

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



مفاهیم فیزیک ذرات بنیادی

برای دریافت تصاویر رنگی، به پروفایل کتاب در تارنمای انتشارات
دانشگاه فردوسی مشهد به نشانی زیر مراجعه فرمایید:

press.um.ac.ir

مایکل ای. پسکین

ترجمه:

دکتر محسن سربیشه‌ئی

استاد دانشگاه فردوسی مشهد

فاطمه اشرف مقیمی

مربی دانشگاه فردوسی مشهد

سرشناسه:	پسکین، مایکل ادوارد، ۱۹۵۱-م.	Peskin, Michael Edward, 1951-
عنوان و نام پدیدآور:	مفاهیم فیزیک ذرات بنیادی / مایکل ای. پسکین؛ ترجمه محسن سربیشه‌ئی، فاطمه اشرف مقیمی؛ ویراستار علمی محمدابراهیم زمردیان؛ ویراستار ادبی هانیه اسدپور فعال مشهد.	
مشخصات نشر:	مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات، ۱۴۰۳.	
مشخصات ظاهری:	۴۶۴ ص.: نمودار.	
فروست:	انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد؛ ۹۱۷.	
شابک:		ISBN: 978-964-386-614-3
وضعیت فهرست‌نویسی:	فیپا.	
یادداشت:	عنوان اصلی:	Concepts of elementary particle physics, 2019.
یادداشت:	کتابنامه: ص. [۴۴۹] - ۴۵۶.	
یادداشت:	نمایه.	
موضوع:	ذره‌های بنیادی	Particles (Nuclear physics)
شناسه افزوده:	سربیشه‌ئی، محسن، ۱۳۲۶- مترجم	
شناسه افزوده:	اشرف مقیمی، فاطمه، ۱۳۲۷- مترجم	
شناسه افزوده:	زمردیان، ابراهیم، ۱۳۳۲- ، ویراستار	
شناسه افزوده:	دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات.	
رده‌بندی کنگره:	QC۷۹۳/۲۴	
رده‌بندی دیویی:	۵۳۹/۷۲	
شماره کتابشناسی ملی:	۹۶۶۸۶۵۶	

مفاهیم فیزیک ذرات بنیادی

پدیدآورنده: مایکل ای. پسکین
ترجمه: دکتر محسن سربیشه‌ئی؛ فاطمه اشرف مقیمی
ویراستار علمی: دکتر محمدابراهیم زمردیان
ویراستار ادبی: هانیه اسدپور فعال مشهد
مشخصات: وزیری، ۱۵۰ نسخه، چاپ اول، تابستان ۱۴۰۳
چاپ و صحافی: همیار
بها: ۳/۹۵۰/۰۰۰ ریال
حق چاپ برای انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد محفوظ است.



انتشارات
۹۱۷

مراکز پخش:

فروشگاه و نمایشگاه کتاب پردیس: مشهد، میدان آزادی، دانشگاه فردوسی مشهد، جنب سلف یاس
تلفن: ۳۸۸۰۲۶۶۶ - ۳۸۸۳۳۷۲۷ (۰۵۱)
مؤسسه کتابیران: تهران، میدان انقلاب، خیابان کارگر جنوبی، بین روانمهر و وحید نظری، بن‌بست
گشتاسب، پلاک ۸ تلفن: ۶۶۴۸۴۷۱۵ (۰۲۱)
مؤسسه دانشیران: تهران، خیابان انقلاب، خیابان منیری جاوید (اردیبهشت) نبش خیابان نظری، شماره ۱۴۲
تلفکس: ۶۶۴۰۰۲۲۰ - ۶۶۴۰۰۱۴۴ (۰۲۱)

<http://press.um.ac.ir>

Email: press@um.ac.ir

فهرست مطالب

.....	سخن مترجمان	۹
.....	پیشگفتار مؤلف	۱۱

بخش ۱. مقدمات و ابزار مورد نیاز

.....	فصل ۱. مقدمه	۱۵
.....	فصل ۲. تقارن های فضا- زمان	۲۰
.....	۱-۲ سینماتیک نسبیتی ذره	۲۱
.....	۲-۲ واحدهای طبیعی	۲۴
.....	۳-۲ مختصری درباره نظریه گروه های گسسته	۲۷
.....	۴-۲ مختصری درباره نظریه گروه های پیوسته	۳۱
.....	۵-۲ تقارن های گسسته فضا- زمان	۳۶
.....	تمرین ها	۳۸

.....	فصل ۳. معادلات نسبیتی موج	۴۲
.....	۱-۳ معادله کلاین- گوردون	۴۳
.....	۲-۳ میدان ها و ذرات	۴۶
.....	۳-۳ معادلات ماکسول	۴۸
.....	۴-۳ معادله دیراک	۵۱
.....	۵-۳ حالت های بهنجار شده نسبیتی	۵۷
.....	۶-۳ اسپین و آمار	۶۰
.....	تمرین ها	۶۱

.....	فصل ۴. اتم هیدروژن و پوزیترونیم	۶۳
.....	۱-۴ اتم هیدروژن ایدئال	۶۴
.....	۲-۴ ساختار ریز و ساختار فوق ریز	۶۵
.....	۳-۴ پوزیترونیم	۶۹

تمرین ها ۷۲

فصل ۵. مدل کوارکی ۷۸

۱-۵ کشف هادرون ها ۷۸

۲-۵ چارمونیم ۸۲

۳-۵ مزون های سبک ۹۰

۴-۵ مزون های سنگین ۹۴

۵-۵ باریون ها ۹۵

تمرین ها ۱۰۱

فصل ۶. آشکارسازهای ذرات بنیادی ۱۰۵

۱-۶ اتلاف انرژی بر اثر یونش ۱۰۶

۲-۶ آشکارهای الکترومغناطیسی ۱۱۰

۳-۶ اثرات دیگر پراکندگی هسته ای ۱۱۵

۴-۶ اتلاف انرژی از طریق خواص ماکروسکوپی ماده ۱۱۷

۵-۶ سیستم های آشکارساز برای فیزیک برخورددهنده ها ۱۱۸

تمرین ها ۱۲۵

فصل ۷. ابزار محاسبه ۱۲۷

۱-۷ مشاهده پذیرها در آزمایش های ذره ای ۱۲۷

۲-۷ فرمول اصلی برای پهنای جزئی و سطح مقطع ها ۱۲۹

۳-۷ فضای فاز ۱۳۲

۴-۷ مثال - پراکندگی $\pi + \pi$ در تشدید ρ ۱۳۵

تمرین ها ۱۴۲

بخش ۲. برهم کش قوی

فصل ۸. نابودی الکترون - پوزیترون ۱۴۹

۱-۸ برهم کش $e + e^- \rightarrow \mu + \mu^-$ ۱۴۹

۲-۸ خواص فرمیون های اسپین 1/2 بدون جرم ۱۵۱

۳-۸ محاسبه عناصر ماتریسی $e + e^- \rightarrow \mu + \mu^-$ ۱۵۴

۴-۸ محاسبه سطح مقطع $e + e^- \rightarrow \mu + \mu^-$ ۱۵۸

۱۶۰.....	۵-۸ نابودی $e + e^-$ به هادرون ها
۱۶۵.....	تمرین ها

۱۶۸.....	فصل ۹. پراکندگی عمیقاً ناکشسان الکترون
۱۶۹.....	۱-۹ آزمایش SLAC-MIT
۱۷۱.....	۲-۹ مدل پارتون
۱۷۳.....	۳-۹ تقارن تبدیلی
۱۷۹.....	۴-۹ سطح مقطع برای پراکندگی الکترون-کوارک
۱۸۱.....	۵-۹ سطح مقطع برای پراکندگی عمیقاً ناکشسان
۱۸۴.....	۶-۹ مقیاس بندی پیورکن
۱۸۸.....	تمرین ها

۱۹۱.....	فصل ۱۰. گلوئون
۱۹۲.....	۱-۱۰ اندازه گیری های توابع توزیع پارتون
۱۹۷.....	۲-۱۰ گسیل فوتون در $e + e^- \rightarrow qq$
۲۰۵.....	۳-۱۰ رویدادهای ۳-جتی در نابودی $e + e^-$
۲۰۸.....	۴-۱۰ اثرات گسیل گلوئون بر روی pdfs ها
۲۱۲.....	تمرین ها

۲۱۴.....	فصل ۱۱. دینامیک کوانتومی رنگ
۲۱۶.....	۲-۱۱ مروری بر گروه های لی
۲۱۹.....	۳-۱۱ تقارن پیمانه ای غیر آبدی
۲۲۳.....	۴-۱۱ فرمول بندی QCD
۲۲۴.....	۵-۱۱ گسیل گلوئون در QCD
۲۲۵.....	۶-۱۱ قطبش خلأ
۲۲۸.....	۷-۱۱ آزادی مجانبی
۲۳۳.....	تمرین ها

۲۳۷.....	فصل ۱۲. پارتون ها و جت ها
۲۳۷.....	۱-۱۲ معادله تحول آلترلی - پاریزی برای توزیع پارتون
۲۴۱.....	۲-۱۲ ساختار جت ها
۲۴۸.....	تمرین ها

۲۵۰.....	فصل ۱۳. QCD و برخورددهنده‌های هادرونی
۲۵۱.....	۱-۱۳ پراکندگی هادرونی در انتقال تکانه پایین
۲۵۶.....	۲-۱۳ پراکندگی هادرونی در انتقال تکانه بالا
۲۶۰.....	۳-۱۳ مشاهده‌پذیرهای ساختار جت برای برخوردهای هادرونی
۲۶۳.....	۴-۱۳ پهنای یک جت در برخوردهای هادرون-هادرون
۲۶۵.....	۵-۱۳ تولید کوارک سر
۲۶۶.....	تمرین‌ها

۲۷۰.....	فصل ۱۴. تقارن کایرال
۲۷۱.....	۱-۱۴ تقارن‌های QCD با جرم صفر کوارک‌ها
۲۷۳.....	۲-۱۴ شکست خودبه‌خودی تقارن
۲۷۷.....	۳-۱۴ بوزون‌های گلدستون
۲۷۹.....	۴-۱۴ خواص مزون‌های π به‌عنوان بوزون‌های گلدستون
۲۸۴.....	تمرین‌ها

بخش ۳. برهم‌کنش ضعیف

۲۸۹.....	فصل ۱۵. مدل جریان-جریان برهم‌کنش ضعیف
۲۹۰.....	۱-۱۵ توسعه نظریه $V-A$ ی برهم‌کنش ضعیف
۲۹۲.....	۲-۱۵ پیش‌بینی‌های نظریه $V-A$ برای لپتون‌ها
۳۰۰.....	۳-۱۵ پیش‌بینی‌های نظریه $V-A$ برای واپاشی پایون
۳۰۳.....	۴-۱۵ پیش‌بینی‌های نظریه $V-A$ برای پراکندگی نوترینو
۳۰۷.....	تمرین‌ها

۳۰۹.....	فصل ۱۶. نظریه‌های پیمانه‌ای با شکست خودبه‌خودی تقارن
۳۱۰.....	۱-۱۶ معادلات میدان برای یک فوتون جرم دار
۳۱۲.....	۲-۱۶ معادلات میدان مدل با یک تقارن پیمانه‌ای غیرآبلی
۳۱۵.....	۳-۱۶ مدل الکترو ضعیف گلاشو-سلام-واینبرگ
۳۲۱.....	۴-۱۶ برهم‌کنش جریان ختثای ضعیف
۳۲۵.....	تمرین‌ها

۳۲۹.....	فصل ۱۷. بوزون‌های W و Z
۳۲۹.....	۱-۱۷ خواص بوزون W

۳۳۳.....	۲-۱۷ تولید W در برخورد های $p p$
۳۳۵.....	۳-۱۷ خواص بوزون Z
۳۳۶.....	۴-۱۷ تست های دقیق مدل الکتروضعیف
۳۴۵.....	تمرین ها

فصل ۱۸. زوایای اختلاط کوارکی و واپاشی های ضعیف

۳۴۷.....	۱-۱۸ زاویه اختلاط کبیو
۳۴۸.....	۲-۱۸ جملات جرمی کوارک و لپتون در مدل استاندارد
۳۵۰.....	۳-۱۸ تقارن های گسسته فضا-زمان و مدل استاندارد
۳۵۲.....	۴-۱۸ مدل استاندارد فیزیک ذرات
۳۵۶.....	۵-۱۸ اختلاط کوارکی شامل کوارک های سنگین
۳۵۷.....	تمرین ها

فصل ۱۹. نقض CP

۳۶۴.....	۱-۱۹ نقض CP در سیستم K^0-K^0
۳۶۴.....	۲-۱۹ گشتاورهای دو قطبی الکتریکی
۳۷۳.....	۳-۱۹ نقض CP در سیستم B^0-B^0
۳۷۴.....	تمرین ها

فصل ۲۰. جرم و اختلاط نوترینوها

۳۸۶.....	۱-۲۰ جرم نوترینو و واپاشی β
۳۸۶.....	۲-۲۰ افزودن جرم به نوترینوها در مدل استاندارد
۳۸۹.....	۳-۲۰ اندازه گیری اختلاط طعم نوترینوها
۳۹۴.....	تمرین ها

فصل ۲۱. بوزون هیگز

۴۰۳.....	۱-۲۱ قیدهای ایجاد شده توسط برهم کنش ضعیف بر روی میدان هیگز
۴۰۳.....	۲-۲۱ خواص مورد انتظار بوزون هیگز
۴۰۶.....	۳-۲۱ اندازه گیری خواص بوزون هیگز در LHC
۴۰۹.....	تمرین ها

بخش ۴. سخن آخر

فصل ۲۲. سخن آخر.....	۴۲۵
چگونه بخش‌های مدل استاندارد به‌طور مناسب کنار یکدیگر قرار می‌گیرند.....	۴۲۶
چرا جرم کوارک‌ها و لپتون‌ها در یک چنین بازهٔ بزرگی تغییر می‌کند؟.....	۴۲۷
چرا تقارن پیمانه‌ای $SU(2) \times U(1)$ برهم‌کنش ضعیف به‌طور خودبه‌خودی شکسته شده است؟.....	۴۲۷
چرا جهان یکنواخت نیست، بلکه پُر از ساختارهاست؟.....	۴۲۹
چرا ماده در جهان بیشتر از پادماده است؟.....	۴۳۰
«مادهٔ تاریک» جهان چیست؟.....	۴۳۱
«انرژی تاریک» جهان چیست؟.....	۴۳۲
آیا تقارن‌های بالاتری در طبیعت وجود دارند که به ذرات و برهم‌کنش‌های جدیدی منجر شوند؟.....	۴۳۳
چگونه گرانش با مدل استاندارد سازگار می‌شود؟.....	۴۳۴
آیا فضا-زمان یک مفهوم بنیادی است که در نظریهٔ نهایی دوام خواهد داشت؟.....	۴۳۵
پیوست «ا»- نمادگذاری.....	۴۳۷
پیوست «ب»- ضرائب تبدیل ثابت‌های فیزیکی.....	۴۴۱
پیوست «ج»- فرمول‌های خلق و نابودی ذرات بنیادی.....	۴۴۳
پیوست «د»- فرمول‌های اصلی برای محاسبهٔ سطح مقطع و پهنای جزئی.....	۴۴۵
پیوست «ه»- فرمول‌های QCD برای برخورد‌های هادرونی.....	۴۴۷
کتابنامه.....	۴۴۹
نمایه.....	۴۵۷

سخن مترجمان

کتاب حاضر برگردان مفاهیم فیزیک ذرات بنیادی تألیف مایکل پسکین است که برای دانشجویان رشته فیزیک نوشته شده است. بخش‌هایی از این کتاب را می‌توان برای دانشجویان سال‌های آخر کارشناسی که دروس نسبیت و مکانیک کوانتومی را گذرانده‌اند، تدریس کرد و بقیه بخش‌ها برای تدریس به دانشجویان تحصیلات تکمیلی نوشته شده است. در این کتاب علاوه بر مباحث نظری، به بخش‌های تجربی ذرات نیز توجه شده است. در آخر هر فصل تعداد زیادی مسئله طرح شده است که به فهم مطالب کمک می‌کند.

لازم می‌دانیم از همکار ارجمند آقای دکتر محمدابراهیم زمرّدیان برای ویراستاری دقیق علمی و نیز از خانم هانیه اسدپور فعال مشهد برای ویراستاری ادبی قدردانی کنیم. از آنجا که قسمتی از ترجمه و کارهای مربوط زمانی انجام شده است که مهمان آقای دکتر حسن سریشه‌ئی بودیم و از امکانات اینترنتی و الکترونیکی و مشاوره ایشان بهره برده‌ایم، لازم می‌دانیم به‌طور ویژه از ایشان تشکر کنیم.

در پایان، از مدیریت نشر آثار علمی دانشگاه فردوسی مشهد که امکان چاپ این کتاب را فراهم کردند، قدردانی می‌شود. مترجمان از آقای دکتر بهروز مهران، مدیریت محترم نشر آثار علمی دانشگاه فردوسی مشهد، آقای دکتر هادی هراتی، رئیس محترم مرکز نشر و همچنین کارشناسان نشر، آقایان قندهاری، نخعی و نداف سنگانی، تشکر و قدردانی می‌کنند.

محسن سریشه‌ئی
فاطمه اشرف‌مقیمی

press.um.ac.ir

پیشگفتار مؤلف

این یک کتاب درسی در رابطه با فیزیک ذرات بنیادی است که برای دانشجویانی که اطلاعات کافی دربارهٔ نسبیّت خاص دارند و درس مکانیک کوانتومی دورهٔ کارشناسی را گذرانده‌اند، نوشته شده است.

فیزیک ذرات اکنون به یک مرحلهٔ نهایی از تحولش رسیده است. نیروهای اولیه که در محدودهٔ هستهٔ اتمی عمل می‌کنند، یعنی برهم‌کنش‌های قوی و ضعیف، اکنون دارای یک توصیف بنیادی با معادلاتی شبیه به معادلات ماکسول هستند. این نیروها در یک توصیف ریاضی فشرده که مدل استاندارد فیزیک ذرات نامیده می‌شود، خلاصه شده است. هدف این کتاب این است که شرح دهد مدل استاندارد چیست و چگونه اجزای مختلف آن برای توصیف نتایج تجربی به کار می‌روند.

خلاً موجود بین مطالعهٔ ذرات بنیادی و دیگر شاخه‌های علوم فیزیکی رو به افزایش است. درحالی‌که شاخه‌های دیگر فیزیک مستقیماً به علم مواد، الکترونیک مدرن و حتی بیولوژی اعمال می‌شوند، فیزیک ذرات محدوده‌ای را که دور از دسترس و در فواصل بسیار کوتاه قرار دارد، توصیف می‌کند. فیزیک‌دان‌های شاخه‌های دیگر هم به دلیل مخارج هنگفت آزمایش‌های ذرات بنیادی و هم به دلیل نحوهٔ رمزآلود توصیف فیزیک ذرات، با اکراه با آن برخورد می‌کنند. فیزیک ذرات مقید به نظریهٔ میدان‌های کوانتومی نسبیتی است که یک مبحث فوق‌العاده تکنیکی است و همین فهم آن را مشکل‌تر می‌کند.

باوجود این، نکات بسیاری در فیزیک ذرات وجود دارند که اگر بتوان به آن‌ها دست یافت، می‌توان از آن‌ها قدردانی کرد. فیزیک ذرات ایده‌های فوق‌العاده زیبایی را دربر دارد. این شاخه از فیزیک ایده‌های عمیق و شگفت‌انگیزی را داراست که از طریق ارتباط بین نظریه و نتایج تجربی حاصل می‌شوند. در این کتاب سعی می‌کنم فیزیک ذرات و مدل استاندارد را به گونه‌ای ارائه دهم که ایده‌های اصلی را بیان کند. امیدوارم این کتاب یک ورودی به این موضوع باشد و کمک کند تا دیگران درک بهتری از ارزش فرهنگی کشفیات تجربی ما پیدا کنند.

نحوهٔ ارائهٔ فیزیک ذرات بنیادی در این کتاب از سال‌ها بحث با فیزیک‌دان‌های تجربی و نظری حاصل شده است. فیزیک‌دان‌های ذرات یک جامعهٔ جهانی تشکیل می‌دهند که دیدگاه‌های مختلف و الگوهای ملی متفاوتی را گرد می‌آورد. این گسترهٔ دیدگاه‌ها بوده است که منبع کلیدی ایده‌های جدید و باعث پیشرفت این حوزه شده است. این دیدگاه‌های متفاوت یک منبع از تصویر شهودی نیز بوده که باعث شده است بتوان فرایندهای فیزیکی را در فواصل و قلمرو نیروهای زیرهسته‌ای تصوّر کرد. در این کتاب سعی کرده‌ام تا حدّ ممکن این تصویرها را

وارد بحث کنم. نحوه تفکر من در رابطه با فیزیک ذرات بنیادی از طریق ارتباطی که با آزمایشگاه‌های بزرگ در دانشگاه کورنل^۱ و اسلاک^۲ داشته‌ام، شکل گرفته است. من قدردان بسیاری از همکاران در این آزمایشگاه‌ها هستم.

در خلال نوشتن این کتاب، اغلب به من یادآوری شده است که بسیاری از افراد بزرگ که در فرمول‌بندی مدل استاندارد دست داشته‌اند، به ضیافت آن سرا شتافته‌اند. تنها در چند سال گذشته، سیدنی درل^۳، مارتین پرل^۴، ریچارد تایلور^۵، کنت ویلسون^۶ و اخیراً برتون ریچتر^۷ را از دست داده‌ایم. همه این افراد شخصاً روی من تأثیر گذاشته و عمیقاً تفکرات من درباره ذرات بنیادی را تحت تأثیر قرار داده‌اند. برای ما چالشی است که نه تنها برای ادامه کارشان، بلکه برای گشودن فصل‌هایی در توسعه فیزیک بنیادی راه آن‌ها را دنبال کنیم. امیدوارم این کتاب برای کسانی که می‌خواهند این کار را دنبال کنند، زمینه مفیدی فراهم کند.

هسته اصلی این نوشتار به عنوان مجموعه درس‌هایی است که برای دانشجویان تابستانی سرن^۸ در ۱۹۹۷ ارائه شد. از آلوارز گومه^۹ برای دعوت به ارائه این دوره تشکر می‌کنم. بخش‌هایی از این مطالب را در چند مدرسه تابستانی و کلاس‌های درس، به خصوص دوره فیزیک ذرات بنیادی در پرمیتراسکالرز^{۱۰} در انستیتو پرمیتر ارائه داده‌ام. از پاتریشیا برجات^{۱۱} برای فراهم آوردن این فرصت و توصیه‌هایی برای تدریس در این سطح سپاسگزارم. از دانشجویان تمام این دوره‌ها برای صبوری در استفاده از نسخه اولیه این کتاب و توجه به اشتباهات موجود در آن تشکر می‌کنم. از سونک ادلانگ^{۱۲}، هاریت کونیشی^{۱۳}، سال مور^{۱۴} و گروه آن‌ها در انتشارات دانشگاه آکسفورد برای ابراز علاقه آن‌ها به این کتاب قدردانی می‌کنم. از تیم کوهن^{۱۵}، سرگ دنداس^{۱۶}، کریستوفر هیل^{۱۷}، سانگون جونگ^{۱۸}، آندره لارکوسکی^{۱۹}، آرون پیرس^{۲۰}، دنیل شرودر^{۲۱}، بروس شوم^{۲۲} و آندره دیوید تینیکو^{۲۳} برای اظهار نظریاتشان در ارائه مطالب و جونگمین یون^{۲۴} برای بازخوانی دقیق نسخه اولیه کتاب تشکر می‌کنم. بیش از همه از همکارانم در گروه نظری اسلاک^{۲۵} برای توصیه و انتقاداتشان که در فهم من از فیزیک ذرات بنیادی مفید بوده است، تشکر می‌کنم.

مایکل پسکین

سانی ویل، کالیفرنیا، آگوست ۲۰۱۸

1. Cornell University
2. SLAC
3. Sidney Drell
4. Martin Perl
5. Richard Taylor
6. Kenneth Wilson
7. Burton Richter
8. CERN
9. Alvarez-Gaume
10. Perimeter Scholars
11. Patricia Burchat
12. Sonke Adlung
13. Harriet Konishi

14. Sal Moore
15. Tim Cohen
16. Serge Dendas
17. Christopher Hill
18. Sunghoon Jung
19. Andrew Larkoski
20. Aron Pierce
21. Daniel Schroeder
22. Bruce Schumm
23. Andre David Tinoco
24. Jongmin Yoon
25. SLAC