

CHEERnews

素粒子で地球を覗く



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
Center for High Energy gEophysics Research

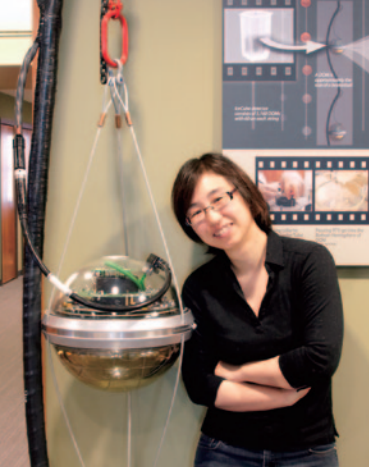
No.3



特集

南極のIceCubeで 地球を覗く

南極のIceCube



↑ 左はIceCubeの検出器DOM

南極点に近いアムンゼン・スコット基地の隣に、氷床を利用した1km³の巨大な観測装置「IceCube」がある。^{アイス キューブ}
IceCubeが観測するのは、物質を構成する基本粒子の一つ、ニュートリノだ。保科琴代 特任研究員は、IceCubeが捉えたニュートリノの観測データから地球内部の密度構造を明らかにしようとしている。

保科琴代 高エネルギー素粒子地球物理学研究センター 特任研究員

南極の氷床につくられた ニュートリノ観測装置

保科琴代 特任研究員(以下、研究員)は、アメリカのウィスコンシン大学マディソン校に研究拠点を置いている。そこに、アメリカや日本など10ヶ国が参加する国際共同実験プロジェクト「IceCube」の本部が置かれているからだ。

「IceCubeは、南極の氷床を利用した体積が1km³もある巨大なニュートリノ検出器です。私たちは、IceCubeを使ってニュートリノを観測することで、レントゲン撮影のように地球を透視して内部構造を明らかにしようとしています」と保科研究員は解説する。

IceCubeは、氷床に86本の孔を掘り、深さ1450～2450mにそれぞれ45～60個ずつ、合計5160個の検出器が設置してある(表紙、図1)。検出器はDOM(Digital Optical Module)と呼ばれ、光電子増倍管とデータ集積回路、電源、磁気シールドが耐圧球の中に収められている。ニュートリノは電荷を持たないが、ほかの物質と反応すると電

子やミューオンなど電荷を持つ粒子が生成される。荷電粒子が水や氷など透明な媒質を光速に近い速度で飛行すると、チェレンコフ光という青白い光が発生する。それを検出器で観測することで、ニュートリノを捉えるのだ。ニュートリノは地球に大量に降り注いでいるが、物質との反応頻度はとても低く、その検出はとても難しい。そのため、ニュートリノを捉えるには、巨大な観測装置が必要になる。

保科研究員は、「実は、IceCubeの本来の目的は地球の内部構造を見ることではありません」と言う。「地球にはとてもエネルギーの高い宇宙線が宇宙から降り注いでいるので、その中高エネルギーのニュートリノもあるはずだと考えられています。発生源として遠方の銀河にある活動銀河核やブラックホールが候補に挙がっていますが、まだ確かな証拠はありません。宇宙から飛んでくる高エネルギーニュートリノを観測し、その発生源を明らかにすることが、IceCubeの本来の目的であり、私もその研究をするために2003年からプロジェクトに参加していました」

