

## نویسندگان

سمیه جلیلزاده آذر<sup>۴۱\*</sup>رامونا نیک خصال<sup>۴۲</sup>سید مصطفی میرخلیلی<sup>۴۳</sup>

\*somayehjalilzadeh@yahoo.com

## چکیده

میکروسکوپ تداخل کوانتومی ابررسانای روبشی<sup>۵</sup> برای اندازه‌گیری شار ذرات و همچنین بررسی ابررسانایی و خواص فرومغناطیس مورد استفاده قرار گرفته است. میکروسکوپ ابررسانای روبشی<sup>۶</sup> ابزاری برای تهیه تصویر از میدان‌های مغناطیسی سطحی است. تقریباً هر سیگنال الکتریکی یا مغناطیسی با فرکانس پایین که قادر به تبدیل سیگنال شار مغناطیسی باشد، با این میکروسکوپ قابل شناسایی است. کاربردهای میکروسکوپ تداخل کوانتومی ابررسانای روبشی عبارتند از مطالعه خواص مغناطیسی و الکترونیکی مواد، جستجوی منابع انرژی حرارتی در خاک، مطالعات پالئومغناطیسی، تحقیقات بیومغناطیس، اندازه‌گیری دما و در نهایت، شناسایی و تعیین ساختارهای مغناطیسی سطح زمین و دریا.

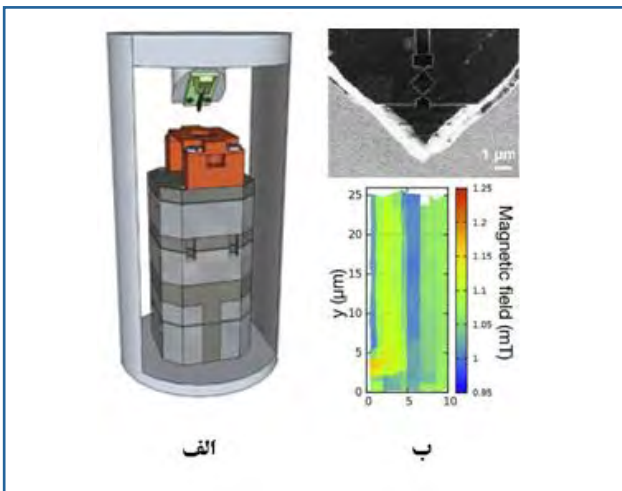
# میکروسکوپ تداخل کوانتومی ابررسانای روبشی

## واژه‌های کلیدی

میکروسکوپ تداخل کوانتومی ابررسانا، پیوند جوزفسون، میدان و شار مغناطیسی، تفکیک پذیری فضایی.

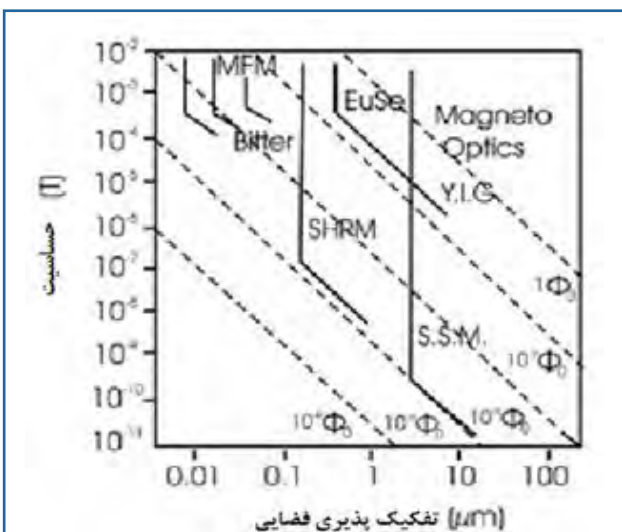
## مقدمه

میکروسکوپ تداخل کوانتومی ابررسانا بخشی از خانواده میکروسکوپ‌های پروبی روبشی<sup>۷</sup> است. هدف اصلی این دستگاه، تهیه تصویر شار مغناطیسی موضعی روی سطوح است. به‌طور کلی، وسایل تداخل کوانتومی ابررسانا (SQUID) حساس‌ترین حسگرهای مغناطیسی هستند که در حال حاضر در دسترس کاربران است. در طی سال‌های گذشته چندین روش دیگر نیز برای تهیه تصویر مغناطیسی ایجاد شده‌است که در اینجا به برخی از آنها اشاره خواهیم کرد.



شکل (۱): (الف) نمایی از یک میکروسکوپ SQUID روبشی در یخچال هلیوم. محفظه سبز رنگ پروب SQUID به یک چنگال کوارتز تنظیم کننده متصل شده است و در قسمت پایین نمونه‌ای از یک پیژوالکتریک است. (ب) میکروگرافی الکترونی یک پروب SQUID و تصویر آزمایش نوار Nb/Au ثبت شده با آن [۲].

همان‌طور که می‌دانید روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی در سطح یک نمونه وجود دارد. همه این روش‌ها دارای مزایا و معایبی نسبت به هم هستند. شکل (۲) برخی از روش‌های مختلف را در مقایسه با تفکیک‌پذیری فضایی و حساسیت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میکروسکوپ SQUID دارای وضوح مغناطیسی با حساسیت بسیار بالایی است، ولی تفکیک‌پذیری فضایی کمی دارد. این موضوع به اندازه حلقه و SQUID به کار رفته مربوط می‌شود. در مقابل، میکروسکوپ نیروی مغناطیسی وضوح فضایی بسیار بالایی دارد اما دارای وضوح مغناطیسی با حساسیت پایینی است. در این میکروسکوپ نیز همانند میکروسکوپ نیروی اتمی، نوک تیز سوزن مغناطیسی روی سطح نمونه حرکت کرده و برهم کنش نوک سوزن-نمونه اندازه‌گیری می‌شود.



