

電子衝撃による希ガス (Ar、Kr、Xe) の副殻励起

山田千樫研究室 梅田直樹

1. 研究の概要

原子物理学においてエネルギー準位の機構や脱励起のメカニズムの研究は、特に、自動電離領域における遷移にとっては重要な項目の一つである。自動電離領域では通常の励起では観測することの出来ない電子間の強い相関作用や直接電離との競合などの現象が現れてくるのがその理由である。ここで自動電離(autoionization)とは、原子が第一イオン化エネルギー以上の連続状態の中に存在する一種の束縛状態(準安定状態)へと励起されたとき、有限の時間の後、自動的に電離する現象のことをいう。このような現象が見られる準安定状態には2電子励起状態や副殻励起状態といったものがあるが、連続状態の中に埋もれているため、直接電離が競合している。本研究ではAr、Kr、Xeについて電子衝突を用い、励起の際の電子間の相互作用が、連続状態とその連続状態の中に在る副殻励起状態、この両者の関係にどのような影響を及ぼすかを調べた。

2. 研究の背景

本研究は電気通信大学、上智大学、東邦大学、そして中国科学技術大学の4つの大学間での日中共同研究の一環であり、日本側、中国側とも同一の実験原理、電子エネルギー損失分光法(Electron Energy Loss Spectroscopy: EELS)を用いた実験装置を扱っている。しかし、日本側の装置は電子の衝突エネルギーが30eV~500eVと比較的低いエネルギーに特化しているのに対し、中国側は1500eV~と高エネルギーに特化している。このような事情から、私達の研究グループと中国側の研究グループは1つの物質に対して研究を進める上で、互いの不足分を補い合える相補的な関係にあり、過去には一酸化窒素(NO)などについて共同に研究を行ってきた。本研究でAr、Kr、Xeといった物質について採り上げた動機は、中国側で既にこれらの物質について研究が進められていたのに対して日本側が未着手であったこと、そして、Arについて中国側の高エネルギー電子衝突の測定結果とMaddenらが行った光吸収の測定結果の間に大きな違いが見られたことなどが挙げられる。この測定結果の大きな違いは、Arの3s3p⁶4pの遷移について、そのピークの形状因子q(図1)に見られた。ここでqについて説明を加えると、まず、Arの3s3p⁶4pの遷移は副殻励起状態への遷移で自動電離が見られるような準安定状態が存在する領域であり、このような領域ではスペクトル上のピークは非対称になることがある。ピークが非対称になるのは2通りの電離の経路が存在するからと考えられており、一方は直接電離する経路、もう一方は準安定状態を経て自動電離を起こして電離する経路である。これらの経路間で干渉が起こるためにピークは非対称になる。この非対称なピークの形を決定する因子がqである。こ

の q はFanoによって提唱され、連続状態と準安定状態の波動関数の位相関係を表している。

Fano Profile :
$$\sigma(E) = \frac{(q + \varepsilon)^2}{1 + \varepsilon^2}$$

$$\varepsilon = \frac{E - E_r}{\Gamma/2}$$

E_r : 共鳴エネルギー Γ : 自然幅

q : 形状因子

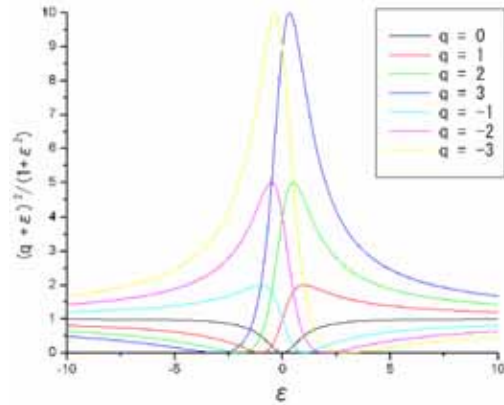


図1 ピークの形状因子 q

q の測定結果の違いは運動量移行 K^2 の存在に起因していると考えられる(図2)。これは電子衝突の励起における運動量移行に対し、光吸収の励起における運動量移行は無視できるくらい小さいものであるからである。ここにArの $3s3p^64p$ の遷移について q の運動量移行 K^2 依存性を調べる必要性が生じる。

