فلزات عجیب قوانین فیـــزیک را دور می‌زنند!

رفتار کوانتومی الکترون‌ها

تفـاوت فازهـای مختلف ماده ناشـی از رفتار جمعـی الکترون‌ها و ویژگی‌های آن‌ها اسـت. اگر حرکت اتم‌هـا در جامدات، مایعات و گازها با مکانیک کلاسـیک قابل توصیف باشد، رفتار الکترون‌ها منحصراً کوانتومی اسـت. الکترونی که به هسـته متصل باشد تحت عنوان یک موج توصیف می‌شـود و چندین ویژگی دارد؛ ازجمله انرژی و اسـپین. اسپین به الکترون خاصیت مغناطیسی می‌دهد و در نتیجه الکترون مانند یک آهنربای کوچک رفتار می‌کند. اسپین در دو حالت اولیه اسپین بالا و اسپین پایین وجود دارد.

قانون اصلی که بر الکترون‌ها، اتم‌ها و تمامی ذرات ماده بانام فرمیون حاکـم اسـت اصل «طـرد پائولی» نام دارد. طبق این اصـل، دو الکترون نمی‌توانند حالت کوانتومی یکسـانی را اشغال کنند. در یک اتم، الکترون‌ها ابتـدا حالت‌هـای با کمترین انرژی را به خود می‌گیرند سـپس حالت‌هایی بالنـرژی بالاتر را پر می‌کنند؛ درسـت مانند لیوانـی که آب در آن از پایین به بالا پر می‌شود.

در تکه‌ای فلز با ۱۰۲۳ الکترون نیز همین اتفاق می‌افتد. الکترون‌هایی که کمتر به هسـته اولیه متصل هسـتند حالت‌هایی را اشغال می‌کنند که در تمامی بلور گسـتردگی دارند. این حالت‌ها مانند امواج سینوسـی هستند که طول آن‌ها با انرژی الکترون‌ها ارتباط مسـتقیم دارد. بر اسـاس اصل طرد پائولـی، الکترون‌ها حالت‌هایی با کمترین میزان انرژی را به خود می‌گیرند و مجموع آن‌ها با هم تمامی حالت‌ها را تا حالتی باانرژی به‌مراتب کمتر در آستانه مشخصی اشغال می‌کنند که انرژی فرمی است.

فلزات به‌طور کلی دارای ویژگی‌هایی نظیر رسانایی الکتریکی بالا، رسانایی گرمایی بالا و چگالی بالا هستند. می‌دانیم که فلزات رسانای خوبی هستند؛ یعنی جریان الکتریکی را به‌خوبی هدایت و منتقل می‌کنند. ازاین‌رو برای ساخت و تولید وسایل الکتریکی و نیز انتقال الکتریسـیته در یک مسـافت طولانی بدون از دست رفتن مقدار زیادی انرژی بسیار ارزشمند هستند.

در فلـزات معمولـی، الکترون‌هـای خاصی کـه به آن‌ها الکترون‌های ظرفیت گفته می‌شـود آزادانـه درون ماده جریان می‌یابنـد و زمانی کـه یک میدان الکتریکـی آن‌ها را به پیش می‌رانـد، بار الکتریکی منفـی خود را حمل می‌کنند. این حرکت همان جریان الکتریکی اسـت. الکترون یک ذره زیراتمی اسـت که در سال ۱۸۹۷ کشف شد؛ یعنی زمانی که فیزیکدان‌ها شروع کردنـد ویژگی‌هـای آماری ذرات در تعداد زیاد را تعیین و تعریف کنند. اکنون با گذشـت چند قرن، فیزیکدان‌ها شـناخت خوبی از فلزات و ویژگی‌های الکترون‌ها دارند. ظاهر براق فلزات و خنکی که هنگام لمس آن‌ها احساس می‌کنیم دو ویژگی هر فلز هستند که هر دو نتیجه حرکت و برهم‌کنش الکترون‌ها ایجاد می‌شوند. به‌عنوان مثال، درخشـش یک فلز ناشـی از قابلیت آن در هدایت الکتریسـیته حتی در فرکانس‌های بسـیار بالای نور مرئی است. حس سـردی که فلز به دسـت ما می‌دهد نیز ناشی از قابلیت آن در انتقال گرما اسـت که حتی بهتر از مواد عایقی مثل شیشـه یا چوب عمل می‌کند.

