

02 THE SCIENTIFIC LEGACY OF OPAL

素粒子の標準理論の確立に貢献したOPAL実験

量子力学の誕生と発展により、素粒子の世界の理解も大きく進み、素粒子物理学を大きく発展させた。加速器を使った高エネルギー実験は、いくつもの新粒子の発見とともに、既知の素粒子の精密な測定により、素粒子の標準理論の構築と確立に大きく貢献してきた。20世紀の終わり頃に実施されたOPAL実験の創設メンバーの1人である川本辰男先生に、OPAL実験について伺った。



TATSUO KAWAMOTO
川本辰男
中国科学技術大学

古代ギリシャの哲学者デモクリトスが唱えたアトモス（原子）はそれ以上、分割することのできない物質の基本的な構成要素でした。デモクリトスの考えた原子は、概念上のものでしたが、20世紀の初め頃に、原子が実在していることが確認されました。しかし、実際の原子は原子核と電子に分割でき、原子核は陽子と中性子に分けられるというように、さらに小さな粒子があることもわかってきたのです。結局のところ、原子はアップクォーク、ダウンクォーク、電子の3種類の素粒子で構成されています。

物質を構成する粒子の仲間は、すべてスピン1/2を持つフェルミオンであり、全部で12種類あります。そして、原子を形成するために、電磁気力、強い力、弱

い力が働いており、それらの力はまた別の素粒子によって媒介されていることが明らかになりました。力を媒介する粒子の仲間はゲージボソンと呼ばれる種類です。

量子電磁力学（QED）、電弱統一理論、量子色力学（QCD）はゲージボソンがどのように働いているのかをうまく説明し、合わせて素粒子の標準理論と呼ばれます。素粒子の標準理論は、特殊相対性理論、量子力学、ゲージ原理を理論的柱としています。

ゲージ原理は、時空の各点でゲージ変換をしても物理はかわらないというゲージ不変性から、相互作用とその媒介粒子を導き出すものです。例えば、電磁気力の媒介粒子である光子は、電子と電磁場を量子化した場の理論であるQEDによって導かれます。

1989年から2000年にかけて活躍した電子・陽電子衝突型加速器LEPは、弱い力を媒介するZ粒子とW粒子を精密に測定することにより、ゲージ原理が量子補正も含めて正しいことを証明し、素粒子の標準理論の基盤を確立しました。

LEPでは4つの実験が採択されました。その1つが、東京大学グループが国際チームと共同で提案したOPAL実験です。

LEPは1989年7月14日に電子と陽電子の最初のビームを周回させ、その年の9月から本格的な物理実験が始まりました。1995年までの実験期間で、OPAL検出器は約450万のZ粒子の生成崩壊過程を記録し、それを詳しく分析しました。

これにより、それまでの実験結果の1,000倍の精度でZ粒子の質量を決め、物質をつくる素粒子の世代数が3であることを明らかにしています（図1）。さらに、Z粒子生成に関わる量子力学の高次効果（量子補正）から、当時まだ発見されていなかったトップクォークの質量を173GeV付近であると算出しました（図2）。トップクォークは1995年に発見され、その質量はOPAL実験の予想通りの約175GeVと、標準理論が量子力学の高次効果も含めて正しいことを証明したのです。

1996年からは、加速器のエネルギーを増強したLEP IIが稼働し、W粒子を対生成することに成功しました。電子・陽電子の衝突からW粒子が対生成する過程は3つあり、そのうちの1つはこれまで知られていないゲージボソン（ZとW）同士の相互作用の情報を持って

ます。そして、標準理論の予言と観測結果は精密に一致することが確かめられました。

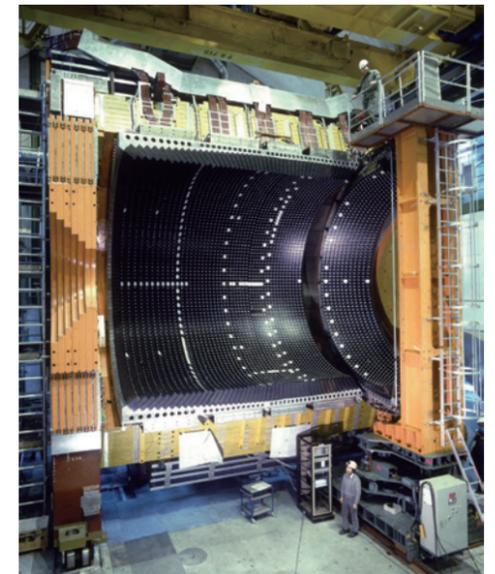
当時、ヒッグス粒子はまだ発見されていませんでしたが、LEP/LEP IIでほぼ確実に見つかるものと考えられていました。そこで徹底的な探索を行ないましたが、残念ながら発見されず、その結果ヒッグス粒子は114.4GeVより重いことがわかったのです（図3）。

一方、さらに量子補正の精度を上げ、それまでのOPAL実験の結果やトップクォークの質量などのデータをもとに標準理論を使って分析したところ、ヒッグス粒子の質量は285GeVより軽いことがわかりました。

これにより、ヒッグス粒子の質量範囲を絞り込んだこととなります。ヒッグス粒子は結局、LEPの運転終了後に建設された大型ハドロン衝突型加速器（LHC）での実験で発見され、その質量が約125GeVであることがわかりました。OPAL実験はほんの10GeVだけエ

ネルギーが足らなかったこととなります。

LEPやLHCをはじめとするさまざまな実験によって、素粒子の標準理論に登場するすべての素粒子が見つかり、1つの区切りをつけることができました。しかしながら、標準理論では説明できない謎はまだあり、さらに深まるばかりです。現在実施しているLHC実験やMEG II実験によって、新しい理論（図4）へとつながる発見ができれば、と思います。



OPAL検出器最重要部分の1つである電磁シャワーカロリメータ。東大グループが担当した。約1万本分の鉛ガラスカウンターからなり、LEP加速器の運転終了まで10年以上高性能を保ち続けた。

図1：素粒子の世代数を3と決定

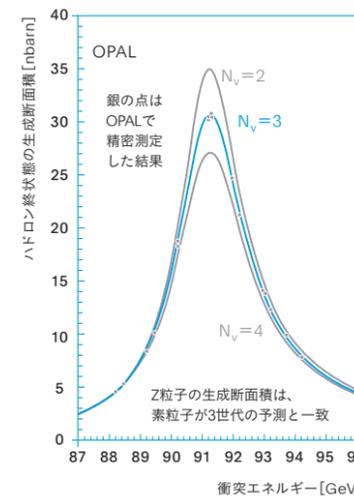


図3：ヒッグス粒子の質量領域の限定

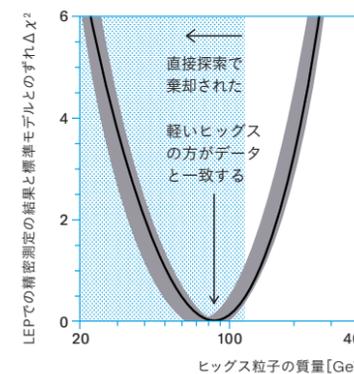


図2：トップクォークの質量

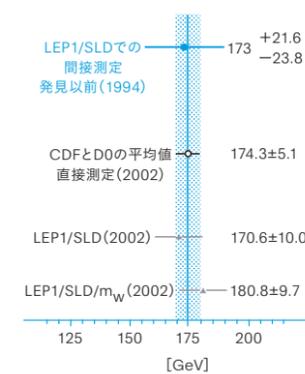


図4：力の大統一の可能性（超対称性粒子を示唆）

