

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 和田 健

論文題目：ハロゲン化メタン気体中におけるオルソ・ポジトロニウムの消滅率

本論文は4章からなる。第1章は序論であり、陽電子及びポジトロニウムの基本的性質およびそれらの消滅過程の特性が解説され、本研究の背景および動機について述べられている。第2章には実験方法の詳細が述べられている。第3章では測定結果と工夫した新しい方法によるデータ解析の詳細が述べられている。第4章では得られた各試料気体中でのオルソ・ポジトロニウムの消滅率に対する考察が述べられ、最後に結論がまとめられている。また、付録として、実在気体に対して成り立つPVT関係の一般論と、一つ一つのデータに対する解析の詳細図が付けられている。

電子の反粒子である陽電子と電子の束縛状態であるポジトロニウム(Ps)は、レプトンのみからなる「原子」であり、それ自体が基礎的な物理学の研究の対象であると同時に、原子・分子相互作用のユニークなプローブである。

ポジトロニウムには、その構成要素である電子と陽電子のスピン状態により、一重項状態のパラ・ポジトロニウムと三重項状態のオルソ・ポジトロニウムがある。後者の固有の寿命は約 $0.142 \mu\text{s}$ で、前者の寿命より 1000 倍長いために、QED テストとしての固有の寿命の精密測定の対象となるだけでなく、気体分子などとの相互作用の研究も、オルソ・ポジトロニウムを対象とすることが多い。

気体中のオルソ・ポジトロニウムは、気体分子との相互作用のために寿命が真空中より短くなる。機構はいくつかあり、オルソ・ポジトロニウムが分子と衝突した際に陽電子が分子中の自分と反対向きのスピンを持った電子と消滅するピックオフ消滅、電子を交換してパラ・ポジトロニウムに転換して短寿命で消滅するオルソ・パラ転換消滅、スピン軌道相互作用によるオルソ・パラ転換消滅、ポジトロニウムと分子が共鳴状態を作ってから消滅する化学クエンチングの過程などが知られている。

これらに対する理論的研究は、ごく最近、本格的に整備されはじめたばかりで、まだ、希ガスに対するピックオフ消滅に対する結果も、実験との一致を見ていない。これは、陽電子やポジトロニウムの質量が軽いため、反跳の効果を無視できず、陽電子と電子の近距離相互作用を精度よく扱って陽電子の位置での電子密度を求めることが容易でないためである。

ポジトロニウムの消滅率に対する気体の効果は、気体の密度にほぼ比例するので、気体の密度で規格化し、ディラックの陽電子電子2光子消滅でさらに規格化した $^1Z_{\text{eff}}$ というパラメタで整理するのが便利である。このパラメタは、ピックオフ消滅に対しては、陽電子に対してスピン1重項をなす有効電子数という意味をもつ。他の過程に対しては、相対的な消滅率の大小を表すパラメタとしての意味しかないのだが、その場合も、このパラメタで整理されることが多い。これまで多くの気体に対してオルソ・ポジトロニウムの消滅率が測定されており、 $^1Z_{\text{eff}}$ は、1以下から 10^5 台までの値の広がりをもつ。

和田氏は、常温での蒸気圧が低いために、測定が難しく、これまでポジトロニウムとの相互作用が研究されていなかったハロゲン化メタンを試料とする測定を行い、新たに、 $1Z_{\text{eff}}$ の値を決定した。これらの気体の蒸気圧が低いのはファン・デル・ワールス力による分子同士の相互作用が大きいためであるが、そのことがポジトロニウムとの相互作用にどう影響するのか、興味深いところである。

和田氏は先ず、それぞれの気体をもつ特質に応じて異なる操作が可能な測定チャンバーを設計・作成した。さらに、蒸気圧が低い気体ではポジトロニウムの生成量に限界があるので、シリカ・エアロゲルというシリカ超微粒子の集合体を用いて、気体の圧力によらず入射陽電子の約5割をポジトロニウムにできる方法でポジトロニウムを生成した。ただし、気体分子がシリカ超微粒子の表面に吸着することによる表面での消滅の不確実性がデータの値に影響するおそれがある。そこで、表面処理が同じで密度の異なるシリカ・エアロゲルを用いて測定を繰り返すという方法で、吸着の影響を取りのぞく新しい方法を開発した。

その結果、新しい方法でフッ化メタン、臭化メタン、および比較のために測定したメタンの $1Z_{\text{eff}}$ の決定に成功した。塩化メタンは2種類のエアロゲルを用いて従来の方法で $1Z_{\text{eff}}$ を決定したが、両者の結果は不確かさの範囲で一致した。メタンの値は文献値と一致し、フッ化メタン、塩化メタン、臭化メタンも、幾何学的衝突断面積でスケールするとこれまでに測られている他の分子と同じ傾向を示した。ヨウ化メタンについては1種類のシリカ・エアロゲルでしか測定していないが、 $1Z_{\text{eff}}$ の値が、化学クエンチングや電子交換によるスピン転換が起こらない分子としては、異常に高い値を示した。

フッ化メタン、塩化メタン、臭化メタンの結果に対して、和田氏は、分子の双極子モーメント、分極、ファン・デル・ワールス力と $1Z_{\text{eff}}$ の関係について詳細に検討した。その結果、測定した分子（メタンを除く）のように永久双極子モーメントをもつ分子（極性分子）どうしの相互作用は、持たない分子（無極性分子）どうしに比べて配向力や誘起力の存在が大きく影響している。しかしポジトロニウムは双極子モーメントを持たないため、極性分子との相互作用でも配向力はゼロであり、誘起力も小さい。このことから、相互作用は、同程度のサイズの無極性分子との相互作用と余り変わらないことになることを明らかにした。

また、ヨウ化メタンに対しては、すでにキセノンとポジトロニウムの間で確認されているスピン軌道相互作用によるオルソ・パラ転換による消滅率の増大が寄与している可能性が大であると指摘している。しかし、それを確定するのは今後の課題である。またヨウ素とキセノンは周期表で隣であるにもかかわらず $1Z_{\text{eff}}$ は数倍大きくなっていることも、今後に残された興味深い問題である。

審査委員会は、本研究において、工夫された実験装置での実験がされ、オリジナリティのある方法を用いた解析と、適切な考察がなされていると判断した。特に、この研究で開発されたシリカ表面への吸着の効果を補正する方法は、今後、シリカ・エアロゲルを用いるポジトロニウム研究において、吸着の影響を補正する標準的な手法となると考えられる。

なお、本研究は、指導教員他との共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験計画の立案、実験、解析を行ったもので、論文提出者である和田氏の寄与が大であると判断される。

したがって、本審査委員会は博士(学術)の学位を授与するにふさわしいものと認定する。