ニュートリノで地球を透視する

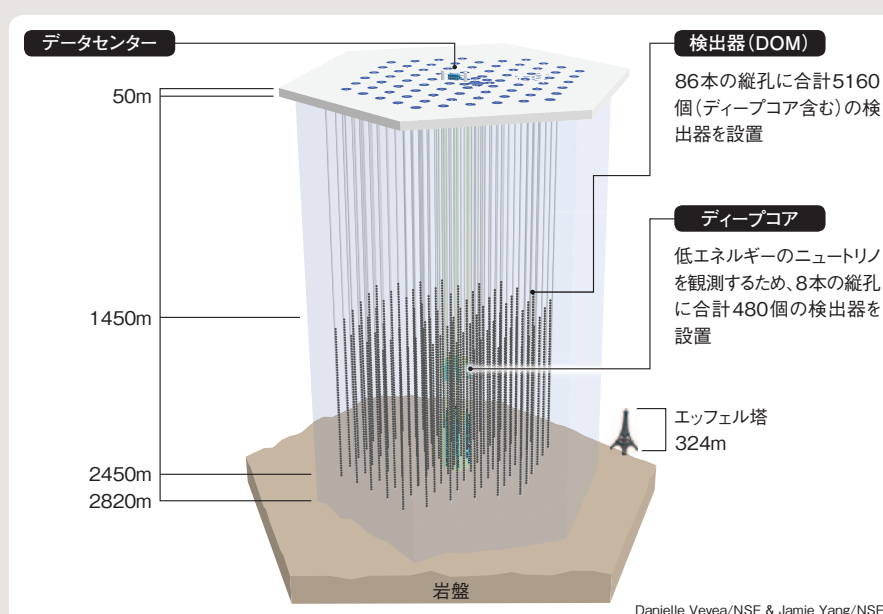
「IceCubeで地球を透視できるというアイデアを出したのは、高エネルギー素粒子地球物理学研究センター(CHEER)の田中宏幸さんです」と保科研究員。田中教授は、素粒子の一つであるミューオンを用いて火山の内部構造などを明らかにするミュオグラフィを、世界に先駆けて成功させた。ミューオンはほかの物質と反応しにくいので火山も通り抜けるが、密度が高いところを通ると数が減る。ミューオンが飛来した方向と数を調べることで、ミューオンが通ってきた場所の平均密度が分かり、火山の内部構造を描き出すことができるのだ。

「ニュートリノは、ミューオンより物質との反応頻度が小さいため、地球も通り抜けます。それでも密度が高い部分を通過すると数が減ることから、地球内部の密度構造が分かると、田中さんは考えたのです」(図2)

2008年、田中教授の研究提案がIceCubeプロジェクトに承認された。「そのころ私はポスドク研究員の契約終了が迫っていました。身の振り方を考えていたところ、田中さんから一緒にやりませんかと声を掛けてもらったのです。地球科学の知識はまったくなかったので、戸惑いました」。決めた理由は?「地球を透視するなんて面白そうじゃないですか。しかも実は、やることはそれまでとあまり変わりません」

陽子や電子などから成る宇宙線が地球の大気の原子核と衝突すると、ミューオンやニュートリノなどに姿を変える。IceCubeの観測データには、そうしてできた大気ニュートリノも含まれている。「宇宙から来るニュートリノを捉えたい私たちにとって、大気ニュートリノは邪魔者です。そのため、大気ニュートリノのデータは取り除くか、シミュレーションと比較して、宇宙から来るニュートリノから分別します。地球の内部構造を調べるには、この大気ニュートリノを使います。捨てていたデータを使って新しいことが分かるのです」

図1 IceCubeの構造



Danielle Vevea/NSF & Jamie Yang/NSF

beで地球を覗く

図2 ニュートリノで地球内部を透視する仕組み

ニュートリノは密度の高い部分を通ると数が減る。地球内部を通過してきたニュートリノの数と飛来方向を調べることで、地球内部の密度構造が分かる。

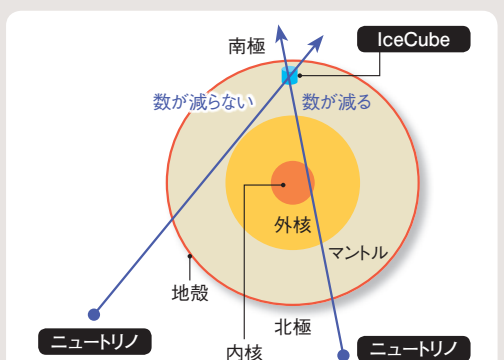
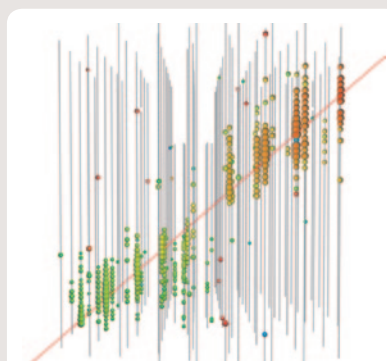


