دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده فیزیک

طراحی و شبیه سازی شتاب دهنده سیکلوترونی

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک

امیرعارفیان

استاد راهنما

دکتر سید ظفرا...کلانتری

۱۳۹۱

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک آقای امیر عارفیان

تحت عنوان

طراحی و شبیه سازی شتاب دهنده سیکلوترونی

در تاریخ ۱۳۹۱/۱۱/۰۱ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر سید ظفرا...کلانتری
۲- استاد مشاور پایان نامه	دکتر جواد رحیقی
۳- استاد مشاور پایان نامه	آقای سجاد محمودپورقمصر
۴- استاد مدعو	دکتر محمد حسن علامت ساز
۵- استاد داور پایان نامه	دکتر احمد شیرانی
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر مجتبی اعلایی

خدایا...

خیلی ازت ممنونم... از بچگی همیشه دوست داشتم فیزیک بخونم و یه روز منم فیزیک‌دان بشم، و با لطف شما هر روز بیشتر و بیشتر دارم به این آرزوم نزدیک تر می‌شم... خیلی وقت‌ها شده که در این راه کم آوردم، نا امید شدم و بیراهه رفتم، فقط خودت بودی که مواظبم بودی و دوباره بهم امید و قدرت می‌دادی، کمکم می‌کردی که سختی-های زندگی مانع از رسیدن به آرزوهام نشه، بهم ایمان می‌دادی که اندکی صبر، سحر نزدیک است.....امیدوارم که در زندگی بتونم همیشه شکر گزارت باشم و هیچ وقت فراموشت نکنم....

ممنونم، به خاطر بزرگ‌ترین معلم اخلاق و زندگی که بهم دادی، روحش شاد.....

از اینکه یکی از دلسوزترین و مهربون ترین پدر و مادر و خواهر و همسر دنیا رو بهم دادی ممنونم.. کمکم کن قدرشون رو بدونم و اونا هم همیشه ازم راضی باشن...

جناب آقای دکتر سید ظفرا.. کلانتری...

نمی‌دونم چطور ازتون تشکر کنم، فقط می‌تونم بگم در این چند سال که من افتخار شاگردی شما رو داشتم، همیشه ازتون یادگرفتم، نهایت استفاده رو از کلاس‌های پر بارتون بردم، همیشه در اتاق شما به روی من باز بود، همیشه بهم اعتماد به نفس و دلگرمی می‌دادید و از نصایح و تجارب ارزشمندتون کمال استفاده نصیبم شد.

جناب آقای دکتر جواد رحیقی، جناب آقای سجاد محمودپور...

بی‌نهایت از زحمات و راهنمایی‌های شما در طول این پایان نامه، ممنون و سپاس‌گذارم...آقای محمودپور، به خاطر همه‌ی تجربه‌های ارزشمندتون که بی‌دریغ در اختیارم گذاشتین ممنونم.

جناب آقایان دکتر شیرانی، دکتر سید جواد هاشمی‌فر، دکتر اکبر پروازیان، اساتید ارجمند دانشکده فیزیک...
جناب آقای سعیدی، کارشناس محترم آزمایشگاه...
از راهنمایی‌ها، تجربیات و آموزه‌های بی نظیرتان در طول تحصیلم در دانشکده از شما سپاس‌گذارم، همیشه به یادتون هستم.

جناب آقایان دکتر علامت ساز و دکتر شیرانی، از اینکه زحمت بازخوانی این پایان نامه رو بر عهده گرفتید ممنونم.

آقای ناصر سیدزاده، دوست و همراه گرامی، به خاطر همه‌ی کمک‌هات در این دوران ازت ممنونم.

در آخر از همه‌ی کسانی که در طول این مدت به هر نحوی به من یاری رسوندن تشکر می‌کنم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و

نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه

متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به پدر و مادر بزرگوارم و خواهر عزیزم

تقدیم به همسر مهربانم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول : مقدمه

