

氏名	す がわ よし お 栖 川 宜 夫
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2289 号
学位授与の日付	平 成 13 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学位論文題目	AMD-MF 法による原子核の液気相転移の研究

論文調査委員 (主査) 教授 堀内 昶 教授 九後太一 講師 藤原義和

### 論 文 内 容 の 要 旨

原子核はその密度やエネルギーの飽和性に表れているように液体的性格の物質である。液体の原子核を熱すれば相転移を起こして液体から気体へと変化するであろうことが、核力が近距離斥力を持った引力であって丁度分子間力に似ていることから、予想されてきた。理論的には例えば平均場近似の理論では確かに液体気体相転移の起こることが示されている。実験的に原子核の液体気体相転移の起こることを調べるのは容易ではなく、近年の重イオン衝突実験の進歩によりやっと反応破砕の詳細な分析を通じて相転移を示唆する結果が得られるようになってきた。問題はこのような実験結果とその解釈の当否の判定である。重イオン衝突は非平衡過程であるので平衡系の成立を仮定しない分子動力学によってこのような当否の判定を下すことが望ましい。ところがこれまでは古典力学的分子動力学を除けば量子力学的な分子動力学を適用して相転移を調べたことは熱平衡系に対してすら存在しない。申請論文は量子力学的な分子動力学である反対称化分子動力学を用いて熱平衡の原子核系の相転移を始めて本格的に研究したものであり、重要な知見を多く得るとともに、非平衡過程である重イオン衝突の分析を通して液体気体相転移を研究する展望を切り開いたものである。

申請論文が研究対象としたのは中性子と陽子の数の等しい質量数が36の系を球形の容器の中に入れたものである。論文の記述は2種類の有効核力を用いて計算した結果をそれぞれに分析し考察した2つの部分からなっている。1つは Volkov 力と称される核力で質量数が16辺りを越えると結合エネルギーが現実より大きくなるもので、もう1つは Gogny 力と称される核力で結合エネルギーの実験値の再現性が良く信頼性の高いものであるが密度依存性を表す項を含むために計算時間が掛かりすぎると考えられていたものである。申請論文の成果の1つは有効核力の密度依存性を表す項の行列要素の数値計算を高速に実行する技術を開発したことで、これによって信頼性の高い Gogny 力を用いた液体気体相転移の研究が可能となったのである。この計算技術はすでに他の論文での原子核構造の研究にも用いられて成果を挙げている。

申請論文は体系の励起エネルギーの上昇と共に体系の温度がどの様に上昇するかを示すカロリック曲線の計算を行い、そのカロリック曲線の各点に於いて体系はどの様な相になっているかを体系の中に存在する各種のクラスターの数分布や温度分布などをもとにして調べた。どちらの核力を用いた場合にもカロリック曲線は3つつの部分からなり、それは低励起部分とそれに続く温度平坦部分と直線的な温度上昇を見せる気体部分である。Volkov 力は大きいクラスターの形成に有利であるため低励起部分は「液体原子核と気体核子」の配位となりカロリック曲線も液相のカロリック曲線として知られる曲線に極めて近い。従って質量数が僅か36の体系にも拘わらず、Volkov 力の場合にはかなりはっきりと液体気体相転移が現れることが示された。3つつの領域の境界ではクラスター分布にも大きな変化が見られる。申請論文はその上で幾つか重要な知見を得ている。例えば、液相から気相へ変化する温度平坦領域の温度は容器の体積つまり容器から受ける圧力に敏感で、しかもこの領域での体系に含まれるクラスターの分布も圧力に敏感である。また、気相領域の温度と圧力の状態方程式は van der Waals 気体のもので、容器の体積の大きい場合は理想気体的になる。

Gogny 力の場合の計算結果は大局的には Volkov 力の場合に類似するが、体系のクラスターへの分割がより起こり易いた

めの様々な違いが現れる。例えば低励起部分では「液体原子核と気体核子」の配位に加えて種々のクラスターが存在するチャンネルも重要な役割を果たす。これは液相のカロリック曲線からのずれとしても現れる。Gogny 力の場合には種々のクラスターが存在するようになるため He と Li のアイソトープの存在数から決めたいわゆるアイソトープ温度を少ない誤差で計算することが出来て通常の温度との関係を議論することができる。この結果は実験解析などに有益な情報をもたらすとと言える。このようにより現実的な Gogny 力の場合には種々のクラスターの存在により Volkov 力の場合よりも複雑となるが申請論文はより単純な Volkov 力の場合の理解をもとにして上記の例を含めて多くの知見を引き出すことに成功している。

