

# مکانیک کوانتومی

## مفاهیم و کاربردها

(ویرایش دوم)

نویسنده:

نورالدین زتیلی

برگردان:

محمد بهتاج لجبینی و نگار اورعی

نیاز دانش

سرشناسه	: زتیلی، نورالدین Zettili, Nouredine
عنوان و نام پدیدآور	: مکانیک کوانتومی: مفاهیم و کاربردها / نویسنده: نورالدین زتیلی، برگردان محمد بهتاج لجبینی، نگار اورعی.
مشخصات نشر	: تهران: نیاز دانش، ۱۳۹۳.
مشخصات ظاهری	: ۸۸۰ ص، مصور، جدول، نمودار.
شابک	: ۹۷۸-۶۰۰-۶۴۸۱-۰۸-۱
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا.
یادداشت	: عنوان اصلی: Quantum Mechanics: Concepts and Applications, 2 <sup>nd</sup> . ed, 2009
یادداشت	: نمایه.
موضوع	: کوانتوم.
شناسه افزوده	: بهتاج لجبینی، محمد، ۱۳۵۷، مترجم.
شناسه افزوده	: اورعی، نگار، ۱۳۶۳، مترجم.
رده‌بندی کنگره	: QC۱۷۴/۱۲/ز۲م۷ ۱۳۹۱
رده‌بندی دیوئی	: ۵۳۰/۱۲
شماره کتابشناسی ملی	: ۲۶۵۲۰۷۲
ISBN: 978-600-6481-08-1	



نام کتاب	: مکانیک کوانتومی (مفاهیم و کاربردها) - ویرایش دوم
نویسنده	: نورالدین زتیلی
برگردان	: محمد بهتاج لجبینی - نگار اورعی
مدیر اجرایی - ناظر بر چاپ	: حمیدرضا محمد شیرازی - محمد شمس
ناشر	: نیاز دانش
صفحه‌آرا	: واحد تولید انتشارات نیاز دانش
لیتوگرافی / چاپ	: گنجینه
نوبت چاپ	: دوم - ۱۳۹۳
شمارگان	: ۱۰۰۰ نسخه
قیمت	: ۲۳۵۰۰۰ ریال

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۶۴۸۱-۰۸-۱ ISBN:978-600-6481-08-1

هرگونه چاپ و تکثیر (اعم از زیراکس، بازنویسی، ضبط کامپیوتری و تهیهی CD) از محتویات این اثر بدون اجازه کتبی ناشر ممنوع است، متخلفان به موجب بند ۵ از ماده ۲ قانون حمایت از مؤلفان، مصنفان و هنرمندان تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند.

کلیه حقوق این اثر برای ناشر محفوظ است.

تماس با انتشارات: ۰۹۱۲۷۰۷۳۹۳۵-۰۹۱۲۷۰۷۳۹۳۵-۶۶۴۷۸۱۰۸-۶۶۴۷۸۱۰۶-۲۱

[www.Niaze-Danesh.com](http://www.Niaze-Danesh.com)

مشاوره جهت نشر: ۲۱۰۶۷۰۹ - ۰۹۱۲

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ر	پیش‌گفتار مترجم .....
س	پیش‌گفتار ویرایش دوم .....
ز	پیش‌گفتار ویرایش نخست .....
ص	توصیه به دانشجو .....
۱	فصل اول / اصول فیزیک کوانتومی .....
۱	۱-۱ مشاهدات تاریخی .....
۵	۲-۱ جنبه‌ی ذره‌ای تابش .....
۵	۱-۲-۱ تابش جسم سیاه .....
۱۴	۲-۲-۱ اثر فوتوالکتریک .....
۱۸	۳-۲-۱ اثر کامپتون .....
۲۲	۴-۲-۱ تولید زوج .....
۲۴	۳-۱ جنبه‌ی موجی ذرات .....
۲۴	۱-۳-۱ فرضیه‌ی دوپرویی: امواج مادی .....
۲۵	۲-۳-۱ تایید تجربی فرضیه‌ی دوپرویی .....
۲۷	۳-۳-۱ امواج مادی برای اجسام ماکروسکوپی .....
۲۹	۴-۱ ذرات بر حسب امواج .....
۲۹	۱-۴-۱ دیدگاه کلاسیک ذرات و امواج .....
۳۱	۲-۴-۱ دیدگاه کوانتومی ذرات و امواج .....
۳۴	۳-۴-۱ دوگانگی موج - ذره: مکملیت .....
۳۵	۴-۴-۱ اصل برهم‌نهی خطی .....
۳۶	۵-۱ طبیعت غیر قابل تعیین دنیای میکروفیزیکی .....
۳۷	۱-۵-۱ اصل عدم قطعیت هایزنبرگ .....
۳۹	۲-۵-۱ تعبیر احتمالاتی .....
۴۰	۶-۱ گذارهای اتمی و طیف‌نگاری .....
۴۰	۱-۶-۱ مدل سیاره‌ای رادرفورد برای اتم .....

۴۱	..... ۱-۶-۲ مدل بوهر برای اتم هیدروژن
۴۸	..... ۱-۷ قواعد کوانتاش
۵۱	..... ۱-۸ بسته‌های موج
۵۲	..... ۱-۸-۱ بسته‌های موج جای‌گزیده
۵۶	..... ۱-۸-۲ بسته‌های موج و روابط عدم قطعیت
۵۷	..... ۱-۸-۳ حرکت بسته‌های موج
۷۲	..... ۱-۹ سخن پایانی
۷۳	..... ۱-۱۰ مسأله‌های حل شده
۹۵	..... ۱-۱۱ تمرین‌ها
۱۰۵	..... فصل دوم / ابزارهای ریاضی مکانیک کوانتومی
۱۰۵	..... ۲-۱ پیش‌گفتار
۱۰۶	..... ۲-۲ فضای هیلبرت و توابع موج
۱۰۶	..... ۲-۲-۱ فضای برداری خطی
۱۰۷	..... ۲-۲-۲ فضای هیلبرت
۱۰۸	..... ۲-۲-۳ بعد و پایه یک فضای برداری
۱۱۱	..... ۲-۲-۴ توابع انتگرال‌پذیر مجذوری: توابع موج
۱۱۲	..... ۲-۳ نمادگذاری دیراک
۱۱۹	..... ۲-۴ عملگرها
۱۱۹	..... ۲-۴-۱ تعریف‌های کلی
۱۲۱	..... ۲-۴-۲ همیوگ هرmitی
۱۲۳	..... ۲-۴-۳ عملگرهای تصویری
۱۲۴	..... ۲-۴-۴ جبر جابه‌جاگری
۱۲۶	..... ۲-۴-۵ رابطه عدم قطعیت میان دو عملگر
۱۲۸	..... ۲-۴-۶ توابع عملگرها
۱۲۹	..... ۲-۴-۷ عملگرهای معکوس و یکانی
۱۳۰	..... ۲-۴-۸ ویژه مقدارها و ویژه بردارهای یک عملگر
۱۳۴	..... ۲-۴-۹ تبدیل‌های یکانی بی‌نهایت کوچک و متناهی
۱۳۷	..... ۲-۵ نمایش در پایه‌های گسسته
۱۳۷	..... ۲-۵-۱ نمایش ماتریسی کت‌ها، براه‌ها و عملگرها
۱۴۹	..... ۲-۵-۲ تغییر پایه‌ها و تبدیل‌های مکانی

۱۵۳	..... ۲-۵-۳ نمایش ماتریسی مسأله‌ی ویژه‌مقداری
۱۵۷	..... ۲-۶-۶ نمایش در پایه‌های پیوسته
۱۵۷	..... ۲-۶-۱ راه‌کار کلی
۱۵۹	..... ۲-۶-۲ نمایش مکان
۱۶۰	..... ۲-۶-۳ نمایش اندازه حرکت
۱۶۱	..... ۲-۶-۴ ارتباط میان نمایش‌های مکان و اندازه حرکت
۱۶۵	..... ۲-۶-۵ عملگر پاریته
۱۶۸	..... ۲-۷-۷ مکانیک ماتریسی و موجی
۱۶۸	..... ۲-۷-۱ مکانیک ماتریسی
۱۶۹	..... ۲-۷-۲ مکانیک موجی
۱۷۰	..... ۲-۸-۸ سخن پایانی
۱۷۱	..... ۲-۹-۹ مسأله‌های حل شده
۲۰۰	..... ۲-۱۰-۱۰ تمرین‌ها
۲۱۳	..... فصل سوم / اصول موضوعه‌ی مکانیک کوانتومی
۲۱۳	..... ۳-۱-۱ پیش‌گفتار
۲۱۴	..... ۳-۲-۲ اصول موضوعه‌ی اساسی مکانیک کوانتومی
۲۱۶	..... ۳-۳-۳ حالت یک سیستم
۲۱۷	..... ۳-۳-۱ چگالی احتمال
۲۱۸	..... ۳-۳-۲ اصل برهم‌نهی
۲۲۰	..... ۳-۴-۴ مشاهده‌پذیرها و عملگرها
۲۲۲	..... ۳-۵-۵ اندازه‌گیری در مکانیک کوانتومی
۲۲۲	..... ۳-۵-۱ چگونه اندازه‌گیری‌ها سیستم را مختل می‌کند
۲۲۴	..... ۳-۵-۲ مقدار چشم‌داشتی
۲۲۷	..... ۳-۵-۳ مجموعه‌های کامل عملگرهای جابه‌جاشونده (CSCO)
۲۳۰	..... ۳-۵-۴ اندازه‌گیری و روابط عدم قطعیت
۲۳۱	..... ۳-۶-۶ تحول زمانی حالت سیستم
۲۳۱	..... ۳-۶-۱ عملگر تحول زمانی
۲۳۲	..... ۳-۶-۲ حالت‌های مانا: پتانسیل‌های مستقل از زمان
۲۳۴	..... ۳-۶-۳ معادله‌ی شرودینگر و بسته‌های موج
۲۳۴	..... ۳-۶-۴ پایستگی احتمال

۲۳۶	..... تحول زمانی مقدار چشم‌داشتی‌ها..... ۵-۶-۳
۲۳۸	..... تقارن‌ها و قوانین پایستگی..... ۷-۳
۲۳۸	..... تبدیل‌های یکانی بی‌نهایت کوچک..... ۱-۷-۳
۲۳۹	..... تبدیل‌های یکانی متناهی..... ۲-۷-۳
۲۴۰	..... تقارن‌ها و قوانین پایستگی..... ۳-۷-۳
۲۴۳	..... ارتباط میان کوانتوم و مکانیک کلاسیک..... ۸-۳
۲۴۳	..... براکت‌های پواسون و جابه‌جاگرها..... ۱-۸-۳
۲۴۵	..... قضیه‌ی ارنفست..... ۲-۸-۳
۲۴۷	..... مکانیک کوانتومی و مکانیک کلاسیک..... ۳-۸-۳
۲۴۸	..... ۹- مسأله‌های حل شده..... ۹-۳
۲۷۰	..... ۱۰- تمرین‌ها..... ۱۰-۳
۲۷۹	..... فصل چهارم / مسأله‌های یک بعدی..... ۲۷۹
۲۷۹	..... ۱-۴ پیش‌گفتار..... ۱-۴
۲۸۰	..... ۲-۴ ویژگی‌های حرکت یک بعدی..... ۲-۴
۲۸۱	..... ۱-۲-۴ طیف گسسته (حالت‌های مقید)..... ۱-۲-۴
۲۸۱	..... ۲-۲-۴ طیف پیوسته (حالت‌های نامقید)..... ۲-۲-۴
۲۸۲	..... ۳-۲-۴ طیف ترکیبی..... ۳-۲-۴
۲۸۲	..... ۴-۲-۴ پتانسیل‌های متقارن و پارینه..... ۴-۲-۴
۲۸۳	..... ۳-۴ ذره‌ی آزاد: حالت‌های پیوسته..... ۳-۴
۲۸۵	..... ۴-۴ پله‌ی پتانسیل..... ۴-۴
۲۹۰	..... ۵-۴ سد و چاه پتانسیل..... ۵-۴
۲۹۱	..... ۱-۵-۴ حالت $E > V_0$ ..... ۱-۵-۴
۲۹۴	..... ۲-۵-۴ حالت $E > V_0$ : تونل زنی..... ۲-۵-۴
۲۹۷	..... ۳-۵-۴ اثر تونل زنی..... ۳-۵-۴
۲۹۹	..... ۶-۴ پتانسیل چاه مربعی نامتناهی..... ۶-۴
۲۹۹	..... ۱-۶-۴ چاه مربعی نامتقارن..... ۱-۶-۴
۳۰۴	..... ۲-۶-۴ چاه پتانسیل متقارن..... ۲-۶-۴
۳۰۴	..... ۷-۴ پتانسیل چاه مربعی متناهی..... ۷-۴
۳۰۴	..... ۱-۷-۴ جواب‌های پراکندگی $(E > V_0)$ ..... ۱-۷-۴
۳۰۵	..... ۲-۷-۴ جواب‌های حالت مقید $(0 < E < V_0)$ ..... ۲-۷-۴

۳۰۹	..... ۸-۴ نوسانگر هماهنگ
۳۱۳	..... ۱-۸-۴ ویژه مقدارهای انرژی
۳۱۵	..... ۲-۸-۴ ویژه حالت های انرژی
۳۱۶	..... ۳-۸-۴ ویژه حالت های انرژی در فضای مکان
۳۲۰	..... ۴-۸-۴ نمایش ماتریسی عملگرهای گوناگون
۳۲۲	..... ۵-۸-۴ مقدار چشم داشتی عملگرهای گوناگون
۳۲۳	..... ۹-۴ حل عددی معادله ی شرودینگر
۳۲۳	..... ۱-۹-۴ روش کار عددی
۳۲۵	..... ۲-۹-۴ الگوریتم
۳۲۷	..... ۱۰-۴ مسأله های حل شده
۳۵۸	..... ۱۱-۴ تمرین ها
۳۶۹	..... فصل پنجم / اندازه حرکت زاویه ای
۳۶۹	..... ۱-۵ پیش گفتار
۳۷۰	..... ۲-۵ اندازه حرکت زاویه ای مداری
۳۷۲	..... ۳-۵ قواعد کلی اندازه حرکت زاویه ای
۳۷۸	..... ۴-۵ نمایش ماتریسی اندازه حرکت زاویه ای
۳۸۲	..... ۵-۵ نمایش هندسی اندازه حرکت زاویه ای
۳۸۴	..... ۶-۵ اندازه حرکت زاویه ای اسپین
۳۸۴	..... ۱-۶-۵ گواه تجربی اسپین
۳۸۷	..... ۲-۶-۵ نظریه ی عمومی اسپین
۳۸۸	..... ۳-۶-۵ اسپین $\frac{1}{2}$ و ماتریس های پاولی
۳۹۲	..... ۷-۵ ویژه توابع اندازه حرکت زاویه ای مداری
۳۹۳	..... ۱-۷-۵ ویژه توابع و ویژه مقدارهای $\hat{L}_z$
۳۹۴	..... ۲-۷-۵ ویژه توابع $\hat{L}^2$
۳۹۸	..... ۳-۷-۵ ویژگی های هماهنگ های کروی
۴۰۲	..... ۸-۵ مسأله های حل شده
۴۲۰	..... ۹-۵ تمرین ها
۴۳۱	..... فصل ششم / مسأله های سه بُعدی
۴۳۱	..... ۱-۶ پیش گفتار
۴۳۲	..... ۲-۶ مسأله های سه بُعدی در مختصات دکارتی

۴۳۲	..... ۱-۲-۶ روش کار کلی: جداسازی متغیرها
۴۳۳	..... ۲-۲-۶ ذره‌ی آزاد
۴۳۵	..... ۳-۲-۶ پتانسیل جعبه
۴۳۷	..... ۴-۲-۶ نوسانگر هماهنگ
۴۴۰	..... ۳-۶ مسأله‌های سه بعدی در مختصات کروی
۴۴۰	..... ۱-۳-۶ پتانسیل مرکزی: روش کار کلی
۴۴۴	..... ۲-۳-۶ ذره‌ی آزاد در مختصات کروی
۴۴۷	..... ۳-۳-۶ پتانسیل کروی چاه مربعی
۴۴۹	..... ۴-۳-۶ نوسانگر هماهنگ همسانگرد
۴۵۴	..... ۵-۳-۶ اتم هیدروژن
۴۷۱	..... ۶-۳-۶ اثر میدان‌های مغناطیسی روی پتانسیل‌های مرکزی
۴۷۵	..... ۴-۶ سخن پایانی
۴۷۶	..... ۵-۶ مسأله‌های حل شده
۴۹۸	..... ۶-۶ تمرین‌ها
۵۰۵	..... فصل هفتم / چرخش‌ها و جمع اندازه حرکت‌های زاویه‌ای
۵۰۵	..... ۱-۷ چرخش‌ها در فیزیک کلاسیک
۵۰۷	..... ۲-۷ چرخش‌ها در مکانیک کوانتومی
۵۰۸	..... ۱-۲-۷ چرخش‌های بی‌نهایت کوچک
۵۱۰	..... ۲-۲-۷ چرخش‌های متناهی
۵۱۱	..... ۳-۲-۷ خواص عملگر چرخش
۵۱۱	..... ۴-۲-۷ چرخش‌های اوپلر
۵۱۴	..... ۵-۲-۷ نمایش عملگر چرخش
۵۱۶	..... ۶-۲-۷ ماتریس‌های چرخش و هماهنگ‌های کروی
۵۲۰	..... ۳-۷ جمع اندازه حرکت‌های زاویه‌ای
۵۲۰	..... ۱-۳-۷ جمع دو اندازه حرکت زاویه‌ای: قواعد کلی
۵۲۷	..... ۲-۳-۷ محاسبه‌ی ضرایب کلبش - گوردن
۵۳۴	..... ۳-۳-۷ جفت شدگی اندازه حرکت‌های زاویه‌ای مداری و اسپینی
۵۳۹	..... ۴-۳-۷ جمع بیش از دو اندازه حرکت زاویه‌ای
۵۴۱	..... ۵-۳-۷ ماتریس‌های دوران برای جفت‌شدگی دو اندازه حرکت زاویه‌ای
۵۴۳	..... ۶-۳-۷ ایزوسپین



۵۴۷	..... ۴-۷ عملگرهای نرده‌ای، برداری و تانسوری
۵۴۸	..... ۱-۴-۷ عملگرهای نرده‌ای
۵۴۸	..... ۲-۴-۷ عملگرهای برداری
۵۵۰	..... ۳-۴-۷ عملگرهای تانسوری: تانسورهای کاهش‌پذیر و کاهش‌ناپذیر
۵۵۳	..... ۴-۴-۷ قضیه‌ی ویگنر - اکارت برای عملگرهای تانسور کروی
۵۵۷	..... ۵-۷ مسأله‌های حل شده
۵۷۷	..... ۶-۷ تمرین‌ها
<b>۵۸۵</b>	<b>..... فصل هشتم / ذرات یکسان</b>
۵۸۵	..... ۱-۸ سیستم‌های چند ذره‌ای
۵۸۵	..... ۱-۱-۸ معادله‌ی شرودینگر
۵۸۷	..... ۲-۱-۸ تقارن تبدیلی
۵۸۹	..... ۳-۱-۸ سیستم‌هایی با ذرات غیربرهم‌کنشی تمییزپذیر
۵۹۲	..... ۲-۸ سیستم‌های ذرات یکسان
۵۹۲	..... ۱-۲-۸ ذرات یکسان در مکانیک کلاسیک و کوانتومی
۵۹۴	..... ۲-۲-۸ تبه‌گنی تبدیلی
۵۹۵	..... ۳-۲-۸ اصل متقارن‌سازی
۵۹۶	..... ۴-۲-۸ ساختمان توابع متقارن و پاد متقارن
۵۹۷	..... ۵-۲-۸ سیستم‌های ذرات یکسان غیربرهم‌کنشی
۶۰۱	..... ۳-۸ اصل طرد پاولی
۶۰۳	..... ۴-۸ اصل طرد و جدول تناوبی
۶۱۲	..... ۵-۸ مسأله‌های حل شده
۶۲۴	..... ۶-۸ تمرین‌ها
<b>۶۲۹</b>	<b>..... فصل نهم / روش‌های تقریبی برای حالت‌های مانا</b>
۶۲۹	..... ۱-۹ پیش‌گفتار
۶۳۰	..... ۲-۹ نظریه‌ی اختلال مستقل از زمان
۶۳۱	..... ۱-۲-۹ نظریه‌ی اختلال غیرتبه‌گن
۶۳۸	..... ۲-۲-۹ نظریه‌ی اختلال تبه‌گن
۶۴۳	..... ۳-۲-۹ ساختار ریز و اثر زیمان نابهنجار
۶۵۴	..... ۳-۹ روش وردشی
۶۶۴	..... ۴-۹ روش ونتزل - کرامر - بریلوئن

۶۶۴	..... ۱-۴-۹ قاعده‌ی کلی
۶۶۸	..... ۲-۴-۹ حالت‌های مقید برای چاه‌های پتانسیل بدون دیواره‌های صلب
۶۷۶	..... ۳-۴-۹ حالت‌های مقید برای چاه‌های پتانسیل با یک دیواره‌ی صلب
۶۷۸	..... ۴-۴-۹ حالت‌های مقید برای چاه‌های پتانسیل با دو دیواره‌ی صلب
۶۸۱	..... ۵-۴-۹ تونل‌زنی به درون یک سد پتانسیل
۶۸۴	..... ۵-۹ سخن پایانی
۶۸۵	..... ۶-۹ مساله‌های حل شده
۷۲۴	..... ۷-۹ تمرین‌ها
۷۳۵	<b>فصل دهم / نظریه‌ی اختلال وابسته به زمان</b>
۷۳۵	..... ۱-۱۰ پیش‌گفتار
۷۳۵	..... ۲-۱۰ تصویرهای مکانیک کوانتومی
۷۳۶	..... ۱-۲-۱۰ تصویر شرودینگر
۷۳۶	..... ۲-۲-۱۰ تصویر هایزنبرگ
۷۳۸	..... ۳-۲-۱۰ تصویر برهم‌کنشی
۷۳۹	..... ۳-۱۰ نظریه‌ی اختلال وابسته به زمان
۷۴۲	..... ۱-۳-۱۰ احتمال گذار
۷۴۳	..... ۲-۳-۱۰ احتمال گذار برای یک اختلال ثابت
۷۴۵	..... ۳-۳-۱۰ احتمال گذار برای یک اختلال هماهنگ
۷۴۹	..... ۴-۱۰ تقریب‌های بی‌دررو و ناگهانی
۷۴۹	..... ۱-۴-۱۰ تقریب بی‌دررو
۷۵۰	..... ۲-۴-۱۰ تقریب ناگهانی
۷۵۴	..... ۵-۱۰ برهم‌کنش اتم‌ها با تابش
۷۵۵	..... ۱-۵-۱۰ روش کلاسیکی تابش فرودی
۷۵۷	..... ۲-۵-۱۰ کوانتشن میدان الکترومغناطیسی
۷۶۱	..... ۳-۵-۱۰ آهنگ‌های گذار برای جذب و گسیل تابش
۷۶۲	..... ۴-۵-۱۰ آهنگ‌های گذار در تقریب دو قطبی
۷۶۳	..... ۵-۵-۱۰ قواعد گزینش دو قطبی الکتریکی
۷۶۵	..... ۶-۵-۱۰ گسیل خودبه‌خودی
۷۶۹	..... ۶-۱۰ مساله‌های حل شده
۷۸۸	..... ۷-۱۰ تمرین‌ها

۷۹۵	فصل یازدهم / نظریه‌ی پراکندگی
۷۹۵	۱-۱۱ پراکندگی و سطح مقطع
۷۹۷	۱-۱-۱۱ ارتباط زاویه‌ها در چارچوب‌های آزمایشگاه و مرکز جرم
۷۹۹	۲-۱-۱۱ ارتباط سطح مقطع‌های آزمایشگاهی و مرکز جرم
۸۰۱	۲-۱۱ دامنه‌های پراکندگی ذرات بدون اسپین
۸۰۳	۱-۲-۱۱ دامنه‌ی پراکندگی و سطح مقطع دیفرانسیلی
۸۰۴	۲-۲-۱۱ دامنه‌ی پراکندگی
۸۰۸	۳-۱۱ تقریب بورن
۸۰۸	۱-۳-۱۱ تقریب اول بورن
۸۱۰	۲-۳-۱۱ اعتبار تقریب اول بورن
۸۱۲	۴-۱۱ تحلیل پاره موجی
۸۱۲	۱-۴-۱۱ تحلیل پاره موجی برای پراکندگی کشسان
۸۱۷	۲-۴-۱۱ تحلیل پاره موجی برای پراکندگی غیرکشسان
۸۱۹	۵-۱۱ پراکندگی ذرات یکسان
۸۲۲	۶-۱۱ مساله‌های حل شده
۸۳۶	۷-۱۱ تمرین‌ها
۸۳۹	پیوست آ تابع دلتا
۸۳۹	آ-۱ تابع دلتای یک بعدی
۸۳۹	آ-۱-۱ تعریف‌های گوناگون تابع دلتا
۸۴۰	آ-۱-۲ خواص تابع دلتا
۸۴۱	آ-۱-۳ مشتق تابع دلتا
۸۴۲	آ-۲ تابع دلتای سه بعدی
۸۴۴	پیوست ب تکانه‌ی زاویه‌ای در مختصات کروی
۸۴۴	ب-۱ به دست آوردن برخی روابط عمومی
۸۴۵	ب-۲ گرادیان و لاپلاسی در مختصات کروی
۸۴۶	ب-۳ تکانه‌ی زاویه‌ای در مختصات کروی
۸۴۸	پیوست پ کد $C^{++}$ برای حل معادله‌ی شرودینگر
۸۵۰	روابط اساسی و ثابت‌های فیزیکی و تبدیل واحدها
۸۵۷	نمایه

## پیش‌گفتار مترجم

در حوزه‌ی مکانیک کوانتومی کتاب‌های بسیاری به رشته‌ی تحریر درآمده‌اند که هر یک با رویکردی خاص به بیان مفاهیم آن پرداخته‌اند. کتاب حاضر، مجموعه‌ای مدون و پربار برای درک بهتر مفاهیم مکانیک کوانتومی است و دربرگیرنده‌ی مثال‌ها، مسایل حل شده و تمرین‌های سودمندی است که نویسنده آن‌ها را با هدف تسلط خواننده در هر مبحث در میان و پایان هر فصل گنجانده است و آن را در میان کتاب‌های هم‌سطح خویش ممتاز ساخته است. در ویراست دوم چنان‌که در پیش‌گفتار نویسنده نیز خواهید خواند سعی شده است ابهامات و ایرادات موجود در ویراست نخست رفع شوند و تلاش نویسنده بر این بوده که کوانتوم را به شکل جالبی ادامه دهد. آخرین درست‌نامه‌ی مؤلف پس از تألیف و نیز چند ایراد از نظر دورمانده‌ی کتاب اصلی در این برگردان لحاظ شده است. دانشجویان دوره‌های کارشناسی و کارشناسی ارشد فیزیک، مخاطبان اصلی این کتاب هستند ضمن این‌که برای داوطلبان آزمون‌های ورودی دوره‌های کارشناسی ارشد و دکترای فیزیک می‌تواند بسیار سودمند و آموزنده باشد. با کمال میل خرسندیم که مراتب سپاس‌گزاری خود را از تمام کسانی که در برگردان این کتاب کمک‌های بی‌دریغی داشته‌اند تقدیم نماییم.

محمد بهتاج لجبینی - نگار اوری

۱۳۹۱

## پیش‌گفتار ویرایش نخست

کتاب‌های تألیف شده پیرامون مکانیک کوانتومی را می‌توان به دو گروه عمده دسته‌بندی کرد: کتاب‌های درسی، که در آن تمرکز روی قواعد و اصول است، و کتاب‌های منحصراً حل مسأله، که در آن تأکید روی کاربردهاست. با وجود آن‌که کتاب‌های خوب بسیاری در زمینه مکانیک کوانتومی وجود دارد، کتاب‌های حل مسأله بسیار کم تعدادتر هستند. قصد من صرفاً افزودن مطلبی به یکی از این دو گروه نیست. هدف من ترکیب هر دو شکل در یک نوشتار واحد است که محتوای یک کتاب درسی و یک کتاب حل مسأله را دربرمی‌گیرد. کتاب‌هایی با این قالب عملاً وجود ندارند. دریافت‌ام که این ایده بسیار مفید است زیرا به دانشجو دسترسی آسان و سریع را به اجزاء اساسی نظریه و نیز جنبه‌های عملی آن در یک مجموعه‌ی منسجم ارائه می‌دهد.

در طول چندین سال تدریس مکانیک کوانتومی، دریافت‌ام که برای دانشجویان عموماً یادگرفتن مفاهیم بنیادی قواعد [مکانیک کوانتومی] آسان‌تر از کار با جنبه‌های عملی آن است. بدون دانستن چگونگی محاسبه و اعداد به‌دست آمده از روابط، توانایی کامل و کاربرد نظریه از دست می‌رود. مهارت در فنون حل مسأله، یک بخش ضروری یادگیری فیزیک است. برای دستیابی به این هدف، مسأله‌های حل شده در این کتاب برای آموزش چگونگی محاسبه به دانشجویان طرح شده‌اند. بدون آموختن چگونگی استخراج و محاسبه کمیت‌ها مهارت واقعی در مکانیک کوانتومی حاصل نمی‌شود.

در این کتاب می‌خواهم به هدفی دو سویه دست پیدا کنم: ارایه‌ای جامع، اما مختصر و مفید از بیشتر مباحث مکانیک کوانتومی غیرنسبیتی، و عرضه‌ی مجموعه‌ای پُرپار از مثال‌ها و مسایل کامل جدا شده. دستیابی به این شکل همه جانبه بدون هزینه نیست. حجم کتاب! برای خلاصه کردن کتاب، بدون کاستن از ارتباط میان موضوع‌ها و کامل بودن آن‌ها دقت بسیاری شده است.

این کتاب برآمده از جزوه‌های دوره‌ی کارشناسی و کارشناسی ارشد است که برای دوره‌ای در حدود ده سال به دانشجویانم ارائه کردم؛ مسأله‌های موجود در آن از مجموعه‌ای بزرگ از تکالیف و تمرین‌های امتحانی گلچین شده‌اند که به دانشجویان عرضه می‌کرده‌ام. این نوشتار برای دانشجویان دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد سال اول پیشنهاد می‌شود. موضوعات موجود در این کتاب را می‌توان در سه واحد درسی پوشش داد: فصل‌های ۱ تا ۵ (به‌جز بخش ۳-۷) در یک دوره آموزشی کارشناسی یک واحدی؛ فصل ۶، بخش ۷-۳، فصل ۸، بخش ۹-۲ (به‌جز ساختار و اثر زیمان غیرعادی) و بخش ۱۱-۱ تا ۱۱-۳ در واحد درسی دوم؛ و بقیه‌ی کتاب در یک دوره‌ی آموزشی کارشناسی ارشد یک واحدی.

کتاب با پایه‌های تجربی مکانیک کوانتومی آغاز می‌شود که در آن به آن دسته از پدیده‌های اتمی و زیراتمی می‌پردازیم که شکست فیزیک کلاسیک در مقیاس میکروسکوپی و وجود نیاز به یک روش جدید را تأیید می‌کند. سپس ابزارهای ریاضی مکانیک کوانتومی مانند فضاها خطی، جبر عملگری، مکانیک ماتریسی و مسأله‌های ویژه مقداری می‌آیند؛ همه‌ی این‌ها به وسیله‌ی نمادگذاری دیراک بررسی می‌شوند. پس از آن در مورد مبانی قراردادی مکانیک کوانتومی بحث می‌کنیم و آن‌گاه به جواب‌های دقیق معادله‌ی شرودینگر برای مسأله‌های یک بُعدی و سه بُعدی می‌پردازیم. سپس روش‌های تقریبی مانا و وابسته به زمان را پیش‌رو داریم و سرانجام نظریه‌ی پراکندگی را ارائه می‌کنیم.

مایل هستم از پروفیسور اسماعیل زاهد (دانشگاه نیویورک در استونی بروک) و جری او. سالیوان (کالج دانشگاهی دابلین، ایرلند) به خاطر مطالعه‌ی دقیق و ارایه‌ی نظرشان در مورد پیش‌نویس اولیه‌ی کتاب قدرانی کنم. از

چهار داور ناشناسی که نظرات و پیشنهادهای خردمندانه‌ای ارائه کردند سپاس گزارم. از سردبیرم، دکتر اندی اسلید به خاطر حمایت‌های پیوسته، تشویق و نظارت مؤثرش بر این پروژه تشکر ویژه می‌کنم. از مهمان‌نوازی مرکز فیزیک نظری MIT، کمبریج، به خاطر دو سالی که در آن‌جا به‌عنوان بازدیدکننده اقامت داشتم سپاس گزارم. به‌ویژه از پروفیسورها آلن گاث، رابرت جافی و جان نیگل به خاطر حمایت‌هایشان تشکر می‌کنم.

### پیش‌گفتار ویرایش دوم

اکنون هشت سال از پدیدآوری ویرایش نخست این کتاب در سال ۲۰۰۱ سپری شده است. در طول این زمان، بسیاری از کاربران مهربان - اساتیدی که کتاب را پذیرفته‌اند، پژوهشگران و دانشجویان - وقت صرف کرده‌اند و با ارائه‌ی نظرات ارزشمندشان درباره‌ی کتاب بر من منت نهاده‌اند. در تهیه‌ی ویرایش دوم بازخورد سخاوتمندانه‌ای را که از سوی این کاربران دریافت نموده‌ام، مورد توجه قرار داده‌ام. می‌خواهم قبل از هر چیز مراتب عمیق سپاس‌گزاری و قدردانی خود را به آنها بیان کنم.

تمرکز اساسی کتاب همچنان حفظ شده است: فراهم کردن متنی خوش ساختار و جامع، اما مختصر و مفید که توسط مجموعه‌ای پُر بار از مثال‌ها و سایل با حل کامل که بیانگر جنبه‌های گوناگون مکانیک کوانتومی غیرنسبیتی است، پشتیبانی می‌شود. کتاب دستیابی به دو هدف را دنبال می‌کند: از یک سو، ارائه‌ی یک ابزار مناسب برای تدریس با رویکرد آموزشی، و از سوی دیگر، کمک به دانشجویان نه تنها برای تسلط بر پایه‌های نظریه، بلکه برای ورزیده شدن مؤثر در مکانیک کوانتومی.

گرچه ساختار کلی و محتوای کتاب همچنان بر پایه‌ی حمایت شمار زیادی از کاربران باقی مانده است، چند تغییر جهت‌مند، و اصلاحی در ویرایش دوم صورت داده‌ام. این تغییرات، با هدف برطرف کردن کاستی‌های یافته شده در ویرایش اول ضمن تقویت و نیرومندسازی آن صورت داده شده است. چند بخش، مثال و مسأله‌ی جدید و مبحث تازه تعریف کرده‌ام؛ این‌ها در لابه‌لای متن قرار گرفته‌اند. همچنین، بازبینی اساسی تمرین‌ها را در پایان فصل‌ها انجام داده‌ام؛ تعدادی تمرین جدید افزوده‌ام، برخی را حذف کرده‌ام و بقیه را اصلاح کرده‌ام. حال می‌توانم بر این واقعیت تأکید کنم که مجموعه تمرین‌های پایان هر فصل برای چند سال در کلاس درس امتحان شده‌اند.

هم‌اینک کتاب، مجموعه‌ای نزدیک به ششصد مثال، مسئله و تمرین دارد. هر فصل شامل موارد ذیل است: (آ) تعدادی مثال حل شده که هر یک برای نشان دادن مفهوم خاصی مربوط به بخش ویژه‌ای در خلال فصل طراحی شده‌اند، (ب) شمار زیادی مسأله با حل کامل (که در انتهای هر فصل می‌آیند) که به‌طور کلی جامع هستند و بنابراین چندین مفهوم را یک‌جا پوشش می‌دهد و (پ) تمرین‌های فراوان حل شده که به‌عنوان تکلیف خانگی در نظر گرفته شده است. با این مجموعه پُر بار از مثال، مسئله و تمرین قصد داریم دانشجو تقویت شود تا به دانش پژوهی مستقل و کارآزموده‌ای ماهر در مکانیک کوانتومی تبدیل شود. داشتن توانایی حل مسأله گواهی با پر جا بر فهم واقعی مطلب است.

ویرایش دوم با منابع سودمند طراحی شده برای مدرسه‌های به‌کاربرنده‌ی این کتاب پشتیبانی می‌شود (جهت دریافت این منابع رایگان لطفاً با نویسنده یا «وایلی» تماس بگیرید).

موارد درسی موجود در این کتاب برای سه ترم درسی مناسب است - یک دوره دو ترمی در کارشناسی و یک دوره یک ترمی در کارشناسی ارشد. یک سؤال مربوط به این موضوع مطرح می‌شود: چگونه کتاب را به‌طور عملی در یک دوره درسی کارشناسی یا کارشناسی ارشد می‌توان مورد استفاده قرار داد؟ هیچ پاسخ روشنی برای این سوال وجود ندارد زیرا این به زمینه‌ی قبلی دانشجویان و ماهیت دوره‌های مورد نظر بستگی دارد. نخست، می‌خواهم این ملاحظه‌ی مهم را مورد تأکید قرار دهم: از آنجا که کتاب اطلاعات فراوانی ارائه می‌دهد، هر مدرس باید به‌طور



## توصیه به دانشجوی

ما آن چه که پی‌درپی انجام می‌دهیم هستیم. پس برتری ناشی از یک عمل تنها نیست، بلکه پیامد یک عادت است.

### ارسطو

هیچ‌کس انتظار ندارد بدون آن‌که خیس شود، شنا کردن را بیاموزد. همان‌طور که با خواندن کتاب و تماشای شناکردن دیگران، آموختن آن انتظار نمی‌رود، شنا کردن را نمی‌توان بدون تمرین آموخت. هیچ راه چاره‌ای جز این‌که خود را به داخل آب بیندازد و هفته‌ها و یا حتی ماه‌ها آموزش ببیند وجود ندارد تا جایی که شناکردنتان روان شود. به همین ترتیب، فیزیک را نمی‌توان به‌صورت منفعل یادگرفت. بدون برخورد با مسائل چالش برانگیز گوناگون، دانشجوی راهی برای آموختن چگونگی فهم خود از یک موضوع ندارد. این جا است که به دانشجوی احساس رضایت و تسلط ناشی از فهم هوشمندانه اصول پایه دست می‌دهد. توانایی حل مسأله بهترین تأیید بر داشتن مهارت در موضوع است. همانند شنا کردن، هر چه بیشتر مسأله حل کنید، بر مهارت شما در حل مسأله و ظرافت‌های موجود در آن افزوده می‌شود.

برای بهره‌گیری کامل از مثال‌ها و مسائل حل شده در متن، به سرعت به سراغ پاسخ آن نروید. اگر بار اول تلاش کردید و نتوانستید حل کنید، دوباره سعی کنید! اگر مسأله را خودتان حل می‌کنید، باز هم حل خود را باید با حل کتاب مقایسه کنید. شاید راه حلی کوتاه‌تر یا دقیق‌تر پیدا کنید.

یک تذکر مهم: چون کتاب حاضر با مجموعه‌ای از مثال‌ها و مسائل با حل کامل همراه است باید حتماً از وسوسه‌ی به خاطر سپردن فن‌ها و حل‌های مختلف پرهیز شود، در عوض، باید روی درک مفاهیم و پیکربندی به‌کار گرفته شده در آن تمرکز شود. در این کتاب قصد من این نیست به دانشجوی تعدادی راهکار یا فنون را برای کسب نمرات خوب در کلاس‌های مکانیک کوانتومی بدون فهم هوشمندانه یا تسلط داشتن بر موضوع، آموزش دهم؛ یعنی منظورم این نبوده است که به دانشجوی یاد دهم چگونه بدون فهمی عمیق و طولانی، امتحانات مکانیک کوانتومی را بگذرانند. با این حال، دانشجویی که روی فهم اصول پایه مبحث و تقویت آن به‌وسیله‌ی حل مسائل متعدد و فهم کامل آنها تمرکز کند بی‌شک به هدف دست پیدا می‌کند؛ کسب نمرات خوب و همچنین دریافت آموزش درست و طولانی‌مدت.