幹・大学院理学研究科
aya@hepburn.s.chiba-u.ac.jp)

(2021年6月3日原稿受付)