

「銅酸化物超伝導体に於ける スピン渦とループ電流」

小泉 裕康(数理物質科学研究科物性・分子工学専攻)



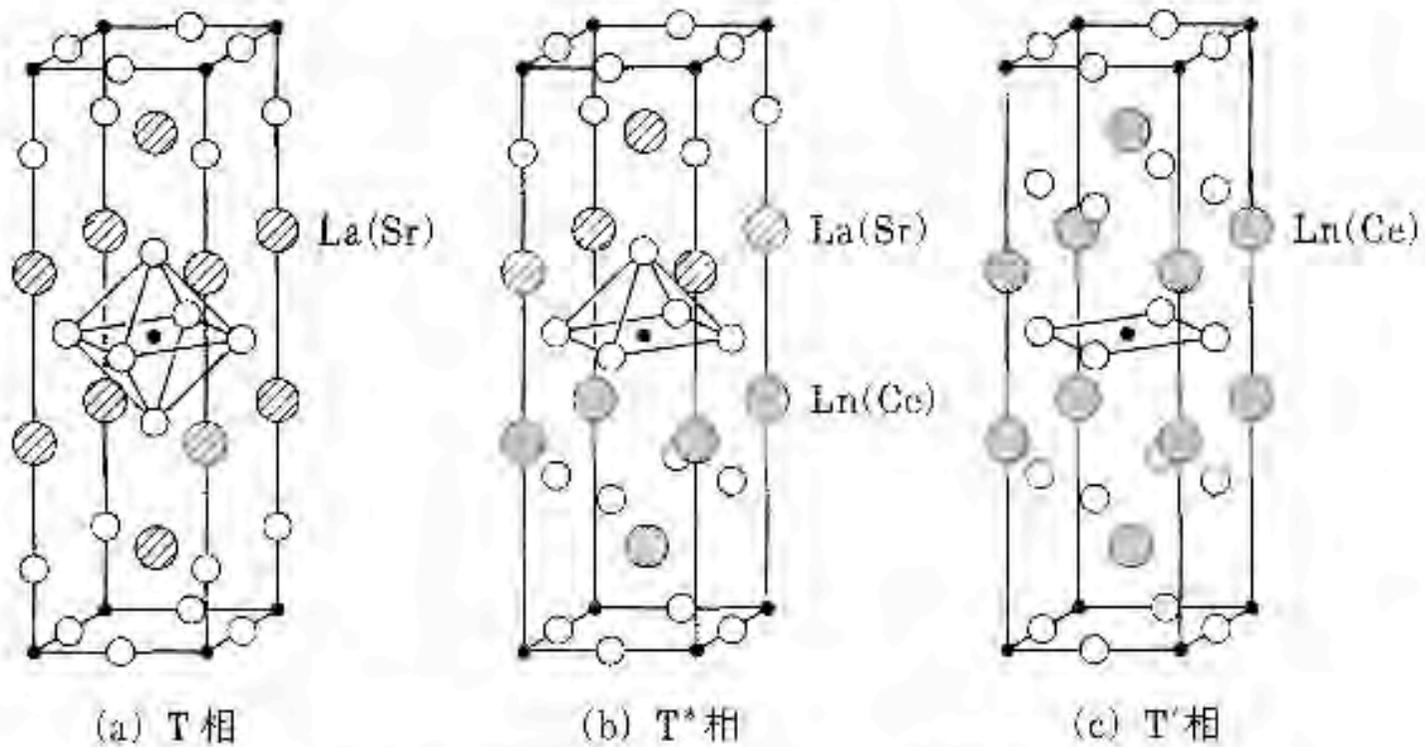
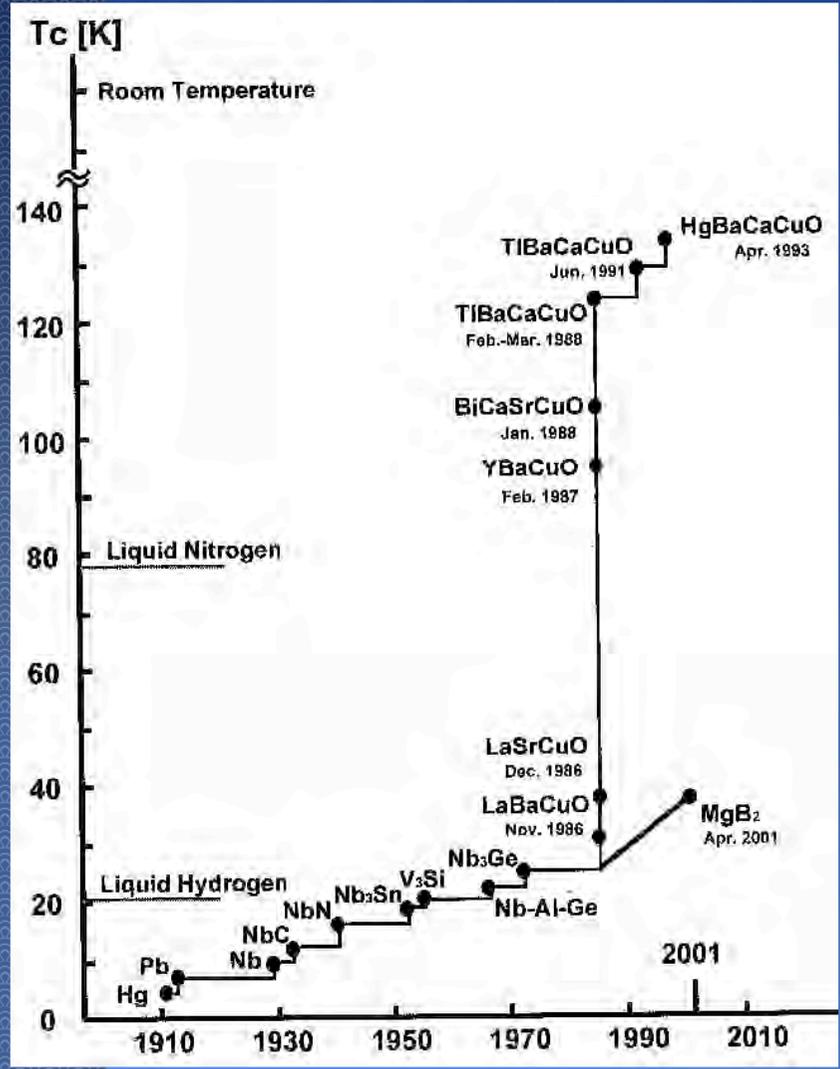


