





دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده فیزیک

تعمیم رهیافت لاندائز - بوتیکر جهت مطالعه‌ی ترابرد وادوس و پلارونی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد فیزیک - ماده چگال

مریم نوری

استاد راهنما

دکتر فرهاد فضیله



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده فیزیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک – ماده چگال خانم مریم نوری
تحت عنوان

تعمیم رهیافت لاندائِر – بوتیکر جهت مطالعه‌ی ترابرد وادوس و پُلارونی

در تاریخ ۹۳/۱۰/۲۱ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

دکتر فرهاد فضیله

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه

دکتر کیوان آقابابایی سامانی

۲- استاد مشاور پایان‌نامه

دکتر فرهاد شهبازی

۳- استاد داور

دکتر پیمان صاحب‌سرا

۴- استاد داور

دکتر فرهاد شهبازی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

سپاسگزاری:

با هر چه عشق نام تو را می توان نوشت

با هر چه رود راه تو را می توان سرود

بیم از حصار نیست که هر قفل کهنه را

با دست های روشن تو می توان کشود

سپاس خدایی را که سخن و روان در ستودن او بانند و شمار کران شمرده نعمت های او ندانند، و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. خدایی که پای اندیشه می تیزگام، در راه شناسایی او لنگ است و سر فکرت زرف، رو به دریای معرفتش بر سنگ.

سپاس بی کران بر مهدی و بهرامی و بهگامی مادر دل سوز و مهربانم که سجده می ایثارش گل محبت را در وجودم پروراند و دلمان گهر بارش لحظه های مهربانی را به من آموخت.

از پدر بزرگوارم که بهواره حامی و مشوق من بوده است.

هم چنین، سپاس و قدردانی خود را نسبت به راهبانی ها و محبت های استاد ارجمندم جناب آقای دکتر فرهاد فضیله ابراز می دارم و بدین وسیله زحمات ایشان را ارج می نمم.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع
این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان
است.

تقدیم به:

پدر و مادر مهربانم

آنانکه فارغ از هر کمان و زمان،

قلبشان برای وجودم تپید...

مانده باد این پیش!

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
هشت	فهرست مطالب
۱	چکیده
۲	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱ نگاه‌های کوتاه
۴	۲-۱ راهکار
۴	۳-۱ بخش‌بندی
۶	فصل دوم: مفاهیم پایه
۶	۱-۲ سیستم‌های مزوسکوپی
۹	۱-۱-۲ ترابرد الکترونی در سیستم‌های مزوسکوپی
۹	۲-۱-۲ ترابرد کوانتومی پخشی
۱۰	۳-۱-۲ ترابرد بالستیک
۱۱	۴-۱-۲ ترابرد میدان قوی
۱۲	۲-۲ گاز الکترونی دوبعدی
۱۴	۳-۲ معادله‌ی جرم مؤثر
۱۵	۱-۳-۲ زیرنوارها
۱۶	۲-۳-۲ نمودارهای نواری و چگالی حالات
۱۷	۴-۲ طول‌های مشخصه
۱۸	۱-۴-۲ طول موج دوبروی
۱۸	۲-۴-۲ مسافت آزاد میانگین
۱۸	۳-۴-۲ طول واهلش فاز
۱۹	۴-۴-۲ طول مغناطیسی
۱۹	۵-۴-۲ طول جای‌گزیدگی
۱۹	۵-۲ مدهای عرضی
۲۰	۱-۵-۲ الکترون‌های محصور ($U_y \neq 0$) در میدان مغناطیسی صفر ($B = 0$)
۲۱	۲-۵-۲ الکترون‌های غیرمحصور ($U_y = 0$) در میدان مغناطیسی غیر صفر ($B \neq 0$)
۲۳	فصل سوم: رهیافت لاندائِر - بوتیکر
۲۴	۱-۳ رسانای بدون بازتاب
۲۵	۲-۳ مقاومت رسانای بالستیک
۲۸	۱-۲-۳ محاسبه‌ی جریان
۲۹	۲-۲-۳ مقاومت تماسی
۳۰	۳-۳ فرمول لاندائِر
۳۲	۴-۳ رهیافت لاندائِر - بوتیکر

