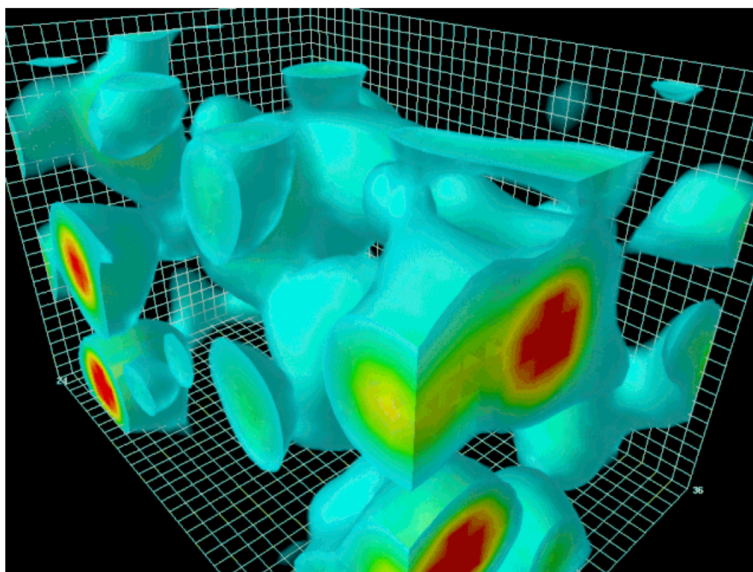


هیچ مطلق به چه شکل است؟



بررسی اثر کازیمیر و تبیین آنچه در هیچ مطلق به وقوع میپیوندد...

چکیده

برای پاسخ به سوال سرتیتر نیاز به تبیین‌هایی داریم؛ برای مثل اصلاً تعریف هیچ مطلق چیست؟ آیا جایی وجود دارد که اساساً هیچ چیزی مطلقاً در آن وجود نداشته باشد؟ و یا اگر جعبه‌ای فرضی را در نظر بگیریم و سعی کنیم آن را از همه چیز خالی کنیم؛ دقیقاً چه چیزهایی را باید از این جعبه برداریم؟ به راستی اجزا تشکیل دهنده‌ی این جهان چه چیزهایی هستند که نبود آنها برای ما هیچ مطلق را ایجاد کند؟

بباید برای شروع مروری بر تاریخ علم داشته باشیم. میدانیم جستجو برای بنیادی‌ترین ذرات سازنده جهان با چیزی به اسم عنصر شروع شد. در زیر این حوادث را به صورت خلاصه وار می‌بینیم:

● کشف عناصر و جدول تناوبی:

- دوره‌ای که ایده‌ی ساخته شدن تمام مواد جهان از عناصر پذیرفته شده بود.

● معرفی اتم:

- دهه ۱۸۰۰ میلادی: جان دالتون مفهوم اتم را بر اساس آزمایشات علمی معرفی کرد.
- ۱۸۹۷: جی.جی. تامسون الکترون‌ها را کشف کرد، ذراتی هزاران برابر سبکتر از هیدروژن.

● پیشرفت‌هایی در درک اتم:

- دهه ۱۹۱۰: آزمایشات ارنست رادرفورد نشان داد که اتم‌ها هسته‌هایی با بار مثبت دارند.

- نیلز بور مدلی پیشنهاد کرد که در آن الکترون‌ها در مدارهای دایروی به دور هسته حرکت می‌کنند.
- تشکیل هسته از پروتون‌ها و نوترون‌ها پذیرفته شد.

● کشف‌های بیشتر در زمینه ذرات زیراتمی:

- دهه ۱۹۷۰: پروتون‌ها و نوترون‌ها تنها ذرات بنیادی نبودند بلکه بنظر می‌رسید از اجزا کوچک‌تری ساخته شده‌اند - کشف کوارک‌ها.
- دو نوع کوارک درون پروتون و نوترون وجود دارد؛ کوارک بالا و کوارک پایین.

● ذرات بنیادی:

- سه ذره بنیادی: کوارک بالا، کوارک پایین و الکترون.
- این ذرات به این معنا که نمی‌توانند به واحدهای کوچک‌تری تقسیم شوند، به‌عنوان ذرات بنیادی شناخته شدند.

● تحقیقات بیشتر:

- مشخص شد آنچه به‌عنوان بنیادی‌ترین ذرات یاد کردیم آنقدرها هم بنیادین نبوده‌اند...