۱- ۱ تعریف شتاب‌دهنده‌ها ۲

۱- ۲ اهمیت و کاربردهای شتاب‌دهنده‌ها ۳

۱- ۳ جدول زمانی پیدایش و توسعه‌ی شتاب‌دهنده‌ها ۸

۱- ۴ خلق ذرات جدید ۹

۱- ۵ باریکه‌ی ذرات ثانویه ۱۰

۱- ۶ موضوع پایان نامه‌ی حاضر ۱۰

فصل دوم : معرفی انواع شتاب‌دهنده‌ها

۲- ۱ دسته بندی شتاب‌دهنده‌ها ۱۸

۲- ۱- ۱ دسته بندی شتاب‌دهنده‌ها بر اساس انرژی ۱۹

۲- ۱- ۲ دسته بندی شتاب‌دهنده‌ها بر اساس مسیر ذرات ۱۹

۲- ۲ اجزاء مشترک شتاب‌دهنده‌ها ۲۰

۲- ۳ مولدهای ولتاژ پایین ۲۰

۲- ۳- ۱ مولدهای الکترواستاتیکی ۲۱

۲- ۳- ۲ سیم پیچ تسلا ۲۲

۲- ۳- ۳ مولدهای (سرج) موج‌زن ۲۳
۲- ۳- ۴ مولدهای آبشاری ۲۳
۲- ۳- ۵ یکسو کننده تبدیلی ۲۳
۲- ۳- ۶ افزاینده‌ی سریع ولتاژ ۲۴
۲- ۴ شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیکی ۲۴
۲- ۴- ۱ شتاب‌دهنده با افزاینده‌ی سریع ولتاژ ۲۵
۲- ۴- ۲ شتاب‌دهنده با مولد واندوگراف ۲۶
۲- ۵ شتاب‌دهنده‌های خطی ۲۷
۲- ۶ شتاب‌دهنده‌های سیکلوترون ۲۹
۲- ۷ سینکرو سیکلوترون ۳۱
۲- ۸ بتاترون ۳۳
۲- ۹ سینکروترون ۳۴

فصل سوم : ملزومات ساخت سیکلوترون

۳- ۱ اطلاعات کلیدی در طراحی ۳۹
۳- ۲ سیکلوترون ۴۰
۳- ۲- ۱ تاریخچه‌ی سیکلوترون ۴۰
۳- ۲- ۲ نحوه‌ی کارکرد سیکلوترون ۴۱
۳- ۳ سیستم الکترومگنت ۴۲
۳- ۳- ۱ سختی باریکه‌ی یونی ۴۲
۳- ۳- ۲ سیم پیچ‌های الکترومگنت ۴۴

۳- ۴ چشمه‌ی یونی ۴۵
۳- ۴- ۱ چشمه‌ی یون مویی ۴۵
۳- ۴- ۲ مواد، با قابلیت گسیل گرما یونی الکترون ۴۶
۳- ۵ محفظه‌ی خلأ ۴۷
۳- ۵- ۱ مشخصات فیزیکی ۴۷
۳- ۵- ۲ درگاه‌های خلأ ۴۸
۳- ۵- ۳ خلأ و روش‌های تولید آن ۵۱
۳- ۵- ۴ ابزارهای اندازه‌گیری خلأ ۶۲
۳- ۶ سیستم فرکانس رادیویی سیکلوترون ۶۸
۳- ۶- ۱ انحراف ولتاژ DC ۶۹
۳- ۶- ۲ توان منبع ولتاژ RF ۷۰
۳- ۶- ۳ جزئیات جعبه‌ی تزویج ۷۰
۳- ۶- ۴ روش‌های اندازه‌گیری ولتاژ RF ۷۱
۳- ۶- ۵ تقویت کننده‌ها ۷۳
۳- ۷ استخراج یون ۷۴
۳- ۷- ۱ محاسبات مربوطه به منحرف کننده‌ی DC ۷۵

