

氏 名 熊 倉 光 孝

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大乙第73号

学位授与の日付 平成12年3月24日

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学 位 論 文 題 目 準安定ヘリウム原子のレーザー冷却と冷却原子の極低温
イオン化衝突

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 中村 宏樹
助 教 授 平等 拓範
助 教 授 森田 紀夫
助 教 授 鈴木 俊法
教 授 藪崎 努（京都大学）

論文内容の要旨

レーザー冷却で得られる極低温 He 原子は、質量が軽いためにド・ブロイ波長が長いこと、内部構造が単純なために理論的な研究が比較的容易であることなどの理由により、極低温での原子の集団運動に関する研究や、原子干渉計への応用、極低温での原子衝突に関する研究等において現在興味深い研究対象の一つとなっている。そこで本研究では、量子統計性の異なる2つの同位体種 ^4He (ボゾン) と ^3He (フェルミオン) のそれぞれに対してレーザーによる減速と磁気光学トラップへの閉じ込めを行って極低温 He 原子気体を生成し、さらにそれらのトラップ内で起こる極低温イオン化衝突の速度定数の詳細な測定を行った。その結果、両同位体の速度定数に大きな差を見いだすと共に、理論計算によってその同位体差の由来を明らかにすることが出来た。

He 原子のレーザー冷却は、 $2s\ ^3S_1 \rightarrow 2p\ ^3P_2$ (波長 1.083 μm) の遷移 (以下、冷却遷移と呼ぶ) を用いて行った。この遷移の下準位である $2s\ ^3S_1$ 状態の He 原子 (以下、He*原子と記す) は、励起エネルギーが非常に高い (19.8 eV) ため He*原子同士の衝突によりイオン化 (主に Penning イオン化 $\text{He}^* + \text{He}^* \rightarrow \text{He}^+ + \text{He} + e^-$) が引き起こされるが、自然放出寿命は非常に長い (~ 7900 秒) ため光学遷移に関しては基底状態の原子と同様に扱うことができる。

He*原子の減速は、冷却遷移に近共鳴するレーザー光を He*原子線に対向して入射し、減速による Doppler シフトの変化を Zeeman 同調法で補償しながら連続的に行った。減速された He*原子は磁気光学トラップに導かれ、 ^4He 、 ^3He それぞれに対して約 10^5 個の原子が温度 0.5 mK 密度約 $10^9\ \text{cm}^{-3}$ でトラップされた。なお、 ^3He 原子のレーザー冷却・トラップは本研究において初めて実現されたものである。このような量子統計性の異なった同位体のトラップは未だ限られた原子種にしか行われていないことに加え、He のようにド・ブロイ波長が長く且つ理論的にも扱い易い原子において量子統計性の異なる同位体の極低温気体を生成することが出来たことは、今後の量子力学の基礎的研究などにおいて有用な成果であると考えられる。

さて、このような極低温気体中での原子衝突は、衝突エネルギーが常温に比べて非常に小さいため、

(1) 常温の衝突では無視できるような小さな内部エネルギー差でも衝突全体に大きな影響を与え得る、

(2) 高次の散乱部分波は遠心力障壁によって衝突中心に近づけないために低次の散乱部分波だけが非弾性衝突に寄与する、

(3) 衝突時間が長いために衝突中の原子対による光の吸収・放出が可能であり、内部状態間の遷移に近共鳴するような光の存在によって衝突断面積が大きく変化し得る、などの特徴を持つ。したがって極低温での衝突では、(1)や(2)から、常温の場合とは異なって大きな同位体差が現れることが予想され興味深い。

そこで本研究では、同一温度 (0.5 mK) の極低温レーザートラップ中の $^3\text{He}^* + ^3\text{He}^*$ および $^4\text{He}^* + ^4\text{He}^*$ 衝突 (以下、S-S衝突と呼ぶ) におけるイオン化速度定数 k ($^3\text{He}^*$ 、 $^4\text{He}^*$ でそれぞれ 3k 、 4k とする) を生成イオンの計数や蛍光減衰の観測によって測定し、その同位体差を調べた。その結果、 3k が 4k の約 3 倍という、原子の質量と速度の相違のみに起因する同位

体差（～1.5倍：常温の衝突の場合に相当）に比べて著しく大きな同位体差を見出した。

また、このような極低温非弾性衝突では、(3)に挙げたように冷却遷移に近共鳴するレーザー光によって速度定数が大きく影響されるので、レーザー光照射下の極低温原子衝突においてどのような同位体差が生ずるのかという点にも興味を持たれる。そこで本研究ではトラップに用いたレーザー光による k の増大効果についても測定を行った。その結果、 ${}^3\text{He}$ と ${}^4\text{He}$ でそれぞれ32倍と55倍という大きな増大が観測されたが、レーザー光照射下でのイオン化速度定数 \widetilde{k} (${}^3\text{He}$ 、 ${}^4\text{He}$ でそれぞれ ${}^3\widetilde{k}$ 、 ${}^4\widetilde{k}$ と記す)の同位体差に関しては、 ${}^3\widetilde{k}$ は ${}^4\widetilde{k}$ の約1.7倍であり、 k に見られたほどの大きな同位体差は無いことが分かった。

そこで次に、これらの同位体差の原因や増大効果の大きさを決める要因を明らかにするために、速度定数 k 、 \widetilde{k} の理論計算を行った。

S-S衝突では主に遠心力と短距離力である van der Waals 力とで衝突ポテンシャルが決まるが、その遠心力障壁の高さは、最も低い p 波の場合でも衝突エネルギー（0.5 mK）より十分高い（ ${}^4\text{He}$ で10 mK、 ${}^3\text{He}$ で15 mK）ため、衝突イオン化は単一の散乱部分波（ s 波）のみによって引き起こされる。したがって、量子統計対称性から許されるイオン化チャンネルの電子状態は同位体間で明確に異なる。この事実と、イオン化においてスピン保存則が良く成立することを合わせて考慮すると、イオン化チャンネル数に6倍もの同位体差があることがわかった。この結果から計算された速度定数の同位体差は4.7倍で、これは実験結果とかなり良く一致しており、 k の同位体差は両同位体の量子統計対称性の違いの直接の現れであることが明かとなった。

このような量子統計対称性の相違によるイオン化衝突の同位体差の研究としては、これまでにスピン偏極したKr原子やXe原子の極低温イオン化衝突についての報告があるが、これらの実験ではボゾン同士の衝突の方が速度定数が大きく、Heの場合とは大小関係が逆となっていて興味深い。この大小関係の相違は、KrやXeの実験の場合には電子スピンの偏極した原子の衝突イオン化を観測しているのに対して本研究のHeの場合には偏極していないこと、およびKrやXeではイオン化におけるスピン保存則が成り立たないのに対してHeではそれが良く成立することに起因していると考えられる。すなわち、Heの衝突ではスピンのすべて揃った状態（ ${}^5\Sigma_g^+$ ）からはスピン保存則によりイオン化が起らず、それ以外のスピン状態のみからイオン化が起こるのであるが、これは、スピンをすべて揃えたKrやXeの実験の場合とは完全に相補的な状況となっており、このことが互いに逆の同位体差をもたらしたものと考えられる。

次に、レーザー光照射時についてであるが、この場合には、S-S衝突の他に、 $\text{He}(2s^3S_1) + \text{He}(2p^3P_2)$ 衝突（以下、S-P衝突と呼ぶ）と $\text{He}(2p^3P_2) + \text{He}(2p^3P_2)$ 衝突によってもイオン化が引き起こされる。このうち後者では原子間相互作用がS-S衝突の場合とほぼ同様であるため速度定数の大きさもほぼ同程度であると考えられるが、一方S-P衝突では、原子間相互作用が主に遠心力と遠距離まで働く双極子-双極子相互作用であるため、角運動量が6までの高次の部分波に対しても、遠心力障壁が存在しないかまたは衝突エネルギーより低いチャンネルが多数存在し、速度定数がS-S衝突に比べて1～2桁大きいことが分かった。このようなS-P衝突のために ${}^3\widetilde{k}$ が 3k の13倍、 ${}^4\widetilde{k}$ が 4k の50倍になると計算されるが、これらは実験結果をほぼ再現している。また \widetilde{k} の同位体差については ${}^3\widetilde{k}$ が ${}^4\widetilde{k}$ の約1.2倍と計算され、これも実験結果をよく再現している。このように \widetilde{k} での同位体差

が k のそれよりも小さいのは、極低温での衝突にも関わらず常温の場合と同様に偶・奇両パリティを持った高次の多数の部分波がイオン化に寄与するために、量子統計対称性から許される電子状態の同位体間の相違が全体として相殺されることに起因している。この事実は、 S - S 衝突の場合とは極めて対照的である。

以上のように、本研究では、極低温 He 原子衝突におけるイオン化速度定数の同位体差を初めて観測するとともにその原因を明らかにすることができた。これらの実験結果は、He 原子での Bose-Einstein 凝縮の実現など将来の興味深い研究においても重要なデータであると考えられる。

論文の審査結果の要旨

本博士論文は、(1) ヘリウム原子の2つの同位体種 ^4He (ボゾン) と ^3He (フェルミオン) のそれぞれをレーザー冷却し、さらにレーザー光と磁場とを併用した磁気光学トラップに閉じこめて500 μK という極低温のヘリウム原子気体を生成したこと、および、(2) それらのトラップ内で起こる極低温イオン化衝突 (トラップされた原子は3重項準安定状態にあるためそれらの原子同士の衝突によってイオン化が起こる) の速度定数の詳細な測定を行うとともにその結果を理論的に詳しく解析したことから成っている。

現在様々な原子のレーザー冷却・トラップおよびその応用研究が行われているが、ヘリウム原子のレーザー冷却・トラップは実験的に困難な点が多いため世界でも実験例が極めて少ない。特に ^3He 原子のレーザー冷却・トラップは本研究によって初めて成し遂げられたものであり、量子統計性の異なる2つの同位体種を共に冷却・トラップしてそれらの極低温原子気体を生成できたことは、極低温における気体原子の量子統計性の違いに起因する現象の研究の発展の上で極めて意義深いといえる。ヘリウム原子は、質量が小さいために同一温度で比較すると他の殆どの原子よりもドブロイ波長が長く、また内部構造が簡単のために理論的にも比較的扱いやすいことから、極低温気体原子の振舞いの研究の上で重要な原子である。そのような意味からも本論文の成果は重要と考えられる。

本論文では、さらに、この2種の同位体の極低温原子気体を利用した応用実験として、それぞれの極低温気体中での衝突すなわち $^4\text{He}+^4\text{He}$ 衝突および $^3\text{He}+^3\text{He}$ 衝突におけるイオン化速度定数を同一温度 (500 μK) において測定し、それらの速度定数の間に大きな同位体差 (^3He 同士の衝突の方が約3倍大きい) があることを初めて見出した。このような大きな同位体差は常温の衝突においては予想できないものであり注目に値する (質量や速度の違いのみによる差は1.5倍である)。さらに本研究では詳しい理論的解析によって、このような大きな同位体差は、500 μK という極低温における衝突イオン化が最低次の散乱部分波 (s波) のみによって引き起こされるものであることに起因していることを明らかにした。すなわち、単一の部分波のみによるイオン化であるために、イオン化に寄与できる電子・スピン状態がボゾンである ^4He とフェルミオンである ^3He とでは大きく異なることから生じた差であり、この同位体差は2つの同位体種における量子統計性の違いの露わな現れであることを明らかにした。一方、原子の遷移周波数よりもやや低周波側に離調した光が照射されている場合には一般にイオン化速度が大きく増加することが知られているが、そのような場合についてのイオン化速度の同位体差も測定し、この場合にはその差が小さくなることを見出した。これについても詳しい理論解析が行われ、この場合は極低温衝突であっても常温の場合と同様に多数の散乱部分波がイオン化に寄与するために同位体差が小さくなることを明らかにした。これらの研究は、極低温気体原子の振る舞いにおける量子統計性の違いの研究の典型例として大きな価値があるものと考えられる。

これらの研究成果は既に4報の論文として審査制度の確立した権威ある学術雑誌に掲載されている (うち一報は印刷中)。また、本論文は邦文によって書かれているが、同時に提出された英文の概要は分かり易くかつ質の高い英語によって書かれており、本申請者の英語の能力も十分にあると判断される。本申請者は京都大学理学部を卒業後、同大学大学院理学系研究科修士課程を中退して分子科学研究所・技術課技官 (分子構造学第一研究部門

所属)として就職し現在に至っている。したがって最終学歴は京都大学卒業であるが、その後の研究歴は修士課程在学中を含めて12年以上にわたっており、研究者として十分な研鑽を積んでいると考えられる。

以上より、本論文は学位論文として十分質の高いものであると、審査員全員の意見が一致した。