

## 強誘電性長距離秩序形成と競合するコヒーレント量子 ゆらぎダイナミクスの研究

Study of Coherent Quantum Fluctuation Competed with the  
Long-Ranged Ferroelectric Ordering

八木 駿郎 (Toshirou Yagi)

北海道大学・名誉教授



### 研究の概要

量子常誘電体・強誘電体において、量子ゆらぎと結合する極性フォノンモードのスペクトルを観測することで、コヒーレントな量子ゆらぎのダイナミクスを明らかにする。

研 究 分 野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キ ー ワ ー ド：量子常誘電体、量子ゆらぎ、ソフトモード、強誘電性相転移

### 1. 研究開始当初の背景・動機

量子常誘電体では、静電相互作用により強誘電性が発現する条件が整っても、量子ゆらぎが分極の長距離秩序（自発分極）の形成を抑制するために強誘電相が出現しない。この現象は誘電体物性に現れた最初の巨視的な量子効果であり、まったく新しい物性である。しかしながらこの現象の実験的研究は、1979年の *K.A.Muller* と *H.Burkard* によるチタン酸ストロンチウム  $\text{SrTiO}_3$  の誘電率の測定のみである。量子ゆらぎの物理的な特性(ダイナミクス)は未知であり、さらにどのような機構によって強誘電性秩序形成が抑制されるか(結合機構)についても未知である。本研究では1999年の *Itoh* らによる酸素同位元素置換効果に着目し、空間コヒーレンシをもつ量子ゆらぎのダイナミクスを解明する。

### 2. 研究の目的

本研究では強誘電性自発分極の発生という秩序の形成に競合してそれを乱す、空間コヒーレンシをもつ量子ゆらぎのダイナミクスを解明する。そのため、量子ゆらぎとフォノンの結合機構を通じて、コヒーレント量子ゆらぎの振動数と波長の関係(量子ゆらぎの分散)および、強誘電性フォノンモードのソフト化過程から、強誘電性秩序形成と競合するコヒーレント量子ゆらぎのダイナミクスを明らかにする。

### 3. 研究の方法

広帯域—高分解能分光スペクトル観測装置を構築し、量子ゆらぎと結合する極性フォノンモードのスペクトルを観測することで、コヒーレント量子ゆらぎのダイナミクスを検出する。そのため、半導体単一モードレーザー(*Diabolo DPSS500-TYS* 型, *Innolight* 社製)を、スチールハニカム定盤上にタンデム型ファブリ・ペロー干渉計分光計(*JRS* 社製)と共に設置し、広帯域—高分解能分光スペクトル観測装置を構築した。その安定を保つために、ダイナミックバイブレーションアイソレーションシステムをコントロールユニットと組み合わせて応用した。極低温に試料を保持するためには、オクスフォードインスツルメンツ社製の極低温クライオスタット製作材料を購入し、*Heliox AC-V3He* 冷凍機ユニット *He3AC-Comp* 型を中心とした極低温光散乱クライオスタットを製作し、その中に設置した試料の温度を温度コントローラ *He3AC-ITC* 型で制御した。

### 4. これまでの研究成果

#### ◆広帯域—高分解能分光スペクトル観測装置の構築

半導体単一モードレーザーを光源とし、1台の実験定盤上に振動数分光法と時間分解分光法を相補的に組み合わせて構成した、

広帯域—高分解能分光スペクトル観測装置が完成した。それは、タンデム式ファブリ・ペロー干渉分光計により、振動数領域のスペクトルを観測し、その分解能以下の振動数領域に対しては、Impulsive Stimulated Thermal Scattering (ISBS)法を用いて時間領域で検出し、広帯域にわたるスペクトル観測が可能なシステムである。

