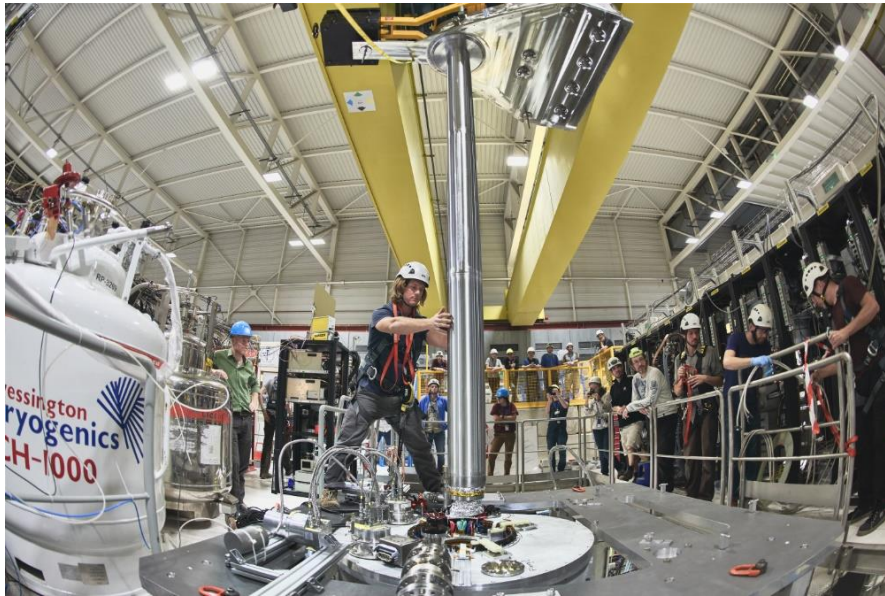


گرانش ماده و پادماده



Gravity of matter and antimatter¹

“ALPHA experiment at CERN observes the influence of gravity on antimatter. The result is a milestone in the study of the properties and behaviour of antimatter.

27 SEPTEMBER 2023¹”

ماده و پادماده به ذراتی با جرم مساوی اما متضاد در بار الکتریکی گفته می‌شود. پرسشی که از همان ابتدای کشف پادماده نزدیک به یک قرن پیش مطرح شد این بود که آیا گرانش ماده و پادماده در دو جهت مخالف هم عمل می‌کنند؟

فشرده

انسان از زمان‌های بسیار دور دریافته بود که جهت حرکت اجسام رها شده از یک ارتفاع همواره به طرف پایین است. اما او تا قرن هفدهم قادر به توضیح این پدیده نبود. در این قرن نیوتن توانست با بهره‌گیری از دستاوردهای گالیله و کیپلر^۲ نشان دهد که علت آن یک قانون طبیعی جهانشمول معروف به قانون گرانش است. نیوتن این قانون را در چهارچوب فیزیک کلاسیک خود فرمولبندی و در سال ۱۶۸۷ در کتابی تحت عنوان “اصول ریاضی فلسفه طبیعی” منتشر نمود.

بیش از دو قرن بعد از نیوتن، یعنی در نیمه اول قرن بیستم فیزیکدان‌ها موفق به کشف پادماده شدند. از آن زمان به این سو همواره این پرسش مطرح بود که آیا اندازه و جهت گرانش پادماده با ماده یکی است؟ یعنی، آیا هر دو با شتابی یکسان برای مثال بطرف زمین حرکت می‌کنند؟

از نظر تئوری همجهتی گرانش پادماده و ماده از زمان کشف پادماده پذیرفته شده بود. اما از آنجا که در علم فیزیک هیچ دید نظری به تنهایی برای پذیرفتن مطلبی کافی نیست، لازم بود اندازه و همجهت بودن گرانش پادماده با ماده بطور تجربی نشان داده شود، به اثبات برسد.