همانطور که در این سیر تاریخی هم دیدید به نظر می‌رسد تلاش ما برای خالی کردن آن جعبه‌ی فرضی از اجزا تشکیل دهنده‌ی جهان کمی به بن‌بست خورده باشد. کمی صبر کنید! بیاید به سال 1948 برگردیم. یعنی سالی که در آن کازیمیر پدیده‌ی عجیبی را پیشبینی کرد. پدیده‌ای که درستی آن بعدها با آزمایش‌های دقیق اثبات شد و داستان را هیجان انگیزتر کرد!

برای درک این پدیده دوباره به سراغ جعبه‌ی فرضی می‌رویم. این بار دو ورقه‌ی رسانای خنثی را در فاصله‌ی بسیار کم از هم - برای اتم‌ها زیاد و چیزی در حدود 1000 اتم - قرار می‌دهیم و در جعبه را می‌بندیم و در آن خلاء ایجاد می‌کنیم. به نظر شما چه اتفاقی می‌افتد؟

جناب کازیمیر پیشبینی می‌کند که این دو ورقه با نیرویی به سمت هم جذب می‌شوند. اما این نیرو دقیقاً از کجا آمده است؟ دیگر حتی نمی‌توان از نیروهای الکتریکی یا مغناطیسی برای تبیین این موضوع استفاده کرد چرا که در محیط نه باری وجود دارد و نه میدانی!

اما آیا به واقع میدانی وجود ندارد؟ به بیان دیگر دوباره جعبه‌ی فرضی خالی از همه چیز را تصور کنید؛ فرض کنید که توانستید آن را از هر ذره‌ای خالی کنید. تکلیف میدان‌ها چه می‌شود؟ آیا در این جعبه میدان وجود دارد؟ به راستی میدان یعنی چه؟

به بیان یکی از بزرگان فیزیک:

میدان چیزی است که در همه جای کیهان گسترده شده و در هر نقطه از فضا مقدار خاصی به خود می‌گیرد. لازم به ذکر است این مقدار لزوماً مقدار ثابتی نداشته و می‌تواند در طول زمان تغییر کند.

به نظر می‌رسد این بزرگوار با وجود خدمات بسیار مهمی که به فیزیک کرده؛ در تبیین میدان برای ما کمی بی‌حوصلگی به خرج داده باشد. بیاید سری به تاریخچه‌ی این موجود -میدان- بزنیم؛ یعنی اولین باری که مایکل فارادی جوان برای تبیین مفاهیم مورد نظرش کلمه‌ی میدان را به کار برد...

آنچه فارادی تصور می‌کرد این بود که فضا پر از میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی است که همه جا پخش شده بودند. از نظر وی این میدان‌ها حتی زمانی که هیچ الکتریسیته یا مغناطیسی در محیط تشخیص داده نمی‌شود، وجود دارند. ایده‌ی فارادی جوان مفهومی بسیار انتزاعی بود که درک آن حتی امروزه نیز ممکن است برای ما چالش برانگیز باشد.

حدود سال 1820 اورستد کشف کرد که جریان الکتریکی می‌تواند میدان مغناطیسی ایجاد کند. در سال 1830، یکی از اکتشافات بزرگ فارادی این بود که میدان مغناطیسی متحرک، جریان الکتریکی ایجاد می‌کند. نتیجه‌ی این اکتشافات از ارتباط بسیار نزدیک این دو میدان خبر می‌داد. توضیح فارادی این بود که با وجود اینکه به نظر می‌رسید اشیائی که در تماس با یکدیگر نیستند-فضای خالی بین دو شی وجود دارد-برهم اثر نمی‌گذارند؛ اما در واقع می‌توانست برهم تاثیر بگذارند و به بیان دیگر آن فضای خالی بین اشیا واقعا خالی نبود! بلکه پر بود از میدان‌هایی که بعدا میدان‌های الکترومغناطیسی نامگذاری شدند. بنابراین فارادی نشان داد که در این جهان فقط ذرات وجود ندارند، بلکه میدان‌هایی نیز وجود دارند که در سراسر فضا پخش شده‌اند.

بعدها ماهیت موجی میدان و فوتون‌ها نیز در تبیین بیشتر این ایده به کار گرفته شدند...

