



دانشگاه پیام نور

مبانی فیزیک هسته‌ای ۱

(رشته فیزیک)

پ. ای. هادسون ای. گادیولی ای. گادیولی اربا

مترجمان:

رضا ایزدی نجف آبادی، علیرضا بینش

پرویز پرورش، نیما قلعه، رحیم کوهی فایق

بسم الله الرحمن الرحيم

پیشگفتار ناشر

کتاب‌های دانشگاه پیام نور حسب مورد و با توجه به شرایط مختلف یک درس در یک یا چند رشته دانشگاهی، به صورت کتاب درسی، متن آزمایشگاهی، فرادرسی، و کمک‌درسی چاپ می‌شوند.

کتاب درسی ثمرهٔ کوشش‌های علمی صاحب اثر است که براساس نیازهای درسی دانشجویان و سرفصل‌های مصوب تهیه و پس از داوری علمی، طراحی آموزشی، و ویرایش علمی در گروه‌های علمی و آموزشی، به چاپ می‌رسد. پس از چاپ ویرایش اول اثر، با نظرخواهی‌ها و داوری علمی مجدد و با دریافت نظرهای اصلاحی و متناسب با پیشرفت علوم و فناوری، صاحب اثر در کتاب تجدیدنظر می‌کند و ویرایش جدید کتاب با اعمال ویرایش زبانی و صوری جدید چاپ می‌شود.

متن آزمایشگاهی (م) راهنمایی است که دانشجویان با استفاده از آن و کمک استاد، کارهای عملی و آزمایشگاهی را انجام می‌دهند.

کتاب‌های فرادرسی (ف) و **کمک‌درسی** (ک) به منظور غنی‌تر کردن منابع درسی دانشگاهی تهیه و بر روی لوح فشرده تکثیر می‌شوند و یا در وبگاه دانشگاه قرار می‌گیرند.

مدیریت تولید مواد و تجهیزات آموزشی

فهرست مندرجات

	مقدمه مترجمین
	مقدمه مؤلفین
۱	بخش اول هسته و ذرات آن
۳	فصل ۱ مقدمه تاریخی
۳	۱-۱ لایه‌های ماده
۸	۲-۱ تاریخچه اولیه فیزیک هسته‌ای و فیزیک ذرات
۱۴	۳-۱ فیزیک هسته‌ای و ذرات بنیادی در دوران بلوغ
۱۷	فصل ۲ پرتوزایی
۱۷	۱-۲ کشف پرتوزایی طبیعی و مصنوعی و قانون واپاشی پرتوزا
۲۵	۲-۲ واپاشی آلفا
۲۷	۳-۲ واپاشی بتا
۲۷	۱-۳-۲ واپاشی β^-
۳۰	۲-۳-۲ واپاشی β^+
۳۴	۴-۲ واپاشی گاما، الکترون‌های تبدیلی و گذارهای ایزومری
۳۵	۵-۲ ایزوتوپ‌های پرتوزای طبیعی
۴۰	۶-۲ سری‌های واپاشی پرتوزا
۴۵	۷-۲ انباشت و واپاشی ایزوتوپ‌های پرتوزای مصنوعی
۴۸	۸-۲ واحدهای پرتوزایی
۵۱	۹-۲ استفاده از پرتوزایی در تحقیقات محض و کاربردی
۵۶	مسائل
۵۹	فصل ۳ کشف هسته
۵۹	۱-۳ آزمایش راترفورد

