

暗黒物質とバリオン数の起源

野尻美保子

総合研究大学院大学助教素粒子原子核専攻／高エネルギー加速器研究機構助教

未知の暗黒物質の探索と、その生成メカニズムの解明に向けた実験が飛躍的に進歩してきている。一方で、陽子や中性子などのバリオン数の起源を探るため、Bファクトリー、ニュートリノ振動実験による挑戦が続いている。

暗黒物質の謎

宇宙にある物質は、われわれの周囲にある原子（陽子や中性子などのバリオン）と、まだその本体が突き止められていない暗黒物質（ダークマター）に分けられる。暗黒物質という名前は、「重力的にはその存在が確立されているが、それ自身は光を出さない」ことに由来する。

暗黒物質の量はバリオンよりもはるかに多い。にもかかわらず、宇宙から飛来する宇宙線などにまったく見つかからないことから、暗黒物質はきわめて透過力の高い粒子であることがわかっている。物質の基本単位である素粒子の性質を記述する標準モデルには、このような粒子は存在しない。

また、暗黒物質は宇宙の初期から現在まで存在し続けている寿命の長い粒子である必要がある。このような不思議な性質

をもつ新しい素粒子を提案し、その性質を検証することは、素粒子物理の重要なテーマとなっている。

では、暗黒物質はどのようにして宇宙に生まれたのだろうか？ 暗黒物質の候補となる安定な素粒子をX、その反粒子を \bar{X} としよう。

宇宙初期には宇宙の温度は高く、素粒子と素粒子が高エネルギーで衝突することによって、Xと \bar{X} は大量につくられていくとXがつくれる確率が減り、その数もX・ \bar{X} が対になって軽い粒子になることで減っていく。一方、時間の経過とともに宇宙は膨張し、粒子は互いにどんどん遠ざかる。反粒子との衝突が一度も起こらないほど互いの距離が遠くなると、Xの数は減少することがなくなり、宇宙に有限で残ることができると考えられる。

暗黒物質の探索

簡単な計算によって、Xは弱い相互作用をする安定な粒子であることがわかる。Xの候補として有望視されている素粒子は「超対称粒子」である。この新たなモデルでは、標準モデルのすべての粒子に対して、電荷は同じだがスピンの1/2だけ異なる超対称粒子が予言される。暗黒物質の候補としてもっとも有力なのは、光子などの電荷をもたない粒子の超対称粒子である。この粒子と原子核との反応は大変弱いゼロではなく、その反応の観測を目指した測定器の開発の進展は目覚ましい。

普通の環境で実験すれば、原子核の同位体の崩壊や宇宙線が常に測定器に信号（雑音）を残す。暗黒物質の出す、非常に頻度の低い現象をとらえるためには、暗黒物質の衝突の出す信号と雑音の違いを切

り分ける測定器の能力が求められる。現在トップを走る測定器は、粒子が測定器に衝突した際に出るイオン化のエネルギーと振動のエネルギーを同時に測ることで、雑音を減らすことに成功している。一方で測定器のさらなる大型化に向けた研究が進められており、この数年でさらに1桁感度が上がることが期待されている。

暗黒物質を発見するもう1つの方法は、粒子と粒子を衝突させるコライダー実験で暗黒物質がつくりだされる反応を直接観察するものである。暗黒物質は宇宙の温度が1000兆K(100GeV)のときにつくられたと考えられており、これを超えるエネルギーで粒子を衝突させ、宇宙初期の状態をつくり出すことが必要となる。

2007年から稼動するLHC実験*1では、7000GeVまで加速された陽子と陽子を衝突させることが計画されている。もちろん、暗黒物質は透過力が高いのでその存在を直接確認することはできない。しかし、暗黒物質のもつ運動量のみで、運動量が釣り合わない事象として観測することができる。LHC実験は、暗黒物質の謎に、生成メカニズムの解明という側面から切り込もうとしているのである。

バリオン数の起源

暗黒物質の起源については宇宙初期の熱生成という自然な説明がある。では、われわれの周辺にある物質についてはどうだろうか。宇宙がインフレーションを起こすと、すべての粒子の密度はいったん限りなくゼロに近くなる。一方、陽子や中性子のようなバリオンと原子核の周りを回る軽い物質であるレプトンは、バリオン数、レプトン数という保存量をもっている。陽子1個のもつバリオン数は1、その反粒子である反陽子のバリオン数は-1である。この保存量が変わる反応は標準モデルの中にはない。

物質があり、反粒子が存在しないという現状を説明するには、バリオン数・レプトン数の保存則を破る未知の反応の存在が必要である。さらに、この反応が粒子と反粒子の反応を区別すること（CPの破れ）も必要になってくる。このような

