مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۶، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۵



# پارامتر نظم ابررسانایی در فلز CeIrIn

### حميده شاكرىپور

دانشکدهٔ فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

پست الكترونيكي: hshakeri@cc.iut.ac.ir

(دریافت مقاله:۱۳۹۳/۱۲/۷ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی:۱۳۹۴/۹/۱)

### چکیدہ

فهم و شناخت سازوکار جفتشدگی الکترونها در ابررساناهای جدید، از مسائل بنیادین در زمینهٔ ابررسانایی است. سازوکار جفتشدگی الکترونها، با پارامتر نظم و در واقع با ساختار گاف یک ابررسانا رابطهٔ مستقیم دارد. ابررساناهای متعارف موج ۵ دارای ساختار گاف متقارن در اطراف سطح فرمی هستند. حضور این ساختار پارامتر نظم متقارن، موجب می شود که بسیاری از خواص فیزیکی ماده در دماهای پایین، رفتار نمایی نسبت به دما نشان دهند. در حالی که حضور انواع گرههای (صفرها) ناشی از شکست تقارن در تابع گاف ابررسانای بسیاری از ابررساناهای جدید، نشاندهندهٔ وجود یک پارامتر نظم متفاوت از پارامتر نظم یک ابررسانای متعارف و در نتیجه، یک سازوکار متفاوت جفتشدگی می باشد. در این مقاله نشان می دهیم چگونه اندازه گیری های هدایت گرمایی در دماهای نزدیک به صفر کلوین، منجر به تشخیص پارامتر ترکیب هر CeIrIn می شود.

**واژههای کلیدی:** ابررسانایی نامتعارف، پارامتر نظم، ساختار گاف، هدایت گرمایی

#### ۱.مقدمه

با کشف ابررسانایی در مواد فرمیون سنگین CeCu<sub>r</sub>Si<sub>r</sub> (۱۹۷۹) که حاوی یون مغناطیسی Ce بوده، و سپس در ابررساناهای دما-بالا (۱۹۸۶) با دمای گذار در حدود ۱۰۰ کلوین، ابررسانایی، که یکی از موضوعات بسوذرهای به ظاهر کاملاً فهمیده شده در فیزیک بود، دوباره تبدیل به یکی از مسائل

1. Oxygen flow

چالش برانگیز برای محققین شد. مسئله چالش برانگیز در این مواد، مشاهدهٔ همزمان فازهای ابررسانایی و نظم پادفرومغناطیسی یا فرومغناطیسی در مجاورت هم در نمودارهای فاز این مواد میباشد [۱ – ۳] (شکل ۱). همزیستی یا مجاورت این دو فاز، این فرضیه را به ذهن آورد که سازوکار ابررسانایی باید ریشه در مغناطیس داشته باشد (این دسته از ابررساناها به ابررساناهای نامتعارف نام گذاری شدند). در حالی که در نظریهٔ میکروسکوپی BCS ابررسانایی، حضور



**شکل ۱**. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) نمودار فاز سه گروه از ابررساناهای نامتعارف: (سمت راست) ابررساناهای با پایهٔ آهن، (وسط) فلزات فرمیون سنگین(M: Co, Rh, Ir) هCeMID و (سمت چپ) ابررساناهای دما– بالا. در همهٔ این نمودارها، فاز ابررسانایی در مجاورت با فاز مغناطیسی دیده می شود و این فرضیه را به ذهن می آورد که سازوکار ابررسانایی باید ریشه در مغناطیس داشته باشد. (شکل ها از [۲–۴]).

ناخالصی مغناطیسی عامل شکستن جفت کوپر و در نتیجه از بین رفتن ابررسانایی میشود. کشف مواد با پایهٔ آهن در ترکیبات جدید نیکتایدها در سال ۲۰۰۸ (مانند ۲۴۹٬۸۵۶) این فرضیه را تقویت کرد و حضور ابررسانایی در این مواد، شاهد قطعی و مسلم برای پذیرفتن مدلهای جفتشدگی مغناطیسی الکترونها را موجب شده است.

