「無感ニュートリノ」を求めて

Hunt for the sterile neutrino heats up

ERIC HAND 2010年3月18日 Vol. 464 (334-335)

www.nature.com/news/2010/100317/full/464334a.html

第四のニュートリノである無感（ステライル）ニュートリノが本当に存在するなら、天体物理学の最も深刻な問題のいくつかに、解決の糸口を与えるはずだ。

ニュートリノは秘密主義だ。この粒子は、普通の物質と相互作用したがない。そのため、毎日数十億個ものニュートリノが我々の体を猛スピードで突き抜けていっても、なんの害も及ぼさない。逆にいえば、わずか数個であっても、ニュートリノを検出しようとすれば専用の巨大検出器が必要になる。天文学者たちは今、既知のニュートリノよりもさらに検出困難なタイプのニュートリノについて、その存在を示唆する証拠を手にし始めている。ただし、この第四の無感（ステライル）ニュートリノ

を直接検出するのは不可能だと考えられている。

理論家も実験家も10年以上前からこの幽霊粒子に興味をもっていたが、これをとらえようとする実験は難航を極めている。けれども今、宇宙で行われている2つの観測（1つはマイクロ波、もう1つはX線を使ったもの）により、再び希望がみえてきた。

この無感ニュートリノを同定できれば、これまで何度となく検証されてきた標準モデルを超えて、新しい物理学を垣間見ることができよう。また、天文学の多くの謎を解き明かす手がかりが得られ、ひょっとすると、宇宙の質量の85%を占めていると考えられているダークマター（暗黒物質）の正体さえ説明できるかもしれない。

ロスアラモス国立研究所（米国ニューメキシコ州）に所属するWilliam Louisは、「原子核・素粒子物理学と天体物理学にとって、無感ニュートリノの問題は非常に重要だ」という。彼が1990年代半ばに地上で行った実験は、この幽霊ニュートリノの存在を示唆する最初期の証拠の1つとなった。

普通の3種類のニュートリノでも（次ページの図を参照）、検出するのは十分に難しい。これらのニュートリノは「弱い力」によって物質と相互作用するため、大量の物質の中を通り抜けても、その原子核とはほとんど衝突しない。そこで物理学者は、ニュートリノをとらえるために、鉱油または重水を満たしたタン

クを使って検出器を製作する。そしてさらに、原子炉や粒子加速器や太陽から来るニュートリノの流れに検出器を集中させて、キャッチする確率を高めている。

付き合いの悪い粒子

1998年、スイスのジュネーブ近郊にあるヨーロッパ素粒子物理学研究所（CERN）の加速器を使って行われた実験結果は、弱い力の作用を受けるニュートリノが、既知の3つのファミリー（フレーバー）だけであることを示した。したがって、これら以外のニュートリノは、弱い力の作用を受けない無感のニュートリノであり、既存の検出器を素通りしてしまうことになる。

そもそも、理論家はなぜ、こんな付き合いの悪い粒子を考え出したのだろうか？ それは、同じ1998年に、驚くべき発見がもう1つあったからである。3種類の普通のニュートリノは、小さいものの、確かに質量をもつことがわかったのだ。

この結果は衝撃的だった。それは単に、標準モデルではニュートリノには質量がないとされていたからではない。あるフレーバーから別のフレーバーへの振動（変化）の仕方から、3種類のニュートリノの質量が決定されたが、それらが信じられないほど小さかったからだ。最も重いものでも、電子より7桁以上軽かった。そこで理論家たちは、両者の間には、ほかのなんらかの粒子（おそらくは無感ニュートリノ）があるはずだと推測したのである。

このミッシングリンクに関するヒントをもたらしたのが、ウィルキンソンマイクロ波異方性探査機（WMAP）だった。WMAPは、2001年以来、ビッグバンの名残の放射にある微小なゆらぎの地図を作成している。このゆらぎのパターンには、ビッグバンの直後にあった素粒子の混合物に関する手がかりが残されている。

2010年1月に発表された過去7年分の観測結果は¹、原始宇宙のニュートリノ

ニュートリノハンター

MiniBooNE 実験は、1280 個の光電子増倍管を使って、ニュートリノまたは反ニュートリノが巨大なタンクに満たされた液体の中に飛び込んできたときに発する「微かな光」をとらえる。この実験から得られる新しいデータは、第四のニュートリノがあることを示唆するかもしれない、そうなれば無感ニュートリノが実在する可能性が出てくる。

ノのファミリー数が4だった可能性が高いことを示唆した。つまり、あと1種類のニュートリノがまだ発見されていないことになる。ジョンズ・ホプキンス大学（メリーランド州ボルティモア）の主任研究員 Charles Bennett は、「ほかにも何かあると主張するのは、たいへんなことです」と語る。観測誤差がまだ大きく、ニュートリノの種類が最大で3である可能性は消えていない、と慎重な姿勢をとる。「結果は非常に興味深いですが、気になってしかたがないというほどではありません」。