図3 IceCubeの観測データの例

ニュートリノが物質と反応して生成した荷電粒子が発生するチェレンコフ光を、検出器が捉えている。観測データからニュートリノのエネルギーや飛来方向を再構成する(赤線)。



地球の中心には本当に核がある？

地球は、内側から核、マントル、地殻という層構造をしているとされている。しかし保科研究員は、「私たちが今知っている地球の内部構造は、地震波などの観測から間接的に得られたもので、温度や化学組成などさまざまな仮定が入っています。大きな誤りはないと考えられていますが、本当はどうなっているのか直接調べないと、科学者としては落ち着きません」と言う。「ニュートリノの観測は唯一、仮定を入れずに地球内部の密度構造を直接明らかにできる手法です。それによって私たちは初めて、地球の中心には核がある、と確信を持って言えるようになるのです」

大気ニュートリノにはさまざまなエネルギーのものがおり、10TeV(テラ電子ボルト。テラは 10^{12})未満のニュートリノは地球を通り抜けてしまう。100TeV以上のニュートリノは、地球の中心を通るような角度では通り抜けることができない。「つまり、IceCubeで下から飛んできた10～100TeVのニュートリノを観測すれば、地球内部の密度構造を知ることができるのです。しかし、10～100TeVというのは大気ニュートリノとしてはエネルギーが高く、もともと数がとても少ないのです。地球を透視するには、巨大なIceCubeを使っても長期間の観測が必要です」

10年後、地球の透視図を手にする

これまでに、2008年から1年分の観測データの解析が終了。まだ建設中で86本のうち40本の検出器だけが稼働していたときのものだ。解析ではまず、検出器が捉えたチェレンコフ光のデータからニュートリノのエネルギーや飛来方向を再構成する。そして、エネ

ルギーが10～100TeVで、地球内部を通過してIceCubeに到達したニュートリノを選別していく。

「選別の結果、200個ほどのニュートリノのデータが残りました。このデータを詳しく解析しましたが、核とマントルの密度の差は見えませんでした。まだまだニュートリノの数が足りないのです」と保科研究員(図3)。

現在は、2009年以降の観測データの解析を進めているところだ。IceCubeは2010年にすべての検出器が完成した。「データを10年間蓄積すれば、核の姿が見えてくるでしょう。しかし、もっと短期間で、マントルと核の境界など細かい構造まで見たい。今は選別のときに疑わしいデータは捨てています。使えるデータまで捨てていないかを検証し、データを増やす努力をしているところです」

地震波を用いて地球の内部構造を探っている研究者も、IceCubeの成果に注目している。「核やマントルの化学組成を知りたいのだがIceCubeで分かりませんか、という質問をよく受けますね」と保科研究員。「ニュートリノ振動の物質効果を観測すれば、そのヒントを得ることができます」

ニュートリノは電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノという3種類があり、互いに姿を変える。それがニュートリノ振動だ。この振動パターンが物質によって影響を受ける効果を、物質効果という。「ニュートリノ振動の物質効果の観測には1～10GeV(ギガ電子ボルト。ギガは 10^9)程度の大気ニュートリノを使います。IceCubeで観測できるのは10GeV以上なので、ニュートリノ振動における物質効果を十分な精度で観測できません。しかし現在、IceCubeの一部に検出器を高密度に追加設置することで1GeVのニュートリノも観測できるようにしようという計画が推

進されています。実現すれば、核やマントルの化学組成について、これまで私たちが手にしたことがなかった情報を得ることができるでしょう」

10ヶ国が参加する国際プロジェクト

IceCubeは10ヶ国、38の大学や研究機関から200人以上が参加する巨大な国際プロジェクトである。「地震研がアソシエイトメンバーとして加わったのは、すでに建設が進んでいた2008年末です。これはとても異例なこと」と保科研究員は言う。「巨大な実験装置を使ったプロジェクトでは、一番大変なのは設計や建設の段階です。観測が始まったところに使わせてほしいと言っても、簡単に受け入れてもらえるものではありません」

