



دانشگاه گیلان
دانشکده علوم پایه

شبیه سازی برخورد واکنش مستقیم $^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$

توسط FLUKA

نام دانشجو:

مهدی مرادی

استاد راهنما:

آقای دکتر علیرضا صدرممتاز

استاد مشاور:

آقای پیوند طاهرپرور

بهمن ماه ۱۳۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به همسر عزیزم

از استاد عزیزم جناب آقای دکتر علیرضا صدرممتاز که در جمع آوری این پایان
نامه مرا یاری نموده‌اند و نیز جناب آقای پیوند طاهرپرور که در تمام مراحل
تحقیق یار و همراهم بودند کمال تشکر و قدردانی می‌نمایم.

ظ.....	چکیده فارسی
ع.....	چکیده انگلیسی
غ.....	مقدمه
۱.....	فصل اول : واکنش‌های هسته‌ای
۲.....	مقدمه
۳.....	۱-۱- انواع واکنشها و قوانین پایستگی
۴.....	۱-۱-۱- مشاهده پذیرها
۴.....	۱-۱-۲- قوانین پایستگی
۵.....	۲-۱- انرژی واکنشهای هسته‌ای
۱۳.....	۳-۱- روشهای تجربی
۱۵.....	۴-۱- سطح مقطعها
۱۵.....	۱-۴-۱- تعریف سطح مقطع
۲۱.....	فصل دوم: تولید رادیودارو توسط سیکلوترون و راکتور
۲۲.....	مقدمه
۲۲.....	۱-۲- تولید رادیونوکلئیدها بوسیله‌ی راکتور
۲۳.....	۱-۱-۲- شکافت یا واکنش (n,f)
۲۴.....	۲-۱-۲- گیراندازی نوترون یا برهمکنش (n, γ)
۲۶.....	۳-۱-۲- هدف و فرایندهای آن
۲۶.....	۴-۱-۲- معادلات برای تولید رادیونوکلئیدها
۲۸.....	۲-۲- سیکلوترون و فرایند تولید رادیونوکلئیدهای PET
۲۸.....	۱-۲-۲- عملکرد سیکلوترون

۳۰	.....سیکلوترون پزشکی
۳۲	.....فرایند تولید هدف
۳۲	.....معادله برای تولید رادیونوکلئیدها در سیکلوترون
۳۴	.....فعالیت ویژه
۳۴	.....تولید رادیونوکلئید های گسیلنده ی پوزیترون
۳۵	.....فلوئور- ۱۸
۳۶	.....کربن- ۱۱
۳۶	.....نیتروژن- ۱۳
۳۷	.....اکسیژن- ۱۵
۳۷	.....ید- ۱۲۴
۳۷	.....استرونتیم- ۸۲
۳۸	.....تکنسیم- ۹۴ برانگیخته
۳۸	.....ژرمانیم- ۶۸
۳۹	.....فصل سوم: شیوه های نشاندارسازی و تولید کربن ۱۱ نشاندار
۴۰	.....مقدمه
۴۰	.....۱-۳- شیوه های نشاندارسازی
۴۰	.....۱-۱-۳- روش واکنش مستقیم
۴۰	.....۲-۱-۳- روش تبادل یون
۴۳	.....۳-۱-۳- روش اصلاح سطح
۴۶	.....۴-۱-۳- مقایسه ی نتایج
۴۷	.....تولید ^{11}CO
۴۷	.....۱- ۲-۳- واکنش مستقیم
۴۸	.....۲-۲-۳- سطح مقطع واکنش

۴۸	۳-۲-۳- هدف های نازک
۴۹	۳-۲-۴- هدف های ضخیم
۴۹	۳-۲-۵- انرژی آستانه ی $^{14}N(p, \alpha)^{11}C$
۵۰	۳-۲-۶- سطح مقطع کل واکنش برای $^{14}N(p, \alpha)^{11}C$
۵۱	۳-۲-۷- محاسبه ی تئوری فعالیت $^{11}CO_2$ تولید شده در هدف
۵۳	۳-۳- موضوعات کاربردی
۵۳	۳-۳-۱- درصد O_2 و CO_2 موجود در هدف
۵۵	۳-۳-۲- واکنش های جانبی در هدف
۵۶	۳-۳-۳- بهره واکنش در هدف
۵۷	۳-۳-۴- سیستم پردازش شیمیایی (CPS)
۶۱	۳-۳-۵- فشار در CPS
۶۲	۳-۳-۶- کاهش $^{11}CO_2$
۶۳	۳-۳-۴- شمارش ^{11}CO تولید شده
۶۴	۳-۴-۱- آشکارساز سوسوزن
۶۵	۳-۴-۲- الکترونیک یک آشکارساز سوسوزن
۶۷	۳-۴-۳- مد واپاشی ^{11}C
۶۸	۳-۴-۴- بررسی ^{11}CO
۶۸	۳-۴-۵- فعالیت ^{11}CO
۷۰	۳-۴-۶- فعالیت ویژه ^{11}CO

۷۱	۳-۴-۷- طیف اشعه گاما از ^{11}CO
۷۴	فصل چهارم: کاربرد کربن ۱۱ در سلول های خونی
۷۵	مقدمه
۷۵	۴-۱-۱- هموگلوبین (Hb)
۷۷	۴-۱-۲- عوامل موثر بر پیوند هموگلوبین به مولکول های اکسیژن
۷۸	۴-۱-۳- تعیین میزان اکسیژن
۸۰	۴-۱-۴- انتقال CO
۸۲	۴-۱-۵- سلول خونی بسته
۸۲	۴-۱-۶- چگونه سلول خونی می میرد
۸۳	۴-۲- روشهای نشاندارسازی RBC با استفاده از CO
۸۴	۴-۲-۱- سیستم نشاندارسازی نمونه آزمایشی
۸۵	۴-۲-۲- ملاحظات مختلف در فرآیند نشاندارسازی
۸۵	۴-۲-۳- اندازه گیری فعالیت برای سلول های خونی نشاندار شده
۸۷	۴-۲-۴- تحلیل مفهومی طیف سنجی نور جذبی برای کربکسی هموگلوبین
۸۸	۴-۲-۵: نتایج اولیه برای تصویرسازی سلول خونی نشاندار
۸۹	۴-۳: روشهای ایزوله کردن RBC نشاندار شده منفرد
۸۹	۴-۳-۱- فعالیت مطلوب بدون ملاحظات بیولوژیکی
۸۹	۴-۳-۲- هموگلوبین نشاندار شده با $^{15}\text{O}^{15}\text{O}$ یا $^{15}\text{O}_2$
۹۰	۴-۳-۳- هموگلوبین نشاندار شده با ^{11}CO

۹۲.....	فصل پنجم: کد FLUKA.....
۹۳.....	مقدمه
۹۴.....	۱-۵- مروری بر فیزیک FLUKA، ساختار و قابلیت های آن.....
۹۴.....	۱-۱-۵- برهمکنشهای هسته‌ای نا کشسان هادرون
۹۵.....	۱-۲-۵- پراکندگی کشسان
۹۶.....	۱-۳-۵- اتلاف انرژی.....
۹۷.....	۱-۴-۵- نوترون های کم انرژی.....
۹۹.....	۲-۵- هندسه
۹۹.....	۱-۲-۵- انتقال.....
۱۰۰.....	۲-۲-۵- نشانه گذاری.....
۱۰۰.....	۳-۵- اختلاف اصلی بین FLUKA و دیگر کدهای مشابه
۱۰۲.....	فصل ششم: نتایج شبه سازی.....
۱۱۰.....	منابع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: نمایش هندسی واکنش $a+x \rightarrow b+Y$ ۶
- شکل ۱-۲: (a) نمایش تغییرات T_a بر حسب T_b برای واکنش ${}^3\text{H}(p,n){}^3\text{He}$ ۷
- شکل ۱-۲: (b) نمایش تغییرات T_a بر حسب T_b برای واکنش ${}^{14}\text{C}(p,n){}^{14}\text{N}$ ۸
- شکل ۱-۳: نمایش تغییرات T_a بر حسب T_b برای واکنشهای ${}^3\text{He}(p,n){}^3\text{H}$ و ${}^{14}\text{N}(p,n){}^{14}\text{C}$ ۱۰
- شکل ۱-۴: (a) طیف پروتون های حاصل از واکنش ${}^{58}\text{Ni}({}^4\text{He},p){}^{61}\text{Cu}$ ۱۰
- شکل ۱-۴: (b) پرتوهای γ حاصل از واکنش ۱۱
- شکل ۱-۴: (c) نمودار تراز جزئی حاصل از ${}^{61}\text{Cu}$ ۱۱
- شکل ۱-۵: آرایش اساسی تجربی برای تعیین سطح مقطع یک واکنش هسته‌ای (a) نمای جانبی ۱۷
- شکل ۱-۵: آرایش اساسی تجربی برای تعیین سطح مقطع یک واکنش هسته‌ای (b) نما، در امتداد باریکه ۱۷
- شکل ۱-۶: آرایش اساسی تعیین سطح مقطع دیفرانسیلی واکنش ۲۰
- شکل ۱-۲: تصویر شماتیکی از سیکلوترون ۲۹
- شکل ۲-۲: یک سیکلوترون تجاری، RDS ECLIPSE ۳۱
- شکل ۲-۳: تولید رادیونوکلئید در سیکلوترون ۳۳
- شکل ۳-۱: تأثیر Cl^- و CO_3^{2-} روی فعالیت جذب شده بر ذرات رزین با اندازه‌ی $212 - 250 \mu\text{m}$ ۴۳
- شکل ۳-۲: تأثیر Fe^{3+} بر جذب ${}^{18}\text{F}$ روی کوارتز ۴۴
- شکل ۳-۳: تأثیر Fe^{3+} بر جذب ${}^{18}\text{F}$ روی MCC ۴۴
- شکل ۳-۴: تأثیر Fe^{3+} بر پتانسیل زتای zeta کوارتز ۴۵
- شکل ۳-۵: فعالیت یک ذره در شرایط بهینه ۴۵
- شکل ۳-۶: سطح مقطع کل برای واکنش ${}^{14}\text{N}(p,\alpha){}^{11}\text{C}$ ۵۱

- شکل ۳-۷: سطح مقطع کل برای واکنش $^{14}N(p, \alpha)^{11}C$ ۵۱
- شکل ۳-۸: نرخ واپاشی و نرخ تولید ۵۲
- شکل ۳-۹: سیستم هدف ۵۶
- شکل ۳-۱۰: سیستم پردازش شیمیایی ۵۹
- شکل ۳-۱۱: شمایی از سیستم CPS مورد استفاده ۶۰
- شکل ۳-۱۲: آهنگ شمارش جریان ۶۱
- شکل ۳-۱۳: ارتباط فشار و زمان در سیستم CPS ۶۲
- شکل ۳-۱۴: نمای یک طیف سنج استاندارد ۶۷
- شکل ۳-۱۵: مد واپاشی ^{11}C ۶۷
- شکل ۳-۱۶: پنج نقطه زمانی در اندازه گیری λ ۶۸
- شکل ۳-۱۷: اندازه طیف گسیلی برای ^{137}Cs ۷۲
- شکل ۳-۱۸: اندازه طیف خطی برای ^{22}Na ۷۲
- شکل ۳-۱۹: اندازه طیف خطی برای ^{11}CO ۷۳
- شکل ۴-۱: شکلی از گلبول قرمز خون ۷۵
- شکل ۴-۲: ساختار جز خونی ۷۶
- شکل ۴-۳: ساختار مارپیچی هموگلوبین ۷۶
- شکل ۴-۴: منحنی اشباع Hb (منحنی تفکیک اکسیژن) ۷۸
- شکل ۴-۵: طیف جذبی HbA (افراد بالغ) و HbF (جنین) ۸۰
- شکل ۴-۶: تغییرات درصد پیوندی CO و O₂ در کل لایه نازک خون با زمان ۸۲

- شکل ۴-۷: ابزار چرخش سرنگ در محیط آزمایشگاه نشاندارسازی RBC با ^{11}CO ۸۳
- شکل ۴-۸: فعالیت RBC بر حسب زمان مخلوط کردن ۸۴
- شکل ۴-۹: شکل شماتیک سیستم نشاندارسازی نمونه آزمایشگاهی ۸۵
- شکل ۴-۱۰: آشکارساز سوسوزن جهت تعیین فعالیت سلول های خونی نشاندار شده ۸۶
- شکل ۴-۱۱: دوز گرماده کاپینتک ۸۶
- شکل ۴-۱۲: شکلی از همفرودی یک آشکارساز ۸۷
- شکل ۴-۱۳: طیف جذب HbA (افراد بالغ) و HbF (جنین) ۸۸
- شکل ۴-۱۴: نتیجه اولیه برای نشاندارسازی ۸۹
- شکل ۴-۱۸: فرآیند ردیابی برای یک RBC نشاندارشده منفرد جهت ردیابی ۹۱
- شکل ۶-۱: محفظه هدف ۱۰۲
- شکل ۶-۲: عبور پروتون از ورق آلومینیم به داخل محفظه ۱۰۲
- شکل ۶-۳: تولید ذرات در محفظه هدف ۱۰۴
- شکل ۶-۴: ذرات موجود در محفظه ۱۰۴
- شکل ۶-۵: نهشت انرژی درون محفظه هدف ۱۰۵
- شکل ۶-۶: توزیع انرژی ذرات آلفا ۱۰۵
- شکل ۶-۷: توزیع انرژی کل ذرات تشکیل شده در محفظه هدف ۱۰۶
- شکل ۶-۸: تولید ذرات در محفظه هدف حاوی اندکی اکسیژن ۱۰۷
- شکل ۶-۹: ذرات موجود در محفظه، حاوی اندکی اکسیژن ۱۰۷
- شکل ۶-۱۰: نهشت انرژی درون محفظه هدف حاوی اندکی اکسیژن ۱۰۸
- شکل ۶-۱۱: توزیع انرژی ذرات آلفا حاوی اندکی اکسیژن ۱۰۸

شکل ۶-۱۲: توزیع انرژی کل ذرات تشکیل شده در محفظه‌ی هدف حاوی اندکی اکسیژن ۱۰۹

فهرست جداول

- جدول ۱-۱: واکنشهای هسته های متوسط و سنگینی ۱۵
- جدول ۱-۲: مشخصات رادیونوکلئیدهای متداول ۴۵
- جدول ۲-۲: سیکلوترون ها با سازنده های مختلف ۵۱
- جدول ۲-۳: تولید و ویژگی های گسیلنده های پوزیترون متداول ۵۵
- جدول ۱-۳: فعالیت تئوری ۷۳
- جدول ۲-۳: مشخصات ویژه ی سوسوزن ها ۸۴

(شبیه سازی برخورد واکنش مستقیم $^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$ توسط کد FLUKA)

(مهدی مرادی)

کربن-۱۱ نیمه عمری در حدود ۲۰/۳۹ دقیقه دارد و می‌تواند توسط برهمکنش‌های $^{10}\text{B}(p,n)^{11}\text{C}$ ، $^{10}\text{B}(d,n)^{11}\text{C}$ ، $^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$ در سیکلوترون تولید شود. در دو برهمکنش اول B_2O_3 هدف است و گاز نیتروژن برای برهمکنش با پروتون نیز به عنوان هدف مورد استفاده می‌باشد. هم ^{11}CO و هم $^{11}\text{CO}_2$ توسط هدف بور و با استفاده از پروتون های ۱۱ تا ۱۷ MeV تولید می‌شوند که پس از آن توسط گاز های طبیعی تخلیه می‌شود. صرف نظر از اینکه ^{11}CO تماما به شکل گاز $^{11}\text{CO}_2$ اکسید شود یا اینکه $^{11}\text{CO}_2$ تماما بشکل گاز ^{11}CO کاهیده شود، ^{11}CO و $^{11}\text{CO}_2$ عموما بعنوان ماده‌ی اولیه در آماده سازی ترکیبات مفید مختلف آزمایشگاهی از قبیل پالمیتیت- ^{11}C برای میکرورادیکال های متابولیک جهت تصویر سازی PET و نشاندار سازی سلول خونی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

متداول ترین روش برای تولید ^{11}C برهمکنش $^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$ با پروتون های ۱۳ تا ۱۷ MeV است. هنگامیکه هدف نیتروژن ۱۴ خالص با اکسیژن مخلوط می‌شود، ^{11}CO و $^{11}\text{CO}_2$ تولید می‌شوند. در ابتدا $^{11}\text{CO}_2$ با در تله انداختن $^{11}\text{CO}_2$ در تله‌ی نیتروژن مایع بازیابی شده و سپس بوسیله‌ی هلیوم یا گرم کردن تله تخلیه می‌شود. بازده می‌تواند در گستره‌ی کوری (GBq) با قطعیت ۹۹.۹٪ است. در این مطالعه تولید ^{11}C و ^{11}CO در محفظه‌ی نیتروژن را توسط پرتوافکنی پروتون با کد فلوکا شبیه سازی کرده ایم و با مقایسه‌ی انرژی های مختلف، انرژی بهینه‌ی تولید (۱۵ MeV) را بدست آوردیم.

