



آشکار سازها و سیستم‌های اندازه‌گیری هسته‌ای

(رشته فیزیک)

دکتر مرجانه جعفری فشارکی علی اصغر مولوی چوبینی

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 دستاورد 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 عظیم‌الشان خداوند، فرود آمده، نام «قلم» به تجلیل یاد شده‌است: «إِقْرَأْ 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	یازده
فصل اول: مروری بر فیزیک هسته‌ای	۱
هدف کلی	۱
هدف‌های یادگیری	۱
مقدمه	۱
۱-۱ هسته	۲
۱-۱-۱ شعاع هسته	۳
۲-۱-۱ جرم هسته	۴
۳-۱-۱ انرژی بستگی هسته	۵
۴-۱-۱ فرمول نیمه تجربی جرم	۸
۵-۱-۱ ترازهای انرژی هسته‌ای	۱۰
۲-۱ قانون واپاشی پرتوزا	۱۲
۱-۲-۱ تولید و واپاشی عناصر رادیواکتیو	۱۵
۲-۲-۱ رشد اکتیویته‌ی دختر- هسته	۱۵
۳-۲-۱ عمرسنجی رادیواکتیو	۱۶
۳-۱ واپاشی آلفا	۱۷
۱-۳-۱ قاعده‌ی گایگر- ناتال	۱۷
۲-۳-۱ تکانه‌ی زاویه‌ای و پارите در واپاشی آلفا	۱۸
۴-۱ واپاشی بتا	۲۰
۱-۴-۱ تکانه‌ی زاویه‌ای و پارите در واپاشی بتا	۲۱
۵-۱ واپاشی گاما	۲۳
۱-۵-۱ تبدیل داخلی	۲۴
۶-۱ واکنش‌های هسته‌ای	۲۵
۷-۱ سینماتیک واکنش‌های هسته‌ای	۲۶

۲۸	پرسش‌های تشریحی
۲۹	سؤالات چهار گزینه‌ای

۳۳	فصل دوم: منابع تابش
۳۳	هدف کلی
۳۳	هدف‌های یادگیری
۳۴	مقدمه
۳۵	۱-۲ یکاها و تعاریف
۳۵	۱-۱-۲ فعالیت
۳۷	۲-۱-۲ انرژی
۳۸	۲-۲ چشمه‌های الکترون سریع
۳۸	۱-۲-۲ واپاشی بتا
۴۰	۲-۲-۲ تبدیل داخلی
۴۲	۳-۲-۲ الکترون‌های اوزره
۴۳	۳-۲ چشمه‌های ذرات باردار سنگین
۴۳	۱-۳-۲ واپاشی آلفا
۴۵	۲-۳-۲ شکافت خودبه‌خودی
۴۸	۴-۲ چشمه‌های تابش الکترومغناطیس
۴۸	۱-۴-۲ پرتوهای گامای حاصل از واپاشی بتا
۵۰	۲-۴-۲ تابش نابودی
۵۱	۳-۴-۲ پرتوهای گامای ناشی از واکنش‌های هسته‌ای
۵۲	۴-۴-۲ تابش ترمزی
۵۴	۵-۴-۲ پرتوهای ایکس مشخصه
۵۵	۶-۴-۲ تابش سینکروترون
۵۶	۵-۲ چشمه‌های نوترون
۵۶	۱-۵-۲ شکافت خودبه‌خودی
۵۸	۲-۵-۲ چشمه‌های (α, n)
۶۲	۳-۵-۲ چشمه‌های فوتونوترون
۶۷	۴-۵-۲ واکنش‌های ناشی از ذرات باردار شتاب‌دار
۶۸	پرسش‌های تشریحی
۷۰	سؤالات چهار گزینه‌ای

۷۳	فصل سوم: برهم‌کنش‌های تابش
۷۳	هدف کلی
۷۳	هدف‌های یادگیری
۷۴	مقدمه
۷۵	۱-۳ سازوکارهای اتلاف انرژی ذرات باردار
۷۵	۱-۱-۳ برهم‌کنش کولنی

۷۶	۳-۱-۲ گسیل تابش الکترومغناطیسی (تابش ترمزی)
۷۷	۳-۲ توان توقف ناشی از یونش و برانگیزش
۸۱	۳-۳ اتلاف انرژی ناشی از گسیل تابش ترمزی
۸۱	۳-۴ محاسبه‌ی توان توقف برای ترکیب یا مخلوط عناصر
۸۳	۳-۵ برد ذرات باردار
۸۵	۳-۵-۱ برد ذرات سنگین ($\alpha, t, d, p, : A \leq 4, Z \leq 2$)
۸۸	۳-۵-۲ خصوصیات افت انرژی
۹۵	۳-۵-۳ برد الکترون و پوزیترون
۹۸	۳-۵-۴ تراگسیل ذرات بتا
۹۹	۳-۵-۵ اتلاف انرژی پس از گذر از ماده‌ای به ضخامت t
۱۰۰	۳-۶ برهم‌کنش‌های پرتوهای گاما و x با ماده
۱۰۱	۳-۶-۱ اثر فوتوالکتریک
۱۰۲	۳-۶-۲ پراکندگی کامپتون
۱۰۳	۳-۶-۳ تولید زوج
۱۰۵	۳-۶-۴ ضریب تضعیف کل
۱۰۶	۳-۶-۵ ضریب جذب انرژی فوتون
۱۰۷	۳-۷ برهم‌کنش‌های نوترون با ماده
۱۰۸	۳-۷-۱ سطح مقطع‌های نوترون
۱۱۱	پرسش‌های تشریحی
۱۱۳	سؤالات چهار گزینه‌ای

۱۱۵	فصل چهارم: ویژگی‌های عمومی آشکارسازهای تابش
۱۱۵	هدف یادگیری
۱۱۵	هدف‌های یادگیری
۱۱۶	مقدمه
۱۱۶	۴-۱ طراحی ساده‌ی آشکارساز
۱۱۸	۴-۲ مدهای عملکرد آشکارساز
۱۱۹	۴-۲-۱ مد جریان
۱۲۲	۴-۲-۲ مد ولتاژ مجذور متوسط (MSV)
۱۲۴	۴-۲-۳ مد پالسی
۱۲۸	۴-۳ طیف ارتفاع پالس
۱۳۰	۴-۴ طیف منحنی شمارش و پلاتو (Plateaus)
۱۳۳	۴-۵ قدرت تفکیک انرژی
۱۳۸	۴-۶ بازده آشکارسازی
۱۴۴	۴-۷ زمان مرگ
۱۴۵	۴-۷-۱ مدل‌هایی برای رفتار زمان مرگ
۱۴۹	۴-۷-۲ روش‌های اندازه‌گیری زمان مرگ
۱۵۴	۴-۷-۳ شمارش‌های از دست رفته به دلیل زمان مرگ در چشمه‌های پالسی

