

گام‌های نخستین در تحول شتابگرها

ای.دی.کورانت*

Brookhaven National Laboratory,

Upton, NY 11973, USA

ecourant@msn.com

حدود ۸۰ سال پیش راترفورد ابراز امیدواری کرد که ذرات را بتوان شتاب داد و به چنان انرژی هائی رساند که بتوان با آنها هسته‌ها و اجزایشان را شناخت [۱]. فیزیکدان‌ها و مهندسين خیلی پیش‌تر از این رفته‌اند. امروز در برخورد دهنده‌ی بزرگ هادرونی (LHC) در سرن در ژنو پروتون‌ها تا هفت هزار میلیارد ($10^{12} \times 7$) الکترون‌ولت شتاب داده می‌شوند. در اینجا گام‌های اصلی را که ما را به اینجا رسانده‌اند مرور می‌کنیم.

دایره‌شکل محدود می‌کند.

۱ شتاب‌دهی‌ی تشدیدي - سیکلوترون

لارنس به دانشجوی خود ام.اس. لیوینگستون گفت مدلی بسازد که درست بودن این اصل را ثابت کند. با مغناطیسی که رویه‌ی قطب‌هایش ۱۰ cm قطر داشت و ولتاژ rf حداکثر 2000 V ، لارنس و لیوینگستون موفق شدند یون‌های مولکولی‌ی هیدروژن را تا انرژی‌ی 80 کیلوولت شتاب دهند [۳]. در اوایل سال ۱۹۳۲ ماشین بزرگ‌تری با قطب‌های ۱۱ اینچی و اِعمال ولتاژ 4000 ولت به Dها ساختند و پروتون‌ها را به انرژی‌ی 1.22 MeV رساندند [۴]. این نخستین بار بود که ذرات شتاب معادل با گذر از ولتاژ بیش از یک میلیون ولت می‌گرفتند.

در سال‌های بعد، لارنس و دیگران سیکلوترون‌های بزرگ‌تر ساختند. آخرین و بزرگ‌ترین نمونه‌ی این ماشین‌ها، ماشینی 60 اینچی بود که در سال ۱۹۳۹ ساخته شد و دوترون را تا انرژی‌ی 20 MeV و ذرات آلفا را تا انرژی‌ی 40 MeV شتاب می‌داد. در دانشگاه‌های دیگر آمریکا و همچنین در فرانسه و ژاپن نیز سیکلوترون ساخته شد (سیکلوترون‌های ژاپن را نیروهای آمریکا که ژاپن را در سال ۱۹۴۵ اشغال کرده بودند بدون هیچ ملاحظه‌تی از بین بردند).

معلوم شد که برای بیشینه انرژی‌ی شتاب‌دهی با این روش حدی وجود دارد: جرم M در معادله‌ی ۱ جرم نسبیتی‌ست و بنابراین بس آمد ω در میدان مغناطیسی‌ی یک دست با افزایش انرژی‌ی ذره کاهش خواهد یافت و ثابت نخواهد ماند. علاوه بر این همان موقع هم معلوم شده بود برای کانونی نگه‌داشتن باریکه در راستای عمودی، به‌جای میدان مغناطیسی‌ی یک‌دست می‌بایست با افزایش انرژی و شعاع باریکه از شدت میدان مغناطیسی‌ی کاست. خود این نکته هم مشکل کاهش بس آمد با افزایش

در ۱۹۲۷ در آخن آلمان، دانشجوی مهندسی رالف ویدرو^۱ی نروژی، در دنباله لوله‌های ولگشت^۲ با استفاده از ولتاژ بس آمد رادیویی با دامنه‌ی ۲۵ کیلوولت، یون‌های سدیم را تا 50 کیلوولت شتاب داد یعنی از همان ولتاژ دو بار استفاده کرد. شرح این دست‌یافت را ویدرو در پایان‌نامه‌ی دکترایش آورد [۲]؛ گرچه شتاب‌دهنده‌ی ویدرو کارش را با یک ضریب ۲ به پایان آورده بود معلوم بود که شتاب‌دهی را با شمار بیشتری لوله‌ی ولگشت می‌توان چندین بار تکرار کرد. چند سال بعد ارنست لارنس^۳ در کتاب‌خانه‌ی برکلی مقاله‌ی ویدرو را دید. لارنس آلمانی خوب نمی‌دانست و متن را رها کرد اما نمودارها و معادله‌ها کافی بود تا این اندیشه به ذهنش برسد که اگر مسیر باریکه‌ی ذره را در میدان مغناطیسی به‌شکل دایره در بیاوریم می‌توان به‌جای استفاده از شمار زیادی الکتروود پی‌درپی از یک مجموعه الکتروودهای شتاب‌دهنده چندین بار استفاده کرد. او به این نکته‌ی حیاتی و حساس نیز اشاره کرد که بس آمد زاویه‌ای‌ی دوران ذره‌تی به جرم M و بار الکتریکی‌ی e که در میدان مغناطیسی‌ی B روی مسیری دایره‌ای حرکت می‌کند با

$$\omega = \frac{eB}{Mc} \quad (1)$$

برابر است و به انرژی بستگی ندارد. بنابراین با دو الکتروود توخالی‌ی نیم‌دایره‌ای به‌شکل D که ولتاژی با این بس آمد به‌آنها اِعمال شود هر بار که باریکه از شکاف بین دو الکتروود عبور کند شتاب می‌گیرد و به‌این ترتیب پس از n بار دوران به انرژی‌ی $2n\text{ eV}$ خواهد رسید (V ولتاژ بین الکتروودهاست). بیشینه‌ی انرژی را اندازه‌ی قطب‌های مغناطیسی‌ی

(* ارنست دی.کورانت از ۱۹۴۸ فیزیکدان آزمایشگاه ملی بروک‌هیون است و بیشتر کارش بر دینامیک ذرات در شتابگرها متمرکز است. او با ام.اس. لیوینگستون و اچ.اسنایدر دینامیک گرادیان متناوب (کانونی‌کنندگی‌ی قوی) را ابداع کرد. در دانشگاه‌های پرینستون، ییل، و استونی‌بروک استاد بوده است و در ۱۹۷۶ به عضویت فرهنگستان علوم برگزیده شد. در ۱۹۸۶ جایزه‌ی فرمی را دریافت کرد و در ۱۹۸۷ جایزه‌ی ویاسون را (از انجمن فیزیک آمریکا). در ۱۹۹۰ با عنوان فیزیکدان برجسته بازنشسته شد ولی هم‌چنان در پروژه‌ی برخورددهنده‌ی یون‌های نسبیتی‌ی سنگین (RHIC) نقش دارد و عمدتاً در باره‌ی باریکه‌های قطبیده کار می‌کند.

انرژی را بدتر می‌کند و هر بار هنگام عبور ذره از شکاف شتاب‌دهنده فاز rf تغییر می‌کند و بالاخره به فاز شتاب‌گیرنده (کنکندنده) تبدیل می‌شود. به این ترتیب شمار دوره‌هایی که طی آن ذره شتاب می‌گیرد محدود می‌شود. بته و رز تخمین زدند [۵] که با میدان مغناطیسی ۱۸ کیلوگاوسی و ولتاژ rf حدود ۵° کیلوولت بیشینه‌ی انرژی دست‌یافتنی حدود ۱۷ MeV خواهد بود؛ پس از آن بیشینه‌ی انرژی متناسب با جذر ولتاژ قطب‌های D-شکل افزایش می‌یابد.

لارنس را این نکته مأیوس نکرد و مغناطیسی با قطب‌های ۱۸۴ اینچی ساخت با این قصد که با ولتاژ حدود یک میلیون ولت به انرژی ۱۰° MeV برسد. اما زمانی که مغناطیس آماده شد پروژه‌ی منتهن شروع شده بود و مغناطیس بزرگ برای جداکردن الکترومغناطیسی‌ی ایزوتوپ‌ها (کالیوترون^۴) به‌کار برده شد. کار روی سیکلوترون متوقف شد.

۲ شتاب‌دهی به الکترون - بتاترون؛ نظریه‌ی مدار

معلوم است که اصول شتاب‌دهی در سیکلوترون برای شتاب‌دادن به الکترون مناسب نیست زیرا الکترون در گستره‌ی مگاالکترون‌ولت نسبیتی‌ست. نیاز به ره‌یافت جدیدی هست. یک امکان که در دهه‌ی ۱۹۲۰ به ذهن چند نفر رسید شتاب‌دهی در میدان الکتریکی‌ی برخاسته از میدان مغناطیسی‌ی متغیر در زمان بود. ویدرو "تبدیل‌گر پرتو" (*Strahlen transformator*) را طراحی کرد که میدانی مغناطیسی‌ی $B(r)$ با تقارن استوانه‌ای دارد و الکترون‌ها با تکانه‌ی p در مدار دایره‌ای به شعاع R

$$RB(R) = \frac{pc}{e} \quad (۲)$$

حرکت می‌کنند. اگر شار مغناطیسی‌ی $\Phi = 2\pi \int_0^R rB(r)dr$ که این مدار در بر گرفته است افزایش یابد، میدان الکتریکی‌ی مماسی به مقدار $E = \dot{\Phi}/2\pi Rc$ در مدار القا می‌شود و الکترون‌ها را شتاب می‌دهد. ویدرو متوجه شد که اگر میدان $B(R)$ روی مدار و شار Φ متناسب با هم افزایش یابند شتاب الکترون برای ماندن روی همان دایره کفایت می‌کند به شرطی که شار دقیقاً دو برابر مقدار شاری باشد که در صورت وجود میدانی یک‌دست درون دایره برابر با میدان روی محیط دایره به دست می‌آید. او چنین دستگاهی ساخت و امیدوار بود بتواند با آن دستگاه الکترون را به انرژی‌ی ۶ MeV برساند اما موفق نشد الکترون‌ها را شتاب دهد. بنابراین به سراغ همان لوله‌های ولگشت و شتابگر خطی که در بخش قبل شرح داده شد رفت؛ در پایان نامه‌اش اما شرح تبدیل‌گر پرتو نیز به همراه شرح شتابگر خطی آمده است [۲].

دیگران هم این روش شتاب‌دهی‌ی القایی را آزمودند اما موفق نشدند. در آخر در سال ۱۹۴۰ کرسنت موفق شد [۶ و ۷] و الکترون را تا ۲٫۳ MeV

شتاب داد. راز موفقیت او در تحلیل نظری‌ی پایداری‌ی مدار بود. کرسنت و سیرپر در مقاله‌شان [۸] نشان داده‌اند که در میدانی مغناطیسی با تقارن استوانه‌ای ذرات حول مدارشان در جهت شعاع و عمود بر صفحه‌ی دوران نوسان می‌کنند. بس آمده‌های زاویه‌ای‌ی این نوسان‌ها

$$\omega_r = \Omega\sqrt{1-n}, \quad \omega_v = \Omega\sqrt{n} \quad (۳)$$

است که در آن Ω سرعت زاویه‌ای‌ست و میدان در همسایگی‌ی مدار به شعاع R متناسب با $(R/r)^n$ تغییر می‌کند. از این شرط اخیر شاخص میدان n تعریف می‌شود. بنابراین برای پایداری‌ی مدار لازم است

$$0 < n < 1 \quad (۴)$$

باشد. معادله‌های ۳ و ۴ و مرجع ۸ شالوده‌ی نخستین نظریه مدار شتابگر است.

پس از این موفقیت کرسنت اقدام به ساخت شتابگرهای القایی‌ی بزرگ‌تر کرد. اینها به "بتاترون" معروف شدند زیرا از زمانی که پرتوایی کشف شد به الکترون‌های پرتو بتا "پرتو بتا" می‌گفتند.

به دنبال انتشار مقاله‌ی کرسنت [۸-۶] ویدرو موق شد در آلمان بتاترونی ۱۵ مگاالکترون‌ولتی بسازد (کایزر در [۹] این بتاترون را توصیف کرده است).

در سال ۱۹۴۵ بتاترونی ۱۰° مگاالکترون‌ولتی در آزمایشگاه جنرال الکتریک در سنکتادی نیویورک (که عمده‌تاً کرسنت طراحی کرده بود) توانمندترین شتابگر دنیا در زمان خودش بود و سیکلوترون را پشت سر گذاشته بود.

۳ پایداری‌ی فاز - سنکروترون و سنکروسیکلوترون

در اواخر جنگ جهانی‌ی دوم هنگامی که پروژه‌ی منتهن به موفقیت نزدیک شده بود اندیشه‌ی متخصصان برکلی دوباره به سیکلوترون بازگشت. مک‌میلان راهی برای چیره شدن بر محدودیت‌های سیکلوترون پیدا کرد [۱۰]. او اشاره کرد که برابری‌ی ۱ را می‌توان به صورت زیر بازنوشت

$$E = Mc^2 = \frac{eBc}{\omega} \quad (۵)$$

و متوجه شد اگر سیستم بس‌آمد رادیویی به بس‌آمد ω ، و ذره‌ی به انرژی‌ی E داشته باشیم که از (۵) تبعیت می‌توان ω و/یا B را به‌کندی تغییر داد و انرژی‌ی E خودبه‌خود طوری تغییر می‌کند که شرط سنکرون بودن (هم‌زمانی) ۱ یا ۵ را برآورده کند به این شرط که سرعت تغییر میدان یا بس‌آمد بسیار تند نباشد و میدان B ولتاژ کافی داشته باشد که بتواند با همان آهنگی که برای برآورده‌کردن (۵) لازم است تغییر کند. مک‌میلان سازوکار را این چنین شرح می‌دهد [۱۰]

”ذره‌ئی را در نظر بگیرید که انرژی‌ش از (۵) به دست می‌آید. این انرژی را انرژی تعادل برای میدان B و بس آمد ω می‌نامیم. فرض کنید ذره از شکاف شتاب‌دهی درست لحظه‌ئی می‌گذرد که میدان الکتریکی از صفر می‌گذرد و طوری تغییر می‌کند که اگر ذره زودتر می‌رسید شتاب می‌گرفت. این مدار به وضوح پایاست. اینک فرض کنید که فاز جابه‌جا شود طوری که ذره زودتر به شکاف شتاب‌دهی برسد. در این صورت ذره شتاب خواهد گرفت و افزایش انرژی ذره باعث کاهش سرعت زاویه‌ای آن خواهد شد در نتیجه ذره بار دیگر دیرتر به شکاف خواهد رسید. با برهان مشابه برای حالت دیگر می‌توان دید که هر انحراف انرژی از انرژی حالت تعادل تمایل به تصحیح خود دارد. البته این مدارهای جابه‌جاشده هم‌چنان نوسان خواهند کرد و هم دامنه و هم فاز آنها حول مقادیرهای متناظر با انرژی تعادل تغییر خواهد کرد.“

برای شتاب‌دادن به ذرات اینک نیاز است انرژی تعادل را تغییر داد. این کار را می‌توان با تغییر میدان مغناطیسی یا تغییر بس آمد (یا هر دو) انجام داد. با تغییر انرژی تعادل، فاز حرکت نیز جابه‌جا می‌شود آن قدر که نیروی لازم برای شتاب‌دهی را فراهم کند؛ شباهت این رفتار به رفتار موتور سنکرون نام ”سنکروترون“ را برای این دستگاه تداعی می‌کند.“

در واقع همین اصل پایداری فاز و کاربردش برای شتاب‌دهی را پیش‌تر وای. وکسلر در مسکو کشف کرده بود [۱۱]. هنگامی که مک میلان از این کار آگاه شد بی‌درنگ تقدم وکسلر را رسماً پذیرفت [۱۲]. این اصل پایداری فاز بر محدودیت سیکلوترون فائق آمد: بس آمد ω را در میدان سیکلوترون کم کنید و ذره شتاب خواهد گرفت. به مغناطیس ۱۸۴ اینچی که با امید رسیدن به انرژی 10^6 MeV ساخته شده بود (بخش ۲) دو الکترون D-شکل با ولتاژ متوسط و سیستم If مدولاسیون بس آمد اضافه شد و توانست دوترون‌ها را تا 10^6 MeV (ذرات آلفا را تا 10^7 MeV) شتاب دهد.

با سیکلوترون مدولاسیون بس آمد یا سنکروسیکلوترون می‌توان بیشینه‌ی انرژی شتاب‌دهی را به مقدار دل‌خواه افزایش داد به شرطی که شعاع ماشین را به میزان لازم بزرگ کرد. برای انرژی مشخص شعاع را می‌توان از معادله‌ی

$$pc = eBR, \quad R = \frac{pc}{eB} \quad (6)$$

که در آن p تکانه‌ی ذره است معلوم کرد. اما میدان مغناطیسی باید تمام فضائی را که مدار متناظر با انرژی نهایی در بر می‌گیرد پر کند و اگر اندازه‌ی مدار خیلی زیاد باشد این کار هزینه‌ی زیادی می‌طلبد. در

عمل سنکروسیکلوترون‌هایی که به این شکل کار کنند تا بیشینه انرژی 10^6 MeV ساخته شده‌اند.

برای شتاب‌دهی به الکترون شعاع مدار را ثابت نگه می‌داریم و میدان — و بس آمد — را به شکلی تغییر می‌دهیم که (۳) و (۴) برآورده بمانند. در این صورت برخلاف بتاترون که درون مدار میدانی با شدت میانگین دوبرابر میدان روی مدار لازم دارد تنها در ناحیه‌ئی نواری حول وحوش مدار به میدان مغناطیسی نیاز است.

در سال‌های پس از جنگ اواخر دهه‌ی ۱۹۴۰، سنکروسیکلوترون و سنکروترون الکترون در محدوده‌ی 10^6 MeV فراوان ساخته شدند زیرا امکان بررسی‌ی فیزیک جدید و هیجان‌انگیزی را فراهم می‌کردند: به‌نازگی پیون در پرتوهای کیهانی کشف شده بود و به کمک این ماشین‌ها فیزیک آنها کاملاً بررسی شد.

پروتون‌ها را هم می‌توان در شعاع ثابت با تغییر میدان و بس آمد شتاب داد. چند سنکروترون پروتون در بیرمنگام (۱ GeV)، بروک هیون (۳ GeV)، برکلی (۶ GeV)، و دوبرنا شوروی (۱۰ GeV) طراحی و ساخته شد.

۴ قانونی‌کنندگی قوی

وقتی ساخت سنکروترون سه گیگا‌الکترون‌ولتی بروک هیون (به نام کازموترون) در ۱۹۵۲ به‌آخر رسید، برای کاوش در راه‌های ممکن برای بهترکردن طراحی گروهی شکل گرفت. مغناطیس کازموترون از ۲۸۸ بخش یک‌سان به شکل C ساخته شد. گشودگی C به سمت بیرون و پایه‌ی C به سمت داخل مدار بود. شاخص میدان n (معادله‌ی ۳) را ببینید) برای همه‌ی مغناطیس‌ها یک‌سان و برای برآوردن شرط پایداری (۴) برابر با $1/6$ بود. مغناطیس‌های کازموترون همه رو به بیرون بودند بنابراین گرفتن باریکه‌ی ثانویه‌ی منفی ساده بود اما ثانویه‌های مثبت با دیواره‌ی درونی ماشین برخورد می‌کردند. علاوه بر این در اثر اشباع میدان مغناطیسی ناحیه‌ی قابل‌استفاده‌ی ”میدان خوب ۵“ به‌ازای میدان‌های متناظر با بیشینه‌ی انرژی کاهش می‌یافت. بنابراین پیش‌نهاد شد که پایه‌ی عمودی‌ی بخش‌های مغناطیس یک‌درمیان رو به بیرون و رو به درون مدار داشته باشند.

ممکن بود این کار منجر به مشکلی شود: گرادیان‌های کانونی‌کننده می‌توانست به‌سادگی در بخش‌های رو به بیرون و رو به درون متفاوت باشد به‌ویژه در ناحیه‌ی میدان‌های فریزی^۶. آیا این منجر به ناپایداری مدار نمی‌شد؟

تقریباً بلافاصله با تحلیل معلوم شد [۱۳] که گرادیان‌های متناوب نه تنها پایداری را ضعیف‌تر نمی‌کند بلکه آن را بهتر می‌کند! با تنظیم پارامترهای می‌توان پایداری‌ی مدار را بسیار بهتر از حالت عادی کرد. شدت مؤثر کانونی‌کنندگی را نسبت بس‌آمدهای نوسان افقی و عمودی به سرعت

زاویه‌ای تعیین می‌کند. در حالت عادی این نسبت‌ها (که به “کوک” معروف‌اند) به ترتیب $\sqrt{1-n}$ و \sqrt{n} هستند و باید از ۱ کم‌تر باشند؛ با این طرح جدید می‌توان کوک را بسیار بزرگ‌تر گرفت که متناظر با نوسان‌های کم‌دامنه است. نوسان‌های کم‌دامنه استفاده از گشودگی‌های واقعاً کوچک را ممکن می‌کند. این نکته نیز امکان می‌دهد مغناطیس‌ها (و قطعه‌های دیگر) را ارزان‌تر ساخت و با کانونی‌کنندگی ی “قوی” به انرژی‌های بیشتر رسید. در مرجع ۱۳ برای کانونی‌کنندگی در بخش‌های مستقیم کاربرد مغناطیس‌های چهارقطبی پیش‌نهاد شده است.

باز هم معلوم شد که گرادیان متناوب را کسی پیش‌تر کشف کرده بود: ان.سی. کریستوفیلوس، مهندسی که در یونان کار می‌کرد [۱۴]، و گروه ما در بروک هیون تقدم او را رسماً پذیرفت [۱۵].

ساخت سنکروترون پروتون با گرادیان متناوب (AG) تقریباً بلافاصله در بروک هیون و در سرن ژنو آغاز شد. و در عمل تمام شتابگرهای بزرگی که از سال ۱۹۵۲ تا کنون ساخته شده‌اند از جمله LHC و از کانونی‌کنندگی AG استفاده می‌کنند.

در فرآیند برنامه‌ریزی و ساخت این سنکروترون‌ها معلوم شد که به تحلیل نظری مفصل (و البته نوآوری‌های زیاد در مهندسی) نیاز است. آموزش رفتار باریکه‌ی ذرات در شتابگرهای کانونی‌کننده‌ی گرادیان متناوب به رشته‌ی فعال تبدیل شده که مقالات و کتاب‌های پرشماری در باره‌اش منتشر شده است؛ چندتائی را فهرست می‌کنیم [۲۰-۱۶].

زود معلوم شد که کاهش دامنه‌ی نوسان پیش‌بینی‌شده در اولین مقاله [۱۳] بیش از اندازه بوده است. آدامز، هاین و لاؤسون اشاره کردند [۲۱] که اگر نسبت بس‌آمدهای نوسان به بس‌آمد دَوْران (که به‌زودی

“کوک” های ν_x و ν_y نام گرفتند) مثل نسبت دو عدد صحیح باشند هر خطای کوچک در میدان منجر به انحراف‌های بزرگ از مدار می‌شوند، و اگر کوک‌ها نصف عدد صحیح باشند ناپایداری رشد نمایی خواهد داشت. هر دو این اثرها به معنی‌ی تشدید بین نوسان‌ها و مؤلفه‌های فوری‌ی خطاهای میدان است. چاره این است که مغناطیس‌ها با دقت بسیار زیاد ساخته شوند و میدان‌ها و گرادیان‌های کانونی‌کننده طوری طراحی شوند که کوک‌ها را از مقادیر تشدید (صحیح یا نیم‌صحیح) دور باشند.

هنر و علم طرح‌ریزی آرایش (“شبکه”ی) مغناطیس‌ها در سنکروترون‌های AG طی‌ی سال‌ها پیش رفته است. در اولین سنکروترون‌های AG مغناطیس‌های کانونی‌کننده در جهت‌های افقی و عمودی را یک‌در میان قرار می‌دادند. یکی از اولین نوآوری‌ها ساختارهایی بود که کالینز ابداع کرد [۲۲] و بخش‌های مستقیم طولانی دارند و در آنها می‌توان همه نوع ویژگی‌های جدید به شتابگر اضافه کرد. و میلتون وایت (کار منتشر نشده) و دنبی و همکارانش [۲۳] پیش‌نهاد جدا کردن. کارکرد کانونی‌کنندگی از کارکرد خم‌کردن. مسیر ذرات را دادند یعنی مغناطیس‌هایی (یا میدان‌های یک‌دست) داشته باشیم که فقط مسیر ذرات را خم می‌کنند و در بین آنها مغناطیس‌های چهارقطبی‌ی کانونی‌کننده قرار داده شوند. در اولین سنکروترون‌های AG در بروک هیون و سرن از مغناطیس‌های خم‌کننده با “کارکرد ترکیبی” استفاده شده بود که در مرجع ۱۳ به‌میان آورده شده بود اما تقریباً تمام شتابگرهای AG که از آن زمان ساخته شده‌اند این پیکربندی “کارکرد جداگانه” را به کار می‌برند.

ترجمه نادر حیدری

• Early Milestones in the Evolution of Accelerators

E. D. Courant

in *Reviews of Accelerator Science and Technology*, Vol. 1,

eds. Alexander W. Chao, Weiren Chou (World Scientific, 2008) pp. 1-5.

مراجع

1. E. Rutherford, *Proc. R. Soc.* **A117** (1927) 300.
2. R. Wideröe, *Arch. F. Elektrot.* **21** (1928) 387.
3. E. O. Lawrence, M. S. Livingston, *Phys. Rev.* **37** (1931) 1707.
4. E. O. Lawrence, M. S. Livingston, *Phys. Rev.* **40** (1932) 19.
5. H. A. Bethe, M. E. Rose, *Phys. Rev.* **52** (1937) 1251.
6. D. W. Kerst, *Phys. Rev.* **58** (1940) 841.
7. D. W. Kerst, *Phys. Rev.* **60** (1941) 47.

8. D. W. Kerst, R. Serber, *Phys. Rev.* **60** (1941) 53.
9. H. F. Kaiser, *J. App. Phys.* **18** (1947) 1.
10. E. M. McMillan, *Phys. Rev.* **68** (1945) 143.
11. V. I. Veksler, *J. Phys. (USSR)* **9** (1945) 153.
12. E. M. McMillan, *Phys. Rev.* **69** (1946) 534.
13. E. D. Courant, M. S. Livingston, H. S. Snyder, *Phys. Rev.* **88** (1952) 1190.
14. N. C. Christofilos, Focussing system for ions and electrons. US Patent No. 2736299 (application 1950, patent issued 1956).
15. E. D. Courant, M. S. Livingston, H. S. Snyder, J. P. Blewitt, *Phys. Rev.* **91** (1953) 202.
16. E. D. Courant, H. S. Snyder, *Ann. Phys.* **3** (1958) 1.
17. H. Bruck, *Accélérateurs Circulaires de Particules* (Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires, Paris, 1966).
18. M. Conte, W. W. MacKay, *An Introduction to the Physics of Particle Accelerators* (World Scientific, Singapore, 1991).
19. D. A. Edwards, M. J. Syphers, *An Introduction to the Physics of High Energy Accelerators* (John Wiley, New York, 1993).
20. S. Y. Lee, *Accelerator Physics* (World Scientific, Singapore, 1999); 2nd edn. (2004).
21. J. B. Adams, M. G. N. Hine, J. D. Lawson, *Nature* **171** (1953) 926.
22. T. L. Collins, Cambridge Accelerator Report CEA-86 (July 1961).
23. G. T. Danby, J. E. Allinger, J. W. Jackson, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS-14**(3) (1967) 431.