

گام‌های نخستین در تحول شتابگرها*

ای. گی. کورانت*

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

شتاب‌دهی تشدیدي-سیکلوترون

برابر است و به انرژی بستگی ندارد. بنابراین با دو الکترون توخالی نیم‌دایره‌ای به شکل D که ولتاژی با این بسامد به آنها اعمال شود هر بار که باریکه از شکاف بین دو الکترون عبور کند شتاب می‌گیرد و به این ترتیب پس از n بار دوران به انرژی $2n$ eV خواهد رسید (V ولتاژ بین الکترودهاست). بیشینه انرژی را اندازه قطب‌های مغناطیسی دایره‌شکل محدود می‌کند.

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

در سال‌های بعد، لارنس و دیگران سیکلوترون‌های بزرگ‌تر ساختند. آخرین و بزرگ‌ترین نمونه این ماشین‌ها، ماشینی ۶۰ اینچی بود که در سال ۱۹۳۹ ساخته شد و دوترون را تا انرژی 20 MeV و ذرات آلفا را تا انرژی 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 ملاحظه‌ای از بین بردند).

معلوم شد که برای بیشینه انرژی شتاب‌دهی با این روش حدی وجود دارد: جرم M در معادله ۱ جرم نسبیتی است و بنابراین بسامد ω در میدان مغناطیسی یک‌دست با افزایش انرژی ذره کاهش خواهد یافت و ثابت نخواهد ماند. علاوه بر این همان موقع هم معلوم شده بود برای کانونی نگهداشتن باریکه در راستای عمودی، به جای میدان مغناطیسی یک‌دست

در ۱۹۲۷ در آخن آلمان، دانشجوی مهندسی رالف ویدرو (Rolf Wideröe) نروژی، در دنباله لوله‌های ولگشت (drift tube) با استفاده از ولتاژ بسامد رادیویی با دامنه ۲۵ کیلوولت، یون‌های سدیم را تا 50 کیلوولت شتاب داد یعنی از همان ولتاژ دو بار استفاده کرد. شرح این دستیافت را ویدرو در پایان‌نامه دکترایش آورد [۲]؛ گرچه شتاب‌دهنده ویدرو کارش را با یک ضریب ۲ به پایان آورده بود معلوم بود که شتاب‌دهی را با شمار بیشتری لوله ولگشت می‌توان چندین بار تکرار کرد. چند سال بعد ارنست لارنس (Ernest Lawrence) در کتابخانه برکلی مقاله 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 باریکه ذره را در میدان مغناطیسی به شکل دایره در بیاوریم می‌توان به جای استفاده از شمار زیادی الکترون پی‌درپی از یک مجموعه الکترودهای شتاب‌دهنده چندین بار استفاده کرد. او به این نکته حیاتی و حساس نیز اشاره کرد که بسامد زاویه‌ای دوران ذره‌ای به جرم M و بار الکتریکی e که در میدان مغناطیسی B روی مسیری دایره‌ای حرکت می‌کند با

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

* ارنست دی. کورانت از ۱۹۴۸ فیزیکدان آزمایشگاه ملی بروک هیون است و بیشتر کارش بر دینامیک ذرات در شتابگرها متمرکز است. او با ام.اس. لیوینگستون و اچ. اسنایدر دینامیک گرادیان متناوب (کانونی‌کنندگی قوی) را ابداع کرد. در دانشگاه‌های پرینستون، ییل، و استونی بروک استاد بوده است و در ۱۹۷۶ به عضویت فرهنگستان علوم برگزیده شد. در ۱۹۸۶ جایزه فرمی را دریافت کرد و در ۱۹۸۷ جایزه ویلسون را (از انجمن فیزیک آمریکا). در ۱۹۹۰ با عنوان فیزیکدان برجسته بازنشسته شد ولی همچنان در پروژه برخورددهنده یون‌های نسبیتی سنگین (RHIC) نقش دارد و عمدتاً در زمینه باریکه‌های قطبیده کار می‌کند.

استوانه‌ای ذرات حول مدارشان در جهت شعاع و عمود بر صفحه دوران نوسان می‌کنند. بسامدهای زاویه‌ای این نوسان‌ها

$$\omega_r = \Omega \sqrt{1-n}, \quad \omega_v = \Omega \sqrt{n} \quad (3)$$

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

$$0 < n < 1 \quad (4)$$

باشد. معادله‌های (۳) و (۴) و مرجع ۸ شالوده نخستین نظریه مدار شتابگر است.

پس از این موفقیت کرسست اقدام به ساخت شتابگرهای القایی بزرگ‌تر کرد. اینها به «بتاترون» معروف شدند زیرا از زمانی که پرتوایی کشف شد به الکترون‌های پرنرژی «پرتو بتا» می‌گفتند.

به دنبال انتشار مقاله کرسست [۸-۶] ویدرو موق شد در آلمان بتاترونی ۱۵ مگا الکترون‌ولتی بسازد (کایزر در [۹] این بتاترون را توصیف کرده است).

در سال ۱۹۴۵ بتاترونی 10^6 مگا الکترون‌ولتی در آزمایشگاه جنرال الکتریک در سنکنتادی نیویورک (که عمدتاً کرسست طراحی کرده بود) توانمندترین شتابگر دنیا در زمان خودش بود و سیکلوترون را پشت سر گذاشته بود.

پایداری فاز-سنکروترون و سنکروسیکلوترون

در اواخر جنگ جهانی دوم هنگامی که پروژه منهن به موفقیت نزدیک شده بود اندیشه متخصصان برکلی دوباره به سیکلوترون بازگشت. مک میلان راهی برای چیره شدن بر محدودیت‌های سیکلوترون پیدا کرد [۱۰]. او اشاره کرد که برابری (۱) را می‌توان به صورت زیر بازنوشت

$$E = Mc^2 = \frac{eBc}{\omega} \quad (5)$$

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

«ذره‌ای را در نظر بگیرید که انرژی‌اش از (۵) به دست می‌آید. این انرژی را انرژی تعادل برای میدان B و بسامد ω می‌نامیم. فرض کنید ذره از شکاف شتاب‌دهی درست لحظه‌ای

می‌بایست با افزایش انرژی و شعاع باریکه از شدت میدان مغناطیسی کاست. خود این نکته هم مشکل کاهش بسامد با افزایش انرژی را بدتر می‌کند و هر بار هنگام عبور ذره از شکاف شتاب‌دهنده فاز rf تغییر می‌کند و بالاخره به فاز شتاب‌گیرنده (کنندکننده) 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 5×10^6 کیلوولت بیشینه انرژی دست‌یافتنی حدود ۱۷ MeV خواهد بود؛ پس از آن بیشینه 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 10^8 MeV برسد. اما زمانی که مغناطیس آماده شد پروژه منهن شروع شده بود و مغناطیس بزرگ برای جدا کردن الکترومغناطیسی ایزوتوپ‌ها (کالیوترون (Calutron)) به کار برده شد. کار روی سیکلوترون متوقف شد.

شتاب‌دهی به الکترون-بتاترون؛ نظریه مدار

معلوم است که اصول شتاب‌دهی در سیکلوترون برای شتاب‌دادن به الکترون مناسب نیست زیرا الکترون در گستره مگا الکترون‌ولت نسبیستی است. نیاز به رهیافت جدیدی هست. یک امکان که در دهه ۱۹۲۰ به ذهن چند نفر رسید شتاب‌دهی در میدان الکتریکی برخاسته از میدان مغناطیسی متغیر در زمان بود. ویدرو «تبدیل‌گر پرتو» (Strahlen transformator) را طراحی کرد که میدانی مغناطیسی $B(r)$ با تقارن استوانه‌ای دارد و الکترون‌ها با تکانه p در مدار دایره‌ای به شعاع R

$$RB(R) = \frac{pc}{e} \quad (2)$$

حرکت می‌کنند. اگر شار مغناطیسی $\Phi = 2\pi \int_0^R rB(r)dr$ که این مدار در بر گرفته است افزایش یابد، میدان الکتریکی مماسی به مقدار $E = \dot{\Phi}/2\pi R$ 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 یک دست 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 انرژی 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 شتاب‌دهی القایی را آزمودند اما موفق نشدند. در آخر در سال ۱۹۴۰ کرسست موفق شد [۶ و ۷] و الکترون را تا 2.3 MeV شتاب داد. راز موفقیت او در تحلیل نظری پایداری مدار بود. کرسست و سیرپر در مقاله‌شان [۸] نشان داده‌اند که در میدانی مغناطیسی با تقارن

در سال‌های پس از جنگ در اواخر دهه ۱۹۴۰، سنکروسپیکلوترون و سنکروترون الکترون در محدوده ۳۰۰ MeV فراوان ساخته شدند زیرا امکان بررسی فیزیک جدید و هیجان‌انگیزی را فراهم می‌کردند: به‌تازگی پیون در پرتوهای کیهانی کشف شده بود و به‌کمک این ماشین‌ها فیزیک آنها کاملاً بررسی شد.

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

کانونی‌کنندگی 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 به‌شکل C ساخته شد. گشودگی C به سمت بیرون و پایه C به سمت داخل مدار بود. شاخص میدان n (معادله ۳ را ببینید) برای همه مغناطیس‌ها یکسان و برای برآوردن شرط پایداری (۴) برابر با ۰٫۶ بود. مغناطیس‌های کازموترون همه رو به بیرون بودند، بنابراین گرفتن باریکه ثانویه منفی ساده بود اما ثانویه‌های مثبت با دیواره درونی ماشین برخورد می‌کردند. علاوه بر این در اثر اشباع میدان مغناطیسی ناحیه قابل‌استفاده («میدان خوب good field») به‌زای میدان‌های متناظر با بیشینه انرژی کاهش می‌یافت. بنابراین پیشنهاد شد که پایه عمودی 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 ناحیه میدان‌های فریزی (fringe fields). آیا این منجر به ناپایداری مدار نمی‌شد؟

تقریباً بلافاصله با تحلیل معلوم شد [۱۳] که گرادیان‌های متناوب نه‌تنها پایداری را ضعیف‌تر نمی‌کند بلکه آن را بهتر می‌کند! با تنظیم پارامترها می‌توان پایداری مدار را بسیار بهتر از حالت عادی کرد. شدت مؤثر کانونی‌کنندگی را نسبت به‌سامدهای نوسان افقی و عمودی به سرعت زاویه‌ای تعیین می‌کند. در حالت عادی این نسبت‌ها (که به «کوک» (tune) معروف‌اند) به‌ترتیب $\sqrt{1-n}$ 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 «قوی» به انرژی‌های بیشتر رسید. در مرجع ۱۳ برای کانونی‌کنندگی در بخش‌های مستقیم کاربرد مغناطیس‌های چهارقطبی پیشنهاد شده است.

می‌گذرد که میدان الکتریکی از صفر می‌گذرد و طوری تغییر می‌کند که اگر ذره زودتر می‌رسید شتاب می‌گرفت. این مدار به‌وضوح 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 مقدارهای 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 بسامد (یا هر دو) انجام داد. با تغییر انرژی تعادل، فاز حرکت نیز جابه‌جا می‌شود آن‌قدر 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 مک‌میلان از این کار آگاه شد بی‌درنگ تقدم وکسلر را رسماً پذیرفت [۱۲].

این اصل پایداری فاز بر محدودیت سیکلوترون فائق آمد: بسامد ω را در میدان سیکلوترون کم کنید و ذره شتاب خواهد گرفت. به مغناطیس ۱۸۴ اینچی که با امید رسیدن به انرژی ۱ MeV ساخته شده بود (بخش ۲) دو الکترون D-شکل با ولتاژ متوسط و سیستم rf با مدولاسیون بسامد اضافه شد و توانست دوترون‌ها را تا ۱۹۰ MeV (ذرات آلفا را تا ۳۸۰ MeV) شتاب دهد.

با سیکلوترون مدولاسیون بسامد یا سنکروسپیکلوترون می‌توان بیشینه 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 معادله

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

که در آن p تکانه ذره است معلوم کرد. اما میدان مغناطیسی باید تمام فضایی را که مدار متناظر با انرژی نهایی در بر می‌گیرد پر کند و اگر اندازه مدار خیلی زیاد باشد این کار هزینه زیادی می‌طلبد. در عمل سنکروسپیکلوترون‌هایی که به این شکل کار کنند تا بیشینه انرژی ۶۰۰ MeV ساخته شده‌اند.

برای شتاب‌دهی به الکترون، شعاع مدار را ثابت نگه می‌داریم و میدان -- و بسامد -- را به‌شکلی تغییر می‌دهیم که (۳) و (۴) برآورده بمانند. در این صورت برخلاف بتاترون که درون مدار میدانی با شدت میانگین دو برابر میدان روی مدار لازم دارد تنها در ناحیه‌ای نواری حول وحوش مدار به میدان مغناطیسی نیاز است.

• **E. D. Courant**, *Early Milestones in the Evolution of Accelerators*, in: *Reviews of Accelerator Science and Technology*, (Alexander W. Chao and Weiren Chou, eds) World Scientific, Vol. 1, 2008, pp. 1-5.

مراجع

1. **E. Rutherford**, *Proc. R. Soc. A* **117** (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 and 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 and 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, and 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, and J. P. Blewitt, *Phys. Rev.* **91** (1953), 202.
16. **E. D. Courant and 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 and W. W. MacKay**, *An Introduction to the Physics of Particle Accelerators* World Scientific, Singapore, 1991.
19. **D. A. Edwards and 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, and 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, and J. W. Jackson**, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS-14**(3) (1967), 431.

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: Alternating Gradient) 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 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 باریکه ذرات در شتابگرهای کانونی‌کننده گرادیان متناوب به رشته‌ای فعال تبدیل شده که مقالات و کتاب‌های پرشماری در باره‌اش منتشر شده است! در اینجا چندتایی را فهرست می‌کنیم [۱۶-۲۰].

زود معلوم شد که کاهش دامنه نوسان پیش‌بینی شده در اولین مقاله [۱۳] بیش از اندازه بوده است. آدامز، هاین و لاوسون اشاره کردند [۲۱] که اگر نسبت بسامدهای نوسان به بسامد دوران (که به زودی «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 دوی این اثرها به معنی تشدید بین نوسان‌ها و مؤلفه‌های فوریه 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 تشدیدی (صحیح یا نیم صحیح) دور باشند.

هنر و علم طرح‌ریزی آرایش («شبکه»ی) مغناطیس‌ها در سنکروترون‌های AG طی سال‌ها پیش رفته است. در اولین سنکروترون‌های AG مغناطیس‌های کانونی‌کننده در جهت‌های افقی و عمودی را یک در 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. میلتون وایت (کار منتشر نشده) و دنیبی و همکارانش [۲۳] پیشنهاد جدا کردن کارکرد کانونی‌کنندگی از کارکرد خم کردن. مسیر ذرات را دادند یعنی مغناطیس‌هایی (یا میدان‌هایی یک‌دست) داشته باشیم که فقط مسیر ذرات را خم می‌کنند و در بین آنها مغناطیس‌های چهارقطبی کانونی‌کننده قرار داده شوند. در اولین سنکروترون‌های AG در بروک هیون و سرن از مغناطیس‌های خم‌کننده با «کارکرد ترکیبی (combined function)» استفاده شده بود که در مرجع ۱۳ به میان 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