

فیزیک ماده چگال، از اواسط قرن بیستم تا کنون

رضا عسگری*

دیوید بوهم (David Bohm) و شاگرد او دیوید پاینز (David Pines) [۱] نشان دادند که برهمکنش قوی الکترونی یک دستگاه مایع الکترونی را می‌توان به دو مجموعه، برانگیختگی‌های جمعی با انرژی نسبتاً زیاد به نام پلاسمون‌ها و الکترون‌ها با انرژی کم، تفکیک نمود. در حقیقت نظریه بوهم-پاینز را می‌توان ایده پیشگام در نظریه باز بهنجارش دانست که در آن مدهای با انرژی زیاد سیستم را می‌توان به‌طور کامل حذف کرد تا تصویر باز بهنجارش شده‌ای از برانگیختگی‌های باقیمانده سیستم در انرژی کم به دست آید.

در اواخر دهه ۱۹۵۰، ایده نمودارهای فاینمن به فیزیک ماده چگال وارد شد. اولین کاربرد آن توسط بروکنر (Brueckner) [۲] برای مطالعه یک دستگاه الکترونی با برهمکنش به‌کار گرفته شد. یکی دیگر از موفقیت‌های این کاربرد، وارد کردن مفهوم زمان موهومی توسط ماتسوبارا (Matsubara) [۳] بود که با توجه به تشابه بین عملگر تحول زمانی در مکانیک کوانتومی و ماتریس چگالی بولتزمن، این ایده را مطرح کرد که مکانیک کوانتومی معمولی را می‌توان با در نظر گرفتن زمان موهومی به جای زمان حقیقی به مکانیک کوانتومی آماری در دمای محدود تبدیل کرد.

دو دستاورد مهم دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ به کشف شکست تقارن و گروه باز بهنجارش مربوط می‌شود. لاندائو در سال ۱۹۳۷ [۴] مفهوم شکست تقارن را فرمول‌بندی کرد و با استفاده از مفهوم پارامتر نظم، این نظر را مطرح کرد که گذار فاز در یک سیستم با فرایند کاهش تقارن در آن همراه است. در دهه ۱۹۵۰، انساکر (Onsager) و پنروز (Penrose) [۵] با یاری گرفتن از ایده لاندائو در مفهوم شکست تقارن، توانستند فاز چگالش در ابرشارگی مایع هلیوم را توصیف کنند.

در سال ۱۹۵۶ چند سال پس از اولین مشاهدات تجربی مایع هلیوم ۳ -- ایزوتوپ فرمیونی مایع رقیق شده هلیوم -- لاندائو [۶] مقاله‌ای مهم برای توصیف خصوصیات فیزیکی انرژی‌های کم یک گاز فرمیونی یکنواخت منتشر کرد. او در این مقاله نشان داد که یک رابطه یک‌به‌یک بین برانگیختگی‌های یک دستگاه با برهمکنش و برانگیختگی‌های شبه ذرات یک دستگاه فرمیونی بدون برهمکنش وجود دارد و بنابراین به جای پرداختن به مطالعه دستگاه واقعی می‌توان به خصوصیات فیزیکی دستگاه فرضی بدون برهمکنش شبه ذراتی، نگاه کرد. در این دستگاه اخیر، ذرات با جرم مؤثر، ضریب مؤثر لند (Landé)، پذیرفتاری اسپینی و باری مؤثر رفتار می‌کنند.

تا دهه ۱۹۶۰ مدل‌های کوانتومی-شیمیایی تنها قادر بودند به خصوصیات سیستم‌هایی با حداکثر ۱۰ ذره پردازند در صورتی که

در اوایل قرن بیستم، مباحث بلورشناسی (crystallography)، علم مواد (metallurgy)، کشسانی (elasticity)، مغناطیس و غیره، که با وجوه مختلف ماده جامد سروکار داشتند شاخه‌های مستقلی از علم به حساب می‌آمدند. تنها در دهه ۱۹۴۰ بود که مباحث فوق همراه با مباحث دیگری در شاخه‌ای واحد از علم فیزیک تحت عنوان فیزیک حالت جامد قرار گرفتند. با گذشت کمتر از دو دهه از آن، و با گسترش حیطه مطالعه این علم به فیزیک مایعات و دستگاه‌های بس‌ذره‌ای، نام نوین فیزیک ماده چگال به آن داده شد. در اوایل دهه ۱۹۵۰ تنها تعداد اندکی دانشگاه، مرکز صنعتی، و آزمایشگاه دولتی مثل آزمایشگاه بل (Bell) در آمریکا بودند که برنامه‌های تحقیقاتی در زمینه فیزیک ماده چگال را هدایت می‌کردند.

امروزه، فیزیک ماده چگال بزرگترین زیرشاخه علم فیزیک محسوب می‌شود و درصد قابل توجهی از دانشجویان مقطع دکتری فیزیک در کشورهای اروپایی و آمریکایی در این شاخه به تحقیق مشغول هستند. با نگاهی به بولتن همایش مارس در سال ۲۰۰۶، همایشی که سالانه توسط انجمن فیزیک آمریکا برگزار می‌شود، دیده می‌شود که بالغ بر ۶۵۰۰ نفر از فیزیک‌پیشه‌های ماده چگال در این همایش مقاله ارائه کرده‌اند.