より最近の手がかりは、チャンドラ X 線観測衛星からもたらされた。無感ニュートリノが本当に存在していて十分な重さがあるなら、これが崩壊して、より軽いニュートリノへと変化する際に、かすかな X 線パルスを放つはずだ。カリフォルニア大学ロサンゼルス校の Alexander Kusenko は、空の中で、多くのダークマターがあると考えられ、星やその他の光源がほとんどない領域に注目した。そして、銀河系の伴銀河であるウィルマン 1 という薄暗い矮小銀河からの X 線に、予測されたとおりの兆候を発見したと主張した²。しかし、Bennett と同様、Kusenko も、無感ニュートリノを発見したと主張するには時期尚早だという。「すべてがきれいに一致しているようですが、気をもませますね」。

Kusenko の観測によれば、無感ニュートリノは、それ自体がダークマター粒子となりうるほどの重さと量があることになる。一方、WMAP のデータは、無感ニュートリノの質量が、理論の予測範囲の軽い側にあることを示している。カリフォルニア大学サンディエゴ校天体物理学・宇宙科学センターの所長である George Fuller は、この軽い質量を歓迎する。それが本当なら、超新星に関する積年の問題を解決するのに役立つからだ。大質量星が爆発する際、中性子が融合して鉄よりも重い元素が形成される。けれどもこのとき、膨大な数のニュートリノも生成する。理論的には、このニュー

トリノが中性子を陽子と電子に変え、その融合を抑制すると考えられる。

無感ニュートリノは、この問題を解決する糸口となる。超新星爆発の際に生成したニュートリノの一部が無感ニュートリノに変わるなら、これらは中性子と相互作用することなく飛び去っていくため、中性子の多くがそのまま残れるからである。「その可能性は高いと思います」と Fuller はいう。

矛盾する報告

2010 年 3 月、MINOS (Main Injector Neutrino Oscillation Search) の実験から、無感ニュートリノを探す人々を落胆させるニュースが飛び込んできた³。この実験は、フェルミ国立加速器研究所（フェルミ研究所、イリノイ州バタヴィア）の加速器で生成させたニュートリノビームを、735km 離れたミネソタ州の地下にある MINOS 検出器に向かって照射し、ニュートリノ振動を検出しようとする実験だ。MINOS 実験のデータは、あるファミリーのニュートリノが無感ニュートリノに変化しにくいことを示したのだ。しかし、スポークスマンの Robert Plunkett は、無感ニュートリノが存在する余地はまだあるという。「今、無感ニュートリノに関するパラメーターの幅をしぼり込んでいるところです」。

フェルミ研究所ではもう 1 つ、無感ニュートリノの最初期の手がかりを追跡する実験が進められている。こちらはもっと明るい展望をもたらす可能性がある。1993 年から 1998 年まで、Louis と同僚は、液体シンチレーターニュートリノ検出器実験を利用して、167 トンの鉱油に反ニュートリノ（ニュートリノの反粒子）を照射し、これをとらえようとした。この実験から、ある種類の反ニュートリノが別の種類の反ニュートリノに変化する過程についてデータが得られたが、それは 4 種類のフレーバーが存在していることを示唆していた。

その 10 年後、追試として、フェルミ研究所で MiniBooNE (Mini Booster

無感ニュートリノの検出を夢見て

ニュートリノは、普通の物質と「弱い力」を通じて相互作用する。検出困難な粒子であり、どんな原子核ともほとんど衝突することなく地球を突き抜ける。ニュートリノには 3 つの種類があり、ある種類から別の種類へと変化（振動）することができる。

いくつかの実験が、第四のニュートリノの存在を示唆している。この無感（ステライル）ニュートリノは、普通のニュートリノと違って弱い力の作用を受けないため、その検出はさらに困難になる。

Neutrino Experiment) の実験が行われた。そのデータからは、第四のニュートリノの存在を裏付ける証拠は全く得られなかったが、ただこの実験ではニュートリノビームを使用していたため、結果をロスアラモスの反ニュートリノのデータと比較するのは難しかった。しかし、今回、MiniBooNE で 1 年半にわたる反ニュートリノのデータ収集を終え、MiniBooNE 実験から違ったパターンがみえてきたのだ（「ニュートリノハンター」参照）。

世界各地で行われているほかの反ニュートリノ実験と考え合わせると、このデータは、3 つの普通のニュートリノと 1 つの無感ニュートリノという「3+1 モデル」にきれいに一致する、と Louis はいう⁴。「今年の夏に発表される次のデータによって、この検出困難な侵入者がついにキャッチされたかどうか、よりはっきりわかるでしょう」。

（翻訳：三枝小夜子）

1. Komatsu, E. et al. Preprint at <http://arxiv.org/abs/1001.4538v1> (2010).

2. Lowenstein, M. & Kusenko, A. Preprint at <http://arxiv.org/abs/0912.0552> (2009).

3. Adamson, P. et al. *Phys. Rev. D* **81**, 052004 (2010).

4. Karagiorgi, G., Djuricic, Z., Conrad, J. M., Shaevitz, M. H. & Sorel, M. *Phys. Rev. D* **80**, 073001 (2009).