۱۵۷	پرسش‌های تشریحی
۱۶۱	سؤالات چهار گزینه‌ای

۱۶۵	فصل پنجم: لامپ‌های تکثیر گر فوتون و فوتودیودها
۱۶۵	هدف کلی
۱۶۵	هدف‌های یادگیری
۱۶۵	مقدمه
۱۶۸	۵-۱ فوتوکاتد
۱۶۸	۵-۱-۱ فرآیند گسیل الکترون
۱۷۰	۵-۱-۲ گسیل خودبه‌خودی الکترون
۱۷۰	۵-۱-۳ ساخت فوتوکاتد
۱۷۱	۵-۱-۴ بازده کوانتومی و پاسخ طیفی
۱۷۴	۵-۲ تکثیر الکترونی
۱۷۴	۵-۲-۱ گسیل الکترون ثانویه
۱۷۶	۵-۲-۲ مواد الکترون‌خواه
۱۷۸	۵-۲-۳ تکثیر چند مرحله‌ای
۱۷۹	۵-۲-۴ آمار تکثیر الکترون
۱۸۳	۵-۳ خصوصیات لامپ تکثیر گر فوتون
۱۸۳	۵-۳-۱ تفاوت‌های ساختاری
۱۸۷	۵-۳-۲ خصوصیات زمانی پالس
۱۹۰	۵-۳-۳ بیشترین بهره
۱۹۱	۵-۳-۴ ویژگی‌های لامپ تکثیر گر فوتون
۱۹۲	۵-۳-۵ خطی بودن
۱۹۳	۵-۳-۶ نوفه و پالس‌های نادرست
۱۹۶	۵-۳-۷ غیریکنواختی‌های فوتوکاتد
۱۹۶	۵-۳-۸ تغییرات بهره با آهنگ ولتاژ
۱۹۷	۵-۴ تجهیزات جانبی مورد نیاز با لامپ‌های تکثیر گر فوتون
۱۹۷	۵-۴-۱ منبع تغذیه و مقسم ولتاژ
۲۰۲	۵-۴-۲ حفاظ‌سازی مغناطیسی
۲۰۳	پرسش‌های تشریحی
۲۰۴	سؤالات چهار گزینه‌ای

۲۰۷	فصل ششم: آشکارسازهای نیمه‌رسانا
۲۰۷	هدف کلی
۲۰۷	هدف‌های یادگیری
۲۰۸	مقدمه
۲۰۸	۶-۱ ویژگی‌های نیمه‌رسانا
۲۰۸	۶-۱-۱ ساختار ترازهای الکترونی در جامدات

۲۱۲	۶-۱-۲ تغییر گاف انرژی با دما
۲۱۴	۶-۱-۳ رسانندگی نیمه‌رساناها
۲۱۶	۶-۱-۴ نیمه‌رساناهای ذاتی و غیرذاتی
۲۱۸	۶-۲ پیوند p-n
۲۲۰	۶-۲-۱ پیوند p-n به عنوان یک آشکارساز
۲۲۳	۶-۳ انواع آشکارسازهای نیمه‌رسانا
۲۲۳	۶-۳-۱ آشکارسازهای با لایه‌ی سد پتانسیل (سد سطحی)
۲۲۴	۶-۳-۲ آشکارساز پیوند بخشنده (آشکارساز با اتصال نفوذی)
۲۲۷	۶-۳-۳ آشکارسازهای لیتید سیلیسیوم ($SiLi$)
۲۲۹	۶-۳-۴ آشکارسازهای لیتید ژرمانیوم ($GeLi$)
۲۳۱	۶-۳-۵ آشکارسازهای تهی شده
۲۳۱	۶-۳-۶ آشکارسازهای ژرمانیومی با خلوص بالا ($HpGe$)
۲۳۲	۶-۳-۷ آشکارسازهای $CdTe$ و HgI_2
۲۳۳	۶-۳-۸ آشکارساز الماس و دیود MIS
۲۳۴	۶-۴ آسیب‌شناسی ناشی از تابش بر آشکارسازهای نیمه‌رسانا
۲۳۵	پرسش‌های تشریحی
۲۳۷	سؤالات چهار گزینه‌ای

۲۴۱	فصل هفتم: شمارش گر گایگر - مولر
۲۴۱	هدف کلی
۲۴۱	هدف‌های یادگیری
۲۴۲	مقدمه
۲۴۳	۷-۱ تخلیه الکتریکی گاز
۲۴۷	۷-۲ گازهای پرکننده
۲۴۸	۷-۳ فرونشانی
۲۵۱	۷-۴ رفتار زمانی
۲۵۱	۷-۴-۱ مشخصه زمانی پالس
۲۵۳	۷-۴-۲ زمان مرگ
۲۵۵	۷-۵ پلاتوی شمارش گایگر
۲۵۹	۷-۶ ویژگی‌های طراحی
۲۶۲	۷-۷ بازده شمارش
۲۶۲	۷-۷-۱ ذرات باردار
۲۶۳	۷-۷-۲ نوترون
۲۶۳	۷-۷-۳ پرتوهای گاما
۲۶۶	۷-۸ روش زمان تا اولین شمارش
۲۶۸	۷-۹ تابش سنج گایگر - مولر
۲۷۰	پرسش‌های تشریحی
۲۷۲	سؤالات چهار گزینه‌ای