۳۳	..... دمای غیر صفر	۱-۴-۳
۳۴	..... نقش اصل طرد پائولی	۲-۴-۳
۳۶	فصل چهارم: محاسبه‌ی تابع تراگسیل با استفاده از مدل دی‌آماتو- پاستاوسکی	
۳۷	..... توابع گرین پیشرفته و تأخیری	۱-۴
۳۸	..... ماتریس S و تابع گرین	۲-۴
۳۹	..... رابط‌های چند مدی	۳-۴
۴۰	..... مدل تنگابست	۴-۴
۴۱	..... نمایش ماتریسی عملگر هامیلتونی در یک بعد	۱-۴-۴
۴۳	..... رابطه‌ی پراکندگی برای یک شبکه‌ی گسسته	۲-۴-۴
۴۳	..... نمایش ماتریس عملگر هامیلتونی در دو بعد	۳-۴-۴
۴۴	..... کاهش مرتبه‌ی ماتریس	۴-۴-۴
۴۶	..... خودانرژی	۵-۴-۴
۴۷	..... تابع تراگسیل	۶-۴-۴
۴۷	..... فرایند کاهش و کسرهای دنباله‌دار	۵-۴
۴۹	..... مدل دی‌آماتو- پاستاوسکی	۶-۴
۵۰	..... ساختار بندی مدل DP	۱-۶-۴
۵۲	..... ترابرد وادوس	۲-۶-۴
۵۶	فصل پنجم: محاسبات تحلیلی و ترابرد پلارونی	
۵۶	..... محاسبات تحلیلی	۱-۵
۵۷	..... احتمال تراگسیل همدوس در یک سیستم تک‌سایتی	۱-۱-۵
۵۸	..... احتمال تراگسیل وادوس	۲-۱-۵
۶۰	..... ترابرد پلارونی	۲-۵
۶۸	فصل ششم: نتیجه‌گیری	
۷۰	..... مراجع	

چکیده

در سال‌های اخیر با پیشرفت علم در ابعاد بسیار کوچک، ترابرد کوانتومی در سیستم‌های موزوسکوپی مورد توجه بسیاری از دانشمندان قرار گرفته است. مشاهده‌ی الگوهای تداخل کوانتومی، راه را برای درک و ارزیابی ترابرد الکترونی در این ابعاد باز می‌کند. از این رو شاید بررسی اثر وادوسی گامی اساسی برای تحلیل ترابرد در این سیستم‌ها به حساب آید. در نگاه اول این‌طور به نظر می‌رسد که وادوسی تأثیری منفی بر روی ترابرد الکترونی می‌گذارد به این دلیل که با تولید ضدتشدید، تشدیدهای رخ داده را ضعیف می‌کند. با این حال وادوسی تأثیر مهمی بر روی ترابرد دارد، چراکه افزون بر تضعیف تشدیدها، قادر به از بین بردن تداخل‌های ویرانگر و در نتیجه افزایش ترابرد کل سیستم است. از جمله موادی که در این حوزه مورد بررسی قرار می‌گیرند، پلیمرها هستند که با اختصاص جایزه‌ی نوبل سال ۲۰۰۰ میلادی به زمینه‌ی پلیمرهای رسانا، تلاش‌ها برای مطالعه‌ی ترابرد در این مواد افزایش یافته است. در پروژه‌ی حاضر اثر وادوسی بر روی ترابرد در یک سیستم تک‌سایتی با استفاده از محاسبات تحلیلی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: ۱- ترابرد الکترونی ۲- وادوسی ۳- پلیمرهای رسانا ۴- ترابرد پلارونی

فصل اول

مقدمه

مطالعه‌ی ویژگی‌های ترابرد الکترونی جامدات یکی از پایه‌های فیزیک ماده‌چگال است. در دهه‌های اخیر، با پیشرفت تکنولوژی، بررسی دستگاه‌های الکترونی در مقیاس نانو ممکن شده است. تلاش‌های اخیر برای محاسبه‌ی ترابرد الکترونی در اتصالات مولکولی قابل توجه بوده اما مدل‌سازی آن معمولاً با تأخیر مواجه است. توانایی ساخت و چینش اشیاء در مقیاس نانو (نانو تکنولوژی) یکی علوم مهم در حال حاضر به شمار می‌آید، به ویژه با پیشرفت در زمینه‌ی الکترونیک مولکولی، امکان دستیابی به ویژگی‌های کوانتومی و بکارگیری آن برای طراحی دستگاه‌ها الکترونی مهیا می‌شود. این زمینه‌ی بین رشته‌ای در مرزهای کاربردی شیمی و فیزیک رشد کرده است که با وجود تفاوت در کاربردهای تکنولوژیکی، چالش‌های فکری مهمی را در زمینه‌ی دانش‌های بنیادین برمی‌انگیزد [۱].

۱-۱ نگاهی کوتاه

نانوساختارها به خاطر ابعاد کوچکشان زمینه‌ای برای مطالعه‌ی رفتار حالات الکترونی همدوس^۱ تحت تأثیر چندین برهم‌کنش کوانتومی مشخص فراهم می‌کنند. درک ویژگی‌های تراپردی آنها نشان‌گر اهمیت بنیادین