فصل چهارم : بررسی تجربی و شبیه سازی برای ساخت یک سیکلوترون

۴- ۱ سیستم خلأ ۷۷
۴- ۱- ۱ محفظه‌ی خلأ ۷۷
۴- ۱- ۲ مسافت آزاد میانگین ۷۹

۴- ۱- ۳ خلأ سنج ۸۰
۴- ۲ شبیه سازی نخستین چرخش‌های پروتون ۸۱
۴- ۳ شبیه سازی دی، Dummy-Dee و چشمه‌ی یونی باکر PSF ۸۳
۴- ۴ ولتاژ دی‌ها، جابجایی فاز ۸۸
۴- ۵ ولتاژ دی‌ها، طول مسیر ذره ۸۹
۴- ۶ اصول طراحی منبع ولتاژ RF و محاسبات تئوری مربوط به آن ۹۰
۴- ۶- ۱ جفت شدگی بحرانی و فاکتور Q ۹۷
۴- ۷ طراحی چهارچوب آهنی ۹۸
۴- ۷- ۱ اثر کانونی ۹۹
۴- ۷- ۲ پایداری محوری ۱۰۰
۴- ۷- ۳ پایداری شعاعی ۱۰۳
۴- ۷- ۴ شبیه سازی میدان مغناطیسی ۱۰۵
۴- ۷- ۵ رسیدن به انرژی‌های بیشتر ۱۱۷
۴- ۷- ۶ نتیجه‌گیری ۱۱۹
۴- ۷- ۷ پیشنهادات ۱۲۱
مراجع ۱۲۲

چکیده

سیکلوترون‌ها یکی از انواع شتاب دهنده‌های دایره‌ای به شمار می‌آیند که در آن از میدان الکتریکی جهت شتاب دادن، و از میدان مغناطیسی جهت هدایت ذرات در مسیر دایره‌ای استفاده می‌شود. سیکلوترون معمولاً برای شتاب دادن به پروتون و هسته‌ی هلیوم مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شتاب‌دهنده‌ها شامل اجزای اصلی چون الکترومگنت، چشمه‌ی یونی، سیستم خلأ و سیستم فرکانس رادیویی هستند. هم اکنون در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان و با همکاری دانشکده‌ی فیزیک طرح ساخت یک شتاب‌دهنده‌ی سیکلوترونی در حال انجام است. موضوع این پایان نامه در راستای طراحی اجزایی از این ماشین و شبیه سازی میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی و مسیر حرکت ذره می‌باشد. اتاقک خلأ و درگاه‌های آن طراحی و سپس مراحل ساخت آن‌ها تکمیل شد. مسافت آزاد میانگین برای گاز هیدروژن محاسبه شد و با استفاده از آن خلأ مورد نیاز برای شتاب دادن به پروتون به دست آمد، و در ادامه مروری بر روش‌های ایجاد خلأ و اندازه‌گیری آن داشتیم. با حل معادلات حرکت ذره، مسیر آن در صفحه‌ی x-y مشخص شد و با استفاده از آن تخمینی از مقدار پارامترهای ضروری به دست آمد، مانند شعاع لوله‌ی هدایت یون. میدان الکتریکی در داخل اتاقک خلأ با استفاده از کد Poisson SuperFish شبیه سازی شد و با استفاده از نتایج آن، طراحی بهینه‌ی اجزای داخل اتاقک انجام شد. مروری بر سیستم فرکانس رادیویی سیکلوترون داشتیم و اثرات ولتاژ بر شتاب ذره مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و در انتها با استفاده از کد PSF و برنامه‌ی SF۷ به طور کامل میدان مغناطیسی شبیه سازی شد و اثرات مختلف آن بر حرکت ذره و پایداری آن مورد بررسی قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی:

سیکلوترون، الکترومگنت، چشمه‌ی یونی، سیستم فرکانس رادیویی، مسافت آزاد میانگین، لوله‌ی هدایت یون، Poisson SuperFish، SF۷

فصل اول

مقدمه

۱-۱ تعریف شتاب‌دهنده

افزایش دانش تخصصی از دنیای میکروسکوپی زمانی میسر می‌شود که ابزارهای پژوهشی مورد نیاز آن تهیه گردد. هرچه دنیای مورد تجسس کوچکتر باشد، طول موج ذره کاوشگر نیز باید کوچکتر شود. برای کاهش طول موج یک ذره باید تکانه و در نتیجه انرژی آن افزایش یابد. پس برای مطالعه‌ی دنیای ملکول، اتم، هسته و نوکلئون ها نیاز به انرژی بیشتر و بیشتر داریم. این انرژی توسط دستگاه‌هایی به نام شتاب دهنده[۱] تامین شده و به ذرات کاوشگر داده می‌شود تا بتوانند وظیفه‌ی تجسسی خود را انجام دهند. طیف وسیعی از فوتون‌ها می‌توانند ما را در مطالعه‌ی دنیای ملکول‌ها و اتم ها یاری دهند زیرا در این محدوده به انرژی‌های چند الکترون ولت تا چند کیلوالکترون ولت نیازداریم، ولی در دنیای هسته‌ها که به انرژی چند مگاالکترون ولت نیاز است باید از شتاب دهنده‌ها استفاده شود. راترفورد[۲] در سال ۱۹۱۹ نشان داد که هسته نیتروژن را می‌توان توسط ذرات آلفا که به طور طبیعی از رادیوم و توریم رادیواکتیو گسیل می‌شدند بمباران کرده و تجزیه و تحلیل نمود. این ذرات آلفا که در بمباران هسته‌ها مورد استفاده قرار گرفت دارای انرژی بین ۵ تا ۸ میلیون الکترون ولت بودند. راترفورد در سخنرانی معروف خود در سال ۱۹۲۷ اظهار امیدواری کرد که شتاب دهنده‌های مصنوعی با انرژی کافی ساخته شود تا بتوانند هسته‌های

