

論文内容の要旨

論文題目

Precision X-ray spectroscopy of kaonic helium atom
(K 中間子ヘリウム原子 X 線の精密分光)

氏名 竜野 秀行

K 中間子原子とは、原子中の 1 つの電子を負の電荷を持った K 中間子と置き換えたエキゾチック原子であり、生成時は原子核とクーロン相互作用で束縛している。K 中間子原子は、K 中間子と原子核の間に働く強い相互作用を閾値近傍で実験的に知ることができる唯一のツールとして研究されてきた。K 中間子原子の低いエネルギー準位では、K 中間子と原子核との強い相互作用が影響し、エネルギー準位はクーロン相互作用のみで計算した値からあるシフトと幅を持って存在している。そのシフトと幅を特性 X 線を利用して精密に測定することで、強い相互作用を評価することができる。

K 中間子原子の X 線は、1970 年代から今までに水素からウランという様々な標的で測定されてきたが、長い歴史があるにもかかわらずその相互作用の正確な理解はまだ得られていない。最も基本的なシステムである K 中間子水素の X 線が正しく測定されたのは 1990 年代の終わりであり、それまではその相互作用の符号さえわからなかった (K 中間子水素パズル)。その原因は、K 中間子水素 X 線の強度がオーダー 1% 程度と低く、K 中間子の吸収やハイペロンの崩壊によって発生する π^0 や高エネルギー光子によるバックグラウンドが大きいため、精密測定実験が難航していたのである。K 中間子ヘリウムに関しては、 $2p$ 軌道のシフトの実験値と理論計算とに大きな不一致があることが知られていた。過去の実験値の平均は -43 ± 8 eV という大きな斥力的シフトであるのに対し、理論計算はほぼゼロのシフトを示していた。この 5σ に及ぶ不一致は“K 中間子ヘリウム原子パズル”として知られており、30 年以上もの間説明が付かない状態であった。

この K 中間子ヘリウム原子の問題を解決するべく、我々は数 eV という高精度を目標にし K 中間子ヘリウム原子のバルマー系列 X 線 ($3d \rightarrow 2p$, $4d \rightarrow 2p$, そして $5d \rightarrow 2p$ 遷移) を測定する実験を行った。実験は茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の 12 GeV 陽子

シンクロトロンで生成される二次 K 中間子ビームを利用して行った。減速させた K 中間子を超流動液体ヘリウムに静止させ K 中間子ヘリウム原子を生成し、発生する X 線を高分解能半導体検出器を用いて測定した。当時我々が利用できる大強度の K 中間子ビームは KEK のみで、低運動量 (650 MeV/c) かつ大強度 (~10 kHz) という KEK の K5 ビームラインはまさに我々の実験に合ったものであった。

我々の実験に特徴的な過去の実験に対する改善点として次の三つがあげられる。

1. 高分解能シリコンドリフト検出器 (SDD) を加速器実験で初めて利用した。SDD は過去の実験で使用された Si(Li) 検出器と比較しておよそ 2 倍のエネルギー分解能を持ち、その薄さは 10 分の 1 程度である。測定器が薄いということは、測定器中における高エネルギー光子のコンプトン散乱によるバックグラウンドを抑えることができる。
2. 液体ヘリウム中に静止した K 中間子のイベントのみを選び出すことで劇的にバックグラウンドを抑制させることに成功した。K 中間子ビームだけを同定していただけの過去の実験とは異なり、我々の実験では静止した K 中間子と原子核との反応点を K 中間子ビームの軌跡と反応によって放出される陽子や π 中間子などの荷電粒子の軌跡により再構成し、それが標的内部に存在するという選別を行うことで目的の静止 K 中間子イベントを選び出した。
3. 目的 X 線のデータを取りながら同時にエネルギー較正用のデータを取得するという信頼度の高いエネルギー較正を行った (*in-situ* エネルギー較正)。純金属フォイルのチタンとニッケルを SDD から見える位置に貼り、大強度のビーム (主に K 中間子に混ざってくる π 中間子) で金属を励起させ、発生する特性 X 線をエネルギー較正に利用した。

我々の解析の特徴は、

1. フラッシュ ADC によってシグナルが二つ重なったようなパイルアップイベントを特定しその寄与を評価した。
2. 標的に静止した K 中間子の分布を用いて X 線を発生させるシミュレーションを行い、標的内部で起こる目的 X 線のコンプトン散乱の寄与を正しく見積もった。
3. SDD の応答関数とサテライト X 線による特性 X 線の非対称性まで考慮しフィット関数を構成し精確なフィットを行った。

これらの解析は系統誤差を取り除くためには必須の作業であり、強度が 10% 以上もあるパイルアップや標的内部におけるコンプトン散乱の寄与は、正しく評価しなければシフトの中心値を ± 10 eV もずらしてしまう程重要なものである。

これらの新しい実験手法と解析によって、我々は K 中間子ヘリウム原子の強い相互作用による $2p$ 軌道のシフトを $-0.3 \pm 2.2 \pm 1.7$ eV と決定した。始めの誤差は統計誤差、次は系統誤差を表している。系統誤差は、フィットで固定したパラメータの統計誤差、ADC の非線形性、コンプトン散乱シミュレーションにおける断面積の誤差、エネルギー較正の誤差、そしてクーロン相互作用のみの X 線エネルギーの理論的計算の誤差から評価した。また $2p$ 軌道の幅として上限値 18 eV (90% 信頼度) を得た。

我々の結果は過去の実験値とは一致しない値となった。その原因の一つはおそらくコンプトン散乱の評価にある。過去の実験では K 中間子の静止位置を正しく得ることはできず、K 中間子がどこに止まったのかの情報は調べられなかった。一方我々の手法では、K 中間子が標的内部のどこの位置に止まったのかを再構成できるので、より正しくコンプトン散乱の寄与を計算することができた。また、我々のエネルギー較正の方法は、線源を利用せず目的の X 線と同じ環境でエネルギー較正用のデータも取得し、エネルギーの近い金属の特性 X 線を利用して内挿するという手法なので、より正確なエネルギー較正となっている。

我々の結果は、すべての理論計算の値とエラーの範囲で一致しており、長い間問題とされていた K 中間子ヘリウム原子パズルを解決した。