بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه یزد
دانشکده فیزیک
گروه اتمی و مولکولی

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته
فیزیک، اتمی و مولکولی

طرّاحی و شبیه‌سازی یک کاواک برای شتابدهنده‌ی خطّی الکترون با انرژی 10 MeV

استاد راهنما

پروفسور عبّاس بهجت

استاد مشاور

مهندس علی‌محمّد پورصالح

پژوهش و نگارش

جواد اعتمادمقدّم

مهرماه ۱۳۹۰

چکیده

در شتاب‌دهنده‌های خطی، ذرات باردار در اثر میدان الکتریکی حاصل از امواج الکترومغناطیسی در مسیر مستقیم شتاب می‌گیرند. در این پایان‌نامه پس از ارائه تاریخچه مختصر از انواع شتاب‌دهنده‌های ذرات باردار در فصل اول، ساختار برخی ازانواع شتاب‌دهنده‌ها و اجزا اصلی تشکیل دهنده آن‌ها معرفی می‌شود. در فصل دوم، انتشار میدان الکتریکی در موجبرهای مستطیلی و استوانه‌ای و مدهای قابل انتشار در آن‌ها به تفصیل توضیح داده شده و تأثیر بارگذاری این موجبرها با صفحات رسانا بررسی شده است . در فصل سوم، به بررسی دینامیک باریکه و عوامل مؤثر بر روی آن پرداخته شده است. فصل چهارم به معرفی ساختارهای اصلی شتاب‌دهنده خطی و کلیات طراحی سلول‌های شتاب اختصاص دارد. در فصل پنج به معرفی نرم‌افزار CST studio suite و مقایسه آن با چند کد شبیه‌سازی دیگر که در زمینه طراحی اجزای مختلف شتاب‌دهنده‌های خطی کاربرد دارند پرداخته شده است. فصل ششم به شبیه‌سازی، محاسبه و مقایسه کمیت‌های اصلی سه نوع از کاواک‌های متداول که در ساختار شتاب‌دهنده‌های خطی مورد استفاده قرار می‌گیرند، پرداخته شده است.

تقدیم به همه آنهایی که

می خواهند بیشتر بدانند

خدایا...[1]

به من زیستنی عطا کن که در لحظه مرگ، بر بی‌ثمری لحظه‌ای که برای زیستن گذشته است، حسرت نخورم و مُردنی عطا کن که بر بیهودگیش، سوگوار نباشم. بگذار تا آن را، خود انتخاب کنم، اما آنچنان که تو دوست می‌داری.

تو می‌دانی و همه می‌دانند که شکنجه دیدن بخاطر تو، زندانی کشیدن بخاطر تو و رنج بردن به پای تو تنها لذت بزرگ زندگی من است، از شادی توست که من در دل می‌خندم، از امید رهایی توست که برق امید در چشمان خسته‌ام می‌درخشد و از خوشبختی توست که هوای پاک سعادت را در ریه‌هایم احساس می‌کنم. نمی‌توانم خوب حرف بزنم. نیروی شگفتی را که در زیر کلمات ساده و جمله‌های ضعیف و افتاده، پنهان کرده‌ام دریاب، دریاب.

تو می‌دانی و همه می‌دانند که زندگی از تحمیل لبخندی بر لبان من، از آوردن برق امیدی در نگاه من، از برانگیختن موج شعفی در دل من، عاجز است.

تو، چگونه زیستن را به من بیاموز، چگونه مردن را خود خواهم آموخت.

به من توفیق تلاش در شکست، صبر در نومیدی، رفتن بی‌همراه، جهاد بی‌سلاح، کار بی‌پاداش، فداکاری در سکوت، دین بی‌دنیا، مذهب بی‌عوام، عظمت بی‌نام، خدمت بی‌نان، ایمان بی‌ریا، خوبی بی‌نمود، گستاخی بی‌خامی، قناعت بی‌غرور، عشق بی‌هوس، تنهایی در انبوه جمعیت، و دوست داشتن بی‌آنکه دوست بداند، روزی کن.

اگر تنهاترین تنها شوم، باز خدا هست

او جانشین همه نداشتن‌هاست...

---

[1] مناجاتی از دکتر علی شریعتی.

سپاس‌گزاری...

سپاس خداوندگار حکیم را که با لطف بی‌کران خود، آدمی را زیور عقل آراست.

در آغاز وظیفه خود می‌دانم از زحمات بی‌دریغ استاد راهنمای خود، جناب آقای پروفسور عبّاس بهجت، صمیمانه تشکر و قدردانی کنم که قطعاً بدون راهنمایی‌های ارزنده ایشان، این مجموعه به انجام نمی‌رسید.

