



دانشگاه شاهرود

فیزیک هسته‌ای ۲

(رشته فیزیک)

دکتر سعید محمدی

امروزه کتاب‌خوانی و علم‌آموزی، نه تنها یک وظیفه‌ی ملی، که یک واجب دینی است.

مقام معظم رهبری

در عصر حاضر یکی از شاخصه‌های ارزیابی رشد، توسعه و پیشرفت فرهنگی هر کشوری میزان تولید کتاب، مطالعه و کتاب‌خوانی مردم آن مرز و بوم است. ایران اسلامی نیز از دیرباز تاکنون با داشتن تمدنی چندهزارساله و مراکز متعدد علمی، فرهنگی، کتابخانه‌های معتبر، علما و دانشمندان بزرگ با آثار ارزشمند تاریخی، سرآمد دولت‌ها و ملت‌های دیگر بوده و در عرصه‌ی فرهنگ و تمدن جهانی به‌سان خورشیدی تابناک همچنان می‌درخشد و با فرزندان نیک‌نهاد خویش هنرنمایی می‌کند. چه کسی است که در دنیا با دانشمندان فرزانه و نام‌آور ایرانی همچون ابوعلی سینا، ابوریحان بیرونی، فارابی، خوارزمی و ... همچنین شاعران برجسته‌ای نظیر فردوسی، سعدی، مولوی، حافظ و ... آشنا نباشد و در مقابل عظمت آنها سر تعظیم فرود نیاورد. تمامی این افتخارات ارزشمند، برگرفته از میزان عشق و علاقه فراوان ملت ما به فراگیری علم و دانش از طریق خواندن و مطالعه منابع و کتاب‌های گوناگون است. به شکرانه‌ی الهی، تاریخ و گذشته ما، همیشه درخشان و پربار است. ولی اکنون در این زمینه در چه جایگاهی قرار داریم؟ آمار و ارقام ارائه‌شده از سوی مجامع و سازمان‌های فرهنگی در مورد سرانه‌ی مطالعه‌ی هر ایرانی، برایمان چندان امیدوارکننده نمی‌باشد و رهبر معظم انقلاب اسلامی نیز از این وضعیت بارها اظهار گله و ناخشنودی نموده‌اند.

کتاب، دروازه‌ای به سوی گستره‌ی دانش و معرفت است و کتاب خوب، یکی از بهترین ابزارهای کمال بشری است. همه‌ی دستاوردهای بشر در سراسر عمر جهان تا آنجا که قابل کتابت بوده است، در میان دست‌نوشته‌هایی است که انسان‌ها پدید آورده و می‌آورند. در این مجموعه‌ی بی‌نظیر، تعالیم الهی، درس‌های پیامبران به بشر، و همچنین علوم مختلفی است که سعادت بشر بدون آگاهی از آنها امکان‌پذیر نیست. کسی که با دنیای زیبا و زندگی‌بخش کتاب ارتباط ندارد بی‌شک از مهم‌ترین دستاوردهای انسانی و نیز از بیشترین معارف الهی و بشری محروم است. با این دیدگاه، به‌روشنی می‌توان ارزش و مفهوم رمزی عمیق در این حقیقت تاریخی را دریافت که اولین خطاب خداوند متعال به پیامبر گرامی اسلام (ص) این است که «بخوان!» و در اولین

سوره‌ای که بر آن فرستاده‌ی عظیم‌الشأن خداوند، فرود آمده، نام «قلم» به تجلیل یاد شده‌است: «اقْرَأْ وَ رَبُّكَ الْأَكْرَمُ. الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ» در اهمیت عنصر کتاب برای تکامل جامعه‌ی انسانی، همین بس که تمامی ادیان آسمانی و رجال بزرگ تاریخ بشری، از طریق کتاب جاودانه مانده‌اند.

دانشگاه پیام‌نور با گستره‌ی جغرافیایی ایران‌شمول خود با هدف آموزش برای همه، همه‌جا و همه‌وقت، به‌عنوان دانشگاهی کتاب‌محور در نظام آموزش عالی کشورمان، افتخار دارد جایگاه اندیشه‌سازی و خردورزی بخش عظیمی از جوانان جویای علم این مرز و بوم باشد. تلاش فراوانی در ایام طولانی فعالیت این دانشگاه انجام پذیرفته تا با بهره‌گیری از تجربه‌های گرانقدر استادان و صاحب‌نظران برجسته کشورمان، کتاب‌ها و منابع آموزشی درسی شاخص و خودآموز تولید شود. در آینده هم، این مهم با هدف ارتقای سطح علمی، روزآمدی و توجه بیشتر به نیازهای مخاطبان دانشگاه پیام‌نور با جدیت ادامه خواهد داشت. به‌طور قطع استفاده از نظرات استادان، صاحب‌نظران و دانشجویان محترم، ما را در انجام این وظیفه‌ی مهم و خطیر یاری‌رسان خواهد بود. پیشاپیش از تمامی عزیزانی که با نقد، تصحیح و پیشنهادهای خود ما را در انجام این وظیفه‌ی خطیر یاری می‌رسانند، سپاسگزاری می‌نماییم. لازم است از تمامی اندیشمندانی که تاکنون دانشگاه پیام‌نور را منزلگاه اندیشه‌سازی خود دانسته و ما را در تولید کتاب و محتوای آموزشی درسی یاری نموده‌اند، صمیمانه قدردانی گردد. موفقیت و بهروزی تمامی دانشجویان و دانش‌پژوهان عزیز آرزوی همیشگی ما است.

