



دانشگاه ساری
پایه

شتاب‌دهنده‌های ذرات و اپتیک باریکه‌های یونی

(رشته فیزیک)

دکتر افضل رقوی

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 پر بار 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 مطالب کتاب

نه

پیشگفتار

فصل اول: مفاهیم، تاریخچه و کاربردها

۱

هدف کلی

۱

هدف‌های یادگیری

۱

مقدمه

۱

۱-۱ مفاهیم اولیه

۲

۲-۱ قلمروی فیزیک شتاب‌دهنده‌ها

۴

۳-۱ تاریخچه

۵

۴-۱ کاربردهای شتاب‌دهنده‌ها

۱۲

خلاصه فصل اول

۱۴

خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل اول

۱۵

خودآزمایی تشریحی فصل اول

۱۷

فصل دوم: اصول شتاب‌دهی ذرات باردار

۱۹

هدف کلی

۱۹

هدف‌های یادگیری

۱۹

مقدمه

۱۹

۱-۲ سینماتیک نسبیتی

۲۱

۲-۲ معادلات حرکت ذره باردار در میدان مغناطیسی

۲۳

۳-۲ دستگاه مختصات خمیده

۲۶

۴-۲ گسیلندگی پرتو

۳۱

۵-۲ گسیلندگی بهنجار

۴۱

خلاصه فصل دوم

۴۲

خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل دوم

۴۳

خودآزمایی تشریحی فصل دوم

۴۴

۴۷	فصل سوم: میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی
۴۷	هدف کلی
۴۷	هدف‌های یادگیری
۴۷	مقدمه
۴۸	۱-۳ میدان الکتروستاتیک یکنواخت
۵۰	۲-۳ میدان الکتروستاتیک چهارقطبی
۵۱	۳-۳ میدان الکتروستاتیک بار - فضا
۵۳	۴-۳ میدان مغناطیسی حاصل از یک باریکه بار
۵۴	۵-۳ میدان مغناطیسی سیم‌لوله
۵۵	۶-۳ میدان مغناطیسی چنبره‌ای
۵۶	۷-۳ میدان دوقطبی مغناطیسی
۵۸	۸-۳ چهارقطبی مغناطیسی
۵۹	۹-۳ میدان مغناطیسی قطاعی
۶۱	۱۰-۳ بسط چندقطبی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی
۶۵	خلاصه فصل سوم
۶۷	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل سوم
۶۸	خودآزمایی تشریحی فصل سوم
۷۱	فصل چهارم: اپتیک باریکه‌های ذرات باردار
۷۱	هدف کلی
۷۱	هدف‌های یادگیری
۷۱	مقدمه
۷۲	۱-۴ مروری بر اپتیک هندسی
۷۶	۲-۴ ماتریس انتقال
۷۷	۱-۲-۴ انتشار در فضای رانش
۷۸	۲-۲-۴ عدسی نازک
۷۹	۳-۲-۴ ماتریس انتقال چهارقطبی الکتریکی و مغناطیسی
۸۱	۴-۲-۴ ماتریس انتقال قطاع مغناطیسی
۸۵	۳-۴ ترکیب دستگاه‌های اپتیکی
۸۷	۴-۴ عدسی‌های چهارقطبی دوگانه و سه‌گانه
۹۰	خلاصه فصل چهارم
۹۲	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل چهارم
۹۳	خودآزمایی تشریحی فصل چهارم
۹۷	فصل پنجم: شتاب‌دهنده‌های الکتروستاتیک
۹۷	هدف کلی
۹۷	هدف‌های یادگیری

۹۷	مقدمه
۱۰۰	۵-۱ چشمه‌های یونی و الکترونی
۱۰۱	۵-۱-۱ چشمه‌های الکترونی
۱۰۲	۵-۱-۲ چشمه‌های یونی
۱۰۶	۵-۲ منابع ولتاژ بالا
۱۰۶	۵-۲-۱ مبدل ولتاژ القایی
۱۰۸	۵-۲-۲ مولد ولتاژ آبشاری
۱۱۲	۵-۳ شتاب‌دهنده کوکرافت - والتون
۱۱۴	۵-۴ شتاب‌دهنده واندوگراف
۱۱۸	۵-۵ شتاب‌دهنده تاندم
۱۱۹	۵-۶ کاربردهای شتاب‌دهنده‌های الکتروستاتیک
۱۲۱	خلاصه فصل پنجم
۱۲۲	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل پنجم
۱۲۳	خودآزمایی تشریحی فصل پنجم
۱۲۵	فصل ششم: شتاب‌دهنده‌های خطی (لیناک)
۱۲۵	هدف کلی
۱۲۵	هدف‌های یادگیری
۱۲۵	مقدمه
۱۲۶	۶-۱ لیناک‌های رادیوبسامدی (RF)
۱۲۶	۶-۱-۱ لیناک ویدرو
۱۳۱	۶-۱-۲ لیناک آلوارز
۱۳۴	۶-۲ لیناک القایی
۱۴۰	۶-۳ کاربردهای شتاب‌دهنده‌های خطی
۱۴۱	۶-۴ لیناک بازیافت انرژی (ERL)
۱۴۳	خلاصه فصل ششم
۱۴۴	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل ششم
۱۴۵	خودآزمایی تشریحی فصل ششم
۱۴۷	فصل هفتم: شتاب‌دهنده‌های دایروی
۱۴۷	هدف کلی
۱۴۷	هدف‌های یادگیری
۱۴۷	مقدمه
۱۴۸	۷-۱ شتاب‌دهنده بتاترون
۱۵۲	۷-۲ سیکلوترون
۱۶۲	۷-۳ سینکروترون و سینکروترون
۱۶۵	۷-۴ کاربردهای شتاب‌دهنده‌های دایروی