همچنین از جناب آقای مهندس علی‌محمد پورصالح به خاطر مشاوره‌های ارزنده کمال امتنان را دارم.

از جناب آقای پروفسور جواد رحیقی به عنوان داور خارجی و جناب آقای دکتر محمد اسلامی کلانتری به عنوان داور داخلی که زحمت مطالعه و مشاوره این پژوهش را تقبل فرمودند کمال تشکر را دارم.

همچنین لازم می‌دانم از پدید آورندگان بسته زی‌پرشین، مخصوصاً جناب آقای وفا خلیقی، که این پایان‌نامه با استفاده از این بسته، آماده شده است نیز قدردانی نمایم.

در پایان، بوسه می‌زنم بر دستان خداوندگاران مهر و مهربانی، پدر عزیز و همسر مهربانم که بعد از خدا، ستایش می‌کنم وجود مقدس‌شان را که در این سردترین روزگاران، بهترین پشتیبان من بودند.

جواد اعتمادمقدّم

مهرماه ۱۳۹۰

فهرست مطالب

۱ تاریخچه‌ای از شتاب‌دهنده‌ها ۱

۱.۱ شتاب‌دهنده و اجزا اصلی آن ۲

۲.۱ دسته‌بندی شتاب‌دهنده‌ها ۲

۱.۲.۱ شتاب‌دهنده‌ها از لحاظ انرژی ۲

۲.۲.۱ شتاب‌دهنده‌های الکتروستاتیک ۳

۳.۲.۱ پایداری فاز در سیکلوترون ۸

۴.۲.۱ شتاب‌دهنده‌های سنکروترون ۱۰

۳.۱ شتاب‌دهنده‌های خطی LINAC(Linear Accelerator) ۱۲

۱.۳.۱ شتاب‌دهنده‌های برخوردی ۱۴

۲ موجبرها، کاواک‌ها و میدان‌ها ۱۵

۱.۲ روابط نسبیتی و الکترومغناطیسی ۱۶

۱.۱.۲ معادلات ماکسول و روابط ساخت‌مندی ۱۷

۲.۱.۲ شرایط مرزی ۱۸

۳.۱.۲ سرعت گروه و سرعت انتقال انرژی ۱۹

۲.۲ میدان‌ها در سطح و داخل رساناها ۲۴

۳.۲ موجبرها و کاواک‌های استوانه‌ای ۳۰

۴.۲ جریان انرژی و اتلاف توان در موجبرهای استوانه‌ای ۵۲

۵.۲ کاواک‌های تشدید ۶۴

۶.۲ توان اتلافی و ضریب کیفیت ۷۰

۳ عوامل موثر بر باریکه و دینامیک باریکه ۷۷

۱.۳ مقدمه ۷۸

۲.۳ جریان باریکه ۷۹

۱.۲.۳ حد جریان باریکه‌های الکترونی نسبیتی شدید ۷۹

۲.۲.۳ درخشندگی ۸۰

۳.۳ دینامیک باریکه در شتاب‌دهنده‌های خطی ۸۰

۴.۳ بهره انرژی ۸۳

۱.۴.۳ شتاب‌گیری ذرات در میدان RF ۸۳

۲.۴.۳ بهره انرژی در روی محور یک شکاف یا کاواک RF ۸۴

۵.۳ اثرات بار گذاری ناخواسته الکترون ۹۲

۱.۵.۳ اثر مولتی‌پکتینگ ۹۲

۲.۵.۳ گسیل میدانی الکترون ۹۶

۳.۵.۳ شکست میدان الکتریکی RF ۹۶

۶.۳ فضای فاز و امیتانس ۹۷

۷.۳ دینامیک طولی باریکه ۱۰۱

۸.۳ دینامیک عرضی باریکه ۱۰۶

۱.۸.۳ نیروهای چهارقطبی در $Linac$ ۱۰۹

۹.۳ اثر بار فضایی ۱۱۲

۱.۹.۳ محدودیت ناشی از بار فضایی در جریان باریکه ۱۱۶

۱۰.۳ بارگذاری باریکه ۱۱۷

۱.۱۰.۳ قضیه اساسی بارگذاری باریکه ۱۱۷

۲.۱۰.۳ ضریب اتلاف تک خوشه ۱۲۰

۳.۱۰.۳ اتلاف انرژی خوشه به مدهای بالاتر ۱۲۲

۴.۱۰.۳ بارگذاری باریکه در مد شتاب ۱۲۳
۵.۱۰.۳ بررسی کمی یک کاواک بارگذاری شده ۱۲۴
۶.۱۰.۳ بهینه سازی ۱۲۷
۷.۱۰.۳ یک مثال عددی ۱۲۷
۸.۱۰.۳ رفتار گذرا در بارگذاری باریکه ۱۲۸
۱۱.۳ میدان عقبه ۱۲۹

