

特集

ニュートリノ振動で 地球内部の 化学組成を知る

ニュートリノ振動で地球内部の化学組成を知る

ニュートリノ振動——東京大学宇宙線研究所の梶田隆章所長は、その発見によって2015年のノーベル物理学賞を受賞した。ニュートリノが質量を持つ証拠であり、質量はないとしていた素粒子物理学の標準理論に見直しを迫るものだ。そのニュートリノ振動を地球科学に使うという研究が進んでいる。これまで不可能だった、地球深部の化学組成の直接測定を目指す。

武多昭道
高エネルギー素粒子
地球物理学研究センター 助教

地球の中心部は何でできている？

「地球の中心部が何でできているのか、知りたいと思いませんか？」と武多昭道助教。

地球の中心には核がある。内側の内核は固体、外核は液体だ。核の外側にはマントルがあり、表面は地殻で覆われている。こうした地球の内部構造は、地震波の伝わり方を調べることで明らかにされてきた。「地球内部の密度分布は、誤差1%以内という高精度で求められています。しかし、地球内部の化学組成、つまりどの元素がどのくらいの比率で含まれているかは、よく分かっていません。例えば、外核は約90%が鉄とニッケルの合金、残り10%が水素や酸素などの軽元素から成るといわれていますが、それは密度や隕石の化学組成、高圧実験などからの推定にすぎないのです」と武多助教は指摘する。

外核の物質を手に入れて分析できればよいが、地下3000kmもの深部にある物質を採ってくることはできない。では、どうすれば地球深部の化学組成を知ることができるのだろうか。

ニュートリノ振動とは

「これまで地球深部の化学組成を直接測定できる方法はありませんでした」と武多助

教は言う。「私は、ニュートリノ振動を用いるまったく新しい測定手法を考案しました」

ニュートリノは、物質を構成する素粒子の一つである。ほかの物質とほとんど反応しないため、地球さえも通り抜ける。ニュートリノには、電子型、ミュー型、タウ型の3種類がある。電子型がミュー型になったり、ミュー型がタウ型になったりと、ほかの型に変化することがあり、その現象をニュートリノ振動と呼ぶ。

2015年、東京大学宇宙線研究所の梶田隆章所長は、このニュートリノ振動を発見した功績によってノーベル物理学賞を受賞した。梶田所長らは、高エネルギーの陽子や原子核から成る宇宙線が大気中の原子核と衝突してできる大気ニュートリノを、岐阜県の神岡鉱山にある「スーパーカミオカンデ」で観測。すると、地球の裏側から来たミュー型の数は、上空から来たミュー型の数の半分しかなかった。それはミュー型が地球内部を通り抜ける間にタウ型に変化したため、ニュートリノ振動が起きていることを意味する。

ニュートリノ振動を地球科学に使えるか

ニュートリノ振動を用いて地球深部の化学組成を測定するという手法は、どのようにして生まれたのだろうか。「田中宏幸教授から『ニ

ュートリノ振動を地球科学に使えないかな』と言われたのが始まりです」と武多助教は振り返る。「またむちゃなことを言っていると思いましたが(『CHEER news』No.4参照)、できないと言うだけでは納得してもらえません。そこで、諦めてもらえる根拠を探すためにニュートリノ振動について詳しく調べてみると、意外にも地球深部の化学組成の測定に使えることに気が付いてしまったのです」

武多助教が目にしたのは、「ニュートリノがほかの型に変化する確率(ニュートリノ振動確率)は、エネルギーと伝播距離と通過した物質の電子密度で決まる」ということ。エネルギーと伝播距離は観測から分かるので、ニュートリノ振動確率を測定すれば、地球内部の電子密度分布を求めることができる。「実は、地球内部の電子密度が分かれば、その物質の平均化学組成は簡単に求めることができるのです」

原子は原子核と電子から成り、原子核は陽子と中性子から成る。陽子の数を原子番号と呼び、それぞれの元素で固有である。イオン化していない原子では、陽子の数と電子の数は等しい。また、電子の質量は非常に小さいため、陽子の数と中性子の数の合計が原子の質量数になる。「電子密度と物質密度の比は、原子番号と質量数の比に等しくな

