

2008年ノーベル物理学賞受賞記念

NAGOYA UNIVERSITY LECTURE

名古屋大学レクチャー

公開講演会

宇宙と物質の根源 「対称性の破れ」のかなたに

小林博士・益川博士、
素粒子と宇宙の謎について大いに語る！

2009年 名古屋大学は
創立70周年
(創基138周年)を迎えます



2009. 2.7 SAT

名古屋大学豊田講堂 13:00-17:00

2008年ノーベル物理学賞受賞記念

名古屋大学レクチャー プログラム(予定)

- 13:00~ 開会あいさつ(平野 眞一 総長)
- 13:10~ 解説「素粒子とは」
山脇 幸一 大学院理学研究科教授
- 13:40~ 解説「宇宙進化の謎と素粒子」
杉山 直 大学院理学研究科教授
- 14:15~ 名古屋大学レクチャーシップ授与式、表彰楯贈呈式
- 14:25~ 講演「CP 対称性の破れと素粒子の模型」
小林 誠 博士
- 15:15~ 講演「CP 対称性の破れが我々に語ったこと」
益川 敏英 博士



2008年ノーベル物理学賞受賞
名古屋大学特別招へい教授
独立行政法人日本学術振興会理事

小林 誠



2008年ノーベル物理学賞受賞
名古屋大学特別招へい教授
京都産業大学教授

益川 敏英

素粒子とは

身近な素粒子：電子と光子

素粒子とは物質の最小構成要素である粒子のことであり、この世のもっとも根源的な物質です。よく知られているように我々の身の回りのすべての物質は原子からできています。原子はさらに原子核とその周りをまわっている電子からできています。原子核はプラスの電荷をもちマイナスの電荷をもった電子と電氣的・磁氣的な力で引き合って原子を作っています。電氣的・磁氣的（電磁氣的）な力は、電界（電場）、磁界（磁場）によるもので、電気製品のモーターを動かしたりする日常生活になじみの深い力ですが、化学反応などもすべてこの力が原因です。この力の正体（担い手）である電場、磁場は、これまた我々の日常生活になじみの深い電磁波や光と同じものです。極微の世界を支配する法則である量子力学によれば、これは波であると同時に粒子でもあり、「光子」と呼ばれる素粒子です。一方、電子が動くと電流になり、我々の日常生活になじみ深いものですが、この電子も素粒子です。

クォーク

電子や光子が素粒子だとすると、電子とともに原子を作っている原子核はどうでしょうか。一番簡単な原子は水素原子で、その原子核はたった1個の陽子なのですが、その他の原子の原子核は何個かの陽子と中性子が集まってできたものです。では陽子や中性子は素粒子でしょうか。実は陽子や中性子も素粒子ではなくて、さらに「クォーク」と呼ばれる粒子からできています。このクォークが素粒子です。クォークは現在アップ（u）、ダウン（d）、ストレンジ（s）、チャーム（c）、ボトム（b）、トップ（t）という6種類が発見されていて、もうこれ以上のクォークの種類はないと信じられています。陽子はuクォーク2個とdクォーク1個からできており、中性子はuクォーク1個とdクォーク2個からできています。（図1）

レプトン

電子の仲間の素粒子も、電子（e）、ミュー粒子（ μ ）、タウ粒子（ τ ）と呼ばれる3種類があり、さらにそれぞれの相棒として電子ニュートリノ（ ν_e ）、ミューニュートリノ（ ν_μ ）、タウニュートリノ（ ν_τ ）の3種類のニュートリノがあってクォークと同じく合計6種類あります。これら6つの素粒子はまとめて「レプトン」と呼ばれています。

物質の構成要素としての素粒子

まとめると、物質の構成要素としての最小単位の素粒子は、6種類のクォークと6種類のレプトンであるということになります。

力を担う素粒子

では「電磁氣的な力」の担い手としての「光子」の仲間はどうでしょう。実は素粒子の間に働く力には電磁氣的な力の他に、放射能を引き起こす「弱い力」があります。放射能はクォークやレプトンが別のクォークやレプトンに崩壊して起こる現象です。これを担う素粒子がWボソンやZボソンで、これは「ウィークボソン（弱ボソン）」と総称されます。さらに、クォークをくっつけて陽子や中性子を作っている「強い力」もあります。それを担うのが「グルーオン」と呼ばれる素粒子です。力の担い手となっている素粒子である光子、弱ボソン、グルーオンはまとめて「ゲージボソン」と呼ばれます。

ン」と呼ばれることがあります。これらの素粒子が力を担う仕方はいずれも「ゲージ理論」と呼ばれるもので記述されているからです。実は我々になじみの深い電磁氣的な力を記述する「電磁気学」こそは、ゲージ理論の第一号であり、その他の理論はすべて電磁気学の拡張として作られたものなのです。このほか、自然界の基本的力には昔から知られている重力があります。これも電磁気学と同じゲージ理論の一種で、重力を担う素粒子は「グラビトン（重力子）」と呼ばれています。この素粒子はまだ確認されていません。重力の量子力学はまだできていないのです。素粒子はあまりにも質量の小さいものですから、通常素粒子の性質を議論するときには重力の効果は考慮せずに進めます。(表1)

素粒子の種類によって力の働き方は違う

物質を構成する素粒子のうち、クォークは「電磁氣的な力」「弱い力」「強い力」のすべてを感じるのですが、レプトンは「強い力」を感じません。さらにレプトンの中でもニュートリノは電氣的に中性ですので「強い力」だけでなく「電磁氣的な力」も感じず「弱い力」だけを感じます。一方、重力はすべての素粒子が感じますが、上にも述べたように大抵の場合考慮しなくてもよいのです。

未発見のヒッグス粒子

表1には「ヒッグス粒子」が素粒子の仲間として挙げられています。実はこの粒子はまだ見つかっていません。これは素粒子に質量を与えるために理論的に導入されたものです。この粒子がないと上に述べたすべての素粒子の質量はゼロなのです。ところがクォークやレプトン、ウィークボソンはすべて質量をもっています。これが本当に存在するのか、または素粒子かどうかは、これから本格的に稼動する超大型加速器LHCなどで検証されると期待されます。

反粒子

量子力学と相対性理論を組み合わせると、すべての素粒子には必ずそれと逆符号の電荷をもちその他の性質は同じである「反粒子」が存在することが結論されます。実際そのような粒子は見つかっていて、表1のそれぞれの素粒子に対して反粒子があることとなります。反粒子はそれぞれの名前の前に「反」をつけて呼びます。クォークに対して反クォーク、ニュートリノに対して反ニュートリノ、のように(例外的に電子の反粒子は反電子とは呼ばず、「陽電子」と呼びます)。また例外的に「光子」は電荷がないので粒子と反粒子は同じものです。(ただし、電氣的に中性でも別の「電荷」を持つ場合には、反粒子と粒子は同じではありません。たとえばニュートリノと反ニュートリノは別ものです。)

メソン、バリオン、ハドロン

ちなみに、1946年日本人初のノーベル賞に輝いた湯川先生の予言されたパイ中間子は、当初素粒子と考えられたのですが、いまではグルーオンが担う「強い力」でクォークと反クォークが結合した複合粒子であることがわかっています。素粒子の仲間には入らないのです。陽子や中性子のようにクォークが3個結合したものを「バリオン」と呼び、パイ中間子のようにクォークと反クォークが結合してできたものを「メソン」と呼びます。メソンとバリオンのようにクォークが何個か集まってできている(複合)粒子を総称して「ハドロン」と呼びます。ハドロンは構成要素のクォークと同様、すべての種類の力を感じます。

坂田模型からクォーク模型へ

ハドロンがクォークからできている複合粒子であるという考えは、故坂田昌一名大教授の提案された坂田模型(1956年)から発展したものです。坂田模型では、陽子(p)、中性子(n)、ラムダ粒子(Λ)を基本粒子としその他のハドロンはすべてこの3種類の粒子(とその反粒子)が集まってできた複合粒子と考えられました。坂田模型の(p, n, Λ)が、その後修正されてクォーク模型の(u, d, s)になったのです(1964年)。

坂田模型から牧・中川・坂田理論へ

クォーク模型の出現以前に、名古屋大学の坂田学派では、坂田模型をさらにレプトンまで含む統一模型にまで拡張していました。これが「名古屋模型」(牧二郎・中川昌美・大貫義郎・坂田昌一の共著)です。当時知られていたレプトンは3種類(ν_e , e, μ)でこれが坂田模型の(p, n, Λ)と「弱い力」の働き方が非常によく似ていました。そのためレプトンに強い力を感じる「B物質」というものがくっついて(p, n, Λ)ができると考えたのです。ところが1962年に第4番目のレプトンとしてミューニュートリノ(ν_μ)が発見されました。これからただちに4つのレプトンを基にした「新名古屋模型」(牧・中川・坂田理論)が生まれました(1962年)。まず2種類のニュートリノ ν_e と ν_μ が混合するとして現実のニュートリノ2種類はこれらの交じり合ったものだという考えです。これから予言されるニュートリノ振動は1998年に有名な神岡の実験で立証されました。牧・中川・坂田理論はさらに、4つのレプトンに対応するには(p, n, Λ)では不足で4番目の基本粒子の存在を示唆しました。これが後に4つ目のクォーク(チャームクォーク)へと発展しました。このため益川博士、小林博士の育った坂田学派では、クォーク4種類は当然という風潮でした。ところが、このころ世界の主流はハドロンが素粒子であってそれ以上基本的な粒子はないと考えていました。3種類のクォークですら信じる人は少なかったのです。

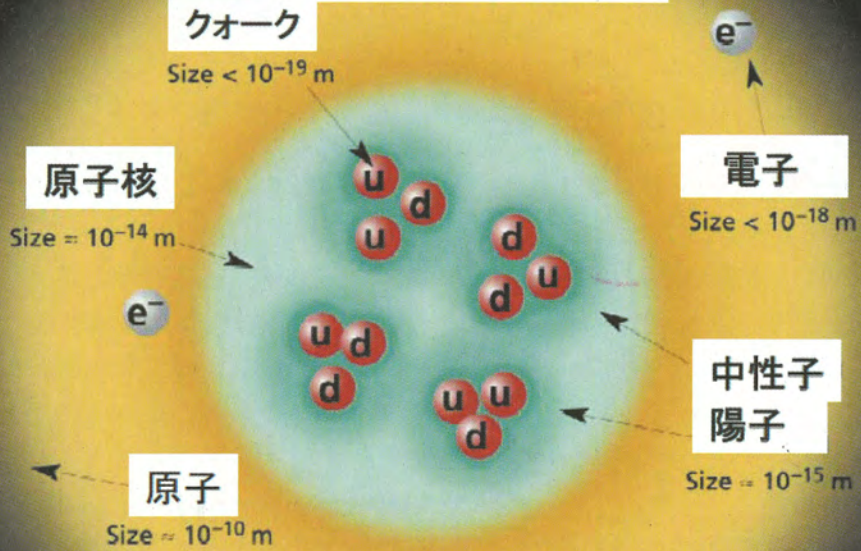
CP対称性の破れ

反粒子の存在が発見されて以来、人々は長い間両者はまったく同じ法則に従うと信じていました。粒子と反粒子を入れ替える操作をC変換(荷電共役変換)と呼び、鏡に映すような変換(右手が左手に変わる)変換をP変換(パリティ変換)と呼びますが、素粒子の世界でこれらの変換をしても物理法則が同じ場合、それぞれC対称性、P対称性と呼びます。C対称性とP対称性がそれぞれ破れていること(成り立たないこと)が発見されて衝撃を与えましたが、それでも、C変換と同時にP変換も行うと法則は同じだと信じられていました。これが「CP対称性」です。ところが、1964年に実験でこのCP対称性も破れていることが発見され、その理由は長い間謎でした。

小林益川理論の誕生

小林・益川理論の誕生の1972年(出版は1973年)の前年には、電磁的力と弱い力をゲージ理論として統一するグラشوウ・ワインバーグ・サラム理論の「くりこみ可能性」が証明されました。実はこの理論は当時は実験的に否定されたままでした(実験的サポートは1973年)。ところが「くりこみ可能性」は、最初電磁的力に関して朝永・シュウィンガー・ファインマンが示したこと(1965年ノーベル物理学賞)で、理論の予言能力にとって決定的です。小林・益川両博士は、実験的に否定されていたにもかかわらず、この理論の「素性のよさ」を重視して、この理論の枠内でCP対称性の破れが、坂田学派伝来の4種のクォークなら説明できるのではないかと考えて検討した結果、クォーク4種類では説明できないことを結論しました。その上で、CP対称性の破れの起源としてクォークが6種類(以上)あればよいことを発見したのです。3種類のクォークですら信じない世界的風潮の中で、6種類のクォークは当時としてはきわめて突飛なことで数年間は黙殺されました。しかしながら出版から35年間もの時を経てついにノーベル物理学賞に至りました。この感動のドラマの詳細は、小林博士、益川博士のご講演で直接お聞きになれることでしょう。

原子の構造



陽子・中性子の直径が10cmだとすると電子やクォークは0.01mm以下
原子は10kmになります。

図1

レプトン		クォーク	
ν_e ニュートリノ	e^- 電子	u アップ	d ダウン
ν_μ ミューニュートリノ	μ^- ミュー粒子	c チャーム	s ストレンジ
ν_τ タウニュートリノ	τ^- タウ粒子	t トップ	b ボトム
ゲージボソン			
γ 光子	g グルーオン	W, Z ウィークボソン	G グラビトン?
(電磁気力)	(強い力)	(弱い力)	(重力)
質量の起源		h ヒッグス粒子	(もうすぐ見つかるかも)

表1