

Cascade Calculation of Exotic Helium Atoms

(エキゾチックヘリウム原子のカスケード計算)

学位論文内容の要旨

物質中に止まった負電荷ハドロン (以下、 X^- と呼ぶ) は原子軌道に捕えられてエキゾチック原子を生成する。この原子は始め高励起状態にあるが、種々の過程により次第に低い軌道へ遷移した後、原子核との強い相互作用により X^- は核に吸収されて消滅する。特に、ストレンジネスをもつ粒子 (K^- 、 Ξ^- 等) を止めた場合、 X^- は核に吸収された後、ハイペロンに転換し、ハイパー核を生成する。したがって、エキゾチック原子はハイパー核生成の有力な手段のひとつとして利用されている。この際、どの種類のハイパー核がどれくらい生成するかは、 X^- がどこの原子軌道から核に吸収されるかに依存する。原子核側ではただか s 軌道から吸収された場合、p 軌道から吸収された場合等を別々に計算できるのみである。各々の軌道から吸収される割合がどれくらいかという問題は、原子カスケード計算を行うことにより見積もられる。実験と比較し得る生成率を得るためには、原子核物理側の計算と原子物理側の計算を結合させなければならない。

しかしながら、原子カスケード計算の結果は未だ確立していない。通常、カスケード過程は主量子数 n が 30 ~ 40 といった非常に高い状態から始まり、 n の大きな軌道から吸収される割合を見積もることが難しいためである。エキゾチックヘリウム原子の場合、まわりの原子との衝突過程の取扱い方が重要になる。とりわけ、衝突によって引き起こされるシュタルク混合過程が n の大きな s 軌道からの吸収を増大させるので、この過程を十分正確に扱わなければならない。従来のエキゾチックヘリウム原子に対するカスケードモデルは、衝突過程を現象論的に扱うことにより、X 線収量の実験データを再現させることに一応成功している。しかし、このような現象論的なやり方が n の大きな軌道からの吸収過程を正しく記述しているかどうかは疑わしい。観測される X 線データは主量子数の小さな軌道の情報しか持っていないので、X 線の実験データを再現させたとしても、 n の大きな軌道での振る舞いは決められないからである。そこで、衝突過程に対し、従来の現象論的なモデルではなく、より現実的なモデルを用いたカスケード計算を行うことによって、 X^- がどこの原子軌道から核に吸収されるかという問いに対するある程度信頼し得る答を得ることがこの研究の目的である。

まず、いくつかの重要な衝突過程について、微視的な観点から遷移率を計算する。外部オーグマー過程については、電子の波動関数の歪みを取り入れるために $^4\text{He}-^1\text{H}^+$ 分子イオ

ンの波動関数を導入した。新しく導き出した公式は内部オージェー過程と簡単な関係で結びつけることができ、それは従来使われていた現象論的な公式を微視的観点から説明する。また、分子イオン $[^4\text{He}-(X^--\alpha)]^+$ の生成を経由したオージェー過程も新たに考慮する。

さらに、シュタルク混合過程に対する新しいモデルを衝突径数方法に基づき定式化し、新しい遷移率の表式を導き出した。従来の現象論的なモデル (sliding 遷移モデル) と比較すると、sliding 遷移モデルはボルン近似に相当し、新しいモデルは高次の効果を完全に取り込んでいる。sliding 遷移モデルは主量子数 n の小さな軌道では良いが、 n の大きな軌道ではシュタルク混合率をかなり大きく見積りすぎていることがわかった。

カスケード計算の結果、シュタルク混合過程に対して新しいモデル、及び sliding 遷移モデルのどちらを使っても、X 線収量の実験データを良く再現する。それにもかかわらず、新しいモデルにおける $s(p)$ 軌道吸収の割合は sliding 遷移モデルのそれにくらべてかなり小さく (大きく) なることがわかった。 $K^--\alpha$ 原子では、 $s(p)$ 軌道吸収の割合は sliding 遷移モデルで約 44% (54%) に対し、新しいモデルでは約 26% (72%) になる。また、 $\bar{p}-\alpha$ 原子では $s(p)$ 軌道吸収の割合は sliding 遷移モデルで約 30% (45%) に対し、新しいモデルでは約 14% (62%) になる。二つのモデルの違いはほとんど主量子数 n の大きな軌道から吸収される分だけであり、X 線の観測されている n の小さな領域では二つのモデルに違いはない。