۶۷	۲-۳ یکاها و تعاریف
۷۱	مسائل
۷۴	فصل ۴ شتاب دهنده‌های ذرات و چشمه‌های نوترون
۷۴	۱-۴ مقدمه
۷۶	۲-۴ انواع شتاب دهنده‌ها
۷۸	۳-۴ شتاب دهنده‌های با هدف ثابت
۷۸	۴-۴ شتاب دهنده‌های الکتروستاتیکی
۸۳	۵-۴ شتاب دهنده‌های دوره‌ای
۸۳	۱-۵-۴ شتاب دهنده خطی
۸۶	۲-۵-۴ بتاترون
۸۸	۳-۵-۴ سیکلوترون
۹۲	۴-۵-۴ سنکروسیکلوترون
۹۴	۵-۵-۴ سنکروترون
۹۷	۶-۴ برخورد دهنده‌ها
۱۰۲	۷-۴ چشمه‌های نوترون
۱۰۶	مسائل
۱۱۰	فصل ۵ آشکارسازهای ذرات
۱۱۰	۱-۵ مقدمه
۱۱۰	۲-۵ آشکارسازهایی که یک ذره با تابش را توسط سیگنال الکتریکی‌ای که تولید می‌کند تشخیص می‌دهند
۱۱۱	۱-۲-۵ ذرات باردار سنگین
۱۱۷	۲-۲-۵ یونش ویژه و برد یک ذره سنگین
۱۱۹	۳-۲-۵ الکترون‌ها
۱۲۴	۴-۲-۵ آشکارسازهای بصری
۱۲۹	۵-۲-۵ آشکارسازهای گازی جمع‌کننده بار
۱۳۴	۶-۲-۵ آشکارسازهای نیم‌رسانا
۱۴۰	۷-۲-۵ سوسوزن‌ها
۱۴۳	۸-۲-۵ تابش چرنکوف
۱۴۵	۹-۲-۵ فوتون‌ها
۱۵۳	۱۰-۲-۵ کالریمترها
۱۵۵	۱۱-۲-۵ ذرات خنثی
۱۶۳	۳-۵ طیف سنج‌های الکترومغناطیسی
۱۷۲	۴-۵ آشکارسازهای فعال‌سازی
۱۷۵	مسائل
۱۸۲	فصل ۶ نیروهای بنیادی
۱۸۲	۱-۶ نیروهای بنیادی و ذرات زیرهسته‌ای
۱۸۵	۲-۶ سرشت تبادلی نیروهای بنیادی

۱۸۷	۳-۶ قدرت نیروهای بنیادی
۱۸۹	مسائل

۱۹۰	فصل ۷ لپتون‌ها
۱۹۰	۱-۷ مقدمه
۱۹۲	۲-۷ مدارکی دال بر پایداری عدد لپتونی و عدد نسلی لپتونی
۱۹۴	۳-۷ مشاهده نوترینوی الکترونی و پادنوترینوی الکترونی
۱۹۵	۴-۷ مدرک دال بر طبیعت متفاوت نوترینوهای سه‌نسل
۱۹۸	۵-۷ هلیسیته نوترینو
۲۰۲	۶-۷ جرم نوترینو
۲۰۳	۷-۷ مسئله نوترینوی خورشیدی
۲۰۷	۸-۷ بوزون‌های پیمانه‌ای W و Z
۲۱۳	مسائل

۲۱۵	فصل ۸ هادرون‌ها
۲۱۵	۱-۸ باریون‌ها و مزون‌ها
۲۱۵	۲-۸ اعداد کوانتومی هادرونی
۲۲۴	مسائل

۲۲۷	فصل ۹ کوارک‌ها
۲۲۷	۱-۹ کوارک‌ها
۲۳۳	۲-۹ ابرچندتایی‌های هادرونی
۲۳۸	۳-۹ پتانسیل برهم‌کنشی بین کوارک‌های پرچرم
۲۴۲	مسائل

۲۴۵	بخش دوم نیروهای هسته‌ای
۲۴۷	فصل ۱۰ قوانین ناوردایی
۲۴۷	۱-۱۰ برهم‌کنش دو نوکلئونی
۲۴۸	۲-۱۰ پایداری انرژی
۲۴۹	۳-۱۰ پایداری تکانه خطی
۲۵۰	۴-۱۰ پایداری تکانه زاویه‌ای
۲۵۰	۱-۴-۱۰ پایداری تکانه زاویه‌ای مداری
۲۵۲	۲-۴-۱۰ اسپین و پایداری تکانه زاویه‌ای کل
۲۵۵	۵-۱۰ اسپین ایزوتوپی
۲۵۶	۱-۵-۱۰ اصل پائولی تعمیم‌یافته
۲۵۷	۲-۵-۱۰ عملگرهای تعویض مایورانا و هایزنبرگ
۲۵۸	۳-۵-۱۰ ویژگی‌های عملگرهای ایزواسپینی
۲۶۰	۴-۵-۱۰ تقارن بار و نیروهای هسته‌ای
۲۶۲	۵-۵-۱۰ استقلال از بار نیروهای هسته‌ای

۲۶۵	۱۰-۶ پایستگی پارите
۲۷۳	۱۰-۷ مزدوج کردن بار
۲۷۵	۱۰-۸ نقض CP
۲۷۸	۱۰-۹ وارونی زمانی
۲۸۳	۱۰-۱۰ قضیه CPT
۲۸۴	مسائل

فصل ۱۱ نظریه‌های میدان بوزون و پتانسیل‌های پدیده شناختی

۲۸۹	۱-۱۱ مقدمه
۲۸۹	۱۱-۲ نظریه میدان شبه نرده‌ای
۲۹۱	۱۱-۳ ویژگی‌های برهم‌کنش تانسوری
۲۹۴	۱۱-۴ ویژگی‌های OPEP ی دستگاه دو نوکلئونی
۲۹۵	۱۱-۵ پتانسیل‌های نرده‌ای و برداری
۲۹۶	۱۱-۶ پتانسیل‌های پدیده شناختی دو نوکلئونی
۲۹۷	مسائل
۳۰۰	

