





دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش ماده چگال  
بررسی لایه‌ی فلز نرمال قرار گرفته بین دو انباره‌ی ابررسانای حالت سه‌تایی  
غیریکانی

استاد راهنما:

دکتر غلامرضا راشدی

پژوهشگر:

مریم باورساد عبدالی

مهر ۱۳۹۰



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش ماده چگال

خانم مریم باورساد عبدالی

تحت عنوان

**بررسی لایه‌ی فلز نرمال قرار گرفته بین دو انباره‌ی ابررسانای حالت سه‌تایی**

**غیریکانی**

در تاریخ ..... توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه ..... به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنما دکتر غلامرضا راشدی با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا

۲- استاد داور داخل گروه دکتر ابراهیم قنبری عدیوی با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا

۳- استاد داور خارج از گروه دکتر حسن ربانی با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا

امضای مدیر گروه

تقدیم به دو یر تو فروزان الهی

به او که هستیش رستنگاه شاخه‌های عشق و امید زندگی بود

و

او که فکرت وجودش همواره این نجوا را در گوشم می‌خواند:

به بالا بنگر تا تنها روشنایی را نظاره‌گر باشی و هرگز برای دیدن سایه‌ات به پایین منگر

پدر و مادر مهربانم

تا همیشه پروانه‌تان خواهیم ماند

## چکیده

در این پایان نامه ابتدا مقدمه‌ای از ابررسانایی و جفت شدگی اسپین سه‌تایی را بیان کرده‌ایم. آن‌گاه نظریه‌ی میکروسکوپی BCS را مطرح می‌کنیم و چگونگی محاسبه بردار گاف مربوط به ابررساناهای با تقارن جفت‌شدگی موج-f را بررسی می‌کنیم. سپس به صورت اجمالی به بررسی انواع پیوندگاه‌های ضعیف و اهمیت این شاخه پرداخته و با پارامترهای مهم مربوط به آن آشنا می‌شویم.

در ادامه کار، بر پیوندگاهی ضعیف که از دو ابررسانای اسپین سه‌تایی غیر یکانی موج-f تشکیل شده می‌پردازیم و بعد از آن همان دو ابررسانا را در حالی که فلزی معمولی را ساندویچ کرده‌اند، مطالعه می‌کنیم و معادلات آیلنبرگر را با استفاده از شرایط مرزی برای این دو نوع پیوندگاه S-S و S-N-S با ابررساناهای اسپین سه‌تایی و غیریکانی حل کرده و توابع گرین مورد نیاز مربوط به آن را به صورت تحلیلی به دست می‌آوریم. آن‌گاه از این توابع گرین استفاده می‌کنیم و با انجام محاسبات عددی، جریان‌های بار و اسپین را در این پیوندگاه برحسب اختلاف فاز خارجی بین دو ابررسانا رسم می‌کنیم و سپس اثرات ضخامت لایه فلز معمولی و زاویه‌های چرخش بین بردارهای گاف ابررساناها بر خواص ترابرد پیوندگاه را به صورت جداگانه‌ای مورد بررسی قرار می‌دهیم. لازم به ذکر است که فرض اولیه در این پایان نامه این بوده است که بردارهای گاف دو انباره ابررسانا در ابتدا به صورت موازی و هم‌راستا با یکدیگرند و در مراحل بعدی اثر این چرخش بر جریان‌های بار و اسپین بررسی شده است.

**کلید واژه‌ها:** ابررسانایی اسپین سه‌تایی غیریکانی، اثر مجاورت، پیوندگاه جوزفسون، جریان اسپینی

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	<b>فصل اول: ابرسانایی اسپین سه تایی</b>
۱-۱	مقدمه
۲-۱	ابرسانایی غیرقراردادی
1-2-1	بردار گاف و ابرسانایی اسپین سه تایی
2-2-1	آزمون‌هایی برای پارامتر نظم در ابرساناهای غیرقراردادی
۳-۱	اثر جوزفسون
1-3-1	طبقه‌بندی و خواص کلی
	<b>فصل دوم: نظریه میکروسکوپی ابرسانایی</b>
۱-۲	جفت کوپر
۲-۲	بعد زوج کوپر
۳-۲	ساختار اسپینی حالت‌های جفت شده
۴-۲	نمودهای تقارن
۵-۲	انرژی برانگیختگی‌های پایه در ابرسانا
۶-۲	گاف در طیف برانگیختگی‌های پایه و دمای بحرانی
۷-۲	معادلات گورکف
	<b>فصل سوم: پیوندگاه‌های ضعیف</b>
۱-۳	مقدمه
۲-۳	اثر جوزفسون و پیوندگاه‌های ضعیف
۱-۱-۲-۳	اثرات ac, dc
۲-۱-۲-۳	اتصالات تونلی و پیوندگاه‌های ضعیف
۲-۲-۳	معادلات اصلی اتصالات تونلی
۱-۲-۲-۳	خواص اصلی اتصالات جوزفسون
۳-۲-۳	اثر مجاورت در پیوندگاه‌های ضعیف
۴-۲-۳	انواع اصلی پیوندگاه‌های ضعیف
۵-۲-۳	مقیاس‌های طول

عنوان	صفحه
..... پیوندگاه‌های ضعیف ۶-۲-۳	45
..... فاز - ۳-۳ خواص کلی رابطه جریان - فاز	46
<b>فصل چهارم: توابع گرین و معادله آیلنبرگر</b>	
..... روش شبه کلاسیکی ۱-۴	49
..... محاسبات تحلیلی ۲-۴	52
..... پیوندگاه S - S 1-2-4	52
..... پیوندگاه S - N - S 2-2-4	54
<b>فصل پنجم: جریان اسپینی در پیوندگاه S - S و جریانهای بار و اسپین در پیوندگاه S - N - S</b>	
..... بردار گاف ابرسانایی ۱-۵	58
..... گاف ابرسانایی ۲-۵	59
..... شکستن تقارن وارونی زمان در ابرساناهای غیرقراردادی ۳-۵	60
..... نتایج عددی ۴-۵	62
..... جریان اسپینی در پیوندگاه S - S 1-4-5	62
..... جریانهای بار و اسپینی 2-4-5	64
..... نتایج ۵-۵	69
..... منابع:	70

