

B 中間子崩壊におけるアノマリーの現状と今後の展望

高橋 悠太 <チューリッヒ大学 Yuta.Takahashi@cern.ch>

廣瀬 茂輝 <フライブルク大学 shigeki.hirose@cern.ch>

佐藤 優太郎 <高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所 syutaro@post.kek.jp>

中村 克朗 <高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所 katsuro.nakamura@kek.jp>

約 138 億年前、宇宙はビッグバンにより始まった。その後、宇宙膨張に伴ってエネルギー密度すなわち温度は下がっていき、現在の宇宙は 2.7 K ($\sim 10^{-4}$ eV) まで冷えている。この極低温宇宙に住む私たちが、まだ灼熱だった頃の宇宙について理解するには、粒子加速器を使って宇宙初期の状況を再現し、万物の「素」となる素粒子の性質や相互作用について調べることが重要となる。得られた知見は素粒子標準理論としてまとめられ、宇宙開闢からおよそ 10^{-10} 秒後、温度にして 1,000 兆度 (~ 100 GeV) までさかのぼって宇宙の歴史を理解するに至った。ところが、ニュートリノ振動や暗黒物質の存在など、標準理論では説明できない事象も多く、標準理論は低いエネルギー領域での近似理論であって、より高いエネルギー領域には未知の物理法則が存在するという見方が確実視されている。この新物理の尻尾をつかむことが、我々素粒子物理学者に課された使命である。

新物理の探索手法には様々あるが、有力なものとして B 中間子を使う手法がある。B 中間子は加速器で大量に生成可能であり、多様な崩壊過程を精密測定することで多角的な新物理検証が可能となる。たとえば $m = 1$ TeV の質量をもった未知の粒子が存在したとしよう。すると B 中間子の崩壊において、 $\Delta t \sim \hbar/m = 10^{-27}$ 秒の間だけ仮想的に存在することができる。もし B 中間子が、この仮想状態を経由して特定の崩壊をすると、B 中間子の崩壊パターンが僅かに標準理論からずれるはずで、これを検出しようというわけである。

興味深いことに、近年、B 中間子のいくつかの崩壊パターンで標準理論からの系統

的な差異が報告され、“B アノマリー”と呼ばれている。中でも特に注目したいのが、レプトンフレーバー普遍性の破れに関するものである。日本の Belle 実験をはじめとする B 中間子の精密測定において、B 中間子が異なるフレーバーに崩壊するパターンを詳しく調べてみると、 3σ 以上の統計的有意度で標準理論の予想値とは異なる結果が得られた。これは、レプトンフレーバー普遍性を破る新物理の存在を強く示唆している。

B アノマリーが新物理によって引き起こされているとすれば、その大きさや性質から $O(1)$ TeV のレプトクォークが新粒子として有力視される。これを受けて、世界最高の衝突エネルギー 13 TeV を誇る陽子陽子衝突型加速器 LHC を利用した ATLAS および CMS 実験にて、新粒子を直接生成し、探索する試みが進められている。両実験におけるレプトクォーク探索は、現状でおよそ 1 TeV の質量領域に到達している。まだ直接観測には至ってはいないものの、B アノマリーから予言される新物理のエネルギー領域に手が届きつつある。

以上のように、B アノマリーに関する実験的研究は、B 中間子崩壊の精密測定による“間接探索”と世界最高エネルギーの加速器を用いた“直接探索”の両輪によって、近年急速に進展してきた。今後、Belle 実験から測定精度を大きく向上させた Belle II 実験や、LHC 加速器を用いて行われている LHCb 実験とで B アノマリーの検証を継続していく。また ATLAS や CMS 実験でも加速器性能の向上により感度が良くなっていく。今後 10 年以内に、B アノマリーの是非に対して、決着がつかだろう。

—Keywords—

B 中間子：

クォークの一種である b クォークと軽いクォークとが結合した複合粒子で、約 10^{-12} 秒の寿命で崩壊して別の粒子に転換する。この崩壊パターンは多彩で数百にのぼり、それらの崩壊確率の精密測定から新物理の存在を探ることができる。

レプトンフレーバー普遍性：

標準理論の弱い相互作用ではレプトンとの相互作用の強さを決める結合定数は、荷電レプトンの種類すなわちレプトンフレーバー (e, μ, τ) に依らず普遍である。これをレプトンフレーバー普遍性と呼ぶ。しかしフレーバーに依存する相互作用をもつ新物理が存在すると、この普遍性が成り立たなくなる。そこでこの普遍性の破れの測定が重要な新物理探索となる。

レプトクォーク：

標準理論には存在しない粒子で、レプトンとクォークの性質を併せもつ。標準理論では物質を構成する素粒子はレプトンとクォークに大別され、これらは別種の粒子とみなされる。一方で、世代構造や電荷量などに注目すべき共通点があることから、レプトンとクォークを統一的に理解する新物理理論が提唱されている。3 つの力 (相互作用) を統一する大統一理論がその代表例である。これらの理論においてレプトクォークの存在が予言される。