では、なぜ認められたのだろうか。「IceCubeは物理学の実験装置です。それを地球科学に使うという点が、プロジェクト側としても魅力的だったのでしょう。異なる視点が加わることでプロジェクトの存在意義も増します。そして、宇宙の謎を知りたいという人もたくさんいますが、自分が暮らしている足元、地球の中がどうなっているのかを知りたいという人はもっと多い。IceCubeプロジェクトには多額の資金も必要です。より多くの人の関心に応えることは、とても重要です」

この研究の面白さは？「IceCubeは巨大な装置ですが、解析はとても細かい作業の連続です。終わりが見えず、途方に暮れることもあります。でも、あちこちに落ちている小さな証拠を一つ一つ集めて考え、地球の真実の姿に迫っていく。その過程は探偵のようでワクワクします」

人類が初めて手にする地球の透視図。そこにはどんな姿が描かれているのだろうか。

TOPICS

7層式カロリメーターが実地観測開始

『CHEER news』1号で紹介した多層式カロリメーターを薩摩硫黄島に移動し、6月中旬から火道内のマグマ対流の観測を実施します。

国際シンポジウム

●IAVCEI(国際火山学・地球内部化学協会)の
学術総会

7月20～24日の予定で、鹿児島市で開催されます。ミュオンを用いた火山学の分科会も開催されます(英語のみ)。詳しくは<http://www.iavcei2013.com>をご覧ください。

●MNR2013「ミュオン、ニュートリノによる
素粒子地球物理学とその応用」

7月25～26日に東京都内で開催されます。詳しくは<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/CHEER>をご覧ください(6月下旬掲載予定)。

一般公開開催

地震研究所の一般公開が8月7日に行われます。詳しくは<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>をご覧ください(7月掲載予定)。

大学院進学者の進路相談

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。8月の一般公開の前後などの時期もご活用ください。

共同研究の募集

「共通モジュール開発を通じたミュオグラフィー測定要素技術の体系化」および「地球ニュートリノの研究(仮題)」という2課題を、地震研究所の共同利用の枠組み(特定共同研究[B])で、予定しています。このテーマについて共同研究を希望する方のエントリーを歓迎致します(締め切りは2013年10月31日ごろ)。エントリー期間、資格などの詳細については<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sharing>をご参照の上、奮ってご応募ください(WEB申請)。

高エネルギー素粒子地球物理学研究センター(CHEER)のシンポジウム

「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3号

2013年6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
フォトンクリエイト
(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

●田中宏幸 昇任(准教授→教授)
(2013年5月1日)

COVER

オーロラを背景にした、南極の「IceCube」データセンター(NSF/F. Pedreros)。氷床を掘削してニュートリノ検出器が設置されています。IceCubeは、米国立科学財団(NSF)の支援を受けています。

CHEER 豆事典 ③

宇宙線ニュートリノ、どうやって捉える？ チェレンコフ放射(放射)の巻

本号で紹介しているニュートリノは、電荷を持たない中性粒子なので、直接捉えることができません。そこで、まずニュートリノをミュオンなどの電気を帯びた荷電粒子に変換します。水や氷などの物質中を通過する荷電粒子の速度が、その物質中を光が伝わる速さ(=真空中の光速÷物質の屈折率)を超えると、その荷電粒子の飛跡を波源とする光が放出されます。この現象をチェレンコフ放射、また光をチェレンコフ光と呼んでいます。チェレンコフ光としては、原子炉の燃料が入ったプールで見える青白い光が有名です(図)。

実際には、光速に近い速度で走っているミュオンが屈折率1.33の水を通過ときに放出する光子数は1cm当たり165個ほどで、私たちが普段目にする何兆個もの光子数と比べると極端に少ないことが分かります。これを光電子増倍管という特殊な装置で電気信号に変換して捉えます。

→アメリカ・アイダホ国立研究所内にある新型実験炉で観測されたチェレンコフ放射(Matt Howard作成。クリエイティブ・コモンズ 表示-継承 2.0 一般ライセンスのもとにWikipedia掲載画像を利用)

