

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه ارومیه

دانشکده علوم - گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد  
گرایش فیزیک حالت جامد

## آشکارسازی درهم تنیدگی نقطه کوانتومی ابررسانا

دانشجو:

خدیجه قلیزاده

استاد راهنمای اول:

دکتر کوروش آقایار قره باغ

استاد راهنمای دوم:

دکتر اصغر اسمعیلی

مهر ۱۳۹۲

حق چاپ برای دانشگاه ارومیه محفوظ است.

تقدیم به

روح بزرگ مادرم که عطر حضورش همیشه در وجودم باقی  
می ماند

و همسر مهربانم که بدون او بی معنی اند محظات زندگی ام

# سپاس

پروردگارا!

مرا مدد کن تا دانش اندکم

نه نردبانی باشد برای فزونی غرور و تکبر

و نه حلقه ای برای اسارت

و نه دستمایه ای برای تجارت

بلکه گامی باشد برای انسانیت و متفاوت ساختن زندگی خود و دیگران

پیش از هر چیز خداوند را شاکرم که به من توانایی تهیه این پایان نامه را داد. پس از آن از خانواده ام به خصوص پدر مهربانم سپاس گزارم که طی این مدت به طرق مختلف در راستای تحصیل علم و دانش مرا یاری نمودند. مراتب تقدیر و تشکر فراوان خود را از اساتید بزرگوارم جناب آقای دکتر کوروش آقایار قره باغ و جناب آقای دکتر اصغر اسمعیلی به پاس زحمات بی دریغشان، به جای می آورم. بدون شک علم آموزی در محضر این اساتید بزرگوار از ارزشمندترین تجارب من در طول زندگی ام خواهد بود.

## چکیده

درهم تنیدگی یکی از نتایج جالب مکانیک کوانتومی است و نقش اساسی را در نظریه اطلاعات کوانتومی بازی می کند. درهم تنیدگی برای سیستم های مختلف حالت جامدی چون کیوبیت های نقاط کوانتومی، اتم ها، فوتون ها و ... مورد بررسی قرار گرفته است. در این طرح درهم تنیدگی کیوبیت های بار را در مدارهای ابررسانا مورد بررسی، تجزیه و تحلیل قرار می دهیم. ابتدا در فصل اول به طور خلاصه به معرفی پدیده ابررسانایی و نظریه های شناخته شده ی آن پرداخته شده است. در فصل دوم به طور خلاصه نظریه اطلاعات و محاسبات کوانتومی و بحث درهم تنیدگی را بیان می کنیم و با توجه به اهمیت کیوبیت های ابررسانا به بررسی امکان ساخت کیوبیت های ابررسانا می پردازیم. یکی از روش های مورد استفاده در مکانیک کوانتومی حل معادلات به روش ماتریسی است. با توجه اهمیت هامیلتونی در سیستم های ابررسانا، در فصل سوم هامیلتونی متناظر را به صورت ماتریسی توضیح داده و سپس طرح دو کیوبیت بار را معرفی می کنیم. با در نظر گرفتن حالت های مختلف این سیستم ها، با استفاده از معیار توافق میزان درهم تنیدگی آنها را بررسی کرده و در نهایت نمودارهای مربوطه را رسم می کنیم. ملاحظه می کنیم که در این سیستم وقتی جفت شدگی را در راستای  $(XZ)$  در نظر می گیریم، نسبت به زمانی که جفت شدگی فقط در راستای  $Z$  در نظر گرفته می شود، میزان درهم تنیدگی افزایش می یابد که یک عملکرد بهتر برای ابررسانای نقطه کوانتومی است. در نهایت وقتی جفت شدگی را در راستای  $(XYZ)$  در نظر می گیریم، مشاهده می کنیم که سیستم پایدارترین میزان درهم تنیدگی را دارد.