شکل (۲): وضوح فضایی و مغناطیسی روش‌های مختلف اندازه‌گیری میدان مغناطیسی در سطح [۲].

متداول‌ترین این روش‌ها، میکروسکوپ نیروی مغناطیسی<sup>۸</sup> است که نیروی مغناطیسی بین پروب و سطح نمونه را اندازه‌گیری می‌کند. میکروسکوپ پروبی روبشی حال<sup>۹</sup>، از ویژگی ولتاژ حال در میدان‌های مغناطیسی استفاده می‌کند که با اندازه‌گیری ولتاژ حال، اندازه نیروی میدان مغناطیسی به دست می‌آید. همچنین انواع و اقسام روش‌های مبتنی بر نور برای اندازه‌گیری خواص مغناطیسی وجود دارند. علاوه بر دقت بالای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی، روش‌های SSM را می‌توان برای طیف وسیعی از پدیده‌های مغناطیسی به کار برد. به‌طور معمول ویژگی مغناطیسی در موادی از نوع ابررسانا و یا فرومغناطیس بررسی می‌شود، اما SSM را می‌توان برای تهیه تصویر از میدان مغناطیسی حاصل از توزیع جریان و حساسیت موضعی با کمک یک میدان معلوم نیز به کار گرفت. همچنین از SSM برای اندازه‌گیری شار جزئی ذره، بررسی وجود خواص ابررسانایی و فرومغناطیسی هم استفاده شده است. تغییرات موضعی مغناطیس سطحی نیز با این دستگاه قابل رؤیت است. همچنین، SSM ابزاری مناسب برای تهیه تصویر از آلودگی‌های مغناطیسی روی سطوح غیرمغناطیسی است. به عبارتی دیگر، میکروسکوپ SSM مزایایی همچون اندازه‌گیری در میدان مغناطیسی قوی، کالیبراسیون آسان و پاسخ خطی دارد و از معایب آن نیز به تفکیک‌پذیری فضایی به نسبت کم دستگاه می‌توان اشاره نمود. در مقایسه با MFM که می‌تواند برای اندازه‌گیری تا چندین ده نانومتر پیش رود، SSM به تازگی توانسته به حوزه کمتر از میکرومتر وارد شود.

در میکروسکوپ روبشی SSM، یک SQUID کوچک روی سوزن نصب می‌شود تا بتواند در فاصله نزدیک به سطح نمونه اندازه‌گیری را انجام دهد. اولین میکروسکوپ روبشی SQUID در سال ۱۹۹۲ توسط بلک<sup>۱۰</sup> و همکارانش ساخته شد که از آن زمان به بعد این روش برای اثبات ویژگی ابررسانایی غیر متعارف در چندین ابررسانای با دمای بالا از جمله ترکیبات ابررسانای ایتیریم باریوم مس اکسید<sup>۱۱</sup> با فرمول شیمیایی  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  و بیسموت استرانسیم کلسیم مس اکسید<sup>۱۲</sup> با فرمول شیمیایی  $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4+x}$  نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

از آنجایی که SQUID از مواد ابررسانا تشکیل شده است، فقط در دماهای پایین می‌تواند عمل کند. یعنی هم حسگر و هم نمونه داخل محفظه حاوی هلیوم یا نیتروژن مایع غوطه‌ور شده و حسگر با استفاده از جریان گاز خنک می‌شود. مزیت این حالت این است که نمونه‌ها می‌توانند در دماهای مختلف، از جمله دمای اتاق نگه داشته شوند. این مزیت برای نمونه‌هایی از جنس مواد آلی مناسب است [۱]. به‌طور معمول مواد ابررسانایی که برای SQUID های کم دما (کمتر از ۹ K) استفاده می‌شود، نیوبیوم یا آلومینیوم سرب هستند. در این نوع SQUID برای حفظ ویژگی ابررسانایی، حسگر با هلیوم مایع خنک می‌شود. در نوع دیگر SQUID با درجه حرارت بالا (یعنی پایین‌تر از ۹۰ K) از ابررساناهای در دما بالا مانند (YBCO) استفاده می‌شود که با نیتروژن مایع ارزان و قابل دسترس خنک می‌شوند. اما، این نوع SQUID ها حساسیت کمتری نسبت به نوع کم دما دارند و برای موارد خاص به کار برده می‌شوند (شکل (۱)).

روابط ریاضی را برای جریان و ولتاژ در حالت‌های مختلف پیوند ضعیف بین دو ماده ابررسانا به صورت زیر پیش‌بینی کرد:

معادلات اساسی حاکم بر دینامیک اثر جوزفسون:

$$U(t) = \frac{\hbar}{2e} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (۱)$$

(معادله تکامل فاز ابررسانا)

$$I(t) = I_c \sin(\varphi(t)) \quad (۲)$$

(رابطه جریان-فاز در پیوند ضعیف جوزفسون)

که در آن:  $I(t)$  ولتاژ و  $I_c$  جریان عبوری از پیوند جوزفسون،  $\varphi(t)$  اختلاف فاز پیوند و  $I_c$  جریان بحرانی پیوند است. جریان بحرانی پدیده‌ای است که در اثر دما و میدان مغناطیسی ایجاد شده در دستگاه به وجود می‌آید. ثابت فیزیکی  $\frac{\hbar}{2e}$  نشان‌دهنده شار مغناطیسی کوانتومی  $\Phi_0$  و عکس آن ثابت جوزفسون است. سه اثر اصلی پیش‌بینی شده توسط جوزفسون از اصول زیر پیروی می‌کنند:

- اثر جوزفسون DC: این اثر، جریان مستقیم عبوری ناشی از تونل زدن، از میان عایق در غیاب میدان الکترومغناطیسی خارجی است. این جریان DC جوزفسون متناسب با سینوس اختلاف فاز موجود در عایق است.