^۱ Coherent

کاربردهای آن است. در سال ۱۹۵۷، رالف لاندائتر^۱ مسئله‌ی رسانندگی الکترونی را مشابه مسئله‌ی احتمال تراگسیل حل کرد. رسانایی توسط احتمال تراگسیل همدوس حاملان بار درون نمونه تعیین می‌شود که خود احتمال تراگسیل نیز بین دو الکتروید یک بعدی که به ترتیب به عنوان چشمه و درآشام جریان رفتار می‌کنند، محاسبه می‌شود. محاسبات مربوط به نمونه‌های خاص از طریق احتمال تراگسیل کوانتومی تنها تقلیدی از کار فیلیپ دبلیو اندرسون^۲، دیوید تولس^۳ و سایرین در اواخر دهه‌ی ۱۹۷۰ بود و با مطرح شدن بحث جایگزیدگی فرمول لاندائتر دوباره مورد توجه قرار گرفت. در دهه‌ی ۱۹۸۰ چارچوب کلی برای محاسبه‌ی رسانایی مزوسکوپی مطرح شد که تصویری کوتاه و نهایی از رهیافت لاندائتر ارائه می‌دهد. رهیافت اخیر به عنوان رهیافت لاندائتر-بوتیکر شناخته می‌شود که توسط رالف لاندائتر، مارکوس بوتیکر^۴ و یوزف ایمری^۵ ارتقا داده شد [۲]. امروزه رهیافت لاندائتر برای محاسبه‌ی کوانتومی ترابرد الکترونی همدوس در مقیاس نانو، رهیافتی بی‌رقیب است [۳]. ساده‌سازی رهیافت لاندائتر و سادگی روش محاسباتی آن، باعث گسترش استفاده از این راهکار برای محاسبه‌ی رسانایی در بسیاری از کدهای محاسباتی شده است.

کارلوس بوتیکر (کسی که مسئله‌ی اندازه‌گیری چندپایانه‌ای در فرمالیزم ماتریس پاشندگی را مطرح کرد) خیلی زود نظریه‌ی خود را مبنی بر این که گمانه‌های^۶ ولتاژ به عنوان پراکنده‌سازهای غیرکشسان رفتار می‌کنند، بیان کرد. گمانه‌های ولتاژ نیز همچون ولت‌سنج‌های واقعی نباید تعادل الکترونی سیستم را مختل کنند، بنابراین به ازای هر الکترون وارد شده در آن‌ها، یک الکترون به سیستم بازگردانده می‌شود. یعنی به ازای هر فرایند فرار^۷ از پرتو همدوس ناشی از برهم‌کنش با محیط، باید یک ذره‌ی وادوس جدید به درون سیستم بازتزریق شود. از این رو راهکاری مناسب برای اعمال اثر وادوسی^۸ در ترابرد الکترونی توسط جورج دی‌آماتو^۹ و هریشیو پاستاوسکی^{۱۰} (DP) ارائه شد [۴]. طرح کلی این روش این است که برهم‌کنش‌های بس‌ذره‌ای منجر به از بین رفتن الگوهای تداخلی درون سیستم می‌شود که توسط نرخ به دست آمده از قاعده‌ی طلایی فرمی^{۱۱} (FGR) توصیف می‌شود. به خاطر بقای بار، این نرخ باید معادل با جفت‌شدگی با یک ولت‌سنج باشد. با قبول این فرض می‌توان ماتریس دامنه‌های تراگسیل را برای تمام سایت‌های نمونه محاسبه و در نهایت معکوس این ماتریس را به دست

Rolf Landauer^۱
 Philip W. Anderson^۲
 David Thouless^۳
 Markus Buttiker^۴
 Yoseph Imry^۵
 Probe^۶
 Escape^۷
 Decoherence^۸
 George D'Amato^۹
 Horacio Pastawski^{۱۰}
 Fermi Golden Rule^{۱۱}

آورد. برخلاف سهولت درک و کاربرد این مدل، به ندرت مورد استفاده قرار گرفته که احتمالاً به خاطر هزینه‌ی محاسباتی ظاهری آن بوده است. کارهای انجام گرفته تا به امروز با چشم‌پوشی از نقش غیرکشسانی و وادوسی، حتی در کاربردهایی نظیر ترابرد در پلیمرها در دمای اتاق بوده است [۱]. از این رو قصد داریم با استفاده از مدل DP برای اعمال اثر وادوسی، امکان اجرای گسترده‌ی آن را بر روی بسیاری از سیستم‌ها نشان دهیم.

۲-۱ راهکار

در این بخش راه حلی برای محاسبه‌ی احتمال تراگسیل مؤثر با استفاده از مدل دی‌آماتو-پاستاوسکی ارائه و هم‌چنین نمادگذاری ماتریسی جمع و جوری توصیف می‌شود که پتانسیل‌های شیمیایی و توابع تراگسیل را به سادگی بیان می‌کند. همین‌طور نشان می‌دهیم که با استفاده از فرایندهای وادوس در مدل دی‌آماتو-پاستاوسکی، رسانایی در پلیمرهای رسانای ذاتی افزایش چشم‌گیری دارد. کاربردهای عملی این مدل بیشتر مربوط به مسائل یک‌بعدی که فرمول اصلی از آن برگرفته شده، می‌شوند. از این رو وجود یک روش کارآمدتر زمینه را برای شبیه‌سازی بهتر در مقیاس نانو در حضور عوامل وادوس (زمینه‌ای که اخیراً مورد توجه قرار گرفته است)، مساعدتر می‌کند.

