

دانشگاه پیام نور

مرکز مشهد

دانشکده علوم

گروه فیزیک

عنوان پایان نامه :

بررسی پدیده پس خمیدگی در الیزوتوپ های زوج-زوج الیریم

پایان نامه:

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک هسته ای

مولف:

رقیه دادخواه گندشمین

استاد راهنما

آقای دکتر سعید محمدی

ماه و سال انتشار:

دی ماه ۱۳۸۴

دانشگاه پیام نور - مرکز مشهد - گروه فیزیک

شماره پرونده	QC
شماره ثبت	۵۸۴
شماره و تاریخ	۸۵۲۲۱

۵۵۲۲۱

موسسه انتشارات آران سمنان

۱۳۸۷ / ۲ / ۱۱۲

۱۴۳۹۰۹

# دانشگاه پیام نور

مرکز مشهد

دانشکده علوم

گروه فیزیک

عنوان پایان نامه :

بررسی پدیده پس خمیدگی در اینوتورهای زوج-زوج الیریم

پایان نامه:

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک هسته ای

مولف

رقیه دادخواه گندشمین

استاد راهنما

آقای دکتر سعید محمدی

۱۰۳۹۵۹

ماه و سال انتشار

دی ماه ۱۳۸۴



تاریخ:

شماره:

بیرت:

### دانشگاه پیام نور

بسمه تعالی

### تصویب نامه پایان نامه

پایان نامه تحت عنوان: بررسی پدیده سوسپانسیون در برابر توپ‌های رنج- رنج ارسوا (EN)

که توسط رجب دادخواه تهیه و به هیئت داوران ارائه گردیده است مورد تأیید می‌باشد.

تاریخ دفاع: ۱۴۰۱/۱۰/۱۸ نفره: ۱۹/۱۲۵ درجه ارزشیابی: عالی

اعضای هیئت داوران:

نام و نام خانوادگی	هیئت داوران	مرتبه علمی	امضاء
	استاد زامنیا	دکتر سعید محمد استاربار	
	استاد راهنمای همکار یا مشاور		
	استاد محقق	دکتر حسین فرانسوس استادبار	
	نماینده گروه آموزشی		

## تقدیر و تشکر

سپاس بی انتها تو را که به تدبیر حکمت ازلی و  
تأثیر قدرت لم یزلی از نابود محض بود دو عالم را رقم  
زدی. ای پروردگاری که معرفت حقیقی دل حاصل نمی-  
شود تا آنگاه که هستی تو را بشناسم. حمد و ثنایت  
می گویم در خور زبان قاصر خویش نه در شأن و سزاوار  
مقام پروردگاریت و با تقدیر و تشکر فراوان از استاد  
ارجمند آقای دکتر محمدی که با راهنمایی های  
ارزشمند خویش مرا به ادامه کار ترغیب می کرد و  
سختی های راه را هموار می ساخت.

## تقدیم

تقدیم به همسر مهربان و فداکارم که همواره نور  
امید و خود باوری را در ذهنم روشن می ساخت  
و پسر کوچک و عزیزم که صبورانه کار زیاد و  
دوری مرا تحمل می کرد  
و مادر علم دوست و دلسوزم که به من دلگرمی و  
امیدواری می بخشید  
و همه آنهایی در این راه مشوق من بودند.

هسته های اتمهای خاکی هنگامی که در شتاب دهنده ها از طریق واکنش های هسته ای به حالت های برانگیخته می رسند ، دارای اسپین های هم جهت شده و در مجموع اسپین کل هسته بالا می رود بنابراین رفتارهای خاصی را از خود نشان می دهند در طول دو یا سه دهه گذشته حالت های اسپین بالای هسته ای موضوع مطالعات گسترده تجربی و نظری بوده است در این میان حالت های چرخشی و نوسانی هسته های سنگین بیشترین مطالعات را به خود اختصاص داده است. در این پروژه از روی مدل نیلسون براساس یک پتانسیل غیر کروی به بررسی طیف دورانی ایزوتوپ های ایریم در اسپین های بالا پرداخته شده است. هنگامی که این هسته های با اسپین بالا به حالت پایه برمی گردند اشعه گاما گسیل می کنند. از روی انرژی اشعه های گامای گسیل شده نمودار تغییرات گشتاور لختی هسته بر حسب مربع انرژی بین ترازها رسم شده و ایزوتوپ هایی که پدیده پشت خمیدگی در آنها وجود دارد مشخص گردیده است و دلیل این پدیده و تعدد آن بررسی شده و به تغییر شکل هسته مربوط شده است. تاکنون این تحقیق در سطح دکتری ارائه شده است. در انجام این پروژه از مراجع مختلف فارسی و انگلیسی استفاده شده است. در واقع می توان گفت یک تحقیق بنیادی هسته ای است که تأییدی بر درستی مدل های هسته ای خصوصاً مدل هسته ای نیلسون می باشد که می تواند در مراکز آموزشی و پژوهشی مورد استفاده قرار گیرد.