<p>中国側 (高エネルギー電子衝突) 2.5keV 4deg Chin.Phys.Lett vol.20 No.10 1718(2003) $K^2 = 0.89$ $q = 0.085$</p>	<p>Madden R. P et al 光吸収 Phys.Rev. 177 136(1969) $K^2 = 0$ $q = -0.22$</p>
--	--

図2 高エネルギー電子衝突と光吸収の測定結果の違い

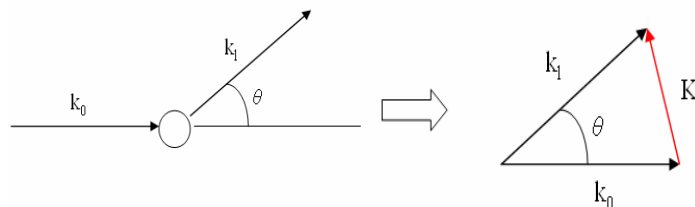


図3 運動量移行

図3の中の k_0 、 k_1 はそれぞれ入射電子の運動量ベクトル、散乱電子の運動量ベクトル、 θ は散乱角度、 K は運動量移行ベクトルを表す。また、 K^2 は、以下の式で表される。

$$K^2 = k_0^2 + k_1^2 - 2k_0k_1 \cos \theta$$

3. 研究の目的

本研究の目的は2つ。Ar、Kr、Xeについて、衝突エネルギーを30eV~500eVまでの間で変化させてスペクトルを測定、または散乱電子の散乱角度を変えてスペクトルを測定し、スペクトルの衝突エネルギー依存性、散乱角度依存性を調べる。Arの3s3p⁶4pの遷移について、 q の運動量移行 K^2 依存性を調べる。

4. 実験

実験原理（電子エネルギー損失分光法：Electron Energy Loss Spectroscopy：EELS）

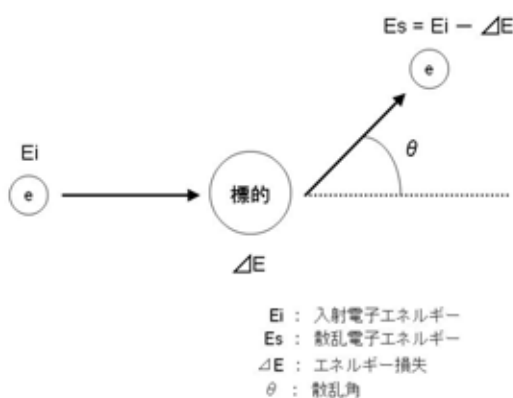


図4 衝突概図

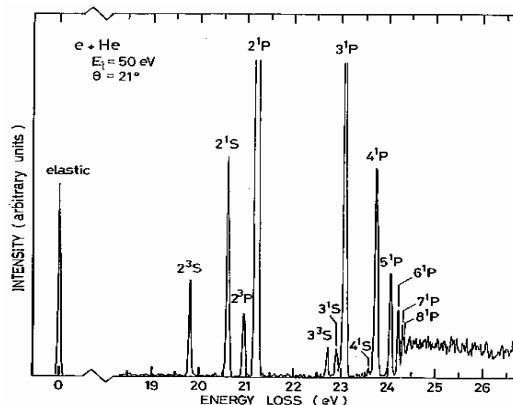


図5 Heのエネルギー損失スペクトル

本実験で用いる電子エネルギー損失分光法（EELS）とは、ある定まったエネルギー E_i に揃えた電子線を標的に打ち込み、そこから散乱されてきた電子のエネルギー損失分 E に注目して、その損失分に対応する散乱電子の数を測定する方法である。

