



فیزیک هسته ای ستارگان

جلد ۱

تألیف:

کریستیان الیادیس

ترجمه:

دکتر عباس قاسمی زاد

استاد گروه فیزیک دانشگاه گیلان

دکتر سهیل خم‌بین فر

استادیار گروه فیزیک دانشگاه گیلان

سید سهیل اسماعیل

دانشجوی دکتری فیزیک دانشگاه گیلان

انتشارات دانشگاه گیلان

۱۳۹۸



شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۱۵۳-۱۹۵-۸

سرشناسه	: ایلیادیس، کریستین Iliadis, Christian
عنوان و نام پدیدآور	: فیزیک هسته‌ای ستارگان/ مولف کریستیان ایلیادیس؛ مترجمان عباس قاسمی‌زاد، سهیل خوشبین‌فر، سید سهیل اسماعیلی.
مشخصات نشر	: رشت: دانشگاه گیلان، انتشارات، ۱۳۹۶ -
مشخصات ظاهری	: ج: ۱۴/۵ × ۲۱/۵ س.م.
شابک	: دوره 5-196-600-153-978-600-153-195-8۱ ج: 978-600-153-196-5
وضعیت فهرست نویسی	: فیبا
یادداشت	: عنوان اصلی: Nuclear physics of stars, 2nd. ed, [2015].
یادداشت	: کتابنامه.
موضوع	: فیزیک نجومی هسته‌ای
موضوع	: Nuclear astrophysics
موضوع	: فیزیک نجومی
موضوع	: Astrophysics
موضوع	: ستاره‌ها
موضوع	: Stars
شناسه افزوده	: قاسمی‌زاده، عباس، ۱۳۴۴ -، مترجم
شناسه افزوده	: خوشبین‌فر، سهیل، ۱۳۵۸ -، مترجم
شناسه افزوده	: اسماعیلی، سید سهیل، ۱۳۵۸ -، مترجم
شناسه افزوده	: دانشگاه گیلان، انتشارات
رده بندی کنگره	: QB۴۶۴/۹ الف ۹۶:۱
رده بندی دیویی	: ۵۲۳/۰۱
شماره کتابشناسی ملی	: ۰۲۳۸

اداره چاپ و انتشارات دانشگاه گیلان

نام کتاب	: فیزیک هسته‌ای ستارگان - ۱
مولف	: کریستیان ایلیادیس
مترجمان	: دکتر عباس قاسمی‌زاد، دکتر سهیل خوشبین‌فر، سید سهیل اسماعیلی
ویراستار علمی	: دکتر صابر فرجامی شایسته
ویراستار ادبی	: هوشنگ سپهری
نوبت چاپ	: اول، ۱۳۹۸
ناشر	: انتشارات دانشگاه گیلان
شمارگان	: ۱۰۰۰ جلد
قیمت	: ۵۸۰۰۰۰ ریال

* هر گونه چاپ و تکثیر فقط در اختیار انتشارات دانشگاه گیلان است.*

پیشگفتار ویراست دوم

پیشنهاد ناشر برای ارائه ویراست دوم کتاب "فیزیک هسته‌ای ستارگان" هفت سال بعد از اولین ویراست، بسیار شگفت‌انگیز بود. با این حال، من به سادگی با این مسئله موافقت کردم که دلیل آن نیز بازخورد مطلوب دانشجویان و همکاران من در بسیاری از دانشگاه‌ها و آزمایشگاه‌ها نسبت به ویراست اول بود. این امر، فرصت در نظرگیری موضوع‌های دیگری را در کتاب مورد اشاره فراهم آورد که در ویراست اول وجود نداشت. بخش‌های زیر، به کتاب حاضر افزوده شده‌اند:

سنتز هسته‌ای انفجاری در قلب ابرنواخترهای دچار رُمبش؛

سنتز هسته‌ای انفجاری در ابرنواخترهای گرماهسته‌ای؛

سنتز هسته‌ای القائی نوترینویی؛

سنتز هسته‌ای مه‌بانگ؛

سنتز هسته‌ای پرتوی کیهانی کهکشانی.

