

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	フォノン角運動量の生成と変換の理論
Title(English)	Theory of Generation and Conversion of Phonon Angular Momentum
著者(和文)	濱田真人
Author(English)	Masato Hamada
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11043号, 授与年月日:2019年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:村上 修一,齋藤 晋,笹本 智弘,吉野 淳二,西田 祐介
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11043号, Conferred date:2019/3/26, 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		濱田 真人	
論文審査 審査員		氏 名	職 名		氏 名	職 名	
	主査	村上 修一	教授	審査員	西田 祐介	准教授	
	審査員	吉野 淳二	教授				
		斎藤 晋	教授				
		笹本 智弘	教授				

論文審査の要旨（2000 字程度）

論文は「Theory of generation and conversion of phonon angular momentum」と題し、固体結晶中のフォノンの生成と他の自由度への変換現象について理論的な定式化と計算を行っており、6 章よりなる。

第 1 章「Introduction」では固体結晶中のフォノンの性質について概観している。フォノンの基礎的な性質や電子フォノン相互作用について説明した後、フォノンクスと呼ばれる、フォノン伝導の制御を利用した最近の分野の進展について述べている。特にフォノンホール効果について、その理論と実験について概観し、電子系での量子ホール効果・異常ホール効果との比較をしている。さらに人工的な周期系でトポロジカルなフォノンバンド構造を作る試みも述べている。さらにこの学位論文で中心的な役割を果たすフォノン角運動量について解説している。最後に本論文の全体を概観している。

第 2 章「Background」では、フォノンの角運動量の基礎的な性質を紹介するとともに、本博士論文に関係する交差相関応答現象について解説を行っている。最初にフォノンの角運動量の定式化について説明している。次に時間反転対称性や空間反転対称性に起因する角運動量の性質について議論し、さらに磁性体など時間反転対称性の破れた系ではフォノン角運動量が有限に現れることを示し、その高温極限・低温極限での振る舞いを議論している。また例として六角格子でのフォノン角運動量について説明している。さらに電子系でのエーデルシュタイン効果や電気磁気効果などの交差相関応答現象についても解説している。

第 3 章「Phonon Thermal Edelstein Effect」では、フォノンの熱エーデルシュタインについて理論的に提案している。まず、時間反転対称性が保たれ空間反転対称性の破れた系では、熱流を流すとフォノンの分布関数が平衡状態からずれ、フォノンの角運動量が有限に現れることを示している。さらにこの効果が現れるための結晶の点群対称性の制約について述べ、特に GaN など極性結晶や Te などカイラル結晶でこの効果が現れることを、第一原理計算により示している。この第一原理計算ではフォノンの分散や角運動量の分布を計算し、また原子核の古典的な軌跡が楕円運動をして運動量を持つことを示している。またフォノン角運動量は直接観測しにくいので、この効果の観測手段についてもいくつか提案している。例えば結晶を自由回転できるように糸でつるすことで、全角運動量保存に起因して、フォノン角運動量が結晶の剛体回転を誘起し、それが観測できる大きさであることを示している。また正の有効電荷をもつ原子核の回転運動は微小な磁気モーメントを誘起することも数値的に示している。

第 4 章「Magnetoelectric effect for phonons」では、系が時間反転および空間反転に関する対称性を破っているがこの 2 操作の積の下で不変である場合には、電子系の電気磁気効果と同様の効果が起こることを理論的に提案している。まず、これら 2 つの対称性の有無でどんな効果が残るかを最初に整理し、上記の場合には電場によりフォノン角運動量が誘起されうること対称性から示している。さらにこの効果にはスピン・フォノン相互作用が必要であることを説明し、その定式化を説明している。さらに上記の対称性を満たすばねと質点のモデルを例にとり、電場を印加することで格子が歪んでフォノンの固有状態が変わり、角運動量が誘起されることをこのモデルで示している。さらにこの効果の高温極限・低温極限について説明している。

第 5 章「Conversion between the electron spin and the microscopic atomic rotation」では、フォノンの角運動量から電子スピンへの変換の微視的な機構を理論的に提案している。先行研究では系全体の回転から電子スピンへの変換の議論はあるものの、フォノン角運動量のような微視的な原子核の回転から電子スピンへの変換については未知であることを説明している。さらに蜂の巣格子上の電子系を考え、この格子がフォノン角運動量を持つ場合の電子スピン偏極を計算している。フォノンの運動の時間スケールは電子のそれと比べて十分長いため、断熱近似による計算を用いて、原子核が

回転しているときにスピンの偏極すること、また回転でなく振動している場合はスピンの偏極しないことも示し、格子の回転運動がスピンへと変換される微視的機構を確立している。

第6章「Conclusion」では、論文の全体を概観し今後の展望について述べている。

以上をまとめると、本論文では、熱流や電場を結晶に導入することでフォノンの角運動量が誘起されることを理論的に初めて示し、それぞれフォノンの熱エーデルシュタイン効果、およびフォノンの電気磁気効果と名付けた。熱エーデルシュタイン効果については第一原理計算も行って、実際の物質に即して計算し、この効果の観測方法についても提案した。またフォノン角運動量が電子スピンへと変換される微視的機構も初めて理論的に提案した。このように本博士論文では、フォノン角運動量の生成・変換の基本的な性質を理論的に初めて見出すとともに、それが実際に実験で観測しうる可能性も示し、今後の実験・理論研究への礎となりうるものであり、そのため本論文は、理学の発展に大いに資するものと判定される。よって本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値があると認められる。

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。