۱۶۶	خلاصه فصل هفتم
۱۶۷	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل هفتم
۱۶۸	خودآزمایی تشریحی فصل هفتم
۱۷۱	فصل هشتم: شتاب‌دهنده‌های لیزری و پلاسمایی
۱۷۱	هدف کلی
۱۷۱	هدف‌های یادگیری
۱۷۱	مقدمه
۱۷۴	۸-۱ شتاب‌دهنده لیزر الکترون آزاد معکوس (IFEL)
۱۷۹	۸-۲ شتاب‌دهنده‌های لیزر- پلاسما
۱۸۱	۸-۲-۱ نیروی گرانرو
۱۸۴	۸-۲-۲ نوسانات پلاسمایی
۱۹۰	۸-۳ شتاب‌دهنده یون لیزری
۱۹۱	خلاصه فصل هشتم
۱۹۲	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل هشتم
۱۹۳	خودآزمایی تشریحی فصل هشتم
۱۹۵	فصل نهم: تابش پرتوی ایکس سینکروترونی
۱۹۵	هدف کلی
۱۹۵	هدف‌های یادگیری
۱۹۵	مقدمه
۱۹۹	۹-۱ تابش سینکروترونی
۲۰۱	۹-۱-۱ شتاب خطی
۲۰۲	۹-۱-۲ شتاب دایروی
۲۰۴	۹-۱-۳ توزیع زاویه‌ای تابش سینکروترون
۲۰۷	۹-۲ منابع تابش سینکروترونی
۲۰۹	۹-۳ ویژگی‌های تابش نوسان‌ساز
۲۱۳	خلاصه فصل نهم
۲۱۴	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل نهم
۲۱۵	خودآزمایی تشریحی فصل نهم
۲۱۷	پیوست الف
۲۳۶	پیوست ب
۲۳۷	پیوست ج
۲۳۹	پاسخ‌نامه
۲۵۳	واژه‌نامه فارسی - انگلیسی
۲۵۵	واژه‌نامه انگلیسی - فارسی
۲۵۷	کتابنامه

پیشگفتار

کتاب شتاب‌دهنده‌های ذرات و اپتیک باریکه‌های یونی به‌عنوان یک کتاب درسی مقدماتی برای تدریس در مقطع کارشناسی رشته فیزیک و مطابق با سرفصل‌های مصوب وزارت علوم، تحقیقات و فناوری برای این درس تهیه و تدوین شده‌است. موضوع شتاب‌دهنده‌های ذرات به‌طور عام یک موضوع بسیار گسترده و پیچیده شامل مباحثی در فیزیک سیستم‌های بس‌ذره‌ای برهم‌کنشی است که با شاخه‌های مختلف فیزیک از قبیل نسبیت، الکترومغناطیس، فیزیک محاسباتی، ترمودینامیک و مکانیک آماری ارتباط اجتناب‌ناپذیر دارد. علاوه بر این، فناوری لازم در طراحی و ساخت عملی شتاب‌دهنده‌ها نیز مستلزم پیشرفته‌ترین فناوری‌های روز جهان است که هنوز سهم زیادی از آن در انحصار تعداد معدودی از کشورهای پیشرفته صنعتی قرار دارد. با توجه به این، کاملاً محسوس است که پوشش دادن چنین موضوع گسترده‌ای در قالب یک کتاب، هرچند هم در سطح پیشرفته، کار ممکن نخواهد بود و نیاز به تفکیک مباحث مختلف آن به‌صورت زیرشاخه‌های مستقل از هم خواهد داشت. به همین دلیل در عمل نیز بیشتر کتاب‌های موجود در این زمینه به‌صورت تفکیک‌شده و موضوعی در رابطه با هریک از این زیرشاخه‌ها تألیف و تدوین شده‌اند. هدف دنبال‌شده در تدوین این کتاب تنها معرفی ابتدایی و مقدماتی فیزیک شتاب‌دهنده‌های ذرات جهت آشنایی دانشجویان با کلیات مربوط به این موضوع است. با وجود این دانشجویان برای استفاده بردن از مباحث مطرح‌شده در این کتاب به دانش پایه‌ای در زمینه فیزیک کلاسیک و مخصوصاً الکترومغناطیس نیاز خواهند داشت.

