

The neutrino and the whale

ニュートリノとクジラ

Nicola Nosengo

Nature Vol. 462(560-561)/3 December 2009

深海での素粒子検出をめざす計画が、マッコウクジラの生息調査という意外な成果に結びつき、海洋生物学者と素粒子物理学者の間に新たに協力関係が生まれた。

2005年から2006年にかけて、イタリアのシチリア島東部にあるカタニアの港では、港湾労働者や船乗りたちが、いぶかしげに2人のよそ者を眺めていた。彼らは、毎月およそ1回、棧橋の端にある木造の大きめの小屋までやってきて扉のかぎを開け、小さい箱を取り出した後、またかぎをかけて翌月やってくるということを繰り返していた。

地元の人々は、この2人の男が何をやっているのか疑問を抱かずにはいらなかった。尋ねると、2人のよそ者は、何も心

配しなくていいと地元民を安心させた。2人は科学者だったのだ。2人の名前は、Giorgio RiccobeneとGiovanni Pavan。Riccobeneはカタニアにあるイタリア国立核物理学研究所(INFN)南部研究施設の素粒子物理学者、Pavanはイタリア北部にあるパビア大学の海洋生物学者である。彼らが回収していた箱はコンピューターのハードディスク・ドライブであり、沖合28キロメートルの地中海海底に置かれたハイドロフォン(水中聴音機)とよばれる水中マイクから、海中ケーブルを経由して送られてきた音響データが数時間分保存されていた。Riccobeneは、ハイドロフォンを使って、深宇宙からやってくるニュートリノとよばれる素粒子を検出できることを実証しようと考えており、Pavanは、Riccobeneを手助けして記録データの背景ノイズの処理をするために来ていた。

ところが、RiccobeneとPavanが音響データを聞いて見つけた事象のおかげで、翌年2人は役割を交代してこの港に戻ってくるようになった。物理学者のRiccobeneが生物学者のPavanを手伝う役回りとなり、彼らの調査ターゲットはニュートリノではなくマッコウクジラになったのである。

この予想外の展開になった経緯の発端は、Riccobeneがニュートリノ地中海観測所(NEMO)にかかわった10年ほど前にさかのぼる。NEMOは、海洋でニュートリノ観測をしたいと考える、INFNやそ

の他の研究機関の研究者およそ100人からなる共同研究組織である。宇宙から飛来するニュートリノは地球に絶えず降り注いで通り抜けており、超新星など遠く離れたその発生源について、計り知れないほどの情報をもたらしてくれる。しかし、ニュートリノは電荷をもっておらず、質量もゼロに近い。したがって物質と相互作用することは非常にまれであり、そのため、これを研究するには巨大な検出器が必要で、その規模は大きいほどよいとされる。それゆえ、NEMOの計画案では、シチリア島南部にあるパッセロ岬沖の深度3500メートルの海域で、2立方キロメートル以上の空間に数千個の光検出器を配置することが必要だとしている。この検出装置で、水中に飛来したニュートリノがごくまれに水1分子と相互作用して光のパルスを発するのをとらえようというのだ。

Riccobeneは、この光検出能力を高める方法について研究していた。「理論上、高エネルギーのニュートリノは、検出可能な音波も発するはずだ。水中では光よりも音のほうが遠くまで伝わるので、音響検出装置を使うことでニュートリノ現象をとらえられる確率が高まると思われたのです」と彼はいう。これがうまくいくかどうかは誰にもわからなかった。しかし、いずれにしてもNEMOの計画では、光検出器の設置位置を決めるためにハイドロフォンの使用も必要だとされており、Riccobeneが2002年に海洋ノイズ検出実験(ONDE)

Giorgio Riccobene :
素粒子物理学者。



Giovanni Pavan :
海洋生物学者。



という予備実験の監督役に任された。ONDE は、カタールニア東方にある NEMO の深度 2000 メートルのテスト海域で行われることになった。

ノイズ対策

Riccobene は自ら研修のためにパリに出かけ、音響によるニュートリノ検出に関するワークショップに参加した。しかし、すぐさま何か足りないと感じた。「背景ノイズについての話題がまるでなかったのです。深度が深ければ背景ノイズは非常に小さくなると、誰もが当然のように考えていました。しかし、それを実証した発表済みのデータはありませんでした」と彼は振り返る。Riccobene はカタールニアへ戻ると、ちょうどタイミングよく、地元的环境保護団体の主催で Pavan が講演していることを知った。Pavan は、1980 年代初めに海生哺乳類の発する音声をデジタル録音した草分け的存在であり、この分野では世界一流クラスの専門家の 1 人だと認められていた。彼が Riccobene の疑問に答えてくれる人物であることは明らかだった。つまり、深度 2000 メートルの深海で背景ノイズはどれくらいの大きさなのか、という疑問である。

