



幽霊粒子のニュートリノ

——パウリの予言

ニュートリノの存在は、仮説から始まりました。1930年、オーストリア生まれのスイスの物理学者ヴォルフガング・**パウリ**（1900～1958）は「ニュートリノ仮説」を理論的に打ち立て、その存在を予言しました。しかし、ニュートリノはなかなか直接捉えることが難しかったので、実際にニュートリノが発見されたのは1956年まで待たねばなりませんでした。

では、パウリはどのようにしてニュートリノを予言したのでしょうか。それは原子核のβ崩壊と呼ばれる、放射性元素の崩壊の研究から始まりました。β崩壊というのは、ある原子番号（Z）の原子核が次の原子番号（Z+1）に転換するときに電子を1個放出し、起きる反応プロセスです。たとえば、炭素C（原子番号6）がβ崩壊して窒素N（原子番号7）に変わるときには、



となります。

崩壊前に比べ、崩壊後の元素の質量のほうが電子1個分以上、小さくなります。アインシュタインの方程式 $E = mc^2$ から、電子がその質量差に相当する運動エネルギーをもち去ると考えられていましたが、

電子は予想されたエネルギーよりも少ないエネルギーしかもち去っていないのです。このため、当時は「エネルギー保存則が破れているのではないか」と考える物理学者もいたほどです。

しかし、パウリはβ崩壊において放出されるのは電子（ e^{-} ）だけでなく、実はまだ知られていない「**幽霊粒子**」も一緒に放出されたためではないか、という仮説を1930年に発表しました。この幽霊粒子のことをパウリは「中性」を意味するところから「ニュートロン（本来の意味は「中性子」）」と名付けようとしたのです。

●フェルミが名付け親

その後、1932年には原子核を陽子とともに構成する粒子に「ニュートロン」（現在の「中性子」）という名前が先に使われてしまったため、イタリアの物理学者エンリコ・**フェルミ**（1901～1954）はパウリの幽霊粒子のことを「**ニュートリノ**」（中性の小さな粒子）と呼び変えたのです。

こうして理論的な整合性は得られたのですが、ニュートリノを直接捕まえることはなかなかできませんでした。予言されていたのに、ニュートリノをなかなか発見できなかった最大の理由は、ニュートリノが極端に他の粒子との相互作用が弱かったためです。

相互作用というのは「ぶつかりやすさ」の程度のことです。それが持っているエネルギーによって、ぶつかりやすさ、衝突のしやすさは違います。実験した環境で、ニュートリノの相互作用と、電磁相互作用とを比べてみると、ケタ違いにぶつかりやすさが弱く、このため、ニュートリノのもつ相互作用は「**弱い相互作用**」と呼ばれます。相互作用には4つあり、これは「4つの力」という言葉でも知られていますが（次のコラムを参照）。



宇宙ができてすぐに超高温の火の玉となり、急速な膨張とともに、宇宙空間の温度も下がっていきます。宇宙ができた当初は、4つの力（相互作用：次のコラムを参照）はすべて1つにまとまっていたと考えられていますが、エネルギーが下がっていくにつれ、「重力」が分岐し、次に「強い力」が、最後に「電磁力」と「弱い力」が分岐して現在に至っていると考えられています。

その分岐の原因となる現象は、**相転移**と呼ばれる現象だと考えられています。**相転移とは、それまでとは違う相になるという意味**です。たとえば、水を例にとるとわかりやすいかもしれません。温度が下がるにつれ、水の相から氷の相というように変化します。その液相と気相との間の相転移の前後では物理法則が違って見えたりします。水という液相では、水分子は電氣的にやわらかくくっついている状態で自由に動き回っていますが、氷という固相では、水分子はガチガチに隣り合っていて、動けません。そのように、相転移後はまったく違う物理法則のように見えるのです。宇宙はそのように、膨張するにつれて温度が下がり、数々の相転移を繰り返して現在の姿に至ると考えられています。

ただし、そんな弱い相互作用だけしかしないというニュートリノであっても、重力に比べると、たとえばMeVのニュートリノは 10^{32} 倍も強いのですから、いかに重力が弱いかがわかるかと思います。ちなみに電磁気力より 10^{16} 倍も弱い力なのです。