چندین بخش دیگر نیز بازبینی شده‌اند که شامل بحث پیرامون ضرایب افزایش ستاره‌ای و استخراج مقادیر سطح مقطع حاصل از اندازه‌گیری، می‌باشد. همه جدول‌ها نیز با آخرین اطلاعات موجود به‌روز رسانی شده‌اند. بسیاری از شکل‌ها اصلاح شده و برخی نیز حذف شدند، در حالی که مواردی نیز افزوده شد. مراجع کتاب با روزگارید و چندین پرسش جدید نیز در انتهای فصل افزوده شد. برخی از محتوای کتاب نیز جهت همخوانی بیشتر با نیاز رایی شدند.

در اینجا میل دارم از افراد زیر، به دلیل پیشنهادهای و نظرات ارزشمندشان تشکر کنم: کمپین هنر، آلساندرو شیفی، آلن کوک، جک درینی، لوی دوفن، مونیب العید، پتر هافلیخ، شون هانت، جوردی خوزه، کیگان کلی، کارل لودویگ کرار، ریچارد لاکلند، ماریا لوگارو، برد میر، پتر مورد، آنوی پاریخ، نیکو پرائتروس، مارکو لیمونگی، ایوو سیتزل، فرانک، تیمس و جان ویلکرسون. این کتاب را به والدین خود تقدیم می‌کنم، به خاطر تمام آنچه که برای من انجام داده‌اند.

کاربرو، اوت ۲۰۱۴

کریستین ایلیدیس

پیشگفتار ویراست اول

فرآیندهای هسته‌ای، انرژی‌ای را تولید می‌کنند که اسباب درخشش ستارگان می‌شود. همین فرآیندهای هسته‌ای ستارگان، عامل سنتز (شکل‌گیری) عناصر هستند. زمانی که ستارگان، بخشی از مواد خود را از طرق گوناگون، به سمت بیرون پرتاب می‌کنند، محیط میان‌ستاره‌ای را با خاکسترهای هسته‌ای خود غنی می‌سازند و از این رو، سنگ‌بنای تولد ستارگان جدید، سیارات و حتی خود زندگی را فراهم می‌کنند. نظریه ایجاد این عناصر، سنتز هسته‌ای نامیده می‌شود که به میزان زیادی در توصیف فرآیندهای هسته‌ای درون ستارگان - که در زمان و فضایی بسیار دور نسبت به ما قرار دارند - موفق است. چگونگی پیش‌بینی چنین فرآیندهای هسته‌ای بر مبنای خواص مکانیک کوانتومی هسته‌های اتمی قابل توجه است. سنتز هسته‌ای، تولید انرژی هسته‌ای در ستارگان و سایر موضوع‌های مشترک بین فیزیک هسته‌ای و اخترفیزیک، علم اخترفیزیک هسته‌ای را به وجود می‌آورد. این رشته نیز همانند سایر زمینه‌های فیزیک، با فعالیت‌های نظری و تجربی سر و کار دارد. هدف این کتاب، توضیح این مفاهیم، با تأکیدی خاص بر فرآیندهای هسته‌ای و ایفای نقش آن‌ها در ستارگان است.