۳-۱ بخش‌بندی

بحث را با توصیف مفاهیم پایه در **فصل دوم** شروع می‌کنیم. ابتدا سیستم مزوسکوپی^۱ تعریف و انواع ترابرد در این نوع سیستم‌ها بیان می‌شود. سپس به بررسی ابعاد نمونه و چگونگی تشکیل آن با استفاده از گاز الکترونی دوبعدی می‌پردازیم. در ادامه معادله‌ی جرم مؤثر و طول‌های مشخصه (به عنوان معیاری برای تحقق سیستم مزوسکوپی) و هم‌چنین مدهای عرضی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

به عنوان نقطه‌ی شروع ایده‌ی اصلی، رهیافت لاندائتر-بوتیکر برای محاسبه‌ی ترابرد الکترونی در **فصل سوم** بیان می‌شود، اما پیش از آن به رساناهای بدون بازتاب و مقاومت رسانای بالستیک (ویژگی‌هایی که در نمونه‌ی مورد بررسی وجود دارد) پرداخته و جریان و مقاومت تماسی را به دست می‌آوریم. تصویر لاندائتر و تعمیم آن تحت عنوان رهیافت لاندائتر-بوتیکر پایان بخش این فصل خواهد بود.

^۱ Mesoscopic

روش بازهنجارش فضای واقعی، چارچوبی را فراهم می‌کند که اجازه‌ی بررسی سیستماتیک تغییرات یک سیستم فیزیکی را که در مقیاس‌های مختلف مشاهده شده‌است، می‌دهد. مدل تنگابست که معمولاً تقریب مناسبی برای معادله‌ی شرودینگر ارائه می‌کند، در **فصل چهارم** بیان می‌شود. ثابت شده که مدل تنگابست برای توصیف ساختارهای نواری مربوط به جامدات بسیار مفید است. بنابراین برای توصیف این مدل، فرمالیزم تابع گرین مطرح می‌شود. تابع گرین مفهوم قدرتمندی است که روشی ارزشمند برای محاسبه‌ی توابع تراگیسل به دست آمده از فرمول فیشر-لی^۱، فراهم می‌کند. در ادامه برای کاهش تعداد درجات آزادی سیستم‌های پیچیده و در نتیجه بررسی ساده‌تر آن‌ها، فرایند کاهش را به طور خلاصه معرفی می‌کنیم. در پایان این فصل مدل اصلی مورد استفاده در این پایان نامه، یعنی مدل دی‌آماتو-پاستاوسکی توصیف می‌شود.

فصل پنجم شامل محاسبات تحلیلی تابع تراگیسل با استفاده از فرمول فیشر-لی و مدل DP و هم‌چنین ترابرد پلارونی و نتایج مربوط به شبیه‌سازی آن است. و در پایان نتیجه‌گیری این پروژه در **فصل ششم** بیان شده است.

Fisher- Lee ^۱

فصل دوم

مفاهیم پایه

این فصل به تعریف مبانی و مفاهیم اولیه‌ی مورد نیاز برای بحث اصلی اختصاص داده شده است. علاوه بر سیستم‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی، سیستم‌های دیگری وجود دارند که مزوسکوپی نامیده می‌شوند. رفتار این سیستم‌ها بین سیستم‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی قرار دارد. یعنی نه رفتاری کاملاً ماکروسکوپی از خود نشان می‌دهند و نه کاملاً میکروسکوپی. در این فصل به تعریف و بررسی رفتار این سیستم‌ها می‌پردازیم.

۱-۲ سیستم‌های مزوسکوپی

رسانایی^۱ یک قطعه‌ی ماکروسکوپی از رابطه‌ی $g = \frac{\sigma A}{L}$ به دست می‌آید که در این رابطه σ رسانندگی^۲ ویژه (خاصیت ذاتی ماده‌ی رسانا)، A مساحت سطح مقطع عمود بر جهت جریان و L طول نمونه است. این رابطه در دو بعد به صورت $g = \frac{\sigma W}{L}$ در می‌آید که W عرض نمونه در جهت عمود بر جریان است. در این حالت پاسخ سیستم خطی خواهد بود. یعنی ولتاژی که به سیستم اعمال می‌شود آنقدر کوچک است که با آن رابطه‌ی خطی دارد و با ثابت g نشان داده می‌شود. برای یک سیستم رسانای همگن، تانسور رسانندگی σ چگالی جریان را به میدان

^۱ conductance
^۲ conductivity

الکتریکی مربوط می‌سازد $J = \sigma E(r)$. این معادلات موضعی هستند، به این معنا که چگالی جریان در نقطه‌ی r تنها به میدان در آن نقطه بستگی دارد. برای تحقق این موضوع، میدان الکتریکی نباید در فواصلی که با مسافت آزاد میانگین قابل مقایسه هستند، تغییرات چشم‌گیر داشته باشد [۵].