- اثر جوزفسون AC: با عبور ولتاژ ثابت  $U_{DC}$  از سراسر پیوند، فاز به طور خطی با زمان تغییر خواهد کرد و جریان نیز، جریان AC با دامنه  $I_c$  و فرکانس  $\frac{2e}{\hbar} U_{DC}$  خواهد شد. این بدان معنی است که اتصال جوزفسون می‌تواند به عنوان یک مبدل کامل ولتاژ به فرکانس عمل کند.

- اثر جوزفسون AC معکوس: در این اثر، ممکن است برای ولتاژ AC متفاوت، پیوند جریان DC را عبور دهد و در این حالت پیوند مانند یک مبدل کامل فرکانس به ولتاژ عمل می‌کند.

میکروسکوپ روبشی SQUID بر اساس ولتاژ DC شامل یک حلقه ابررسانایی کار می‌کند که دو پیوند جوزفسون را با جریان ثابت تحت تأثیر همدیگر قرار می‌دهد (شکل (۴)). بدون میدان مغناطیسی، جریان ورودی به طور مساوی بین شاخه‌ها تقسیم می‌شود. هر میدان مغناطیسی خارجی باعث تغییر در فرکانس رزونانس در مدار می‌شود و عدم تعادل، منجر به جاری شدن ولتاژ در پیوند جوزفسون می‌شود. ولتاژ، تابعی از شار مغناطیسی است که می‌تواند اندازه‌گیری شود و برای محاسبه شار مغناطیسی مورد استفاده قرار گیرد. در ورای جریان بحرانی پیوندهای جوزفسون، اختلاف ولتاژ ایده‌آل بین الکترودها با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

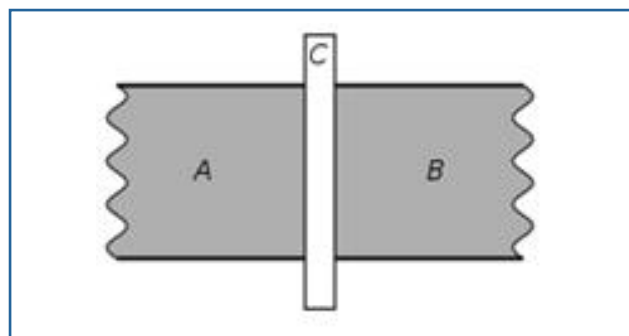
$$V = \frac{R}{2} \sqrt{I^2 - I_0^2} = \frac{R}{2} \left( I^2 - \left( 2I_c \cos \left( \pi \frac{\Phi}{\Phi_0} \right) \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (۳)$$

که در آن:  $R$  مقاومت بین الکترودها،  $I$  جریان،  $I_0$  حداکثر جریان،  $I_c$  جریان بحرانی پیوندهای جوزفسون،  $\Phi$  شار مغناطیسی کل درون حلقه و  $\Phi_0$  شار مغناطیسی کوانتومی است.

## اساس کار میکروسکوپ روبشی SQUID

SQUID از یک حلقه ابررسانایی که شامل یک یا چند پیوند جوزفسون است، تشکیل شده است. همان‌طور که می‌دانید ابررسانایی پدیده‌ای است که در دماهای بسیار پایین برای برخی از مواد رخ می‌دهد. در حالت ابررسانایی مقاومت الکتریکی ماده دقیقاً صفر می‌شود و ماده ویژگی دیامغناطیس کامل پیدا می‌کند؛ یعنی میدان مغناطیسی را از درون خود طرد می‌کند. طرد میدان مغناطیسی تنها تفاوت اصلی ابررسانا با رسانای کامل است، زیرا در رسانای کامل انتظار می‌رود میدان مغناطیسی ثابت بماند، در حالی که در ابررسانا میدان مغناطیسی همواره صفر است. مقاومت الکتریکی یک رسانای فلزی به تدریج با کاهش دما کم می‌شود. در رساناهای معمولی مثل مس و نقره، وجود ناخالصی و مشکلات دیگر این روند را کند می‌کند؛ به طوری که حتی در صفر مطلق هم نمونه‌های معمول مس همچنان مقاومت الکتریکی کمی از خود نشان می‌دهند. در مقابل، ابررساناها موادی هستند که اگر دمایشان از یک دمای بحرانی کمتر شود، ناگهان مقاومت الکتریکی خود را از دست می‌دهند. با عبور جریانی از الکتریسیته در یک حلقه ابررسانا، می‌تواند برای مدت نامحدودی بدون وجود مولد جریان در آن وجود داشته باشد. مانند پدیده فرومغناطیس و خطوط طیفی اتم‌ها، ابررسانایی نیز پدیده‌ای کوانتومی است. هر چند یک تئوری جهان شمول برای ابررسانایی وجود ندارد و نمی‌توان آن را با فیزیک کلاسیک مانند یک رسانای مطلوب توصیف کرد.

اثر جوزفسون که به افتخار بریان جوزفسون، دانشمند انگلیسی، نام‌گذاری شده است، پدیده ابر جریانی است که جریان بدون محدودیت زمانی و بدون اعمال هیچگونه ولتاژی در یک وسیله شناخته شده با عنوان پیوند جوزفسون<sup>۱۳</sup> که شامل دو یا چند ابررسانا با پیوند ضعیف است، جاری می‌شود (شکل (۳)).