دانشگاه پیام‌نور

فهرست

پیشگفتار	نه
فصل اول: واکنش‌های هسته‌ای	۱
هدف کلی	۱
هدف‌های یادگیری	۱
۱-۱ مقدمه	۱
۲-۱ ویژگی‌های واکنش‌های هسته‌ای	۲
۳-۱ قوانین پایستگی و انرژی واکنش‌های هسته‌ای	۴
۴-۱ واکنش‌های مستقیم و هسته مرکب	۵
۵-۱ واکنش (α, p)	۶
۶-۱ واکنش‌های (α, n) و (α, γ)	۷
۷-۱ واکنش‌های (α, n) ، (p, d) و (p, γ)	۸
۸-۱ واکنش‌های (d, p) ، (d, n) و (d, α)	۹
۹-۱ واکنش‌های (γ, x)	۱۰
۱۰-۱ واکنش‌های (n, x)	۱۱
۱۱-۱ سینماتیک واکنش‌های هسته‌ای	۱۳
۱۲-۱ واکنش‌های هسته‌ای در خورشید	۲۱
سؤالات چندگزینه‌ای	۲۷
پرسش‌های تشریحی	۳۰
فصل دوم: انواع واکنش‌های هسته‌ای	۳۳
هدف کلی	۳۳
هدف‌های یادگیری	۳۳
۱-۲ مقدمه	۳۳
۲-۲ پراکندگی کوئنی	۳۴
۳-۲ پراکندگی هسته‌ای	۴۳
۴-۲ مدل اپتیکی	۴۸
۵-۲ واکنش‌های هسته‌ای مرکب	۵۲

۵۶	۶-۲ واکنش های مستقیم
۵۸	۷-۲ واکنش های یونی سنگین
۶۰	۸-۲ عناصر فرا اورانیوم - نپتونیم و پلوتونیوم
۶۲	۹-۲ عناصر فوق سنگین (SHE)
۶۸	سؤالات چندگزینه ای
۷۰	پرسش های تشریحی

فصل سوم: شکافت هسته ای

۷۳	هدف کلی
۷۳	هدف های یادگیری
۷۳	۱-۳ مقدمه
۷۴	۲-۳ انرژی بستگی هسته ای و شرط شکافت
۸۱	۳-۳ شکافت خودبه خود و شکافت القا
۸۲	۴-۳ ویژگی های شکافت
۹۰	۵-۳ انرژی شکافت
۹۱	۶-۳ شکافت و ساختار هسته ای
۹۴	۷-۳ واکنش های زنجیره ای
۹۶	۸-۳ رآکتورهای شکافت هسته ای
۱۰۰	۹-۳ انواع رآکتورهای هسته ای
۱۰۶	۱۰-۳ سموم راکتور
۱۰۷	۱۱-۳ کیک زرد و نمک سبز
۱۰۸	۱۲-۳ چرخه سوخت هسته ای
۱۱۱	۱۳-۳ حوادث راکتورهای هسته ای
۱۱۶	سؤالات چندگزینه ای
۱۲۰	پرسش های تشریحی

فصل چهارم: همجوشی هسته ای

۱۲۱	هدف کلی
۱۲۱	هدف های یادگیری
۱۲۱	۱-۴ مقدمه
۱۲۲	۲-۴ تولید انرژی از طریق همجوشی
۱۲۴	۳-۴ مزیت های همجوشی هسته ای نسبت به شکافت هسته ای
۱۲۶	۴-۴ ویژگی های واکنش همجوشی
۱۳۱	۵-۴ معیار لاوسون برای همجوشی هسته ای
۱۳۴	۶-۴ رآکتورهای همجوشی هسته ای
۱۴۱	سؤالات چندگزینه ای
۱۴۴	پرسش های تشریحی

