



KAMLAND/LBNL

Ghosts from within

地球内部からの「幽霊」素粒子

William F. McDonough

Nature Vol. 436 (467-468) / 28 July 2005

地下から放出される地球ニュートリノが初めて観測されたのは、画期的な成果である。これによって、地球内部にある放射性元素の量や分布、地球全体としての熱収支をもっと詳しく推定できるようになると考えられる。

地球内部に存在する化学元素の不安定な同位体が崩壊することで発生する熱が、地球から放出される全エネルギーの一部となっていることは、アンリ・ベクレルが1896年に放射能を発見した直後にわかった事実である。100年以上たつて、荒木たち¹は地球中心部での放射性 β^- 崩壊で生じた反ニュートリノを初めて観測したと *Nature* 2005年7月28日号に報告した。このいわゆる地球ニュートリノの観測から得られた結果は地球の化学的・物理学的モデルと矛盾せず、地球内部の不安定同位体、つまり放射性核種が貯蔵されている場所やその濃度を確かめる新しい方法となる。

反ニュートリノは、その片割れであるニュートリノと同様に3種類あり、それぞれ対となる荷電粒子の電子、ミュオン粒子、タウ粒子の名をとって命名されている。反電子ニュートリノは、たとえばカリウム (^{40}K) からカルシウムの同位体 ^{40}Ca への崩壊やウラン (U) やトリウム (Th) の崩壊系列で起きる原子核の β^- 崩壊で発生する。ニュートリノや反ニュートリノは幽霊のような粒子で、電荷をもたず質量もほとんどなく、まったく相互作用せずにほとんどの物質を通りぬける。それゆえ、検出がきわめて困難である。

カムランド (KamLAND、神岡液体シンチレーター反ニュートリノ検出器) の設備は、このようなつかまえない粒子によって生じるかすかな光をとらえることを目的として作られた。この検出器は本州中央部、岐阜県池ノ山山頂の地下1kmにある鉱山内に置かれていて、反ニュートリノ以外の素粒子からなる宇宙線の影響が少なくなるようにしている。反ニュートリノは逆 β^- 崩壊として知られている過程によって、カムランドの重さ1000トン、直径13mのシンチレーション検出器(上記の写真)中の陽子にときたまらえられる。すると、中性子ができ、中性子は陽子と結合して重陽子となり、エネルギー2.2MeVの特性 γ 線(シンチレーション光)を発生する。この反応で生まれた光は、検出器を取り囲んで配置された光電子増倍管によって検出され、電気信号となる。

2003年に、カムランドは3種の反ニュートリノが相互に入れかわる現象(反ニュートリノ振動²)を立証するうえで重要な役割を果たした。この結果は反ニュートリノに質量が(小さいものだが)あることを実証し、カナダのサドベリーニュートリノ観測所による太陽ニュートリノ振動の発見³を補強するものとなった。カムラン

ドで検出された振動する反ニュートリノは、約180km (平均) 離れた場所にある原子炉で発生したものだ。今回、カムランドが検出したのは、さらに遠い発生源からの反ニュートリノつまり地球ニュートリノである。地球ニュートリノは、地球から放出されるエネルギーが発生する場所を解明する鍵となる。

地球内部から散逸する総エネルギーは30から44テラワット(1TW、1テラワットは 10^{12} ワット)の間であると推定されている^{4,5}。推定値の幅は、一方は地球表面での熱流の全球モデル間と、他方は海洋の熱水循環の効果を考慮に入れた中央海嶺での熱放散量の推定値とのちがいに由来している。地球についてのいくつかの合成モデルによると、地球内のK、U、Thの量では、合計しても約19TWのエネルギーにしかならないこと^{6,7}が示されている。これらの観測結果から、ユーリー比(地球表面での総熱流に対する放射性崩壊で発生する熱量の評価指標)は0.4から0.6になる。残りの熱は核の偏析、内核の結晶化、降着エネルギー、あるいは消滅した放射性核種といった潜在的な要因からもたらされているにちがいない。たとえば、地球の核に金属が集積することによって重力エネルギーが増え、熱転換されたエネルギーとか、地球の成長初期に衝突によって加えられたエネルギーなどである。