نتیجه آزمایش در اینبار در آزمایشگاه سرن با یاری ۷۲ دانشمند از کشورهای مختلف جهان در ۲۷ سپتامبر سال ۲۰۲۳ در نشریه معتبر نیچر منتشر و معلوم شد که گرانش پادماده و گرانش ماده هر دو در یک سو عمل می‌کنند و دارای اندازه یکسان هستند. این یک دستاورد بزرگ تاریخی در شناخت انسان از کیهان از جمله برای فهم بهتر مراحل آغازین آن است.

در این مقاله می‌خواهیم پس از توضیح کوتاهی در باره‌ی دو مفهوم ماده و پادماده به‌عنوان پیشگفتار به گرانش ماده و گرانش پادماده بپردازیم و در ادامه چگونگی تعیین جهت و اندازه پادماده در آزمایشگاه سرن را شرح دهیم.

پیشگفتار

در باره‌ی مقوله پادماده در مقاله^۳ تحت عنوان 'چرا بجای هیچ، چیزی وجود دارد؟ - ماده و پادماده' از جمله چنین می‌خوانیم:

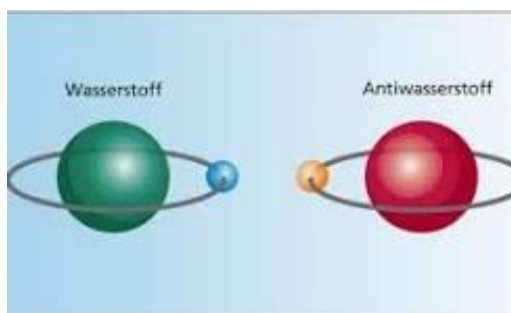
"مقوله پادماده (antimatter) اولین بار در سال ۱۸۹۸ در نوشته‌های آرتور شوستر، فیزیکدان انگلیسی (۱۸۵۱-۱۹۳۴) ذکر شده است. شوستر حدس می‌زد که منظومه‌هایی متشکل از پادماده وجود داشته باشند اما نمی‌توان آن‌ها را از راه مشاهده از منظومه‌های متشکل از ماده تفکیک نمود.

در سال ۱۹۲۸ پاول دیراک، فیزیکدان انگلیسی (۱۹۰۲-۱۹۸۴) وجود پادماده (پادالکترون یا پوزیترون) را بطور نظری با استفاده از نظریه نسبیت خاص اینشتین پیش‌بینی کرد.

در سال ۱۹۳۲ کارل آندرسون، فیزیکدان آمریکایی (۱۹۰۵-۱۹۹۱) پوزیترون (پادذره الکترون) را در پرتو کیهانی کشف کرد.

در نیمه دوم قرن بیستم فیزیکدان‌ها موفق به کشف پادپروتون (۱۹۵۵) و پادنوترون (۱۹۵۶) شدند. ذره پادنوترون عاری از بار الکتریکی، یعنی خنثی و همان ذره نوترون است.

در سال ۱۹۹۵ فیزیکدان‌ها توانستند شکل‌گیری اتم پادهیدروژن را که از نظر بار الکتریکی مانند اتم هیدروژن خنثا می‌باشد در آزمایشگاه نشان دهند. اتم هیدروژن به‌عنوان سبک‌ترین عنصر از عناصر جدول شیمیایی از یک الکترون در مدار اتم و یک پروتون در هسته اتم و بعضاً با یک یا دو نوترون تشکیل شده است. اما پادهیدروژن آزمایشگاهی^۴ از یک پوزیترون در مدار پاداتم و یک پادپروتون در هسته پاداتم هیدروژن تشکیل شده است (تصویر ۲).