۱۴۷	فصل پنجم: مدل لایه‌ای در هسته
۱۴۷	هدف کلی
۱۴۷	هدف‌های یادگیری
۱۴۷	۱-۵ مقدمه
۱۴۸	۲-۵ مدل لایه‌ای (پوسته‌ای)
۱۵۵	۳-۵ پتانسیل مدل پوسته‌ای هسته
۱۵۶	۴-۵ پتانسیل اسپین - مدار
۱۵۹	۵-۵ کاربردهای مدل پوسته‌ای در هسته‌ها
۱۶۸	سؤالات چندگزینه‌ای
۱۷۰	پرسش‌های تشریحی
۱۷۳	فصل ششم: اسپین و گشتاورهای الکترومغناطیسی هسته
۱۷۳	هدف کلی
۱۷۳	هدف‌های یادگیری
۱۷۳	۱-۶ مقدمه
۱۷۴	۲-۶ اسپین هسته
۱۷۶	۳-۶ گشتاورهای الکترومغناطیسی هسته
۱۷۸	۴-۶ گشتاور دوقطبی مغناطیسی
۱۸۲	۵-۶ گشتاور دوقطبی مغناطیسی و مدل پوسته‌ای
۱۸۷	۶-۶ گشتاور چهارقطبی الکتریکی
۱۹۱	۷-۶ گشتاور چهارقطبی الکتریکی و مدل پوسته‌ای
۱۹۵	سؤالات چندگزینه‌ای
۱۹۷	پرسش‌های تشریحی
۱۹۹	فصل هفتم: دوترون و نیروی بین نوکلئون‌ها
۱۹۹	هدف کلی
۱۹۹	هدف‌های یادگیری
۱۹۹	۱-۷ مقدمه
۲۰۰	۲-۷ انرژی بستگی دوترون
۲۰۱	۳-۷ توابع موج و شعاع دوترون
۲۰۷	۴-۷ اسپین و پارته دوترون
۲۰۸	۵-۷ گشتاور دوقطبی مغناطیسی دوترون
۲۰۹	۶-۷ گشتاور چهارقطبی الکتریکی دوترون
۲۱۱	۷-۷ خواص نیروی هسته‌ای
۲۱۸	۸-۷ مدل نیروی تبادل
۲۲۲	سؤالات چندگزینه‌ای
۲۲۴	پرسش‌های تشریحی

۲۲۷	فصل هشتم: کاربردهای فیزیک هسته‌ای
۲۲۷	هدف کلی
۲۲۷	هدف‌های یادگیری
۲۲۷	۸-۱ مقدمه
۲۲۸	۸-۲ تحلیل با فعال‌سازی نوترونی
۲۲۹	۸-۳ گسیل پرتو ایکس با القای پروتون (پیکسی)
۲۳۱	۸-۴ توموگرافی محوری کامپیوتری (CT اسکن)
۲۳۲	۸-۵ توموگرافی گسیل پوزیترون یا PET
۲۳۵	۸-۶ تشدید مغناطیسی هسته، NMR
۲۳۷	۸-۷ تصویر سازی تشدید مغناطیسی، MRI
۲۳۹	۸-۸ توموگرافی کامپیوتری گسیل تک فوتونی اسپکت، SPECT
۲۴۰	۸-۹ روش درمانی کاشت براکی ترایی
۲۴۳	۸-۱۰ روش درمانی گیراندازی نوترون توسط بورون، BNCT
۲۴۴	۸-۱۱ ماموگرافی گسیل پوزیترون، PEM
۲۴۵	۸-۱۲ عمر سنجی رادیوآکتیو و AMS
۲۴۸	۸-۱۳ کاربردهای واپاشی آلفا
۲۵۰	۸-۱۴ سایر کاربردهای ایزوتوپ‌ها
۲۵۳	سؤالات چند گزینه‌ای
۲۵۵	پیوست الف (جدول ثابت فیزیکی)
۲۵۷	پیوست ب (جدول رادیو ایزوتوپ‌ها)
۳۳۷	منابع

پیشگفتار

درس فیزیک هسته‌ای ۲ به میزان ۳ واحد درسی برای دانشجویان دوره کارشناسی فیزیک تدوین شده است. همان‌طور که در فهرست دیده می‌شود این کتاب در ۸ فصل و چند پیوست تنظیم شده است. در انتهای هر فصل تعدادی سؤالات چندگزینه‌ای و مسئله برای درک بهتر مطالب آورده شده است. در این کتاب خودآموز سعی شده است تا تمام مفاهیم توضیح داده شوند. علاوه بر مثال‌ها و خودآزمایی‌های حل شده در کتاب، پاسخ کلیه مسائل و سؤالات چندگزینه‌ای در انتهای کتاب آورده شده‌اند.