سازوکار جفتشدگی الکترونها، با پارامتر نظم دسـتگاه، و در واقع با ساختار گاف یـک ابررسـانا رابطـهٔ مسـتقیم دارد. در نظریهٔ ابررسانایی BCS که سازوکار جفت شدگی، برهم کنش مؤثر الكترون– فونون معرفي ميشود، رابطهٔ بين پـارامتر نظـم و یا به عبارتی پارامتر گاف ابررسانایی در دمای صفر (۵٫) و پتانسیل برهمکنش بین جفت الکترونها V، به صورت زیـر  $N(E_F)$  معرفے مے شود:  $|\Delta_{\circ}| = r\hbar \tilde{S}_D e^{(-v/N(E_F)V)}$  کے چگالی حالات در سطح فرمی و  $\hbar \check{S}_{\mathrm{D}}$  انرژی دبای است [۵]. پس، برای تعیین سازوکار جفتشدگی الکترون، اولین گام اساسی تعیین ساختار گاف ابررسانایی میباشد. در این ارتباط، اندازه گیری هدایت گرمایی در دماهای نزدیک به صفر کلوین یکی از دقیقترین ابزار برای تعیین ساختار گاف و مشاهده مکان و توپولوژی گرهها (صفرها در گاف) در اطراف سطح فرمی در ابررساناهای نامتعارف است [۶ و۷]، زیرا این کمیت ترمودینامیکی، مانند مقاومت الکتریکی، در دمای گذار ابررسانایی، صفر نشده و نیز جفت کوپر دارای آنتروپی صفر

است و در نتیجه در هدایت گرمایی سهمی ندارند. پس هدایت گرمایی، می تواند ابزار بسیار مستقیم و مفیدی برای آشکارسازی شبه ذرات غیرجایگزیده با انرژی کم و یا به عبارتی، برای تشخیص و مشاهدهٔ گرههای اطراف سطح فرمی در حالت ابررسانایی باشد.

### ۲. هدایت گرمایی

هدایت گرمایی یک ماده، ۲، خاصیتی از ماده است، که توان ایی هدایت گرما از خود را نشان می ده. ۲ به صورت ضریب تناسب بین جریان گرما  $Q \ e$  گرادیان دمایی اعمال شده  $\nabla T$ تعریف می شود:  $\nabla Q - g \ e$  گرادیان دمایی نمونه، اندازه گیری و به نمونه اعمال شده و گرادیان دمایی نمونه، اندازه گیری و سپس هدایت گرمایی ماده به دست می آید (شکل ۲). هدایت گرمایی الکترونی در فلزات، به صورت زیر داده می شود [۸]:  $ke = \frac{1}{w} C_e v_F le = \frac{1}{w} C_e v_F^* t e,$  (۱)

که در آن  $k_B^{Y}N(E_F)T$  گرمای ویژهٔ الکترونی در دماهای پایین،  $v_F$  سرعت فرمی، le طول پویش آزاد میانگین الکترون و  $N(E_F)$  چگالی حالات الکترونی در سطح فرمی میباشد. پس در یک فلز عادی با فرض اینکه le مستقل از دما باشد (در دمای صفر کلوین یا در دماهای نزدیک به صفر)، میتوان دید  $T \propto g$  (در دماهای مختلف، میتوان برحسب نوع 29

جدول ۱. وابستگی توانی بر حسب دمای بعضی از کمیت های فیزیکی در حالت ابررسانایی در دماهای پایین (محاسبه شده). این وابستگی های توانی نسبت به دما برای ابررساناهای دارای گره، پیش بینی شده و با مشاهدات تطابق خوبی را نشان میدهند [٩]