#### ◆極低温光散乱クライオスタットの製作

前年度で設計されオクスフォードインストルメンツ社製の極低温クライオスタット製作材料から製作された極低温光散乱クライオスタットは、現在のところの最低到達温度とその保持時間は、280mK-100 時間が実現されており、ほぼ研究目的を達成するための条件を実現した。今後はスペクトルを観測しながら、入射光強度をパラメータとして、最適のスペクトルS/N比の得られる「最適条件」を求める予定である。

強誘電性秩序はブリルアンゾーンのΓ点で生じるので、観測されたスペクトルの物理起源解析のためには振動数の波数依存性（分散関係）が重要になる。図1は前年度において作成された分散関係測定用極低温光学クライオスタットである。これにより、「最適条件」で観測されたスペクトルを7種の波数ベクトルの大きさで観測でき、コヒーレント量子ゆらぎのダイナミクスを分散関係から解明する準備が完成した。



図1. 分散関係測定用極低温光散乱クライオスタット。5個の光学窓を備え、7種類の大きさの散乱ベクトルでの観測ができる。

#### ◆理論モデルの作成

フォノン間非線形結合に基づく自己無撞着場近似による酸素同位元素誘起強誘電性相転移の理論的研究から、相転移ダイナミクスにおける量子効果及び同位元素濃度による相転移温度の変化（相図）の定性的説明に成功した。

#### 5. これまでの進捗状況と今後の計画

前年度で分散関係を明らかにする用意ができ、これまで本課題は極めて順調に進展している。さらにコヒーレント量子ゆらぎ探索のための「最適条件」の探求は継続され、より有利なものを探る。理論面では第1原理計算を含んで理論の展開が開始され、実験結果を取り入れた新しいモデルが提案される。研究協力者間の協力体制は極めて密接かつ強力で、最終年度での完璧な新素励起補足に向けて一丸となって協力し、無意味な批判を反駁して新しい物理概念「量子フォノン」が示す研究分野を開拓する。

#### 6. これまでの発表論文等

（研究代表者は太字、研究分担者には下線）

1. “Ideal Soft Mode Type Quantum Phase Transition and Coexistence at Quantum Critical Point in  $^{18}\text{O}$ -exchanged  $\text{SrTiO}_3$ ”, H.Taniguchi, M.Itoh and **T.Yagi**, Phys. Rev. Lett. **99**,017602-1(2007).
2. “Light Scattering Study of the Phase Transition in Quantum Paraelectric Strontium Titanate”, **T.Yagi**, J. Korean Phys.Soc. **51**,798 (2007).
3. “Recent Topics on the Light Scattering Study of Ferroelectrics”, **T.Yagi**, Ferroelectrics, **355**,3 (2007).
4. “Demonstration of Perfect Softening of the Slater-Type Ferroelectric Mode on  $\text{SrTiO}_3$ ” M.Takesada, M.Itoh, A.Onodera and **T.Yagi**, Ferroelectrics, **346**,20 (2007).
5. “Perfect Softening of the Ferroelectric Mode in the Isotope-Exchanged Strontium Titanate of  $\text{SrTi}^{18}\text{O}_3$  Studied by Light Scattering”, M.Takesada, M.Itoh and **T.Yagi**;Phys. Rev. Lett. **96**,227602-1 (2006).
6. “Anomaly of Acoustic Phonon Mode in Ferroelectric Phase Transition of  $\text{SrTi}^{18}\text{O}_3$ ”, M.Takesada, M. Itoh, A. Onodera and **T. Yagi**; Ferroelectrics, **337**, 1333 (2006).
7. “Precursory Softening of Polar Mode in Isotope-Exchanged Paraelectric Strontium Titanate Studied by Raman Scattering”, H.Taniguchi, M.Takesada, M.Itoh and **T.Yagi**; Ferroelectrics,**337**, 131 (2006).
8. “Soft Mode Dynamics in  $^{18}\text{O}$ -Exchanged  $\text{SrTiO}_3$  as Inhomogeneous System”, H.Taniguchi, M. Itoh, M. Takesada, and **T. Yagi**, Transactions of the Materials Research Society of Japan, **31**, 97 (2006).