

مصاحبه:

سیری در ماده چگال

دکتر سید میر ابوالحسن واعظی

که در آن‌ها هر چند گذار فازهای پیوسته دیده می‌شد، اما هیچ تقارنی در آن‌ها شکسته نمی‌شد. از نمونه‌های معروف آن گذار فاز در سیستم‌های کوانتومی هال بود که با تغییر شدت میدان مغناطیسی بیرونی و یا چگالی الکترون‌ها در نقطه‌ی گذار رسانندگی سیستم دچار جهش‌های گسسته می‌شد اما هیچ شکست تقارنی را نمی‌شد به آن نسبت داد. فیزیکدان‌ها نشان دادند که برخلاف گذار فازهای شناخته شده - که برای هر شکست تقارنی می‌توان پارامتر نظم موضعی متناظر با آن تعریف کرد- در این نوع نوین از گذارهای فاز هیچ پارامتر نظم موضعی را نمی‌توان به سیستم نسبت داد و در عوض یک پارامتر نظم سرتاسری (توپولوژیک) را باید به سیستم نسبت داد. به همین خاطر به این نوع از گذارهای فاز، گذار فازهای توپولوژیک می‌گویند. نکته‌ی حائز اهمیت این است که ریاضیاتی که این گذارهای فاز را توصیف می‌کند نظریه‌ی میدان‌های توپولوژیک می‌باشد که از شاخه‌های مهم ریاضیات است و فیزیک ماده‌ی چگال را به زمینه‌های پژوهشی دیگر در فیزیک (مانند نظریه‌ی ریسمان و فیزیک سیاه‌چاله، نظریه‌ی میدان‌های همدیس و یا محاسبات و رایانه‌های کوانتومی توپولوژیک و ...) و ریاضی (مانند هندسه‌ی دیفرانسیل و توپولوژی جبری، نظریه‌ی دسته‌بندی (category theory) و ...) پیوند تنگاتنگ می‌دهد.

ابررسانایی دمای بالا: نظریه‌ی ابررسانایی متعارف BCS چگونگی پیدایش رسانندگی بی‌نهایت و مقاومت صفر در دماهای متناهی (و البته بسیار پایین) را با استفاده از برهم‌کنش میان الکترون‌های تراز رسانش با یون‌های با بار مثبت (هسته‌ی اتم‌ها) در ابررساناهایی که تا قبل از ۱۹۸۶ کشف شده بودند، به خوبی توضیح می‌دهد. البته برای بیش از هفتاد و پنج سال قبل از آن، بالاترین دمای گذار ابررسانایی زیر ۲۵ درجه‌ی کلوین بود. در سال ۱۹۸۶، ابررسانایی در سیستم‌های سرامیکی که در حالت عادی عایق‌های بسیار خوبی هستند، مشاهده شد و در کمتر از دو سال دماهای گذار به بزرگی ۱۳۰ درجه‌ی کلوین مشاهده شدند. البته سیمای فاز این سیستم‌ها بر حسب دما، چگالی الکترون‌ها و شدت میدان مغناطیسی بسیار غنی‌تر از تنها فاز ابررسانایی است. شوربختانه علیرغم گذشت بیش از ۳۰ سال از کشف آزمایشگاهی این سیستم‌ها هنوز توصیف نظری موفقی از آن‌ها وجود ندارد و از بزرگترین چالش‌های روبروی فیزیک ماده‌ی چگال، توضیح قانع‌کننده‌ی ابررسانایی و علت آن و بقیه‌ی حالت‌های ماده‌ی مشاهده شده در این سیستم‌هاست. البته پیشرفت‌های خوبی در این سال‌ها اتفاق افتاده، اما به هیچ وجه کافی نیستند. چالش اصلی در این سیستم‌ها شدت و قدرت برهم‌کنش و دافعه‌ی کولمبی میان الکترون‌هاست که بر خلاف ابررساناهای متعارف (دمای پایین) بسیار قوی است و به همین علت تمامی روش‌های نظری و یا محاسباتی فیزیک مبتنی بر نظریه‌ی میدان‌های کوانتومی (مانند بسط اختلالی برهم‌کنش، نظریه‌ی میدان میانگین، روش مونته‌کارلوی کوانتومی، نظریه‌های مبتنی بر درهم‌تنیدگی کوانتومی و ...) در این حالت غیرقابل اعمال و به شدت به لحاظ قدرت تبیین و پیش‌بینی نادرست و ضعیف می‌شوند.

مایع اسپین: به موادی گفته می‌شود که حل

بندۀ علاقمند به فیزیک در کلیت آن هستیم و در حال حاضر به طور تخصصی بر مطالعه‌ی سیستم‌های ماده‌ی چگال سخت، یعنی توده‌ی انبوهی از ذرات که با هم اندرکنش کوانتومی دارند، تمرکز دارم. بخش مهمی از ماده‌ی چگال را پدیده‌های نوظهور (emergent phenomena) تشکیل می‌دهند که به عنوان نمونه از نظم توپولوژیک (مثلاً در اثر کوانتومی هال)، ابررسانایی دمای بالا، مایع اسپینی، فلزات با رفتارهای ناپهنجار و ... که بالاتفاق در سیستم‌های با برهم‌کنش و همبستگی قوی پدیدار می‌شوند، نام برد. این سیستم‌ها رفتارهای نامتعارف و شگفت‌انگیز و گاه کاملاً خلاف انتظار و پیش‌بینی‌های نظری ما دارند و برخی از آن‌ها می‌توانند بستر و پایه‌ای باشند برای تحقق فناوری‌های پیشرفته در آینده، مانند رایانه‌های کوانتومی. در ادامه، بندۀ تلاش می‌کنم تا خیلی کوتاه راجع به برخی از این زمینه‌های پژوهشی توضیح بدهم.

نظم توپولوژیک: در نظریه‌ی گذار فاز لاندائو، گذار فازهای مرتبه‌ی دوم (پیوسته) همواره همزاد و همراه با شکست یکی از تقارن‌های سیستم می‌باشند. هم‌چنین در حالت منظم می‌توان برای سیستم پارامتر نظم موضعی -که معرف شکستگی تقارن متناظر با آن است- تعریف کرد. به عنوان مثال، گذار فاز آهنربایی (فرومغناطیس) متناظر با انتخاب جهت خاصی برای گشتاورهای موضعی اتم‌های آهن است. علیرغم این که هامیلتونی حاکم بر ماده تقارن دورانی را به صورت کامل حفظ می‌کند و جهت مرجحی را به ما تحمیل نمی‌کند، اما جواب‌های آن (رفتار عملی سیستم) متقارن نیستند (چون مغناطش آهنربا جهت مشخصی دارد). فلذا قبل از سنجش جهش مغناطش یک آهنربا، علی‌الاصول هر جهتی را می‌توانستیم برای مغناطش آن -به علت تقارن دورانی برهم‌کنش هاینبرگ بین الکترون‌های تراز ظرفیت اتم‌های آهن انتظار داشته باشیم. این کاهش تقارن دورانی سیستم در یک دمای خاص رخ می‌دهد و برای دماهای پایین‌تر از دمای گذار خاصیت آهنربایی انتظار داریم. هم‌چنین پارامتر نظم موضعی (که متوسط مغناطش موضعی سیستم است) در دماهای پایین‌تر از دمای گذار غیرصفر و بالاتر از آن صفر می‌باشد. این نظریه در پیش‌بینی گذار فازهای مرتبه‌ی دوم و خواص آن بسیار موفق بود، تا این که سیستم‌هایی به صورت تجربی مشاهده شدند

یاری‌رسانی اساسی کنند.

اثر کوانتومی هال: در سیستم‌های تقریباً دوبعدی گاز الکترونی (مانند مرز دو نیمه‌رسانای نوع n و p)، که در حالت عادی رفتار فلزی دارند، با اعمال میدان مغناطیسی خیلی قوی می‌توان وارد فازهای توپولوژیکی از ماده شد که نه تنها رسانندگی هال آن‌ها گسسته (quantized) است، که هم‌زمان اثرات فیزیکی جالب متعدد دیگری نیز در آن‌ها رخ می‌دهند، مانند حالت‌های حجمی عایق و حالت‌های مرزی یک‌جهته‌ی رسانا، برانگیختگی‌های بس‌ذره‌ای با بار کسری (مانند برانگیختگی‌های با بار $-e/3$) و یا حتی آمار کسری (یعنی برانگیختگی‌ها نه فرمیون و نه بوزون که حالتی بینابین دارند) که موسوم به آنیون (anyon excitation) هستند. از این برانگیختگی‌های آنیونی می‌توان به‌طور بالقوه برای تولید بیت‌های کوانتومی (qubit) و ذخیره‌سازی و پردازش اطلاعات کوانتومی در رایانه‌های کوانتومی توپولوژیک بهره برد که انتظار می‌رود از پایداری بالایی نسبت به عوامل واهمدوسی کوانتومی (افت و خیزهای گرمایی، برهم‌کنش‌های الکتریکی، وجود ناخالصی و ...) برخوردار هستند. البته بخش مهمی از این آنیون‌ها که اصطلاحاً غیرآبلی هستند - و تنها آن‌ها قابل استفاده در کامپیوترهای کوانتومی توپولوژیک هستند - هنوز به لحاظ آزمایشگاهی مشاهده و مورد تصدیق نشده‌اند، و تلاش‌های بسیاری برای طراحی و یافتن بسترهای جدید برای مشاهده‌ی آنیون‌های غیرآبلی در جریان است.

بنده در تلاشم که سیستم‌های یادشده و دیگر سیستم‌های فیزیکی را با بهره‌گیری از روش‌های تحلیلی و عددی بهتر بشناسم و از طریق همکاری‌های نزدیک با آزمایشگران قدم‌هایی برای بررسی صحت و سقم و دقت پیش‌بینی‌های نظری و هم‌چنین کاربردی کردن آن‌ها و پیشبرد فناوری بردارم.

کلاسیکی هامیلتونی برهم‌کنشی آن‌ها نظم مغناطیسی در آن‌ها پیش‌بینی می‌کند اما اثرات و افت و خیزهای کوانتومی باعث می‌شوند که این سیستم‌ها تا پایین‌ترین دماها دچار شکستگی تقارن نشوند و نظم مغناطیسی در آن‌ها رخ ندهد. البته در این سیستم‌ها نظم توپولوژیک به معنایی که در بالا به اختصار توضیح داده شد، مورد انتظار است. در بسیاری از نظریه‌های محبوب ساده‌ی چگال مایع‌های اسپینی ارتباط تنگاتنگی با ابررسانایی دمای بالا، کامپیوترهای کوانتومی توپولوژیک، اثر کوانتومی هال و ... پیدا می‌کنند و بنابراین شناخت بهتر آن‌ها می‌تواند به کشف راز و رمزهای ابررساناهای دمای بالا و ... کمک کند.

فلزهای ناهنجار: نظریه‌ی مایع فرمی لاندائو به خوبی می‌تواند رفتار بیشتر فلزات شناخته شده، از قبیل رفتار رسانندگی آن‌ها بر حسب دما، ظرفیت و رسانندگی گرمایی، نوسانات کوانتومی مرتبط با میدان مغناطیسی، برهم‌کنش الکترون‌ها با میدان الکترومغناطیس خارجی (نور) و یا نوسانات شبکه‌ای (فونون‌ها)، را به خوبی توضیح دهد. با کشف ابررسانایی دمای بالا، بخشی از سیمای فاز آن (با تخریب ابررسانایی از طریق دما یا اعمال میدان مغناطیسی قوی) رفتار فلزی دارد، اما دارای تفاوت‌های بنیادین با فلزات متعارف است. این بخش از سیمای فاز به نام‌های مختلفی شناخته می‌شود، از جمله فلز شگفت (strange metal). از آن‌جا که نظریه‌ی مایع فرمی لاندائو ناتوان از تبیین رفتارهای این سیستم (از جمله رسانندگی الکتریکی خطی با دما تا دماهای خیلی پایین) است، این سیستم‌ها را به عنوان یکی از مثال‌های مایع غیرفرمی دسته‌بندی می‌کنند. مجدداً شناخت و تبیین درست این سیستم‌ها هم‌بستگی بالایی با فهم بهتر ابررسانایی دمای بالا دارد و می‌تواند ما را در شناخت بهتر مایع اسپینی پیشتر یادشده هم