Various quantities	Line node	point node
Specific heat $C_V$	$\mathbf{T}^{r}$	$T^r$
NMR relaxation rate $\frac{1}{T_1}$	$\mathrm{T}^{\tt w}$	$\mathrm{T}^{\diamond}$
Thermal conductivity $\kappa$	$\mathbf{T}^r$	T٣
Penetration depth $\frac{1}{\beta_{\parallel}^{\gamma}}$	$\mathbf{T}^{\mathbf{r}}$	$\mathbf{T}^{r}$
Penetration depth $\frac{1}{\lambda_{\perp}}$	Т	$\mathrm{T}^{\mathrm{F}}$

فرایندهای پراکندگی الکترون، وابستگی دمایی le را به کار برده و در نتیجه وابستگی دمایی e را به دست آورد.) در نتیجه، مشاهدهٔ یک رسانش گرمایی خطی غیر صفر در  $\bullet T$  که به این صورت نمایش داده می شود:  $\frac{\bullet}{T} = \frac{\bullet}{T}$ .

اساساً نشانهای از حضور برانگیختگی های فرمیونی غیرجایگزیده در دستگاه در دمای صفر کلوین است [۶ و ۷] برای مثال: در ابررساناهای موج ۶ که دارای گاف کامل (بدون صفر) میباشند خواهیم دید  $= \frac{1}{T} = \frac{1}{T}$  زیرا در این محدودهٔ دمایی، هیچ الکترونی برای حمل گرما وجود ندارد. اما در ابررساناهای کوپراتی دما- بالا با داشتن ساختار گاف موج له که دارای چهار گرهٔ خطی در راستای محور c بلوری است آنگاه  $0 \neq \frac{1}{T}$  حضور برانگیختگی های فرمیونی غیرجایگزیده در دمای صفر، ناشی از صفرهای موجود در پارامتر گاف میباشد نقطهای دستگاه در هنگام گذار، موجب میشود که رفتار دمایی نقطهای دستگاه در هنگام گذار، موجب میشود که رفتار دمایی نقطهای پایین به جای رفتارهای نمایی پیشبینی شده در نظریهٔ میکروسکوپی ابررسانایی متعارف، رفتارهای توانی باشد:  $(^{T} ∞)$ . توان n، به وسیله توپولوژی گره تعیین میشود

(جدول ۱) [۷ و ۹].

در جـدول ۱، پـيش بينـی وابسـتگی دمـايی بعضـی از كميت هاى فيزيكي، مانند ظرفيت گرماي ويژه، هدايت گرمایی، آهنگ واهلش تشدید مغناطیسی هستهای و طول عمق نفوذ مغناطیسی (در دو جهت میدان مغناطیسی اعمالی در راستای محور c بلور و عمود بر این محور) در حالت ابررسانایی و در دماهای پایین نشان داده شده است [۷ و ۹]. برای مثال، دیده می شود که با حضور گرهٔ خطبی در ساختار گاف، ظرفیت گرمایی با دما رابطـهٔ  $C \propto T^{7}$  را داشـته و اگـر گره، نقطهای باشد آنگاه ۲<sup>۳</sup> د حواهد بود. این نتایج پیش بینی شده، در بسیاری از ابررساناها با مشاهدات آزمایشگاهی تطابق خوبی نشان میدهند. لازم به ذکر است که خود گرهٔ نقطهای، بر حسب این که گاف در مکان گره بـا چه شیبی روی سطح فرمی به صفر میرسد، انواع مختلف دارد. برای مثال، گرهٔ نقط مای – خطبی وقتبی که 🗴 ( )، گرهٔ نقطهای– مربعی وقتی کـه ۲ ∞ ( )∆ و گـره نقطـهای– مکعبی وقتی که ت ح ( ) ۸ باشد. در این جدول، گرهٔ نقطهای – مربعی مورد نظر است. جالب توجه این که، اندازه گیری های هدایت گرمایی، حتی قادر به تشخیص نوع گره نقطهای میباشد. نوع و توپولوژی گرهها، وابستگی انرژی متفاوت و معینی را برای چگالی حالات الکترونـی در حالت ابررسانایی موجب شده و در نتیجه، فیزیک متفاوتی را برای دستگاه رقم میزند. توضیحات بیشتر در مکانی دیگر آورده خواهد شد.