اصطلاحات مهم و کلیدی این پروژه عبارتند از : اسپین بالا (High Spin) ، طیف گاما (Gamma Spectrum) ، نوار چرخشی (Rotational Band) ، هسته های تغییر شکل یافته (Deformed Nuclei) ، ایزوتوپ (Isotope) و پشت خمیدگی (Back bending) .

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول شتابدهنده ها
۲	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ شتابدنده ها و انواع آن
۴	۳-۱ شتابدهنده های خطی
۵	۴-۱ شتابدهنده های جرخه ای
۸	فصل دوم واکنش های هسته ای
۹	۱-۲ واکنش های هسته ای
۱۰	۲-۲ انواع واکنش های هسته ای
۱۱	۱-۲-۲ تقسیم بندی واکنشهای هسته ای براساس پارامتر برخورد
۱۲	۲-۲-۲ واکنش های مستقیم و هسته مرکب
۱۴	۳-۲ انرژی پتانسیل و تکانه زاویه ای هسته مرکب
۱۶	۴-۲ تراز یوراست
۱۷	۵-۲ قوانین پایستگی مورد استفاده در واکنش های هسته ای
۱۹	فصل سوم آشکارسازها
۲۰	۱-۳ آشکارسازها
۲۰	۲-۳ لزوم مطالعه اشعه گاما
۲۱	۳-۳ آشکارسازهای مناسب برای پرتو گاما
۲۳	۴-۳ آشکارسازهای حالت جامد (نیم رسانا)
۲۵	۵-۳ وسایل اندازه گیری سرعت ، اندازه حرکت و جرم
۲۶	۶-۳ اندازه گیری انرژی
۳۱	فصل چهارم مدل های هسته ای
۳۲	۱-۴ مدل های هسته ای
۳۵	۲-۴ انواع مدل های هسته ای در حالت کلی
۳۵	۳-۴ مدل پوسته ای
۳۶	۴-۴ پتانسیل مدل پوسته ای
۳۸	۵-۴ مدل جفت شدگی اسپین-مدار

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۴۰	هسته های Z زوج و N زوج و ساختار جمعی ..... ۶-۴
۴۵	مدل نیلسون و محاسبه پتانسیل و انرژی اختلاف ..... ۷-۴
۵۵	حالت های ارتعاشی هسته ها ..... ۸-۴
۵۸	حالت های دورانی ( طیف دورانی ) هسته ها ..... ۹-۴
۶۱	پدیده پشت خمیدگی ..... ۱۰-۴
۶۲	نتیجه گیری ..... فصل پنجم
۶۳	طیف های دورانی ایزوتوپ های ایریم و رسم نمودارها ..... ۱-۵
۸۲	نتیجه گیری و پیشنهادات ..... ۲-۵
۸۴	مراجع ..... ۳-۵
۸۷	پیوست ها ..... ۳-۵