تصویر ۲: پادهیدروژن و هیدروژن^۴

در سال ۲۰۱۱ فیزیکدان‌ها موفق به تولید هسته اتم پادهلیوم و همچنین ۳۰۹ پاداتم هیدروژن در دمایی نزدیک به یک کلوین و حفظ آن‌ها به مدت نزدیک به ۱۷ دقیقه جهت مطالعه مشخصات‌شان شدند. این موضوع از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. به این خاطر که کسب اطلاع از ویژگی‌های پادماده می‌تواند از جمله به درک ما از مسئله شکست تقارن‌های اولیه کیهان و چرایی غلبه ماده بر پادماده یاری رساند. هرچه زمان نگهداری پادذرات و پاداتم‌ها را طولانی‌تر کنیم به‌همان نسبت نیز فرصت بیشتری برای مطالعه و بررسی خواص آن‌ها داریم.

در سال ۲۰۱۷ فیزیکدان‌ها در سرن موفق شدند صدها ذرات پادپروتون را برای مدت یکسال حفظ و روی آن‌ها مطالعه کنند.^۳

ناهمتایی مهم ذرات با پادذرات (ماده با پادماده) در بار الکتریکی مثبت یا منفی آن‌ها می‌باشد. تجربه نشان می‌دهد که هر ذره پادذره خود را دارد (سواى ذرات خنثا) و در صورت برخورد با یکدیگر هر دوی آنها نابود (محو) شده و به انرژی (پرتو، تابش) تبدیل می‌شوند. این گفته بدان معنا نیز هست که ذرات و پادذرات می‌توانند از انرژی که از نظر بار الکتریکی خنثاست بوجود آیند. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند که از هر یک میلیارد 'جفت ذره - پادذره' در آغاز کیهان تنها یک ذره (ماده) به انرژی تبدیل نشده است. چرایی این مطلب معمایی است که تاکنون حل نشده و ما هیچ پاسخی برای آن نداریم.

تذکر: اندازه‌گیری‌ها روی ذرات دارای بار الکتریکی با بهر جویی از اتاقک حباب (bubble chamber, Blasen-kammer)، وسیله‌ای برای آشکارسازی حرکت این ذرات، نشان می‌دهد که جرم اینرسی (جرم لختی) پادماده و ماده باهم برابر هستند.

گرائش ماده

در مقاله^۲ تحت عنوان 'فله اندیشیدن علمی' می‌خوانیم: "... افلاطون (۳۴۷-۴۲۷ ق. م.) همچنین این پرسش مهم را مطرح می‌کند که اجسام آسمانی طبق کدام قوانین ریاضی مسیر خود را طی می‌کنند؟ پرسشی که در نهایت پاسخ خود را در سه قانون معروف یوهانس کپلر (۱۶۳۰-۱۵۷۱) پیدا می‌کند. ... ارسطو (۳۸۴-۳۲۲ ق. م.) معتقد بود اجسام در حالت طبیعی هر یک جای خود را دارند و حرکت آنها یا بطرف بالا و یا بطرف پائین است. به‌نظر او جای طبیعی اجسام از پائین به بالا عبارتند: زمین (خاک)، آب، هوا و آتش. ... ارسطو می‌گفت اجسام با سرعت ثابت سقوط می‌کنند و این نظر او تا قرن هفدهم، یعنی نزدیک به ۲۰ قرن، معتبر شناخته می‌شد. اما گالیله (۱۶۴۲-۱۵۶۴) بطور تجربی (آزمایشی) نشان داد که چنین چیزی صحت ندارد و اجسام نه با سرعت ثابت بلکه با شتاب ثابت سقوط می‌کنند. او اندازه‌ی این شتاب را برای زمین ۹٫۸ متر در مربع ثانیه می‌سنجد. این اندازه شتاب به‌معنای آن است که در هر ثانیه ۹٫۸ متر به سرعت سقوط اجسام افزوده می‌شود. این بیان را می‌توان این‌گونه فرمولبندی ریاضی نمود: $h = \frac{1}{2} g \cdot t^2$ (h ارتفاع، g شتاب و t زمان).