**کلمات کلیدی:** درهم تنیدگی، نقطه کوانتومی، ابررسانایی، پیوندگاه جوزفسون

# فهرست مطالب

۱	مقدمه ای بر ابرسانایی	۱
۱	مقدمه	۱.۱
۱	نظریه ابرسانایی	۲.۱
۴	نظریه های ابرسانایی	۳.۱
۵	مدل گینزبورگ لاندائو برای ابرسانایی	۴.۱
۸	ابرسانای نوع اول	۵.۱
۸	ابرسانای نوع دوم	۶.۱
۱۱	اثر مایسنر	۷.۱
۱۲	تئوری <i>BCS</i>	۸.۱
۱۵	تونل زنی در پیوندهای ابرسانا	۹.۱
۱۷	تونل زنی الکترونها در پیوند <i>SIS</i>	۱۰.۱
۲۱	تونل زنی زوج الکترونها در پدیده جوزفسون	۱۱.۱
۲۴	بررسی کاربرد ابرساناها در صنعت برق ایران	۱۲.۱
۲۴	کاربرد در مهندسی پزشکی	۱۳.۱
۲۵	کاربرد در مهندسی الکترونیک	۱۴.۱
۲۶	درهم تنیدگی و کیوبیت های ابرسانایی	۲
۲۶	مقدمه	۱.۲
۲۶	تاریخچه درهم تنیدگی	۲.۲
۲۸	فضای هیلبرت	۳.۲
۲۸	ماتریس چگالی	۴.۲
۳۰	تابع توافق	۵.۲

۳۱	..... ماتریس های پاولی	۶.۲
۳۳	..... واحد اطلاعات کوانتومی	۷.۲
۳۴	..... کیوبیت ها	۸.۲
۳۷	..... بیت های کوانتومی ابررسانا	۹.۲
۳۸	..... کیوبیت ابررسانایی بر مبنای بار	۱.۹.۲
۳۹	..... کیوبیت ابررسانایی بر مبنای فاز	۲.۹.۲
۳۹	..... انواع کیوبیت های ابررسانا	۱۰.۲
۴۱	..... جعبه جفت کوپر	۱۱.۲
۴۴	<b>بحث و نتایج</b>	<b>۳</b>
۴۴	..... مقدمه	۱.۳
۴۴	..... مزایا و معایب استفاده از پایه های ابررسانا	۲.۳
	درهم تنیدگی ابررسانای نقطه کوانتومی مشبک دو کیوبیتی با جفت	۳.۳
۴۵	..... شدگی در راستای $XZ$	
۴۸	..... هامیلتونی سیستم	۱.۳.۳
۵۲	..... مطالعه میزان درهم تنیدگی	۲.۳.۳
	درهم تنیدگی ابررسانای نقطه کوانتومی مشبک دو کیوبیتی با جفت	۴.۳
۵۸	..... شدگی در راستای $XYZ$	
۵۸	..... هامیلتونی سیستم	۱.۴.۳
۶۰	..... بررسی میزان درهم تنیدگی	۲.۴.۳

# فهرست تصاویر

۳	شرایط بروز خاصیت ابررسانایی در عناصر جدول تناوبی . . . . .	۱.۱
۷	حد واسط بین ابررسانایی و نرمال در حالت میانی . . . . .	۲.۱
۹	نمودار $B$ بر حسب دما در ابررسانای نوع اول . . . . .	۳.۱
۱۰	نمودار $B$ بر حسب دما در ابررسانای دوم . . . . .	۴.۱
۱۱	اثر مایسنر . . . . .	۵.۱
	دیاگرام سطوح انرژی در دماهای صفر و غیر صفر الف) نیمه رسانا (الکترونها همواره فرمیون) ب) ابررسانا (جفت الکترونها در حالت بوزون و زوج کوپر) . . . . .	۶.۱
۱۴	پدیده تونل زنی . . . . .	۷.۱
۱۶	حالت های مختلف تونل زنی . . . . .	۸.۱
۱۸	نمودار $I - V$ برای پدیده $AC$ جوزفسون تحت تاثیر تونل زنی تک الکترونها در پیوند $SIS$ . . . . .	۹.۱
۱۹	تونل زنی تک الکترون ها در پیوند $SIS$ در دمای غیر صفر . . . . .	۱۰.۱
	انواع کیوبیتهای ابررسانا؛ چپ: کیوبیت شار، راست بالا: کیوبیت بار، راست پایین: کیوبیت فاز . . . . .	۱.۲
۴۰	جعبه زوج کوپر به عنوان یک اتم قابل تنظیم . . . . .	۲.۲
۴۲	مدار پایه از یک پیوندگاه جوزفسون کیوبیت بار . . . . .	۱.۳
	تغییرات تابع توافق با شار مغناطیسی برای مقادیر $\delta V_g$ مختلف . . . . .	۳.۳
	تغییرات تابع توافق بر حسب شار مغناطیسی اعمالی بر سیستم در دماهای متفاوت . . . . .	۴.۳
۵۶		۵۶