مراجع **۱۳۳**

مراجع ۱۳۳

فصل ۱

تاریخچه‌ای از شتاب‌دهنده‌ها

۱.۱ شتاب‌دهنده و اجزا اصلی آن

۱) چشمه ذرات باردار

۲) یک میدان الکتریکی $(\vec{E})$ برای شتاب ذرات

۳) ابزار کانونی‌کننده برای غلبه بر تمایل طبیعی باریکه به واگرا شدن

۴) منحرف کننده‌ها

۵) هدف برای برخورد باریکه به آن

۶) ابزار ایجاد خلأ در تمامی قسمت‌های شتاب‌دهنده برای جلوگیری از پراکندگی باریکه در اثر برخورد با مولکول‌های هوا

۲.۱ دسته‌بندی شتاب‌دهنده‌ها

شتاب‌دهنده‌ها را می‌توان به لحاظ انرژی باریکه ذرات خروجی، مکانیزم شتاب و ساختار هندسی آن‌ها دسته‌بندی نمود.

۱.۲.۱ شتاب‌دهنده‌ها از لحاظ انرژی

۱) انرژی پایین: $(10 - 100MeV)$ مطالعه واکنش‌ها و پراکندگی‌ها به منظور توضیح ساختار حالت‌های نهایی خاص محصولات واکنش‌ها(دراین شتاب‌دهنده‌ها باید گزینش انرژی بسیار دقیق و شدت جریان به قدر کافی بالا باشد).

۲) انرژی متوسط : $(100 - 1000MeV)$ به منظور مطالعه برخورد نوکلؤن‌ها با هسته که می‌توانند تولید مزون‌های π را نیز بنمایند به کار می‌روند. این شتاب‌دهنده‌ها غالباً به منظور مطالعه سازوکار تبادل مزون‌ها در نیروهای هسته‌ای به کار می‌روند.

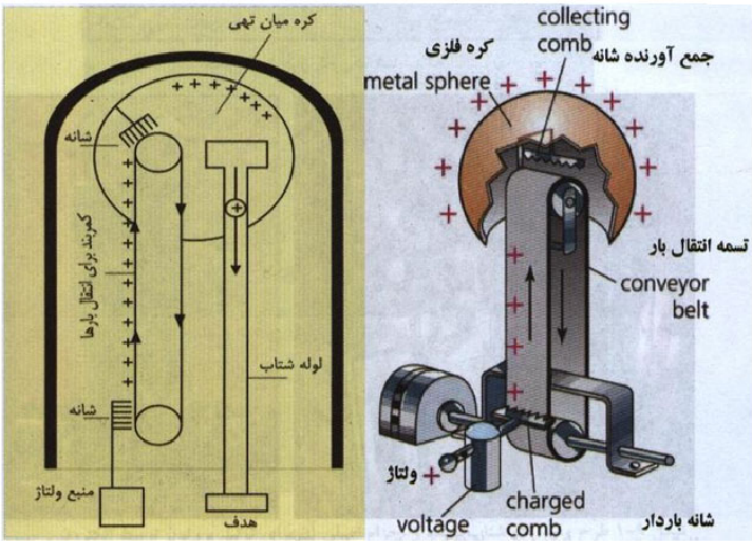
۳) انرژی بالا : $(1GeV - TeV)$ جهت تولید انواع مختلف ذرات و مطالعه خواص آن‌ها به کار می‌روند. در انرژی‌های حدود $10KeV$ سرعت یون‌ها تقریباً با سرعت الکترون‌های مداری بخار عناصر قلیایی یکسان است. در این حالت اگر یون‌های مثبت از داخل بخارات قلیایی عبور داده شوند، از آن‌جا که انرژی بستگی الکترون‌های مداری اتم‌های قلیایی بسیار کم است ممکن است یون‌های مثبت الکترون‌های این اتم‌ها را به خود جذب کنند و حتی تبدیل به یون منفی شوند. از این سازوکار می‌توان برای ساخت یک چشمه یون منفی استفاده کرد. حصول یون‌های مثبت در اثر تخلیه الکتریکی در یک گاز خنثی و شتاب دادن یون‌ها به سمت یک الکترود منفی با پتانسیل $10KeV$ مقدور است.