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ ساختار بلوری و منطقه اول بریلوئن ..... ۶
- شکل ۲-۱ قدر مطلق پارامتر نظم در فضای اندازه حرکت برای فاز قطبی در ابررسانای موج-f ..... ۷
- شکل ۳-۱ قدر مطلق پارامتر نظم در فضای اندازه حرکت برای فاز محوری در ابررسانای موج-f ..... ۸
- شکل ۱-۳ انواع مختلف ساختارها که اثر جوزفسون در آن‌ها رخ می‌دهد ..... ۳۷
- شکل ۲-۳ دامنه‌های ابرجریان و جریان معمولی در دماهای مختلف که در نظریه تونل‌زنی مورد استفاده‌اند ..... ۳۹
- شکل ۳-۳ چگالی حالت‌ها در ابررسانا ..... ۴۲
- شکل ۴-۳ بازتاب اندریدر در فصل مشترک فلز معمولی و ابررسانا ..... ۴۳
- شکل ۵-۳ نمایش فرآیندی در پیوندگاه ضعیف روی صفحه فازی پارامتر نظم  $\Delta$  ..... ۴۷
- شکل ۶-۳ روابط ممکن در پیوندگاه ضعیف ..... ۴۸
- شکل ۱-۵ فاز ابررسانای ترکیب فرمیون سنگین در فضای میدان مغناطیسی و دما ..... ۵۹
- شکل ۲-۵ گاف انرژی بر حسب دمای یک ابررسانای موج-f ..... ۶۰
- شکل ۳-۵ پیوندگاه جوزفسون در ابررسانای اسپین سه‌تایی موج-f غیریکانی ..... ۶۲
- شکل ۴-۵ مولفه‌ی مماسی جریان اسپینی پیوندگاه S - S نسبت به اختلاف فاز خارجی ..... ۶۳
- شکل ۵-۵ مولفه عمودی جریان اسپینی پیوندگاه S - S نسبت به اختلاف فاز خارجی ..... ۶۳
- شکل ۶-۵ فلز معمولی ساندویچ شده بین دو ابررسانای اسپین سه‌گانه غیریکانی موج-f ..... ۶۴
- شکل ۷-۵ جریان بار نسبت به اختلاف فاز خارجی برای ضخامت  $l = \xi$  لایه فلز معمولی و برای زوایای مختلف چرخش در دوهندسه‌ی چرخشی ..... ۶۵
- شکل ۸-۵ جریان بار نسبت به اختلاف فاز خارجی برای ضخامت‌های مختلف لایه فلز معمولی با زاویه چرخشی  $\alpha = \pi/4$  و هندسه (الف) ..... ۶۵
- شکل ۹-۵ جریان بار نسبت به اختلاف فاز خارجی برای ضخامت‌های مختلف لایه فلز معمولی و زاویه چرخش  $\alpha = \pi/4$  و هندسه (ب) ..... ۶۶
- شکل ۱۰-۵ جریان‌های اسپینی نسبت به اختلاف فاز خارجی برای زوایای مختلف چرخش و ضخامت  $l = \xi$  و هندسه‌های (الف) و (ب) ..... ۶۷
- شکل ۱۱-۵ مولفه‌ی مماسی جریان اسپینی نسبت به اختلاف فاز برای ضخامت‌های مختلف لایه فلز معمولی و زاویه چرخش  $\alpha = \pi/4$  در هندسه (الف) ..... ۶۸
- شکل ۱۲-۵ مولفه عمودی جریان اسپینی نسبت به اختلاف فاز خارجی برای ضخامت‌های مختلف لایه فلز معمولی و زاویه چرخشی  $\pi/4$  در هندسه (الف) ..... ۶۸



**فهرست جدول‌ها**

- جدول ۱-۱ جدول تناوبی عناصر دارای خاصیت ابررسانایی.....۳
- جدول ۱-۲ خلاصه‌ی نتایج برای تابع اسکالر  $\psi$  و تابع برداری  $\vec{d}$ .....۲۰

## فصل اول

### ابرسانایی اسپین سه تایی

#### ۱-۱ مقدمه

ابرسانایی پدیده‌ای است که در برخی مواد و برای دماهایی پایین‌تر از دمای بحرانی ( $T_c$ ) رخ می‌دهد. در حالت ابرسانایی، مقاومت dc الکتریکی صفر است و خواص مغناطیسی خیلی متفاوت از حالت فلز معمولی است. مقاومت صفر می‌تواند منجر به روان شدن یک جریان بدون اتلاف انرژی شود. این جریان، ابرجریان نامیده می‌شود و به صورت آزمایشگاهی مشاهده شده است. یک انباره ابرسانا مشابه یک دیامغناطیس کامل رفتار می‌کند و ظرفیت القاء مغناطیسی درون ابرسانا قابل صرف نظر است. اگر یک نمونه در یک میدان مغناطیسی قرار گرفته و سپس تا دمای پایین‌تر از دمای بحرانی ابرسانایی سرد شود، دیده می‌شود که میدان اولیه را دفع می‌کند. این اثر به نام اثر مایسنر معروف است. ابرسانایی در بسیاری از عناصر فلزی از جمله در Cd, Al, Ti, Nb, Hg و در آلیاژها و ترکیبات فلزی خاص رخ می‌دهد. دمای بحرانی می‌تواند از 140 K برای آلومینیوم تا 90 K برای ترکیب  $YBa_2Cu_3O_{0.69}$  تغییر کند.

نظریه‌ای که ابرسانایی را شرح می‌دهد توسط باردین<sup>۱</sup>، کوپر<sup>۲</sup> و شریف<sup>۳</sup> (BCS) [۱]، و بوگولیوبف<sup>۴</sup> [۲] و ولانتین<sup>۵</sup> [۳] بنا شده است. یک نشانه مهم مربوط به طبیعت ابرسانایی که در آزمایشگاه مشاهده می‌شود آن است که دمای بحرانی برای ایزوتوپ‌های مختلف مواد یکسان، متفاوت است. این بدین معناست که حرکت هسته اتم

<sup>1</sup> Bardeen

<sup>2</sup> Cooper

<sup>3</sup> Schrieffer

<sup>4</sup> Bogoliubov

<sup>5</sup> Valatin

جدول ۱-۱ جدول تناوبی عناصر که در آن عناصری که در دماهای پایین (حدود ۰ تا ۵ K) دارای خاصیت ابررسانایی هستند با رنگ متفاوت نمایش یافته‌اند.