فصل ۱۲ دستگاه‌های کم نوکلئونی

۳۰۱	۱-۱۲ مقدمه
۳۰۱	۱۲-۲ دوترون
۳۰۲	۱۲-۳ دستگاه‌های سه نوکلئونی
۳۱۲	۱۲-۴ ذره α
۳۱۷	مسائل
۳۱۸	

فصل ۱۳ نظریه پراکندگی

۳۲۰	۱۳-۱ چارچوب‌های مرجع و قوانین تبدیل
۳۲۰	۱۳-۲ تقریب بورن مرتبه اول
۳۲۴	۱۳-۳ نظریه موج جزئی پراکندگی کشسان
۳۲۷	۱۳-۴ تقریب بورن مرتبه دوم
۳۳۳	۱۳-۵ پراکندگی ذرات با اسپین $\frac{1}{2}$ از هدف با اسپین صفر
۳۳۵	مسائل
۳۴۱	

فصل ۱۴ پراکندگی نوکلئون-نوکلئون

۳۴۳	۱۴-۱ برهم‌کنش نوکلئون-نوکلئون
۳۴۳	۱۴-۲ پراکندگی نوترون-پروتون کم انرژی
۳۴۸	۱۴-۳ پراکندگی نوترون‌ها توسط هیدروژن اُرتو و پارا
۳۵۲	۱۴-۴ نظریه برد مؤثر
۳۵۴	۱۴-۵ پراکندگی پروتون-پروتون کم انرژی
۳۵۶	۱۴-۶ پراکندگی نوکلئون-نوکلئون در انرژی‌های زیاد
۳۵۹	مسائل
۳۷۲	

۳۷۵	بخش سوم ساختار هسته‌ای
۳۷۷	فصل ۱۵ سیستماتیک هسته‌ای
۳۷۷	۱-۱۵ انواع هسته‌ها
۳۸۱	۲-۱۵ جرم‌ها و انرژی‌های هسته‌ای
۳۸۸	۳-۱۵ توزیع بار و ماده هسته‌ای
۳۹۶	۴-۱۵ تغییر شکل هسته‌ای
۴۰۲	مسائل
۴۰۶	فصل ۱۶ خواص هسته‌ای
۴۰۶	۱-۱۶ حالت‌های هسته‌ای و ساختار هسته‌ای
۴۱۳	۲-۱۶ اسپین و ایزواسپین هسته
۴۱۳	۱-۲-۱۶ اسپین
۴۱۵	۲-۲-۱۶ ایزواسپین
۴۱۸	۳-۱۶ حالت‌های هسته‌ای و چگالی‌های تراز
۴۲۸	۴-۱۶ خوشه‌بندی در هسته
۴۳۰	۵-۱۶ ماده هسته‌ای
۴۳۳	۶-۱۶ ابر هسته
۴۳۸	مسائل
۴۴۱	فصل ۱۷ مدل‌های هسته‌ای
۴۴۱	۱-۱۷ انواع مدل‌ها
۴۴۴	۲-۱۷ مدل‌های هسته‌ای اولیه
۴۴۷	۳-۱۷ مدل گاز فرمی
۴۵۲	۴-۱۷ مدل پوسته‌ای
۴۶۰	۴-۱۷ توزیع‌های چگالی هسته‌ای
۴۶۲	۲-۴-۱۷ پاریتته‌ها و تکانه‌های زاویه‌ای کل حالت‌های هسته‌ای
۴۶۶	۳-۴-۱۷ گشتاورهای مغناطیسی
۴۶۹	۴-۴-۱۷ محاسبات دقیق‌تر
۴۷۴	۵-۱۷ مدل دورانی
۴۹۴	۶-۱۷ مدل ارتعاشی
۵۰۳	۷-۱۷ مدل نیلسون
۵۰۵	۸-۱۷ مدل ذره α
۵۰۸	۹-۱۷ مدل بوزون برهم‌کنش کننده
۵۱۰	مسائل
۵۲۲	فصل ۱۸ واپاشی هسته‌ای
۵۲۲	۱-۱۸ مقدمه
۵۲۵	۲-۱۸ واپاشی آلفا
۵۳۴	۳-۱۸ واپاشی بتا