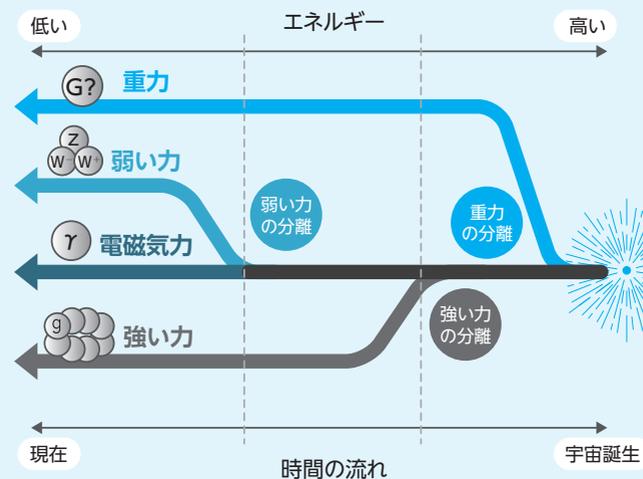
4つの力と相転移（相互作用）

宇宙ができた当初は1つの力だったと期待されますが、宇宙の温度、つまりエネルギースケールが下がるにつれていろいろな力（相互作用）が分岐していきます。

最初に分岐したのが「**重力**」で、宇宙誕生後、 10^{-44} 秒後、そのときの温度は1000兆度の1000兆倍の100倍で、これは「第1の真空の相転移」とも呼ばれています。

第2の真空の相転移は「**強い力**」（強い相互作用）の分岐です。宇宙誕生後、およそ 10^{-38} 秒後のこととされ、1000兆度の10兆倍の温度。このとき、陽子と中性子とをくっつけるグルーオンと呼ばれる強い力を媒介するゲージ粒子が生まれます。なお、重力を除く、残り3つの力を統一する理論を「**大統一理論**」（GUT: Grand Unification Theory）と呼んでいます。

第3の真空の相転移は 10^{-10} 秒後のことで、ここで「**電磁力**（電磁相互作用）」と「**弱い力**（弱い相互作用）」が分かれます。温度としては1000兆度です。この時期までに、それまで同数あった原子などのバリオン物質の粒子と反粒子のバランスが崩れ（CP

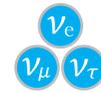


対称性の破れ)、結果的に、この宇宙(自然界)には私たちの体や惑星、恒星を形づくっている正の「粒子」しか存在しなくなりました(反粒子は加速器などで人工的につくることができる)。この電磁力・弱い力を統一する理論を「電弱統一理論、つまり**標準理論**(ワインバーグ・サラム理論)と呼んでいます。

なお、第4の真空の相転移(10^{-4} 秒後)と呼ばれるものもありますが(QCD相転移)、これはクォークとグルーオンから陽子や中性子ができた時期のことで、力(相互作用)の分岐自体とは直接関係ありません。