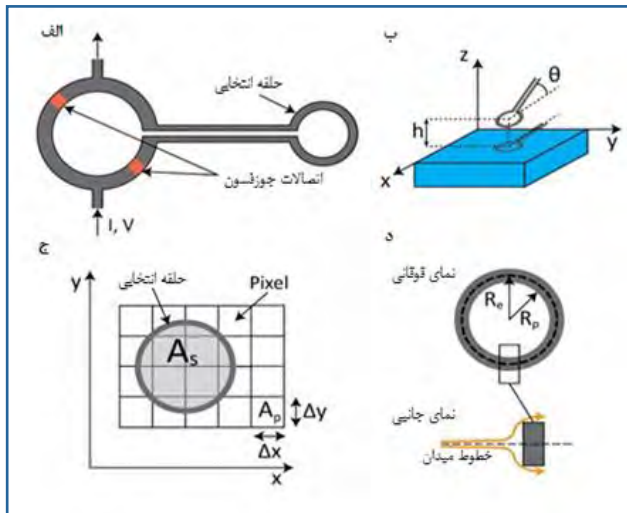


شکل (۳): نمایی از یک تک پیوند جوزفسون. A و B نشانگر ابررسانا و C نشانگر پیوند ضعیف بین آنهاست [۸].

پیوند ضعیف جوزفسون می‌تواند شامل یک عایق نازک (ابررسانا-عایق-ابررسانا یا S-I-S)، یک تکه از فلز غیر ابررسانا (S-N-S) یا یک فشردگی فیزیکی که ابررسانایی را در نقطه تماس (S-S-S) ضعیف می‌کند، باشد. این وسیله بر اساس پدیده تونل‌زنی الکترون‌ها کار می‌کند. البته لازم به ذکر است که اجزای پیوند جوزفسون فقط در دماهای نزدیک به صفر مطلق کار می‌کنند. اثر جوزفسون نمونه‌ای از یک پدیده کوانتومی ماکروسکوپی است. در سال ۱۹۶۲، جوزفسون

## تفکیک پذیری فضایی در میکروسکوپ روبشی SQUID

به طور معمول SQUID با یک حلقه (شکل (۶-الف)) بسط می‌یابد که این حلقه دارای مساحت مشخصی برای نفوذ شار است. از این امر برای کاهش تأثیر میدان مغناطیسی خارجی روی خود SQUID استفاده می‌شود. از آنجایی که SQUID فقط به مؤلفه میدان مغناطیسی عمود بر سطح SQUID حساس است، چنانچه حسگر را موازی با سطح فرض کنیم، مؤلفه میدان مغناطیسی می‌تواند مؤلفه Z باشد.



شکل (۶): (الف) نمایی از یک SQUID، با یک حلقه انتخابی بسط یافته. (ب) تعریف سیستم مختصات SSM و ارتفاع اسکن h و زاویه روبش  $\theta$ . (ج) مقایسه بین مساحت حلقه انتخابی  $A_s$  SQUID و مساحت پیکسل  $A_p$ . (د) شرح مختصری از رفتار خطوط میدان مغناطیسی در نزدیکی یک ابررسانا و تأثیر آن بر قطر مؤثر  $R_0$  حلقه انتخابی [۳].

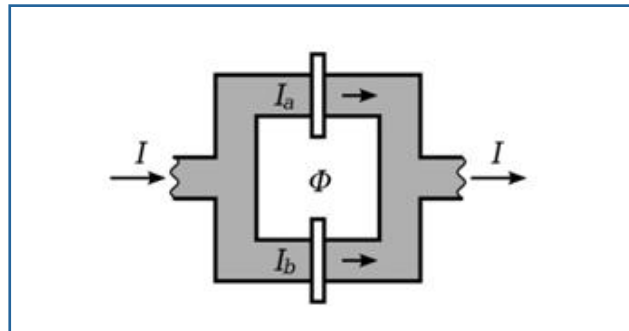
بیشتر تحلیل‌ها در این کار براساس معادله دو قطبی مغناطیسی صورت می‌گیرند که عبارتند از:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \frac{3\vec{r}(\vec{m} \cdot \vec{r})}{r^5} - \frac{\vec{m}}{r^3} \right] \quad (۴)$$

که در آن:  $\mu_0$  نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد،  $\vec{r} = \{x; y; h\}$  فاصله بردار از منبع تا ناظر با بزرگی r، و  $\vec{m} = \{m_x; m_y; m_z\}$  گشتاور مغناطیسی دو قطبی با بزرگی m است. بنابراین، از این طریق مؤلفه Z یک میدان دو قطبی تعیین می‌شود:

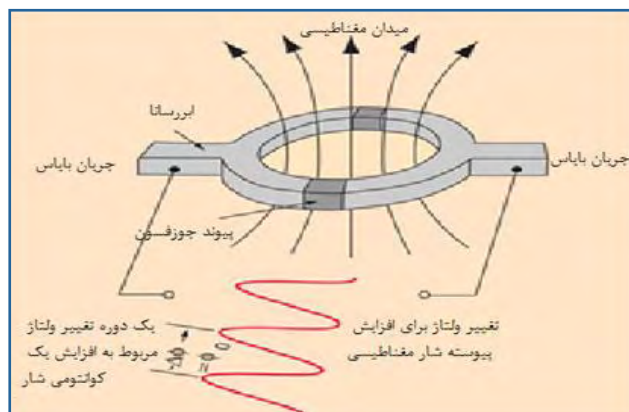
$$B_z = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \frac{3h(m_x x + m_y y + m_z h)}{r^5} - \frac{m_z}{r^3} \right] \quad (۵)$$

چنانچه سطح جسم مورد نظر را با x y و جهت عمود بر سطح نمونه را با z (شکل (۶-ب)) نشان دهیم، حسگر فاصله سنج h، با زاویه  $\theta$  بین آن و سطح x y قرار داده می‌شود. سپس منطقه روبش شده به پیکسل تقسیم می‌شود، به طوری که هر یک پیکسل به یک نقطه داده مربوط شود. بنابراین، هر یک پیکسل شامل مجموعه  $A_p = \Delta x \Delta y$  است، که  $\Delta x$  و  $\Delta y$  به ترتیب اندازه گام در جهت x



شکل (۴): نمایی از یک SQUID DC. جریان ورودی (I) به دو مسیر تقسیم می‌شود، در مسیر هر دو جریان  $I_a$  و  $I_b$  مواضع نازکی قرار دارند که همان پیوندهای جوزفسون هستند که در واقع دو منطقه ابررسانایی را از هم جدا می‌کنند.  $\Phi$  نشانگر وارد شدن شار مغناطیسی به درون حلقه DC SQUID است [۸].