۴۹□□□□□□□□.۳.۲



۵.۳ تغییرات تابع توافق با شار مغناطیسی در دماهای متفاوت برای  $E_{z1} =$  . . . . .  $E_{x1} = 0.5$  ۵۷

۶۴۰۰۰۰۰۰۰.۳.۶

۶۵۰۰۰۰۰۰۰.۳.۷

۶۹۰۰۰۰۰۰۰.۳.۱۰

۷۰۰۰۰۰۰۰۰.۳.۱۱

۷۱۰۰۰۰۰۰۰.۳.۱۲

## مقدمه

به دنبال پیشرفتهای بسیاری که در زمینه علوم مختلف و تکنولوژی در زندگی بشر اتفاق افتاده است، تاکنون بشر توانسته است که ابزارهای بسیار مدرن را برای رسیدن به اهداف لایتنهای خود تهیه کند. اما نیازهای بشری هیچگاه خاتمه نمی یابد و دانشمندان همواره در صدد بهبود و پیشرفت وسایل آنها می باشد. یکی از مهمترین و پیشرفته ترین آنها، ابزار و وسایل محاسباتی همچون رایانه ها می باشند که سریعترین آنها در چند سال اخیر با توجه به رشد و پیشرفت سریع تکنولوژی نیمه هادی ساخته شده اند. اما هنوز مشکلات بزرگی پیش روی بشر می باشند که رایانه های امروزی پاسخگوی این نیازها نیستند. مساله مهمی که در رایانه های امروزی ضعف محسوب می شود، سرعت انجام محاسبات است. بدون تردید نقطه شروع طراحی هر رایانه، تک عنصر حافظه یا به اصطلاح بیت می باشد که در رایانه های کلاسیک دو مقدار برای آن قابل تصور است و برای سادگی به صورت صفر (۰) و (۱) بیان می شود. اما در رایانه های کوانتومی به دلیل اصل برهم نهی حالات اکوانتومی، بیت کوانتومی<sup>۲</sup> به طور کلی در یک زمان خاص به شکل برهم نهی از این دو حالت پایه  $(\frac{a|0\rangle + b|1\rangle}{\sqrt{a^2 + b^2}})$  خواهد بود [۲۱].

همانطور که می دانیم، هر سیستمی (از دیدگاه کوانتومی) در ابعاد محدود، دارای طیف انرژی گسسته ای است که در آن تراز هر انرژی متناظر با حالت خاصی است. بنابراین می توان گفت که بیتهای کوانتومی همواره کنار ما در طبیعت وجود دارند. اما معمولاً در طبیعت (ابعاد بزرگ) تعداد زیادی از این طبقات انرژی و بسیار نزدیک به هم وجود خواهند داشت و هنگامی که انرژی موجود در سیستم بسیار بزرگ باشد، حالت کل سیستم به شکل ترکیبی از تعداد زیادی از این حالتها می باشد. در حالیکه در بیت کوانتومی یک سیستم دو حالته قابل تفکیک مدنظر است. بر این اساس، تحقیقات و پیشنهادات مختلفی برای طراحی و ساخت بیتهای کوانتومی در سالهای اخیر از سوی دانشمندان و محققین ارائه شده است و همگی سعی کرده اند که بهترین بیت کوانتومی با خاصیت مذکور را معرفی نمایند.

توجه به این نکته مهم است که تنها معرفی و ساخت یک سیستم کوانتومی دو حالته با خاصیت فوق کافی نمی باشد، بلکه مهمتر از آن امکان ایجاد تغییر در حالت سیستم به شکل دلخواه و همچنین خواندن (استخراج) حالت (اطلاعات) سیستم نیز دو مساله اساسی در طراحی بیت

---

<sup>۱</sup>Superposition

<sup>۲</sup>Qubit

های کوانتومی می باشند. بنابراین بهترین بیت های کوانتومی آنهایی هستند که این دو امر (نوشتن و خواندن) در آنها به ساده ترین و مؤثرترین شکل، ممکن باشد.

پیشرفت در دانش، اغلب حاصل به کارگیری قوانین و فنون بین رشته ای است که در ظاهر کاملاً از هم جدا می باشند. معمولاً این تبادل ها، هر دو رشته را در مسیری جدید قرار می دهد. در این پروژه به سراغ کیوبیت های ابررسانا می رویم. در واقع کیوبیت های ابررسانا برای تحقق بخشیدن سنگ بنای کامپیوترهای کوانتومی انتخاب شده اند. همانطور که از نام آنها پیداست، پیچیدگی های بسیاری در این زمینه وجود دارد.