图 2.5 单层 CuO_2 面をもつ Ln_2CuO_4 構造

(a) T相(La_2CuO_4), (b) T*相($(\text{La}, \text{Sr})(\text{Ln}, \text{Ce})\text{CuO}_4$), (c) T'相(Nd_2CuO_4)



◀ 前頁 **超電導技術** 次頁 ▶

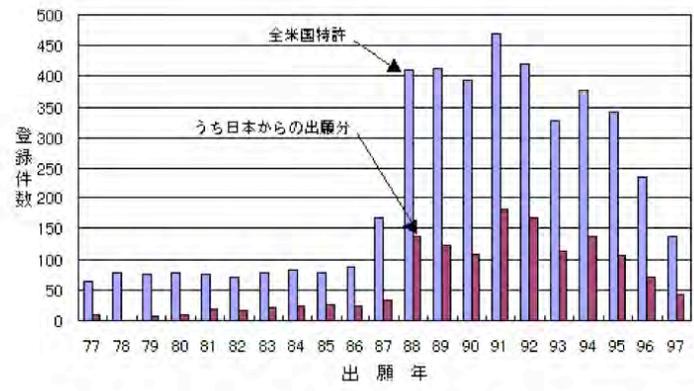
1.5 米国特許の分析

1.5.1 米国特許の登録件数推移

米国での特許登録件数を出願日を基準としてその推移を図1.5.1-1に示す。1977~97年までの総件数は4,461件で、そのうち1987年以降のものが約3,700件を占めている点、米国でも高温超電導材発見以降に開発が加速されている様子が分かる。なお、4,461件中の日本からの出願は1,372件で、約30%を占めている。

米国特許の登録件数推移を図1.1.2-1の日本の特許出願件数の推移と対比してみると、日本は1987年をピークに大量の出願があり、以降1988年、89年と激減しているのに対して、米国特許は1988年から増加し92年まではほぼ横ばいの件数推移となっている。また出願のピークを1991年に迎えており、これは日本のピークの年と比べて4年の遅れとなっている。

図1.5.1-1 超電導技術の米国特許の登録件数推移
(CLAIMS/U.S.Patentによる検索)
米国特許件数 4,461件うち日本出願分 1,372件



【平成19年11月 8日】

■ 超伝導送電システムについてヒアリング 国家戦略本部

国家戦略本部は8日、冷却装置大手の前川製作所（本社・東京都江東区）の前川正専務取締役らから直流超伝導送電システムについて意見を聞いた。それによると、現状の送電システムの主流である交流送電は、ケーブルで1000km送電すると約3分の1の電力を損失するのに対し、直流超伝導送電システムでは損失がゼロになり長距離送電を行えるという。また、日本列島を背骨のように縦断する基幹送電線を直流超伝導送電に変え、北海道、東北、東京など全国9ブロックそれぞれに円形に直流超伝導ケーブルを構築し、そこから家庭やオフィス、工場に接続し、電力を供給するとの導入イメージを説明。原発を消費地から離れた場所に立地でき、災害リスクを減らせるほか、発電力の小さい太陽光や風力、水力などの自然エネルギー発電の促進にもつながるとのメリットを強調した。議員からは「こういうシステム型の技術が日本から出てきている。技術者を助けるために政治の世界から何ができるか」などの質問が出された。同本部は今後、国家戦略を練っていく上で先端技術の活用が不可欠との考えから、今後も先端技術のヒアリングを行っていく方針。

サハリンからの送電プロジェクト

シベリア原油パイプライン構想

サハリンから原油・天然ガスを
パイプラインで日本に輸送



システムの小型化
地球環境への負担低減

直流超伝導技術で実現

採掘地(サハリン)で発電し
直流超伝導送電で日本へ輸出

パイプ径比較

160A



直流超伝導送電用配管



30inch

原油・天然ガス用配管



【平成19年11月21日】

■ リチウム電池の将来展望について有識者からヒアリング 国家戦略本部

国家戦略本部は21日、リチウム電池と太陽光発電の将来展望について慶応義塾大学大学院の吉田博一教授から意見を聞いた。リチウムイオン電池は充電して繰り返し使用できる二次電池でエネルギー密度が高いことが特徴。吉田教授は「四国の3分の1の面積に太陽電池を設置すれば、日本の全電力量をまかなえ、リチウムイオン電池との併用で夜間も電力を使用できる」と述べ、将来有効なエネルギー資源になるとの見解を示した。また、環境にやさしく資源枯渇の心配がないことから、大型リチウムイオン電池を家庭に導入できるよう規制を緩和するべきだとの考えを示した。

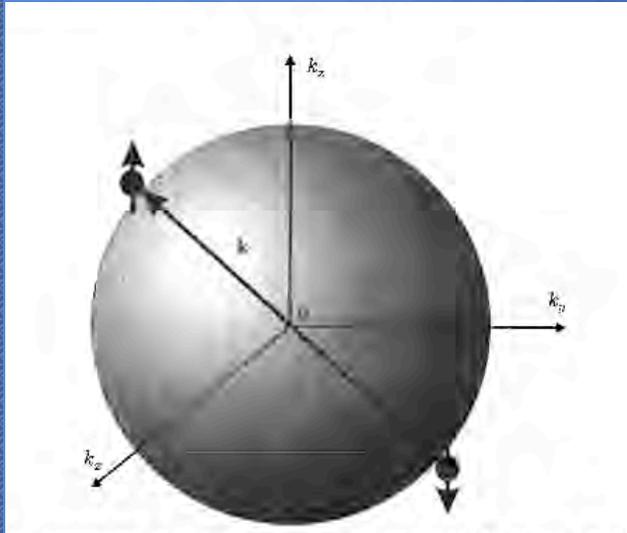
これまでの超伝導理論 (BCS理論)

- ◇ バンド理論に基づいている
平均場の中の1電子描像が良い

$$H\psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = \varepsilon_n(\mathbf{k})\psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$$

$$\text{Bloch Function } \psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}}$$

$$u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r} + \mathbf{a}) = u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$$



$$|\Psi_{BCS}\rangle = \prod_{\mathbf{k}} (u_{\mathbf{k}} + v_{\mathbf{k}}c_{\mathbf{k}\uparrow}^{\dagger}c_{-\mathbf{k}\downarrow}^{\dagger})|vac\rangle$$

$$\Delta = - \sum_{\mathbf{k}} V \langle c_{\mathbf{k}\uparrow}^{\dagger}c_{-\mathbf{k}\downarrow}^{\dagger} \rangle = |\Delta|e^{i\varphi}$$

銅酸化物超伝導の難しさ

- ◇ 1. 常伝導状態の電気伝導に通常のブロッホ電子に基づく電気伝導理論が使えない。
- ◇ 2. 電子相関が非常に強い。
- ◇ 3. ドープしたホールと格子の相互作用が非常に強い。

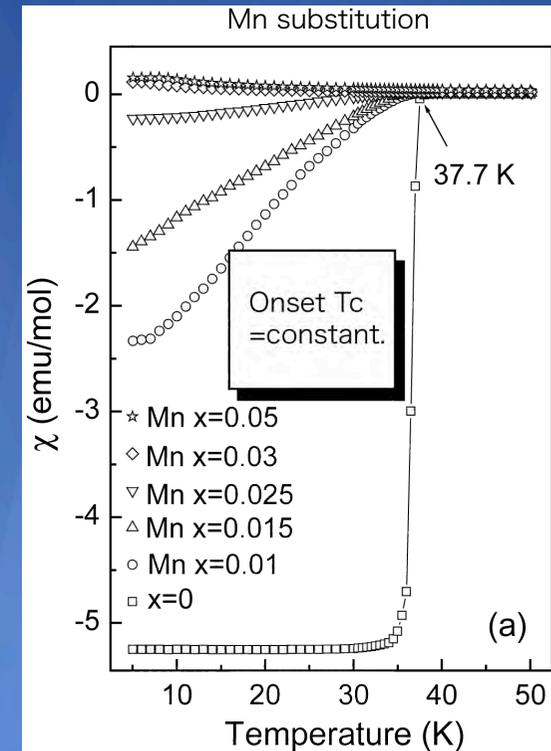
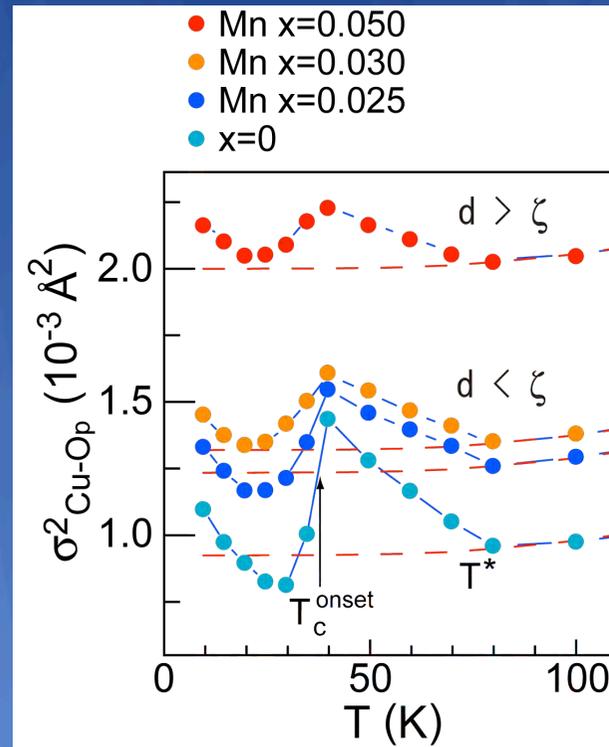
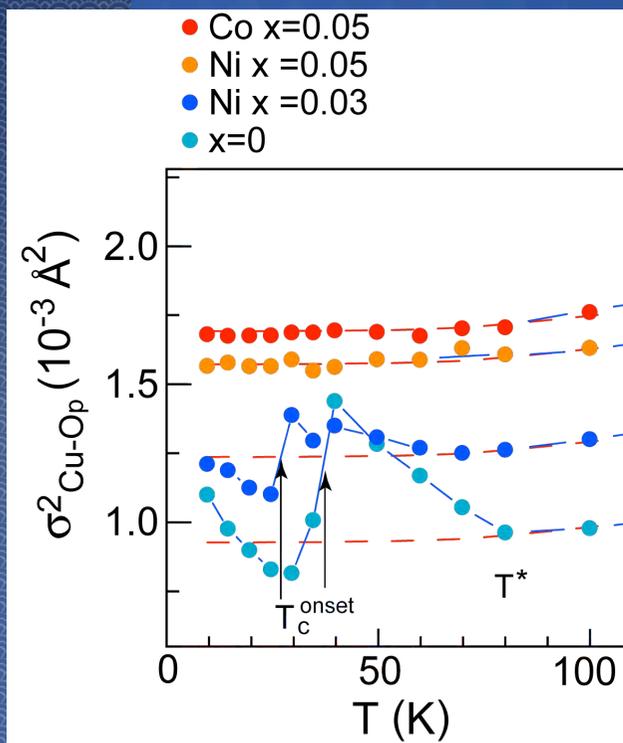
本研究の最終目標

- ◆ 1. 超伝導の出現、転移温度を精度よく予言する理論の構築とそれに基づく計算方法、計算プログラムの開発

現段階

- ◆ 1. 現在の超伝導理論は不完全である。
- ◆ 2. ab initio 計算可能な理論の構築とその応用として銅酸化物超伝導の機構解明、転移温度の高精度計算を目指している。

La_{2-x}Sr_xCu_{1-y}M_yO₄ (x=0.15、y<0.05) のCu-O結合長の平均2乗相対変位と磁化率の温度変化

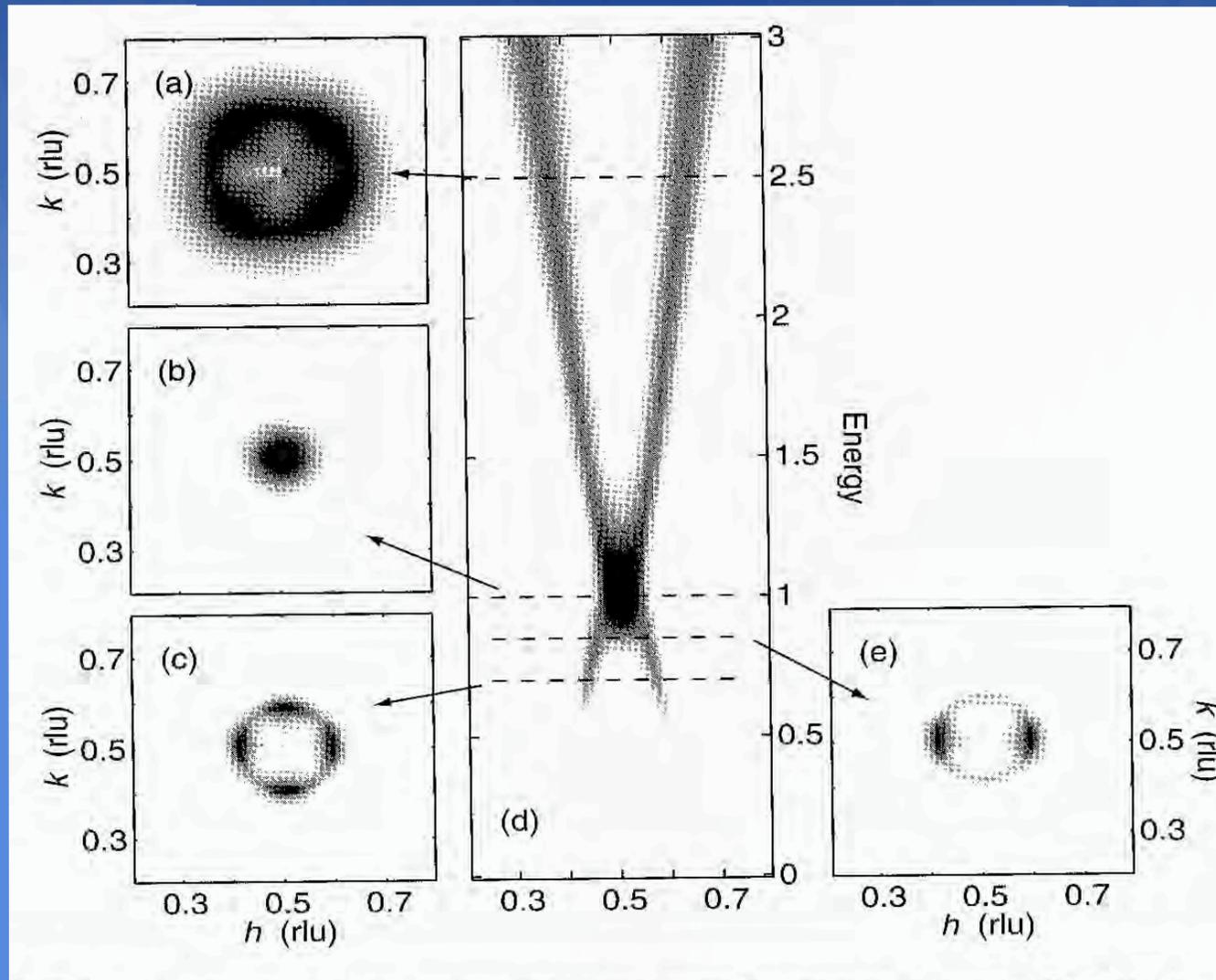


格子変形と超伝導が直接関係している

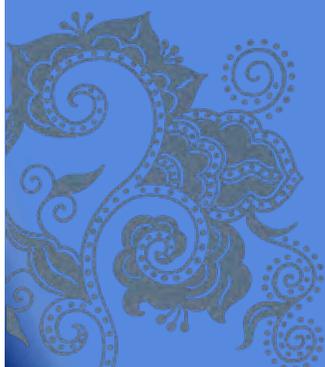
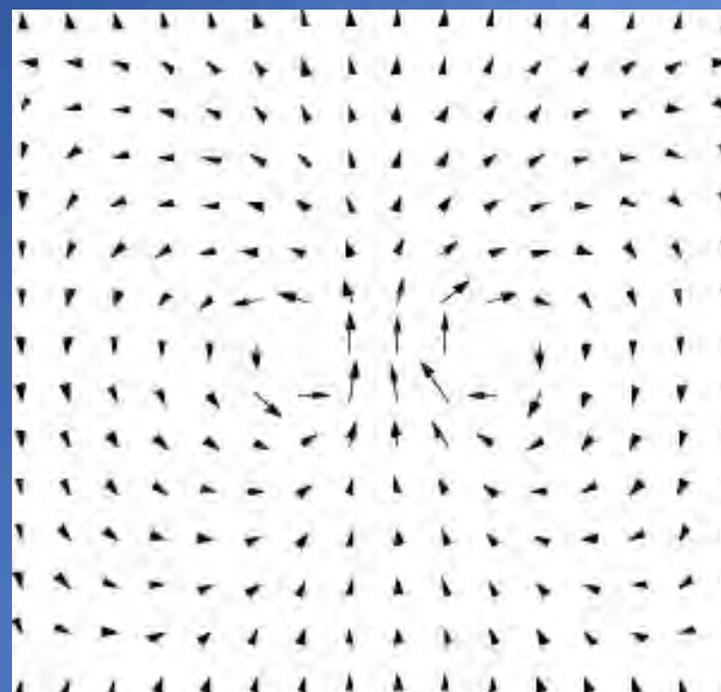
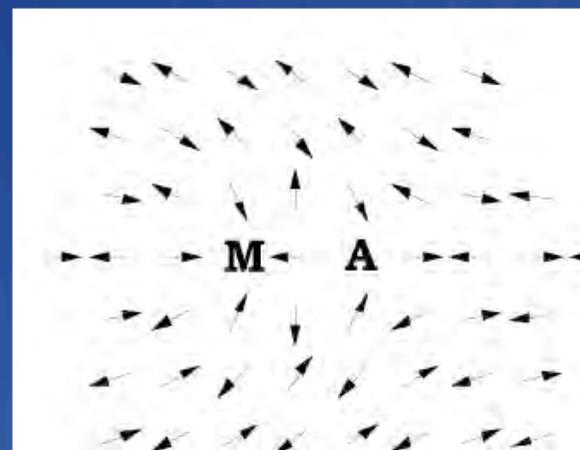
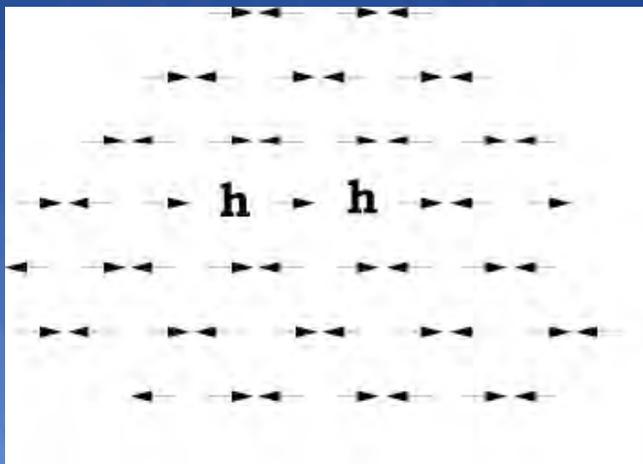
C. J. Zhang and H. Oyanagi, Phys. Rev. B (2009) in press.

砂時計型のスピン波の励起スペクトル

局所的にはホールをドーピングした後も反強磁性秩序がある。



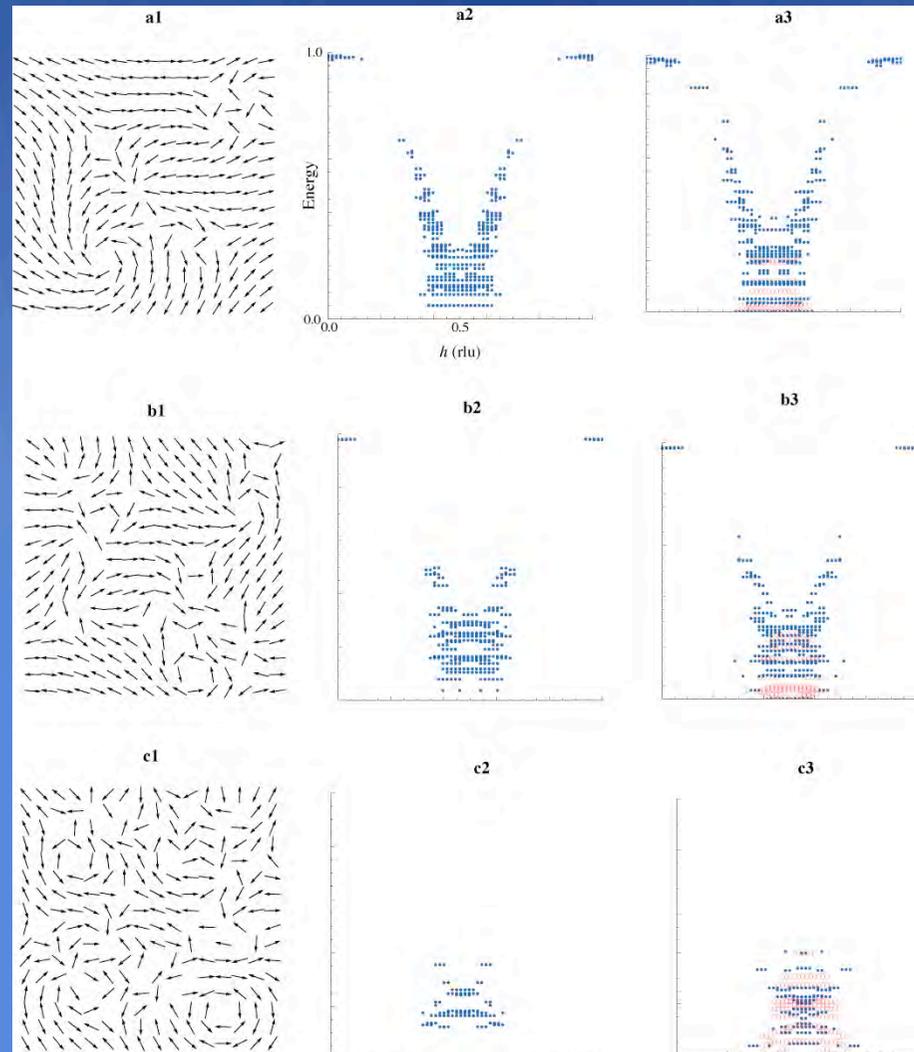
スピン渦の生成による永久電流の生成



スピン渦モデル

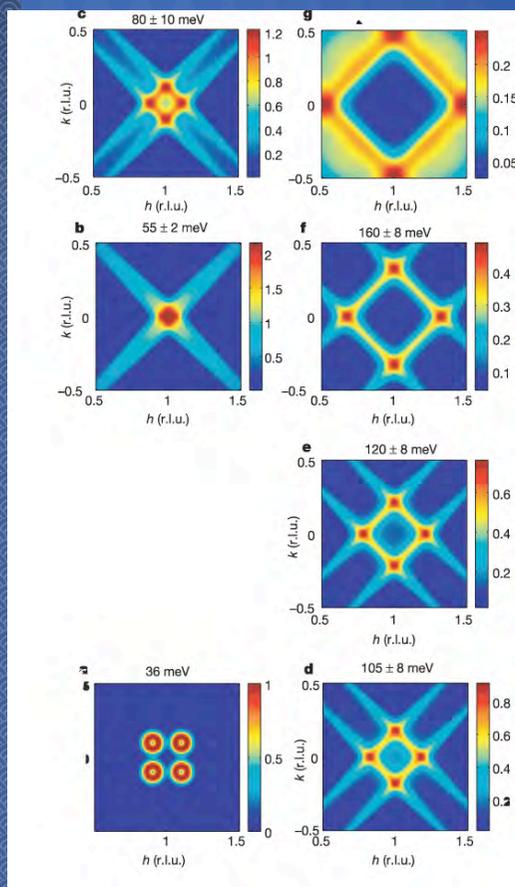
H. Koizumi, J. Phys. Soc. Jpn. 77, 104704 (2008).

スモールポーラロンとなったホールを中心にスピン渦が形成される

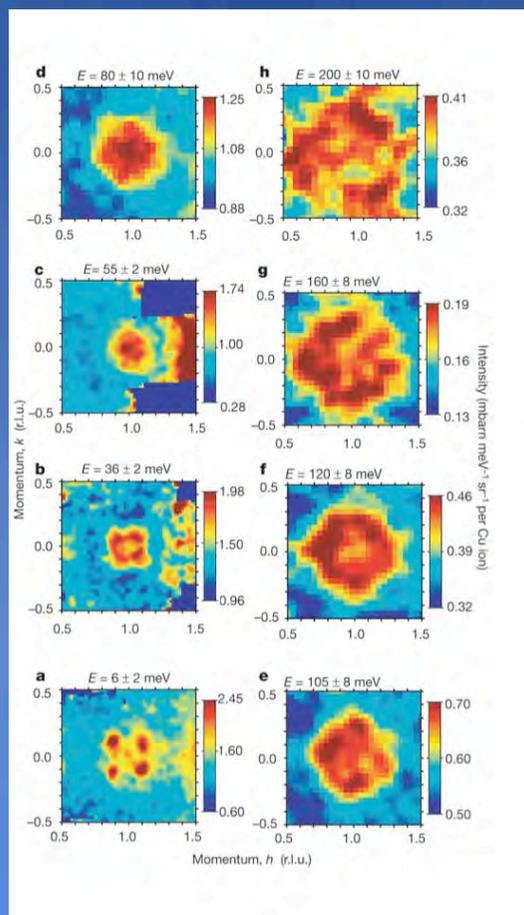


ストライプ vs 渦

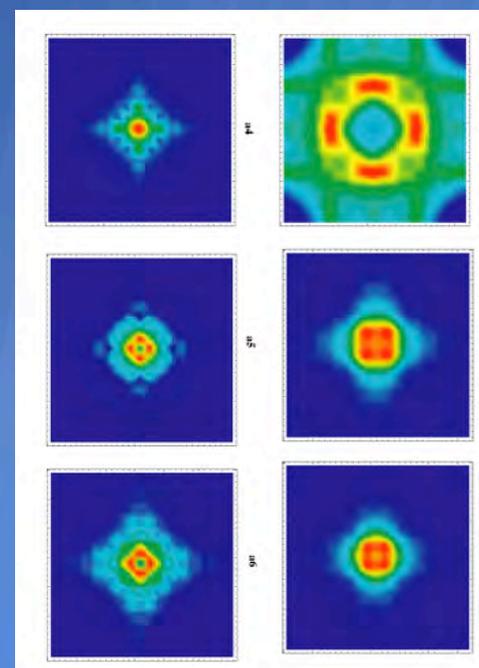
理論 (ストライプ)



実験



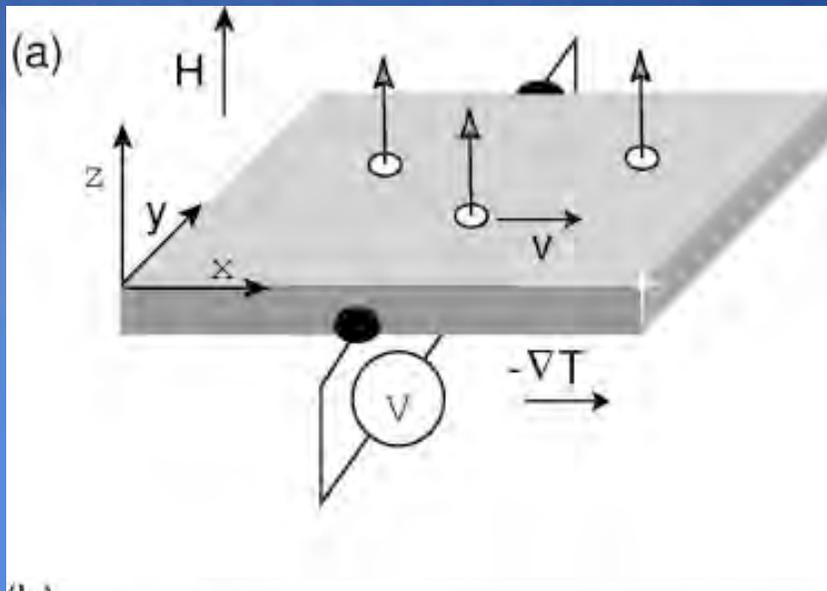
理論 (渦)





ループ電流は本当に存在するのか？

第三の謎：擬ギャップ相で見られる巨大なネルンスト効果



Y. Wang et al., PRB 64 (2001) 224519

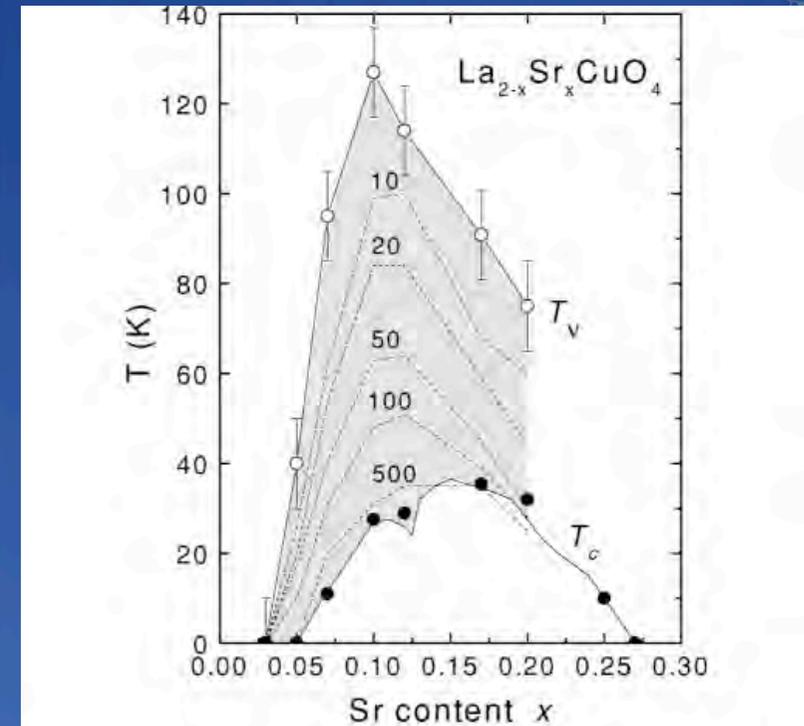
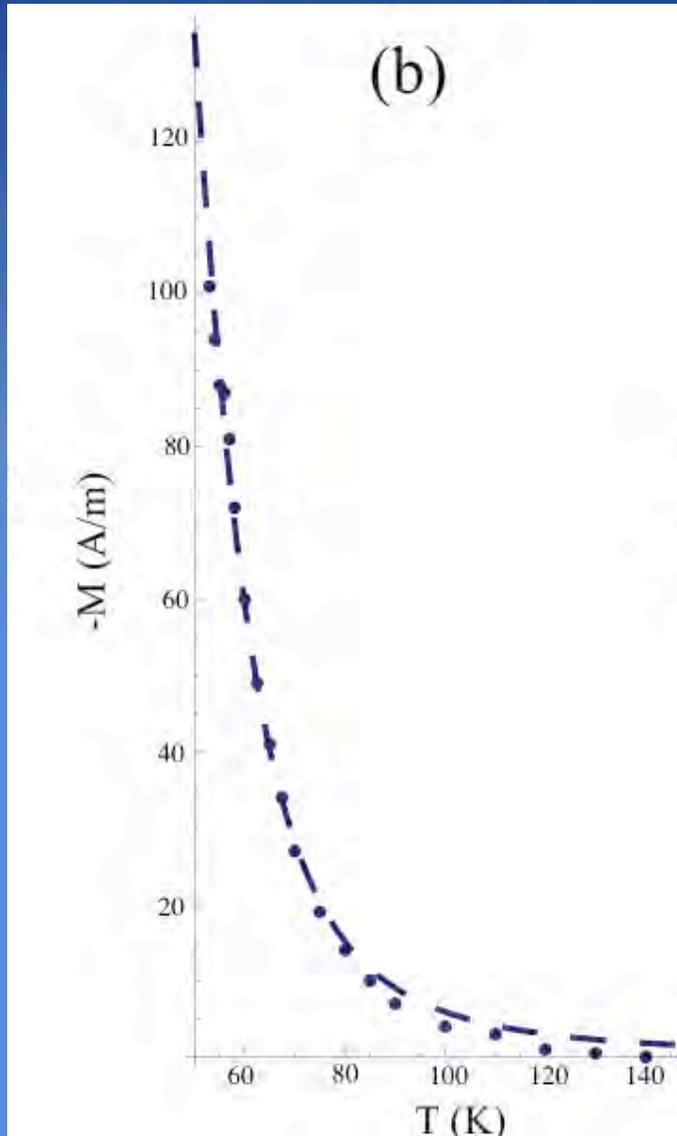
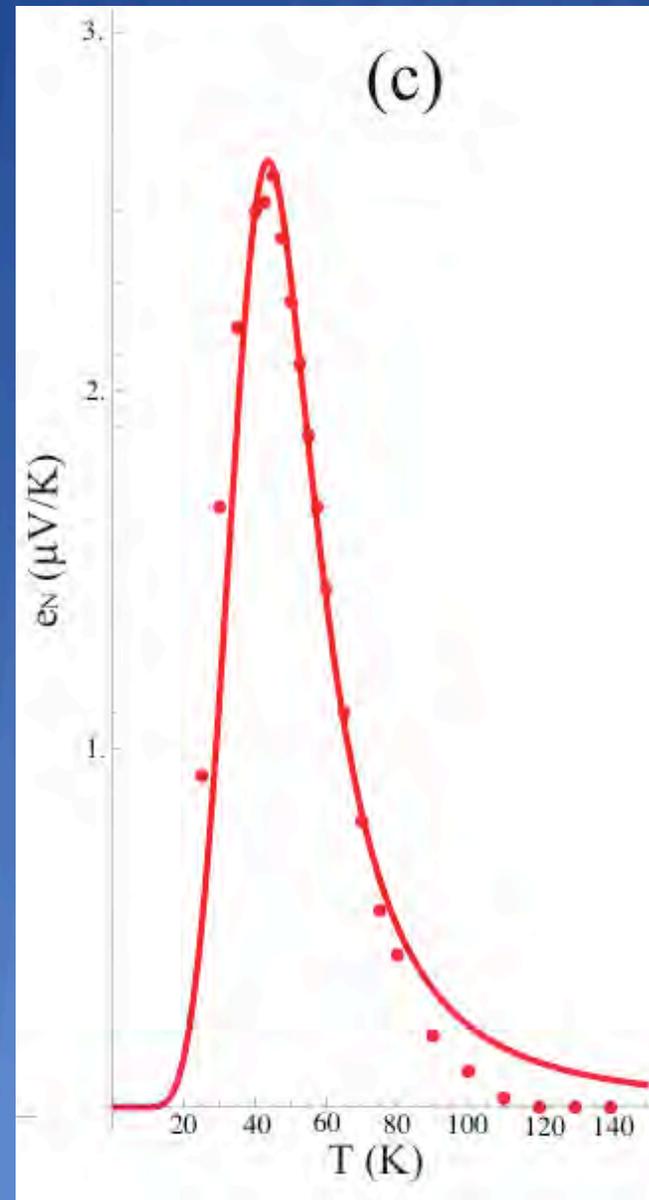


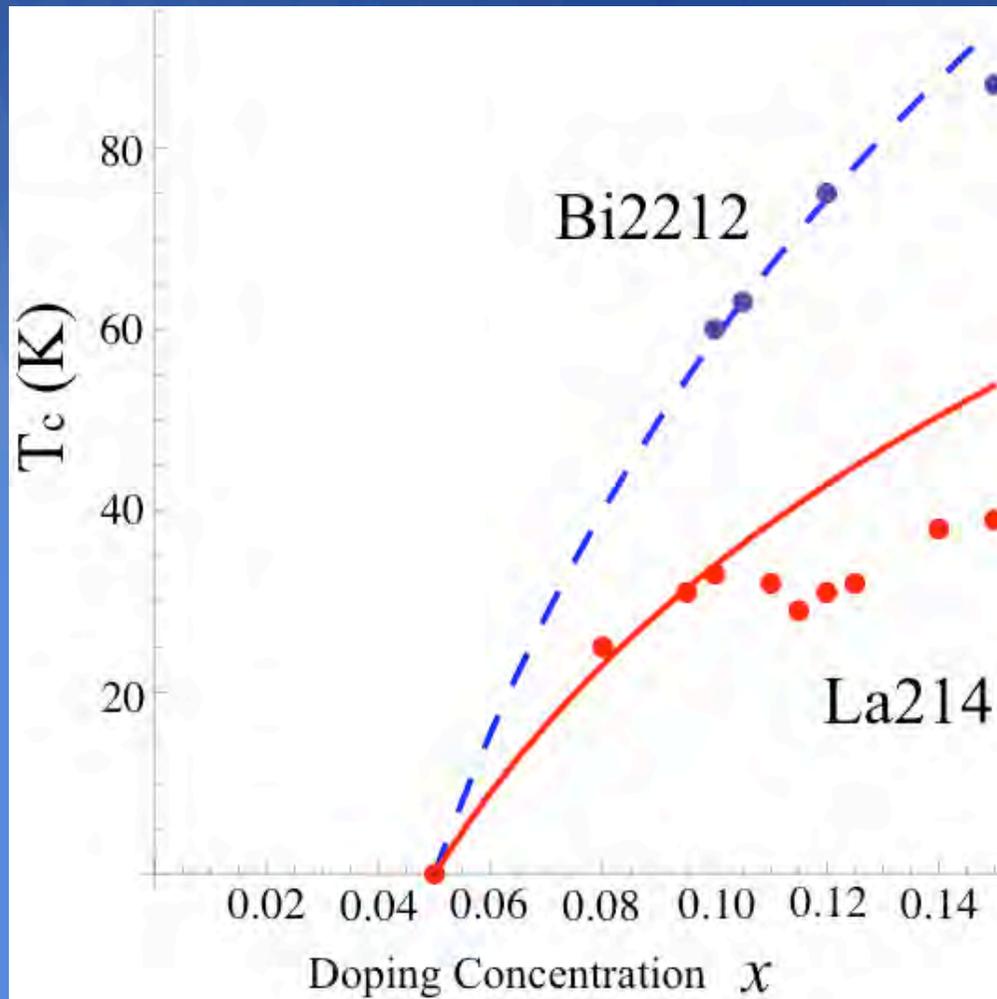
FIG. 9. The x dependence of T_v and the contours of the vortex-like Nernst signal in LSCO. For the very underdoped samples L1–L3, T_v is determined from α_{xy} as explained in the text. For L1–L3, the numbers by the contour lines refer to the magnitude of $\alpha_{xy}^s/\sigma B$ derived from Fig. 4. For samples with $x > 0.07$, we have used the procedure of Xu *et al.* (Ref. 7) to determine T_v (the contour values are then the magnitudes of $v - v_N$). Data for the two samples with $x = 0.10$ and 0.17 are taken from Xu *et al.*

$$-M \propto n_m = \frac{c_1}{1 + c_2 T e^{-W_p / k_B T}}$$



$$e_N = \frac{c_3 T^{-1} e^{-0.5 W_p / k_B T}}{1 + c_2 T e^{-W_p / k_B T}}$$

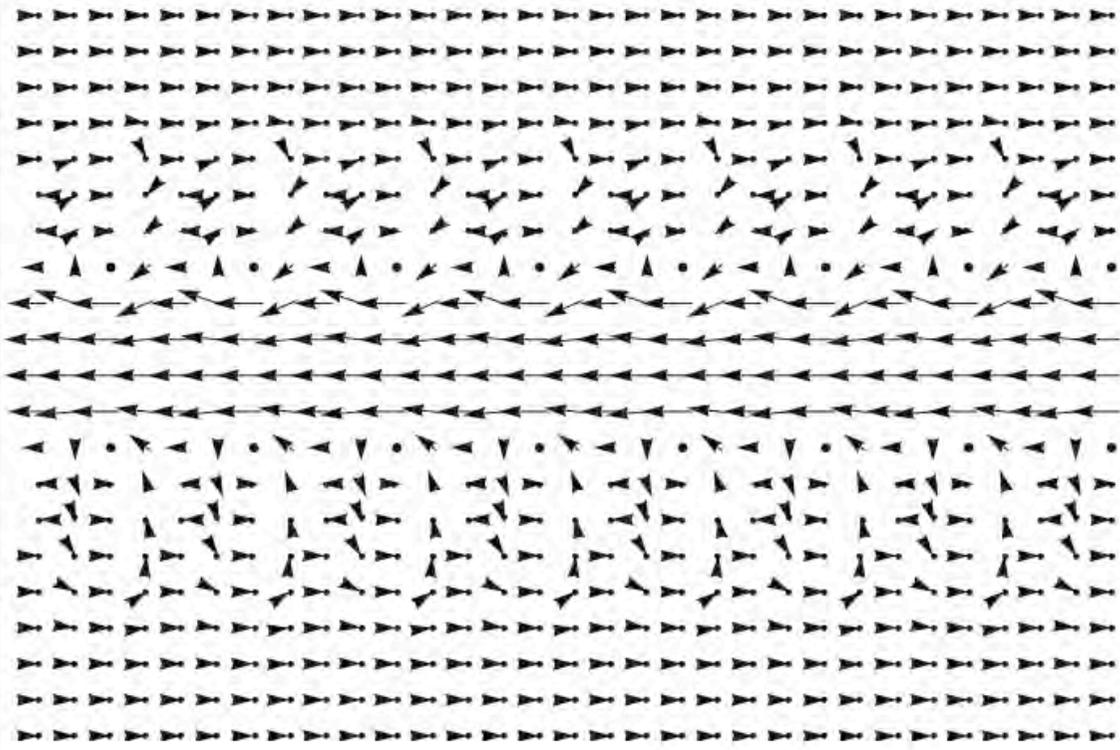




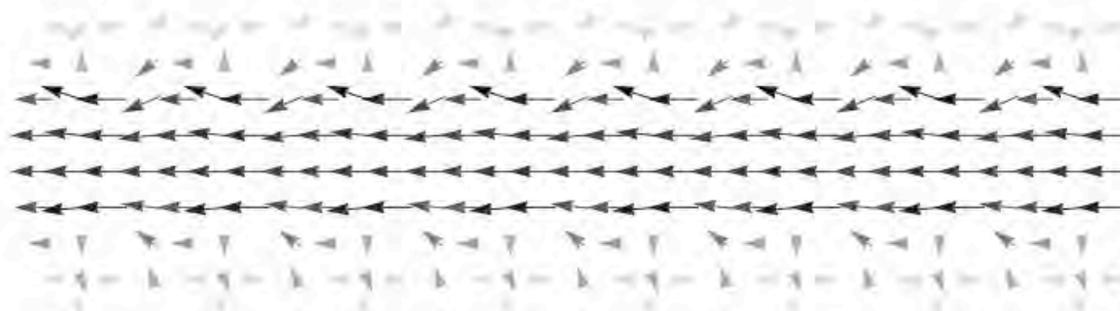
$$T_c = T_0 \ln \frac{x}{x_0}$$



(a)



(b)



まとめ

1. ドープされたホールは強いホール・格子相互作用によりスモールポーラロンになる。
2. ホールを中心としてスピン渦ができるとすると、ベリー位相の効果により、ホールの回りにループ電流が出来る。
3. スピン渦は、中性子線散乱の砂時計型磁気励起分散と光学伝導度のドゥルーデ様のピークを説明する。
4. ホールの回りのループ電流はネルンスト効果の実験で観測された、巨大なネルンスト信号を説明する。
5. ホールの回りのループ電流がコヒーレントになった状態が、低ドープ領域での超伝導電流である可能性がある。これは、超伝導転移温度のドープ量依存性を説明する。
6. 転移温度を上げる為には、スピン渦の安定性を高めれば良いことが示唆される。ナノテクノロジーを使い人工的なナノ構造を構築することにより、常温超伝導が可能になるかもしれない。