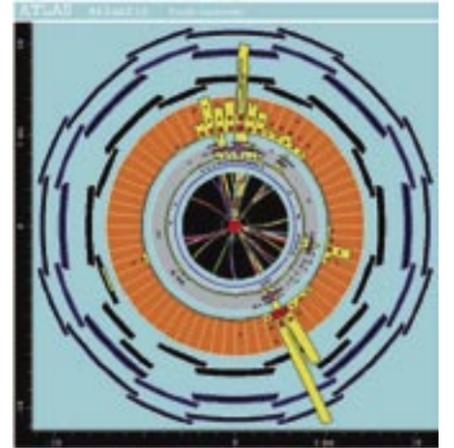
反応として、どのようなものが期待されるだろうか。

宇宙の温度が下がっていくと、真空の構造が変わる「相転移」と呼ばれる現象が起こる。この相転移をはさんで、レプトン数とバリオン数を変える反応が起こる。この反応は宇宙の温度が1000GeV程度のときには特に活発であったと考えられている。また、標準モデルのCPの破れは、クォークに質量を与える「小林・益川行列」の位相として記述される。理論的には、この2つを組み合わせると宇宙にバリオン数が生まれる可能性がある。

高エネルギー加速器研究機構（KEK）とスタンフォード大学線形加速器センター（SLAC）で行われたBファクトリー実験では、B中間子と反B中間子を約1億個生成し、B中間子と反B中間子の崩壊の違いを調べることによって、小林・益川行列の位相を初めて測定した。さらにKEKではB中間子を100億個生成することによって、超対称モデルなど、標準モデルを超える物理を起源とするCPの破れの探索を目的とするスーパーBファクトリー実験が提案されている。

素粒子の世代間をつなぐ相互作用はニュートリノにも働いている。ニュートリノ（ ν ）が相互に移り変わる振動現象は、宇宙線 ν を観測することによって発見された。ニュートリノ振動を引き起こすのはニュートリノ質量であるが、この質量の起源を説明するシーソー機構はレプトン数を破るきわめて重いマヨラナ粒子の存在も予言している。このマヨラナ粒子によって、宇宙初期にレプトン数やバリオン数がつくれる場合があるということが、福来正孝と柳田勉によって指摘されている。

KEKでは、自然界にある ν ではなく、人工的にきれいな ν ビームをつくり、その世代間構造をさらに詳しく調べる試みが進められている。まずK2K実験では、KEKから発射された ν ビームはスーパーカミオカンデで観測され、 ν 振動現象が確認された。J-PARCではさらに100倍の強さのビームを生成し、 ν 質量項を精密に計る計画が進められている（part 2



LHCで、超対称粒子が生成、崩壊したときに、測定器で観測される粒子の方向と運動量を、ビームが来る方向からみた図。暗黒物質は、測定器でつかまえることができないので、ビームに垂直な方向の運動量が釣り合わなくなる。

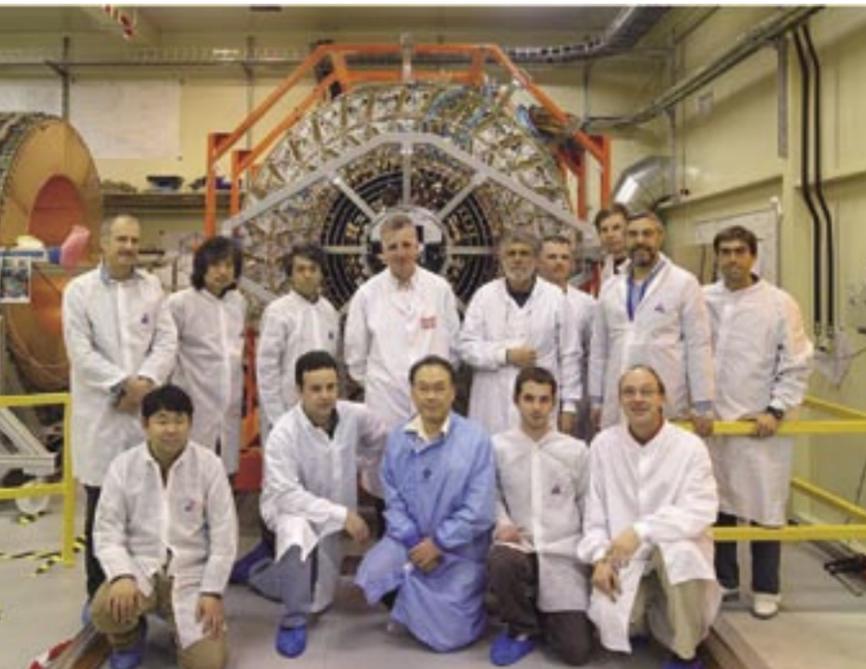
P.26参照）。

J-PARCのビーム強度が上がり、スーパーカミオカンデ測定器が拡張されれば、 ν 振動でのCPの破れを調べることも可能である。このT2K実験は ν による物質生成を検証するうえで重要な第一歩と考えられている。

*1 LHC (Large Hadron Collider) 欧州共同原子核研究機構（CERN）が建設を進めている大型ハドロン衝突型実験装置で、世界最高のエネルギーをつくり出す。その開発には世界中の研究者が参加している。



野尻美保子 (のじり・みほ) 大学ではストリングの場の理論で学位を取りましたが、KEKでPDをする間に暗黒物質の研究を始め、その後コライダーの物理に転身しました。LHCの研究は7年前から始めていて、主に超対称モデルなど暗黒物質を予言するモデルで、どんなシグナルが期待できるかを研究しています。2007年から始まる実験で、暗黒物質の候補が現れることを楽しみにしています。



KEKは、LHC建設に重要な貢献を果たしており、今後は実験データの解析を日本の各大学と協力して行っていく予定である。写真は日本チームがつくったLHC実験の測定装置。