

## 特集 宇宙はどんな《言葉》で書かれているか

鼎談:

## 素粒子論と宇宙論の展望

リサ・ランドール Lisa Randall (ハーバード大学)

村山 斉 むらやま ひとし (東京大学数物連携宇宙研究機構)

大栗博司 おおぐり ひろし (東京大学数物連携宇宙研究機構, カリフォルニア工科大学)



リサ・ランドールは素粒子論と宇宙論の研究者で、「ワープした余剰次元」を使った素粒子模型を提唱したことで有名である。ハーバード大学から博士号を授与された後、プリンストン大学とマサチューセッツ工科大学の教授を経て、現在はハーバード大学教授。アメリカ物理学会のリリエンフェルド賞を受賞し、全米科学アカデミーの会員に選ばれるなど、数々の荣誉に輝いている。科学の啓蒙活動にも熱心

で、日本でも、科学解説書『ワープする宇宙—5次元時空の謎を解く』<sup>\*1</sup>の出版や、NHKのドキュメンタリー番組『未来への提言』の出演などでよく知られている。

ランドールがカリフォルニア工科大学のゴードン・ムーア荣誉客員教授としてパサデナに半年間滞在している機会に、東京大学の数物連携宇宙研究機構(Institute for the Physics and Mathematics of the Universe, 以下IPMU)の村山斉機構長が日本から渡米し、大栗博司も参加して、素粒子と宇宙の研究の現状と展望、そしてIPMUの役割について語り合った。

鼎談には素粒子や宇宙についての専門用語が現れるが、話の流れを妨げないように脚注による説明は控えた。その代わりに、これらの専門用語とその背景となる考え方を解説した「鼎談の手引き」を末尾に用意したので、そちらを先に読んでおくと、鼎談の内容の理解が深まるのではないかと思う。「手引き」で解説されている部分には†の印をつけた。

ランドールの姓は、第一音節にアクセントを置き、履物の「サンダル」と韻を踏むように発音するのが、米国では標準的である。しかし、日本では「ランドール」という表記が広まっているので、混乱を避けるために、この記事でもその例に従うことにする。

(文責・翻訳: 大栗博司)

<sup>\*1</sup> リサ・ランドール:『ワープする宇宙—5次元時空の謎を解く』向山信治・塩原通緒訳(日本放送出版協会, 2007年)。

大栗 日本には何度かいらっしゃっていますね。『ワープする宇宙』の日本語訳も評判のようです。本屋で平積みになっているのを拝見しましたよ。ランドール あの本が出る前に、宇宙飛行士(若田光一氏)との対談がテレビ番組として放送されて、その記録が別な小冊子<sup>\*2</sup>として出版されました。おかげで、本が出版されたときには、宣伝が行き渡っていたのです。日本の人々が科学にとっても興味をもっているということに、強い印象を受けました。

大栗 日本の基礎科学、とくに素粒子物理学の現状について、どう思われますか。

ランドール IPMU ができて、とてもうまくいっていると思います。これだけ高いレベルの研究活動が行われるようになったのは、大きな出来事です。素粒子実験における成果もすばらしいと思います。とくに、ニュートリノやB中間子の物理では、高い国際競争力があります<sup>†</sup>。もちろん、超弦理論<sup>†</sup>の研究も活発です。村山さんはどう思いますか。(†は末尾の「手引き」参照、以下同。)

村山 まず、ランドールさんにも、ぜひIPMUを訪問していただきたいと思います。世界トップレベル研究拠点計画では、日本に真の国際研究機関を作ることが当面の目標です。IPMUでは、研究者の過半数が外国国籍になるところまでできました。

ランドール: 日本国内ではどう見られているのでしょうか。日本に着いたときの第一印象は、どちらを見ても日本人しかいないということです。そのような環境で、うまくいっていますか。

村山 IPMUが立ち上がったとき、日本の若い研究者の間には、これは彼らの雇用対策のためだという誤解もあったようでした。ですから、外国からの研究者をたくさん雇って、日本人にそれほど職がいきわたらなかつたときには、がっかりした人たちもいたようです。しかし、IPMUができて、海外からの多くの研究者と交流する機会が増えたことには、大いに刺激を受けているようです。