بنابراین، از SQUID DC می‌توان به عنوان مبدل شار به ولتاژ استفاده کرد. با این حال، همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده، با توجه به مقدار شار مغناطیسی که از دستگاه عبور می‌کند، ولتاژ در کل الکتروده به صورت سینوسی حرکت می‌کند. در نتیجه از SQUID می‌توان برای اندازه‌گیری اختلاف میدان مغناطیسی استفاده کرد، مگر اینکه میدان مغناطیسی و یا اندازه دستگاه بسیار کوچک باشد، به طوری که  $\Phi < \Phi_0$  شود. برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی استاندارد با SQUID DC، یا باید تعداد نوسانات ولتاژ در میدان تغییر یابد، که در عمل بسیار دشوار است و یا از یک میدان مغناطیسی بایاس DC جداگانه به موازات استفاده شود تا یک ولتاژ ثابت و در نتیجه شار مغناطیسی ثابتی درون حلقه ایجاد شود. شدت میدان اندازه‌گیری شده برابر با شدت میدان مغناطیسی بایاس عبوری از SQUID خواهد بود. با این‌که، ولتاژ DC بین دو ترمینال SQUID را می‌توان به طور مستقیم خواند، ولی وجود نوفه، اندازه‌گیری‌های DC را با مشکل مواجه می‌کند، لذا از روش جریان متناوب استفاده می‌شود. علاوه بر میدان مغناطیسی بایاس DC، یک میدان مغناطیسی AC دارای دامنه ثابت، با ایجاد نیروی میدان  $\Phi \ll \Phi_0$  نیز در سیم پیچ بایاس منتشر می‌شود. این میدان AC یک ولتاژ AC با دامنه متناسب با اجزای DC در SQUID تولید می‌کند. مزیت این روش این است که می‌توان فرکانس سیگنال ولتاژ را به دور از هر منبع نوفه بالقوه انتخاب کرد. با استفاده از یک قفل در تقویت کننده دستگاه می‌توان فرکانس مربوط به میدان مغناطیسی را خواند و بسیاری از منابع دیگر نوفه‌ای را حذف کرد.

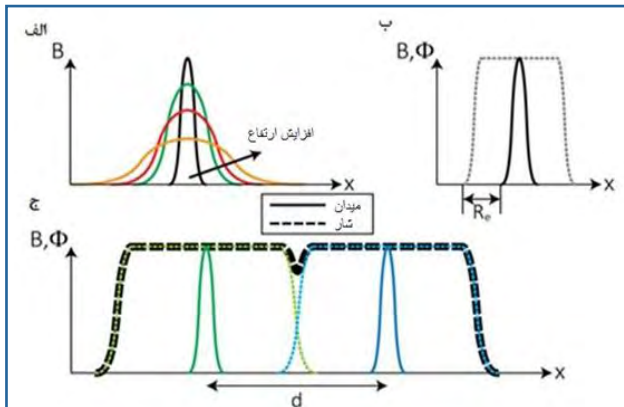


شکل (۵): نمایی از SQUID DC [۸].

شده و فاصله نمونه-حسگر است.

مشخصات میدان مغناطیسی  $B(x,y)$  در (شکل (۷-الف)) نشان داده شده‌است. هنگامی که با استفاده از SSM روبش انجام شد، شار  $\Phi$  نسبت به اندازه  $R_e$  حلقه انتخاب شده، بسط می‌یابد (شکل (۷-ب)) و مقدار بسط به‌طور خطی به  $R_e$  بستگی دارد.

با افزایش فاصله نمونه-حسگر، مشخصه میدان بطور عکس بسط می‌یابد (شکل (۷-الف))، که به نوبه خود موجب می‌شود  $\Phi$  نیز گسترش یابد. البته این تغییرات مستقل از اندازه حلقه انتخاب شده، هستند. همان‌طور که می‌بینیم، هر دو عامل بر مشخصه شار نهایی  $\Phi$  تاثیر می‌گذارند. یعنی افزایش ارتفاع یا افزایش اندازه قطر حلقه انتخابی و یا هر دو، موجب افزایش  $\Phi$  تا زمانی می‌شود که دیگر مشخصه شار حلقه‌های مجاور قابل تشخیص نباشد (شکل (۷-ج)). بنابراین، تعیین تفکیک فضایی فقط براساس یکی از این دو عامل، موجب بروز مشکلی در تعریف تفکیک فضایی می‌شود.



شکل (۷): (الف) مشخصه مغناطیسی  $B$  برای برخی از ویژگی‌های مغناطیسی به‌صورت تابع ارتفاع. (ب) مشخصه شار  $\Phi$  (نقطه چین) حاصل از اندازه‌گیری گرادینان  $B$  (خط) با یک حلقه انتخابی با شعاع  $R_e$  (ج) دو مشخصه مغناطیسی، که به‌صورت گرادینان نشان داده شده‌اند (منحنی‌های خط آبی و سبز) با فاصله  $d$  از همپوشانی مشخصه شارها جدا شده‌اند (منحنی‌های نقطه چین آبی کمرنگ-سبز کمرنگ) و همپوشانی ترکیبی شار (منحنی خط چین سیاه) ایجاد کرده‌اند که می‌تواند ویژگی‌های هر یک را مختل کند [۳].