تحول در علم فیزیک ماده چگال مدیون سه انقلاب بزرگ بود که در نیمه دوم قرن بیستم رخ داد. یکی اکتشافات نوین تجربی و تکنولوژی دقیق اندازه‌گیری، دومی کنترل کردن شکل و اندازه آلیاژها و اتم‌ها در مواد و در نهایت، بسط و توسعه نظریه‌ها و تکنیک‌های نوین فیزیک بس‌ذره‌ای که ارتباط تنگاتنگی با مکانیک آماری دارند.

در ۷۰ سال گذشته، با توسعه نظریه‌های بس‌ذره‌ای، فیزیک‌پیشه‌های ماده چگال درک بی‌سابقه و عمیقی از فیزیک مواد پیدا کرده‌اند. با اکتشافات نوین تجربی مثل ابررسانایی، ابرشارگی، پدیده‌های بحرانی، بلورهای مایع، آنتی فرمومغناطیس، اثرکوانتومی هال، اتم‌های فوق سرد و نیمه‌رساناهای مغناطیسی، تلاش‌های بی‌وقفه فیزیک‌پیشه‌های نظری ماده چگال معطوف به آن است که بتوانند ماهیت و خواص فیزیکی دستگاه‌هایی را که در بالا اشاره‌ای به آنها شد کشف کنند.

فیزیک بس‌ذره‌ای اساساً پس از پایان جنگ جهانی دوم شکوفا شد. جالب است بدانید که تا اواخر دهه ۱۹۵۰ روش نموداری فاینمن به حیطه فیزیک بس‌ذره‌ای وارد نشده بود و بدون استفاده از این روش، فیزیک‌پیشه‌های ماده چگال، پیشرفت‌های چشمگیری در دهه ۱۹۵۰ به دست آورده بودند. در ابتدای دهه ۱۹۵۰، به این سؤال اساسی که چرا مدل غیر برهمکنشی زومرفلد برای یک سیال الکترونی، خواص فیزیکی دستگاه را به درستی توصیف می‌کند، پاسخ مناسبی داده شد. در حقیقت

۱۹۶۴ [۱۲]، اثر حضور یک ناخالصی اسپینی در پراکندگی الکترون‌های هدایت دستگاه را بررسی کرد و به شکل جالبی گذار فاز فلز-عایق را توصیف نمود. در حقیقت او نشان داد که در حد دماهای پایین‌تر از دمای نوعی -- دمای کاندو (Kondo) -- اسپین ناخالصی یک حالت یکتایی را با الکترون‌های هدایت دستگاه به وجود می‌آورد و باعث می‌گردد که پذیرفتاری مغناطیسی دستگاه صفر شود. در دهه ۱۹۶۰، تصور محققان بر این استوار بود که الگوی اندرسن و کاندو برای توصیف گذار فاز عایق-فلز یکسان است در صورتی که امروزه می‌دانیم که الگوی اندرسن رفتارهای گوناگون فیزیکی بیشتری را توصیف می‌کند. الگوی کاندو به اسپین موضعی به صورت یک واحد مجزا می‌نگرد، حال آنکه در الگوی اندرسن، الکترون اسپین موضعی، الکترونی است مشابه الکترون‌های دیگر دستگاه، این الکترون می‌تواند با الکترون دستگاه جابه‌جا شود.

کشف موادی که دارای الکترون‌هایی با جرم سنگین هستند به اواخر دهه ۱۹۷۰ برمی‌گردد [۱۳]. این مواد دارای نوارهای انرژی نیمه‌پر در اوربیتال‌های ۴f و ۵f شبیه اتم‌های Ce و U در ترکیبات $CeAl_3$ و UPt_3 هستند. از ویژگی‌های این دسته مواد، رابطه خطی ظرفیت گرمایی با دماست که در ضریب تناسب، جرم مؤثر الکترون‌های هدایت با مقداری در حدود ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر جرم الکترون قرار دارد. بنابراین، این مواد را «فرمیون‌های سنگین» می‌گویند. در این دسته از مواد، گستره وسیعی از رفتارهای الکترونی را می‌توان مشاهده نمود. مواد پارامغناطیسی با پذیرفتاری اسپینی بسیار بزرگتر از پذیرفتاری پائولی، مواد مغناطیسی با گشتاور مغناطیسی بسیار کوچک، موادی با رفتار عایق‌گونه و دسته موادی با رفتار ابررسانا در دماهای کم از خصوصیات متنوع این دسته از مواد هستند. عقیده عمومی این است که این دسته از مواد خصوصیات متفاوت با الگوی کاندو دارند. برهمکنش‌های الکترون‌های نوار f در جایگاه‌های مختلف با الکترون‌های هدایت، فیزیک این دسته از مواد را توصیف می‌کند. هم‌اکنون فیزیک دستگاه‌های فرمیونی سنگین، همراه با فیزیک ابررسانایی دمای بالا از موضوعات مطرح و مهم فیزیک ماده چگال است.