در فلزات علاوه بر الکترونها، فونونها نیز هدایت گرما را بـــه عهــده دارنــد. در فلــزات فرمیــون ســنگین (M:Co,Rh,Ir)هCeMIn با درجه خلوص و کاملی بسیار بـالا، سهم فونونی در دماهای پایین تقریباً صفر بـوده و در نتیجـه رفتار خالص الکترونها را میتوان مورد بررسی قـرار داد [۱۰ و ۱۲].

### ۳. جزئیات تجربی

تکبلورهای فلزی فرمیون سـنگین «CeIrIn بـا روش self-flux



**شکل ۲**. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) طرحوارهای از نحوهٔ اندازه گیری هدایت گرمایی با روش چهار اتصاله (اندازهها در شکل واقعی نیستند).

در آزمایشگاه ملی بروکهاون ساخته شدند [۱۱]. ابعاد نمونههای به دست آمده درست پس از ساخت، تقریباً ۳ ۵/۵×۵/۵×۵/۵ بودند. پس از شستشـوی دقیق نمونهها بـا اتانول و تعیین دقیق جهت محورهای بلوری، نمونه روی پايهاي قرار گرفتـه و سـطح آن بـا چسـب مـايع قـوي، كـاملاً پوشانده می شود، تا برای برش در ابعاد مورد نظر و به شکل مكعب مستطيل آماده شود. پس ازخشك شدن كامل چسب، نمونه با استفاده از ارهٔ سیمی در راستای خاص محور بلوری مورد نظر، بریده شده و سپس سطح نمونهٔ به دست آمده، با دقت فراوان با سمبادهٔ بسیار نرم صاف میشود، تا بدین ترتیب نمونههایی به شکل مکعب مستطیل با ابعاد تقریبی ۴٫۵×۰٫۱۴×۰٫۰۱۴×۱۵×۰٫۰۰۸۶ و ۴٫۵×۰٫۱۴×۱٫۰۰ به ترتیب برای نمونههای با محور a و c با بزرگترین طول در راستای محور مورد نظر، آماده شدند. اندازه گیری هدایت گرمایی با روش چهار اتصال انجام شد. با استفاده از ترکیب خاصی با پایهٔ نقره و ایندیم و با استفاده از هویه، چهار اتصال بر روی سطح نمونهها لحيم شدند. اتصالات الكتريكي- گرمايي، مقاومت الكتريكي بسيار پاييني نسبت به مقاومت نمونهها، كمتر از ۱mΩ، را نشان می دادند (این نکته، در اندازه گیری های نمونههایی که مقاومت بسیار پایینی در دماهای پایین دارند. بسیار کلیدی و حیاتی است). اندازه گیری ها در یخچال He-<sup>\*</sup>He" انجام شد. با استفاده از غوط مور کردن یخچال در هلیوم مایع ۴، دما تا ۴ کلوین پایین آمده و سپس با استفاده از دميدن مخلوطي از هليوم ۳ و ۴ در يک مدار بسته، دمـا بـه ۴۰

میلیکلوین میرسد. سهم فونونها در هدایت گرما زیـر دمـای ۱K، با آزمایش، تقریباً صفر به دست آمد [۱۲ و۱۳]. در شکل ۲ طرحوارهای از نحوهٔ انجام آزمـایش هـدایت گرمـایی نشـان داده شده است (اندازهها در شکل واقعی نیستند).

