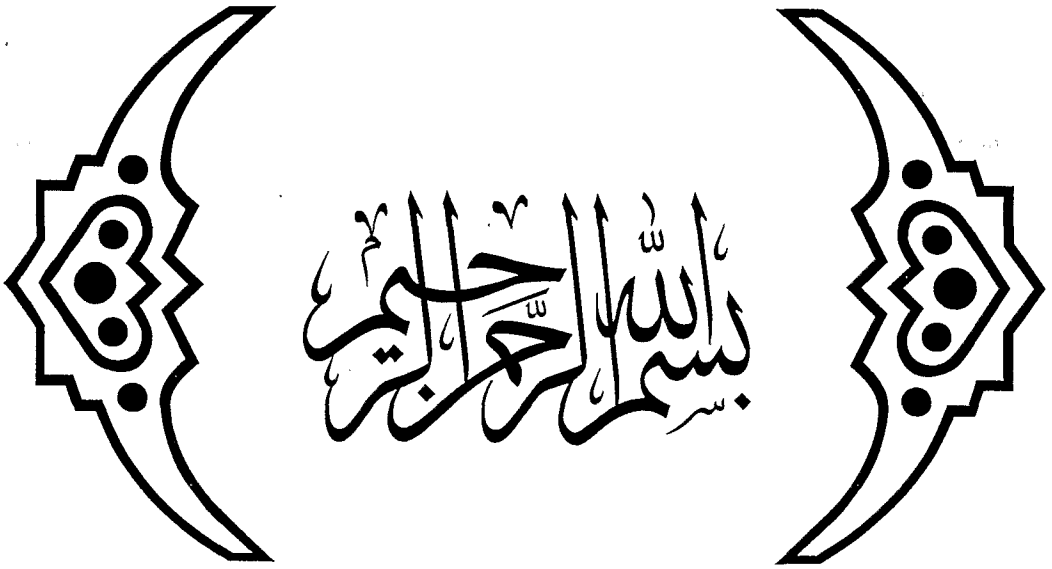


٣٩٠٤٠١

QC
۲۵۷
۸۴/۱۲/۲۴

دانشگاه پیام نور
مرکز مشهد

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک هسته ای

عنوان:

مطالعهٔ پدیدهٔ پس خمیدگی در ایزوتوپهای اوتربیوم

Back bending in Ytterbium isotops

۱۳۸۷/۲/۱۱

استاد راهنما

دکتر سعید محمدی

نگارش

مجید شاهقاسی

سال ۱۳۸۴

۱۰۴۰۳۹

تقدیم به:

پدر و مادرم

که وجودشان مایهٔ سربلندی و افتخار من است.

سپاسگزاری

در ابتدا بر خود لازم می دانم تا از زحمات و راهنمایی های ارزندهٔ استادان و سروران گرامی گروه علوم پایه تقدیر و تشکر به عمل آورم . بویژه از استاد گرامی ، جناب آقای دکتر سعید محمدی که با دقت و حوصلهٔ زیاد این رساله را از نظر گذرانده وبا رهنمودهای ارزندهٔ خود ،در رفع اشکالات و کاستی ها مرا راهنمایی فرمودند. تشکر وسپاسگزاری می نمایم .از استاد ارجمند جناب آقای دکتر ایزدی که مشاورهٔ این پایان نامه را بر عهده داشتند و در تهیهٔ آن نگارنده را مدیون خود ساختند کمال تشکر و قدردانی را دارم .

از همهٔ کسانی که مرا در این تحقیق یاری نمودند ،بویژه آقای عبدالناصر احمدی بنکدار و عموی بزرگوارم آقای عبدالرضا شاهقاسی ، که در مدت دورهٔ تحصیلم همواره مرا رهنمون و مشوق بودند بسیار سپاسگزارم .

از همسر و دختر مهربانم که سختیها را تحمل کرده و از هیچ کمکی دریغ نورزیده اند ممنونم.

فهرست

مقدمه ۱

فصل اول :شتابدهنده ها

شتابدهنده ها ٤

شتابدهنده های الکترو استاتی ۷

شتابدهنده های سیکلوت ۱۰

شتابدهنده های سنکروترون ۱٤

شتابدهنده های خطی ۱۵

شتابدهنده های با باریکه خطی ۲۰

فصل دوم :واکنشهای هسته ای

واکنشهای هسته ای ۲٤

واکنشهای هسته مرکب ۲۵

فصل سوم :آشکارسازی تابشهای هسته ای

آشکارسازی تابشهای هسته ای ۲۹

انواع آشکارسازها

شمارگرگازی ۳۰

آشکارساز سوسوزن ۳۱

آشکارساز نیمرسانا ۳٤

فصل چهارم : مدلهای هسته ای

مدلهای هسته ای

مدل ارتعاشی ۳۷

مدل چرخشی ۳۸

نمودار اورست و بک بندینگ(پس خمیدگی) ٤۲

مدل لایه تغییر شکل یافته ٤۳

فصل پنجم : پدیدهٔ پس خمیدگی ونتیجه گیری

مطالعهٔ پدیدهٔ پس خمیدگی در ایزوتوپهای اوتربیوم ٤۸

مقدمه:

برای انجام مطالعات ساختار هسته ای باید هسته ها را در حالت برانگیخته داشته باشیم ، که این حالات برانگیخته توسط واکنشهای هسته ای بدست می آیند . برای انجام یک واکنش هسته ای ، باید باریکه ای از ذرات حاصل از یک شتابدهنده به توده ای از ماده برخورد کنند . هسته های برانگیخته عموماً از این حالت به سرعت با گسیل پرتو گاما واپاشیده می شوند . اگر تابشهای گامای حاصل از واپاشی حالتهای برانگیختهٔ هسته توسط آشکارسازها ، آشکارسازی شوند می توانیم به کمک آنها اطلاعاتی در مورد ساختار هسته بدست آوریم.

