

LHCとダークマター

宇宙を満たす見えない物質ダークマター

宇宙の中の物質の大半が光っていない物質（暗黒物質、ダークマター）であるということは、銀河の中の星や銀河団の運動から数十年前から知られていましたが、今では観測の発展によって宇宙のエネルギーの70%を暗黒エネルギー、約23%をダークマターが占める一方で、陽子、中性子などバリオンはわずかに4%であることが明らかになっています。また最近では、X線衛星チャンドラとハッブル宇宙望遠鏡などを用いた観測チームが、銀河団どうしがぶつかる際に、普通の物質と違いダークマターがお互いに干渉せず通り抜けている姿をとらえています（図1）。このことからダークマターが極めて他の粒子とぶつかりにくい粒子だということがわかります。このような粒子の存在は素粒子物理にとっても大きな意味をもっていま

す。実験的に調べられた素粒子の性質は素粒子標準模型でよく記述されているのですが、この標準模型の粒子の中にダークマターとなりうる素粒子は知られていないからです。

ダークマターの性質はまだ明らかではないのですが、それがなぜ宇宙に存在するか、という問いには比較的自然的な答えが存在します。ビッグバンシナリオでは、過去にさかのぼっていくと宇宙の大きさはどんどん小さくなります。このことから、宇宙の始まりには、物質の温度や密度が極端に高く、頻繁に衝突していたことがわかります。この衝突から、現在我々のまわりには通常存在していない素粒子も頻繁につくられていたことが想像できます。高いエネルギーの素粒子の衝突から作られる安定な素粒子があれば、これが現在まで残ってダークマターになると考えることができます。このようにダークマターが宇宙の最初の素粒子

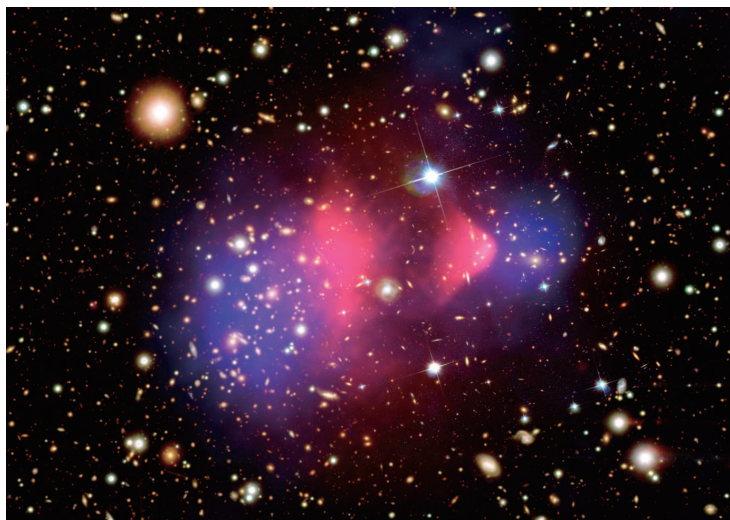


図1 銀河団の衝突により、ピンク色のX線観測衛星チャンドラが観測した高温ガス（普通の物質）とハッブル宇宙望遠鏡で重力レンズ効果により観測した暗黒物質の存在する領域（青い部分）が分離している様子。暗黒物質は衝突せずにすり抜けている。

Credit: X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch et al.; Optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.; Lensing Map: NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.

同士の衝突でつくられたとすると、ダークマター同士の相互作用は弱くなければいけません。相互作用が強いと、せっかく作られてもお互いにぶつかって消えてしまうのです。これは現在重力だけで観測されているダークマターの性質と符合しています。

一方で、ダークマターの存在は素粒子理論にとって驚きでもあります。われわれが普段観測している素粒子のなかで安定なのは、電子、ニュートリノ、陽子（uクォーク、dクォーク、グルーオン^gなどの複合粒子）です。素粒子物理では、これらの粒子を安定にするのは保存則であることが知られています。ダークマターは少なくとも宇宙年齢よりはるかに長寿命なので、その崩壊を禁止する未知の（近似的な）保存則が存在するはずで

