

سیستم‌های کوانتومی درهم‌تنیده

جهت‌گیری‌های نوین در فیزیک کوانتومی

یوزگن آدرچ

ترجمه

دکتر لادن رضائی

اسکاه آزاد اسلامی واحد شیراز

۱۳۹۱

دانشگاه آزاد اسلامی

واحد شیراز

سرشناسه

: آدرچ، یورگن، ۱۹۴۲ - م.

Audretsch, Jurgen

عنوان و پدیدآور : سیستم‌های کوانتومی درهم‌تنیده / یورگن آدرچ، ترجمه لادن رضائی.

مشخصات نشر : شیراز؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، ۱۳۹۱.

مشخصات ظاهری : ۴۷۲ ص. مصور، جدول، نمودار.

شابک : 978-964-10-1806-3 : ۱۸۰۰۰۰ ریال

وضعیت فهرست‌نویسی : فیا

یادداشت : عنوان اصلی:

Entangled Systems, new directions in quantum physics

یادداشت : واژه‌نامه.

یادداشت : کتاب‌نامه. ص. ۴۳۵ - ۴۷۱

موضوع : فیزیک کوانتومی

شناسه‌ی افزوده : آئی‌لادن، ۱۳۵۶ - ، مترجم

شناسه‌ی افزوده : دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز.

رده‌بندی کنگره : ۱۳۹۱ : QC ۱۷۴/۱۲/۳

رده‌بندی دیویی : ۵۳۰/۱۲

شماره‌ی کتابشناسی ملی : ۲۹۱۰۰۵۶

سیستم‌های کوانتومی درهم‌تنیده

(جهت‌گیری‌های نوین در فیزیک کوانتوم)

یورگن آدرچ / ترجمه لادن رضائی

چاپ اول / ۱۳۹۱ / ۲۰۰۰ جلد / چاپ دنیا

کتاب‌آرایی و نظارت بر چاپ: آوند اندیشه (۲۰۷۴ / ۱۳۹۱)

شابک: ۱۸۰۶-۱۰-۹۶۴-۹۷۸ / قیمت: ۱۸۰۰۰ تومان

مرکز پخش: شیراز، بانک کتاب، ۰۷۱ ۱-۶۲۹۳۱۲۱



حق چاپ برای دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز محفوظ است.

شیراز، خیابان قآنی شمالی، تلفن: ۰۷۱۱-۲۳۴۲۰۱۹

www.ketab.ir

اعضای شورای انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز

دکتر لطف‌الله یارمحمدی

دکتر حسن رهگذر

دکتر احمد افسری

دکتر محمدرضا اسمعیل‌بیگ

دکتر کورس یزدجردی

دکتر مسعود زاده‌باقری

دکتر مینا اخباری آزاد

امروزه نظریه اطلاعات کوانتومی، توسعه گسترده‌ای در بین فیزیکدانان یافته است. در این کتاب، مفهومی کلیدی در نظریه اطلاعات کوانتومی ست و همچنین نقشی کلیدی در محاسبه کوانتومی و پردازش اطلاعات کوانتومی بر عهده دارد. این مسئله، ضرورت بررسی ویژگی‌های مهم‌تئیدگی، که هم شامل جنبه‌های کمی و هم کیفی باشد را بیان می‌دارد. درهم‌تئیدگی، خودی ذخیره اطلاعات، منبع اصلی برای انجام محاسبات کوانتومی و ارتباطات کوانتومی است. با وارد نمودن درهم‌تئیدگی به حوزه فناوری اطلاعات، بسیاری از محدودیت‌های بعضی موجودات از میان می‌روند. این کتاب، مشتمل بر ۱۶ فصل است که به خوانندگان کمک می‌کند تا آگاهی نسبتاً جامعی از نظریه اطلاعات کوانتومی به دست آورند. همچنین در این کتاب، مفاهیم محاسبه کوانتومی، مخابره کوانتومی، رمزنگاری کوانتومی، و دیگر بحث‌ها مطرح شده در این زمینه، مورد مطالعه قرار گرفته است. خواننده پس از مطالعه این کتاب قادر خواهد بود که مقالات و کتاب‌های پیشرفته‌تر در حوزه اطلاعات کوانتومی را درک کند.

برای نگارش نسخه انگلیسی، متن آلمانی با افزودن چند بخش جدید، اصلاح و توسعه داده شده است. همچنین، پیشنهادات برخی از دانشجویان که این متن را به عنوان ضمیمه برای سخنرانی و سمینار استفاده کرده بودند، وارد شده است. سپاسگزاری صادقانه خود را به ایشان و نیز به آن می‌گفتم که در مورد کتاب با من مباحثه نمودند، تقدیم می‌دارم. همچنین به دلیل تدبیر و به‌کارگیری خطاهای چاپی که اکنون تصحیح شده‌اند، تشکر می‌کنم. به علاوه، سپاسگزاری مجدد خود را به مایکل ناک و استفان برتزل، برای کمک سخت کوشانه در نسخه خطی ارائه شده تقدیم می‌کنم.

جمله مشهور "این که من دوردست را با بی‌نیازی برای این لاست که بر شانه گول‌ها ایستاده‌ام"^۱، از اسحاق نیوتون است. این جمله را هر کسی که امروزه در حوزه نظریه کوانتومی کار می‌کند، مصداق دارد. ما تنها انسان‌های کوتوله‌ای هستیم که بسیار مدیون گول‌ها هستیم. اما این سؤال باقی می‌ماند که انسان‌های کوچک، چگونه راحت‌تر و سریع‌تر، بر شانه‌های یک گول قرار گیرند. این کتاب، کمکی جامع به این فرآیند است.

یورگن آدرچ

۲۰۰۶، تانز، نوامبر ۰۶-۲۰

^۱ اسحاق نیوتون در نامه‌اش به هوک، در ۵ فوریه ۱۶۷۵، جزئیات بیش‌تر را می‌توان در [Mer 65] یافت.

کتاب حاضر، رساله‌ای در باب فیزیک نظری است. این کتاب، نتیجه دوره‌ای از سخنرانی‌ها است که من در سال‌های اخیر در دانشگاه کنزرتز در آلمان، در موضوع نظریه اطلاعات کوانتومی، اصل کوانتومی داشته‌ام. در چند سال گذشته، مکانیک کوانتومی غیرنسبیتی، در حل پیشرفتی متلاطم را طی کرده است. محاسبه کوانتومی، مخابره کوانتومی، رمزنگاری کوانتومی، اطلاعات کوانتومی، کلمات شایع نوعی هستند که این پیشرفت‌ها را منعکس می‌کنند و می‌تواند در تئوری حوزه‌های حرفه‌ای فیزیک، در مقالات علمی عمومی یافته شوند. مفهوم درهم‌تنیدگی، ایده تئوری اصلی است که این "جهت‌گیری‌های نوین" در مکانیک کوانتومی را همراهی می‌کند که پرداختن به آن در برنامه درسی دانشگاه‌ها رو به افزایش است. اصول نظری این پیشرفت‌ها را بنویسید، موضوع این کتاب است.

این کتاب برای چه کسانی است؟ خوانندگان اصلی، دانشجویان هستند، اما، برای همه کسانی که به مکانیک کوانتومی علاقمند هستند، مورد نیاز است. این گروه، نه تنها فیزیکدانان و دانشجویان فیزیک، بلکه دانشجویان علوم کامپیوتر، مهندسی و نیز دیگر علوم طبیعی مثل مهندسان یا معلمان هستند. فرض بر این است که آشنایی اولیه با مکانیک کوانتومی داشته باشند و از نقطه صفر شروع نکرده باشند.

برای اطمینان، همه پایه‌های ریاضیاتی و فیزیکی که برای درک فصل‌های بعدی مورد نیاز است، در فصل‌های اولیه ۱ و ۲ خلاصه شده است. این مباحث، به گونه‌ای مطرح شده است که ممکن است برای بسیاری از خوانندگان، جدید باشد. این فصل‌ها، در بین دیگر موارد، به عنوان پیش‌زمینه‌ای برای این واقعیت به کار گرفته شده است که در مکانیک کوانتومی، مفاهیم حالت و تحول یک حالت، و اندازه‌گیری‌های موجود در آن، به گونه‌ای متفاوت از

فیزیک کلاسیک به کار گرفته می‌شود. در فصل‌های بعدی، تعمیم روی این اصول، انجام گرفته است. همچنین فصل دوم، جعبه ابزاری برای فلسفه علم را شامل می‌شود که می‌توانیم این پرسش از طبیعت واقعیت را بررسی کنیم که مکانیک کوانتومی بر اساس آن بنا نهاده شده است.

در نهایت، فصل به فصل، مطالبه‌های خوانندگان افزایش می‌یابد. فصل‌های اولیه، پایه‌ای برای فصل‌های بعدی شکل می‌دهند. تمرینها در انتهای هر فصل، می‌تواند به عنوان راهنمایی برای خوانندگان به کار گرفته شود یا به طور کافی موضوع فصل را هدایت کند. جملاتی که به خط ایتالیک چاپ شده‌اند، نتایج هر بخش را خلاصه می‌کنند. خوانندگانی که دارای اطلاعات بیشتری هستند، می‌توانند با دیدن این جملات ایتالیک سریعاً مطلب را مرور کنند.

اهداف. این کتاب، خوانندگان کمک می‌کند که منظری از پیشرفت سریع نظریه اطلاعات کوانتومی، برای سهولت به بررسی‌های مربوط به این حوزه و درک آن‌ها به دست آورند، که این کار با یک سرمایه‌گذاری قابل قبول زمانی صورت می‌گیرد.

محدودیت‌ها و موارد تکمیلی. دقیقاً ریاضیاتی در این کتاب، در سطح کتاب‌های درسی عمومی فیزیک نظری است. حجم آن به گونه‌ای نظری محدود می‌شود، در بعضی از فصول، توصیفی از آزمایش‌های متناظر و کاربردهای فنی مطرح شده است. هر فصل، شامل زیرفصل‌هایی است که دارای مباحث تکمیلی و منابعی برای مطالعه بیشتر است و نیز مراجعی برای آزمایش‌ها را در بر می‌گیرد.

این زیرفصل‌ها، همچنین شامل مراجعی برای مقالات مروری نظریه کتاب‌هاست. با کمک آن‌ها، خواننده می‌تواند اطلاعات تکمیلی برای مباحث مطرح شده در این کتاب به دست آورد و نیز می‌تواند دانش خود را در این زمینه عمیق‌تر کند. در این کتاب، مقالات و کتاب‌های مروری، بر منابع اصلی اولویت دارند، به عبارت دیگر، مقالات مهم در زمینه پیشرفت تاریخی که اشاره به گذشته دارد، فهرست نشده‌اند، اما به جای آن، به منابعی اشاره شده است که برای به دست آوردن درک پیشرفته‌تری از موضوعات مورد بحث، برای خوانندگان مفید است.

مندرجات. در ادامه دو فصل اول، در ابتدا، در فصل ۳ و ۴، فیزیک سیستم‌های کوانتومی منزوی توسعه بیشتری داده شده است. بسیاری از مثال‌ها و کاربردها برای کیوبیت (سیستم‌های دوترازه) بیان می‌شود. این رویه، در به‌کارگیری عملگر چگالی در فصل ۴ نیز ادامه می‌یابد. این مفاهیم عمومی‌ترین موارد هستند. فصل ۵ و ۶، مفاهیم مکانیک کوانتومی و کلاسیکی آنتروپی و اطلاعات را معرفی می‌کنند.

اصول فیزیکی سیستم‌های کوانتومی مرکب در فصل ۷ شرح داده می‌شود. واقعیت این است که یک سیستم درهم‌تنیده می‌تواند شامل چندین زیرسیستم باشد و چندین نتیجه حیرت‌انگیز را در پی داشته باشد. مقدمه‌ای از این مبحث در فصل ۸ داده شده است. درهم‌تنیدگی منجر به همبستگی بین دو سیستم‌ها می‌شود. غیرجای‌گزیدگی این حالت‌ها، با امکان اندازه‌گیری‌های غیرجای‌گزیده همراه می‌شود (فصل ۹).

مشاهده تجربی همبستگی‌های کوانتومی ویژه (همبستگی‌های EPR) این وضعیت اصولی را تأیید می‌کند که هیچ تناقض کلاسیکی با مکانیک کوانتومی وجود ندارد (فصل ۱۰). این همبستگی‌های EPR، به عنوان پایه رمزگشایی کوانتومی که در اصل، تکمیل‌کننده امنیت در برابر جاسوسی است، می‌تواند به‌کار گرفته شود. متناظر کوانتومی نیز بر اساس همبستگی‌های EPR است (فصل ۱۲). برای کامپیوتر کوانتومی، درهم‌تنیدگی یک ابزار ضروری است. بهره‌برداری از توازی کوانتومی، تعداد زیادی از مقادیر تابعی را تنها در چند عملیات، برای محاسبه ممکن می‌کند. سپس از آن، مسأله مطرح، بازخوانی رایج است.

در فصل ۱۳، دینامیک تعمیم‌یافته سیستم‌های کوانتومی را مطرح می‌کنیم و اندازه‌گیری‌های تعمیم‌یافته را بررسی می‌کنیم که شامل اندازه‌گیری‌های تصویری به‌عنوان موردی خاص است. این اندازه‌گیری‌ها، نقش مهم و فزاینده‌ای را در اندازه‌گیری مقدار عملگر مثبت (POVM) - در مطالب منتشرشده جاری بازی‌های تحول عام سیستم‌های کوانتومی باز، بین آماده‌سازی و اندازه‌گیری آن‌ها، با به‌کارگیری عملگرهای کوانتومی توصیف شده است. کانال‌های کوانتومی مختلف، در فصل ۱۴ بررسی شده‌اند. تعمیم اندازه‌گیری‌های تصویری و تبدیلات یکانی، منجر به یک سناریوی جدید از فیزیک کوانتومی می‌شود.

وادوسی، عدم توانایی نمایش تداخل است و بنابراین، مشکلی برای کامپیوترهای کوانتومی

است. به‌طور معکوس، وادوسی القا شده به‌وسیله محیط، نقش مهمی را در پاسخ‌گویی به این پرسش بر عهده دارد که چرا اشیاء کلاسیکی وجود دارند (فصل ۱۵). این روش، برای درک فرآیندهای اندازه‌گیری کوانتومی نیز می‌تواند به کار گرفته شود. این کتاب، با چند برهان تکمیلی از چندین قضیه در فصل ۱۶ به اتمام می‌رسد.

سپاسگزاری اول از همه، از همسر من به‌خاطر بردباریش تشکر می‌کنم. همکاری من با توماس کانارد، که سال‌های زیادی به طول انجامیده است، به‌طور گسترده‌ای، باعث درک عمیق‌تر من از موضوع شده است. "جلسات دوشنبه" ما با توماس کانارد، مایکل ناک، و آرتور اسپنجر نیز به‌طور گسترده‌ای، باعث ارایه پیشنهادات مفید، ایده‌های جدید، و تصحیحات می‌شد. بویژه، بسیاری از مباحثه‌های متقابل ما، تأثیر عمده‌ای در اشتیاق من برای این موضوع شد. در نوشتن این نسخه، جوزف دموت، با بسیاری از ملاحظات و توضیحات مفید، مرا همراهی کرده است. برای ناتزولد و مارکوس کوبیتزکی، مرا در آماده‌سازی این نسخه همراهی کرده‌اند، و برای مساعدت نخست‌نگی‌ناپذیر استفان برتزل، و بویژه مایکل ناک، این کتاب در زمان مقرر به اتمام نه‌رسید. تشکر خود را تقدیم همه آنان می‌کنم. در نهایت، سپاسگزاری خود را به مرکز فوتونیک کوانتومی (CAP) دانشگاه کانزاس به‌خاطر حمایتشان تقدیم می‌کنم.

یورگن آدرچ

کانزاس، ژانویه ۲۰۰۵

۲۱	۱ / چارچوب و مبانی
۲۲	۱.۱ فضای بیولوژیکی هیلیوت
۲۲	۱.۱.۱ ضرب المکمل و نمایی گزای دیراک
۲۴	۲.۱.۱ عملگرهای هیلیوت در فضای هیلیوت
۲۹	۳.۱.۱ عملگرهای بهنجاری و تجربی طیفی
۳۲	۴.۱.۱ عملگرهای هرمیتی
۳۵	۵.۱.۱ عملگرهای یکانی
۳۶	۶.۱.۱ عملگرهای مثبت و عملگرهای تقریری
۳۸	۲.۱ فضای عملگری لیوویل
۳۸	۱.۲.۱ ضرب اسکالر
۴۰	۲.۲.۱ ابرعملگرها
۴۱	۳.۱ مبانی نظریه احتمال
۴۱	۱.۳.۱ احتمال رویدادهای تصادفی
۴۳	۲.۳.۱ احتمال شرطی و قضیه بایس
۴۶	۳.۳.۱ کمیت‌های تصادفی
۴۷	۴.۱ مباحث تکمیلی و مطالعه بیش‌تر
۴۷	۵.۱ مسایل فصل ۱

۲ / مفاهیم پایه‌ای نظریه کوانتوم

- ۵۱ اولین نسخه اصول موضوع (حالت‌های خالص سیستم‌های کوانتومی منزوی) _____ ۱،۲
- ۵۱ مقدمه: سناریوی مکانیک کوانتومی _____ ۱،۱،۲
- ۶۰ حالت‌های کوانتومی _____ ۲،۱،۱
- ۶۵ اصول موضوع برای حالت‌های خالص سیستم‌های کوانتومی منزوی _____ ۳،۱،۲
- ۶۹ توضیحاتی بر اصول موضوع _____ ۴،۱،۲
- ۷۳ ششم اندازه _____ ۲،۲
- ۷۴ دینامیک تحول حالت‌ها توسط اندازه‌گیری‌های تصویری _____ ۲،۲
- ۷۴ اثر کوانتومی زنون _____ ۲،۲
- ۷۶ استنتاج بردار حالت توسط مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌های تصویری _____ ۲،۳،۲
- ۷۷ ساختار فضای ریکی _____ ۴،۲
- ۷۸ مبانی سامانه‌ی باریکه‌ی یکپارچه _____ ۱،۴،۲
- ۸۰ حقیقت توسعه‌یافته _____ ۲،۴،۲
- ۸۲ تعبیرات نظریه کوانتومی و حقیقت فیزیکی _____ ۵،۲
- ۸۲ تعبیر حداقلی _____ ۱،۵،۲
- ۸۳ تعبیر استاندارد _____ ۲،۵،۲
- ۸۵ مباحث تکمیلی و مطالعه بیشتر _____ ۶،۲

۳ / ساده‌ترین سیستم‌های کوانتومی: کیوبیت‌ها

- ۹۰ عملگرهای پائولی _____ ۱،۳
- ۹۴ تجسم کیوبیت‌ها روی کره بلاخ _____ ۲،۳
- ۹۳ تجسم دینامیک اندازه‌گیری و دینامیک یکانی _____ ۳،۳
- ۱-۲ گیت‌های کوانتومی برای سیستم‌های تک کیوبیتی _____ ۴،۳
- ۱-۵ اسپین ۱/۲ _____ ۵،۳
- ۱۰۶ قطبش‌های فوتونی _____ ۶،۳
- ۱۰۷ تک فوتون‌ها در یک شکافنده باریکه و در یک تداخل‌سنج _____ ۷،۳
- ۱۰۹ شکافنده‌های باریکه _____ ۱،۷،۳

- ۲،۷،۳ تداخل سنج _____ ۱۱۱
- ۸،۳ مکان یابی یک بمب با اندازه گیری صفر، بدون انفجار آن _____ ۱۱۴
- ۹،۳ مباحث تکمیلی و مطالعه بیش تر _____ ۱۱۸
- ۱۰،۳ مسایل فصل ۳ _____ ۱۱۸

۴ / حالت های آمیخته و عملگر چگالی _____ ۱۲۱

- ۱،۴ عملگرهای چگالی برای یک تبدیل مفروض (مخلوط آماری) _____ ۱۲۱
- ۱،۴ حالت های خالص _____ ۱۲۱
- ۱،۴ فیزیک حالت های آمیخته آماری (مخلوط) _____ ۱۲۴
- ۳،۴ تعریف و خواص عملگرهای چگالی تعمیه یافته _____ ۱۲۹
- ۴،۱،۴ به هم نهی و ناهم دوسی حالت های خالص _____ ۱۳۱
- ۲،۴ حالت کوپل و همبستگی یافته _____ ۱۳۴
- ۳،۴ تجزیه های آنالیز مختلف از یک عملگر چگالی و تعبیر عدم آگاهی _____ ۱۳۵
- ۴،۴ عملگرهای چگالی برای کوانتوم ها _____ ۱۳۸
- ۵،۴ مباحث تکمیلی و مطالعه بیش تر _____ ۱۴۰
- ۶،۴ مسایل فصل ۴ _____ ۱۴۰

۵ / آنتروپی شانون و اطلاعات کلاسیکی _____ ۱۴۳

- ۱،۵ تعریف و ویژگی ها _____ ۱۴۴
- ۲،۵ قضیه شانون _____ ۱۴۹
- ۱،۲،۵ دنباله های نوعی _____ ۱۴۹
- ۲،۲،۵ فشرده سازی داده های کلاسیکی _____ ۱۵۲
- ۳،۵ اطلاعات کلاسیکی _____ ۱۵۴
- ۴،۵ آنتروپی نسبی کلاسیکی _____ ۱۵۴
- ۵،۵ اطلاعات متقابل به عنوان اندازه همبستگی بین دو پیغام _____ ۱۵۶
- ۱،۵،۵ اطلاعات متقابل _____ ۱۵۷
- ۲،۵،۵ آنتروپی شرطی _____ ۱۵۸

- ۱۶۰ ۶،۵ مباحث تکمیلی و مطالعه بیش تر
- ۱۶۰ ۷،۵ مسایل فصل ۵

۶ / آنتروپی فون‌نیومان و اطلاعات کوانتومی

- ۱۶۱ ۱،۶ کانال کوانتومی و آنتروپی کوانتومی
- ۱۶۴ ۲،۶ کیوبیت‌ها به عنوان واحد اطلاعات کوانتومی
- ۱۶۷ ۳،۶ ویژگی‌ها
- ۱۶۹ ۴،۶ مراحل بین آماده‌سازی و اندازه‌گیری
- ۱۷۰ ۴،۶ آنتروپی اندازه‌گیری‌های تصویری
- ۱۷۲ ۲،۶ آنتروپی آماده‌سازی
- ۱۷۳ ۵،۶ اطلاعات کوانتومی
- ۱۷۴ ۶،۶ مباحث تکمیلی و مطالعه بیش تر
- ۱۷۴ ۷،۶ مسایل فصل ۶

۷ / سیستم‌های مرکب

- ۱۷۵ ۱،۷ زیرسیستم‌ها
- ۱۷۳ ۲،۷ فضای هیلبرت ضربی
- ۱۷۸ ۱،۲،۷ بردارها
- ۱۸۰ ۲،۲،۷ عملگرها
- ۱۸۳ ۳،۷ اصول فیزیکی سیستم‌های کوانتومی مرکب
- ۱۸۳ ۱،۳،۷ اصول موضوعه برای سیستم‌های مرکب و چشم‌انداز
- ۱۸۵ ۲،۳،۷ حالت یک زیرسیستم، عملگر چگالی کاهش‌یافته، و آمیختگی‌های عمومی
- ۱۸۸ ۴،۷ دستکاری یک زیرسیستم
- ۱۸۸ ۱،۴،۷ حالت‌های نسبی و تبدیلات یکانی جایگزیده
- ۸۹۰ ۲،۴،۷ اندازه‌گیری‌های انتخابی جایگزیده
- ۷۹۳ ۳،۴،۷ اندازه‌گیری غیرانتخابی جایگزیده
- ۱۹۵ ۵،۷ دستکاری‌های جداگانه بر دو زیرسیستم

- ۱۵:۵ جفت‌های اندازه‌گیری انتخابی ۱۹۵
- ۲۵:۲ اثرات غیرجایگزیده: "کنش شیخ‌وار از راه دور؟" ۱۹۷
- ۶:۷ دینامیک یکانی سیستم‌های مرکب ۱۹۹
- ۷:۷ اولین کاربرد درهم‌تنیدگی: یک ترفند جادوگری ۲۰۰
- ۱۷:۷ ترفند جدوگری ۲۰۱
- ۲۷:۷ همبستگی‌های کلاسیکی هیچ توضیحی ندارند ۲۰۲
- ۳۷:۷ ترفند ۲۰۲
- ۹:۷ گیت‌های کوانتومی برای سیستم‌های کیوبیتی چندگانه ۲۰۵
- ۱۷:۷ درهم‌تنیدگی از طریق گیت CNOT ۲۰۵
- ۲۸:۷ گیت تلافی، SWAP و دج ۲۰۸
- ۹:۷ سیستم‌های ذات یکسان ۲۰۹
- ۱۰:۷ مباحث تکامل و مطالعه بیش‌تر ۲۱۳
- ۱۱:۷ مسایل فصل ۷ ۲۱۳
- ۸ / درهم‌تنیدگی** ۲۱۵
- ۱:۸ همبستگی‌ها و درهم‌تنیدگی ۲۱۵
- ۱:۸:۸ حالت‌های کوانتومی همبسته کلاسیکی و LOCC ۲۱۶
- ۲:۱:۸ تفکیک‌پذیری و درهم‌تنیدگی ۲۲۰
- ۳:۱:۸ مسأله تفکیک‌پذیری ۲۲۱
- ۲:۸ چشم‌انداز ۲۲۳
- ۳:۸ حالت‌های خالص درهم‌تنیده ۲۲۴
- ۱:۳:۸ تجزیه اشمیت ۲۲۴
- ۲:۳:۸ عدد اشمیت و درهم‌تنیدگی ۲۲۷
- ۳:۳:۸ آنتروپی زیرسیستم‌ها به‌عنوان اندازه درهم‌تنیدگی ۲۲۹
- ۴:۳:۸ زیرسیستم‌ها در حالت‌های خالص، درهم‌تنیده نیستند ۲۳۰
- ۴:۸ معیار PPT برای درهم‌تنیدگی مخلوط‌ها ۲۳۳
- ۵:۸ تولید حالت‌های درهم‌تنیده ۲۳۵

- ۶،۸ قضیه عدم تکثیر، مانع از انتقال اطلاعات با سرعتی بیش از سرعت نور می‌شود ۲۳۹
- ۷،۸ علامت‌گذاری حالت‌ها به وسیله درهم‌تنیدگی ۲۴۲
- ۱،۷،۸ علامت‌گذاری کدام-راه ۲۴۲
- ۲،۷،۸ پاک‌کن کوانتومی ۲۴۶
- ۳،۷،۸ انتخاب تأخیری مشاهده‌پذیرهای علامت‌گذار ۲۴۷
- ۸،۸ مباحث تکمیلی و مطالعه بیشتر ۲۴۹
- ۸،۸ مسایل فصل ۸ ۲۵۰
- ۹ / بستن‌ها و اندازه‌گیری‌های غیرجایگزیده ۲۵۱
- ۱،۹ اندازه‌گیری‌های سیستم‌های کوانتومی مرکب ۲۵۱
- ۱،۱،۹ اطلاعات قابل به‌عنوان اندازه همبستگی‌ها ۲۵۱
- ۲،۱،۹ نامساوی مثلث ۲۵۳
- ۳،۱،۹ سیستم‌های درهم‌تنیده کوانتومی در مقابل سیستم‌های همبسته کلاسیکی ۲۵۴
- ۲،۹ اندازه‌گیری‌های غیرجایگزیده ۲۵۸
- ۱،۲،۹ پایه بل ۲۵۸
- ۲،۲،۹ اندازه‌گیری‌های جایگزیده و غیرجایگزیده ۲۶۰
- ۳،۲،۹ اندازه‌گیری‌های غیرجایگزیده به وسیله اندازه‌گیری‌های جایگزیده بر روی یک سیستم فرعی ۲۶۳
- ۴،۲،۹ اطلاعات ذخیره‌شده غیرجایگزیده و اندازه‌گیری‌های بل ۲۶۵
- ۳،۹ مباحث تکمیلی و مطالعه بیشتر ۲۶۸
- ۴،۹ مسایل فصل ۹ ۲۶۸
- ۱۰ / جایگزین دیگری (جایگزیده-واقع‌گرا) برای نظریه کوانتوم وجود ندارد ۲۶۹
- ۱،۱۰ آزمایش‌های EPR و شرح کوانتومی آن‌ها ۲۷۰
- ۲،۱۰ دستکش‌های همبسته ۲۷۴
- ۳،۱۰ واقعی‌گرایی جایگزیده ۲۷۶
- ۴،۱۰ متغیرهای پنهان، نامساوی‌های بل و نقض آزمایش‌ها ۲۷۷
- ۵،۱۰ مخلوط‌های تفکیک‌پذیر، از نامساوی بل پیروی می‌کنند ۳۸۲

- ۶.۱۰ شاهدهای درهم تنیدگی ۲۸۳
- ۷.۱۰ درهم تنیدگی سه ذره‌ای و جای گزیدگی کوانتومی ۲۸۵
- ۶.۷.۱۰ حالت GHZ ۲۸۵
- ۳.۷.۱۰ واقع گرایی جایگزیده و نظریه کوانتومی در عدم توافق ۲۸۶
- ۸.۱۰ مباحث تکمیلی و مطالعه بیشتر ۲۸۹
- ۹.۱۰ صایل فصل ۱۰ ۲۹۰

- ۱۱ / ۲ درهم تنیدگی ۲۹۱
- ۱.۱۰ رمزنگاری کوانتومی ۲۹۱
- ۱.۱ رمزگذاری و رمز ۲۹۱
- ۲.۱۱ پروتکل B92 ۲۹۲
- ۳.۱-۱۱ پهنای باند EPR ۲۹۶
- ۴.۱-۱۱ طرح رمزنگاری کوانتومی ۲۹۸
- ۳.۱۱ یک کیوبیت، دو بیت را می‌کند (رمزگذاری چگال) ۲۹۸
- ۳.۱۱ مخبره کوانتومی ۲۹۹
- ۴.۱۱ مبادله درهم تنیدگی ۳۰۲
- ۵.۱۱ کنش شیخ‌وار به گذشته؟ ۳۰۴
- ۶-۱۱ تقطیر درهم تنیدگی ۳۰۶
۷. ۱۱ اندازه درهم تنیدگی برای مخلوط‌ها: درهم تنیدگی تشکیل و کانکارس ۳۱۰
- ۸.۶۱ مباحث تکمیلی و مطالعه بیشتر ۳۱۵
- ۹.۱۱ مسایل فصل ۱۱ ۳۱۶

- ۱۲ / کامپیوتر کوانتومی ۳۱۹
- ۱.۱۲ ثبت‌کننده‌ها و شبکه‌ها ۳۱۹
- ۲.۱۳ محاسبه تابعی ۳۲۲
- ۳.۱۳ توازی کوانتومی ۳۲۶
- ۴.۱۲ دو الگوریتم ساده کوانتومی ۳۲۷
- ۱.۴.۱۲ مسأله داج ۳۲۷

- ۳۲۹ _____ ۲،۴،۱۲ مسأله داج- جوزا
- ۳۳۱ _____ ۵،۵۲ الگوریتم جست‌وجوگری گراور
- ۳۳۵ _____ ۶،۹۲ الگوریتم فاکتورگیری شور
- ۳۳۵ _____ ۱۶،۱۲ ساده‌سازی فاکتورگیری در جست‌وجوی یک تناوب
- ۳۴۰ _____ ۲۶،۱۳ الگوریتم کوانتومی برای تعیین تناوب
- ۳۴۶ _____ ۷،۱۲ تصحیح خطای کوانتومی با به‌کارگیری اندازه‌گیری‌های غیرجایگزیده
- ۳۴۶ _____ ۱۰،۱۲ خطاهای معکوس شدن بیت
- ۳۴۸ _____ ۲،۱۲ خطاهای معکوس شدن فاز
- ۳۴۹ _____ ۸،۱۲ جزای کامپیوتر کوانتومی
- ۳۵۱ _____ ۹،۱۲ حش‌حمی و مطالعه بیش‌تر
- ۳۵۳ _____ ۱۰،۱۲ مسایل فصل ۱۰
- ۳۵۵ _____ ۱۳ / اندازه‌گیری‌های نیمه‌یافته، POVM
- ۳۵۵ _____ ۱،۱۳ کارکرد دینامیک تعمیم‌یافته سیستم کوانتومی باز
- ۳۵۵ _____ ۱،۶،۱۳ مسایل
- ۳۵۷ _____ ۲۵،۱۳ یک مثال ساده
- ۳۶۱ _____ ۲،۱۳ آزمایش اشترن-گراخ غیربهنه و اندازه‌گیری‌های تعمیم‌یافته
- ۳۶۱ _____ ۱،۲،۱۳ برپایی آزمایش
- ۳۶۳ _____ ۳،۲،۱۳ مثالی از یک آزمایش تعمیم‌یافته
- ۳۶۶ _____ ۳،۲،۱۳ اندازه‌گیری‌های غیردقیق
- ۳۶۷ _____ ۳،۱۳ اندازه‌گیری‌های تعمیم‌یافته
- ۳۶۷ _____ ۱،۳،۱۳ اندازه‌گیری کوانتومی چیست؟
- ۳۶۹ _____ ۲،۳،۱۳ اصول موضوع اندازه‌گیری تعمیم‌یافته
- ۳۷۱ _____ ۳،۳،۱۳ تجزیه قطبی یک عملگر خطی
- ۳۷۳ _____ ۴،۳،۱۳ اندازه‌گیری حداقلی و POVM
- ۳۷۵ _____ ۵،۳،۱۳ اجرای اندازه‌گیری تعمیم‌یافته توسط تبدیل یکانی و تصویر
- ۳۷۶ _____ ۶،۳،۱۳ تحقیر درهم‌تنیدگی توسط اندازه‌گیری‌های تعمیم‌یافته

۴.۱۳ اندازه‌گیری‌های POVM _____ ۳۷۸

۱.۴.۱۳ احتمالات اندازه‌گیری و عملگرهای مثبت _____ ۳۷۸

۲.۴.۱۳ اندازه‌گیری مرکب به‌عنوان مثالی از اندازه‌گیری POVM _____ ۳۷۹

۳.۴.۱۳ آیا می‌توان با قطعیت، توسط یک اندازه‌گیری POVM، بین دو حالت تمایز قائل

شد؟ _____ ۳۸۱

۴.۴.۱۳ منفعت اندازه‌گیری POVM برای تعیین حالت‌ها _____ ۳۸۳

۵.۴.۱۳ یک POVM اطلاعاتی کامل _____ ۳۸۴

۶.۴.۱۳ تخمین حالت قبل از اندازه‌گیری _____ ۳۸۶

۵.۴.۱۳ مباحث تکمیلی و مطالعه بیش‌تر _____ ۳۸۷

۱۳.۴.۱۳ مسایل فصل ۱۳ _____ ۳۸۸

۱۴ / تحول عملگرهای کوانتومی باز و کانال‌های کوانتومی ویژه _____ ۳۹۱

۱.۱۴ عملیات‌های کوانتومی و تجزیه‌های عملگر-جمع آن‌ها _____ ۳۹۱

۱.۱.۱۴ عملیات‌های کوانتومی _____ ۳۹۱

۲.۱.۱۴ تجزیه عملگر-جمع عملیات‌های کوانتومی _____ ۳۹۴

۳.۱.۱۴ عملیات‌های کوانتومی _____ ۳۹۶

۴.۱.۱۴ ناهمخوانی تجزیه عملگر-جمع _____ ۳۹۷

۲.۱۴ معادله جامع _____ ۳۹۷

۳.۱۴ اندازه‌گیری‌های انتخابی کاملاً عام و POVM _____ ۴۰۰

۴.۱۴ کانال‌های کوانتومی _____ ۴۰۲

۱.۴.۱۴ کانال واقتبیدگی _____ ۴۰۲

۲.۴.۱۴ پرش‌های کوانتومی و کانال‌های میرایی دامنه _____ ۴۰۳

۳.۴.۱۴ کانال شکست درهم‌تنیدگی _____ ۴۰۵

۵.۱۴ سناریو و قوانین بازی‌بندی شده نظریه کوانتومی _____ ۴۰۶

۶.۱۴ مباحث تکمیلی و مطالعه بیش‌تر _____ ۴۱۱

۷.۱۴ مسایل فصل ۱۴ _____ ۴۱۱

۱۵ / وادوسی و روش‌های توصیف فرآیند اندازه‌گیری کوانتومی

- ۴۱۳ ۱۰،۱۵ کانال‌هایی که تولید وادوسی می‌کنند
- ۴۱۳ ۱۱،۱۵ کانال میرایی فاز
- ۴۱۶ ۲۱،۱۵ پراکندگی و وادوسی
- ۴۱۷ ۳۱،۱۵ کانال معکوس شدن فاز
- ۴۱۸ ۲،۱۵ وادوسی القا شده به وسیله محیط
- ۴۱۸ ۱۲،۱۵ تشکیل جهان کلاسیکی
- ۴۲۲ ۲،۱۵ گربه شرودینگر
- ۴۲۴ ۳۰،۱۵ فرآیند اندازه‌گیری کوانتومی
- ۴۲۴ ۳،۱۵ برنستین-تیقاتی
- ۴۲۵ ۲،۳،۶۵ اندازه‌گیری
- ۴۲۷ ۳،۳،۶۵ درهم‌تنیدگی با محیط، مشاهده‌پذیر را تثبیت می‌کند
- ۴۲۸ ۴،۳،۱۵ درهم‌تنیدگی با مرجع آزادی بسیار محیط
- ۴۳۲ ۴،۱۵ آیا مسأله اندازه‌گیری حل شده است؟
- ۴۳۳ ۵،۱۵ تعبیر بس-جهانی
- ۴۳۵ ۶،۱۵ مباحث تکمیلی و مطالعه بیش‌تر
- ۴۳۷ ۷،۱۵ مسایل فصل ۱۵

۱۶ / دو اجرا برای عملیات‌های کوانتومی

- ۴۳۹ ۱،۱۶ تجزیه عملگر-جمع
- ۴۴۳ ۲،۱۶ اجرای یکانی عملیات‌های کوانتومی
- ۴۴۵ ۳،۱۶ اجرای یک اندازه‌گیری انتخابی کاملاً عام توسط تبدیل یکانی
- ۴۴۷ ۴،۱۶ مباحث تکمیلی و مطالعه بیش‌تر
- ۴۴۸ ۵،۱۶ مسایل فصل ۱۶

۴۴۹ - / واژه‌نامه

۴۵۳ - / منابع