ります。その値が、物質の平均化学組成なのです。地球内部の物質密度は地震波の観測から分かっていますから、電子密度が分かれば両者の比は求められます」と武多助教は解説する。「単純なことなのですが、不思議なことに誰も気が付いていませんでした」

図1は、地球を通り抜けていくニュートリノがどのように変化するかをシミュレーションした結果である。ミュー型(赤)が電子型(緑)に変化し、またミュー型に変化して、とニュートリノ振動を起こしながら地球を通過していく。外核が鉄のみの場合(実線)と、鉄に2%の水素が混ざった場合(破線)では、変化する割合が違っていることが分かる。「ニュートリノ振動の確率を精密に測定できれば、水素の含有量を0.1%、酸素の含有量を1%の精度で求めることが可能です」

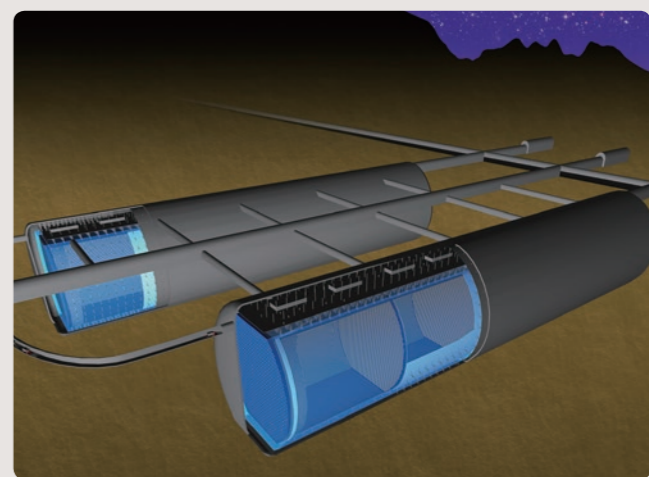
化学組成測定に特化したニュートリノ検出器を

「しかし」と武多助教は続ける。「現在あるニュートリノ検出器では、化学組成の測定はできません」

ニュートリノの観測には、チェレンコフ型検出器が用いられている。ニュートリノがほかの物質と反応すると電子など電荷を持つ粒子が生成され、その荷電粒子が水や氷など透明な媒質中を光速に近い速度で飛行するとき、青白い光を発生する。検出器は、このチェレンコフ光を捉えるのだ。しかし、ニュートリノはほかの物質とほとんど反応しないため、巨大な検出器が必要になる。また、ニュートリノにはさまざまなエネルギーのものがあるが、化学組成の測定には10億~100億電子ボルト(eV)とエネルギーが比較的低いニュートリノを観測しなければならない。「スーパーカミオカンデ」は、そのエネルギーのニュートリノも観測可能だが、体積が小さ過ぎる。南極の氷床を利用してつくられている「IceCube」は「スーパーカミオカンデ」の2万倍と体積は十分だが、観測できるのは100億eV以上のニュートリノである。

図2 次世代ニュートリノ検出器のハイパーカミオカンデ

岐阜県の神岡鉱山に、深さ48m、長さ250mの円筒形のタンクを2個設置する。タンクの体積は100万トンで、スーパーカミオカンデの約20倍に相当。タンクの壁には、チェレンコフ光を捉える大型の超高感度光センサーが9万9000本取り付けられる。2025年稼働予定。武多助教は、ハイパーカミオカンデ用の光センサーの開発にも参加している。(提供:ハイパーカミオカンデ研究グループ)



