



In-gas-cell laser resonance ionization spectroscopy of 196-198Ir

著者	Mukai Momo
内容記述	この博士論文は内容の要約のみの公開（または一部非公開）になっています
year	2018
その他のタイトル	196-198Irのガスセル内レーザー共鳴イオン化分光
学位授与大学	筑波大学 (University of Tsukuba)
学位授与年度	2017
報告番号	12102甲第8456号
URL	http://hdl.handle.net/2241/00152337

数理物質科学研究科 博士論文の要約

専攻名 物理学専攻
学籍番号 201430091
学生氏名 向井 もも
学位名 博士(理学)
指導教員 小沢 顕

博士論文題目 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)

II型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。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(滞留核)が集中的に合成される。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(金や白金を含む質量数 $A \sim 195$) 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未だ解明されていない。

それを解明する手掛かりとして、第3ピークの主な親核及び滞留核の break-through ペアである ^{195}Tm ($Z = 69$) と $^{196,198}\text{Yb}$ ($Z = 70$) の半減期、質量、 β -遅発中性子放出確率等を知る必要がある。しかし、これらの原子核は安定核から非常に遠く ($\Delta N = +20$)、現行の施設では生成困難である。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、 $Z \sim 74$, $N \sim 126$ の原子核の β^- 崩壊ではガモフテラー遷移 ($\nu h 9/2 \rightarrow \pi h 11/2$) と第一禁止遷移 ($\nu i 13/2 \rightarrow \pi h 11/2$ 等) の両方が競合するため、様々な理論モデルによる半減期の予測値は一けた以上異なっている。理論計算の精度向上のために、滞留核より安定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。

基底状態の波動関数を調べれば、支配的な遷移モードがわかる。原子核の波動関数は核磁気双極子モーメントから推測可能である。電磁モーメントは、レーザー分光による超微細構造(HFS)測定から直接導出できる。またレーザー分光では、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)から原子核の平均二乗荷電半径($\langle r_c^2 \rangle$)と四重極変形パラメータ β_2 の変化量が導出できる。 β_2 は原子核の形状や変形度の変化から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ある。ISOLDE/CERNやISOCELE/IPNで行われた先行研究では、 $Z = 77, 78, 79$ の中性子欠乏核について、レーザー分光を用いて電磁モーメントが測定された。これらは水銀同位体の β^+/EC 崩壊や α 崩壊で生成された。しかし、中性子過剰核については、先と同様な手法では生成できない。また、 $\text{Hf} - \text{Pt}$ ($Z = 72 - 78$) は高融点元素であるため標的からの熱拡散を利用したイオン源からの引き出しが困難であり、これらの中性子過剰核の電磁モーメントはこれまでにほとんど調べられていない。博士論文研究では、 $Z \sim 77$ 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 $^{196-198}\text{Ir}$ ($Z = 77, N = 119 - 121$) のレーザー分光による超微細構造測定を行った。

$Z \sim 77$ の中性子過剰核は、 ^{136}Xe ビーム ($Z = 54, N = 82$, 核子当たり 9.4 MeV) と ^{198}Pt ($Z = 78, N = 120$)

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。このようにして得られた単一核種について β - γ 検出器系で精密な崩壊核分光が可能である。

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。この実験手法では、74 kPaのアルゴンガス中で不安定核をレーザー共鳴イオン化するため、高融点元素でも超微細構造測定が可能である。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を決めている核磁気双極子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。

$^{196-198}\text{Ir}$ ($Z = 77, N = 119 - 121$) について測定した超微細構造スペクトルの解析から、核磁気双極子モーメント (μ) と同位体シフトを導出した。 ^{197}Ir ($N = 120, \text{スピンパリティ } I^\pi = 3/2^+$) の μ は、 ^{199}Au ($N = 120, I^\pi = 3/2^+$) の先行研究結果と近い値であった。この結果は、 $N = 112, 114, 116$ のイリジウムおよび金同位体で核磁気双極子モーメントが近い値になる傾向と一致する。 $N = 112, 114, 116$ のイリジウムおよび金同位体は $\pi d_{3/2}$ 軌道のシュミット値 0.12 に近い μ をもつが、 $^{197}\text{Ir}, ^{199}\text{Au}$ の μ はそれらより 2 倍程度大きい。このことから、 $^{197}\text{Ir}, ^{199}\text{Au}$ では軽い核よりも原子核の変形が大きくなることが示唆される。 ^{196}Ir ($N = 119, I^\pi = (0, 1)^-$) と ^{198}Ir ($N = 120, I^\pi = \text{未知}$) 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、 $I \geq 1$ が示唆される。最小の reduced χ^2 はどちらの核でも $I = 1$ の場合に得られた。

導出した同位体シフト量から、液滴模型による原子核の平均二乗荷電半径と四重極変形パラメータの安定核 ^{191}Ir の値に対する変化量を導出した。 $^{196-198}\text{Ir}$ の平均二乗荷電半径の変化量は、誤差を考慮すると軽い核から滑らかに増加する傾向を示した。 $^{196-198}\text{Ir}$ の四重極変形パラメータの絶対値は、 $A = 196$ 以下でプロレート変形、 $A = 197$ 以上でオブレート変形を示す FRDM モデルによる理論値と似た傾向を示した。

本研究で評価した $\mu, \beta_2, \delta\langle r_c^2 \rangle$ を HFB+SkM*及び殻模型による計算値と比較した。HFB+SkM*では、 β_2 の絶対値および $\delta\langle r_c^2 \rangle$ については実験値とおおよそ一致するが、核磁気双極子モーメントの計算値は実験値の 2 倍以上大きくなった。SkM*は安定二重魔法数核の荷電半径や結合エネルギーを再現するように相互作用が作られた。そのため、スピナーアイソスピン相互作用に大きく依存する電磁モーメントの再現性向上のためには、スピナーアイソスピン相互作用に関係する物理量を説明できるように改良する必要がある。殻模型では KHHE 相互作用を用いて ^{208}Pb からのホール状態として $^{196-198}\text{Ir}$ の核磁気双極子モーメントを計算した。多すぎるホール数のために、 $^{196, 197}\text{Ir}$ ではモデル空間を制限して計算が行われたが、制限についての信頼性は不明である。殻模型計算でも μ, β_2 の両方について、実験値と一致する結果は得られなかった。

^{197}Ir について、HFB+SkM*、殻模型、FRDM の理論予測から、オブレート変形が示唆されている。しかし、核子移行反応や β 崩壊遅延 γ 線測定より同定された、 $A = 187 - 197$ の odd- A イリジウム同位体の 3 つの低エネルギー準位、基底状態 $3/2^+$ [402]、低励起状態 $I^\pi = 1/2^+$ ($1/2^+$ [400]と基底状態の γ 振動の混合状態)、準安定状態 $11/2^-$ [505]、の系統性からプロレート変形と予測されている。また、先行研究でのレーザー分光による HFS 測定から、 $A = 187 - 193$ のイリジウム同位体はプロレート変形であ

ることが示唆されている。これらの準位や変形の系統性から、 ^{197}Ir はプロレート変形していると考えられる。高分解能な超微細構造スペクトル測定から電気四重極モーメントを導出すれば、より精密に変形度と β_2 の符号を知ることができ、イリジウム同位体での形状遷移を明らかにすることができる。

^{196}Ir と ^{198}Ir について、陽子・中性子軌道推測のために、導出した核磁気双極子モーメント (μ_{exp}) 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双極子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 (μ_{emp}) と比較した。その結果、 μ_{emp} が μ_{exp} を最もよく再現したのは、 ^{196}Ir で $I^\pi = 1^-[\pi d 3/2 \times \nu p 3/2, \nu d 5/2]$ 、 ^{198}Ir で $I^\pi = 1^-[\pi d 3/2 \times \nu p 3/2]$ であった。陽子軌道 $\pi d 3/2$ は $N \geq 109$ のイリジウム同位体の系統性と一致しており、中性子軌道 $\nu p 3/2, \nu d 5/2$ は殻模型軌道を順番に占有した場合に $N = 119, 121$ で妥当な軌道である。

ガスセル内レーザー共鳴イオン化分光により、核磁気双極子モーメント及び $|\beta_2|$ を 10%程度の精度で導出し、スピン未知核ではカイ二乗検定からスピンの最確値を得ることができた。今後、イリジウムの中性子過剰核での形状遷移について明らかにするためには、電気四重極モーメントを測定し符号付きで β_2 を決定する必要がある。そのためには、高分解能の HFS 測定、収量の少ない中性子過剰核でも S/N 良く β 線を検出できる β 線検出器、基底状態と準安定状態を分離できる高分解能質量分離器の多重反射型飛行時間測定式質量測定器 (MR-TOF) が必要である。

電気四重極モーメントがあると ($I > 1/2$)、核磁気双極子モーメントによる HFS のエネルギーシフト (数百 MHz~数 GHz) に加えて約 200 MHz 程度の追加のエネルギーシフトが生じる。10%程度の精度で電気四重極モーメントを導出するために必要な HFS 測定の分解能は 300 MHz 程度である。本研究で行ったガスセル内レーザー分光では、主にドップラー広がり (ガス温度 300 K) と圧力広がり (ガス圧 74 kPa)、色素レーザーの線幅 (3.4 GHz) により分解能が 8 GHz 程度になった。原子の速度が均一で周辺圧力が低いガスジェット内レーザー分光では、ドップラー広がり は 1/5、圧力広がり は 1/100 程度に抑えられる。また線幅の狭い色素レーザーを導入することで測定の分解能は 300 MHz 程度に抑えられる見込みである。

より中性子過剰で収量の少ない核で β 崩壊核分光や HFS 測定を行うためには、 β 線検出器を低バックグラウンド化する必要がある。現在の β 線検出器は複数分割型のガス検出器によりおおよそ 2 次元の位置検出が可能であるが、陽極を高抵抗カーボン線にすることで 3 次元の位置検出が可能になる。この改良により、バックグラウンド計数率を 0.1 cps から 0.01 cps 程度まで減少できる見込みである。これにより、 ^{199}Ir ($N=122$) や ^{198}Os ($Z=76, N=122$) でも HFS 測定が可能になる。

Hf - Pt の原子核領域では、励起エネルギー数 100 keV 付近に準安定状態が存在する。基底状態と準安定状態を双極電磁石で分離することはできないため、測定した HFS スペクトルは基底状態と準安定状態の HFS を含む可能性がある。解析時に 2 つの HFS を考慮する必要があり、物理量の精度低下の原因になる。200 keV の質量測定精度で原子核質量を測定できる MR-TOF を導入することで、基底状態と準安定状態の HFS をそれぞれ独立に高精度に測定できる。また MR-TOF 下流のイオン検出器で、質量分離されたイオン数を計測すれば、 β 崩壊を待つことなく、効率良く HFS 測定を実施できる。