۵۳۷	۱۸-۳-۱ نظریه فرمی برای واپاشی β
۵۴۲	۱۸-۳-۲ قواعدگزینش
۵۴۴	۱۸-۳-۳ جرم نوترینو
۵۴۸	۱۸-۳-۴ واپاشی دو بتایی
۵۴۹	۱۸-۴-۱ واپاشی گاما
۵۵۰	۱۸-۴-۱ انرژی‌شناسی
۵۵۰	۱۸-۴-۲ نظریه کلاسیکی الکترومغناطیس
۵۵۴	۱۸-۴-۳ گذار به مکانیک کوانتومی
۵۵۵	۱۸-۴-۴ یکاهای وایسکوف
۵۵۶	۱۸-۴-۵ قواعدگزینش
۵۵۷	۱۸-۴-۶ اندازه‌گیری‌های توزیع زاویه‌ای
۵۵۹	۱۸-۴-۷ تبدیل داخلی
۵۶۰	۱۸-۴-۸ اثر موسبائور
۵۶۲	۱۸-۵ شکافت
۵۷۴	۱۸-۶ واپاشی خوشه‌ای
۵۷۶	مسائل

مقدمه مترجمین

کتابی که پیش رو دارید جلد اول از مجموعه‌ای است که دربرگیرنده مباحث نسبتاً گسترده از درس فیزیک هسته‌ای می‌باشد. اگرچه برای این درس در دوره کارشناسی چندین کتاب فارسی وجود دارد، اما متأسفانه تاکنون هیچ مرجع مناسبی جهت تدریس فیزیک هسته‌ای پیشرفته، به این زبان، به دنیای کتاب‌های فارسی راه نیافته است. پس از جستجوی زیاد، یکی از مترجمان کتاب حاضر را در همایش بین‌المللی فیزیک نظری، که در سال پایانی قرن بیستم در کاخ یونسکو شهر پاریس برگزار گردید، در غرفه انتشارات دانشگاه آکسفورد مشاهده و تهیه نمود. با پیشنهاد ایشان و بررسی و مطالعه همه‌جانبه معلوم شد که مطالب این کتاب، علاوه بر استفاده در دوره کارشناسی، می‌تواند برای درس فیزیک هسته‌ای پیشرفته در مقطع کارشناسی ارشد، و دست‌کم بخشی از مباحث پیشرفته همین درس در دوره دکترای فیزیک هسته‌ای مناسب باشد. بر این اساس و پس از هماهنگی لازم دست به ترجمه کتاب زدیم و اکنون افتخار داریم اثری را به زبان فارسی ارائه دهیم که بتواند مشکل چندین ساله دانشجویان تحصیلات تکمیلی فیزیک هسته‌ای را تا حدودی حل کند. به هیچ وجه معتقد به این نیستیم که کار انجام گرفته بی‌عیب و نقص است. از این رو چشم به راه ارزیابی هستیم که ضمن پیشنهادهای ارزشمند خود نقاط ضعف و نارسایی‌های ترجمه ما را گوشزد کنند. انشاءالله این نقطه نظرات در چاپ‌های بعدی مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

در اینجا لازم می‌دانیم به نکته‌ای اشاره کنیم. در حروفچینی کتاب سعی شده است که تا حد امکان متن‌ها و اعداد به کار رفته در شکل‌ها و جدول‌ها و نیز اعداد فرمول‌ها به

فارسی باشد. در همین زمینه مجبور شدیم بردار را با علامت پیکان (→) روی حروف اسم آن و یا با به کار بردن قلم سیاه برای نوشتن این حروف مشخص کنیم. در پایان وظیفه خود می‌دانیم از آقای دکتر جعفر گودرزی، که زحمت ویرایش کتاب را تقبل نموده‌اند، تشکر نمائیم. همچنین از دانشگاه پیام‌نور به دلیل پذیرش چاپ و انتشار کتاب و کلیه کسانی که در تهیه و تنظیم آن ما را یاری نموده‌اند قدردانی ویژه داریم.

مقدمه مؤلفین

فیزیک هسته‌ای موضوع مهم و قابل توجهی است. هسته اتم مثال منحصر به فردی از یک سیستم کوانتومی با تعداد نسبتاً کم ذره است که هم حرکت تک-ذره و هم حرکت جمعی را به نمایش می‌گذارد. سه نیرو از چهار نیروی طبیعی، نیروی الکترومغناطیسی، نیروی قوی هسته‌ای و اندرکنش ضعیف بر این سیستم حاکم‌اند. پرتوهای هسته‌ای کاربردهای گسترده‌ای در پزشکی، کشاورزی، و صنعت پیدا کرده‌اند. شکافت هسته‌ای ممکن است منبع انرژی اصلی آینده باشد، پیش از آن که، شاید، با گداخت هسته‌ای جایگزین شود.

