

## A. 自然

### 6. 謎の物質に迫る

(暗黒物質、暗黒エネルギー、ブラックホール)

#### はじめに

本日のJWTC春の特別セミナー(3)にご出席くださり、大変うれしく思う。寒さも厳しくなっているが、お互いに励まし合い、この冬を乗り越えていきたいと思う。

前々回の太陽系、前回の銀河系に続き、本講演では、現代の宇宙学が未だ解決できない問題を取り上げる。暗黒物質、暗黒エネルギー、ブラックホール、などである。こういう言葉は、どこかでお聞きになったことはあると思うが、それが本当のところ何を意味しているのか、考えたこともない、そう言われる方々が多いのではないだろうか。普段考えることのない事柄をちょっと覗いてみるというのも、楽しいものである。

この講演を、現代日本の天文学をリードする谷口義明氏の言葉を引用させていただき、始めたいと思う。これは、大方の科学者の心境ではないかと思う。

私たち人類が宇宙の歴史を正しく理解していると考えるのはもちろん早計である。まだ暗黒物質と暗黒エネルギーを正しく理解していないからだ。『平家物語』の冒頭にあるように、「おごれる人も久しからず」という一文はいつの時代にあっても正しい。そもそも暗黒物質と暗黒エネルギーが分かったとしても、そこにゴールがあるとは限らない。なぜなら、もっと、とてつもないものが宇宙に潜んでいる可能性を否定できないからだ。だが、最後に一つだけ言えることがある。私たちは幸せな宇宙、そして幸せな時代に生きている。

私は、最後の「幸せな宇宙」、「幸せな時代」という言葉が好きだ。20世紀から21世紀にかけて、科学は我々の住む宇宙についてたくさんのことを明らかにした。しかし、一つの問題が解けると、新しい問題が起り、謎は次々と深まっていく。人は、自然を前にして、謙虚にならねばならない。

被造物管理の神学に立つ者たちにとっては、科学で分からないことがあっても不安になるわけではない。神から管理を託されているとはいえ、人間の能力以上の管理を求められているわけではない。科学が明らかにしたことを踏まえて管理するのは当然であるにしても、いまだ明らかにできない分野においては、謙虚に神の知恵とご計画に信頼する。そして、与えられた分野で、ベストを尽くして自分の責任を果たせば、それでよいのである。

私はときどき、ローマ人への手紙 11章の終わりを開いて沈思黙考する。そこでは、神が、歴史の流れの中でイスラエルの民をどのように取り扱われてきたのかが論じられている。神はご自身の民を決して見捨てたわけではなく、遠い歴史の流れを見通しながらすべてを導いておられる。神のご計画は誰にも分からない。だが、神の知恵は完全である。神に絶対的に信頼して憩うことができる。その結論として、次のような神の知恵に感嘆した言葉が吐露されている。

ああ、神の知恵と知識との富は、何と底知れず深いことでしょう。そのさばきは、何と知り尽くしがたく、その道は、何と測り知りがたいことでしょう。なぜなら、だれが主のみこころを知ったのですか。また、だれが主のご計画にあずかったのですか。また、だれが、まず主に与えて報いを受けるのですか。というのは、すべてのことが、神から発し、神によって成り、神に至るからです。どうか、この神に、栄光がとこしえにありますように。アーメン。(ローマ 11:33-36)

## I. 暗黒物質

「宇宙の誕生」の講演において、2001年にアメリカが探査機WMAP(宇宙マイクロ波背景放射を観測する探査機)を打ち上げたことについてふれた。その調査されたデータの解析結果が2003年に報告された。この宇宙は、原子は4.6%、ニュートリノは0.4%で、暗黒エネルギーは72%、暗黒物質は23%であるとの発表があった。暗黒物質? 皆さんは、この言葉をどこかでお聞きになったことがあると思う。現在の天文学・物理学の世界では最もホットな話題であり、最近は大マスコミなどでもよく取り上げられている。

我々には、夜空に見える星と星の間には、何もないように見える。しかし実際には、「真空状態」というわけではない。何も見えないが、我々の身の回りにあるのと同じような原子や電子が希薄なガス状になって存在している。しかし、それだけに留まらない。「暗黒物質」といわれる、未だ正体不明の物質が存在している。その重力が周りの天体運動に非常に大きな影響を及ぼしている、そういうことがこの80年ぐらいの間に、徐々に明らかになってきたのである。

では、その暗黒物質とはいったい何ものなのか。本講演では、この問題から一緒に考えてみたいと思う。

### 1. 暗黒物質の存在

宇宙の構造や成り立ちを観測すると、この宇宙には、何か見えない正体不明の物質が大量にあるらしい。こういう考えは、1930年前後から多くの科学者たちによって提唱されていた。その後多くの観測と理論的な考察とが今日まで積み重ねられてきた。特に、WMAPの報告は、決定的なもので、現代の宇宙科学者のほとんどが、この報告を受け、暗黒物質が存在することについて認めるようになった。

ここで、暗黒物質の正体を突き止めることから、ちょっと横道に逸れるが、大事な問題に触れておこう。WMAP衛星が、宇宙の通常物質は4.6%であると観測結果を報告した。実は、宇宙にある星やガスを足しても、それらの量は全体の2%ほどにしかならない。むしろ、暗い星は観測できていないので、そこには含まれてはいない。だが、たとえそのすべてを足したとしても、到底4.6%にはならない。

では、通常物質が4.6%あるという発表自体が間違っていたのか。それも言えない。宇宙の初期に水素とヘリウムをつくったビッグバン元素の合成から、理論上考えられている宇宙にある物質の値とぴったり一致する。従って、宇宙には4.6%の通常物質があるというのは間違っていない。

消えた2.6%は、おそらく電磁波では検出できない暖かい状態のガス状態で存在しているのだろうと予想される。しかしそれが観測的に証明もされていないわけではない。このように、宇宙にはまだまだ謎や不思議なことが多く、地道な観測結果を待つ以外にない。

では、「暗黒物質」の本題に入っていこう。暗黒物質を想定しなければならない理由は、以下のような状況に基づく。

銀河や銀河団を電磁波で観測すると、星やガスの量を見積もることができる。星やガスは、我々がよく知っている水素、ヘリウム、炭素、酸素、窒素、鉄などの元素からできている。もし銀河や銀河団が我々の知っている元素からだけでできているとすれば、電磁波の観測によって、ある程度ではあるが、質量を見積もることができる。一方力学的な情報からも、銀河や銀河団の質量を見積もることができる。この力学的質量を計算すると、電磁波で見積もった質量より重くなる。すなわち、我々が知っている質量とは別の物質が存在すると想定しないと、話のつじつまが合わない。

暗黒物質が存在することについて、我々の住む太陽系と銀河系の例から説明してみる。

太陽を中心とする太陽系は、銀河系の一部である。地球が太陽の周りをまわっているように、太陽系自体も銀河系をまわっている。この銀河系は渦巻き銀河であるが、それを真上から見ると、この円盤状の銀河の中で、それぞれの星は互いの重力により、ケプラー運動と呼ばれる楕円運動をしている。通常、多くの星は銀河の中心付近に集中しており、中心から離れている星ほど重力の影響は弱くなり、その速度は遅くなるはずである。

ところが、渦巻き銀河における星の運動速度を測定してみると、実際には一定か、むしろ外側の方が速い速度で回っている。これは、銀河の質量は中心付近に偏って存在しているのではなく、銀河の周囲全体に何らかの物

質が存在していることを示唆する。その質量の方が大きいため、外側の方の速度が早くなっている。その質量こそ、暗黒物質といわれるものである。見えている星の 10 倍ぐらいの質量を持った暗黒物質が、重力によって星をひきつけ運動させていることは間違いない。

我々が今観測できている銀河系の中心部には、太陽系をつなぎ止めておくだけの引力はない。つまり、太陽系は銀河系からいつ飛び出してもおかしくない状況にある。それにも関わらず、実際には飛び出していない。それは、銀河系の中に未だ観測されていない物質(暗黒物質)があり、その引力が地球を含む太陽系に働いているからである。しかもその暗黒物質は、銀河の中心部分から離れば離れるほど、どんどん増えていく計算になる。

太陽系や銀河系の現在の状態に関する話だけではない。星や銀河の生成過程においても、それらの構成要素である物質自体の重力だけでは固まることはできない。暗黒物質の重力が働いたので、星や銀河の元になる物質が引き寄せられた。暗黒物質がないと、結局、星も銀河も生まれなかった。暗黒物質は宇宙の骨組みをつくる原動力だった。最近では、銀河と銀河の間にも多くの暗黒物質が存在しており、銀河団あるいはグレート・ウォールのような大規模構造をつくっていることが確認されている。

## 2. 暗黒物質が見つかるまで

1927 年、オランダの天文学者ヤン・オールトは、太陽系から 300 光年以内にある星々の運動を調べ、その運動速度を実現するのに必要な質量を割り出した。それぞれの星の運動は、質量の分布に支配されている。従って、それぞれの星の運動速度を調べれば、それに必要な質量が分かる。するとそれは、おかしなことに、同じ範囲内にある天体の総質量の 1.6 倍にもなってしまった。その当時は、観測技術が発達すれば解決すると思われた。暗黒物質の存在という考えにまでは至らなかった。

1930 年代に入り、アメリカのリック天文台のホーレス・バブコックは、アンドロメダ銀河のようすを調べた。バルジの部分は角速度が一定で、回転速度が上昇している。銀河の多くの星は中心部に集まっており、中心部の質量は高いからである。一方、円盤部の回転速度は落ちるだろうと推測していた。ところが、実際に測定してみると、回転速度は衰えず、むしろ上昇していることが分かった。

ブルガリア生まれのスイス人フリッツ・ツヴィッキーは、カリフォルニア工科大学の研究者だった。彼は、銀河団には「見えない物質」があると主張し、その研究論文を 1933 年に公表した。彼が活躍していた 30 年代には、銀河が集団で存在していることは既に知られていた。特に、「おとめ座銀河団」と「かみのけ座銀河団」が有名だった。ツヴィッキーは、銀河の集団としてよりはっきりしている「かみのけ座銀河団」を取り上げ、その質量を求めた。まず、この銀河団が力学的に落ち着いた状態(平衡状態)にあると仮定した。銀河団に含まれる銀河は、銀河団全体の質量を感じながら、銀河団の中を軌道運動している。その運動速度のばらつき具合(速度分散)は、銀河団全体の総質量で決まる。つまり、銀河団の銀河の速度分散を求めると、銀河団全体の質量を推定できる。

その速度分散の結果は、秒速 1,500km という値になった。この値から銀河団の質量を計算すると、太陽質量の約 300 兆倍になってしまう(銀河団の半径は 300 キロパーセクとした)。一方銀河団の質量は、銀河の明るさを質量に換算して求めることもできる。彼は銀河の平均的な質量を太陽質量の 10 億倍とし、銀河団には 800 個の銀河があると考えた。これを掛け合わせると、太陽質量の約 8,000 億倍となる。銀河の平均的な質量を太陽質量の(10 億倍ではなく)100 億倍にしてもまだ 8 兆倍で、300 兆倍に比べ 40 分の 1 である。以上のことから彼は、「かみのけ座銀河団」には見えない物質がある。そのため、銀河団の中の銀河は、見えない物質の重力に支配されて運動している、と考えた。この「見えない物質」こそ、今日では暗黒物質と言われるものである。彼の研究は、多くの研究者に受け入れられなかった。時代がいかにも速すぎた。

1960 年代になって、アメリカの女性天文学者ヴェラ・ルービンは、アンドロメダ銀河を調べた。その結果、銀河の外側は、中心と比べても速度が遅くならないことを確認した。彼女はさらに、他の円盤銀河をも系統的に観察した。そしてほとんどの円盤銀河において、アンドロメダ銀河同様、銀河円盤の回転速度は外側でも減少しないことが分かった。これは、銀河の中心部の方が明るく、たくさんの星が集まっていることに矛盾する。彼女は、たくさんの銀河を観察すればするほど、同じような結論に達した。いずれの銀河においても、何らかの暗黒物質を想定しないと説明がつかなかった。

70年代から80年代にかけて、アメリカのプリンストン大学のジェレミー・オストライカーやジム・ピープルスは、普通の円盤銀河も、渦巻銀河も、棒渦巻銀河も、楕円銀河も皆例外なく「見えない質量」に取り込まれていなければならないことを明らかにした。さらに、イギリスのノッティンガム大学のクリストファー・コンセライス達は、矮小銀河に関しても同じことを証明した。その後、カーネギー天文台のアラン・サンデーのグループは、局所銀河群がおとめ座銀河団の方向に流れ込んでいくことを観察した。

さらに1987年、アラン・ドレスラーを中心にした米英の7人の研究者グループは、楕円銀河がある方向に特異運動をしていることを観測した。これらの現象は、周辺にある銀河団や超銀河団の質量の影響によるものとは言えず、想定外の大きな質量の重力源が存在しない限り説明がつかないと考え、それを「グレート・アトラクター」と名づけた。

このような経過を経て、今日の天文学者たちは、この宇宙には、我々には見えない何らかの物質、つまり「暗黒物質」が存在することを認めるようになった。

2003年より、アメリカのカリフォルニア大学のニック・スコピル教授を中心に世界15か国から40人の天文学者が参加して「コスモス・プロジェクト」が進められた。日本からは愛媛大学の谷口義明教授が参加した。2007年には宇宙における(奥行80億光年までではあるが)暗黒物質の空間分布が、世界で初めて明らかにされた。その結果、暗黒物質のたくさんある場所にたくさんの銀河が集中していることが判明した。また、宇宙の織り成す大規模構造は、暗黒物質と普通の物質(バリオン)が寄り添うようにしてできあがってきたことも確認された。

### 3. 宇宙初期の暗黒物質

宇宙誕生から38万年後の「宇宙の晴れ上がり」の際に、「宇宙マイクロ波背景放射」が発せられた。その宇宙マイクロ波背景放射には、当時の宇宙の音が仕込まれている。我々は、その放射の温度(密度)の揺らぎを通して、宇宙の音を聴くことができる。その音の具合で、宇宙の性質を理解できる。基本振動も聞こえるし、倍音も聞こえる。通常の原子物質(バリオン)の他に、暗黒物質があると、トーンが変わる。これらの音の具合を詳細に調べるデータがWMAP(宇宙マイクロ波背景放射を観測する探査機)の観測によって提供された。それによると、2003年の時点では、原子は4.6%、ニュートリノは0.4%で、暗黒エネルギーが72%、暗黒物質が23%だったのである。



NASAのマイクロ波観測衛星

現在の宇宙にある星、銀河、銀河間ガスなどは、原子でできている。ところが、宇宙にあるこれらすべての原子物質をかき集めても全エネルギーの4.6%程度にしかならない。残りの95%は、原子以外のものを想定しなければならない。そのうちの一つが「暗黒物質」であり、もう一つが「暗黒エネルギー」だった。宇宙の大部分を占めるとされる暗黒物質と暗黒エネルギーの存在は、これまで予測されてきた。だが、観測されてはいなかった。しかし現在は、未だ正体は不明ではあるが、とにかくWMAPによって観測されたという事実は、宇宙理解にとって大きな前進だった。

銀河、あるいは銀河団の誕生は、宇宙マイクロ波背景放射の「ゆらぎ」に原因があった。我々がよく見るこのWMAPの宇宙マイクロ波背景放射の写真は、ゆらぎのコントラストを見やすくするために諧調が調整されている。実際には、非常になめらかな分布で、平均温度の10万分の1程度の揺らぎしかなかった。この揺らぎは、宇宙が無から誕生した後のインフレーションの時に発生した量子的なゆらぎが基になっている。

「宇宙の晴れ上がり」の時期が過ぎる頃には、ガス雲が重力不安定になり、密度の高い場所が成長し、星や銀河の種ができた。ところが、密度ゆらぎが10万分の1程度では、密度の高い領域であってもその成長は遅く、とても現在の銀河をつくるには至らない。宇宙年齢の間に稼げるコントラストの増加は、せいぜい1,000倍程度だから、これではどうにもならない。

ここで登場するのが、暗黒物質である。宇宙マイクロ波背景放射の揺らぎのコントラストは10万分の1だった。これはバリオンの密度ゆらぎのことである。宇宙の晴れ上がりまで、バリオンは放射と強く結びついていたので、密

度ゆらぎを成長させにくかった。一方、暗黒物質の方は、バリオンと光子との相互作用が弱いので、比較的自由に密度ゆらぎを成長させることができた。そして宇宙が晴れ上がった後、バリオンの密度ゆらぎは、暗黒物質の大きな密度ゆらぎに助けられるように急激に成長した。このおかげで、宇宙年齢が 1 億歳の頃には太陽質量の 100 万倍程度の暗黒物質の固まりができ、そこにもバリオンが集められた。

バリオンの質量は暗黒物質の数分の 1 程度だった。それでもとにかく、星をつくることができるようになり、銀河の種ができた。後はそれらが合体を繰り返し、成長することだ。原始物質だけだと重力が弱く、現在の宇宙年齢である 137 億年の間に銀河はできない。暗黒物質の助けがどうしても必要だった。

宇宙年齢が 2 億年の頃になると、暗黒物質に導かれて星が生まれ、銀河の種ができた。それまで宇宙は真っ暗だったので、「宇宙の暗黒時代」と呼ばれた。もし宇宙誕生 2 億年後に一番星ができたとしたら、それは、今から 135 億年かあなたの昔になる。しかも、できた星は 1 個または数個だけだろう。それらは、現在我々が手にしている望遠鏡では観測することはできない。あまりに遠く、暗いからだ。ただ、コンピュータ上では、ここに述べたことは、シミュレーションが可能になっている。

暗黒物質の助力を得て宇宙の一番星ができる頃のガス雲の物理的な状態については、はっきりとは分からない。かなり重い星、太陽の 1,000 倍程度の質量をもつ星ができたかもしれない。もしそのような星であれば、100 万年も経てば超新星爆発を起こすことも十分あり得る。そのようにしてガスから星へ、星からガスへという循環がスタートしたのであろう。

むしろ、このような循環を起こさせるには、ガス自身の重力だけでは不十分である。星になる物質が集まることのできたのは、もともと数倍も重いはずの暗黒物質によった。宇宙誕生後 1 億年後頃にできた最初の物質は、暗黒物質の固まりだったと言ってよい。これを学者たちは、「暗黒物質のハロー (DMハローという)」と呼んでいる。

このDMハローは、単体でできたわけではない。密度の高い領域では何億個も出来上がり、それらがどんどん合体して、太陽質量の 100 万倍程度に太っていった。このようなDMハローが基になり、順次合体して、現在見られるような銀河の階層構造を形成してきたのである。

このような暗黒物質に操られて銀河が形成されてきたという考え方は、カルロス・フレンクらの論文が 1985 年の「ネイチャー」誌に投稿されたことによって明らかにされた。その後、多くのグループが、このような銀河形成論を観測的に検証しようと、熱心に調査され続けている。

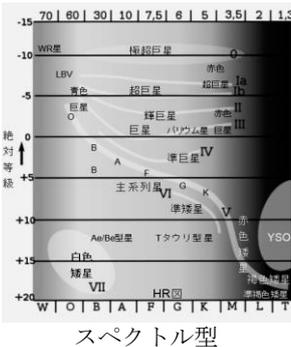
さらにこれと似たような考え方ではあるが、少々違うモデルも提唱されている。それは、DMハローの成長はバリオンの成長より早かった。暗黒物質は塊として合体成長していくが、バリオンはDMハローの質量のたくさんあるところに、川が流れるように流れ込んでいった、という考えである。塊の合体か、それとも流れ込みか、それを決定するのは現時点では難しい。銀河の種の時代 (130 億光年以上か) のガスの運動状態を調べることができないからである。当時最も多かったガスは、中性水素原子ガスだった。現在の電波望遠鏡や受信機では、これらの原子が放射する電波領域のスペクトル線を分析するには不十分である。現在は、平方キロメートル電波アレイ (SKA) というプロジェクトが進められている。もしこれが完成すれば、塊の合体か、それとも流れ込みかがはっきりするかもしれない。とても楽しみである。

#### 4. 暗黒物質の実体と本性

暗黒物質の存在は確認できたが、それが何なのか、今もって分かっていない。世界中の研究者が実態究明に努力しているのだが、未だ確かな答えは出ていない。そこで、暗黒物質について、今分かっていることを整理しておこう。

まず、我々が知っている原子や素粒子でない。

次に、宇宙には暗く見えない天体がたくさんある。例えば、褐色矮星とか、ブラックホールなどである。しかし、そのような天体も暗黒物質ではない。このことは、大マゼラン星雲の星 100 万個ぐらいを観測し、次のような検証作業が行われた結果、判明した。



目には見えなくても重力の大きな天体が横切ると、重力効果を起こして光を曲げて集める。すると、ある時だけ一時的に明るくなる。そしてその星が通り過ぎると元に戻る。そのような現象を探し続けた。その結果、暗い天体だけでは必要な質量に満たなかった。その暗い天体が太陽と同じぐらいの重さだった場合、その重量は銀河の中の10%以下にしかない。この種の天体が暗黒物質のごく一部の役割を担うことはあり得る。しかし、暗黒物質のほとんどは、この種の天体ではない。

さらに、暗黒物質は冷たくないといけない。暗黒物質は銀河をつくる役目を果たした。銀河が最初につくられたのは、宇宙誕生後5億年頃であろう。その時に、もし暗黒物質が熱いと粒子などが飛び回り、一か所に集まることは難しい。暗黒物質が一か所に集まっていないと、銀河形成の役目を果たせない。というわけで、暗黒物質は冷たく、ゆっくり動き、重いものになっていなければならない。

四番目に、暗黒物質は電気をもっていない。通常の物質は電気をもっているため、他の物質と反応してしまう。ところが、暗黒物質は銀河団同士が衝突する時も、ぶつかることなくすり抜けてしまう。ということは、暗黒物質は電気をもっていないことになる。

五番目に、暗黒物質の重さについては何も言えない。現在分かっていることは、陽子一つの重さに対し、10の31乗分の1倍から、10の50乗倍の範囲に入ることである。つまり、素粒子のように軽くても、あるいは眼に見えるような重いものであっても、問題はない。重さの範囲が分かると、およその見当はつきやすいものだが、81ケタの範囲の幅となると、特定化することには役立たない。

六番目に、普通の元素ではない。我々の周囲のどこにでもあり、我々はそれに囲まれている。目に見えず、何でもすっとすり抜けてしまうところから、「オバケのようなもの」と表現している学者もいる。暗黒物質は、今この瞬間も、我々の体をすり抜けているはずである。

七番目は、最近の観測結果から、銀河団の暗黒物質は、どこにどれだけ分布しているかが分かってきた。それは球形ではなく、少し伸びていて、大きくゆがんだ楕円形で分布していることが多い。

最後に、寿命についてである。暗黒物質が発生したのは、宇宙が誕生した直後である。宇宙で暗黒物質ができるほど大きなエネルギーがあったのは、宇宙誕生直後である。その頃であれば、宇宙はとても小さくて熱く、ものすごいエネルギーがあったので、重い素粒子もつくられたと考えられる。宇宙の初期の頃にできた素粒子はお互いに出会って反応することで消滅するのだが、暗黒物質は他のものに反応しないので、そのまま残ったと考えられている(ほんの少しだけは反応して、普通の物質に変わってしまったと考える学者もいる)。以来現在まで存在し続けている。今後もこのまま存在し続けると推測できるが、その点については何も言えない。

## 5. 暗黒物質の候補

現在、この暗黒物質の正体を明らかにしようと、世界中の物理学者が英知を傾けている。暗黒物質の候補としてこれまでに名前が上がっているのは、「ニュートリノ」、「アクシオン」、「ニュートラリーノ」の三つである。

特に「ニュートリノ」の特徴と暗黒物質の特徴とは似ているところが幾つかある。そのため、かつては有力な候補と考えられていた。確かにニュートリノはこの宇宙に満ち溢れている。計算すると、何も無い空っぽの宇宙空間でも1立方センチメートルの中に300個ほどある。数だけでみると、この宇宙で一番多い元素である水素の、約10億倍の量のニュートリノが存在していることになる。ところがニュートリノの重さは軽く、その総量は、暗黒物質の推定量には到底及ばない。現在分かっているニュートリノの重さは、電子の100万分の1にも満たないので、宇宙全体で集めても0.1~1.5%ぐらいにしかない。23%には遠く及ばない。

ニュートリノが暗黒物質の候補になりえないもう一つの理由は、ニュートリノは光とほぼ同じ速さで移動し、熱いということである。実は、昔の高温の宇宙では、宇宙空間全体にわたって存在するニュートリノが光速近くで動いていたことが分かっている。ニュートリノが、光速近くで動いていた期間にどのぐらいの距離を動いたかは、ニュートリノの質量の大きさによる。もし宇宙全体のうち約20%を占めるだけの質量があれば、その距離は超銀河団、宇宙の大構造サイズになる。

すると、最初に超銀河団より小さいサイズの物質の密度ゆらぎがあったとしても、小さいスケールではニュートリノが自由に動くため、密度ゆらぎが消滅してしまう。密度が高いところと低いところが混じり合い、ならされてしまうことになる。密度が大きくて構造ができるのは、超銀河団サイズからとなる。その後、超銀河団サイズの天体が分裂、収縮などをして、銀河団、銀河がだんだん形成されていくことになる。これは、昔、ソ連の天体物理学者のゼルドビッチが描いていた「パンケーキモデル」である。

このモデルの難点は、銀河ができるまでに時間がかかりすぎることである。最近の観測では、銀河はかなり早くからできたと推定されている。従って、合わない。宇宙膨張により温度が下がってくると、ある時期に宇宙空間全体にわたって存在するニュートリノの速度は遅くなる。すると、重力ポテンシャルが大きくなり、宇宙背景放射のゆらぎが大きくなってしまう。従って、暗黒物質はニュートリノではありえない。

暗黒物質にできたムラがそのまま残るためには、暗黒物質の速度が今も昔も遅くなくてはいけない。つまりニュートリノのような熱い素粒子ではなく、冷たい素粒子でなければならない。物理学者は、「アクシオン」とか「ニュートラリーノ」ではないかと考えている。どちらもあまり聞いたことのない名前であろう。これらは、普通の物質をつくる粒子ではなく、理論的に予言されているだけで、実際にはまだ見つかっていない。

「アクシオン」は原子核力(強い力)を説明する理論である量子色力学と関連してその存在が期待されている。「ニュートラリーノ」もまた、超対称性理論においてその存在が期待されている。では、その超対称性理論とは何か。素粒子論では、この世の中に存在する 4 つの力(重力、強い力、弱い力、電磁気力)は、宇宙のごく初期では一つの力に統一されていたはずだと考える。その中である時期に重力を除いた、強い力、弱い力、電磁気力の三つの力が 1 つの力に統一された時代があったと考える。これが、「超対称性理論」である。この理論が本当だとすると、期待されているのが「ニュートラリーノ」である。

これらの二つの「冷たい暗黒物質」は、昔から動きが遅いはずだったから、小さいサイズの密度ゆらぎが消されずに残ることが可能である。すると、小さいサイズの銀河から、次第に大きな超銀河団に至る「階層的集団化モデル」を形成することが可能になる。ただし、「アクシオン」も、「ニュートラリーノ」のいずれも、その存在はいまだ未確認で、実際に観測してみなければ何も言えない。

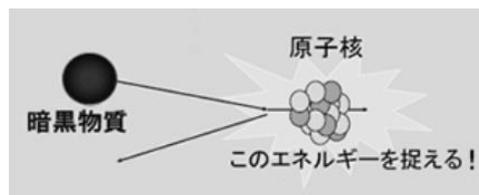
この二つの候補以外にも、暗黒物質に関わる新しい仮説が提案されている。アメリカのリサ・ランドール博士の考えは次のようなものである。我々が認識している四次元の宇宙には膜がある。それと同じような四次元の世界が別にあり、その二つが平行して存在している。その並行している二つの空間はワープして(両者を筒のような形のものに結んでいるのだが、その片側が小さく、もう一つの片側が大きくなっている)、その別次元の宇宙から暗黒物質のエネルギーが働きかけている。この見えない重い素粒子が我々からは見えない別の宇宙で動き回っていて、そのエネルギーが我々の宇宙に影響を及ぼしている。

このような考えは、我々常識人にとっては、突拍子もない理論である。ところが、物理学の世界では今真面目に考えられている。ある不可解な現象を矛盾なく説明できるような理論を考え、その理論を実験的に検証していくのが物理学の研究方法である。その意味では、仮説として、選択肢の一つに残しておくことは重要であろう。

暗黒物質を実験室でつくることができる可能性はないのか。これは、今のところ、無理であると考えられている。アインシュタインの有名な式( $E=mc^2$ )によれば、重さとエネルギーは変換できる。つまり、重い素粒子を作ろうとすると、大きなエネルギーを注がねばならない。素粒子を人工的に作るには加速器を使い、陽子などを加速・衝突させる方法を使う。この方法で暗黒物質を作ろうとすると、非常に大きな加速器が必要になる。ということより、暗黒物質の正体が分からない限り、どういう加速器を作ったらよいか分からない。今は、こういう状態なのである。

暗黒物質は、他の物質と反応しない。反応しないものをどのようにすれば捕まえることができるのか。それは反応があまり頻繁に起こらない静かな場所に行くしかない。地上には宇宙からたくさんの粒子が降ってくる。例えば、ミュオン粒子という粒子は宇宙から降ってきて、1 秒間に 1,000 個ぐらい我々の体を通り抜けている。このような粒子も地下に行けば邪魔されるものは少なく、反応もほとんどない。そういう静かな地下に実験室を作り、とても精度の高い測定器を置けば、数年に一回は、暗黒物質の反応が観測できるかもしれない。そういう気の長い話である。アメリカのミネソタ州の鉱山の地下 800 メートルの場所に、CDMSという純度の高いゲルマニウム結晶を使った実験装置が置かれ、20 年以上にわたって観測され続けている。

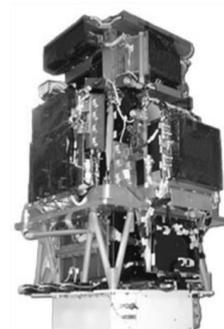
岐阜県の神岡町に建設したXMASS(エックスマス)という実験装置もその一つである。神岡鉱山の地下 1 キロメートルの場所に 100 キログラムの観測装置を設置し、普通の素粒子が入ってこないようにして、暗黒物質を捕まえるための検出器を水のタンクの中に入れてある。検出器のなかの雑音が出ないようにきれいになっていないといけな。そこで、一つ一つの装置をクリーンルームで組み立てている。そこでは、巨大なプール(約 1 トンの液体キセノンが入っている)に宇宙から暗黒物質が降ってくるのを待ち受け、プールの中の原子と暗黒物質原子がコツンとぶつかる際の小さな動きを検出しようとしているのである。



また、次のような方法で暗黒物質をとらえることができるのではないかと考えている人たちもいる。夏は地球の動きと太陽系の動く向きが同じになるので、銀河系全体に対する地球全体の動きは相対的に早くなる。逆に冬は地球の動きと太陽系の動く向きが逆になるので、銀河系全体に対する相対速度は遅くなる。銀河系には暗黒物質がたくさんあるので、地球の速度が速ければ暗黒物質が地球にやってくる速度が速くなり、量も多くなる。地球の速度が遅い場合は、暗黒物質が地球に向かう速度は遅く、量も少なくなる。

このように、季節によって暗黒物質の速度と量が変化するので、その差をとらえることができれば、暗黒物質の正体がわかるのではないかとというわけである。イタリアの研究グループが 8 年間観測を続け、その差をとらえたと発表した。同じような観測がたくさん発表されているが、他の観測結果と矛盾するところもあり、その発表の説明には今のところ信憑性が少ない。

さらに変わったところでは、南極の氷を全部装置代わりにして観測する計画も進んでいる。南極の氷が一番厚いところでは 4,000 メートルの厚みがある。この氷に直径 1 メートル、深さ 2,400 メートルの穴をあけ、「光電子増倍管が入った光学センサー」を埋め込み、暗黒物質同士の衝突で生み出されたニュートリノを捕まえようというのである。



観測衛星 パメラ

その他、銀河の中心に集まっている暗黒物質が出会うと底から強い光が出るのではないかと考えて観測しているグループもある。また、暗黒物質同士の反応では、反物質も生成されると考え、その反物質をとらえることで暗黒物質を解明しようという観測もなされている。実際、イタリアやロシアを中心とした観測衛星パメラとアメリカを中心としたガンマ線観測衛星フェルミがそれぞれ、反物質をとらえたと報告している。しかし、それらが暗黒物質の反物質であることの証明は十分ではなく、その報告がどこまで信憑性があるのか、いまだはっきりしていない。



ガンマ線観測衛星  
フェルミ

ここまでは、暗黒物質を発見する試みであるが、ある学者たちは、暗黒物質をつくる取り組みをしている。欧州合同原子核研究機構は、スイス・ジュネーブ郊外の地下に一周 27 キロメートルにもなる大きなトンネルを作り、「大型ハドロン衝突型加速器」を設置した。その中で 2 つの陽子を高いエネルギーで加速して衝突させるなら、ビッグバンが起きた時に、この宇宙で起きたことが分かるのではないかと考えられている。多くの科学者が、そのとき、一緒に暗黒物質もできるのではないかと期待している。もし暗黒物質を捕まえて解明に成功すれば、宇宙ができてから「100 億分の 1 秒後」の世界に迫ることも夢ではなくなる。

現在、東京大学国際高等研究所数物連携宇宙研究機構が中心になり、国立天文台や外国の研究機関と協力して数十億光年離れた銀河を何百万個も観測する「すみれ計画」を立てている。これは宇宙のゲノム計画と言われるもので、すばる望遠鏡を使って、銀河のイメージと分光器による赤方偏移の観測をして、詳しい暗黒物質の地図を作ろうとしている。このため、9 億画素、重さ 3 トンの大型カメラや 1 度に 3,000 個ぐらいの銀河を観察できる分光装置を製作し、すばる望遠鏡に取りつける予定である。

この計画が進められると、さらに詳しい暗黒物質の地図をつくることができる。現在作られている暗黒物質の地図はほとんどが二次元のものである。平均的な分布は分かるが、奥行きがどのようになっているのか分からない。三次元の地図が作られていないわけではない。しかし、範囲が非常に狭いため、大規模構造までには至っていない。

ない。宇宙が誕生した頃は、暗黒物質はどこでもほぼ同じ濃さだったが、時間が経つにつれ、だんだん集まるようになり、濃いところと薄いところとができ、大規模構造をつくってきた。もし「すみれ計画」が進めば、広い範囲で暗黒物質の地図をつくることができ、宇宙の大規模構造や昔の暗黒物質の状態をも観測できるようになるだろう。宇宙の進化の過程が明らかにされることを期待したい。

また、近い将来、素粒子物理学の研究者の国際組織が「国際リアコライダー (ILC)」という巨大加速器の建設を計画している。ビッグバンで起こったことを詳細に調べることが目的にしている。岩手・宮城両県にまたがる北上山地と、佐賀・福岡両県にまたがる脊振山地の地域で熱心な誘致活動が広がられている。長期にわたる巨額の財政負担をめぐって諸問題を解決する必要がある、難題も多いが、ぜひ実現してほしい(朝日新聞、2013年8月13日号朝刊)。

なお、暗黒物質が正体不明の物質であるなら、もしなんらかの未知の素粒子が見つかった場合、それが暗黒物質であるかどうかのように確認するのか。それは結局状況証拠を積み重ね、消去法によって確定していく方法しかない。光を発したら暗黒物質ではないし、化学反応を示したら暗黒物質ではないと、一つ一つ潰していかなければならない。あるいは、発見された素粒子が今まで知られているあらゆる現象に当てはまらなければ、暗黒物質である可能性は高い。もっとも、暗黒物質に、これまで発見されていないような性質があった場合には、見つけるのがさらに困難になるのだが。

このようにして、世界中の物理学者は、暗黒物質の正体を明らかにするために観測や実験を繰り返し、さまざまなデータを集めている。未だ暗中模索の段階ではある。実験や観測で得られた事実をつなぎ合わせ、矛盾がないような説明をすることに集中している。多くの科学者は、あと5年もすればこの正体が明らかになるのではないかと期待している。

## II. 暗黒エネルギー

WMAPの観測によれば、宇宙に存在する全物質の4%のみが我々の知っている通常の物質であり、23%が暗黒物質、73%が暗黒エネルギーである。前章では、暗黒物質について検証したので、本章では、暗黒エネルギーについて考えてみよう。

実は、暗黒物質も、暗黒エネルギーも、どのようなものか分かっていない。にもかかわらず、物質とエネルギーとに分ける理由は何か。一番の違いは、「暗黒物質」は一つの場所に留まって天体などの動きに大きな影響を与えているのに対し、「暗黒エネルギー」は、ある場所に局在することなく、宇宙全体にほぼ一様に存在し、宇宙全体に大きな影響を及ぼしていることにある。従って、宇宙が膨張すると、暗黒物質は普通の物質同様薄まるのに対し、暗黒エネルギーの方は薄まらず、一様であり続ける。

従って、暗黒物質の方が我々には分かりやすく、1930年代にはその存在が論議され始められている。しかし暗黒エネルギーの方は、1998年、今からわずか10年ちょっと前になって初めて、宇宙物理学者の間で注目され始めたものである。暗黒物質の正体は間もなく明らかにされることだろう。ところが暗黒エネルギーの方は、今やっと解決の糸口に立ったところで、今世紀いっぱいかかるという学者もいる。場合によっては、我々の宇宙観を根底からひっくり返すような結論に導かれるかもしれない。

### 1. 暗黒エネルギーが提唱されるまで

1917年、アインシュタインは一般相対性理論に基づく最初の宇宙モデルを発表した。彼は、宇宙を静止したものと考えていたので、その数式に「宇宙項」を導入した。しかしその後、宇宙が膨張していることが明らかになったので、その「宇宙項」を不要なものとし、破棄した。だが、ルメートルは膨張する宇宙においても宇宙項は必要であると主張し、アインシュタインに再考を促した。その後も、この「宇宙項」をめぐっての議論は、宇宙物理学者の間で盛んに論じられてきた。だが、決定的な観測的進展はなかったため、結論は出なかった。

一方、この「宇宙項」の問題は、宇宙スケールの問題だけでなく、ミクロの世界を記述する「場の量子論」の問題としても、真剣に受け止められるようになった。というのは、場の量子論においても「物質が存在しない真空の空間においても、大量のエネルギーが詰まっている」という計算結果が出ていたからである。場の量子論の枠内に留ま

る限り、この結果は大きな問題にならない。しかし、ミクロの世界から大きな宇宙の世界にそれを広げていくと、話が違ってくる。

一般相対性理論によれば、もし真空中にエネルギーが存在するとすれば、宇宙空間を著しく曲げてしまうはずである。しかし実際には、この宇宙は広い範囲で平坦であることが分かっているため、矛盾してしまう。それゆえ、場の量子論で期待される真空エネルギーは、何らかの力によってゼロに打ち消されていなければならない。従って、この真空エネルギーを「宇宙項」にするわけにはいかない。では、この真空エネルギーを打ち消すものは何なのか、そういう問題が浮上してきたのである。

この問題は、意外な方向から大きなチャレンジを受けることになった。1998年、ローレンス・バークレー国立研究所のパーミュッタ(1959年～)は、遠方にある「超新星」の観測を通し、現在の宇宙が緩やかながらも再び「加速度的膨張」をしていることを発見した。その加速度的膨張は今から60億年ぐらい前から始まった。加速度が伴っている以上、この宇宙にはそうさせる何らかのエネルギーが存在しなければならない。しかし、そのエネルギーの正体は分からない。そこでパーミュッタは「正体不明のエネルギー」として自らの観測結果を公表した。

この宇宙の加速度的膨張は、アインシュタインの「宇宙項」の問題を蒸し返すことになった。その「宇宙項」が存在するとすると、量子論の場において計算上出てくる「真空エネルギー」を打ち消すことなく、かつある時点で加速度的な宇宙膨張をもたらすエネルギーでなければならない。そのようなことが可能となるためには、120桁以上もの精度で微調整されていなければならない。しかしそれはあり得ない天文学的数字である。

理論に不自然なものが見え、微調整を必要とするとき、その奥にはまだ明らかになっていない真実が隠されていることが多い。それは、地動説を拒否して天動説を守るために、(惑星の動きを説明するため)苦し紛れに周転円や従円などを持ち出したことを思い出せば、十分であろう。星や惑星などの動きはすべて、地動説と万有引力の法則から簡単に説明できた。しかし、その出発点に立たない限り、とんでもない微調整を繰り返さねばならなかった。

同様に、不自然な微調整を繰り返し求められる「宇宙項」の裏には、何か未知の真実が隠されているに違いない、そう考えるのはごく自然なことだった。1998年、超新星爆発の観測を通して宇宙の加速度的膨張が発見された(このことで、「宇宙項」の問題は一応の決着を見た)。シカゴ大学のマイケル・ターナーは、この加速度的膨張をもたらしている「宇宙を漂っている未知のエネルギー」が存在すると考え、それを「ダークエネルギー」と名づけた。日本語では「暗黒エネルギー」と訳されている。このエネルギーは、星とは違って光を発しないので「暗黒」である。と同時に「暗黒」という言葉には「正体不明の」という意味もある。そんな点が受け入れられたのであろう。その名は瞬く間に、世界中に広がった。

宇宙の加速度的膨張が明らかにされてから、この「暗黒エネルギー」の実態を解明するためのさまざまな理論的説明が提唱されている。しかし、今のところ、十分な説得力をもつ理論はない。むしろ、「暗黒エネルギー」の性質を観測的に明らかにする試みもいろいろなされている。しかし、暗黒物質以上に難題に満ちており、21世紀最大の天文学、あるいは素粒子物理学の問題となっている。

## 2. 暗黒エネルギーの発見

2003年、WMAP(宇宙マイクロ波背景放射を観測する探査機)は、この宇宙は原子4.6%、ニュートリノ0.4%、暗黒エネルギー72%、暗黒物質23%からできていると、発表した。普通、このような発表がある以上、当然「暗黒エネルギー」の正体は分かっていると考えられやすい。しかし、暗黒物質同様、暗黒エネルギーを想定しないと、今の宇宙を説明できないので使われている言葉である。その正体が明らかになっているわけではない。実際、暗黒物質の方は、近いうちにその正体が明らかにされると期待されているが、暗黒エネルギーの方は、まだ解決の糸口さえつかめていない。とりあえず、暗黒エネルギーとは、「宇宙全体を一様に満たしている正体不明のエネルギー」と定義しておき、話を進めることにしよう。

このエネルギーが確認されたのは、1998年、今からわずか15年ほど前のことである。その年、ローレンス・バークレー国立研究所のパーミュッタ(1959年～)は、現在の宇宙が、今から60億年ほど昔より、緩やかながらも再び加速度的膨張をしていることを発見した。加速度が伴っている以上、何らかのエネルギーが宇宙の膨張を加速さ

せているはずである。しかしその正体は分からない。そこで彼は、「正体不明のエネルギー」として、自らの観測結果を公表した。

1920年代にハッブルが宇宙膨張説を唱え出したころは、学者間でも彼の考えはほとんど相手にされなかった。ところが、20世紀後半になると、たくさんの観測結果から、もはや宇宙が膨張していることに疑義をはさむ人はいなくなった。問題はその膨張の仕方である。加速度的な膨張であるとは、誰も想像していなかったのである。

宇宙誕生の時にもインフレーションがあった。それは、真空エネルギーが空間を押し広げる力によって起こった。その際、真空エネルギーはゼロになった。確かに、その後も宇宙は膨張し続けているが、それはいわば惰性によるもので、膨張速度はそのうち減速すると思われていた。そんなところに、宇宙は再び加速膨張に転じているという観測結果が提示されたのである。学界は大騒ぎになった。さまざまな新たな観測が始まり、最終的には、2001年に打ち上げられたWMAP衛星による観測結果が2003年に公表されるに及んで、一応の決着が見られた。

現在、この宇宙を満たしている暗黒エネルギーの値自体は非常にわずかなもので、宇宙の初期にインフレーションを起こした真空エネルギーに比べると、100ケタくらい小さい。それでも、普通の物質の総量よりはるかに大きく、暗黒物質に比べても3倍以上になる。この暗黒エネルギーについては、膨張させる力があるという以外、何一つ分かっていない。このなんだか分からないエネルギーが宇宙の創生時から存在しており、それが約80億年の間何もしていなかったのに、突然動き出して宇宙を膨張させているという話である。

暗黒物質と暗黒エネルギーは本質的に同じものだ、と考える学者もいる。同じものが薄く広がれば暗黒エネルギーになり、濃い場所では暗黒物質になると説明する人もいる。あるいは、宇宙は凍りかけた湖のようなもので、氷になっているところが暗黒物質であり、液体として広がっているのが暗黒エネルギーだと提唱する人もいる。暗黒エネルギーなどというものは存在せず、何らかのエネルギーによって膨張しているのではなく、我々の知らない重力の別の働きが加速膨張を引き起こしているに過ぎないという意見もある。

このような批判的見解には、説得力のある部分もある。と同時に、全外的外れであるという部分もある。とにかく、宇宙が加速膨張していることは、超新星の観測からも証明されており、暗黒エネルギーの存在を想定しない限り、すべての観測結果を説明することは難しい。現在のほとんどの学者はそのように考えている。

現在暗黒エネルギーを研究している人たちは、暗黒エネルギーが時間的に変化するのかどうか、確かめようとしている。つまり、加速はずっと続くのか、それとも速度は緩まるのか。彼らは日夜、銀河を何百万個も観測するという大変な作業を行っている。その結果によっては、我々の宇宙の行き先も大きく変わることだろう。

暗黒エネルギーの存在については、「状況証拠」からそう信じるのが一番自然だ、という理論である。その正体は、暗黒物質とは違って、全く不明である。宇宙空間の膨張のようすから間接的に分かるのみである。重力レンズ効果(大きな重力をもっているものは、近くに来た光を曲げてしまうという性質があることを利用し、その銀河の歪みを解析する観測方法)やバリオン音響震動の観測によって、暗黒エネルギーの特徴がより明らかになるかもしれない。正体が絞られるだけで、正体までは明らかにならないかもしれない。まずは、このエネルギーの正体に関する画期的な理論が出される必要がある。そしてその理論(モデル)を「証明する」観測方法が提案されねばならない。

暗黒物質エネルギーについては、未だ、議論の糸口さえつかめていない。

### 3. 超新星爆発

この暗黒エネルギーを発見するきっかけとなったのは非常に遠くの宇宙で起きた超新星爆発だった。この超新星の加速度的な膨張の発見者アメリカのローレンス・バークレー研究所のソール・パールマター(1959年～)とオーストラリア国立大学のブライアン・シュミット(1967年～)、そしてアメリカのジョンス・ホップキンス大学のリース博士に対し、2011年度のノーベル物理学賞が授与された。

では、超新星爆発とはどういうものか。まず一般的な星の死について話すことから始めよう。

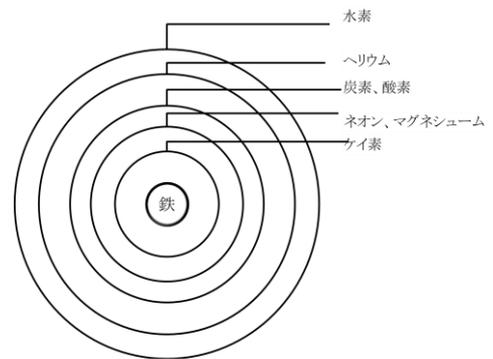
星は、水素をヘリウムに変えながら、光を放っている。通常、その状態で長い安定期を過ごす。しかし、その長

い安定期もいつかは終わる。星の中心部にある水素がすべてヘリウムに変換されると、星はエネルギーをつくれなくなる。それでも星の表面からエネルギー放出は続くため、星は縮み始める。一方星の中心には水素の燃えかすのヘリウムがたまっていく。そのヘリウムの芯は、さらに縮んで圧力が強まり、それによって押し出された外層は膨張してどんどん広がっていく。星の表面が広がれば面積は増え、その分温度が下がり、赤くなる。晩年に入った星は外から見ると赤い大きな星「赤色巨星」になる。

星の中心では、ヘリウムの芯が縮み、一層高温になる。一億度を超えると、ヘリウムの核融合が始まって炭素がつくられる。出来立ての炭素とヘリウムが核融合して、酸素もつくられる。宇宙が誕生したときには、水素とヘリウムしかなかった。それが、星という場を借りて新しい元素がつくられていく。ここまではすべての星が歩む道である。ところが、ここからは、質量が大きい「重い星」と、小さい「軽い星」とでは、歩む道が異なる。ここでは、超新星爆発の話なので、重い星に焦点をあてることにする。

太陽の質量の 8 倍以上ある星を「重い星」と呼ぶ。その星では、表面から放出されるエネルギーをまかなうため、中心にできた炭素と酸素の芯はさらに縮んでいく。それに伴い中心温度もうなぎ上りに上昇し、やがて 8 億度に達する。すると、炭素が核融合をはじめ、酸素、ネオン、マグネシウムなどの元素が新たにつくられる。中心部の炭素が燃え尽きると、また縮み、今度は酸素などが燃え、ケイ素、硫黄、カルシウムがつくられる。それも燃え尽き、また縮み、10 億度を超えるとケイ素などが燃え始め、鉄がつくられる。

このときの星の中心は、鉄、その次にケイ素、硫黄、カルシウムの層、酸素、ネオン、マグネシウムの層、炭素と酸素の層、ヘリウムの層、水素の層と、いろいろな元素の層からなるたまねぎ構造となる。晩年を迎えた重い星は、自らの重みで中心部の温度を上げ、核融合によって新たな元素を次々と生み出していく。ところが、鉄までくると核融合は止まり、これ以上核融合によってエネルギーを取り出すことができなくなる。そこで星はひたすら収縮し、中心温度は 50 億度にまで上がる。これほどの高温になると原子核も無事ではいられず、構成要素である陽子や中性子に分解されてしまう。分解によって一挙にエネルギーが失われ、重力に対抗できなくなった星は一瞬にしてつぶれてしまう。

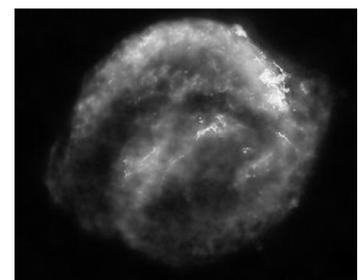


この瞬間、ほとんどの中性子は星の中心半径 10km ほどの範囲に集まり、硬い芯でできた「中性子星」がつくられる。中心めがけて高速で落ちてくる星の物質がこの硬い芯にぶつくと、超高温で強烈な衝撃波が生まれる。このとき、大量のニュートリノが放出される。そのニュートリノのエネルギーの一部を吸収した衝撃波は、外に向けて駆け上がり、星の表面に達する。すると、星はパァーと明るくなり、大爆発を起こす。星は太陽の 30 億倍もの明るさで輝き、星全体が宇宙空間に向けて飛び散っていく。これが超新星爆発の瞬間である。

質量が太陽の 20 倍以上もある「重い星」の場合、星の中心には「中性子星」ではなく、「ブラックホール」がつくられる。そして爆発の際には、星の物質が極度の高熱になることで、鉄よりも重い元素が一気につくられる。我々や我々の身のまわりにあるすべてのものを構成する元素の多くは、星と超新星によってつくられた。科学的に言えば、この世に星がなければ、我々人間が生まれてくることもなかった。

超新星は、観測される光の特徴から七つほどの種類に分類される。その中の一つに Ia 型の超新星がある。Ia 型超新星爆発は、二つの星がお互いの周りをぐるぐる回る連星で起こる。その連星の組み合わせには、次の二つのパターンがある。

一つは、白色矮星に巨星の伴星という組み合わせである。白色矮星は自分の重力によって巨星からガスをどんどん吸い上げる。その結果、白色矮星は重さを増し、重力がより強くなっていく。重力が強くなると、ガスを飲み込むスピードはさらに増す。すると、重さが増え、重力がさらに強くなる、というサイクルが繰り返えされる。ただし、このサイクルは永遠に続くわけではなく、どこかで自分自身の重力に耐えられなくなり、潰れ始める。この時に大きな爆発を



超新星爆発の残骸

起こすのである。

もう一つの組み合わせは、白色矮星と白色矮星の組み合わせである。この場合は、お互いに衝突して合体する。その時に超新星爆発を起こす。

このIa型の超新星爆発は、銀河全体より明るく光る。地球に届く光を調べればどのタイプの超新星爆発かを調べることができる。Ia型の超新星は、どれも明るさは同じである。しかし、Ia型なのに、暗い超新星爆発が観測されることがある。暗く見えるのは、爆発が起きた場所が地球から遠く離れているからである。つまり、観測された爆発の明るさを調べることによって、爆発した場所が分かるので、Ia型の爆発は宇宙空間の距離を測るよい指標になる。Ia型の超新星がある銀河からの光を観測し、赤方偏移を測れば、それぞれの銀河がどれくらい早く遠ざかっているかを比較できる。

このIa型の星を調べた結果、宇宙の膨張速度はどんどん増加していることが分かった。宇宙の膨張速度は、宇宙の創生以来だんだん遅くなっているはずである。宇宙が広がればその密度は薄まる。もし大きさが2倍になれば、縦、横、奥行きの方で長さがそれぞれ2倍になるので、堆積は8倍になり、密度は8分の1になる。すると、宇宙のエネルギー密度が低くなるので、宇宙の膨張速度は遅くなる。それが、全く逆の観測結果が得られた。宇宙物理研究者たちが驚くのも当然である。

宇宙が大きくなっても薄まらないエネルギーがどこかにあるはずである。引力に対抗する宇宙を広げようとする斥力を仮定しないと話のつじつまが合わない。宇宙が加速度的に膨張しているとすれば、宇宙が広がるたびに、それを補うような増え続けているエネルギーが必要になる。これが暗黒エネルギーを想定する理由である。

#### 4. 第二のインフレーション

宇宙が膨張しているというとき、遠くの銀河の方が速く遠ざかっているように見える、ということを行っているのではない。AとBとCという点があったとする。A～Bは1の距離、B～Cの距離は2とする。A～Bが2になると、B～Cが4になる。Aから見ると膨張が大きくなっているように見える。しかしここで、加速度的に膨張するとは、ある時点でA～Bが1、B～Cが2だったのに、その後ある時点から、A～Bが1ではなく1.5、B～Cが2ではなく3になったということである。すると、同じ時間が経った場合、A～Bが2.25に、B～Cが4.5になった、ということである。従って、これを第二のインフレーションと呼ぶ人もいる。

宇宙創生の初期のインフレーションでは、膨張の速度は10のマイナス36乗秒ごとに倍になるというものだった。しかし、今の第二のインフレーションによる宇宙の膨張速度は、最初のインフレーションとは違い、ごく緩やかなものである。

観測によれば、第二のインフレーションは60億年ほど前に始まった。なぜ60億年前なのか。この時期は、人類という知的生命体が宇宙に誕生するのにちょうどよい時期だった。もし第二のインフレーションの開始時期が早すぎたら、宇宙にある水素やヘリウムといったガスは、今日のように固まることなく、拡散し、今日のような天体は形成されなかつただろう。

太陽系が形成されていくのは、46億年前である。天体が形成されなければ生命が誕生することもなく、当然人類という知的生命体が宇宙に出現することもなかった。137億年という宇宙の歴史の中で、第二のインフレーションは偶然にも、人類が出現するのにちょうどよい約60億年前という時期に始まったのである。

もし残った真空エネルギーが一桁でも多ければ(10倍)、開始時期が早すぎて人類は生まれなかつたと考えられる。否、2倍違っても人類の出現は難しかったのではないかと思う。絶妙な条件が整っていたからこそ、人類がこの宇宙に生まれてきたのである。電弱統一理論を完成したスティーヴン・ワインバーグは、この偶然性の問題は「人間原理(人間原理については、次回の講演において詳しく説明する)」という考え方しか説明できないのではないかと言っている。

#### 5. 宇宙の未来

我々の宇宙は、現在のところ暗黒エネルギーによって加速度的に膨張していることは分かった。では、この宇宙は、今後どうなるのか。それについては、次の4つの考え方がある。そのいずれもが暗黒エネルギーと深く関わっている。

まず、宇宙は大きくなっていくが、ある時点を境にして収縮に転じ、最終的にはまた小さな点、かのビッグバンの状態に戻る、という予測である。この考えは、依然はかなり有力だった。しかし、暗黒エネルギーの発見を契機に、この考えを信じる学者はほとんどいなくなった。

二番目に、宇宙は、暗黒エネルギーによって加速膨張し続け、最終的には宇宙は破裂し、空間も原子もバラバラになってしまうという予測である。

三番目は、宇宙は暗黒エネルギーによって現在のスピードで膨張し続け、それが永遠に続くと予測する。二番目のように、どこかで破裂するという考えはない。宇宙は膨張しているので、最終的には、遠くの銀河はより遠くに行ってしまう、地球からは見えなくなる。つまり、このまま宇宙が光より速く膨張し続けると、今観測できているたぐさんの銀河からの光も、いずれは見えなくなる時が来るということになる。

四番目は、物質と暗黒エネルギーの割合によって、宇宙はだんだん膨張速度が穏やかになる。そして、次第にゼロに近づき、最後は膨張が停止すると予測する。この場合も、宇宙の膨張は止まるが、宇宙そのものは終わるわけではなく、永遠に存続することになる。

我々の宇宙は、これから先、いったいどの道を歩むのか。そもそも暗黒エネルギーの実態が分かっていないのだから、今の時点で予測することは難しい。将来どれかの道をたどるであろうが、それは数千億年後の話である。現在の人類が関われるような話ではない。被造物の管理を任されている者としては、きちんと見据えておきたいという思いはある。だがきつと、そこまで心配すると、「It's not your job」と神から言われそうな気がする。

### Ⅲ. ブラックホール

ダークマター(暗黒物質)、ダークエネルギー(暗黒エネルギー)の「ダーク」は、「分からない」の代名詞のようなものである。それに比べ、日本語にすれば同じ「暗い、黒い」を意味する「ブラック」をつけた「ブラックホール」の方は、謎に満ちてはいるものの、かなりいろいろなことが分かっている。

現代のブラックホールの描写は、アインシュタインの相対性理論を基にして考えられている。しかし、一般相対性理論の登場する100年も前に、イギリスの天文学者ミッチェルやフランスの数学者ラプラスは、ニュートン力学を応用して、ブラックホールの基になる暗黒天体が存在することを予測していた。

#### 1. ブラックホールとは

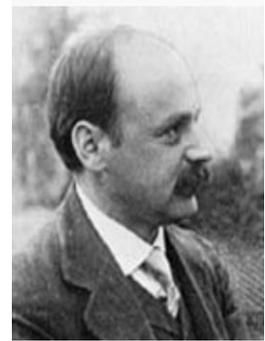
ブラックホールとは、圧縮されてつぶれた物質の巨大な雲である。密度が高くて重力が強いため、近づいてきた物質をすべて飲み込んでしまう。ブラックホールとは、「黒い穴」が直訳である。その名前から想像できるように、この内側からは光さえも出てこられない。このブラックホールを理解するには、この「光さえ抜け出せない」ということを理解する必要がある。

もし地球からロケットを打ち上げようとする、地球の重力によって引っ張られるので、相当な速度で打ち上げないと地球からの脱出に失敗する。この重力に打ち勝つ速度を脱出速度という。この脱出速度は、天体表面の重力によって決まる。天体が重いほど、そして小さいほど脱出は難しい。地球であれば、秒速11キロ以上であれば、脱出可能になる。我々の感覚で言えば、秒速11キロは途方もなく大きな速度である。ところが、光の速度は秒速30万kmで、軽々と地球を脱出してしまう。光の速度のものを脱出できない地球にしようとするには、今の重さを変えないままで、半径9ミリまで縮める必要がある。つまり、地球を9ミリの大きさに縮めたものが、光を閉じ込めておくことができるので、ブラックホールになったということになる。太陽の脱出速度は秒速約620kmである。すると、太陽を半径3キロの大きさまで潰すとブラックホールになる。ブラックホールが、いかに密度の濃い天体であるか分かるであろう。ブラックホールは、材料には一切関係なく、質量とサイズだけで決まる。

ブラックホールかそうではないかの境界線は、光が脱出できるかどうかという事にある。この境界面を「事象の地平面」と呼ぶ。光速は宇宙の「最高速度」で、1秒間に30万km進む速さである。ある領域の重力が、光速で飛んでも逃げられないほど強い場合を「事象の地平面」としているのである。ブラックホールの特徴は、この「事象の地

平面」の中にあることである。従って、そこでは、光さえ逃げ出させない。

別な言い方をすれば、この「事象の地平面」がブラックホールの周囲を覆っている、ということになる。ブラックホールの中心から事象の地平面までの距離は計算することができる。その半径は、「シュヴァルツシルト半径」と呼ばれている。ドイツの天文学者シュヴァルツシルトは、1916年頃、アインシュタインの一般相対性理論(1915-16年に発表された)を基に、このブラックホールの半径を導き出した。



カールシュヴァルツシルト

「事象の地平面」で囲まれた領域の大きさは、ブラックホールの質量で決まってくる。質量が太陽の10倍では半径30kmくらいの大きさである。太陽の10億倍も質量がある場合には、その領域の半径は30億kmになる。それは、太陽から土星までがすっぽり入ってしまうほどの大きさになる。この「事象の地平面」より少しでも外側にいけば、光速であるなら飲み込まれることはなく、脱出できる。しかし、もし「事象の地平面」の真上まで来てしまったら、脱出しようと思ってもできず、衛星にしかならない。

「事象の地平面」より少しでも内側に足を踏み入れたら、光速でも中心に落ちていくしかない。これがブラックホールというものなのである。地面のように明確な境界線を引くことは難しいが、この「事象の地平面」をもって、暗黒領域とそうでない領域の境界という線が引かれ、ブラックホールのサイズということになる。

「事象の地平面」の中に入ると、光でも出てくることできない。従って、ブラックホールの中でどのようなことが起きているのかは、外部の我々には分からない。理論的に考えると、事象の地平面を超えてしまった物質は、ブラックホールの重力の影響を受け、前後に細長く引き伸ばされる。特異点に近くなればなるほど重力は大きくなるので、引き伸ばす力も強くなり、原子核、素粒子とだんだん小さく分離されていく。そして特異点あたりでは物質としての存在はなくなって、エネルギーになると考えられる。

「ブラックホール」は、大量の物質を小さな領域に押し込め、極限状態に置いた状態にある。それは、時空に穴が開いた状態というか、我々の宇宙から見れば「底が抜ける」というイメージになる。もし中に入ったときに無限に底が抜けていくようなものであれば、それは別の宇宙ということになる。

1977年天文学者ロジャー・ブランドフォードとローマン・ズナイェクは、ブラックホールが自転していると主張し、熱い磁気を帯びたガスを飲み込んでいることから、巨大な電気回路ができていることを明らかにした。ブラックホールが自転すると、赤道からそれを取り囲むガスへと電流が流れ出て、それがまたブラックホールの極に戻ってくる。そこでは巨大な質量が関わっているので、1,000万兆ボルトもの電気を生み出している。ブラックホールは「超巨大なバッテリー」のようなものである。

## 2. ブラックホールの形成過程

恒星とは、太陽のように核融合のエネルギーで自ら光輝く星のことである。この恒星は、水素やヘリウムから成るガスの集まりである。宇宙空間を漂うガスが重力によって引き寄せられ、十分な量が集まると、中心部の温度が上がり、核反応が始まる。こうしてガスの塊は輝き始める。この核反応では膨大なエネルギーが発生する。すると、恒星を構成するガスが温められ、圧力が上昇する。この圧力は恒星を大きくしようとする。星自身の重力とガスの圧力が釣りあうことによって恒星の大きさは一定に保たれる。

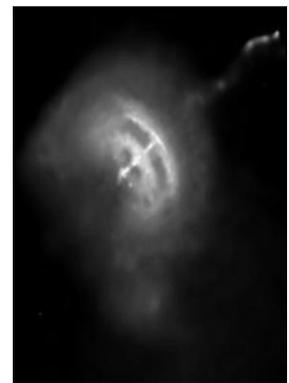
しかし、この安定はいつまでも続くわけではない。燃料に限りがあるので、燃料を使い果たした恒星ではガスの圧力が効かなくなり、収縮を始める。半径が約1万kmまで小さくなったあたりで電子の「縮退圧」という新たな力が働き、重力による収縮が止まる。この縮退圧によって支えられた星を「白色矮星」と呼ぶ。重力とガスの圧力が釣りあっているのが「恒星」、重力と電子の縮退圧が釣りあっているのが「白色矮星」である。通常の恒星は、いろいろな大きさのものがあるが、直径100万km程度のものが多い。それに対し「白色矮星」は1万kmと、大変小さな恒星の残骸となる。

1920年代までは、すべての恒星が最終的には「白色矮星」になると考えられていた。しかし、インド生まれの天文学者チャンドラセカールは、太陽程度の質量の星は白色矮星になるが、それより重い星、太陽質量の約1.4倍

を超えると電子の「縮退圧」が働かず、無限に収縮して「白色矮星」にならず、ブラックホールになる、と提唱した。彼のこの発見提唱に対し、彼の師であり、イギリス天文学の大家エディントンは、ブラックホールのような奇妙な天体が生まれるはずがないと否定的な見解を示した。エディントンの権威は絶大だったし、ブラックホールがあまりに常識はずれの天体であったため、人々はエディントンの考えを受け入れた。チャンドラセカールの発見が天文学史上重要な意味があると認められたのは、提唱してから半世紀も経ってからの1983年、彼がノーベル賞を受賞したときである。

ただし、チャンドラセカールの発見で問題がすべて解決したわけではなかった。1932年、原子核の分野で、陽子と電子以外に中性子があることが発見された。中性子が発見されると、電子の「縮退圧」で支えられる「白色矮星」だけでなく、中性子星の「縮退圧」で支えられる「中性子星」があってもいいはずだと、ツヴィッキーが提案した。ホイーラーは、この考えを取り入れ、「ブラックホール」ではなく、「中性子星」ではないか、と考えた。それに対し、ブラックホールができると言ったのが、後に「原爆の父」と言われた原子核や中性子の専門家オッペンハイマーだった。

その後、太陽の8倍から30倍の質量の恒星は、その最後は超新星爆発を起こす、その結果「中性子星」になるということが分かってきた。1967年、イギリスの天文学者アントニー・ヒューイッシュとジョスリン・ベル・バーネルは、この「中性子星」を最初に観測した。さらに、太陽の30倍以上の恒星は、超新星爆発を起こし、その後「ブラックホール」が形成されることも明らかにした。このブラックホールについては、1971年、世界初のX線天文衛星「ウフル」の観測によって確認された。ホイーラーは最初、オッペンハイマーに反対してブラックホールの存在を否定していた。しかし、後に自分の考えを変え、ブラックホールの存在を支持する立場に変わった。最初は、「爆縮星」とか「凍結星」と呼ばれていたものが「ブラックホール」と命名された。



中性子星

チャンドラセカールとエディントンの論争、オッペンハイマーとホイーラーの研究を通じ、次のことが明らかになった。質量の比較的小さな星の最後が「白色矮星」となる。もう少し質量の大きい星は「中性子星」になる。さらに重い星は、「ブラックホール」になる。現代の天文学者のほとんどは、そう考えている。白色矮星については既にふれた。ここでは「中性子星」についてもう少し詳しくふれておこう。

星は、核融合を続け、その最後になると、星の中心部にある原子をすべて鉄に変える。この鉄はそれより重い元素に融合することはない。一方、星の中心部の周囲にある熱いガスの殻は反応を続け、鉄になっていく。従って、終末を迎えた星の鉄の芯は、時間と共に大きく、重くなる。この巨大な鉄の玉が太陽質量の1.4倍ほどの質量(2,800兆兆トン)に達すると、突然崩壊をはじめ、中性子星になる。この中性子星は直径が25キロほどしかないが、平均密度は立方センチあたり3億4,000万トン(白色矮星の1億7,000万倍)にもなる。この密度は、サイコロほどの中性子星に対し全人類の重さの3倍ほどでやっとなんかという感じである。中性子星がいかに重いか分かるだろう。

中性子星がこのように高い密度に達することが可能なのは、原子と電子の配置の仕方が通常の規則とは異なるからである。どんな物質でも、一見中身はぎっしり詰まっているように見える。ところが、原子のレベルで見ると、実際にはほとんどが空っぽである。通常の物質の原子では、陽子と中性子からなる原子核を、電子の雲がはるか遠くから取り囲んでいるような形なので、原子核と電子の間には何もない巨大な隙間がある。ところが、中性子星になると全く違う。

まず、白色矮星の場合は、通常の物質において埋めることができる原子の隙間を一番ぎちぎちに詰められたような状態になる。その結果、立方センチあたり2トンの密度にもなる。ところが、中性子星になると、白色矮星でもなお使っていない空間がたくさんあるので、それさえもすべてを埋め尽くした状態になる。

中性子星とは、星に存在する多くの陽子と電子が融合して中性子になることである。電子の90~95%がなくなり、原子それぞれの原子核の周りに確保していた空っぽの隙間が使えるようになり、星は劇的に体積を減らす。新たにできた中性子は、基本的に触れ合うほどに接近しあう。こうして星の密度は急上昇し、立方センチあたり3億

4,000 万トンというとても重い値になる。

では、このような中性子星が重力によってつぶされないのはなぜか。これは「パウリの排他原理」による。つまり2つの中性子は、同時に同じ場所で同じエネルギー状態を取ることはできない。この普遍的な法則に従わねばならないので、中性子はほとんど想像を絶する圧力と密度の状況で重力に逆らってきつく格子に詰め込まれている（白色矮星の方は結晶状の構造をとっているため、少々状況が異なる）。

中性子星の場合は、中性子の強烈な重力により、大気の厚さはほんの数センチ程度しかない。中性子の表面には、中性子星ができる時に星の大半を覆った中性子化を逃れた普通の原子が宿っている。その結果、これらの物質は特にきつく詰め込まれることはなく、密度は立方センチあたり 5 ないし 10 グラムである（鉄程度）。しかも、中性子星表面の強烈な磁場は、個々の原子を細長い円筒状につぶすので、それはものすごく長い鎖のようになり、磁場の方向に沿って並ぶことになる。

この場合、中性子表面の原子すべてがつながってきちんと並んでいる。この変わった物質は中性子星の殻で、厚さは 1 キロほどである。それはとても丈夫で、切れたり折れたりすることはない。原子核物理学者のチャールズ・ホロウィッツ・カダウによれば、その中性子の殻の強さは鋼鉄の 100 億倍の強度がある。

最後に、恒星ブラックホールについて述べておこう。質量の大きな星が爆発すると、たいていはその中心部分が中性子星として残る。ところがそれよりさらに大きな星は、超新星爆発後にもっと重い中心部を残すことがあり、それがさらにつぶれて恒星ブラックホールになる。ブラックホールにおいては、事象の地平の内側からは光さえ脱出できないほどの極度の重力があると想定される。

一方、恒星ブラックホールの中には、中性子星よりも重くて小さいものもある。従って、その内部は中性子星より密度が高いと予想するかもしれない。しかし、それは違う。未だはっきりしているわけではないが、多くの学者は次のように考えている。ブラックホールの質量はすべて、「特異点」という、事象の地平の中心にある、無限に小さい数学的な点に集中している。すると、ブラックホールの密度は、すべて無限大ということになる。ただし、これを理解するのは容易ではなく、この考えを確かめる測定結果が得られているわけではない。

一般的には、ブラックホールを「密度相当値」というものを使って記述する。つまり、ブラックホールの体積を、事象の地平を使って求め、質量を体積で割って密度を求める。通常物質を押しつぶしてブラックホールになるまで小さくする場合に、ブラックホールができるほど圧縮したときに達する密度を、密度相当値という。

ブラックホールでは、質量が大きくなるほど重力は弱くなる。従って、重いブラックホールの方が軽いブラックホールよりも密度は低い。あり得る最高の密度のブラックホールを探そうとする場合には、質量の最小のブラックホールを調べればよい。現在知られているもので最小のブラックホールは「GRO J0422+32」で、質量は太陽の 4 倍もない（およそ 8,000 兆トン）。この事象の地平は直径およそ 23 キロである。質量を体積で割ると、密度相当値は立方センチあたり 12 億トンで、中性子星の密度の 3 倍以上となる。恒星ブラックホールは、現在 10 個余り見つかっている。しかしその密度相当値は相当下がる。例えば、太陽質量の 10 倍のブラックホールの密度は、立方センチあたり 1 億 8,000 万トンで、最小のもの 6 分の 1、中性子星の半分ほどである。また、ほとんどの銀河の中心には超大質量ブラックホールがある。中には太陽質量の何万倍、何億倍というものがある。このような巨大な質量であっても、事象の地平も大きいので、密度相当値は意外に低い。

### 3. 銀河系のブラックホール

天文学の場合、観測によって新種の天体が発見され、理論的にその正体が解明されるという順番で研究が進められる。しかし、ブラックホールの場合はその逆で、理論的に予言され、観測によって発見された。理論が観測に先行するという珍しいケースである。

ブラックホールは暗黒天体であり、その存在を検証するのは大変困難なことだった。しかし 1962 年、「銀河系」の中心部にある「はくちょう座」の方向に「X線源になるものがある」ことが分かった。それは、「白鳥座X-1（強いX線を放射している天体の意味）」と名づけられたが、その後の観測により、「白鳥座X-1」には、巨大な恒星が存在することが分かった。しかも、この恒星は強いX線を出す性質はなかった。

さらに、もう一つの別の天体とペアを組み、単独で存在していないことが分かった。恒星はこの謎の天体と重力

で引き合い、互いの周りを回っていたのである。謎の天体からのX線を詳しく観測すると、何と1,000分の1秒という非常に短い時間間隔で変動していた。これは、謎の天体の半径が300km以下であることを意味する。謎の天体は極めてコンパクトな天体だった。

またこの謎の天体は、質量が大きいことも判明した。「はくちょう座X-1」にある恒星は、太陽の30倍程度の大きな質量をもっているが、太陽のようにじっとしていない(太陽がほとんど動かないのは太陽を周る惑星の質量が非常に小さいからである)。地球の軌道半径(太陽と地球の距離)と回転周期(1年)から太陽の質量を見積もることができるように、互いに重力で引き合っている天体の質量は、軌道半径と周期を観測することによって調べることができる。

詳しい観測の結果、謎の天体の質量は太陽の6倍から20倍であることが分かった。これは、白色矮星でも、中性子星でもなく、ブラックホールであるに違いないと判断された。このような結論が出たのは、9年後の1971年のことだった。これが、天文観測によって人類が初めて発見したブラックホールである。なお、この「はくちょう座X-1」のX線観測においては、故小田稔氏をはじめ、日本の研究グループが多大な貢献をした。

太陽の10倍程度の質量をもつブラックホールを「恒星質量ブラックホール」と呼ぶ。2011年現在、銀河系の中心付近には20個ほどのブラックホールの痕跡が見つかっている。そのほとんどは、太陽の10倍程度の質量で、サイズは30キロほどである。発見されているこの種の「恒星質量ブラックホール」のほとんどは、「はくちょう座X-1」のように恒星とペアを組んでいる。二つの恒星がペアを組んでいるシステムを「連星」と呼んでいる。連星の片方がブラックホールである場合には、「ブラックホール連星」である。

我々の住む銀河系にも、銀河系の中心部に太陽の約400万倍の重さの「いて座A\*(エースター)」と呼ばれる超巨大ブラックホールがある。ただし、巨大なのは質量であって、サイズではない。そのブラックホールの半径は1,200万kmで、地球と太陽の距離が1億5,000万kmなので、そのサイズは10分の1以下になる。銀河系のサイズは約10万光年なので、超巨大ブラックホールといっても、サイズとしてはわずか1,000億分の1にしかない。このいて座A\*は、本体はブラックホールなので暗いが、そのへりのごく近くには、猛烈な速さの(多分もう終わりに近い)軌道上のガスが、大量の光と熱を発している。これは銀河系の中でただ一つの全く動かない天体で、銀河系のど真ん中にあり、銀河系のすべての星はこれを中心に公転している。

2005年頃から、若いアメリカ人天文学者ウォーレン・ブラウンは、アリゾナ州にある望遠鏡を使って、銀河系の質量と構造の新しい地図づくりを始めた。その作成過程の中で、銀河系の中心いて座A\*から時速250キロの速さではじきとばされた「SDSS J090745+04024507」という星を発見した。これは、1億5,000万年ほど前に銀河系の中心いて座A\*に接近し、40万年ほど前にその中心から弾き飛ばされたものである。それは、我々の知る限り最速で移動しており、今も減速する気配はない。このような発見以来、多くの天文学者がこの種の星の発見に興味をもち、今ではいて座A\*から100万km以上の高速で遠ざかっている星が20個以上発見されている。この現象が銀河系の中心にある最大のブラックホールに何らかの関係があることは間違いない。このような現象が、ブラックホールの謎を解くための大きな手掛かりを提供するかもしれない。

#### 4. 超巨大ブラックホール

銀河系の中心部にある「いて座A\*」のような超巨大ブラックホールは、決して珍しいものではない。銀河系のような渦巻き銀河の中心部分には必ずあると考えてよい。中には、太陽の重さの数百億倍もあるものもある。このような銀河の真ん中にあるブラックホールは、銀河全体の形成に関わっている。太陽の何千万倍、何億倍という規模の質量をもっているが、銀河が大きければ大きいほど、ブラックホールも大きい。これは、ブラックホールが銀河と共に進化している証拠でもある。

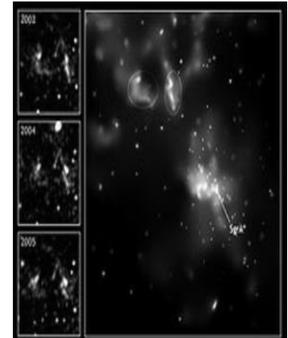
超巨大ブラックホールとは、太陽の100万倍から数百億倍もの質量をもつブラックホールのことである。超巨大ブラックホールは、ブラックホール同士が合体するとか、ブラックホールの左右に広がる超臨界円盤のガスを吸い込むなどして成長していく。未だ、正確なところは分からないが。

ブラックホールのある部分がときどき明るくなる。ブラックホール自身は光らない。では、なぜときどき明るくなるのか。その理由はブラックホールが周りにあるガスを飲み込んでいくからである。ブラックホールとは一度入ったら

絶対出ることができない場所である。当然ガスも出てくることはできないが、ガスはブラックホールに飲み込まれる直前に、まるで断末魔の叫びのように光を出す。その光が明るく輝くのである。このようにして、ブラックホールは、だんだん大きくなっていく。

いろいろな銀河において、銀河の中心にある巨大ブラックホールの質量は、バルジの質量の約 2,000 分の 1 になることが分かってきた。中心の巨大ブラックホールとバルジのサイズは何ケタも違うにもかかわらず、質量にこのような密接な関係があるのは、とても不思議である。巨大ブラックホールは、落ちてくる星やガスを飽きることなく飲み込み続け、重さを増やす方向にしか進まない。あるいは、ブラックホール同士が食い合って巨大化してきたことは分かっている。しかし、バルジがどうなっているのか、その質量はどのように決まっているのか、巨大ブラックホールの起源と成長にバルジがどのように関わっているのか、このような問題は未だよく分かっていない。

銀河系の最大の巨大ブラックホールは、その中心にある「いて座A\*」である。これは、銀河系では最大であっても、宇宙全体では比較的小さな方だと言わねばならない。今ある望遠鏡によって、それぞれの銀河の中心にある巨大ブラックホールの質量などを、いて座A\*を測るように正確に測定することはできない。しかし、いくつかの測定方法を用いて、それぞれの銀河の中心にある超巨大ブラックホールの質量を推定することは可能である。その結果、銀河の中心に位置する巨大ブラックホールの多くは、いて座A\*の 100 倍近くあるものも珍しくはないことが分かった。現時点で分かっている一番質量の大きな巨大ブラックホールは、ケファウス座の方向に 120 億光年離れたところにある「S5 0014+813」である。イタリアの天文学者ガブリエレ・ギセリーニらのチームは、その質量を太陽の 400 億倍と計算している。これは、いて座A\*の 1,000 倍にもなる。

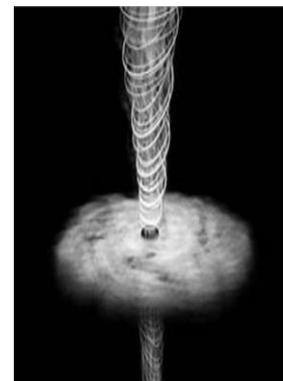


いて座 A\*

## 5. クェーサー

1932 年、アメリカの物理学者・無線技術者であったカール・ジャンスキー (1905 年 -1950 年) は、波長 14.6 メートルの電波を検出できるアンテナを用いて、宇宙から飛来する電波を初めてとらえた。彼は最初、太陽以上に強い電波源はない、また太陽が地平線に隠れたら、宇宙から飛来する電波は弱まるだろう、と考えていた。太陽の電波は、銀河系の 1,000 万倍も強いと計算していたのである。

ところが、その予想に反し、宇宙からの電波は太陽よりはるかに大きく、また太陽の動きには対応していないことが分かった。電波の来る方向に関しても、彼の予測は外れた。太陽の代わりに銀河系中心 (いて座の方向にある天の川の最も明るい領域) が真上に来ると電波は強まり、それが地平線に隠れると電波は弱まった。銀河系の中心から飛来する電波は、太陽からの電波よりはるかに強いことが判明した。



クェーサーのイメージ

この観測は、「電波天文学の幕開け」と言われるほど重要なものだった。1950 年、彼は 44 歳の若さで死亡した。もし彼がもう少し長生きしていたなら、間違いなくノーベル賞を受賞した、と言われている。電波天文学の分野では、電波の強さを示すのに、今でも「ジャンスキー」という単位を使っている。

その後、電波技師レーバーは、自分で電波望遠鏡を作成し、はくちょう座とカシオペア座の方向に強い電磁波のあることを確認した。それに関する論文は、アメリカの天文学会に提出された。そのような電磁波は、1960 年頃になると、数百個見つかるようになった。この謎の電波源は「クェーサー」と呼ばれた。クェーサーとは、準恒星状態の天体という意味で、星ではないが星のような天体を指した言葉である。1963 年、オランダ生まれのアメリカ在住の天文学者シュミットは、宇宙のはるかかなたで、とてつもない明るさで輝く天体を観測していた。これも、クェーサーだった。

クェーサーはあまりに遠いので、近傍の銀河のように、形や大きさを直接測ることはできない。しかし、クェーサーの明るさの時間的な変化から、そのサイズを推定することはできる。その結果、極めてコンパクトなサイズであることが分かった。銀河の 100 倍ほどの明るさをもっている、そのサイズは 100 万分の 1 である。このような星は、

宇宙には存在しない。唯一の合理的な解釈は、ブラックホールと考えることである。このような明るさとコンパクトさの両方を満たす天体は、巨大なブラックホールとそれを取り巻くガス円盤であると解釈するなら、すべてが理解できるわけである。

しかもクェーサーは、赤方偏移(スペクトル線が赤い方にずれる)によって、我々から遠ざかっていることが分かった。20 億光年離れている「3C273」というクェーサーは光速の 16%、45 億光年離れている「3C48」のクェーサーは、光速の 37%の速度で遠ざかっている。これほど超高速で遠ざかっているということは、クェーサーが宇宙のはるか遠方に存在していることを意味している。

クェーサーほどのパワーはなくても、中心部が明るく輝き時間的に変動している銀河も、いくつも見つかった。それらはクェーサーの縮小版と考えてよい。現在は、このような銀河の中心部とクェーサーをひっくるめて「活動銀河中心核」と呼んでいる。非常にパワーの弱いものをも含めると、この「活動銀河中心核」は、およそ半数の銀河に存在することが分かっている。しかし、その構造については未だなぞに包まれていて、ほとんど分かっていない。現在では、活動銀河中心核をもつものたないに関わらず、およそすべての銀河の中心部には超巨大ブラックホールが存在することが明らかになっている。この超巨大ブラックホールに光り輝くガス円盤が付随しているというシステムは、多くの銀河の中で比較的ありふれたものとなっている。

最近では、多くの天文学者が、電波銀河、クェーサー、ブラックホールなどは基本的には同類の天体であると考えている。むろんその詳細な事柄は不明な点が多い。今後の観察結果を待つ以外にない。

## 6. ホーキング放射

これまで我々は、ブラックホール、超巨大ブラックホール、クェーサーなどについて考えてきた。最後に、このようなブラックホールが、どのような運命をたどるのか、考えてみたい。この問題に興味深い提案をしているのは、イギリスのスティヴン・ホーキングである。彼は来日したこともあり、著書もたくさん翻訳され、ベストセラーにもなっている。車椅子の物理学者として、日本でも親しまれている。1974 年彼は、「ブラックホールは、さまざまな粒子を放出し続けるため、徐々に質量を失い、最後には蒸発して消えてしまう」という考えを公表した。

この理論は、「ホーキング放射」と言われる。それは、次のようなものである。

ブラックホールは穴が開いており、そこでは非常に強い力が働いている。従って、周囲のものはすべて吸い込まれてしまう。もし周囲のものがすべて飲み込まれると、周囲には何もなくなってしまう。ブラックホールがその状態で放っておかれると、今度は、じわじわと周囲にエネルギーを放射するようになる。その放射によってブラックホールはエネルギーを失っていき、だんだん小さくなる。そしてしまいには、パチンと蒸発してしまう。

現代物理学では、「真空」とは、絶えずペアの粒子が生まれては出会い、消滅している状態を言う。これは「粒子が揺らいでいる状態」にある。ペア粒子はあっという間に消滅し、平均すると揺らぎは何も起こらなかったかのように消えてしまう。ところが、ブラックホールの近傍では、違った状況が起こることがある。ペアで誕生した粒子がきちんと出会えれば消滅する。ところが、出会う前に片方だけがブラックホールに吸い込まれてしまう、という可能性がある。相棒を失った粒子は、同様にブラックホールに吸い込まれる場合もある。しかし、吸い込まれるのを免れ、はるか遠方に飛び去ることもある。このような粒子は、ブラックホールから飛び出してきた、粒子のエネルギー分だけブラックホールのエネルギーが減少した、と理解することができる。

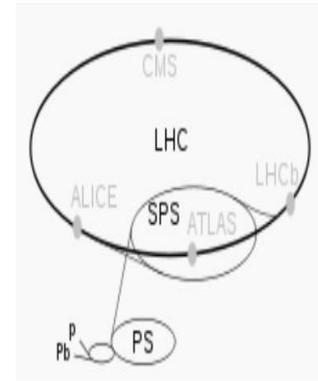
むろんこの現象は、ブラックホールがガス円盤をまとうことで光り輝いている状態とは違う。ホーキング放射は、ブラックホールが作り出す歪んだ時空がもとになって起こる。従って、周囲にガス円盤がなくても起こる。ブラックホールの表面の重力は、ブラックホールの質量に反比例する。同様に、ブラックホールの温度もまた、質量に反比例する。例えば、太陽質量の 10 倍の質量をもつブラックホールの温度は、1 億分の 1 度となる。つまり、質量の大きなブラックホールほど温度は低くなる。ということは、放射は弱くなる。通常の恒星は質量が大きいほど明るく輝くが、ホーキング放射においては、全く反対の結果になる。質量の小さなブラックホールほど、ホーキング放射は強くなる。

ホーキング放射が強ければ強いほど、ブラックホールの崩壊にかかる時間は短い。宇宙年齢 137 億年の間に蒸発できるブラックホールの質量は、最大で小惑星程度(太陽質量の 100 億分の 1 のさらに 100 億分の 1)である。これまで見てきたブラックホールの場合、宇宙年齢の 1 億倍の 1 億倍の・・・と 1 億倍を 7 回繰り返してもまだ足りないくらいの時間が必要である。巨大ブラックホールに至るとそれよりさらに長い時間がかかることになる。

従って、ホーキング放射によるブラックホールの崩壊という理論は、ミニブラックホールの世界の話である。現実のブラックホールの話ではない。というより、今日までの宇宙誕生から 137 億年の間に、たくさんのミニブラックホールが誕生し、それが消えていった、という話である。そういうことはあり得る。

銀河の真ん中にある超巨大ブラックホールと、星の成れの果てである恒星質量のブラックホールは見つかっている。というより、理論的に存在すると仮定しないとすべての天文現象は説明できない。しかし、まだ実際にブラックホールそのものが観測されたわけではない。ミニブラックホールの存在と消滅に関しては、理論的にあり得るが、確かな話として受け止めるわけにはいかない。

スイスのジュネーブ近郊につくられた「大型ハドロン衝突型加速器」において、ブラックホールの誕生という試みもなされている。もしそこでブラックホールがつけられたなら、この地球も飲み込まれてしまうのではないかとという心配がまことしやかに語られたことがある。しかし、もし仮に加速器の中で作られたとしても、そのブラックホールは一瞬にして消えてしまう。その心配は全くない。



大型ハドロン衝突型加速器  
模式図

## おわりに

我々は、科学的な側面からこの宇宙の不可解な事柄を考えてきた。しかし、ほとんどのキリスト者は、この宇宙を科学的にではなく、神学的に見ることに慣れている。その結果、見方が全く違ってくる。この宇宙は、間もなくキリストの再臨と共に滅ぼされ、新天新地にとって替えられる。そう信じているキリスト者は、科学的な宇宙理解にはあまり興味を示さない。

本講演で扱われたような暗黒物質、暗黒エネルギー、ブラックホールなどの問題についても、科学の限界であり、神の創造の神秘に属するとして、まともに考える価値はない、と思い込んでいるキリスト者は意外に多い。キリスト者として、それはまずいというわけではない。科学的な意識を持っていなくても、この世界に生きていくのに不都合なことはほとんどない。ただ、このような科学の未解決の問題に関し、すぐに「神の創造の奥義」とか、「神の御業の神秘」などを持ち出し、問題をまともに取り合わない態度だけは控えるべきである。科学者は、科学の領域において、科学の方法論により、神の被造物を解明しようと真摯に向き合っている。被造物管理の神学においては、科学者に感謝することはあっても、蔑視することはあってはならない。

科学者がさまざまな現象に直面し、説明に窮すると、すぐ神を持ち出すキリスト者がいる。このような議論の仕方を「ギャップ・セオリー(Gap theory)」という。科学者が科学の論理では説明できないような事柄は、神がなされたことである。それゆえ、神は存在するのである、といった論理である。

これは、信仰者の仲間には通じる。しかし、科学者には通じない。それに、「ギャップ・セオリー」には、大きな盲点がある。もし科学がさらに進めば解明されるような事項にまで、神を持ち出してしまふ危険性が常にある。それでは、科学の発展を阻害する。科学者たちを信仰から遠ざけてしまう。

さらにそこで語られる神は、普段は「理神論的な神(Deism)」で、ギャップが出てくると「有神論的な神(Theism)」になる。聖書の神はキリストを通して万物を創造され、常に万物を保持されている。ギャップの時だけ登場させる神は、聖書の神ではない。万物の創造者なるキリストのお姿とは大きく乖離している。

なぜなら、万物は御子にあって造られたからです。天にあるもの、地にあるもの、見えるもの、また見えないもの、王座も主権も支配も権威も、すべて御子によって造られたのです。万物は、御子によって造られ、御子のために造られたのです。御子は、万物よりも先に存在し、万物は御子にあって成り立っています。

(コロサイ 1:16-17)

## 参考文献

### <暗黒物質に関する参考文献>

- 荒船良孝著『宇宙の新常識 100』(2008年、ソフトバンク)44-50頁  
イアン・スチュアート著、水谷淳訳『もっとも美しい対称性』(日経BP社、2008年)  
谷口義明著『宇宙進化の謎』(講談社、2011年)  
郷田直樹『ダークマターとは何か』(PHP研究所、2012年)  
佐藤勝彦著『宇宙「96%の謎」』(角川書店、2008年)211-40頁  
村山斉著『宇宙は何でできているか』(幻冬舎新書、2010年)193-210頁  
青野由利著『宇宙はこう考えられている』(筑摩書房、2013年)117-150頁  
谷口義明著『新天文学事典—ダークマター』(講談社、2013年)103-28頁

### <暗黒エネルギーに関する参考文献>

- 荒船良孝著『宇宙の新常識 100』(2008年、ソフトバンク)41-55頁  
土居守・松原隆彦著『宇宙のダークエネルギー』(2011年、光文社)  
松原隆彦著『宇宙に外側はあるか』(光文社新書、2012年)142-58頁  
青野由利著『宇宙はこう考えられている』(筑摩書房、2013年)151-80頁  
松原隆彦著『新天文学事典—ダークエネルギー』(講談社、2013年)75-102頁

### <ブラックホールに関する参考文献>

- P・C・W・デイヴィス著、松田卓也訳『ブラックホールと宇宙の崩壊』(岩波現代選書、1983年)  
デニス・オーヴァバイ著、鳥居祥二訳『宇宙はこうして始まり、こう終わりを告げる』(白揚社、2000年)142-207頁  
福井康雄著『大宇宙の誕生』(光文社、2006年)125-99頁  
佐藤文隆、R.ルフィーニ著『ブラックホール』(筑摩書房、2009年)  
レオナルド・サスキンド著、林田陽子訳『ブラックホール戦争』(日経BP社、2009年)  
大須賀健著『ゼロからわかるブラックホール』(講談社、2011年)  
スティーヴン・ホーキング著『宇宙の始まりと終わり』(青志社、2008年)77-120頁  
福井康雄著『宇宙 100 の謎』(角川学芸出版、2011年)150-65頁  
大須賀健著『新天文学事典—ブラックホール』(講談社、2013年)401-464頁

### <宇宙の未来に関する参考文献>

- ポール・デイヴィス著、出口修至訳『宇宙最後の3分間』(草思社、1995年)  
デニス・オーヴァバイ著、鳥居祥二訳『宇宙はこうして始まり、こう終わりを告げる』(白揚社、2000年)636-78頁  
スティーヴン・ホーキング著『ホーキング、未来を語る』(SB文庫、2006年)  
マーティン・リース著、堀千恵子訳『今世紀で人類は終わる?』(草思社、2007年)  
スティーヴン・ホーキング著『ホーキング、宇宙の始まりと終わり』(青志社、2008年)  
佐藤勝彦著『インフレーション宇宙論』(講談社、2010年)125-42頁  
松原隆彦著『宇宙に外側はあるか』(光文社新書、2012年)159-70頁