با آزمایش های مختلف [۱۱] و نیز با اندازه گیری مقاومت الکتریکی نمونه ها در دماهای نزدیک به صفر، خلوص و کامل بودن نمونه ها تایید شد؛ برای مثال، در ۲ و ۲ مقدار مقاومت الکتریکی برای نمونه a || J برابر  $\Omega cm ~ 1/\circ = a_{\circ\cdots}$ مقاومت الکتریکی برای نمونه a || J برابر  $T_c = 0, rm$  و به دست آمد [۱۳]. دمای گذار ۲۸ مراح + ۳/۰ ی تر ۲۰ م T

## ۴. نتايج

نتایج مطالعات در مورد ابررسانای «CeCoIn با دمای گذار  $T_c = 7/\%$  K  $T_c = 7/\%$  K می دهند [۲۰–۱۷]. در حالی که مطالعات بسیار اند کی بر روی «CeIrIn با ۲۸ ۲۰» – ۲۰ موجود است، بر اساس نتایج مشابه (CeIrIn با دست آمده از محاسبات ساختار نوار انرژی و اندازه گیری سطوح فرمی [۲۶–۱۷] برای این دو ترکیب، برای «CeIrIn نیز ساختار گاف موج b پیشنهاد شده است. در ادامه خواهیم دید که اندازه گیری های هدایت گرمایی، نتیجهٔ متفاوتی را برای «CeIrIn نشان می دهند.

در این جا فقط به بررسی نتایج در حالت ابررسانایی در دمای صفر کلوین می پردازیم (به عبارتی، کمیت هدایت



**شکل ۳.** (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) وابستگی دمایی هدایت گرمایی در راستای محور a و c تک بلور <sub>«</sub>CeIrIn. ناهمسانگردی دیده شده در دماهای پایین، با ساختار گاف دارای گرهٔ خطی افقی مطابقت دارد. درون شکل، یک نمایی از ساختار گاف هیبرید دارای گرهٔ خطی افقی بر روی یک سطح فرمی کروی کشیده شده است. برای مقایسه، در بیرون شکل ساختار گاف موج d که دارای گرههای خطی عمودی (عمود بر صفحه ab بلوری، و به موازات محور c تک بلور، که با خطوط قرمز نشان داده شدهاند) است [۱۷].

در آزمایشگاهی مان، تطابق خوبی را نشان می دهد [۱۳]. با قرار ول دادن مقادیر ضریب گرمای ویژه الکترونی به دست آمده از ور اندازه گیری های هدایت گرمایی، سرعت فرمی از تا اندازه گیری های سطح فرمی مانند آزمایش دو هس ون آلفن و تان، با در نظر گرفتن مقدار بیشینهٔ گاف از نظریهٔ BCS در رابطهٔ که (۲)، مقدار پیش بینی شده به دست می آید.

لازم به ذکر است، محاسبات نظری نشان میدهد که مقدار  $\frac{1}{T}$  یک مقدار جهان شمول نسبت به غلضت ناخالصی دارد T (در محدودهٔ اضافه کردن ناخالصی به اندازهٔ  $\Delta \gg X$ ، که (در محدودهٔ اضافه کردن ناخالصی به اندازهٔ  $\Delta \gg X$ ، که (در محدودهٔ اضافه کردن ناخالصی به اندازهٔ  $\frac{1}{T}$  و استفاده از رابطهٔ (۲) می توان به اندازهٔ گاف ابررسانایی  $\frac{1}{T}$  و استفاده از رابطهٔ (۲) می توان به اندازهٔ گاف ابررسانایی در مکان گره دست یافت [۶].

حال با نگاه به رفتار هدایت گرمایی در راستای محور <sup>o</sup> بلور (شکل ۳)، دیده می شود که تقریباً هیچ هدایت گرمایی در راستای محور <sup>o</sup> بلور انجام نمی شود، <sup>o</sup> <sup>o</sup> (نقاط مربع سبز). با مشاهدهٔ این ناهمسان گردی آشکار هدایت گرمایی بین دو راستای محور <sup>a</sup> و <sup>o</sup> شبکهٔ بلوری، ساختار گافی متفاوت (دارای گرهٔ خطی افقی) از ساختار پیشنهادی موج <sup>b</sup>، برای این مواد پیشنهاد می شود [۳۱، ۱۸ و ۱۹]. به عبارتی، ساختار گاف موج گرمایی،  $\frac{1}{T}$ ، را مورد بررسی قرار میدهیم). بررسی نتایج در دماهای بالاتر و در میدان مغناطیسی به مکانی دیگر موکول می شود. اندازه گیری های دقیق هدایت گرمایی مواد تک بلور می شود. اندازه گیری های دقیق هدایت گرمایی مواد تک بلور می شود. اندازه گیری های دقیق ساختار گاف ابررسانایی آن، اندازه گیری شد (شکل ۳). در شکل ۳ دیده می شود که شبه ذرات با انرژی پایین، گرما را به خوبی در راستای صفحهٔ db شبکهٔ بلوری هدایت می کنند،  $r = \frac{1}{T}$  (نقاط دایرهٔ قرمز). شبکهٔ بلوری هدایت می کنند، مای صفر برای ابررساناهای رابطهٔ (۱) در حالت ابررسانایی در دمای صفر برای ابررساناهای با گره خطی به صورت زیر بازنویسی می شود [۶]:

$$\frac{|\cdot|}{T} = \frac{1}{r} \gamma_N \upsilon_F^r \frac{a\hbar}{r - \Delta_\circ}$$
(Y)

یعنی در این نوع ابررساناها •  $\neq \frac{1}{T}$  است، که نشاندهندهٔ وجود یک مقدار غیرصفر هدایت گرمایی در دمای صفر است. در این رابطه،  $X_N$  ضریب الکترونی گرمای ویژه، a یک ثابت در حدود یک، - شیب گاف در جایی که به صفر میرسد که برای گرهٔ یک، - شیب گاف در جایی که به صفر میرسد که برای گرهٔ بیک، نشینهٔ اندازهٔ گاف در دمای صفر یا بیشینهٔ اندازهٔ گاف میباشد. مقایسهٔ این مقدار پیشبینی شده، با مقدار غیرصفر به دست آمده برای  $\frac{1}{T}$  توسط اندازه گیری های آزمایش به سختی قابل مشاهده خواهد بود.

برای تعیین سازوکار جفتشدگی الکترون ها در یک ابررسانا،

گام اساسی، تعیین ساختار گاف ابررسانا و یا به عبارتی یارامتر

نظم آن است. هدایت گرمایی یکی از دقیقترین ابزار برای

آشکارسازی برانگیختگی های شبه ذرات غیر جایگزیده در حالت

ابررسانایی است. اندازه گیریهای هـدایت گرمایی در دماهای

پایین در جهت جریانها ی گرمایی اعمالی در راستاهای

متفاوت شبكة تك بلوري و مقايسة آنها با هم، منجر به تعيين

مکان صفرهای گاف ابررسانا، تویولوژی آنها و در نتیجه یارامتر

انجام اين تحقيق با حمايت موسسهٔ تحقيقات ييشر فتهٔ كانادا

انجام شده است. ساخت نمونههای تکبلور در آزمایشگاه ملی

بروکهاون توسط دکتر چدومیر پتروویچ آانجام شده است.

۵. نتيجه گيرې

نظم ابررسانا می شود.

قدرداني

d، به دلیل دارا بودن گرههای خطی به موازات محور c تک بلور یا به عبارتی عمود بر راستای صفحهٔ ab شبکهٔ بلوری، به نام گرههای خطی عمودی، موجب رسانش گرمایی همسان گردی در دو راستای محور a و c شبکهٔ بلوری شده، که با مشاهدات آزمایشگاهی در شکل ۳ همخوانی ندارد.

با مقايسة داده هاي آزمايشگاهي شكل ٣ با كلية حالات مجاز ساختار گاف با «پاریتهٔ زوج» با جفتشدگی اسپین یگانه در گروه نقطهای تقارنی ساختار بلوری چهاروجهی (که شامل هفت حالت مجاز ساختار گاف است) [۲۰]، تابع پایه برای ساختار گاف این مواد پیشنهاد  $p_{air}(\vec{k}) = (k_x + ik_y)k_z$ می شود. این ساختار، دارای یک گرهٔ خطبی افقبی در صفحهٔ بلوری ab و دو گرهٔ نقطهای در راستای محور c بلور است (داخل شکل ۳). بدین ترتیب ساختار پیشنهادی موج d و یا هر ساختاری با گرهٔ خطی عمودی، در محدودهٔ دمایی نزدیک به صفر کلوین، برای این مواد رد می شود.

لازم به ذکر است این ساختار پارامتر نظم، به دلیل داشتن یک بخش موهومی، باعث شکست تقارن وارونی زمان می شود (زيرا  $(\vec{k}) \neq pair(\vec{k})$ ). البته اين اثر، در مواد با درجـهٔ (زيرا  $(\vec{k}) \neq pair(\vec{k})$ خلـوص و کـاملي بـالا، بسـيار ضـعيف و کوچـک بـوده و در

Gordon and Breach (1999).

- 9. N Ashcroft and N Mermin, "Solid State Physics", W.B. Saunders Company (1976).
- 10. R Joynt and L Taillefer, Rev. Mod. Phys. 74, 1 (2002) 235.
- 11. C Petrovic, P Pagliuso, et al., J. Phys: Condens. Matter 13 (2001) L337.
- 12. C Petrovic, R Movshovic et al., Europhys. Lett. 53 (2001) 354.
- 13. M A Tanatar et al., Phys. Rev. Lett. 95, 6 (2005) 067002.
- 14. H Shakeripour et al., Phys. Rev. Lett. 99 (2007) 187004.
- 15. K Izawa et al., Phys. Rev. Lett. 87, 5 (2001) 057002.
- 16. H Aoki et al., J. Phys: Condensed Matter 16 (2004) L13.
- 17. T Maehira, T Hotta, K Ueda, and A Hasegawa, J. Phys. Soc. Jpn. 72 (2003) 854.
- 18. Y Haga et al., Phys. Rev. B 63 (2001) 060503.
- 19. H Shakeripour, C Petrovic, and L Taillefer, New J. Phys. 11 (2009) 055065.

- 1. N D Mathur, F Grosche, G Lonzarich et al., Nature 394 (1998) 39.
- 2. L Taillefer, Annu. Rev. Condens. Matt. Phys. 1 (2010) 51
- 3. P G Pagliuso et al., Physica B 312-313 (2002) 129.
- 4. J-Ph Reid, A Juneau-Fecteau, R T Gordon, S R de Cotret, N Doiron-Leyraud, X G Luo, H Shakeripour et al., Supercond. Sci. Technol. 25 (2012) 084013.
- 5. J Annett, "Superconductivity, Superfluity and Condensation", Oxford University Press (2005).
- 6. M J Graf, Phys. Rev. B 53 (1996) 15147.
- 7. M R Norman and P J Hirschfeld, Phys. Rev. B 53 (1996) 5706.
- 8. V P Mineev and K V Samokhin, "Introduction to Unconventional Superconductivity", London:
- 1. Spin singlet
- Y. Canadian Institute for Advanced Research
- ۳. C Petrovic

مراجع

٣٢

٣٣

- 21. C Tsuei and J Kirtley, *Rev. Mod. Phys.* **72**, 4 (2000) 969.
- 20. H Shakeripour, M A Tanatar, C Petrovic, and L Taillefer, *Phys. Rev.* B **82** (2010) 184531.