تفاوت این اتم های مصنوعی (نقاط کوانتومی) با اتم های ساده، در خواص بهتر و قابلیت کنترل آنها می باشد، که امکان پیاده سازی موثرتر کیوبیت ها را فراهم می آورد.

اما چرا ابررسانا؟ پیوندهای جوزفسون در پدیده ابررسانایی مثال بارزی از خواص کوانتومی ماکروسکوپیک هستند و همزمان کاربردهای بسیاری را در زمینه الکترونیک فراهم آورده اند. اکثر ادوات الکترونیک ابررسانا از این خاصیت کوانتومی ماکروسکوپیک و یک پدیده بنیادین دیگر در ابررساناها یعنی کوانتش شار استفاده می کنند. ترکیب این دو پدیده به همراه رسانایی بینهایت (مقاومت صفر) در حالت ابررسانایی بستری بسیار مناسب برای طراحی مدارهای نوین فراهم آورده است. در ضمن توجه به این نکته ضروری است که با توجه به توضیحات فوق، تا حد بسیار خوبی امکان ساخت قطعات و مدارهای پیچیده ابررسانا با تکنولوژی در دسترس پژوهشگران ایرانی، فراهم است و این خود می تواند انگیزه مضاعفی برای تحقیق و تفحص در این زمینه باشد.

### ساختار پایان نامه

فصل اول: در فصل اول به معرفی پدیده ابررسانایی و نظریه های شناخته شده آن پرداخته می شود. با توجه به گسترش روزافزون مصرف انرژی در جهان و روند روبه کاهش منابع انرژی، استفاده از این مواد که با تلفات کمتر و بازدهی بیشتر ما را در مصرف بهینه انرژی یاری می نمایند، بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

فصل دوم: درهم تنیدگی یکی از نتایج جالب مکانیک کوانتومی می باشد که خود ناشی از اصل برهم نهی حالات کوانتومی است و نقش اساسی را در نظریه اطلاعات کوانتومی بازی می کند. در هم تنیدگی برای سیستم های مختلف حالت جامدی چون کیوبیت های نقاط کوانتومی، اتم ها، و ... مورد بررسی قرار گرفته است، در این طرح در هم تنیدگی کیوبیت های باری را در مدارهای ابررسانا مورد بررسی، تجزیه و تحلیل قرار می دهیم، برای این منظور در فصل دوم به طور خلاصه نظریه اطلاعات و محاسبات کوانتومی و بحث درهم تنیدگی

را بیان می کنیم و با توجه به اهمیت کیوبیت های ابررسانا به بررسی امکان ساخت کیوبیت های ابررسانا می پردازیم.

فصل سوم: یکی از راه های مورد استفاده در مکانیک کوانتومی حل معادله شرودینگر به روش ماتریسی است، لذا با توجه اهمیت هامیلتونی در کیوبیت های ابررسانا در فصل سوم هامیلتونی به صورت ماتریسی توضیح داده می شود. در فصل سوم طرح دو کیوبیت باری معرفی می شود و سپس در این سیستم در حالت های مختلف را در نظر گرفته و با استفاده از معیار توافق<sup>۱</sup> مقدار درهم تنیدگی این سیستم را بررسی نموده و در پایان نمودارهای آن رسم می کنیم. دیده می شود که در این سیستم وقتی جفت شدگی را در راستای  $XYZ$  را در نظر می گیریم، سیستم بیشترین و پایدارترین میزان درهم تنیدگی را خواهد داشت.

---

<sup>۱</sup>Concurrence

# فصل ۱

## مقدمه ای بر ابرسانایی

### ۱.۱ مقدمه

در این فصل مروری بر نظریه ابرسانایی را ارائه داده و به بیان برخی از مهمترین خواص و ویژگی های مواد ابرسانا می پردازیم. همچنین بعضی از نظریه های ابرسانایی را توضیح می دهیم.

### ۲.۱ نظریه ابرسانایی

مقاومت الکتریکی بسیاری از فلزات و آلیاژها مانند  $Nb, Al, Zn, Hg$ ...، هنگامی که به اندازه ی کافی سرد شوند (معمولاً در درجه حرارتهایی در محدوده ی هلیوم مایع و کمتر از آن) به طور ناگهانی صفر خواهد شد. این پدیده به عنوان مهمترین خاصیت ابرساناها شناخته می شود [۳].

برای اولین بار این پدیده در سال ۱۹۱۱ توسط فیزیکدان هلندی به نام اونز<sup>۱</sup> در عنصر جیوه (اولین ابرسانای کشف شده) و در دمای هلیوم مایع ( $4^{\circ}K$ ) کشف شد [۴]. پس از مطالعات فراوان او دریافت که مقاومت صفر عنصر جیوه در دمای ( $4^{\circ}K$ ) تحت میدانهای مغناطیسی بالا و همچنین با عبور جریان بالا از بین خواهد رفت. در سال ۱۹۱۳ این فیزیکدان به علت تحقیقات ارزنده خود در زمینه ابرسانایی برنده ی جایزه ی نوبل شد.

پس از آن ابرساناهای دیگری نیز کشف شدند که از انواع فلزات، سرامیک ها، آلیاژها و عناصر ترکیبی و تغییر شکل یافته بدست آمده بودند. برخی از عناصر، فقط تحت فشارهای

---

<sup>۱</sup>Heike Kamerling Onnes

بسیار زیاد و دماهای بسیار کم، ابررسانا می شوند که در شکل (شکل ۱-۱) می بینیم. در دمای بحرانی مخصوص  $T_c$  سیستم یک گذار فازی به حالتی خواهد داشت که در آن یک کشش جاذب بین الکترونها منجر به تشکیل یک ذره واحد با بار معادل  $e^* = 2e$  و جرم  $m^* = 2m$  به نام زوج کوپر می شود. اما همه ی عناصر، با فرض ابررسانا شدن، دارای دمای گذار ابررسانایی بسیار کمی می باشند و این مسأله، محدوده ی کاربردهای آنها را در ابتدای اکتشاف، کاهش می داد (اگرچه امروز رسیدن به دماهای بسیار اندک با سادگی بیشتری امکانپذیر شده است). سپس خاصیت ابررسانایی در برخی آلیاژهای فلزی و ترکیبات این عناصر، مانند ترکیبهای فلز  $Nb$  شامل  $NbTi$ ,  $Nb_3Sn$ ,  $Nb_3Ge$  و ... که دمای گذار ابررسانایی نسبتاً بیشتری دارند، کشف شد. مثلاً  $Nb_3Sn$  دارای دمای گذار ابررسانایی ( $18^\circ K$ ) و  $Nb_3Ge$  دارای دمای گذار ابررسانایی ( $23^\circ K$ ) می باشد [۵].

اما در این مواد نیز دمای ابررسانایی هنوز اندک می باشد و سرد کردن این مواد تا این دما، نیاز به تجهیزات سرمایشی پیچیده ای دارد. به همین دلیل، تا مدتی، ابررساناها برای استفاده در مدارات علمی و سیستم های کاربردی، چندان مورد توجه قرار نگرفت. اما در سال ۱۹۸۶، انقلاب بزرگی در علم ابررسانایی صورت پذیرفت. محققین آزمایشگاه تحقیقاتی  $IBM$  در زوریخ، خاصیت ابررسانایی را در ترکیبات غیرفلزی خاصی به نام سرامیک ها کشف کردند. این محققین مشاهده کردند که انواع خاصی از سرامیک ها با وجود اینکه در دماهای عادی رسانای خوبی نمی باشند، اما پس از سرد شدن و کاهش دما، در دماهای اندک، خاصیت ابررسانایی پیدا می کنند. ماده ی سرامیکی که این محققین موفق به ساخت آن شدند،  $LaBaCuO$  بود که دمای ابررسانایی در حدود ( $32^\circ K$ ) داشت و بیشترین دمای ابررسانایی تا آن زمان بود. این امر توجه آزمایشگاه های مختلفی را در سراسر جهان به خود جلب کرد، تا اینکه در فوریه سال ۱۹۸۷، گروه تحقیقات ابررسانایی دانشگاه آلاباما موفق به تولید سرامیکی شدند که در دمای ( $92^\circ K$ ) ابررسانا می شد. این ماده که فرمول شیمیایی آن  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  می باشد، بسیار مورد توجه دانشمندان و به خصوص مهندسان قرار گرفت، زیرا دمای ابررسانایی آن بالاتر از دمای جوش نیتروژن بوده و لذا با استفاده از نیتروژن مایع که بسیار ارزان و فراوان است، قابل سرد شدن می باشد. از آن پس، ابررساناهایی با دمای گذار بالاتر تا حدود ( $138^\circ K$ ) نیز کشف گردید. تحت فشارهای خیلی زیاد، پدیده ی ابررسانایی در موادی مانند  $InSnBa_4Tm_4Cu_6O_{18+}$  در دمای  $150^\circ K$  نیز مشاهده شده است. این سرامیکهای ابررسانا که دمای ابررسانایی زیادی دارند، ابررساناهای دمای بالا ( $HTS$ ) نام

