

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	結晶中の単一希土類イオンの低温分光測定
Title(English)	Spectroscopy of a single rare-earth ion in a crystal at cryogenic temperature
著者(和文)	中村一平
Author(English)	Ippei Nakamura
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9708号, 授与年月日:2015年3月26日, 学位の種類:課程博士, 審査員:松下 道雄,奥田 雄一,上妻 幹旺,村上 修一,旭 耕一郎,細谷 暁夫
Citation(English)	Degree:., Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9708号, Conferred date:2015/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

## 論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第 号		学位申請者氏名	中村 一平		
論文審査 審査員		氏名	職名		氏名	職名
	主査	松下 道雄	准教授	審査員	村上 修一	教授
	審査員	旭 耕一郎	教授		細谷 暁夫	特命教授
		奥田 雄一	教授			
		上妻 幹旺	教授			

## 論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「Spectroscopy of a single rare-earth ion in a crystal at cryogenic temperature」と題し、以下の5章から構成されている。

第1章「Introduction」は、本論文の主題である結晶中にドーパされた希土類イオンの分光研究の意義について述べるものである。イオンビーム法から始まる単一原子、分子の分光研究の軌跡を概観し、現在では単一原子核スピンの観測と制御、ひいては核スピンを利用した量子情報処理の実現を目指して固体中の単一原子分子の分光研究が盛んに行われていることを説明している。申請者は、単一核スピンの光観測、制御に最適な系として温度数ケルビンに冷却された無機結晶中の希土類イオンに着目すると同時に、希土類イオンの発光が非常に微弱なために単一核スピンの観測以前に単一イオンの発光検出が極めて困難であることを述べている。本研究に先行して、あるいは平行して行われてきた単一希土類イオン分光の試みについて概説し、それらと比較してバルクの結晶試料を用いた実験は核スピンに対するゼーマン磁場の印加や将来の核スピン量子ビットの高密度化を容易にすること、そのような利点と引き替えに発光の検出感度と空間分解能に優れた低温対応顕微鏡の開発が必須であることを述べている。

第2章「Spectroscopy of a single  $\text{Pr}^{3+}$  ion in a  $\text{LaF}_3$  crystal」は、試料であるプラセオジウムイオン( $\text{Pr}^{3+}$ )をドーパしたフッ化ランタン( $\text{LaF}_3$ )結晶の物性と、結晶中に含まれる多数の  $\text{Pr}^{3+}$  を個別に分光するための実験手法を説明するものである。試料に関する基本的な情報として、 $\text{LaF}_3$  結晶中における  $\text{Pr}^{3+}$  の電子状態、光学遷移、核スピンがもたらすイオンのエネルギー準位の超微細構造、および  $\text{LaF}_3$  結晶自体の物性がまとめられている。続いて、不均一広がりと呼ばれる結晶中のイオンが示す光学遷移の遷移周波数のばらつきを利用し、顕微鏡の検出領域に含まれるおよそ  $10^5$  個にも達する莫大な数の  $\text{Pr}^{3+}$  から、一つのイオンの吸収スペクトルを分解する分光法について述べている。

第3章「Experimental setup」は、前章で説明した単一  $\text{Pr}^{3+}$  分光法を実現するための顕微鏡装置について述べている。初めに、顕微鏡の感度を左右する最も重要な光学装置である低温対応物レンズの開発と性能評価について述べている。続いて、試料を温度 1.5 K に冷却できる超流動ヘリウム液溜め真空槽を備えた共焦点顕微鏡について説明し、新開発のレンズを含めたシステム全体の発光の検出効率の見積もりを行っている。最後に、結晶中の複数の  $\text{Pr}^{3+}$  を遷移周波数の違いによって分解するのに必要な狭線幅の周波数安定化レーザーの製作について述べている。100 kHz 級の線幅を持つ市販の半導体レーザー装置と超低熱膨張ガラス製の光共振器を組み合わせることにより、一日にわたり  $\pm 0.018$  MHz の周波数安定度と 0.4 MHz の線幅が達成されたことを説明している。

第4章「Results and discussion」には、開発した顕微鏡装置による温度 1.5 K での  $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$  の分光測定の結果が記されている。初めに、 $\text{Pr}^{3+}$  の発光検出をおこなう上で障害となる Pr 核スピンの光ポンピングと、三つの周波数成分を持つレーザー光をイオンに同時に照射することで核スピンのポンピングを解消する光励起法について説明している。続いて、主たる実験結果である単一  $\text{Pr}^{3+}$  の発光励起スペクトルについて述べている。半値全幅 12.7 GHz の不均一広がりを持つ  $^3H_4 \rightarrow ^3P_0$  遷移のアンサンプル吸収スペクトル上の各点で高分解能発光励起スペクトル測定を行い、不均一広がりを中心周波数 627.33 THz から +0.10 THz 離れた周波数帯で単一  $\text{Pr}^{3+}$  のものと見られる強度 20 cps、半値全幅 3 MHz の

発光ピークが複数観測されたことを説明している。これらの発光ピークについて光吸収が飽和した際の発光強度、発光強度の励起光の偏光方向に対する依存性などを調べたところ、単一  $\text{Pr}^{3+}$  の発光励起スペクトルに期待される性質を満たしていたことから、確かに単一  $\text{Pr}^{3+}$  の検出に成功したと結論している。また光ポンピングを利用して単一  $\text{Pr}^{3+}$  の核スピン状態を特定の準位に輸送できることを確認したことも単一希土類イオンの核スピン状態制御に繋がる重要な成果であると述べている。考察では 3 MHz という単一  $\text{Pr}^{3+}$  のスペクトル線幅について議論を行い、観測された線幅が高い励起光強度がもたらす飽和広がり、Pr 核スピンとイオンの相互作用がもたらす電子励起状態  $^3P_0$  の超微細構造に由来すると看破した。

第 5 章「Conclusion」では本研究を総括し、特に 2013、14 年に公表された単一希土類イオンの分光研究と比較してイオンのスペクトル線幅が 5 倍近く細かった事実を挙げて、バルク試料を用いた研究の利点と希土類ドーピング結晶による量子情報処理実現への展望を述べている。

以上を要するに、申請者は無機結晶中にドーピングされた単一希土類イオンの低温分光測定を実現し、結晶中の単一希土類イオン核スピンの光観測を阻む最も高い障壁を突破した。特に、装置の検出領域に多数の希土類イオンが含まれるような、濃厚にドーピングされたバルク結晶での実験はこれまで成功例がない。光の波長程度の空間に密集した個々のイオンを分解できたことは、将来行われるべきイオン間相互作用を利用した多ビット量子演算の実装を容易にする。また微結晶など異なる形態の試料と比べて細いスペクトル線幅が観測されたことは、バルクの結晶試料が量子デバイスとして高い情報密度を有し得ることの実験的な証左である。したがって、本論文は博士(理学)の学位論文に十分値すると認められる。なお、本論文は全編英語であるが、理路整然とわかりやすく書かれている。英語による発表も分かりやすく、英語によるコミュニケーションは問題ないといえる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。