یکی دیگر از موضوعات مهم که در اوایل دهه ۱۹۸۰ کشف شد، اثر کوانتومی هال بود. فون کلپتینگ (Von Klitzing)، دوردا (Dorda) و پپر (Pepper) در سال ۱۹۸۰ [۱۴] رفتاری عجیب، حاکی از کوانتیزه بودن ضریب هال برای یک دستگاه الکترونی دوبعدی را کشف کردند. این آزمایش که برای اندازه‌گیری ثابت هال طراحی شده بود به نتیجه مهمی در فیزیک بنیادی انجامید و دقت اندازه‌گیری ثابت ریزساختار، با استفاده از پدیده کوانتومی هال، تا یک مرتبه بزرگی افزایش یافت. مشاهده پدیده کوانتومی هال نیاز به میدان‌های مغناطیسی قوی، حدود ده تسلا، و مایع الکترونی دو بعدی دارد. با افزایش میدان مغناطیسی سهم اعداد کوانتومی کوچک در انرژی الکترون‌ها بیشتر شده و آثار کوانتومی مهم‌تر می‌شوند. از طرف دیگر، در یک دستگاه الکترونی دو بعدی گذار از یک تراز لاندائو به تراز دیگر، به‌طور پیوسته انجام نمی‌گیرد و انرژی کل الکترون گسسته

فیزیک ماده چگال با دستگاه‌هایی که تعداد ذرات آنها از مرتبه 10^{23} cm^{-3} هستند سر و کار دارد. نظریه موفق تابعی چگالی در سال ۱۹۶۵ توسط هوهنبرگ (Hohenberg) و کُن (Kohn) [۷] ارائه شد. نظریه فوق توفیق بسیار خوبی در توجیه ساختار الکترونی مواد با همبستگی ضعیف و یا تعداد ذرات بسیار زیاد داشته است. در این نظریه، چگالی وابسته به اسپین الکترون‌ها، انرژی حالت پایه دستگاه، ضرایب کشسانی، توابع کار، گشتاور مغناطیسی و بسیاری دیگر از کمیت‌های فیزیکی یک دستگاه بس‌ذره‌ای همبسته ضعیف، با دقت خوبی قابل محاسبه هستند.

نظریه گذار فاز مرتبه دو در قرن نوزدهم توسط وان در والز (Van der Waals) مطالعه شد. دو اتفاق مهم باعث گردید که فیزیک‌پیشه‌های ماده چگال به مطالعه مجدد گذار فاز مرتبه دوم بپردازند. یکی تناقض بین نتایج آزمایش برای نماهای بحرانی و مقدار پیشگویی شده برای آن توسط نظریه میدان متوسط [۸] بود و اتفاق دوم با نتایج مدل ایزینگ دو بعدی [۹] ارتباط داشت. مطالعه فیزیک‌پیشه‌های ماده چگال در این موضوعات منجر به پدید آمدن مفاهیم جدید در موارد زیر شد:

- (الف) نظریه مقیاس‌بندی.
- (ب) جهان شمولی، بدین معنی که خواص اساسی و فیزیکی نمونه در مقیاس طول بلند مستقل از جزئیات فواصل کوتاه است.
- (ج) باز بهنجارش، روندی است که فیزیک فواصل کوتاه و فیزیک انرژی‌های بالا توسط پارامترهای قابل تنظیم در هامیلتونی سیستم جذب می‌شود.
- (د) نقاط ثابت، که اثرات کوتاه برد و انرژی‌های بالا در داخل هامیلتونی حذف شده‌اند.
- (ه) ثابت‌های جفت‌شدگی، که مقادیرشان برحسب فاصله فیزیکی تغییر می‌کند.
- (و) حد بالای بعد بحرانی، یعنی حد بالای بعد که در آن نتایج نظریه میدان متوسط قابل استناد است.

برانگیختگی‌های جمعی، یکی از نشانه‌های مهم دستگاه بس‌ذره‌ای است. این رفتار با وجود برهمکنش ذره-ذره و غیرجایگزیده بودن برانگیختگی‌ها در داخل سیستم مرتبط است. مات در سال ۱۹۴۴ [۱۰] متوجه شد که ترکیب NiO_2 یک عایق است در صورتی که برپایه تعداد الکترون‌های موجود در سلول واحد و نوار انرژی بلاخ، انتظار می‌رفت که ترکیب فوق یک فلز با نوار نیمه پر باشد. این پدیده او را واداشت تا نظریه‌ای را بر پایه گذار از حالت فلز به عایق با تغییر اندازه ثابت شبکه که به گذار مات معروف است ارائه کند. تغییر ساختار داخلی در این عایق‌ها کاملاً با توصیف عایق باندهای بلاخ، متفاوت است.

در طرح مشابهی، اندرسن در سال ۱۹۶۱ [۱۱] گذار فاز حالت فلزی به عایق را توسط برهمکنش الکترون‌های رسانش با یک اسپین موضعی، حاصل از اتم ناخالصی، مطرح نمود. سپس کاندو (Kondo) در سال

ماده چگال به وجود آورده است و تلاش محققان در این زمینه به طور مستمر ادامه دارد.

در مطالب بالا، اشاره‌ای به نظریه تابعی چگالی داشتیم، و اینکه این نظریه بر پایه تقریب چگالی موضعی، توانایی توجیه بعضی از خواص فیزیکی موادی را که به صورت ضعیف همبسته هستند داراست و جواب‌های قابل مقایسه با نتایج تجربی، از آن استخراج می‌شود. اما دسته مهمی از مواد وجود دارند که نظریه تابعی چگالی در مورد آنها جواب‌های درستی به دست نمی‌دهد. به عنوان مثال، اکسیدهای فلزات گذاری یا دستگاه‌های فرمیونی سنگین. همچنین در این نظریه نتایج محاسباتی باند نوار انرژی برای موادی که دارای پوسته الکترونی f یا d هستند با نتایج تجربی در تناقض کامل است. در حقیقت برای موادی که در آنها الکترون‌های هدایت بخشی از اوربیتال‌های f یا d را پر کرده باشند، کاربرد نظریه تابعی چگالی جای سؤال اساسی دارد. برای توصیف چنین سیستم‌هایی، نظریه غیراختلالی و پیشرفته‌ای به نام نظریه دینامیکی میدان متوسط در سال ۱۹۸۹ توسط متسز (Metzner) و ولهارت (Vollhardt) [۲۱] پیشنهاد شد. نظریه فوق به صورت کامل‌تری برای بررسی خواص همبستگی سیستم‌های با همبستگی قوی توسعه داده شده است و نتایج حاصل از محاسبات آن قابل مقایسه با داده‌های تجربی است [۲۲].

یکی دیگر از پدیده‌های بسیار جالب، مسأله اتم‌های فوق سرد است. پس از ابداع تکنولوژی سرد کردن اتم‌ها تا حد نانو کلوین به روش سرد کردن لیزری که توسط استیون چو (Steven Chu) و همکارانش [۲۳] انجام پذیرفت و جایزه نوبل فیزیک را در سال ۱۹۹۷ از آن خود کردند، گروه تجربی اریک کورنل (Eric Cornell) در سال ۱۹۹۵ [۲۴] و چند ماه بعد کیتل (Ketterle) از دانشگاه MIT توانستند اتم‌ها را تا چند بیلیونیم بالای درجه صفر مطلق سرد کرده و پدیده چگالش بوز-اینشتین را مشاهده کنند. گروه اول آزمایش خود را روی ایزوتوپ بوزونی اتم‌های روبیدیم انجام داد و گروه دوم این پدیده را روی اتم سدیم مشاهده کردند. در سال ۲۰۰۱ جایزه نوبل فیزیک به کشف پدیده چگالش بوز-اینشتین تعلق گرفت. هرگاه گاز اتم‌های روبیدیم یا سدیم به اندازه کافی سرد شوند، گاز وارد یک فاز نوین می‌شود؛ کسر محدودی از اتم‌های فوق سرد شده به طور ناگهانی در حالت کمترین انرژی تک ذره‌ای قرار می‌گیرند و حالت ماکروسکوپی را به وجود می‌آورند. به تعبیری یک حالت ماکروسکوپی، در یک تراز انرژی تک‌ذره‌ای کوانتومی قرار می‌گیرد و چنین حالت بس‌ذره‌ای را چگالش بوز-اینشتین می‌نامیم. برای مطالعه بیشتر می‌توانید به مرجع [۲۵] مراجعه کنید. تقریباً در تمامی گروه‌های تحقیقاتی فعال در خارج از کشور، زیرگروهی مشغول به تحقیق در این موضوع است و امیدواریم در ایران نیز گروهی برای مطالعه و تحقیق در زمینه پدیده چگالش بوز-اینشتین شکل بگیرد.

به کارگیری درجه آزادی اسپینی الکترون‌ها در سیستم‌های حالت

می‌شود. در جایی که مقاومت هال کوانتیزه است، مقاومت الکترونی طولی دستگاه ناچیز شده و اتلاف دستگاه به صفر می‌گراید. این عدم اتلاف فوق العاده جالب است و نشان دهنده هم‌ارزی پدیده کوانتومی هال با پدیده‌های غیراتلافی دیگر مانند ابررسانایی یا ابرشارگی است. گرین (Girvin) [۱۵] برای اولین بار نشان داد که دستگاه کوانتومی هال هم‌ارز ابرشاره هلیوم ۴ است. در دو دهه اخیر تلاش‌های گسترده‌ای برای کشف و توصیف پدیده‌های نوین فیزیکی در دستگاه‌های کوانتومی هال انجام شده است [۱۶] و این موضوع نیز یکی از مباحث جالب برای فیزیک‌پیشه‌های تجربی و نظری در فیزیک ماده چگال محسوب می‌شود.