<sup>۱</sup>High Temperature Superconductor

**Superconducting Elements**

■ در فشارهای محدود  
■ در فشارهای بالا  
■ در فشارهای متعادل

1	H																	2	He																				
2	3	Li	4	Be											5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne													
3	11	Na	12	Mg											13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar													
4	19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr			
5	37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe			
6	55	Cs	56	Ba	57	La	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn			
7	87	Fr	88	Ra	89	Ac	104	Rf	105	Ha	106	Sg	107	Bh	108	Hs	109	Mt	110	Ds	111	Rg	112	Uub															
		58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu										
		90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No	103	Lr										

شکل ۱.۱: شرایط بروز خاصیت ابرسانایی در عناصر جدول تناوبی

گرفتند و توجه طیف وسیعی از مهندسان و محققان کاربردی را به خود جلب کردند [۶ و ۷]. علت این امر، خواص بسیار جالب توجه این نوع از ابررساناها بوده که برای استفاده در مدارات کهموجی، نوری، مغناطیسی و ... بسیار مفید و کاربردی می باشد. در جدول ۱-۱، لیست برخی از مهمترین ابررساناهای دمای بالا آورده شده است [۵].

جدول ۱.۱: دمای بحرانی برخی از ابررساناهای دمای بالا

$T_c$	HTS
۳۲K	$(La_{1/85}Ba_{7/15})CuO_4$
۴۰K	$(La_{1/85}Sr_{7/15})CuO_4$
۸۱K	$Y_1Ba_2Cu_4O_8$
۹۲K	$Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$
۹۱ - ۹۲K	$Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$
۸۰K	$Sn_4Ba_4Y_2Cu_4O_x$
۱۰۵K	$Tl_2Ba_2CaCu_2O_{7+}$
۱۱۲K	$TlBa_2Ca_3Cu_4O_{11}$
۱۳۳ - ۱۳۵K	$HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$
۱۵۰K	$InSnBa_4Tm_4Cu_6O_{18+}$

### ۳.۱ نظریه های ابررسانایی

همانطور که گفته شد هنگامی که یک ابررسانا تا زیر دمای بحرانی سرد شود مقاومت آن به طور ناگهانی، صفر می شود. خاصیت مهم دیگر آنها عدم اجازه نفوذ میدان مغناطیسی به درون ماده و دفع آن به اطراف می باشد که این پدیده اصطلاحاً اثر مایسنر<sup>۱</sup> نامیده می شود [۸]. به دنبال کشف پدیده ی ابررسانایی تلاشهای بسیاری برای توصیف این پدیده انجام شد. در سال ۱۹۳۴ یک مدل بسیار ساده توسط لاندن<sup>۲</sup> برای توصیف آن معرفی شد. این

<sup>۱</sup>Meissner effect

<sup>۲</sup>London



مدل اثر مایسنر را توصیف کرده و وجود طول نفوذ  $\lambda$  را پیش بینی می کند ( $\lambda$  طولی است که در این طول میدان مغناطیسی در ابررسانا نفوذ کرده و به صورت نمایی افت می کند تا به صفر برسد). در سال ۱۹۵۰ توسط گینزبورگ<sup>۱</sup> ولانداو<sup>۲</sup>، نظریه گینزبورگ لانداو<sup>۳</sup> بیان شد، که بر پایه ی ویژگیهای ماکروسکوپیکی بسیاری از خواص ابررساناها را توصیف می کند. در سال ۱۹۵۷، الکسی آبریکاسو<sup>۴</sup> با استفاده از نظریه ی گینزبورگ لانداو به مطالعه ی ابررساناها تحت میدان مغناطیسی پرداخت و ابررساناهای نوع یک و نوع دو<sup>۵</sup> را کشف کرد. از خواص مهم ابررساناها می توان به موارد زیر اشاره کرد:

## ۴.۱ مدل گینزبورگ لانداو برای ابررسانایی

زوج های کوپر مانند بوزونها رفتار می کنند. طبق قوانین مکانیک کوانتوم، در شرایط خاص، بوزونها همگی دارای یک حالت کوانتومی می شوند که به این پدیده در اصطلاح چگالش بوز- اینشتین<sup>۶</sup> می گویند که خاصیت ابرشارگی در هلیوم نیز به این خاصیت مربوط می شود. این حالت کوانتومی ماکروسکوپیکی با تابع موج  $\psi$  نمایش داده می شود:

$$\psi = |\psi(\vec{r})| \exp(i\theta(\vec{r})) \quad (1.1)$$

که در آن  $|\psi(\vec{r})|^2$  تعیین کننده چگالی وجود جفت الکترونها در مکان  $r$  می باشد و فاز  $\theta(\vec{r})$  است که تغییرات آن بیانگر جریان ابررسانایی<sup>۷</sup> (جریان زوج های کوپر) است. با نزدیک شدن دو ابررسانا به هم، توابع موج آنها در سد مابین نفوذ کرده و در یکدیگر ادغام می شوند تا سطح انرژی سیستم به مقدار حداقل برسد. در این شرایط جفت الکترونها می توانند بدون اتلاف انرژی از سد بین دو ابررسانا عبور کرده و جابجا گردند. چگالی زوجهای کوپر تابعی از دما بوده و هم الکترونها<sup>۸</sup> عادی و هم زوجهای کوپر (آبرالکترونها<sup>۸</sup>) در کنار یکدیگر

<sup>۱</sup>Vitaly Ginzburg

<sup>۲</sup>Lev Landau

<sup>۳</sup>Ginzburg-Landau

<sup>۴</sup>Alexi Abrikosov

<sup>۵</sup>Type I and Type II superconductors

<sup>۶</sup>Bose- Einstein Condensation (BEC)

<sup>۷</sup>Supercurrent

<sup>۸</sup>Super electrons

وجود دارند که چگالی آنها به صورت زیر با هم رابطه دارد:

$$\frac{n_s}{n} = 1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^\gamma \quad (2.1)$$

که در آن  $n_s$  چگالی ابرالکترونها است که با رابطه ( $n_s = |\psi(x)|^2$ ) بیان می شود، که  $\psi$  چگالی ابرالکترون هاست و  $n$  چگالی کل الکترون هاست و پارامتر  $\gamma$  برای ابررساناهای دمای پایین، حدود ۴ و برای ابررساناهای دمای بالا، تقریباً ۲ می باشد. چگالی جریان الکترونها برابر است با:

$$J = neV \quad (3.1)$$

چگالی ابرجریان از رابطه زیر بدست می آید:

$$J_s = \frac{e^*h}{2im^*}(\psi^* \nabla \psi - \psi \nabla \psi^*) - \frac{e^{*2}}{m^*c}|\psi|^2 A \quad (4.1)$$

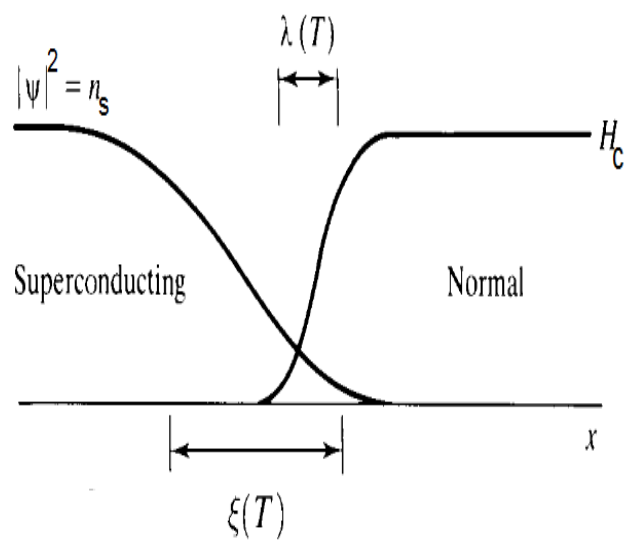
در این رابطه  $A$ ، حالت میانی ابررساناها نامیده می شود، که در شکل (۱-۲) نشان داده شده است:

دو پارامتر مهم دیگر در ابررساناها، عمق نفوذ و طول همدوسی می باشد. **عمق نفوذ**<sup>۱</sup>: همانطور که ذکر شد، میدان مغناطیسی در عمق ابررسانا نفوذ نمی کند. حال اگر یک ابررسانا را در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی قرار دهیم، این میدان به صورت نمایی داخل ابررسانا افت می کند تا به صفر برسد. نرخ افت نمایی میدان مغناطیسی در داخل ابررسانا، عمق نفوذ نامیده شده و با  $\lambda$  نشان داده می شود. بنابر معادلات لاندن عمق نفوذ میدان مغناطیسی فاصله ای از سطح ابررساناست که میدان مغناطیسی در داخل آن به مقدار  $\frac{1}{e}$  روی سطح آن می رسد. به صورت تجربی تعیین شده است که عمق نفوذ در دماهای خیلی پایین تر از دمای گذار ثابت است و با نزدیک شدن به دمای گذار به بی نهایت میل می کند.

**طول همدوسی**<sup>۲</sup>: طول همدوسی ( $\xi$ ) حداقل فاصله ای است که تابع موج ابررسانا ( $\psi$ ) می تواند در آن فاصله به صفر برسد. تعبیر فیزیکی این پارامتر، فاصله بین دو الکترونی است که به هم تزویج شده اند (زوج کوپر) و برای شکستن پیوند بین این دو الکترون، مقداری انرژی لازم است که به اندازه همان گاف ابررسانایی می باشد. پس اگر در کمتر از این فاصله تابع

<sup>۱</sup>Penetration depth

<sup>۲</sup>Coherence length



شکل ۲.۱: حد واسط بین ابررسانایی و نرمال در حالت میانی

موج در دو نقطه صفر باشد، پدیده ابررسانایی بین آن دو نقطه امکان پذیر نیست [۹]. طول همدوسی فاصله ای است، که در آن  $(\psi = 0)$  می شود و می توان آن را برای حالت حدی فاز تابع موج نسبت داد. برای ابررساناهای خالص (محض) مقدار عددی طول همدوسی  $(A \approx 3000 \text{ \AA})$  و مقدار عددی عمق نفوذ  $(\lambda \approx 500 \text{ \AA})$  است.

## ۵.۱ ابررسانای نوع اول

ابررساناهایی که در دمای مشخصه خاص به نام دمای گذار ابررسانایی به یک دیامغناطیس کامل تبدیل می شوند و شار مغناطیسی را به طور کامل طرد می کنند به ابررسانای نوع اول معروفند. بیشتر ابررساناهایی که عنصر ساده هستند به جز ثوبیوم، وانادیوم و نانولوله های کربنی، ابررسانای نوع  $I$  هستند. این نوع ابررساناها دمای گذار نسبتا پایینی دارند. مکانیزم ابررسانش در این ابررساناها با نظریه  $BCS$  قابل توجیه است. از ویژگی های این نوع ابررساناها طول همدوسی بزرگ و عمق نفوذ کوچک است.

در ابررساناهای نوع اول اگر میدان مغناطیسی از یک حد آستانه  $(H_c)$  بیشتر شود، ابررسانایی ناگهان از بین می رود. بسته به شکل هندسی نمونه، ممکن است حالت های میانی ای هم ایجاد شوند که در آن ناحیه های عادی (که در آن ها میدان وجود دارد) و ناحیه های ابررسانا (که میدان درونشان صفر است) هم زمان وجود داشته باشند. یک میدان خارجی بحرانی ترمودینامیکی وجود دارد که ابررسانایی را در این نوع ابررساناها از بین می برد.

$$H_c = H_0 \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (5.1)$$

شکل (۱-۳) نمودار  $H$  بر حسب دما در ابررسانای نوع اول را مشاهده می کنیم.

## ۶.۱ ابررسانای نوع دوم

این نوع ابررساناها دمای گذار بالاتری دارند. برخی از آلیاژها و ترکیباتی از فلزات و اکسید مس در این گروه قرار می گیرند. در این ابررساناها می توان دو میدان مشخصه تعریف کرد. به ازای میدان های خارجی کمتر از  $H_{c1}$  ابررسانا دیامغناطیس کامل است و هیچ شاری وارد نمونه نمی شود ولی در میدان های بالاتر از  $H_{c2}$  به حالت عادی می روند. شکل (۱-۴) نمودار  $H$  بر حسب دما در ابررسانای نوع دوم را مشاهده می کنیم.

باید توجه داشت در فاصله بین  $H_{c1}$  و  $H_{c2}$  شار مغناطیسی وارد نمونه ابررسانا می شود. به