

論文審査の結果の要旨

氏名 鈴木 謙

量子色力学 (QCD) の基本的な性質であるカイラル対称性の自発的な破れとその回復については、近年多くの理論的及び実験的研究がなされている。有限密度ハドロン物質中のカイラル対称性の部分的な回復を調べる手段として、パイオン原子を用いた π 中間子と原子核の相互作用の詳細な研究が注目されている。最近の理論研究によれば、パイオンの崩壊定数の 2 乗 f_π^2 とカイラルオーダーパラメータ $\langle \bar{q}q \rangle$ との間に比例関係があり、又、 f_π^2 はパイオンと原子核の光学ポテンシャルの s 波アイソベクター相互作用強度 b_1 に反比例することが知られている。従って、有限密度中での b_1 を決定することで、カイラル対称性の部分的回復の度合いについての定量的に論ずることが可能となる。

本研究の目的は、重い中性子過剰核について π 中間子の深束縛 1s 状態を生成し、その束縛エネルギーを精密に測定することで、 b_1 を精密に決定し、その結果から、有限密度下でのパイオンの f_π^2 を決定し、カイラル対称性の部分的回復についての証拠を探ることである。

重い原子核における π 中間子の深い束縛状態は、従来の方式、即ち高い励起状態からのカスケードを用いる方法では、原子核による強い吸収過程の競合のため生成が困難であったが、近年確立された原子核分光法を用いることで、直接、深い束縛状態の π 中間子原子を生成することが可能となった。本論文の基になる実験では、標的として錫同位体を用いた π 中間子深束縛 1s 状態の系統的測定を行った。錫同位体を標的とした最大の理由は、原子核のフェルミ面付近に中性子 3s 状態が存在することで、反応において π 中間子 1s 状態が選択的に生成される。 π 中間子原子の 1s 状態は p 波項の不定性による影響が無視でき、s 波項部分のみを分離した議論が可能となる。また重い原子核、即ち中性子過剰核を用いることは、アイソベクター相互作用を一意に決定するための本質的な役割を果たす。また、多数の安定な同位体が存在することから幅広い領域での同位体効果の測定を行うことができる利点もある。

本論文の基になる実験は、ドイツ重イオン研究所 (GSI) の UNILAC/SIS 加速器施設から得られる重陽子 (d) ビームを用いて行なわれた。(d, $^3\text{He}\pi^-$) 反応から放出される ^3He の運動エネルギーを測定することで、 π 中間子原子核の束縛エネルギーが決定されるが、 ^3He の運動量測定はスペクトロメータ (FRS) を用いて行なわれた。ビームエネルギー (=250MeV/u) は、反応の無反跳条件を満たし、 π 中間子 1s 状態の選択的生成を助長するように選ばれた。ビーム強度は 0.5/sec 平均、標的には分解能向上のために幅 1.5mm の細さにまで絞った厚さ 20 の錫同位体 (A=116,120,124) が用いられた。FRS は 4 基の二重極磁石と二十基の四重極磁石等からなるスペクトロメータで、FRS の前半部を用いて運動量解析を (dispersion=6.8%/cm)、後半部を用いて粒子識別のための飛行時間計測とエネルギー損失の測定が行なわれた。そのようにして ^3He の運動エネルギースペク

トルが得られた。エネルギースケールを高精度に較正するために、いくつかの方法を用いているが、その一つが、 $p(d, {}^3\text{He})\pi^0$ 反応からの ${}^3\text{He}$ 運動エネルギーの測定であるが、錫同位体標的に薄いマイラー膜を重ねることで同時測定を可能とした。この更正からエネルギーの絶対値を 7keV の精度で決定することができた。

解析の結果、得られたスペクトルの 1s 状態生成部分は精密に分解され、その束縛エネルギー (B) と幅 (Γ) が以下のように決定された (単位は MeV)。

$${}^{115}\text{Sn}: \quad B = 3.906 \pm 0.024, \quad \Gamma = 0.441 \pm 0.087$$

$${}^{119}\text{Sn}: \quad B = 3.820 \pm 0.018, \quad \Gamma = 0.326 \pm 0.080$$

$${}^{119}\text{Sn}: \quad B = 3.744 \pm 0.018, \quad \Gamma = 0.341 \pm 0.072$$

次に、先に Yamzaki らによって提案のなされた手法にそって π 中間子-原子核相互作用の詳細な解析がなされた。 π 中間子-原子核相互作用は 9 つのパラメータ (s 波項に 4 つ p 波項に 5 つ) が含まれる。しかしながら、先に述べたように π -1s 状態のみに着目する限り s 波項に限定した議論が可能であり、また s 波項のある変数間に存在する強い相関関係を考慮した相互作用の再定式化やまた既知の対称核における 1s 状態の情報 (アイソベクター項がない) を援用することにより、最終的に s 波アイソベクター相互作用強度 b_1 のみの自由度に帰着される。この事実を利用して、実験から決められた束縛エネルギー及び幅から、s 波アイソベクター相互作用強度 b_1 を一意的に導出された。その値は

$$b_1(\rho_{eff}) = 0.115 \pm 0.005 m_\pi^{-1}$$

である。ここで、パイ中間子の感じる平均的な原子核密度 ρ_{eff} 中での相互作用強度という意味で、 $b_1(\rho_{eff})$ と表現している。この値と真空中での $b_1^{free}(=0.090)$ の比から、

$$\frac{b_1^{free}}{b_1(\rho_{eff})} = \frac{f_\pi^*(\rho_{eff})^2}{f_\pi^2} = 0.78 \pm 0.03$$

が得られる。 $\rho_{eff} \approx 0.6\rho_0$ であるので、このことから通常核媒質密度 ρ_0 においては、

$$\frac{f_\pi^*(\rho_{eff})^2}{f_\pi^2} = 0.63 \pm 0.05$$

が得られる。これらを用いて最終的に計算されたカイラルオーダーパラメーター $\langle \bar{q}q \rangle$ の値は 0.66 ± 0.06 であり、最近の理論的な予言と非常によい一致が得られることが示された。

本論文の基になった実験は複数名との共同研究に基づくが、論文提出者である鈴木謙君は、実験の企画・遂行において中心的な役割を果たし、論文に用いられているデータの解析、まとめ、考察を行っており、その寄与は十分であると判断した。

したがって、審査員全員一致で、博士 (理学) の学位を授与できるものと判断した。