LHCでダークマターを生成する

ダークマターを実験で生成することも可能と考えられます。CERN（欧州共同原子核研究所）が昨年ジュネーブ近郊に完成させたLHC（Large Hadron Collider）は世界最大の衝突ビーム加速器で、陽子と陽子を14TeVで衝突させます。この陽子・陽子衝突のエネルギーは、宇宙が始まって 10^{-10} 秒後（宇宙の温度が 10^{14} 度だったころ）に起こっていた粒子・粒子衝突のエネルギーとほぼ同じです。宇宙の始めにダークマターが作られたのであれば、LHC実験によってもダークマターを作ることができるはずで

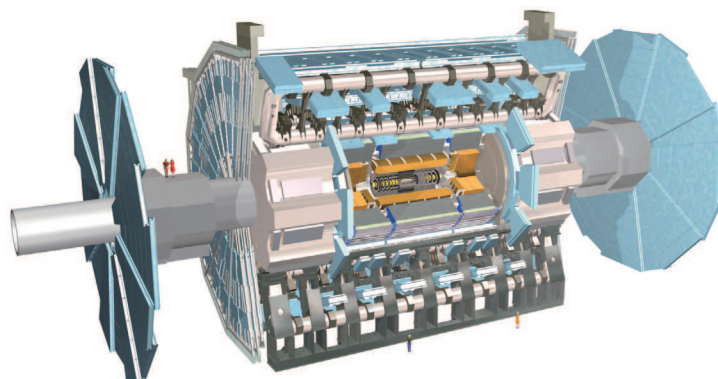


図2 LHCでの実験の一つ、ATLAS実験の測定器のイメージ
Copyright © CERN, Photograph by Joao Pequeno

理論研究者は、これまで知られている素粒子の性質は変えずにダークマターの性質を説明するモデルを多数提案しています。このようなモデルに共通した特徴として、知られている素粒子に対して、それぞれパートナーとなる素粒子が予言されている、ということがあります。例えば、超対称モデルというモデルでは、クォークに対してスカラークォーク、グルーオンに対してグルーイノという粒子が予言されています。これらの粒子は、そのパートナーよりも約500倍以上重いということがすでにわかっています。暗黒物質になれるのは、光、Z粒子、ヒッグス粒子のパートナーで、質量はクォークのパートナーよりは軽いと考えられています。

このようなモデルでは、すべての粒子が1か-1の値を取るパリティ*という保存量を持ち、標準モデルの粒子はパリティ1を、そのパートナーの超対称粒子はパリティ-1をもっています。パリティの積は保存します。