تاکنون دانشمندان مطالعات زیادی روی فلزات و نحوه رفتار الکترون‌ها در عبور از آن‌ها انجام داده‌اند و به نتایج سـودمندی رسـیده‌اند که به پیشـرفت فناوری‌ها کمک زیادی کرده‌اند اما دنیای مواد دارای ناشـناخته‌های زیادی است و هنوز هم خواص تازه‌ای از آن‌ها کشـف می‌شـوند. در مورد فلزات، دانشـمندان به‌تازگی به کشـف دیگری رسـیده‌اند و آن این است که فلزاتی به نام فلزات عجیب، رفتارهای الکترونیکی سـردرگم‌کننده‌ای از خود نشان می‌دهند.

چنیـن به نظر می‌رسـد که در فلـزات عجیب، الکترون‌ها هویت منفرد و جداگانه خود را از دسـت می‌دهند و مانند سـوپی رفتـار می‌کنند که در آن همه ذرات بـا درهم‌تنیدگی کوانتومی به‌هم متصل شـده‌اند. حتی عملکرد فیزیکی این الکترون‌ها که برهم‌کنش شدیدی با یکدیگر دارند می‌تواند بازتابی از چگونگی برخی از عملکردهای ذرات در افق سیاهچاله‌ها باشد. فیزیکدان‌ها امیدوارنـد که بامطالعه این موارد همه فلزات و پدیده‌های که در مواد جامد رخ می‌دهند را بهتر بشناسند.

رسـاناها، ابررسـاناها و عایق‌ها هر کدام با فازهای مختلف ماده مطابقت دارند. در هر کدام از این‌ها، گروه الکترونی شـکل متفاوتی به خود می‌گیرد. طی دو دهه‌ی اخیر، فیزیکدان‌ها بازهم فازهای الکترونی بیشـتری را در مواد جامد کشف کرده‌اند. یک مثال بسیار جالب‌توجه همین فلزات عجیب هستند و ویژگی بارز آن‌ها این است که در مقایسه با فلزات معمولی مقاومت الکتریکی آن‌ها متناسب با دما تغییر می‌کند.

نخستین تلاش‌ها در اِعمال قوانین فیزیک بر نحوه عملکرد مواد جامد از این اصل آغاز شـد که الکترون‌های یک فلز مانند مولکول‌های گاز رفتار می‌کنند. اما در اواخر دهه‌ی ۱۹۲۰ نخستین انقلاب کوانتومی رخ داد و ثابت شد که الکترون‌ها نیز مانند همه ذرات کوانتومی دارای خواص موجی هستند.

حـدود هفتاد سـال پیش، فیزیکـدان روس «لِو لاندو» و همکاران او نظریه مایع فِرمی را طی مطالعات خود برای شناخت بهتر برهم‌کنش بین الکترون‌ها در فلزات ارائه دادند. مایع فِرمی یک حالت کوانتومی ماده اسـت که در بیشـتر فلزات کریستالی در دمای پایین دیده شـده اسـت. مایع فِرمی دارای «فرمیون» اسـت؛ ذره‌ای کـه نام آن از نـام «انریکو فرمـی»، فیزیکدان ایتالیایی ـ آمریکایی گرفته شده‌اسـت. فرمیون‌ها ذراتی شـامل همـه کوارک‌ها، لپتون‌ها و ذرات مرکبی مثل باریون‌ها، اتم‌ها و هسـته‌های اتمی هسـتند. به‌طور کلی هرذره‌ای که از اصل طرد پائولی پیروی می‌کند یک فرمیون است. بنابراین فرمیون می‌تواند یـک ذره بنیادی مثل الکترون یا یـک ذره مرکب مثل پروتون باشد. طبق اصل طرد پائولی، یک فرمیون در یک‌لحظه می‌تواند یک حالت کوانتومی خاص را داشـته باشد. به‌عبارتی دیگر، اصل پائولـی بیان می‌کنـد که هیچ دو الکترونی یا به‌طور کلی هیچ دو فرمیون مشابهی نمی‌توانند حالت کوانتومی یکسانی داشته‌باشند.

مایـع فرمی دارای ویژگی‌هـای ترمودینامیک، مغناطیس و رسـانایی الکتریکـی اسـت. الکترون‌هایی کـه در یک مایع فِرمـی برهم‌کنش دارند، شـبه ذره را به وجـود می‌آورند؛ حالت برانگیخته‌ای که تمامی ویژگی‌های یک ذره مانند بار، اسـپین، تکانه و انرژی را دارد با این تفاوت که فقط زمانی به وجود می‌آید که در یک سـامانه بزرگ‌تر ادغام شود. درواقع، شبه ذرات نتیجه برهم‌نش الکترون‌ها هسـتند. برای درک بهتر شبه ذره، فردی را تجسـم کنیم که در یک اتاق شـلوغ تلاش می‌کند راه خود را باز کند. طبیعی اسـت که سـرعت حرکت او قابل‌مقایسه با سرعت او هنگام حرکت در یک اتاق خالی نیسـت؛ چون حرکتش تحت تأثیر وجود افراد دیگر در اتاق و برخورد با آن‌ها قرار گرفته است، افرادی که به‌نوبه خود باید جابه‌جا شوند تا این فرد بتواند عبور کند.

فیزیکدان‌هـا با مشـاهده اَعمالی کـه الکترون‌ها به‌طور دسـته‌جمعی به‌عنوان شـبه‌ذرات انجام می‌دهند پیش‌بینی‌های قابل آزمایشـی را انجام داده‌اند که بارها در آزمایش روی فلزاتی ماننـد طلا، نقره، مس و آلومینیوم تأیید شده‌اسـت. برای مثال، مقاومـت الکتریکـی یک مایـع فرمی در دمـای پایین باید به نسـبت مجذور دما متفاوت باشد و آزمایش‌ها نشان می‌دهند که همین‌طور است.

در سـال‌های اخیر فیزیکدان‌ها بیش از دهها ماده را کشف کرده‌اند که به‌وضوح فلز هستند؛ یعنی مقاومت الکتریکی آن‌ها با دما کاهش می‌یابد اما مایعات فِرمی نیستند. این مواد همان فلزات عجیب هسـتند. در این فلـزات عجیب، مقاومت به‌طور خطی با دما تغییر می‌کند نه متناسب با مجذور دما. ازجمله موادی که این ویژگی را دارند اکسـید مس، ابررسـاناهای ساخته شده با اکسید مس و آهن هستند. بعضی از مواد متشکل از فرمیون‌های سنگین و لایه‌های دوگانه گرافن هستند. بیشتر آن‌ها در آزمایشگاه تحت آزمایش‌هایی قرار می‌گیرند که روی مواد و فلزات شـناخته شده انجام می‌شـوند تا نزدیک به دو فاز ماده باشـند، به‌عنوان مثال، بین یک ابررسانا و یک فلز یا بین حالت‌های مغناطیسی مختلف.

ایـن فلزات عجیب در نگاه نخسـت چنـدان قابل‌توجه به نظر نمی‌رسـند. اگرچه بیشـتر از این که نرم و چکش خور باشند سـخت و شکننده هسـتند اما عجیب بودن آن‌ها در دمای اتاق نمایـان نمی‌شـود چون انرژی گرمایی آثـار کوانتومی را از بین می‌برد. بسـیاری از فلزات تا وقتی که به نقطه کوانتومی بحرانی به‌خصوصی نزدیک نشـوند ازلحاظ دما، فشـار و سایر پارامترها فلزاتـی کامـلاً معمولی به‌نظر می‌رسـند. در این نقطه بحرانی، زمانی که به صفر مطلق نزدیک می‌شوند، از یک فاز عادی عبور کـرده و بـه فاز دیگر می‌روند؛ برای مثال، دو فاز فلزی معمولی با خواص مغناطیسـی متفاوت. اما وقتی در معرض دماهای بالاتر و انرژی‌های بیشـتری قرار می‌گیرنـد، به فلزات عجیب تبدیل می‌شوند.

وابسـتگی فلـزات عجیب به تغییرات دمـا وقتی درجه آن پایین اسـت ممکن اسـت ناچیز و بی‌اهمیت به نظر برسـد اما برعکـس ایـن تغییر با اهمیت بوده و به معنای شکسـت نظریه مایع فِرمی و به عقیده برخی از دانشـمندان، فروپاشـی تصویر شـبه‌ذراتِ الکترون‌های برانگیخته اسـت. در غیاب شبه‌ذرات، گویی الکترون‌ها فردیت خود را از دست می‌دهند و در قالب یک مجموعه مانند اجزای یک سوپ با هم تعامل قوی برقرار می‌کنند که در آن همه ذرات به‌شدت درهم‌پیچیده هستند. درهم‌تنیدگی نوعی اتصال کوانتومی است؛ پیوندی که سبب می‌شود سرنوشت ذرات به‌هم تنیده شـود. زمانی که الکترون‌های فلزات به‌شـدت درهم تنیده می‌شوند رفتار جمعی آن‌ها تغییر می‌کند.

مقیاس زمانی که در آن الکترون‌ها میزان حرکت در بسیاری از فلزات عجیب را توزیع می‌کنند پلانکی اسـت؛ بدین معنی که مکانیک کوانتومی و دما حاکم بر آن هسـتند و این دو از طریق ثابـت پلانک ایـن مقیاس زمانی را تعیین می‌کنند. ثابت پلانک یک ثابت طبیعی در فیزیک اسـت که انرژی فوتون را به بسـامد آن مرتبـط می‌کند. این ثابت را فیزیکدان آلمانی کشـف کرد و بـه دلیل مطالعاتـش درزمینه نظریه کوانتوم جایزه نوبل دریافت کرد. این ویژگی که در تمامی فلزات عجیب دیده می‌شـود و نیز این واقعیت که خاصیت فلزیت عجیب در بسـیاری از مواد ظاهر می‌شـود نشان می‌دهد که یک اصل سازماندهی‌کننده عمیق‌تر در فلـزات عجیـب مداخله می‌کند. برخی از مدل‌های نظری که برای توصیف پدیده‌های فلزات عجیب ارائه شـده‌اند حتی رفتار الکترون‌ها را به فیزیک افق رویداد در اطراف سـیاهچاله‌ها ربط می‌دهند. تجربه‌گرایـان بـا الهام گرفتن از ایـن دیدگاه از خود می‌پرسـند چگونه می‌توانند بفهمند آیا الکترون‌ها در همکاری با یکدیگر مانند اجزاء یک سوپ کوانتومی عمل می‌کنند یا به‌عنوان شـبه‌ذرات الکترونیکی رفتاری تقریباً مستقل دارند؟ همچنین با توجه به این که همه الکترون‌ها برایشـان قابل‌مشـاهده نیستند، چگونـه با ابزارهای محدودی می‌توانند به‌طور تجربی مدل‌های مختلف را ازهم تشخیص دهند؟

چهار رویکرد تجربی برای پاسـخ به این پرسـش‌ها وجود دارند. رویکرد نخسـت شامل استفاده از پرتو الکترونی به‌منظور تأمین مقادیر دقیق انرژی و حرکت برای الکترون‌های فلز است. به این فرایند طیف‌نگاری اتلاف انرژی الکترون گفته می‌شـود. فیزیکدان‌ها با تعیین چگونگی جذب انرژی و حرکت توسط کل سیسـتم الکترون‌ها می‌توانند نقش شـبه‌ذرات معمولی و سوپ کوانتومی جمعی را از هم تشخیص دهند.

رویکـرد یا تکنیک دوم مبتنی بر روش‌های بسـیار دقیقی اسـت که به‌تازگی برای مطالعه نحوه گردش جریان داخل مواد ابـداع شده‌اسـت. در این رویکرد، فیزیکدان‌ها از حسـگرهای میدان مغناطیسـی فوق‌العاده حسـاس استفاده می‌کنند. یکی از این حسگرها یک حلقه ابررسانای کوچک است که ولتاژی دقیقاً مرتبط با مقدار میدان مغناطیسی جریان‌یافته از درون حلقه تولید می‌کند. حسـگر دیگری از یک کریسـتال الماس دارای نقص سـاخته شده‌اسـت. این نقص به‌خصوص ناشی از نبود یک اتم کربن اسـت که جالـی خالی ایناتم را یک اتم نیتروژن اشـغال کرده‌اسـت. این نقص، «نیتروژن ـ تهی جایی مرکزی» (NV) نام دارد و یکی از بی‌شمار انواع نقص‌ها در الماس است. مفیدترین ویژگـی نقص NV مرکزی، نورتابناکی آن اسـت. ویژگی‌های نوری سـبب می‌شوند میدان مغناطیسـی محلی به یک حسگر بسیار خوب تبدیل شود. پژوهشگرها با نقشه‌برداری از میدان‌های مغناطیسی که در نزدیکی یک فلز عجیب قرار دارند می‌توانند به جزئیات جریان الکتریکی پی ببرند. ازجمله این جزئیات نشانه‌های همکاری الکترون‌ها با یکدیگر و نیز دریایی از الکترون است که مانند یک سیال با چسبناکی (گران روی) بسیار کم رفتار می‌کند.

رویکرد سـوم شامل استفاده از نورشناسی به‌منظور مطالعه انتقال و بازتاب نور در طول موج‌های بین ۱۰۰ نانومتر تا ۱ میلی‌متر است. دانشمندان از این رویکرد برای پی بردن به این که چگونه فرایند هدایت جریان الکتریکی ازجمله انتشار به فرکانس میدان الکتریکی بستگی دارد استفاده می‌کنند.

سـرانجام در رویکرد چهارم نوسـانات جریانی که در یک فلز عجیب گردش می‌کند اندازه‌گیری می‌شـود. پژوهشگران با اندازه‌گیری نوسـانات جریـان درمی‌یابند چه مقدار بار در زمانی معین منتقل می‌شود.

فلـزات عجیب آشـکارکننده شکسـت خـوردن یکی از موفق‌ترین مدل‌های فیزیکی برای توصیف جامدات هسـتند اما فیزیکدان‌ها این شکست را دعوت به اکتشاف تلقی می‌کنند. این فلزات صرفاً موضوع مطالعاتی از روی کنجکاوی نیسـتند بلکه در فناوری‌هایی که نیازی فوری به آن‌ها احسـاس می‌شـود نیز نقش مهمی دارند. دانشـمندان بروز ویژگی ابررسانایی در دمای نسبتاً بالا را در چندین خانواده از فلزات عجیب مشاهده کرده‌اند. بنابراین شـناخت عمیق این فلزات به سـاخت ابررساناهایی که در دمـای اتـاق یا نزدیک به آن عمـل می‌کنند کمک می‌کند. ساخت چنین ابررساناهایی شبکه‌های برق، انفورماتیک کوانتومی و دستگاه‌های پزشکی را متحول خواهد کرد.

اکسید مس، نقطه آغاز داستان فلزات عجیب

شروع داستان فلزات عجیب به سال ۱۹۸۶ برمی‌گردد؛ زمانی که فیزیکدان آلمانی «یوهانس گئورگ بِدنورتس» و همکارش «کارل الکس مولر» سوئیسی که هر دو در مرکز پژوهشی «آی بی ام» (IBM) در زوریخ سوئیس کار می‌کردند به کشف جالب و چشمگیری رسیدند.

آن‌ها هنگام مطالعه روی ماده‌ای که بر پایه‌ی اکسید مس بود مشاهده کردند که این ماده در دمای پایین‌تر از ۳۵ کلوین تبدیل به اَبَررسـانا می‌شـود. در یک ماده ابررسـانا، مقاومت الکتریکی صفر اسـت و جریان الکتریکی بدون هیچ مانعی گردش می‌کند.

شاید این دمای بحرانی یعنی $C^{\circ}238-$ به نظر ما و برای زندگی روزمره ما فوق‌العاده پایین باشد اما این مقدار دما دهها درجه بالاتر از دمای تمامی مواد ابررسـانایی بود که در آن زمان شـناخته شـده بودند و این برای دانشمندان علم فیزیک تازگی داشت. هنوز هدف بسیاری از کارهای پژوهشی این است که دمای بحرانی را بازهم بیشتر پایین بیاورند تا امکان ساخت ابررساناهایی فراهم شود که در دمای اتاق کار کنند.

در آن زمان، کشف ابررسانایی در دمای بالا رفتار دیگر اکسید مس گئورگ بِدنورتس و کارل الکس را آشـکار کرد. زمانی که اکسـید مس تا بالاتر از دمای بحرانی‌اش گرم می‌شـود، مقاومتی پیدا می‌کند که صفر نیست اما این مقاومت به شکل خطی با بالا رفتن دما افزایش می‌یابد.

ایـن رفتار عجیب اسـت چون به‌طـور معمول مقاومت فلزات در دمـای پایین به‌صورت چهارگانه (quadratic) یا به‌عبارتی دیگر متناسب با مجذور دما بالا می‌رود.