---

۱. Accelerator
۲. Ernest Rutherford

مختلف را بمباران نمایند. دو سال بعد یعنی در سال ۱۹۲۹ چند آزمایشگاه ساختن وسایل مختلف شتاب دهنده‌ها را آغاز کردند. با اصرار راترفورد اولین شتاب دهنده توسط کاکروفت[۱] و والتون[۲] در سال ۱۹۳۲ با تجزیه لیتیم توسط پروتون‌های با انرژی ۴۰۰ کیلوالکترون ولت آغاز به کار کرد.

بیش از دو دهه از ساخت اولین شتاب دهنده نگذشته بود که فیزیک دانان متوجه شدند که ذرات پروتون و نوترون که سازنده هسته بودند خود از اجزای کوچکتری به نام کوارک‌ها ساخته شده‌اند. در همین ایام ذرات دیگری به نام مزون‌ها و باریون‌ها که اعضای خانواده‌ی هادرون‌ها بودند نیز کشف شدند و در نتیجه نیاز فیزیک دانان به شتاب دهنده‌های با انرژی بالاتر محسوس‌تر شد و ساختن شتاب دهنده‌ها در دستور کار دولت‌ها قرار گرفت[۱].

۱-۲ اهمیت و کاربردهای شتاب دهنده‌ها

با پیشرفت شتاب‌دهنده‌ها، امروزه شاهد آن هستیم که ذرات باردار دراین ماشین‌ها در ترکیبی از میدان-های الکتریکی و مغناطیسی تا نزدیکی‌های سرعت نور شتاب می‌گیرند و به همین دلیل کاربردهای آن‌ها طیف بسیار گسترده‌ای را شامل می‌شود. حجم و ابعاد شتاب دهنده‌ها از حدود یک متر تا اندازه یک شهر با کاربردهایی چون :

۱. درک ساختار ذراتی که طبیعت را به وجود آورده‌اند و شناخت قوانین حاکم بر آنها (حوزه فیزیک هسته‌ای و ذرات بنیادی)
۲. شناخت ساختار مواد و خصوصیات آن‌ها (حوزه فیزیک حالت جامد و متالوژی)
۳. درمان‌های پزشکی بخصوص تومورهای سرطانی
۴. تولید رادیوایزوتوپ‌های پزشکی
۵. استریلیزه کردن مواد مختلف
۶. کاشت یونی جهت بهبود خواص سطحی مواد
۷. تبدیل پسماندهای هسته‌ای
۸. تولید انرژی، با روش‌های ایمن‌تر در رآکتورهای زیر بحرانی

طبق بررسی‌های انجام شده در سال ۲۰۰۰ میلادی توسط آقایان سکارف و ویشزیکا[۳] تعداد کل شتاب دهنده‌ها در دنیا حدود ۱۵۰۰۰ دستگاه بوده است که کاربرد این تعداد در شاخه‌های مختلف در جدول ۱-۱ آمده است[۲].

---

۱. Cockcroft
۲. Walton
۳. W. Scarf & W. Weisczycka

جدول ۱-۱ دسته بندی تعداد شتاب‌دهنده‌های موجود در دنیا بر اساس زمینه‌ی کاربردی آن‌ها.

تعداد شتاب دهنده	دسته‌ی مورد استفاده
۷۰۰۰	کاشت یونی و اصلاح سطح مواد
۱۵۰۰	شتاب دهنده‌های مورد استفاده در صنعت
۱۰۰۰	شتاب دهنده‌های موجود در تحقیقات غیر هسته‌ای
۵۰۰۰	پرتو درمانی
۲۰۰	تولید رادیو ایزوتوپ‌های پزشکی
۲۰	هادرون درمانی
۷۰	چشمه‌های نور سینکروترونی
۱۱۰	تحقیقات فیزیک هسته‌ای و ذرات بنیادی

همان‌طور که مشاهده می‌شود مشهورترین نوع شتاب دهنده‌ها که در تحقیقات فیزیک هسته‌ای و ذرات بنیادی به کار می‌روند تعداد کمی از آمار این ماشین‌ها را به خود اختصاص داده‌اند، این در حالی است که فناوری ساخت دیگر شتاب دهنده‌ها بر اساس این ماشین‌ها است.

عمده‌ی دانش ما از دنیای زیر اتمی به خاطر آزمایش‌هایی است که توسط شتاب دهنده‌ها انجام شده است. شتاب دهنده‌های اولیه در سال‌های ۱۹۶۰ میلادی که دهه‌ی پیشرفت فیزیک هسته‌ای بود به منظور دستیابی به ذرات با انرژی بالا هرچه بیشتر توسعه یافتند و این تلاش‌ها به توسعه‌ی فیزیک ذرات بنیادی منجر شد. هم اکنون بزرگترین شتاب دهنده‌ی دنیا (LHC) در مرکز تحقیقات فیزیک هسته‌ای CERN، واقع در ژنو سویس قرار دارد که قادر است دو باریکه‌ی پروتونی ۷ ترااالکترون ولتی[۱] را به هم برخورد دهد.

با توجه به مطالب گفته شده، حال می توانیم به این پرسش پاسخ دهیم که چرا شتاب دهنده‌ها ساخته شدند؟

شتاب دهنده‌ها، باریکه‌ای از ذرات باردار را با انرژی‌های از چند MeV تا چندصد GeV تولید می‌کنند. شدت این پرتوها می‌تواندتا $۱۰^{۱۶}$ ذره در ثانیه باشد، و باریکه‌ها می‌توانند بر روی هدفی به مساحت فقط چند $mm^۲$ متمرکز شوند. ذراتی که اکثرا به عنوان پرتابه‌های اولیه به کار می‌روند عبارتند از پروتون و الکترون.

دو کار را می‌توان فقط به وسیله‌ی شتاب دهنده‌ها به خوبی انجام داد، یکی تولید ذرات و حالت‌های جدید، و دیگری جستجو در ساختار دقیق سیستم‌های زیر اتمی. ابتدا ذرات و هسته‌ها را در نظر بگیرید. فقط تعداد معدودی ذره‌ی پایدار در طبیعت وجود دارد، الکترون، پروتون، نوترینو و فوتون. همچنین، تنها تعداد کمی هسته‌ی مشخص پیدا می‌شود که معمولا در حالت پایه است. برای گریز از محدودیت‌های حاکم بر آنچه که به طور طبیعی وجود دارد،

[۱] .TeV

باید حالت‌های جدید را به طور مصنوعی ایجاد کرد. برای آفریدن حالتی به جرم m، حداقل به انرژی $E=mc^2$ نیاز داریم. ولی در عمل به انرژی بیشتر نیاز پیدا می‌کنیم.

انرژی‌های زیاد نه تنها برای ایجاد حالت‌های جدید لازم‌اند، بلکه برای پی بردن به جزئیات مربوط به ساختار سیستم-های زیر اتمی نیز نقش بنیادی دارند. به سادگی دیده می‌شود که هر بعدی که به آن نگاه می‌کنیم کوچکتر باشد، انرژی ذره باید بیشتر باشد.

طول موج دوبروی برای یک ذره با تکانه p عبارت است از :

$$\lambda = h/p \qquad (۱-۱)$$

که در آن h ثابت پلانک است. در اکثر عبارات، طول موج کاهش یافته دوبروی را به کار خواهیم برد:

$$\lambda\!\!\!^{-} = \frac{h}{2\pi} = \frac{\hbar}{p} \qquad (۲-۱)$$

که h بار یا $\hbar$ دیراک برابر است با:

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 65/820 \times 10^{-22}\, MeVs \qquad (۳-۱)$$

همان طور که در اپتیک معلوم شده است، برای دیدن جزئیات ساختاری ابعاد d، طول موجی در حدود d یا کوچکتر از آن باید به کار بریم

$$\lambda\!\!\!^{-} \le d \qquad (۴-۱)$$

بنابراین تکانه‌ی لازم، عبارت است از

$$p \ge \frac{\hbar}{d} \qquad (۵-۱)$$

برای دیدن ابعاد کوچک، به تکانه‌های زیاد و در نتیجه به انرژی‌های زیاد احتیاج داریم. به عنوان مثال، فرض می‌کنیم d=۱ fm و پروتون، ذره‌ی جستجوگر موردنظر باشد. خواهیم دید که در این حالت یک تقریب غیر نسبیتی مجاز است؛ بنابراین با استفاده از معادله‌ی (۱-۵) انرژی جنبشی پروتون‌ها برابر خواهد شد با

$$E_k = \frac{p^2}{2m_p} = \frac{\hbar^2}{2m_p d^2} \qquad (۶-۱)$$

E_k و همچنین m_pc^2 = ۹۳۸ MeV دارای بعد انرژی‌اند. در نتیجه، انرژی جنبشی را در شکل جدید آن به صورت یک نسبت می‌نویسیم:

$$\frac{E_k}{m_p c^2} = \frac{1}{2d^2}\left(\frac{\hbar}{m_p c}\right)^2$$

کمیت داخل پرانتز، طول موج کامپتون برای پروتون است:

$$\lambda\!\!\!^{-}_{p} = \frac{\hbar}{m_p c} = ۰/۲۱۰ \text{ fm} \qquad (۷-۱)$$

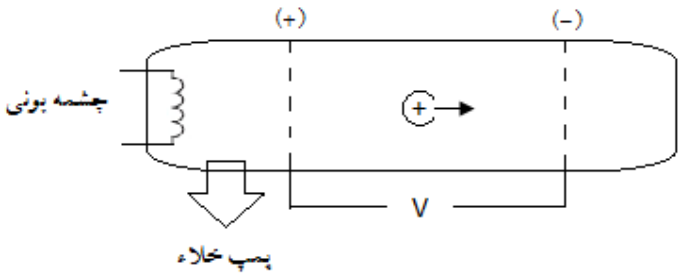
به طوری که انرژی جنبشی به صورت زیر داده می‌شود:

$$\frac{E_k}{m_p c^2} = \frac{1}{2}\left(\frac{\lambda\!\!\!^{-}_{p}}{d}\right)^2 = 0.02 \qquad (۸-۱)$$

پس انرژی لازم برای دیدن ابعادی از مرتبه‌ی ۱ fm ، تقریبا برابر ۲۰ MeV است. از آنجا که این انرژی جنبشی خیلی کمتر از انرژی سکون نوکلئون است، تقریب غیر نسبیتی موجه است. طبیعت باریکه‌ی پروتون با چنین شدتی را به ما نمی‌دهد، بنابراین ناچاریم آنها را به طور مصنوعی تولید کنیم. (پرتوهای کیهانی حاوی ذراتی با انرژی خیلی بالاتر هستند، اما شدت آنها آنقدر کم است که به ندرت می‌توان از آن‌ها به صورتی سازمان یافته استفاده کرد.)
راه معمولی برای تولید یک باریکه از ذرات با انرژی زیاد آن است که ذرات باردار را در یک میدان الکتریکی شتاب دهیم. نیروی وارد بر ذره‌ای با بار الکتریکی q توسط یک میدان الکتریکی E برابر است با :

$$F = qE \qquad (۹-۱)$$

در ساده ترین شتاب دهنده که شامل دو شبکه به فاصله‌ی d و به اختلاف پتانسیل V از یکدیگر است.



شکل ۱-۱ شکل اولیه‌ی ساده ترین شتاب دهنده.

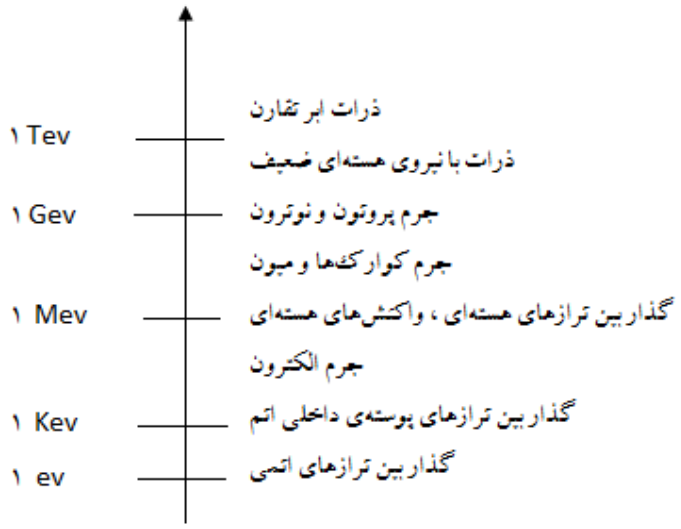
شدت میدان متوسط عبارت است از

$$E = \frac{V}{d} \qquad (۱۰-۱)$$

و انرژی کسب شده توسط ذره برابر است با:

$$W = Fd = qV \qquad (۱۱-۱)$$

واحد اندازه‌گیری انرژی در دنیای شتاب دهنده‌ها الکترون ولت است. یک الکترون ولت مقدار انرژیی است که اگر یک الکترون در اختلاف پتانسیل یک ولت قرار گیرد به آن میزان انرژی به دست می آورد. در شکل ۱- ۲ بازه-هایی از این انرژی و اتفاقاتی که حوالی این انرژی‌ها در دنیای هسته‌ای اتفاق می‌افتد را مشاهده می‌کنید.



شکل ۱-۲ بازه‌های مختلف انرژی بر حسب الکترون ولت.

البته دستگاه باید در خلاء قرار بگیرد، در غیر این صورت ذرات شتاب دار با ملکول‌های هوا برخورد کرده و به تدریج مقدار زیادی از انرژی خود را از دست خواهند داد. همچنین یک چشمه‌ی یونی نیز برای تولید ذرات باردار مورد نیاز است. این اجزا که عبارتند از چشمه ذرات و پمپ خلاء در هر شتاب دهنده‌ای دیده می‌شوند(شکل ۱-۱).
آیا می‌توان به کمک ماشین‌های ساده نظیر آنچه که در شکل (۱-۱) ترسیم شده است، به باریکه‌هایی از ذرات با انرژی ۲۰ MeV دست یافت؟ هرکس که با ولتاژهای زیاد کار کرده باشد می‌داند که انجام چنین کاری آسان نیست. در چند KV ، این امکان وجود دارد که ولتاژ به طور ناگهانی سقوط کند و برای فرا رفتن از حتی ۱۰۰ KV ، تجربه‌ی کافی لازم است. در حقیقت، نبوغ و تلاش قابل ملاحظه‌ای به کار گرفته شده است تا مولدهای الکترواستاتیکی به جایی برسند که بتوانند ذراتی با انرژی حدود ۱۰ MeV تولید کنند. با این همه، هرچقدرهم که مولد الکترواستاتیکی پیشرفته باشد، دستیابی به انرژی‌هایی که چند مرتبه‌ی بزرگی بالاتر باشند، غیر ممکن است. ایده‌ی جدیدی لازم بود، و چنین ایده‌ای پیدا شد: اعمال پی در پی یک ولتاژ معین بر یک ذره. در واقع، در راه رسیدن به شتاب دهنده‌های بزرگ امروزی، چندین بار تصور شد که به حداکثر انرژی شتاب دهنده‌ها دست یافته‌اند. با وجود این، هر نوع مشکلی که به ظاهر لاینحل به نظر می‌رسید، به کمک یک روش جدید و مبتکرانه برطرف شد.

۱-۳ جدول زمانی پیدایش و توسعه‌ی شتاب دهنده‌ها

مهم‌ترین پیشرفت‌ها و رخدادهای علمی مربوط به شتاب‌دهنده‌ها در ذیل آورده شده است:

۱۸۹۵: کشف اشعه ایکس توسط رونتگن[۱].
۱۸۹۷: کشف الکترون توسط تامسون[۲].
۱۹۰۵: نظریه نسبیت انیشتین[۳].
۱۹۰۷: توسعه‌ی نظریه‌ی تابش سنکروترونی توسط اسکات[۴].
۱۹۱۱: کشف هسته‌ی اتم توسط راترفورد[۵] با استفاده از ذرات آلفا.
۱۹۲۰: ساخت اولین مبدل آبشاری ۱۰۰ کیلو ولتی توسط هاینریش گریناخر[۶] (فیزیکدان سویسی).
۱۹۲۴: مفاهیم اولیه‌ی شتاب دادن توسط قرار گرفتن ذره در اختلاف پتانسیل‌های متعدد برای اولین بار توسط آیزینگ[۷] پیشنهاد شد.
۱۹۲۷: رولف ویدرو[۸] اولین شتاب دهنده‌ی خطی را ساخت، یون‌های سدیم و پتاسیم شتاب داده شدند.
۱۹۲۸: دیراک[۹] پیش بینی کرد که پادماده نیز وجود دارد (پوزیترون).
۱۹۳۱: واندوگراف[۱۰] اولین مولد ولتاژ بالا را ساخت.
۱۹۳۲: کاکروفت و والتون اولین شتاب دهنده‌ی انرژی بالا را ساختند که به وسیله‌ی آن اولین واکنش هسته‌ای غیر طبیعی $p+Li \longrightarrow {}^{2}He$ انجام شد.
۱۹۳۲: لورنس و لیوینگستن[۱۱] اولین شتاب دهنده‌ی سیکلوترونی که قادر بود پروتون‌ها را تا انرژی ۱/۲ مگاالکترون ولت شتاب دهد ساختند.
۱۹۳۲: کشف پوزیترون و نوترون.
۱۹۴۱: کرست و سربر[۱۲] اولین بتاترون را ساختند.
۱۹۴۱: توسکچ[۱۳] و ویدرو مفهوم حلقه انبارش را برای اولین بار مطرح کردند.
۱۹۴۳: اولیفنت[۱۴] مفهوم سینکروترون را مطرح کرد.

---

۱. Roentgen
۲. J.J. Thomson
۳. Einstein
۴. Schott
۵. Rutherford
۶. Greinacher
۷. Ising
۸. Rolf Wideroe
۹. Dirac
۱۰. Van de Graaff
۱۱. Lawrence & Livingston
۱۲. Donald William Kerst & Serber
۱۳. Touschek
۱۴. Oliphant

۱۹۴۷: مشاهده اولین تابش سینکروترونی در شرکت جنرال الکتریک[۱].
۱۹۴۷: آلوارز[۲] اولین شتاب دهنده خطی پروتونی را ساخت.
۱۹۴۷: ادوارد گینزتن[۳] موفق به ساخت اولین شتاب دهنده خطی الکترونی شد.
۱۹۵۰-۱۹۵۲: مفهوم اثر کانونی قوی[۴] ابداع شد.
۱۹۵۴: ویلسون[۵] و دیگران اولین سینکروترون اثر کانونی قوی را در کرنل[۶] ساختند.
۱۹۵۶: هارتمن[۷] از تابش سینکروترونی برای آزمایش‌های اسپکتروسکوپی استفاده کرد.
۱۹۶۰: ساخت اولین شتاب دهنده‌ی برخوردی الکترون- پوزیترون : ADA در فراسکاتی.
۱۹۷۲: ساخت اولین شتاب دهنده‌ی برخوردی پروتون- پروتون، ISR، در مرکز تحقیقات سرن.
۱۹۸۱: ساخت اولین برخورد دهنده‌ی پروتون - پادپروتون، SPS ، در مرکز تحقیقات سرن.

۱-٤ خلق ذرات جدید

انیشتین با رابطه مشهور خود، $E=mc^2$ نشان داد که جرم و انرژی قابل تبدیل به یکدیگر هستند. یک ذره پر انرژی دارای انرژی نسبیتی کل $E=T+m.c^2$ می باشد. اگر یک ذره با جفت پاد ماده‌ی خودش برخورد کند می توانند نابود شوند و جفت ذرات دیگری را به وجود آورند. به طور مثال: $e^- + e^+ \longrightarrow B^+ B^-$
انرژی حالت سکون و جنبشی این ذرات در جدول ۱-۲ آمده است.

جدول ۱-۲ انرژی حالت سکون و انرژی لازم برای خلق ذرات جدید توسط ذرات و پاد ذرات.

	انرژی حالت سکون MeV	انرژی جنبشی MeV
e^+ , e^-	۰/۵۱۱	۵۲۹۰
B^+ , B^-	۵۲۷۹	۱۱۸۰۰

اما اگر انرژی الکترون و پوزیترون برخوردی به میزان کافی نباشد واکنش $e^+ + e^- \longrightarrow \gamma + \gamma$ رخ می‌دهد و دو فوتون تولید می‌شوند.

۱. General Electric research laboratory
۲. Alvarez
۳. Edward Ginzton
٤. Strong-Focusing
٥. R.R. Wilson
٦. Cornell
۷. Hartmann