しかし信頼できるデータはほとんどなく、Pavan は簡単に答えられなかった。「深海で音を記録するシステムが使えるようになったのは、ほんの 2、3 年前のことなのです」と彼はいう。Pavan が確信をもっていえたのはせいぜい、深海はニュートリノ物理学者が予想しているような無音の世界では到底ない、ということだった。

「最初、私は愕然としました」と Riccobene はいう。Pavan が推測したノイズの量は、ニュートリノ現象で予測される量よりはるかに大きかったのだ。だからといって必ずしも、ニュートリノ検出が実現不可能になるわけではないと、彼はいう。しかしこれは、除去しなければならぬ背景ノイズを正確に突き止めるまでは、NEMO の研究チームがニュートリノ信号を分離で



素粒子のニュートリノを検出するために設計された装置が、マッコウクジラのコミュニケーションをとらえた。

きる希望はみえてこないことを意味した。

Riccobene は Pavan に、ONDE チームでシチリア沖海底の音響環境を長期観測するプロジェクトに参加してくれるよう頼んだ。これほど深い海中での音響観測は、初めての試みだった。Pavan は参加し続けるだけの資金がなかったが、とにかく承諾した。Riccobene のおかげで、Pavan はほかでは決して到達できない深度までアクセスできるようになり、深海というほとんど未知の音響環境を研究できるようになったのである。Pavan が特にやりたいと思ったのは、そこでの「騒音公害」の程度を測定することだった。なぜなら、そうした騒音は、深海に潜る多くのクジラ類が座礁する原因になっている可能性があるからだ。また彼は、音響記録の中にクジラ類の音声も含まれているだろうと予想した。

Riccobene と彼の研究チームは、2005 年 1 月までに、NEMO の実験サイトに高感度ハイドロフォンを 4 個設置し、カタールニアの栈橋にある実験小屋へデータを送る光ケーブルを敷設した。直後からデータが送られ始め、そして 2005 年 4 月、Pavan は最初の記録データの試聴を始めた。

すると、Pavan が予測していたように、低く一定の背景ノイズが聞こえた。そのほとんどは自然の水の動きや船舶の航行で生じたものだった。それに加えて、時おり、

大型船のスクリュー音やソナーの発信音、果ては何かの爆発音といった、音源を特定できる音が集中して聞こえた。しかし、彼の注意を引いたのは、カチカチという、短く規則的に繰り返す連続的な「クリック音」だった。これは、マッコウクジラが呼吸器系で空気を圧縮して発する特徴的な音である。「クジラたちはおそらく、そうした音波を使って深さを測ったり、獲物の位置をつかんだりしています。コウモリがやっているのと同じように反響音を測定しているのでしょう」と Pavan は話す。時おりクリック音が聞こえるのは当然のことだった。この音は動物が発する音の中でも最も大きい部類に入り、水中で最大 20 キロメートル先まで届くからだ。意外だったのは、このクリック音が毎月、記録データに現れ続けたことである。「マッコウクジラはこの海域では非常にまれだと考えられています。公表済みのデータでは、個体数が非常に少ないことが示唆されているのです」と Pavan はいう。しかし、こうした調査は、目撃情報や海面近くでの音響記録に基づいているのが普通である。それに対して、ONDE の記録データが採取された深海域は、マッコウクジラが獲物を求めて潜り、1 日の大半を過ごす場所である。そのため、この海域では実は、従来考えられていたよりもマッコウクジラの個体数がかなり多いのではないかと思われた。

Riccobene と Pavan は、2006 年 11

月まで音響記録を取り続けた。その後、ハイドロフォンは撤去され、代わって光検出システムの試作機が設置された。このシステムはハイドロフォンと同じケーブルに接続された。この時点までに2人は、600時間を超える記録データを集めた。残念ながら、ニュートリノはいっさい見つからなかったが、満足していた。「このとき、私の興味は、深海での音響記録が実行可能であって、高品質データが得られることを実証することにありました。この段階では、私はニュートリノが検出できるとは期待していなかったのです」とRiccobeneは話す。その一方でPavanは、音響データから、背景ノイズ発生源として単純にリストアップされたもの以外にも、多くの情報を得られることに気づいた。