## 論文審査の結果の要旨

近年の金の原子核同士の周縁衝突の実験は入射核破砕片の詳細な分析を通じて原子核の液相気相相転移を強く示唆する結果を与えたと報告されている。入射核破砕片を調べるので中心衝突のような圧縮も無く暖められた入射核の熱平衡状態の情報が実験的に得られているとの仮定がそこでは為されている。理論的にはこの様な仮定の当否の判定も為されねばならず、平衡系の成立を仮定しない分子動力学によって衝突過程の分析が為されることが望ましい。ところがこれまでは古典力学的分子動力学を除けば量子力学的な分子動力学を適用して相転移を調べたことは熱平衡系に対してすら存在しない。申請論文は、量子力学的な分子動力学である反対称化分子動力学は波束の運動量分布の表す量子揺らぎを適切に取り入れるならば液相での原子核の量子力学的な熱統計的性質を正しく再現することをもとにして、分子動力学を用いて熱平衡の原子核系の相転移を始めて本格的に研究したものである。この研究は重要な知見を多く得るとともに、非平衡過程である重イオン衝突の分析を通して液体気体相転移を研究する展望を切り開いたものとして高く評価される。

申請論文が研究対象としたのは中性子と陽子の数の等しい質量数が36の系を球形の容器の中に入れたものである。分子動力学で熱平衡系を扱うには長時間平均を計算せねばならず質量数が36という小さな系でも量子揺らぎを組み入れた計算は既に膨大な時間と量を扱った研究となっている。申請論文は有効核力として Volkov 力と Gogny 力の2つを用いた結果をそれぞれに分析し考察している。Gogny 力の方が Volkov 力よりも結合エネルギーの実験値の再現性が良く信頼性の高いものであるが、Gogny 力の場合には種々のクラスターの存在する複雑なチャンネルが大きな役割を果たすので解析も単純ではない場合が多い。従って信頼性の高い Gogny 力に加えて Volkov 力の解析を行うことで、相転移過程の有効核力依存性を理解できることを含めて、Gogny 力の場合の複雑な計算結果の理解に大きく役だっている。

ところで Gogny 力は信頼性の高いものであるが、密度依存性を表す項を含むために計算時間が掛かりすぎると考えられていた。申請論文の成果の1つは有効核力の密度依存性を表す項の行列要素の数値計算を高速に実行する技術を開発したことで、これによって信頼性の高い Gogny 力を用いた液体気体相転移の研究が可能となったのである。この計算技術はすでに他の論文での原子核構造の研究にも用いられて成果を挙げている。

申請論文はカロリック曲線の計算を行うとともに、そのカロリック曲線の各点での体系の内容について体系の中に存在する各種のクラスターの数分布や温度分布などをもとにして調べている。どちらの核力を用いた場合にもカロリック曲線は3つ々の部分からなり、それは低励起部分とそれに続く温度平坦部分と直線的な温度上昇を見せる気体部分であることが示された。Volkov 力の場合には低励起部分は「液体原子核と気体核子」の配位となりカロリック曲線も液相のカロリック曲線として知られる曲線に極めて近い。従って質量数が僅か36の体系であるにも拘わらず、かなりはっきりした形で液体気体相転移が現れることが示されている。3つの領域の境界ではクラスター分布にも大きな変化が起こることが示されており、また液相から気相へ変化する温度平坦領域の温度は容器の体積つまり容器から受ける圧力に敏感で、しかもこの領域での体系に含まれるクラスターの分布も圧力に敏感であることが見出されている。また、気相領域の温度と圧力の状態方程式は van der Waals 気体のものであることも示された。

Gogny 力の場合には、大局的には Volkov 力の場合に類似するが、体系のクラスターへの分割がより起こり易いための様々な違いが現れ、それに付いての種々の分析が提示されていて有益な情報を与えている。例えば Volkov 力の場合には必ずしも容易ではなかった個々のクラスターの励起エネルギーを少ない誤差で計算することが出来て種々の質量数の原子核の個別のカロリック曲線が得られている。実験では温度の測定に例えば He と Li のアイソトープの存在数から決めたいわゆるアイソトープ温度などが用いられるが現実的な Gogny 力の場合には種々のクラスターが存在するのでアイソトープ温度を

少ない誤差で計算することが出来て通常の温度との関係が議論されていて有益である。前述したように現実的な Gogny 力の場合は種々のクラスターの存在により Volkov 力の場合よりも複雑となるが申請論文はより単純な Volkov 力の場合の理解をもとにして多くの知見を引き出すことに成功している。

以上に述べた申請論文の研究の重要な成果により、申請論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認めた。なお、申請論文とそれに関連した口頭試問を行った結果合格と認めた。