۲۷۵	فصل هشتم: شمارنده‌های سوسوزن و آشکارسازی پرتو گاما
۲۷۵	هدف کلی
۲۷۵	هدف‌های یادگیری
۲۷۵	مقدمه
۲۷۶	۸-۱ سوسوزن‌های غیرآلی
۲۷۸	۸-۱-۱ وابستگی گسیل فوتون به زمان
۲۸۰	۸-۱-۲ ویژگی‌های اساسی بعضی از سوسوزن‌های غیرآلی
۲۸۱	۸-۲ سوسوزن‌های آلی
۲۸۲	۸-۲-۱ سازوکار فرآیند سوسوزن‌های آلی
۲۸۳	۸-۲-۲ سوسوزن‌های آلی بلوری
۲۸۴	۸-۲-۳ سوسوزن‌های آلی آب‌گون
۲۸۴	۸-۲-۴ سوسوزن‌های پلاستیکی
۲۸۵	۸-۳ سوسوزن‌های گازی
۲۸۶	۸-۴ پرتوهای گاما
۲۸۶	۸-۵ مدهای ذخیره‌ی انرژی در آشکارساز
۲۸۶	۸-۵-۱ برهم‌کنش فوتون‌ها با انرژی $E < 1.02 MeV$
۲۹۰	۸-۵-۲ برهم‌کنش فوتون‌ها با انرژی $E > 1.02 MeV$
۲۹۲	۸-۶ بازده آشکارسازهای پرتوهای x و پرتوهای گاما
۲۹۴	۸-۷ آشکارسازهای پرتوهای گاما به‌وسیله‌ی شمارنده‌های سوسوزن $NaI(Tl)$
۲۹۵	۸-۷-۱ بازده آشکارسازهای $NaI(Tl)$
۲۹۵	۸-۷-۲ تحلیل طیف انرژی آشکارساز $NaI(Tl)$
۲۹۸	۸-۸ آشکارسازی پرتوهای گاما با آشکارساز $GeLi$
۲۹۹	۸-۸-۱ بازده‌ی آشکارساز $GeLi$
۳۰۲	۸-۸-۲ قدرت تفکیک انرژی آشکارساز $GeLi$
۳۰۳	۸-۸-۳ تحلیل طیف انرژی آشکارساز $GeLi$
۳۰۴	پرسش‌های تشریحی
۳۰۶	سؤالات چهار گزینه‌ای
۳۰۹	پیوست
۳۱۷	منابع

پیشگفتار

با اینکه زمان مدیدی از ترجمه‌ی کتاب‌هایی در زمینه‌ی پرتوها و آشکارسازهای هسته‌ای به زبان فارسی می‌گذرد، ولی به دلیل اینکه اساس نظام آموزشی دانشگاه پیام‌نور بر خودآموز بودن مفاد درسی تکیه دارد و هر واحد درسی در رشته‌ی فیزیک بر مبنای ۸ ساعت در هر نیمسال تنظیم شده‌است، هیچ‌یک از کتاب‌های موجود در زمینه‌ی پرتوها و آشکارسازهای هسته‌ای، مناسب با اصول تدریس در دانشگاه پیام‌نور نمی‌باشند. کتاب‌های مورد استفاده مدرسین این دانشگاه باید به‌صورت خودآموز تألیف شوند تا دانشجو بتواند با مطالعه‌ی آن‌ها، به‌آسانی مطالب علمی پیشرفته را درک و مسائل مربوط به آن‌ها را حل نماید. پیرو این نیاز و براساس تکلیفی که بر خود احساس نمودیم و با توجه به سوابق پژوهشی و تدریس در زمینه‌ی فیزیک هسته‌ای و مطالب مرتبط با آشکارسازهای هسته‌ای و همچنین پیشنهاد تألیف این کتاب توسط شورای گروه فیزیک دانشگاه پیام‌نور، به تألیف کتاب آشکارسازهای هسته‌ای اقدام نمودیم که اکنون نتیجه‌ی آن پیش روی شما است.

در تألیف این کتاب تأکید ما بررسی کیفی فیزیک عملکرد آشکارسازهای هسته‌ای مختلف است. در حقیقت با رویکردی تحلیلی به بررسی ابزارهای مختلف پرداخته‌شده و تا حد امکان از وارد کردن مباحث ریاضی پیچیده در تشریح فیزیک این سیستم‌ها اجتناب کرده‌ایم که این مهم خود به درک و شناخت عمیق‌تر عملکرد این ابزارها کمک خواهد کرد.

کتاب مشتمل بر هشت فصل است. در فصل اول کتاب با مروری اجمالی، مفاهیم فیزیک هسته‌ای که دانشجو قبلاً در درس فیزیک هسته‌ای با آن‌ها آشنا شده‌است و اکنون در این کتاب جهت درک مفاهیم فصول آتی نیازمند یادآوری آن‌ها می‌باشد، به‌طور خلاصه بازنگری شده‌است. در فصل‌های دوم و سوم به فیزیک مربوط به چشمه‌ها و برهم‌کنش‌های تابش پرداخته شده‌است. در فصل چهارم، با یک دیدگاه کلی به بررسی ویژگی‌های عمومی آشکارسازهای مورد استفاده برای اندازه‌گیری تابش پرداخته شده‌است تا خواننده با دانش قبلی از ویژگی‌های عمومی این آشکارسازها، کاربرد و عملکرد آشکارسازهای مختلف را مورد مطالعه قرار دهد.

در فصل پنجم، ابزارهای مورد استفاده برای قرائت آشکارسازها بررسی شده‌است. فصل شش، کاربرد تکنولوژی نیمه‌رسانا در بحث آشکارسازی و آشکارسازهای نیمه‌رسانای مختلف

را شامل می‌شود. در فصل هفت به بررسی شمارش گرهای گایگر-مولر پرداخته شده‌است. فصل هشت بحث طیف‌سنجی تابش گاما با استفاده از آشکارسازهای سوسوزن را شامل می‌شود. در ارائه مطالب، سعی شده‌است تا مفاهیم درسی با توضیحات کافی و تا حد ممکن با مثال‌هایی ارائه شود و از ذکر مطالب تکراری که دانشجو قبلاً در درس فیزیک هسته‌ای مطالعه کرده‌است، جلوگیری شود. مسلماً کار ما بی‌عیب نیست و در این مورد هیچ ادعایی نداریم و چشم به راه انتقادات و پیشنهادات سازنده همکاران هستیم.

مرجانه جعفری فشارکی

علی اصغر مولوی چوبینی

مرداد ماه ۱۳۹۴

فصل اول

مروری بر فیزیک هسته‌ای

هدف کلی

مفاهیم فیزیک هسته‌ای مرتبط با اندازه‌گیری پرتوها بررسی می‌شود که پیش‌زمینه‌ی مطالب ارائه شده در فصول بعد می‌باشد.

هدف‌های یادگیری

دانشجو پس از مطالعه‌ی این فصل باید:

۱. با مفاهیم پایه فیزیک هسته‌ای شامل هسته، شعاع هسته و جرم هسته آشنا شود.
۲. با مفهوم انرژی بستگی هسته آشنا شود.
۳. با فرمول نیمه‌تجربی جرم آشنا شود.
۴. با انواع مختلف واپاشی‌ها شامل α ، β ، γ ، بتا و گاما آشنا شود.
۵. با مفهوم تبدیل داخلی در واکنش‌های هسته‌ای آشنا شود.

