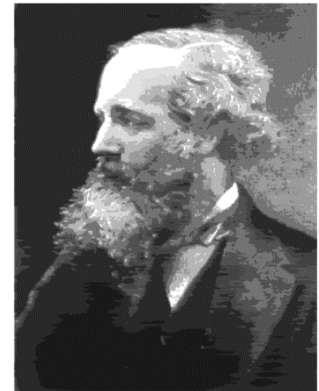


ساخت شتابگر و علم تجربی

علم جدید برخاسته از برهمکنش بین علم نظری و علم تجربی است. هیچ نظریه‌ئی هرچه‌قدر عقلانی تا در عمل آزموده نشود پذیرفته نیست و مجموعه داده‌های آزمایشگاهی نیز به‌تنهایی برای ساختن تصویری از جهان که به کار تغییر و بهبود وضعیت انسان بیاید کفایت نمی‌کند. در ایران علم نظری پیشرفت زیادی کرده است و دلایلش روشن است: معروف است که ابزار کار ریاضیدان فقط مداد و کاغذ است. اما علم تجربی در ایران هنوز با آنچه در کشورهای تراز اول علمی دنیا می‌گذرد فاصله‌ی زیاد دارد. ساخت شتابگر در ایران گام مهمی در راه بهترکردن این وضعیت خواهد بود. ساخت شتابگر و کار با آن، آشنایی با فناوری‌های پرشماری را می‌طلبد: فناوری خلأ، بسیار زیاد، فناوری ساخت مغناطیس، فناوری بس‌آمد رادیویی، فناوری کنترل کامپیوتری، حرکت‌دادن ابزار مکانیکی سنگین با دقت میکرونی... . آشنایی و کار با این فناوری‌ها برای علم تجربی و در نهایت صنعت ایران بسیار بارآور خواهد بود.

تابش سنکروترون

در سال ۱۸۶۱ ماکسول جمله‌ئی به معادلات شناخته‌شده‌ی حاکم بر پدیده‌های الکتریکی و مغناطیسی (قانون گاوس، قانون آمپر، قانون فارادی) اضافه کرد که توصیف پدیده‌های الکتریکی و مغناطیسی را در مجموعه معادلاتی معروف به معادلات ماکسول وحدت بخشید و شالوده‌ی پیشرفت‌ها و انقلاب‌های بعدی در فیزیک شد. این جمله به جریان جابه‌جایی معروف است و به قانون آمپر اضافه شد و



پی‌آمدهائی
حیرت‌انگیز
در بر داشت
از جمله:
میدان‌های

الکتریکی و مغناطیسی می‌توانند مستقلاً و دور از چشمه‌های میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی به‌صورت موج انتشار یابند (امواج الکترومغناطیسی)؛ تابش گرمایی و نور خود از همین نوع امواج است؛ این امواج هنگامی زاده می‌شوند که بار الکتریکی شتاب بگیرد. در باره‌ی تأثیر این کشف بر زندگی روزمره‌ی انسان‌ها هر چه بگوییم کم است. اما آنچه

مستقیماً به تابش سنکروترون مربوط می‌شود همین نکته‌ی آخر است.

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = q / \epsilon_0$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = -d\Phi_B / dt$$

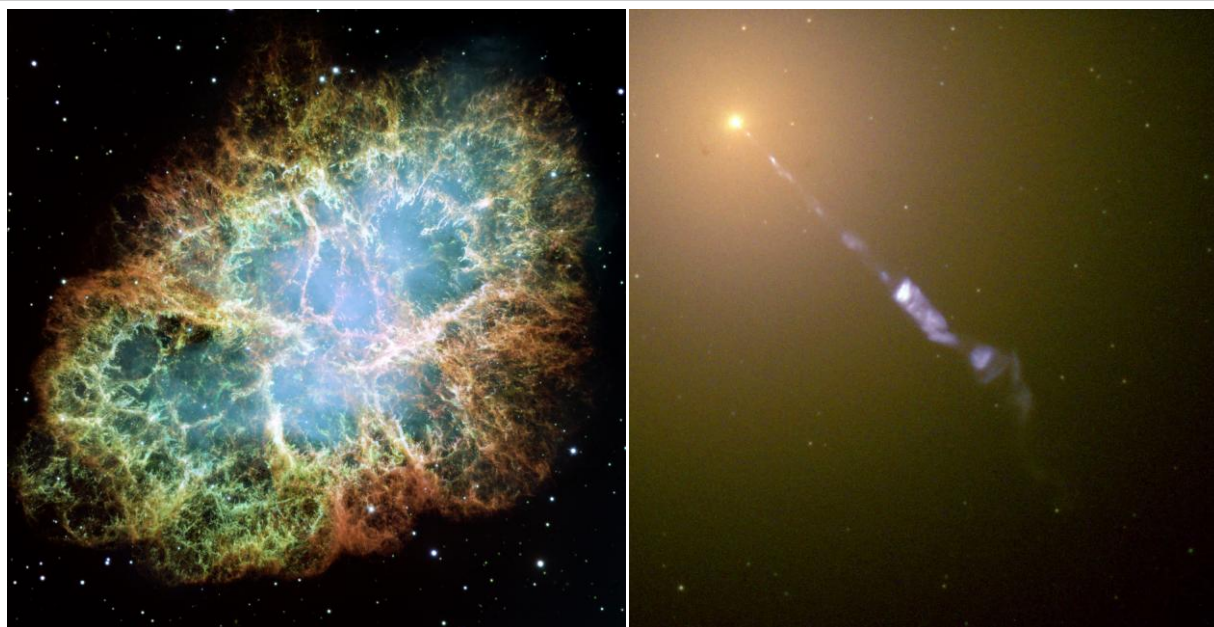
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \mu_0 i + \mu_0 \epsilon_0 d\Phi_E / dt$$

جریان جابه‌جایی

معادلات ماکسول و جریان جابه‌جایی.

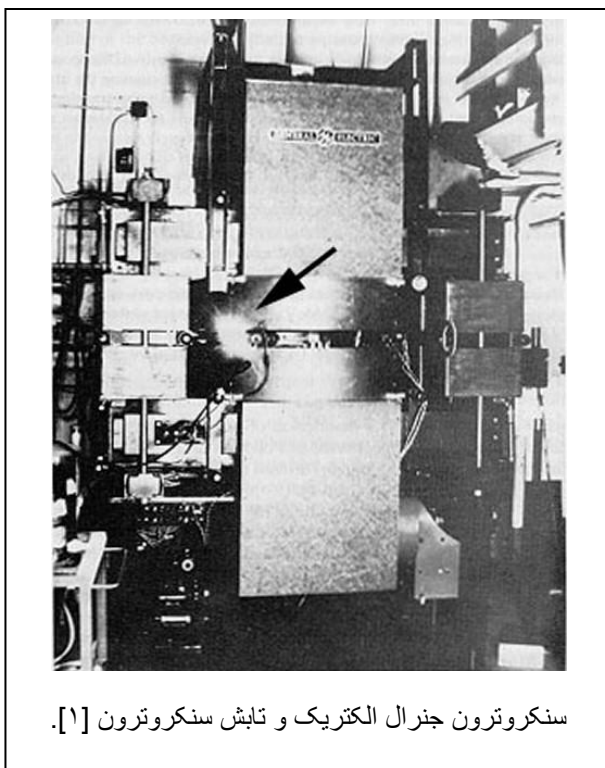
با کشف الکترون و هسته‌ی اتم‌ها دانشگران در جست‌وجوی راه‌های شناختن این ذرات جدید به‌فکر شتاب‌دادن آنها و برخورد دادن آنها با یکدیگر و یا هدف‌های شناخته‌شده افتادند. این کار ابتدا با عبور دادن ذرات باردار از اختلاف‌پتانسیل الکتریکی ثابت انجام می‌شد اما با این روش انرژی ذرات را نمی‌توان به بیش از ۳ میلیون الکترون‌ولت رساند (معادل با انرژی الکترونی که از اختلاف‌پتانسیل ۳ میلیون ولت – آستانه‌ی یونش هوا – عبور کرده باشد).

در تلاش برای افزایش انرژی نهایی ذرات باردار، شتابگرهای دایره‌ای – نخست به‌صورت سیکلوترون، سپس به‌صورت سنکروترون، و در نهایت سنکروترون به بار آمدند. ذرات باردار با اعمال میدان مغناطیسی وادار به حرکت روی مسیر دایره‌ای می‌شوند تا بارها و بارها از کاواک شتاب‌دهنده عبور کنند و انرژی‌شان در هر گذر افزایش یابد. در سیکلوترون میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی ثابت هستند اما با این روش تا زمانی که سرعت ذره‌ی باردار نسبیتی نیست می‌توان آن را شتاب داد. در سنکروترون تنها میدان الکتریکی و در سنکروترون، هم میدان الکتریکی و هم میدان مغناطیسی به شکلی متناسب با تغییر جرم نسبیتی ذره تغییر می‌کنند.