در میان کتاب‌های تألیف‌شده در زمینه شتاب‌دهنده‌ها رهیافت‌های متفاوتی وجود دارد که مؤلفین بسته به هدف و کاربردی که در نظر داشته‌اند، آن‌ها را دنبال کرده‌اند. به‌عنوان مثال، در منبع شماره (ب) بیشتر به نیاز دانشجویان و محققین ذرات بنیادی توجه شده‌است^۱ درحالی‌که در منابع (۱۰) و (۲۱) بیشتر فیزیک شتاب‌دهنده‌ها از دیدگاه نظری مدنظر بوده و در منبع (۲۵) صرفاً به جنبه کاربردی شتاب‌دهنده‌ها پرداخته شده‌است. در منبع (۲۶) نیز سعی شده از دیدگاهی همه‌جانبه به این موضوع پرداخته شود. منابع شماره (۳)، (۱۴)، (۱۶) و (۲۳) نیز به شتاب‌دهنده‌هایی از نوع خاص اختصاص دارند. مرجع شماره (۱۸) یک کتاب به زبان ساده و تقریباً غیرتخصصی است که برای هر فردی، حتی بدون نیاز به بینش وسیع در فیزیک، قابل استفاده است.

با توجه به این‌که کتاب حاضر به‌عنوان یک کتاب مقدماتی در رابطه با شتاب‌دهنده‌ها برای دانشجویان فیزیک و مستقل از گرایش تحصیلی آن‌ها تدوین شده‌است، سعی بر آن بوده که در آن از دیدگاهی مشتمل بر مهم‌ترین موضوعات مرتبط با شتاب‌دهنده‌ها به این موضوع پرداخته شود. با وجود این، محدودیت سطح مورد انتظار کتاب به‌عنوان یک منبع درسی سه‌واحدی در مقطع کارشناسی مانع از آن بوده‌است که به موضوعات مورد بحث به‌صورت عمیق و با جزئیات پرداخته شود. در عین حال تمام آنچه در رابطه با موضوعات این کتاب مورد نیاز است در منابع معرفی‌شده در انتهای کتاب موجود است.

در این کتاب حتی‌المقدور سعی شده‌است در ارائه مطالب جنبه خودآموزی مطالب نیز مورد نظر قرار گیرد، ولی باید توجه داشت که این خودآموزی فرایند خودبه‌خودی نبوده و نیاز به همکاری و هماهنگی دانشجو با روش‌های به‌کار رفته در کتاب دارد. خودآزمایی‌های مطرح‌شده و پاسخ دانشجو به آن‌ها در همین راستا است و بنابراین باید توسط دانشجوی مطالعه‌کننده کتاب جدی گرفته شود. برخی مطالب که پایه آن در دروس پیش‌نیاز این درس ارائه شده‌اند در اینجا بدون اثبات و فهرست‌وار آورده شده‌است و انتظار می‌رود که دانشجو تسلط کافی برای اثبات آن‌ها را داشته باشد. برخی از این قبیل مسائل به‌صورت خودآزمایی تشریحی در پایان هر فصل داده

۱. به کتابنامه رجوع شود.

شده است. بقیه مسائل آخر فصل نیز از مطالب متن کتاب استخراج شده و بنابراین حل خودآزمایی‌های پایان هر فصل جزء فرایند آموزشی کتاب محسوب شده و باید مورد اهتمام دانشجو قرار داشته باشد. به منظور حفظ جنبه خودآموزی کتاب، سعی شده تا حد امکان توضیحات لازم برای بعضی مفاهیم و پدیده‌ها که در نگاه اول نسبتاً پیچیده به نظر می‌رسند، ارائه شود. برای این منظور بعضی مطالب بعضاً با بیان‌های متفاوت تکرار شده است.

همان‌گونه که در بیشتر کتاب‌های مرتبط با سیستم‌های بزرگ مقیاس الکترومغناطیس مرسوم است، در این کتاب نیز دستگاه واحدهای متریک (MKS) مبنای محاسبات است. یک مورد استثناء در این مورد، واحد انرژی است که با توجه به مرتبه انرژی مورد استفاده در شتاب‌دهنده‌ها، بیشتر از واحد الکترون‌ولت (eV) و ضرایب آن استفاده شده است.

از آنجایی که توسعه فناوری شتاب‌دهنده‌ها در دهه‌های اخیر در غرب اتفاق افتاده است، به نظر می‌رسد که برای تاریخچه وقایع مرتبط با آن استفاده از تاریخ میلادی مانوس‌تر باشد. به همین دلیل تاریخ وقایع مختلف که در اینجا تنها در حد سال واقعه ذکر شده‌اند، برحسب سال میلادی بیان شده‌اند. شاید لازم به ذکر نباشد که در صورت نیاز می‌توان با کسر عدد ۶۲۱ از سال میلادی، سال شمسی متناظر با آن را به تقریب به دست آورد.

کتاب حاضر در قالب نه فصل مجزا طراحی شده که چهار فصل اول کتاب شامل مفاهیم و مقدمات اولیه‌ای است که دانستن آن‌ها برای درک فیزیک حاکم بر دستگاه‌های مختلف شتاب‌دهنده‌ها لازم است. دانشجویان رشته فیزیک قبل از اخذ این واحد درسی بیشتر این مقدمات را در دروس پیش‌نیاز این درس فرا گرفته‌اند. با وجود این، در اینجا به منظور یادآوری مجدد و همچنین در دسترس بودن جهت کاربرد در مباحث بعدی برخی مطالب با جزئیات مختصر تکرار شده‌اند. چهار فصل بعدی کتاب به تشریح چهار دسته مهم از شتاب‌دهنده‌ها، شامل شتاب‌دهنده‌های الکتروستاتیک (فصل ۵)، شتاب‌دهنده‌های خطی (فصل ۶)، شتاب‌دهنده‌های دایروی (فصل ۷) و شتاب‌دهنده‌های لیزری (فصل ۸) اختصاص داده شده است. در نهایت فصل نهم (با توجه به آخرین سرفصل ارائه شده از طرف وزارت علوم برای این درس در سال ۱۳۹۴ شمسی) به

موضوع تابش سینکروترونی پرتو ایکس می‌پردازد. علاوه بر نه فصل اصلی کتاب برخی مطالب کمکی نیز به صورت پیوست در انتهای کتاب ارائه شده‌اند که ممکن است در خلال مطالعه کتاب مفید واقع شوند.

در اینجا لازم می‌دانم که مراتب تشکر صمیمانه و خالصانه خود را از ویراستار محترم علمی کتاب، جناب آقای دکتر سعید محمدی که با نظرات خود موجبات غنای بیشتر مطالب این کتاب را فراهم آوردند، ابراز دارم. همچنین لازم می‌دانم که از زحمات دلسوزانه همکار گرامی‌ام جناب آقای مزدک زبردست که ویراستاری ادبی کتاب را برعهده داشته و با نظرات اصلاحی خود موجب رفع بسیاری از ایرادات نگارشی این کتاب شدند، تشکر کنم. با وجود این، مسلم است که متن کتاب هنوز خالی از ایرادات علمی و یا نگارشی نخواهد بود و رفع آن‌ها نیازمند همکاری تمامی استادان و صاحب‌نظرانی است که این کتاب را از دیدگاهی انتقادی مطالعه خواهند کرد.

افضل رقوی

استادیار فیزیک اتمی و مولکولی

دانشگاه پیام نور

شهریور ۱۳۹۵

E-mail: a_raghavi@pnu.ac.ir

فصل اول

مفاهیم، تاریخچه و کاربردها

هدف کلی

هدف کلی در این فصل، آشنایی ابتدایی با موضوعات اصلی مورد بحث در فیزیک شتاب‌دهنده‌ها است.

هدف‌های یادگیری

- آشنایی با موضوع فیزیک شتاب‌دهنده‌های ذرات و مفاهیم مرتبط با آن
- آشنایی با تاریخچه شتاب‌دهنده‌های ذرات
- آشنایی با کاربردهای شتاب‌دهنده‌ها در حوزه‌های مختلف

مقدمه

یک مجموعه پرشمار از ذرات پرانرژی و جهت‌مند در مقیاس اتمی و زیراتمی ابزار تحقیقاتی بسیار کارایی را تشکیل می‌دهند که در زمینه‌های علمی و فناوری ارزش کاربردی بسیار زیادی دارد. فیزیک شتاب‌دهنده‌های ذرات مبحثی است که در آن به بررسی خصوصیات این دسته از ذرات پرانرژی، روش‌ها و فناوری مورد نیاز جهت ایجاد، کنترل و به کارگیری آن‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۱ مفاهیم اولیه

از آنجایی که برهم‌کنش الکترومغناطیسی بین ذرات باردار و میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ساده‌ترین روش برای شتاب‌دادن به ذرات باردار است، شتاب‌دهنده‌های ذرات نیز غالباً بر این اساس بنا می‌شوند. البته ذرات پرانرژی خشی (مثل نوترون‌ها) نیز در تحقیقات و فناوری به همان اهمیت ذرات باردار هستند، ولی در عمل روش‌های مورد استفاده برای شتاب‌دهی به آن‌ها با آنچه به‌طور عام تحت عنوان شتاب‌دهنده‌های ذرات شناخته می‌شود، متفاوت است. ذرات پرشتاب خشی معمولاً به‌صورت یک محصول ثانویه و با استفاده از ذرات باردار پرشتاب به‌دست می‌آیند. از این‌رو وقتی صحبت از شتاب‌دهنده‌های ذرات پیش می‌آید، از جمله در کتاب حاضر، منظور تنها شتاب‌دهنده‌های ذرات باردار خواهد بود.

قبل از ورود به این مبحث، ابتدا به مرور تعاریف بعضی از اصطلاحات کلیدی پرکاربرد در شتاب‌دهنده‌های ذرات پرداخته خواهد شد که در این کتاب با آن‌ها برخورد می‌شود ولی ممکن است هنوز تعریف جامعی برای آن‌ها در ذهن خواننده مبتدی در موضوع فیزیک شتاب‌دهنده‌های ذرات وجود نداشته باشد.

الف) ذرهٔ باردار. ذرهٔ باردار، بنا به تعریف، عبارت است از یک ذرهٔ بنیادی یا غیربنیادی که دارای مقداری بار خالص مازاد مثبت یا منفی باشد. این ذرات همیشه به‌صورت ذرات نقطه‌ای فرض می‌شوند که می‌توان از ساختار داخلی آن‌ها صرف‌نظر کرد. تنها نوع برهم‌کنش حاکم بر آن‌ها برهم‌کنش با میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی از طریق نیروی لورنتس است. به‌علت کوچک‌بودن بیش از حد این ذرات از نیروی وزن آن‌ها نیز صرف‌نظر می‌شود. چند نمونه از این ذرات همراه با خصوصیات فیزیکی آن‌ها در جدول (۱-۱) آورده شده‌است.

ب) شتاب‌دهی به ذرات. اصطلاح شتاب‌دهی به ذرات به معنی فرایند انتقال انرژی جنبشی به ذرات از طریق اعمال میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی است. نیروی عامل این شتاب، نیروی الکترومغناطیسی لورنتس است که به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1-1)$$

جدول ۱-۱. خصوصیات برخی ذرات باردار که در شتاب‌دهنده‌های متداول شتاب می‌گیرند.

نوع ذره	بار الکتریکی (C)	جرم (kg) انرژی	سکون (MeV)
الکترون	-1.6×10^{-19}	9.11×10^{-31}	۰/۵۱۱
پروتون	$+1.6 \times 10^{-19}$	1.67×10^{-27}	۹۳۸/۰
دوترون (D^+)	$+1.6 \times 10^{-19}$	3.34×10^{-27}	۱۸۵۷/۰
تریتون (T^+)	$+1.6 \times 10^{-19}$	5.0×10^{-27}	۲۸۰۹/۰
He^+	$+1.6 \times 10^{-19}$	6.64×10^{-27}	۳۷۲۸/۰
He^{2+} (ذره آلفا)	$+3.2 \times 10^{-19}$	6.64×10^{-27}	۳۷۲۸/۰
C^+	$+1.6 \times 10^{-19}$	1.99×10^{-26}	1.12×10^4
U^+	$+1.6 \times 10^{-19}$	3.95×10^{-25}	2.22×10^5

خودآزمایی ۱-۱. کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین نسبت بار به جرم در این جدول

مربوط به کدام ذرات است؟

با دقت در این رابطه بلافاصله می‌توان دریافت که تنها میدان الکتریکی می‌تواند انرژی جنبشی ذرات را تغییر دهد. نیروی مغناطیسی همیشه بر جهت حرکت عمود بوده و کار مکانیکی انجام نمی‌دهد. به عبارت دیگر، نیروی الکتریکی باعث شتاب مماسی ذره می‌شود درحالی‌که نیروی مغناطیسی شتاب جانب مرکز تولید می‌کند. از نیروی مغناطیسی بیشتر به منظور هدایت و محصورسازی ذرات استفاده می‌شود.

خودآزمایی ۲-۱. با توجه به رابطه (۱-۱)، مؤلفه‌های مماسی و شعاعی شتاب

ذره‌ای به جرم m و بار q در میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی چیست؟

(ج) باریکه بار: منظور از باریکه بار (یا پرتو بار)، مجموعه‌ای از ذرات باردار است

که سه مشخصه زیر دارند:

- انرژی جنبشی ذرات در مقایسه با انرژی حرارتی آن‌ها خیلی زیاد است.
- ذرات دارای پراکندگی انرژی^۱ کوچکی هستند.
- ذرات تشکیل‌دهنده باریکه تقریباً در یک جهت حرکت می‌کنند.

منظور از پراکندگی انرژی، میزان انحراف نسبی انرژی ذرات نسبت به مقدار میانگین آن است.

ح) تپ بار. به یک دسته متناهی و بسیار کوتاه از ذرات باردار یک تپ (یا پالس) بار گفته می‌شود. این تپ‌ها نیز مانند مشابه نوری آن‌ها، اغلب برحسب زمان اندازه‌گیری می‌شوند. منظور از این زمان، زمانی است که طول می‌کشد تا پالس از یک نقطه معین در مسیرش عبور کند.

خودآزمایی ۱-۳. طول یک تپ الکترونی $1/0 \text{ ns}$ که با سرعت $0.9c$ در حال انتشار است برحسب متر چقدر خواهد بود؟

خ) تابش سینکروترون^۱ (SR). بنا بر نظریه الکترومغناطیس، هر ذره باردار وقتی حرکت شتاب‌دار (شتاب مثبت) دارد از خود تابش الکترومغناطیسی ساطع می‌کند. این تابش تحت عنوان تابش سینکروترونی شناخته می‌شود. در شتاب‌دهنده‌های ذرات نیز وجود این نوع تابش اجتناب‌ناپذیر بوده و به عنوان یکی از محصولات آن مورد توجه است. البته این پدیده از دیدگاه شتاب‌دهی به ذرات یک پدیده مزاحم به حساب می‌آید، زیرا سهم زیادی از انرژی داده‌شده به دستگاه را به صورت تابش هدر می‌دهد. با وجود این، تابش سینکروترونی به عنوان یک چشمه تابش پرانرژی کاربردهای فراوانی پیدا کرده است تا آنجا که امروزه نوع خاصی از شتاب‌دهنده‌ها صرفاً به منظور تولید این نوع از تابش ساخته می‌شوند.

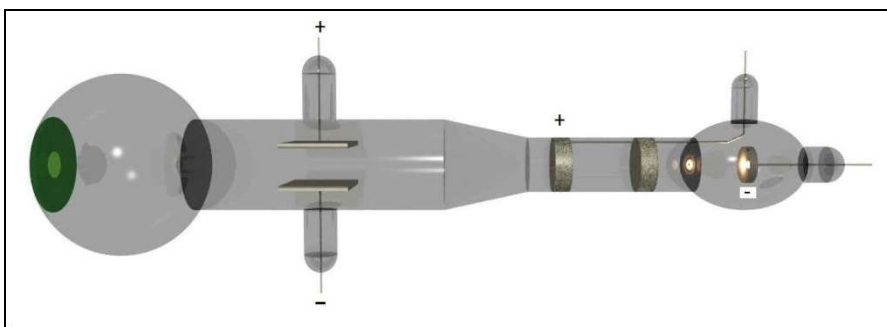
۱-۲ قلمروی فیزیک شتاب‌دهنده‌ها

تحقیقات در زمینه شتاب‌دهنده‌های ذرات دامنه‌ای گسترده و متنوع دارد. دامنه بسیار وسیعی از پارامترها متناسب با کاربردهای مختلف به همراه فناوری‌های گوناگون که محدوده جریان‌هایی از حدود 10^{-9} A تا 10^6 A و پالس‌هایی به طول زمانی چند نانوثانیه تا جریان‌های پیوسته را شامل می‌شود. ذرات شتاب‌گیرنده از الکترون‌ها تا یون‌های سنگین با تفاوت جرمی حدود 10^6 برابر را شامل می‌شود و انرژی مفید پرتوهای بار نیز از حدود چند الکترون‌ولت تا چند تراالکترون‌ولت (10^{12} eV) متغیر است.

شتاب‌دهنده‌ها از لحاظ ساختاری به دو دسته کلی شتاب‌دهنده‌های خطی و شتاب‌دهنده‌های دایروی تقسیم‌بندی می‌شوند. شتاب خطی ذرات باردار حاصل برهم‌کنش با میدان الکتریکی است درحالی‌که شتاب دایروی آن‌ها از میدان مغناطیسی ناشی می‌شود. البته همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، شتاب دایروی باعث افزایش انرژی ذرات نمی‌شود و افزایش انرژی صرفاً از طریق میدان الکتریکی صورت می‌گیرد.

۳-۱ تاریخچه

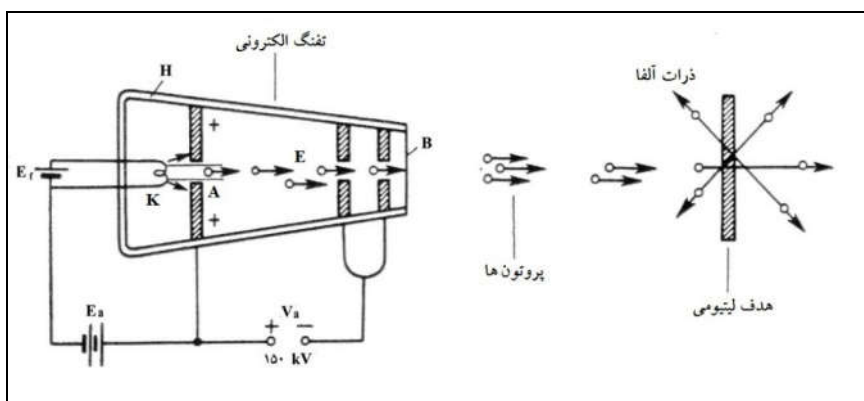
از لحاظ تاریخی می‌توان وسیله‌ای را که تامسون در سال ۱۸۹۷ میلادی از آن در کشف الکترون استفاده کرد به‌عنوان اولین شتاب‌دهنده ذرات ساخت بشر به حساب آورد، هر چند در آن زمان به این دستگاه شتاب‌دهنده گفته نمی‌شد. دستگاه تامسون در حقیقت یک لامپ تخلیه الکتریکی متشکل از یک لوله شیشه‌ای حاوی گاز با فشار پایین بود که در دو سر آن دو الکتروود با اختلاف پتانسیل زیاد قرار داشت. این اختلاف پتانسیل باعث تخلیه الکتریکی گاز شده و جریان الکتریکی را از یک الکتروود به الکتروود دیگر برقرار می‌کرد. (شکل ۱-۱)



شکل ۱-۱. ساختار لامپ پرتو کاتدی تامسون که به‌وسیله آن برای اولین بار سرعت انتشار الکترون‌ها را اندازه‌گیری کرد.

دستگاه‌هایی از این نوع که در شمار شتاب‌دهنده‌های الکتروستاتیک قرار دارند، امروزه به‌وفور در اطراف ما درحال کارند. تلویزیون‌های لامپی، نمایش‌گرهای لامپی رایانه، لامپ‌های مهتابی و لامپ‌های نئون از جمله این دستگاه‌ها هستند.

اما دستگاهی که برای اولین بار تحت عنوان شتاب‌دهنده از نوع خطی ساخته شد، وسیله‌ای بود که آقای واندوگراف^۱، از دانشگاه ماساچوست ایالات متحده، در سال ۱۹۳۱ میلادی اختراع کرد. یک سال بعد از او کوکرافت^۲ و والتون^۳ مشترکاً نمونه دیگری از این دستگاه را ساختند. آن‌ها به کمک آن اولین واکنش‌های هسته‌ای را به وسیله ذراتی که به صورت مصنوعی شتاب گرفته بودند، به انجام رساندند. ساختار ساده‌شده این دستگاه که در آن زمان به آن تفنگ الکترونی^۴ گفته می‌شد، در شکل (۲-۱) نشان داده شده‌است. این دستگاه شامل یک محفظه H، یک کاتد K و داغ A و الکترودهای شتاب‌دهنده A و E (شکل ۲-۱) بود.



شکل ۲-۱. طرح اولیه شتاب‌دهنده تفنگ الکترونی کوکرافت و والتون

الکترون‌های گسیل شده از کاتد K به وسیله میدان الکتریکی ایجاد شده بین کاتد K و آند A که به آن ولتاژ پایین مثبت E_a اعمال شده‌است، شتاب می‌گیرند. هنگام عبور این باریکه الکترونی از میان گاز هیدروژن موجود در داخل محفظه، تعداد زیادی از اتم‌های هیدروژن در اطراف آند A توسط این الکترون‌ها یونیزه شده و در نتیجه هسته‌های هیدروژن، یا همان پروتون‌ها تولید می‌شوند. سپس یک منبع ولتاژ بالای $V_a = 150 \text{ kV}$ که به آند A و الکترودهای شتاب‌دهنده E متصل است، به پروتون‌ها در

1. R. J. Van De Graaff
2. J. D. Cockcroft
3. E. T. Walton
4. Electron Gun

فضای بین A و E شتاب داده و در نهایت پروتون‌ها با انرژی ۱۵۰ keV از دریچه خروجی B خارج می‌شوند.

کوکرافت و والتون با قراردادن یک هدف لیتیومی عمود بر مسیر باریکه پروتونی خروجی، به واکنش هسته‌ای زیر دست یافتند:

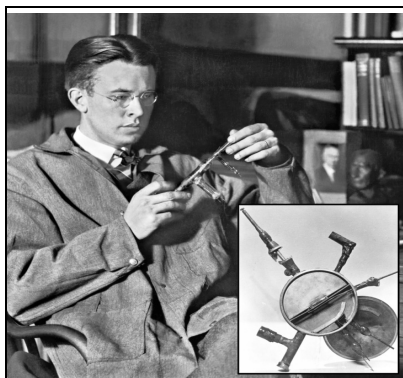


آزمایش کوکرافت و والتون برای اولین بار یک تبدیل هسته‌ای را با استفاده از پروتون‌هایی که به صورت مصنوعی شتاب گرفته بودند، ممکن ساخت. پس از این آزمایش موفق که آن دو را مشترکاً سزاوار دریافت جایزه نوبل فیزیک در سال ۱۹۵۱ میلادی کرد، آن‌ها به اصلاح دستگاه شتاب‌دهنده خود پرداخته و شتاب‌دهنده الکتروستاتیک معروف کوکرافت- والتون را ساختند. این شتاب‌دهنده قادر بود پروتون‌ها را تا انرژی ۷۰۰ keV شتاب دهد.

اولین شتاب‌دهنده از نوع دایروی، سیکلوترونی^۱ بود که در سال ۱۹۳۰ میلادی در آزمایشگاه تابش دانشگاه برکلی ایالات متحده و توسط ارنست لاورنس^۲ ساخته شد. بیشینه قطر مدار ذرات در این سیکلوترون ۱۱ cm بود و می‌توانست پروتون‌ها را تا ۸۰ keV شتاب دهد (شکل ۱-۳). اکثر شتاب‌دهنده‌های بزرگ دایروی امروزی را می‌توان نوادگان سیکلوترون لاورنس دانست.

اما اولین سینکروترون (نوع اصلاح شده‌ای از سیکلوترون که در آن، برخلاف سیکلوترون، میدان مغناطیسی دیگر ثابت نیست)، دستگاه کازموترون^۳ در آزمایشگاه ملی بروک‌هاون بود که پروتون‌ها را تا انرژی حدود ۳ GeV شتاب می‌داد. شتاب‌دهنده بواترون^۴ که در سال ۱۹۵۴ میلادی در برکلی تکمیل شد، برای اولین بار توانست پروتون‌ها را به انرژی‌ای برساند که برای تولید پاد پروتون نیاز بود. انرژی پروتون‌ها در این شتاب‌دهنده به ۶/۴ GeV می‌رسید.

1. Cyclotron
2. Ernest Lawrence
3. Cosmotron
4. Bevatron

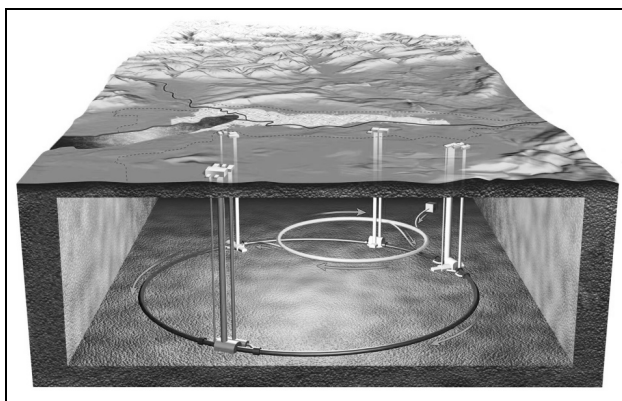


شکل ۱-۳. ارنست لاورنس و اولین سیکلوترونی که ساخت. قطر این دستگاه ۱۳ cm و پیشینه شعاع مسیر ذرات در آن ۱۱ cm بود.

ابرسینکروترون^۱ پروتونی سرن^۲ در سال ۱۹۵۴ میلادی در مرکز اروپایی تحقیقات هسته‌ای در مرز سوئیس و فرانسه ساخته شد و توانست پروتون‌ها را به انرژی ۵۰۰ GeV برساند. شتاب‌دهنده تواترون^۳ آزمایشگاه فرمی با طول مسیر دایروی به طول ۶/۴ km در سال ۱۹۸۴ میلادی به عنوان یک برخورددهنده پروتون-پاد پروتون ساخته شد ولی در سال ۲۰۱۱ به علت مشکلات بودجه‌ای از فعالیت باز ماند. بزرگ‌ترین شتاب‌دهنده دایروی که تا به حال ساخته شده است، حلقه انباشت بزرگ الکترون-پوزیترون^۴ (LEP) با محیط ۲۶/۶ km و در عمق ۵۰ تا ۱۷۵ متری زمین در سرن است که در سال ۱۹۸۸ میلادی شروع به کار کرد. این شتاب‌دهنده تا پیش از تغییر کاربری در سال ۲۰۰۰، توانست به انرژی ۲۰۹ GeV برسد. در سال ۲۰۰۰ میلادی پس از تغییر کاربری این دستگاه و از تونل زیرزمینی آن به عنوان برخورددهنده بزرگ هادرونی^۵ (LHC) مورد استفاده قرار گرفت. اکنون LHC بزرگ‌ترین و پرانرژی‌ترین شتاب‌دهنده جهان است که انتظار می‌رود به انرژی ۷ TeV برسد، درحالی که هم اکنون با بیش از نصف این انرژی در حال کار است. آخرین موفقیت بزرگ LHC تاکنون را می‌توان آزمایش‌هایی دانست که منجر به تأیید وجود ذره هیگز^۶ در سال ۲۰۱۳ میلادی شد.

-
1. Super Synchrotron
 2. Centre Europeen de Recherche Nucleaire (CERN)
 3. Tevatron
 4. Linear Electron Positron Collider
 5. Large Hadron Collider
 6. Higgs Boson

اَبَربرخورددهنده ابرسانیایی^۱ (SSC) با محیط ۸۷ km و انرژی ۲۰ TeV قرار بود در تگزاس ساخته شود، ولی چند سال پس از شروع به ساخت آن در سال ۱۹۹۳ میلادی به علت ایرادات ساختاری پیش آمده و همچنین مشکلات بودجه‌ای ناتمام گذاشته شد. اما معروف‌ترین و بزرگ‌ترین شتاب‌دهنده از نوع خطی، شتاب‌دهنده خطی استنفورد معروف به اسلک^۲ (SLAC) است که در سال ۱۹۶۶ میلادی در دانشگاه استنفورد ایالات متحده عملیاتی شد و توانست ذرات را در راستای موج‌بری به طول ۳/۲ km به انرژی ۳۰ GeV برساند. این دستگاه هنوز هم به عنوان طولانی‌ترین شتاب‌دهنده خطی جهان به شمار می‌آید که هم‌زمان به عنوان چشمه تابش‌های پرتو UV پرتوی ایکس و نیز کاربرد دارد. این تابش‌ها از نوع تابش ترمزی هستند که از طریق متوقف کردن ناگهانی پرتوهای پرانرژی الکترونی به دست می‌آیند. علاوه بر این، اخیراً با الحاق یک ساختار نوسان‌ساز در قسمت انتهایی این شتاب‌دهنده، تحت عنوان پروژه چشمه نور همدوس لیناک^۳ (LCLS) توانسته‌اند از پتانسیل بالای ذرات شتاب گرفته در آن برای تولید درخشان‌ترین پرتوی لیزر پرتو ایکس سخت و نرم استفاده کنند. این لیزر که از نوع لیزرهای الکترون آزاد^۴ (FEL) است، اولین منبع تابش سینکروترون نسل چهارم محسوب می‌شود.



شکل ۱-۴. نمای شماتیکی از موقعیت و ابعاد حلقه شتاب‌دهنده LHC در سرن

1. Superconducting Super Collider
2. Stanford Linear Accelerator
3. Linac Coherent Light Source
4. Free Electron Laser