مقدمه

در این فصل مفاهیم فیزیک هسته‌ای مرتبط با اندازه‌گیری پرتوها را مرور می‌کنیم. هیچ یک از مباحث مطرح شده در اینجا را نباید به‌عنوان یک مبحث فراگیر و جامع تلقی کرد. برای مطالعه‌ی عمیق‌تر پیرامون هر مبحث، خواننده باید به مراجع مندرج در پایان کتاب رجوع نماید.

این مرور از لحاظ تاریخی صورت نمی‌پذیرد، بلکه رفتار اتمی و هسته‌ای و نظریه و آزمایش‌های مربوط به آن را همان‌گونه که امروزه آن‌ها را درک می‌کنیم، مورد بحث قرار داده و بیان می‌کنیم. علاوه بر این، بر این نکته نیز تأکید می‌کنیم که تصویر جاری از اتم‌ها، هسته‌ها و ذرات زیر اتمی فقط مدلی است که بهترین شواهد نظری و تجربی فعلی ما را بیان می‌کند و اگر شواهد تازه‌ای مبنی بر ناسازگاری بین نظریه‌های موجود و تجربه بروز کرد، این مدل‌ها ممکن است دست‌خوش تغییر گردد.

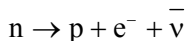
۱-۱ هسته

هر هسته را با بار کل مثبت و تعداد واحدهای جرمی موجود در هسته مشخص می‌کنیم. عدد جرمی هر هسته که آن را با A نمایش می‌دهیم، به صورت نزدیک‌ترین عدد درست به حاصل تقسیم جرم هسته بر یکای بنیادی جرم یعنی جرم پروتون تعریف می‌نماییم. هر هسته از ذراتی به نام پروتون و نوترون تشکیل شده است که برای مقایسه بعضی از ویژگی‌های نوترون، پروتون و الکترون را در جدول (۱-۱) درج کرده‌ایم. هرگاه از ذرات هسته‌ای بدون توجه به نوع پروتونی یا نوترونی آن‌ها بحث کنیم، از اصطلاح نوکلئون استفاده می‌کنیم. نوکلیدهایی با عدد اتمی یکسان و عدد نوترونی متفاوت را ایزوتوپ می‌نامیم. نوکلیدهایی با عدد اتمی متفاوت و عدد نوترونی یکسان را ایزوتون می‌نامیم. نوکلیدهایی با عدد جرمی یکسان را ایزوبار می‌نامیم.

جدول ۱-۱. ویژگی‌های نوترون، پروتون و الکترون.

	الکترون	نوترون	پروتون
جرم سکون (kg)	9.109558×10^{-31}	1.674928×10^{-27}	1.672622×10^{-27}
MeV	۰.۵۱۱	۹۳۹.۵۲۲	۹۳۸.۲۵۸
u		۱.۰۰۸۶۶۵	۱.۰۰۷۲۷۶
بار	-e	.	+e

ذرات نوکلئونی همواره در قید هسته قرار دارند، با این حال یک پروتون آزاد یا یک الکترون را جذب می‌نماید و به یک اتم هیدروژن تبدیل می‌شود و یا سرانجام جذب یک هسته می‌شود. یک نوترون آزاد نیز یا جذب هسته می‌گردد، یا طبق واکنش زیر واپاشی می‌کند:



یعنی با گسیل یک الکترون و ذره‌ی دیگری به نام پادنوترینو، به یک پروتون تبدیل خواهد شد.

فیزیک هسته‌ای از صورت‌بندی نظری الکترودینامیکی منسجمی برخوردار نیست که بتوان با استفاده از آن تمام پدیده‌ها را به روش بنیادی تحلیل و تعبیر کرد. بدین ترتیب در مطالعه‌ی فیزیک هسته‌ای، شیوه‌ی پدیده‌شناختی را در پیش می‌گیریم. با این حال می‌توان هسته‌ها را به کمک تعدادی از پارامترهای هسته‌ای تا حد قابل توجهی توصیف کرد. این خواص شامل خواص استاتیکی و خواص دینامیکی می‌باشند.

خواص استاتیکی عبارت‌اند از: بار الکتریکی، شعاع، جرم، انرژی بستگی، تکانه‌ی زاویه‌ای، پاریته، گشتاور دوقطبی مغناطیسی، گشتاور چهارقطبی الکتریکی و انرژی حالت‌های برانگیخته. خواص دینامیکی عبارت‌اند از: احتمال واپاشی و احتمال واکنش هسته‌ها. در ادامه تعدادی از مهم‌ترین این خواص را توضیح می‌دهیم.

۱-۱-۱ شعاع هسته

شعاع هسته نیز مانند شعاع اتم، کمیتی دقیقاً تعریف شده نیست، بنابراین شکل هسته را با دو پارامتر مشخص می‌کنیم:

- **شعاع میانگین:** نشانگر فاصله‌ای از مرکز هسته است که چگالی نوکلئونی در آن به نصف مقدار مرکزی آن کاهش می‌یابد.

- **ضخامت پوسته:** نشانگر فاصله‌ای از مرکز هسته است که در طی آن چگالی نوکلئونی از مقدار نزدیک به حداکثر به مقدار نزدیک به حداقل کاهش می‌یابد.

شعاع هسته‌ای که اندازه‌گیری می‌کنیم، به نوع آزمایشی که برای تعیین شکل هسته انجام می‌گیرد بستگی دارد. در بعضی آزمایش‌ها نظیر پراکندگی الکترون‌های پرانرژی، برهم‌کنش کولنی بین یک ذره‌ی باردار و هسته را اندازه‌گیری می‌کنیم. پس کمیت مورد

اندازه‌گیری در این آزمایش‌ها، توزیع بار هسته‌ای است. در بعضی آزمایش‌های دیگر نظیر پراکندگی رادرفورد، برهم‌کنش هسته‌ای قوی بین ذرات موجود در هسته اندازه‌گیری می‌شود، و توزیع تعیین شده توزیع نوکلئون‌ها است که توزیع ماده‌ی هسته‌ای نامیده می‌شود.

در روش پراکندگی الکترون‌ها، روش معمولی تعیین اندازه و شکل جسم، بررسی تابش پراکنده شده توسط آن جسم است. برای اینکه بتوانیم جسم و جزئیات آن را ببینیم باید طول موج تابش مورد استفاده از ابعاد جسم کوچک‌تر باشد تا اثرات پراش تمام یا بخشی از تصویر را محو نکند. اولین کمینه‌ی نقش پراش برای پراش از یک قرص دایره‌ای به قطر D باید تحت زاویه‌ی $\theta = \sin^{-1} \left(\frac{1.22\lambda}{D} \right)$ ظاهر شود. علت اینکه این کمینه‌ها مانند کمینه‌های پراش نور تابیده شده بر قرص کدر به صفر نمی‌رسند، این است که هسته مرز دقیقاً مشخصی ندارد.