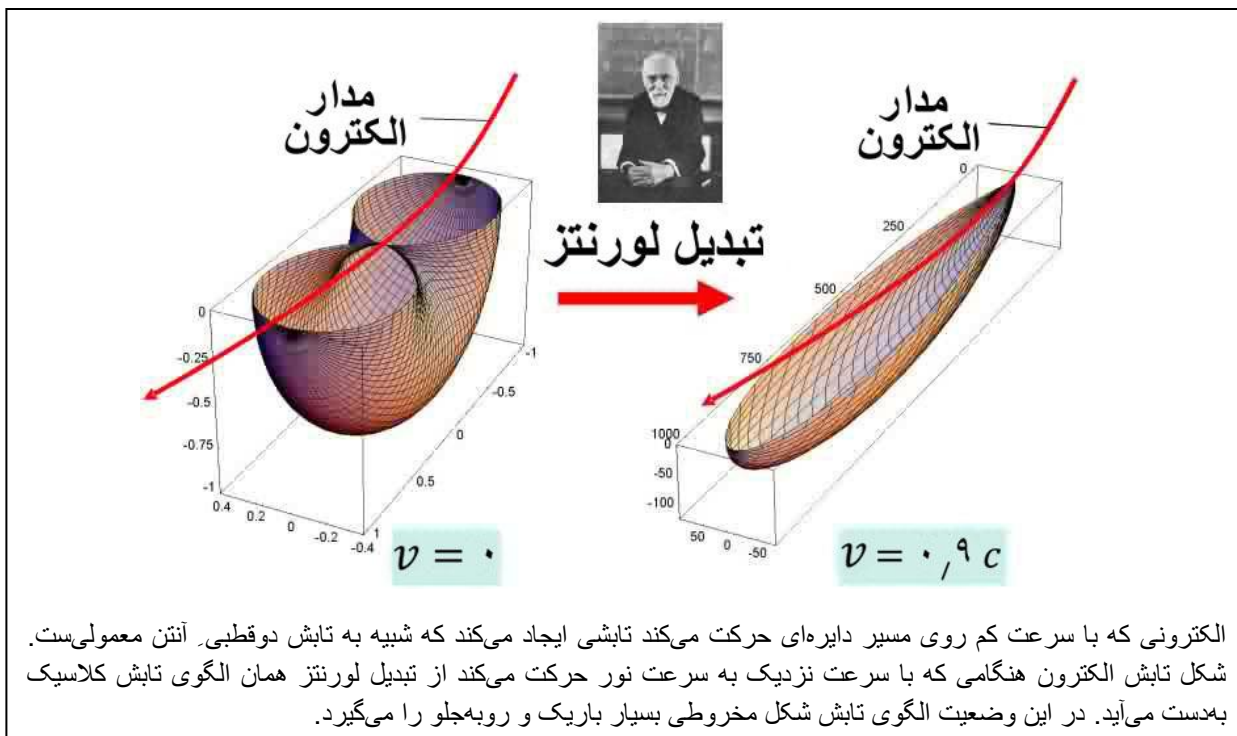
(سمت راست) تصویر جت پرنرژی M۸۷ از تلسکوپ هابل: نور آبی‌رنگ انتهای جت ذرات پرنرژی که از قلب هسته‌ی فعال کهکشان ساطع می‌شود برخاسته از تابش سنکروترونی‌ست. (سمت چپ) سحابی عقرب: درخشش آبی‌رنگ مرکز سحابی تابش سنکروترونی‌ست [از مرجع ۱].

تابش سنکروترونی برخاسته از حرکت مارپیچ ذرات باردار در میدان‌های مغناطیسی ستارگان، بر زمین می‌تابد و به قدمت ستارگان است، اما در آزمایشگاه، نخستین بار در آزمایشگاه پژوهشی جنرال الکتریک در شینکتادی نیویورک مشاهده شد. فرانک لدر، آناتول گورویچ، رابرت لانگموئر و هرب

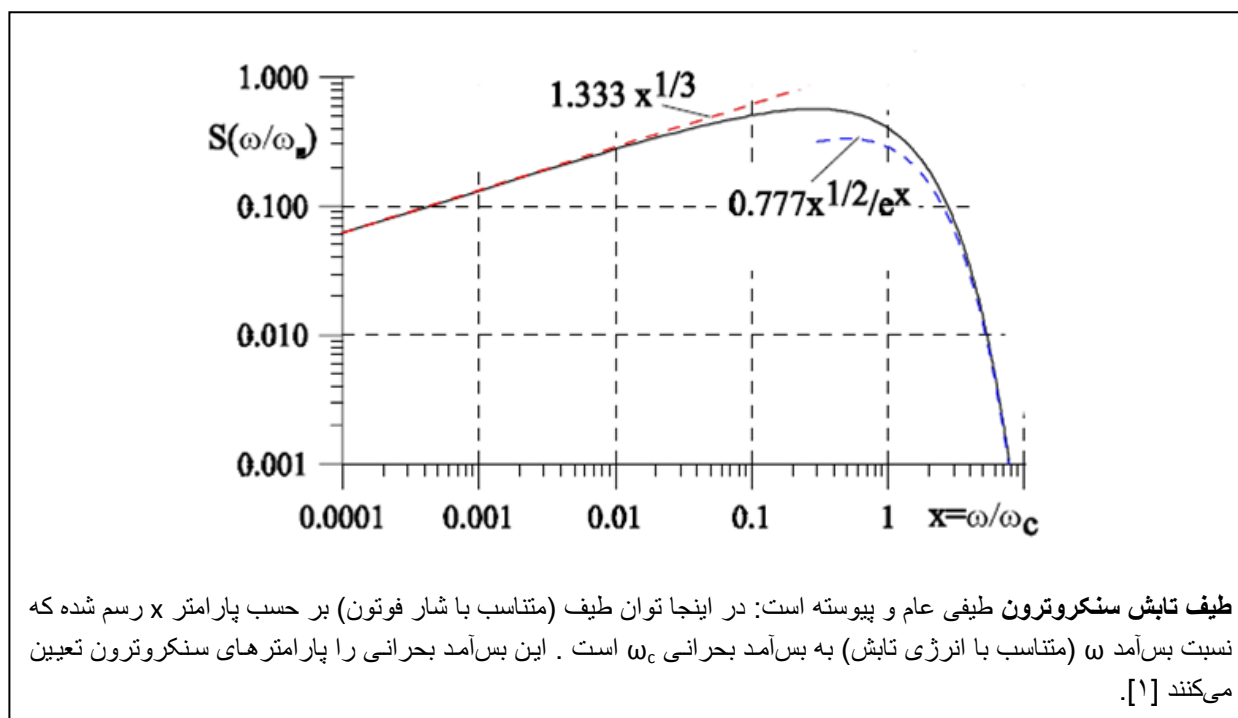


پولاک این کشف را در می ۱۹۴۷ اعلام کردند. پولاک ماجرا را چنین تعریف می‌کند: "در ۲۴ آوریل، لانگموئر و من با دستگاه کار می‌کردیم و از تکنیسین خواستیم که با آینه پشت دیوار بتونی. محافظ را نگاه کند. او بی‌درنگ علامت داد که سنکروترون را خاموش کنیم چون در لوله‌ی سنکروترون جرقه می‌دید. خلأ هنوز بسیار خوب بود و من و لانگموئر به انتهای دیوار رفتیم تا ببینیم چه رخ می‌دهد. نخست فکر کردیم که آن چه می‌دیدیم تابش چرنکوف است اما زود معلوم شد آن‌چه می‌بینیم تابشی بود که ایوانگکو و پومرانچوک پیش‌بینی کرده بودند." نام **تابش سنکروترون** از همین‌جا برخاسته است [مرجع ۱ و ۲].

روی مسیر دایره‌ای ذره‌ی باردار پیوسته تحت تأثیر شتاب روبه‌مرکز قرار دارد که میدان مغناطیسی به‌آن وارد می‌کند و نتیجه‌اش تابش سنکروترون است. در کار شتابگری که هدفش شتاب‌دادن به ذرات است این تابش عاملی مزاحم است زیرا با کاهش انرژی ذره همراه است. هنگامی که سرعت ذره‌ی باردار آن‌قدر زیاد می‌شود که رفتار نسبیتی بروز دهد (برای الکترون با جرمی برابر با ۵۱۱ کیلو الکترون‌ولت، رسیدن به انرژی ۵ مگا الکترون‌ولت معادل با عبور الکترون از اختلاف پتانسیل ۵ میلیون ولت معادل با چنین وضعیتی است) این تابش خصوصیت‌های بسیار مطلوبی دارد. تابش ذره‌ی باردار با سرعت نزدیک به سرعت نور به‌سمت جلو و



در مخروطی باریک متمرکز است که زاویه‌ی گشودگی آن در حد یک تا ۰٫۱ میلی‌رادیان است، قطر باریکه نیز در حد چند میکرون است. درخشندگی این تابش می‌تواند بین یک میلیون تا 10^{11} برابر چشمه‌های آزمایشگاهی باشد. طیف این تابش نیز پیوسته است و از فروسرخ تا پرتوهای x سخت را پوشش می‌دهد و با استفاده از فیلترهای مناسب می‌توان آن بخش از طیف را که برای آزمایش مناسب است انتخاب کرد. در سنکروترون‌ها، این تابش تپشی‌ست و ساختار زمانی مشخص دارد. مدت‌زمان هر تپ بین ۱۰ تا ۱۰۰ پیکوثانیه و فاصله‌ی زمانی بین تپ‌ها می‌تواند بین ۱۰ تا ۱۰۰ نانوثانیه باشد.

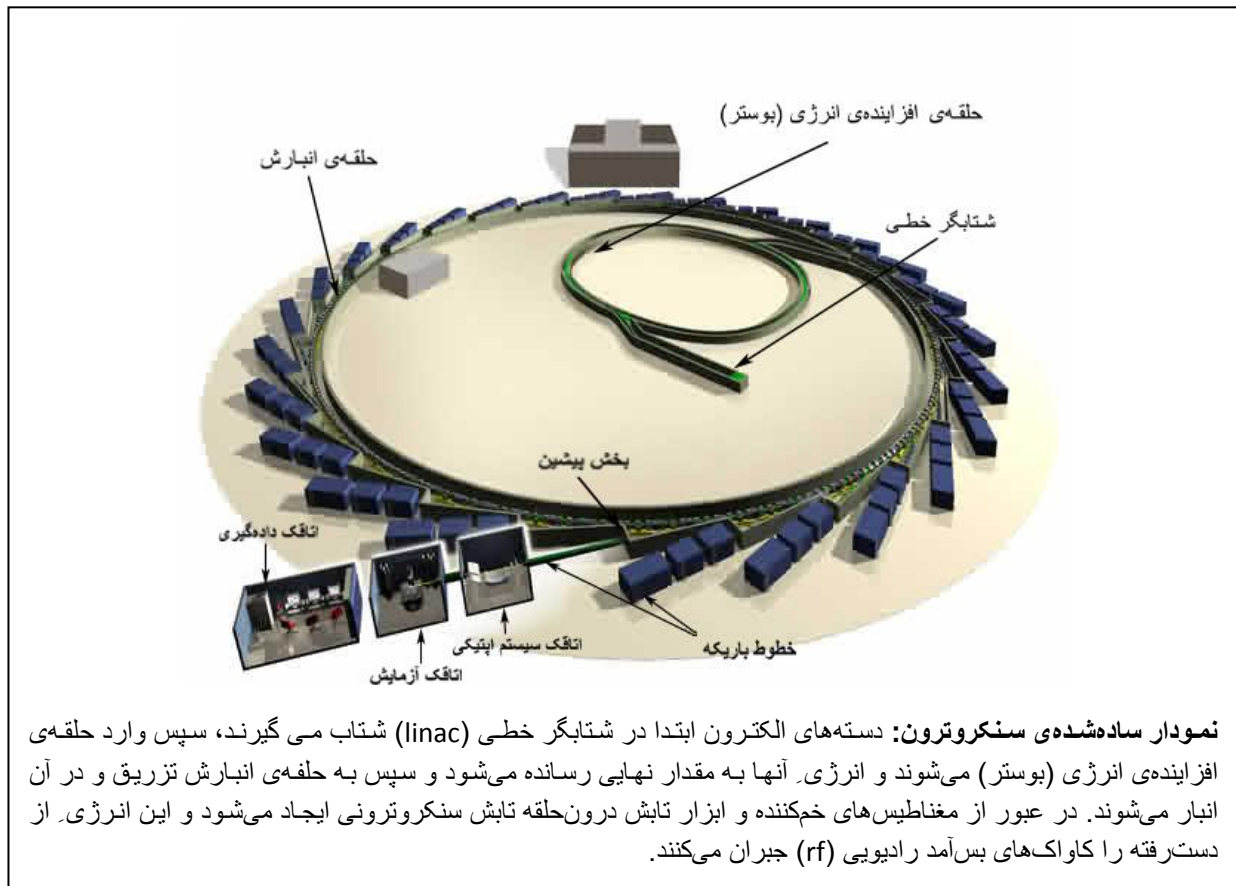


در آغاز کسانی که می‌خواستند از خصوصیات این تابش استفاده کنند مجبور بودند سربار شتابگرهای شوند که برای پژوهش‌های ذرات بنیادی ساخته شده بود. به عبارت دیگر مجبور بودند ابزارهای آزمایش خود را در کنار حلقه‌ی شتابگر مستقر کنند و هنگامی که آزمایش‌های ذرات بنیادی متوقف می‌شد کار خود را انجام دهند. از اوایل دهه‌ی ۱۹۷۰ میلادی این اندیشه پیدا شد که شتابگرهای ویژه‌ی تولید تابش سنکروترون ساخته شود. به این ترتیب چشمه‌های نور یکی‌یکی ظاهر شدند. اینک بیش از ۷۵ چشمه‌ی نور در امریکای شمالی، اروپای غربی، و خاور دور با حدود ۶۰۰۰۰ کاربر مشغول به کارند.

کاربردهای تابش سنکروترون در پژوهش

هر چه ذره سبک‌تر باشد تابش آن بیشتر است. بنابراین در چشمه‌های نور سنکروترون ذره‌ی که شتاب داده می‌شود سبک‌ترین ذره یعنی الکترون است. الکترون ابتدا در تفنگ الکترون در اثر گرمای زیاد و پدیده‌ی گرمایونش ایجاد می‌شود و با شتابگری خطی به انرژی مناسب برای تزریق به حلقه‌ی افزایش انرژی می‌رسد. در حلقه‌ی افزایش انرژی (بوستر) انرژی الکترون به انرژی نهایی رسانده می‌شود و سپس به حلقه‌ی که دسته‌های الکترون در آن انبار می‌شوند (حلقه‌ی انبارکننده یا حلقه‌ی

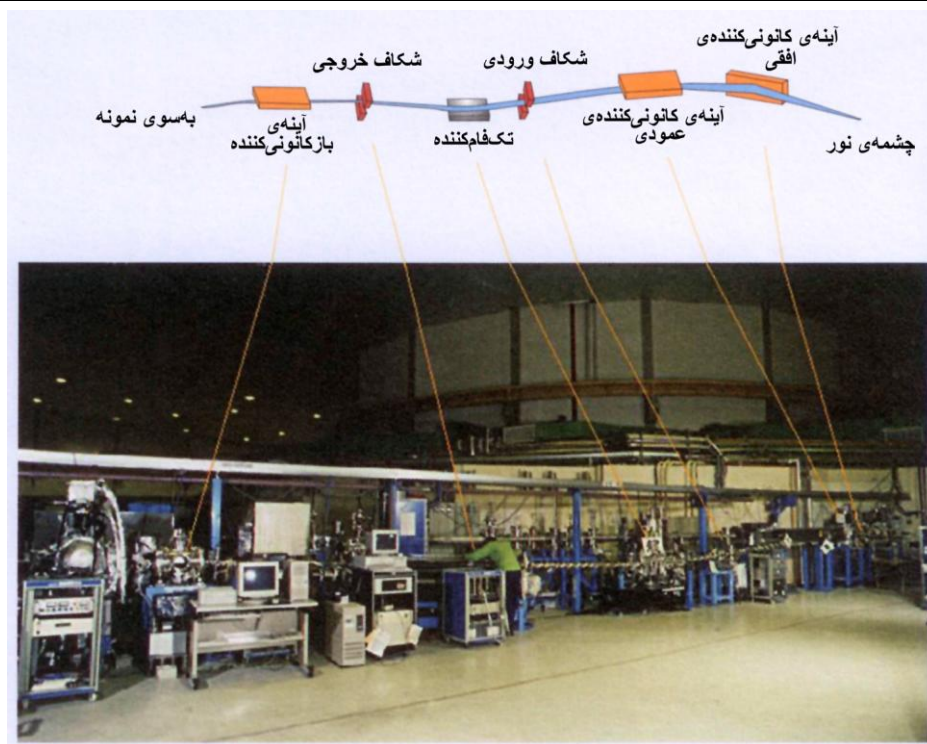
انبارش) وارد می‌شود. الکترون‌ها درگذر از مغناطیس‌های خم‌کننده و چشمه‌های تابش درون حلقه (نوسان‌سازها یا لرزاننده‌ها) تابش درخشان سنکروترونی تولید می‌کنند. انرژی‌ئی را که به این صورت از دست می‌دهند باید با شتاب‌دادن مجدد به آنها در کاواک‌های بس‌آمد رادیویی (RF) تأمین کرد.



تابش سنکروترون هر جا که نیاز به بررسی جزئیات ساختار ماده در مقیاسی هست که به جابه‌جایی اتم‌ها حساس باشد به کار می‌آید^۱:

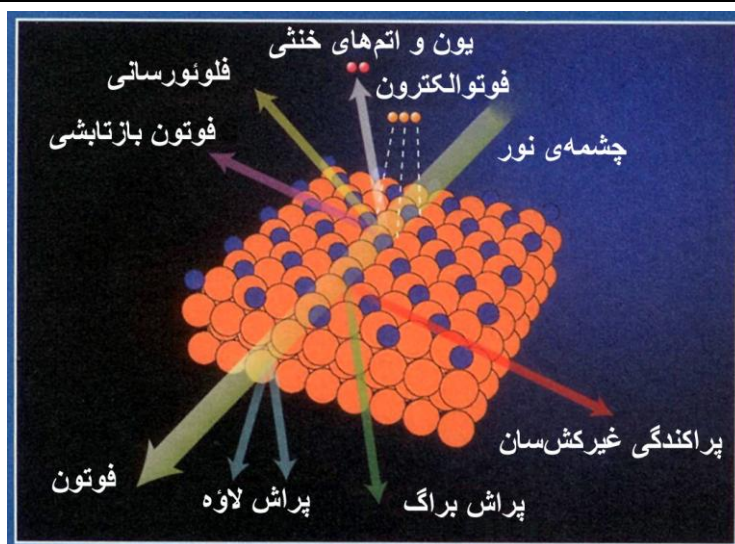
۱. فیزیک: علاوه بر ساختار هندسی، پرتوهای x ساختارریز مواد را به‌دست می‌دهند و تابش سنکروترون زمینه‌های پژوهشی جدید مانند بررسی سطح‌ها (تابع کار، ویژگی‌های مرزها، لایه‌های نازک، سطح‌نشانه‌ها، آلودگی‌ها)، خواص مغناطیسی، نمونه‌های تحت فشار و دماهای حاد را به‌وجود آورده است.

^۱ مطالب بعدی با استفاده از مرجع ۲ نوشته شده است.



خط باریکه در مرکز ملی پژوهش‌های تابش سنکروترون: در این خط باریکه طیف‌نمایی با روش‌های متنوع PES، ARPEST، تصویر بالا نمودار ساده‌شده‌ی خط‌باریکه‌ی تصویر زیرین شامل این قسمت‌هاست: (۱) آینه‌های کانونی‌کننده‌ی افقی و عمودی باریکه‌ی فوتون را در جهت افقی و سپس عمودی کانونی می‌کنند (۲) با شکاف ورودی شدت و توان تفکیک باریکه کنترل می‌شود (۳) تکفام‌کننده بخشی از نور با طول‌موج مورد نیاز را انتخاب می‌کند (۴) شکاف خروجی شدت و توان تفکیک نور خروجی را کنترل می‌کند و (۵) آینه‌ی بازکانونی‌کننده نور سنکروترون را روی نمونه کانونی می‌کند [برگرفته از مرجع ۴ با تغییرات].

۲. **علم مواد:** در علم مواد تابش سنکروترون را می‌توان برای بررسی ساختار و آرایش اتم‌ها در پلاستیک، کولوئید، شیشه، سیمان، مواد مرکب، آلیاژها، ابررساناها، مواد طبیعی مانند چوب و تار عنکبوت، مواد غذایی مانند شکلات؛ بررسی تغییر آرایش اتم‌ها طی فرایندهای شیمیایی و زیستی و به‌دست‌آوردن اطلاعات در باره‌ی کارکرد شیمیایی یا زیستی مولکول‌ها و یا جست‌وجوی روش بهتر برای ساخت مواد به کار برد. تقریباً در همه فعالیت‌های بشر نیاز به ساخت مواد جدید است. اکنون می‌توان موادی با خواص ماکروسکوپی دل‌خواه در تراز اتم‌ها طراحی کرد. حدود ۷۰٪ زمان کاربری سنکروترون‌ها به پژوهش‌های مواد اختصاص دارد که در باره‌ی ساختار شیمیایی، بلوری، الکترونیکی، مواد مختلف و رویش و خواص بلورها، سرامیک، و شناخت بهتر از فرایندهای خوردگی و خستگی فلز اطلاعات فراوان به دست داده است:

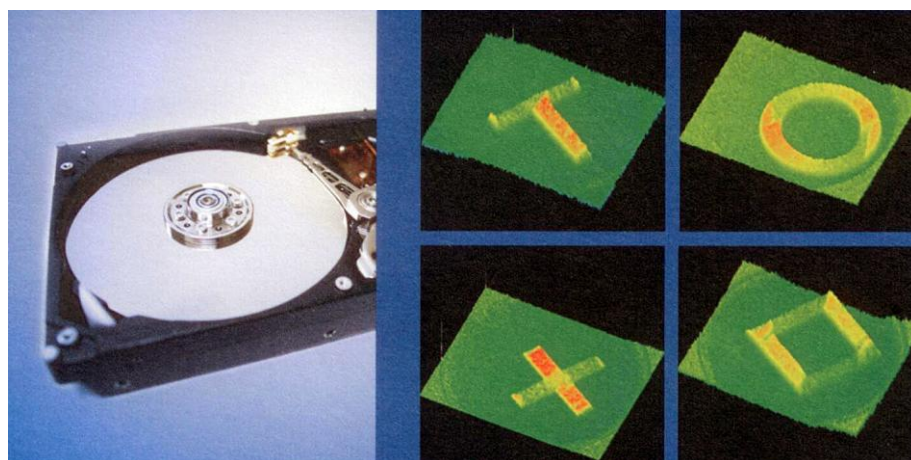


آثار برخورد تابش سنکروترون با نمونه: تابش سنکروترون می‌تواند باعث گسیل فوتوالکترتون، یون یا اتم خنثی، و فلوئورسانی. نمونه شود. بخشی از تابش جذب می‌شود و بقیه از نمونه عبور می‌کند، تابش سنکروترون پراکنده می‌شود، بازتابیده می‌شود، پراش می‌یابد... و هر کدام از این آثار می‌تواند برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی. نمونه را آشکار کند [برگرفته از مرجع ۴ با تغییرات].

- **نانوفناوری** با ساختارهای مولکولی در اندازه‌های ۱ تا ۱۰۰ نانومتر سروکار دارد: با پودرهای نانومتری می‌توان سرامیک‌ها، کاتالیزورها، مواد کاهنده‌ی ساییش، و لایه‌های پوشش‌دهنده‌ی جدید به‌بار آورد؛ سازمان‌یابی. خودبه‌خودی. مولکول‌ها و شکل‌گیری. ساختارهای بزرگ‌تر می‌تواند فرآیندهای ساخت را زیرورو کند و این پدیده هم اینک در ساخت ابزارهای الکترونیکی و ساخت مواد چندبخشی که آثار کوانتومی بروز می‌دهند، کاربرد پیدا کرده است.
- **الکترونیک و مخابرات:** با استفاده از بلورهای مایع جدید می‌توان نمایشگرهای بلور مایع با روشنایی و سرعت بیشتر ساخت؛ با رساناهای آلی می‌توان ترانزیستورهای بسیار کوچک ساخت و خودسامان‌یابی. این رساناها می‌تواند به ساخت کامپیوترهای مولکولی منجر شود؛ مواد دارای خواص اپتیکی. غیرخطی سرعت و بازدهی. مخابرات اپتیکی را افزایش خواهد داد؛ مواد رنگین جدید و روش‌های جدید ساخت آنها برای صنعت به‌سرعت درحال تحول چاپ و تصویرسازی بسیار اهمیت دارد.
- **تولید و انبارکردن انرژی:** معلوم شده است برای ساخت. یاخته‌های سوخت. اکسیدهای جامد که در دمای زیاد کار کنند و یاخته‌های سوختی که مستقیماً با متانول کار کنند چه چالش‌هایی پیش روست؛ کار به‌بارآوردن. کاتالیزورها و غشاهای سرامیکی آغاز شده است؛ به باتری‌های جدید برای کاربرد در خودروها و وسایل الکترونیک همراه نیاز است تا از مصرف بیشینه کاسته شود.



ریزنمایی گسیل فوتوالکترونی (PEEM): فوتوالکترون‌هایی را که در اثر تابش سنکروترون آزاد می‌شوند عدسی‌های الکترون گردآوری می‌کنند و با آنها تصویر ساخته می‌شود. با تحلیل این تصاویر ویژگی‌های ناحیه‌های بسیار کوچک مشخص می‌شود. این روش از ریزنمایی معمولی الکترونی کمتر مخرب است و می‌توان با آن طیف شیمیایی را نقطه به نقطه بررسی کرد.

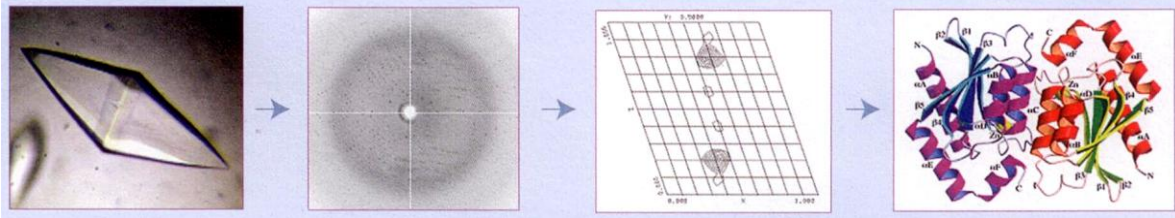


لایه‌های مغناطیسی پرمالوی را می‌توان با روش ریزنمایی گسیل فوتوالکترونی درمقیاس بسیار کوچک کاوید و ارتباط نزدیک بین توزیع و شکل حوزه‌های مغناطیسی را بررسی کرد. در شکل‌های هندسی بالا رنگ‌های مختلف نماینده‌ی جهت‌های مغناطیگی متفاوتند، این اطلاعات را می‌توان برای گزینش میکروساختار عناصر حافظه‌های مغناطیسی آینده به کار برد [برگرفته از مرجع ۴ با تغییرات].

- **پزشکی و بهداشت عمومی:** برای ساخت بافت‌های مصنوعی، استخوان، درون‌کاشته^۲ها، پیوند اندام‌ها، مفاصل، و ابزارهای پزشکی نیاز به مواد زیست‌سازگار است. با این مواد مجموعه‌ابزارهای تشخیصی برای فروش در داروخانه‌ها در دسترس همه قرار خواهد گرفت؛ حسگرهای زیست‌شناختی برای درمان، جلوگیری، زیست‌پس‌خورد^۳، و دارورسانی. کنترل‌شده ساخته خواهد شد؛ با شیمی درمقیاس نانومتری خبرگیری از کارکردهای خاص و پیش‌روی بیماری میسر خواهد شد.

- **تراپری:** برای کاهش مصرف انرژی و آلودگی برخاسته از آن، و همچنین برای طراحی مؤلفه‌های سازه‌ای جدید با هدف کاهش آسیب‌ها و جذب انرژی هنگام برخورد، به ساخت مواد سبک جدیدی از نوع مواد مرکب در واحدهای تولید نیرو و ابزارهای درون خودرو نیاز است.

- **محیط زیست:** یافتن مواد جدیدی که بازیافت‌شان به‌سادگی میسر باشد و به‌بارآوردن شیمی سبز با هدف کاهش کاربرد منابع و مواد خطرناک که منجر به یافتن روش‌های تمیزتر و کنترل دقیق‌تر و ویژگی‌شناسانه‌ی مواد در سنتز شیمیایی شود.



از چپ به راست: (۱) تهیه‌ی بلور پروتئین (۲) داده‌گیری (۳) تعیین محل اتم‌های سنگین (۴) تعیین ساختار

بلورنگاری پروتئین‌ها: پیش از آن‌که بتوان ویژگی‌های پروتئین را مشخص کرد باید (از چپ به راست) (۱) آن را بلورین کرد و در ایستگاه آزمایش قرار داد (۲) با پرتوهای x الگوی پراش بلور را به‌دست آورد (۳ و ۴) با تحلیل الگوی پیچیده‌ی پراش همراه با دانسته‌ها ساختار بلوری پروتئین را استنتاج کرد [مرجع ۴]..

۳. **علم حیات و زیست‌شناسی:** کارکرد هر ماکرومولکول زیستی به ساختار آن یعنی آرایش اتم‌ها در مولکول بستگی دارد؛ روش‌های کار با تابش سنکروترون شامل بلورنگاری، طیف‌نگاری، پراکندگی از مواد غیربلوری، و تصویرسازی‌ست. در بلورنگاری پروتئین تابش سنکروترون دو مزیت عمده‌ی سرعت و دقت را دارد:

- برای هر پروژه‌ی تعیین ساختار پروتئین سرعت اهمیت بسیار دارد. و برای طراحی داروها با کارکرد درمانی. ویژه دقت نقش حیاتی دارد زیرا بسیاری از بیماری‌ها برخاسته از کارکرد نادرست پروتئین‌هاست و تفکیک‌دهی با تابش سنکروترون بسیار بهتر از چشمه‌های

^۲ implant

^۳ biofeedback

آزمایشگاهیست ضمن این که می توان با آن بلورهای بسیار کوچک و یا بلورهائی با یاخته‌ی یکائی بسیار بزرگ را بررسی کرد.

- با تابش سنکروترون می توان آنزیم ها را که بلورین نمی شوند بررسی کرد و همچنین ساختار تارها مثل بافت های ماهیچه ای و غشاها را. کاربردهای این روش ها به پژوهش در زیست فناوری هم رسیده است مثلاً می توان آنزیم های را طراحی کرد که مواد آلاینده را تجزیه کنند یا به صورت کاتالیزگرهای گرمایی پایدار در صنعت عمل کنند و یا با آنها می توان حشره کش های با تأثیرات بهتر ساخت

- هرروزه مسائل زیست شناختی بیشتری وارد حوزه ی تعیین ساختارهای زیستی می شود و با پیچیده تر شدن مسائل، تقاضا برای ادغام اطلاعات از چند نوع آزمایش بیشتر می شود. پیشرفت فناوری ها در خطوط باریکه ی چشمه های نور تقاضا برای زمان کاربری این چشمه ها را افزایش داده است و تأسیسات منطقه ای روز به روز اهمیت بیشتری پیدا می کنند زیرا برای دانشجویان و پسادکترها دسترسی آسان به این تأسیسات اهمیت زیاد دارد.

۴. پزشکی: روش های تصویرسازی با تابش سنکروترون در تشخیص بیماری ها به کار می آید همچنین نتایج پژوهش های زیست شناسان نیز در پزشکی کاربرد دارد. تابش سنکروترون را برای درمان نیز می توان به کار برد. در ژاپن یک بیمارستان در نزدیکی سنکروترون Spring 8 قرار دارد و با خط باریکه ای سه کیلومتری تابش سنکروترون دریافت می کند.

۵. شیمی: تابش سنکروترون برای بررسی واکنش ها و ترکیب های شیمیایی آرمانیست، بسیاری از فرآیندهای صنعتی به کاربرد کاتالیزگرهای بستگی دارند که می توان با روش های خاص مربوط به تابش سنکروترون بررسی کرد. همچنین تابش سنکروترون را می توان برای بازشناسی ساختار بس پارها که دسته ی خاصی از مولکول های درشت هستند به کار برد.

۶. محیط زیست: به بود منابع انرژی، مبارزه با آلودگی های زیست محیطی، درک بهتر از پدیده های طبیعی برای حفظ محیط زیست اهمیت بسیار دارد. تابش سنکروترون اینک به میزان زیاد برای شناخت آلاینده ها و درک فرآیند وارد شدن شان به محیط زیست، تحرک آنها در محیط، و میزان سمیت آنها به کار برده می شود.

۷. علم زمین: تابش سنکروترون را می توان برای پژوهش در باره ی مولکول ها در محیط اطراف به کار برد یعنی فرآیندهای اصلی زیست شناختی و شیمیایی مؤثر در چرخش عناصر بین پوسته ی زمین، آب سپهر^۶، زیست سپهر^۵ و جو را در تراز مولکول ها بررسی کرد؛ تابش سنکروترون همچنین نقش مؤثری در فیزیک مواد معدنی و سنگ شناسی تحت فشار زیاد دارد که هدفش درک بنیادی ارتباط بین

⁴ unit cell

⁵ hydrosphere

⁶ biosphere

خواص فیزیکی و ساختار اتمی و پایداری و معادلات حالت مواد معدنی درون جبهه^۷ و عمق پوسته^۸ی زمین است.

کاربردهای صنعتی تابش سنکروترون^۹

اطلاعاتی که با چشمه‌ی نور حاصل می‌شود برای صنایع مختلف اهمیت زیاد دارد. نمونه‌های فراوان می‌توان از کاربرد این اطلاعات در صنعت آورد از جمله: به‌بارآوردن داروهای جدید؛ طراحی میکروتراشه‌های جدید برای کامپیوترهای پرقدرت‌تر؛ درون‌کاشته‌های کوچک زیست‌پزشکی؛ ساخت آلیاژهای فلزی محکم‌تر برای بال هواپیماها، به‌بارآوردن مواد جدید برای قالب‌گیری تزریقی کالاهائی مانند کفش مخصوص دویدن، بدنه‌ی خودرو، سپر خودرو، و فوم برای مبل؛ به‌بارآوردن رنگ‌های بدون حلال؛ تولید پلاستیک‌های تجزیه‌پذیر زیستی که حشرات می‌خورند؛ بررسی سطوح و مرز بین مواد برای مقابله با مشکلات خوردگی در خودروها، هواپیماها، و لوله‌ها؛ ساخت ماشین‌های میکروسکوپی مثلاً موتورهای که در سوراخ سوزن جای می‌گیرند؛ ارزیابی عمل‌کرد میکروتراشه‌ها؛ ردگیری غلظت آلاینده‌ها در سیستم‌های طبیعی؛ تعیین غلظت سرب در سفال؛ به‌بارآوردن مواد کاهنده‌ی سایش بسیار نازک؛ ارزیابی مکان‌های احتمالی برای معدن‌کاری بر اساس تحلیل فقط یک نمونه.

مهم‌ترین روش‌های صنعتی که در چشمه‌های نور به‌کار می‌روند عبارتند از بازتاب/پراش پرتوهای x در زاویه‌های خراشان^{۱۰} (برای کاویدن سطوح)، پراش پرتو x با تفرق انرژی^{۱۱} (شناسایی و طبقه‌بندی دینامیک گذارهای فاز)، پراش پودری با تفکیک‌دهی زیاد^{۱۲} (ساختار اتمی میکروبلورها)، طیف‌نمایی پرتو x (XAS)^{۱۳} (تشخیص ساختار اتمی مواد غیربلوری/بی‌شکل)، پراکندگی پرتو x در زوایای کوچک/بزرگ (دو روش که ترکیب‌شان اطلاعات ساختاری در باره‌ی سیستم‌های بانظم یک بعدی یا دوبعدی به‌دست می‌دهد)، بلورنگاری پروتئین‌ها (شناسایی کامل ساختار اتمی زیست‌مولکول‌های درشت که بتوان به‌صورت بلور با نظم کامل درآورد).

۱. داروسازی: داده‌گیری سریع با چشمه‌های نور به شرکت‌های داروسازی امکان می‌دهد فرآیند پرهزینه‌ی به‌بارآوردن داروهای جدید را که تا کنون با آزمون‌وخطا و آزمایش‌های طولانی همراه بوده است با طراحی داروها بر اساس نقش زیست‌شیمیایی پروتئین‌ها کوتاه‌تر کنند و داروهای مطمئن‌تر و ارزان‌تر بسازند.

۲. مواد بهداشتی: بررسی میکروساختار کرم‌ها، مواد تمیزکننده‌ی مو، لاک... و مشخصه‌یابی آنها با پرتوهای x به مهندس محصولات نظافتی و بهداشتی امکان می‌دهد کالاهائی با تأثیرات درازمدت

⁷ mantle

⁸ crust

^۹ مطالب این بخش از مرجع ۲ گرفته شده است.

¹⁰ glancing angle x-ray reflection/diffraction

¹¹ energy dispersive x-ray diffraction

¹² high resolution powder diffraction

¹³ x-ray absorption spectroscopy

طراحی کند؛ شرکت اورآل با تابش سنکروترون، ساختار مولکولی و ابرمولکولی کراتین در مو و همچنین تأثیر آب و فرّ دائم را بر مو بررسی کرده است، همچنین معلوم شده که موئی که در آزمایشگاه درکشت‌های سلولی تولید می‌شود ساختار مشابه با موی طبیعی دارد.

۳. **مواد غذایی:** صنعت مواد غذایی برای ارضای ذائقه‌ی مصرف‌کننده دائماً به دنبال تازگی غذاها، آسان بودن طبخ آنها و بالا بردن ارزش غذایی محصولاتش است. چندین شرکت غذایی اینک از ابزارهای تحلیلی که با تابش سنکروترون فراهم می‌شود بهره می‌برند تا با تحلیل مؤلفه‌های مختلف در مواد غذایی که خواص گرمایی، مکانیکی، شارشی و عمریابی بسیار متفاوتی دارند به سوی فرآوری سنجیده^{۱۴} گام بردارند.

۴. **صنعت پلاستیک:** در مقایسه با چوب، چرم، فلزات، شیشه، سرامیک، و تارهای طبیعی که استفاده از قابلیت‌های آنها به شکل نهایی و کامل خود رسیده است، پلاستیک هنوز امکانات فراوان برای بارآوری‌های تازه را نوید می‌دهد. تابش سنکروترون این امکان را فراهم می‌کند که با شناخت ساختار میکروسکوپی، بس‌پارها، رفتار آنها را پیش‌بینی و کنترل کرد و با خلق مواد مرکب یا مخلوط و بهتر کردن فرآیند ساخت، بس‌پارهایی با خواص مطلوب‌تر ساخت.

۵. **صنعت کاغذسازی:** روشی با آلاینده‌ی کمتر برای خیساندن چوب که در آن از هیدروژن پراکسید استفاده می‌شود به TCF^{۱۵} (کاملاً بدون کلر) معروف است. بازدهی این فرآیند از حضور یون‌های آهن، منگنز، مس، منیزیم، و مس در تارهای چوب تأثیر می‌پذیرد و با تابش سنکروترون می‌توان توزیع یون‌ها در نمونه‌ی چوب را با دقت میکرونی اندازه گرفت.

۶. **مهندسی شیمی:** سازوکارهای کاتالیز هنوز عموماً در مقیاس اتم‌ها تحلیل نشده‌اند. نیاز به کاتالیزگرهای پربازده‌تر، شناخت سازوکار واکنش‌ها را در مقیاس اتمی در اولویت قرار داده است و از راه طیف‌سنجی جذب پرتوهای x انجام می‌شود که با آن می‌توان محیط اطراف اتم‌های کاتالیزگر را طی واکنش تحت نظر داشت و به این ترتیب ترکیب‌های گذرا را شناسایی کرد.

۷. **صنعت ساختمان:** شناخت واکنش‌های شیمیایی و خواص شیمیایی موادی که در ساختمان به‌کار می‌روند، برای عمل‌کرد آنها و همچنین عمریابی آنها بسیار اهمیت دارد. مثلاً فرمول‌بندی سیمان کمی حالت تجربی دارد و امروزه تولیدکنندگان سیمان می‌خواهند با شناخت فرآیند سفت‌شدن سیمان و مشاهده‌ی فازهای پرشمار در این فرآیند، به فرمول‌بندی مناسبی برای سیمان دست یابند تا گزینه‌ی بهینه را بین شارش‌پذیری و زمان سفت‌شدگی پیدا کنند. انجام آزمایش‌های تفکیک‌پذیر در زمان اینک در سنکروترون میسر است. همچنین برای ساختن مدل برای فرآیند عمریابی مواد ساختمانی در اثر تماس با آب، نیاز به شناخت ساختار حفره‌بندی ماده نیاز است که به کمک روش‌های تصویرسازی با تابش سنکروترون اکنون امکان‌پذیر شده.

¹⁴ rationalized processing

¹⁵ Totally Chlorine Free

۸. **متالورژی:** دانستن رابطه‌ی بین تنش و کرنش برای صنایع هوافضا، خودرو، و ساختمان حیاتی‌ست و در تخمین عملکرد و عمر قطعات نقش اساسی دارد. اندازه‌گیری کرنش به‌صورت روبشی با پرتو x ابزار مناسبی برای تعیین رابطه‌ی بین تنش و کرنش است. با این روش تغییر شکل ساختار شبکه‌ی بلوری فلز را در مقیاس اتم می‌توان مشاهده کرد، و ناحیه‌های بحرانی را با محاسبه‌ی نیروهای تنش‌ی شناسایی کرد. با پرتوهای پرشدت x در سنکروترون می‌توان تا عمق چند میلی‌متر فولاد را با تفکیک‌دهی زیاد بررسی کرد.

۹. **معدن‌کاری:** تابش سنکروترون به شکلی روزافزون در شناسایی و تحلیل مواد معدنی، در شناخت ترکیب دقیق آنها و ساختار بلوری و الکترونی‌شان و در پاک‌کردن مناطق آلوده به کار برده می‌شود. شناسایی سریع مواد شاخص می‌تواند در کار کاوش برای معادن قابل استخراج بسیار مفید باشد. بررسی سطح مواد معدنی با تابش سنکروترون برای کاهش هزینه و افزایش بازدهی استخراج و جداکردن مواد معدنی حیاتی‌ست. روش‌های کار با تابع سنکروترون در پاک کردن خاک‌های آلوده به فلزهای سنگین با مواد پرتوزا به کار رفته است.

۱۰. **میکروماشین‌کاری** در بسیاری از صنایع امروز کاربرد دارد: در صنعت خودروسازی ابزار میکرونی متنوعی به‌صورت فعال‌گر و حس‌گر در قطعاتی مانند سیستم‌های ترمز قفل‌ناشونده، کیسه‌های هوا و سیستم احتراق کاربرد دارد؛ در ابزار پزشکی صحبت از آزمایشگاه روی تراشه است؛ در صنعت میکروالکترونیک نیز مدت‌هاست ساختارهای میکرونی اهمیت بسیار دارد و نیاز به مشخصه‌یابی نیم‌رساناها و کنترل خواص سیلیسیم را در دستور کار قرار داده است. روش‌های میکرولیتوگرافی که به این منظور به‌کار می‌روند در محدوده‌ی ۵۰۰ نانومتر متوقف شده‌اند در حالی‌که تابش سنکروترون تفکیک‌دهی‌ئی کمتر از ۱۰۰ نانومتر را در اختیار قرار می‌دهد که در این‌صورت می‌توان از نانولیتوگرافی صحبت کرد. بررسی لایه‌های نازک مغناطیسی که برای افزایش ظرفیت انبارش حافظه‌های مغناطیسی لازم است نیز با دقت بالا با تابش سنکروترون ممکن است. تابش سنکروترون همچنین پاسخ‌گوی نیاز به مشخصه‌یابی سیلیسیوم در مقیاس اتم‌هاست و می‌توان به حضور مقادیر بسیار کم آلودگی‌های فلزی پی برد و فرآیند ساخت تراشه‌های نسل جدید را بهتر کرد.

طرح چشمه‌ی نور ایران

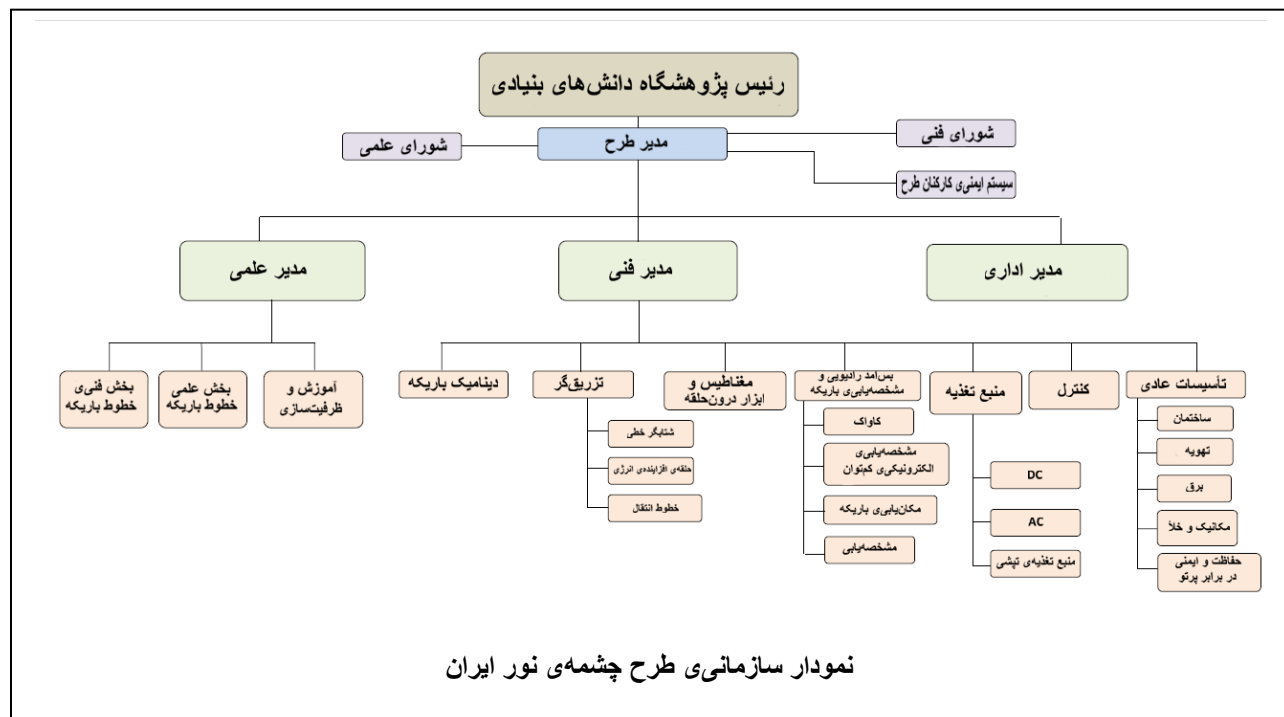
ایران فاقد تأسیسات بزرگ شتابگر برای استفاده‌ی کاربران ایرانی است. عضویت ایران در پروژه‌ی سزامی^{۱۶} پاسخ‌گوی نیاز شدید کاربران ایرانی خواهد بود اما طی ۱۰ سال آینده می‌تواند برای آموزش و ساخت ظرفیت کاربران ایرانی مفید باشد: در پروژه‌ی سزامی انتظار می‌رود سنکروترون قدیمی BESSY I که به خاورمیانه اهدا و به اردن منتقل شده است پس از بازسازی و به‌روزشدن در سال ۲۰۱۴ در اردن به بهره‌برداری برسد. طی چندین نشست رسمی و رای‌زنی‌های غیررسمی، اندیشگران و دانشگران ایرانی به این نتیجه رسیده‌اند که ساخت سنکروترون ملی برای کاربران ایرانی و پژوهشگران

¹⁶ SESAME (Synchrotron light for Experimental Science and Applications in the Middle East)

منطقه بسیار ضروری است زیرا در حالی که پژوهشگران زمینه‌ی فیزیک ذرات بنیادی و انرژی‌های زیاد امکان استفاده از تأسیسات بزرگ آزمایشگاه سرن در اروپا را دارند و شمار آنها در سال‌های آینده افزایش چشمگیر خواهد یافت، امکاناتی که تابش سنکروترون برای پژوهشگران و صنایع ایران فراهم خواهد کرد بیشترین منافع را برای آینده‌ی علمی ایران در بر خواهد داشت. چشمه‌ی نور ایران اولین تسهیلات آزمایشگاهی در مقیاس بزرگ برای پژوهش‌های بین‌رشته‌ای خواهد بود.

طرح ساخت سنکروترون به‌صورت طرح کلان ملی در معاونت علمی و فناوری ریاست‌جمهوری به تصویب رسید و در اسفندماه سال ۱۳۸۷ با امضای تفاهم‌نامه‌ی بین آقای دکتر سالارآملی، معاون وقت علمی و فناوری رئیس‌جمهور و آقای دکتر محمدجواد اردشیر لاریجانی، رئیس پژوهشگاه دانش‌های بنیادی مأموریت ساخت شتابگر سنکروترون و بهره‌برداری از آن در مدت ۱۰ سال به پژوهشگاه دانش‌های بنیادی سپرده شد.

در اوایل سال ۱۳۸۹ گروه‌های مختلف علمی و فنی طرح مطابق نمودار سازمانی شکل گرفتند و هم‌اکنون بیش از ۵۰ نفر مهندس و فیزیکدان و افرادی با تخصص‌های مختلف در این گروه‌ها مشغول به کار هستند. در این مدت گروه‌های فنی پس از آموزش‌های لازم به کار طراحی اولیه‌ی سنکروترون پرداختند و بخش‌های اصلی طراحی اولیه با نظارت مشاور فنی طرح، دیتر آینفلد از سنکروترون آلبا در اسپانیا، تکمیل شده است. انتظار می‌رود طراحی اولیه تا آخر اردیبهشت ۱۳۹۱ کامل شود و در اختیار شورای راهبردی طرح قرار گیرد. شورای علمی طرح با امکان عضویت افراد باتجربه و برجسته‌ی مانند هلموت ویدمن، استاد بازنشسته‌ی دانشگاه استنفورد، ارنست وایرتر از دانشگاه ووپرتال، آلبن ورولیش از چشمه‌ی نور سوییس در حال شکل‌گیری است.



انجام کار طراحی اولیه با طراحی و ساخت پیش‌نمونه‌های مختلف همراه بوده است از جمله تقویت‌کننده‌ی حالت‌جامد برای کاواک بس‌آمد رادیویی، کاواک آلومینیومی، سیستم کنترل الکترونیکی بس‌آمد رادیویی. کم‌توان (LLRF)، جفت‌کننده‌ی یک کیلوواتی برای آزمودن تقویت‌کننده‌ی حالت‌جامد، چند نمونه‌ی منبع‌تغذیه‌ی بسیار پایدار برای مغناطیس‌های چهارقطبی، دوقطبی‌ی نوع H برای حلقه‌ی انبارش، مغناطیس چهارقطبی برای شتابگر خطی، پایه‌ی نگهدارنده‌ی مغناطیس‌های دوقطبی و چهارقطبی و شش‌قطبی، اتاقک‌های خلأ، سیستم اندازه‌گیری‌ی میدان مغناطیسی دوقطبی‌ها و چهارقطبی‌ها با پیچ‌های دوار. برای تعیین محل احداث سنکروترون با چندین دانشگاه مذاکره شد. پس از انجام بررسی‌های لازم از سوی گروه عمران، اراضی‌ی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی در حومه‌ی شمالی‌ی قزوین برای احداث سنکروترون انتخاب شده است. گروه عمران اینک مشغول به انجام بررسی‌های لرزه‌نگاشتی و خاک‌شناختی‌ست. علاوه بر این گروه ساختمان تا کنون چندین طراحی‌ی مختلف برای معماری و آرایش ساختمان‌های گوناگون و پردیس تأسیسات چشمه‌ی نور ایران آماده کرده است که پس از نهایی‌شدن شبکه‌ی مغناطیس‌های حلقه‌ی انبارش و حلقه‌ی افزاینده‌ی انرژی‌ی شکل نهایی‌ی این طراحی‌ها نیز معلوم خواهد شد. گروه دینامیک باریکه تاکنون چندین طراحی شبکه‌ی مغناطیس‌های حلقه‌ی انبارش و حلقه‌ی افزاینده‌ی انرژی‌ی ارائه کرده است: هم‌اکنون ۶ گزینه‌ی شبکه با میدان قوی و ۳ گزینه با میدان ضعیف در اختیار مدیریت طرح قرار دارد که با توجه به نیاز کاربران و برآورد هزینه، انتخاب نهایی از بین آنها انجام خواهد شد.



جدول ۱: مشخصات خطوط باریکه‌ی مورد نیاز کاربران در آغاز کار

خط باریکه	چشمه‌ی تابش	گستره‌ی انرژی (eV)	شار فوتون (p/s)	تفکیکده‌ی (توان تفکیک)	اندازه‌ی باریکه (μm)
۱ پراش پودری	مغناطیس خم‌کننده	۶-۳۰ k	10^{12}	10^{-4}	100×100
۲ پراش پرتو x از تک‌بلور	نوسان ساز در خلا	۷-۲۵ k	10^{12}	10^{-4}	
۳ EXAFS	مغناطیس لرزاننده	۳-۴۰ k	10^{12}	10^{-4}	چند میکرون
۴ نورگسیل در فاز گازی (XPS, AES, ARPES)	نوسان ساز الکترومغناطیسی	۱۵-۱۰۰۰	10^{11}	۱۰۰۰۰	
۵ طیف‌سنجی الکترون‌ها در حالت جامد	نوسان ساز الکترومغناطیسی	۱۰-۱۵۰۰	10^{12}	۱۰۰۰۰	
۶ ریزنمایی و طیف‌سنجی توأم	SPEM (+ARPES)	۱۰-۲۰۰۰	10^{12}	بیش از ۸۰۰۰	چند میکرون
	PEEM (+ XMCD)				
۷ بلورنگاری. مولکول‌های درشت	مغناطیس لرزاننده	۳-۲۵ k	10^{12}		

گروه علمی طرح در حال حاضر حدود ۵۰ کاربر باتجربه‌ی ایرانی و حدود ۲۰۰ کاربر بالقوه در داخل و خارج از ایران شناسایی کرده است. برای تعیین و بهینه‌کردن پارامترهای خطی و غیرخطی سنکروترون مانند نقطه‌ی کار^{۱۷}، کوک^{۱۸} سنکروترون، گسیلندگی^{۱۹}، روزنه‌ی دینامیک^{۲۰}، ... علاوه بر مطالعه‌ی طراحی‌های سنکروترون‌های مشغول به کار نیازهای کاربران سنکروترون نیز باید در نظر گرفته شود. گروه علمی با برگزاری چند هم‌ایش به گروه‌های مختلف کاربران شکل داده است و تصویری کلی از نیازهای آنان به دست آورده است. مشخصات باریکه‌ی مورد نیاز کاربران که در آغاز طرح باید برای بهره‌برداری آماده باشد در جدول ۱ آمده است [برگرفته از مرجع ۳].

جدول ۲ مشخصات یکی از گزینه‌ها برای حلقه‌ی انبارشی را نشان می‌دهد که برای آن می‌توان خطوط باریکه‌ی فوق را ساخت. علاوه بر این گروه علمی طرح با برگزاری کارگاه در دانشگاه‌های مختلف ایران و در پژوهشگاه کار ترویج دانش سنکروترون و کار ساخت ظرفیت استفاده از سنکروترون را دنبال می‌کند. این گروه همچنین کار شناخت فناوری‌هایی را که در ساخت خطوط باریکه‌ی مختلف در جدول ۱ نیاز است آغاز کرده.

¹⁷ work point

¹⁸ tune

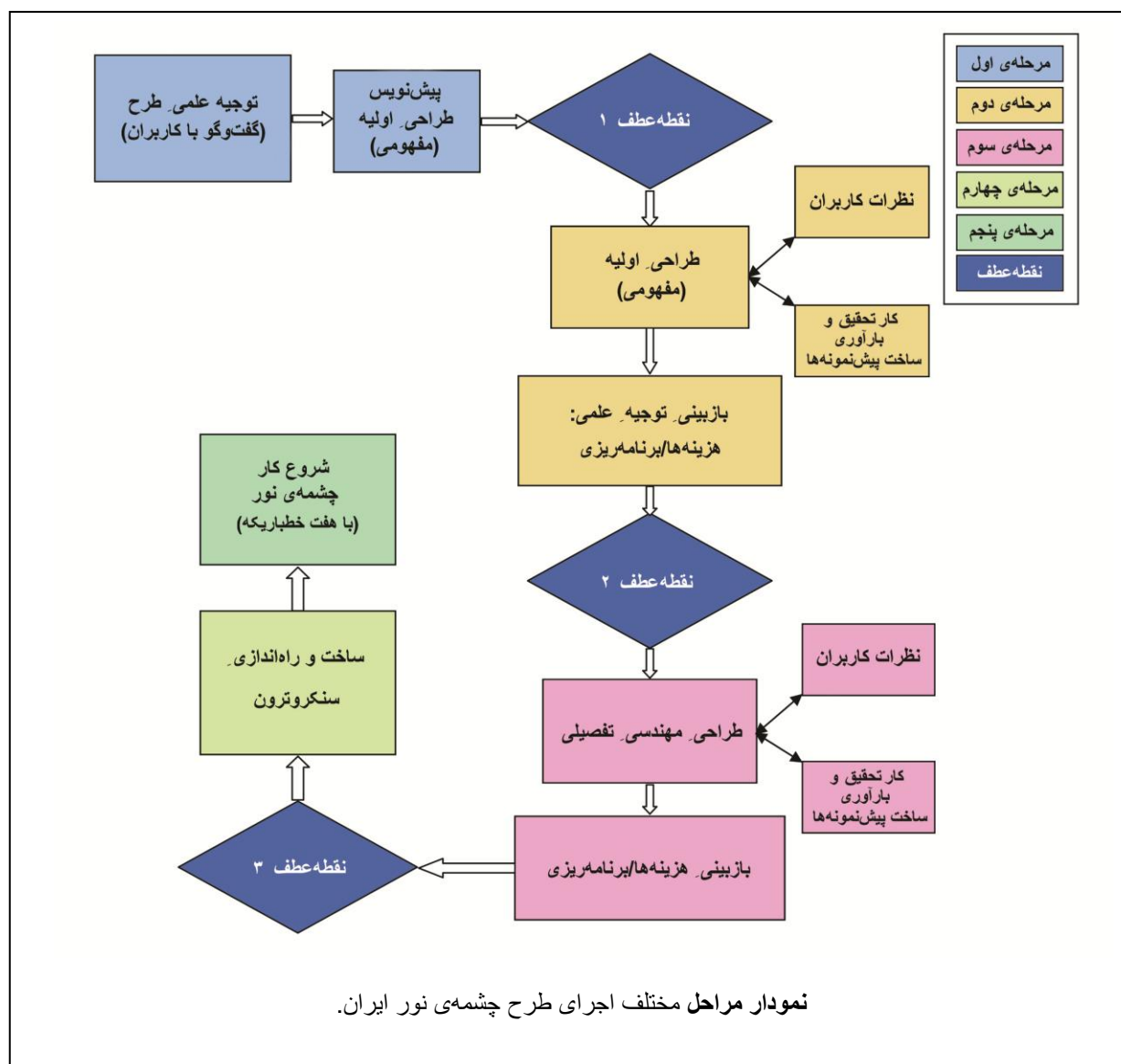
¹⁹ emittance

²⁰ dynamic aperture

جدول ۲: مشخصات حلقه‌ی انبارش با توجه به نیاز کاربران (جدول ۱)

انرژی الکترون ها در حلقه‌ی انبارش	۳ GeV
محیط حلقه‌ی انبارش	~ ۳۰۰ m
تعداد فضاهای خالی مورد نیاز	~ ۳۰
تعداد خطوط انتقالی فوتون‌ها	~ ۲۲
گسیلندگی باریکه‌ی الکترونی در حلقه‌ی انبارش	کمتر از ۵ نانومتر x میلی رادیان
جریان	۴۰۰ میلی‌آمپر
طول عمر	بیش از ۱۵ ساعت

چشمه‌ی نور ایران اکنون در مرحله‌ی طراحی اولیه است (نمودار مراحل اجرای طرح را ببینید). فرآیند ساخت و بهره‌برداری از این طرح منجر به پیشرفت‌های چشمگیر در زمینه‌های علمی و فنی در ایران خواهد شد. تا کنون از همه مؤسسات پژوهشی و دانشگاه‌ها نیز دعوت شده است تا در بخش‌های مختلف طرح از جمله طراحی خطوط باریکه و ساخت چشمه‌های تابش درون‌حلقه با طرح چشمه‌ی نور ایران همکاری کنند. در آخرین بازبینی پیشرفت طرح در دسامبر سال گذشته، مشاوران بین‌المللی طرح پیشرفت آن را درخشان ارزیابی کرده‌اند و تداوم و به‌بار نشستن این فعالیت‌ها گام مهمی در راه پیشرفت علم تجربی و واردشدن ایران به عرصه‌ی علم جهانی خواهد بود.



مراجع:

1. http://en.wikipedia.org/wiki/Synchrotron_radiation
2. Synchrotron radiation and applications, www.candle.am/about_sr/part.pdf
3. ILSF CDR, available upon request.
4. NSRRC, Synchrotron Light Source, <http://www.ssrc.gov.tw/english/img/pdf/info.pdf>