اما می‌دانیم هرگاه اسم فوتون -یعنی کوانتا‌های انرژی- به میان می‌آید طبیعت رفتاری گسسته از خود نشان می‌دهد. چگونه میتوان میدان پیوسته‌ی فارادی که کل فضا را اشغال کرده را با رفتار گسسته‌ی فوتون سازگار دانست؟

و اینجا دقیقا نقطه‌ی تولد نظریه‌ی میدان‌های کوانتومی است؛ ایده‌ای که برای ترکیب طبیعت گسسته‌ی فوتون و رفتار پیوسته‌ی میدان به کمک ما می‌آید.

اما قبل از اینکه پیش تر برویم بیاید تکلیف جعبه‌ی خالی را مشخص کنیم؛ آخر سر توانستیم این جعبه را خالی کنیم یا نه؟ و برای خالی کردن این جعبه باید چه چیزهای را از آن حذف کنیم؟ ذرات یا میدان‌ها؟ -کدام بنیادی تر است؟ ذره یا میدان؟-

دوست دارم بگویم میدان‌ها! اما ذات موجی میدان که با ماهیت دوگانه‌ی موجی-ذره‌ای ترکیب می‌شود مرا از این پاسخ منصرف می‌کند. بگذارید با شما روراست باشم. من برای تبیین پیش‌بینی کازیمیر از پنج مورد برای توجیه استفاده خواهم کرد. یکی از آنها همین ماهیت دوگانه‌ی موجی-ذره‌ایست. چهار تای دیگر هم مربوط اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، موج‌های رونده و شرایط مرزی، مقایسه‌ی بینهایت‌ها و انرژی -تکانه- داشتن فوتون است. می‌توانید این‌ها را در گوشه‌ای از ذهن خود داشته باشید.

مشخص کردن تکلیف جعبه:

جواب این است که حتی زمانی که تمام "ذرات" حذف شوند، میدان‌ها-که به نوعی ذره هستند!- همچنان وجود دارند و قوانین مکانیک کوانتومی برای آنها برقرار است. در واقع، به دلیل ماهیت موجی-ذره‌ای آنها، و همچنین اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، نمی‌توان تکانه و مکان یک ذره-بخوانید موج ایستا- را در زمان ثابت به طور دقیق تبیین کرد. به کارگیری این اصل برای یک میدان-بخوانید موج- بدین معناست که چنین میدانی نمی‌تواند با گذر زمان ثابت بماند و اساسا چاره‌ای جز نوسان ندارد. و اینجاست که ما مفهومی به نام نوسانات کوانتومی خلاء را ایجاد می‌کنیم. شاید با این مفهوم آشنا نباشید اما شکل آن -حداقل شبیه سازی کامپیوتری اش- را در عکس روی جلد این مقاله دیده‌اید. به زبان ساده و غیرفیزیکی این مفهوم بدین معناست که در جعبه‌ی خالی مذکور که هیچگاه نمیتواند از نوسانات کوانتومی خالی شود؛ در واقع ذرات در لحظه ایجاد شده و از بین می‌روند. به بیان دیگر اگر ماهیت ذره‌ای موج را در نظر بگیریم؛ نوسانات آن به معنای به وجود آمدن و از بین رفتن ذرات است.

ممکن است به نظر تخیلی برسد اما درک این نکته مهم است که این نوسانات کوانتومی واقعی بوده و قابل مشاهده هستند! ما می‌توانیم آزمایش‌هایی طراحی کنیم و اثر این ایجاد و تخریب ذره را به شکل نیرویی که کار جاذبه را بین دو صفحه انجام میدهد مشاهده کنیم. اگر تا کنون نفهمیده‌اید صریحا بگویم که آزمایش کازیمیر نشان می‌دهد چگونه این ذرات مجازی بین دو صفحه فلزی نیرو ایجاد می‌کنند؛ جالب آنکه نظریه میدان‌های کوانتومی قادر است این پدیده را از نظر ریاضی بسیار دقیق توضیح دهد.

شروع مقاله:

و تازه اینجاست که مقاله‌ی من شروع میشود! در این مقاله قصد دارم نیروی جاذبه‌ی بین دو صفحه‌ی خنثی در خلا را بررسی کنم. در ضمن خوب است که اسم نیروی کزیمیر به چشمتان آشنا باشد؛ چرا که این نیروی خارق العاده‌ی حاصل از هیچ که برایتان گفتم به این اسم نامگذاری شده.

