

## ابرسانایی آمیخته در عایق توپولوژیک

مریم خضرو<sup>1</sup> و هادی گودرزی<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> دانشگاه ارومیه، دانشکده علوم، گروه فیزیک

<sup>2</sup> بنیاد ملی نخبگان

### چکیده

ابرسانایی با تقارن آمیخته اسپین تک-گانه و سه-گانه در سیستم‌هایی با شکست تقارن وارونی قابل مشاهده است. در کار حاضر این جفت-شدگی زوج بر حالت‌های سطحی یک عایق توپولوژیک سه بعدی بواسطه اثر مجاورت اعمال می‌شود. همبستگی دینامیک نسبیتی حالت‌های دو بعدی که توسط تقارن معکوس زمانی حفظ می‌شود و جفت‌شدگی ابرسانایی آمیخته باعث نتایج جالب توجهی در انرژی برانگیختگی شبه ذرات الکترون - حفره می‌گردد. گاف مؤثر ابرسانایی در طیف انرژی پاشندگی و موقعیت آن تحت تاثیر دامنه‌های جفت‌شدگی اسپین تک-گانه و سه-گانه تغییر می‌کند. طیف انرژی بدون گاف دیراک در عایق توپولوژیک، در حضور ابرسانایی آمیخته به حالت فرمیونهای جرم‌دار تبدیل می‌شود که این نتیجه مختص اثر مجاورت ابرسانایی در سیستم دیراک-گونه است و در ابرساناهای نامتقارن دیگر قابل مشاهده نیست. هر کدام از این نتایج منجر به تغییر ماهیت سیستم تراپردی بر پایه عایق توپولوژیک خواهد شد. هم-چنین تقارن های گسسته ذره-حفره و معکوس زمانی برای این سیستم مطالعه شده و کلاس توپولوژیکی آن تعیین می‌گردد.

### مقدمه

در فیزیک ماده چگال، عایق توپولوژیک به علت فاز غیر بدیهی توپولوژیکی، در مقایسه با عایق‌های معمول دارای ویژگی‌های منحصر بفرد الکترونیکی می‌باشد. در سطح عایق توپولوژیک سه بعدی حامل‌های بار به صورت فرمیونهای دیراک بدون جرم رفتار می‌کنند. این حالات سطحی دارای تقارن معکوس زمانی بوده و در برابر اختلالات و بی‌نظمی‌ها مقاوم می‌باشند. خواص ویژه این مواد آنها را برای استفاده در صنعت اسپینترونیک و ابزار کوانتومی توپولوژیکی توانا می‌سازد [1 و 2]. در کنار این خواص، القای خاصیت ابرسانایی با استفاده از اثر مجاورت در عایق توپولوژیک در سالهای اخیر توجه بسیار زیادی به خود جلب کرده است. پتانسیل جفت‌شدگی می‌تواند در سیستم نرمال عایق توپولوژیک، بدون هیچ اندرکنش بلکه به واسطه نفوذ چگالش جفت کوپر از یک ابرسانا ایجاد شود [3 و 4]. گزارش‌های تجربی در القای ابرسانایی اسپین تک-گانه و سه-گانه در حالت‌های سطحی عایق توپولوژیک سه بعدی ارائه شده است. در این حوزه، یکی از کاربردی‌ترین نتایج، مشاهده فرمیونهای مایارونا در حالات مقید آندریف تشکیل شده در فصل مشترک ابرسانا/فرومغناطیس بر پایه عایق توپولوژیک می‌باشد. فو و کین در مطالعات خود نشان دادند که معادله باگالیوف-دی جنیس با ابرسانای معمول نوع  $s$  جفت‌شدگی غیر معمول با مولفه‌های اسپین سه-گانه را در عایق توپولوژیکی القا می‌کند [5]. این موضوع به علت قفل‌شدگی اسپین-اندازه حرکت به واسطه جمله  $\vec{\sigma} \cdot \vec{p}$  در هامیلتونی رخ می‌دهد که منجر به شکست تقارن دورانی اسپین می‌شود.

همچنین انرژی شبه ذرات عایق توپولوژیک در مجاورت ابرسانا با تقارن سه-گانه، دارای گاف مؤثر ابرسانایی صفر است که منجر به توقف فرآیند آندریف در اتصالات مربوطه می‌شود. شکست تقارن وارونی در عایق توپولوژیک امکان بررسی ابرسانایی آمیخته اسپین تک-گانه و سه-گانه را فراهم می‌کند که گزارش‌های تجربی اخیر نیز مؤید این مطلب است [6]. قبل از این، ابرسانایی آمیخته در کوپراتها گزارش شده بود که در این مواد نیز شکست تقارن وارونی منجر به اندرکش قوی اسپین-مدار می‌شود [7]. در کار حاضر، اثر تقارن آمیخته بر روی خواص دینامیکی عایق توپولوژیک با جزییات مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در این راستا تقارنهای وارونی، ذره-حفره و معکوس زمانی مطالعه شده و اثر آن بر ایجاد گاف دیراک مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

## هامیلتونی مؤثر

ساختار عایق توپولوژیک را بر پایه اثر مجاورت به گونه‌ای که دارای پتانسیل جفت شدگی آمیخته تک‌گانه و سه‌گانه باشد در نظر می‌گیریم. فرم عمومی پتانسیل جفت‌شدگی آمیخته به صورت  $\hat{\Delta}(\vec{k}) = [\Delta_s(\vec{k})\hat{\sigma}_0 + \vec{d}(\vec{k}) \cdot \vec{\sigma}]i\hat{\sigma}_2 e^{i\varphi}$  می‌باشد که ماتریس‌های پائولی بر روی فضای اسپینی اثر می‌کنند و  $\varphi$  بیانگر فاز ابررسانایی می‌باشد. مولفه اسپین تک‌گانه تابعی زوج از عدد موج می‌باشد که فرض بر ثابت بودن آن است. پارامتر نظم حالت سه‌گانه با تابع فرد  $\vec{d}(\vec{k})$  توصیف می‌شود. این تابع برای جفت-شدگی کایرال سه‌گانه به فرم  $\vec{d}(\vec{k}) = \Delta_p [\cos\theta + i\chi \sin\theta]\hat{z}$  تعریف می‌شود که  $\Delta_p$  دامنه پارامتر نظم سه‌گانه است و  $\chi$  جهت‌گیری اندازه حرکت زاویه‌ای جفت کوپر را نشان می‌دهد.

برای محاسبه رابطه انرژی پراکندگی حالات سطحی عایق توپولوژیک در مجاورت ابررسانا از هامیلتونی دیراک-باگالیوف-دی جنیس استفاده می‌شود:

$$H = \begin{pmatrix} \hat{h}_{II}(\vec{k}) & \hat{\Delta}(\vec{k}) \\ \Xi \hat{\Delta}(\vec{k}) \Xi^{-1} & \Xi \hat{h}_{II}(\vec{k}) \Xi^{-1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

که در این رابطه هامیلتونی ذره آزاد  $\mu$   $\hat{h}_{II}(\vec{k}) = v_F(\hat{\sigma}_1 k_x + \hat{\sigma}_2 k_y) - \mu$  می‌باشد.  $v_F$  معرف سرعت حامل‌های بار و  $\mu$  پتانسیل شیمیایی است. تقارن ذره-حفره با عملگر پادیونیتاری  $\Xi$  توصیف می‌شود که بر روی هامیلتونی دیراک و پتانسیل جفت-شدگی ابررسانا اثر می‌کند. هامیلتونی  $H$  تحت عملگر  $\Xi = \hat{\tau}_1 \otimes \hat{\sigma}_0$  که ماتریس  $\hat{\tau}_1$  مربوط به فضای ذره-حفره است به صورت  $H^*(-\vec{k})$  رفتار می‌کند و بنابراین دارای تقارن ذره-حفره است. می‌توان نتیجه گرفت که در این شرایط تبهگنی اسپینی سطح فرمی از بین رفته و شرایط برای وجود فرمیونهای مایارونا مهیا می‌گردد. وجود جفت شدگی سه‌گانه کایرال موجب شکست تقارن معکوس زمانی می‌شود که عملگر آن به فرم  $\Theta = \hat{\tau}_0 \otimes i\hat{\sigma}_2$  تعریف می‌شود. با ملاحظه فرم ماتریسی عملگرهای تقارنی ذره-حفره  $\Xi$  و معکوس زمانی  $\Theta$  می‌توان کایرالیته سیستم را از طریق ویژه مقادیر این تقارنها معین نمود. از اینرو هامیلتونی  $H$  در دسته بندی توپولوژیکی جز دسته  $D$  قرار خواهد گرفت. اگر پارامتر نظم سه‌گانه از نوع کایرال نباشد تقارن معکوس زمانی حفظ شده و کلاس توپولوژیکی مربوطه  $DIII$  خواهد بود.

قطری سازی هامیلتونی (1) منجر به رابطه انرژی پراکندگی می‌شود:

$$\varepsilon_{mix} = \alpha \sqrt{v_F^2 k^2 + \tilde{\Delta}_1 + \mu^2} + \beta \sqrt{\varepsilon_R}, \quad (2)$$

که  $\varepsilon_R$  بازبهنجارش مربوط به جفت شدگی آمیخته می‌باشد.  $\alpha = \pm 1$  برانگیختگی الکترون و حفره را از هم جدا کرده و  $\beta = \pm 1$  نوارهای ظرفیت و رسانش را نشان می‌دهد.  $\tilde{\Delta}_1$  تابعی از دو کانال اسپینی  $\Delta_{1(2)} = \Delta_s \pm \Delta_p e^{i\chi\theta}$  می‌باشد.

اگر این انرژی را با انرژی ابررسانایی نامتقارن معمول (بدون حضور سیستم دیراکی) دارای جفت شدگی آمیخته مقایسه کنیم به نتایج جالبی می‌رسیم. یکی از نکات مهم آن است که هامیلتونی و انرژی ابررسانایی نامتقارن معمول به ازای دو کانال اسپینی جدا می‌شوند، بطوریکه تغییر علامت بردار موج باعث تغییر طیف انرژی می‌شود [8]. از اینرو پتانسیل جفت شدگی به  $\Delta_{1(2)}$

تنهایی با جهت حرکت در ارتباط است. اما در حضور عایق توپولوژیکی، انرژی پراکندگی تابعی آمیخته از دو کانال اسپینی  $\Delta_{1(2)}$  می باشد.

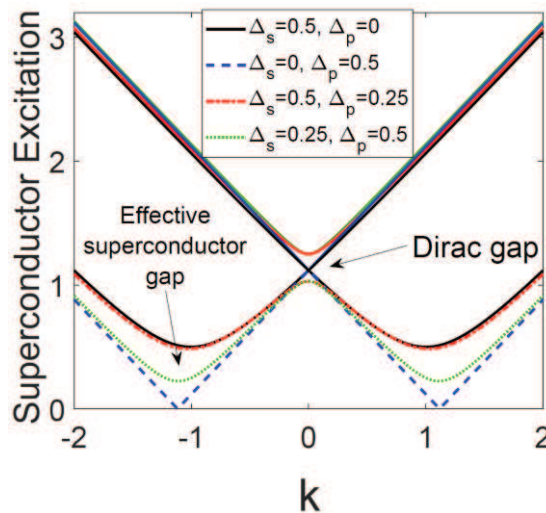
در طیف انرژی پراکندگی حالت تک گانه یا سه گانه، نوار رسانش و ظرفیت همدیگر را در نقطه دیراک قطع می کنند که این موضوع از نظر الکترونیکی دارای اهمیت ویژه ای می باشد. اما در حالت جفت شدگی آمیخته توپولوژی نواری دچار تغییر می شود بطوریکه به جای یک طیف دیراک بدون گاف، شاهد گاف انرژی در نقطه دیراک خواهیم بود که اندازه آن به دامنه های پراکندگی پتانسیل های جفت شدگی ابررسانایی  $\Delta_p$  و  $\Delta_s$  مرتبط است (نمودار 1). در واقع جرم مؤثر نقطه دیراک به همبستگی دامنه های  $\Delta_p$  و  $\Delta_s$  مرتبط است. به روش ریاضی می توان با یک تبدیل یونیتاری بر روی هامیلتونی (1)، فرم دقیق هامیلتونی گافدار را بدست آورد.

### گاف مؤثر ابررسانایی

گاف مؤثر ابررسانایی نیز تحت تاثیر دامنه های جفت شدگی اسپین تک گانه و سه گانه می باشد. فرم دقیق گاف مؤثر ابررسانایی برای حالت آمیخته از رابطه (2) قابل محاسبه است:

$$\Delta_{eff} = \sqrt{\tilde{\Delta}_1 - \frac{|\Delta_1 - \Delta_2|^2}{4} - \frac{\tilde{\Delta}_2^2}{\mu' + \sqrt{\mu'^2 + 4\tilde{\Delta}_2^2}}} \quad (3)$$

که در این رابطه  $\mu'$  بازبهنجارش پتانسیل شیمیایی و  $\tilde{\Delta}_2$  نیز تابعی از دو کانال اسپینی  $\Delta_{1(2)}$  می باشد. موقعیت گاف مؤثر ابررسانایی بر حسب بردار موج نیز با رابطه  $\Gamma = \frac{1}{2} \sqrt{\mu' + \sqrt{\mu'^2 + 4\tilde{\Delta}_2^2}}$  تعیین می شود (نمودار 1).



نمودار 1: طیف برانگیختگی ابررسانایی عایق توپولوژیکی به ازای جفت شدگی تک گانه، سه گانه و آمیخته

باید توجه داشت برای حالات خاص تقارن تک گانه و سه گانه موقعیت گاف ابررسانایی فقط با  $\mu$  رابطه دارد، اما در حالت آمیخته،  $\Delta_{1(2)}$  باعث تغییر موقعیت  $\Gamma$  می شود. طبق رابطه (3)، در حالت تک گانه که  $\Delta_1 = \Delta_2$  است، گاف مؤثر ابررسانایی دقیقاً برابر مقدار همسانگرد و ثابت  $\Delta_s$  می شود، اما در حالت سه گانه که  $\Delta_1 = -\Delta_2$  است، گاف مؤثر ابررسانایی صفر می شود. فرم انرژی پراکندگی، گاف نقطه دیراک، محل گاف ابررسانایی و مقدار مؤثر آن در نمودار 1 به ازای جفت شدگی تک گانه، سه گانه و آمیخته نشان داده شده است.

## نتیجه گیری

با معرفی هامیلتونی دیراک-باگالیوف-دی جنیس در حضور جفت شدگی ابررسانایی آمیخته، فرم دقیق انرژی پراکندگی بر پایه عایق توپولوژیک محاسبه شد. تابعیت پیچیده انرژی برانگیختگی حالت آمیخته برای دو کانال اسپینی در عایق توپولوژیک منجر به اهمیت مطالعه این سیستم ها در مقایسه با سیستم هایی دارای دینامیک غیرنسبیتی می گردد. از آنجایی که گاف مؤثر ابررسانایی در فرآیند مهم انعکاس آندریف نقش بسزایی دارد، محاسبه رابطه دقیق این کمیت منجر به بدست آوردن رسانندگی وابسته به فرآیند آندریف در ساختارهای ابررسانا-نرمال به صورت تئوری می شود که قابلیت مقایسه با نتایج تجربی را دارد.

## سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از حمایت مالی معاونت علمی فناوری ریاست جمهوری و بنیاد ملی نخبگان کمال تشکر و قدردانی را دارند.

## مرجع ها

- [1] C. L. Kane, E. J. Mele, Phys. Rev. Lett. 95, 146802 (2005).
- [2] M. Z. Hasan, C. L. Kane, Rev. Mod. Phys. 82, 3045 (2010).
- [3] J. Wang, C. Z. Chang, H. Li, K. He, D. Zhang, M. Singh, X. C. Ma, N. Samarth, M. Xie, Q. K. Xue and M. H. W. Chan, Phys. Rev. B, 85, 045415 (2012).
- [4] G. Koren, T. Kirzhner, E. Lahoud, K. B. Chashka and A. Kanigel, Phys. Rev. B, 84, 224521 (2011).
- [5] L. Fu, C. L. Kane, Phys. Rev. Lett. 100, 096407 (2008).
- [6] M. P. Stehno, N. W. Hendrickx, M. Snelder, T. Scholten, Y. K. Huang, M. S. Golden and A. Brinkman, Semicond. Sci. Technol. 32, 094001 (2017).
- [7] P. A. Frigeri, D. F. Agterberg, A. Koga, and M. Sigrist, Phys. Rev. Lett. 92, 097001 (2004).
- [8] P. Bursset, F. Keidel, Y. Tanaka, N. Nagaosa and B. Trauzettel, Phys. Rev. B, 90, 085438 (2014).