



سرمقاله

میراث چهار دهه ابرسانایی کوپرات‌ها

در سال ۱۹۸۳، یوهانس بدنورتس^۱ و کارل مولر جست‌وجوی خود را برای یافتن ابرسانایی خارج از ترکیبات بین‌فلزی سنتی مانند نیوبوم-قلع آغاز کردند. پژوهش‌های دهه ۱۹۷۰ پیش‌تر پتانسیل اکسیدهای فلزی مانند تیتانات استرانسیوم را نشان داده بودند.

اما نخستین تلاش‌های آنان با اکسیدهای فلزی موفقیت‌آمیز نبود. اکسید نیکل لانتانوم نتیجه چشم‌گیری نداشت و جایگزینی یون لانتانوم با یون ایتیریم نیز کمکی نکرد.

اتفاق مهم زمانی فرا رسید که آن‌ها تجهیزات بهتری تهیه کردند و به‌جای نیکل از مس استفاده کردند. در اواخر سال ۱۹۸۵، بدنورتس و مولر کار روی اکسید مس لانتانوم-باریم (LBCO) را آغاز کردند و سرانجام آن‌ها در فوریه ۱۹۸۶، دمای بحرانی ۳۵ کلون را در LBCO مشاهده کردند.

برای اطمینان از نتایج، آن‌ها ساختار بلوری نمونه‌ها را با پراش پرتو ایکس بررسی کردند و کاهش شدید مقاومت الکتریکی را تأیید نمودند. اما نتوانستند آزمون کلیدی مشاهده اثر مایسنر-اوخسنفلد را انجام دهند؛ پدیده‌ای که در آن ابرسانا میدان مغناطیسی را از خود بیرون می‌راند. با وجود این، مقاله خود را در آوریل ارسال کردند و به‌دلیل تردیدهای موجود، مجبور شدند سردبیر مجله Zeitschrift für Physik B را برای پذیرش مقاله متقاعد کنند.

اندکی بعد، در همان سال، تجهیزات آزمایشگاهی پیشرفته‌تری در اختیار آنان قرار گرفت و توانستند اندازه‌گیری‌های مغناطیسی انجام دهند که شواهد قانع‌کننده‌تری از ابرسانایی واقعی ترکیب LBCO فراهم کرد. افزون بر این، جایگزینی لانتانوم با

در فوریه ۱۹۸۶، یوهانس بدنورتس^۱ و کارل مولر^۲ کشفی شگفت‌انگیز انجام دادند: ابرسانایی در دمای ۳۵ کلون در یک اکسید مس آلاییده کوپرات. بی‌تردید این کشف مسیر فیزیک ماده چگال را تغییر داد. آنان در آوریل ۱۹۸۶ نتایج خود را منتشر کردند و تنها نوزده ماه بعد موفق به دریافت جایزه نوبل فیزیک شدند؛ کوتاه‌ترین فاصله زمانی میان یک کشف علمی و دریافت جایزه نوبل در تاریخ.

روند تحول این حوزه در چهل سال گذشته، چه از جنبه‌های موفق و چه ناکام، نمونه‌ای گویا از شیوه پیشرفت علم است: کشف‌های تصادفی، هیجان درباره کاربردهای فناورانه، دستاوردهای جانبی غیرمنتظره، پرسش‌های بنیادین، شکل‌گیری مفاهیم نو، وحدت میان شاخه‌های مختلف و پیشرفت‌های تدریجی.

به‌طور معمول، حتی بهترین رسانای الکتریکی نیز در برابر بخشی از جریان الکتریکی مقاومت می‌کند و همین امر باعث اتلاف انرژی می‌شود. اما ابرساناهایی که در سال ۱۹۱۱ کشف شدند، مقاومت الکتریکی صفر دارند و نویدبخش بازدهی بی‌نظیری هستند.

با این حال، پیش از کشف بدنورتس و مولر، پژوهش در زمینه ابرسانایی به مرحله‌ای تقریباً ایستا رسیده بود. نظریه^۳ BCS که در سال ۱۹۵۷ ارائه شد، به‌نظر می‌رسید توصیفی جامع برای ابرسانایی فراهم می‌دهد. از نظر تجربی نیز رکورد دمای ابرسانایی که از سال ۱۹۷۳ برابر با ۲۳٫۳ کلون (حدود ۲۴۹٫۹- درجه سانتی‌گراد) بود، تا سال‌ها بدون تغییر باقی ماند.

بود.

۱. Johannes Georg Bednorz

۲. Karl Alexander Müller

۳. Bardeen, Cooper, Schrieffer (BCS)

استرانسیوم دمای بحرانی این ماده را به حدود ۴۰ کلوین افزایش داد.