از دیگر مباحث جذاب در فیزیک ماده چگال، موضوع ابررسانایی -- بررسی موادی که بدون اتلاف انرژی جریان الکترونی را عبور می‌دهند -- است که چندین جایزه نوبل فیزیک به آن تعلق گرفته است. بعد از گذشت نزدیک به سه دهه از فعالیت‌های مهم تجربی گروه ماتیز (B. Matthis) و دیگران، دمای گذار ابررسانایی از ۸ درجه کلوین به حدود ۲۵ درجه کلوین افزایش یافت. بندنورز (Bednorz) و مولر (Muller) در سال ۱۹۸۴ [۱۷] با مطالعه روی مواد و ترکیبات جدید توانستند دمای گذار را به حدود ۴۰ درجه کلوین افزایش دهند. مطالعات بیشتر روی ترکیبات اکسیدمس که ناخالصی حفره‌ای در آن تزریق شده بود، دمای گذار را به حدود ۱۶۵ درجه کلوین افزایش داد. فهرستی از موضوعات جالب در این گروه از مواد -- ابررساناهای دمای بالا -- وجود دارد که باید در چارچوب دستگاه‌های الکترونی قویاً همبسته مطالعه شوند. به عنوان مثال می‌توان به خواص زیر اشاره‌ای کرد:

(الف) در دیاگرام فاز ابررسانایی گرم، فازهای ابررسانایی و عایقی دستگاه در نزدیکی هم قرار گرفته‌اند. این‌گونه به نظر می‌آید که حالت‌های ابررسانایی و عایقی دستگاه، بستگی نزدیکی به بردارهای موج حالت پایه داشته باشند [۱۸].

(ب) منشأ وجود فرایند رشد شبه گاف در طیف الکترونی مواد ابررسانایی که فرایند تزریق حامل‌ها -- الکترون‌ها یا حفره‌ها -- در آنها کامل نشده باشد، می‌تواند مرتبط با اثر همبستگی الکترون‌ها قبل از فاز ابررسانایی باشد. گروهی معتقدند این فرایند نشان دهنده شکل‌گیری جفت‌های الکترونی بدون هم‌دوسی کامل است [۱۹].

مطالعه نمودار فاز ابررساناهای گرم -- رفتار دمای گذار بر حسب درصد تزریق حفره -- از دیدگاه فیزیک‌پیشه‌های نظری کاری بسیار پرزحمت، و مستلزم ابداع ایده‌های نوین در توجیه فیزیکی آن است. به عنوان مثال می‌توان به وجود پدیده جدایی باری - اسپینی شبیه به یک دستگاه مایع الکترونی یک بعدی، وجود مقدار بحرانی درصد تزریق حفره در پدیده کوانتومی بحرانی در سیستم ابررسانایی و همچنین به‌کارگیری فرم‌های جدید نظریه پیمانه‌ای Z_2 و $SU(2)$ [۲۰] برای توجیه احتمالی حالت‌هایی که شدیداً توسط برهمکنش‌های کولنی مقید شده‌اند، اشاره کرد. بنابراین ابررسانایی اکسید مسی، ایده‌های نوین بسیاری را در فیزیک

مشخص در فاصله^۳ از الکترون دیگری که با اسپین خاص در مبدأ حضور دارد تعریف می‌گردد. کلیه آثار تبادلی-همبستگی مایع الکترونی در تابع دوزهای نهفته است. مهمترین نظریه برای محاسبه چنین تابعی توسط سینگوی (Singwi) و همکارانش در سال ۱۹۶۸ ارائه شد (جدول پایین). هرچند این نظریه نقایص متعددی داشت ولی تا سال‌های اخیر یکی از نظریه‌های موفق به‌شمار می‌رفت. شبیه‌سازی کامپیوتری مبتنی بر مدل مونت کارلو در سال ۱۹۸۰ برای مایع الکترونی سه بعدی ارائه شد که این مدل برای گاز الکترونی دو بعدی در سال ۱۹۸۹ و برای یک سیستم یک بعدی در سال ۲۰۰۶ محاسبه شده‌اند.

اخیراً ما روشی پیشنهاد کرده‌ایم [۲۸] که با توجه به حجم محاسباتی کم، قادر است جواب‌های قابل مقایسه با نتایج دقیق مونت کارلو را به‌دست دهد. چنین نظریه‌ای برای توجیه نتایج آزمایشگاهی، خواص تراپردی یک دستگاه مایع الکترونی و پیش‌بینی در مورد دیگر خواص فیزیکی آنها بسیار مهم و سودمند است [۲۹].

هم اکنون در پژوهشکده فیزیک تلاش می‌کنیم خواص فیزیکی بعضی از پدیده‌هایی را که در بالا به آنها اشاره‌ای شد تبیین کنیم. امیدوار هستیم زیرگروه‌هایی در پژوهشکده شکل بگیرند که بتوانند همگام با گروه‌های پژوهشی خارج کشور، به مطالعه فیزیکی موضوعات پیشرفته روز – که نبود تیم‌های تحقیقاتی آن در داخل کشور محسوس است – بپردازند. همان‌طوری‌که در روند بررسی پدیده‌های مطرح فیزیک ماده چگال اشاره شد، چنین پدیده‌هایی در ارتباط تنگاتنگ با آزمایشگاه، صنعت و طبیعت هستند و بنابراین سرمایه‌گذاری و برنامه‌ریزی برای این گروه پژوهشی در فیزیک حائز اهمیت بسیاری است.