## فهرست اشکال

صفحه	عنوان
	فصل اول
۴	۱-۱ شکل ساده شتاب دهنده خطی لوله سوقی .....
	۲-۱ نواحی میدان شدید و میدان ضعیف در یک
۷	سیکلوترون AVF .....
	فصل دوم
۱۰	۱-۲ مراحل مختلف هر واکنش هسته ای .....
۱۳	۲-۲ انواع واکنش ها براساس پرامتر برخورد .....
	۳-۲ نمودار تغییرات مجذور پرامتر برخورد بر حسب انرژی ذره
۱۳	فرودی .....
۱۵	۴-۲ نحوه تشکیل هسته مرکب .....
۱۶	۵-۲ مراحل رسیدن هسته از حالت برانگیخته به حالت پایه .....
۱۶	۶-۲ همجهت شدن اسپینها .....
	۷-۲ نمودار تغییرات انرژی دورانی بر حسب تکانه زاویه ای $J$ (در
۱۷	برانگیزش جمعی در هسته های زوج-زوج) .....
	فصل سوم
۲۴	۱-۳ پیوندگاه Pn در آشکارساز حالت جامد .....
۲۵	۲-۳ شکل آشکارساز ژرمانیوم مدل ESS .....
	۳-۳ نمودار ساده ای از دستگاه الکترونیکی که می توان آن را در
۲۶	اندازه گیری انرژی تابش های حاصل از یک چشمه بکار برد ...
۲۸	۴-۳ فرایندهایی که در آشکارسازی پرتو گاما رخ می دهند .....
۲۹	۵-۳ نمونه پاسخ یک آشکارساز به پرتوهای گامای تک انرژی
	۶-۳ مقایسه طیف های حاصل از چشمه $^{137}\text{Cs}$ در آشکارسازهای
۳۰	$\text{Ge(Li)}$ و $\text{NaI(Tl)}$ .....
	فصل چهارم
	۱-۴ سهم هر یک از جملات موجود در فورمول نیمه تجربی جرم
۳۴	در بازسازی انرژی بستگی متوسط نوکلئونها .....

صفحه	عنوان
	۲-۴ نمودار تغییرات جرم اتمی بر حسب عدد اتمی به ازای A
۳۵	ثابت .....
۳۷	انواع پتانسیل ها در مدل پوسته ای .....
	۴-۴ تأثیر انواع پتانسیل های مدل پوسته ای در شکافتگی
۳۸	ترازهای هسته ای .....
۴۰	نمودار ترازهای انرژی حاصل از پتانسیل شکل ۳-۴ .....
	۶-۴ چهار خاصیت مختلف هسته های زوج-زوج .....
۴۲	الف) انرژی پایینترین حالت های $2^+$ در هسته های زوج-زوج .....
	ب) نسبت $\frac{E(4^+)}{E(2^+)}$ برای پایین ترین حالت های $2^+$ و $4^+$ در
۴۲	هسته های زوج-زوج .....
	ج) گشتاور مغناطیسی پایینترین حالت های $2^+$ در هسته های
۴۳	زوج-زوج .....
	د) گشتاور چهار قطبی الکتریکی پایینترین حالت های $2^+$ در
۴۳	هسته های زوج-زوج .....
۴۸	۷-۴ جهت گیری تکانه زاویه ای $J$ یک نوکلئون در فضا .....
	۸-۴ انرژی پتانسیل به صورت تابعی از تغییر شکل هسته
۴۹	(تغییرات انرژی پتانسیل بر حسب پارامتر تغییر شکل) .....
	۹-۴ اعداد کوانتومی مناسب و جهت گیری آنها در فضا در مدل
۴۹	نیلسون .....
۵۱	۱۰-۴ مدارهای نیلسون تهیه شده توسط دوپسون .....
	۱۱-۴ مدارهای نیلسون تهیه شده توسط بنت سون و راگنر سون
۵۲	برای پروتون ها .....
	۱۲-۴ مدارهای نیلسون تهیه شده توسط بنت سون و راگنر سون
۵۳	برای نوترون ها .....
۵۶	۱۳-۴ شکل ارتعاش تک قطبی و چهار قطبی هسته .....
۵۷	۱۴-۴ طیف حالت های ارتعاشی هسته ها بر حسب تعداد فونون ها .....
۵۸	۱۵-۴ فاصله ترازهای حالت های دورانی .....
۶۱	۱۶-۴ تغییرات انرژی دورانی بر حسب $J(J+1)$ برای هسته $^{178}Er$ .....

صفحه	عنوان
۶۵-۷۰	طیف های دورانی ایزوتوپ های ایربیم ..... ۱-۵
۷۱-۸۱	نمودارهای $\frac{\gamma I}{\hbar^2}$ بر حسب $\hbar^2 \omega^2$ برای ایزوتوپ های ایربیم ..... ۲-۵

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۷	آشکارسازهای ذرات باردار و فوتونها فصل سوم ۱-۳
	جدول نتیجه گیری پدیده پس خمیدگی برای ایزوتوپهای فصل سوم ۱-۵
۸۳	زوج-زوج ایریم