このとき、衝突の前後では、

衝突エネルギー（衝突前）

$$= \text{標的の内部状態の変化させたエネルギー} + \text{散乱電子のエネルギー（衝突後）}$$

という関係式、つまりエネルギーの保存則が成り立つ。エネルギー損失 E は、標的の内部状態の変化に要したエネルギーに対応するので、 E は標的の内部構造を反映することとなる。このEELSは、原子・分子・固体などの標的に対してもその励起エネルギーのスペク

トルが得られることから本質的には光の吸収スペクトルに対応するといえる。ただし、プロジェクタイトルが電子であり、衝突エネルギーが低く、電子の散乱角度も大きいので、光では禁制となっている多くの励起状態への遷移によるピークが見られる。

実験装置

実験装置は、電子分光器、電子分光器を収める真空槽、試料ガス導入系、磁気対策として用いるヘルムホルツコイルから構成される。また、測定可能領域は、衝突電子エネルギー：20eV～500eV、電子電流：10～30nA、分解能(FWHM)：50eV～75meV、角度分解能：0.8deg、散乱角：-5～110degである。試料はガスを用い、さらに差動排気を行っている。実験時のガス圧については 5×10^{-5} Torr程度までの測定が可能である。磁場についても対策を施し、衝突領域の磁場を数mGまで抑えている。