بدین وسیله از گروه تدوین دانشگاه پیام نور برای تصویب این کتاب به عنوان یک منبع درسی و از استاد محترم سید احمد بابا نژاد به خاطر ویرایش دقیق و علمی متن و از سرکار خانم پروا مرادی صالح به خاطر تایپ و آماده سازی متن تشکر و قدردانی می‌نمایم.

دکتر سعید محمدی

استاد فیزیک هسته‌ای

خرداد ۱۳۹۴

فصل اول

واکنش‌های هسته‌ای

هدف کلی

کلیات واکنش‌های هسته‌ای با توجه به قوانین پایستگی تکانه و انرژی بحث می‌شود. همین‌طور سینماتیک واکنش‌های هسته‌ای و نحوه آزادسازی انرژی در خورشید مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

هدف‌های یادگیری

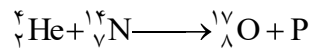
دانشجو پس از مطالعه‌ی این فصل باید:

۱. ویژگی واکنش‌های هسته‌ای را بیان کند.
۲. قوانین پایستگی تکانه و انرژی را برای واکنش‌های هسته‌ای بنویسد.
۳. انواع واکنش‌های سبک را بیان کند.
۴. سینماتیک واکنش‌های هسته‌ای را بیان کند.
۵. واکنش‌های هسته‌ای در خورشید را توضیح دهد.

۱-۱ مقدمه

نخستین تحقیقات در علم هسته‌ای حول موادی تمرکز داشت که به‌طور طبیعی پرتوزا بودند. از نمونه‌های پرتوزا به‌عنوان چشمه ذرات آلفا نیز استفاده می‌شد که این ذرات، در جای خود در بمباران هسته‌های دیگر مورد استفاده قرار می‌گرفتند. چنین آزمایش‌هایی که توسط رادرفورد و همکارانش انجام گرفتند، ایده دقیقی از کوچکی

هسته به دست دادند که به نظریه هسته اتمی منجر شد. رادرفورد در سال ۱۹۱۹ با پرتابه‌هایی از ذرات آلفا موفق شد که نخستین واکنش هسته‌ای را طبق رابطه زیر مشاهده کند:



به منظور انرژی دادن بیشتر به پرتابه‌ها برای غلبه بر سد پتانسیل یا دافعه کولنی هسته‌های هدف، طراحی و ساخت شتاب‌دهنده‌های ذرات آغاز شد که خود مبحث دیگری است.

در این فصل خصوصیات کلی واکنش‌های هسته‌ای را مورد بحث قرار می‌دهیم.

۲-۱ ویژگی‌های واکنش‌های هسته‌ای

یک واکنش هسته‌ای معمولاً به شکل $a + x = y + b$ یا به شکل خلاصه شده $X(a, b)Y$ نوشته می‌شود که در آن a پرتابه، X هدف (معمولاً ساکن در آزمایشگاه) و Y و b محصولات واکنش هستند. از لحاظ جرمی پرتابه‌ها به ۳ دسته تقسیم می‌شوند:

۱. پرتابه‌های سبک، $A \leq 4$ ، مانند پروتون، نوترون و ذرات آلفا.
۲. پرتابه‌های متوسط، $4 < A \leq 40$ ، مانند اکسیژن، ازت، نئون.
۳. پرتابه‌های سنگین، $40 < A$ ، مانند سلنیوم، اورانیوم.

از لحاظ انرژی نیز پرتابه‌ها به ۳ دسته تقسیم می‌شوند:

۱. پرتابه‌های انرژی پایین، $E \leq 10 \text{ MeV}$ به‌ازای هر نوکلئون که منجر به واکنش هسته‌ای بدون تغییر در ساختار پروتون و نوترون می‌گردد.
۲. پرتابه‌های انرژی میانی، $100 \text{ MeV} < E \leq 1 \text{ GeV}$ که منجر به تولید مزونی می‌شود و پروتون‌ها و نوترون‌ها به یکدیگر تبدیل می‌شوند.
۳. پرتابه‌های انرژی بالا، $1 \text{ GeV} < E$ که کوارک‌ها و انواع ذراتی مانند باریون‌ها و مزون‌ها را می‌توانیم تولید کنیم.

عموماً (a, b) را نوکلئون‌ها، هسته‌های سبک و یا حتی فوتون‌ها تشکیل می‌دهند.

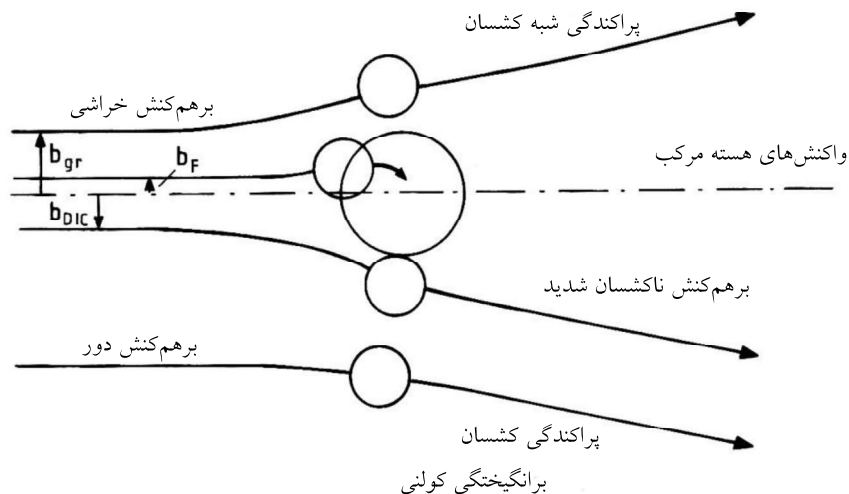
واکنش‌های هسته‌ای ۳

روش دیگر تقسیم‌بندی واکنش‌ها برحسب نوع ذرات a و b است که عبارت هستند از:
الف) واکنش (a, γ) ، گیراندازی فوتونی و (γ, b) فروپاشی فوتونی نام دارد.
ب) واکنش (a, a) ، پراکندگی کشسان نام دارد (در این حالت X و Y نیز یکسان هستند)، مانند پراکندگی رادرفورد.

پ) واکنش (a, a') ، پراکندگی ناکشسان نام دارد (Y در حالت برانگیخته است).
ت) واکنش (d, n) یا (d, p) ، واکنش برکنی دوترون است.
ث) واکنش (α, n) یا (α, p) ، واکنش گیراندازی آلفا نام دارد.
ج) واکنش (p, d) یا (n, d) ، واکنش قاپ زنی نام دارد.
واکنش‌های (ت) و (ج) واکنش‌های انتقالی نیز نام دارند.
واکنش‌ها را می‌توان براساس سازوکاری که حاکم بر فرایند است نیز رده‌بندی کرد که ۲ دسته معروف آن‌ها عبارت هستند از:

۱. واکنش‌های مستقیم که فقط تعداد خیلی کمی از نوکلئون‌ها در واکنش شرکت دارند. واکنش‌های انتقالی از این نوع هستند.
 ۲. واکنش‌های هسته مرکب که در آن پرتابه و هدف موقتاً در هم ادغام می‌شوند و تقسیم کامل انرژی فرودی بین تمام نوکلئون‌ها انجام می‌شود.
- شکل (۱-۱) طبقه‌بندی کلی واکنش‌ها را براساس پارامتر برخورد b (فاصله مسیر پرتابه از خطی که از مرکز هسته هدف می‌گذرد) نشان می‌دهد. در فصل بعدی انواع واکنش‌های هسته‌ای به‌طور مفصل بحث می‌شوند.
- برای انجام طیف‌نمایی دقیق ذره خروجی b و هسته باقیمانده Y ، تهیه باریکه (یا پرتابه) باید براساس ضوابط زیر باشد:

- الف) باریکه باید به شدت کانونی و موازی شده باشد.
- ب) باریکه باید انرژی کاملاً معینی داشته باشد.
- پ) باریکه باید شدت زیادی داشته باشد.
- ت) شدت باریکه باید به آسانی قابل اندازه‌گیری باشد.
- ث) باریکه ممکن است طبق نیاز به‌صورت قطبیده باشد.
- ج) انتقال باریکه به هدف باید از طریق کانال‌های خلأ باشد.



شکل ۱-۱. طبقه‌بندی واکنش‌ها براساس پارامتر برخورد b

۳-۱ قوانین پایستگی و انرژی واکنش‌های هسته‌ای

تمام قوانین پایستگی به واکنش‌های هسته‌ای نیز قابل اعمال هستند. این‌ها عبارت هستند از:

- الف) پایستگی انرژی کل (E)
- ب) پایستگی تکانه خطی (P)
- پ) پایستگی بار کل (Z)
- ت) پایستگی عدد جرمی (A)
- ث) پایستگی اسپین (I)

برطبق پایستگی انرژی نسبی کل، در واکنش $X(a,b)Y$ خواهیم داشت:

$$m_X c^2 + T_X + m_a c^2 + T_a = m_Y c^2 + T_Y + m_b c^2 + T_b \quad (۱-۱)$$

واکنش‌های هسته‌ای ۵

که در آن T انرژی جنبشی (در انرژی پایین می‌توان رابطه غیرنسبیتی $\frac{1}{2}mv^2$ را به کار برد) و m جرم سکون هستند. مقدار Q واکنش، به صورت انرژی جرم اولیه منهای انرژی-جرم نهایی تعریف می‌شود:

$$Q = (m_i - m_f) c^2 = (m_x + m_a - m_y - m_b) c^2 \quad (2-1)$$

که برابر با انرژی جنبشی اضافی محصولات نهایی است:

$$Q = T_f - T_i = T_y + T_b - T_x - T_a \quad (3-1)$$

مقدار Q ممکن است مثبت، منفی یا صفر باشد. اگر $Q > 0$ باشد، واکنش را گرمازا یا انرژی‌زا می‌نامند. برای $Q < 0$ ، واکنش گرماگیر یا انرژی‌گیر نام دارد. تغییر جرم و انرژی باید طبق رابطه معروف نسبیت خاص یعنی $\Delta E = \Delta mc^2$ با یکدیگر مرتبط باشند.

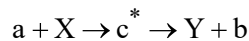
۴-۱ واکنش‌های مستقیم و هسته مرکب

در یک واکنش مستقیم، ذره تابشی عمدتاً در سطح هسته هدف برهم‌کنش انجام می‌دهد. چنین واکنش‌هایی را **فرایندهای پیرامونی** نیز می‌نامند. البته ممکن است در یک واکنش مشخص، هر دو فرایند هسته مرکب و مستقیم سهم داشته باشند. چگونه می‌توان سهم هر یک را تشخیص داد و یا فهمید که کدام یک از آن‌ها اهمیت بیشتری دارد؟ دو اختلاف اساسی وجود دارد که به طور تجربی می‌تواند قابل مشاهده باشد:

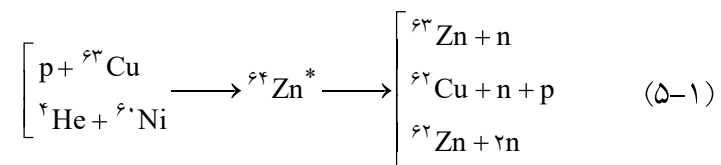
۱. فرایندهای مستقیم خیلی سریع و از مرتبه زمانی 10^{-22} ثانیه روی می‌دهند، درحالی‌که فرایندهای هسته مرکب در زمان‌های طولانی‌تر، شاید از مرتبه 10^{-16} تا 10^{-18} ثانیه صورت گیرند.

۲. توزیع‌های زاویه‌ای ذرات خروجی در واکنش‌های مستقیم تمایل دارند که نسبت به واکنش‌های هسته مرکب قله تیزتری در زوایای جلو داشته باشند، درحالی‌که در واکنش هسته مرکب، توزیع زاویه‌ای ذرات تقریباً همسانگرد است. واکنش انجام

گرفته از طریق هسته مرکب، یک فرایند دو مرحله‌ای، شامل تشکیل هسته مرکب و واپاشی آن است. به‌طور نمادین، یک واکنش هسته مرکب به‌صورت زیر نوشته می‌شود:



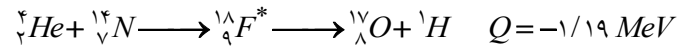
که c^* معرف هسته مرکب است. هر هسته مرکب ممکن است به طرق مختلفی واپاشیده شود و فرض اساسی مدل هسته مرکب برای واکنش‌های هسته‌ای این است که احتمال نسبی واپاشی به هر مجموعه خاصی از محصولات نهایی مستقل از طرز تشکیل هسته مرکب است. احتمال واپاشی فقط به انرژی کل داده شده به دستگاه بستگی دارد. در حقیقت، هسته مرکب فرایند تشکیل خود را فراموش می‌کند و واپاشی آن براساس قواعد آماری حاکم انجام می‌شود. به‌عنوان مثال، هسته مرکب $^{64}\text{Zn}^*$ می‌تواند از طریق چند واکنش مختلف تشکیل و به طرق مختلفی واپاشیده شود. یعنی داریم:



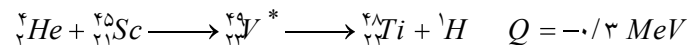
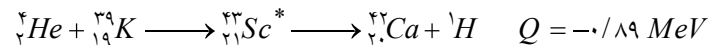
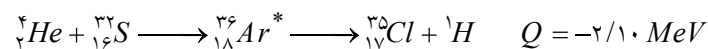
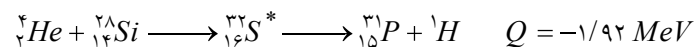
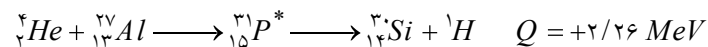
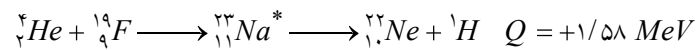
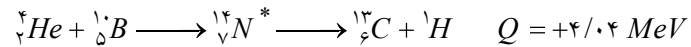
در فصل بعدی، مطالب بیشتری در مورد واکنش‌های هسته مرکب و مستقیم گفته می‌شود. در قسمت‌های بعدی این فصل، مثال‌های بیشتری از تقسیم‌بندی واکنش‌ها برحسب نوع ذرات a و b آورده می‌شود.

۵-۱ واکنش (α, p)

واپاشی هسته نیتروژن توسط ذرات آلفا، از نظر تاریخی نخستین واکنش از سری واکنش‌های هسته‌ای است که در آن‌ها ذره آلفا توسط یک هسته‌گیر می‌افتد و هسته مرکبی را به‌وجود می‌آورد که بی‌درنگ با خارج‌شدن یک پروتون از آن به هسته جدیدی تبدیل می‌شود:

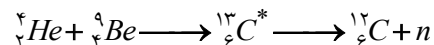


سایر واکنش‌های (α, p) عبارت هستند از:

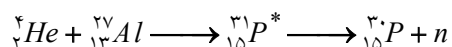
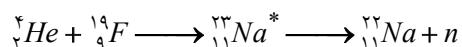
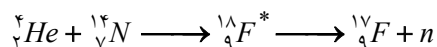
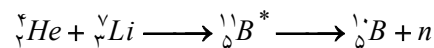


۶-۱ واکنش‌های (α, n) و (α, γ)

گیراندازی ذره آلفا توسط هسته مرکب همیشه باعث گسیل پروتون از هسته مرکب نمی‌شود. بمباران بریلیوم توسط ذرات آلفا همراه با گسیل بعدی نوترون‌ها یکی از واکنش‌های هسته‌ای رایج است که با واکنش (α, n) نشان داده می‌شود:

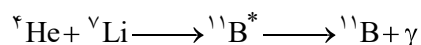


سایر واکنش‌های (α, n) عبارت هستند از:



نوترون‌ها به علت فقدان بار باید بتوانند به آسانی به درون هسته اتم‌ها نفوذ کنند و بررسی این واکنش‌های هسته‌ای باید اطلاعات ارزنده‌ای از ویژگی‌های هسته‌ای و ساختار هسته‌ای به دست دهد.

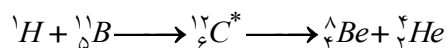
در هر واکنش (α, n) و (α, n) از هسته‌ی مرکب یک ذره هسته‌ای گسیل می‌شود. اما هسته‌ی مرکبی که از گیراندازی یک ذره آلفا درست می‌شود می‌تواند بدون گسیل یک ذره و بجای آن با گسیل یک فوتون پرتو گاما به آرایش پایدارتری برود. فرایند گیراندازی تابش‌زا را می‌توان یک فرایند (α, γ) نامید. به عنوان مثال:



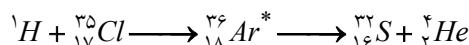
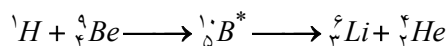
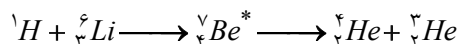
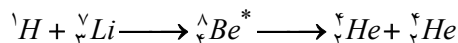
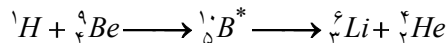
فرایند گیراندازی تابش‌زا یکی از شواهدی است که بر وجود هسته‌ی مرکب دلالت می‌کند.

۷-۱ واکنش‌های (α, n) ، (p, d) و (p, γ)

در واکنش (p, α) یکی از محصولات نهایی ذره آلفا است. یکی از واکنش‌هایی که به طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است، واکنش زیر است:

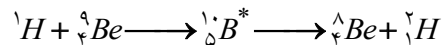


معلوم شده است که در اکثر موارد هسته بریلیوم حاصل در حالت برانگیخته قرار می‌گیرد و سپس با گسیل دو ذره آلفا فرو خواهد پاشید. سایر واکنش‌های (p, α) عبارت هستند از:



واکنش‌های هسته‌ای ۹

تمام واکنش‌هایی که ذره بمباران کننده در آن‌ها پروتون است لزوماً از نوع (p, α) نمی‌باشند. در مورد برلیوم دو واکنش مختلف مشاهده شده است. یکی واکنشی است که در آن یک ذره آلفا گسیل می‌شود و دیگری واکنشی که در آن یک دوترون گسیل می‌شود. واکنش اخیر را واکنش (p, d) می‌نامند:



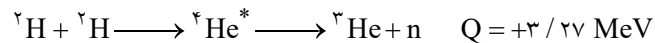
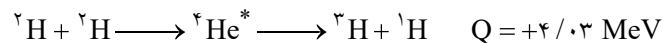
از بمباران یک عنصر با پروتون‌ها، پرتوهای گاما نیز مشاهده شده‌اند:



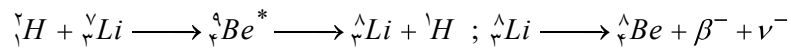
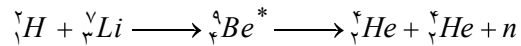
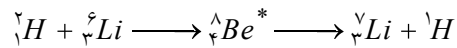
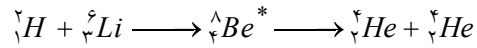
فرایند فوق را واکنش (p, γ) می‌نامند.

۸-۱ واکنش‌های (d, α) و (d, n) ، (d, p)

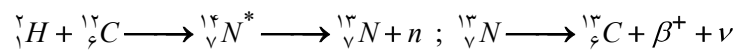
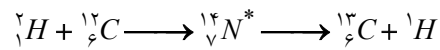
واکنش‌های هسته‌ای بسیار زیادی در نتیجه بمباران با دوترون‌ها مشاهده شده‌اند. واکنش‌هایی را که ذره بمباران کننده دوترون باشد می‌توان برطبق نوع ذره یا ذرات گسیل یافته از هسته مرکبی که در نتیجه گیراندازی دوترون به وجود می‌آید، تقسیم‌بندی کرد. در این فرایندها، ذرات آلفا، تریتون‌ها، پروتون‌ها و نوترون‌ها قابل تولید هستند. در نتیجه بمباران دوتریوم با دوترون‌ها دو واکنش هسته‌ای مختلف مشاهده شده است:



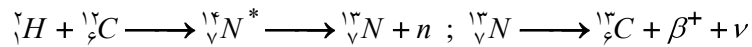
برخی از واکنش‌های هسته‌ای حاصل از گیراندازی دوترون توسط لیتیم به صورت زیر مشاهده شده‌اند:



در مورد کربن بمباران شده با دوترون‌ها دو واکنش مشاهده شده است:

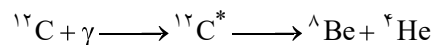
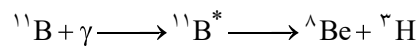
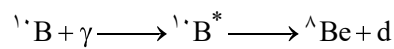
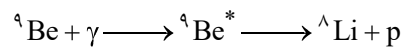
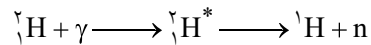


در مورد بمباران سدیم نیز دو واکنش زیر مشاهده شده است:



۹-۱ واکنش‌های (γ, X)

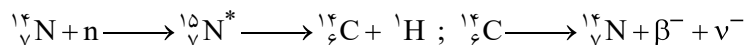
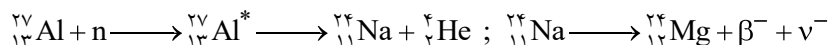
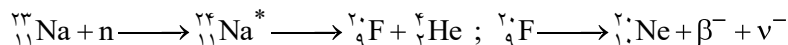
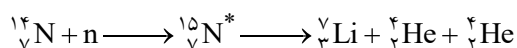
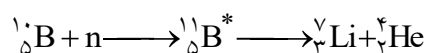
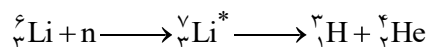
این نوع واکنش‌ها به فرایندهای فروپاشی فوتونی معروفند و در آن‌ها X می‌تواند یکی از ذرات نوترون، پروتون، دوترون، تریتم یا آلفا باشد. این واکنش‌ها به ترتیب عبارت هستند از:



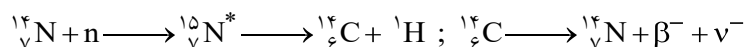
واکنش‌های فوق را می‌توان به‌عنوان عکس فرایندهای گیراندازی گاما که قبلاً بحث شد، تلقی کرد.

۱-۱۰ واکنش‌های (n, x)

ثابت شده‌است که نوترون‌ها به این علت که دارای بار الکتریکی نیستند، در نفوذ به هسته‌ها بسیار مؤثرند و بدین ترتیب باعث ایجاد واکنش‌های هسته‌ای می‌شوند. در اینجا نیز X می‌تواند یکی از ذرات آلفا، پروتون، تریتم، نوترون و یا حتی گاما باشد. تعدادی از این واکنش‌ها عبارت هستند از:



آخرین واکنش را منشاء تولید ایزوتوپ‌های ${}^{14}_6\text{C}$ (سال $T_{1/2} = 5730$) در طبیعت می‌دانند که کاربرد مهمی در عمرسنجی مواد آلی دارد. شکی نیست که این واکنش در جو صورت می‌گیرد. تریتم نیز در جو دیده شده‌است و به احتمال زیاد از طریق واکنش (n, t) به‌وجود آمده‌است:



از واکنش‌های (n, p) می‌توان از واکنش‌های زیر نام برد:

