

ウランの起源解明のための未知アクチノイド核の分光実験

	研究代表者	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授	
		渡邊 裕 (わたなべ ゆたか)	研究者番号：50353363
	研究課題情報	課題番号：24H00008	
		研究期間：2024年度～2028年度	
		キーワード：元素合成、r過程、原子核反応、新同位体、ウランの起源	

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

自然界を構成する多様な元素はどのように作られたのか？それは自然科学の根源的な問いの一つである。物質を構成する原子の中心には原子核があり、原子核に含まれる陽子の数(原子番号)により元素は決まる。星の中では原子核が他の原子核と融合したり、中性子を吸収して原子核内の中性子が陽子に変わるベータ崩壊を起こすことで、より原子番号の大きい元素が作られている。また、非常に高温で中性子が密集した爆発的な天体環境では原子核が複数の中性子の吸収とベータ崩壊を繰り返してウランより原子番号の大きい元素までをわずか数秒で合成すると考えられている。これは速い中性子捕獲過程(r過程)と呼ばれ、天然に存在するウランやトリウム の起源となる唯一の元素合成過程である。重い星が晩年に重力崩壊を起こして大爆発する重力崩壊型超新星爆発や、2つの中性子星が合体する連星中性子星合体は、r過程の天体サイトの候補と考えられているが、r過程の物理環境と天体サイトを特定するためには、天文学、天体物理学、原子核物理学が連携した学際的な研究が必要である(図1)。極端に中性子が過剰な原子核を合成して進行するr過程に関与する原子核の多くは未知であり、r過程元素合成のシミュレーションには理論モデルによる原子核の質量や寿命などの予測値が不可欠である。原子核モデルの予測値には不確定さが存在し、それにより元素合成シミュレーションにも不確定さが生じる。陽子に対して中性子の数が多い中性子過剰核では、陽子と中性子の数の差に起因する対称エネルギーの評価がその安定性にとって重要となる。この研究では広範囲の中性子過剰アクチノイド核に対して核分光データを取得することで、対称エネルギーの評価や核構造の理解における理論的な不確定さを減少させて、より信頼度の高い核モデルの構築と精密化を実現し、r過程元素合成の包括的な理解を目指す。