## فهرست علائم

## علائم و نمادهای ریاضی

= مساوی است

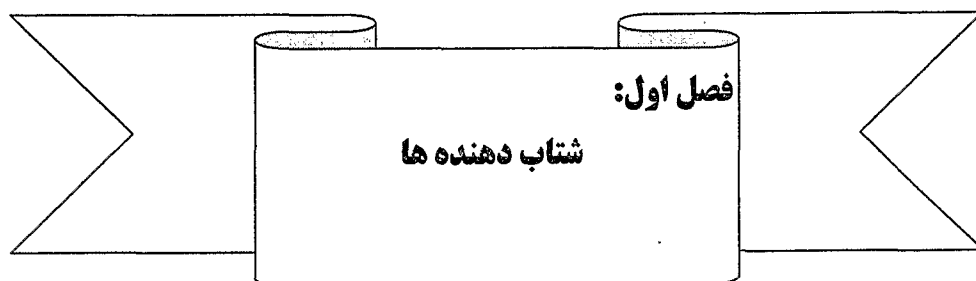
 $\neq$  مساوی نیست $\equiv$  تقریباً مساوی است $>$  بزرگتر است از ( $\gg$  خیلی بزرگتر است از) $<$  کوچکتر است از ( $\ll$  خیلی کوچکتر است از) $\geq$  بزرگتر است از یا مساوی با (یا کوچکتر نیست از) $\leq$  کوچکتر است از یا مساوی با (یا بزرگتر نیست از) $+$  به اضافه یا منها $\propto$  متناسب است با $\Sigma$  مجموع ... $\bar{x}$  مقدار میانگین $\nabla$  عملگر گرادین (دل) $\nabla^2$  عملگر لاپلاسی (دل به توان ۲) $h$  ثابت پلانگ که برابر  $6.626 \times 10^{-34} \frac{kgm^2}{s}$  $\hbar$  ثابت پلانگ تقسیم بر  $2\pi$ 

• ضرب نقطه ای

 $\times$  ضرب برداریمشتق تابع  $f$  نسبت به  $x$   $\frac{df(x)}{dx}$ مشتق مرتبه دوم تابع  $f$  به  $x$   $\frac{d^2f(x)}{dx^2}$

## الفبای یونانی

$A$	$\alpha$	آلفا
$B$	$\beta$	بتا
$\Gamma$	$\gamma$	گاما
$\Delta$	$\delta$	دلتا
$E$	$\varepsilon$	اپسیلون
$\Theta$	$\theta$	تتا
$\Lambda$	$\lambda$	لاندا
$M$	$\mu$	مو
$N$	$\nu$	نو
$\Pi$	$\pi$	پی
$P$	$\rho$	رو
$\Sigma$	$\sigma$	سیگما
$\Phi$	$\phi$	فی
$\Psi$	$\psi$	پسی
$\Omega$	$\omega$	امگا



۱-۱ مقدمه

۲-۱ شتابدهنده ها و انواع آن

۳-۱ شتابدهنده های خطی

۴-۱ شتاب دهنده های چرخه ای

## ۱-۱ مقدمه

در طول دو یا سه دهه گذشته حالت‌های با اسپین بالای هسته ای موضوع مطالعات گسترده تجربی و نظری بوده است. در این میان حالت‌های چرخشی و نوسانی هسته های سنگین بیشترین مطالعات را به خود اختصاص داده است. چون هسته شامل ذرات بسیاری است که همگی قویاً بر هم کنش می کنند هیچ تک مدل نظری نمی تواند کلیه جنبه های رفتار هسته ای را بطور موفقیت آمیز توصیف کند. فورمول نیمه تجربی جرم باعث ایجاد چند مدل هسته ای می شود که با این پروژه می توان به درستی این مدل‌های هسته ای بویژه مدل هسته ای نیلسون برای هسته های سنگین پی برد. عنصر ایربیم دارای ایزوتوپ های مختلفی است که برخی پایدار و برخی ناپایدارند. نقطه ذوب آن  $1529^{\circ}\text{C}$  و نقطه جوش آن  $2862^{\circ}\text{C}$  می باشد. فلزی است که عدد اتمی آن ۶۸ بوده و تعداد الکترون های لایه های اتمی آن به صورت روبرو می باشد.

K	L	M	N	O	P	Q
۲	۸	۱۸	۳۰	۸	۲	

هر کدام از ایزوتوپ‌های عنصر ایربیم در حالت پایه طیف دورانی تشکیل می دهند.

بررسی کامل ساختار هسته ای مستلزم مطالعه واپاشی های رادیواکتیو و واکنش‌های هسته ای است که اولی گذار خود به خودی بین حالتها را نشان می دهد. و در دومی آزمایشگر می تواند حالت‌های ابتدایی و نهایی را به میل خود انتخاب کند. در این دو زمینه تحقیقی ما می توانیم احتمال های واپاشی و واکنش را محاسبه و با مقادیر تجربی آنها مقایسه کنیم و بدین گونه ساختار حالت‌های هسته ای را مورد پژوهش قرار دهیم.

از جمله هدف های این تحقیق بررسی وجود پدیده پشت خمیدگی (Back bending) در ایزوتوپ‌های زوج-زوج هسته ایربیم ( $E_{\pi}$ ) می باشد. در حالت پایه ایزوتوپ های ایربیم طیف‌های دورانی از خود نشان می دهند. اسپین کل یک هسته زوج-زوج در حالت پایه  $0^{+}$  می باشد و تقارن آینه ای هسته در این مورد خاص باعث می شود که تمامی حالت‌های دورانی به مقادیر زوج تکانه زاویه ای اسپینی منتهی شوند. هسته هنگام رسیدن از حالت برانگیخته به حالت پایه اشعه گاما گسیل می کند که می توان از روی انرژی اشعه گاما بدست آمده نمودار تغییرات گشتاور لختی هسته را بر حسب مربع انرژی بین ترازها رسم نمود و ایزوتوپ‌هایی که پدیده پشت خمیدگی در آنها وجود دارد را تعیین کرد و دلیل پدیده پشت خمیدگی را در ایزوتوپ ها بیان نمود.

تعدادی از واژه هایی که در این پروژه بکار رفته اند عبارتند از اسپین بالا - طیف گاما - نوار چرخشی - هسته های تغییر شکل یافته - ایزوتوپ - پشت خمیدگی.

## ۱-۲ شتابدهنده ها و انواع آن

منظور از شتابدهی ذرات باردار ، گسیل باریکه ای از ذرات بخصوص با انرژی خاص به طرف یک هدف مورد نظر است و شتابدهنده یک ابزار اساسی است که برای دادن انرژی به پرتابه ها بکار می رود. یک ماشین شتابدهنده ایده آل باریکه ای از ذرات باردار با انرژی مشخص و شدت زیاد تولید می کند. تمامی شتابدهنده های ذرات باردار بر این حقیقت استوارند که انرژی یک ذره باردار وقتی تغییر می کند که تحت تاثیر میدان الکتریکی واقع شوند. میدان مغناطیسی متغیر میدان الکتریکی تولید می کند که به نوبه خود می تواند به ذره باردار شتاب بدهد.





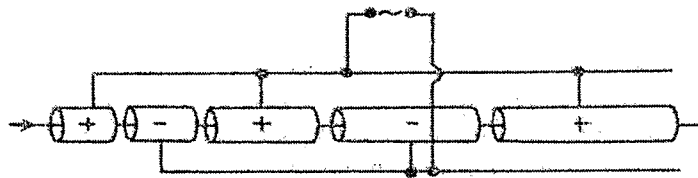
۳-۱ شتابدهنده های خطی

در شتابدهنده های خطی ذرات باردار در امتداد یک خط مستقیم حرکت می کنند. شتابدهنده های خطی در محاوره «Linacs» نام دارند.

انواع شتابدهنده های خطی عبارتند از مولد وان دوگراف، شتابدهنده لوله سوقی و شتابدهنده موج متحرک (موجبر) که به توضیح مختصری از هر یک می پردازیم.

موفقترین ماشین برای شتاب دادن به ذرات در امتداد خط مستقیم با استفاده از اختلاف پتانسیل زیاد، مولد الکتروستاتیکی وان دو گراف است که در سال ۱۹۳۱ توسط وان دوگراف اختراع شد. این ماشین می تواند ذراتی را که یک مرتبه باردار شده اند تا انرژی های حدود ۳۰ مگا الکترون ولت شتاب دهد. حسن عمده این ماشین شدت زیاد باریکه (چند میلی آمپر) و انرژی دقیقاً کنترل شده (تا ۰/۱ درصد) آن است.

در شتابدهنده خطی لوله - سوقی ذرات از طریق یک ولتاژ ac شتابهای جدا از هم زیادی را دریافت می دارند. و ذرات باردار در طول یک خط مستقیم چندین مرتبه شتاب میگیرند. که هزینه آن نسبت به شتابدهنده های چرخه ای کاهش یافته و نیز اثرات واکانونی کنندگی میدان های مغناطیسی مشاهده شده در شتابدهنده های چرخه ای برطرف می گردد.



شکل ۱-۱ - شکل ساده شتابدهنده خطی لوله سوقی [۵]

در شکل ۱-۱ طرح اساسی یک شتابدهنده خطی نشان داده شده است.

ذرات باردار (باریکه) به لوله دراز، مستقیم و تخلیه شده ای وارد می شوند که در داخل آن تعدادی استوانه رسانای توخالی که طول آنها نسبت به یکدیگر افزایش می یابد قرار دارند. این استوانه ها یا الکترودهای حلقوی توخالی به تناوب به قطبهای مخالف منبع ولتاژ ac متصل می شوند. ذرات هنگام عبور از گاف بین الکترودها شتاب می گیرند.

به محض ورود به داخل یک الکتروده، ذره در ناحیه ای با میدان صفر حرکت می کند و برای زمانی مساوی با نصف دوره تناوب ولتاژ ac به جلو رانده می شود (نام «لوله رانش» به همین مناسبت به الکترودها داده می شود). بدین ترتیب قطبیت ولتاژ در خلال زمانی که ذره در داخل لوله رانش است عوض می شود در نتیجه ذره هنگام عبور از گاف بعدی توسط میدان الکتریکی مجدداً شتاب می گیرد. پس ورود ذرات به داخل هر گاف در تشدید با میدان الکتریکی دو سر گاف می باشد.

هر گاه  $t/2$  نصف دوره تناوب ولتاژ ac باشد، در این صورت طول لوله رانش  $n$  ام برای ذرات با سرعت  $v$  باید چنین باشند.

$$L_n = v_n \frac{t}{2} \quad (1-1)$$

۱- Linacs مخفف Liner accelerators (شتابدهنده های خطی) است.

برای ذرات نانسیتی با بار  $e$ ، پس از عبور از میان  $n$  گاف با اختلاف پتانسیل  $V_0$ ، انرژی جنبشی ذره عبارت است از:

$$T_n = neV_0 = \frac{1}{2}mv_n^2 \quad (2-1)$$

در نتیجه خواهیم داشت:

$$L_n = \left( \frac{neV_0}{2m} \right)^{1/2} t \quad (3-1)$$

بنابراین طول لوله رانش باید به صورت  $n^{1/2}$  افزایش یابد. برای ذرات نسیتی، که  $v \cong c$  می شود، طول لوله رانش تقریباً ثابت است.

علاوه بر شتابدهنده لوله-سوقی، شتابدهنده خطی دیگر که ذرات در آن چندین مرتبه شتاب می گیرند شتابدهنده موجبر (موج متحرک) است. که برای انرژیهای بالا و جریانهای زیاد بکار می رود که ذرات توسط یک میدان الکتریکی که در یک رسانای توخالی (در طول شتابدهنده) برقرار می شود سوار بر قله یک موج پیشرو در حرکتند درست همانند یک اسکی باز روی آب که بر قله موج دریا سوار می شود. چون اتلاف انرژی در اثر مقاومت زیاد است، توان لازم باید در بازه های منظم به داخل شتابدهنده و در طول آن تغذیه شود تا امواج پیشرو را از میرایی حفظ کند.

#### ۱-۴ شتابدهنده های چرخه ای

در شتابدهنده های چرخه ای ذرات باردار در مسیر خمیده حرکت می کنند و دوباره دور می زنند. انواع شتابدهنده های چرخه ای عبارتند از سیکلوترون، سنکرو سیکلوترون و سنکروترون. در این ماشینها به ذرات بارداری که توسط میدان مغناطیسی به حرکت در قوسهای دایره ای مقید شده اند شتابهای چندگانه داده می شود. ساده ترین ماشین چرخه ای سیکلوترون است.

سیکلوترون در سال ۱۹۳۲ توسط لارنس<sup>۱</sup> و لیوینگستون<sup>۲</sup> اختراع شد. در این شتابدهنده ذره باردار تحت تاثیر میدان مغناطیسی ثابت قرار می گیرد و در حالی که در هر نیم چرخه توسط میدان الکتریکی شتاب می گیرد، میدان مغناطیسی مسیر آن را بصورت دایره خم می کند و ذرات در داخل دو اتاقک فلزی نیم دایره ای که به خاطر شکلشان حرف **D** «دی» نامیده می شوند، به دوران در می آیند.

دی ها به یک منبع ولتاژ متناوب متصل اند. هنگامی که ذرات در داخل دی ها در حرکت اند، هیچ میدان الکتریکی بر آنها وارد نمی شود و مسیر دایره ای شکلی را تحت اثر میدان مغناطیسی طی می کنند. اما در فاصله بین دی ها، ولتاژ شتابدهنده ای بر ذرات وارد می شود و در هر چرخه کمی انرژی اضافی کسب می کنند.

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 شعاعهای بزرگتر پیش می روند، انرژی کسب می کنند. و با سرعت بیشتری به حرکت در می آیند و افزایش طول مسیر کاملاً با افزایش سرعت ختنی می شود.

نیروی لورنتس در مدار دایره ای  $qvB$ ، شتاب مرکز گرای لازم را برای حفظ حرکت دورانی تامین می کند. بنابراین

داریم:

<sup>۱</sup>-E.O.Lawrence

<sup>۲</sup>-M.S.Livingston

$$F = qvB = \frac{mv^2}{r} \quad (4-1)$$

و زمان مورد نیاز برای یک دوران نیم دایره ای عبارت است از :

$$t = \frac{\pi r}{v} = \frac{m\pi}{qB} \quad (5-1)$$

و بسامد تشدید سیکلوترون یا بسامد سیکلوترون بدست می آید.

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m} \quad (6-1)$$

بسامد حرکت ( $\nu$ ) با نسبت بار به جرم و بزرگی میدان مغناطیسی بستگی دارد نه به سرعت ذره یا شعاع مسیر دایره ای آن.

همان طور که ذره با حرکت حلزونی به پیش می رود، سرعت به تدریج افزایش می یابد و بالاترین سرعت در بزرگترین شعاع R حاصل می شود. در واقع ذرات شتابدار وقتی به پیرامون دی ها رسیدند توسط میدان الکتریکی یک صفحه دفع کننده، E، منحرف می شوند و با هدف T برخورد می کنند.

$$v_{\max} = \frac{qBR}{m} \quad (7-1)$$

که به حداکثر انرژی جنبشی زیر منجر می شود:

$$T = \frac{1}{2} m v_{\max}^2 = \frac{q^2 B^2 R^2}{2m} \quad (8-1)$$

که این رابطه نشان می دهد که خوب است سیکلوترون های با میدان های بزرگ و شعاعهای بزرگ در اختیار داشته باشیم.

راهی که برای افزایش انرژی در سیکلوترونها وجود دارد افزایش میدان مغناطیسی همراه با شعاع مدار به منظور جبران اثر افزایش جرم نسبیتی ذرات دورانی است اما این امر به نتیجه نامطلوب واکانونی شدن باریکه بر اثر انحنای خطوط میدان منجر می شود. هر گاه میدان مغناطیسی به بخشهایی از میدان تناوبی شدید و ضعیف تقسیم شود کانونی شدن را می توان به سیستم بازگرداند. چنین سیکلوترونی را سیکلوترون کانونی کننده قطاعی یا سیکلوترون AVF (با میدان متغیر سمتی) می نامند. مدارهای پایدار در سیکلوترون AVF بصورت دایره نیستند. و مطابق شکل ذرات حول مدار دورانی نوساناتی شعاعی دارند. در مرزهای بین قطاعهای میدان شدید و ضعیف، یک مولفه سمتی برای میدان وجود دارد و نیروی لورنتس  $\vec{F} = q \vec{V} \times \vec{B}$  یک نیروی قائم تولید می کند که سعی دارد باریکه را در صفحه میانی بصورت کانونی نگاه دارد، این اثر کانونی کننده باید به قدری قوی در نظر گرفته شود که بر اثر واکانونی کننده میدانی که به طور شعاعی در حال افزایش است غلبه کند.

مزیت عمده سیکلوترون های AVF به سنکروسیکلوترونها باریکه پیوسته آنهاست و لذا تولید جریانهای باریکه ای

زیاد (در مرتبه  $100 \mu A$ ) امکان پذیر است.