1 <b>H</b> Hydrogen 1.00794																	2 <b>He</b> Helium 4.003
3 <b>Li</b> Lithium 6.941	4 <b>Be</b> Beryllium 9.012182											5 <b>B</b> Boron 10.811	6 <b>C</b> Carbon 12.0107	7 <b>N</b> Nitrogen 14.00674	8 <b>O</b> Oxygen 15.9994	9 <b>F</b> Fluorine 18.9984032	10 <b>Ne</b> Neon 20.1797
11 <b>Na</b> Sodium 22.989770	12 <b>Mg</b> Magnesium 24.3050											13 <b>Al</b> Aluminum 26.981538	14 <b>Si</b> Silicon 28.0855	15 <b>P</b> Phosphorus 30.973761	16 <b>S</b> Sulfur 32.066	17 <b>Cl</b> Chlorine 35.4527	18 <b>Ar</b> Argon 39.948
19 <b>K</b> Potassium 39.0983	20 <b>Ca</b> Calcium 40.078	21 <b>Sc</b> Scandium 44.955910	22 <b>Ti</b> Titanium 47.867	23 <b>V</b> Vanadium 50.9415	24 <b>Cr</b> Chromium 51.9961	25 <b>Mn</b> Manganese 54.938049	26 <b>Fe</b> Iron 55.845	27 <b>Co</b> Cobalt 58.933200	28 <b>Ni</b> Nickel 58.6934	29 <b>Cu</b> Copper 63.546	30 <b>Zn</b> Zinc 65.39	31 <b>Ga</b> Gallium 69.723	32 <b>Ge</b> Germanium 72.61	33 <b>As</b> Arsenic 74.92160	34 <b>Se</b> Selenium 78.96	35 <b>Br</b> Bromine 79.904	36 <b>Kr</b> Krypton 83.80
37 <b>Rb</b> Rubidium 85.4678	38 <b>Sr</b> Strontium 87.62	39 <b>Y</b> Yttrium 88.90585	40 <b>Zr</b> Zirconium 91.224	41 <b>Nb</b> Niobium 92.90638	42 <b>Mo</b> Molybdenum 95.94	43 <b>Tc</b> Technetium (98)	44 <b>Ru</b> Ruthenium 101.07	45 <b>Rh</b> Rhodium 102.90550	46 <b>Pd</b> Palladium 106.42	47 <b>Ag</b> Silver 107.8682	48 <b>Cd</b> Cadmium 112.411	49 <b>In</b> Indium 114.818	50 <b>Sn</b> Tin 118.710	51 <b>Sb</b> Antimony 121.760	52 <b>Te</b> Tellurium 127.60	53 <b>I</b> Iodine 126.90447	54 <b>Xe</b> Xenon 131.29
55 <b>Cs</b> Cesium 132.90545	56 <b>Ba</b> Barium 137.327	57 <b>La</b> Lanthanum 138.9055	72 <b>Hf</b> Hafnium 178.49	73 <b>Ta</b> Tantalum 180.9479	74 <b>W</b> Tungsten 183.84	75 <b>Re</b> Rhenium 186.207	76 <b>Os</b> Osmium 190.23	77 <b>Ir</b> Iridium 192.217	78 <b>Pt</b> Platinum 195.078	79 <b>Au</b> Gold 196.96655	80 <b>Hg</b> Mercury 200.59	81 <b>Tl</b> Thallium 204.3833	82 <b>Pb</b> Lead 207.2	83 <b>Bi</b> Bismuth 208.98038	84 <b>Po</b> Polonium (209)	85 <b>At</b> Astatine (210)	86 <b>Rn</b> Radon (222)
87 <b>Fr</b> Francium (223)	88 <b>Ra</b> Radium (226)	89 <b>Ac</b> Actinium (227)	104 <b>Rf</b> Rutherfordium (261)	105 <b>Db</b> Dubnium (262)	106 <b>Sg</b> Seaborgium (263)	107 <b>Bh</b> Bohrium (262)	108 <b>Hs</b> Hassium (265)	109 <b>Mt</b> Meitnerium (266)	110 (269)	111 (272)	112 (277)	113	114				
58 <b>Ce</b> Cerium 140.116	59 <b>Pr</b> Praseodymium 140.90765	60 <b>Nd</b> Neodymium 144.24	61 <b>Pm</b> Promethium (145)	62 <b>Sm</b> Samarium 150.36	63 <b>Eu</b> Europium 151.964	64 <b>Gd</b> Gadolinium 157.25	65 <b>Tb</b> Terbium 158.92534	66 <b>Dy</b> Dysprosium 162.50	67 <b>Ho</b> Holmium 164.93032	68 <b>Er</b> Erbium 167.26	69 <b>Tm</b> Thulium 168.93421	70 <b>Yb</b> Ytterbium 173.04	71 <b>Lu</b> Lutetium 174.967				
90 <b>Th</b> Thorium 232.0381	91 <b>Pa</b> Protactinium 231.03588	92 <b>U</b> Uranium 238.0289	93 <b>Np</b> Neptunium (237)	94 <b>Pu</b> Plutonium (244)	95 <b>Am</b> Americium (243)	96 <b>Cm</b> Curium (247)	97 <b>Bk</b> Berkelium (247)	98 <b>Cf</b> Californium (251)	99 <b>Es</b> Einsteinium (252)	100 <b>Fm</b> Fermium (257)	101 <b>Md</b> Mendelevium (258)	102 <b>No</b> Nobelium (259)	103 <b>Lr</b> Lawrencium (262)				

(یون) نقشی را ایفا می‌کند. برهم‌کنش الکترون- شبکه- الکترون در ابررساناها منجر به یک برهم‌کنش جاذب بین الکترون‌ها می‌شود. به همین دلیل حالت پایه در فاز ابررسانایی بسیار متفاوت از یک گاز فرمی الکترون آزاد است. حالت پایه گاز الکترون آزاد یک دریای فرمی پر شده از الکترون‌های غیر برهم‌کنشی است (همه حالت-های پایین تر از انرژی فرمی بر اساس اصل طرد پائولی پر شده‌اند). این حالت، برانگیختگی‌های کوچک الکترون‌ها با یک انرژی نزدیک به انرژی فرمی را مجاز می‌داند.

نظریه BCS نشان می‌دهد که جاذبه موثر بین الکترون‌ها منجر به تشکیل زوج‌هایی از الکترون‌ها، با اندازه حرکت و اسپین مخالف می‌شوند ( $p\uparrow, p\downarrow$ ). چنین زوجی، زوج کوپر نامیده می‌شود. به دلیل اصل طرد، زوج-های الکترونی نمی‌توانند درون کره فرمی پراکنده شوند، اما به صورت موثری در لایه‌ای دو بعدی در اطراف آن قرار می‌گیرند. با تعمیم دادن به مورد چندذره‌ای، باید شبه‌ذراتی را که پایین تر از سطح فرمی واقع هستند و حفره نامیده می‌شوند به حساب آوریم. انرژی کل سامانه در حالت نهایی و در شرایط لازم پایین تر از انرژی فرمی خواهد شد و سامانه ابررسانا می‌شود.

ابررساناها معمولاً یک گاف انرژی به پهنای  $2\Delta$  دارند که در حوالی مرکز ترازهای تک الکترونی مجاز است. ترازهای مجاز یک الکترون درون ابررسانا با شرط  $|E - E_F| > \Delta$  محدود می‌شوند. اندازه گاف انرژی

ابرسانا با کاهش دما افزایش می‌یابد و در دمای بحرانی ابرسانا صفر است. گاف در طیف انرژی یک خاصیت بسیار مهمی از ابرسانایی است که به ما اجازه می‌دهد که بسیاری از جوانب رفتاری ابرسانایی را درک کنیم.

