



## 従来の宇宙線の生成モデルが覆るか！？ 幽霊粒子ニュートリノの観測から新たな発見 ～最高エネルギー宇宙線の源とは何か 解明へ一歩前進～

千葉大学ハドロン宇宙国際研究センターのIceCube実験国際共同研究グループ（石原安野准教授、吉田滋教授ら）は、宇宙からくる超高エネルギーニュートリノの数がこれまでの予想より少ないことを発見しました。この発見は、宇宙の高エネルギー物質の放射（UHECR:注1）やその発生源となる天体（UHECR起源天体）の正体について、従来の定説を覆すものになります。

### ■背景 ～最高エネルギー宇宙線の謎にニュートリノ実験から迫る～

宇宙には宇宙線と呼ばれる粒子が飛び回っているものの、その高いエネルギーを持つ宇宙線がどこでどう作られているかは長年の謎でした。その謎を解明するために研究者たちは宇宙線が宇宙空間に飛び出す時に発生させる「ニュートリノ」に注目しました。あらゆるものを幽霊のようにすり抜ける性質があるニュートリノを捕まえることによって、宇宙線が作られている場所や仕組みがわかるため、世界中の研究者が追い求めています。

今回対象とした宇宙線(粒子)の中で最も高いエネルギーを持つUHECRも、光をつかった望遠鏡による直接観測が非常に難しく、どこから来ているのか、何からできているのか等もわかっていません。これらの謎の解明の切り札とされているのが「超高エネルギーニュートリノ(注2)」です。ニュートリノは遠方宇宙(注3)から直接地球にも届きます。地球上で観測できる「超高エネルギーニュートリノ」の流量から、遠方宇宙のUHECR起源天体の分布を読み取り、ここから天体種類の同定を試みています。

### ■本研究の成果

今回、「宇宙の各時代における若い星の分布」「遠方に存在することが知られる明るい電波銀河の分布」をそれぞれ表す天体進化モデルと、南極にある世界最大のニュートリノ検出器であるIceCube(注4)を使った実験で取得された7年分の超高エネルギーニュートリノの観測データとを比較し、UHECR起源天体に迫りました。(詳細は次頁以降)

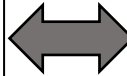
その結果から、世界で初めてUHECRやUHECR起源天体の正体について、従来考えられてきた定説を見直す必要があることが示されました。



南極にあるIceCubeプロジェクト観測所

#### 【従来の定説】

- ・UHECR起源天体は遠方宇宙に多く存在している。
- ・UHECRを構成するおもな物質は「陽子」である。



#### 【今回の解析結果】

- ・UHECRが「陽子」だとすると、UHECR起源天体は我々の近傍宇宙にあるはずである。
- ・UHECRが「重い原子核」であるとすれば、本解析結果との矛盾がない。

### ■今後の展望

遠方宇宙にあるとされていたUHECR起源天体は、実は我々のご近所にあるのでしょうか？ 現在、千葉大学ハドロン宇宙国際研究センターでは、IceCubeの5倍超の検出感度を持つIceCube-Gen2や、超高エネルギーニュートリノに特化した電波ニュートリノ検出器ARAを開発しています。これらの次世代検出器が完成すれば、さらなる高統計解析が可能となり、この長年にわたる最高エネルギー宇宙線の大きな謎が解明されることが期待されています。

本研究結果は「Physical Review Letters (PRL)」(アメリカ物理学会出版)2016年12月9日版に掲載されます。また、本論文はPhysical Review Letters誌が選ぶ特に重要な論文として「PRL Editors' Suggestion」に選出されPRLのホームページで特集されます。



本件に関するお問い合わせ・取材のお問い合わせ  
千葉大学ハドロン宇宙国際研究センター 石原安野 (いしはらあや)  
電話 043-290-2760 メール aya@hepburn.s.chiba-u.ac.jp

## 注釈解説

**注1) UHECR:** 宇宙に存在する粒子の中で最も高いエネルギーを持つ最高エネルギー宇宙線。 $10^{18-20}\text{eV}$ ( $=1-100\text{EeV}$ )という、スイスの国境にある世界最大のLHC加速器が作り出す陽子のエネルギーの1億倍ものエネルギーを持つ。

**注2) 超高エネルギーニュートリノ:** UHECRが宇宙に広がる背景放射光や天体内外の光やガスと相互作用を起して生み出すもの。親UHECRの平均5%のエネルギー(つまり $5 \times 10^{16}\text{eV}$ - $5 \times 10^{18}\text{eV}$ 、または $50\text{PeV}$ - $5\text{EeV}$ )を持ち、宇宙から真っすぐに伝搬してくる。宇宙背景放射に遮られることなく直接届くため、望遠鏡で見えない遠い宇宙の様相を知るための手がかりとなっている。

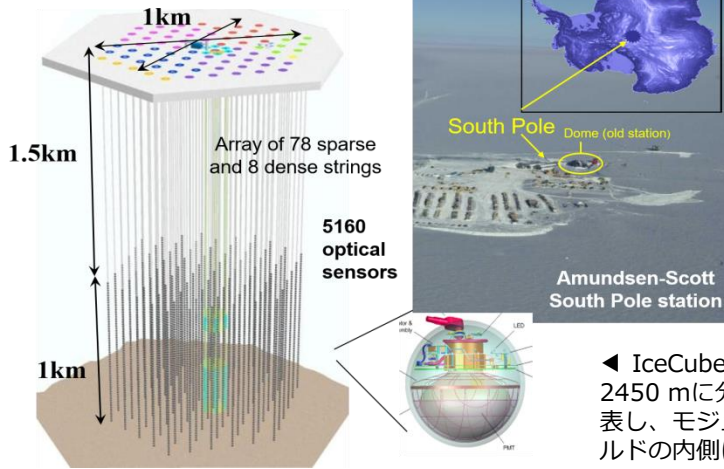
**注3) 遠方宇宙:** 光の速さは有限であるため、我々が宇宙を観察するとき、対象が遠方にあるほど現在より遡った時間の(=現在と比べて若い頃の)状態を見ていることになる。また、宇宙にある様々な天体は、宇宙の初めから現在まで同じように存在しているわけではなく、例えば原始銀河のような、宇宙が若い時期に多く生成され、宇宙が年を取るにつれ少なくなっていくとされている天体がある。これらのことより、遠方宇宙での天体の分布が読み取れば、それらがどの時代に活動的な天体なのかかわかる。

**注4) IceCube実験:** 約5千個の光検出器モジュールと南極氷河からなる世界最大のニュートリノ検出器実験。日本の神岡鉱山にあるスーパーカミオカンデなどと似た手法でニュートリノを検出する。ただし、容量はスーパーカミオカンデの15000倍に達し、この大きさを武器とした超高エネルギーニュートリノの検出における高い感度が特徴。2004年に建設開始、2011年に検出器が完成。約300名からなる国際共同実験。

<http://icecube.wisc.edu/>

南極点にある世界最大一立方キロメートルの容量を持つ

## IceCube検出器



▲IceCubeの基地

◀ IceCube検出器の模式図: 南極氷河中地下1450 m から2450 mに分布する黒い点の一つ一つが光検出器モジュールを表し、モジュールは球形の耐圧ガラス内にファイア状の磁気シールドの内側に光電子増倍管が下向きに設置されている。

## ■ 研究手法と成果 (詳細)

今回、IceCube実験によって取得された7年分のデータを解析し、超高エネルギーニュートリノ探査を行いました。2つの異なる天体進化のモデルと観測されたデータとを比較し、データを最も良く描写する進化モデルを選別することでニュートリノ流量の観測からUHECR起源天体に迫りました。

今回解析を行った7年分のIceCubeデータからは、図1、図2に示した2つのPeV領域のエネルギーを持つニュートリノ事象が観測されました。この2事象は2.6PeVと約0.7PeVのエネルギーを検出器内に放出していますが、UHECRの相互作用によって生み出される10PeVを超えるエネルギーのニュートリノとしては、放出エネルギーが低すぎます。これらがUHECR起源であるためには、より高いエネルギーの事象も一緒に観測されていなくてはモデルと矛盾します。つまり、これらはUHECR起源ではなく10-100PeVのエネルギーを持ついわゆるknee領域の宇宙線起源天体から来たと考えられます。ここから、今回の解析によってニュートリノ観測によるUHECR起源天体に対する強い制限をつけることが出来ました。