بسیار قابل توجه است که ایزاک نیوتن (۱۷۲۶-۱۶۴۲) با ترکیب قوانین گالیله و کپلر به قانون جاذبه میان دو جرم m_1 و m_2 دست می‌یابد: $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ (r فاصله دو جرم از یکدیگر و G ضریب نیروی جاذبه). نیوتن شتاب نیروی جاذبه را برابر با ۹٫۸ متر در مربع ثانیه که برابر با شتاب گالیله است محاسبه می‌کند. او از این محاسبه نتیجه می‌گیرد: نیرویی که سبب سقوط اجسام می‌شود می‌باید همان نیرویی باشد که به‌عنوان نیروی جاذبه میان زمین و کره ماه، یعنی نیروی گرائش، عمل می‌کند. اما در اینجا چیزی برای نیوتن قابل فهم نبود. او در باره‌ی آن در نامه‌ای چنین می‌نویسد:

"قابل تصور نیست که ماده بیجان می‌تواند بدون واسطه چیز مادی بر ماده دیگری اثر بگذارد و آن را تحت تاثیر قرار دهد بدون آن‌که لمس کردنی میان آنها مطرح باشد."^۵

نیوتن گرچه پاسخ به این مسئله را نداشت اما کاملاً به آن آگاه بود. به‌همین خاطر او حل این مسئله را به آیندگان می‌سپارد. و آیندگان، یعنی مایکل فارادی (۱۸۶۷-۱۷۹۱) و جیمز کلرک ماکسول (۱۸۷۹-۱۸۳۱)، توانستند پاسخ مناسب به مشکل نیوتن را با ارائه نظریه میدان‌ها (و معادلات ماکسول) حل کنند و در ادامه آلبرت اینشتین (۱۹۵۵-۱۸۷۹) توانست (۱۹۱۵) نیروی گرائش را با پیوند دادن آن به مفهوم فضا-زمان چهاربعدی توضیح دهد.^۶

گفتیم که در سال ۱۹۲۸ پاول دیراک وجود پادالکترون یا پوزیترون را بطور نظری پیش‌بینی نمود و در سال ۱۹۳۲ کارل آندرسون ذره پوزیترون را در پرتو کیهانی کشف کرد. از آن زمان به این سو فیزیکدان‌ها توانستند نه تنها پادذرات دیگر را کشف کنند بلکه موفق به ساخت پاداتم هیدروژن به نام پادهیدروژن در سال ۱۹۹۵ شدند. اتم‌های پادهیدروژن مانند اتم‌های هیدروژن 'پایدار' و از نظر بارالکتریکی خنثا هستند. اما آنچه در این میان به‌ویژه در عرصه‌ی تجربی برای نزدیک به یک قرن بی‌پاسخ مانده بود اندازه و جهت عملکرد نیروی گرائش این نوع ایزوتوپها بود. به این معنا که روشن نبود که آیا اندازه شتاب و جهت سقوط پادماده و ماده برای مثال از یک ارتفاع از سطح زمین یکی هستند. یعنی، آیا هر دوی آنها با شتاب برابر به‌طرف مرکز زمین حرکت می‌کنند و یا خیر؟ در زیر به این مطلب مهم می‌پردازیم.

گرائش پادماده

بنابر نظریه نسبیت عام اینشتین می‌باید ماده و پادماده هر دو در یک جهت عمل کنند. برای کسب اطلاع از درستی یا نادرستی این پیش‌بینی (در زمان ارائه نظریه نسبیت عام در سال ۱۹۱۵ پادماده هنوز کشف نشده بود) راهی جز اثبات عملی (تجربی) آن، یعنی آزمایش، وجود ندارد. در تاریخ ۲۷ ماه سپتامبر سال ۲۰۲۳ نتیجه یک چنین آزمایشی با همکاری گروه بزرگی از دانشمندان جهان در آزمایشگاه سرن در مقاله‌ای به قلم ۷۲ دانشمند در نشریه معتبر نیچر (Nature) منتشر شد.^۶ این مقاله نشان می‌دهد که اتم‌های پادهیدروژن متشکل از یک پوزیترون در مدار و یک پادپروتون به‌عنوان هسته، مانند اتم‌های ماده معمولی بطرف پائین، زمین، حرکت می‌کنند. به عبارت دیگر، پادماده در همان جهتی حرکت می‌کند که ماده حرکت می‌کند، یعنی به‌طرف مرکز زمین.

سخنگوی این پروژه تحت عنوان ALPHA-g به نام Jeffrey Scott Hangst فیزیکدان تجربی ذرات از دانشگاه آرهوس در دانمارک در باره نتیجه آزمایش انجام گرفته می‌گوید:

"در واقع این اولین آزمایش مستقیم برای مشاهده‌ی اثر گرائشی روی حرکت پادماده است. این یک نقطه عطف در مطالعه پادماده است که هنوز ما را به دلیل فقدان آشکار آن در کیهان شگفت زده می‌کند."^۱

آزمایش پادماده و نتایج کسب شده

نتایج آزمایش گرانث پادماده در آزمایشگاه سرن درستی پیش‌بینی نظریه نسبیت عام اینشتین را نشان داد. شیوه دستیابی به این نتایج مهم بطور خلاصه و ساده چنین است:

اتم‌های پادهیدروژن در یک محفظه خلاء استوانه‌ای بلند (تصویر ۱) توسط تله مغناطیسی متغیر نگهداری می‌شود. برای رهایی اتم‌های پادهیدروژن از قید تله مغناطیسی می‌باید میدان مغناطیسی بالا و پائین تله را تا اندازه‌ای که لازم است تغییر داد. با آزاد شدن اتم‌های پادهیدروژن از تله امکان مشاهده تأثیر نیروی گرانث زمین بر آنها وجود دارد. در این حالت دیده می‌شود که حدود ۸۵ درصد اتم‌های پادهیدروژن از زیر تله، یعنی در جهت مرکز زمین، خارج می‌شوند و مابقی با برخورد با جداره‌های استوانه، یعنی با ماده معمولی، نابود (محو) می‌شوند.

به‌خاطر کسب اطمینان بیشتر، آزمایش مزبور چندین بار تکرار می‌شود. در نهایت روشن شد که اتم‌های پادهیدروژن (پادماده) در میدان گرانشی زمین همان عکس‌العملی را از خود نشان می‌دهند که هیدروژن معمولی (ماده) نشان می‌دهد. به بیان دیگر، پادهیدروژن و هیدروژن هر دو در یک جهت حرکت می‌کنند، یعنی دارای جهت گرانشی یکسانی هستند.

نتیجه مهم دیگر حاصل از این آزمایش آن بود که نشان داده شد اندازه شتاب گرانث پادماده روی زمین بسیار شبیه اندازه شتاب گرانث ماده، یعنی حدود ۹/۸ متر در مربع ثانیه، کمیتی که از زمان گالیله شناخته شده است، می‌باشد. این به معنای آن نیز می‌باشد که اندازه و جهت نیروی گرانث ماده و پادماده در کل کیهان مشابه هم هستند.

بی‌شک نتایج بدست آمده بسیار با اهمیت هستند و روشن می‌کنند که ماده و پادماده از لحاظ نیروی گرانث و عملکرد تفاوتی باهم ندارند. با این همه باید اذعان نمود که این نتایج ما را قدمی به پاسخ این پرسش که چرا کیهان از ماده تشکیل شده و پادماده در آن کمیاب است یاری نمی‌رسانند. این یکی از کلیدی‌ترین پرسش‌های بی‌پاسخ مانده در شناخت ما از کیهان است.

نکاتی از مقاله نشریه نیچر

در زیر نکات چندی از مقاله^۶ منتشر شده در نشریه نیچر را بازگو می‌کنیم:

"... مفهوم‌های در حال توسعه ماده تاریک و انرژی تاریک نشان می‌دهند که مسائل زیادی در رابطه با گرانث در کیهان وجود دارند. تکنیکی در نظریه نسبیت عام و نبود یک نظریه گرانث کوانتومی گویای آنند که شناخت ما نمی‌تواند کامل باشد. به‌همین خاطر کاوش گرانث در سیستم‌های فیزیکی غیرمعمول ضروری است. ... ما در اینجا نتایج اولیه یک آزمایش هدفمند و طراحی شده برای بررسی جهت و اندازه نیروی گرانث پادماده (اتم پادهیدروژن) را شرح می‌دهیم. ... در حال حاضر به تله انداختن و انباشتن پادهیدروژن امری عادی است و تا چندین هزار اتم به‌طور همزمان در دستگاه ALPHA-2 ذخیره شده است. تا به امروز، تمامی اندازه‌گیری‌ها روی مشخصات پادهیدروژن در تله‌های مغناطیسی ALPHA-g انجام گرفته است. در سال ۲۰۱۸، دستگاه ALPHA-g برای مطالعه گرانث پادهیدروژن که یک تله پادهیدروژن به شکل عمودی است طراحی شد. استراتژی آزمایش طراحی ساده دارد: اتم‌های پادهیدروژن را به دام انداختن، انباشتن و رها کردن آرام آنها از طریق باز کردن موانع بالای و پائینی تله و سعی در تشخیص هرگونه تأثیر گرانث بر حرکت آنها ... تصویر زیر دستگاه ALPHA-g را نشان می‌دهد:

a. سمت چپ تصویر: سطح برش دستگاه ALPHA-g

دستگاه کامل شامل سه بخش برای به دام انداختن اتم‌های پادهیدروژن است که در اینجا فقط از پائین‌ترین آنها استفاده می‌شود. از آشکارسازهای MCP (Microchannel plate) برای نمایش ذرات با بار الکتریکی مثبت یا منفی (e^- , e^+) بیرون آورده شده از تله‌های پنینگ (Penning) به منظور تشخیص آنها استفاده شده است.

b. سمت راست تصویر: نمای گسترده‌ی تله‌ی پائین پادهیدروژن (مستطیل نقطه‌چین در a) تله پنینگ برای تولید پادهیدروژن و سیم‌پیچ‌های ابررسانا برای ایجاد تله اتم خنثا را نشان می‌دهد. سمت راست روی محور، مشخصات میدان محوری در جریان کامل نشان داده شده است.

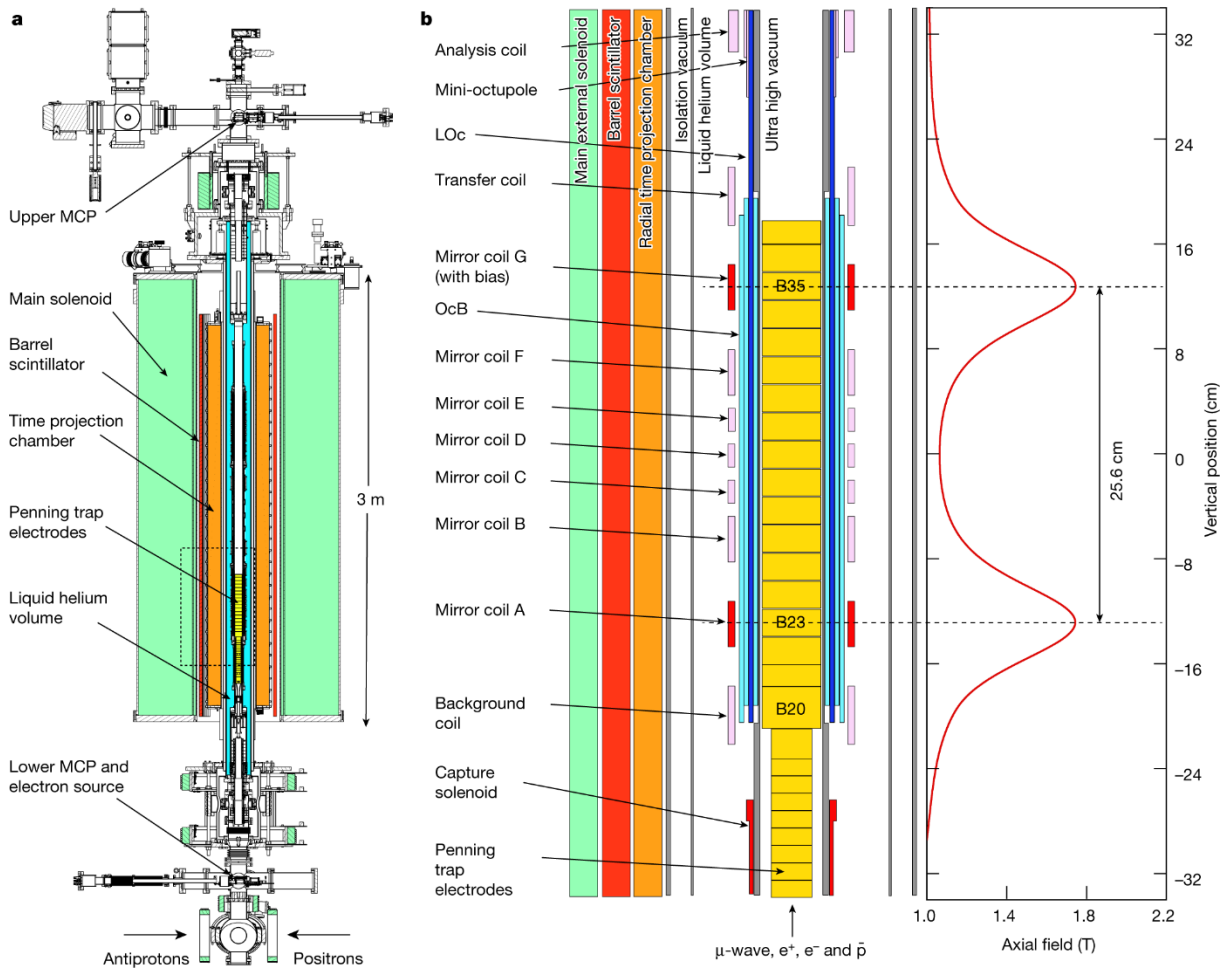
برای آشنایی بیشتر با آزمایش و دستگاه ALPHA-g در زیر لینک دو ویدیوی کوتاه دیدنی سرن ارائه می‌شود:

<https://videos.cern.ch/record/2298635>

https://www.youtube.com/watch?v=0bgyi4skk9s&list=PLAk-9e5KQYEpdLDiy12UJeIpdKjO_GZV&index=5

Fig. 1: ALPHA-g apparatus

From: Observation of the effect of gravity on the motion of antimatter



مراجع

1. <https://home.cern/news/press-release/physics/alpha-experiment-cern-observes-influence-gravity-antimatter>
2. Hassan Bolouri, Peak of Scientific thinking
۲. حسن بلوری، 'قله اندیشیدن علمی'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه سپتامبر سال ۲۰۲۱
3. Hassan Bolouri, why is there something rather than nothing?
۳. حسن بلوری، 'چرا بجای هیچ، چیزی وجود دارد؟ ماده و پادماده'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه آوریل سال ۲۰۲۰
4. https://www.weltderphysik.de/fileadmin/_processed_/b/8/csm_2006_Anti-Wasserstoff_FZJuelich_d91e543b70
5. Carlo Rovelli, Die Wirklichkeit, die nicht so ist, wie sie scheint, Rowohlt Verlag, Reinbeck bei Hamburg, 3. Auflage, 2017, S.14, S. 52, S. 67
6. <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06527-1#Fig1>
7. <https://www.mdr.de/wissen/beweis-cern-antimaterie-unterliegt-wirkung-der-schwerkraft-100.html>