他のモデルでは、地球の核にはKも存在すると考えられ^{8,9}、より高いユーリー比が予測される。しかしながら、このようなモデルは受容限度を制限する地球化学的な結果をとまなう(文献4を参照)。核-マントル境界を通る熱流束と核内の熱源の性質も、これまで懸案とされてきた考察の対象である¹⁰。カムランドの結果¹はThとUの放射性崩壊によって生じる熱エネルギーの上限値が(信頼水準99%で)60TWであり、代表値が16TWであることを明らかにしたが、この値はモデル予測と矛盾しない。

カムランドの結果は簡単に取得できたものではなく、その解析も容易ではない。きれいな信号にするには、さまざまな「汚染物」をエネルギースペクトルから取り除かねばならない。地球ニュートリノによって生じた可能性のある152個の事象のうち、20~25個の事象だけが地球ニュートリノの真の候補と考えられた。残りの「バックグラウンド」反ニュートリノは近くにある原子炉(全信号の50%以上)と検出器内の放射性の不純物(約28%)から発生している。そのうえ、Kの崩壊によって発生した地球ニュートリノは、エネルギーが既存の検出系で検出できる閾値1.8MeVより小さいため、カムランドではまだ検出されていない。

荒木たちによって報告されたデータ¹は彼らの最初の

実験から得られたものであり、約2年間にわたる計測作業の成果である。カムランドや2006年に運用がはじまるイタリア中部のグランサッソ山地下のBorexino検出器で行われる観測によって、さらに多くのデータが得られ、より高い感度で地球ニュートリノの性質と発生源を検証できるようになるだろう。そして、地球から外側へ放射状に移動する地球ニュートリノの熱流束が、放射性崩壊によって生じた熱流束に正比例していることの確認が大きく前進することになるだろう。しかしながら、そのためには地球内部のK、Th、Uの存在量と分布についての正確な情報が必要である。

この目的を達成するために、最初の詳細なアセスメントとして、カムランド近辺の局地的な地殻とその下のマントル内および地球内部全体に含まれる放射性元素の分布に関する地球ニュートリノフラックスの予測が行われた¹¹。さらに今後、さまざまな場所にある検出器で得られた角度積分したニュートリノフラックス¹²と元素分布地図を組み合わせて、地球全体のK、Th、Uの分布についてより多くのことを伝えてくれる地球ニュートリノ断面図を作成できようになるだろう。それゆえ、将来(反)ニュートリノ検出器を設置するように提案される場所には、K、Th、Uに富む大陸領域とK、Th、Uに乏しい海洋領域の両方が必ず含まれていなければならない。

荒木たちが発表したカムランドによる先駆的な結果¹に、将来行われる研究から得られるデータを加えると、地球のU収支とTh収支に対する基本的な制約条件が得られるだろう(そしてやがてはK収支についても期待される)。また、全エネルギー収支に対する各核種の寄与の度合いも明らかになるだろう。今年後半には、ハワイで行われる会議¹³に素粒子物理学者と地球科学者が集まって、このような活気に満ちた両者に共通の研究領域について討論されることになっている。 ■

メリーランド大学(米)、William F. McDonough

1. Araki, T. *et al.* *Nature* **436**, 499-503 (2005).
2. Eguchi, K. *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **90**, 021802 (2003).
3. Ahmad, Q. R. *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **89**, 011301 (2002).
4. Pollack, H. N., Hurter, S. J. & Johnson, J. R. *Rev. Geophys.* **31**, 267-280 (1993).
5. Hofmeister, A. M. & Criss, R. E. *Tectonophysics* **395**, 159-177 (2005).
6. McDonough, W. F. in *Treatise on Geochemistry* Vol. 2 (ed. Carlson, R. W.) 547-568 (Elsevier, Oxford, 2003).
7. Palme, H. & O'Neill, H. St C. in *Treatise on Geochemistry* Vol. 2 (ed. Carlson, R. W.) 1-38 (Elsevier, Oxford, 2003).
8. Rama Murthy, V., van Westrenen, W. & Fei, Y. *Nature* **423**, 163-165 (2003).
9. Lee, K. K. M. & Jeanloz, R. *Geophys. Res. Lett.* **30**, 2212 (2003).
10. Labrosse, S. *Phys. Earth Planet. Inter.* **140**, 127-143 (2003).
11. Fiorentini, G., Lissia, M., Mantovani, F. & Vannucci, R. preprint at www.arxiv.org/hep-ph/0501111 (2005).
12. Field, B. D. & Hochmuth, K. A. preprint at www.arxiv.org/hep-ph/0406001 (2004).
13. www.phys.hawaii.edu/~sdye/hnsc.html