

論文内容の要旨

論文題目: Study of the mass spectra of excited baryons from lattice QCD
(格子 QCD によるバリオン励起状態の質量スペクトルの研究)

佐々木 潔

本研究では、格子 QCD に基づく数値シミュレーションを用い、バリオンの励起状態の質量スペクトルを解析した。特に、 $N'(1440)$ と $N^*(1535)$ のエネルギー準位の順序に関する問題に焦点をあてた。実験的には、核子の第一励起状態は正パリティを持つローバー共鳴 $N'(1440)$ であるのに対し、わずかに質量の大きい第二励起状態 $N^*(1535)$ は負パリティ・チャンネルに現れる事が知られている。バリオンの励起状態におけるこのようなエネルギー準位の順序は、フレーバー 8 重項の Σ や Λ チャンネル、そして 10 重項の Δ チャンネルにおいても見られる。しかし、このパターンを構成子クォーク模型などにより説明するのは非常に困難である事が知られている。この問題を格子 QCD に基づく第一原理計算により調べる事が、本研究の主要な目的の一つである。

格子 QCD 数値シミュレーションによる N^* と N' の質量の評価は、以下で述べるいくつかの技術的な困難のため、これまで系統的な研究がなされてこなかった。まず第一に、バリオンの励起状態は格子体積が有限である事の影響を強く受ける。我々は三種類の格子サイズ (1.6, 2.2, 3.2 fm) を用いた計算により、この有限体積効果の評価を行ない、有限体積効果からくる系統誤差を抑制する事を試みた。第二に、クォーク場で書かれたバリオン演算子は、常に正パリティ状態と負パリティ状態の両方の寄与を含んでいる。それゆえ、基底状態である正パリティの核子より高い質量を持つ負パリティの N^* 状態を抽出するために、適切なパリティ射影を行なう必要がある。この目的のために、我々は、周期的および反周期的境界条件に従うクォーク・プロパゲーターを線形結合してバリオン演算子を構成する方法を用いた。第三に、 N' は核子と同じ量子数を持つ励起状態なので、量子数の射影により両者を区別する事が不可能である。このため、我々は最大エントロピー法 (MEM) を用いてバリオン相関関数の解析を行なった。MEM は、基底状態に加えて励起状態の情報も含む、スペクトル関数を直接計算する方法であり、本研究の目的のために非常に有効な手段である事を示した。

上記の全ての方法を活用して、我々は、格子間隔 0.093 fm、サイズ $L^3 \times T = 32^3 \times 32$ の格子上で生成されたデータから、 N' と N^* の質量を抽出し、カイラル極限でそれらがほぼ等しい質量を持つ事を見い出した。さらに、カイラル極限だけでなく、広いクォーク質量の領域にわたって N' と N^* の準位が統計誤差の範囲内で一致する事も見い出した。これらの結果は、ローパー共鳴 N' が N^* よりもずっと高い質量を持つという現象論的クォーク模型の予想とは対照的である一方、実験的に知られている準位構造とは定性的に一致している。