هدف ما این است که مقدمه ساده‌ای از دانش ساختار هسته و واکنش‌های هسته‌ای در این کتاب ارائه دهیم. این دانش پیوسته در حال رشد است به‌طوری‌که، با وجود کتاب‌های متعددی در فیزیک هسته‌ای، لازم می‌آید در اندیشه خود و بیان مطالب همواره بازنگری کنیم تا به جذابیت، هیجان و کارهای بزرگ پژوهشی نوین آن پی ببریم. گسترش دانش ما از گرایش خاصی در جهان فیزیک مراحل مختلفی را طی می‌کند و کتاب‌هایی که آن را توضیح می‌دهند بازتابی از این گسترش هستند. در آغاز پدیده‌هایی که وجود حیطه‌های جدید طبیعت را مشخص می‌کنند، بی‌ارتباط جلوه می‌کنند. مانند رفتار کهربا، سنگ آهنربا، رعد و برق که برداشت کلی اولین نشانه‌های جهان الکتریسته و مغناطیس بودند. سپس ابزارهای مقدماتی ساخته شدند، تا بتوانیم به بازتولید این پدیده‌ها تحت شرایط کنترل شده، و اندازه‌گیری آثارشان پردازیم. پیشرفت دقت اندازه‌گیری‌ها، منجر به قوانین پدیده‌شناختی، همچون قوانین وبر و آمپر شدند. ماکسول از تجمع این قوانین به نظریه جامع الکترومغناطیس رسید که در معادلاتش

جمع‌بندی شده است. هنگامی که به این مطلب می‌رسیم، اصولاً تمام پدیده‌ها را شناخته‌ایم، و مراجعه به اسباب آزمایشگاهی زائد می‌شود، مگر در آشناسازی‌های مقدماتی به این موضوع.

مطالعه فیزیک هسته‌ای به پیشرفتگی الکترومغناطیس نیست. هنوز از خیلی جهات موضوعی تجربی است: پدیده‌های جدیدی مدام پیدا می‌شوند که علم ما را گسترش می‌دهند و چیزهایی که ما می‌دانیم هنوز به دقت و محدودیت دستگاه‌های موجود بستگی دارند. هنوز نظریه جامعی در مورد هسته نداریم و شاید هرگز نداشته باشیم. برای توضیح آن مجبوریم به مدل‌های هسته‌ای تکیه کنیم که هریک بعضی جنبه‌های ساختار هسته را، غالباً با جزئیات و دقت بالا، توضیح می‌دهند. با این وجود به نظر می‌رسد که این مدل‌ها در بعضی موارد با هم تناقض دارند، و این باعث می‌شود که فکر کنیم علم ما در مورد هسته ناقص و ناتمام است. اما در سال‌های اخیر آثار اتحاد و تجمع این مدل‌ها پدیدار شده‌اند، و به‌خصوص مفهوم میدان میانگین هسته‌ای در این زمینه کمک بزرگی بوده است.

پیچیده بودن هسته و ناکامل بودن دانش ما به این معنی است که امکان ندارد که فیزیک هسته‌ای را بتوانیم به خوبی نظریه الکترومغناطیس، نظریه مکانیک کلاسیک و یا مکانیک کوانتومی توضیح دهیم. در این موضوع‌ها می‌توان به آسانی از چند قضیه اساسی با توان و عمومیت بالا شروع کرد و نتیجه‌های مورد نظر را به‌طور ریاضی آشکار کرد. در این موارد نیازی به توضیح دستگاه اندازه‌گیری و یا مقایسه نتایج تجربی و محاسباتی نیست. می‌توان به سادگی معادله‌های ماکسول، یا لاگرانژ، و یا شرودینگر را نوشت و آن‌ها را با شرط‌های مرزی و اندرکنش‌های مربوطه حل کرد. مطلبی که زمانی معضلی در فیزیک بود اکنون به‌صورت یک تمرین ریاضی درآمده است که غایت مطلوب نهایی (یا تقدیر، بسته به باور) هر شاخه فیزیک است.

فیزیک هسته‌ای هنوز از چنین وضعیتی خیلی دور است، در نتیجه راه منطقی روشنی برای توضیح این موضوع وجود ندارد. نقطه شروع منطقی، مجموعه معادلات اساسی که همه چیز را از آن نتیجه بگیریم وجود ندارد. تقریباً هر عنوانی فوری مجموعه سؤالات اساسی و مشکلی را پیش می‌آورد. بخش‌های قسمت‌های مختلف این موضوع با هم ارتباط نزدیک دارند و نمی‌توان آن‌ها را به ترتیب متوالی ساده‌ای توضیح داد. در نتیجه این در بعضی فصل‌ها به مطالبی ارجاع می‌شود که در فصل‌های بعد از آن بررسی می‌شوند و این غیر قابل اجتناب بود. بنابراین بهترین راه یادگیری موضوع روش

متقابل است که در آن تمام موضوع را چند بار بخوانیم تا رابطه بین شناخت ما از ساختار هسته و اندرکنش‌های هسته‌ای به تدریج واضح‌تر شود.

در آشنایی با فیزیک هسته‌ای نمی‌توان از بعد تاریخی گذشت چرا که بعضی بخش‌های دانش گذشته در درک کامل دانش روز اساسی است. گسترش دانش فیزیک هسته‌ای در قرن حاضر رویداد پرشور و پر از دل‌بستگی‌ها انسانی و بازتاب‌های کم و بیش همه سیمای زندگی است. دانشمندانی که بنیانگذار این پیشرفت‌ها بودند انسان‌های واقعاً برجسته و متمایزی بودند. بدون اشاره به کشمکش‌های پنهان، ناامیدی‌ها، تلاش‌های شجاعانه و شکست‌های غم‌انگیز کتاب درسی مقدماتی فیزیک هسته‌ای گزارش بی‌روح و کسل‌کننده خواهد بود. سعی کرده‌ایم که بعضی از این مطالب را با نوشتن یک فصل تاریخی و گاهی اشاره اندکی به بعضی نکات، که خواننده را وادار به درک ماجرا کند، موضوع را واگو کنیم.

تصمیم داریم که در نظر گرفتن پیشرفت‌های فیزیک هسته‌ای تا حد امکان این کتاب را کتاب درسی به روز کنیم. چون پژوهش‌های هسته‌ای امروزه از نظر وسایل بکار رفته، فرموله‌سازی ریاضی آن و اندیشه‌های فیزیکی خیلی پیچیده‌اند، گاهی مجبور شدیم موضوعی را طرح‌وار بیان کنیم که اندیشه‌ها و نتیجه‌های اصلی را بدون اشاره به تمام حرکت‌هایی که منجر به آنها شده است، نشان دهد. مسأله آن است که به توانیم تمام مطالب را در حجم معینی محدود کنیم بدون اینکه به خلاصه‌سازی نامعقول برسیم. در متن‌های مقدماتی مطلوب است که نظریه‌ها ریاضی وار توضیح داده شوند. اما در فیزیک هسته‌ای این عمل فقط برای آسان‌ترین مدل‌ها و نظریه‌های واکنش ممکن است، به‌طور مثال کاربست پتانسیل‌های نوسانگر هماهنگ منجر به نتیجه‌هایی که به خوبی با داده‌ها سازگار باشد، نمی‌شود. نظریه‌های واقعی‌تر به معادلات پیچیده‌تری منتهی می‌شوند که فقط به‌طور عددی حل‌پذیرند و گرچه نتیجه‌های آن‌ها بهتر با داده‌ها توافق دارد، اما ممکن است فیزیک مسأله از دست برود. در یک کتاب مقدماتی نمی‌توان فرموله‌سازی کامل ریاضی را بیان کرد، از طرفی باید به کارهای جدید که تطابق دقیقی با داده‌ها دارد اشاره کرد. روش مادر این کتاب این است که ابتدا اندیشه‌های اساسی فیزیکی را بیان کنیم، و سپس نشان دهیم که چگونه با یک مدل ساده آن‌ها اعمال می‌شوند. سرانجام به آخرین پیشرفت‌های مدل، بدون جزئیات ریاضی، اشاره و نتیجه‌های محاسبات واقع بینانه ریاضی را با نتایج تجربی مقایسه می‌کنیم. در بعضی حالات، نظریه بیان ساده‌ای ندارد. به‌طور مثال، مدل اندرکنشی بوزون برای بیان ویژگی‌های متعددی از هسته بسیار موفق است، اما توضیح آن نیاز به نظریه

گروه پیشرفته دارد. در چنین مواردی بیشتر به اندیشه‌های بنیادی فیزیک توجه می‌کنیم، و سپس بعضی نتیجه‌های محاسبات اخیر با تجربی آن‌ها مقایسه می‌شوند.