*ここでいうパリティは、空間反転に伴う保存量であるパリティと区別するため、専門的にはR-パリティと呼ばれる。

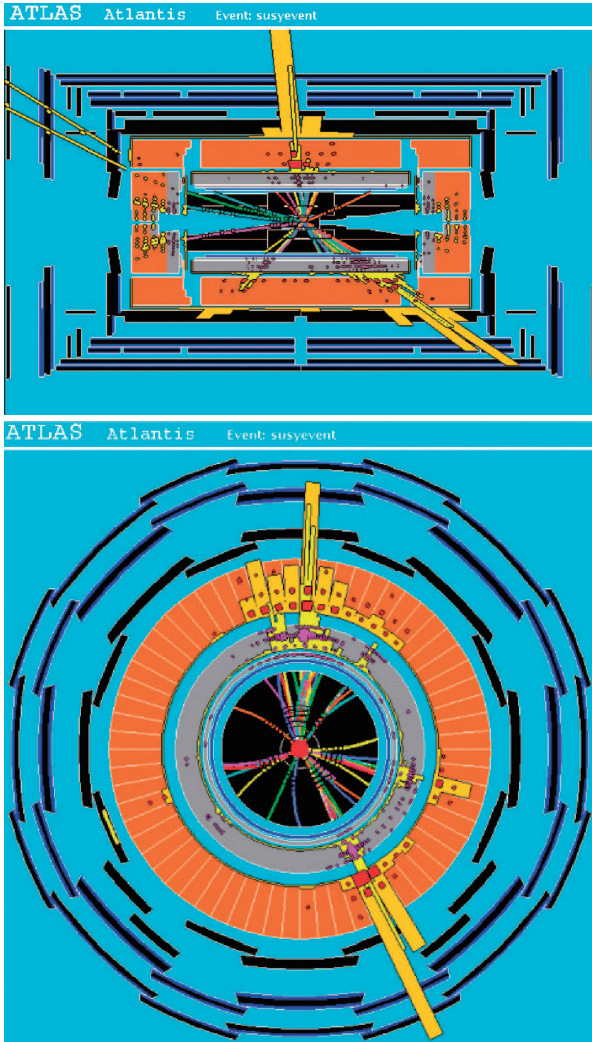


図3 ATLAS実験で観測される超対称性粒子生成事象のシミュレーション
Credit: The ATLAS Experiment at CERN, <http://atlas.ch>

たとえば、最初の粒子のもつパリティが-1であれば、それが崩壊してでてくる粒子のパリティの積も-1でなければなりません。またパリティ 1の標準模型の粒子

同士が衝突してパリティ -1の粒子が作られる場合は、偶数個つくられます。したがって、LHCでは超対称粒子は対になってつくられ、各々が超対称粒子を含む粒子に崩壊して、最終的に偶数個のダークマターとたくさんの標準模型の粒子が作られます。

見えない粒子を測定する

LHCの測定器ではダークマターを直接見ることはできません。LHCで主に観測されるのは標準模型の粒子だけの生成で、この場合、運動量の和はほぼ保存しています。そこで、見えている粒子の運動量の和が保存していなければ、ダークマターが作られて逃げていったとわかるはずですが、ですから、見えない運動量に着目することにより、ダークマターの生成の寄与をみる事ができるのです。

それだけではありません。見えている粒子の運動量から超対称粒子の質量を調べたり、見えている粒子の分布から超対称粒子の相互作用を決定することが可能です。20年前には、LHCでできることは新粒子の発見だけだと思われていましたが、現在ではかなり詳しくダークマターのことがわかると考えられています。どのようなステップでそれを達成するかはかなり専門的な話なのでここでは触れず、最終的な目標についてお話ししましょう。

LHC実験でビッグバン宇宙論を検証

熱い過去の宇宙で作られたダークマターの密度



図4 LHC加速器のトンネルに最初に設置された電磁石
Copyright © CERN, Photograph by Maximilien Brice

は、ダークマター同士がぶつかって消える確率に反比例することが知られています。(相互作用の強いダークマターほど、宇宙の温度が冷えても消滅を続けて密度が減ってしまうのです。)つまりダークマターがどんな粒子であるかわかれば、その密度もわかるということになります。LHCなどのコライダー実験で調べたダークマターの性質から宇宙の中にあるダークマターの量を計算して、観測結果とぴったり一致するのでしょうか？ダークマターをつくりだした宇宙が単純なビッグバン宇宙で記述されるのであれば、この2つは一致するはずですが、しかし、ダークマターが作られる機構が違ったり、宇宙の歴史が単純なものではなかったりすると、この2つは異なってきます。このように、宇宙の歴史についてこれまでとは全く違う角度から調べることが可能になるのです。

宇宙の初期に起こった反応を再現するには、大がかりな仕掛けが必要です。陽子を高いエネルギーまで加速するために、陽子に磁場をかけて軌跡を曲げ、リングの中を回転させながら加速します。リングは大きい

方が効率が良いので、LHCのリングの全周は27Kmもあります。陽子はこのリングの中を1時間に4,000万回転しながら衝突を続けます。効率よく衝突をするためには、ビームの位置を精度よくコントロールすることが必要です。また陽子のエネルギーが高いために、非常に磁場の強い電磁石が要求され、発熱を押さえるために、電磁石のコイルはすべて超伝導となっています。この超伝導磁石は、1.9K以下に冷やされた液体ヘリウムの中に入っています。2.7Kの現在の宇宙より低い温度に保たれた磁石に導かれたビームが、 10^{14} 度の温度に相当する衝突を起こすのです。

LHCは2008年9月11日に最初の衝突を成功させましたが、その後この冷却に必要な液体ヘリウムの漏れによって停止し、現在修理を行っています。このような先端的な実験施設では過去にも初期不良による困難に直面していますが、現場の専門家の努力によって克服され、科学的成果を挙げてきた実績があります。今年から本格的に始まる実験に期待したいと思います。