کار در این دسته دستی این کتاب زمانی آغاز شد که از من دعوت شد تا به مدت دو هفته برای دوره‌های تحصیلی در دانشگاه پلی‌تکنیک کاتالونیای بارسلونا در اسپانیا (در ژوئن ۲۰۰۳) درس فیزیک هسته‌ای ستارگان را ارائه کنم. در طول آماده شدن برای این دوره، کاملاً مشخص شد که داشتن کتاب درسی به‌روز در این زمینه، کار آسان نخواهد بود. تشویق و اصرار بسیاری از دانشجویان و همکاران نسبت به من، جهت نگارش این کتاب انگیزه‌ای شد تا کار روی دست‌نویس این کتاب را آغاز کنم. پس از یک دهه تدریس در دانشگاه کاتالونیای شمالی در Chapel Hill، از بسیاری از دانشجویان یاد گرفتم که هیچ حقیقتی وجود ندارد نه بسیار دقیقه منتشر شده باشد. آن‌ها تمایل داشتند زمانی که من از واژه "روش حل، واضح و مشخص است" استفاده می‌کنم، روش به دست آوردن معادلات را ببینند. همچنین زمانی که تلاش می‌کردم تا فقط به صورت خلاصه مطلبی را بیان کنم، آن‌ها میل داشتند تا توصیفی اصولی‌تر و بنیادی‌تر ارائه دهم. سبک این کتاب، تحت تأثیر تجربیات تدریس من قرار دارد. در واقع، بیشتر معادلات، در متن به دست می‌آید و بر کار و عملیات دقیق تأکید شده است. انگیزه و هدف اصلی من، توصیف مفاهیم پیچیده به ساده‌ترین و قابل درک‌ترین راه است. در برخی از موارد، فرمول‌بندی ظریف و بهتری برای مفاهیم ارائه شده است. این موارد، فقط زمانی بیان شده که امکان توصیف ساده مفاهیم وجود نداشت. همکاران دائم می‌خواستند بدانند که من از کدام مقاله مروری برای

تهیه بخشی خاص استفاده کرده‌ام. راهبرد من به گونه‌ای بوده که از مقاله‌های بازنگری، هنگامی استفاده شده است که پیش از نگارش متن، پیش‌نویسی کامل و اولیه از آن بخش نوشته باشم. این روش باعث می‌شد تا من موضوع را خودم از آغاز فرا گرفته باشم و مطلبی منسجم و هماهنگ را ارائه کنم.

کتاب پیش‌رو، برای دانشجویان کارشناسی پیشرفته، دانشجویان کارشناسی ارشد و محققان حوزه فیزیک هسته‌ای و اخترفیزیک ارائه می‌شود. فصل ۱ با مفاهیم پایه فیزیک هسته‌ای و تحول ستارگان آغاز می‌شود. فصل ۲، نظریه واکنش‌های هسته‌ای را توسعه می‌دهد که آغاز آن از ایده‌های پایه مکانیک کوانتومی است. فرآیندهای هسته‌ای پلاسمای ستاره‌ای نیز در فصل ۳ ارائه می‌شود. فصل ۴، حاوی مهم‌ترین اطلاعات تجربی لازم جهت اندازه‌گیری در اخترفیزیک هسته‌ای است. فصل ۵، بحث درباره نظریه سنتز هسته‌ای ستاره‌ای را در بر می‌گیرد. در پیوست‌ها نیز بخش‌هایی درباره پاسخ معادله شرودینگر، قواعد گزینش تکانه زاویه‌ای، سینماتیک (حرکت‌شناسی) و نظریه همبستگی تکانه زاویه‌ای گنجانده شده است. در انتهای کتاب، ثابت‌های فیزیکی، نمادهای ریاضی و کمیت‌های فیزیکی، به صورت راهنما برای خوانندگان آورده شده است. دانشجویان باید به عنوان پیش‌نیاز، دوره فیزیک نوین و آشنایی مقدماتی با توابع راج را گذرانده باشند. گذراندن دوره درسی مکانیک کوانتوم یا فیزیک هسته‌ای نیز کمک بزرگی در درک مطالب این کتاب خواهد بود؛ با این وجود، الزامی نیست.

این کتاب، به شکلی عالی و بی‌عیب وارد مطالب می‌گردد و در نتیجه‌ی محدودیت‌های زمان و فضا، ناگزیر به نادیده گرفتن برخی از موضوعات مهم شدم. ممکن است مدرسی که از این کتاب استفاده می‌کند، میل داشته باشد مواردی را که در اینجا بیان شده است، با اطلاعات مربوط به موارد زیر تکمیل کند: سنتز هسته‌ای آغازین (J. Rich, Fundamentals of Cosmology, Berlin: Springer, 2001)، واکنش‌های تلاشی پرتوی کیهانی (E. Vangioni-Flam, M. Casse and J. Audouze, Phys. Rep., Vol. 333, p. 365, 2000)، عمرسنجی هسته‌ای (J. J. Cowan, F.-K. Thielemann, Rep., Vol. 333, p. 365, 2000)، (and J.W. Truran, Ann. Rev. Astron. Astrophysics., Vol. 29, p. 447, 1991)، اخترفیزیک نوترینو (J. N. Bahcall, Neutrino Astrophysics, Cambridge: Cambridge University Press, 1989)، فرآیند v (Woosley et al., Astrophysical J., Vol. 356, p. 272, 1990)، ذرات پیش از وجود خورشید (M. Lugaro, Stardust from Meteorites, Singapore: World Scientific, 2005) و سنجش غیرمستقیم واکنش‌های هسته‌ای مهم در اخترفیزیک.