به دلیل مسئله‌ای که در تعریف تفکیک فضایی وجود دارد، در روش‌های فعلی SSM باید هنگام تعیین میزان تفکیک، اندازه حلقه نیز مورد توجه قرار گیرد؛ زیرا اندازه فیزیکی یک حلقه قابل توجه است و به عوامل متعددی همچون ضخامت ماده ابررسانای (لایه نازک) به‌کار رفته بستگی دارد.

بنابراین، تعریف جدیدی از تفکیک فضایی براساس دوقطبی نقطه‌ای در صفحه پیشنهاد شده‌است (شکل (۸-الف)). این دو قطبی باعث ایجاد یک میدان بیرون از صفحه می‌شود که دو نقطه بی‌نهایت<sup>۱۶</sup> دارد (شکل (۸-ب)).

میزان جدایی (s) این بیشینه‌ها صرفاً به ارتفاعی (h) که در آن اندازه‌گیری می‌شود و قطر حسگر (d)، بستگی دارد. یعنی در جایی که حد معادله به سمت صفر میل می‌کند، (s) صفر می‌شود. اکنون می‌توان تعریف کرد که تفکیک فضایی برابر با (s) است.

و هستند.

با توجه به دقت بالای موتورهای خطی یا همان عملگرهای پیزو به‌کار رفته در SQUID، اندازه گام به‌طور معمول در حد پایین‌تر از ابعاد حلقه در نظر گرفته می‌شود (شکل (۶-ب)). بنابراین، شار عبوری  $\Phi_s$  از حلقه انتخابی برابر با شار  $\Phi_p$  که از یک پیکسل عبور می‌کند، نیست. در صورتی که میدان مغناطیسی  $B$  در سطح حلقه جمع شده باشد، می‌توان گفت:

$$B = \frac{\Phi_p}{A_p} = \frac{\Phi_s}{A_s} \rightarrow \Phi_p = \frac{A_p}{A_s} \Phi_s \quad (۶)$$

برای به‌دست آوردن مقدار صحیح شار عبوری از یک پیکسل، عامل  $A_p/A_s$  باید در شار اندازه‌گیری شده، ضرب شود.

از آنجایی که مدار SQUID از جنس ماده ابررسانا ساخته می‌شود، شار عبوری از حلقه انتخابی در معرض شار کانونی قرار می‌گیرد. همان‌طور که می‌دانیم ابررساناها از جنس مواد دیامغناطیس کامل هستند، لذا خطوط میدان مغناطیسی به جای این‌که به‌طور معمول به ماده حلقه انتخاب شده نفوذ کنند، به اطراف محوطه داخلی حلقه خمیده می‌شوند. این امر باعث افزایش سطح مؤثر حلقه انتخابی می‌شود که در نتیجه پاسخ دستگاه افزایش می‌یابد. این بدان معنی است که هنگام تبدیل شار به میدان مغناطیسی، سطح مؤثر حلقه انتخابی کمی بزرگ‌تر از سطح محصور شده با حلقه انتخابی است که تجزیه و تحلیل دقیق این موضوع توسط کتچن و کرتلی<sup>۱۵</sup> انجام شده‌است. به‌عنوان اولین تقریب، می‌توان فرض کرد که خطوط شار ورودی در نیمه راه در اطراف ماده ابررسانا خمیده می‌شوند. اگر یک حلقه ابررسانا را در نظر بگیریم، قطر مؤثر  $R_e$  آن حلقه برابر با قطر فیزیکی  $R_p$  به‌علاوه نصف عرض حلقه خواهد بود. بنابراین،  $A_s$  به سطح مؤثر  $A_e$  افزایش می‌یابد و معادله (۳) به رابطه (۷) تبدیل می‌شود (به شکل (۶-ج) رجوع شود) [۶].

$$\Phi_p = \frac{A_p}{A_e} \Phi_s \quad (۷)$$

$A_e$  را می‌توان به‌صورت آزمایشی با اندازه‌گیری یک واحد به‌دست آورد. از آنجایی که کل شار ناشی از حلقه باید برابر با  $\Phi_0$  باشد، تصحیح سطح فیزیکی می‌تواند با جمع اطلاعات تمام نقاط و سپس تقسیم بر شار کوانتومی به‌دست آید.

به‌طور کلی، یکی از ویژگی‌های اساسی چینش SSM و SQUIDها، دقت بالای آنها در اندازه‌گیری شار مغناطیسی است. با این حال، همان‌طور که قبلاً ذکر شد، تفکیک‌پذیری فضایی آنها در مقایسه با بعضی روش‌ها مانند MFM، کم است.

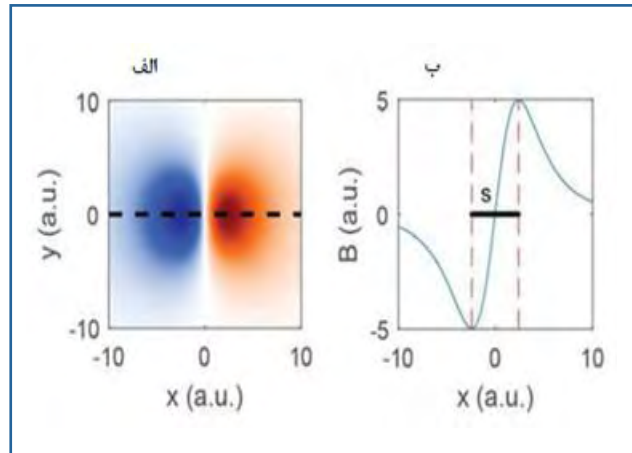
دانستن مفهوم تفکیک فضایی در SSM در درک اطلاعات به‌دست آمده از آزمایش انجام شده به کمک میکروسکوپ بسیار مهم است. همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده‌است، تفکیک فضایی در چینش SSM ترکیب پیچیده‌ای از قطر حلقه انتخاب

مورد استفاده قرار می‌گیرد.