現在、次世代と呼ばれるニュートリノ検出器の計画が複数進んでいる。IceCubeの中心部に光センサーを高密度に設置することで観測可能なエネルギーを50億eVまで下げようというPINGU計画は、2010年代後半から稼働予定だ。地中海に建設中のKM3NeTでも、エネルギーの低いニュートリノを観測可能なORCAを追加する計画がある。また、「スーパーカミオカンデ」の20倍の体積を持つ「ハイパーカミオカンデ」は、2025年の実験開始を目指している(図2)。「次世代ニュートリノ検出器でも、外核は鉛や岩石ではないという大ざっぱな測定しかできないでしょう。それでも、仮説ではなく観測によって検証することには、大きな意味があると考えています」。さらに「将来的には、化学組成測定に特化したニュートリノ検出器をつくりたい」と意気込む。

地磁気の起源にも迫る

地球深部で特に武多助教が興味を持っているのが、外核だ。「地磁気の起源の謎が、外核の化学組成から解けるかもしれないのです」

地球には約42億年前から磁場が存在していたことが分かっている。鉄は磁石の性質を持つため、地磁気が形成される。そのままで

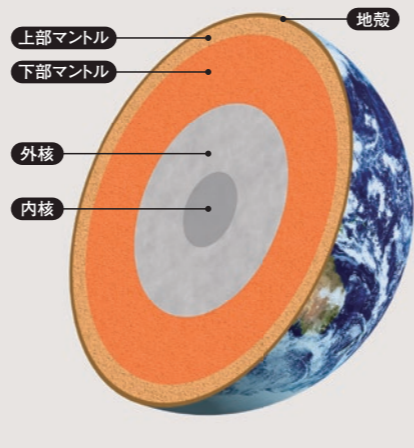
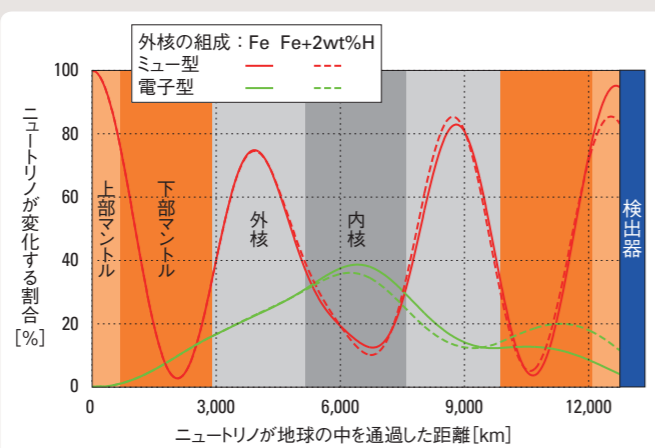
は次第に弱まっていくが、地磁気の中で液体の鉄が対流することで電流が流れて磁場が生み出され、地磁気が維持されていると考えられている。しかし、なぜ液体鉄の対流が40億年以上も続いているのか、よく分かっていないのだ。

地球は中心ほど温度が高くなっている。内核近くで暖められた液体の鉄が上昇して、マントルの近くで冷やされて下降するという熱対流が起きていることは間違いないだろう。ほかに、重い鉄やニッケルが外核の下層にたまり、軽元素が外核の上層にたまるという組成対流があるのではないかとされている。ニュートリノ振動を用いて外核の中で化学組成が異なることが分かれば、組成対流が起きている証拠になり、地磁気の起源の解明が大きく進むことだろう。

「ニュートリノ振動を用いて地球深部の化学組成を測定できると学会などで発表すると、興味を持ってくれる人もいますが、素粒子物理学の研究者も地球科学の研究者も多くは、本当にできるのだろうか、とまだ懐疑的です。まずは次世代ニュートリノ検出器を用いて、この手法で地球深部の化学組成を測定できることを実証しなければ」と、武多助教は表情を引き締める。その結果は、化学組成測定に特化した検出器への足掛かりとなる。

図1 外核の化学組成の違いによるニュートリノ振動確率の変化

40億eVのエネルギーを持ったニュートリノが地球の中心を通過したときのニュートリノ振動をシミュレーションした結果。ニュートリノは地球を通り抜けていく間に、ミュー型(赤)から電子型(緑)へ、またミュー型へと変化していく。実線は外核の組成が鉄(Fe)100%の場合、破線は鉄に2%の水素(H)が混ざった場合で、検出器で捉えられるミュー型と電子型の割合は10%程度変わる。



