

氏名	向井 もも
学位の種類	博士（理学）
学位記番号	博甲第 8456 号
学位授与年月日	平成 30年 3月 23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	In-gas-cell laser resonance ionization spectroscopy of $^{196-198}\text{Ir}$ ($^{196-198}\text{Ir}$ のガスセル内レーザー共鳴イオン化分光)

主査	筑波大学教授	博士(理学)	小沢 顕
副査	筑波大学教授	理学博士	三明 康郎
副査	筑波大学教授	博士(理学)	中務 孝
副査	筑波大学准教授	博士(工学)	笹 公和
副査	高エネルギー加速器研究機構教授	理学博士	宮武 宇也
副査	高エネルギー加速器研究機構教授	理学博士	和田 道治

論 文 の 要 旨

本論文は、鉄より重い元素の半分を合成したとされる r-過程に関連し、中性子過剰 Ir 同位体($^{196-198}\text{Ir}$)のレーザー核分光に関する実験的研究の論文である。超新星爆発や中性子星衝突のような爆発的な天体環境中では速い中性子捕獲過程(r-過程)が生じ、合成された中性子過剰核の β -崩壊を通して重い元素が生成されると考えられている。中性子数が魔法数の原子核では中性子吸収反応と光分解反応が平衡するため、それらの原子核が集中的に合成される(滞留核)。太陽系で観測された、r-過程を起源とする安定な同位体分布における第3ピーク(質量数 A~195、金や白金を含む)は、陽子数 $Z \leq 70$ 、中性子数 $N=126$ の滞留核が起源であると考えられているが、実際にどのような天体環境でどのような原子核が合成されたかはまだわかっていない。それを解明する手掛かりとして、第3ピークの原子核の半減期、質量、 β -遅発中性子放出確率等を測定する必要がある。しかし、これらの原子核は安定核から非常に遠く、既存の不安定核施設では生成は困難である。従って、当面これらの原子核について実験的に調べることはできない。そのため、信頼できる理論モデルによる予測値が必要である。しかしながら、様々な理論モデルによる半減期の予測値は一ケタ以上異なっており、理論計算の精度向上のために、滞留核より安定核に近い未知の核種について系統的に核構造を調べ、理論計算へフィードバックすることが求められている。原子核の波動関数がわかれば、半減期などの計算が可能となる。波動関数は核磁気モーメントからも推測可能である。電磁気モーメントは、レーザー核分光による超微細構造測定から直接導出できる。また

レーザー核分光では、同位体間での超微細構造の重心周波数のずれ(同位体シフト)から原子核の荷電半径と変形パラメータの変化量が導出できる。変形パラメータは、変形軌道の移り変わりを推測するための重要な物理量でもある。以上の動機から、第3ピークに近い中性子過剰核のレーザー核分光の測定が計画された。本研究では、Z=77の中性子過剰核での系統的な核構造測定の第一歩として $^{196-198}\text{Ir}$ のレーザー核分光による超微細構造測定を行った。

Z=77の中性子過剰核は、 ^{136}Xe ビーム(9.4 MeV/核子)と ^{198}Pt 標的を使った多核子移行反応で生成した。KEK isotope separation system(KISS)は、多核子移行反応により生成した標的的反跳核から単一核種を選別して引き出すことのできる元素選択型質量分離器である。KISSは、反応生成物を停止・中性化し元素選択的にレーザー共鳴イオン化を行うガス捕集型レーザーイオン源、質量分離器であるオンライン同位体分離装置で構成される。本研究では、KISSで $^{196-198}\text{Ir}$ のガスセル内レーザー共鳴イオン化核分光を行った。レーザー波長を走査しながら不安定核から放出される β 線を計数することで超微細構造スペクトルを測定する。アルゴンガス中での圧力広がりのため、得られた超微細構造スペクトルは幅広いピークとなるが、そのピーク幅とピーク位置から、核磁気モーメントおよび同位体シフト量をそれぞれ導出することができる。 $^{196-198}\text{Ir}$ について測定した超微細構造スペクトルの解析から、核磁気モーメントと同位体シフトを導出した。 ^{197}Ir の核磁気モーメントは、同中性子体である ^{199}Au の先行研究結果と近い値であった。この結果は、陽子の単一粒子軌道が同じであるN=112,114,116のIrおよびAu同位体での核磁気モーメントの傾向と一致しており、N=120同位体での陽子単一粒子軌道が同じであることが示唆される。 ^{196}Ir と ^{198}Ir では、I=0を仮定した場合の超微細構造スペクトルのカイ二乗検定から、スピン1以上が示唆された。 ^{196}Ir と ^{198}Ir について、陽子・中性子軌道推測のために、導出した核磁気モーメントを、同じ陽子・中性子軌道を持つと考えられる近隣の原子核の核磁気モーメントの実験値を用いて計算する半経験則による値と比較した。その結果、実験値を最もよく再現したのは、陽子軌道が $d_{3/2}$ で、中性子軌道が $p_{3/2}$ あるいは $d_{5/2}$ の場合であった。この結果は、N \geq 109の系統性と一致している。さらに、本研究では、導出した同位体シフト量から、液滴模型を仮定して原子核の荷電半径と変形パラメータの変化量を導出した。得られた変形パラメータの結果は、 ^{197}Ir で大きくなり、 ^{198}Ir で小さくなる傾向を示し、これは、FRDMの予測と一致した。FRDMではN \leq 119でプロレート形状、N \geq 120でオブレート形状となることが予測されている。今後は、ガスジェット内でのレーザー共鳴イオン化に向けて装置の改良を行う予定である。これによりドップラー幅、圧力広がりはいずれもそれぞれ1/5、1/100程度に抑えられ、精度良く分光を行うことができ、確実なスピンの同定や電気四重極モーメントの導出も可能になると期待される。

審 査 の 要 旨

[批評]

鉄より重い元素の半分を合成したとされるr-過程は、超新星爆発や中性子星衝突のような爆発的な天体環境中で起きたと考えられているが、実際にどのような天体環境でどのような原子核が合成されたかはまだわかっていない。r-過程解明のためには、陽子数 $Z\leq 70$ 、中性子数 $N=126$ の原子核の半減期、質量、 β -遅発中性子放出確率等を測定する必要がある。しかし、これらの原子核は安定核から非常に遠く、既存の不安定核施設では生成は困難である。従って、当面これらの原子核について実験的に調べることはできない。そのため、信頼できる理論モデルによる予測値が必要である。しかしながら、様々な理論モデ

ルによる半減期の予測値は一ケタ以上異なっており、理論計算の精度向上のために、安定核に近い未知の核種について系統的に核構造を調べ、理論計算へフィードバックすることが求められている。核構造研究の観点では、核磁気モーメントは、波動関数及び、陽子・中性子軌道に敏感な量であり、荷電半径及び変形パラメータは、変形軌道に敏感な量であり、いずれも、核構造の理解には重要な物理量である。本研究では、KISSにおけるレーザー核分光により、これまで、未知であった、 $^{196-198}\text{Ir}$ の核磁気モーメント、荷電半径、変形パラメータを初めて測定した。これらの核は、核スピンも未知であったが、本研究により、核スピンに制限を与えるとともに、陽子、中性子の単一粒子軌道に関しても制限を与えることができた。これら、 $^{196-198}\text{Ir}$ の核構造に関する知見が得られた点は高く評価できる。さらに、荷電半径と変形パラメータの測定からは、理論が予想する $N=120$ でのプロレート形状からオブレート形状への変化を支持する結果も得られた。本研究により、KISSでのレーザー核分光は、不安定核の核構造研究に有効であることが示された。Ir 以外への同位体の核構造研究への拡張も期待できる。

〔最終試験結果〕

平成30年2月9日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(理学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認める。