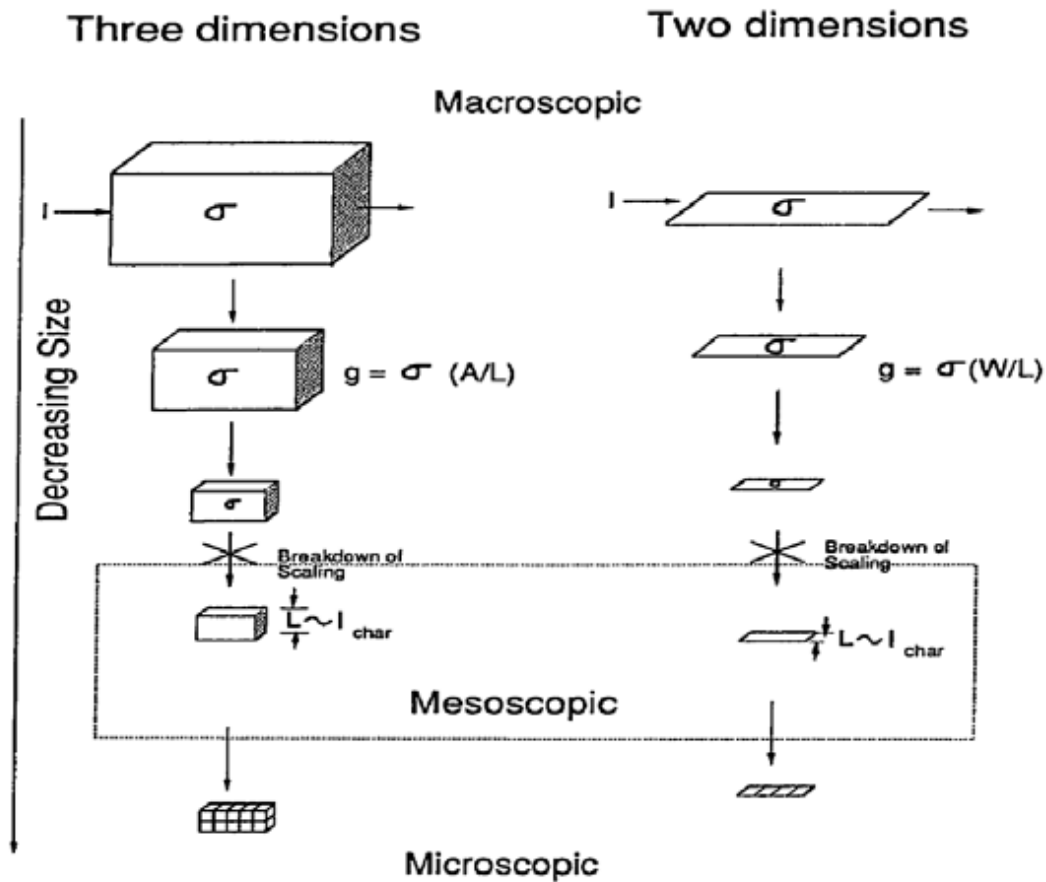
وقتی که ابعاد نمونه را کوچک می‌کنیم این طور به نظر می‌رسد که با کوچک شدن L رسانایی به سمت نامتناهی میل می‌کند اما در عمل چنین اتفاقی نمی‌افتد، بلکه رسانایی خلاف انتظار، به عدد متناهی G_C میل می‌کند. در این حالت می‌گوییم مقیاس رفتار ماکروسکوپی (رفتار اهمی) در اندازه‌ی کوچک زیر میکرونی دچار شکست می‌شود. در فیزیک به چنین سیستم‌هایی، مزوسکوپی (واژه‌ای که از مکانیک آماری قرض گرفته شده است [۶]) می‌گویند. زمانی که اندازه‌ی نمونه (مقیاس طول تغییرات میدان) در محدوده‌ی پاسخ خطی با طول پراکندگی کشسان و ناکشسان قابل مقایسه باشد، فرض موضعی بودن شکسته می‌شود. در این حالت همان طور که در شکل ۲-۱ نشان داده شده‌است، ابعاد نمونه بین حالت ماکروسکوپی و میکروسکوپی، یعنی در محدوده‌ی چند ده سلول واحد شبکه قرار می‌گیرد.

رفتار اهمی زمانی دچار شکست می‌شود که ابعاد نمونه با برخی از طول‌های مشخصه از جمله مسافت آزاد میانگین (L_m) یا طول همدوسی فاز (L_ϕ)، قابل مقایسه باشد. به بیان دیگر، فیزیک ترابرد الکترونی زمانی مزوسکوپی گفته می‌شود که: (۱) طول موج دو بروی وابسته به الکترون‌ها، (۲) مسافت آزاد میانگین و (۳) طول همدوسی فاز^۱ با اندازه‌ی نمونه قابل مقایسه باشد.