همان‌طور که در شکل (۱-۱) نشان داده شده‌است، چگالی بار هسته‌ای در مرکز تمام هسته‌ها تقریباً مقداری ثابت است. نوکلئون‌ها ظاهراً در مرکز هسته متراکم نمی‌شوند، بلکه توزیع آن‌ها در تمام حجم هسته نسبتاً ثابت می‌ماند. به عبارتی:

$$\frac{A}{\frac{4}{3}\pi R^3} \approx \text{const} \rightarrow R = R_0 A^{1/3}$$

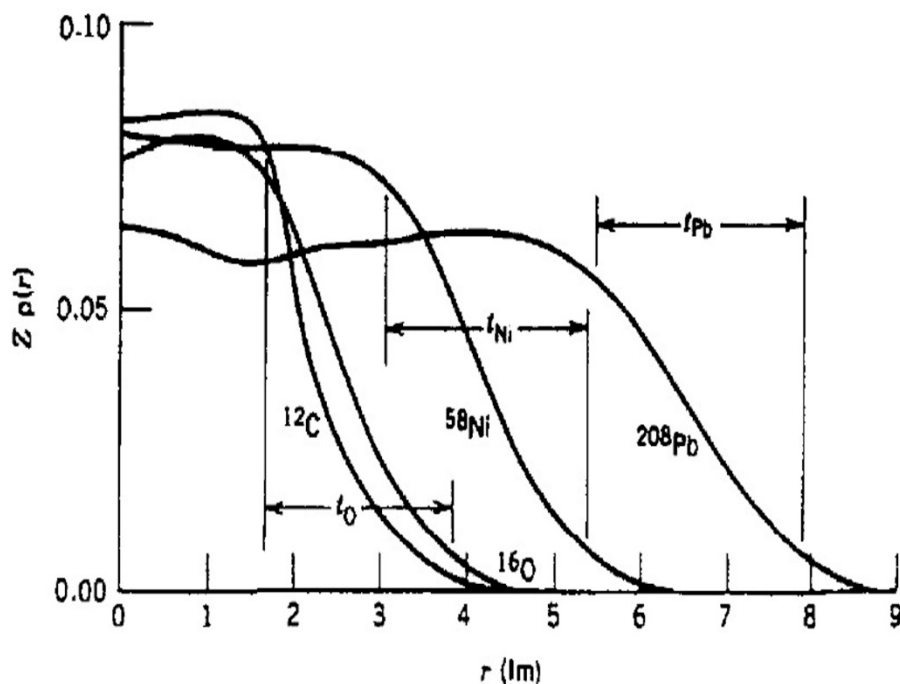
که در آن $R_0 = 1.2 \text{ fm}$ است.

۱-۱-۲ جرم هسته

جرم یک هسته با عدد جرمی A و عدد اتمی Z که آن را با $M_N(A, Z)$ نشان می‌دهیم، به‌صورت‌زیر بیان می‌شود:

$$M_N(A, Z) = Zm_p + Nm_n - B(A, Z)c^2 \quad (1-1)$$

که در آن $B(A, Z)$ انرژی بستگی نامیده می‌شود و در بخش بعدی پیرامون آن بحث می‌کنیم.



شکل ۱-۱. نمونه‌هایی از توزیع شعاعی بار هسته‌ها.

جرم‌های هسته‌ای را برحسب یکای جرم اتمی u بیان می‌کنیم. این یکا چنان تعریف می‌شود که جرم یک اتم ^{12}C دقیقاً برابر $12u$ شود. ضریب تبدیل بین جرم و انرژی به صورت $1u = 931.5 \text{ MeV}$ است. از این رو انرژی معادل جرم هر نوکلئون در حدود 1000 MeV است.

۱-۳- انرژی بستگی هسته

انرژی بستگی (B) یک هسته، اختلاف انرژی بین جرم هسته‌ی ${}^A_Z\text{X}_N$ و جرم کل پروتون‌ها (Z پروتون) و نوترون‌های تشکیل دهنده‌ی آن (N نوترون) است که به شکل زیر بیان می‌گردد:

$$B = \{Zm_p + Nm_n - [m({}^A_Z\text{X}_N) - Zm_e]\}c^2 \quad (1-2)$$

اگر مجموع جرم Z پروتون و Z الکترون را به صورت جرم Z اتم خنثای هیدروژن در نظر بگیریم، جرم‌ها برحسب جرم‌های اتمی بیان می‌شوند و برای انرژی بستگی خواهیم داشت:

$$B = [Zm({}^1_1\text{H}) + Nm_n - m({}^A_Z\text{X})]c^2 \quad (3-1)$$

که در آن $c^2 = 931.5 \text{ MeV/u}$ است. در مبحث انرژی بستگی، دو پارامتر از اهمیت برخوردار هستند که به تعریف آن‌ها می‌پردازیم. **انرژی جداسازی نوترون:** عبارت است از مقدار انرژی لازم برای دورکردن یک نوترون از هسته و برابر است با:

$$S_n = B({}^A_Z\text{X}_N) - B({}^{A-1}_Z\text{X}_{N-1}) = [m({}^{A-1}_Z\text{X}_{N-1}) - m({}^A_Z\text{X}_N) + m_n]c^2 \quad (4-1)$$

انرژی جداسازی پروتون: عبارت است از مقدار انرژی لازم برای دورکردن یک پروتون از هسته و برابر است با:

$$S_p = B({}^A_Z\text{X}_N) - B({}^{A-1}_{Z-1}\text{X}_N) = [m({}^{A-1}_{Z-1}\text{X}_N) - m({}^A_Z\text{X}_N) + m_p]c^2 \quad (5-1)$$

مثال ۱: انرژی بستگی کل و انرژی بستگی هر نوکلئون را در هریک از موارد زیر حساب کنید: (الف) ${}^7\text{Li}$ (ب) ${}^{20}\text{Ne}$

حل: با استفاده از جدول مقادیر جرم‌های اتمی در انتهای کتاب برای هریک از نوکلئون‌ها و یکی از فرمول‌های انرژی بستگی زیر، خواهیم داشت:

$$B = \{Zm_p + Nm_n - [m({}^A_Z\text{X}_N) - Zm_e]\}c^2$$

یا

$$B = [Zm({}^1_1\text{H}) + Nm_n - m({}^A_Z\text{X})]c^2$$

که در آن $c^2 = 931.5 \text{ MeV/u}$ است.