توسط واکنشهای هسته ای از نوع هسته مرکب که به منظور مطالعهٔ تعدادی از ایزوتوپهای زوج - زوج **Yb** انجام شده است ، حالتهای برانگیختهٔ طیف دورانی را برای هر یک از ایزوتوپها بدست آورده اند .(حرکت دورانی را در هسته هایی بهتر می توان مشاهده کرد که شکل تعادل غیر کروی دارند .) این هسته ها را که ممکن است تغییر شکل زیادی نسبت به شکل کروی در آنها رخ داده باشد غالباً هسته های تغییر شکل یافته می نامند .

این گونه هسته ها در گسترهٔ جرمی $۱۵۰ \prec A \prec ۱۹۰$ دیده می شوند . این حالتها از طریق یک سری گذارهای گاما به صورت پیاپی به حالت پایه انتقال میابند .مشاهده این گذارهای پیاپی راهی را برای مطالعهٔ این حالتهای برانگیخته فراهم میسازد . بخصوص می توان مطالعه کرد که آیا فرض گشتاور لختی ثابت در چنین برانگیختگی های بالایی معتبر باقی می ماند یا خیر .

انرژیهای دورانی با معادلهٔ $E = \frac{\hbar^۲}{۲I} J(J+۱)$ نشان داده میشود . یک راه برای بررسی این فرض آن است که نمودار انرژی حالتها را بر حسب $J(J+۱)$ ترسیم کنیم و ببینیم که آیا همانند آنچه معادله نشان می دهد شیب منحنی ثابت باقی می ماند یا خیر . نمودار ترسیم شده برای تعدادی از ایزوتوپهای **Yb** انحراف از رفتار خطی مورد انتظار را نشان می دهد . یک روش بهتر آن است که گشتاور لختی را که بر حسب انرژی گذارها و **J** محاسبه شده بر حسب $\omega^۲$ ترسیم کنیم . در تعدادی از نمودارها آشفتگی دیده میشود که **(Back bending)** یا پس خمیدگی نامیده می شود که به این علت است که انرژی دورانی از مقدار لازم برای شکستن یک زوج نوکلئون تزویج شده تجاوز می کند . گشتاور لختی هسته تغییر میکند در این تحقیق می خواهیم ببینیم تغییرات بوجود آمده

در هسته بر اســـاس مدل تغییر شکل یافته نیلسون قابل توضیح می باشد یا خیر .
به این منظور ابتدا در بارهٔ عوامل دخیل در مطالعهٔ پدیدهٔ پس خمیدگی (شـــتابدهنده هـا ، واکنشهای هسته ای ، آشکارسازها ، مدلهای هسته ای) توضیح مختصری خواهیم داد .

فصل اول

شتابدهنده ها

شتا بدهنده ها

منظور از از شتابدهی ذرات باردار ، گسیل باریکه ای از ذرات بخصوص با انرژی خاص به طرف یک هدف مورد نظر است . انواع مختلفی از روشها برای انجام این امر وجود دارند که در تمام آنها از آرایشهای گوناگون میدانهای الکتریکی و مغناطیسی استفاده میشود . شتابدهنده به عنوان یک دستگاه الکترونیکی شباهتهای زیادی به لامپ تصویر تلویزیون دارد .یک شتابدهنده به اجزای زیر نیاز دارد :

١ — یک چشمه ذرات باردار .

٢ — یک میدان الکتریکی به منظور شتاب دادن ذرات .

٣ — ابزار کانونی کننده برای غلبه بر تمایل طبیعی باریکه به واگرا شدن .

٤ — منحرف کننده ها برای به حرکت در آوردن باریکه در راستای دلخواه .

٥ — یک هدف از ماده مورد نظر برای برخورد با باریکه .

٦ — اتاقکی که تمام قسمتها را در خلاء بالا نگهداری کند تا از پراکندگی باریکه در اثر برخورد با مولکولهای موجود در هوا جلوگیری به عمل آید.

طرح شتابدهنده ها عمدتا بر حسب منظوری که برای آن طراحی میشوند تغییر می کند . در پاره ای موارد ، انرژی زیاد و در پاره ای موارد شدت زیاد مورد نظر است . به طور کلی شتابدهنده را میتوان به صورت شتابدهنده های انرژی پایین ، انرژی

متوسط یا انرژی بالاگروه بندی کرد . شتابدهنده های انرژی پایین که برای ایجاد باریکه هایی در گسترهٔ انرژی ۱۰۰MeV — ۱۰ به کار میروند، غالبا در مطالعات واکنش یا پراکندگی و به منظور توضیح ساختار حالتهای نهایی خاص و شاید حتی حالتهای برانگیختهٔ منفرد مورد نیازند .در این شتابدهنده ها باید گزینش انرژی دقیق و شدت جریانها به قدر کافی بالا باشد ، زیرا آمار شمارش دقت بسیاری از آزمایشها را محدود میکند . گرم شدن هدفها توسط باریکه های پرشدت میتواند قابل ملاحظه باشد و غالبا لازم است هدف را خنک کرد تا از تخریب آن جلوگیری بعمل آید .

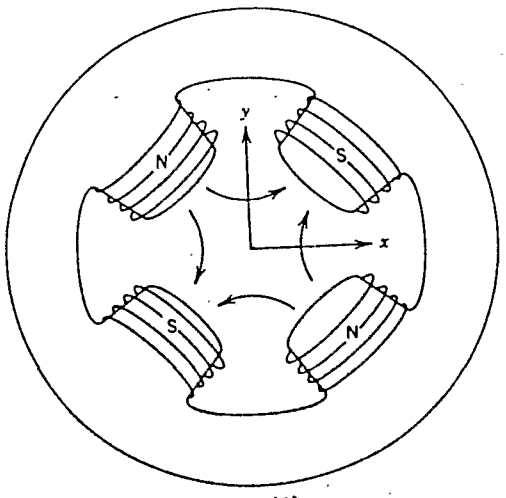
شتابدهنده های انرژی متوسط در گستره انرژی تقریبا ۱۰۰۰MeV — ۱۰۰ کار می کنند .

در این انرژیها ، برخورد نوکلئونها با هسته هامیتواند مزونهای π ایجاد کند و لذا این نوع شتابدهنده ها غالبا برای مطالعه نقش تبادل مزونها در نیروی هسته ای بکار میروند . فقط در چند مورداست که این شتابدهنده ها قادر به تفکیک حالتهای برانگیخته نهایی منفرد هستند . شتابدهنده های انرژی بالا باریکه های به انرژی ۱GeV (۱۰۰۰MeV) و بالاتر تولید می کنند . منظور از ساخت این شتابدهنده ها کمتر بررسی ساختار هسته ای است ، بلکه بیشتر به تولید انواع مختلف ذرات و مطالعه خواص آنها مربوط میشود .در اینجا ،هدف اصلی بالاترین انرژی ممکن در دستگاه مرکز جرم است، ودر حال حاضر ، طراحی ماشینهایی که قادر به تولید انرژی بالاتر از ۱۰۰۰ GeV باشند ،در دست بررسی است .

در اینجا به طور کلی انواع شتابدهنده ها و نقاط قوت و ضعف آنها را مورد بحث قرار میدهیم. قبل از انجام این کار ، بعضی از دستگاههایی را که از لوازم ضروری هر ماشین شتابدهنده ای است ، مورد بررسی قرار می دهیم .

اولین دستگاه از این نوع چشمه ی یون است که از آن ، باریکه ی یونها یا الکترونهایی که باید شتاب داده شوند ، سرچشمه میگیرند. اساس عملکرد این دستگاه به این صورت است که گازی معمولا تحت تا ثیر تخلیهٔ الکتریکی یونیده میشود و یونهای باردار مثبت بر اثر پتانسیلی به ولتاژ ۱۰ KV به طرف یک الکترود منفی شتاب میگیرند و استخراج می شوند . برای بعضی کاربردها ، ممکن است به یک باریکه ی یونهای منفی نیاز داشته باشیم که در این صورت باید اتمهای خنثایی را در نظر گرفت که قادرند الکترون اضافی را بپذیرند . هرگاه باریکه یونهای مثبت را از میان گاز خنثایی عبور دهیم که انرژی پیوند الکترونها با اتمهایشان نسبتا ضعیف باشد ، در این صورت احتمال زیادی وجود دارد که

یونهای مثبت الکترونها را به دام اندازند و به یونهای منفی تبدیل شوند . دستگاه ترابرد باریکه (اپتیک باریکه) شامل تعدادی وسایل مغناطیسی یا الکتریکی است که باریکه را کانونی میسازند و آنرا در طول مسیر مورد نظر منحرف میکنند . در قیاس با اپتیک ، دستگاههای کانونی کننده را عدسی مینا مند ، اما این عدسیها بجای شیشه از میدانهای مغناطیسی تشکیل میشوند. شکل (۱-۱) نمونه ای از یک عدسی چهار قطبی را نشان میدهد .



شکل (۱-۱) سطح مقطع عدسی چهار قطبی در راستای باریکه

آهنرباهای خم کننده که راستای باریکه را تغییر می دهند و آنرا به مؤلفه هایش تجزیه می - کنند . آهنربا های خم کننده در تجزیه باریکه ای از محصولات واکنش ، نظیر تشکیل باریکه ثانویه از نوع خاص از میان محصولات ناشی از واکنش ، می توانند خیلی مفید باشند .

هدفهای باریکه های شتاب یافته نیز همانند موارد استفادهٔ شتابدهنده ها متنوع اند . برای انجام طیف سنجی دقیق هسته ای ، نظیر مطا لعهٔ حالتهای خاص بر انگیخته و سطح مقطع آنها ، معمولا باید آشفتگی باریکه ورودی و خرو جی تا سر حد امکان کوچک باشد ، بنابراین هدفهای خیلی نازک (در مرتبه $10\,\mu m$)به کار میروند . از طرفی هرگاه بخواهیم یک باریکه پروتونهای پر انرژی را کاملا متوقف سازیم تا ذرات ثانویه ایجاد شوند ، هدفهای ضخیم (به ضخامت دهها سانتیمتر) را باید به کار ببریم . غالبا هر دو نوع هدفهای نازک وضخیم را سرد میکنندتا گرمای ناشی از تابش باریکه از آنها خارج شود .

از جمله قسمتهای اساسی هر دستگاه شتابدهنده ای را وسایل آشکارسازی و تحلیل کننده ای تشکیل میدهند که برای ثبت نوع ذره ، انرژی ، زمان وجهت حرکت محصولات واکنش به کار میروند.

با این بحث مختصر درباره ی چشمه، طرز تشکیل.انحراف وتحلیل باریکه های ناشی از شتابدهنده ،اینک به تکنیکهای متداول برای انرژی دهی به ذرات تا انرژی دلخواه می پردازیم.

الف:شتابدهنده های الکترو استاتیکی

ساده ترین راه شتابدادن به ذرهٔ باردار ، افت آن از یک اختلاف پتانسیل ثابت V است. هرگاه بار ذره برابر q باشد ،انرژی جنبشی qv دست میا ورد. بزرگترین اختلاف پتانسیلی را که میتوان در شرایط شتابدهنده ایجاد کرد در حدود $۱۰^{۷}$ V است ، و لذا یونها انرژی در حدود ۱۰Mev به ازای واحد بار کسب می کنند .این درست انرژی است که برای بسیاری از مطالعات ساختار هسته ای نیازداریم وبنابراین این نوع شتابدهنده در آزمایشگاههای فیزیک هسته ای سراسر جهان ،کاربرد وسیعی دارد .

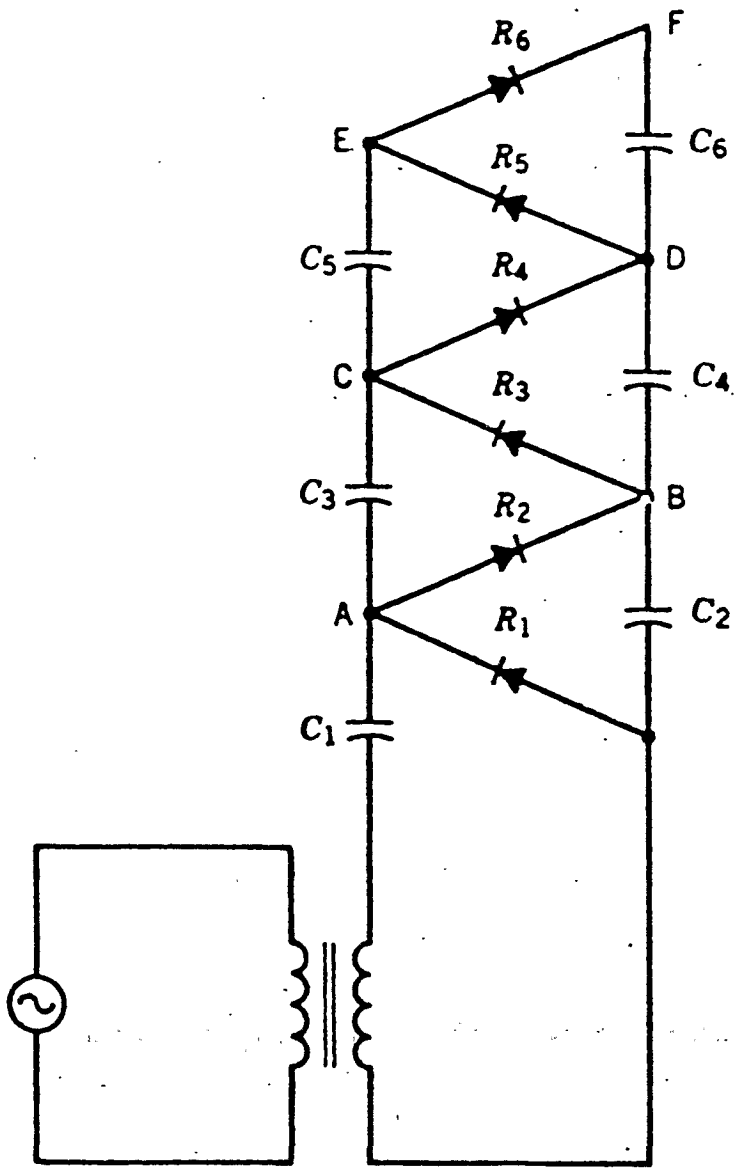
تکنولوژی شتبدهنده های الکترو استاتیکی شامل برقرار ی و نگهداری یک پایانه ولتاژ بالا به منظور شتاب دادن به ذرات باردار حاصل از چشمهٔ یون است . ساخت اولین شتابدهنده از این نوع برای کاربرد های فیزیک هسته ای درسال ۱۹۳۲ توسط کوکلرافت و والتون صورت گرفت .آنها دستگاهی را ساختند که ولتاژ آن سرانجام به ۸۰۰KV رسید .شکل (۲-۱) اساس کار دستگاه را نشان می دهد که در آن خازنها در اتصال موازی به یک پتانسیل مشترک وصل شده اند و سپس بطور متوالی تخلیه می شوند .کلید زنی بین بین اتصالات متوالی وموازی توسط یکسوسازها انجام می شود.

کوکلرافت ووالتون با استفاده از تکنیک افزایش ولتاژ ،اولین فروپاشی هسته ای ناشی از واکنش ذرات باردار مصنوعا شتاب یافته را مورد بررسی قرار دادند .

$$P+Li \longrightarrow He+He$$

به خاطر سادگی طرح ،شتابدهندهٔ کوکلرافت — والتون اهمیت خود را پیش از آنچه از لحاظ تاریخی مستحق آن است حفظ کرده ا ست .

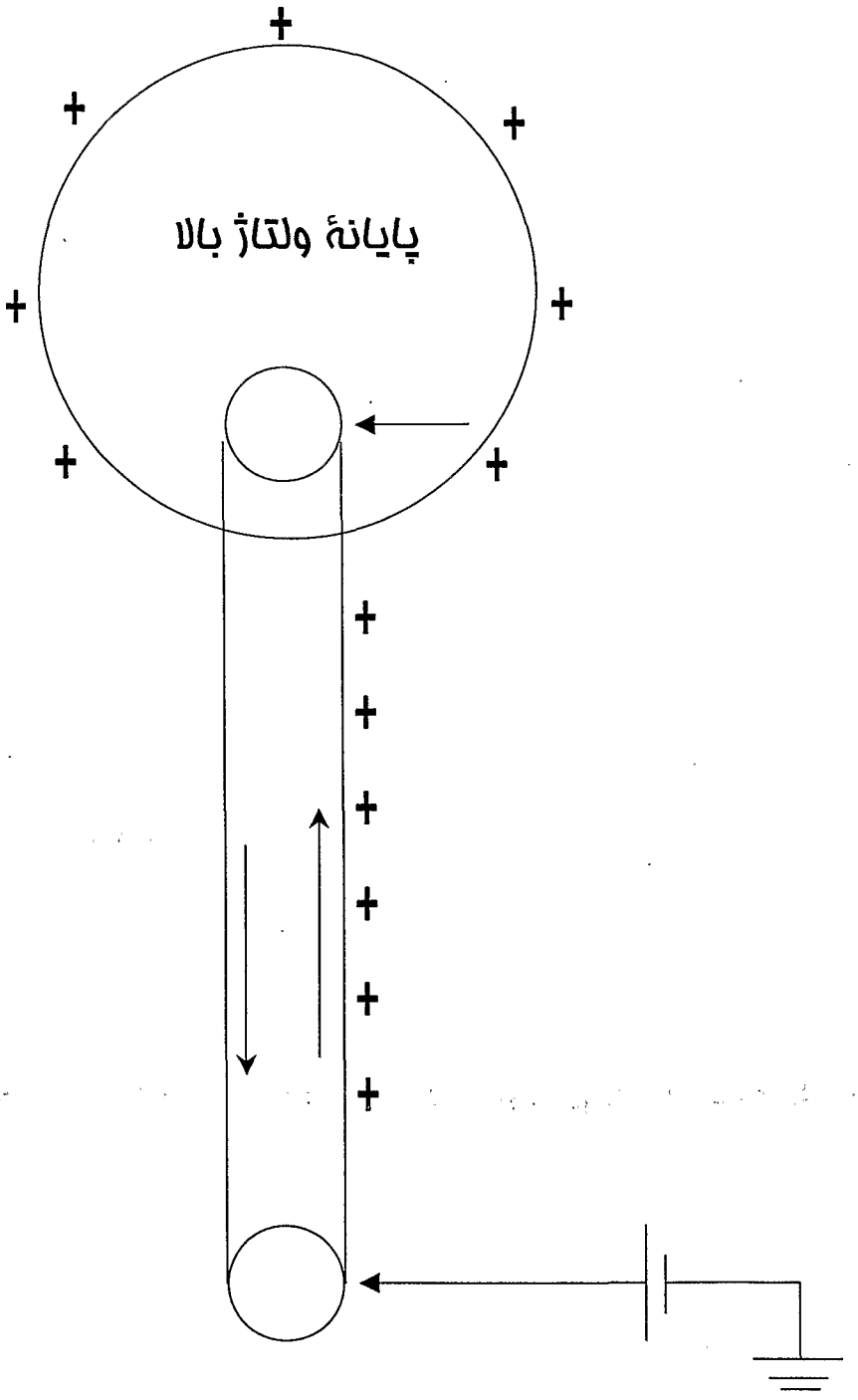
عمومی ترین نوع شتابدهندهٔ الکترواستاتیکی که امروزه درآزمایشگاههای فیزیک هسته ـ ای بکار میرود ،بر اساس مولد واندوگراف ساخته میشود که بطور طرح واره در شکل



شکل (۲-۱) مولد ولتاژ بالای کوکلرافت — والتون . دامنه های ولتاژ ثانویه مبدل V_0 برای ولتاژهای **dc** عبارتند از

$V_F = 6V_0 \quad V_D = 4V_0 \quad V_B = 2V_0$

(۲-۱) نشان داده شده است .



۴

شکل (۳-۱) اساس کار مولد واندوگراف

هنگامی که رسانای داخلی باردار و با پوسته خارجیتر در تماس قرار میگیرد ،تمام بار از رسانای داخلی به طرف رسانای خارجی جریان میابد بدون توجه به اینکه چه مقدار بار در روی آن موجود بوده یا پتانسیل آن چه اندازه بوده است . پتانسیل نهایی رسانای خارجی توسط ظرفیت آن نسبت به اجسام متصل به زمین اطراف آن تعیین می شود ، $V=Q/C$، و در اصل ،با افزایش هر چه بیشتر وبیشتر بار **Q** پتانسیل بدون هیچ حدی افزایش می یابد . در عمل ،تخلیه الکتریکی با ستون عایقی که رسانای خارجی را نگاه میداردیا تخلیه با جو اطراف باعث محدودیت افزایش پتانسیل میشود .برای کاهش تخلیه و جرقه زنی ،مولد در محفظهٔ فشاری محتوی گاز عایق به فشار ۲۰-۱۰ اتمسفر نگهداری میشود و بدین ترتیب از تخلیه جلوگیری بعمل میاید.

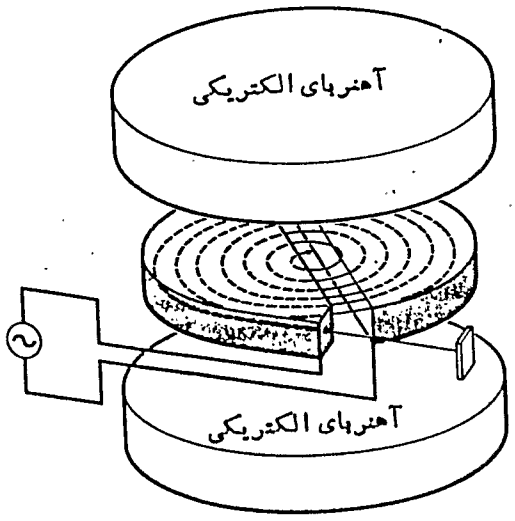
مولد واندوگراف مزیت بسیار بزرگی بر مولدکوکلرافت دارد،ولتاژپایانه در وان دوگراف فوق العاده پایدار وفاقدتموجهای جریان متناوبی است که درموردکوکلرافت - والتون دیده میشود.

ب: شتابدهنده های سیکلوترون

نوع بدیل شتابدهنده های الکترواستاتیکی تک مرحله ای را دستگاه دورانی تشکیل میدهد که در آن باریکهٔ ذرات دورانهای بسیار زیادی را درداخل دستگاه طی میکند ودرهرمدار باافزایش ولتاژکوچکی روبرو میشود تاانرژی ذره به گستره **MeV** برسد . اولین وساده ترین شتابدهنده های ازاین نوع سیکلوترون است که شتابدهندهٔ تشدید مغناطیسی نیز نامیده میشود.

در شکل (٤-١) طرح ساده ای از سیکلو ترون نشان داده شده است . با استفاده از یک میدان مغناطیسی ،باریکه به صورت مسیر دایره ای خم میشود وذرات درداخل دواتاقک فلزی نیم دایره ای که به خاطر شکلشان (**D**) دی نامیده میشوند،به دوران در میایند.دی ها به یک منبع ولتاژ متناوب متصلند . هنگامی که ذرات در داخل دی ها در حرکتند،هیچ میدان الکتریکی بر آنها وارد نمیشودومسیر دایره ای شکلی را تحت اثرمیدان مغناطیسی طی میکنند.اما،درفاصلهٔ بین دی ها ،ولتاژ شتابدهنده ای بر ذرات وارد میشودودر هرچرخه کمی انرژی اضافی کسب می کنند.

ایدهٔ اصلی طرح سیکلوترون درسال۱۹۲۹ توسط ارنست لارنس در دانشگاه کالیفرنیا مطرح شد.نکته مهم این است که زمان مورد نیاز برای اینکه ذره یک مسیر نیم دایره را طی کند مستقل از شعاع مسیر است. یعنی هنگامی که ذرات با حرکت حلزونی به طرف



شکل(٤-١) نمودار ساده ای از یک شتابدهنده سیکلوترون . باریکه با مدار حلزونی شکل شروع به حرکت میکند و به تدریج از آن دور می شود . ذره هر بار که فاصله بین دی ها را طی می کند شتاب می گیرد و بالا خره پس از خروج از دستگاه به طرف هدف گسیل می شود .

شعاعهای بزرگتر پیش میروند ،انرژی کسب میکنند وبا سرعت بیشتری به حرکت در می آیند وافزایش طول مسیر کاملا با افزایش سرعت خنثی میشود . هرگاه نصف دورهٔتناوب ولتاژ متناوب اعمال شده بردی ها مساوی زمان دوران نیم دایره باشد ،در این صورت میدان در همزمانی کامل با عبور ذرات از فاصله بین دی هابطورمتناوب تغییرمیکندوذره هربارکه ازاین فاصله رد میشود تحت تاثیریک ولتاژشتابدهنده قرار می گیرد . نیروی لورنتس در مداردایره ای ،**qvb**، شتاب مرکزگرای لازم رابرای حفظ حرکت دورانی تامین می کندوبنابراین داریم :

$$F = qvb = \frac{mv^2}{r} \qquad (1)$$

وزمان مورد نیازبرای یک دوران نیم دایره ای عبارت است از:

$$t = \frac{\pi r}{v} = \frac{m\pi}{qb} \qquad (2)$$

بسامدولتاژمتناوب مساوی است با:

$$\vartheta = \frac{1}{2t} = \frac{qb}{2\pi m} \qquad (3)$$

که غالبا آنرابسامدسیکلوترن یا بسامدتشدیدسیکلوترن برای ذره ای به بار **q**وجرم **m**که در میدان مغناطیسی یکنواخت **B**حرکت میکندمینامند.

همانطورکه ذره با حرکت حلزونی پیش میرود ،سرعت به تدریج افزایش میابدوبالا ترین سرعت دربزرگترین شعاع **R**حاصل میشود که عبارت است از:

$$v_{max} = \frac{qBR}{m} \qquad (٤)$$

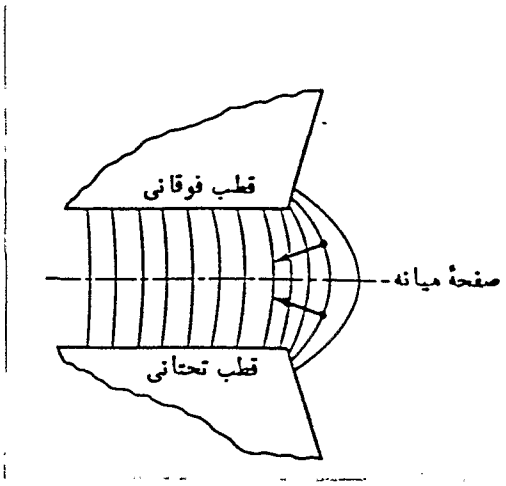
که به حداکثرانرژی جنبشی زیر منجر میشود

$$T = \frac{١}{٢} m v_{max}^{٢} = \frac{q^{٢} B^{٢} R^{٢}}{٢m} \qquad (٥)$$

این معادله نشان میدهد که خوب است سیکلوترنهای با میدانهای بزرگ وشعاعهای بزرگ در اختیار داشته باشیم . در عمل اولین شتابدهندهٔذرات در سال ۱۹۳۱ توسط لارنس واستانلی لیوینگستون دربرکلی ساخته شد . دی ها دارای شعاع **۱۲/٥cm** بود وسیکلوترون می توانست پروتونهای با انرژی **۱/۲MeV** در میدان حدود **۱/۳T** ایجاد کند . بسامد متناظر در حدود **۲۰MHz** است . در خلال چند سال شعاع تا حدود **۳٥cm** و انرژی ذره نیز تا **۱۰MeV** برای پروتونها ، **٥ MeV** برای دوترونها و**۱۰MeV** برای ذرات α افزایش یافت . در اواخر دههٔ ۱۹۳۰ شعاعهای **۷٥cm** قابل حصول شد وگستره های انرژی تا حدود **٤۰MeV** برای ذرات α وپروتونها و**۳۲MeV**برای دوترونها توسعه یافت .

جریان در این سیکلوترنها نوعا در گستره چند ده میکرو آمپر است که از شدت لازم برای مطالعات تفصیلی واکنشهای هسته ای بیشتر است . بدین ترتیب از دههٔ ۱۹۳۰ تا دسترسی تجارتی به شتابدهنده های واندوگراف بزرگ که در دههٔ ۱۹٦۰ عرضه شد ، سیکلوترون متداول ترین شتابدهندهٔ مورد استفاده برای مطالعات ساختار هسته ای از طریق واکنشهای هسته ای بود .

همانطور که باریکهٔ موجود در سیکلوترون به طرف لبهٔ ماشین و به طرف خارج به حرکت در میاید ،خطوط میدان مغناطیسی تا حدی از راستای قائم واقعی منحرف می شوند (شکل ٥-۱) .



شکل(۵-۱) خطوطمیدان مغناطیسی در نزدیکی لبهٔ سیکلوترون از وضعیت قائم منحرف می شوند . نیروی برایند وارد بر یـون (پیکانها)یک اثر کانونی کننده به وجود می آورد .

این میدان حاشیه ای متضمن دو اثر است که یکی سودمندودیگری زیانبار است . انحنـای خطوط میدان ، یک مولفهٔ نیروی خالص به طرف سطح میانی به دست میدهـد کـه موجـب کانونی کردن میشود و از واگرایی باریکه جلوگیری می کند . اما در همان زمـان ، میـدان وضعیت یکنواخت خودِ را از دست میدهد وهرگاه بسامدثابت بـاقی بمـاند ،شـرط تشـدید دیگر برقرار نخواهد بود.

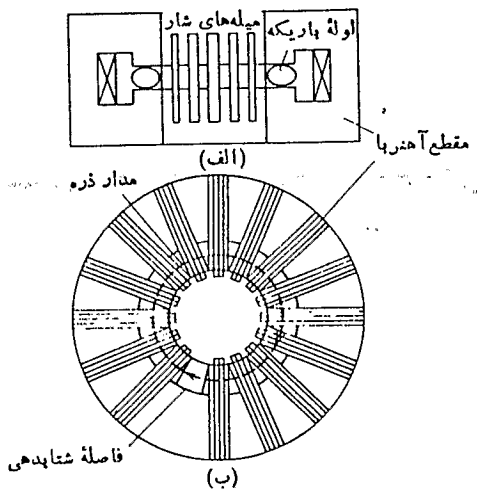
مشکل جدی تر از رفتار نسبیتی ذرات شتابدار ناشی میشود. ازجایکزین کردن تکانه **mv** درمعادله (۱) با مقدار نسبیتی **γmv**که درآن $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ است . با توجه بـه معادله (۳) مشاهده می کنیم که برای برقراری شرط تشدید لازم که با افزایش **v** مقـدار **B** نیز افزایش یابد ولذا در شعاعهای بزرگتر میدان باید بزرگتر شود . این امـر را میتـوان از طریق دستکاری میدان انجام داد ،که دراین صورت خطوط میدان به طـرف داخـل خـم میشوند و در نتیج دارای یک اثر واکانونی کنندهٔ نا خواسته خواهد بود . در طرح اساسـی سیکلوترون با میدان ثابت وبسامد ثابت ، هیچ راه قابل قبولـی بـرای جـبران اثـر نسـبیتی وجودنداردواین امربه محدودیت اندازهٔچنین ماشینهایی منجرمیشود .

برای غلبه بر این مشکل ،یکی از راه حلها تغییردادن بسامد است که به سیکلوتروونی با مدوله سازی بسامد منجر میشود که سنکروسیکلوترون نام دارد .

ج:سنکروترون

توسعه سیکلوترون یا سنکروسیکلوترون تاانرژی بالاتر بدین معنی است که ماشینهایی با شعاعهای بزرگتر ساخته شوند . از آنجا که هزینه ساختن آهنربا رقم اصلی در ساختن سیکلوترون است ،انتظار داریم که هزینه های ساخت سیکلوترونهای بزرگتر برحسب مکعب انرژی افزایش یابد . توسعه سیکلوترونهای ۵۰۰MeV نسل حاضر به ماشینهای با انرژی بالاتر (۵GeV) به سرعت هزینه ساخت را به مرتبه تولید ناخالص ملی آمریکا میرساند . برای حل این معضل باید شتابدهندهٔسنکروترون ساخت که در آن شدت میدان مغناطیسی و بسامد تشدید هر دو تغییر می کنند .

شکل (٦-١) ساده ترین نوع یک سنکروترون را نشان میدهد . ویژگی اساسی این ماشین که با وجود افزایش انرژی هزینه ها را منطقی میکند این است که شعاع مدار ذرات در انرژیهای بالا تقریبا ثابت میماند . بنابراین میدان مغناطیسی مورد نیاز فقط در ناحیه محیط اعما ل میشود و نه در تمام حجم دورانی قرص چنانکه در سنکروترون معمولی دیده میشود . همانطور که در شکل نشان داده شده است ،یک آهنربای معمولی میتواند این وظیفه را انجام دهد . ذرات در مسیری دایره ای حرکت میکنند و در هر دوران هنگام عبور از یک فاصلهٔ خالی ، توسط میدان الکتریکی تشدیدی شتاب میگیرند . با افزایش انرژی . بسامد ولتاژ متناوب دو سر فاصله باید افزایش یابد تا شرایط تشدید محفوظ بماند ، بطور همزمان ، میدان مغاطیسی نیز باید افزایش یابد تا شعاع را ثابت نگه دارد .



شکل(٦-١)منظره ای از سسطح مقطع عمودی و افقی سنکروترون الکترون. چندین آهنربا باریکه را بصورت دایره خم می کنند و یک میدان الکتریکی ذرات را در هر دوران شتتاب می دهد . اگر انرژی ذره بالا باشد ، حتی با اافزاییش انرژی هم شعاع مداری ذره تقرررریباً ثابت باقی می ماند.

د: شتابدهنده های خطی

در شتابدهنده های خطی (که غالبا **linac** نام دارد) همانند مورد سیکلوترون ذرات از طریق یک ولتاژ **ac** شتابهای جدا از هم زیادی را دریافت میدارند و اختلاف در این است که ذرات در **linac** در خط مستقیمی حرکت میکنند .این امر هزینه های زیاد مربوط به آهنرباهای سیکلوترون و اثرات واکانونی کنندگی میدانهای مغناطیسی را برطرف میسازد.در شکل (۷-۱)طرح اساسی یک یک شتابدهنده خطی نشان داده شده است . باریکه از میان تعدادی الکترودهای حلقوی توخالی که به تناوب به قطبهای مخالف منبع ولتاژ **ac** متصل میشوند حرکت میکند . ذرات هنگام عبور از گاف بین الکترودها شتاب میگیرند .به محض ورود به داخل یک الکترود ذره در ناحیه ای با میدان صفر حرکت میکند و برای زمانی مساوی با نصف دوره تناوب ولتاژ **ac** به جلو رانده میشود (نام لوله رانش به همین مناسبت به الکترودها داده میشود) بدین ترتیب قطبیت ولتاژ در خلال زمانی که ذره در داخل لوله رانش است عوض میشود و در نتیجه ذره هنگام عبور از گاف بعدی مجددا شتاب میگیرد . کار چنین شتابدهنده ای وابسته به این شرط است که ورود ذرات به هر گاف در تشدید با میدان الکتریکی دو سر گاف باشد . هر گاه نصف دوره تناوب ولتاژ **ac** باشد دراین صورت طول لوله رانش **n** ام برای ذرات با سرعت **v** باید چنین باشد :

$$L_n = v_n t / ۲ \qquad (۶)$$

برای ذرات نانسبیتی با بار **e** ،پس از عبور از میان **n**گاف با اختلاف پتانسیل **V**انرژی جنبشی ذره عبارت است

$$T_n = neV_0 = \frac{۱}{۲} m v_n^۲ \qquad (۷)$$

در نتیجه خواهیم داشت

$$L_n = \left(\frac{neV_0}{۲m}\right)^{\frac{۱}{۲}} t \qquad (۸)$$

بنابراین طول لوله رانش باید بصورت $n^{۱/۲}$ افزایش یابد . برای ذرات نسبیتی که **v=c** میشود ، طول لوله رانش تقریبا ثابت است .ذرات در عبور از گاف کمی کانونی میشوند که با مراجعه به شکل(۸-۱) میتوان آنرا درک کرد . در نیمهٔ گاف (ناحیهٔ **ab**) ، خطوط نیروی میدان الکتریکی ذرات خارج محور را به طرف داخل کانونی میکنند در حالی که