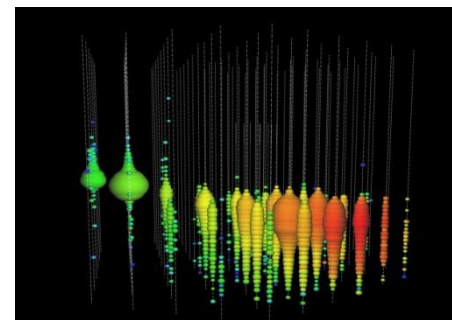


図1: 本解析で検出した2事象のうちの一つの上向きトラック事象。これまで観測された中で最もエネルギーの高いニュートリノ事象。2.6PeVものエネルギーがIceCube検出器内に放出された。

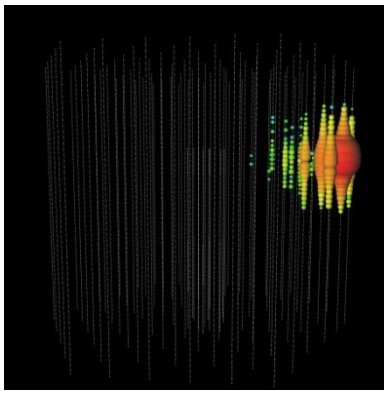


図2：本解析で検出した2事象のうちの一つで2012年11月16日に検出器の端っこで起こった上向き粒子シャワー事象。これまでのIceCubeデータの解析によって観測された中で4番目にエネルギーの高い事象で、上向きの粒子シャワー事象の中では最もエネルギーの高いニュートリノ事象である。0.77PeVのエネルギーが粒子シャワーとして放出された。

表に、各モデルとそこで期待される主に100PeV-1EeVのエネルギー領域のニュートリノ事象数を示します。星形成率を意味するSFRは、宇宙の各時代における若い星の分布を表し、FRII(ファナロフ・ライリイII型)は比較的遠方に存在することが知られる明るい電波銀河の分布を表します。

そして表の右列に本解析から得られたモデルに対するp値を示します。FRII進化モデルは、 $3\sigma$  (=有意水準99.7%)より強いレベルで棄却されることがわかります。また、本解析で初めて、SFR進化モデルに対しても、制限が付き始めました。

表) 異なったUHECR進化モデルより期待される超高エネルギーニュートリノの事象数と観測から導かれたp値の比較。UHECRが陽子だとするとSFR(星形成率)より、小さい宇宙論的進化を持つ天体であることが示唆される。

UHECR 陽子と宇宙背景放射との相互作用によるニュートリノモデル		期待される超高エネルギーニュートリノ事象数 (2426日)	p値 (%)
Kotera モデル*	SFR 進化	3.6	22.3
Kotera モデル*	FRII 進化	14.7	<0.1
Aloisio モデル**	SFR 進化	4.8	7.8
Aloisio モデル**	FRII 進化	24.7	<0.1

\*K.Kotera, et al., JCAP 10, 013 (2010), \*\*R. Aloisio et al., JCAP 10, 006 (2015)

これまでUHECR起源天体はUHECR到来方向の一様性や高エネルギー天体分布観測により、我々の近傍よりは、比較的遠方(若い)宇宙に多く存在すると考えられていました。ガンマ線バースト(GRB)や活動銀河中心核(AGN)といった、多くの高エネルギー光を発する天体がそうであるように、少なくともSFRより強い宇宙論的進化をしているとされていたのです。

しかし、本解析は、UHECRが陽子だとすると、その起源天体の宇宙論的進化は弱く、つまり、比較的年を取った我々の近傍宇宙にあることを示唆しています。また、UHECR起源天体は高いエネルギーの光も放っているだろうという一般的な予想とも異なる結果となったのです。そうはいても、我々の近傍にUHECR生成天体の候補は多くありません。そこで、UHECRが重い原子核だとするとUHECR起源のニュートリノ生成率は低くなるので、本解析結果との矛盾はなくなります。

この研究からこれまで観測が非常に難しかったUHECR起源天体に、ニュートリノ観測から迫ることに成功しました。

## ■ 論文情報

題名: Constraints on ultra-high-energy cosmic ray sources from a search for neutrinos above 10 PeV with IceCube

著者: IceCube Collaboration

雑誌名: 「Physical Review Letters」 (アメリカ物理学会出版) 117巻24号 2016年12月9日

編集者の選ぶ重要な論文 Physical Review Letters EDITORS' SUGGESTIONに選出