

空間反転対称性の破れた超伝導体の 渦糸状態における解析的理論

Analytical theory of electronic states around
a vortex core in a noncentrosymmetric
superconductor

東大理
東大総合文化
ETH

永井佑紀
加藤雄介
林伸彦

Y. Nagai, Y. Kato and N. Hayashi: to be published in J. Phys. Soc. Jpn. **74** No.4 (2006)

渦糸コア近傍の準粒子束縛状態

磁場をかけた第二種超伝導体において

渦糸コアでギャップ0: 渦糸近傍に準粒子の束縛状態

渦糸コア近傍にはギャップの異方性を反映した電子状態密度分布が存在する。

運動量空間でのギャップの異方性が実空間に射影されている。

Scanning Tunneling Microscopy (STM)

NbSe₂ H. F. Hess et al.: Phys. Rev. Lett. **64** (1990) 2711

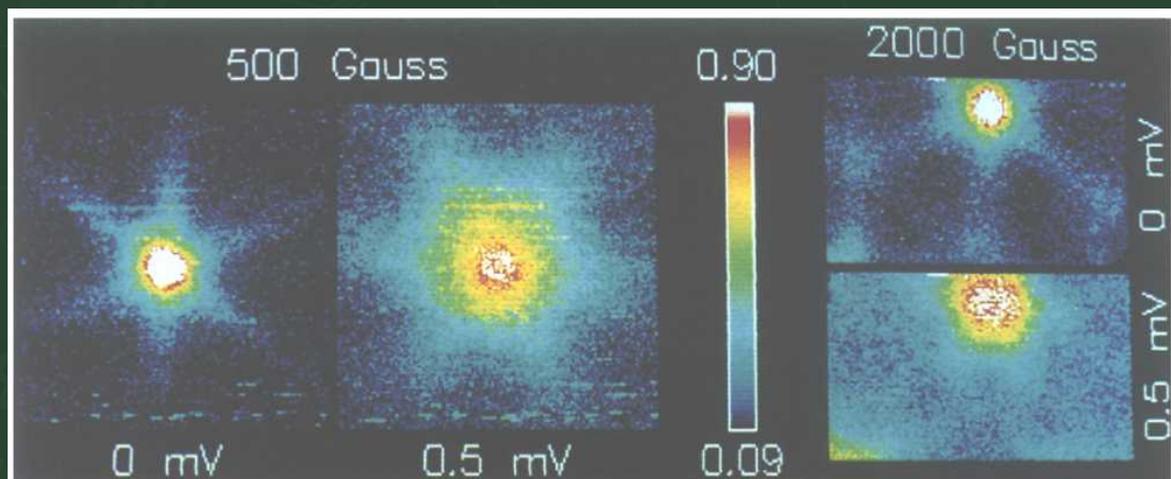


FIG. 4. Simultaneously taken XY images of $dI/dV(0 \text{ mV}, x, y)$ and $dI/dV(0.5 \text{ mV}, x, y)$ with $B = 500 \text{ G}$ and the same for 2000 G . The width of all images is 1500 \AA . Differential tunneling conductance of 0.9 and larger in normalized units is shown as white.

STMは局所電子状態密度を観測できる



ペアリングの異方性を
探るツールになりうる

今回はCePt₃Si

対象とする系

結晶構造に空間反転対称性のない重い電子系の超伝導体CePt₃Si

特徴

1. 系に空間反転対称性が存在しない

2. ラインノードの存在を示唆 (熱伝導率)

K. Izawa et al.: Phys. Rev. Lett. **94** (2005) 197002

3. s波的クーパーペアリング (NMR)

M. Yogi et al.: Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 027003

4. 超伝導転移温度

$$T_C \sim 0.75 \text{ K}$$

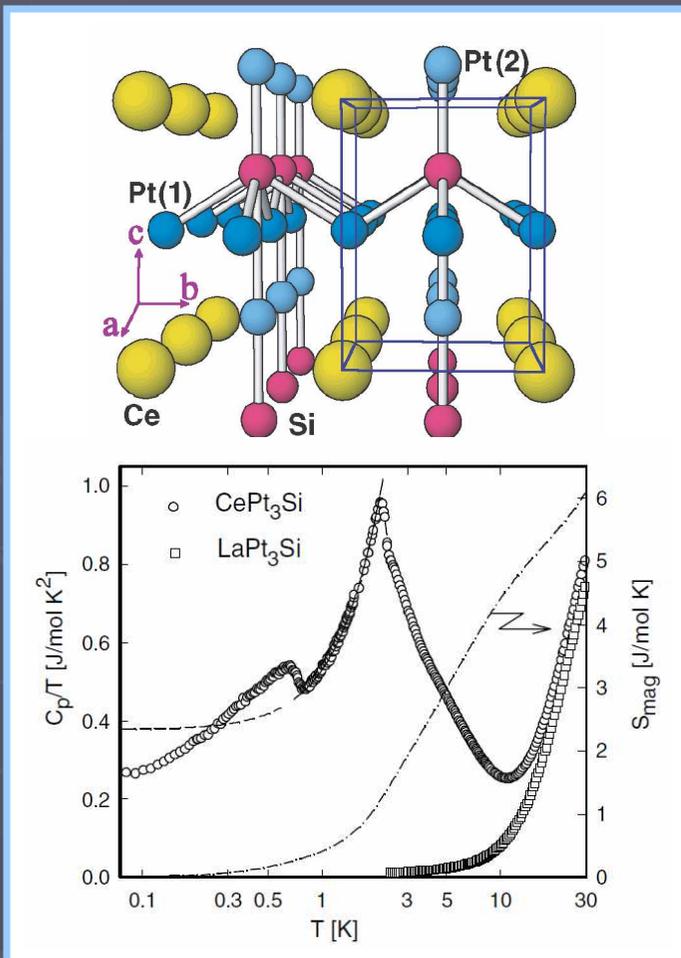
5. 反強磁性転移温度

$$T_N \sim 2.2 \text{ K}$$

6. Fermi面が二つに分裂している可能性

(スピン軌道相互作用の存在)

7. 比較的cleanな第二種超伝導体 $l/\xi \sim 8$



E. Baur et al.: Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 027003

どのようなペアリングが実現しているか？

モデルと目的

CePt₃Siの一見相容れないそれぞれの実験結果

spin-singlet-triplet混合ペアリングで説明可能 (29pRA-2で林伸彦が発表予定)

$$\begin{aligned}\hat{\Delta}(\mathbf{r}, \bar{\mathbf{k}}) &= [\Psi(\mathbf{r})\hat{\sigma}_0 + \mathbf{d}_k(\mathbf{r}) \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}}] i\hat{\sigma}_y \\ &= [\Psi(\mathbf{r}) + \Delta(\mathbf{r})(-k_y\hat{\sigma}_x + k_x\hat{\sigma}_y)] i\hat{\sigma}_y\end{aligned}$$

s+p-wave mixed pairing model

仮定

$$\Psi(\mathbf{r}) \propto \Delta(\mathbf{r}) = \Psi\Delta(\mathbf{r})$$

BCS Hamiltonianに
スピン軌道相互作用 (Spin-orbit coupling) 項を追加

$$\sum_{\mathbf{k}, \eta, \eta'} \alpha \mathbf{g}_k \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}} c_{\mathbf{k}\eta}^\dagger c_{\mathbf{k}\eta'}$$

$$\mathbf{g}_k = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{1}{k_F} (-\bar{k}_y, \bar{k}_x, 0)$$

$$\mathbf{g}_k \parallel \mathbf{d}_k$$

目的

準古典近似 ($\Delta \ll E_F$) を用いる

準古典近似を用いて渦糸近傍の局所電子状態密度を調べる

Singlet-Triplet混合比など、pairing symmetryの情報を
実験的に確認する方法を見つけ出す。

実験への提案

準古典近似

Fermi波長程度の振動を無視する近似

Gor'kov方程式

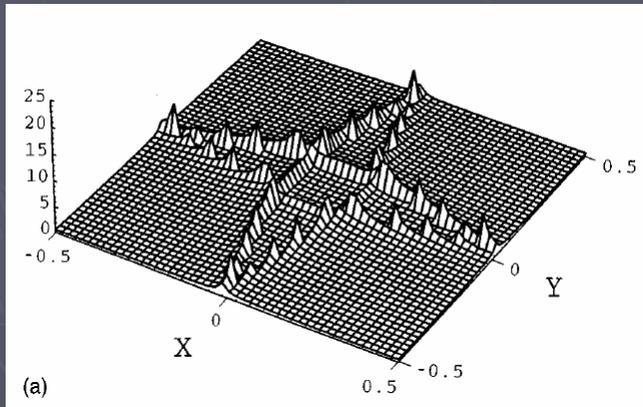


Eilenberger方程式

準古典近似を用いた過去の研究

局所電子状態密度 (LDOS)

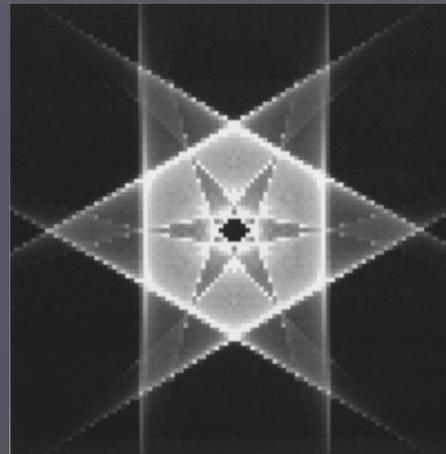
d波超伝導体



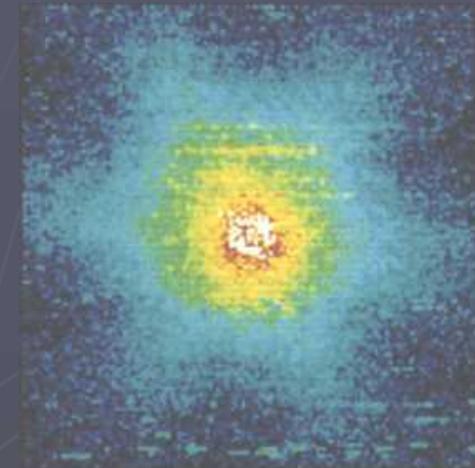
N. Schopohl and K. Maki: Phys. Rev. B **52** (1995) 490

M. Ichioka et al.: Phys. Rev. B **53** (1996) 15316

NbSe₂ N. Hayashi et al.: Phys. Rev. B **56** (1997) 9052



数値計算結果



STM像

CePt₃Siは $\Delta \ll E_F$ を満たしている。



さらに

渦糸コア近傍なので \ll とする (Kramer-Pesch近似と呼ぶ)

:準粒子の励起エネルギー

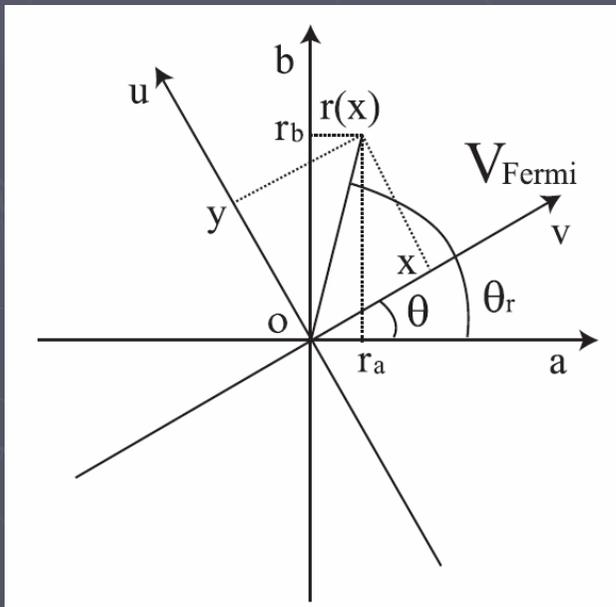
Kramer-Pesch近似

渦系コア近傍において成立する近似(\ll)

インパクトパラメータ y 、励起エネルギー V が小さいとして摂動展開して解く

L. Kramer and W. Pesch: Z. Phys. **269** (1974) 59

渦系(vortex)に垂直な平面を考える。



物理的意味

渦系コアでは励起エネルギー $V = 0$ でGreen関数が発散する (Zero-bias peek)



Green関数の分母を発散点近傍で y の一次まで展開

渦系コア近傍におけるGreen関数を解析的に得ることができる

解くべき方程式

スピン軌道相互作用項が存在するときのEilenberger Equation

$$-i\mathbf{v}_F \cdot \nabla \check{g}(\hat{\mathbf{p}}, \mathbf{r}; i\omega_n) = \left[\begin{pmatrix} i\omega_n \hat{\sigma}_0 - \alpha \mathbf{g}_k \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}} & -\hat{\Delta}(\hat{\mathbf{p}}, \mathbf{r}) \\ \hat{\Delta}^\dagger(\hat{\mathbf{p}}, \mathbf{r}) & -i\omega_n \hat{\sigma}_0 + \alpha \mathbf{g}_k \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}}^{tr} \end{pmatrix}, \check{g}(\hat{\mathbf{p}}, \mathbf{r}; i\omega_n) \right]$$
$$\check{g}^2 = \check{1},$$

4x4行列の微分方程式



Matrix Riccati Equation

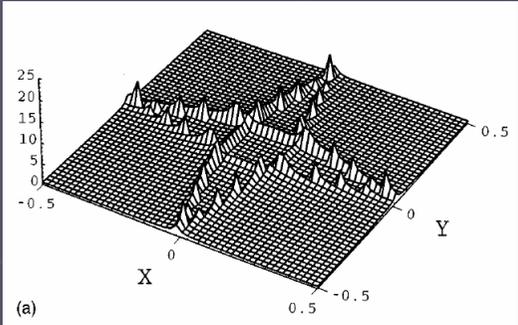
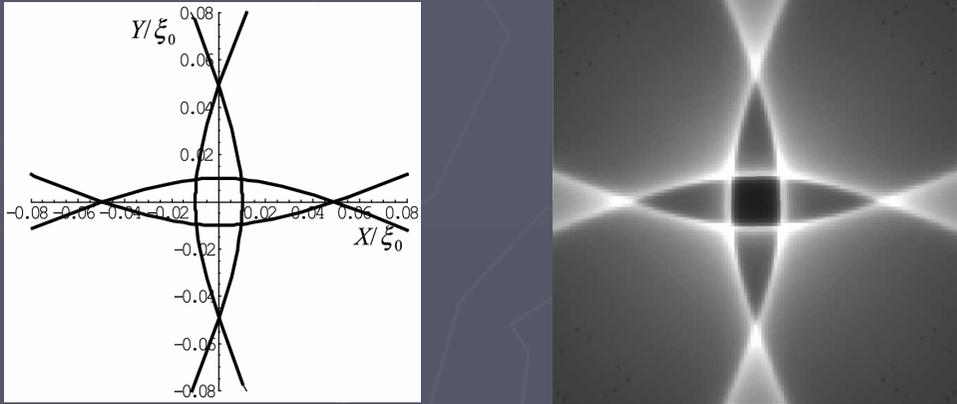
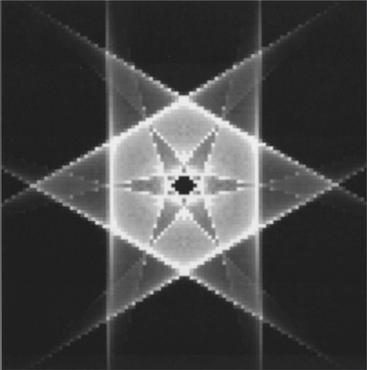
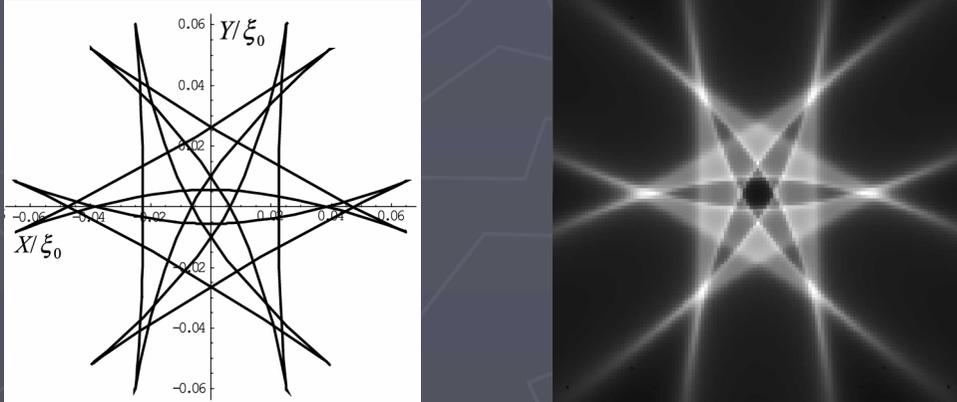
$$\mathbf{v}_F \cdot \nabla \hat{a}_+ + 2\omega_n \hat{a}_+ + \hat{a}_+ \hat{\Delta}^\dagger \hat{a}_+ - \hat{\Delta} + i(\hat{a}_+ \alpha (\mathbf{g}_k \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}})^{tr} + \alpha \mathbf{g}_k \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}} \hat{a}_+) = 0,$$
$$\mathbf{v}_F \cdot \nabla \hat{b}_- - 2\omega_n \hat{b}_- - \hat{b}_- \hat{\Delta} \hat{b}_- + \hat{\Delta}^\dagger - i(\hat{b}_- \alpha \mathbf{g}_k \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}} + \alpha (\mathbf{g}_k \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}})^{tr} \hat{b}_-) = 0,$$

$$\check{g} = - \begin{pmatrix} (1 + \hat{a}_+ \hat{b}_-)^{-1} & 0 \\ 0 & (1 + \hat{b}_- \hat{a}_+)^{-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (\hat{1} - \hat{a}_+ \hat{b}_-) & 2i\hat{a}_+ \\ -2i\hat{b}_- & -(\hat{1} - \hat{b}_- \hat{a}_+) \end{pmatrix}.$$

この方程式をKramer-Pesch近似を用いて解く

局所電子状態密度 (LDOS) の数値計算と解析計算

過去の研究で得られたLDOSと、我々の方法による結果を比較

	過去の数値計算結果	我々の解析計算結果 / $\xi_0 = 0.01$
d波超伝導体		
NbSe ₂		

我々の方法は任意の異方的超伝導のLDOSを計算できる

CePt₃Siでは？

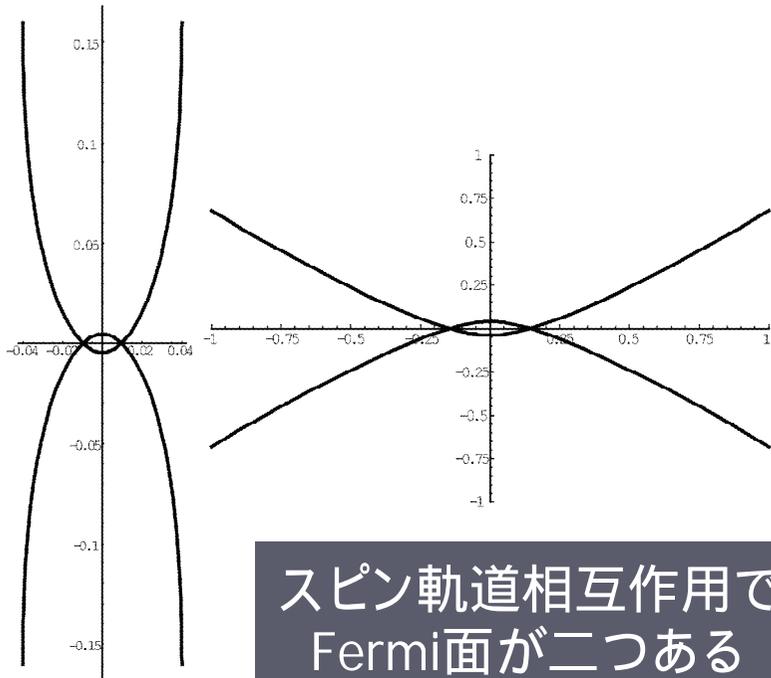
CePt₃Si

磁場をb軸方向にかけた場合

LDOSが発散する点(パラメータ表示)

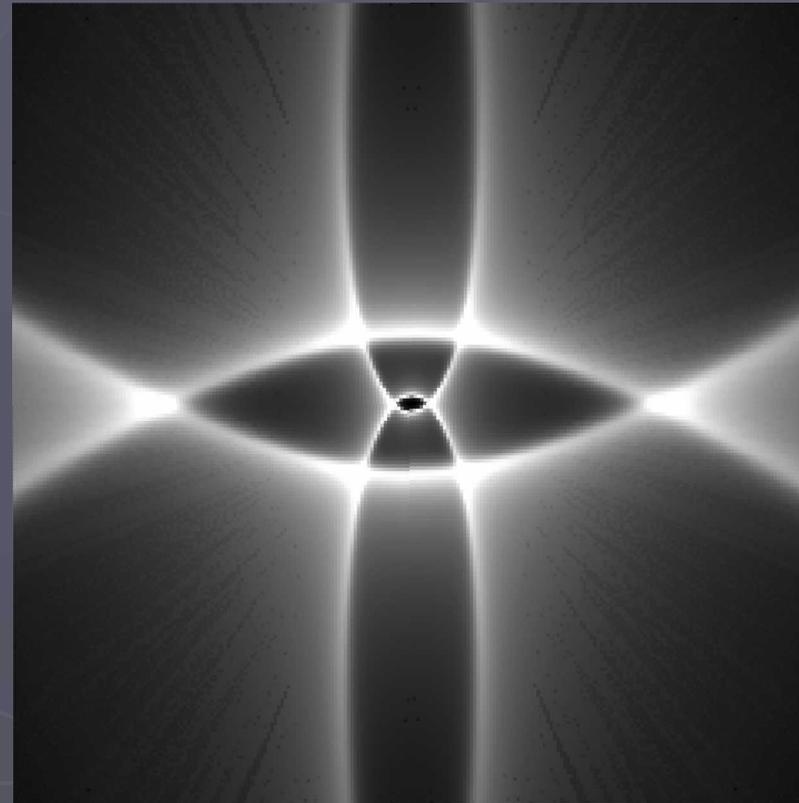
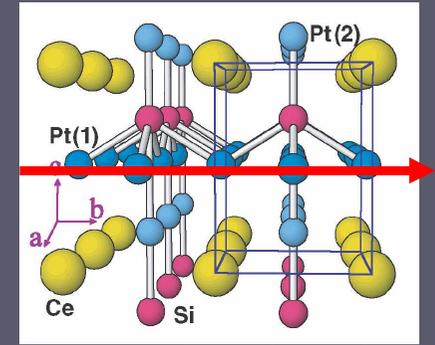
$$\tilde{X}_{\pm} = \frac{-\tilde{\epsilon} \sin \theta}{(|\cos \theta| \pm \tilde{\Psi})^3} \left\{ 3|\cos \theta| \pm \tilde{\Psi} \right\},$$

$$\tilde{Y}_{\pm} = -2 \frac{\tilde{\epsilon} \sin^2 \theta \text{sign}[\cos \theta]}{(|\cos \theta| \pm \tilde{\Psi})^3} + \frac{\tilde{\epsilon} \cos \theta}{(|\cos \theta| \pm \tilde{\Psi})^2},$$



スピン軌道相互作用で
Fermi面が二つある

LDOSの空間分布

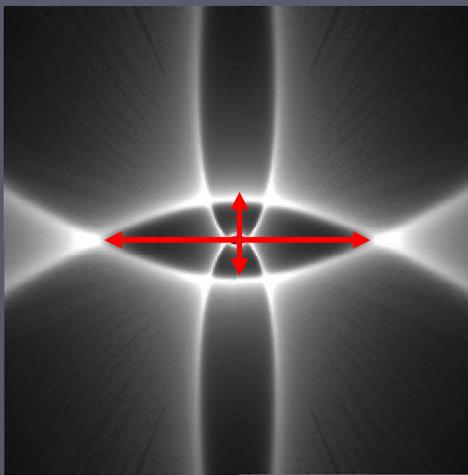


0.5

$\tilde{\epsilon} = 0.01$, s波とp波の成分比 $\tilde{\Psi} : 1 = 1 : 2$

このLDOSパターンから何が言えるか？

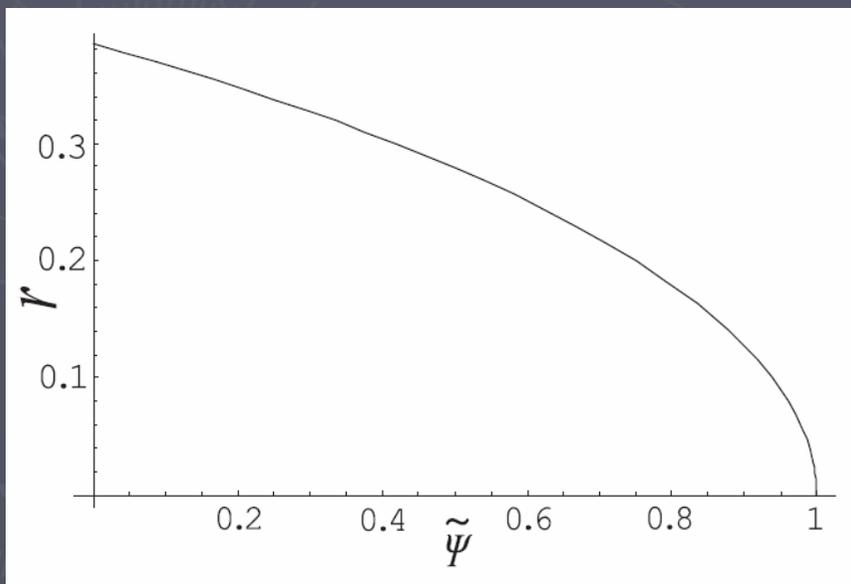
s波とp波の混合比



楕円形の長軸と短軸の比 r に着目

$$r = \frac{(-5\tilde{\Psi} + \sqrt{24 + \tilde{\Psi}^2})^3}{108(1 - \tilde{\Psi})^2(-\tilde{\Psi} + \sqrt{\tilde{\Psi}^2 + 24})\sqrt{1 - \left(\frac{\tilde{\Psi} + \sqrt{\tilde{\Psi}^2 + 24}}{6}\right)^2}},$$

s波とp波の混合比: $\tilde{\Psi}$ のみの関数 (r に依らない)



r がわかれば $\tilde{\Psi}$ が一意に定まる

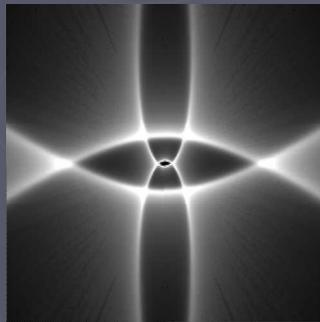
CePt₃Siの対称性の同定が可能

Fermi面の異方性(回転楕円体)を取り入れてもほとんど関数は変化せず

まとめ

準古典近似($\Delta \ll E_F$)で、渦糸コア近傍の局所電子状態密度(LDOS)を解析的に求めた。

CePt₃Si渦糸近傍の局所電子状態密度(LDOS)



渦糸コアを観測することでsinglet成分とtriplet成分の比が得られる

CePt₃Siの対称性の同定が可能

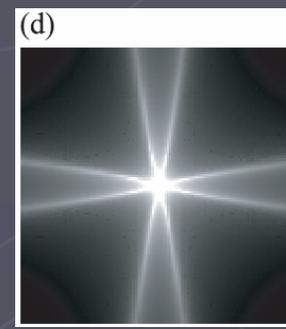
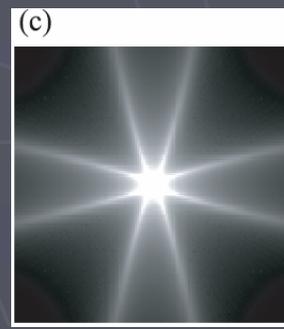
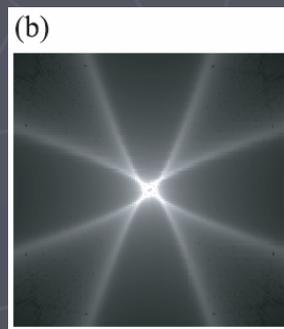
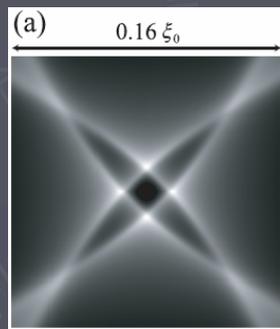
Y. Nagai et al.: to be published in J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2006)

また

CePt₃Siに限らず任意の超伝導体、任意の方向の磁場のLDOSを計算できる

例: point-nodeと考えられているYNi₂B₂C $\Delta = (1 - \sin^4 \theta \cos 4\phi) / 2$ (近々Full Paper投稿予定)

大 小



STMは超伝導対称性の詳細な解析の可能性を秘めている