$${}^7\text{Li} : B = [3(1.007825) + 4(1.008665) - 7.016003]c^2 = 39.245 \text{ MeV}$$

$${}^{20}\text{Ne} : B = [10(10.07825) + 10(10.08665) - 19.992436]c^2 = 160.76 \text{ MeV}$$

انرژی بستگی به‌ازاء هر نوکلئون از رابطه‌ی B/A به‌دست می‌آید که با استفاده از مقادیر انرژی بستگی که در بالا به‌دست آوردیم، داریم:

$${}^7\text{Li} : \frac{B}{A} = \frac{39.245}{7} = 5.6 \text{ MeV}$$

$${}^{20}\text{Ne} : \frac{B}{A} = \frac{160.76}{20} = 8.03 \text{ MeV}$$

مثال ۲: (الف) انرژی جداسازی نوترون را در هریک از هسته‌های ${}^7\text{Li}$ و ${}^{238}\text{U}$ به‌دست آورید. (ب) انرژی جداسازی پروتون را در هریک از هسته‌های ${}^{20}\text{Ne}$ و ${}^{197}\text{Au}$ به‌دست آورید.

حل: (الف) انرژی جداسازی نوترون برابر است با:

$$S_n = B({}_Z^AX_N) - B({}_Z^{A-1}X_{N-1}) = [m({}_Z^{A-1}X_{N-1}) - m({}_Z^AX_N) + m_n]c^2$$

که در آن $c^2 = 931.5 \text{ MeV/u}$ است. بنابراین برای هریک از نوکلئون‌های بالا خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} {}^7\text{Li} : {}^7\text{Li} &\rightarrow {}^6\text{Li} + n \quad \rightarrow S_n = [m({}^6\text{Li}) + m_n - m({}^7\text{Li})]c^2 \\ &\rightarrow S_n = [7.015121 + 1.008665 - 7.0160038]c^2 = 7.725 \text{ MeV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} {}^{238}\text{U} : {}^{238}\text{U} &\rightarrow {}^{237}\text{U} + n \quad \rightarrow S_n = [m({}^{237}\text{U}) + m_n - m({}^{238}\text{U})]c^2 \\ &\rightarrow S_n = [237.043924 + 1.008665 - 237.04563]c^2 = 7.54 \text{ MeV} \end{aligned}$$

(ب) انرژی جداسازی پروتون است با:

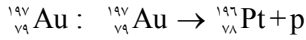
$$S_p = B({}_Z^AX_N) - B({}_{Z-1}^{A-1}X_N) = [m({}_{Z-1}^{A-1}X_N) - m({}_Z^AX_N) + m_p]c^2$$

بنابراین برای هریک از نوکلئون‌های بالا داریم:



$$S_p = [m({}^4_2\text{He}) + m_p - m({}^2_0\text{Ne})]c^2$$

$$\rightarrow S_p = [18.998403 + 1.00728 - 19.992635]c^2 = 13.78 \text{ MeV}$$



$$S_p = [m({}^{196}_{78}\text{Pt}) + m_p - m({}^{197}_{79}\text{Au})]c^2$$

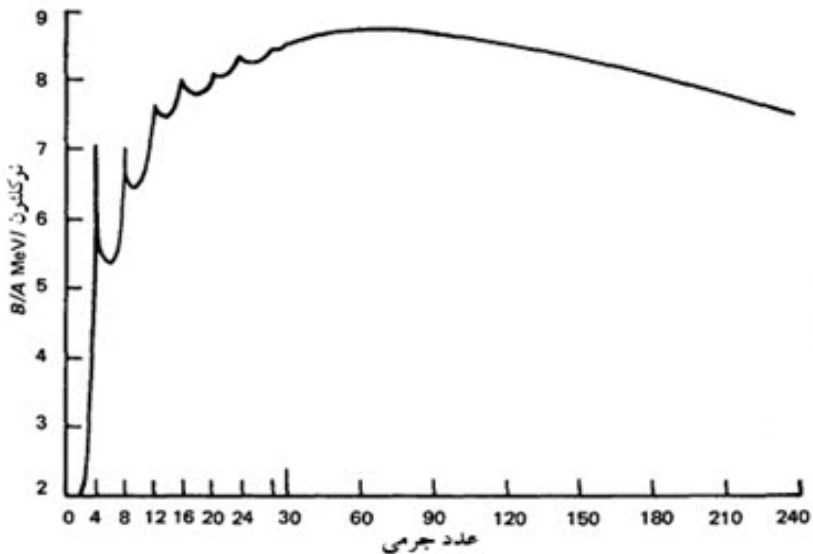
$$\rightarrow S_p = [195.964926 + 1.00728 - 196.966543]c^2 = 7.62 \text{ MeV}$$

۱-۴ فرمول نیمه تجربی جرم

با بررسی نظم و ترتیب انرژی بستگی هسته‌ها می‌توان مدارک ارزنده‌ای از ساختار هسته‌ها به دست آورد. از آنجایی که انرژی بستگی کم‌وبیش به صورت خطی بر حسب A تغییر می‌کند، عموماً انرژی بستگی متوسط هر نوکلئون را به صورت تابعی از A نشان می‌دهند که در شکل (۱-۲) ترسیم شده است. از این شکل نکات زیر استنتاج می‌شود:

جز در موارد هسته‌های سبک، انرژی بستگی مقدار نسبتاً ثابتی دارد.

انرژی بستگی متوسط بسیاری از هسته‌ها در حدود 8 MeV است.



شکل ۱-۲. تغییرات انرژی بستگی میانگین به ازای هر نوکلئون.

منحنی در نزدیکی $A = 60$ قله‌ی پهنی دارد و در همین ناحیه است که انرژی بستگی به مقدار حداکثر می‌رسد. وجود چنین قله‌ای بدین معنی است که به دو روش، شکافت هسته‌ای و همجوشی هسته‌ای می‌توان به آزادسازی انرژی دست یافت.

تلاش برای درک منحنی انرژی بستگی به فرمول نیمه‌تجربی جرم منتهی می‌شود که در طی آن و با استفاده از چند پارامتر کلی، سعی می‌کنیم تغییرات B را برحسب A توضیح دهیم. این پارامترها به شرح زیر هستند:

از آنجایی که $B \propto A$ است، لذا باید یک جمله حجمی را به صورت $B = a_v A$ وارد کنیم که در آن a_v مقداری ثابت در حدود 8 MeV است.

