

تأثیر جداشدگی راشبا بر برهمکنش تبادلی غیرمستقیم در لایه‌ی نازک عایق توپولوژیک

شیرانزائی، مه‌رو^۱؛ پرهیزگار، فریبرز^۲؛ چراغچی، حسین^۱^۱ دانشگاه دامغان، دانشکده فیزیک^۲ مرکز تحقیقات دانش‌های بنیادی، پژوهشکده فیزیک

چکیده

با توجه به وجود برهمکنش راشبا در لایه‌ی نازک عایق توپولوژیک، این برهمکنش منجر به سه نوع برهمکنش متفاوت با نام‌های برهمکنش هایزنبرگ‌گونه، آیزینگ-گونه و ژیلوشینسکی-موریایگونه می‌شود. هر سه جمله به فاصله‌ی بین دو ناخالصی، انرژی فرمی و پتانسیل اعمالی بستگی دارد. بعلاوه، این برهمکنش‌ها می‌توانند موجب نظم ناخالصی‌های مغناطیسی شوند که برای اثر کوانتومی غیرعادی هال ضروری است. شکسته شدن تقارن وارون فضایی در این سیستم به جداشدگی راشبا در نوار انرژی لایه‌ی نازک عایق توپولوژیک منجر می‌شود و ما اثر جداشدگی بر روی رفتار جمله‌های برهمکنشی را مورد بررسی قرار داده‌ایم.

The effect of Rashba spin-splitting on the indirect exchange interaction in a thin film of topological insulator

Shiranzaei, Mahroo¹; Parhizgar, Fariborz²; Cheraghchi, Hosein¹¹ Department of Physics, Damghan university, Damghan² School of Physics, Institute for Research in Fundamental Sciences (IPM), Tehran

Abstract

Quantum anomalous Hall (QAH) has been experimentally realized in topological insulator (TI) thin films. So investigation of the effect of magnetic impurities on this material including indirect exchange interaction between impurities known as Ruderman-Kittel-Kasuya-Yoshida (RKKY) interaction becomes of much importance. By considering the existence of Rashba coupling in TI thin film in such system, RKKY interaction includes three different interactions between two magnetic impurities: Heisenberg, Ising and Dzyaloshinski-Moriya terms. These three interactions can cause magnetic ordering which is necessary for QAH effect. The behavior of them depends on distance between two magnetic impurities, the Fermi energy and voltage.

PACS No. 70.00, & 75.00

مقدمه

با توجه به اهمیت این موضوع در اسپینترونیک، در این مطالعه، ما به بررسی برهمکنش تبادلی غیرمستقیم در لایه‌ی نازک عایق توپولوژیک با روش تابع گرین پرداخته‌ایم. برهمکنش تبادلی غیرمستقیم، برهمکنشی مؤثر بین دو ممان مغناطیسی است که توابع موج‌شان با هم همپوشانی مستقیم فضایی ندارند اما به واسطه‌ی حضور الکترون‌های سیار سیستم با یکدیگر برهمکنش می‌کنند. این نوع برهمکنش با نظریه‌ی رودرمان-کیتل-کاسویا-یوشیدا (RKKY) توصیف می‌شود. در این نظریه، با حل اختلالی مدل زرنر تا مرتبه‌ی دوم، جفت‌شدگی بین ممان‌های مغناطیسی

یکی از ساختارهای کاربردی و جذاب برای تحقیقات، لایه‌ی نازک عایق توپولوژیک است که دارای دو حالت سطحی می‌باشد و به دلیل ضخامت کم بین آن دو، امکان تونل‌زنی بین آن‌ها وجود دارد و طیف حالت‌های سطحی می‌تواند گاف‌دار شود. به‌طور تجربی برای اولین بار، اثر کوانتومی غیرعادی هال در لایه‌ی نازک این مواد دیده شد [1-3] و این کشف جدید در سال‌های پیشین، منجر به گستره‌ی فراوانی از مطالعات کاربردی درباره‌ی اثر ناخالصی‌های مغناطیسی بر روی عایق توپولوژیک شده است.