۲.۲.۱ شتاب‌دهنده‌های الکتروستاتیک

مکانیزم شتاب در این شتاب‌دهنده‌ها، وارد کردن ذره در یک میدان الکتریکی و سقوط ذره از یک پتانسیل بالا می‌باشد. بزرگترین اختلاف پتانسیل موثر در شتابدهی 10^7V می‌باشد. کاربرد این نوع از شتاب‌دهنده‌ها در مطالعه ساختارهای هسته‌ای می‌باشد. حال به بررسی انواع شتاب‌دهنده‌های الکتروستاتیک می‌پردازیم:

۱) شتاب‌دهنده واندوگراف

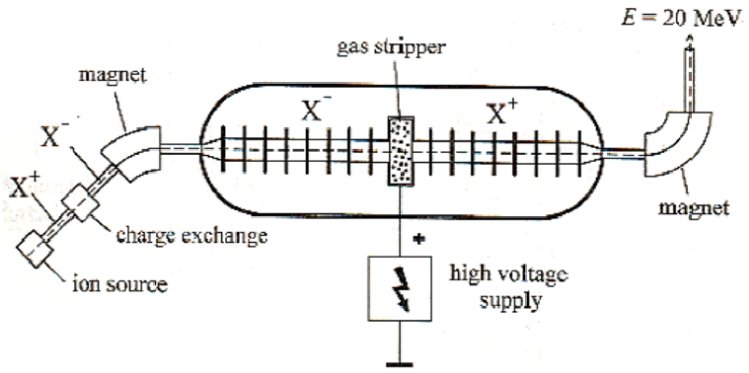
در سال ۱۹۳۰ توسط واندوگراف در آمریکا ساخته شد (شکل ۱.۱). این شتاب‌دهنده اختلاف پتانسیلی در حدود $5 - 10MV$ ایجاد می‌کرد.



شکل ۱.۱: **طرح شماتیک از شتابگر واندوگراف.**

۲) شتاب‌دهنده واندوگراف تاندوم

مکانیزم کار آن مشابه شتاب‌دهنده واندوگراف است با این تفاوت که با تغییر بار یون‌ها فرآیند شتاب‌دهی دو بار صورت می‌گیرد (شکل ۲.۱). در این نوع اختلاف پتانسیلی در حدود $10-25MV$ صورت می‌گیرد.



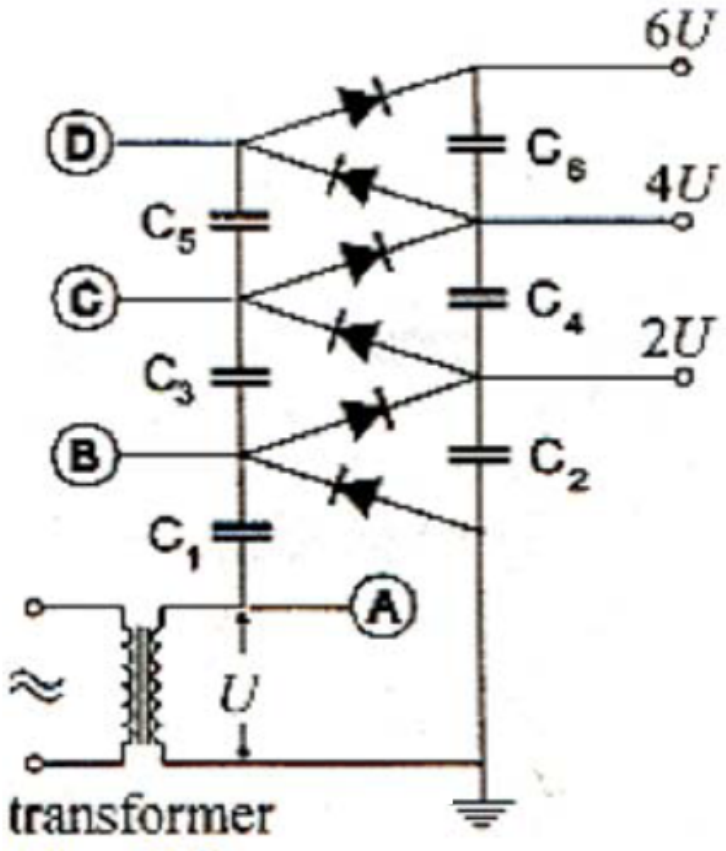
شکل ۲.۱: **طرح شماتیک از شتاب‌دهنده تاندوم.**

۳) شتاب‌دهنده کوک - کرافت و والتون

این شتاب‌دهنده در سال ۱۹۳۲ توسط کوک - کرافت و والتون ساخته شد (شکل ۳.۱) که پتانسیلی در حدود $800KV$ ایجاد می‌کرد. در این شتاب‌دهنده با استفاده از مدارات خازنی موازی که از طریق پل‌های متوالی یکسوساز که فقط در یک جهت اجازه عبور جریان را می‌دهند ولتاژهایی تا چند ده برابرولتاژ منبع تغذیه قابل حصول است.