## ۱-۲ ابرسانایی غیر قراردادی

فیزیک نوین ابرسانایی را می‌توان فیزیک ابرسانایی غیر قراردادی نامید. قابل توجه است که درست بعد از مقاله مشهور از باردین، کوپر و شریفر (BCS) مشخص شد که تنها ابرسانایی قراردادی (موج-s) با جفت‌شدگی یکتایی امکان‌پذیر نیست [۴, ۵] و حالت ابرسانایی چندمولفه‌ای (ابرشاره) نیز ممکن است تشخیص داده شود که اندازه حرکت اسپینی و زاویه‌ای زوج‌های کوپر غیر صفر هستند. جذابیت تقارن جفت‌شدگی غیر قراردادی بعد از کشف ابرشارگی در  $^3\text{He}$  با تقارن جفت‌شدگی اسپین سه‌گانه و فازهای ابرشاره مخلوطی افزایش یافت [۶, ۷]. آزمایش‌های دمای پایین روی ترکیبات مخلوط، منجر به کشف ابرسانایی غیر قراردادی در سامانه‌های فرمیون سنگین شد [۴, ۸]. ترکیب فرمیون سنگین  $\text{UPt}_3$  مشابه  $^3\text{He}$  یک دیاگرام فاز ابرسانایی مخلوط دارد که وجود فازهای مختلف ابرسانایی را نشان می‌دهد، در حالی که وابستگی دمایی ضعیف پارامغناطیس به صورت مستعدی به جفت‌شدگی سه‌گانه اشاره دارد. ابرسانایی اسپین سه‌گانه دیگر که در سال‌های اخیر کشف شده، ترکیب  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  است.

### ۱-۲-۱ بردار گاف و ابرسانایی اسپین سه‌تایی

پارامتر نظم در یک ابرسانا به وسیله‌ی یک تابع گاف  $\Delta(\vec{k})$  بیان می‌شود. ابرسانایی حالتی از شکست خودبخودی تقارن است و  $\Delta(\vec{k})$  کل خواص تقارنی تابع موج چگالیده را دارا است. تقارن پیمانه‌ای همیشه در  $T_c$  شکسته شده و در حالت موج-s  $\Delta(\vec{k})$  تقارن‌های بیشتری نمی‌شکند. در حالت موج-d ( $l=2$ ) تقارن‌های بیشتری ممکن است بشکند. در ابرساناهای موج-s و موج-d الکترون‌های زوج در حالت یکتایی اسپین پادمقارن است و یک تابع مزدوج یکتا برای  $\Delta(\vec{k})$  کافی است. در ابرساناهای موج-p ( $l=1$ ) و موج-f ( $l=3$ ) (بخش فضایی تابع موج جفت، پادمقارن است. در نتیجه اسپین‌های زوج تشکیل دهنده یک حالت تقارن سه‌تایی برای شرح وابستگی اسپینی زوج‌شدگی به سه تابع گاف مستقل نیاز دارد.

برای محاسبه وابستگی اسپینی جفت‌شدگی، به استفاده از یک شکل ماتریس  $2 \times 2$  کلی برای  $\Delta(\vec{k})$  نیازمندیم:

$$\Delta(\vec{k}) = \begin{pmatrix} \Delta_{\uparrow\uparrow} & \Delta_{\uparrow\downarrow} \\ \Delta_{\downarrow\uparrow} & \Delta_{\downarrow\downarrow} \end{pmatrix}, \quad (1-1)$$

که در آن عناصر ماتریس متعلق به حالت اسپینی الکترون‌های تشکیل دهنده زوج کوپر است.  $\hat{k}$  بردار واحدی است که یک جهت را در فضای اندازه‌حرکت مشخص می‌کند. در این نمایش ابرسانای اسپین یکتایی به وسیله  $\Delta_{\uparrow\uparrow} = \Delta_{\downarrow\downarrow} = 0$  و  $\Delta_{\uparrow\downarrow} = \Delta_{\downarrow\uparrow} = \Delta_0$  تشریح می‌شود، در حالی که برای حالت اسپین سه‌تایی  $\Delta_{\uparrow\downarrow} = -\Delta_{\downarrow\uparrow} = \Delta_s$  است.

بالین<sup>۱</sup> و ورتامر<sup>۲</sup> در سال ۱۹۶۳ اعلام کردند که برای جفت‌شدگی سه‌تایی، ماتریس گاف به شکل یک بردار

مختلط سه‌بعدی  $\vec{d}(k) = [d_x(k), d_y(k), d_z(k)]$  می‌تواند نمایش یابد، اگر به صورتی تعریف شود

$$\Delta(\vec{k}) = \begin{pmatrix} \Delta_{\uparrow\uparrow} & \Delta_{\uparrow\downarrow} \\ \Delta_{\downarrow\uparrow} & \Delta_{\downarrow\downarrow} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -d_x + id_y & d_z \\ d_z & d_x - id_y \end{pmatrix}. \quad (۲-۱)$$

پس مانند یک بردار تحت چرخش اسپین‌ها تبدیل می‌شود. ظرافت این نمایش منجر به پذیرش جهانی نمایش پارامتر نظم برای ابررساناهای سه‌تایی شده است. بردار گاف  $\vec{d}(k)$  تقارن‌های حالت ابررسانایی و اندازه‌حرکت-های زاویه‌ای اوربیتالی و اسپینی زوج‌های کوپر و ساختارهای گرهی گاف انرژی را در یک روش، به خوبی شرح می‌دهد.

ماتریس گاف (معادله (۲-۱)) تقارن‌هایی مشابه تابع موج زوج کوپر دارد، بنابراین بردار حالت  $|\psi\rangle$  ابررسانای سه‌تایی می‌تواند به شکل زیر بسط داده شود.

$$|\psi\rangle = \Delta_{\uparrow\uparrow} |\uparrow\uparrow\rangle + \Delta_{\downarrow\downarrow} |\downarrow\downarrow\rangle + \Delta_0 (|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle), \quad (۳-۱)$$

پایه‌های  $|\uparrow\uparrow\rangle$ ،  $|\downarrow\downarrow\rangle$  و  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle)$  به ترتیب منطبق بر  $S = -1, 0, +1$  است. اگر دسته جدیدی از پایه‌ها  $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$  معرفی شود، به طوری که

$$\begin{aligned} \hat{z} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle), \\ \hat{x} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (-|\uparrow\uparrow\rangle + |\downarrow\downarrow\rangle), \\ \hat{y} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\uparrow\rangle + |\downarrow\downarrow\rangle), \end{aligned} \quad (۴-۱)$$

باشد، آن‌گاه بردار حالت  $|\psi\rangle$  می‌تواند نوشته شود:

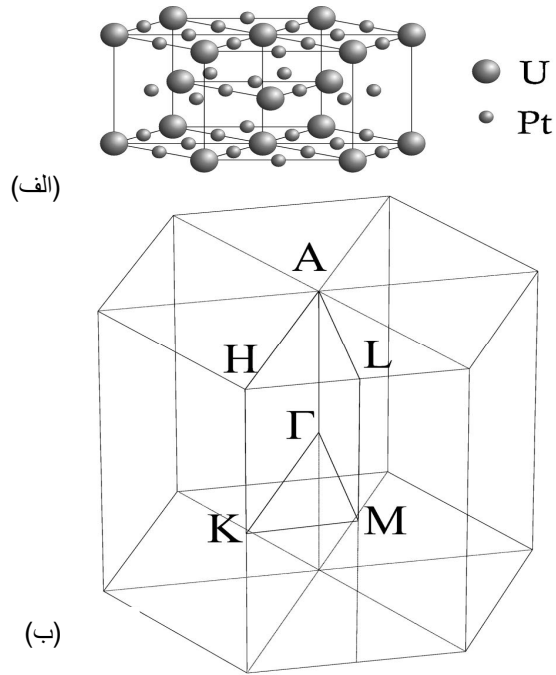
$$|\psi\rangle = \sqrt{2}(d_x \hat{x} + d_y \hat{y} + d_z \hat{z}), \quad (۵-۱)$$

به عنوان مثال نمونه‌هایی از بردار پارامتر نظم مربوط به ترکیب فرمیون سنگین  $Upt_3$  را در این‌جا می‌آوریم. ترکیب فرمیون سنگین  $Upt_3$ ، یکی از جالب‌ترین ابررساناهای فرمیون سنگین است [۱۰، ۹]. وابستگی ضعیف دمایی، نایت شیفت<sup>۳</sup> و فازهای ابررسانایی چندتایی [۱۱] وابستگی دمایی غیرمعمول ظرفیت گرمایی [۱۲] رسانندگی گرمایی [۱۰، ۱۱] و جذب صوتی در  $Upt_3$  نشان می‌دهد [۱۰] که این ترکیب، یک ابررسانای غیر-قراردادی اسپین سه‌گانه است که دارای پارامتر نظم چندمؤلفه‌ای است [۱۳]. ابررسانای فرمیون سنگین  $Upt_3$  به گروه نقطه‌ای بلور شناسی هگزاگونال ( $D_{6h}$ ) تعلق دارد. مدل‌هایی که در توضیح خواص فازهای ابررسانایی در  $Upt_3$  موفق بوده‌اند، براساس نمایش دو بعدی پارامتر فرد  $E_{2u}$  بنا شده‌اند. این مدل‌ها قیاسی هگزاگونالی از جفت‌شدگی موج-f اسپین سه‌گانه را تشریح می‌کنند. یکی از این مدل‌ها با جفت‌شدگی اسپین-اوربیتال قوی

<sup>1</sup> Baleen

<sup>2</sup> Vertamer

<sup>3</sup> Knight Shift



شکل ۱-۱ (الف) ساختار بلوری  $UPt_3$  و (ب) منطقه اول بریلوئن

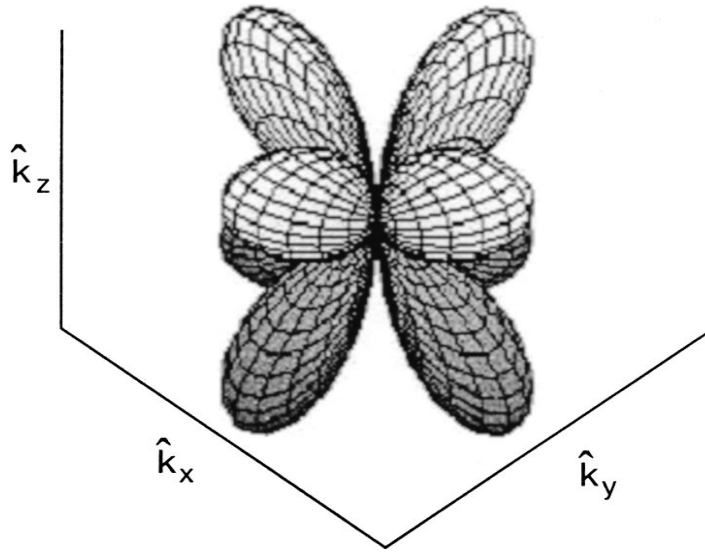
هم‌خوانی دارد و بردار  $\vec{d}$  در راستای محور  $\hat{c}$  شبکه قرار دارد ( $\hat{c} \parallel \hat{z}$ ). برای این مدل  $\vec{d} = \hat{z} [\eta_1 Y_1 + \eta_2 Y_2]$  با بردار  $\vec{d}$  در راستای محور  $\hat{c}$  شبکه قرار دارد ( $\hat{c} \parallel \hat{z}$ ). برای این مدل  $\vec{d} = \hat{z} [\eta_1 Y_1 + \eta_2 Y_2]$  با توجه به این که  $Y_2 = 2k_x k_y k_z$  و  $Y_1 = k_z (k_x^2 - k_y^2)$  توابع پایه این مثال هستند. برای فاز قطبیده دمای بالا ( $\eta_1 = 1, \eta_2 = 0$ ) است.

$$\vec{d}(k) = \Delta \hat{z} k_z (k_x^2 - k_y^2), \quad (۶-۱)$$

و برای فاز محوری دمای پایین ( $\eta_1 = 1, \eta_2 = i$ )

$$\vec{d}(k) = \Delta \hat{z} k_z (k_x \pm k_y)^2, \quad (۷-۱)$$

که در آن  $\hat{k} = (k_x, k_y, k_z)$  است. هر دو حالت یکنانی اند. حالت اول دارای اندازه حرکت اوربیتالی انتظاری صفر است. در حالی که برای دومین حالت داریم  $\langle L \rangle = \pm 2$ . برای فاز قطبی (۶-۱) گاف در طیف انرژی برانگیخته  $|\vec{d}(k)|$  یک گره خطی استوایی در  $\theta = \frac{\pi}{2}$  دارد و خطوط طولی گره‌ها در  $\phi_n = (\frac{\pi}{4})(2n+1)$  و  $n=0,1,2,3,\dots$  است (شکل ۲-۱). در حالت محوری (۷-۱) گره‌های خطی طولی به هم نزدیک شده‌اند و یک جفت گره نقطه‌ای در  $\theta=0$  وجود دارد.



شکل ۱-۲ قدر مطلق پارامتر نظم  $|\vec{d}(k)|$  (۶-۱) در فضای اندازه حرکت برای فاز قطبی در ابرسانای موج-f.

حالت اریتالی دیگر که جفت‌شدگی اسپین-اوربیتال در  $UPT_3$  ضعیف فرض شده، حالت صفحه‌ای یکانی

$$\vec{d}(k) = \Delta k_z [ \hat{x}(k_x^2 - k_y^2) + 2k_x k_y \hat{y} ]. \quad (۸-۱)$$

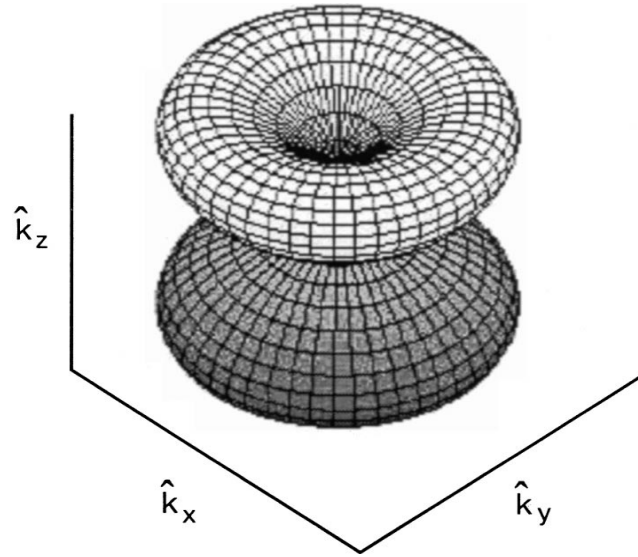
و حالت دو قطبی غیریکانی

$$\vec{d}(k) = \Delta k_z [ \hat{x}(k_x^2 - k_y^2) + 2ik_x k_y \hat{y} ]. \quad (۹-۱)$$

است. مدل‌های بیشتر برای پارامتر نظم  $UPT_3$  در مراجع [۹, ۱۰, ۱۴] آمده‌اند. مدل‌های (۷-۱) و (۹-۱) از این نظر جالب‌اند که به صورت خودبه‌خودی تقارن وارونی زمان را می‌شکنند.

ابرساناهای اسپین سه‌تایی علاوه بر موارد ذکر شده در بالا از دیدگاه نظری و تجربی دارای ویژگی‌های خاصی است. عموماً در مقایسه با ابرساناهای دمای بالای موج-d ابرساناهایی با دمای بحرانی پایین هستند [۱۴-۱۷]. در این ابرساناها رابطه بین دمای بحرانی و گاف در دمای صفر متفاوت از آن رابطه‌ای (مقداری ثابت  $\Delta$ ) است که تئوری BCS برای ابرسانای موج-s معرفی کرده است [۱۵, ۱۸]. ابرسانای فرومغناطیس پدیده جالب دیگری از ابرسانای اسپین سه‌تایی است. قبلاً مشاهده شده بود که ابرساناهای قراردادی موادی غیرمغناطیسی‌اند و لذا نتیجه گرفتند که ابرسانایی و فرومغناطیس پدیده‌هایی مخالف هم هستند. در حالی که ابرسانایی فرومغناطیس بعداً در برخی ابرساناهای سه‌تایی شبیه  $ZrZn_2$ ،  $UGe_2$  و  $URhGe_2$  مشاهده شد [۱۸, ۱۹].

وقتی که تعداد زیادی از اتم‌ها یا الکترون‌ها اسپین‌شان با هم هم‌جهت شوند، فرومغناطیس به وجود می‌آید. در واقع دو منبع مغناطیس در فلزات اندازه‌حرکت‌های مغناطیسی محلی و دریای الکترون‌های رسانش هستند. مغناطیس محلی در فلزات نادر زمین (مثل گادولینیوم) و اکتیدها (مثل نپتونیم) به خاطر ناقص پر شدن الکترون‌ها



شکل ۳-۱ قدر مطلق پارامتر نظم  $|\vec{d}(k)|$  معادله‌ی (۷-۱) در فضای اندازه حرکت برای فاز محوری در ابررسانای موج-f

در لایه‌های اتمی داخلی رخ می‌دهد. این منجر به یک اندازه حرکت خوب تعریف شده در هر مکان ثابت اتمی می‌شود که مرتب جفت‌شدگی مغناطیسی بلندبرد را به سبب تبادل الکترون‌های رسانایی تولید می‌کنند. نوع دوم مغناطیس - معروف به مغناطیس نواری - از اندازه حرکت‌های مغناطیسی الکترون‌های رسانشی خودشان به وجود می‌آید. در فلزات، الکترون‌ها سیار هستند و لذا آن‌ها برای حرکت کردن از محل یک اتم به محل اتم دیگر آزادند و تمایل دارند که اندازه حرکت مغناطیسی‌شان هم جهت با میدان خارجی اعمال شده باشد.

فرومغناطیس‌ها فقط یک اندازه حرکت مغناطیسی در دمای پایین دارند و میدان مغناطیسی داخلی به صورت خودبخودی در دمای کوری ظاهر می‌شود که به صورت نوعی از مرتبه‌ی ۱۰ تا ۱۰۰۰ کلوین است. در دماهای بالاتر بهر حال اندازه حرکت‌های مغناطیسی اتم‌ها پیوسته جهت‌شان را تغییر می‌دهند تا اندازه حرکت کل صفر شود. یک گذار مغناطیسی مشابه در آنتی‌فرومغناطیس‌ها (موادی که اسپین اتم‌های مجاور در راستاهای متفاوتند) رخ می‌دهد. این گذار در دمای نیل رخ داده و منجر به نابودی میدان مغناطیسی داخلی می‌شود.

به هر حال جفت‌شدگی دیگری نیز ممکن است رخ دهد، همچنین جالب توجه است وقتی که یک دافعه کولمبی محلی قوی وجود دارد. این دافعه نقشی حیاتی در پیدایش مغناطیس و کمک به پایداری مرتبه بلند برد یا کندی همبستگی‌های مغناطیسی نوسانی دارد. جفت‌شدگی الکترونی غیرقراردادی و مغناطیس اغلب به هم پیوند خورده‌اند و درک اثر متقابل بین دو پدیده یکی از کلیدهای سوالات در فیزیک ماده چگال است. برهم‌کنش‌های مغناطیسی همچنین می‌تواند نقش مهمی در ایجاد جذب الکترون‌ها به یکدیگر ایفا کند.

همبستگی‌های آنتی‌فرومغناطیس منجر به جفت‌شدگی یکتایی (با اسپین صفر)، در حالی که همبستگی‌های فرومغناطیس خواهان جفت‌شدگی سه‌تایی (با اسپین واحد) هستند. مشاهده ابررسانایی در رساناهای ذاتی و



سامانه‌های فرمیون سنگین و جدیداً ابررساناهای فرومغناطیس جدید [۲۰]، استدلال‌هایی قوی برای وجود نوع عجیبی از ابررسانایی فراهم می‌کند. در حقیقت، ابررسانایی در فرومغناطیس‌ها باید نتیجه نوع دیگری از مکانیسم جفت‌شدگی باشد. در این مواد، الکترون‌هایی که دارای اسپین هم‌جهت هستند با یکدیگر زوج کوپر تشکیل می‌دهند که اسپین‌شان یک است، نتیجه تشکیل ابررسانایی اسپین سه‌تایی است. در مقابل، ابررسانایی قراردادی - معروف به ابررسانایی یکتایی موج-S وقتی رخ می‌دهد که الکترون‌های با اسپین مخالف با هم زوج کوپر با اندازه حرکت و اسپین صفر تشکیل دهند.

یک میدان مغناطیسی از دو طریق می‌تواند ابررسانای اسپین یکتایی را نابود کند. اولین راه همان اثراتی هستند که به اثر اوربیتالی معروف است و به آسانی نمودی از نیروی لورنتس است. چون الکترون‌ها در زوج کوپر اندازه حرکت‌های مخالف دارند، نیروی لورنتس در جهت‌های مخالف بر آن‌ها اثر کرده و زوج کوپر را می‌شکند. پدیده‌ی دوم، معروف به اثر پارامغناطیس، وقتی رخ می‌دهد که یک میدان مغناطیسی قوی برای هم‌جهت کردن اسپین‌های دو الکترون با میدان تلاش کند.

ابررسانایی اسپین یکتایی در میدان‌های قوی از بین می‌رود، در حالی که چنین میدان‌هایی نمی‌توانند ابررسانایی اسپین سه‌تایی را از بین ببرند، زیرا اسپین‌های دو الکترون ممکن است با میدان هم‌جهت باشند. این بدان معناست که ابررسانایی اسپین سه‌تایی فقط با اثر اوربیتالی می‌تواند از بین برود. علاوه بر دما و میدان مغناطیسی، فشار نیز بر گذار فاز ابررساناهای اسپین سه‌تایی، به‌ویژه ابررساناهای اسپین سه‌تایی فرومغناطیس تاثیر دارد. برخی از ابررساناهای اسپین سه‌تایی ساختارشان مشابه برخی دیگر از ابررساناهای مهم با دمای بحرانی بالا است. برای مثال، ابررسانای اسپین سه‌تایی  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  ساختاری مشابه ابررسانای دمای بالای اسپین یکتایی  $\text{LaBaCuO}$  دارد که در آن اتم‌های  $\text{Sr}$  و  $\text{Ru}$  به ترتیب جایگزین اتم‌های  $\text{La}(\text{Ba})$  و  $\text{Cu}$  می‌شوند. بنابراین، تحقیق در مورد این ابررساناهای اسپین سه‌تایی به فهم مورد یکتایی کمک می‌کند [۱۹].

در ساختارهایی با ابررسانایی اسپین سه‌تایی، به‌طور کلی یک ابرجریان اسپینی جاری شود، در حالی که در ابررساناهای اسپین یکتایی جریان اسپینی ممکن است که تنها در سامانه‌هایی که ابررسانا و فرومغناطیس در مجاورت هم هستند وجود داشته باشد [۱۹-۲۲].

بردار گاف غیریکانی ( $\vec{d}(k) \times \vec{d}^*(k) \neq 0$ ) به عبارت دیگر  $\vec{d}(k) \neq \vec{d}^*(k)$  اثر انگشت دیگری از ابررسانایی اسپین سه‌تایی است.

طیف انرژی شبه‌ذرات برانگیخته با بردار موج  $\vec{k}$  مربوط به زوج‌های کوپر ابررسانا می‌توانند بر حسب بردار گاف  $\vec{d}(k)$  به شکل زیر نوشته شود:

$$E_k = \sqrt{(\varepsilon_k^2 + \vec{d}(k) \cdot \vec{d}^*(k) \pm |\vec{d}(k) \times \vec{d}^*(k)|)}, \quad (10-1)$$

که در آن  $E_k$  انرژی شبه‌ذرات است و  $\varepsilon_k$  پتانسیل شیمیایی است. اگر  $\vec{d}(k) \times \vec{d}^*(k) = 0$  باشد، حالت یکانی است و  $\vec{d}(k) \cdot \vec{d}^*(k)$  می‌تواند به سادگی با مربع گاف انرژی ابررسانایی  $\Delta(\vec{k})$  جایگزین شود. در مقابل، یک حالت

غیریکانی از زوج‌های کوپر با دو گاف انرژی متمایز تشکیل شده است. یکی از این گاف‌ها حتی می‌تواند صفر شود، نتیجه این که حتی در دمای  $T=0$  همه الکترون‌ها زوج کوپر تشکیل نداده‌اند. بنابراین با توجه به رابطه (۱-۱۰) و وجود علامت  $(\pm)$  در این رابطه، می‌توان نتیجه گرفت که ابررساناهای غیریکانی قادرند که تبهگنی را از ترازهای انرژی بردارند.

حالت‌های یکانی از نظر انرژی خواهان ابررساناهای پارامغناطیس پیوند ضعیف، در غیاب میدان‌های شکننده تقارن‌اند. یک فرآیند اضافی ویژه برای تولید حالت غیریکانی می‌تواند مورد نیاز باشد برای حالت‌های یکانی، همه الکترون‌ها زوج‌اند و  $\vec{d}(k)$  یک معنای فیزیکی دارد. جهتش عمود بر سطحی است که الکترون‌ها در  $(\vec{k}, -\vec{k})$  جفت شده‌اند و اسپین‌های جفت شده برابرند  $(\uparrow\uparrow)$  و  $(\downarrow\downarrow)$  نسبت به محور کوانتیده شده در آن سطح) و اندازه‌اش متناسب با گاف انرژی در  $(\vec{k}, -\vec{k})$  است.

در حالت اسپین سه‌تایی غیریکانی، زوج‌های کوپر ممکن است که اندازه حرکت اسپینی متوسط را با خود حمل کنند که اندازه‌ی آن از رابطه

$$S = -i\hbar \left[ \frac{d\Omega}{4\pi} (\vec{d}(k) \times \vec{d}^*(k)) \right], \quad (11-1)$$

به دست می‌آید. ابررساناهای غیریکانی همواره شکننده‌های تقارن وارونی زمان هستند. در این پایان‌نامه ابررساناهایی که در پیوندگاه جوزفسون مورد بررسی ما شرکت دارند مربوط به فاز B ترکیب فرمیون سنگین  $UPt_3$  است. فاز B به دمای پایین و میدان مغناطیسی ضعیف اشاره دارد. بردار گاف این ابررسانا همان مدل (۱-۹) است، که برای آن:

$$\vec{d}(k) \times \vec{d}^*(k) = -4i\Delta_0^2(T) k_x k_y k_z^2 (k_x^2 - k_y^2), \quad (12-1)$$

است، یا به تعبیری دیگر، چون  $\vec{d}^*(k) = \Delta \hat{k}_z (\hat{x}(k_x^2 - k_y^2) - \hat{y}2ik_x k_y)$  و برابر با  $\vec{d}(k) = \Delta \hat{k}_z (\hat{x}(k_x^2 - k_y^2) + \hat{y}2ik_x k_y)$  نیست، لذا این بردار گاف بیان‌گر یک حالت غیریکانی است.

## ۱-۲-۲-۲-۱ آزمون‌هایی برای پارامتر نظم در ابررساناهای غیرقراردادی

ساده‌ترین راه برای آزمودن حالت ابررسانایی غیرقراردادی، بررسی اثر پراکندگی ناخالصی روی مشخصه‌های الکتروپدینامیکی و جنبشی است. برای ابررساناهای موج-S ناخالصی‌های غیرمغناطیسی هیچ اثری بر  $T_c$  ندارد (قاعده اندرسون<sup>۱</sup>). در ابررساناهای با جفت‌شدگی غیرقراردادی ناخالصی‌های غیرمغناطیسی موجب شکستن جفت‌های الکترونی و از بین رفتن خاصیت ابررسانایی می‌شود. افزایش تراکم ناخالصی منجر به همگن شدن پارامتر نظم می‌شود. در حالتی با تقارن فضایی شکسته‌شده، تنها راه دسترسی آن است که پارامتر نظم بر روی سطح فرمی صفر شود. این مسئله وقتی می‌تواند رخ دهد که  $\Delta_0 \tau \sim 1$  باشد. به طوری که  $\Delta_0$  از مرتبه گاف متوسط

<sup>1</sup> Anderson

اندازه‌گیری شده در غیاب ناخالصی‌ها و در دمای  $T = 0$  است و  $\tau$  زمان آزاد میانگین شبه‌ذرات است [۲۱]، [۲۳].

$\delta\omega$  بسامد تشدید مغناطیس هسته (NMR) ثابت شیف<sup>۱</sup> مناسب‌ترین وسیله برای اندازه‌گیری ساختار اسپینی حالت ابرسانایی است. زیرا ناشی از برهمکنش الکترون با اندازه‌حرکت مغناطیسی هسته است و  $\delta\omega$  متناسب با حساسیت پارامغناطیسی پائولی  $\chi$  الکترون‌های معمولی است. وابستگی دمایی  $\delta\omega(T)$  به صورت قوی به چگونگی جفت‌شدگی یکتایی و سه‌تایی وابسته است. در ابرساناهای یکتایی زوج‌های کوپر اسپین  $S = 0$  دارد و چگالی الکترون‌های معمولی در دمای  $T \rightarrow 0$  به سمت صفر میل می‌کند. بنابراین به خوبی  $\delta\omega \rightarrow 0$  می‌رود. در ابرساناهای اسپین سه‌تایی هم زوج‌های کوپر و هم الکترون‌های برانگیخته بر حساسیت  $\chi$  اثر می‌گذارند، به طوری که با کاهش دما نیز اندکی تغییر می‌کند.

وجود گره‌های خطی و نقطه‌ای پارامتر نظم در ابرساناهای غیرقراردادی ممکن است از وابستگی دمایی ضرایب ترابرد و مقادیر ترمودینامیکی اندازه‌گیری شود. در ابرساناهای موج-s (مقدار ثابت  $\Delta$ ) آن‌ها رفتار فعال شده گرمایی ( $\sim \exp(-\Delta/T)$ ) را آشکار می‌کنند. در یک ابرسانا با گره‌هایی در گاف طیف برانگیختگی پایه، مقادیر جنبشی و ترمودینامیکی وابستگی دمایی توان پایین دارند. جزئی‌ترین اطلاعات در مورد بردار پارامتر نظم می‌تواند از آزمون‌های حساس فاز پارامتر نظم به دست آید.

### ۱-۳ اثر جوزفسون

اثر جوزفسون [۲۳] در اتصالات ضعیف ابرسانایی به وجود می‌آید که دو انباره‌ی ابرسانا به صورت ضعیف باهم تماس پیدا می‌کنند. تماس بین دو انباره‌ی ابرسانا ( $S_1, S_2$ ) اجازه می‌دهد که الکترون‌ها بین دو انباره تبادل شوند و هم‌دوسی فاز ابرسانایی در سامانه پایدار شود. این اثر شدیداً به چگونگی وابستگی پارامتر نظم مختلط در فضای اندازه حرکت روی سطح فرمی حساس است. پارامترهای نظم دو انباره ابرسانای منفرد اساساً یکسان‌اند و فازهای این پارامترهای نظم با  $\varphi_1, \varphi_2$  نشانه‌گذاری می‌شوند. پیوند ضعیف جوزفسون می‌تواند به عنوان مخلوط کننده‌ی دو حالت کوانتومی ماکروسکوپی ابرسانایی در انباره‌ها باشد. نتیجه‌ی این مخلوط کردن، یک جریان وابسته به فاز است که از یک ابرسانا به دیگری جاری می‌شود. این جریان که جریان جوزفسون نام دارد بر حسب اختلاف فاز  $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$  در عرض پیوند ضعیف اندازه‌گیری می‌شود.

#### ۱-۳-۱ طبقه‌بندی و خواص کلی

مطابق نوع جفت‌شدگی، پیوندهای جوزفسون به صورت‌های زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

(۱) اتصالات تونلی S-I-S (در اصل توسط جوزفسون در نظر گرفته شد) که I یک لایه عایق است. پیوند ضعیف با تونل‌زنی کوانتومی الکترون‌ها از میان یک بره پتانسیل مهیا می‌شود.

<sup>1</sup> Knight shift

۲) اتصالات نقطه ای S-C-S که در آن C یک نقطه هندسی است. برای داشتن رفتار جوزفسون، اندازه‌ی نقطه تماس باید از طول هم‌دوسی ( $\xi$ ) ابرسانایی کوچک‌تر باشد.

۳) اتصالات بر اساس اثر مجاورت، S-N-S (یک لایه فلز معمولی است)، S-F-S (یک لایه فرومغناطیس است). ترکیبات مختلف از این نوع اتصالات از قبیل ساختارهای S-I-N-S یا S-I-C-S هم امکان‌پذیر است. نوع دیگری از پیوند ضعیف جوزفسون، میکروساختارهای جوزفسون چندپایانه‌ای هستند که بیش از دو انباره‌ی ابرسانا با هم جفت می‌شوند.