جامد، مبحث نوینی را در فیزیک ماده چگال تحت عنوان اسپینترونیک مطرح کرده است. در حقیقت فیزیک‌پیشه‌ها به دنبال این هستند که با پرش الکترون از اتمی به اتم دیگر و فیزیک حاکم بر آن بتوانند درک بهتری از خصوصیات ماکروسکوپی دستگاه داشته باشند. با چنین دانشی می‌توان فهمید که مواد چه قابلیت‌هایی برای کاربرد دارند. به عنوان مثال چگونه می‌توان ظرفیت ذخیره‌ای یک هارد دیسک کامپیوتر را افزایش داد؟ و یا اطلاعات را چگونه انتقال دهیم تا حداکثر سرعت ممکن را داشته باشند؟ چرا موادی که با اعمال میدان مغناطیسی همچون رسانا رفتار می‌کنند، در غیاب میدان مغناطیسی عایق هستند؟ جواب این سؤالات مربوط به رفتار اسپین است که با جهت‌گیری خاصی روی الکترون متحرک در سیستم موجود است. به کارگیری مفاهیمی از نوع اثر زمین و اثر اسپین-مدار راشبا (Rashba) در نیمه رساناهای مغناطیسی سبب شده تا دامنه کاربرد الکترونیک اسپینی بسیار گسترده شود [۲۶]. در حقیقت چنین کاربردهایی مبتنی بر اجتماع یک پارچه الکترونیک، پتو الکترونیک و مگنتو الکترونیک است که در چارچوب اسپینترونیک عملی خواهد بود.

اما شناخت بیشتر پدیده‌هایی که در بالا نامی از آنها برده شد مبتنی بر درک بهتر از مایع الکترونی کوانتومی و اثرات بس‌ذره‌ای آنها در مواد است. با توجه به گذشت نزدیک به ۶۰ سال از مطالعه مستمر روی دستگاه‌های مایع الکترونی، به دلیل پیچیدگی این دستگاه‌ها، شناخت ما از آنها کامل نیست. هر چند مایع الکترونی همگن یک دستگاه فرضی است و در دنیای واقعی وجود ندارد اما تاکنون بخش اعظم تحقیقات درباره مایع الکترونی به مطالعه این مایع فرضی اختصاص یافته است. در چنین دستگاهی کمیت فیزیکی تابع توزیع دو ذره‌ای مهمترین نقش را ایفا می‌کند. تابع توزیع دو ذره‌ای متناسب با احتمال یافتن الکترونی با اسپین

مهمترین رخدادهای تاریخ مایع الکترونی (برگرفته از مرجع [۲۷])

| سال | رخداد |
|------|-------------------------------------------------------------------|
| ۱۹۴۷ | اختراع ترانزیستور |
| ۱۹۵۶ | نظریه مایع فرمی لاندائو |
| ۱۹۵۷ | نظریه BCS ابررسانایی، تقریب فاز تصادفی، فاکتور میدان موضعی هابارد |
| ۱۹۶۲ | امواج اسپینی و باری |
| ۱۹۶۴ | نظریه تابعی چگالی |
| ۱۹۶۸ | نظریه STLS و تعمیم نظریه فاز تصادفی |
| ۱۹۷۴ | حل مدل لاتینجر توسط ماتیز و لایب |
| ۱۹۸۰ | کشف اثر کوانتومی صحیح، مدل کوانتومی مونت کارلو گاز الکترونی |
| ۱۹۸۲ | کشف اثر کوانتومی کسری |
| ۱۹۸۳ | نظریه لافلین برای توصیف اثر کوانتومی‌ها |
| | کشف مواد فرمیونی سنگین |
| ۱۹۸۷ | کشف ابررسانایی دمایی بالا |
| ۱۹۸۹ | فرم‌یون‌های ترکیبی در پدیده اثر کوانتومی‌ها |

| سال | رخداد |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۱۸۹۷ | کشف الکترون و اندازه‌گیری e/m |
| ۱۹۰۰ | مدل درود و لورنتس برای هدایت الکتریکی |
| ۱۹۰۲ | کشف اثر فوتو الکتریک |
| ۱۹۰۵ | تعبیر انیشتین از اثر فوتو الکتریک |
| ۱۹۱۱ | اندازه‌گیری بار الکترون و کشف ابررسانایی |
| ۱۹۲۴ | فرض دوپروی |
| ۱۹۲۵ | اسپین الکترون، آمار فرمیونی، اصل طرد پائولی |
| ۱۹۲۶ | معادله شرودینگر |
| ۱۹۲۷ | آزمایش پراش الکترون - نظریه توماس-فرمی-اتم، تعبیر جمله تبادلی اسلیر، نظریه پائولی-زومرفلد گاز الکترونی |
| | آزاد برای فلزات، نظریه نسبیتی دیراک برای الکترون‌ها |
| ۱۹۲۸ | نظریه بلاخ برای الکترون‌ها در جامدات |
| ۱۹۲۹ | نظریه بلاخ و ناپایداری فرومغناطیسی |
| ۱۹۳۴ | پیشنهاد ویگنر برای شبکه ویگنری |

- 1 **D. Bohm** and **D. Pines**, *A Collective description of electron interactions: III. Coulomb interactions in a degenerate electron gas*, Phys. Rev. **92** (1953), 609-625.
- 2 **K. Brueckner**, *Many-body problem for strongly interacting particles. II. Linked cluster expansion*, Phys. Rev. **100** (1955), 36-45.
- 3 **T. Matsubara**, *A new approach to quantum-statistical mechanics*, Prog. Theo. Phys. **14** (1955), 351-378.
- 4 **L.D. Landau**, *On the theory of phase transitions*, Phys. Z. Soveit **11** (1937), 26-34.
- 5 **L. Onsager** and **O. Penrose**, Philos. Mag. **42** (1951), 1373-1378.
- 6 **L.D. Landau**, *Theory of the fermi liquid*, Sov. Phys. JEPT. **3** (1957), 920-925.
- 7 **P. Hohenberg** and **W. Kohn**, *Inhomogeneous electron gas*, Phys Rev. Lett. **136** (1964), 864-871.
- 8 **A. Voronel**, et al., Sov. Phys. JEPT, **18** (1964), 568-571.
- 9 **B. Widom**, *Equation of state in the neighborhood of the critical point*, J. Chem. Phys. **43** (1965), 3898-3905.
- 10 **F.N. Mott**, *The Basis of the electron theory of metals, with special reference to the transition metals*, Prog. Phys. Soc. A **62** (1949), 416-422.
- 11 **P.W. Anderson**, *Localized magnetic states in metals*, Phys. Rev. **124** (1961), 41-53.
- 12 **J. Kondo**, *Resistance minimum in dilute magnetic alloys*, Prog. Theoret. Phys. **32** (1964), 37-49.
- 13 **K. Andres**, **J. Graebner**, and **H.R. Ott**, *4f-Virtual-bound-state formation in CeAl₃ at low temperatures*, Phys. Rev. Lett. **35** (1975), 1779-1782;
F. Steglich, et al., *Superconductivity in the presence of strong pauli paramagnetism: CeCu₂Si₂*, Phys. Rev. Lett. **43** (1976), 1892-1896;
A. Amato, *Heavy-fermion systems studied by μ SR technique*, Rev. Mod. Phys. **69** (1997), 1119-1180;
E. Demler, **W. Hanke**, and **S. C. Zhang**, *SO(5) theory of antiferromagnetism and superconductivity*, Rev. Mod. Phys. **76** (2004), 909-974.
- 14 **K. Von Klitzing**, **G. Dorda**, and **M. Pepper**, *New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized hall resistance*, Phys. Rev. Lett. **45** (1980), 494-497.
- 15 **S. M. Girvin**, *Particle-hole symmetry in the anomalous quantum Hall effect*, Phys. Rev. B **29** (1984), 6012-6014.
- 16 **G. Murthy** and **R. Shankar**, *Hamiltonian theories of the fractional quantum Hall effect*, Rev. Mod. Phys. **75** (2003), 1101-1159;
- P. J. Mohr** and **B. N. Taylor**, *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2002*, Rev. Mod. Phys. **77** (2005), 1-108.
- 17 **J.G. Bednorz** and **K.A. Muller**, *Sr_{1-x}Ca_xTiO₃: An XY quantum ferroelectric with transition to randomness*, Phys. Rev. Lett. **52** (1984), 2289-2292.
- 18 **P.W. Anderson**, *Superconductivity: the real dichotomy*, Science **265** (1994), 1789-1790;
S.C. Zhang, *A unified theory based on SO(5) symmetry of superconductivity and antiferromagnetism*, Science **275** (1997), 1089-1096.
- 19 **V.J. Emery** and **S.A. Kivelson**, *Importance of phase fluctuations in superconductors with small superfluid density*, Nature **374** (1995), 434-437.
- 20 **T. Senthil** and **M.P.A. Fisher**, *Fractionalization and confinement in the U(1) and Z₂ gauge theories of strongly correlated systems*, J. Phys. A **34** (2001), L119-L126;
Xiao Wen and **P.A. Lee**, *Theory of underdoped cuprates*, Phys. Rev. Lett. **76** (1996), 503-506.
- 21 **W. Metzner** and **D. Vollhardt**, *Correlated lattice fermions in d = ∞ dimensions*, Phys. Rev. Lett. **62** (1989), 324-326.
- 22 **G. Kotliar**, et al., *Electronic structure calculations with dynamical mean-field theory*, Rev. Mod. Phys. **78** (2006), 865-951;
T. Maier, et al., *Quantum cluster theories*, Rev. Mod. Phys. **77** (2005), 1027-1080.
- 23 **Steven Chu**, *Nobel lecture: The manipulation of neutral particles*, Rev. Mod. Phys. **70** (1998), 685-707.
- 24 **E.A. Cornell** and **A.E. Wieman**, *Nobel lecture: Bose-einstein condensation in a dilute gas, the first 70 years and some recent experiments*, Rev. Mod. Phys. **74** (2002), 875-893;
W. Ketterle, *Nobel lecture: When atoms behave as waves: Bose-einstein condensation and the atom laser*, Rev. Mod. Phys. **74** (2002), 1131-1151.
- 25 **A.J. Leggett**, *Bose-einstein condensation in the alkali gases: Some fundamental concepts*, Rev. Mod. Phys. **73** (2001), 307-356;
A. Minguzzi, **S. Succi**, **T. Toschi**, **M. P. Tosi**, and **P. Vignolo**, *Numerical methods for atomic quantum gases with applications to Bose-einstein condensates and to ultra cold fermions*, Phys. Rep. **395** (2004), 223-355.
- 26 **I. Zutic**, **J. Fabian**, and **S. Das Sarma**, *Spintronics: fundamentals and applications*, Rev. Mod. Phys. **76** (2004), 323-411.