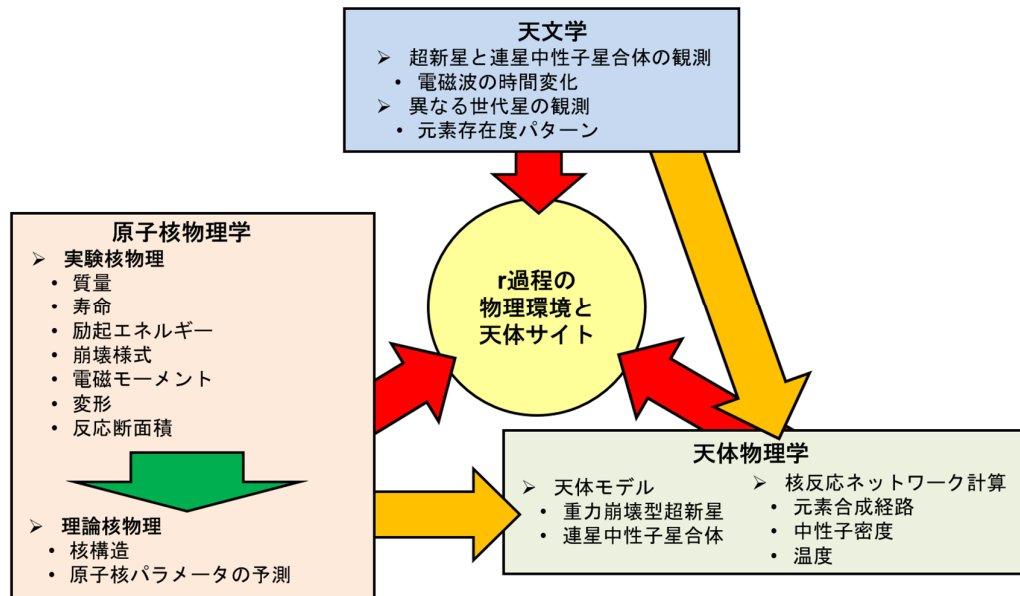


図1 本研究によるr過程元素合成解明のイメージ図

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

これまで合成が困難であった中性子過剰なアクチノイド核を多核子移行反応によって合成する。多核子移行反応は、重イオン加速器で加速した重イオンを標的に照射し、低エネルギーで二つの原子核を衝突させてその間で中性子や陽子を交換させる反応である。一度に多種類の原子核が合成されることが、合成される原子核が標的から低いエネルギーと特定の角度で放出され、なおかつ幅の広いエネルギーと角度の分布を持つことから、多核子移行反応を核分光実験に利用することが困難であった。この研究では図2に示されるKISS-1.5という装置を理化学研究所のRIBF加速器施設内に建設してその困難を克服する。私たちはこれまでKISSという装置を開発し、多核子移行反応で合成した放射性同位体をアルゴンガス中で収集して中性な原子に変換し、レーザーを照射することで元素を選択してイオン化した後、双極電磁石で質量選択することで特定の同位体の核分光を高純度で行ってきた。KISS-1.5では多核子移行反応で合成した放射性同位体をイオンのままヘリウムガス中で収集して電場により高速に引き出しを行う。引き出された反応生成核は多重反射型飛行時間測定式(MRTOF)質量分光器で精密に質量測定することができ、また、可変質量分離器を通して特定の質量範囲のイオンを輸送してMRTOFによる精密質量測定により同位体を識別しながら崩壊核分光を行うことができる。図3はビスマス(Bi)からバークリウム(Bk)までの中性子過剰な同位体の発見年を色分けした図である。トリウム(Th)からバークリウムまでの元素では中性子過剰な同位体が1999年以降発見されていなかった。私たちはKISSで ^{241}U を発見し、 ^{241}U と ^{242}U の質量測定に初めて成功した。KISS-1.5ではKISSの100～1000倍の能率を達成し、図2の点線で囲われた領域の中性子過剰アクチノイド核80種類以上を合成して質量分光、および崩壊核分光を実施し、r過程元素合成の解明に向けて原子核モデルの精密化を行う。

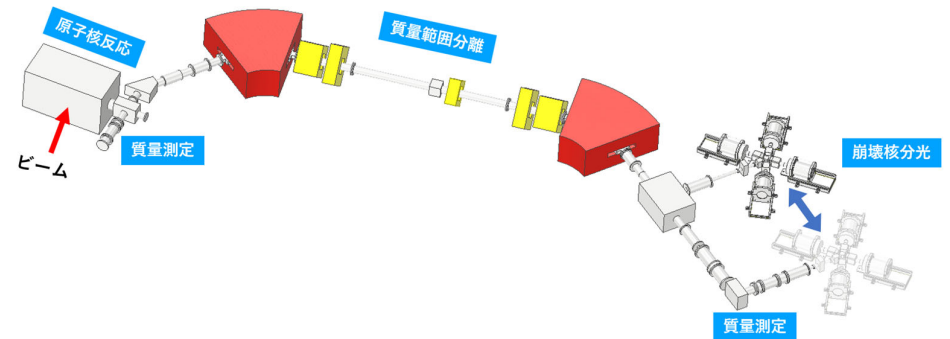


図2 KISS-1.5装置の概略図

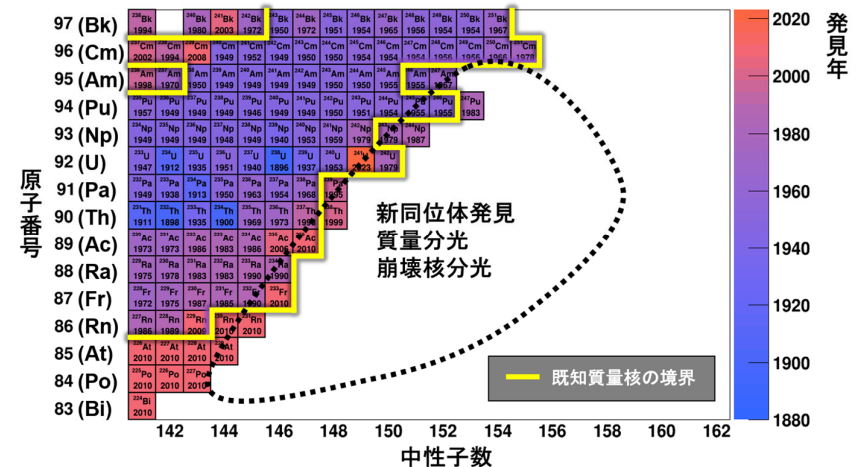


図3 中性子過剰アクチノイドの発見年とこの研究の対象となる原子核の範囲