

特集 / 素粒子物理学の未解決問題

素粒子物理学の未解決問題

小林 誠

1. 序

素粒子の標準模型と呼ばれるものができて、すでに30年が経つ。そして、ニュートリノの質量の確認などわずかな例を除けば、標準模型の枠組みを超えるような本質的な進展はこの30年間起きていない。そこでまず、標準模型によって何が解決されたかを明らかにして、その位置づけを考えてみよう。

素粒子現象を記述するのに基本となる理論的枠組みは場の量子論である。場の量子論は特殊相対性理論と量子論の要請を同時に満たすもので、粒子の生成や消滅が頻繁に起きる素粒子現象を記述するのに適している。その歴史は1928年にハイゼンベルク(W.K. Heisenberg)とパウリ(W.E. Pauli)が電磁場の量子化を議論したときに遡ることができる。場の量子論は、スピンと統計の関係を説明するなど初期における成功をおさめたが、すぐに発散の困難に遭遇した。すなわち、相互作用の効果を摂動論で計算すると、至る所に発散する積分が現れ、質量や電荷に対する補正が発散量となる問題である。

この困難は、電磁相互作用については、くりこみ理論によって回避できることが1940年代に朝永振一郎、シュヴィンガー(J. Schwinger)、ファ

インマン(R.P. Feynman)らによって明らかにされた。一方、弱い相互作用と強い相互作用については、それらの場の量子論による記述は、あまり表舞台上で議論されることなく歳月が流れた。

しかし、その背後では非可換ゲージ理論(Yang-Mills理論)が提唱され、対称性の自発的破れやヒッグス(Higgs)機構などの理解が進み、ついには、トフーフト(G. 'tHooft)とフェルトマン(M. Veltman)によって非可換ゲージ理論のくりこみ可能性が証明されるにいたって転機を迎えた。すなわち、非可換ゲージ理論によって弱い相互作用と強い相互作用を記述することが可能となった。

これとほぼ同時期に相次いで起きた新粒子発見の結果を取り入れて、標準模型は物質の基本的な構成要素とそこに働く相互作用の両面において、矛盾なく自然を記述する枠組みとして完成を見た。基本的な構成要素が6種類のクォークと6種類のレプトンにきれいに整理されることは、標準模型の魅力の重要な要素であるが、これは、経験事実をそのまま表したという性格が強く、その背景にどんな意味があるかはまだ十分には解明されていない。したがって、標準模型の本質をあえて一言で言うならば、弱い相互作用と強い相互作用の記述を電磁相互作用と同じレベルにまで引き上げたということになるであろう。

このように考えると、標準模型によって解明さ