しかし、マッコウクジラの音声を聴き取ることと、その個体数を数えて信頼できる統計資料をまとめることは別物である。原理的には、1個のクリック音の音響的な特性から、その個体のサイズと性別を知ることができる。また、海面からのクリック音の反射も音響記録に表れている場合には、その個体の位置と、上昇または下降の軌跡を推定することが可能である。「しかし、これを行うには、ソフト用アルゴリズムを開発するか、もしくは長時間かけて大変な手動計算をすることが必要です」とPavanはいう。彼が同僚とともに2006年以降行ってきたのは、後者の手動計算だ。彼らにはソフト用アルゴリズムにかけられるほどの資金がなかったのである。

しかしそれでも、統計学的な全体像が徐々に見え始めているとPavanはいう。マッコウクジラは、記録をとった日数の半分で観察されている。これは既存の予測個体数ではちょっと説明がつかない。Pavanと同僚たちは、音響記録の中に季節性パターンや社会的行動を知るヒントも見つけ出すことができた。このデータを彼らは2009年9月にパビアで開催された会議で発表した。「マッコウクジラは春と秋により多く現れます。また、同時に移動

する個体が多く、おそらく同じ群れに属しているのでしょう」とPavanはいう。時には音響記録の中に、「コーダ」とよばれる特定パターンの短い連続クリック音が含まれていることもある。こうした音声は、通常は単独行動している雄たちが雌の集団の周りに集まったときにだけ発せられる。コーダは方言として機能しているらしく、個体群が異なると使用するコーダも異なっている。「地中海で最もよくみられるパターンは、3+1の型です。これはクリック音がすばやく3回連続し、その後1つが追加されるパターンです」とPavanは説明する。しかし、音響記録では2+1の型が予想より頻繁に現れることがわかった。これは、地中海海盆の外から一時的に入ってくる通りすがりのクジラがいることを物語っているのかもしれない。

深海の攪乱

一方でRiccobeneは、今ではニュートリノ物理学とほぼ同じくらい生物音響学を熱心に研究しており、欧州海洋観測所ネットワーク(ESONET)を巻き込んで、研究継続のお膳立てをした。ESONETは欧州の共同研究組織で、地中海にも深海観測施設のネットワークを構築しようとしている。ESONETは活動の重点を地球物理学と気候学に置いているが、LIDO(Listening Into the Deep Ocean)とよばれる新しい形のONDEプラットフォームに資金提供することに同意した。LIDOは3年間観測を続ける予定で、クジラの音声を聴き取るために、2010年3月にハイドロフォン4個一式をカタニア沖に再び設置して始動する。今回は、継続的な記録セッションを最大1年間にわたって続け、アルゴリズムを使って、保存すべきデータと無視すべきデータを選別する予定である。正方形の各頂点に置いた4個のハイドロフォンで音響記録をとり、詳細に比較解析することで、検出したそれぞれのクジラ個体のサイズを算定することができる。また、マッコウクジラの個体数をより正確に見積もった

り、季節性の習性について情報を得たりすることができる。プロジェクトでは、将来的には、ジブラルタル海峡に近いカディス湾など、他の場所でも同様の観測ステーションを設置する構想がある。「我々の重要な疑問の1つは、地中海のマッコウクジラが1つの閉鎖個体群なのか、それとも外海の個体群とやりとりがあるのかどうかを解明することです」とPavanは話す。

Riccobeneと同僚たちは、結局現在でも、大規模になったNEMO観測所で素粒子物理学の研究を続けている。すべてが開発者たちの希望どおりにいけば、今後10年以内に観測所がパッセロ岬沖合に設置されるはずである。拡大したこのプロジェクトには音響観測システムも含まれる予定である。これによってニュートリノは検出できないかもしれないが、少なくとも検出器の設置位置を決めることはできる。今ではRiccobeneも、深海にはたくさんの背景ノイズがあることを知っている。しかし、ニュートリノを音響的に検出できるかどうかをはっきりさせるにはもっとデータが必要であり、またそれには、さらなる研究資金の獲得が必要だと、彼は考えている。また、NEMOで得られたデータは、生物学者や地震学者だけでなく、興味をもったすべての研究者と共有される。Pavanももちろんその中の1人であり、マッコウクジラだけでなくナガスクジラやオウギハクジラについてもぜひ調べたいと考えている。これらのクジラの発する音声は低周波で、深海では非常によく聞こえる。「このような深海底は、地球の中でも最も知られていない領域の1つであり、多くの研究者にとって研究材料の宝庫なのです」とRiccobeneは語る。「我々が深度3500メートルの海底にブロードバンド回線を敷設すれば、そこで得られるデータを求めて研究者が大勢集まってくると思いますよ」。(船田晶子 訳)

Nicola Nosengoは、ローマを拠点に活動するフランスのサイエンスライター。