٨٧/١/١٠١٠٥١
٨٧/١٠/٧

بسم الله الرحمن الرحيم

١٠٨٠٦٩

دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی فیزیک گرایش اتمی مولکولی

حالت‌های درهم‌تنیده و اثرهای غیرکلاسیک تداخل کوانتومی در سامانه‌های دواتمی

استاد راهنما:

دکتر محمد حسین نادری

پژوهشگر:

سحر بصیری اصفهانی

۱۳۸۷ /۹/ ۲۳

شهریورماه ۱۳۸۷

۱۰۸۰۶۹

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات
و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه
متعلق به دانشگاه اصفهان است.

۱۳۸۷ /۹/ ۲۴

شیوه نگارش پایان نامه
رعایت شده است
تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان

دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی فیزیک گرایش اتمی مولکولی خانم سحر بصیری اصفهانی تحت عنوان

حالت‌های درهم‌تنیده و اثرهای غیرکلاسیک تداخل کوانتومی در سامانه‌های دواتمی

در تاریخ ۸۷/۶/۲۵ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه .....عالی..... به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر محمدحسین نادری با مرتبه ی علمی ..استادیار.. امضا

۲- استاد داور داخل گروه دکتر محمود سلطان الکتابی با مرتبه ی علمی ..استاد.. امضا

۳- استاد داور خارج از گروه دکتر منصور حقیقت با مرتبه ی علمی ..دانشیار.. امضا

۱۳۸۷ /۹/ ۲۳

امضای مدیر گروه

گروه فیزیک
ISFAHAN UNIV PHYSICS DEPT

سپاسگزاری

آفریدگار مهربانم را حمد و سپاس می گویم که به ما قدرت اندیشیدن و توان پویایی را عطا فرمود. خدای را سپاسگزارم که توانستم در محیطی مطلوب و در محضر اساتیدی فرزانه کسب علم کنم.

از استاد گرانقدر و فرزانه‌ام جناب آقای دکتر نادری بسیار سپاسگزارم که راهنمایی این رساله را تقبل فرمودند و در طی مراحل انجام آن با صرف وقت و حوصله‌ی فراوان مرا از نظارت‌های سودمند و پیشنهادهای ارزشمند خود بهره‌مند ساختند و زندگی علمی‌ام را جهت بخشیدند. امید آن دارم که با استفاده از راهنمایی‌های ایشان بتوانم عضو کوچکی از جامعه‌ی علمی فیزیک شوم.

از حمایت‌های بی‌دریغ و کمک‌های محبت‌آمیز استاد گرامی جناب آقای پروفسور سلطان‌الکتابی نهایت تشکر را دارم و از ایشان و همچنین از جناب آقای دکتر حقیقت که زحمت مطالعه و داوری این پایان‌نامه را قبول فرمودند قدردانی می کنم.

از تمام دوستان عزیز و دانشجویان گرامی که مرا در انجام این رساله همراهی کردند سپاسگزارم.

تقدیم به

پدر و مادر بسیار عزیزم که در راه تعلیم و تعلم من از هیچ کوششی دریغ ننموده و همواره مشوق من بوده‌اند و حضورشان گرمابخش و روشنی‌بخش زندگی‌ام است.

همسر بسیار مهربانم که طی دوران تحصیلم صبر و بردباری پیشه کرد و همواره یار و همراهم بوده و حضور پرافتخارش زندگی‌ام را قرین شادی و نشاط کرده‌است.

خواهران خوب و عزیزم که فرشتگان زیبای صداقتند و کلام و رفتار پرمهرشان بزم زندگی‌ام را لبریز از شور و دنیایم را عطرآگین نموده‌است.

چکیده

در این رساله، با در نظر گرفتن سامانه‌های برهم‌کنشی متشکل از دو اتم دوترازی و میدان الکترومغناطیسی کوانتیده به مطالعه‌ی اثرهای غیرکلاسیک پادگروهه شدن فوتون‌ها و چلاندگی مؤلفه‌های کوادراتوری میدان تابشی می‌پردازیم. علاوه‌براین، اثر همبستگی کوانتومی میان دو اتم را در تولید ویژگی‌های غیرکلاسیک مزبور بررسی می‌کنیم و به مطالعه‌ی شرایط لازم برای وقوع تداخل کوانتومی در یک سامانه‌ی دو اتمی و نقش آن در کنترل آهنگ گسیل خود به خود سامانه‌ی مزبور می‌پردازیم. براین اساس، ضمن استخراج معادله‌ی حرکت عملگر چگالی سامانه‌ی برهم‌کنشی به توصیف شیوه‌های الگوسازی سامانه‌های دو اتمی در حضور تابش الکترومغناطیسی می‌پردازیم. با درنظر گرفتن سامانه‌ی دو اتمی به عنوان چشمه‌ی تابش غیرکلاسیک به مطالعه‌ی ارتباط میان درهم‌تنیدگی دو اتمی و حالت‌های غیرکلاسیک میدان تابشی حاصل از تداخل کوانتومی گذارها در تابش فلورسان اتمی می‌پردازیم و نشان می‌دهیم که امکان وقوع هر دو پدیده‌ی غیرکلاسیک پادگروهه شدن فوتون‌ها و چلاندگی در تابش فلورسان دو اتمی وجود دارد. به‌علاوه، در مورد اثر برهم‌کنش دوقطبی–دوقطبی میان اتم‌ها بر هر دوپدیده‌ی غیرکلاسیک مزبور بحث می‌کنیم. نشان می‌دهیم درصورتی‌که میزان وادنیدگی بسامد لیزر نسبت به بسامد گذار اتمی با انرژی برهم‌کنش دوقطبی–دوقطبی برابر باشد پادگروهه شدن فوتون‌ها و چلاندگی مؤلفه‌های کوادراتوری میدان تقویت می‌شوند. بیشینه‌ی مقدار چلاندگی در وضعیت دو اتم برهم‌کنشی نسبت به اتم‌های غیر برهم‌کنشی کاهش می‌یابد و برهم‌کنش دوقطبی–دوقطبی بسیار قوی اثر چلاندگی را به صفر کاهش می‌دهد. در ادامه، با توجه به اهمیت طرحواره‌های الکترودینامیک کوانتومی درون کاواک، که در آنها جفت‌شدگی قوی اتم‌ها با مد کاواک به کاهش واهمدوسی حاصل از گسیل خود به خود می‌انجامد، یک سامانه‌ی برهم‌کنشی متشکل از دو اتم دو ترازی و میدان تک مد کوانتیده‌ی درون یک کاواک بدون اتلاف را در نظر می‌گیریم. در غیاب برهم‌کنش دوقطبی–دوقطبی تحول دینامیکی ویژگی‌های غیرکلاسیک میدان کاواک مانند وقوع آمار زیرپواسونی و کاهش نوفه‌ی کوانتومی مؤلفه‌های کوادراتوری را محاسبه می‌کنیم. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که هر دو ویژگی غیرکلاسیک مزبور به درجه و شکل درهم‌تنیدگی اولیه‌ی اتم‌ها و همچنین تعداد متوسط فوتون‌های میدان اولیه بستگی دارند. سرانجام با توجه به اهمیت فراوان حالت‌های درهم‌تنیده‌ی دو اتمی به مرور برخی شیوه‌های ممکن برای آشکارسازی درهم‌تنیدگی دو اتمی می‌پردازیم.

واژه‌های کلیدی: سامانه‌های دو اتمی، تداخل کوانتومی، درهم‌تنیدگی کوانتومی، اثرهای غیرکلاسیک جمعی

فهرست مندرجات

۱ نگرش کلی بر مفاهیم اساسی در سامانه‌های دو اتمی ۱

۱.۱ مقدمه ۱

۲.۱ تداخل کلاسیک تابش‌های اپتیکی و همدوسی ۲
۱.۲.۱ تداخل مرتبه‌ی اول ۲
۲.۲.۱ تداخل مرتبه‌ی دوم ۵

۳.۱ تداخل کوانتومی تابش‌های اپتیکی و همدوسی ۶

۴.۱ تداخل کوانتومی در سامانه‌های اتمی ۸

۵.۱ درهم‌تنیدگی کوانتومی حالت‌های خالص و ناخالص ۱۱

۶.۱ آنتروپی به‌عنوان سنجه‌ی میزان آمیختگی یک حالت ۱۳
۱.۶.۱ آنتروپی فون‌نویمن ۱۳
۲.۶.۱ خلوص یا آنتروپی خطی ۱۴

۷.۱ تعیین میزان درهم‌تنیدگی یک حالت خالص با استفاده از آنتروپی خطی . ۱۵

۸.۱ آنتروپی فون‌نویمن به‌عنوان سنجه‌ی میزان درهم‌تنیدگی یک حالت خالص ۱۶

۹.۱ حالت‌های غیرکلاسیک میدان تابشی ۱۶

۱.۹.۱ پادگروهه شدن فوتون‌ها ۱۷
۲.۹.۱ چلاندگی مؤلفه‌های کوادراتوری میدان ۱۸

۲ بررسی تحول دینامیکی سامانه‌های دواتمی در حضور تابش الکترومغناطیس درون کاواک ۲۳

۱.۲ مقدمه ۲۳

۲.۲ تحول سامانه‌ی دواتمی در حضور میدان تک مد کاواک ۲۴
۱.۲.۲ تحول دینامیکی حالت سامانه ۲۴
۲.۲.۲ دینامیک زیرسامانه‌ها ۲۶

۳.۲ تحول سامانه‌ی دواتمی در حضور میدان خلاء الکترومغناطیسی ۲۹
۱.۳.۲ رهیافت عملگر چگالی ۳۰

۳ شرایط لازم برای وقوع تداخل کوانتومی در یک سامانه‌ی دواتمی و نقش آن در کنترل گسیل خودبه‌خود ۴۱

۱.۳ مقدمه ۴۱

۲.۳ دو اتم برهم‌کنش کننده ۴۲

۳.۳ حالت‌های درهم‌تنیده‌ی دو اتم یکسان و کنترل گسیل خودبه‌خود ۴۳

۴.۳ حالت‌های درهم‌تنیده‌ی دو اتم نایکسان و کنترل گسیل خودبه‌خود ۵۰
۱.۴.۳ وضعیت $\Delta \neq 0$ و $\Gamma_1 = \Gamma_2$ ۵۱
۲.۴.۳ وضعیت $\Delta = 0$ و $\Gamma_1 \neq \Gamma_2$ ۵۵

۵.۳ زنش کوانتومی در شدت تابش گسیل شده از دو اتم نایکسان ۶۰
۱.۵.۳ وضعیت $\Delta \neq 0$، $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma$ و $\Delta << \Omega_{12}$ ۶۲
۲.۵.۳ وضعیت $\Delta = 0$، $\Gamma_1 \neq \Gamma_2$ و $\Gamma_1, \Gamma_2 << \Omega_{12}$ ۶۴

۴ بررسی ارتباط میان درهم‌تنیدگی دو اتمی و تحول دینامیکی ویژگی‌های غیرکلاسیک میدان ۶۷

۱.۴ مقدمه ۶۷

۲.۴ اثرهای غیرکلاسیک جمعی در تابش فلورسان حاصل از سامانه‌ی دو اتمی ۶۸
۱.۲.۴ پادگروهه شدن فوتون‌ها ۶۸
۲.۲.۴ چلاندگی مؤلفه‌های کوادراتوری ۷۶

۳.۴ ویژگی‌های غیرکلاسیک میدان تک مد کاواک در برهم‌کنش با دو اتم دوترازی درهم‌تنیده ۸۲
۱.۳.۴ توصیف الگوی برهم‌کنش ۸۳
۲.۳.۴ آمار شمارش فوتون‌های میدان درون کاواک ۸۶
۳.۳.۴ نوفه‌ی کوانتومی مؤلفه‌های کوادراتوری میدان درون کاواک . ۹۲

۵ مطالعه‌ی نظری روش‌های آشکارسازی درهم‌تنیدگی اتمی در سامانه‌های دو اتمی ۹۵

۱.۵ مقدمه ۹۵

۲.۵ توزیع زاویه‌ای شدت میدان فلورسان تابشی ۹۶

۳.۵ الگوی تداخلی با نوار مرکزی تاریک ۹۷

۴.۵ گسیل خود به خود دو اتم دو ترازیِ درهم‌تنیده ۱۰۳
۱.۴.۵ توصیف الگوی مبتنی بر گسیل خود به خود ۱۰۳
۲.۴.۵ ارتباط آهنگ گسیل خود به خود با درهم‌تنیدگی اتم‌ها ۱۰۶
۳.۴.۵ ویژگی‌های گسیل خود به خود حالت‌های دو اتمی بل ۱۱۲

جمع بندی ۱۱۶

مراجع ۱۱۸

پیشگفتار

فراهم‌سازی حالت‌هایی از میدان تابشی که از خود ویژگی‌های غیرکلاسیک به نمایش می‌گذارند در اپتیک کوانتومی همواره توجه بسیاری را به‌خود جلب کرده است. درواقع، استفاده از حالت‌های غیرکلاسیک می‌تواند به‌شکل مؤثری نوفه‌های کوانتومی را که اثر مخربی بر فرایند اندازه‌گیری دارند کاهش دهد. حالت‌های با آمار زیر پواسونی و حالت‌های چلانده برخی از مهم‌ترین انواع حالت‌های غیرکلاسیک هستند.

در سال ۱۹۵٦ هانبری—براون[۱] و توئیس[۲] برای نخستین بار پدیده‌ی کلاسیک گروهه‌شدن[۳] فوتون‌های حاصل از دو چشمه‌ی نور را با به‌کارگیری یک تداخل‌سنج ستاره‌ای به نمایش گذاردند[۱]. از طرفی، پدیده‌ی غیر کلاسیک پادگروهه شدن فوتون‌ها نخستین بار در تابش فلورسان اتم‌های سدیم در یک باریکه‌ی اتمی مشاهده شد [۲]. پس از آن، با پیشرفت شیوه‌های به‌دام اندازی تک اتم و تک یون امکان اندازه‌گیری همبستگی کوانتومی فوتون‌ها و تحقیق پادگروهه شدن آنها در سامانه‌ی اتم به‌دام افتاده [۳] و سامانه‌های الکترودینامیک کوانتومی درون کاواک [۴] فراهم آمد. درسال‌های اخیر باتوجه به‌کاربرد چشمه‌های تک فوتونی در رمزنگاری کوانتومی و همچنین کاربرد پادگروهه شدن فوتون‌ها در حوزه‌ی مطالعات شیمی‌فیزیک [۵] بررسی‌های نظری و آزمایش‌های متعددی در زمینه‌ی تولید اثر غیرکلاسیک پادگروهه‌شدن فوتون‌ها صورت گرفته‌است [۶، ۷، ۸، ۹]. موضوع چلاندگی نوفه‌های کوانتومی مؤلفه‌های کوادراتوری میدان نیز از زمان کارهای نظری والس [۴] و همکارانش در زمینه‌ی شیوه‌های کاهش نوفه و مطالعه‌ی آمار فوتونی در تابش فلورسان بازآوائیده‌ی یک اتم دوترازی [۱۰] و همچنین سامانه‌های جمعی دو یا چند اتمی [۱۱] مورد بررسی قرار گرفت. پس از آن، شیوه‌های تجربی موفقیت‌آمیزی در زمینه‌ی تولید حالت‌های چلانده‌ی میدان تابشی از طریق روش‌های اپتیک غیرخطی ابداع شد [۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱٦]. پدیده‌ی چلاندگی در دو دهه‌ی اخیر توجه فراوانی را به‌خود جلب کرده است. دستیابی به میدان تابشی چلانده در

---

[۱] Hanbury-Brown

[۲] Twiss

[۳] bunching

[۴] Walls

زمینه‌های مختلف اپتیک کوانتومی نظیر ارتباطات نوری [۱۸ ،۱۷]، بیناب‌نمایی و حسگرهای نوری [۲۰ ،۱۹] و افزایش حساسیت آشکارسازهای تداخلی برای اندازه‌گیری امواج گرانشی [۲۱] از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. آشکارسازی حالت‌های چلانده‌ی میدان تابشی با استفاده از روش بسامدآمیزی [۵] امکان‌پذیر است [۲۲]. به دنبال موفقیت‌های تجربی در زمینه‌ی تولید و آشکارسازی اثرهای غیر کلاسیک مزبور در سامانه‌های کوانتومی، به‌ویژه سامانه‌ی برهم‌کنشی اتم—میدان، موضوع تحقق فیزیکی حالت‌هایی که از خود تداخل کوانتومی و در هم‌تنیدگی به‌نمایش می‌گذارند توجه فزاینده‌ای را به‌خود جلب کرد. درواقع، معلوم شده است که بروز آثار غیرکلاسیک در سامانه‌های کوانتومی را باید به‌عنوان پیامد مستقیم تداخل کوانتومی در فضای فاز به‌حساب آورد [۲۳]. پدیده‌ی تداخل، ساده ترین پدیده‌ای است که طبیعت موجی تابش و همبستگی بین میدان‌های تابشی را آشکار می کند. تداخل اپتیکی یک روش قدیمی است که مطالعات مربوط به آن با آزمایش‌های یانگ و مایکلسون آغاز شد.در این دو آزمایش، با تکیه بر طبیعت موجی تابش، تشکیل نوارهای تداخلی به ترتیب به عنوان نمودی از همدوسی فضایی و همدوسی زمانی تعبیر می شود.

با تولد مکانیک کوانتومی، خواص ذره ای نور در بسیاری از آزمایش ها نشان داده شد و در پی آن شیوه‌ی تفسیر آزمایشهای تداخل تغییر کرد. به علاوه معلوم شد تداخل پرتوهای نوری مستقل پیامد همبستگی‌های مرتبه‌های بالاتر بین میدانهای تابشی است. در چارچوب برخی تعبیرهای مکانیک کوانتومی، که توسط دیراک ارائه شد[۲۴]، تشکیل گرته ی تداخل با تکیه بر ماهیت ذره ای تابش، به عنوان پیامدی از برهم نهی دامنه های احتمال قلمداد می شود. علاوه بر این، معلوم شده است[۲۲] که پدیده ی تداخل نه تنها برای تابش های حاصل از چشمه های اپتیکی قابل مشاهده است بلکه میدان های تابشی حاصل از گذارهای کوانتومی در سامانه های چند اتمی و همچنین سامانه‌های تک اتمی چند باجه‌ای[۶] (مانند اتم های سه ترازی با پیکربندی های بینابی Λ و V) نیز پدیده ی تداخل را از خود به نمایش می گذارند. جنبه ی اساسی این پدیده ی تداخل، که با عنوان تداخل کوانتومی از آن نام برده می شود، بر هم نهی

[۵] homodyne detection
[۶] multichannel

دامنه های احتمال گذار میان حالت های اتمی است و آن را می توان توسط میدان های داخلی یا خارجی و حتی جفت شدگی حالت های اتمی با محیط اطراف (میدان خلاء الکترومغناطیسی) ایجاد کرد.

مطالعات مربوط به تداخل کوانتومی در سامانه های اتمی از اوایل دهه‌ی هفتاد قرن میلادی گذشته با مطالعات نظری آگاروال [۷] در زمینه ی تداخل کوانتومی در سامانه های اتمی [۲۵] آغاز شد. آگاروال نشان داد که آهنگ گسیل خود به خود از یک اتم برانگیخته‌ی سه ترازی تبهگن با پیکربندی V را می‌توان با استفاده از تداخل کوانتومی میان دو گذار اتمی تغییر داد. پس از آن، بررسی به سامانه های چند اتمی و اتم های چند ترازی گسترش داده شد و کاربردهای عملی متنوعی پیشنهاد شدند. مطالعات انجام یافته نشان دادند که تداخل کوانتومی در سامانه های اتمی می تواند به اثرهای فیزیکی جالب توجهی در زمینه ی کنترل ویژگی های اپتیکی سامانه های کوانتومی منجر شود که از آن میان، به ویژه می توان به پدیده هایی همچون شفافیت الکترومغناطیس القائیده [۲۶]، عمل لیزری بدون وارونی جمعیت [۲۷]، افزایش چشمگیر ضریب شکست محیط در غیاب جذب [۲۸]، و کاهش چشمگیر سرعت نور در محیط های اتمی [۲۹] اشاره کرد. علاوه بر این ها، تداخل کوانتومی به عنوان کارامدترین ساز و کار فیزیکی در فرایند تغییر و به ویژه سرکوب آهنگ گسیل خود به خود در سامانه های اتمی شناسایی شده است [۲۵]. کنترل آهنگ گسیل خود به خود، که به عنوان یکی از مهم ترین چشمه های نوفه کوانتومی به شمار می آید، در زمینه هایی همچون محاسبات کوانتومی و پردازش اطلاعات کوانتومی از اهمیت بسزایی برخوردار است [۳۰]. نشان داده شده است [۳۱] که در سامانه های اتمی، حضور تداخل کوانتومی به تشکیل حالت های کوانتومی بر هم نهیده منجر می شود، به طوری که این حالت ها را می توان از طریق تنظیم وکنترل گشتاورهای دو قطبی گذار یا دامنه و فاز میدان های تابشی خارجی اعمال شده بر سامانه ی اتمی دستکاری کرد و بدینسان آهنگ گسیل خود به خود حالتهای بر هم نهیده را به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش داد.

از سوی دیگر، در سال‌های اخیر پژوهش های نظری و جستجوی شیوه‌های تحقق تجربی حالت‌های کوانتومی درهم‌تنیده به عنوان یکی از محورهای اصلی مطالعات مربوط به اثرهای

---

[۷] Agarwal

غیرکلاسیک جمعی در سامانه‌های چنداتمی درآمده‌است [۳۲]. درهم‌تنیدگی کوانتومی که بدون شک یکی از جنبه‌های شگفت‌انگیز مکانیک کوانتومی به‌حساب می‌آید، نخستین بار توسط شرودینگر ضمن مطالعات وی در زمینه‌ی مبانی نظری مکانیک کوانتومی مطرح گردید [۳۳]. سامانه‌های چند ذره‌ای در هم‌تنیده، دارای این ویژگی جالب توجه هستند که نتایج حاصل از اندازه‌گیری برروی یک ذره‌را نمی‌توان مستقل از نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌هایی که برروی سایر ذرات سامانه انجام می‌شود، مشخص کرد. در سال‌های اخیر، موضوع درهم‌تنیدگی کوانتومی نه‌تنها در زمینه‌ی مطالعات بنیادی مکانیک کوانتومی از اهمیت اساسی برخوردار شده است بلکه در بسیاری از عرصه های کاربردی نوین همچون محاسبات کوانتومی [۳۴]، رمزنگاری کوانتومی [۳۵]، دوربری اطلاعات کوانتومی[۸] [۳۶]. و بیناب‌نمایی اتمی و مولکولی [۳۷، ۳۸] جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص داده است. در واقع، فراهم آوردن امکان دستکاری سامانه‌های کوانتومی در مقیاس تک اتم و تک فوتون، به منظور ذخیره‌سازی و انتقال اطلاعات به شیوه‌ای کنترل پذیر، تحقق کاربردهای مزبور را میسر ساخته است. فرایندهای ایجاد درهم‌تنیدگی میان اتم‌ها بایستی یک جفت‌شدگی همدوس قوی میان اتم‌ها ایجاد کنند و بدینسان اثر واهمدوسی و اتلاف در اثر برهم‌کنش با محیط اطراف را کاهش دهند. مشکل منزوی کردن اتم‌ها از محیط اطراف یکی از موانع اساسی برای تحقق کاربردهای عملی حالت‌های درهم‌تنیده است. محیط شامل مدهای میدان الکترومغناطیسی است که اتم‌ها را احاطه می‌کنند. این امر به واهمدوسی و در نتیجه از دست دادن اطلاعات ذخیره شده در سامانه می‌انجامد. به هر حال همان‌گونه که در این پایان‌نامه نشان خواهیم داد ویژگی‌های جمعی سامانه‌های چند اتمی می‌تواند گسیل خودبه‌خود را در مقایسه با وضعیت تک‌اتم تغییر دهد. تاکنون طرحواره‌های فیزیکی متنوعی برای تحقق حالت‌های درهم‌تنیده‌ی اتمی، مبتنی بر به‌دام‌اندازی و سردسازی شمار اندکی از اتم‌های خنثی، پیشنهاد شده است [۳۹]. اتم‌ها یا یون‌های سرد به‌دام افتاده اساساً بدون حرکت هستند و در یک فاصله‌ی مشخص و قابل کنترل از یکدیگر قرار می‌گیرند. این امر امکان مطالعه‌ی برهم‌کنش‌های بین اتمی را فراهم می‌آورد. علاوه براین، اتم‌های سرد به‌دام‌افتاده می‌توانند در حالت‌هایی با بیشینه‌ی درهم‌تنیدگی که از محیط اطراف منزوی هستند

[۸] quantum teleportation

فراهم شوند [۴۲، ۴۱، ۴۰]. دراین میان، به‌ویژه سامانه‌های دواتمی توجه فراوانی را به خود جلب کرده‌اند زیرا نتایج الگوهای نظری مربوط به‌این سامانه‌ها در برخی برپایش‌های تجربی الکترودینامیک کوانتومی درون کاواک تأیید شده‌است [۴۴، ۴۳، ۳۹].حالت‌های اَبَرتابنده[۹] و زیرتابنده[۱۰]، که به‌ترتیب متناظر با ترکیب متقارن و ترکیب پادمتقارن گشتاورهای دوقطبی اتمی هستند [۴۵]، و حالت‌های اتمی جفت‌شده [۴۶] نمونه‌های جالب توجهی از حالت‌های درهم‌تنیده‌ی اتمی به‌حساب می‌آیند که در فرایند تشکیل و آشکارسازی آنها علاوه بر تداخل کوانتومی میان گذارهای دواتم، همبستگی کوانتومی میان آن دو نیز به‌طور مؤثر دخالت دارد. حالت‌های متقارن با آهنگ گسیل خودبه‌خود افزایش یافته و حالت‌های پادمتقارن با آهنگ گسیل خودبه‌خود کاهش‌یافته فروافت می‌کنند. آهنگ گسیل خودبه‌خود کاهش یافته‌ی حالت پادمتقارن بیانگر جفت‌شدگی ضعیف این حالت با محیط اطراف است. در وضعیتی که فاصله‌ی اتم‌ها بسیار کوچکتر از طول‌موج اپتیکی باشد (الگوی دیک)، رخداد تداخل کوانتومی، به واجفتیدگی این حالت از محیط اطراف می‌انجامد و می‌توان آن‌را یک حالت عاری از واهمدوسی درنظر گرفت. درفضای آزاد منشأ اثرهای جمعی، برهم‌کنش میان اتم‌ها از طریق میدان خلأ است. در واقع، میدان تابشی گسیل شده از یکی از اتم‌ها روی گشتاور دوقطبی اتم دیگر اثر می‌گذارد. این امر منجر به یک اتلاف اضافی و همچنین جابه‌جایی ترازهای اتمی می‌شود که هر دو اثر به فاصله‌ی جدایی میان اتم‌ها بستگی دارند. از سوی دیگر درطرحواره‌های الکترودینامیک کوانتومی درون کاواک، اتم‌ها از طریق مد کاواک برهم‌کنش می‌کنند و در حد یک کاواک خوب (کاواک با سازه‌ی کیفیت Qی بزرگ) فوتون‌های تابش شده توسط یکی از اتم‌ها، تقریباً به‌طور سریع توسط اتم دیگر جذب می‌شوند. به‌علاوه جفت‌شدگی قوی اتم‌ها با مد کاواک مانع از این می‌شود که اتم‌ها به مدهای خلأ فوتون گسیل کنند و این به نوبه‌ی خود واهمدوسی را کاهش می‌دهد.

در این پایان‌نامه به بررسی سامانه‌های دواتمی می‌پردازیم. برهم‌کنش سامانه‌های دواتمی با میدان الکترومغناطیسی در اپتیک کوانتومی بسیار مورد توجه است. این موضوع برخاسته از این

---

[۹] superradiant
[۱۰] subradiant

واقعیت است که سامانه‌ی مزبور علاوه بر اینکه در تجربه تحقق پذیر است [۳۹، ۴۳، ۴۴، ۴۷] از دیدگاه کوانتومی نیز در زمره‌ی الگوهای حل‌پذیر اپتیک کوانتومی به‌شمار می‌آید. اگرچه برهم‌کنش یک سامانه‌ی دواتمی با میدان تابشی ساده‌ترین تعمیمی است که می‌توان برای الگوی جینز—کامینگز[۱۱] [۴۸]در نظر گرفت اما از آنجا که مطالعه‌ی سامانه‌های $\mathbb{N}$اتمی در حضور برهم‌کنش دوقطبی—دوقطبی و میدان رانشی دشوار است، لذا بررسی سامانه‌های دواتمی در بسیاری از موارد نسبت به سامانه‌های $\mathbb{N}$اتمی دارای برتری است. زیرا در بیشتر موارد امکان حل تحلیلی دقیق و بررسی جزئیات مسئله وجود دارد. به‌علاوه، بسیاری از نتایج حاصل از بررسی سامانه‌های دواتمی به‌راحتی قابل تعمیم به سامانه‌های چنداتمی هستند. از سوی دیگر، بررسی حالت‌های درهم‌تنیده‌ی سامانه‌های دواتمی بسیار مورد توجه است زیرا سامانه‌های مزبور می‌توانند نشان دهنده‌ی دو بیت کوانتومی [۱۲] (واحدهای ساختاری اساسی درگاه‌های کوانتومی[۱۳]) باشند. بنابراین، بررسی درهم‌تنیدگی تنها دوسامانه‌ی کوانتومی میکروسکوپیک برای ایجاد پروتکل‌های کوانتومی[۱۴] در پردازش اطلاعات کوانتومی ضروری است.

در این پژوهش، هدف اساسی مطالعه‌ی اثرهای غیرکلاسیک جمعی و حالت‌های درهم‌تنیده‌ی اتمی در سامانه‌های برهم‌کنشی متشکل از دو اتم و تابش الکترومغناطیسی است. در واقع، آنچه در این میان از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است همبستگی کوانتومی میان دو اتم و اثر آن بر الگوی تداخل تابش‌های حاصل از گذارهای کوانتومی در دواتم و همچنین درهم‌تنیدگی میان آن‌دو است. علاوه‌براین، در این پژوهش نقش تداخل کوانتومی در فرایند گسیل خودبه‌خود سامانه‌های دواتمی و ارتباط میان درهم‌تنیدگی اتمی و پدیدار شدن ویژگی‌های غیرکلاسیک میدان تابشی مانند پادگروهه شدن فوتون‌ها و چلاندگی مؤلفه‌های کوادراتوری میدان تابشی مورد توجه قرار می‌گیرد. به‌این منظور، ابتدا در فصل اول برخی مفاهیم و روابط اساسی را که در مطالعه‌ی سامانه‌های دواتمی به آنها نیاز داریم، به اختصار مرور می‌کنیم. از جمله‌ی این مفاهیم می‌توان به تداخل کوانتومی تابش‌های اتمی، حالت‌های درهم‌تنیده‌ی

[۱۱] Jaynes-Cummings
[۱۲] qubit
[۱۳] quantum gates
[۱۴] quantum protocols

دواتمی و حالت‌های غیرکلاسیک میدان تابشی اشاره کرد. پس از آن، به بررسی برخی ابزارهای نظری مورد نیاز برای توصیف برهم‌کنش اتم‌ها با میدان الکترومغناطیسی خواهیم پرداخت. از این‌رو در فصل دوم به‌منظور آشنایی باشیوه‌های الگوسازی این برهم‌کنش‌ها ابتدا یک سامانه‌ی برهم‌کنشی نوعی متشکل از دو اتم دوترازی و میدان تک‌مد را در حد یک کاواک خوب فرمول‌بندی و مطالعه می‌کنیم. سپس به منظور بررسی اثرهای تداخل کوانتومی در سامانه‌های اتمی، رهیافت عملگر چگالی را معرفی می‌کنیم و در بحث‌های بعدی بااستفاده از نتایج حاصل از حل معادله‌ی تحول عملگر چگالی به تحلیل دینامیک سامانه‌ی مورد نظر می‌پردازیم. در فصل سوم، با دردست داشتن ابزارهای لازم، به مطالعه‌ی شرایط عمومی کنترل آهنگ گسیل خودبه‌خود دریک سامانه‌ی دواتمی می‌پردازیم. کنترل گسیل خودبه‌خود حالت‌های اتمی درهم‌تنیده در نظریه‌ی اطلاعات کوانتومی همواره مورد توجه قرار گرفته‌است. لذا با درنظر گرفتن دو اتم دوترازی یکسان و همچنین دو اتم دوترازی نایکسان نشان می‌دهیم که توسط تداخلِ کوانتومی می‌توان گسیل خودبه‌خود را سرکوب ویا حتی متوقف کرد. در فصل چهارم با در نظر گرفتن سامانه‌ی دواتمی به عنوان چشمه‌ی میدان تابشی غیرکلاسیک، نقش برهم‌کنش‌های بین اتمی و همچنین درهم‌تنیدگی اتمی را در بروز آمار زیرپواسونی و چلاندگی یکی از مؤلفه‌های کوادراتوری میدان در تابش فلورسان اتمی مورد بررسی قرار می‌دهیم. در ادامه، با در نظر گرفتن سامانه‌ی برهم‌کنشی متشکل از دو اتم دوترازی و میدان تک‌مد کاواک اثر درجه و شکل درهم‌تنیدگی اولیه‌ی اتم‌ها را بر تحول دینامیکی ویژگی‌های غیرکلاسیک میدان تک‌مد کاواک برای دوحالت اولیه‌ی متفاوت میدان عددی و میدان همدوس بررسی می‌کنیم. سرانجام در فصل پنجم با توجه به اهمیت و کاربردهای گسترده‌ی حالت‌های درهم‌تنیده‌ی دواتمی به معرفی برخی شیوه‌های ممکن برای آشکارسازی درهم‌تنیدگی دواتمی می‌پردازیم.

فصل ۱

نگرش کلی بر مفاهیم اساسی در سامانه‌های دو اتمی

۱.۱ مقدمه

هدف اصلی در این فصل، مرور مختصری بر برخی مفاهیم و پدیده‌های فیزیکی است که در مطالعه‌ی سامانه‌های دو اتمی جمعی با آن‌ها مواجه می‌شویم. از میان این پدیده‌ها می‌توان به تداخل کوانتومی و اثرهای غیر کلاسیک جمعی مانند حالت‌های درهم‌تنیده‌ی سامانه‌های دو اتمی و حالت‌های غیرکلاسیک میدان تابشی حاصل از یک سامانه‌ی دو اتمی اشاره کرد که در این فصل به معرفی آن‌ها می‌پردازیم.

برای این منظور، ابتدا مفاهیم اصلی نظریه‌ی کلاسیک تداخل نوری را بیان و نقش همدوسی اپتیکی را تشریح می کنیم. با تکیه بر کوانتش دوم میدان الکترومغناطیسی، این مفاهیم را به نظریه‌ی کوانتومی گسترش می‌دهیم. سپس این مفاهیم را برای بررسی تداخل کوانتومی تابش در حالتی که چشمه‌های اپتیکی با چشمه‌های اتمی جایگزین شوند مورد استفاده قرار می‌دهیم. از سوی دیگر، اثرهای جمعی برای یک سامانه‌ی متشکل از دو یا چند اتم به تمام اثرهایی گفته می‌شود که برای توصیف آن‌ها نمی‌توان از خواص تک‌تک اتم‌های سامانه‌ی مرکب مورد بررسی به‌طور مجزا از هم استفاده کرد. این پدیده‌ها در بسیاری از جنبه‌های

مکانیک کوانتومی به چشم می‌خورند. به‌عنوان مثال، درهم‌تنیدگی یکی از جالبترین ویژگی‌های یک سامانه‌ی مرکب از دو یا تعداد بیشتری زیرسامانه است که اساس نظریه‌ی اطلاع رسانی کوانتومی را تشکیل می‌دهد و مشابه کلاسیک ندارد. در این فصل حالت‌های درهم‌تنیده در سامانه‌های دوتایی را معرفی می‌کنیم. سپس به‌طور مختصر به معرفی سنجه‌هایی که جهت تعیین میزان درهم‌تنیدگی یک حالت خالص معرفی شده‌اند می‌پردازیم. در پایان، دو اثر غیرکلاسیک پادگروهه‌شدن فوتون‌ها و چلاندگی در میدان تابشی را مطالعه می‌کنیم.

۲.۱ تداخل کلاسیک تابش‌های اپتیکی و همدوسی

تداخل اپتیکی عموماً به عنوان یک پدیده‌ی موجی کلاسیک در نظر گرفته می شود. با وجود این که نظریه‌ی کلاسیک و کوانتومی تداخل اپتیکی هر دو به سادگی وجود یک طرح تداخلی را در مرتبه‌ی اول تداخل توضیح می دهند اما آثار تداخلی مربوط به مرتبه‌های بالاتر نیز وجود دارند که طبیعت کوانتومی نور را از طبیعت موجی آن متمایز می کنند.

در توصیف کلاسیک پدیده‌ی تداخل، میدان ها توسط امواج تخت نمایش داده می شوند و تداخل نوری را می توان به عنوان پیامدی ازبر هم نهی دو یا چند موج نوری دانست که به گونه‌ای با هم ترکیب می‌شوند که توزیع انرژی نور حاصل، در فضا یکنواخت نباشد. بدینسان پدیده‌ی تداخل براساس وابستگی شدت نور حاصل به اختلاف راه نوری یا اختلاف فاز پرتوهای اولیه توصیف می شود.

۱.۲.۱ تداخل مرتبه‌ی اول

ساده ترین مثال برای نمایش تداخل اپتیکی مرتبه‌ی اول، آزمایش دو شکافی یانگ است. در این آزمایش، دو پرتو با دامنه‌های $\vec{E}_1(\vec{r}_1, t_1)$ و $\vec{E}_2(\vec{r}_2, t_2)$ که به ترتیب در محل دو شکاف با بردارهای مکان $\vec{r}_1$ و $\vec{r}_2$ تولید می شوند، در نقطه‌ی مشاهده‌ی P با بردار مکان $\vec{R}$ فرود می آیند. متوسط زمانی شدت حاصل از بر هم نهی دو میدان را که در نقطه‌ی P آشکار می‌شود می‌توان

به صورت زیر نوشت[۴۹]

$$\left\langle I(\vec{R},t)\right\rangle = |u_1|^2 \left\langle I_1(\vec{R}_1,t-t_1)\right\rangle + |u_2|^2 \left\langle I_2(\vec{R}_2,t-t_2)\right\rangle + 2Re\{u_1^* u_2 G^{(1)}(\vec{R}_1,t-t_1;\vec{R}_2,t-t_2)\}, \quad (۱-۱)$$

که در آن،

$$G^{(1)}(\vec{R}_1,t-t_1;\vec{R}_2,t-t_2) = \left\langle \vec{E}_1^*(\vec{R}_1,t-t_1).\vec{E}_2(\vec{R}_2,t-t_2)\right\rangle, \quad (۲-۱)$$

تابع همبستگی مرتبه‌ی اول بین میدان در مکان $\vec{R}_2$ و در لحظه‌ی $t-t_2$ و همیوغ مختلط میدان درمکان $\vec{R}_1$ و در لحظه‌ی $t-t_1$ است. در واقع، این تابع نشان دهنده‌ی میزان همبستگی بین دامنه‌های میدان $\vec{E}_1$ و $\vec{E}_2$ است که از دو شکاف سرچشمه می‌گیرند. به‌علاوه، $u_i = \frac{s_i}{R_i}$ یک مقدار ثابت و مختلط است که به هندسه و اندازه‌ی شکاف i ام بستگی دارد.

تابع همبستگی مرتبه‌ی اول بهنجار شده (تابع همدوسی مرتبه اول) به صورت زیر تعریف می شود[۴۹]

$$g^{(1)}(\vec{R}_1,t_1;\vec{R}_2,t_2) = \frac{G^{(1)}(\vec{R}_1,t_1;\vec{R}_2,t_2)}{\sqrt{G^{(1)}(\vec{R}_1,t_1;\vec{R}_1,t_1).G^{(1)}(\vec{R}_2,t_2;\vec{R}_2,t_2)}} = \frac{G^{(1)}(\vec{R}_1,t_1;\vec{R}_2,t_2)}{\sqrt{I_1(\vec{R}_1,t_1)I_2(\vec{R}_2,t_2)}}. \quad (۳-۱)$$

با توجه به نامساوی کوشی–شوارتز، این تابع شرط $0 \leq \left|g^{(1)}\right| \leq 1$ را برآورده می‌کند. از آن جا که تابع همبستگی مرتبه اول بهنجار شده، معیاری از میزان همدوسی چشمه‌ها است، غالباً به آن درجه‌ی همدوسی گفته می‌شود به طوری که اگر دو میدان ناهمدوس باشند، $g^{(1)} = 0$ است و اگر میدان‌ها کاملا همدوس باشند، $g^{(1)} = 1$ است. مقادیر میانی $g^{(1)}$ ($0 < \left|g^{(1)}\right| < 1$) نشان دهنده‌ی همدوسی جزئی است.

شدت میانگین $\left\langle I(\vec{R},t)\right\rangle$ به $g^{(1)}$ بستگی دارد و در حالتی که شکاف‌ها یکسان باشند ($u_1 = u_2$)، برای میدان‌های کاملا همدوس ($\left|g^{(1)}\right| = 1$)، مقدار شدت از $(\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2})^2$ به $(\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2})^2$ تغییر می‌کند و در نتیجه یک طرح تداخل به وجود می آید. حال اگر $I_1 = I_2 = I_0$ باشد، شدت کل میانگین از مقدار $\langle I\rangle_{\min} = 0$ به مقدار $\langle I\rangle_{\max} = 4\langle I_0\rangle$ تغییر می‌کند و در نتیجه بیشینه‌ی تداخل حاصل می‌شود. برای دو میدان ناهمدوس، $g^{(1)} = 0$ و