همانطور که اشاره شد علت وجود نیروی کازیمیر به کمک نظریه میدان کوانتومی توصیف می‌شود، که بیان می‌کند همه میدان‌های بنیادی مختلف، مانند میدان الکترومغناطیسی، باید در هر نقطه از فضا کوانتیزه شوند. اما هر جا که نیرویی وجود دارد مسلما انرژی وجود داشته و تغییرات در آن انرژی سبب ایجاد نیرو شده ست. دوباره‌ی به جعبه‌ی پر از خلاء کازیمیر برگردید. آیا در این جعبه انرژی وجود دارد؟

این بار برای درک بهتر، میدان داخل جعبه را به مثابه‌ی توپ ها و فنرهای متصل به هم در نظر بگیرید که کل فضا را پر کرده‌اند. قدرت میدان را می‌توان به عنوان جابجایی یک توپ از موقعیت خود تصور کرد. امواج -بخوانید میدان- به واسطه‌ی ارتعاش فنرها در کل فضای جعبه منتشر می‌شوند و معادله‌ی حرکت آنها نیز توسط معادله موج مناسب برای میدان خاص مورد نظر داده می‌شود. در ابتدایی ترین ساده سازی، میدان در هر نقطه از فضا را یک نوسانگر هارمونیک ساده در نظر بگیرید؛ دقت کنید که کوانتیزاسیون فضا موجب می‌شود نوسانگرهایی که در جای جای فضا قرار می‌دهیم نوسانگر هارمونیک کوانتومی باشند.

خلاء دارای تمام خصوصیتی است که یک ذره ممکن است داشته باشد؛ اسپین یا قطبش در مورد نور، انرژی و غیره. اما بیشتر این ویژگی‌ها از بین می‌روند! چرا که خلاء، به هر حال، «خالی» است. اما استثناء مهمی که خالی بودن نیز نمیتواند آن را از بین ببرد **انرژی خلاء** یا **انرژی مقدار چشم‌داشتی خلاء** است. و این انرژی همان منشایی است که ما برای تبیین نیرو به دنبال آن می‌گشتیم. میتوانیم انرژی ذخیره شده در خلاء را مانند انرژی ذخیره شده در نوسانگر هارمونیک کوانتومی که در نقاط فضا گذاشته‌اید در نظر بگیریم. کوانتیزاسیون یک نوسانگر هارمونیک ساده بیان می‌کند که کمترین انرژی ممکن یا سطح انرژی پایه نوسانگر بدین شکل است:

$$E = \sum \frac{1}{2} \hbar \omega$$

جمع کردن انرژی تمام نوسانگرهای ممکن در تمام نقاط فضا، مقدار نامتناهی‌ای از انرژی به ما می‌دهد. از آنجایی که تنها اختلاف انرژی از نظر فیزیکی قابل اندازه‌گیری است -به استثنای گرانش، که فراتر از محدوده نظریه میدان کوانتومی باقی مانده- این بی‌نهایت ممکن است به‌جای فیزیک، به‌علت به کارگیری ریاضیات ایجاد شده باشد.

ممکن است با تمام آنچه تا اینجا گفته شده موافق باشید؛ اما هنوز درک نکنید که چرا این نیرو طوری عمل می‌کند که دو صفحه به هم نزدیک می‌شوند؟ و اساساً چرا انرژی موجود در نوسانگرها باید چنین غیریکنواختی ایجاد کند وقتی فضا کاملاً همسان و همگرد است و نوسانگرها نیز مشابه اند؟ نکته اینجاست که ما با قرار دادن آن دو ورقه ی خنثی گویی همسانگرد بودن فضا را از بین برده‌ایم؛ و برای موج‌های موجود در جعبه **شرایط مرزی** ایجاد کرده‌ایم.

مشابه این قضیه در الکترومغناطیس:

مشاهدات کازیمیر این بود که میدان الکترومغناطیسی کوانتومی-یعنی با شرط کوانتیده بودن امواج یا همان وجود فوتون‌ها-، در حضور اجسام فلزی یا دی‌الکتریک، باید از همان شرایط مرزی‌ای پیروی کند که میدان الکترومغناطیسی کلاسیک از آن تبعیت می‌کند. و در نظر گرفتن این موضوع برای محاسبه انرژی خلاء در حضور یک هادی یا دی‌الکتریک حائز اهمیت است. به عنوان مثال، مقدار انرژی چشم‌داشتی خلاء میدان الکترومغناطیسی، در داخل یک حفره فلزی را در نظر بگیرید. در این حالت انرژی حالت پایه امواج ایستاده داخل حفره با نسبت دادن انرژی به هر موج ایستاده قابل محاسبه است. بدین ترتیب که انرژی n امین موج ایستاده E_n است.

$$* E_n = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} E_n$$

این مجموع به وضوح واگراست. به مشکلی برخوردیم؛ اینکه انرژی امواج بین دو صفحه و امواج خارج از صفحات هر دو بی‌نهایت است. یعنی نمی‌توان نتیجه گرفت که به علت تفاوت در مقادیر انرژی

خارج و داخل دو صفحه؛ این دو صفحه جذب هم می‌شوند. اینجا نکته‌ی چهارم یعنی مقایسه‌ی بینهایت‌ها به کمکمان خواهد آمد. پس نیاز داریم تا مقادیر انرژی را دقیق‌تر تبیین کرده و مقایسه کنیم.

برای درک بهتر این نیرو بر وضعیت یک بعدی آن تمرکز می‌کنیم. در ادامه قصد داریم ابهام انرژی بینهایت در جعبه را از بین ببریم و مقدار دقیق آن را محاسبه کنیم. اگر طول ضلع جعبه‌ی فرضی یک بعدیمان را L در نظر بگیریم طبق رابطه‌ی * انرژی بدین صورت خواهد بود:

$$E = 2\left(\frac{1}{2}\right) \sum_{x=1}^{\infty} \frac{\pi}{L} x$$

$$\frac{L}{\pi} E = S = \sum_{n=1}^{\infty} n = 1 + 2 + 3 + \dots$$

برای محاسبه‌ی این جمع نیاز به روشی در ریاضیات به اسم رگولاسیون نمایی داریم؛ اما در این مقوله از پرداختن به جزئیات آن می‌پرهیزیم و با وام گرفتن نتیجه به ادامه‌ی محاسبات می‌پردازیم:

$$S = \frac{1}{\alpha^2} - \frac{1}{12}$$

$$\frac{L}{\pi} E = \infty - \frac{1}{12}$$

α کمی بعد‌تر تبیین خواهد شد.

اگر در رگولاسیون سازی جمع، برای تابع نمایی حد e^{α} را در نظر بگیریم -که با آنچه به طور فیزیکی در واقعیت اتفاق می‌افتد سازگاری دارد- برای فرکانس‌های بالا عبارتی به شکل زیر بدست می‌آید:

$$\alpha = \frac{\pi}{kL}$$

بر این اساس انرژی حالت پایه به این شکل خواهد بود:

$$\frac{L}{\pi} E = \frac{\pi}{L} \left[\frac{1}{\alpha^2} - \frac{1}{12} \right] = \frac{L k^2}{\pi} - \frac{\pi}{12 L}$$

اگر دوباره به مثال جعبه و دو صفحه‌ی رسانای خنثی در آن بازگردیم، عبارت انرژی به این معناست که جعبه‌ی ما به دو جعبه، یکی به طول a و دیگری به طول $b = L - a$ ، تقسیم شده است. کل انرژی $U = Ea + Eb$ است.

$$U = \frac{L k^2}{\pi} - \frac{\pi}{12 a} - \frac{\pi}{12 b}$$

با مشتق گرفتن از عبارت بالا می توانیم نیرو را محاسبه کنیم. توجه کنید که جمله ی اول-عبارت بزرگ بینهایت- ثابت است و تاثیری در مقدار نیرو ندارد. آنچه تاثیرگذار است مقایسه ی بین دو جمله ی آخر است و می دانیم $b \gg a$ بوده و نیروی جاذبه بین دو صفحه برقرار است.

رفرنس ها:

-<https://www.cantorsparadise.com/quantum-field-theory-explained-understanding-the-most-successful-theory-in-science-585b5592538e>

-https://en.wikipedia.org/wiki/Casimir_effect#Derivation_of_Casimir_effect_assuming_zeta-regularization

- https://en.wikiversity.org/wiki/Quantum_mechanics/Casimir_effect_in_one_dimension

-<https://www.youtube.com/watch?v=nDxW9ZF5wGs>