در رژیم مزوسکوپی، تمام درک ما از ترابرد الکترونی می‌شکند و آثار جالبی پدیدار می‌گردد. به عنوان نمونه، رسانایی به جای تغییرات یکنواخت، پرش یا گام‌هایی بر حسب واحد $G_C = 2e^2/h$ خواهد داشت که یک ویژگی کلی و مستقل از نوع ماده است. پدیده‌ی دیگری که می‌توان نام برد، آثار تداخلی در حلقه‌های مزوسکوپی و تنظیم آنها توسط میدان مغناطیسی (نوسانات آهارانوف-بوهم) و پدیده‌های جالب دیگر در نقاط کوانتومی همچون اثر کوندو^۲ و غیره هستند [۷].

^۱ Phase coherence length

^۲ Kondo effect



شکل ۱-۲: مقیاس بندی ترابرد الکترونی. در سیستم‌های ماکروسکوپی، رسانایی g به صورت هندسی با رسانندگی ویژه‌ی موضعی مقیاس گذاری می‌شود. این مقیاس بندی در رژیم مزوسکوپی دچار شکست می‌شود، یعنی زمانی که اندازه‌ی نمونه با طول‌های مشخصه قابل مقایسه باشد. رژیم میکروسکوپی در محدوده‌ی سلول‌های واحد منفرد شبکه‌ی بلوری است [۶].

نظریات اولیه‌ی مکانیک کوانتومی در زمینه‌ی ترابرد الکترونی در انبوهه‌ی مواد ماهیتاً نیمه تجربی و از دو گام تشکیل شده بود: (۱) الکترون‌ها در تمام حالات بلاخ توسط نیروهای خارجی شتاب می‌گیرند و سپس توسط ناخالصی‌ها یا فونون‌ها میان حالات بلاخ پراکنده می‌شوند. (۲) فرایندهای تعادلی با استفاده از احتمال اشغال مورد بررسی قرار می‌گرفت که شامل هیچ فرایند هم‌دوسی نبود. در این رهیافت فرض می‌شد که کل فاز در طی پراکندگی از بین می‌رود که در زمینه‌ی ترابرد الکترونی در رساناهایی مزوسکوپی رد می‌شود و نیاز به دیدگاه جدیدی برای درک ترابرد هم‌دوس را روشن می‌سازد. اولین گام‌ها در این راستا توسط لاندائتر [۸]، بوتیکر [۹] و سپس توسط ایمری [۱۰] برداشته شد.

۱-۱-۲ ترابرد الکترونی در سیستم‌های مزوسکوپی

نمونه‌ی مزوسکوپی مورد نظر همان چیزی است که معمولاً در انجام آزمایش‌ها بکار گرفته می‌شود که شامل یک گاز دوبعدی الکترونی (۲-DEG) است و در سطح مشترک یک ساختار چندگن، اغلب از نوع $GaAs - AlGaAs$ تشکیل می‌شود. این گاز دوبعدی الکترونی ویژگی‌های مطلوب زیادی در مقایسه با فیلم‌های نازک دارد، از جمله این که چگال الکترونی آن خیلی پایین ($\sim 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) است که از بیرون با استفاده از الکترودهای درگاهی^۱ قابل کنترل است و این به معنای طول موج فرمی بزرگ ($\sim 40 \text{ nm}$) می‌باشد که قابل مقایسه با اندازه‌ی یک نانو- نمونه است. هم‌چنین مسافت آزاد میانگین آن در دمای پایین ($\sim 1 \text{ k}$) خیلی بزرگ ($\sim 10 \mu\text{m}$) و آثار تداخلی کوانتومی در سرتاسر نمونه گسترده شده است. در کل ترابرد کوانتومی در یک نمونه‌ی مزوسکوپی را می‌توان در یکی از سه دسته‌ی اصلی: ترابرد کوانتومی پخشی^۲، ترابرد بالستیک^۳ و ترابرد میدان‌قوی قرار داد.