IPMUに海外から来た研究員はみんなとても楽しそうにしていますよ。その中にドイツ人とイタリア人の夫婦がいるのですが、ブログ<sup>\*3</sup>を書いていて、日本での生活を冒険として楽しんでいる様子がわかります。

ランドール 発信塔ですね。

大栗 このブログは海外から研究者を雇うときに役に立っています。海外から来る人は、日本に住むのはどういうものか不安に思っている人も多いのですが、このブログでは彼らが銀行口座を開いたり、アパートを見つける様子が書いてあって……。

ランドール 日本を訪問したときには、日本人はとても親切だという印象をうけました。親身に対応してくれるという。

大栗 それでも、言葉の壁や習慣の違いといった問題はあります。村山さんがIPMUのある千葉県柏市で市民講演会をしたときに、研究所のボランティアを募りました。そうしたら、英語のできる人たちがたくさん応募してくださったので、海外からの研究者が日本で生活を始めるためのお手伝いをさせていただいています。

村山 もしランドールさんが日本で職に就くことになったとしたら、どんなことが気になると思いますか。

ランドール 研究者をばらばらに雇うのではなく、同じような興味の人をまとめて雇うようにしたほうがよいと思います。研究会を開くなどして、常に刺激的な環境にすること。研究者が孤立しないように、海外出張が簡単にできることも大切です。

村山 さて、素粒子論や宇宙論では、最近どのようなことに興味をおもちですか。

ランドール 暗黒物質<sup>†</sup>にはまだ理論的にも調べられていないことがたくさんあり、またさまざまな実験が結果を出し始めているので、これから大きな発展があるように思います。これが1つ。

もう1つは、数学的な超弦理論と素粒子の模型との関連です。超弦理論にはいろいろな側面があ

<sup>\*2</sup> リサ・ランドール、若田光一:『リサ・ランドール—異次元は存在する』(日本放送出版協会, 2007年)。

<sup>\*3</sup> <http://chipango.wordpress.com/>



左から大栗氏、ランドール氏、村山氏。

りますが、私が興味があるのは、素粒子の模型を作るうえで考えたことがなかった可能性を超弦理論が示唆してくれるという点です。低次元の見方からは不自然で、対称性などを使ってうまく説明できない現象でも、高次元(余剰次元)の理論<sup>†</sup>からは自然に理解できることがあります。

たとえば、私が現在興味のある F-理論<sup>†</sup>を使うと、クォークやレプトンにどうして世代<sup>†</sup>があるのか、またその質量行列<sup>†</sup>がどうしてこのような形をしているのかの説明できます。

大栗 何が自然かというの見方によりますね。  
ランドール ブレーン<sup>†</sup>などは本質的に新しい考え方で、低次元の見方では考えつかなかったものです。それによって、まったく新しい理論的手法やアイデアが生まれました。

暗黒物質に関しては、私は DAMA 実験<sup>†</sup>に興味があります。

大栗 DAMA 実験で暗黒物質が検出されたという発表を真剣に受け取っているのですか。

ランドール 私はただの理論屋なので、それが本当かどうかは判定できません。しかし、この実験結果には理論的な説明ができて、それにもとづいて将来の実験についての予言をすることができるので、科学者として追究すべき問題だと思います。

検出器の精度が上がってきたので、何かが見つかるかと期待できます。大型ハドロン衝突型加速器(LHC)<sup>†</sup>が再起動<sup>\*4</sup>するのを待っている間に、考えるにはよい問題でしょう。

村山 では、そちらの方面について話をしましょう。これは何度も聞かれたことだと思いますが、LHC では何がみつかると思いますか。

ランドール 何がみつかるかは予想できません。ヒッグス粒子<sup>†</sup>は見つかるでしょう。何がみつかるかを語るより、できる限り広い可能性を考えておくことが大切です。思いもよらない現象が起きたときに、それを探す手立てを講じなかったから見逃したということのないようにしておかないといけません。何がみつかるかについては、賭けをする気はありません。