本書では基本的に「力」ではなく「相互作用」という言葉で説明しています。

3-2



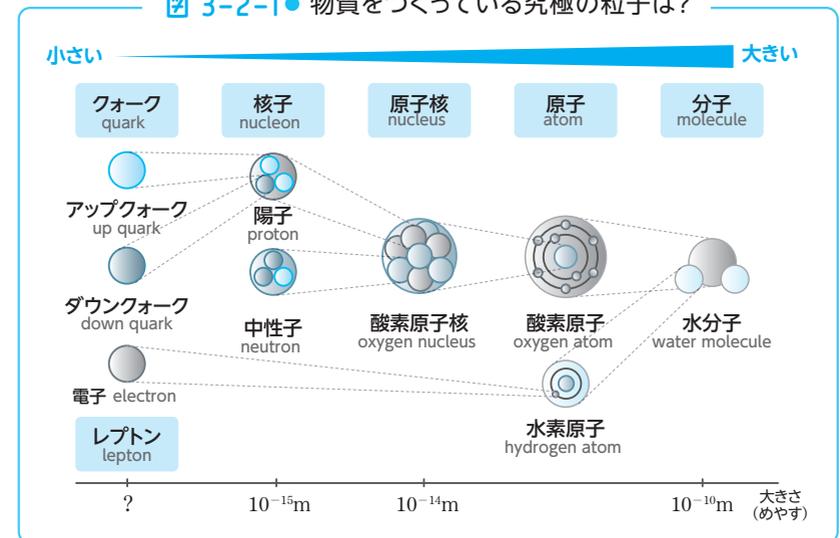
ニュートリノは「素粒子」の1つ

— 究極の17物質

ニュートリノとひとくちにいても、実は3種類あります。それらの話をする前に、「**素粒子**」についてかんたんに説明をしておかなければなりません。

自然界にあるもの、たとえば「水」は H_2O と書かれ、水の分子でできています。この水は水素原子、酸素原子からできていて、かつてはこの原子こそ、世の中の究極的な物質、つまり「素粒子」と考えられてきました。

図 3-2-1 ● 物質をつくっている究極の粒子は?





天体のイベントと 宇宙誕生時の様子を知る

—— 重力波検出の意味

重力波がなぜ重要なのかは、天文学者・素粒子の研究者の中でも認識がそれぞれ異なると思います。ましてや、一般の方にとっては「アインシュタインの最後の宿題が解けた」ということに関心が集まっているかもしれません。

では、天体からやってくる重力波からいったい何がわかるのかを考えてみましょう。実は、次のように、次々とイモヅル式に疑問や問題解決の糸口が見つかりそうなのです。

まず第1に、アメリカの重力波観測装置aLIGO（Advanced LIGOの略：LIGOの検出能力を4倍高めた装置）が発見した「GW150914」（2015年9月14日）は、双子のブラックホールの合体時に放出された重力波でした。この重力波を観測することで、双子のブラックホールの合体の時期がわかるのです。さらに、双子のブラックホールをつくるプロセスのモデルについてのヒントが得られます。そして、ブラックホール同士の衝突によって雪だるま式に重いブラックホールがつけられたことが示唆されました。ここまではテレビ、新聞、雑誌などでも話題になった内容です。

第2に、そのブラックホールをつくることのできる「重い星」、もしくは宇宙初期につくられたブラックホール（原始ブラックホール）の歴史がわかる可能性があることが重要です。

いま「重い星」と述べました。これは種族Ⅲ^(*)のファーストスター（宇宙で最初に生まれた恒星。宇宙の一番星）と呼ばれる、宇宙で最初に誕生した恒星かもしれないし、あるいは種族Ⅱと呼ばれる銀河ハローに付随した古い星かもしれません。大事なのは、重力波を研究することで、ブラックホールがいったいどのようにしてできたのか、その起源がわかる可能性があるということなのです。

第3に、それがさらに双子の星、つまり、連星をつくらないといけないという制約があります。また、その連星間の距離は近くて、観測されたように、宇宙年齢138億年以内に合体しないといけないこととなります。距離が遠い連星だと、宇宙年齢では合体しないのです。

第4に、種族Ⅲの星（ファーストスター）の形成のメカニズムがわかってくることで、ファーストスターの後につづく銀河がどのようにしてできたのか、その起源の解明にも繋がります。

第5に、宇宙初期につくられた原始ブラックホールだった場合には、それをつくるインフレーションモデルに依存します。ブラックホールはその巨大な質量に比べれば、非常に小さな大きさです。小さいスケールでの密度ゆらぎが大きい場合にブラックホールになりますが、それを説明するようなインフレーションモデルでないといけません。

また、インフレーションに頼らないで、小さなスケールの大きな密度ゆらぎをつくるモデルも、多数提案されるようになりました。いずれにせよ、宇宙初期を探る道具となるのです。

第6に、銀河形成のメカニズムがわかると、私たちの太陽のような種族Ⅰの恒星とか、太陽系の中での地球の形成メカニズムなどもわかります。それにより生命の起源、人間の起源にまで影響を与えます。

(*) 種族

恒星の分類方法。最初は種族Ⅰ、種族Ⅱに分けられたが、後に種族Ⅲが追加された。我々の太陽は種族Ⅰに属する。



このように、ブラックホール連星の合体という天体イベントを、今回得た重力波の情報から矛盾なく説明することができれば、私たち人間の起源の解明にも関係してくるということです。これこそ、天体イベント（ブラックホールの衝突、超新星爆発など）から生じた重力波の謎をひもとき、理解していこうという目的の1つです。

● 「宇宙背景重力波」で何がわかるか？

もう1つ、重力波をひもとく目的があります。それは将来のCMB（宇宙マイクロ波背景放射）のB-モード観測という方法を通して、「**宇宙背景重力波**」と呼ばれる、宇宙初期から、宇宙全体に存在する重力波を間接的に観測できる可能性を探ることです。さらにいえば、LISA（*）、DESIGO（**）、BBO（***）、または将来のET（****）などの重力波検出装置によって、間接的どころか、直接的に重力波を観測できる可能性を探ることです。

これは天体イベントの観測ではなく、**宇宙誕生時の様子を重力波で観測すること**になるのです。なぜなら、その背景重力波は、宇宙初期のインフレーション膨張のときの時空自体のゆらぎを観測していることになるからです。

（*）LISA（リサ）

欧州宇宙機関が2034年に打上げをめざしている宇宙重力波望遠鏡のこと。レーザー干渉計宇宙アンテナ（Laser Interferometer Space Antenna）の略。

（**）DESIGO（デザイゴ）

日本が計画する宇宙空間での「重力波望遠鏡」のこと。デシヘルツ干渉計重力波観測所（Deci-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory）の略。

（***）BBO

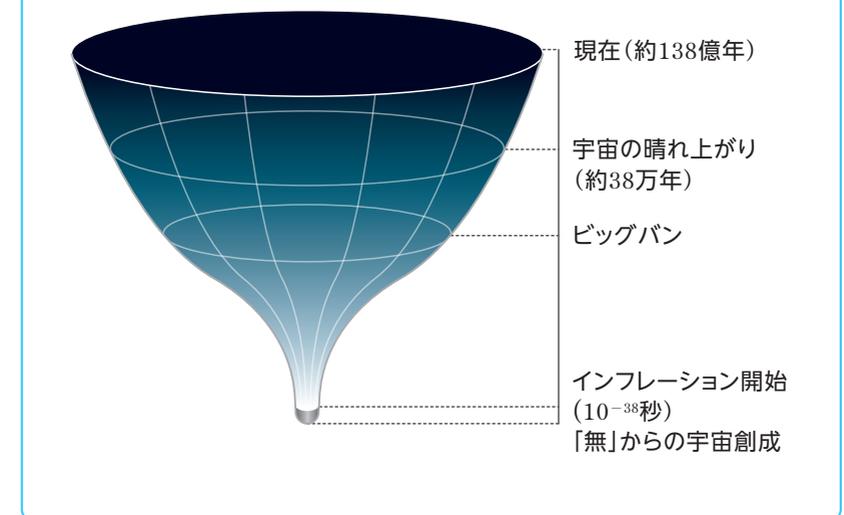
LISAの後継機。ビッグバン・オブザーバ（Big Bang Observer）の略。ビッグバン直後の宇宙背景重力波の観測を目的とする。

（****）ET

アインシュタイン望遠鏡（Einstein Telescope）。干渉計のサイズをVirgo検出器のアーム長3kmから10kmに拡大し、感度を大幅に向上させている。次世代地上重力波検出器。

直接の背景重力波を観測装置で検出することによって、インフレーション期の宇宙の膨張率を詳細に知ることができると考えられています。宇宙の膨張率は、その時期のエネルギースケールと関係が付きますので、膨張率を測ると、宇宙のエネルギースケールがわかることになります。これは天文学・物理学にとってたいへん大きな意味をもちます。

図 7-2-1 ● インフレーション理論をもとに描いた宇宙の歴史



このように、重力波の観測には、

- ①ブラックホールの衝突、中性子星の衝突、超新星爆発など、宇宙に起こる天体イベントによって起きた重力波を検出することで、ブラックホールの形成、銀河の形成などがわかる可能性がある
- ②宇宙初期のインフレーションにより作られた重力波を検出することで、宇宙誕生時の様子を理解できる可能性がある

この2点が重力波研究の重要な意味だと私は思っています。