اگر هر نوکلئونی همه‌ی نوکلئون‌های دیگر موجود در هسته را جذب کند، آنگاه باید انرژی بستگی متناسب با $A(A-1)$ یا به صورت تقریبی متناسب با A^2 باشد. این بدان معنی است که هر نوکلئون تنها نزدیک‌ترین نوکلئون‌های اطرافش را جذب می‌کند. نوکلئونی که در سطح هسته قرار دارد، از حکم بالا مستثنی می‌شود، زیرا چنین نوکلئونی را همسایه‌های کمتری احاطه کرده‌اند. لذا سهم چنین نوکلئون‌هایی را کم می‌کنیم. سهم نوکلئون‌های سطحی هسته را در انرژی بستگی باید به صورت $-a_s A^{2/3}$ در نظر گرفت.

باید دافعه‌ی کولنی پروتون‌ها را نیز به حساب آوریم. این جمله با $Z(Z-1)$ متناسب است و چون هسته را به شکل کره‌ی باردار یکنواخت در نظر می‌گیریم، مقدار آن را به صورت $-a_c Z(Z-1) A^{-1/3}$ وارد می‌کنیم.

از آنجایی که در هسته‌های پایدار $Z \leq A/2$ است، از این رو اگر بخواهیم فرمول انرژی بستگی توصیف واقع بینانه‌ای از هسته‌ها داشته باشد، باید این خاصیت را نیز در نظر بگیریم. این جمله در هسته‌های سنگین اهمیت کمتری دارد، زیرا افزایش سریع دافعه‌ی کولنی مستلزم نوترون‌های اضافی است، تا پایداری هسته تضمین شود. این جمله که به‌خاطر تأثیرش در متقارن نگه‌داشتن هسته از لحاظ تعداد پروتون‌ها و نوترون‌ها جمله‌ی تقارنی نامیده می‌شود را به صورت $-a_{\text{sym}} (A - 2Z)^2 / A$ در نظر می‌گیریم.

سرانجام باید جمله‌ای را در نظر بگیریم که تمایل نوکلئون‌ها در تشکیل زوج و تحکیم پیکربندی پایدار هسته‌ای را نشان دهد. هنگامی که با تعداد فرد نوکلئون‌ها سروکار داریم این جمله هیچ نقشی در انرژی بستگی ندارد. اما در هسته‌هایی که عدد اتمی و نوترونی هر دو فرد باشند، انرژی بستگی با تبدیل یکی از پروتون‌ها یا نوترون‌ها به

یکدیگر و قابلیت توزیع نوکلئون منفرد افزایش می‌یابد. انرژی توزیع δ را در هسته‌هایی با Z و N زوج به صورت $+a_p A^{-2/3}$ ، برای هسته‌هایی با Z و N فرد به صورت $-a_p A^{-2/3}$ و برای A فرد برابر صفر در نظر می‌گیریم.

با ترکیب تمام این ۵ جمله، فرمول کامل انرژی بستگی به شکل زیر به دست می‌آید:

$$B = a_V V - a_S A^{2/3} - a_C Z(Z-1)A^{-1/3} - a_{\text{sym}} \frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta \quad (6-1)$$

و ضرایب آن چنان انتخاب می‌شوند که حداکثر سازگاری بین این فرمول و منحنی تجربی انرژی بستگی حاصل شود.

مثال ۳: برای هسته ^{20}Ne انرژی بستگی کل و انرژی کولنی را محاسبه کنید.

حل: انرژی بستگی را طبق رابطه‌ی زیر به دست می‌آوریم:

$$B = [Zm(^1\text{H}) + Nm_n - m(^A_Z\text{X})]c^2$$

که در آن $c^2 = 931.5 \text{ MeV/u}$ است. انرژی کولنی مطابق رابطه‌ی زیر به دست

می‌آید:

$$\Delta E_c = \frac{3}{5} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 R} (2Z-1) = \frac{3}{5} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 R} A^{2/3}$$

بنابراین برای هسته ^{20}Ne داریم:

$$^{20}\text{Ne} : B = [10(1.007825) + 10(1.008665) - 20 - 19.993843]c^2 = 167.41 \text{ MeV}$$

$$\Delta E_c = \frac{3}{5} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 R} (2Z-1) = \frac{3}{5} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 R} A^{2/3} = \frac{3}{5} (1.44) \frac{(20)^{2/3}}{1.2} = 5.48 \text{ MeV}$$

۱-۱-۵ ترازهای انرژی هسته‌ای

نوترون‌ها و پروتون‌های درون هسته توسط نیروی‌های قوی هسته‌ای در کنار هم قرار می‌گیرند. هرچند طبیعت دقیق نیروهای هسته‌ای هنوز به طور کامل معلوم نیست، ولی با

فرض شکل معینی برای نیرو و ساختن مدل‌های هسته‌ای بر پایه‌ی آن، می‌توان سرشت هسته‌ای و ترازهای هسته را پیش‌بینی کرد. موفقیت هر مدل با میزان سازگاری نتایج پیش‌بینی شده‌ی آن مدل با نتایج تجربی سنجیده می‌شود. تاکنون چندین مدل هسته‌ای پیشنهاد شده‌است که هر کدام برخی از خواص هسته‌ای را توضیح می‌دهند، با این حال هنوز مدل مبسوطی که بتواند پاسخ‌گوی تمام واقعیت‌ها درباره‌ی هسته باشد، شناخته شده نیست.

در همه‌ی مدل‌های پیشنهادی فرض بر این است که هسته می‌تواند در بعضی حالت‌های انرژی گسسته وجود داشته باشد. بسته به نوع مدل، حالت‌های انرژی را می‌توان به نوکلئون‌ها یا به کل هسته نسبت داد. برای مدل بررسی شده‌ای که در این جا بحث می‌شود، فرض می‌کنیم که حالت‌های انرژی به کل هسته نسبت داده می‌شوند.

پایین‌ترین حالت انرژی ممکن یک هسته، حالت پایه نامیده می‌شود. هرگاه حالت پایه دارای انرژی منفی باشد، آن را یک حالت مقید می‌خوانیم. اگر هسته در یک حالت مقید قرار داشته باشد، پس از مدت زمانی از مرتبه‌ی 10^{-12} تا 10^{-16} ثانیه با فرو افتادن به یک حالت پایین‌تر وانگیخته می‌شود. وانگیختگی با گسیل یک فوتون با انرژی‌ای برابر با تفاضل انرژی حالت‌های اولیه و نهایی همراه است.

تمام حالت‌های انرژی که بالاتر از حالت مقید قراردارند را حالت‌های انرژی مجاز می‌نامیم. اگر هسته انرژی کافی برای بالا رفتن تا یک تراز مجاز را به دست آورد، ممکن است یا به یکی از حالت‌های مقید فرو افتد یا با گسیل یک نوکلئون وانگیخته شود. با مطالعه‌ی چنین هسته‌هایی می‌توان به شناسایی و بررسی ترازهای انرژی هسته دست یافت.

بررسی ترازهای انرژی هسته‌های شناخته‌شده نکات زیر را آشکار می‌کند:

- برخلاف فاصله‌ی بین ترازهای اتمی که از مرتبه‌ی eV می‌باشد، فاصله‌ی بین ترازهای انرژی هسته‌ای از مرتبه‌ی keV تا MeV است.
- با افزایش انرژی برانگیختگی، فاصله‌ی بین ترازها کاهش می‌یابد. چگالی ترازها در انرژی‌های بالاتر به نحوی افزایش می‌یابد که تمیزدادن تک‌تک ترازهای انرژی مشکل می‌شود و می‌توان آن‌ها را به شکل پیوسته در نظر گرفت.

- با افزایش عدد جرمی A ، تعداد ترازها افزایش می‌یابد. یعنی هسته‌های سنگین دارای ترازهای انرژی بیشتری هستند.
- با افزایش عدد جرمی A ، انرژی اولین حالت برانگیخته کاهش می‌یابد.

۱-۲ قانون واپاشی پرتوزا

واپاشی رادیواکتیو کانی‌های طبیعی حاوی اورانیوم و توریم تا حدود زیادی منشاء مطالعات اولیه‌ی فیزیک هسته‌ای بوده‌اند. علاوه بر این، هسته‌های رادیواکتیو را از طریق واکنش‌های هسته‌ای در آزمایشگاه نیز می‌توانیم تولید کنیم. این عمل اولین بار در سال ۱۹۳۴ توسط ژولیو و کوری، با بمباران آلومینیوم به وسیله‌ی ذرات آلفای حاصل از واپاشی پولونیم رادیواکتیو، انجام شد. منظور از مواد پرتوزا، موادی هستند که هسته‌های آن‌ها در اثر گسیل خودبه‌خود تابش، تغییر حالت می‌دهند.

سه سال پس از کشف رادیواکتیو ملاحظه شد که آهنگ واپاشی یک ماده‌ی پرتوزای خالص با گذشت زمان طبق یک قانون نمایی کاهش می‌یابد. پس از آن مشخص شد رادیواکتیویته نماینده تغییر در تک‌تک اتم‌ها است و نه تغییر در کل نمونه‌ی ماده. علاوه بر این واپاشی دارای طبیعت آماری است، یعنی پیش‌بینی زمان فروپاشی یک اتم معین غیرممکن می‌باشد و همین امر است که سبب ایجاد قانون نمایی می‌گردد. این قانون به شکل $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ است و در آن λ ثابت واپاشی یا فروپاشی نامیده می‌شود.

عموماً مناسب است تا به جای شمارش تعداد هسته‌های ناواپاشیده در یک نمونه، تعداد واپاشی‌هایی که در فاصله‌ی زمانی بین t_1 و t_2 رخ می‌دهند، شمارش شوند. بدین‌منظور فعالیت یا اکتیویته را به صورت $A(t) = \lambda N(t) = A_0 e^{-\lambda t}$ تعریف می‌نماییم. هرچه فعالیت ماده‌ای بیشتر باشد، تعداد هسته‌های بیشتری در یک ثانیه وامی‌پاشند. فعالیت هیچ‌گونه وابستگی به نوع واپاشی، نوع تابشی که نمونه گسیل می‌دارد و یا انرژی تابش گسیلی ندارد، بلکه فعالیت تنها به تعداد واپاشی بستگی دارد. یکای اندازه‌گیری فعالیت بکرل (Bq) است که برابر با یک واپاشی در ثانیه تعریف می‌شود. به این ترتیب یک کوری (Ci) برابر با 3.7×10^{10} Bq می‌باشد. از اصطلاح فعالیت ویژه (SA) برای فراوانی به‌کار رفته استفاده می‌شود، که ممکن است دارای یکی از دو حالت زیر باشد:

برای جامدات:

$$SA = \frac{\text{فعالیت}}{\text{جرم}} \quad (\text{Bq/kg یا Ci/g})$$

برای گازها و آب‌گون‌ها:

$$SA = \frac{\text{فعالیت}}{\text{حجم}} \quad (\text{Bq/m}^3 \text{ یا Ci/cm}^3)$$

مثال ۴: فعالیت ویژه‌ی یک نمونه آب‌گون به حجم 10^{-3} m^3 که حاوی 10^{-6} kg کیلوگرم ^{32}P است، را محاسبه نمایید؟

حل:

$$SA = \frac{A}{N} = \frac{\lambda N}{V} = \frac{\ln 2}{VT} m \frac{N_A}{A} = \frac{(\ln 2)(10^{-6} \text{ kg})(6.022 \times 10^{23})}{(10^{-3} \text{ m}^3)(14.3 \text{ d})(86400 \text{ s/d})(32 \text{ kg})}$$

$$= 1.05 \times 10^{16} \text{ Bq/m}^3 = 0.285 \text{ Ci/cm}^3$$

دو مفهوم نیمه‌عمر و عمر متوسط به‌طور گسترده در ارتباط با رادیوایزوتوپ‌ها به‌کار می‌روند، که در زیر به تعریف آن‌ها می‌پردازیم:

نیمه‌عمر: مدت زمانی است که طول می‌کشد تا فعالیت به نصف مقدار خود کاهش یابد و به‌صورت $t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$ محاسبه می‌گردد.

عمر متوسط: مدت زمانی است که طول می‌کشد تا فعالیت به $1/e$ مقدار اولیه‌اش کاهش یابد و به شکل $\tau = \frac{1}{\lambda}$ می‌باشد.

قانون نمایی واپاشی تنها در مواردی به‌کار می‌رود که مقدار معینی از ماده‌ی اولیه (با گسیل تابش) به یک عنصر پایدار نهایی واپاشیده شود. تحت این شرایط که هسته رادیواکتیو ۱ با ثابت واپاشی λ_1 ، به هسته‌ی پایدار ۲ واپاشیده می‌شود، تعداد هسته‌های موجود برابر است با:

$$N_1(t) = N_0 e^{-\lambda_1 t}$$

$$N_2(t) = N_0 (1 - e^{-\lambda_1 t}) \quad (V-1)$$

از رابطه‌ی بالا دو نکته استنتاج می‌شود: