

学 位 審 査 報 告 書

(ふりがな) 氏 名	たなか たかよし 田中 孝佳
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 22 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) 超低温 MRI による固体 ^3He の U2D2 相と CNAF 相間における一次相転移の研究	
論 文 調 査 委 員	(主査) 佐々木豊 准教授 松田祐司 教授 池田隆介 准教授

理 学 研 究 科

(続紙 1)

京都大学	博士（理 学）	氏名	田中 孝佳
論文題目	超低温 MRI による固体 ^3He の U2D2 相と CNAF 相間における一次相転移の研究		
(論文内容の要旨)			
本論文は、著者らが開発した超低温 MRI（磁気共鳴映像法）を利用して、数百 μK という絶対零度近傍において、核整列固体 ^3He の 2 種類の反強磁性相の間の磁場誘起一次相転移とその時間空間発展について行った研究成果を報告したものである。 融解压にある固体 ^3He は約 0.9mK の転移温度で核整列反強磁性相に転移する。外部磁場の大きさに応じて 2 種類の対称性の異なる反強磁性構造をとり、約 0.45T の下部臨界磁場以下では U2D2 構造、下部臨界磁場と上部臨界磁場の間では CNAF 構造と呼ばれるスピン構造を取る。転移温度以下の一定温度下で転移磁場近傍にある外部磁場を高速掃引することにより、U2D2 相から CNAF 相への相転移、あるいは CNAF 相から U2D2 相への相転移を引き起こし、不安定となり消滅する準安定相あるいは安定となり成長する安定相の時間空間的な発展を高速な NMR/MRI 測定を手段として研究した。 磁場掃引後の準安定相含有率の時間発展は、相転移の向きに関わらず 2 段階の発展過程を取った。第 1 段階は指数関数的に減衰する時間発展をするが、相転移を完了する前により遅い時間発展を示す第 2 段階に取って代わられることを発見した。第 1 段階の指数関数的な時間発展並びにその後の第 1 段階の終了は、時間発展を支配する試料内での多数回の安定相の核生成と各々の核生成に引き続く高速かつ限定された成長という考え方で説明された。2 相のエントロピーの違いを考慮して、安定相核の成長がある大きさまで成長したところで止まるモデルを提案し、そのモデルに基づき推定された第 1 段階終了時点での準安定相含有率の温度依存性、ならびに 2 相の化学ポテンシャル差に対する依存性が測定結果を説明することを示した。また第 1 段階の指数関数的発展の時定数が示す負の弱い温度依存性を説明するために、核生成後の限定された成長に際して周辺の核生成サイトを吸収して無効化するため、見かけ上の核生成レートが真の核生成レートから変更されることを指摘し、補正された真の核生成レートが温度に依存しなくなることを示した。このような核生成サイトはなんらかのヘテロジニティにより離散的に分布するものと考えられるが、MRI 測定により核生成サイトが結晶全体に偏らず分布することを示した。また、この核生成が相転移の方向に関わらず同程度の核生成レートで行われることから、核生成サイトの物理的起源が結晶内に多数存在する線欠陥に付随する磁氣的面欠陥である可能性を指摘した。 本論文の付録にはこれらの主たる成果に加えて、超低温 MRI 装置を用いて行った U2D2 相の磁区構造と磁壁の方位についての研究、ならびに超流動 ^3He 中での対破壊を伴う U2D2 相固体の結晶成長についての研究の成果が記述されている。			

(論文審査の結果の要旨)

超低温 MRI は著者らの研究グループにおいて開発されてきた世界に類を見ない測定手段であり、著者はその開発をさらに発展させて高速化を図り 3 次元測定を実用化した。本論文ではこの測定手段を利用して、数百 μK という絶対零度近傍において、核整列固体 ^3He の 2 種類の反強磁性相の間の磁場誘起一次相転移とその時間空間発展について行った研究成果を報告している。

絶対零度近傍における一次相転移においては、常温においては支配的な熱核生成による相転移機構に代わって、巨視的量子トンネリングによる相転移機構が支配的となることが期待されている。著者は数百 μK という超低温度にある核整列固体 ^3He の単結晶に加えた磁場を臨界磁場の近辺で高速掃引することにより、2 種類の反強磁性相の間の相転移を引き起こし、その後の時間空間的な相転移の進行について測定することに成功した。その結果、相転移の進行が 2 段階に分かれ、第 1 段階では準安定相が一定のレートで指数関数的に消滅していくものの途中でその進行が停止し、その後の第 2 段階ではよりゆっくりとした進行で安定相に完全に転移することを発見した。この第 1 段階のレートや第 1 段階終了時の準安定相含有率が温度、臨界磁場からの正負のずれなどにどのように依存して変化するかを測定することにより、そのメカニズムが次のようなものであることを明らかにした。結晶内に満遍なく存在するヘテロジニティを核生成サイトとして、次々おこる核生成により指数関数的な時間発展が支配される。生成した核は短時間でエントロピーバランスにより決定される大きさまで成長するものの、その大きさで一定割合の準安定相を含んだままで成長を止める。第 1 段階終了後は結晶全体とまわりを取り囲む超流動ヘリウム 3 との熱輸送に支配された遅い第 2 段階へと移行して相転移を完全に終了する。また著者はこのヘテロジニティの候補として結晶中に多数存在する線欠陥に付随する磁氣的面欠陥が考えられることを指摘した。

これらの主たる成果に加えて、U2D2 相の磁区構造を 3 次元超低温 MRI を利用して研究し、単結晶中に 3 種類数個の磁区が平面的な磁壁を挟んで混在し、その磁壁の方向が磁壁をまたがる多体リング交換のエネルギー損失が最小となる方向である [110] 面であることを明らかにした。また、同じく MRI の利用により超流動ヘリウム中での U2D2 相の結晶成長について研究し、低速領域では従来の研究で報告されていた通り化学ポテンシャルに 1 次で依存する成長速度を示すものの、高速領域では 2 次に依存することを発見し、その移り変わりを説明するモデルとして、結晶成長に付随する超流動相での対破壊によるエネルギー放出とそれによる超流動破壊を提案し、1 次に依存する成長速度を支配するステップの臨界速度が超流動の臨界速度であることを明らかにした。

以上の著者による研究成果はそのユニークな手法とともに、世界に比類なきものと判断される。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 22 年 1 月 6 日論文内容とそれに関連した口頭試問を行った。その結果合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降