۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مکانیک کوانتوم

برای مهندسین برق

نویسنده:
Dennis Michael Sullivan

ترجمه

دکتر محمد صادق ابریشمیان
استاد دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندس [illegible] بروان

www.ketab.ir

سرشناسه	: سالیوان، دنیس مایکل، ۱۹۴۹ - م.Sullivan, Dennis Michael
عنوان و نام پدیدآور	: مکانیک کوانتوم برای مهندسین برق/ نویسنده دنیس میکاییل‌سالیوان ؛ ترجمه محمدصادق ابریشمیان، حمید سیروانی.
مشخصات نشر	: تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، انتشارات، ۱۳۹۵.
مشخصات ظاهری	: ۴۰۷ ص.: مصور، جدول ،نمودار.
شابک	: 978-600-7867-28-0
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
یادداشت	: عنوان اصلی:. Quantum mechanics for electrical engineers, c 2011
یادداشت	: نمایه .
موضوع	: کوانتوم
موضوع	: Quantum theory
موضوع	: برق
موضوع	: Electric
شناسه افزوده	: ابریشمیان، محمد صادق، ۱۳۲۵ -، مترجم
شناسه افزوده	: سیروانی، حمید، ۱۳۶۷ -، مترجم
شناسه افزوده	: دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، انتشارات
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۵ ۷ ۱س/QC۱۷٤/۱۳
رده بندی دیویی	: ۵۳۰/۱۲۰۳۴
شماره کتابشناسی ملی	: ۴۲۶۶۴۵۳

ناشر: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی **http://publication.kntu.ac.ir**

نام کتاب: مکانیک کوانتوم برای مهندسین برق

تألیف: دنیس میکاییل‌سالیوان

مترجمین: دکتر محمدصادق ابریشمیان، عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، مهندس حمید سیروانی.

نوبت چاپ: اول

تاریخ چاپ: تیر ۱۳۹۵

تیراژ: ۲۰۰ جلد

قیمت: ۲۸۰۰۰ تومان

کد کتاب: ۴۱۴

شابک: ۰-۲۸-۸۷۰۳-۹۶۴-۹۷۸ ISBN: 978- 964-8703-28-0

صحافی: گرنامی چاپ: چاپ اول

آدرس و تلفن مرکز پخش و فروش: خیابان ولیعصر(عج)، بالاتر از میدان ونک، تقاطع میرداماد، روبروی ساختمان اسکان (۸۸۷۷۲۲۷۷-۰۲۱)

(حق چاپ برای ناشر محفوظ است)

www.ketab.ir

۱.۰ پیشگفتار

یک روز یکی از اساتید فیزیک به من گفت که مهندسین برق تا آنجا که ممکن است از مکانیک کوانتوم دوری می‌جویند. روز شمار شروع شد. هر مهندس برقی که قصد دارد در زمینه نیمه‌هادیهای جدید کار کند، بایستی مکانیک کوانتوم را درک کند.

مکانیک کوانتوم غالباً جزء درس‌های مهندسین برق نیست، و دانشجویان برق بایستی آنرا در بخش فیزیک گذرانیده و تجربه ناامید کننده‌ای داشته‌باشند. در کلاس مکانیک کوانتوم اغلب به موضوعاتی از قبیل مکانیک آماری، ترمودینامیک، یا مکانیک پیشرفته نیاز است. بعلاوه، اختلاف‌های دیدگاهی زیادی بین مهندسین و فیزیکدانها وجود دارد.

این کتاب از یک ترم درس "نظریه نیمه‌هادیها" در دانشگاه آی‌داهو[۱] تحت نام مکانیک کوانتوم برای مهندسین برق رشد و پرورش نمود. در اینجا مختصری درباره مکانیک آماری و موضوعاتی که نیاز مکانیک کوانتوم است، صحبت می‌شود. بیشترین مطلب مکانیک کوانتوم در زمینه انتقال در نیمه‌هادیها است. این با اکثر کتاب‌های مکانیک کوانتوم در یک یا دو دیدگاه مهم متفاوت است: (۱) از نظریه فوریه[۲] استفاده می‌شود تا چندین مفهوم را توضیح و تشریح نماید زیرا نظریه فوریه بخش اصلی درس مهندسین برق است. (۲) از یک روش شبیه‌سازی بنام روش تفاضل محدود در حوزه زمان FDTD[۳] استفاده شده تا معادله شرودینگر را شبیه‌سازی کرده و ازاینرو مکانیک کوانتوم را تشریح و تفسیر کند. ضمناً شبیه سازی در تمرینات نیز بکار برده شده است. همچنین عناوینی مانند مومنتوم زاویه‌ای که معمولاً در مکانیک کوانتوم مقدماتی، بیان می‌شود در این کتاب صحبت نشده است.

مباحث کتاب

هدف اصلی این کتاب برای مهندسین برق، این است که مطالعه مکانیک کوانتوم درک بهتری از نیمه‌هادی‌ها را عرضه کند. از فصل اول تا هفتم عناوین بنیادین مکانیک کوانتوم را پوشش می‌دهد. فصل هشتم و نهم در باره توابع گرین[۴] که لازمه فرمول بندی انتقال در نیمه‌هادیها است و اولین بار توسط سوپریو داتا[۵] و همکارانش در دانشگاه پرودو[۶] کار و مدون شد، آورده شده است. تابع گرین یک روش محاسباتی برای انتقال درون کانال است. فصل دهم در باره روش تقریب در مکانیک کوانتوم بحث می‌کند. فصل یازدهم در باره نوسان‌سازهای هماهنگ[۷] که برای معرفی عملگر خلق و فنا بکار رفته صحبت می‌نماید. فصل دوازدهم روش شبیه‌سازی برای تعیین حالت‌های ویژه و انرژی‌های ویژه ساختارهای پیچیده‌ای که معمولاً تحلیل ساده‌ای ندارند ارائه شده است.

برنامه‌های شبیه‌سازی

در این کتاب خیلی از شکل‌ها عنوانی دارد که آن عنوان در بالای برنامه نیز یکی شده است. اینها عناوین برنامه‌های متلب MATLAB است که برای تولید این شکل‌ها بکار گرفته شده‌اند. این برنامه‌ها برای خوانندگان آماده و در پیوست "د" آورده شده و همچنین خواننده‌گان می‌توانند از درگاه اینترنت زیر آنرا دریافت کنند.

http://booksupport.wiley.com.

---

[۱] Idaho
[۲] Fourier theory
[۳] finite difference time domain
[۴] Green's function
[۵] Supriyo Datta
[۶] Purdue University
[۷] harmonic oscillator

www.ketab.ir

خوانندگان می‌توانند از این برنامه‌ها استفاده کرده و نتایج شکل‌ها را بدست آورده و نیز شاید مطالب بیشتری را کاوش نمایند. در برخی حالات میبایست برنامه‌ها را بکار برده تا تمرینات انتهای فصول را تکمیل نمایند. خیلی از برنامه‌های شبیه‌سازی حوزه زمان توسط روش FDTD است، و آنها رفتار یک الکترون را در حوزه زمان مشخص می‌نمایند. اکثر خوانندگان این برنامه‌ها را در درک مفاهیم مکانیک کوانتوم مفید و ارزشمند خواهند یافت. برای جزوه حل تمرینات می‌توانید توسط آدرس زیر آنرا درخواست کنید.

pressbooks@ieee.org

دنیس م سولیوان

تقدیر و تشکر نه‌یسنده

اینجانب عمیقاً مدیون پروفسور سوپریو داتا از دانشگاه پرودو بخاطر کمک‌هایش نه فقط در تهیه وتدوین این کتاب، بلکه در پیشرفت و ترقی کلاسی که منجر به این کتاب شد هستم. از افراد زیر که تجربه‌شان در ویرایش این کتاب کمک بسیاری به من کرد متشکرم: پروفسور ریچارد زیولوسکی از دانشگاه آریزونا، پروفسور فرد بارلو، پروفسور اف مارتی یوتربرگ، و پاول ویلسون از دانشگاه آیداهو؛ پروفسور دیوید سیتر از انستیتو تکنولوژی جورجیا؛ پروفسور انریگ ناوارو از دانشگاه والنسیا؛ و دکتر الکسی مسایت از کانون امریکا. از حمایت‌های رئیس دپارتمان خودم، پروفسور براین جانسون در زمان تدویر این کتاب بسیار ممنونم. آقای ری آندرسون حمایت فنی خوبی را تدارک دید. ضمناً از خانم جی لالوند بخاطر کمکهای ویرایشی سپاسگزارم.

www.ketab.ir

فهرست مطالب

۱.۰ پیشگفتار ۱
۲.۰ تقدیر و تشکر ۲

۱ مقدمه **۱**
۱ چرا مکانیک کوانتوم؟ ۱
۱.۱.۱ اثر فوتوالکتریک ۱
۲.۱.۱ دوگانگی موج و ذره ۲
۳.۱.۱ معادلات انرژی ۳
۴.۱.۱ معادله شرودینگر ۵
۲.۱ شبیه‌سازی یک بعدی معادله زمانی شرودینگر ۷
۱.۲.۱ انتشار یک ذره در فضای آزاد ۷
۲.۲.۱ انتشار یک ذره با وجود پتانسیل ۱۱
۳.۱ پارامترهای فیزیکی: زمان پذیری ۱۲
۴.۱ پتانسیل $V(x)$ ۱۶
۱.۴.۱ نوار رسانش یک بعدی ۱۶
۲.۴.۱ یک ذره در میدان الکتریکی ۱۸
۵.۱ انتشار درون سد پتانسیل ۲۰
۶.۱ خلاصه ۲۱
مسائل ۲۳

۲ حالت‌های ایستا **۳۷**
۱.۲ چاه نامحدود ۳۷
۱.۱.۲ حالت‌های ویژه و انرژی‌های ویژه ۴۰
۲.۱.۲ کوانتیزه کردن ۴۳
۲.۲ تجزیه تابع‌ویژه ۴۴
۳.۲ شرایط مرزی متناوب ۴۶
۴.۲ توابع ویژه برای هر شکل پتانسیل دلخواه ۴۸
۵.۲ چاه‌های کوپل شده ۵۰
۶.۲ نماد براکت ۵۴
۷.۲ خلاصه ۵۶
مسائل ۵۷

۳ نظریه فوریه در مکانیک کوانتوم **۵۹**
۱.۳ تبدیل فوریه ۵۹
۲.۳ تحلیل فوریه و حالت‌های مجاز ۶۳

www.ketab.ir

۳.۳ عدم قطعیت ۶۶
۴.۳ انتقال از طریق FFT ۶۹
۵.۳ خلاصه ۷۳
مسائل ۷۴

۴ جبر ماتریسی در مکانیک کوانتوم ۷۹
۱.۴ نمایش برداری و ماتریسی ۷۹
۱.۱.۴ متغیرهای حالت و بردارها ۷۹
۲.۱.۴ عملگرها به‌عنوان ماتریس ۸۲
۲.۴ نمایش ماتریس هامیلتونی ۸۴
۱.۲.۴ یافتن مقادیر ویژه و بردارهای ویژه یک ماتریس ۸۵
۲.۱.۲.۴ چاهی با شرایط مرزی تناوبی ۸۶
۳.۱.۴ نمایش سازگار هماهنگ ۸۸
۳.۴ نمایش فضای ویژه ۸۹
۴.۴ فرموله کردن ۹۲
۱.۴.۴ عملگرهای مرکزیتی ۹۲
۲.۴.۴ فضاهای تابعی ۹۲
پیوست: مروری بر جبر ماتریس‌ها ۹۳
مسائل ۹۷

۵ مقدمه‌ای بر مکانیک آماری ۹۹
۱.۵ چگالی حالت‌ها ۹۹
۱.۱.۵ چگالی حالت‌های یک بعدی ۹۹
۲.۱.۵ چگالی حالت‌های دو بعدی ۱۰۲
۳.۱.۵ چگالی حالت‌های سه بعدی ۱۰۳
۴.۱.۵ چگالی حالت‌ها در نوار رسانش یک نیمه‌هادی ۱۰۴
۲.۵ توزیع‌های احتمال ۱۰۴
۱.۲.۵ فرمیون‌ها در مقابل ذرات کلاسیک ۱۰۵
۲.۲.۵ توزیع احتمال به عنوان تابعی از انرژی ۱۰۶
۳.۲.۵ توزیع توپ‌های فرمیونی ۱۰۷
۴.۲.۵ ذرات در چاه نامحدود یک بعدی ۱۱۲
۵.۲.۵ تقریب بولتزمن ۱۱۴
۳.۵ توزیع متعادل الکترون‌ها و حفره‌ها ۱۱۵
۴.۵ چگالی الکترون و ماتریس چگالی ۱۱۷
۱.۴.۵ ماتریس چگالی ۱۱۸
مسائل ۱۲۰

۶ نوارها و زیرنوارها ۱۲۳
۱.۶ نوارهای در نیمه‌هادیها ۱۲۳
۲.۶ جرم موثر ۱۲۶
۳.۶ مودها در ساختارهای کوانتومی ۱۳۰
مسائل ۱۳۴

www.ketab.ir

۷ معادله شرودینگر برای فرمیون‌های با اسپین ۱/۲ **۱۳۷**
۱.۷ اسپین در فرمیون‌ها ۱۳۷
۱.۱.۷ اسپینورهای در سه بعد ۱۳۸
۲.۱.۷ ماتریس‌های اسپین پاولی ۱۴۱
۳.۱.۷ شبیه‌سازی اسپین ۱۴۲
۲.۷ الکترون در میدان مغناطیسی ۱۴۷
۳.۷ ذره باردار متحرک در میدان‌های ترکیبی E و B ۱۵۱
۴.۷ تقریب هارتری-فوک ۱۵۳
۱.۴.۷ جمله هارتری ۱۵۳
۲.۴.۷ جمله فوک ۱۵۶
مسائل ۱۵۸

۸ تابع گرین **۱۶۳**
۱.۸ مقدمه ۱۶۴
۲.۸ ماتریس چگالی و ماتریس طیفی ۱۶۵
۳.۸ نوع ماتریسی تابع گرین ۱۶۷
۱.۳.۸ نمایش تابع‌ویژه تابع گرین ۱۶۷
۲.۳.۸ نمایش فضای حقیقی تابع گرین ۱۷۰
۴.۸ ماتریس چگالی ۱۷۱
۱.۴.۸ میدان الکتریکی در دوسر کانال ۱۷۴
۲.۴.۸ کمی کردن در باره اتصالات ۱۷۵
مسائل ۱۷۵

۹ انتقال **۱۸۱**
۱.۹ کانال تک انرژی ۱۸۱
۲.۹ عبور جریان ۱۸۳
۳.۹ ماتریس انتقال ۱۸۴
۱.۳.۹ عبور جریان از کانال ۱۸۷
۲.۳.۹ شارش خروجی از کانال ۱۸۷
۳.۳.۹ انتقال ۱۸۸
۴.۳.۹ تعیین عبور جریان ۱۸۸
۴.۹ رسانش ۱۹۳
۵.۹ پروبهای بوتیکر ۱۹۴
۶.۹ یک نمونه شبیه‌سازی ۱۹۸
مسائل ۱۹۸

۱۰ روش‌های تقریبی **۲۰۵**
۱.۱۰ روش تغییرات ۲۰۵
۲.۱۰ نظریه آشفتگی غیر تبهگنی ۲۰۸
۱.۲.۱۰ اصلاح مرتبه اول ۲۰۹
۲.۲.۱۰ اصلاحات مرتبه دوم ۲۱۱
۳.۱۰ نظریه تغییرات تبهگن ۲۱۲
۴.۱۰ نظریه آشفتگی وابسته به زمان ۲۱۵
۱.۴.۱۰ اضافه کردن میدان الکتریکی به چاه نامحدود ۲۱۷
۲.۴.۱۰ آشفتگی‌های سینوسی ۲۱۹

www.ketab.ir

۳.۴.۱۰ جذب، گسیل و گسیل برانگیخته ۲۲۱
۴.۴.۱۰ محاسبه آشفتگی‌های سینوسی با استفاده از نظریه فوریه ۲۲۱
۵.۴.۱۰ قانون طلایی فرمی ۲۲۸
مسائل ۲۳۰

۱۱ نوسان‌ساز هماهنگ ۲۳۳
۱.۱۱ نوسان‌ساز هماهنگ یک بعدی ۲۳۳
۱.۱.۱۱ تشریح توابع‌ویژه نوسان‌ساز هارمونیکی ۲۳۸
۲.۱.۱۱ رویت‌پذیر سازگار ۲۳۸
۲.۱۱ حالت همدوس نوسان‌ساز هماهنگ ۲۳۹
۱.۲.۱۱ جمع‌اثر دو حالت‌ویژه در یک چاه نامحدود ۲۳۹
۲.۲.۱۱ جمع آثار چهار حالت در یک نوسان‌ساز هماهنگ ۲۴۰
۳.۲.۱۱ حالت همدوس ۲۴۰
۳.۱۱ نوسان‌ساز هماهنگ دو بعدی ۲۴۲
۱.۳.۱۱ شبیه سازی یک نقطه کوانتمی ۲۴۲
مسائل ۲۴۹

۱۲ تعیین توابع‌ویژه توسط شبیه سازی حوزه زمان ۲۵۱
۱.۱۲ تعیین انرژی‌های‌ویژه و توابع‌ویژه یک بعدی ۲۵۱
۱.۱.۱۲ تعیین توابع‌ویژه ۲۵۴
۲.۱۲ تعیین توابع ویژه ساختارهای شبه‌یک بعدی ۲۵۶
۱.۲.۱۲ تعیین توابع‌ویژه در یک ساختار غیرمعمولی ۲۵۸
۳.۱۲ تعیین مجموعه کاملی از توابع ویژه ۲۵۹
مسائل ۲۶۱

آ ثابت‌های مهم و واحدها ۲۶۹

ب تحلیل فوریه و تبدیل فوریه سریع ۲۷۱
ب.۱ ساختار (FFT) ۲۷۱
ب.۲ پنجره‌گذاری ۲۷۴
ب.۳ FFT متغیرهای حالت ۲۷۶
مسائل ۲۷۶

پ مقدمه‌ای بر روش تابع گرین ۲۷۹
پ.۱ محفظه الکترومغناطیسی یک بعدی ۲۸۰
مسائل ۲۸۲

ت برنامه‌های بکار رفته در این کتاب ۲۸۵
ت.۱ فصل اول ۲۸۵
ت.۲ فصل دوم ۲۸۷
ت.۳ فصل سوم ۲۹۸
ت.۴ فصل چهارم ۳۱۰
ت.۵ فصل پنجم ۳۱۳
ت.۶ فصل ششم ۳۱۵
ت.۷ فصل هفتم ۳۲۳

www.ketab.ir

ت.۸ فصل هشتم ۳۳۴
ت.۹ فصل نُهم ۳۴۲
ت.۱۰ فصل دهم ۳۵۲
ت.۱۱ فصل یازدهم ۳۷۲
ت.۱۲ فصل دوازدهم ۳۸۸
ت.۱۳ پیوست- ب ۴۰۹
نمایه ۴۱۸

www.ketab.ir