۲-۱-۲ ترابرد کوانتومی پخشی

اگر اندازه‌ی نمونه از مسافت آزاد میانگین خیلی بزرگ‌تر باشد ($W, L \gg L_m$)، آن‌گاه ترابرد پخشی خواهد بود که توسط ثابت پخشی $D = \frac{1}{p} v_f l$ توصیف می‌شود. پراکندگی در این حالت می‌تواند به دلیل ناخالصی‌ها، زبری سطوح داخلی یا بی‌نظمی‌های آلیاژی باشد. مسافت^۴ و فیلم‌های نازک فلزی دو مثال از سیستم‌های رسانای پخشی هستند. این رژیم به صورت کلاسیک توسط معادله‌ی درود^۵ توصیف می‌شود. زمانی که یک نمونه‌ی زیرمیکرونی تا دماهای پایین سرد می‌شود، طول هم‌دوسی فاز یا طول پراکندگی ناکشسان ($L_\phi = L_{in} = (D\tau_\phi)^{1/2}$) [۱۱] می‌تواند نسبت به ابعاد نمونه خیلی بزرگ شود. τ_ϕ نشان‌گر زمان واهلش فاز و عبارت است از مدت زمانی که طول می‌کشد تا فاز اولیه‌ی الکترون کاملاً تصادفی و مستقل از مقدار اولیه‌ی خود شود. در ترابرد کوانتومی پخشی با فاز هندسی هم‌دوس پدیده‌های جالبی رخ می‌دهد. تحت این شرایط آثار کوانتومی ظاهر می‌شوند و علت این امر این است که در این حالت حافظه‌ی فاز الکترونی از بین نمی‌رود:

Gate^۱
 Diffusive^۲
 Ballistic^۳
 MOSFET^۴
 Drude^۵

- یکی از پدیده‌هایی که در ترابرد کوانتومی همدوس مشاهده می‌شود، جای‌گزیدگی ضعیف^۱ است. الکترونی که از یک نقطه‌ی اختیاری p درون رسانا شروع به حرکت پخشی می‌کند، با احتمال کمی به نقطه‌ی اولیه‌ی p باز می‌گردد. اگر این مسیر بسته از L_ϕ کوچک‌تر باشد، تداخل سازنده با حلقه‌ی وارونی زمانی^۲ ممکن خواهد بود. این شرط احتمال برگشتن الکترون به نقطه‌ی شروع را افزایش می‌دهد و منجر به تصحیحی در رسانایی ویژه می‌گردد که جای‌گزیدگی ضعیف نامیده می‌شود.
 - رساناهای فاز-همدوس در رژیم پخشی، افت و خیزهایی در رسانایی به صورت تابعی از میدان مغناطیسی یا انرژی فرمی از مرتبه‌ی e^2/h (در دمای صفر) از خود نشان می‌دهند که مستقل از اندازه‌ی نمونه و مقدار بی‌نظمی است [۱۲]. این افت و خیزهای جهان‌شمول رسانایی^۳ (UCF)، کاملاً تجدیدپذیر است و گاهی به عنوان یک "اثر انگشت" برای نمونه تلقی می‌شود.
- اگرچه UCF تناوبی نیست، افت و خیزهای تناوبی در ساختارهای حلقوی کوچک‌تر از L_ϕ به دلیل شار مغناطیسی محصور خوش‌تعریف در حلقه مشاهده می‌شود. به این افت و خیزها نوسانات آهارانوف-بوهم گفته می‌شود که با تناوب h/e در میدان مغناطیسی مشاهده می‌شوند [۱۳].

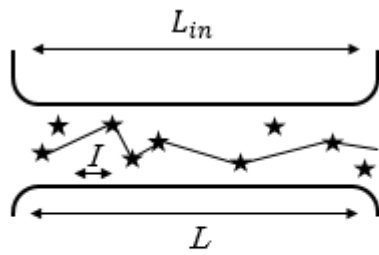
۲-۱-۳ ترابرد بالستیک

در حالی که ترابرد پخشی در ابعاد بسیار بزرگ‌تر از مسافت آزاد میانگین توصیف می‌شود، ترابرد بالستیک زمانی تحقق می‌یابد که اندازه‌ی نمونه از طول پراکندگی کوچک‌تر باشد. در این حالت رسانا باید خیلی تمیز باشد تا پراکندگی تنها بر اثر پتانسیل ساختاری مرز نمونه باشد (شکل ۲-۲-b). اگر دما به اندازه‌ی کافی پایین باشد ترابرد بالستیک، فاز-همدوس نیز هست. ترابرد کوانتومی در این رژیم را می‌توان به خوبی با استفاده از رهیافت لاندائتر توضیح داد که بعداً به آن خواهیم پرداخت.