۴) شتاب‌دهنده سیکلوترون

ماشین‌های هدف ثابت دارای یک محدودیت ذاتی در انرژی بخاطر شکست ولتاژ و تخلیه الکتریکی هستند. یکی از روش‌های غلبه بر این محدودیت و رسیدن به انرژ ی‌های بالاتر استفاده از اصل تشدید است. سیکلوترون که اولین بار در سال ۱۹۲۹ توسط ارنست لاورنس ساخته شد، ساده‌ترین ماشینی است که از این اصل بهره می‌برد. این شتاب‌دهنده از دو محفظه فلزی D شکل توخالی خلأ شده تشکیل شده است، که به یک منبع ولتاژ بالا متصل می‌شوند. تمام سیستم درون یک میدان مغناطیسی قوی عمود بر دی‌ها قرار داده می‌شود. اگر چه دی‌های توخالی به منبع ولتاژ بالا متصل می‌شوند، به‌خاطر اثر حفاظتی دیواره‌های محفظه فلزی، هیچ میدان الکتریکی درون آن‌ها وجود نخواهد داشت، در نتیجه میدان الکتریکی متغیر قوی



شکل ۳.۱: **طرح شماتیک از شتابگر کوک- کرافت والتون.**

فقط در شکاف میان دی‌ها وجود دارد. در این حالت انرژی ذرات درون دی‌ها ثابت و نیروی الکتریکی فقط درون شکاف به یون‌ها وارد می‌شود. منبع تولید یون در شکاف میان دی‌ها قرار داده می‌شود و بسته به علامت ولتاژ در زمان مشخص، یون درون شکاف به‌سوی یکی از دی‌ها شتاب داده می‌شود. یون‌ها درون دی‌ها به‌خاطر اثر خمشی میدان مغناطیسی مسیر دایره‌ای را طی خواهند کرد.

هنگامی که ذره وارد یکی از دی‌ها می‌شود، اثر میدان الکتریکی بر روی آن از بین می‌رود و یون فقط تحت تاثیر میدان مغناطیسی مسیر دایره‌ای را طی کرده و از آن خارج می‌شود. زمانی که یون وارد شکاف میان دی‌ها می‌شود، علامت ولتاژ دی‌ها تغییر کرده و آن‌را به سمت دی مقابل شتاب می‌دهد. یون در دی مقابل مشابه با حالت قبل، فقط تحت تأثیر میدان مغناطیسی بوده و مسیری دایره‌ای را طی می‌کند و سپس از آن خارج می‌شود، مجدداً علامت ولتاژ دی‌ها تغییر کرده و یون را به سمت دی دیگر شتاب می‌دهد. این کار به‌طور مکرر، بسته به فرکانس منبع ولتاژ متغیر، ادامه پیدا می‌کند و در این حالت انرژی و شعاع مسیر حرکت یون در هر عبور از شکاف افزایش می‌یابد تا این‌که از سیستم خارج شود. روابط مفید در

سیکلوترون‌ها به شکل زیر است:

$$|\vec{F}| = |q\vec{v} \times \vec{B}| = \frac{mv^2}{r} \tag{۱.۱}$$

$$t = \frac{\pi r}{v} = \frac{m\pi}{qB} \tag{۲.۱}$$

$$v = \frac{qBr}{m} \tag{۳.۱}$$

که t در رابطه (۲.۱) نیم پریود می‌باشد یعنی زمانی که طول می‌کشد تا ذره یک مسیر نیم‌دایره را طی کند و همان‌طور که در رابطه دیده می شود مستقل از شعاع مسیر است.

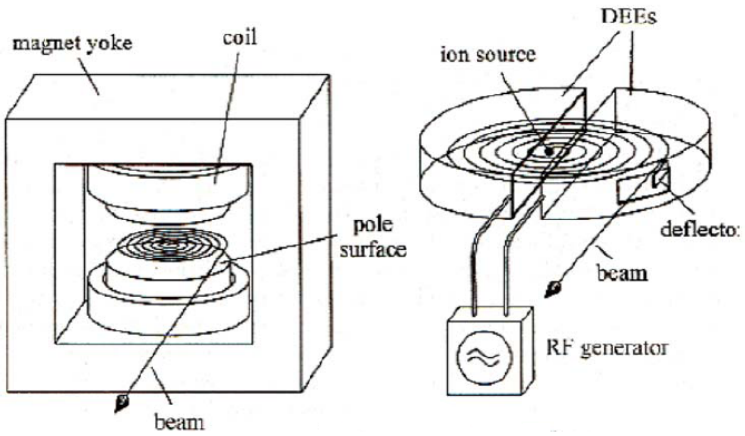
افزایش طول مسیر با افزایش سرعت ناشی از شتاب‌گیری بین دو دی خنثی می‌شود. هرگاه نصف دوره تناوب ولتاژ متناوب اعمال شده بر دی ها مساوی با زمان دوران نیم‌دایره باشد، یعنی:

$$\frac{T}{2} = t = \frac{m\pi}{qB} \Longrightarrow \nu = \frac{1}{2t} = \frac{qB}{2\pi m} \tag{۴.۱}$$