村山 「ワープした余剰次元」<sup>†</sup>もですか。

ランドール 可能性はありますが、5%以上の確率があるとは思いません。あり得ないと言っているわけではありませんよ。かつては、何か思いがけない実験結果が見つかる、最初の1~2年の間、本当にそれが何であったかがわかるまでは、何がみつかったても超対称性<sup>†</sup>が発見されると騒いだ時期がありました。そういうことが起きたときに、「いや、何かあるかわからない」と言うことができることは大切なことです。偏見のない目で何が起きているのかを見て、それから考えるのです。

村山さんなら、LHC では絶対に超対称性が見つかるというのではないですか。

村山 そうは言いません。超対称性が見つかるとういと思いますし、昔からその可能性を追究して

<sup>\*4</sup> LHC は 2008 年 9 月の電気系統の事故のため、現在保守点検作業中であり、実験再開は今秋以降の予定である。

きました。しかし、LHCの到達領域にあるという保証がないことも事実です。

ランドール これまで、超対称性があるという実験的証拠がまったく出ていないので、超対称性は少し分が悪くなっていますね。

村山 それは認めます。とくに、B中間子の実験は、超対称性を使わなくても、小林-益川理論で完全に説明できてしまいます。

ランドール 私が余剰次元の理論を好む理由の1つは、これがフレーバーの物理<sup>†</sup>に説得力のある説明ができる初めての理論だからです。ニュートリノの混合角<sup>‡</sup>が大きくて、クォークの混合角が小さいということには、なにかの意味があると思います。小林-益川行列が単位行列に近いのはなぜでしょうか。余剰次元の理論は、このような構造に説得力のある説明を与えます。

村山 では最後に、これからこの分野に進む若い人たちにメッセージをお願いします。

ランドール 日本を訪問して、とくに感銘を受けたことは、人々が科学に強い興味をもっていること。宇宙のこと、この世界が何からできているのかを知ることができるということは、大切なことだと理解してくれていることです。科学とは発見の過程です。私が強調したいことは、多くの人が科学の進歩に貢献できるということです。あなたたちが日本でこの新しい研究所を始めたので、海外の私たちも日本に注目するようになっていきます。このような研究所ができたことは画期的なことです。これは、日本の人たちが、物理学に興味をもち、尊重していることの表れです。科学の発展は一朝一夕に起きることではありません。宇宙についての深遠な問題は、多くの研究者を結集し、たっぷり時間を与えることで、ようやく解けるものです。これは重要なことで、日本の人がそれをわかってくれていることは、すばらしいと思います。

(写真提供: IPMU)

ヒッグス粒子は、標準模型において実験的に検出されていない唯一の粒子である。対称性の自発的破れを引き起こし、素粒子の質量を生成する役割をもつ。標準模型が正しければ、スイスのジュネーブにある欧州原子核研究機構(CERN)の大型ハドロン衝突型加速器(LHC: the Large Hadron Collider)を使った実験で、ヒッグス粒子が発見されるはずである。

しかし、標準模型は完全な理論ではないと考えられており、標準模型では説明のできない現象がLHC実験で見つかるのではないかと期待されている。どのような新現象が発見されるかを予言することは、理論物理学者の重要な役割である。リサ・ランドールと村山資は、いずれも標準模型を超える素粒子模型を理論的に追究している第一線の研究者である。ランドールは「ワープした余剰次元」の模型で、また村山は「超対称性の破れ」の新しい仕組みを提案したことでとくに有名である。

余剰次元のある模型では、われわれが経験する縦・横・高さの3次元のほかに隠された次元が

## 鼎談の手引き

### 大栗博司

おおぐり ひろし

(東京大学数物連携宇宙研究機構、カリフォルニア工科大学)

今回の鼎談を理解するための基礎用語を解説し、またその背景にある考え方を紹介する。

素粒子の標準模型とは、現在知られているすべての素粒子とその間の相互作用を支配する法則をまとめたものである。標準模型で説明のできない素粒子現象は、これまでのところ、ニュートリノの種類が変化するニュートリノ振動だけである。この現象は、ニュートリノが質量をもつことを意味するが、狭義の標準模型ではニュートリノは質量をもてない。このために、標準模型の修正が提案されている。

あると考える。どのような余剰次元を仮定するかによって、さまざまな模型が考えられる。

ランドールがジョンズ・ホプキンス大学のラマン・サンドラムと提唱したワープした余剰次元をもつ模型では、余剰次元空間の場所によってわれわれの3次元の長さの基準が変わってくると考える。これによって、標準模型の典型的なエネルギー( $10^{11}$ 電子ボルト)と、一般相対論と量子力学が統合するプランク・エネルギー( $10^{28}$ 電子ボルト)が、なぜ17桁も違うのかを説明しようとするのがランドールらの理論である。また、その特別な場合として、ヒッグス粒子が存在しなくても対称性が自発的に破れる模型を考えることもできる。LHC実験でヒッグス粒子が見つからない可能性も、完全に否定はできないのである。

一方、超対称性をもつ模型では、実数を使った通常の座標ではなく、 $xy = -yx$ という関係式を満たす「反可換な数」を座標とする空間を考え、これを余剰次元とする。「ワープした余剰次元」の模型と同様に、標準理論の典型的なエネルギーとプランク・エネルギーがかけ離れた値をもつわけを説明するのが、超対称性を考える主要な動機である。また、超対称性をもつように素粒子の標準模型を拡張すると、3種類の力(電磁相互作用、「強い相互作用」、「弱い相互作用」)の強さを表す結合定数が、高エネルギーで見事に一致することも魅力である。

超対称性があると、すべての素粒子にスピンの異なるパートナーの素粒子が現れる。このようなパートナーの素粒子は今までのところ発見されていないので、超対称性は何らかのかたちで破れていると考えられている。これを説明するのが村山らの取り組んでいる「超対称性の破れ」の理論である。

村山はロサンゼルス空港からそのまま鼎談の会場に現れたが、暗黒物質やLHCの話題になると、東京からの長時間の飛行の疲れを感じさせない丁々発止の議論を繰り広げた。この鼎談の記録でも、LHCで何が発見されるかをめぐるランドールとの緊迫したやり取りに、その一端を見ること

ができる。

鼎談の最初に、ランドールが「(日本は)ニュートリノやB中間子の物理では、高い国際競争力がある」と述べているのは、東京大学の神岡宇宙素粒子研究施設や東北大学のニュートリノ科学研究センターにおけるニュートリノ実験と、高エネルギー加速器研究機構のBファクトリー実験を指す。

ニュートリノ実験では、大マゼラン星雲で起きた超新星爆発(SN1987A)からのニュートリノを世界で初めて検出した。この業績に対し、小柴昌俊が2002年度ノーベル物理学賞を受賞したことは記憶に新しい。またニュートリノ振動を確認した。これによりニュートリノが質量をもつことが示され、標準模型の修正が必要になった。

Bファクトリーでは、電子と陽電子の衝突によりB中間子を大量に作り出し、これを使ってCP対称性の破れを直接観測した。2008年度ノーベル物理学賞の授賞対象となった小林・益川理論は、これによって実証されたのである。

ランドールが最近興味をもっていると述べた暗黒物質は、宇宙に満ち溢れているが、まだその正体がわかっていない謎の物質である。銀河系の回転運動や宇宙の構造形成の時間発展の様子、遠方の超新星爆発の観測による宇宙膨張の加速度の測定、さらに宇宙のマイクロ波背景放射の温度分布の精密観測などにより、宇宙の95%は原子以外の何かでできていることが明らかになった。これらは光を発しないので、暗黒物質、暗黒エネルギーと呼ばれている。暗黒物質は、宇宙の23%をなし、個々の銀河をまとめる働きをする。残りの72%をなす暗黒エネルギーは、逆に、銀河たちをばらばらに引き離そうとしている。