بنابراین می‌توان کاربردهای میکروسکوپ SQUID را به سه گروه توسعه ابزاری و روشی در بیومغناطیس، علم خوردگی و ارزیابی‌های غیرمخرب تقسیم کرد.

### اجزای سیستم الکتریکی و ارتباطات در SQUID

شکل (۹) طرحی از اجزای الکتریکی دستگاه SQUID را نشان می‌دهد. (۹-الف) حسگر میکروسکوپ SQUID؛ در بخش (۹-ب) به قفل حلقه شار در قسمت (۹-پ) که دارای منبع تغذیه بوده، متصل شده‌است. کلید روشن/خاموش در مسیر (۹-ت) مولد موج برای تنظیم حالت حسگر میکروسکوپ قرار گرفته و به منظور به دست آوردن شکل موج (۹-ث) به اسیلوسکوپ متصل و نشان داده شده‌است. (۹-ج) پایه کنترل کننده XYZ شامل (۹-چ) یک مبدل آنالوگ به دیجیتال برای تبدیل خروجی ولتاژ است و با استفاده از (۹-ح) موتورهای پله‌ای<sup>۱۷</sup> حرکت می‌کند. پایه کنترل کننده XYZ برای اندازه‌گیری و پایش داده‌ها با یک رابط USB (۹-خ) به رایانه متصل شده‌است و موتورها (۹-د) از راه دور قابل کنترل هستند. اندازه‌گیری داده‌ها با استفاده از یک تراشه ۱۶ بیتی ADC به دست آمده‌است. (۹-ن) حسگر جریان بین میکروسکوپ SQUID و خروجی جریان گاز هلیوم را تشخیص می‌دهد و به کمک یک فلومتر (۹-ر) کنترل می‌شود. علاوه بر این، با استفاده از یک سطح سنج (۹-ز)، سطح هلیوم مایع را کنترل می‌کند. در گوشه بالا سمت راست شکل (۹)، جریان خطی کالیبراسیون (۹-ژ) نشان داده شده‌است که این جریان خطی با (۹-س) مولد جریان تولید می‌شود.



شکل (۸): تعریف تفکیک فضایی براساس دوقطبی نقطه‌ای در یک صفحه. (الف) تصویر یک دوقطبی نقطه‌ای در مبدأ با جهت مغناطیسی در امتداد محور x. (ب) مشخصات میدان مغناطیسی نشان داده شده در (الف). خط چین‌های قرمز نشان‌دهنده نقاط بی‌نهایت، با فاصله جدایی (s) [۳].

برای تعیین (s)، می‌توان معادله را به صورت تابعی از ارتفاع روبش (h) و شعاع حلقه (R=d/2) به دست آورد. این معادله به راحتی از معادله (۵) مشتق شده و داریم:

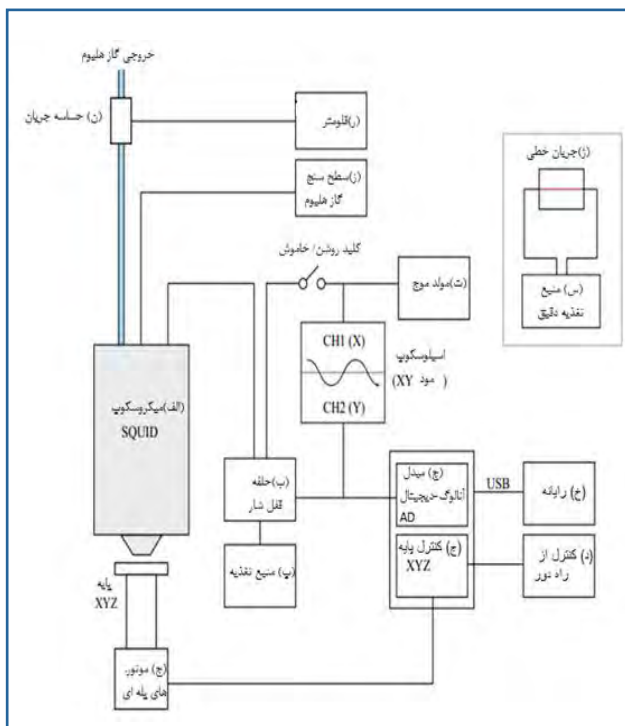
$$\frac{\frac{s}{2}+R}{\left(\left(\frac{s}{2}+R\right)^2+h^2\right)^{5/2}} = \frac{\frac{s}{2}-R}{\left(\left(\frac{s}{2}-R\right)^2+h^2\right)^{5/2}} \quad (۸)$$

به کمک معادله (۸) تعیین تفکیک فضایی در هر مقیاس امکان‌پذیر است [۴-۵].

### کاربردها

همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد، میکروسکوپ تداخل کوانتومی ابررسانا، دستگاهی بسیار حساس برای اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی ضعیف است. با توجه به حساسیت فوق‌العاده آنها، به‌طور وسیعی در مطالعات علوم زیستی و اندازه‌گیری‌های الکترونیکی و مغناطیسی خیلی حساس که سیگنال‌های ضعیف، با استفاده از ابزار اندازه‌گیری معمول در آنها قابل سنجش نیستند، به کار برده می‌شوند. به صورت تقریبی هر سیگنال الکتریکی یا مغناطیسی با فرکانس کم که قابلیت تبدیل به سیگنال جریان شار مغناطیسی را دارد، قابل تشخیص با این میکروسکوپ است.