در اینصورت، میدان در هم‌زمانی کامل با عبور ذرات از فاصله بین دی‌ها به طور متناوب تغییر می‌کند و ذره هربار که از این فاصله رد می‌شود تحت تأثیر یک ولتاژ شتاب افزایشی قرار می‌گیرد.

$$v_{max} = \frac{qBr}{m} \Longrightarrow E_{kmax} = \frac{q^2B^2r^2}{2m} \tag{۵.۱}$$

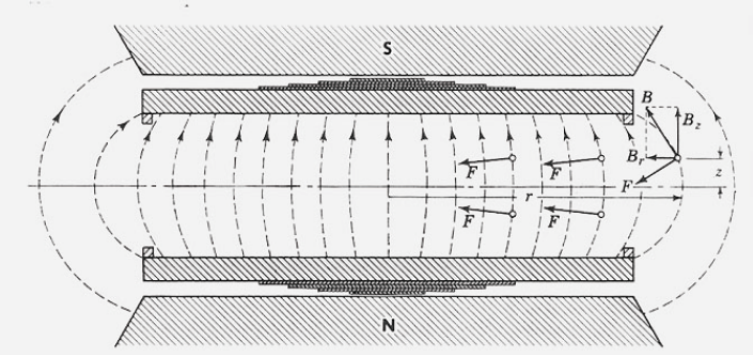
در میکروترون‌ها، با افزایش شعاع دوران و نزدیک شدن به لبه دی‌ها، خطوط میدان مغناطیسی تا حدی



شکل ۴.۱: **طرح شماتیک از شتابگر سیکلوترون.**

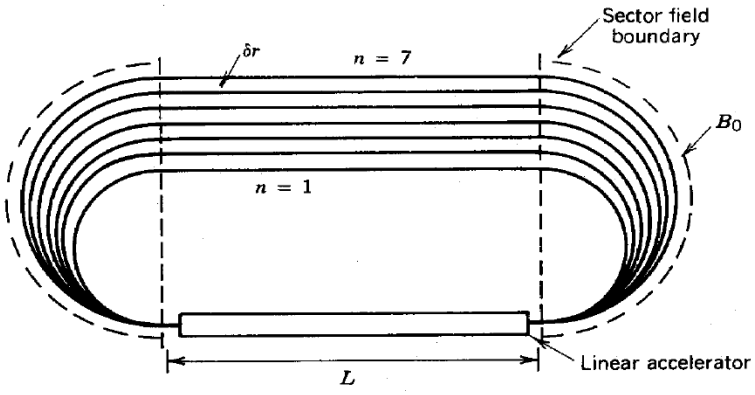
از راستای قائم واقعی منحرف می‌شوند. این میدان حاشیه‌ای متضمن دو اثر است، یکی سودمند و یکی زیان‌بار.

انحنای خطوط میدان یک مؤلفه نیروی خالص به طرف سطح میانی به‌دست می‌دهد که موجب کانونی



شکل ۵.۱: **مؤلفه نیروی خالص به سمت صفحات میانی در اثر انحنای خطوط میدان.**

کردن باریکه می‌شود و از واگرایی باریکه جلوگیری می‌کند، که این اثر سودمند آن است. از طرف دیگر انحنای خطوط میدان به معنای از دست رفتن یکنواختی میدان است. با توجه به رابطه (۴.۱)، با تغییر B، اگر فرکانس ثابت بماند شرط تشدید دیگر برقرار نخواهد ماند. مشکل جدی‌تری که در سیکلوترون‌ها بروز



شکل ۶.۱: **طرح شماتیک از شتاب‌دهنده میکروترون.**

می‌کند، مشکلات ناشی از رفتار نسبیتی ذرات شتابدار است. در حالت نسبیتی داریم:

$$m \to \frac{m}{\sqrt{(1-\frac{v^2}{c^2})}} = \gamma m \qquad \gamma >> 1 \tag{۶.۱}$$

$$\nu = \frac{qB}{2m\pi} \quad , \quad \nu\prime = \frac{qB}{2\gamma m\pi} \qquad \Rightarrow \qquad \nu\prime < \nu \tag{۷.۱}$$

یعنی با افزایش انرژی ذره فرکانس تشدید کاهش می‌یابد و باید فرکانس منبع تغذیه از یک مقدار فرین بالا تا یک مقدار فرین پایین، در طی فرآیند شتاب جاروب شود، که به ایده سنکروسیکلوترون منجر می‌شود. به نظر می‌رسد یک راه دیگر برای غلبه بر مشکل افزایش B، هم‌زمان با افزایش انرژی و جرم ذرات وجود دارد، یعنی در شعاع‌های بزرگ‌تر مقدار میدان نیز بزرگ‌تر باشد، ولی در اینصورت خطوط میدان به طرف داخل خم می‌شوند و یک اثر واکانونی‌کننده ایجاد می‌کنند.