در شکل 1 دیده می‌شود که طیف انرژی لایه‌ی نازک عایق توپولوژیک در این رژیم گاف‌دار است. در $V=0$ دو نوار وجود دارد اما با افزایش V تبهگنی آن شکسته می‌شود و هر کدام به دو نوار تبدیل می‌شوند به طوریکه جدانشدگی راشبا در نوار انرژی سیستم دیده می‌شود و حامل‌های سیستم را باید با دو بردار موج متفاوت توصیف نمود. در شکل 1 خط نقطه‌ای، گویای انرژی فرمی است و می‌توان دید که در نقطه‌ی گذاری که با شرط $\epsilon_F = \sqrt{\Delta^2 + V^2}$ تعیین می‌شود یکی از بردار موج‌های فرمی به مقدار صفر می‌رسد. می‌توان نشان داد در این نقطه، چگالی حالت-های انرژی بر روی صفحه بالای جایگزیده هستند.

هامیلتونی برهمکنش RKKY به صورت ذیل، جفت‌شدگی مؤثر بین دو ناخالصی مغناطیسی را با تابع پذیرفتاری اسپینی بیان می‌کند [7-9]

$$H_{RKKY} = J_c^2 \sum_{i,j} I_i \chi_{ij}(r, r') I_j \quad (2)$$

که در آن، $\chi_{ij}(r, r')$ تابع پذیرفتاری اسپینی در رژیم پاسخ خطی می‌باشد و با تابع گرین تأخیری سیستم خالص رابطه دارد.

$$\chi_{ij}^{\alpha\beta}(r, r') = \frac{-1}{2\pi} \text{Im} \int_{-\infty}^{\epsilon_F} d\epsilon \text{Tr}[\sigma_i G^{\alpha\beta}(r, r', \epsilon) \sigma_j G^{\beta\alpha}(r', r, \epsilon)] \quad (3)$$

α و β نشان‌دهنده‌ی صفحات لایه‌ی نازک و $\sigma_{i,j}$ ماتریس‌های پائولی با $i, j = x, y, z$ هستند. همچنین، ϵ_F انرژی فرمی را نشان می‌دهد. $G^{\alpha\beta}(r, r')$ تابع گرین تأخیری سیستم خالص می‌باشد و رد روی درجه‌ی آزادی اسپینی گرفته می‌شود.

نتیجه‌ها

با بررسی تقارن‌های موجود و ویژگی‌های سیستم، انتظار می‌رود در این سیستم که جفت‌شدگی اسپین-مدار راشبا وجود دارد برهمکنش RKKY را بتوان مجموعه‌ای از سه نوع برهمکنش متفاوت در نظر گرفت [11-12]. در این سیستم، در حالت کلی برهمکنش RKKY وابستگی زاویه‌ای به زاویه‌ی راستای ناخالصی، ϕ_R ، دارد اما برای $\phi_R = 0$ ، هامیلتونی RKKY در نهایت به شکل ذیل نوشته شود

$$H_{RKKY}^{\alpha\beta} = J_H^{\alpha\beta} (I_i \cdot I_j) + J_I^{\alpha\beta} (I_{iy} I_{jy}) + J_{DM}^{\alpha\beta} (I_i \times I_j)_y \quad (4)$$

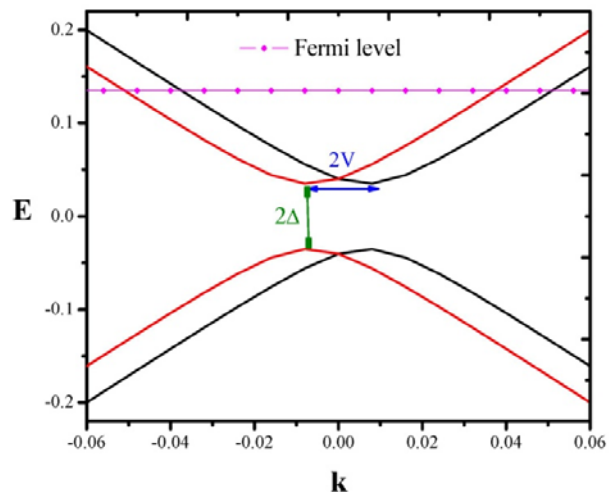
جایگزیده و الکترون‌های سیار به صورت برهمکنش RKKY به تابع پاسخ پذیرفتاری اسپینی مرتبط می‌شود.

تئوری

در حالت کلی، هامیلتونی مؤثر دوبعدی حالت‌های سطحی لایه‌ی نازک عایق توپولوژیک حول نقطه‌ی پرتقارن گاما به صورت

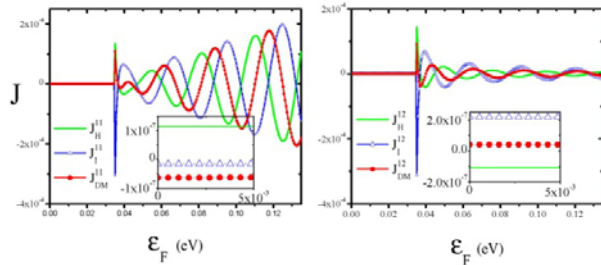
$$H(k) = -Dk^2 \sigma_0 \otimes \tau_0 + [\hbar v_f (\sigma \times k) \hat{z} + V \sigma_0] \otimes \tau_z + \Delta \sigma_0 \otimes \tau_x \quad (1)$$

نوشته می‌شود [4-6] که در آن σ, τ به ترتیب ماتریس‌های پائولی در فضای سطح و اسپین هستند. v_f سرعت فرمی و \hat{z} بردار یکه‌ی عمود بر سطح است. جمله‌ی $-Dk^2$ عدم تقارن ذره-حفره را بیان می‌کند. Δ هیبریداسیون بین سطح‌ها را نشان می‌دهد که به-طور کلی، به صورت $\Delta_0 + \Delta_1 k^2$ می‌باشد. برای انرژی‌های کم، در تقریب مرتبه‌ی اول انرژی، می‌توان از جملات متناسب با درجه‌ی دوم k صرف‌نظر نمود. V نشان‌دهنده‌ی اختلاف پتانسیل بین سطح بالا و پایین است و این عدم تقارن وارون ساختاری بین دو سطح، که می‌تواند ناشی از اثرات زیرلایه یا میدان الکتریکی عمود بر صفحه لایه‌ی نازک باشد، منجر به جدانشدگی اسپینی راشبا در ساختار نواری سیستم می‌شود (شکل 1).



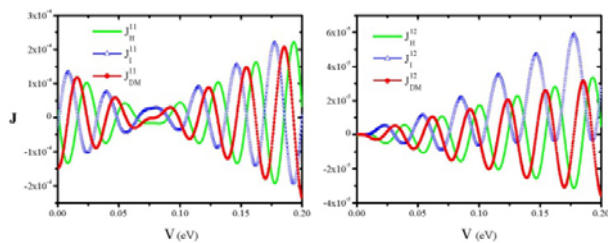
شکل 1: نمودار پاشندگی انرژی لایه‌ی نازک عایق توپولوژیک به ازای $V = 0.02$ eV و $\epsilon_F = 0.135$ eV، $\Delta = 0.035$ eV

شود در ناحیه ی گاف، هر سه برهمکنش تقریباً صفر هستند اما صفر نشدن دقیق آن‌ها به مکانیسم فن-فلک برمی‌گردد [13-14]. ظهور پیک‌ها در لبه ی گاف ناشی از وجود تکینگی‌های فن-هووه به ازای پتانسیل غیرصفر در چگالی حالت‌های لایه ی نازک عایق توپولوژیک است.



شکل 3: نمودار نشان‌دهنده ی رفتار سه جمله ی مختلف برهمکنش RKKY برحسب انرژی فرمی برای دو حالت، به ازای مقادیر $R = 30 \text{ nm}$ ، $V = 0.02 \text{ eV}$ و $\Delta = 0.035 \text{ eV}$ است. شکل سمت چپ برای حالتی داخل سطحی و شکل سمت راست حالت بین سطحی را نشان می‌دهد. هر سه جمله به ضرایب ثابت مسأله مقیاس شده اند.

تأثیر تغییرات پتانسیل عمودی بر روی رفتار جفت‌شدگی بین دو ناخالصی مغناطیسی در هر دو حالت داخل سطحی و بین سطحی در شکل 4 آمده است. با توجه به نقطه ی گذاری که برای صفر شدن چگالی حالت‌های جایگزیده روی یکی از صفحات بالایی یا پایینی از روی نمودار پاشندگی انرژی در بخش تئوری معرفی کردیم به تحلیل شکل 4 می‌پردازیم.

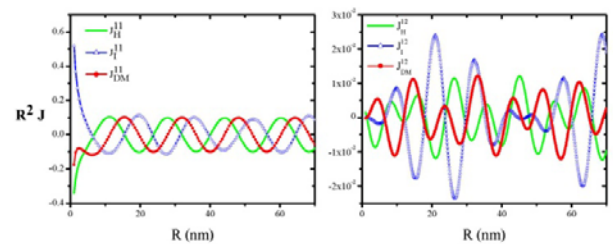


شکل 4: رفتار سه جمله ی جفت‌شدگی بین دو ناخالصی مغناطیسی برحسب پتانسیل عمودی به ازای $R = 30 \text{ nm}$ ، $\epsilon_F = 0.085 \text{ eV}$ و $\Delta = 0.035 \text{ eV}$ به تصویر کشیده شده است و هر سه جمله به ضرایب ثابت مسأله مقیاس شده‌اند.

که در آن به ترتیب از سمت چپ به راست، سه جمله نشان‌دهنده ی جفت‌شدگی‌های هایزنبرگ‌گونه، آیزینگ‌گونه و ژیاوشینسکی-موریاگونه هستند. دو جمله ی هایزنبرگ و آیزینگ منجر به جهت‌گیری هم‌راستا بین دو ناخالصی می‌شوند درحالی‌که جمله ی ژیاوشینسکی-موریا ناهم‌راستایی بین آن دو را ایجاد می‌کند. جملات ناهمسانگرد آیزینگ و ژیاوشینسکی-موریا به دلیل ناهمسانگردی فضایی و جفت‌شدگی اسپین-مدار سیستم ظاهر می‌شوند.

علاقه‌مندی ما به بررسی رقابت این سه جمله در مقادیر متفاوت فاصله بین دو ناخالصی مغناطیسی، انرژی فرمی و اختلاف پتانسیل عمودی و تأثیر جداشدگی راشبا در ساختار نواری می‌باشد. هر سه شکل شامل دو نمودار هستند. نمودار سمت چپ برای حالتی است که هر دو ناخالصی در یک سطح لایه ی نازک قرار دارند (حالت داخل سطحی) و نمودار سمت راست حالتی را نشان می‌دهد که یکی از ناخالصی‌ها در سطح دیگر قرار دارد (حالت بین سطحی) و شایان ذکر است که تمامی نمودارها به ازای زاویه ی خاص، $\phi_R = 0$ ، گزارش شده است.

شکل 2، رفتار جفت‌شدگی‌ها را بر حسب فاصله ی بین دو ناخالصی در دو حالت داخل سطحی و بین سطحی به ترتیب از چپ به راست نمایش می‌دهد. در شکل 2 محور عمودی نمودار $R^2 J$ است تا به وضوح رفتار کاهشی نوسان‌های جمله‌های برهمکنشی، در حالت داخل سطحی، به شکل R^{-2} در رژیم بلند برد نشان داده شود.



شکل 2: رفتار سه جمله ی برهمکنشی برحسب فاصله ی بین دو ناخالصی مغناطیسی به ازای مقادیرهای $\epsilon_F = 0.085 \text{ eV}$ ، $V = 0.02 \text{ eV}$ و $\Delta = 0.035 \text{ eV}$ هر سه جمله به ضرایب ثابت مسأله مقیاس شده اند.

شکل 3، تغییرات سه برهمکنش را برحسب تغییرات انرژی فرمی به صورت نوسانی گزارش می‌کند. همان‌طورکه دیده می‌

ظاهر می‌شوند که در اثر اختلاف پتانسیل عمودی بین دو سطح یا همان جداشدگی راشبا در ساختار نواری سیستم است. همچنین، رفتار هر سه جمله بر حسب فاصله‌ی بین دو ناخالصی، در حالت داخل سطحی، همچون دیگر سیستم‌های دوبعدی [11] به صورت R^{-2} کاهش می‌یابد. بعلاوه، از آنجایی که الکترون‌های سیار هر سطح از لایه‌ی نازک عایق توپولوژیک با دو بردار موج متفاوت برچسب می‌خورند اثر تغییرات اختلاف پتانسیل بین دو سطح بر روی جفت‌شدن دو ناخالصی به یکدیگر در دو حالت داخل سطحی و بین سطحی متفاوت است.

مرجع‌ها

- [1] C. Chang et al., *Science* **340**, 167 (2013)
- [2] J. G. Checkelsky, et al., *Nat. Phys.* **10**, 731 (2014)
- [3] X. Kuo, et al., *Phys. Rev. Lett.* **113**, 137201 (2014)
- [4] Y. Zhang et al., *Nature Phys.* **6**, 584 (2010).
- [5] S. S. Pershoguba and V. M. Yakovenko, *Phys. Rev. B* **86**, 165404 (2012).
- [6] W.-Y. Shan, H.-Z. Lu, and S.-Q. Shen, *New J. Phys.* **12**, 043048 (2010).
- [7] G. Grosso, G. P. Parravicini, *Solid State Physics* (2005).
- [8] P. Coleman, *Introduction to many body physics* (2014).
- [9] M. Ruderman and C. Kittel. Indirect exchange coupling of nuclear magnetic moments by conduction electrons. *Phys. Rev.*, **96**:99102, (Oct 1954).
- [10] M. Heide and et. al., *Newsletter of the Psi-K network* 78 (2006).
- [11] F. Parhizgar, H. Rostami, and Reza Asgari. *Phys. Rev. B*, **87**:125401, (Mar2013).
- [12] H. Imamura et al, *Phys. Rev. B* **69**, 121303(R), (2004).
- [13] R. Yu, W. Zhang, H.-J. Zhang, S.-C. Zhang, X. Dai, and Z. Fang, *Science* **329**, 61 (2010).
- [14] J. Wang, B. Lian, and S.-C. Zhang, *Phys. Rev. L* **115**, 036805 (2015).

در حالت داخل سطحی (شکل 4 سمت چپ)، هر سه جمله‌ی برهمکنشی از مقدار متناهی شروع می‌شوند و در محدوده‌ی مشخصی از پتانسیل که معرفی نمودیم به سمت صفر میل می‌کنند. چرا که در این حالت، الکترون‌های سیار سطح بالا، که در آن ناخالصی‌ها جای گرفته‌اند، بیشتر در جفت‌شدگی‌ها سهم هستند و این الکترون‌ها با همان بردارموجی توصیف می‌شوند که در مقادیر خاص پتانسیل صفر می‌شود و در این بردار موج، چگالی حالت-های الکترونهای سطح بالایی صفر است. بنابراین در حوالی این مقدار پتانسیل، تقریباً شمار بسیار کمی از الکترون‌ها می‌توانند نقش واسطه‌ی برهمکنش بین دو ناخالصی باشند. اما در حالت بین سطحی (شکل 4 سمت راست)، چون الکترون‌های سطح پائین چگالی حالت‌های زیادی دارند این رفتار کاهش در نمودار راست دیده نمی‌شود چرا که این الکترون‌ها با بردار موج فرمی‌ای برچسب می‌خورند که هرگز صفر نمی‌شود و چگالی حالت‌های منتسب به آن زیاد است.

نتیجه‌گیری

جفت‌شدگی اسپین-مدار راشبا از یک طرف سبب جفت شدن دو راستای اسپینی به هم شده و از طرف دیگر فضای ممتوم را به فضای اسپینی مرتبط می‌کند. بنابراین برهمکنش راشبا می‌تواند پدیده‌های کاربردی و جالب توجهی را در سیستم ایجاد کند. در لایه‌ی نازک عایق توپولوژیک، برهمکنش راشبا جفت‌شدگی بین دو راستای متفاوت اسپینی را ایجاد می‌کند و اختلاف پتانسیل بین دو سطح لایه‌ی نازک باعث جداشدگی راشبا در ساختار نواری آن می‌شود. تأثیر جفت‌شدگی اسپین-مدار راشبا در برهمکنش مؤثر بین دو ناخالصی مغناطیسی که به برهمکنش رودرمان-کیتل-کاسویا-یوشیدا معروف است به صورت سه جمله‌ی همسانگرد و هم‌راستای هاینبرگ‌گونه، ناهمسانگرد و هم‌راستای آیزینگ، ناهمسانگرد و ناهم‌راستای ژیالوشینسکی-موریا ظاهر می‌شود.

در ناحیه‌ی گاف سیستم، که از هیبرید شدن دو سطح بالا و پائین لایه‌ی نازک ناشی می‌شود، هر سه جمله برهمکنشی تقریباً صفر هستند اما در لبه‌ی گاف به دلیل وجود تکینگی‌های فن-هووه‌ی دیده شده در چگالی حالت‌های سیستم، پیک‌های بزرگی