

光によって創成される新物質相の探索

複雑系解析学講座 相原正樹

基礎科学と応用研究

- 量子力学が技術革新に果たした役割
 - ◆ 金属、絶縁体、半導体の特質(エネルギーバンド構造)
 - ◆ 磁性、超伝導(本質的に量子力学的現象)
 - ◆ 先端技術で用いる機能性材料の特性は量子効果により発現
- 相転移とデバイス
 - ◆ 多数の粒子が関与する協力現象
 - 固体・液体・気体間の転移、強磁性、強誘電性、金属絶縁体転移、超伝導、レーザー発振、など
 - ◆ 記憶素子は相転移を利用
 - ◆ メゾスコピック系での相転移

量子力学と物質科学

- ◆ 金属、絶縁体、半導体の特質は、電子の量力学的振舞いによる
- ◆ 機能性物質の特性の多くは量子効果により発現
- ◆ 磁性、超伝導、レーザ発振などの興味ある重要な現象は量子効果そのもの

光と物質科学

- 光励起は、数万度の熱エネルギーに相当
- 電子状態の大きな変化と新物質相の出現
(光による物性の制御)
- フェムト秒パルスによる超高速現象と多くの情報量操作

日本には光物質科学を系統的に教育・研究する機関が少ない。
しかし、「光誘起相転移」の研究では日本は世界をリードしている。

光誘起相転移

光を照射することにより物質相が急激に変化する現象

- ◆ 絶縁体・金属転移、常磁性・強磁性転移、超伝導転移
- ◆ 強い電子間相互作用を有する物質(強相関電子系)において主に発現

熱による相転移との違いと特徴:

- ◆ わずかな光子数でマクロな領域の物質状態が変化
- ◆ 高感度な非線形応答
- ◆ フェムト秒領域での超高速応答
 - 従来のCD/DVDなどは、光誘起相転移を用いていないので低速

強相関電子材料

■ 強い電子間の相互作用により、電子が集団的に振舞う

◆ 従来のバンド理論では説明できない特異な性質

■ モット絶縁体

◆ エネルギーバンドが電子で半分詰った状態が絶縁体！

■ 高温超伝導

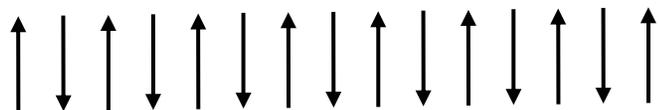
◆ モット絶縁体に電荷をドーブ

◆ 1986年にLa-Ba-Cu-O系において最初に発見

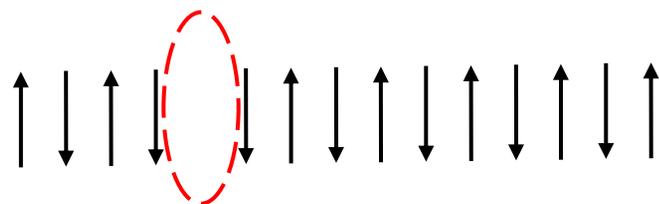
◆ 転移温度は、水銀系銅酸化物で135 K(高圧下では164K)

未だに解決していない難問！ 統一的解釈は得られていない。

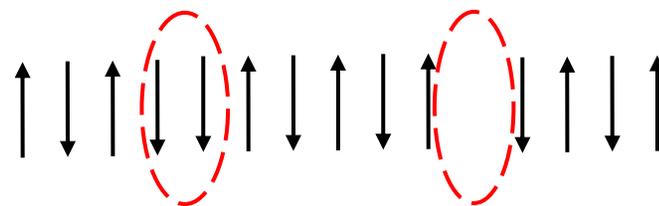
強相関電子系における高温超伝導



半強磁性状態 (モット絶縁体)



ホール・ドーピング



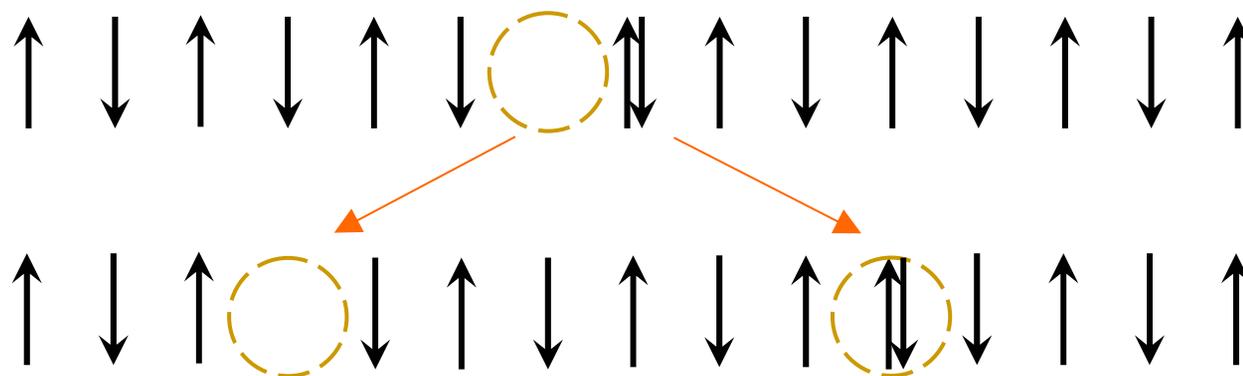
スピノンとホロンの生成
(スピンと電荷の自由度が分離)

スピン

ホロン

ホロンはボーズ粒子(スピンのゼロ)の性質を持つホール
ホロンのボーズ凝縮 超伝導

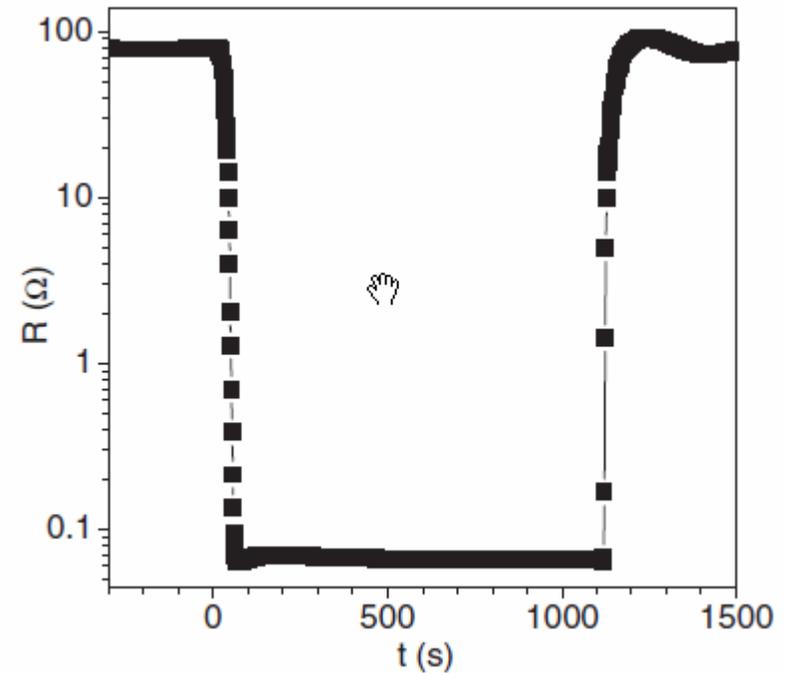
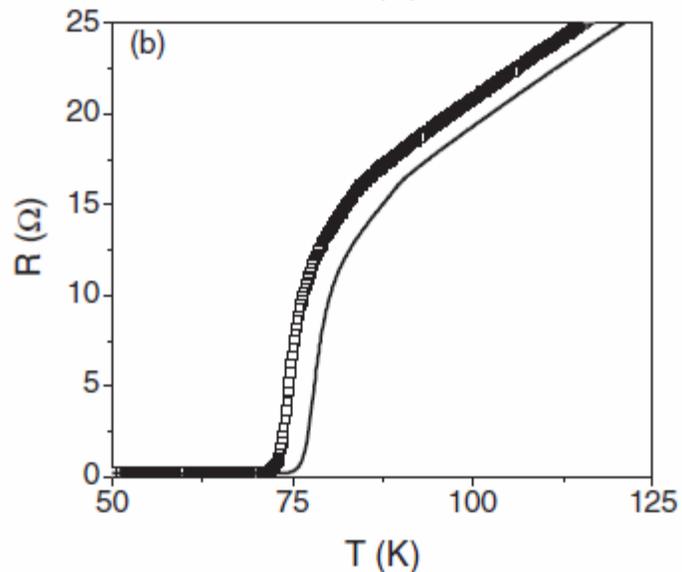
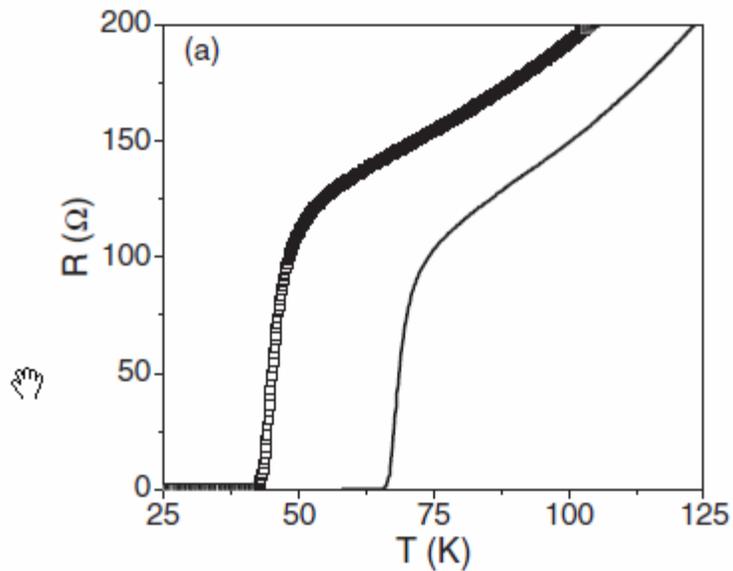
光励起された強相関電子系



ホロン
(電荷 +e; スピン 0)

ダブロン
(電荷 +e; スピン 0)

光誘起超伝導の実験

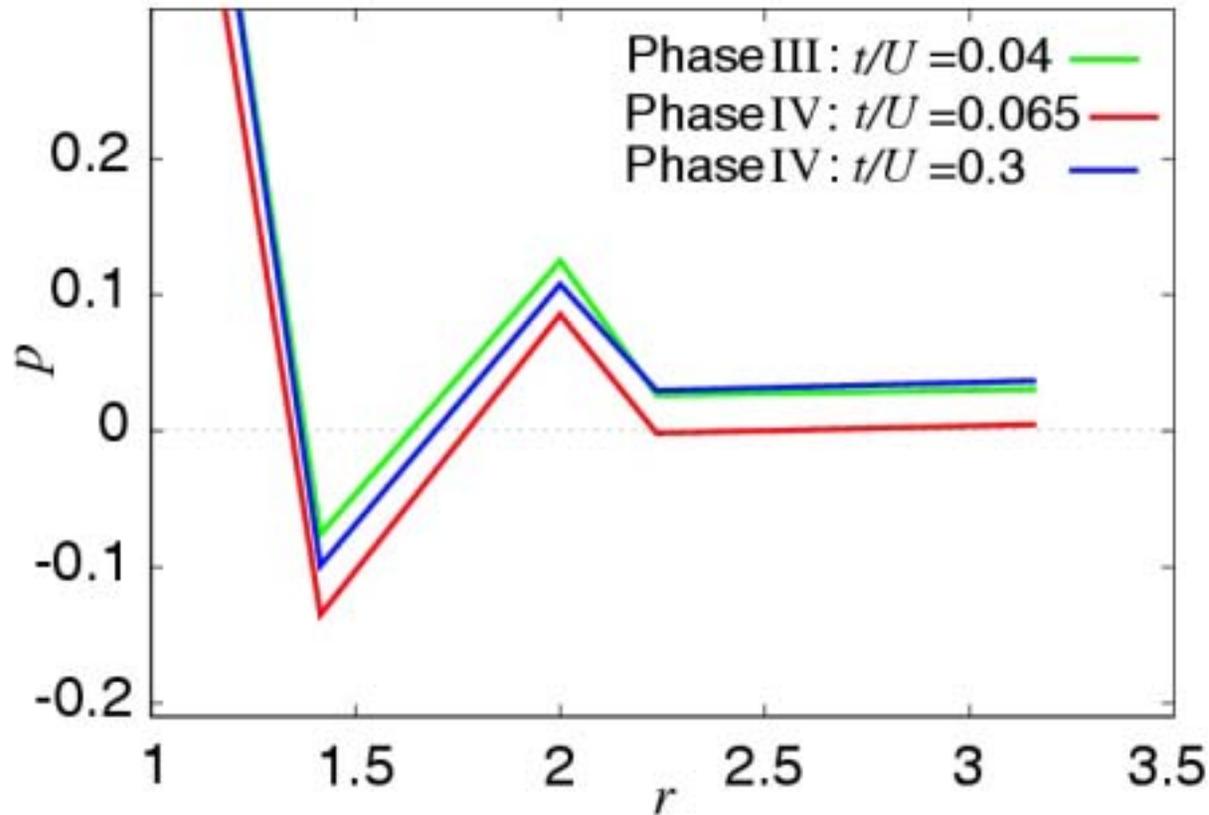


Interfacially Controlled Transient Photoinduced Superconductivity,
V. Pen, T. Gredig, J. Santamaria, and Ivan. K. Schuller, Phys. Rev. Lett. **97**, 177005(2006).

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.7}/\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$

光誘起超伝導の理論

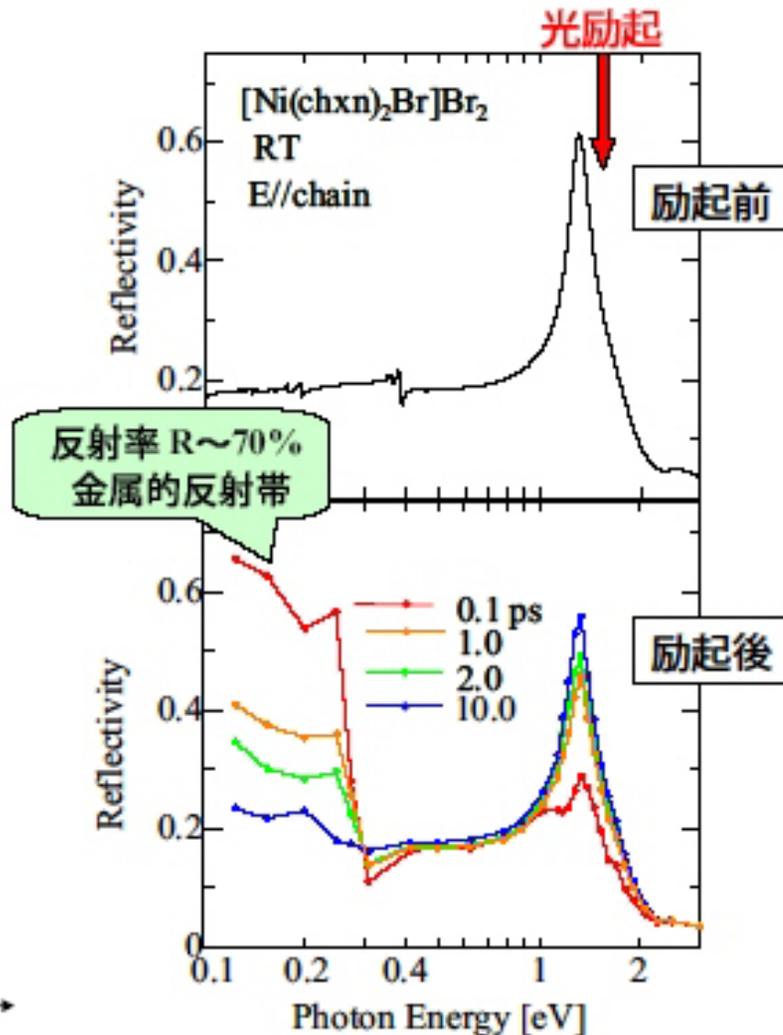
超伝導相関関数



U : 同一サイト上で
の電子間クーロン相
相互作用エネルギー

t : 電子のサイト間
移動エネルギー

光誘起絶縁体金属転移ーモット転移 (実験)



Ultrafast optical switching to a metallic state by photoinduced Mott transition in a halogen-bridged nickel-chain compound

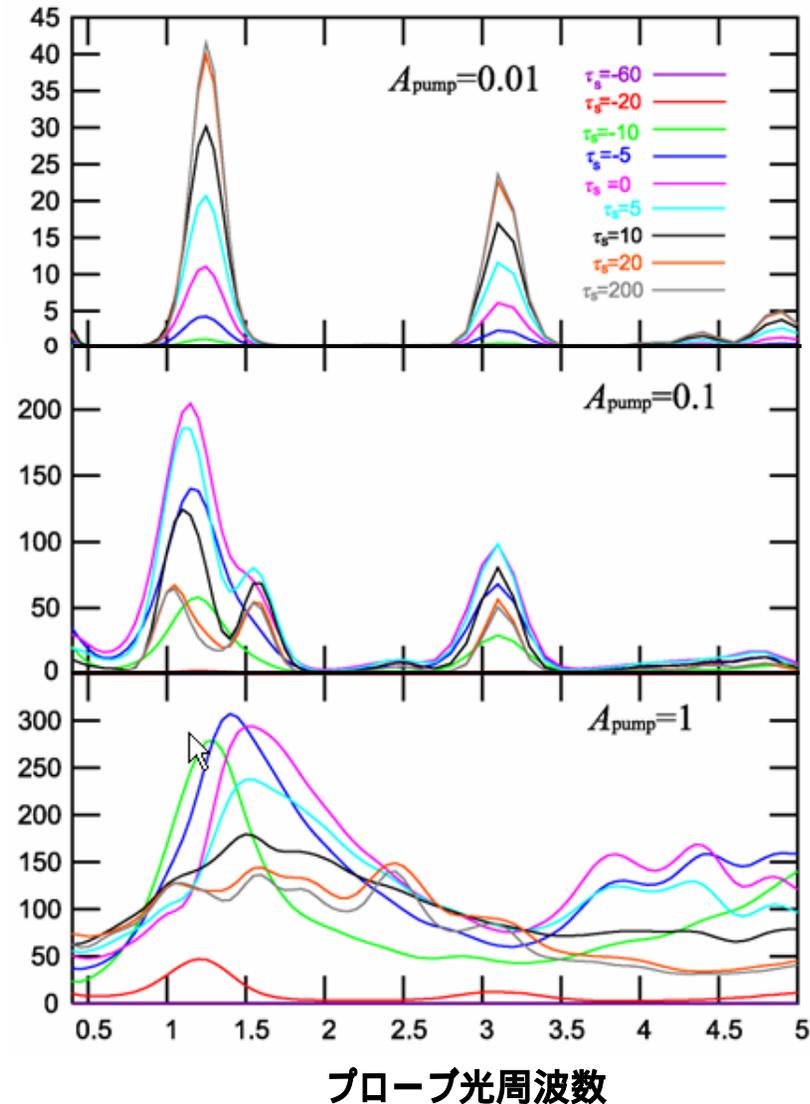
S. Iwai, M. Ono, A. Maeda, H. Matsuzaki, H. Okamoto, Y. Tokura, Phys. Rev. Lett. **91**, 57401(2003).

光誘起絶縁体金属転移 - モット転移 (理論)

ポンプ・プローブ分光

ポンプ光により物質の状態を変化させ、それをプローブ光のスペクトル形状でモニターする

強励起では、低周波側に金属相を示す連続スペクトル



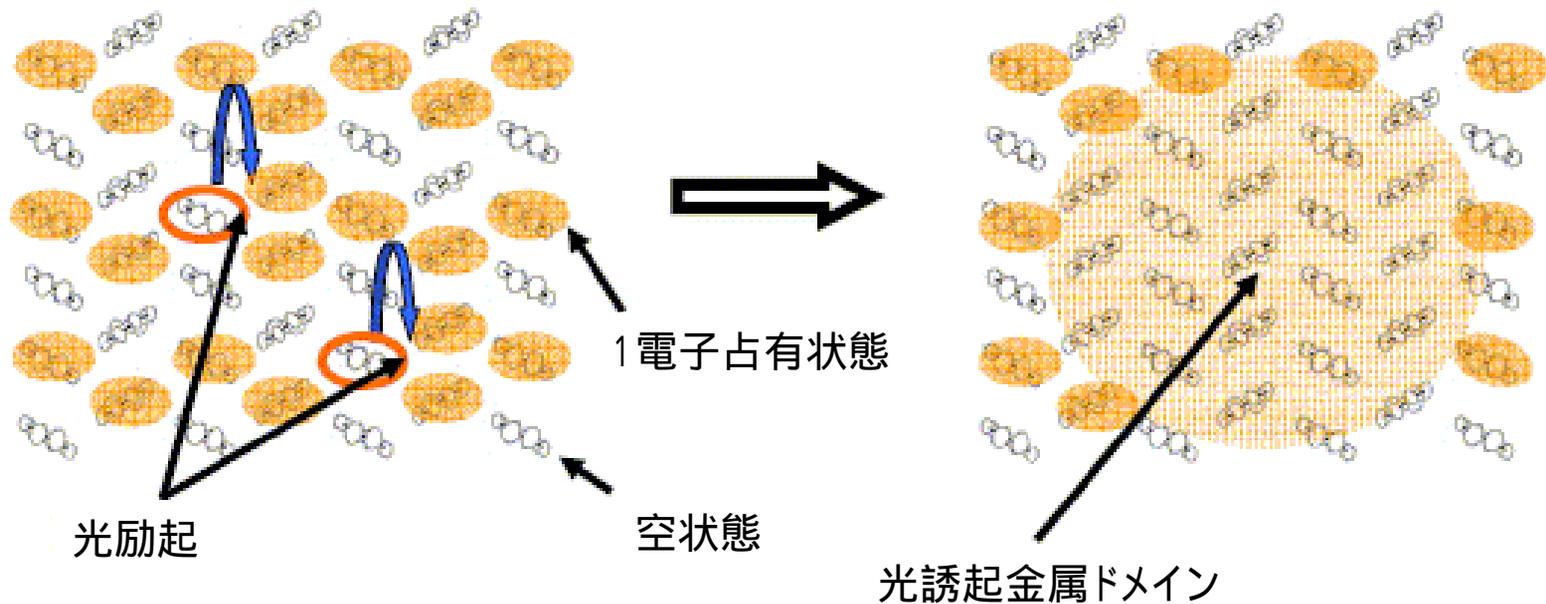
弱励起

強励起

光誘起絶縁体金属転移 — 電荷秩序転移 (実験)

$\frac{1}{4}$ 充填の2次元電子系

クーロン相互作用により電荷が整列 (電荷秩序)

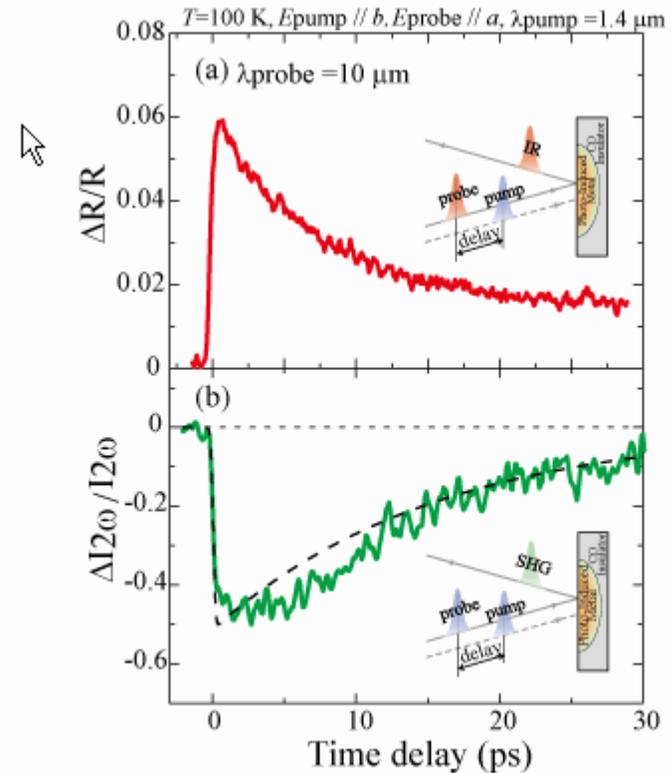




電子間のクーロン相互作用に起因する
強誘電体

従来の強誘電体と異なり格子変位(原子核
位置の変位)を伴わないので、超高速な相
転移

超短光パルスにより生成された第2高調波
を観測することにより実験的に検証



K. Yamamoto, S. Iwai, S. Boyko, A. Kashiwazaki,
F. Hiramatsu, C. Okabe, N. Nishi, and K. Yakushi,
J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 074709(2008).

最後に

- 量子相転移を用いた未来の超高速光デバイスへの可能性
光誘起相転移は超高速超高感度
(現状では未だ熱変化を利用しているに過ぎない)
- 量子デバイスの進展
量子情報処理： 量子暗号通信、量子コンピュータなど
- 良い基礎研究は、長い目で見れば人類に幸福に寄与
- 日本でも、欧米に比並みに基礎研究への投資を期待
自然科学を人類の財産と考える文化