هسته‌ها را می‌توان به‌خوبی به‌صورت ساختاری از نوترون‌ها و پروتون‌ها توضیح داد، که دارای ویژگی‌های باشد که امکان برانگیختگی نوکلئون‌ها یا مجموعه‌ای از آن‌ها فراهم کند. در سال‌های اخیر معلوم شده است که نوکلئون‌ها خود ساختار مرکبی از سه کوارک دارند که با گلئون‌ها به هم مقیدند. سرانجام هسته‌ها را باید با ساختار کوارک - گلئون در نظر گرفت؛ با این وجود بحث قابل‌ملاحظه‌ای در مورد این که این موضوع باید در ساختار هسته و اندرکنش‌های هسته‌ای در نظر گرفته شود در جریان است. همانطور که فیزیک اتمی را می‌توان بدون توجه به ساختار هسته بررسی کرد، می‌توان ادعا کرد که فیزیک هسته‌ای را بدون توجه به ساختار نوکلئون قابل بررسی است. در حال حاضر دلیل قوی برای رد این موضوع نداریم، بنابراین می‌توانیم فیزیک هسته‌ای را از فیزیک ذرات بنیادی جدا کنیم و هسته را تنها برحسب نوترون و پروتون، با بکارگیری اندرکنش‌های پدیده‌شناختی که فقط با ساختار نوکلئون قابل توجیه هستند، توضیح دهیم، اما بهتر است آثار کوارک در هسته را در نظر داشته باشیم. در این کتاب ما چندین فصل ابتدایی را به ویژگی‌های ذرات بنیادی اختصاص داده‌ایم.

پتانسیل‌های هسته‌ای نوعاً حدود 50 MeV عمق دارند، و اغلب مطالعات ساختار هسته‌ای با پرتابه‌هایی با انرژی کمتر از 20 MeV بر نوکلئون انجام شده است. چون این انرژی‌ها خیلی کمتر از انرژی جرم سکون هسته‌اند، پدیده‌های هسته‌ای عموماً غیر نسبیتی هستند. در بیان بهتر مطلب فوق چندین مورد را باید مد نظر داشت، به‌طور مثال بکارگیری باریکه الکترونی در مطالعه توزیع با هسته، و همچنین بررسی نیروی اسپین - مدار، اما در نظر نگرفتن نسبیت دور از واقعیت نیست. هسته‌ها اجسام کوانتومی هستند و برای بررسی ساختار هسته و اندرکنش‌های هسته‌ای از مکانیک کوانتومی استفاده می‌شود. چون اغلب خوانندگان پیش از این درس کوانتوم مکانیک مقدماتی را گذرانده‌اند، فرض کرده‌ایم که آشنایی لازم با فنون و نتایج ساده آن دارند. چندین مسأله چندی در انتهای هر فصل آمده است، که در بعضی موارد حل آن‌ها نیاز به مطالبی دارد که در بخش‌های بعدی کتاب یافت می‌شود.

در متن مقدماتی امکان توضیح و بیان مراجع کامل تحقیقاتی نیست. اما با این وجود می‌خواهیم از دانشجو شانس مطالعه بیشتر را بگیریم، و این امکان را با آوردن فهرستی از کتاب‌ها و مقالات تخصصی فراهم کرده‌ایم.

این کتاب براساس چندین کلاس درس فیزیک هسته‌ای ارائه شده توسط نویسندگان در دانشگاه‌های آکسفورد و میلان بنیاد شده است. ما از همکارانمان که بخش‌هایی از متن کتاب را خواندند و پیشنهادات و نظرات مفید خود را ارائه دادند، به‌ویژه از پروفسور شولت که طرح شتاب‌دهنده COSY را به ما داد، سپاسگزاریم. همچنین از نویسندگان و ناشرانی که اجازه دادند از شکل‌های آن‌ها استفاده شود تشکر می‌کنیم. در چند مورد هم که ما نتوانستیم با مؤلفین تماس بگیریم، ممنون خواهیم بود که اجازه مربوطه را به ما بدهند. ما به‌ویژه از دکتر جاوگیش تولی که به ما اجازه باز تولید کارت‌های جیبی هسته‌ای را داد و دانشگاه‌های ساری و آکسفورد برای بعضی مسائل تشکر می‌کنیم.

پی. ای. هادسون

ای. گادیولی

ای. گادیولی اربا

آکسفورد

میلان

نوامبر ۱۹۹۶

بخش اول

هسته و ذرات آن

فصل ۱

مقدمه تاریخی

۱ - ۱ لایه‌های ماده

علم را می‌توان نتیجه تلاش سیستماتیک و جمعی انسان برای فهم ساختار و برهم‌کنش‌های محیط مادی اطرافش دانست. علوم فیزیکی با ماده غیر زنده سر و کار دارند و در طی چند قرن اخیر اطلاعات دقیق فزاینده‌ای توسط انسان به‌دست آمده است.

اکنون ما می‌دانیم که ماده از اتم‌ها تشکیل شده است و این اتم‌ها کوچک‌ترین اجزاء ممکن هر عنصر شیمیایی هستند. تصور اینکه ماده ممکن است دارای یک ساختار اتمی باشد، در حقیقت توسط یونانیان باستان مطرح گردید ولی مدرک قاطع دال بر وجود آن‌ها و اندازه و ساختارشان در قرن اخیر بدست آمد.

در خلال قرن حاضر، ساختار اتم کشف گردید و اتم به‌صورت یک هسته مرکزی کوچک که اکثر جرم را داراست و با ابری از الکترون‌ها احاطه گردیده است، شناخته شد. اتم از طریق جاذبه الکترواستاتیک بین هسته با بار مثبت و الکترون‌های با بار منفی شکل می‌گیرد و بار الکترون‌ها برابر با بار هسته است طوری که اتم در کل از لحاظ بار الکتریکی خنثی است.

مطالعه ساختار هسته نشان داده است که هسته از پروتون‌ها و نوترون‌ها تشکیل شده است و مطالعات جدیدتر در برخوردهای با انرژی بالا نیز نشان داده است که این پروتون‌ها و نوترون‌ها به نوبه خود از ذراتی، که قابل آشکارسازی نیستند، به نام کوارک ساخته شده‌اند. بنابراین اکنون ما دو لایه ماده در زیر لایه اتمی داریم، لایه هسته‌ای و لایه نوکلئونی، که حوزه‌های کاری فیزیک هسته‌ای و فیزیک ذرات بنیادی هستند.

بالای لایه اتمی، لایه مولکولی قرار دارد که این لایه حوزه کاری علم شیمی است. همانطور که اتم‌ها می‌توانند ترکیب شوند و مولکول‌هایی، با برخی پیچیدگی‌های

بسیار بزرگ، را به وجود آورند، مولکول‌ها نیز می‌توانند ترکیب شوند و تشکیل سلول بدهند که این سلول‌ها کوچک‌ترین جزء زنده به حساب می‌آیند. در سطح بالاتری از پیچیدگی مولکولی، سلول‌ها ترکیب شده و انواع مختلفی از ارگانیسم‌های زنده را پدید می‌آورند که این خود در حوزه کاری علوم زیستی قرار دارد. انسان خود یکی از این ارگانیسم‌های زنده است که دارای هوش و حواس است و این مفاهیم در حوزه کاری علم روانشناسی قرار می‌گیرد. این لایه‌های ماده هرکدام جداگانه به همراه اندازه تقریبی یک گونه اصلی آن‌ها برای مقایسه در جدول ۱ - ۱ فهرست شده‌اند.

همان‌طور که اجسام در هر لایه دارای اندازه مشخصی هستند، مقیاس انرژی مشخصه‌ای نیز، لاقط در لایه‌های پایین‌تر، برای آن‌ها وجود دارد. مولکول‌ها، اتم‌ها، هسته‌ها و نوکلئون‌ها همگی می‌توانند در یک سری از حالت‌های انرژی که می‌توان آن‌ها را با دیگرام‌های تراز انرژی نظیر آنچه در شکل ۱ - ۱ آمده نمایش داد، وجود داشته باشند.

جدول ۱ - ۱

علم	اندازه بر حسب متر	لایه
جامعه‌شناسی	۲	انسان
جانورشناسی	۱۰ ^{-۱} - ۱۰ ^{-۱}	حیوان
زیست‌شناسی	۱۰ ^{-۵}	سلول
شیمی	۱۰ ^{-۹} - ۱۰ ^{-۱۰}	مولکول
فیزیک اتمی	۱۰ ^{-۱۱} - ۱۰ ^{-۱۰}	اتم
فیزیک هسته‌ای	۱۰ ^{-۱۴} - ۱۰ ^{-۱۵}	هسته
فیزیک ذرات بنیادی	۱۰ ^{-۱۵}	نوکلئون
کرومودینامیک کوانتومی	< ۱۰ ^{-۱۵}	کوارک

مقیاس عمودی در واحد انرژی درجه‌بندی شده است و هر خط افقی متناظر با یک حالت سیستم در آن انرژی است. قابل توجه این‌که این دیگرام‌های تراز انرژی بسیار مشابه‌اند و تفاوت اصلی در اندازه انرژی‌ها است: هرچه لایه پایین‌تر و ساختار کوچک‌تر باشد، انرژی بالاتر است این امر دلیل اصلی نیاز ما به انرژی‌های بالاتر و تجهیزات بزرگ‌تر برای بررسی رفتار ذرات کوچک‌تر است.