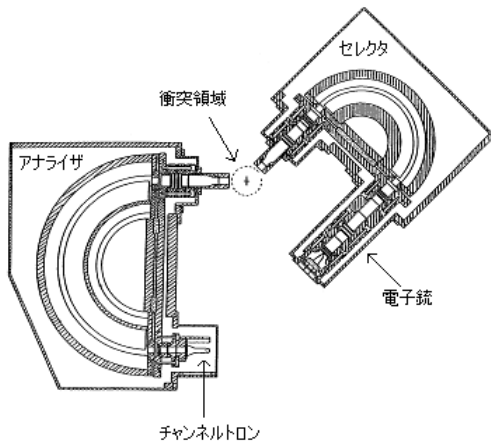


図6 電子分光器

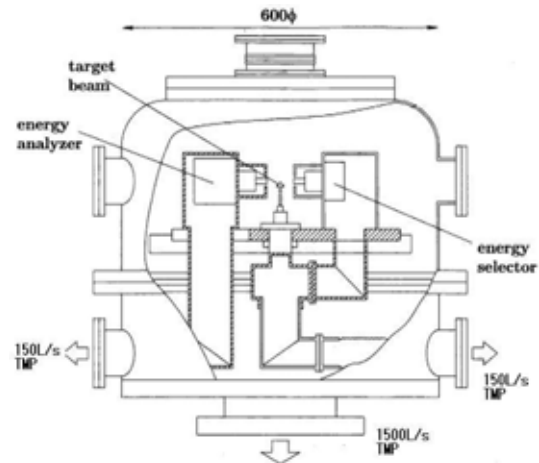


図7 真空槽

5. 実験結果

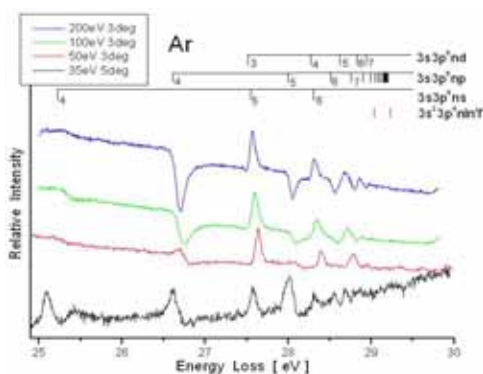


図8 Arの衝突エネルギー依存性

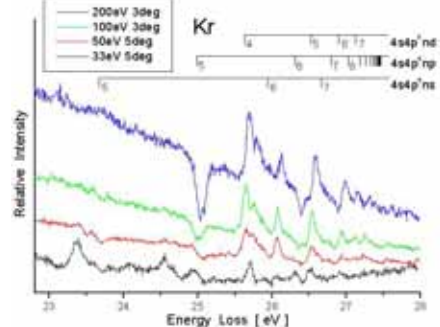


図9 Krの衝突エネルギー依存性

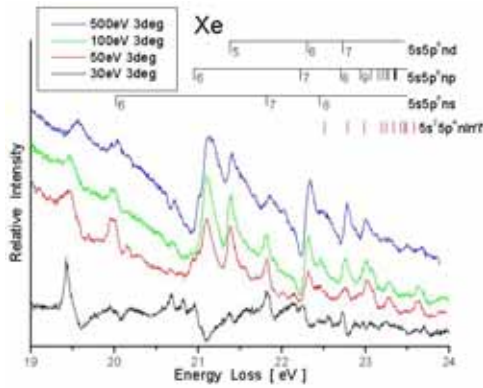


図 10 Xe の衝突エネルギー依存性

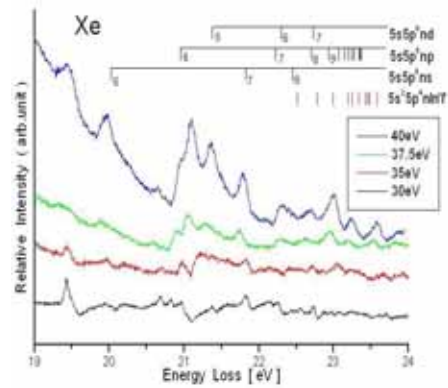


図 11 ピークの反転

図 8、9、10 から Ar、Kr、Xe について、衝突エネルギーを 30eV ~ 35eV 程度まで下げていくと Ar は 3s 4s、Kr は 4s 5s、Xe は 5s 6s のそれぞれ 3S のピークが急に変わるといった現象が共通に観測できた。3S のような禁制遷移が低エネルギーで際立ってくるのは典型的だが、その変化が衝突エネルギー 50eV と比較しても急に強くなっているのが見て取れる。

また、図 10 では Xe のエネルギー損失が 21.1eV の辺りに注目すると、衝突エネルギー 50eV と 30eV の間でピークが上に凸から下に窪んでいるのがわかる。図 11 は、衝突エネルギーを 50eV から 30eV の間で細かく変えていき、この変化についてより詳しく調べたものであり、衝突エネルギーが 37.5eV ~ 35eV の間でピークが急激に変化しているのが見て取れる。このような現象は Ar や Kr では確認できず、Xe 特有の現象であったが、原因については分かっていない。

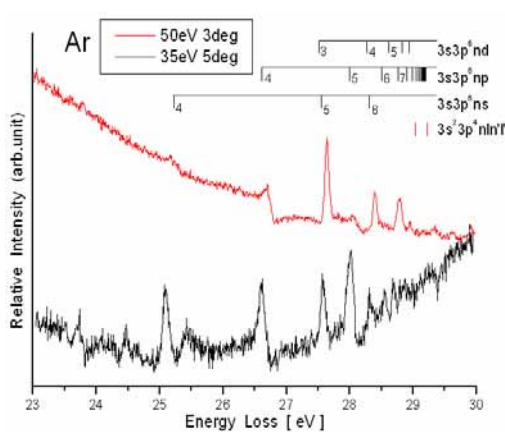


図 12 Ar の衝突エネルギー変化

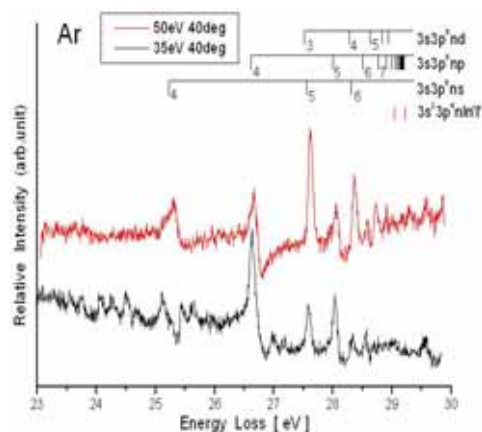


図 13 Ar の衝突エネルギー変化(大散乱角)

また、Ar について衝突エネルギー 35eV における 3s3p⁶np (n = 4, 5, 6, ...) のピークが強くなっているのが確認できた(図 12、図 13)。これは全角運動量 J の値が異なる 2 つの第

ーイオン化エネルギーが非常に近接しているため、 $3s3p^6np$ ($n = 4, 5, 6, \dots$) に 1P と 3P のピークが重なっており、衝突エネルギーを下げることで電子交換などの効果により 3P が強く現れてきたからと考えられる。

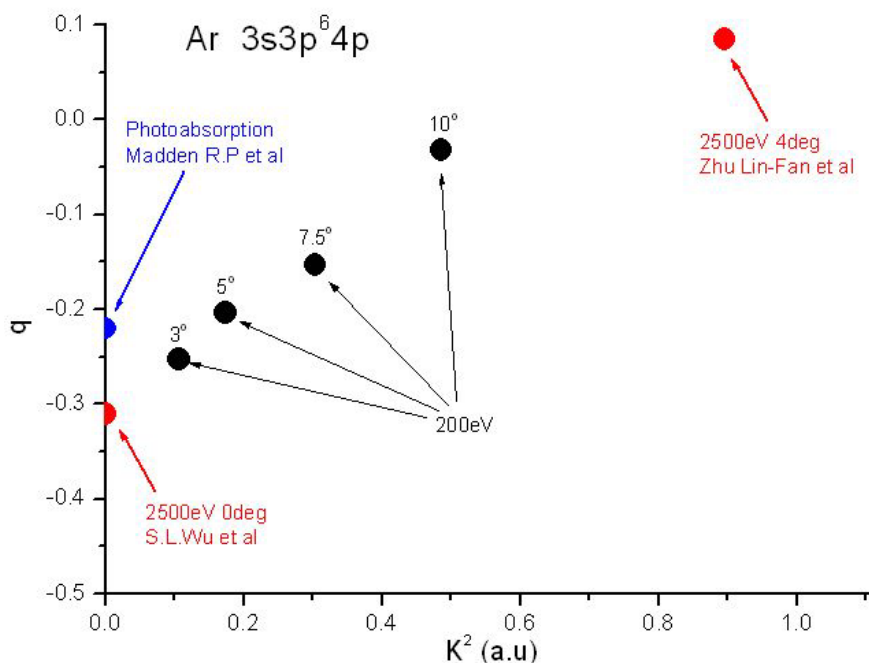


図 14 q の運動量移行 K^2 依存性

Arの $3s3p^64p$ 遷移については、 q の運動量移行 K^2 依存性が見られた(図 14)。この結果から、中国科学技術大学で行われた高エネルギー電子衝突と、Maddenらによる光吸収のデータの隔たりを結びつける結果を得た。また、この結果はArの $3s3p^64p$ 遷移について、電子間の相互作用、つまり運動量移行 K^2 の大小が二つの異なる経路の位相差を変えて言うてることを表している。しかしながら、中国科学技術大のS.L.WuらとZhu Lin-Fanらの高エネルギー電子衝突の結果と、この実験によって得られたデータには直線的な相関が見られたが、なぜ直線的になるのかといったことについてはまだ分かっていない。

6. まとめ

本研究では、比較的低い衝突エネルギー(50eV以下)においてAr、Kr、Xeのスペクトル上に、光学的禁制遷移の情報や、希ガスXeの特異性などといった幾つかの興味深い結果が得られた。また、Arの $3s3p^64p$ 遷移について、 q の運動量移行 K^2 依存性を確認したことによって、中国科学技術大学で行われた高エネルギー電子衝突と、Maddenらによる光吸収のデータの隔たりを結びつける結果を得た。しかしながら、この結果についてはまだ誤差の見積もりが出来ていないので、今後の課題としては q の誤差についての検討などが挙げられる。