

渦糸近傍における局所電子状態密度 分布に対する異方的フェルミ面の効果

Effect of the anisotropic Fermi surface for the
local density of states near the vortex core

東大理
東大総合文化
ETH-Zürich

永井佑紀
加藤雄介
林伸彦

渦糸近傍での準粒子束縛状態

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 and Spectroscopy (STM/STS)

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

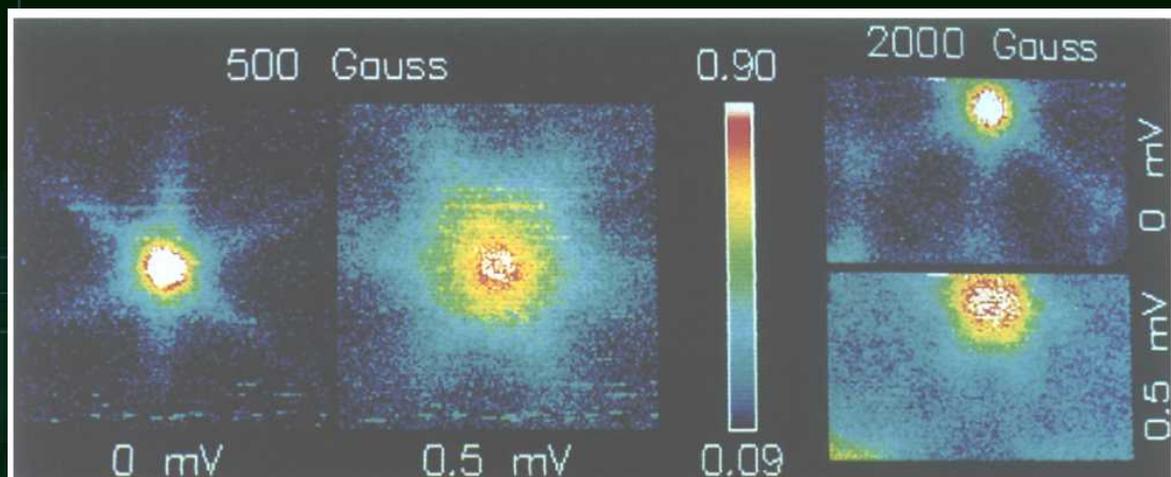


FIG. 4. Simultaneously taken XY images of $dI/dV(0 \text{ mV}, x, y)$ and $dI/dV(0.5 \text{ mV}, x, y)$ with $B=500 \text{ G}$ and the same for 2000 G . The width of all images is 1500 \AA . Differential tunneling conductance of 0.9 and larger in normalized units is shown as white.

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 $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$

対象とする系

YNi₂B₂C: ポイントノードを持つ異方的s波超伝導の可能性

1994年頃、異方的s波超伝導であると考えられ盛んに研究された。

2002年、Makiらがこの物質はポイントノードではないかと述べた。

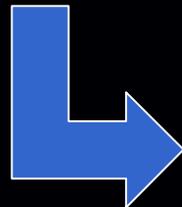
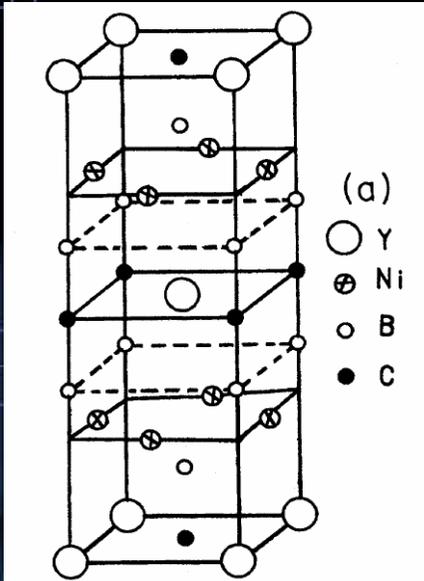


K. Maki et al.: Phys. Rev. B **65** (2002) 140502(R)

Izawaらが角度分解能のある熱伝導率の実験を行い、Makiらの予言を実証

K. Izawa et al.: Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 137006

体心正方晶



ParkらのField-Angle-Dependent Heat Capacityの測定

T. Park et al.: Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 177001

WatanabeらのUltrasonic Attenuationの測定

T. Watanabe et al.: Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 147002

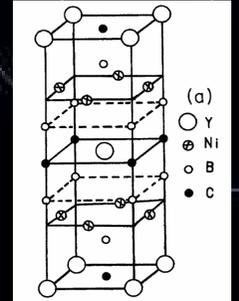
NishimoriらのSTMによる渦糸コアの測定

H. Nishimori et al.: J. Phys. Soc. Jpn. **73** (2004) 3247

$$\Delta(\mathbf{k}) = \frac{1}{2}\Delta(1 - \sin^4 \theta \cos(4\phi)) \quad \text{がよく合う}$$

ポイントノードの位置

ポイントノードの関数形 結晶構造から四回回転対称性を持つ



2002年のMakiらの論文

$$\Delta(\mathbf{k}) = \frac{1}{2}\Delta(1 + \sin^4 \theta \cos(4\phi)) = /2, = /4 \text{にポイントノード}$$

2002年のIzawaらの熱伝導率の実験の論文

$$\Delta(\mathbf{k}) = \frac{1}{2}\Delta(1 - \sin^4 \theta \cos(4\phi)) = /2, =0(a \text{軸方向}) \text{にポイントノード}$$

根拠: フェルミ面にnestingが存在

その他の実験(比熱、超音波吸収、STM): = /2, =0にポイントノード

実験の解析は等方的フェルミ面を仮定している

1. 実験と理論(バンド計算由来)でポイントノードの位置が食い違っている。
ポイントノードの位置に理論的な根拠がまだ存在していない

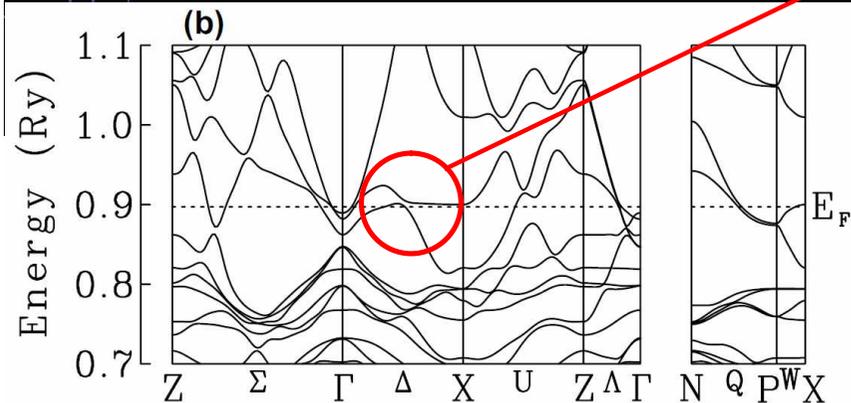
2. $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ のフェルミ面は強い異方性を持つ。
実験が示唆するポイントノードの方向が正しいとは限らない。

本当にこのポイントノードでよいのか？

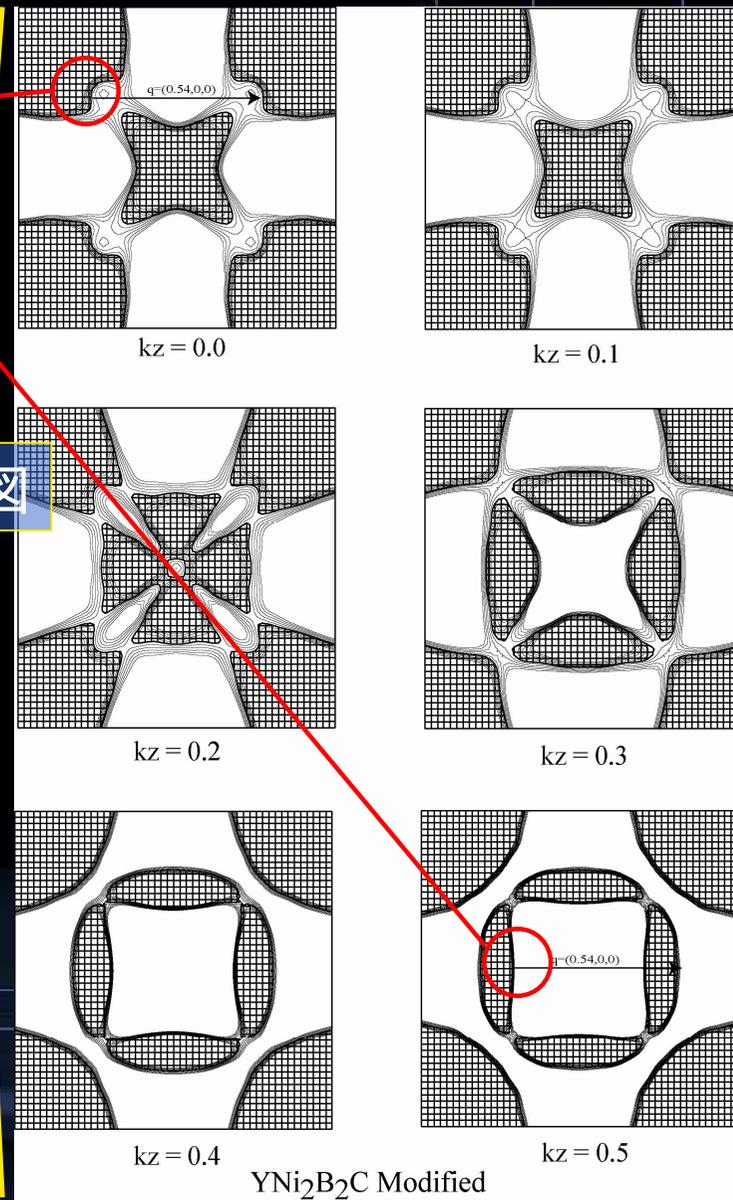
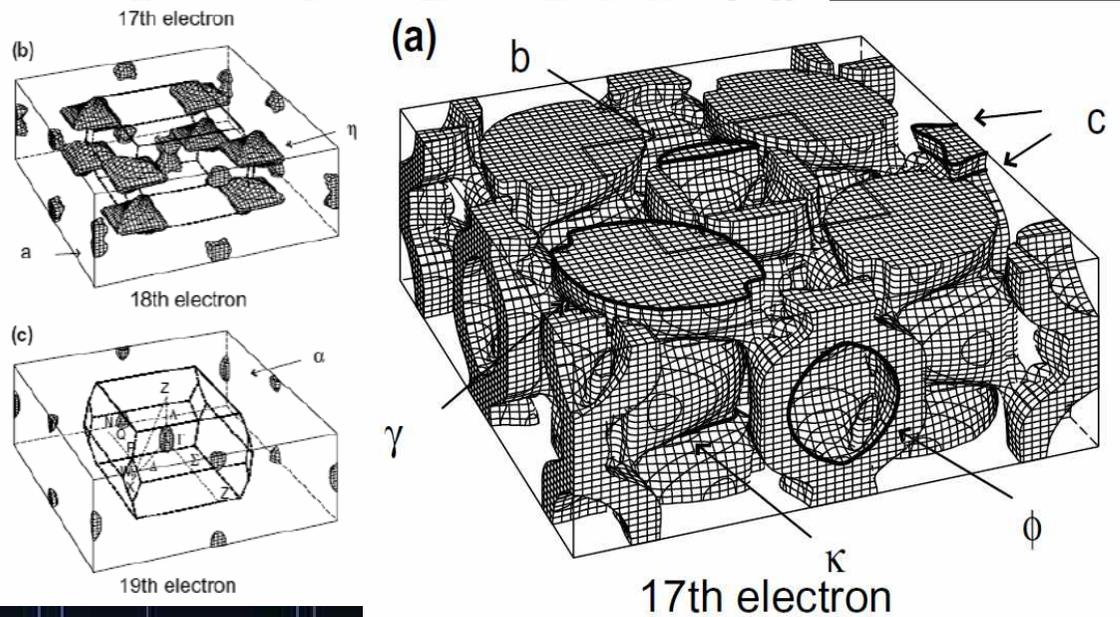
YNi₂B₂Cのバンド構造

YNi₂B₂Cのバンド構造の特徴

Van Hove 的特異性と
Nesting vectorの存在
(a軸方向)



17th Fermi面の断面図



等方的フェルミ面で解析するには異方的すぎる？

実験結果の再解析

「ノード方向を決めた」という実験で用いられている解析方法

Doppler Shift Method: エネルギーがドップラーシフトにより上昇するという方法

G. E. Volovik : Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **58** (1993) 457 [JETP Lett. **58** (1993) 469]

ノードに関する情報

波数ベクトルの方向(フェルミ面上でのノードの位置):

~~$= 1/2, \dots$ にポイントノード~~

等方的フェルミ面の場合にのみ正しい

言えない

Doppler Shift Methodは、準粒子のエネルギーに
 $v_F \cdot v_s$
に比例する項があることを用いている

超音波吸収の
解析でも成り立つ

異方的フェルミ面の場合

ノードに関する情報

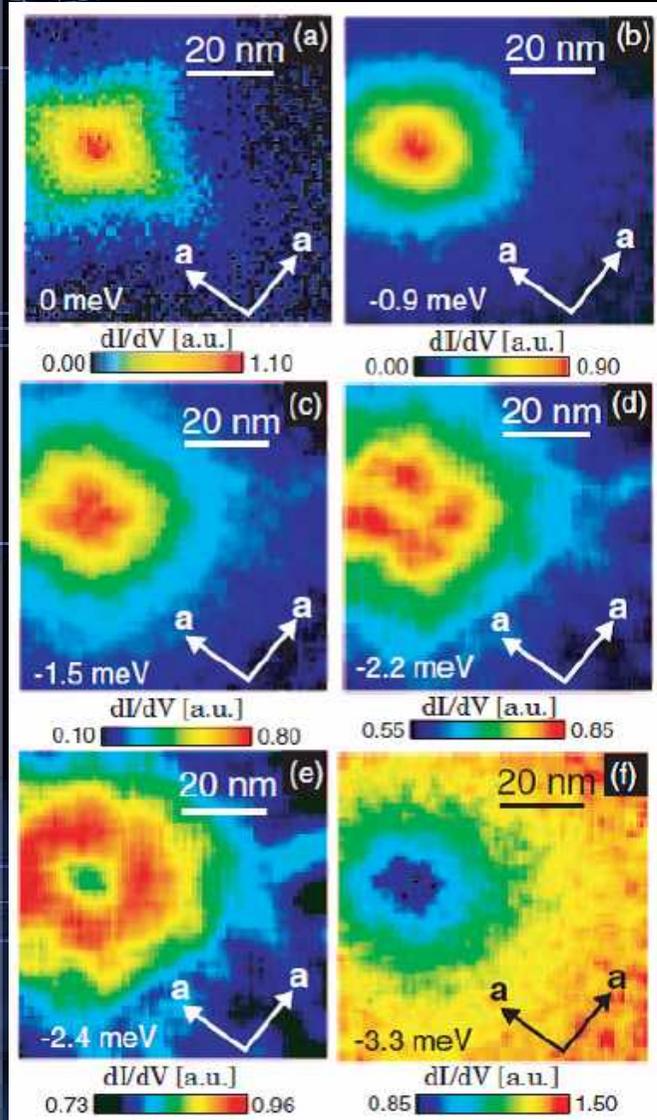
フェルミ速度ベクトルの方向がわかる: 位置は不明

Izawaらの熱伝導率の実験は、フェルミ速度がa軸方向(nesting vector方向)であることを示唆

Makiらのノードでのフェルミ速度はa軸方向であり、理論予想と矛盾しない

局所電子状態密度(LDOS)

渦糸近傍でのLDOSの分布 (STM/STS) $a = 6.3 \text{ nm}$, $l = 70 \text{ nm}$, $\Delta = 3.3 \text{ meV}$



(a): 0 meVでa軸方向に伸びる十字形

ポイントノードはa軸方向?

(c),(d): $\Delta/4$ の十字方向に四つのピークの存在

どのようなギャップの異方性を反映しているのか?

本研究の目的

1. バンド計算を考慮した異方的フェルミ面を用いてLDOSを求め実験結果と比較する。
2. ポイントノードの位置を確かめる。

計算方法

用いる手法

準古典理論を用いた渦糸コア近傍での局所電子状態密度分布の理論

Y. Nagai et al. To be published in J. Phys. Soc. Jpn. **75** (2006) No.10. cond-mat/0605441

渦糸コア近傍の準古典Green関数の解析解が得られる

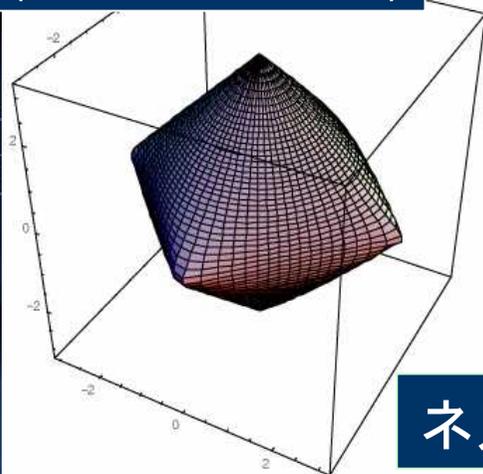
得られた準古典遅延Green関数を

$$\nu(\mathbf{r}, \epsilon) = - \int \frac{dS_F}{2\pi^2 v_F} \text{Re tr}(\hat{g}^R).$$

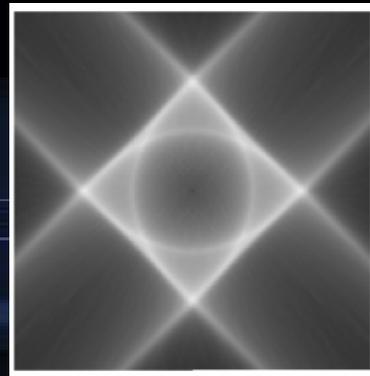
に代入するとLDOSが得られる。

例: simple cubic tight binding model

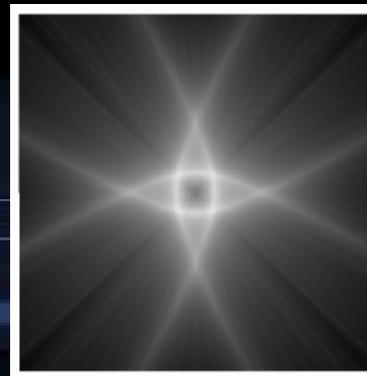
フェルミ面
(ネスティングあり)



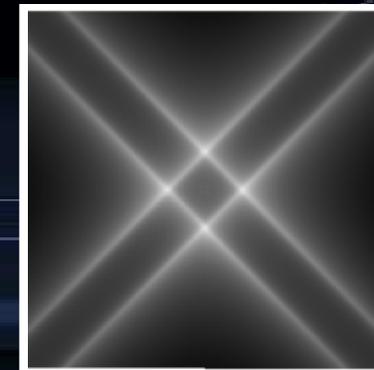
s波



d波(ノード /4度)



d波(ノード0度)



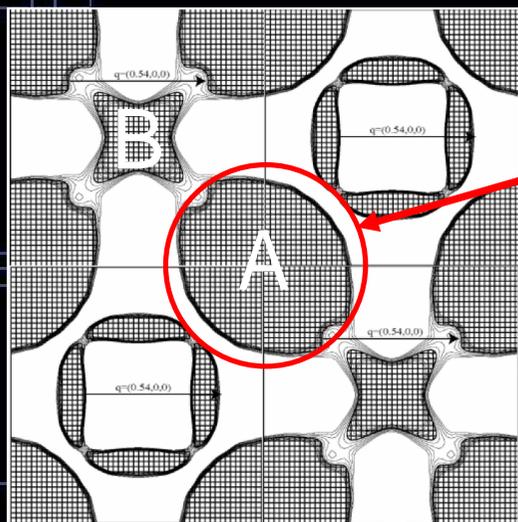
ネスティングベクトル: /4度方向

YNi₂B₂Cでは?

用いるフェルミ面

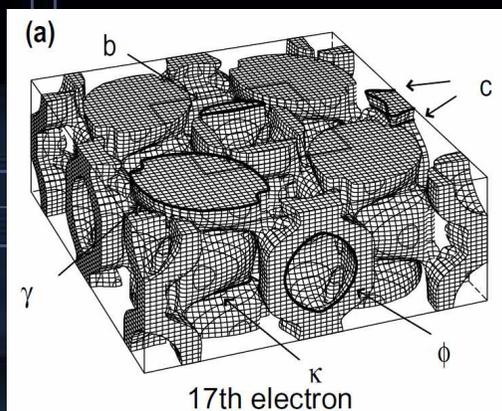
フェルミ面のモデル化

ネスティングベクトルに着目する

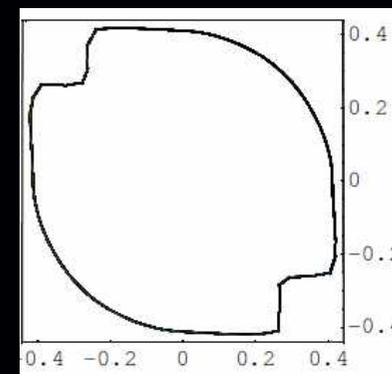
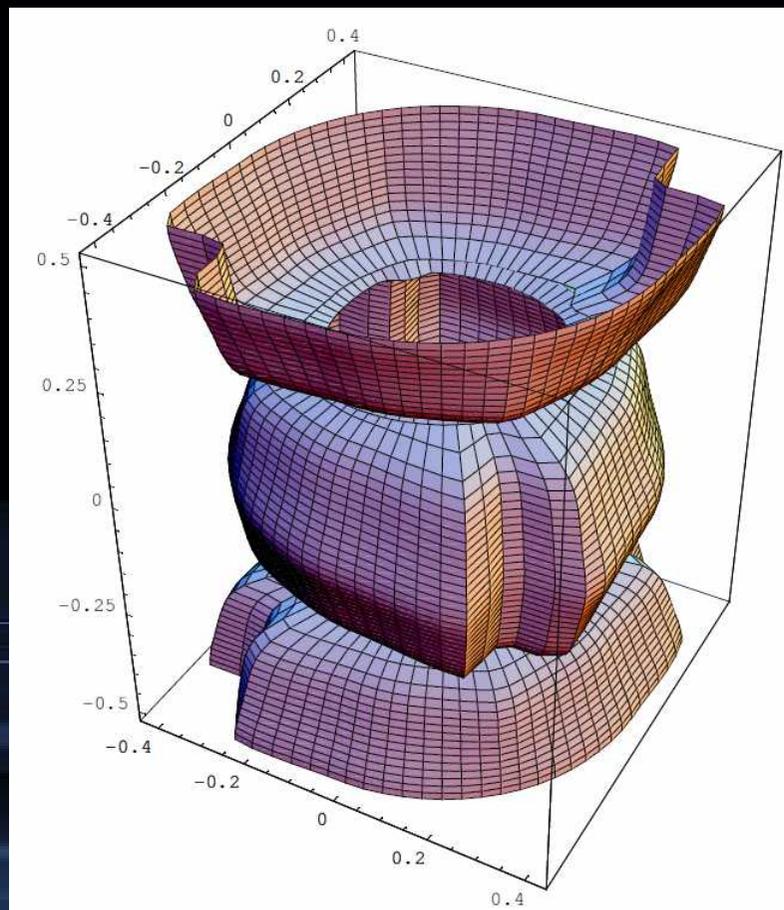


このフェルミ面に着目(フェルミ面Aと呼ぶ)

$k_z=0$ での断面図



フェルミ面(再掲)



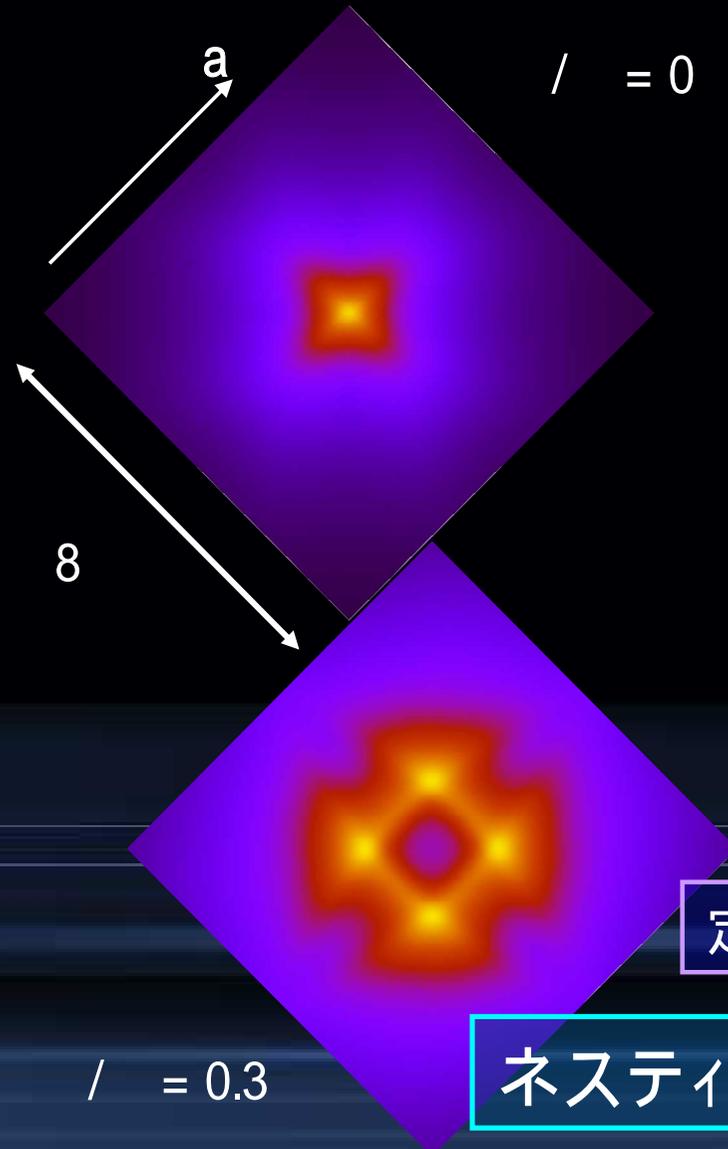
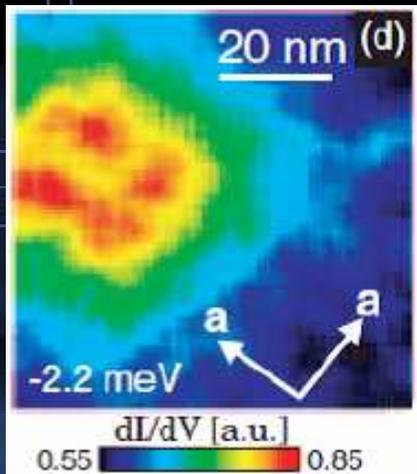
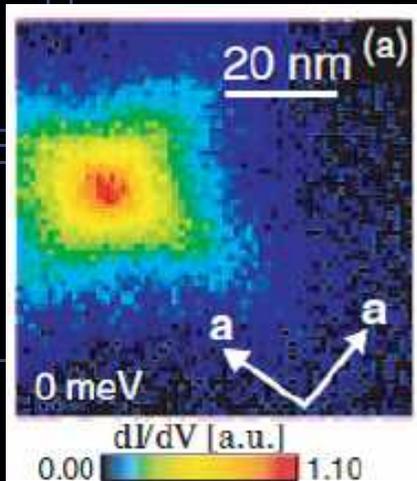
$k_z=0$ の断面図

このフェルミ面を用いる

YNi₂B₂CにおけるLDOS (結果)

$$\Delta(\mathbf{k}) = \Delta \sqrt{\cos^2 \theta + \sin^2 \theta \sin^2(2(\phi - \pi/4 + \pi/32)) \sin^2(2(\phi - \pi/4 - \pi/32))}$$

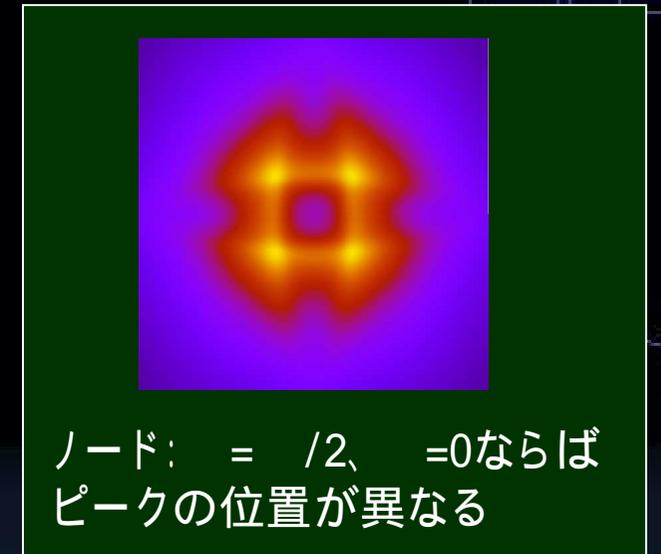
STM実験(再掲)



ノード: $\eta = 1/2$, $\eta = 1/4$

(ネスティングベクトルの位置考慮)

$\eta = 0.1$: smearing factor



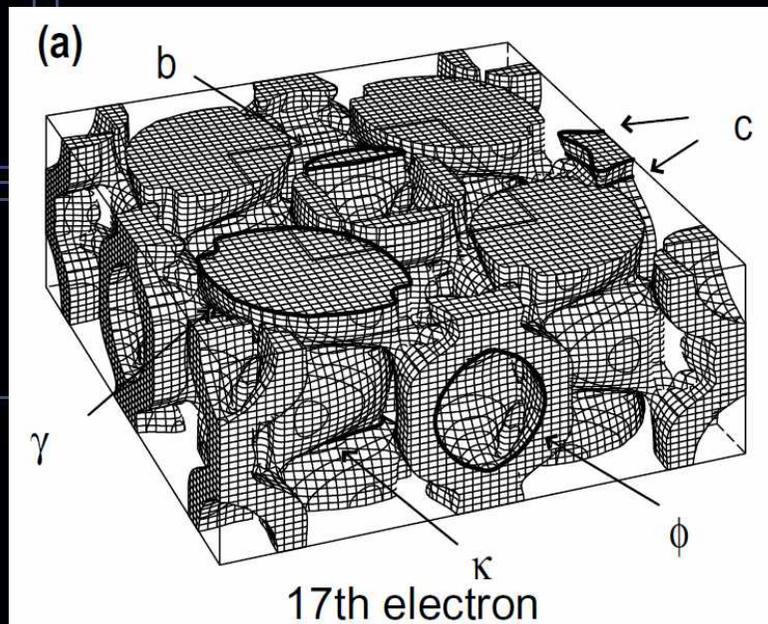
定性的によく一致している

ネスティングシナリオを支持する結果

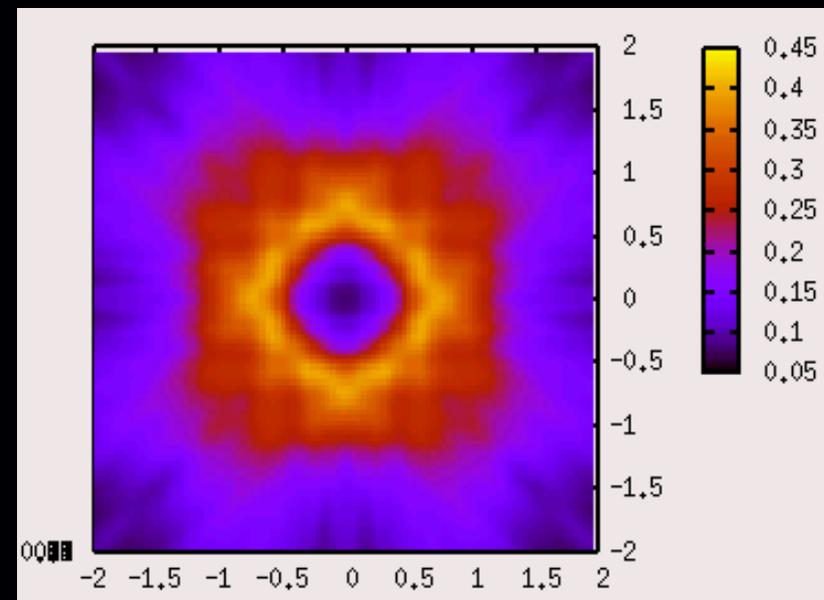
バンド計算によるフェルミ面

バンド計算によるフェルミ面を用いて、s波の場合のLDOSを計算

用いたフェルミ面(再掲)[1]



s波の場合のLDOS



バンドの異方性だけでは、STM実験の結果は再現できない

STM実験の結果は異方的ギャップが原因

[1] 山内邦彦氏(阪大)から分散 (k_x, k_y, k_z) のデータの提供を受けた。

まとめ

YNi₂B₂Cのポイントノードの位置

2002年:理論予想 ノード: $\Gamma = 1/2, K = 1/4$ 「フェルミ面のネスティングが原因」

2002年以降:実験結果 ノード: $\Gamma = 1/2, K = 0$ 「原因は不明(理論予想と位置が違う為)」

~~「熱伝導率、比熱、超音波吸収、STM/STSが支持」~~

実験の解析はすべて等方的フェルミ面を仮定していた

言えない

YNi₂B₂Cが極めて強い異方的フェルミ面を持つこと考慮すると

STM/STS以外の実験結果 ノードの位置でのフェルミ速度の方向: $\Gamma = 1/2, K = 0$

STM:モデル化したフェルミ面での理論計算との比較 ノード: $\Gamma = 1/2, K = 1/4$

$\Gamma = 1/2, K = 1/4$ でのフェルミ速度の方向は $\Gamma = 1/2, K = 0$ である

ノード: $\Gamma = 1/2, K = 1/4$?

ネスティングベクトルのある位置

ネスティングがポイントノード形成の主要因と考えることができる