چند گروه پژوهشی به سرعت تلاش کردند نتایج بدورتس و مولر را تکرار کنند؛ از جمله گروه شوجی تاناکا در ژاپن، گروه پل چو و گروهی در آزمایشگاه‌های بل. گروه تاناکا نخستین گروهی بود که نتایج را تأیید کرد. سپس، چو و همکارانش تأیید کردند که LBCO در ۴۰ کلوین ابرساناست و با اعمال فشار حتی می‌تواند به دماهای بالاتری برسد. آن‌ها نوساناتی تا حدود ۱۰۰ کلوین مشاهده کردند، اما هیچ حالت پایداری پیدا نشد تا زمانی که لانتانوم را با ایتیم جایگزین کردند.

کشف دیگری، زمینه‌ساز رویدادی مهم شد. در سال ۱۹۸۷، همکاران چو در دانشگاه آلاباما در هانتسویل^۱ موفق به ساخت اکسید مس ایتیم-باریم (YBCO) شدند. این ماده در دمای ۹۲ کلوین ابرسانا بود؛ دمایی آن‌قدر بالا که تنها با نیتروژن مایع می‌شد آن را سرد کرد.

در سال ۱۹۸۷، رسانه‌ها از ابرسانایی دمای بالا به‌عنوان انقلابی در فناوری یاد می‌کردند. بسیاری تصور می‌کردند که این مواد به‌زودی در انتقال برق، الکترونیک و تجهیزات پزشکی کاربرد گسترده خواهند یافت. اما بخش بزرگی از این امیدها تحقق نیافت. امروزه تنها چند کاربرد محدود برای کوپرات‌ها وجود دارد. یکی از دلایل اصلی این موضوع آن است که کوپرات‌ها سرمایی هستند و ساخت سیم از آن‌ها دشوار است. این مسئله نمونه‌ای روشن از فاصله میان پژوهش‌های آزمایشگاهی و فناوری‌های تجاری است.

کشف ابرسانایی مبتنی بر آهن، تجدید علاقه به کالکونیدهای لایه‌ای در ارتباط با ابرسانایی دوبعدی، و به‌ویژه جست‌وجوی فرمیون‌های مایورانا در گردابه‌های ابرساناهای موج-پی افق‌های تازه‌ای را پیش روی پژوهشگران گشود و به‌طور طبیعی روندهای تازه‌ای را در زمینه ابرسانایی نامتعارف و قابلیت‌های الکترونیکی ناشی از برهم‌کنش‌های پیچیده در مواد کوانتومی به وجود آورد.

در نهایت، در جولای ۲۰۱۸، ابرسانایی توپولوژیکی به‌عنوان یکی از موضوعات اصلی در فیزیک ماده چگال مطرح شد.

تقاطع ابرسانایی دمای بالا و ابرسانایی توپولوژیکی، امروزه یکی از فعال‌ترین و هیجان‌انگیزترین حوزه‌های پژوهشی در فیزیک ماده چگال به شمار می‌رود. پیوند این دو پدیده می‌تواند انقلابی در رایانش کوانتومی مقیاس‌پذیر ایجاد کند؛ زیرا امکان ساخت کیوبیت‌های مقاوم در برابر خطا و محافظت‌شده از طریق توپولوژی را فراهم می‌آورد.

ابرسانایی توپولوژیکی یک فاز غیرعادی از ماده است که در آن ویژگی‌های توپولوژیکی غیر بدیهی درون شکاف انرژی ابرسانایی ظاهر می‌شوند. مهم‌ترین مشخصه این فازها، حالت‌های مرزی ویژه‌ای به نام مدهای صفر مایورانا^۲ است.

از آن‌جا که این حالت‌های مایورانا ماهیتی غیرموضعی دارند، اطلاعات کوانتومی ذخیره‌شده در آن‌ها در برابر نوفه‌های محیطی محلی مقاوم است؛ ویژگی‌ای که آن‌ها را برای محاسبات کوانتومی بسیار ارزشمند می‌سازد.

ابرساناهای توپولوژیکی متعارف معمولاً به دماهای بسیار پایین، نزدیک به صفر مطلق، و همچنین ساختارهای آزمایشگاهی پیچیده و حساس نیاز دارند. اگر بتوان حالت‌های توپولوژیکی را در دماهای بالاتر و مقیاس‌های انرژی بزرگ‌تر ایجاد کرد، رایانه‌های کوانتومی بسیار پایدارتر خواهند شد و نیاز به سامانه‌های سرمایشی گران‌قیمت و پیچیده نیز به‌طور چشم‌گیری کاهش خواهد یافت.

پژوهشگران مسیرهای مختلفی را برای ترکیب ابرسانایی قوی مواد دمای بالا با ساختارهای نواری توپولوژیکی دنبال می‌کنند. مطالعات نظری نشان داده‌اند که با چرخاندن دو لایه از ابرساناهای اکسید مس دمای بالا، مانند $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ در زوایای مشخص، می‌توان فازهای توپولوژیکی کاملاً شکاف‌دار ایجاد کرد که دارای مدهای لبه‌ای مایورانای دست‌سان هستند. پیش‌بینی می‌شود این حالت‌ها در نزدیکی دمای بحرانی ماده، یعنی حدود ۹۰ کلوین فعال باشند؛ دمایی که به‌مراتب بسیار بالاتر از بسیاری از سامانه‌های توپولوژیکی شناخته‌شده است.

برخی از مواد مبتنی بر آهن، مانند FeSe، به‌طور طبیعی هم دارای دمای بحرانی نسبتاً بالایی (بیش از ۴۰ کلوین) دارند و

۱. University of Alabama in Huntsville

۲. Majorana Zero Modes

با این حال، هنوز حالت‌هایی مانند شبه‌گاف و فلز عجیب به‌طور کامل درک نشده‌اند. کشف کوپرات‌ها جامعه‌های پراکنده پژوهشی را به یک حوزه بزرگ و پویا تبدیل کرد. پژوهشگران دریافتند که میان اکسیدهای فلزات واسطه، فرمیون‌های سنگین، ابررساناهای آلی و دیگر سامانه‌های کوانتومی شباهت‌های عمیقی وجود دارد.

پس از آن، مواد جدیدی مانند روتنات استرانسیوم، گرافن دولایه پیچ‌خورده و پنیکتیدهای آهن کشف شدند که همگی نشان دادند ابررسانایی می‌تواند در نزدیکی حالت عایق مات ظاهر شود.

مطالعه کوپرات‌ها باعث پیشرفت چشم‌گیر در مفاهیمی مانند مایعات اسپینی، فلزات غیر فرمی، بحرانیّت کوانتومی و مفهوم برآمدگی شد. همچنین روش‌های عددی مانند DMRG، DMFT و مونت کارلوی کوانتومی توسعه یافتند.

از نظر تجربی نیز ابزارهایی مانند ARPES، STM و پراکندگی غیرکشسان نوترون پیشرفت فراوانی کردند. علاوه بر این، کیفیت رشد تک‌بلورها به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. با این حال، امروزه پژوهش مستقیم روی کوپرات‌ها نسبت به گذشته کمتر شده است. یکی از دلایل اصلی این موضوع، تغییر اولویت‌های پژوهشی و تمرکز جامعه علمی بر مواد جدیدتر با ویژگی‌های فیزیکی متفاوت و جذاب‌تر است.

هدف نهایی ابررسانایی دمای بالا دستیابی به ماده‌ای است که بتواند در دما و فشار محیط، بدون هیچ مقاومت الکتریکی جریان را هدایت کرده و میدان‌های مغناطیسی را از خود دفع کند. اما این هدف هنوز محقق نشده است؛ زیرا ناپایداری شدید مواد، محدودیت‌های بنیادی فیزیکی و چالش‌های پیچیده ساخت و تولید همچنان موانع اصلی هستند.

اگرچه موادی کشف شده‌اند که در دمای اتاق (حدود ۱۵ درجه سانتی‌گراد) رفتار ابررسانایی از خود نشان می‌دهند، اما این ویژگی تنها تحت فشارهایی در حدود ۲۶۷ گیگاپاسکال ظاهر می‌شود؛ فشاری که بیش از ۲/۶ میلیون برابر فشار جو زمین است. این مواد باید در سلول‌های الماسی سندان^۱

هم حالت‌های سطحی توپولوژیکی را نشان می‌دهند. مطالعات نظری و تجربی بیان می‌کنند که تقارن‌های خاص جفت‌شدگی چندنواره‌ای در این مواد می‌تواند به‌صورت طبیعی فازهای ابررسانایی توپولوژیکی را ایجاد کند.

یکی از رایج‌ترین روش‌های آزمایشگاهی، قرار دادن یک ابررسانای دمای بالا در تماس مستقیم با یک عایق توپولوژیکی است. از شناخته‌شده‌ترین این عایق‌ها می‌توان به Bi_2Se_3 و Bi_2Te_3 اشاره کرد. در این روش، ابررسانایی از طریق اثر مجاورت به حالت‌های سطحی توپولوژیکی منتقل می‌شود. در برخی سامانه‌ها این پدیده در دماهایی تا حدود ۸۰ کلون نیز مشاهده شده است و امکان مطالعه فیزیک مایورانا را در شرایط بسیار قابل‌دسترس‌تر فراهم می‌کند.

علم مواد محاسباتی و روش‌های غربالگری پرسرعت^۱ امروزه نقش مهمی در پیش‌بینی مواد جدید ایفا می‌کنند. یکی از نمونه‌های امیدوارکننده، بوروفن‌های آلایش‌یافته با فلزات^۲ هستند که ممکن است بتوانند به‌عنوان ابررساناهای توپولوژیکی ذاتی با دمای بحرانی بالا و چندشکافی عمل کنند.

تمام این تحولات نشان می‌دهد که پژوهش در فیزیک ماده چگال طی چهل سال گذشته تا چه اندازه پیشرفت کرده است؛ پیشرفتی که با کشف تاریخی و سرنوشت‌ساز ابررسانایی دمای بالا در کوپرات‌ها شتاب گرفت.

امروزه بسیاری از جنبه‌های اصلی کوپرات‌ها شناخته شده‌اند. نظریه گینزبرگ-لاندائو رفتار ماکروسکوپی حالت ابررسانای با تقارن موج (d) را به‌خوبی توصیف می‌کند، و این نظریه همراه با پارامتر نظم، چارچوبی کارآمد برای توصیف گذار و خواص فاز ابررسانایی فراهم می‌آورد.

بسیاری از فیزیک‌دانان معتقدند که فیزیک اصلی این مواد را می‌توان با الگوی هابارد تک‌باندی توصیف کرد. عناصر کلیدی این فیزیک شامل هم‌بستگی شدید الکترونی، عایق مات پادرومغناطیسی آلاییده و جفت‌شدن موج-دی ناشی از نوسانات اسپینی است.

۱. High-Throughput Screening

۲. Metal-Doped Borophenes

۱. Diamond Anvil Cells

چهل سال پس از کشف ابرسانایی در کوپرات‌ها، این مواد همچنان یکی از مهم‌ترین و اسرارآمیزترین سامانه‌های فیزیک ماده چگال به‌شمار می‌روند. اگرچه بسیاری از امیدهای صنعتی اولیه تحقق نیافت، اما تأثیر عمیق آن‌ها بر نظریه، آزمایش و روش‌های محاسباتی انکارناپذیر است. کوپرات‌ها نقطه عطفی در تاریخ فیزیک جدید بودند و همچنان الهام‌بخش پژوهش‌های جدید هستند.

رضا عسگری

سردبیر مجله

دوم خرداد ۱۴۰۵

تولید و نگهداری شوند که بسیار ناپایدار و محدود هستند. بنابراین، استفاده عملی و گسترده از چنین مواد ابرسانایی در حال حاضر غیرممکن است.

در ابرساناهای متعارف، جفت‌شدن الکترون‌ها توسط ارتعاشات شبکه بلوری (فونون‌ها) ایجاد می‌شود. با این حال، اگر این برهم‌کنش بیش از حد قوی شود، الکترون‌ها شبکه بلوری را نیز با خود همراه می‌کنند و در نتیجه به ذراتی سنگین و کند تبدیل می‌شوند که کارایی لازم برای انتقال جریان الکتریکی را ندارند.

از سوی دیگر، هنوز یک نظریه جامع و جهان‌شمول برای ابرساناهای دمای بالا وجود ندارد. موادی مانند کوپرات‌ها از قوانین ساده ابرساناهای متعارف پیروی نمی‌کنند و همین موضوع طراحی و مهندسی ساختارهای بهینه را از دیدگاه نظری و محاسباتی بسیار دشوار کرده است.

کاربردی‌ترین ابرساناهای دمای بالای موجود، مانند YBCO (اکسید ایتیم-باریم-مس)، از جنس سرامیک هستند. این مواد بسیار ترد و شکننده‌اند و تبدیل آن‌ها به سیم‌ها یا کلاف‌های انعطاف‌پذیر، که برای کاربردهایی نظیر شبکه‌های انتقال برق و توربین‌های بادی ضروری هستند، دشوار است. این سرامیک‌ها معمولاً نواحی ابرسانای بزرگ و پیوسته تشکیل نمی‌دهند، بلکه از مجموعه‌ای از ریزدامنه‌ها^۱ تشکیل شده‌اند که مسیر جریان الکتریکی را مختل می‌کنند و عملکرد ابرسانایی را کاهش می‌دهند.

حتی زمانی که ماده‌ای دارای دمای بحرانی بالایی باشد، ممکن است چگالی جفت‌های ابرسانا (تعداد الکترون‌های شرکت‌کننده در حالت ابرسانایی) کافی نباشد. در دماهای بالاتر، انرژی گرمایی شدید باعث نوسان فاز تابع موج ابرسانایی می‌شود. این نوسانات می‌توانند به محض اعمال یک میدان مغناطیسی یا جریان الکتریکی قابل توجه، حالت بدون مقاومت را از بین ببرند.

جمع‌بندی