大学院生の受賞

第23回衛星設計コンテスト(宇宙航空研究開発機構ほか7団体主催、文部科学省・総務省後援)に、修士1年生の長原翔伍君が、「ミュオグラフィによる小惑星の3次元透視」という研究提案で応募しました。応募65作品の中から、1次審査を勝ち抜いた後、2015年11月14日の最終審査で、見事、アイデア大賞を受賞しました。

受賞提案の内容は、「銀河系内で生成される陽子(一次宇宙線)が小惑星と反応するときに生成されるミュオンを用いて、小惑星内部の密度分布を3次元的に細かく描き出す」というものでした。実現すれば、探査機「はやぶさ」が表面サンプルを持ち帰ったイトカワなどの小惑星について、表面だけでなく深部の情報が得られるようになるものと期待されます。

<http://www.satcon.jp/>



◀ 賞状とトロフィーを授与された長原君(中央)。左は平子敬一審査委員長、右は折井武実行委員会会長。

国際ワークショップ開催

2016年1月7～8日に地震研究所で国際ワークショップ「第1回ニュートリノ振動トモグラフィ(1st Neutrino Oscillation Tomography Workshop)」を開催しました。ノーベル賞に輝いたニュートリノ振動の性質を用いて、地球最深部の組成を探ろうとするもので、まだ生まれたての分野にもかかわらず6ヶ国(日・米・仏・伊・露・韓)から20名超の参加があり、ホットな議論が戦わされました。

<https://indico.cern.ch/event/442108/>

特別展示

『ミュオグラフィ——21世紀の透視図法』開催

2015年12月5日(土)から2016年2月21日(日)までJPタワー学術文化総合ミュージアム インターメディアテク2階「GREY CUBE(フォーラム)」にて、特別展示『ミュオグラフィ——21世紀の透視図法』を開催しています。

住所: 東京都千代田区丸の内2丁目7-2 JPタワー / KITTE 2・3階

主催: 東京大学総合研究博物館+東京大学地震研究所

共催: イタリア国立原子核物理学研究所、イタリア国立地球物理学火山学研究所

後援: 在日イタリア大使館、駐日ハンガリー共和国大使館、駒澤大学、新日鐵住金株式会社

入館料: 無料

詳細は下記をご参照ください。

<http://www.intermediatheque.jp/ja/schedule/view/id/IMT0086>



高エネルギー素粒子地球物理学研究センター(CHEER)のミッション

「宇宙線ミュオンやニュートリノ等の高エネルギー素粒子を用いた、火山などの巨大物体の透視」という革新的技術を核に、組織的・有機的な理工学の研究開発及び若手研究者の育成を進める。

CHEER news 第8号

2016年2月発行

発行者
東京大学地震研究所
高エネルギー素粒子
地球物理学研究センター
制作協力
フォントクリエイト
(デザイン: 酒井デザイン室)

問い合わせ先
〒113-0032
東京都文京区弥生1-1-1
東京大学地震研究所
高エネルギー素粒子
地球物理学研究センター
広報担当
Eメール
Koho-cheer@eri.u-tokyo.ac.jp
ホームページ
<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/CHEER>

INFORMATION

人事

- 西山 竜一
辞職(スイス・ベルン大学研究員へ)(2015年8月16日)
- Carsten Rott
長期招聘研究員(2016年1月4日～3月31日)

大学院進学の見学

地震研究所CHEERの研究室・研究設備を用いて、東京大学の大学院生として高エネルギー素粒子地球物理学の研究を行うことができます。CHEERの教員は理学系研究科の大学院指導教員として、指導に当たります。

研究室の見学、およびCHEER在籍の大学院生との面談も可能です。本ページ左下に記載されている広報担当まで、メールで申し込んでください。夏休みの一般公開・オープンキャンパス(ともに2016年8月上旬)などの時期もご活用ください。CHEERは、伸び盛りのあなたを待っています!