暗黒物質の正体は、通常物質との相互作用が弱く大きな質量をもつ未知の粒子WIMP(Weakly Interacting Massive Particle)、もしくはクォークを結び付けて陽子や中性子をつくる「強い相互作用」の対称性を説明するために導入されたアクシオンである可能性が高いと考えられている。WIMPは、超対称性をもつ模型や余剰次元をも

つ模型では自然に現れるので、もしこれが暗黒物質であれば、素粒子の標準模型を超える現象を探る LHC の実験で発見されるのではないかと期待されている。

太陽系は、銀河系内の暗黒物質の分布に対して、一定の相対速度を持って運動していると考えられている。さらに、地球は太陽の周りを公転するために、地球を突き抜ける暗黒物質の「風」の強さは季節によって変化するはずである。DAMA はイタリアのアペニン山脈の山塊グランサッソの地下で行われている暗黒物質検出実験である。ヨウ化ナトリウムに微量のタリウムを添加した結晶を使い、暗黒物質が結晶を通過することで発せられる蛍光を光電子増倍管で検出し、その季節変化を観測したと発表している。しかし、種類の異なる原子を標的として使用した他の施設における実験では、同様のシグナルは観測されていない。

暗黒エネルギーの正体はさらに深い謎であり、その理解には超弦理論のような究極の統一理論を必要とするのではないかと考えられている。ランドールも、この理論をもう1つの研究対象としてあげている。

超弦理論は、すべての素粒子と重力を含む相互作用を統一的に記述する、究極の理論の最有力候補である。バイオリンの弦のように振動する弦を最小単位とし、その振動状態から、素粒子やその間の相互作用を媒介するゲージ場や重力場が現れると考えられている。超弦理論は9次元の空間と1次元の時間を使って定義されている。そこで、われわれが経験している縦・横・高さの3次元のほかに、6次元の空間が余剰次元として隠されていると考えられている。ランドールは、この6次元の幾何学を使って、3次元の素粒子の性質を説明しようとしているのである。

ブレーン・ワールド(膜世界)の模型では、素粒子の標準模型の自由度は、われわれの3次元の空間の中に拡がって存在しているが、余剰空間の中では局在していると考えられる。高次元の空間の中に、われわれの3次元世界が膜のように拡がっているとするのである。ランドールとサンドラムの

「ワープした余剰次元」の模型もこの例である。

F-理論とは、超弦理論から3次元空間の素粒子模型を構成するために、ハーバード大学のカムラン・バッファが提唱した方法である。仮想的な8次元空間を考え、それを使って6次元の空間上の物質場やゲージ場の状態を記述するものである。

ランドールはF-理論が素粒子の世代の存在に、根源的な説明を与えるのではないかと考えている。素粒子の第1世代は、アップとダウンと呼ばれる2種類のクォーク、そして電子とニュートリノからなっている。電子とニュートリノはレプトンと呼ばれている。素粒子の標準模型では、このように2種類のクォークとレプトンをひと組にして世代と呼ぶ。CPの破れが起きるためには、3世代以上の素粒子が必要であることを示したのが小林-益川理論である。標準模型では世代の存在は仮定であり、なぜ素粒子に世代があるのかはわかっていない。

質量行列とは素粒子の質量や世代間の混合の様子を1つの行列によって表す数学的記法である。小林-益川理論では、CPの破れに重要な役割を果たす。素粒子の世代のことをフレーバー、素粒子の世代間の混合などの現象をフレーバー物理と呼ぶこともある。

小林-益川理論では3世代のクォークの混合を $3 \times 3$ 行列で表現する。1962年に牧二郎、中川昌美、坂田昌一は、ニュートリノに質量があると、ニュートリノの世代間にも混合が起こりうることを理論的に予言していた。ニュートリノの混合角はこの現象の大きさを表す指標である。神岡鉱山での実験を中心とする近年のニュートリノ振動の観測により、ニュートリノにも混合が起こることが確認された。これにより、ニュートリノが質量をもつことがわかったのである。

今回の鼎談に参加して、LHC実験をはじめとする素粒子実験や数々の宇宙観測により、素粒子論や宇宙論は今後10年の間に大きく進歩するとの期待を新たにしたい。