مسلماً بدون کمک و تاثیرپذیری از دو تن از همکاران خود، نمی‌توانستم این کتاب را بنویسم. من به جوردی خوزه بسیار مدیون هستم، زیرا وی در سال ۲۰۰۳، مرا به بارسلونا دعوت کرده و سخنرانی‌هایم را برنامه‌ریزی نمود. همچنین میل دارم تشکر خود را نسبت به آرت کمپین (Art Champagne) ابراز دارم، زیرا من را به شکلی حرفه‌ای، در تمامی مراحل تهیه دست‌نویس کتاب پشتیبانی نمود. چندین نفر نیز نسخه دست‌نویس را خوانده، پیشنهادات و نظرات بسیار ارزشمندی را به من ارائه دادند که این کتاب به حق از آن‌ها بهره‌مند شده است. بسیار خرسند خواهم بود که از افراد زیر تشکر کنم: کارمن آنگولو، دیک آزوما، بروس کارنی، جرالده سسیل، کمپین هنر، آلن چن، آلساندرو شیفی، آلن کوک، پیر دیسکومونت، رایان فیتزجرالد، اووه گریف، راف هیکس، جوردی خوزه، فرانتس کاپلر، کارل لودویک کراتز، آلیسون لیرد، جان لاتانزیو، مارکو لیمونگی، ریچارد لانگلند، الکس مورفی، جو نیوتن، آنوی پاربخ، هلموت پل، تامی راوشر، پدی ریگان، هندریک شاتز، سامنر استارفیلد و کلودیو اوگالده. همچنین از دانیل آروس به دلیل تایپ پیش‌نویس، از جان کلی به دلیل حمایت مالی انتشارات کنسول پژوهش‌های دانشگاه کارولینای شمالی در Chapel Hill قدردانی می‌کنم و قدردان حمایت‌های آزمایشگاه هسته‌ای دانشگاه‌های سه‌گانه نیز هستم. این کتاب را به دخترم آلینا، پسرک کیمون و همسرم آندرا تقدیم می‌کنم که اختصاص زمان زیادی از وقتم در چهار سال گذشته برای این کتاب را احساس و البته تحمل کردند.

کریستین ایلیدیس

کاربرو، سپتامبر ۲۰۰۶

پیشگفتار مترجمان

منبع اصلی حیات روی زمین، انرژی آزاد شده از واکنش‌های گداخت هسته‌ای عنصر هیدروژن در قلب ستاره‌ای نسبتاً جوان است. فیزیک هسته‌ای به عنوان یکی از شاخه‌های اصلی فیزیک به مطالعه پدیده‌های هسته‌ای رخ داده درون ساختار هسته‌های اتمی می‌پردازد. گستره کاربرد آن طیف وسیعی از پدیده‌ها، از محدوده ابعاد هسته (10^{-15} متر) تا ابعاد فراکھکشان‌ی، و محدوده زمانی معادل با عمر کیهان را در بر می‌گیرد. در این میان، اخترفیزیک هسته‌ای، شاخه‌ای از دانش فیزیک هسته‌ای است که درباره تحولات هسته‌ای درون ستارگان کاوش می‌کند. هسته‌زایی در محیط‌های ستاره‌ای نقشی تعیین‌کننده در تحول ساختارهای ستاره‌ای و حتی کھکشان‌ی دارد. برای مثال، عناصر شکل‌دهنده سیارات خاکی منظومه خورشیدی، از جمله زمین، شامل عناصر سنگینی هستند که حین انفجارات ابرنواختری تولید شده‌اند و خورشید ما ستاره‌ای از نسل دوم است که در بقایای این انفجار شکل گرفته است. نسبت‌های زایش هسته‌ای و درصد فراوانی هر کدام از عناصر با سرنوشت ستاره در ارتباط مستقیم است. از این رو، مطالعه اخترفیزیک هسته‌ای به عمق دانش بشری درباره تحولات عناصر مختلف در مجموعه‌های ستاره‌ای شتاب بیشتری می‌دهد. از طرفی کاربردهای زمینی این گرایش نیز امروزه توجه جهانی را به خود جلب کرده است. از اواسط قرن بیستم، بشر تلاش فزاینده‌ای برای ایجاد ستاره‌ای کوچک روی زمین آغاز کرده است و امید است در این درخشش انرژی گداخت هسته‌ای در سال‌های آینده روی زمین افروخته شود.

در کشور عزیزمان ایران رشته‌هایی چون فیزیک هسته‌ای و اخترفیزیک رشته‌های جوانی هستند که علاقه‌مندان فراوانی دارند. با این وجود، تعداد انگشت‌شماری از دانش‌پژوهان در حوزه‌های مشترک و ناشناخته آنها در حال تحقیق هستند. همکاران ما با رسه روزافزون این شاخه علمی میان - رشته‌ای، کمبود منابع علمی معتبر، به‌روز و فارسی در جامعه علمی بیش از پیش احساس می‌شود. همین امر، مترجمان کتاب را بر آن داشت تا به ترجمه آن مبادرت ورزند. با این حال، یافتن کتابی درسی برای دانشجویان تحصیلات تکمیلی که در نگارش آن، خوانندگان هر دو زمان را مد نظر قرار دهند، بسیار دشوار بود. کتاب حاضر در عین پیوستگی مطالب و شیوایی نگارش آن، خبیبی به جنبه‌های مختلف موضوع پرداخته است و آن را به عنوان کتابی منحصر به فرد در این حوزه پیشنهاد می‌کند. علاوه بر این، تلاش وافر صورت گرفته است تا مخاطبین اصلی کتاب که پژوهشگرانی علاقه‌مند از حوزه‌های فیزیک هسته‌ای و اخترفیزیک هستند، بتوانند با مطالعه کتاب وارد حیطه علمی و تحقیقاتی آن شوند. به دلیل تعداد صفحات زیاد نسخه اصلی، مترجمان تصمیم گرفتند تا کتاب فیزیک هسته‌ای ستارگان در قالب

دو جلد، ترجمه و به علاقه‌مندان عرضه شود. در ترجمه کتاب اخیر، تلاش شده است تا جسم و روح جملات نگارنده اصلی به صورت کامل و تمام به زبان فارسی برگردانده شود تا خواننده فارسی‌زبان که آشنایی چندانی با ادبیات این زمینه علمی ندارد، به راحتی قادر به فهم موضوع گردد. در پایان، مترجمان بر خود لازم می‌دانند تا از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه گیلان و اداره انتشارات دانشگاه گیلان که با ترجمه و چاپ این کتاب موافقت و مساعدت کردند، کمال سپاسگزاری خود را ابراز نمایند. همچنین، از ویراستاران علمی و ادبی محترم که بر غنای ترجمه اخیر افزودند، خالصانه سپاسگزاریم.

تابستان ۱۳۹۸

www.ketab.ir

فهرست مطالب

فیزیک هسته‌ای ستارگان - جلد ۱.....	۱
شناسنامه کتاب.....	ب
پیشگفتار ویراست دوم.....	ج
پیشگفتار ویراست اول.....	د
پیشگفتار مترجمان.....	ز
جنبه‌های فیزیک هسته‌ای و اخترفیزیک.....	۱
۱-۱- تاریخچه.....	۱
۲-۱- مجموعه اصطلاحات.....	۴
۳-۱- فراهانی‌های منظومه خورشیدی.....	۵
۴-۱- جنبه‌های اخترفیزیکی.....	۱۰
۱-۴-۱- سلاخ‌های کالی.....	۱۰
۲-۴-۱- نمودار برترس رانگ راسل.....	۱۲
۳-۴-۱- تحول ستاره‌ای ستارگان منفرد.....	۱۵
۴-۴-۱- ستارگان دوتایی.....	۳۸
۵-۱- جرم‌ها، انرژی‌های بستگی، واکنش‌های هسته‌ای و موضوعات مرتبط.....	۴۸
۱-۵-۱- جرم هسته‌ای و انرژی بستگی.....	۴۸
۲-۵-۱- انرژی‌شناسی واکنش‌های هسته‌ای.....	۵۰
۳-۵-۱- جرم اتمی و مازاد جرم.....	۵۳
۴-۵-۱- فراوانی عددی، کسر جرمی و کسر مولی.....	۵۷
۵-۵-۱- ثابت واپاشی، عمر متوسط و نیمه‌عمر.....	۵۹

- ۶-۱- مدل پوسته‌ای هسته‌ای ۶۰
- ۱-۶-۱- پوسته‌های پر و اعداد جادویی ۶۲
- ۲-۶-۱- ساختار هسته‌ای و پیکربندی نوکلئونی ۶۶
- ۷-۱- حالات برانگیخته هسته‌ای و گذارهای الکترومغناطیسی ۶۸
- ۱-۷-۱- انرژی، تکانه زاویه‌ای و پاریته ۶۸
- ۲-۷-۱- احتمالات گذار ۶۹
- ۳-۷-۱- نسبت انشعابی و نسبت ترکیبی ۷۳
- ۴-۷-۱- گذارهای پرتوی گاما در پلاسمای ستاره‌ای ۷۵
- ۵-۷-۱- حالات ایزومری و مورد ^{26}Al ۷۶
- ۸-۱- انرژی‌های اندرکنش ضعیف ۸۱
- ۱-۸-۱- فرآیندهای اندرکنش ضعیف ۸۲
- ۲-۸-۱- انرژی‌های ۸۴
- ۳-۸-۱- احتمالات تابش بتا ۸۶
- ۴-۸-۱- واپاشی‌های بتا در پلاسمای ستاره‌ای ۹۳
- مسائل ۹۹
- واکنش‌های هسته‌ای ۱۰۱**
- ۱-۲- سطح مقطع ها ۱۰۱
- ۲-۲- قضیه دو طرفه ۱۰۳
- ۳-۲- پراکندگی کشسان (الاستیک) و روش امواج جزئی ۱۰۶
- ۱-۳-۲- جنبه‌های کلی ۱۰۶
- ۲-۳-۲- ارتباط میان سطح مقطع جزئی و دامنه پراکندگی ۱۰۸

۱۰۸.....	۲-۳-۳- ذره آزاد.....
۱۱۰.....	۲-۳-۴- فعال کردن پتانسیل.....
۱۱۱.....	۲-۳-۵- دامنه پراکندگی و سطح مقطع پراکندگی کشسان.....
۱۱۳.....	۲-۳-۶- سطح مقطع واکنش.....
۱۱۶.....	۲-۴-۴- پراکندگی ناشی از پتانسیل های ساده.....
۱۱۶.....	۲-۴-۱- چاه پتانسیل مربعی.....
۱۲۵.....	۲-۴-۲- سد پتانسیل مربعی.....
۱۳۳.....	۲-۴-۳- عبور از سد کولنی.....
۱۳۶.....	۲-۵-۵- نظریه تشدیدها (رزونانس ها).....
۱۳۶.....	۲-۱-۱- جنبه های کلی.....
۱۳۸.....	۲-۲- مشتق لگاریتمی، جابه جایی فاز و سطح مقطع.....
۱۴۲.....	۲-۵-۳- روابط -یت -ویگنر.....
۱۴۷.....	۲-۵-۴- تعمیم درات اردار و مقادیر اختیاری تکانه زاویه ای مداری.....
۱۵۲.....	۲-۵-۵- نظریه ماتریس.....
۱۵۷.....	۲-۵-۶- آزمون های تجربی، ابط، برای -ویگنر تک ترازی.....
۱۶۲.....	۲-۵-۷- پهنای کاهیده و جزئی.....
۱۷۱.....	۲-۶- نظریه پیوستار.....
۱۷۴.....	۲-۷- نظریه هاوسر -فشباخ.....
۱۷۹.....	مسائل.....
۱۸۱.....	واکنش های گرما هسته ای.....
۱۸۱.....	۳-۱- سطح مقطع ها و آهنگ واکنش ها.....

۱۸۱.....	۳-۱-۱- واکنش های القایی ذره
۱۸۵.....	۳-۱-۲- واکنش های القایی فوتون
۱۸۷.....	۳-۱-۳- تحول فراوانی
۱۹۱.....	۳-۱-۴- واکنش های پیش رونده و پس رونده
۱۹۵.....	۳-۱-۵- آهنگ واکنش ها در دماهای بالاتر
۲۰۳.....	۳-۱-۶- تعادل آهنگ واکنش
۲۱۰.....	۳-۱-۷- تولید انرژی هسته ای
۲۱۱.....	۳-۲- آهنگ واکنش های گرما هسته ای تشدید و غیر تشدید
۲۱۲.....	۳-۲-۱- آهنگ واکنش های غیر تشدید در واکنش های القایی ذره باردار
۲۲۸.....	۳-۲-۲- آهنگ واکنش های غیر تشدید در واکنش های القایی نوترون
۲۳۲.....	۳-۲-۳- آهنگ واکنش های غیر تشدید در واکنش های القایی فوتون
۲۳۵.....	۳-۲-۴- آهنگ واکنش های تشدید باریک
۲۴۶.....	۳-۲-۵- آهنگ واکنش های تشدید پهن
۲۵۲.....	۳-۲-۶- استتار الکتریک
۲۵۸.....	۳-۲-۷- آهنگ های واکنش کا
۲۶۴.....	مسائل
۲۶۷.....	پیوست ها
۲۶۷.....	پیوست - الف پاسخ های معادله شرودینگر در سه
۲۶۹.....	الف-۱ تکانه زاویه ای مداری صفر و پتانسیل ثابت
۲۷۰.....	الف-۲ تکانه زاویه ای مداری اختیاری و پتانسیل صفر
۲۷۰.....	الف-۳ تکانه زاویه ای مداری اختیاری و پتانسیل کولنی

پیوست - ب	قواعد گزینش مکانیک کوانتومی.....	۲۷۳
پیوست - ج	سینماتیک (حرکت شناسی).....	۲۸۱
ج-۱	ارتباط کمیت های سینماتیکی در دستگاه مختصات آزمایشگاهی.....	۲۸۲
ج-۲	تبدیلات دستگاه مختصات آزمایشگاهی و دستگاه مختصات مرکز جرم.....	۲۸۶
پیوست - د	همبستگی های زاویه ای.....	۲۹۱
د-۱	جنبه های کلی.....	۲۹۲
د-۲	تابش های خالص در فرآیند دو مرحله ای.....	۲۹۶
د-۳	تابش های ترکیبی در فرآیند دو- مرحله ای.....	۲۹۹
د-۴	فرآیند سه مرحله ای همراه با تابش واسط مشاهده نشده.....	۳۰۵
د-۵	ملاحظات تجربی.....	۳۰۷
د-۶	نکات مهم پایانی.....	۳۰۹
پیوست - ه	ثابت ها داده ها، واحدها و نمادها.....	۳۱۳
ه-۱	ثابت ها داده های فیزیکی.....	۳۱۳
ه-۲	عبارت های ریاضی.....	۳۱۴
ه-۳	پیشوندها و واحدها.....	۳۱۵
ه-۴	کمیت های فیزیکی.....	۳۱۷
	تصاویر رنگی.....	۳۲۵
	واژه نامه.....	۳۳۹
	منابع.....	۳۵۷