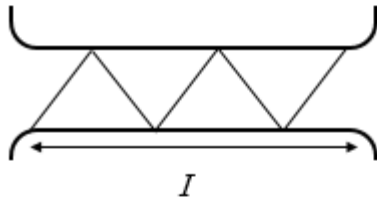
^۱ Weak localization

^۲ Time-reversed

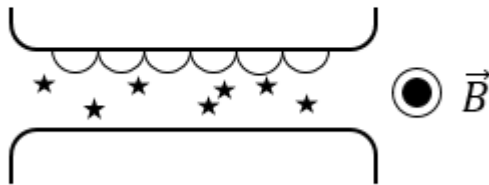
^۳ Universal Conductance Fluctuations



الف) ترابرد کوانتومی پخشی



ب) ترابرد بالستیک



ج) ترابرد میدان-قوی

شکل ۲-۲: سه ترابرد مورد بررسی در سیستم‌های مزوسکوپی. الف) ترابرد کوانتومی پخشی، ابعاد نمونه (W, L) از مسافت آزاد میانگین ($l \equiv L_m$) خیلی بزرگ‌تر و از طول همدوسی فاز ($L_\phi \equiv L_{in}$) کوچک‌تر است. ب) ترابرد بالستیک، ابعاد نمونه از مسافت آزاد میانگین کوچک‌تر است بنابراین دینامیک الکترونی به وسیله‌ی ساختار هندسی مرز نمونه تعیین می‌شود. ج) ترابرد میدان‌قوی، ترابرد الکترونی به حالت‌های لبه‌ای محدود می‌شود که به مدارهای جهشی کلاسیک متناظر است [۱۲].

۲-۱-۴ ترابرد میدان قوی

با کشف اثر کوانتومی هال [۱۴]، توجه زیادی به مطالعه روی گازهای الکترونی دوبعدی در حضور میدان مغناطیسی قوی جلب شد. در این صورت طیف انرژی به صورت *ترازهای لانداو*^۱ در می‌آید. هرگاه تراز فرمی به اندازه‌ی کافی از توده‌ی انرژی ترازهای لانداو دور باشد، ترابرد کوانتومی با مدهای معدود در حوزه‌ی مقیاس طول‌های ماکروسکوپی به دست می‌آید. در نمونه‌های ماکروسکوپی با ابعاد بزرگ‌تر از L_ϕ ، ترابرد موضعی است و توسط تانسور دوبعدی مقاومت ویژه تعریف می‌شود:

$$\rho = \begin{pmatrix} \rho_{xx} & \rho_{xy} \\ \rho_{yx} & \rho_{yy} \end{pmatrix} \quad (1-2)$$

^۱ Landau levels

در اثر کوانتومی هال صحیح مقاومت‌ها به صورت

$$\rho_{xy} = -\rho_{yx} = \frac{h}{e^2 \nu} \quad (2-2)$$

$$\rho_{xx} = \rho_{yy} = 0 \quad (3-2)$$

کوانتیده می‌شوند. ρ_{xx} و ρ_{xy} به ترتیب مقاومت هال و مقاومت طولی صفرشونده و ν عدد اشغال ترازها است. هنگامی که تراز فرمی به توده‌ی انرژی ترازهای لاندائو می‌رسد، ρ_{xx} مقداری متناهی می‌شود و ρ_{xy} عددی بین ترازهای کوانتیده به خود می‌گیرد.

در نمونه‌هایی که یک یا چند بعد از سیستم با طول همدوسی فاز قابل مقایسه باشد، دیگر نمی‌توان چنین تانسور موضعی را تعریف کرد. مقاومت‌ها و رسانایی در این رژیم کاملاً بنیادی و با استفاده از رهیافت لاندائو-بوتیکر محاسبه می‌شوند. ترابرد در این حالت به شکل حالت‌های تراز فرمی محدود به لبه‌های نمونه (2-DEG) در می‌آید که متناظر با مدارهای جهشی^۱ نشان داده شده در شکل است. در نهایت متذکر می‌شویم که مقیاس طول در فیزیک مزوسکوپی به عوامل زیادی هم‌چون دما و خلوص نمونه بستگی دارد. برای مثال این مقیاس می‌تواند از چند نانومتر تا یا حتی بیشتر تغییر کند. از این رو فیزیک مزوسکوپی محدود به علم نانو نمی‌شود، بلکه ممکن است در حوزه‌ی میکروعلم نیز قرار بگیرد. به عنوان نمونه پدیده‌ی کوانتومی هال می‌تواند در نمونه‌های نسبتاً بزرگ دیده شود.

۲-۲ گاز الکترونی دوبعدی

گاز الکترونی ایده‌آل نمونه‌ای است که در آن الکترون‌ها تنها در دو جهت (مثلاً x و y) آزادی حرکت دارند و در جهت دیگر کاملاً محبوس‌اند. در سیستم‌های واقعی با بعد بسیار کوچک، این حبس هرگز کامل نخواهد بود. به عنوان نمونه، حرکت الکترون در راستای z تنها در بازه‌ی کوچکی از z که با طول موج دوبروی الکترون قابل قیاس است، محدود خواهد بود. این محدودیت ناقص منجر به کوانتس انرژی الکترونی خواهد شده که معمولاً بیش از یک تراز انرژی را مجاز می‌سازد. گاز الکترونی دوبعدی ایده‌آل تنها در شرایطی که الکترون فقط در یکی از ترازهای انرژی قرار گیرد، محقق خواهد شد. بنابراین سیستم‌های واقعی کوچک‌بعد، با سیستم ایده‌آل تفاوت‌هایی خواهند داشت. چند ساختار چندگن کوانتومی که در آن‌ها الکترون در یک یا چند بعد محبوس و در ابعاد دیگر آزاد است عبارتند از: