



دانشگاه پیام نور

مکانیک کوانتومی پیشرفته ۳

(کارشناسی ارشد فیزیک)

www.ketab.ir

دکتر فرین پاینده

سرشناسه	: پاینده، فرین، ۱۳۵۳ -
عنوان و نام پدید آور	: مکانیک کوانتومی پیشرفته ۳/ فرین پاینده.
مشخصات نشر	: تهران: دانشگاه پیام نور، ۱۳۹۷.
مشخصات ظاهری	: دوازده، ۵۱۹ ص: مصور.
فروست	: دانشگاه پیام نور، ۲۴۳۱. گروه فیزیک، ۵۸ / ۱
شابک	: 978 - 964 - 14 - 0478 - 1
وضعیت فهرست نویسی	: فیبا
یادداشت	: کتابنامه: ص. ۵۱۹.
موضوع	: کوانتوم - آموزش برنامه‌ای
موضوع	: Quantum theory -- Programmed instruction
موضوع	: کوانتوم - راهنمای آموزشی (عالی)
موضوع	: Quantum theory -- Study and teaching (Higher)
موضوع	: کوانتوم - آزمون‌ها و تمرین‌ها (عالی)
موضوع	: Quantum theory -- Examinations, questions, etc. (Higher)
شماره افزوده	: دانشگاه پیام نور
شماره افزوده	: Payam Noor University
رده بندی ننگره	: QC۱۷۴/۱۲/پ۲۷ ۱۳۹۷
رده بندی دیو	: ۵۳۰/۱۲
شماره کتابشناسی	: ۵۱۸۱۱۴۴



دانشگاه پیام نور

چاپ اول: ۱۳۹۸

شمارگان: ۱۰۰

قیمت: ۵۴۰۰۰۰

مکانیک کوانتومی پیشرفته ۳

مؤلف: دکتر فرین پاینده

ویراستار علمی: دکتر داسم فروزانی

تهیه و تولید: دفتر تدوین و ترجمه محتوای آموزشی

لیتوگرافی، چاپ و صحافی: مرکز چاپ و نشر دانشگاه پیام نور

شابک: ۱ - ۰۴۷۸ - ۱۴ - ۹۶۴ - ۷۸

ISBN: 978 - 964 - 14 - 0478 - 1

فروش این کتاب فقط از طریق نمایندگی‌های دانشگاه پیام نور مجاز می‌باشد و فروش

آن در سایر مراکز فروش کتاب موجب تعقیب قانونی فروشندگان خواهد گردید.

(کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر محفوظ و متعلق به دانشگاه پیام نور است. تولید، کپی یا خلاصه‌برداری، نشر و ترجمه، چاپ، افست، توزیع گسترده، تهیه CD و ... این اثر یا بخشی از آن اعم از متن، طرح پشت و روی جلد و... بدون اخذ مجوز کتبی از معاونت فناوری و پژوهش دانشگاه خلاف مقررات و تعرض به حقوق مادی و معنوی دانشگاه است. متخلفین وفق قانون حمایت از مولفان و مصنفان و هنرمندان دارای مسئولیت حقوقی و کیفری بوده و تحت پیگرد قرار می‌گیرند.)

آدرس فروشگاه مرکزی چاپ و انتشارات دانشگاه پیام نور: تهران، خیابان شهید رجایی،
نرسیده به تقاطع آزادگان، جنب ورزشگاه یادآوران. تلفن: ۵۵۵۰۲۱۰۴ - ۵۵۰۰۹۸۲۸

سایت فروش اینترنتی: <http://digibook.pnu.ac.ir>

فهرست مطالب کتاب

یازده

پیشگفتار

۱	فصل اول: مقدمه‌ای بر مکانیک کوانتومی نسبیتی
۱	هدف کلی
۱	هدف‌های یادگیری
۱	مقدمه
۳	۱-۱ معادله کلااین - گوردین
۸	۲-۱ معادله دیراک
۱۱	۳-۱ ذرات آزاد دیراک
۱۳	۴-۱ حالت‌های انرژی منفی و نظریه الکترون - حفره دیراک
۱۵	۵-۱ ذره دیراکی واقع در یک میدان ایستا
۱۹	۶-۱ ذره دیراکی واقع در یک پتانسیل کولنی - ساختار ریز در هیدروژن
۲۳	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل اول

۲۷	فصل دوم: آشنایی با نظریه گروه و مروری بر نظریه نسبیت خاص
۲۷	هدف کلی
۲۷	هدف‌های یادگیری
۲۸	مقدمه
۲۸	۱-۲ تعریف گروه
۲۹	۱-۱-۲ نمایش گروه
۳۱	۲-۱-۲ پارامترهای گروه
۳۱	۲-۲ گروه‌های لی
۳۴	۳-۲ گروه دوران
۳۵	۴-۲ نمایش‌های دوران
۳۸	۵-۲ گروه $SO(N)$

۴۲	۲-۶ گروه‌های یکانی
۵۷	۲-۷ اصول نظریه نسبیت خاص
۵۸	۲-۸ فرمول‌بندی نظریه نسبیت خاص
۶۴	۲-۹ تبدیلات لورنتز
۶۸	۲-۱۰ شکل ماتریسی تبدیلات لورنتز
۸۷	خودآزمایی تشریحی فصل دوم
۸۸	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل دوم
۹۱	فصل سوم: معادله موج برای ذرات اسپین صفر: معادله کلاین - گوردون
۹۱	هدف کلی
۹۱	هدف‌های یادگیری
۹۱	مقدمه
۹۳	۳-۱ نمادگذاری نسبیتی
۱۱۰	۳-۲ استخراج معادله کلاین - گوردون
۱۱۵	۳-۳ خواص معادله کلاین - گوردون
۱۲۱	۳-۴ حل معادله کلاین - گوردون
۱۲۵	۳-۵ ذرات آزاد اسپین صفر
۱۳۲	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل سوم
۱۳۵	فصل چهارم: فرمالیسم لاگرانژی برای نظریه میدان‌های کلاسیک: تانسور انرژی - تکانه
۱۳۵	هدف کلی
۱۳۵	هدف‌های یادگیری
۱۳۶	مقدمه
۱۳۷	۴-۱ معرفی میدان اسکالر
۱۳۹	۴-۲ فرمالیسم لاگرانژی و اصل کمترین کنش
۱۴۴	۴-۳ فرمالیسم لاگرانژی برای نظریه میدان‌های کلاسیک
۱۵۳	۴-۴ فرمالیسم هامیلتونی نظریه میدان
۱۶۴	۴-۵ میدان کلاین - گوردون باردار
۱۷۰	۴-۶ تانسور انرژی - تکانه برای میدان کلاین - گوردون
۱۷۵	۴-۷ محاسبه تانسور انرژی - تکانه برای چگالی لاگرانژی $\mathcal{L}(\psi_\sigma, \partial_\mu \psi_\sigma)$
۱۹۳	۴-۸ شکل شروdingery معادله کلاین - گوردون
۲۰۶	خودآزمایی تشریحی فصل چهارم
۲۰۷	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل چهارم
۲۰۹	فصل پنجم: معادله موج برای ذرات اسپین $\frac{1}{2}$: معادله دیراک
۲۰۹	هدف کلی
۲۰۹	هدف‌های یادگیری

۲۰۹	مقدمه
۲۱۰	۱-۵ معادله دیراک
۲۱۱	۲-۵ روش اول برای استخراج ماتریس های دیراک
۲۱۵	۳-۵ روش دوم برای یافتن ماتریس های دیراک
۲۲۳	۴-۵ نمایش قطری ماتریس های دیراک
۲۲۶	۵-۵ ماتریس γ^5
۲۳۰	۶-۵ معادله پیوستگی و چهاربردار چگالی جریان برای معادله دیراک
۲۳۲	۷-۵ شکل هموردای معادله دیراک و معادله پیوستگی
۲۳۶	۸-۵ شکل شرو دینگری معادله دیراک
۲۳۷	۹-۵ استخراج اسپین از معادله دیراک
۲۴۲	خودآزمایی تشخیصی عمل پنجم
۲۴۲	خودآزمایی چهار گزینه ای فصل پنجم
۲۴۵	فصل ششم: ناوردایی لورنتز، دیراک، اسپینورهای دیراک و هموردهای دوخطی
۲۴۵	هدف کلی
۲۴۵	هدف های یادگیری
۲۴۶	مقدمه
۲۴۶	۱-۶ ناوردایی لورنتز معادله دیراک
۲۶۰	۲-۶ حل معادله دیراک در دستگاه ساکن و متحرک
۲۶۵	۱-۲-۶ حل معادله دیراک در دستگاه ساکن
۲۶۹	۲-۲-۶ حل معادله دیراک در دستگاه متحرک از روش جواب های دستگاه ساکن
۲۷۳	۳-۶ روش مستقیم برای حل معادله دیراک در دستگاه متحرک، (روش ماتریسی)
۲۸۷	۴-۶ محاسبه ضریب بهنجارش برای اسپینورهای دیراک
۲۹۳	۵-۶ عملگرهای تصویرگر برای انرژی
۲۹۸	۶-۶ هلیسیتی یا عملگر تصویرگر برای اسپین
۳۰۰	۱-۶-۶ خواص هلیسیتی یا عملگر مصور اسپین
۳۰۴	۲-۶-۶ عملگر مصور هلیسیتی
۳۰۸	۷-۶ اسپینورهای وایل
۳۱۱	۸-۶ هموردهای دوخطی اسپینورهای دیراک، اسپینورهای الحاقی و خواص تبدیلی
۳۲۲	خودآزمایی تشریحی فصل ششم
۳۲۳	خودآزمایی چهار گزینه ای فصل ششم
۳۲۹	فصل هفتم: اندرکنش ذرات اسپین صفر و اسپین $\frac{1}{2}$ با میدان الکترومغناطیسی
۳۲۹	هدف کلی
۳۲۹	هدف های یادگیری
۳۳۰	مقدمه

- ۳۳۰ ۱-۷ اندرکنش ذره اسپین صفر با میدان الکترومغناطیسی
- ۳۳۷ ۲-۷ معادله کلاین - گوردون برای حالات ساکن با پتانسیل الکتروستاتیک
- ۳۴۰ ۳-۷ اندرکنش ذره دیراکی اسپین $\frac{1}{2}$ با میدان الکترومغناطیسی
- ۳۴۵ ۴-۷ حد غیرنسبیتی معادله دیراک: معادله پائولی
- ۳۵۵ خودآزمایی تشریحی فصل هفتم
- ۳۵۶ خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل هفتم

- فصل هشتم: ذرات دیراکی واقع در پتانسیل‌های خارجی؛ حل معادله دیراک برای اتم هیدروژن و پارادوکس کلاین
- ۳۵۷ هدف کلی
- ۳۵۷ هدف‌های یادگیری
- ۳۵۸ مقدمه
- ۳۵۸ ۱-۸ معادله دیراک برای اتم هیدروژن
- ۳۵۹ ۲-۸ یادآوری مکانیک کوانتومی
- ۳۶۵ ۳-۸ حل معادله دیراک برای اتم هیدروژن
- ۳۸۱ ۴-۸ بحث دربارهٔ آزمایش‌های آزمایشی حاصل از حل معادله دیراک برای اتم هیدروژن
- ۳۸۶ ۵-۸ مروری کوتاه بر پارادوکس کلاین
- ۳۸۸ ۶-۸ پارادوکس کلاین
- ۳۹۰ ۱-۶-۸ پارادوکس کلاین از معادله کلاین - گوردون
- ۳۹۲ ۲-۶-۸ پارادوکس کلاین از معادله دیراک
- ۳۹۵ ۷-۸ حل پارادوکس کلاین
- ۳۹۷ خودآزمایی تشریحی فصل هشتم
- ۳۹۸ خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل هشتم

- فصل نهم: تقارن‌های گسسته در فیزیک: پاریته، مزدوج بار، و ایزوسپین
- ۴۰۱ هدف کلی
- ۴۰۱ هدف‌های یادگیری
- ۴۰۱ مقدمه
- ۴۰۲ ۱-۹ تقارن‌های پیوسته و گسسته
- ۴۰۳ ۲-۹ اعداد کوانتومی جمع‌پذیر و ضرب‌پذیر
- ۴۰۴ ۳-۹ پاریته
- ۴۰۹ ۴-۹ مزدوج بار
- ۴۱۲ ۵-۹ عملگر CP و نقض آن
- ۴۱۵ ۶-۹ قضیه CPT
- ۴۱۸ خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل نهم

۴۲۳	فصل دهم: معادله وایل - نوترینو
۴۲۳	هدف کلی
۴۲۳	هدف‌های یادگیری
۴۲۴	مقدمه
۴۲۵	۱-۱۰ عملگر مزدوج بار و پادذرات
۴۳۲	۲-۱۰ معادله وایل - نوترینو
۴۴۱	۳-۱۰ تبدیل نظریه دو مؤلفه‌ای وایل - نوترینو به نظریه چهار مؤلفه‌ای
۴۵۰	خودآزمایی تشریحی فصل دهم
۴۵۱	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل دهم
۴۵۳	فصل یازدهم: مقدمات، بر نظریه الکترودینامیک کوانتومی و پراکندگی کولنی ذرات
۴۵۳	هدف کلی
۴۵۳	هدف‌های یادگیری
۴۵۴	مقدمه
۴۵۶	۱-۱۱ ناوردایی پیمانه‌های QED
۴۵۹	۲-۱۱ معرفی ماتریس پراکندگی
۴۶۵	۳-۱۱ تصویر اندرکنشی
۴۶۹	۴-۱۱ نظریه اختلال
۴۷۸	۵-۱۱ اساس قواعد فاینمن *
۴۸۳	۶-۱۱ محاسبه دامنه‌های پراکندگی
۴۸۵	۷-۱۱ قدم‌های لازم برای ساختن یک دامنه
۴۸۶	۸-۱۱ ثابت‌های جفت‌شدگی
۴۸۷	۹-۱۱ انتشارگرها
۴۹۲	۱۰-۱۱ نرخ‌های واپاشی و طول عمرها
۴۹۳	۱۱-۱۱ قواعد فاینمن برای QED
۵۰۸	خودآزمایی تشریحی فصل یازدهم
۵۰۹	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل یازدهم
۵۱۵	پاسخنامه
۵۱۹	منابع

تقدیم به سه بی‌مثا

استاد فرزانه دکتر مهدی گلشنی

دکتر حسین سیدی مسلمی

روانشاد دکتر ابراهیم پاینده

پیشگفتار

کتابی که در پیش‌رو دارید، بر طبق سرفصل‌های مصوب وزارت علوم، تحقیقات و فناوری برای درس مکانیک کوانتومی پیشرفته^۱ تدوین شده است و تا حد امکان سعی بر این بوده است که علاوه بر توضیحات فیزیکی لازم و کنعان دادن تعداد زیادی تمرین حل شده، تمامی روابط ریاضی به‌طور کامل و گام‌به‌گام اثبات شوند. تا فرایند یادگیری خودآموز درس برای دانشجویانی که حداقل دسترسی به کلاس و آموزش سنتی را دارند، به آسانی فراهم گردد. البته، مسلم است که هیچ اثری خالص از ریاضیات و اشکال نمی‌باشد. لذا، هرگونه نظر و پیشنهادی از سوی خوانندگان محترم برای ارتقای رفع ایرادها و بهبود کمی و کیفی مطالب کتاب، و از جمله اشکالات تایپی مشمر ممنوع خواهد بود.^۱ توصیه مفید به خوانندگان این است که پس از فراگیری مطالب این کتاب به سایر منابع موجود برای این درس مراجعه کرده و با مطالعه مطالب و تحلیل مسائل بیشتر و متنوعی که به دلیل محدود بودن حجم این کتاب از بیان آنها چشمپوشی گردیده است، عمق یادگیری خود را به‌ویژه در مسائل فیزیکی بیازمایند.

۱. خوانندگان گرامی می‌توانند نظرات و پیشنهادات خود را به آدرس fnphysics.com@gmail.com ارسال نمایند.

نهایت سپاس قلبی و قدردانی ویژه تقدیم استاد فرزانه دکتر مهدی گلشنی است که همواره زیبایی‌های دنیای فیزیک را به اعجاب به تصویر کشیده‌اند و از مکتب ایشان بسیاری آموخته‌اند. امید است که شوق یادگیری شمع راه شوریدگان دانشی باشد که والا مُرادشان مشاهده و معاینه شگفتی‌های جهان اسرارآمیزی است که در پس نقاب روابط غامض ریاضیات رنگ باخته‌اند.

شایسته است کمال سپاسگزاری و امتنان ویژه به مدیریت محترم تدوین آقای دکتر مهران فرج‌اللهی، معاونت محترم تدوین مهندس حمیدرضا فریا، کارشناسان محترم تدوین آقای امیر عالی و خانم‌ها اشرف شوریایی، آتنا عسگری‌فر، آریتا ابراهیمی، فاطمه ردایی، فاطمه بنی‌جمالی، اکرم مبارکی، فرزانه خرمی مهاجر، مینا حاجی‌انزلی، خدیجه علی‌نژاد، سپیده‌سادات مدنی، فریده قطبی و به‌ویژه سرکار خانم سحر ملّاح به‌خاطر راهنمایی‌های ارزنده و زحمات بی‌دریغ‌شان در راستای چاپ این کتاب، همچنین آقای دکتر قاسم فروزانی که ویراستاری علمی این کتاب را با حوصله و دقتی درخور انجام داده‌اند، اساتید گرانقدرم دکتر محمدمهرآفرین، دکتر محمدوحید تکیوک و دکتر پرویز حوائی در هواره مدیون زحمات آنانم، معاونت محترم آموزشی و مدیر گروه فیزیک آقای دکتر مرتضی حسینی و کارشناس محترم گروه فیزیک خانم پروا مرادی به‌خاطر تمامی زحماتشان در گروه فیزیک، همکار ارجمندم آقای دکتر احمد آخوند، مدیریت محترم دفتر تحقیقات نام دکتر خدیجه دیده‌بان و معاونت محترم پژوهشی آقای دکتر محمدعلی کریمیان، دوستان بسیار عزیزم دکتر محبوبه عبداللّهی، دکتر معصومه عابدینی، سپیده صدرمحرر، اشرف زری، سیّده فاطمه حسینی رثوف، گلنوش مظلومی، الهه توانگر، میترا قدس، مریم ملونی، فاطمه فرجی، شهین اکبرنیا و نیلوفر عظیمی که همواره مشوّق من بوده‌اند و بالاخص عزیزان گرانقدرم مهندس مهری تقی‌زاده انور، مهندس جواد جم‌آذری و امیرحسین جم‌آذری که بدون وجود گهربار آنان و زحمات بی‌شائبه‌شان اتمام این اثر هرگز میسر نبود، و نیز آقای مهندس علی شوکتی که با دقتی ستودنی زحمت تایپ و حروفچینی کتاب را برعهده داشته‌اند، تقدیم گردد.

با آرزوی توفیق

فرّین پاینده