- 27 **G.F. Giuliani** and **G. Vignale**, *Quantum Theory of the Electron Liquid*, Cambridge University Press, Cambridge, 2005.
- 28 **B. Davoudi**, **R. Asgari**, **M. Polini**, and **M.P. Tosi**, *Analytic theory of ground-state properties of a three-dimensional electron gas with arbitrary spin polarization*, Phys. Rev. B **68** (2003), 155112-155121;

* رضا عسگری، پژوهشکده فیزیک، پژوهشگاه.

- R. Asgari**, **B. Davoudi**, and **M.P. Tosi**, *Analytic theory of correlation energy and spin polarization in the 2D electron gas*, Solid State Commun. **131** (2004), 301-307;
- R. Asgari**, *Analytical theory of ground-state properties of the one dimensional electron liquid*, Phys. Rev. B (2006) (submitted).
- 29 **R. Asgari**, **B. Davoudi**, **M. Polini**, **G. Giuliani**, **M. P. Tosi**, and **G. Vignale**, *Quasiparticle self-energy and many-body effective mass enhancement in a two-dimensional electron liquid*, Phys. Rev. B **71** (2005), 045323-045338;
- R. Asgari** and **B. Tanatar**, *Many-body effective mass and spin susceptibility in a quasi-two-dimensional electron liquid*, Phys. Rev. B **74** (2006), 075301-075312.

کارگاه و مدرسه ریسمان

محمد مهدی شیخ جباری*

می شود. یکی از این معیارها پذیرفته شدن اشخاص و یا نتایج مقالات آنها در جامعه بین‌المللی است و این امر خود مستلزم شرکت مؤثر در همایش‌های بین‌المللی است.

از سال‌ها قبل کنفرانسی به نام کنفرانس منطقه‌ای در فیزیک نظری و ریاضی-فیزیک به صورت دوسالانه به تناوب در یکی از کشورهای منطقه با محوریت ایران، ترکیه، و پاکستان برگزار می‌شود که آخرین آنها (تحت عنوان سیزدهمین کنفرانس منطقه‌ای) در فروردین ماه امسال در اسلام‌آباد پاکستان برگزار شد. تاکنون سه بار کنفرانس منطقه‌ای در ایران برگزار شده که اولین آنها در سال ۱۹۸۹ در دانشگاه صنعتی شریف و دومین آنها در بندرانزلی در سال ۱۹۹۵ بود. در خلال این همایش‌ها و تبادل آرا به خصوص با همکاران هندی کم‌کم این ایده شکل گرفت که به منظور تقویت هر چه بیشتر فیزیک در شاخه نظریه ریسمان در ایران، برگزاری و شرکت در کنفرانس‌های منطقه‌ای که از نظر موضوعی بسیار وسیع بود کافی نیست و باید به فکر برگزاری کنفرانس‌هایی در زمینه مشخص نظریه ریسمان و حتی الامکان با تکیه بر نیروهای داخلی بود. سرانجام با تشویق‌ها و همکاری دوستان و همکاران هندی و به خصوص سپنتا وادیا (Spenta Wadia) این ایده در سال ۲۰۰۰ جامعه عمل پوشید و اولین مدرسه و کارگاه بین‌المللی پژوهشگاه در اصفهان برگزار شد و بعد از یک سال وقفه در سال ۲۰۰۲ نیز تکرار شد. در این دو همایش حضور فیزیکدان‌های هندی عمدتاً از مؤسسه تاتا (TIFR) بسیار پررنگ بود و این گروه که از افراد بسیار شاخص نظریه ریسمان هستند عملاً تنها شرکت کنندگان خارجی بودند. در سال ۲۰۰۳ سومین همایش در



بنا به سنت و روال چندین سال گذشته، کارگاه و مدرسه نظریه ریسمان (IPM String School & Workshop) یا به اختصار ISS2006) از تاریخ ۱۰ تا ۱۹ آوریل ۲۰۰۶ (۲۱ تا ۳۰ فروردین ۱۳۸۵) برگزار شد. این مدرسه و کارگاه بین‌المللی پنجمین همایش بین‌المللی ریسمان بود که توسط پژوهشکده فیزیک برگزار می‌شد. اولین این همایش‌ها در سال ۲۰۰۰ در دانشگاه صنعتی اصفهان، دومین آنها (ISS2002) در شیراز، سومین (ISS2003) در بندرانزلی، چهارمین (ISS2005) در جزیره قشم و نهایتاً ISS2006 در تهران و در محل ساختمان نیوران پژوهشگاه برگزار شد.

جا دارد که قبل از گزارش این همایش، تاریخچه همایش‌های بین‌المللی ریسمان را مرور کنیم.

کار تحقیقی، بالاخص در علوم پایه، کاری بین‌المللی است و معیارهای سنجش آن نیز از طرف جامعه بین‌المللی محققان رشته مورد نظر تعیین