

CDF 実験 30 年の軌跡と物理成果



金 信弘

筑波大学数理解物質系物理学域
skim@hep.px.tsukuba.ac.jp



受川 史彦

筑波大学数理解物質系物理学域
ukegawa@hep.px.tsukuba.ac.jp

現在、素粒子とその相互作用を実験結果と矛盾なく説明する素粒子標準模型によると、物質の構成粒子であるクォークとレプトンはそれぞれ弱アイソスピン対をなして3世代6種類存在すると考えられている。また、この標準模型では、ゲージ原理により生じるゲージボソンとして、強い力を伝えるグルオン、電磁力を伝える光子、弱い力を伝える W 、 Z ボソンが存在し、さらに標準模型の基本仮説として真空中に凝縮して素粒子に質量を与えるヒッグス粒子が存在する。また、我々の物質宇宙が存在するために不可欠な粒子・反粒子対称性の破れを説明するために、1973年にクォークが3世代以上ある小林・益川理論が提唱された。その後1977年に第3世代のボトムクォークが発見されて以来、その弱アイソスピンのパートナーであるトップクォークは長い間、多くの衝突型加速器実験で探されてきた。1983年の W ボソンと Z ボソンの発見により、素粒子標準模型で予言されていて未確認な素粒子はトップクォークとヒッグス粒子のみとなった。

米国フェルミ国立加速器研究所のテバトロン衝突型加速器を用いた陽子・反陽子衝突実験 CDF (Collider Detector at Fermilab) は1985年の初衝突以来、1987年に重心系エネルギー1.8 TeVの衝突データ収集を開始し、その後の改良により2001年から重心系エネルギーを1.96 TeVにあげて、2011年9月のテバトロン運転終了まで、世界最高エネルギーの陽子・反陽子衝突データを収集した。CDF 実験では、世界最高エネルギーの加速器を用いて、新しい素粒子・新しい物理の探索を30年の長きにわたっ

て遂行し、多くの重要な物理の成果をあげて、素粒子物理学の発展に寄与してきた。特に1995年にはトップクォークの発見という輝かしい業績をあげた。6番目のクォークであるトップクォークは多くの衝突型加速器実験で探索されてきたが、発見されず、20年来の素粒子物理の宿題となっていたが、CDF 実験によって、ついに解決した。

CDF 実験ではヒッグス粒子の探索も強力に推進してきた。ヒッグス粒子の質量は輻射補正を通してトップクォークと W ボソンの質量と関係づけられるので、トップクォークと W ボソンの質量を精密に測定することによって、ヒッグス粒子の質量の上限を決定した。またヒッグス粒子を直接に探索した結果とあわせて、ヒッグス粒子の質量範囲を $147 \text{ GeV}/c^2$ 以下と特定した。そのヒッグス粒子は2012年にスイス・ジュネーブにある CERN 研究所の LHC 陽子・陽子衝突型加速器を用いた ATLAS、CMS 実験によって発見され、現在では素粒子標準模型で予言されていて未発見な粒子はなくなった。

CDF 実験では、上記のトップクォークの発見以外にも、2006年に B_s^0 中間子の粒子・反粒子振動を観測して、小林・益川理論が正しいことを精密に検証し、1998年には15種類ある基本中間子のうちの最後の中間子である B_c 中間子が発見するなど、多くの重要な物理成果をあげた。現在も物理解析を続けていて、結果を論文で報告している。ここに、その30年の軌跡を振り返る。

—Keywords—

粒子反粒子対称性の破れ：
宇宙には物質が存在するが、反物質は存在しないように見える。この理由はまだ不明であるが、宇宙の進化の過程でこのような不均衡が起こったとするのが定説である。これは、物理法則が、物質と反物質の間で異なることを意味する。素粒子のレベルでは、鏡像反転 P と荷電共役変換 C を同時に行う変換のもとでの対称性 (CP 対称性) が破れていることが必要である。

世代数：
素粒子標準模型の枠組では、小林・益川理論によって、クォークの世代数が3以上であることが要求されている。トップクォークの発見はこの理論の予言が正しいことを立証した。クォークおよび荷電レプトンの世代間には最大で5桁という大きな質量差があるが、この質量階層を説明する理論はなく、この質量階層起源の解明は素粒子物理の大きな課題である。

輻射補正：
 W 、 Z ボソンの質量の輻射補正は、おもにヒッグス粒子とトップクォークのループが寄与するファインマンダイアグラムで計算される。素粒子標準模型では、 W 、 Z ボソンの質量とワインバーグ角の間に関係式が成り立つが、そこに、この輻射補正の効果を含めると、ヒッグス粒子とトップクォークの質量も含む関係式となる。この中で Z ボソンの質量とワインバーグ角は特に精密に測定されているので、この関係式は、 W ボソンとヒッグス粒子とトップクォークの質量の間の関係式とみなすことができる。