برنامه‌های کاربردی SQUID شامل مطالعه خواص مغناطیسی و الکترونیکی مواد، جستجو برای منابع انرژی گرمایی زمین، مطالعات پالئومغناطیس، تحقیقات بیومغناطیس، اندازه‌گیری دمای میلی‌کلوی و در نهایت، شناسایی و تشخیص ساختارهای مغناطیسی سطح روی زمین و دریا است. همچنین SQUID در اندازه‌گیری سیگنال‌های ضعیف در مغز یا قلب انسان با استفاده از میدان‌های مغناطیسی حسگر ایجاد شده با جریان‌های نورولوژیکی



شکل (۹): نمایی از طرح یک میکروسکوپ SQUID [۷].

میکروسکوپ تداخل کوانتومی ابررسانای روبشی (SSM)، با استفاده از پروب روبشی، امکان تهیه تصویر شار مغناطیسی موضعی روی سطوح را فراهم می‌کند. به‌طور معمول ویژگی مغناطیسی در موادی از نوع ابررسانا و یا فرومغناطیس بررسی می‌شود، اما SSM را می‌توان برای تهیه تصویر از میدان مغناطیسی حاصل از توزیع جریان و حساسیت موضعی با کمک یک میدان معلوم نیز به‌کار گرفت. همچنین، از SSM برای اندازه‌گیری شار جزئی ذره، بررسی وجود خواص ابررسانایی و فرومغناطیسی هم استفاده شده‌است. SSM ابزاری مناسب برای تهیه تصویر از آلودگی‌های مغناطیسی روی سطوح غیرمغناطیسی است. تقریباً هر سیگنال الکتریکی یا مغناطیسی با فرکانس کم که قابلیت تبدیل به سیگنال جریان شار مغناطیسی را دارد، قابل تشخیص با این میکروسکوپ است. برنامه‌های کاربردی SQUID شامل مطالعه خواص مغناطیسی و الکترونیکی مواد، جستجو برای منابع انرژی گرمایی زمین، مطالعات پالئومغناطیس، تحقیقات بیومغناطیس، اندازه‌گیری دمای میلی‌کلوین و در نهایت، شناسایی و تشخیص ساختارهای مغناطیسی سطح روی زمین و دریا است.

## پی‌نوشت

۱. کارشناسی ارشد میکروبیولوژی، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران
۲. دکتری مدیریت راهبردی ایمنی، بهداشت، محیط‌زیست، دانشگاه الزهراء (س)
۳. کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، شرکت تولیدی و تحقیقاتی صنعتی آیسار کویر یزد
۴. عضو کارگروه تخصصی میکروسکوپ پروبی روبشی

5. Superconducting Quantum Interference Device (SQUID)
6. Scanning Superconducting Microscope (SSM)
7. Scanning Probe Microscopy (SPM)
8. Magnetic Force Microscopy (MFM)
9. Scanning Hall Probe Microscope (SHPM)
10. Black
11. Yttrium barium copper oxide (YBCO)
12. Bismuth Strontium calcium copper oxide (BSCCO)
13. Josephson Junction (JJ)
14. Pick up
15. Ketchen and Kirtley
16. Extreme
17. Step motors

## مراجع

- [1] Black, R.C., A. Mathai., and F. C. Wellstood., E. Dantsker., A. H. Miklich., D. T. Nemeth., J. J. Kingston., J. Clarke (1993). "Magnetic microscopy using a liquid nitrogen cooled YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> superconducting quantum interference device". Appl. Phys. Lett. 62 (17): 2128–2130
- [2] Shibata, Y., Nomura, S., Kashiwaya., H., Kashiwaya, S., Ishiguro, R., & Takayanagi, H. (2015). "Imaging of current density distributions with a Nb weak-link scanning nano- SQUID microscope". Scientific Reports, 5, 15097
- [3] P. Reith<sup>1</sup>, X. Renshaw Wang, H. Hilgenkamp (2011). "Analysing Magnetism Using Scanning SQUID Microscopy". 639798 Singapore
- [4] Reith, P.; Renshaw Wang, X.; Hilgenkamp (2017). "Analysing magnetism using scanning SQUID microscopy". The Review of scientific instruments, 88 (12), 123706
- [5] John R. Kirtley., John P. Wikswo, Jr., (1999). "SCANNING SQUID MICROSCOPY". Annual Review of Materials Science, 29 (1): 117-148
- [6] J. R. Kirtley., M. B. Ketchen., K. G. Stawiasz., J. Z. Sun., W. J. Gallagher., S. H. Blanton., and S. J. Wind (1995). "High-resolution scanning SQUID microscope". Appl. Phys. Lett., 27 February, 66 (9): 1138-1140
- [7] Hirokuni Oda., Jun Kawai., Masakazu Miyamoto., Isoji Miyagi., Masahiko Sato., Atsushi Noguchi., Yuhji Yamamoto., Jun-ichi Fujihira., Nobuyoshi Natsuhara., Yoshiyasu Aramaki., Takashige Masuda and Chuang Xuan (2016). "Scanning SQUID microscope system for geological samples: system integration and initial evaluation". Oda et al. Earth, Planets and Space 68:179.
- [8] B.D. Josephson (1962). "Possible new effects in superconductive tunneling" Phys. Let. Bib code: 1962PhL.1.251J. doi:10.1016/0031-9163(62)91369-0 1 (7): 251–253.