なお、新しいモデルにおいても、定量的にはまだ若干の不定性が残っている。その不定性を取り除くためには、現在の取扱いで単純化されているエキゾチック原子の運動学を改善することが必要であり、この点が将来の課題である。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	河 本	昇
副 査	教 授	石 川	健 三
副 査	助教授	加 藤	幾 芳
副 査	講 師	大 西	明
副 査	教 授	赤 石	義 紀 (高エネルギー加速器研究機構)

学 位 論 文 題 名

Cascade Calculation of Exotic Helium Atoms

(エキゾチックヘリウム原子のカスケード計算)

エキゾチック原子とは、通常の原子での電子の一つを負電荷の他の粒子 (X^-) に置き換えた原子であり、この粒子がハドロンの場合には、通常のクーロン相互作用に加え強い相互作用が働くことにより原子核に吸収される。このようなエキゾチック原子の生成から吸収までの過程を理解するには、マクロな物質、分子、原子、原子核にわたる異なる階層にわたる物理学の知識を必要とし、これまでの知識を越えた新たな現象の出現も期待されている。

強い相互作用で崩壊するエキゾチック原子としては、これまでに、パイオン、 K 中間子、反陽子、シグマ粒子、グザイ粒子などの粒子を含むものが観測されているが、とりわけ、ストレンジネスをもつハドロン (K 中間子やグザイ粒子など) のエキゾチック原子からの吸収は、ハイパー核 (ストレンジネスをもつ原子核) を生成する有力な手段として重要である。これらのストレンジ・ハドロンは電子に比べて質量が極端に大きいため、エキゾチック原子を形成する時点では大きな主量子数を持ち、これが脱励起した後に原子核に吸収され、ハイパー核を生成する。生成されるハイパー核の角運動量は強い相互作用を経た後の粒子スペクトルにまで大きな影響を与えるが、これは原子核への吸収が起こるクーロン軌道の角運動量により決められるため、こうした軌道の分布、特にその角運動量の分布を知ることがハイパー核の生成・構造・崩壊の過程を理解するうえで不可欠となるのである。しかしながら、これまで用いられてきたエキゾチック原子の脱励起過程の原子カスケード計算は、正当な物理的な根拠をもたない複数の任意パラメータを含む現象論的な模型にもとづいたものであり、特に、主量子数の大きな領域における信頼性には疑問が持たれている。

本学位論文の目的は、エキゾチックヘリウム原子がまわりに存在する通常ヘリウム原子と衝突する過程を記述する従来の現象論的模型に替わるより明確な物理的根拠をもつ新たな模型をつくること、次にその新たな模型を用いて原子核に吸収されるまでのカスケード過程の計算を行い、エキゾチック粒子がどこの原子軌道から核に吸収されたか、その確率について信頼できる理論予測を行うことである。

その目的のために本学位論文において、(i) 他の原子の電子との相互作用である外部オーグマー過程、(ii) 他の原子の電場により引き起こされるシュタルク混合過程、に対して物理的描像の解明を行い、まず、内部オーグマー過程を記述する式と簡単な関係で結びつけることができる外部オーグマー過程を記述する新たな表式を求めることができた。次に、シュタルク混合過程に対する新しい模型を衝突径数法にもとづいて定式化し、新しい遷移率の表式を導き出した。この新しい表式を用いることによって、従来の現象論的模型が主量子数が大きな軌道におけるシュタルク混合率をかなり大きく見積もりすぎていたことが明らかにされた。また、新たな表式によるカスケード計算によって、観測さ

れる X 線収量の割合を従来の現象論的模型と同様に再現することを示すが、吸収が起こる軌道の角運動量分布、特に s 軌道と p 軌道から原子核へ吸収される確率が従来の模型と大きく異なることを明らかにした。

この結果は、物理的描像が明確な現実的模型による微視的なカスケード計算がより信頼できるエキゾチック原子の脱励起過程および原子核への吸収過程の記述を与えることを示すものである。

これを要するに、著者は、広い量子数領域にわたるエキゾチック原子のカスケード過程について微視的な理解による新しい知見を得たものであり、原子核物理学と原子物理学にまたがる研究に対して貢献するところ大なるものである。

よって審査員一同は、著者が北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格あるものと認める。