در طرح اساسی سیکلوترون با میدان ثابت و بسامد ثابت، هیچ راه قابل قبولی برای جبران اثرات نسبیتی وجود ندارد و این امر تنها محدود کننده اندازه این ماشین‌هاست. همان‌طورکه اشاره شد برای غلبه بر این مشکل، یکی از راه‌حل‌ها تغییر دادن بسامد است که به سیکلوترونی با مدوله‌سازی بسامد منجر می‌شود، که سنکروسیکلوترون نام دارد. در این ماشین‌ها برخلاف سیکلوترون، دست‌یابی به باریکه‌ای پیوسته امکان‌پذیر نیست، زیرا زمان مورد نیاز برای طی مدارهای نیم‌دایره دیگر ثابت و مساوی با نصف دوره تناوب (که اینک متغیر است) نخواهد بود، بنابراین ذرات در عبور از سنکروسیکلوترون به‌صورت دسته‌ای یا بانچ بانچ حرکت می‌کنند. در سنکروسیکلوترون، بسامد از مقدار حداکثر خود (هنگامی که دسته در نزدیکی مرکز است و شتاب ذرات و افرایش نسبیتی جرم اندک است)، تا مقدار حداقل خود (هنگامی که دسته آماده خروج از سیکلوترون است و انرژی آن حداکثر و جرم آن به بالاترین مقدار خود افزایش می‌یابد)، جاروب می‌شود.

۳.۲.۱ پایداری فاز در سیکلوترون

برای درک مفهوم پایداری فاز، به رغم این‌که باید در سیکلوترون ذرات در لحظه ماکزیمم بودن میدان از فاصله بین دی‌ها عبور کنند، فرض می‌کنیم ذره‌ای از یک دسته درست در زمان صفر بودن میدان الکتریکی به فاصله بین دی‌ها برسد.

ذره‌ای را در نظر می‌گیریم که در مرکز دسته در حال دوران است و در لحظه‌ای به فاصله بین دی‌ها می‌رسد که ولتاژ در مقدار صفر است. چنین ذره‌ای پیوسته در این مدار باقی می‌ماند و پایدار است. به این مدار یک مدار همگام و به آن ذره یک ذره سینکرونوس[۱] می‌گویند.

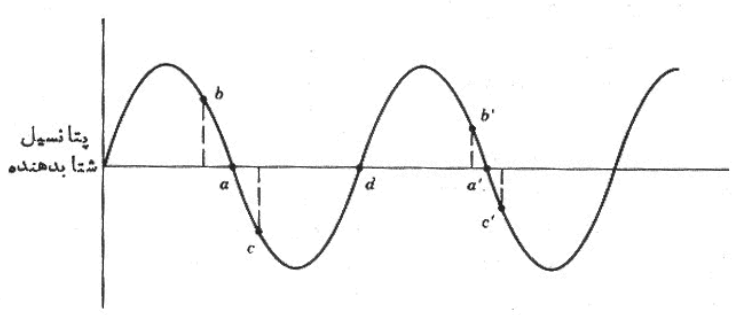
حال فرض می‌کنیم ذره‌ای کمی زودتر و در زمانی که میدان بین دی‌ها مطابق شکل (۷.۱)، در حالت b

[۱] synchronous particle

است به شکاف برسد، به این ذره یک پتانسیل شتاب‌دهنده وارد می‌شود که انرژی و شعاع مدارش را طبق رابطه:

$$E_{kmax} = \frac{q^2 B^2 r^2}{2m} \qquad (۸.۱)$$

افزایش می‌دهد، اما چون جرم آن نیز افزایش می‌یابد طبق رابطه (۴.۱)، بسامد دوران کاهش می‌یابد و دوره تناوب زیاد می‌شود، بنابراین در عبور بعدی آن قدرها زودتر از ذره سینکرونوس به فاصله بین دی‌ها نمی‌رسد و فاصله زمانی آن‌ها کم‌تر می‌شود، یعنی نزدیک‌تر به مرکز دسته قرار می‌گیرد. به همین طریق ذره‌ای که در دور اول دیرتر از ذره سینکرونوس به مرکز دی‌ها رسیده در دور بعدی کمی زودتر می‌رسد و به مرکز دسته نزدیک‌تر می‌شود، ولی ذره‌ای که از ابتدا تقدم داشته همواره تقدم فاز خواهد داشت ولی این تقدم کم‌تر و کم‌تر می‌شود و به همین ترتیب ذره‌ای که از ابتدا تأخیر فاز داشته همواره تأخیر فاز خواهد داشت ولی مقدار آن کم‌تر و کم‌تر می‌شود. به این امر پایداری فاز می‌گویند. در مدارهای دایره‌ای سیکلوترونی



شکل ۷.۱: **پایداری فاز در سیکلوترون.**

اغلب (در حالی‌که اثرات نسبیتی قابل توجه باشند) افزایش انرژی به کاهش سرعت زاویه‌ای می‌انجامد. به دلایل کاملاً متفاوت همین اثر در مدارات ماهواره‌ها در میدان گرانشی نیز رخ می‌دهد. هرگاه موتورهای عقبی روشن شوند و افزایش در انرژی سفینه به وجود آید سفینه با شعاع مدار بزرگ‌تری به حرکت ادامه می‌دهد که نتیجه آن کاهش سرعت زاویه‌ای مداری است. در بعضی از شرایط روش مناسب برای سبقت گرفتن از جسمی که جلوتر از ما در حال دوران است کم کردن سرعت سفینه است نه زیاد کردن سرعت آن!

در سنکروسیکلوترون، هنگامی که بسامد به آرامی کاهش می‌یابد شعاع مدار همگام افزایش خواهد یافت و همراه با آن انرژی فزونی می‌یابد. با هر بار عبور از فاصله بین دی‌ها، بسامد در حال کاهش باعث می‌شود

که ذرات نسبت به مدار همگام زودتر ظاهر شوند، این ذرات بر اثر پایداری فاز هم شتاب می‌گیرند و هم دسته‌بندی می‌شوند.

اگر به جای تغییر بسامد همراه با افزایش انرژی، افزایش میدان مغناطیسی در شعاع‌های بزرگ‌تر را به منظور جبران اثر افزایش جرم نسبیتی لحاظ کنیم، همان‌طور که گفته شد یک اثر واکانونی‌کننده مخرب بر باریکه اعمال می‌شود. هرگاه میدان مغناطیسی به بخش‌هایی از میدان تناوبی شدید و ضعیف تقسیم شود، کانونی باقی ماندن باریکه را به‌رغم افزایش $\vec{B}$ در شعاع‌های بزرگ‌تر می‌توان تضمین نمود. چنین سیکلوترونی، سیکلوترون قطاعی، AVF، نامیده می‌شود. مدار پایدار در این سیکلوترون‌ها دایره‌ای نیست و ذره حول مدار دایره‌ای نوسانات شعاعی خواهد داشت. در مرز بین قطاع‌های متوالی با میدان شدید و ضعیف، یک مؤلفه لختی برای میدان وجود خواهد داشت که منجر به تولید یک نیروی قائم که سعی در حفظ باریکه در صفحه میانی به‌صورت کانونی دارد می‌شود. این اثر کانونی‌کننده باید به‌قدری قوی در نظر گرفته شود که بر اثر واکانونی‌کنندگی میدانی، که به طور شعاعی در حال افزایش است، غلبه کند.

سیکلوترون‌های AVF، دارای باریکه پیوسته با جریان زیاد می‌باشند. از این نوع شتاب‌دهنده برای تولید باریکه مزون‌های π و μ و همچنین مطالعه واکنش‌های یون سنگین استفاده می‌شود.

۴.۲.۱ شتاب‌دهنده‌های سنکروترون

در این شتاب‌دهنده‌ها شدت میدان مغناطیسی و بسامد تشدید هر دو متغیر هستند ولی شعاع مسیر ذرات در انرژی‌های بالا تقریباً ثابت باقی می‌ماند. بنابراین میدان مغناطیسی مورد نیاز برخلاف سیکلوترون‌ها یا سنکروسیکلوترون‌ها که در تمام حجم دورانی قرص اعمال می‌شد، فقط در ناحیه محیط اعمال می‌شود. در این شتاب‌دهنده‌ها ذرات توسط یک آهن‌ربای حلقوی در مسیر دایره‌ای حرکت می‌کنند و در هر دوران هنگام عبور از یک فاصله تو خالی توسط میدان الکتریکی شتاب می‌گیرند. با افزایش فرکانس، ولتاژ متناوب دوسر فاصله خالی باید افزایش یابد تا شرایط تشدید محفوظ بماند. به طور هم‌زمان باید میدان مغناطیسی نیز افزایش یابد تا شعاع را ثابت نگه‌دارد. در این‌جا میدان به‌صورت زمانی تغییر می‌کند نه مانند سیستم AVF به‌صورت مکانی.

دریک میدان مغناطیسی به شدت B، ذره باردار e در قوس دورانی با شعاع r، دارای تکانه زاویه‌ای $p = erB$