کلید واژه: رادیونوکلئید، هدف، فلوکا

Abstract**(Simulation of direct activation contact $^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$ by FLUKA code)****(Mahdi Moradi)**

Carbon-11 has a half-life of 20.39 minutes and can be produced by $^{10}\text{B}(d,n)^{11}\text{C}$, $^{11}\text{B}(p,n)^{11}\text{C}$, and $^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$ reactions in the cyclotron. In the first two reactions, B_2O_3 is the target and nitrogen gas in the third. Both ^{11}Co and $^{11}\text{Co}_2$ are produced in boron targets by using 11–17 MeV protons, which are then flushed out by neutral gases. Either ^{11}Co is oxidized to have all the gas in $^{11}\text{Co}_2$ form, or $^{11}\text{Co}_2$ is reduced to have all the gas in ^{11}Co form. Both ^{11}Co and $^{11}\text{Co}_2$ are commonly used as precursors in the preparation of various clinically useful compounds, such as ^{11}C -palmitate for myocardial metabolic imaging by PET.

The most common method of ^{11}C production is the $^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$ reaction with 13–17 MeV protons. When the pure ^{14}N target is mixed with traces of oxygen, both ^{11}Co and $^{11}\text{Co}_2$ are produced. $^{11}\text{Co}_2$ is recovered by initially trapping $^{11}\text{Co}_2$ in a liquid nitrogen trap and later removing it by flushing with helium or heating the trap. The yield can be in curie (GBq) range with 99.9% purity. In this study we simulated ^{11}C and ^{11}Co produced in nitrogen chamber with proton bombardments by FLUKA code and with comparison different energy we get production yield of energy (15 MeV).

Key word: Radionuclide, Target, Fluka

مقدمه

بیشتر از ۳۰۰۰ رادیونوکلئید تا به حال شناخته شده اند که برخی از آنها تقریباً پایدار هستند و از بقایای رادیواکتیو می‌باشند. اکثر رادیونوکلئیدها به صورت مصنوعی در سیکلوترون یا راکتور ساخته می‌شوند و در صنایع و نیز پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی از این رادیونوکلئیدها شامل ^{18}F ، ^{15}O ، ^{13}N ، ^{11}C و ... می‌باشند و در سیکلوترون تولید می‌شوند. رادیونوکلئیدهای تولید شده ابتدا نشاندار شده و سپس برای استفاده در صنعت یا پزشکی استفاده می‌شود. سه روش برای تولید ذره نشاندار بکار می‌رود که عبارتند از: روش واکنش مستقیم، روش تبادل یون و روش اصلاح سطح.

در روش واکنش مستقیم، ذره‌ی هدف تحت تابش باریکه‌ی پروتو با انرژی حدود 33 MeV قرار می‌گیرند و طی واکنش هسته‌ای به اتم دیگری تبدیل می‌شود. در روش تبادل یون، فعال سازی بصورت غیر مستقیم صورت می‌گیرد و با توجه به ساختار شیمیایی ذره قرار گرفته در محلول، تبادل یون با یکی از عناصر آن روی می‌دهد. در روش اصلاح سطح، به کمک فعال سازی شیمیایی توسط یون های فلزی، جذب ذره روی سطح ماده‌ی مورد نظر به میزان زیادی افزایش می‌یابد. در روش واکنش مستقیم اگرچه فعالیتی در حدود 300 تا $1000 \mu\text{Ci}$ برای یک ذره قابل دستیابی است اما به دلیل تولید حرارت، ابعاد ذره به حدود 1 mm محدود می‌شود، در روش تبادل یون اگرچه میزان فعالیت قابل حصول برای یک ذره کمتر از روش قبل است اما می‌توان ذراتی با ابعاد کوچکتر را نشاندار کنیم. با توجه به محدودیت روش تبادل یون به چند ترکیب خاص از روش اصلاح سطح برای نشاندار سازی ترکیبات بیشتر با فعالیت بالاتر استفاده می‌شود و پتانسیل نشاندار سازی ذره افزایش می‌یابد. ذره‌ی نشاندار شده برای تصویربرداری‌های صنعتی و پزشکی استفاده می‌شود.

در این پایان نامه ^{11}C که دارای طیف وسیعی از کاربردها (نشاندار سازی سلول خونی و ...) می‌باشد مورد توجه قرار گرفت. نیمه عمر ^{11}C $20/39$ دقیقه می‌باشد، چند واکنش هسته‌ای مشخص می‌توانند ^{11}C تولید کنند که عبارتند از: $^{14}N(p, \alpha)^{11}C$ ، $^{11}B(p, n)^{11}C$ ، $^{11}B(d, 2n)^{11}C$ ، $^{10}B(d, n)^{11}C$ و $^{12}C(^3He, \alpha)^{11}C$. واکنش هسته‌ای $^{14}N(p, \alpha)^{11}C$ بوسیله بمباران پروتون از نیتروژن خالص بدست می‌آید. میزان بسیار ناچیزی از اکسیژن همراه با نیتروژن می‌تواند تولید $^{11}CO_2$ (دی اکسید کربن فعال شده) در محفظه هدف نماید. مونواکسید کربن ^{11}CO می‌تواند بوسیله واکنش کاهشی $^{11}CO_2$ با پودر روی در $390^\circ C$ و یا با کلر اکتیو شده در $900^\circ C$ تولید شود و برای کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد. با استفاده از کد شبیه سازی فلوکا، محفظه‌ی استوانه‌ای با شعاع 5 cm و طول 10 cm حاوی نیتروژن خالص در دمای $293^\circ C$ و فشار 5 atm و نیز محفظه‌ی مشابه حاوی 2% اکسیژن به همراه 98% نیتروژن توسط پروتو پروتون در انرژی‌های مختلف بمباران شده و برخورد واکنش مستقیم $^{14}N(p, \alpha)^{11}C$ شبیه سازی گردید، ^{11}C و $^{11}CO_2$ تولید شده، و بهترین بهره‌ی واکنش برای تولید ^{11}C در انرژی 15 MeV بدست آمد.

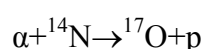
در فصل اول به معرفی و چگونگی تولید واکنش‌های هسته‌ای پرداخته‌ایم، در فصل دوم تولید رادیونوکلئیدها توسط سیکلوترون و راکتور توضیح داده شده است، در فصل سوم روش‌های نشاندارسازی ذره‌ی گسیلنده‌ی پوزیترون شرح داده شده و شیوه‌ی تولید کربن - ۱۱ بیان شده است، در فصل چهارم کاربرد کربن- ۱۱ در نشاندارسازی سلول خونی بحث شده است، فصل پنجم معرفی کلی از کد شبیه سازی فلوکا صورت گرفته و در فصل ششم شبیه سازی فلوکا انجام شده و نتایج بررسی شده است.

فصل اول

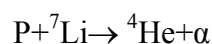
واکنشهای هسته‌ای

مقدمه

هرگاه ذرات انرژی دار حاصل از یک رآکتور یا شتابنده (یا حتی حاصل از یک چشمه رادیو اکتیو) به توده ای از ماده برخورد کنند، این امکان وجود دارد که واکنش هسته ای صورت گیرد. چنین واکنشی اولین بار با استفاده از ذرات آلفای حاصل از یک چشمه رادیو اکتیو در آزمایشگاه را در فورد انجام گرفت. در برخی از این آزمایشگاههای اولیه، ذرات آلفا فقط به صورت کشسان توسط هسته های هدف پراکنده می شدند. این پدیده که به نام پراکندگی رادرفورد معروف است، اولین شاهد دال بر وجود هسته های اتمی را به دست داد. در آزمایشهای دیگر، رادفورد موفق شد که فرایند تغییر یا تبدیل نوع هسته را همانند آنچه در سال ۱۹۱۹ میلادی در واکنش زیر صورت گرفت، مشاهده کند



اولین شتاب دهنده ذره که قادر به انجام واکنشهای هسته ای بود، توسط کاک کرافت و والتون ساخته شد. نامبردگان در سال ۱۹۳۰ میلادی واکنش زیر را مشاهده کردند



در این فصل انواع مختلف واکنشهای هسته ای و خواص آنها را مورد بحث قرار می دهیم. در بیشتر حالات با پرتابه های سبک معمولاً $A \leq 4$ ، سرو کار داریم که بر هدفهای سنگین فرود می آیند، و با واکنشهایی سرو کار داریم که تحت نام «انرژی پایین» یعنی از مرتبه MeV به ازای هر نوکلئون یا کمتر، رده بندی می شوند.

در گستره ۱۰۰ MeV - ۱ GeV، که انرژی میانی نام دارد، تولید مزونی می تواند صورت گیرد و پروتونها و نوترونها به یکدیگر تبدیل شوند. در انرژی بالا، انواع ذرات را می توان تولید کرد، و حتی می توانیم آرایش کوارکها را هم که سازنده نوکلئونها هستند تغییر داد.