

## پارامتر نظم ابرسانی در فلز $CeIrIn_5$

حمیده شاکری پور

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

پست الکترونیکی: hshakeri@cc.iut.ac.ir

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

### چکیده

فهم و شناخت سازوکار جفت‌شدگی الکترون‌ها در ابرسنان‌های جدید، از مسائل بنیادین در زمینه ابرسانی است. سازوکار جفت‌شدگی الکترون‌ها، با پارامتر نظم و در واقع با ساختار گاف یک ابرسنانا رابطه مستقیم دارد. ابرسنان‌های متعارف موج  $s$ ، دارای ساختار گاف متقارن در اطراف سطح فرمی هستند. حضور این ساختار پارامتر نظم متقارن، موجب می‌شود 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 ابرسانی بسیاری از ابرسنان‌های جدید، نشان‌دهنده وجود یک پارامتر نظم متفاوت از پارامتر نظم یک ابرسانی متعارف و در نتیجه، یک سازوکار متفاوت جفت‌شدگی می‌باشد. در این مقاله نشان می‌دهیم چگونه اندازه‌گیری‌های هدایت گرمایی در دماهای نزدیک به صفر کلونین، منجر به تشخیص پارامتر نظم ابرسنانا در ترکیب  $CeIrIn_5$  می‌شود.

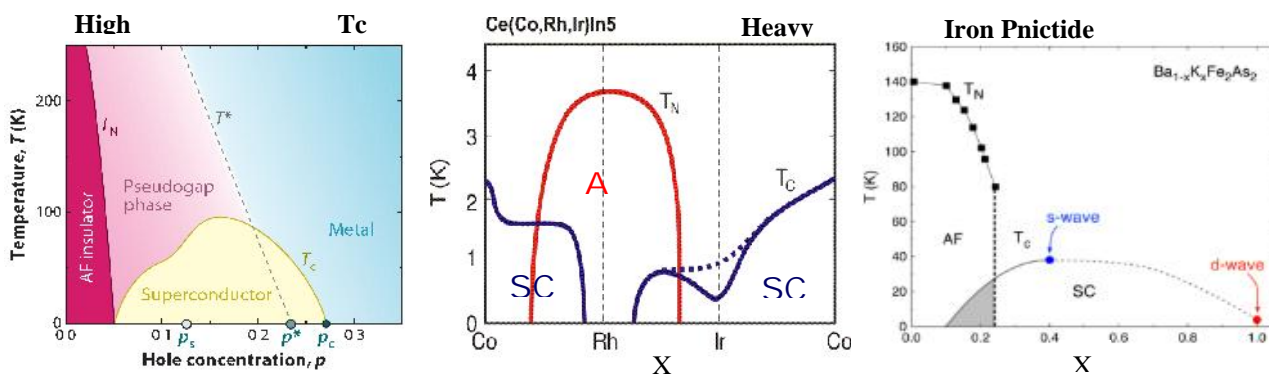
واژه‌های کلیدی: ابرسانی نامتعارف، پارامتر نظم، ساختار گاف، هدایت گرمایی

### ۱. مقدمه

چالش برانگیز برای محققین شد. مسئله چالش برانگیز در این مواد، مشاهده هم‌زمان فازهای ابرسانی و نظم پادرومغناطیسی 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 ابرسانی باید ریشه در مغناطیس داشته باشد (این دسته از ابرسنانا به ابرسنان‌های نامتعارف نام‌گذاری شدند). در حالی که در نظریه میکروسکوپی BCS ابرسانی، حضور

با کشف ابرسانی در مواد فرمیون سنگین  $CeCu_2Si_3$  (۱۹۷۹) که حاوی یون مغناطیسی Ce بوده، و سپس در ابرسنان‌های دما-بالا (۱۹۸۶) با دمای گذار در حدود ۱۰۰ کلونین، ابرسانی، که یکی از موضوعات بس‌ذره‌ای به ظاهر کاملاً فهمیده شده در فیزیک بود، دوباره تبدیل به یکی از مسائل

۱. Oxygen flow



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار فاز سه گروه از ابررساناهای نامتعارف: (سمت راست) ابررساناهای با پایه آهن، (وسط) فلزات فرمیون سنگین  $CeMIn_5$  ( $M$ : Co, Rh, Ir) و (سمت چپ) ابررساناهای دما-بالا. در همه این نمودارها، فاز ابررسانایی در مجاورت با فاز مغناطیسی دیده می‌شود و این فرضیه را به ذهن می‌آورد که سازوکار ابررسانایی باید ریشه در مغناطیس داشته باشد. (شکل‌ها از [۲-۱۴]).

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

## ۲. هدایت گرمایی

هدایت گرمایی یک ماده،  $k$ ، خاصیتی از ماده است، که توانایی هدایت گرما از خود را نشان می‌دهد.  $k$  به صورت ضریب تناسب بین جریان گرما  $J_Q$  و گرادیان دمایی اعمال شده  $\nabla T$  تعریف می‌شود:  $J_Q = -k\nabla T$ . در آزمایش، مقداری معین  $J_Q$  به نمونه اعمال شده و گرادیان دمایی نمونه، اندازه‌گیری و سپس هدایت گرمایی ماده به دست می‌آید (شکل ۲). هدایت گرمایی الکترونی در فلزات، به صورت زیر داده می‌شود [۸]:

$$ke = \frac{1}{3} C_e v_F l e = \frac{1}{3} C_e v_F^2 \tau e, \quad (1)$$

که در آن  $C_e = \frac{2}{3} k_B^2 N(E_F) T$  گرمای ویژه الکترونی در دماهای پایین،  $v_F$  سرعت فرمی،  $le$  طول پویس 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 کلونین یا در دماهای نزدیک به صفر)، می‌توان دید  $e \propto T$  (در دماهای مختلف، می‌توان برحسب نوع

ناخالصی مغناطیسی عامل شکستن جفت کوپر و در نتیجه از بین رفتن ابررسانایی می‌شود. کشف مواد با پایه آهن در ترکیبات جدید نیکتاید‌ها در سال ۲۰۰۸ (مانند  $KFe_2As_4$ ) 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 دستگانه، و در واقع با ساختار گاف یک ابررسانا رابطه مستقیم دارد. در نظریه ابررسانایی BCS که سازوکار جفت‌شدگی، برهم‌کنش مؤثر الکترون-فونون معرفی می‌شود، رابطه بین پارامتر نظم و یا به عبارتی پارامتر گاف ابررسانایی در دمای صفر ( $\Delta_0$ ) و پتانسیل برهم‌کنش بین جفت الکترون‌ها  $V$ ، به صورت زیر معرفی می‌شود:  $|\Delta_0| = \gamma \hbar^2 S_D e^{(-1/N(E_F)V)}$  که  $N(E_F)$  چگالی حالات در سطح فرمی و  $\hbar^2 S_D$  انرژی دمای است [۵]. پس، برای تعیین سازوکار جفت‌شدگی الکترون‌ها، اولین گام اساسی تعیین ساختار گاف ابررسانایی می‌باشد. در این ارتباط، اندازه‌گیری هدایت گرمایی در دماهای نزدیک به صفر کلونین 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 و ۷]، زیرا این کمیت ترمودینامیکی، مانند مقاومت الکتریکی، در دمای گذار ابررسانایی، صفر نشده و نیز جفت کوپر دارای آنتروپی صفر

(جدول ۱) [۷ و ۹].

در جدول ۱، پیش‌بینی وابستگی دمایی بعضی از کمیت‌های فیزیکی، مانند ظرفیت گرمای ویژه، هدایت 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 ابرسانایی و در دماهای پایین نشان داده شده است [۷ و ۹]. برای مثال، دیده می‌شود که با حضور گره خطی در ساختار گاف، ظرفیت گرمایی با دما رابطه  $C \propto T^2$  را داشته و اگر گره، نقطه‌ای باشد آنگاه  $C \propto T^3$  خواهد بود. این نتایج پیش‌بینی شده، در بسیاری از ابرساناها با مشاهدات آزمایشگاهی تطابق خوبی نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که خود گره نقطه‌ای، بر حسب این که گاف در مکان گره با چه شیبی روی سطح فرمی به صفر می‌رسد، انواع مختلف دارد. برای مثال، گره نقطه‌ای-خطی وقتی که  $\Delta(\omega) \propto \omega$ ، گره نقطه‌ای-مربعی وقتی که  $\Delta(\omega) \propto \omega^2$  و گره نقطه‌ای-مکعبی وقتی که  $\Delta(\omega) \propto \omega^3$  باشد. در این جدول، گره نقطه‌ای-مربعی مورد نظر است. جالب توجه این که، اندازه‌گیری‌های هدایت گرمایی، حتی قادر به تشخیص نوع گره نقطه‌ای می‌باشد. نوع و توپولوژی گره‌ها، وابستگی انرژی متفاوت و معینی را برای چگالی حالات الکترونی در حالت ابرسانایی 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 به عهده دارند. در فلزات فرمیون سنگین  $CeMIn_5(M:Co,Rh,Ir)$  با درجه خلوص و کاملی بسیار بالا، سهم فونونی در دماهای پایین تقریباً صفر بوده و در نتیجه رفتار خالص الکترون‌ها را می‌توان مورد بررسی قرار داد [۱۰ و ۱۲].

### ۳. جزئیات تجربی

تک‌بلورهای فلزی فرمیون سنگین  $CeIrIn_5$  با روش self-flux

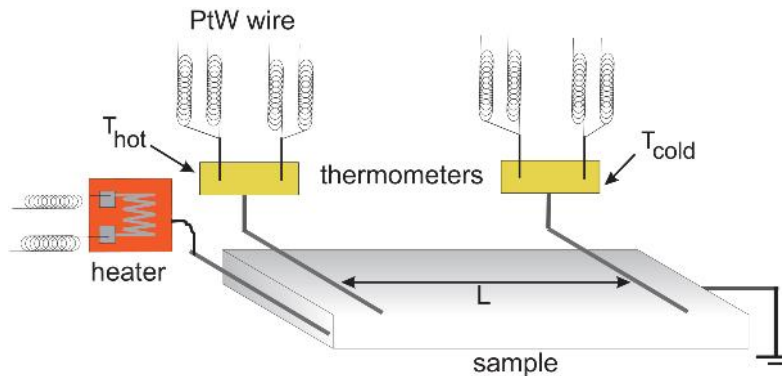
جدول ۱. وابستگی توانی بر حسب دمای بعضی از کمیت‌های فیزیکی در حالت ابرسانایی در دماهای پایین (محاسبه شده). این وابستگی‌های توانی نسبت به دما برای ابرساناها دارای گره، پیش‌بینی شده و با مشاهدات تطابق خوبی را نشان می‌دهند [۹].

Various quantities	Line node	point node
Specific heat $C_V$	$T^2$	$T^3$
NMR relaxation rate $\frac{1}{T_1}$	$T^3$	$T^5$
Thermal conductivity $\kappa$	$T^2$	$T^3$
Penetration depth $\frac{1}{\lambda_{  }^2}$	$T^3$	$T^2$
Penetration depth $\frac{1}{\lambda_{\perp}^2}$	$T$	$T^4$

فرایندهای پراکندگی الکترون، وابستگی دمایی  $le$  را به کار برده و در نتیجه وابستگی دمایی  $e$  را به دست آورد. در نتیجه، مشاهده یک رسانش گرمایی خطی غیر صفر در  $T \rightarrow 0$  که به

$$\left. \frac{1}{T} \right|_{T \rightarrow 0} \equiv \frac{1}{T^*} \text{ می‌شود.}$$

اساساً نشانه‌ای از حضور برانگیختگی‌های فرمیونی غیرجایگزیده در دستگاه در دمای صفر کلین است [۶ و ۷] برای مثال: در ابرساناهای موج  $s$  که دارای گاف کامل (بدون صفر) می‌باشند خواهیم دید  $\left. \frac{1}{T} \right|_{T \rightarrow 0} = \frac{1}{T^*} = 0$  زیرا در این محدوده دمایی، هیچ الکترونی برای حمل گرما وجود ندارد. اما در ابرساناهای کوپراتی دما-بالا با داشتن ساختار گاف موج  $d$  که دارای چهار گره خطی در راستای محور  $c$  بلوری است آنگاه  $\frac{1}{T^*} \neq 0$  حضور برانگیختگی‌های فرمیونی غیرجایگزیده در دمای صفر، ناشی از صفرهای موجود در پارامتر گاف می‌باشد [۷]. وجود این صفرها یا گره‌های ناشی از شکست تقارن گروه نقطه‌ای دستگاه در هنگام گذار، موجب می‌شود که رفتار دمایی بسیاری از کمیت‌های فیزیکی مانند کمیت‌های ترمودینامیکی، در دماهای پایین به جای رفتارهای دمایی پیش‌بینی شده در نظریه میکروسکوپی ابرسانایی متعارف، رفتارهای توانی باشد: ( $\propto T^n$ ). توان  $n$ ، به وسیله توپولوژی گره تعیین می‌شود



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طرح‌واره‌ای از نحوه اندازه‌گیری هدایت گرمایی با روش چهار اتصاله (اندازه‌ها در شکل واقعی نیستند).

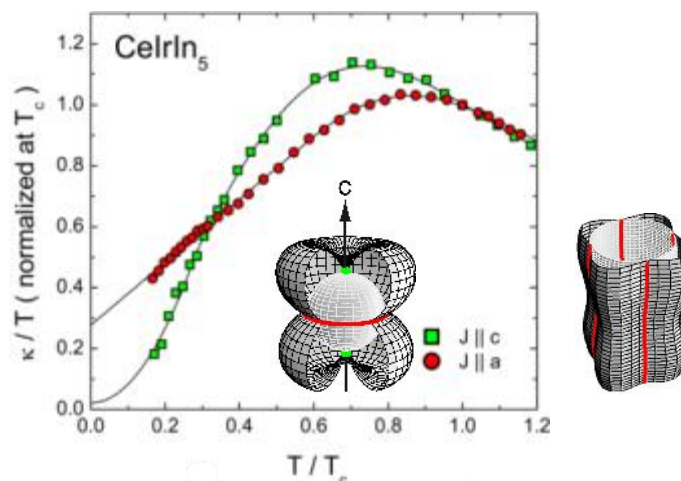
میلی‌کلوین می‌رسد. سهم فونون‌ها در هدایت گرما زیر دمای ۱ K، با آزمایش، تقریباً صفر به دست آمد [۱۲ و ۱۳]. در شکل ۲ طرح‌واره‌ای از نحوه انجام آزمایش هدایت گرمایی نشان داده شده است (اندازه‌ها در شکل واقعی نیستند). با آزمایش‌های مختلف [۱۱] و نیز با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی نمونه‌ها در دماهای نزدیک به صفر، خلوص و کامل بودن نمونه‌ها تایید شد؛ برای مثال، در  $T = 0$  و  $H$  مقدار مقاومت الکتریکی برای نمونه  $a \parallel J$  برابر  $\rho_{aa} = 0.2 \Omega \text{ cm}$  ... به دست آمد [۱۳]. دمای گذار  $T_c = 0.38 \pm 0.02 \text{ K}$  و  $T_c = 0.49 \text{ K}$  ( $H \parallel c$ ) به دست آمد.

#### ۴. نتایج

نتایج مطالعات در مورد ابررسانای  $\text{CeCoIn}_5$  با دمای گذار  $T_c = 2.3 \text{ K}$ ، ساختار گاف موج  $d$  را برای این فلز پیشنهاد می‌دهند [۱۴-۱۷]. در حالی که مطالعات بسیار اندکی بر روی  $\text{CeIrIn}_5$  با  $T_c = 0.38 \text{ K}$  موجود است، بر اساس نتایج مشابه به دست آمده از محاسبات ساختار نوار انرژی و اندازه‌گیری سطوح فرمی [۱۶-۱۷] برای این دو ترکیب، برای  $\text{CeIrIn}_5$  نیز ساختار گاف موج  $d$  پیشنهاد شده است. در ادامه خواهیم دید که اندازه‌گیری‌های هدایت گرمایی، نتیجه متفاوتی را برای  $\text{CeIrIn}_5$  نشان می‌دهند.

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

در آزمایشگاه ملی بروک‌هاون ساخته شدند [۱۱]. ابعاد نمونه‌های به دست آمده درست پس از ساخت، تقریباً  $0.5 \times 0.5 \times 0.5 \text{ cm}^3$  بود. پس از شستشوی دقیق نمونه‌ها با اتانول و تعیین دقیق جهت محورهای بلوری، نمونه روی پایه‌ای قرار گرفته و سطح آن با چسب مایع قوی، کاملاً پوشانده می‌شود، تا برای برش در ابعاد مورد نظر و به شکل مکعب مستطیل آماده شود. پس از خشک شدن کامل چسب، نمونه با استفاده از اهر سیمی در راستای خاص محور بلوری مورد نظر، بریده شده و سپس سطح نمونه به دست آمده، با دقت فراوان با سمباده بسیار نرم صاف می‌شود، تا بدین ترتیب نمونه‌هایی به شکل مکعب مستطیل با ابعاد تقریبی  $1 \times 0.15 \times 0.086 \text{ mm}^3$  و  $4.5 \times 0.14 \times 0.045 \text{ mm}^3$  نمونه‌های با محور  $a$  و  $c$  با بزرگترین طول در راستای محور مورد نظر، آماده شدند. اندازه‌گیری هدایت گرمایی با روش چهار اتصال انجام شد. با استفاده از ترکیب خاصی با پایه نقره و ایندیم و با استفاده از هویه، چهار اتصال بر روی سطح نمونه‌ها لحیم شدند. اتصالات الکتریکی-گرمایی، مقاومت الکتریکی بسیار پایینی نسبت به مقاومت نمونه‌ها، کمتر از  $1 \text{ m}\Omega$ ، را نشان می‌دادند (این نکته، در اندازه‌گیری‌های نمونه‌هایی که مقاومت بسیار پایینی در دماهای پایین دارند، بسیار کلیدی و حیاتی است). اندازه‌گیری‌ها در یخچال  $^3\text{He}-^4\text{He}$  انجام شد. با استفاده از غوطه‌ور کردن یخچال در هلیوم مایع ۴، دما تا ۴ کلوین پایین آمده و سپس با استفاده از میدن مخلوطی از هلیوم ۳ و ۴ در یک مدار بسته، دما به ۴۰



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) وابستگی دمایی هدایت گرمایی در راستای محور  $a$  و  $c$  تک بلور CeIrIn<sub>5</sub>. ناهمسانگردی دیده شده در دماهای پایین، با ساختار گاف دارای گره خطی افقی مطابقت دارد. درون شکل، یک نمایی از ساختار گاف هیبرید دارای گره خطی افقی بر روی یک سطح فرمی 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].

آزمایشگاهی مان، تطابق خوبی را نشان می‌دهد [۱۳]. با قرار دادن مقادیر ضریب گرمای ویژه الکترونی به دست آمده از اندازه‌گیری‌های هدایت گرمایی، سرعت فرمی از اندازه‌گیری‌های سطح فرمی مانند آزمایش دو هس-ون آلفن و با در نظر گرفتن مقدار بیشینه گاف از نظریه BCS در رابطه (۲)، مقدار پیش‌بینی شده به دست می‌آید.

لازم به ذکر است، محاسبات نظری نشان می‌دهد که مقدار  $\frac{\kappa}{T}$  یک مقدار جهان شمول نسبت به غلظت ناخالصی دارد (در محدوده اضافه کردن ناخالصی به اندازه  $\Delta \ll X$ ، که  $X$  پهنای نوار ناخالصی را نشان می‌دهد) و در نتیجه، با اندازه‌گیری  $\frac{\kappa}{T}$  و استفاده از رابطه (۲) می‌توان به اندازه گاف ابرسانی در مکان گره دست یافت [۶].

حال با نگاه به رفتار هدایت گرمایی در راستای محور  $c$  بلور (شکل ۳)، دیده می‌شود که تقریباً هیچ هدایت گرمایی در راستای محور  $c$  بلور انجام نمی‌شود،  $\frac{\kappa}{T} \sim 0$  (نقاط مربع سبز). با مشاهده این ناهمسانگردی آشکار هدایت گرمایی بین دو راستای محور  $a$  و  $c$  شبکه بلوری، ساختار گافی متفاوت (دارای گره خطی افقی) از ساختار پیشنهادی موج  $d$ ، برای این مواد پیشنهاد می‌شود [۱۳، ۱۸ و ۱۹]. به عبارتی، ساختار گاف موج

گرمایی،  $\frac{\kappa}{T}$ ، را مورد بررسی قرار می‌دهیم). بررسی نتایج در دماهای بالاتر و در میدان مغناطیسی به مکانی دیگر موکول می‌شود. اندازه‌گیری‌های دقیق هدایت گرمایی مواد تک بلور CeIrIn<sub>5</sub> دو جهت ساختار بلوری  $a$  و  $c$  ( $J \parallel a$  و  $J \parallel c$ ) تا دمای نزدیک ۴۰ mK برای یافتن ساختار گاف ابرسانی آن، اندازه‌گیری شد (شکل ۳). در شکل ۳ دیده می‌شود که شبه‌ذرات با انرژی پایین، گرما را به خوبی در راستای صفحه  $ab$  شبکه بلوری هدایت می‌کنند،  $\frac{\kappa}{T} \neq 0$  (نقاط دایره-قرمز). رابطه (۱) در حالت ابرسانی در دمای صفر برای ابرسازانهای با گره خطی به صورت زیر بازنویسی می‌شود [۶]:

$$\frac{\kappa}{T} = \frac{1}{3} \gamma_N v_F^2 \frac{a \hbar}{2 \Delta} \quad (2)$$

یعنی در این نوع ابرسازها  $\frac{\kappa}{T} \neq 0$  است، که نشان‌دهنده وجود یک مقدار غیرصفر هدایت گرمایی در دمای صفر است. در این رابطه،  $\gamma_N$  ضریب الکترونی گرمای ویژه،  $a$  یک ثابت در حدود یک،  $\sim$  شیب گاف در جایی که به صفر می‌رسد که برای گره خطی دارای مقداری برابر ۲ و  $\Delta$  اندازه گاف در دمای صفر یا بیشینه اندازه گاف می‌باشد. مقایسه این مقدار پیش‌بینی شده، با مقدار غیرصفر به دست آمده برای  $\frac{\kappa}{T}$  توسط اندازه‌گیری‌های

آزمایش به سختی قابل مشاهده خواهد بود.

### ۵. نتیجه گیری

برای تعیین سازوکار جفت‌شدگی الکترون‌ها در یک ابررسانا، گام اساسی، تعیین ساختار گاف ابررسانا و یا به عبارتی پارامتر نظم آن است. هدایت گرمایی یکی از دقیق‌ترین ابزار برای آشکارسازی برانگیختگی‌های شبه ذرات غیرجایگزیده در حالت ابررسانایی است. اندازه‌گیری‌های هدایت گرمایی در دماهای پایین در جهت جریان‌های گرمایی اعمالی در راستاهای متفاوت شبکه تک بلوری و مقایسه آنها با هم، منجر به تعیین مکان صفرهای گاف ابررسانا، توپولوژی آنها و در نتیجه پارامتر نظم ابررسانا می‌شود.

### قدردانی

انجام این تحقیق با حمایت موسسه تحقیقات پیشرفته کانادا<sup>۱</sup> انجام شده است. ساخت نمونه‌های تک‌بلور در آزمایشگاه ملی بروک‌هاون توسط دکتر چدومیر پتروویچ<sup>۲</sup> انجام شده است.

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

با مقایسه داده‌های آزمایشگاهی شکل ۳ با کلیه حالات مجاز ساختار گاف با «پارینه زوج» با جفت‌شدگی اسپین یگانه<sup>۱</sup> در گروه نقطه‌ای تقارنی ساختار بلوری چهاروجهی (که شامل هفت حالت مجاز ساختار گاف است) [۲۰]، تابع پایه  $\text{pair}(\vec{k}) = (k_x + ik_y)k_z$  برای ساختار گاف این مواد پیشنهاد می‌شود. این ساختار، دارای یک گره خطی افقی در صفحه بلوری ab و دو گره نقطه‌ای در راستای محور c بلور است (داخل شکل ۳). بدین ترتیب ساختار پیشنهادی موج d و یا هر ساختاری با گره خطی عمودی، در محدوده دمایی نزدیک به صفر کلون، برای این مواد رد می‌شود.

لازم به ذکر است این ساختار پارامتر نظم، به دلیل داشتن یک بخش موهومی، باعث شکست تقارن وارونی زمان می‌شود (زیرا  $\text{pair}(\vec{k}) \neq \text{pair}^*(\vec{k})$ ). البته این اثر، در مواد با درجه خلوص و کاملی بالا، بسیار ضعیف و کوچک بوده و در

### مراجع

- 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, Superfluidity 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:

۱. Spin singlet

۲. Canadian Institute for Advanced Research

۳. C Petrovic

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.