

# نظریه های ابرتقارنی در فیزیک ذرات بنیادی

ارمیا اعتمادی - زهرا اکبری - سپیده حسینی

## مقدمه

ابرتقارن یک تقارن داخلی است که فیزیک دانان نظری برای حل مشکلات مختلف به نظریه خود اضافه می کنند. این تقارن فرمیون ها و بوزون ها را به یک دیگر مرتبط می کند که در حل بسیاری مسائل از مکانیک کوانتومی غیرنسبیتی تا مدل استاندارد ذرات سودمند است. اولین یافته ها در مورد ابرتقارن در اوایل دهه ی 1970 میلادی مطرح شدند که در واقع نظریه هایی ریاضی بودند که با عنوان "راه حل هایی در جستجوی مسئله" شناخته می شدند. اولین نسخه ی واقعی ابرتقارن مدل استاندارد، سال ها بعد برای حل مسئله ی سلسله مراتبی پیشنهاد شد که به مدل استاندارد ابرتقارنی مینیمال معروف شده است. در این مقاله قصد داریم ابتدا نگاهی به چارچوب نظری نظریه های ابرتقارنی داشته باشیم و پیامدهای مختلف آن را بررسی کنیم و در نهایت به جایگاه امروزی نظریه های ابرتقارنی بپردازیم.

## ابرتقارن چیست؟

مدل استاندارد فیزیک ذرات بنیادی، یک مدل موفق برای توصیف اجزای سازنده ی ماده، یعنی کوارک ها و لپتون ها است و برهمکنش های بنیادی ضعیف، الکترومغناطیسی و قوی را با وارد کردن نظریه ی میدان های کوانتومی بیان می کند. این نظریه کاملاً بر مبنای نظریه ی میدان های کوانتومی نسبیتی است. بسیاری از آزمایش ها با پیش بینی های این نظریه منطبق هستند. اما با وجود اینکه مدل استاندارد به خوبی نتایج آزمایش ها را در مورد آجرهای بنیادی سازنده ی مواد پیش بینی کرده ولی فیزیک دانان پذیرفته اند که این مدل کامل نیست. ماده تاریک جایی در این مدل ندارد، توضیحی برای تنظیم ظریف وجود ندارد و برای جرم سبک بوزون هیگز دلیلی نداریم که در ادامه به مسئله سلسله مراتبی منجر می شود (ضعیف بودن نیروی گرانش در مقابل نیروی هسته ای ضعیف). یکی از راه حل های پیشنهادی برای این مشکلات، فرض ابرتقارن است. این فرض به صورت خلاصه در زیر آمده:

هر بوزون یک جفت هم جرم فرمیونی و هر فرمیون یک جفت هم جرم بوزونی دارد.

این ارتباط در نگاه اول فریبنده به نظر می‌رسد. ارتباط میان بوزون‌ها و فرمیون‌ها به زبان ساده، مشابه ارتباط میان نیرو و ماده است که تقارنی جدید در معادلات بنیادی ایجاد می‌کند. شاید بخواهیم تلاش کنیم فرمیون‌ها و بوزون‌های شناخته شده در مدل استاندارد را به همین ترتیب به یک‌دیگر مرتبط کنیم. اما با بررسی درجات آزادی در میدان‌های فرمیونی و بوزونی می‌توان دید که اختلاف این دو باعث می‌شود تا ایجاد چنین ارتباطی به کمک ابرتقارن غیر ممکن باشد. در حقیقت برای ساختن نظریه‌ی ابرتقارنی، نیازمند معرفی ذرات ابرتقارنی جدید برای هر ذره‌ی مدل استاندارد هستیم که با نام ابرهمراه نیز شناخته می‌شوند. هر ابرهمراه به اندازه نیم اسپین با ذره‌ی اصلی اختلاف دارد. همچنین میدان‌ها با ابرمیدان‌ها جایگزین می‌شوند که ذرات ابرهمراه را نیز شامل می‌شوند. ابرمیدان‌ها از تقارن‌های قبلی میدان‌ها پیروی می‌کنند. مدل استاندارد ابرتقارنی مینیمال که در سال 1981 برای حل مشکل جرم بوزون هیگز ارائه شد، مدلی با کوچک‌ترین تعداد ذره‌ی ابرهمراه ممکن است. در این مدل برای هر ذره، یک ابرهمراه تعریف شده که برای فرمیون‌ها با پیشوند "اس" و برای بوزون‌ها با پسوند "اینو" نام‌گذاری می‌شوند. به عنوان مثال ابرهمراه الکترون، اس‌الکترون و ابر همراه گلوئون، گلوئینو است. در این مدل همچنین میدان اسکالر هیگز دوتایی است. در این مقاله سعی داریم جوانب کلی نظریه‌های ابرتقارن را بررسی کنیم؛ اما مشخصاً روی مدل مینیمال تمرکز داریم.

## جبر ابرتقارن

در این بخش قصد داریم برای ابرتقارن یک عملگر تبدیل مناسب معرفی کنیم. این عملگر به گونه‌ای عمل می‌کند که هر ذره را به ابرهمراه خود مرتبط می‌کند:

$$Q_a |j\rangle = \left| j \pm \frac{1}{2} \right\rangle$$

که  $j$  اسپین است. ابرتقارن یک تقارن است، پس این عملگر باید پایسته باشد:

$$[H, Q_a] = 0$$

اما مشکلی در این میان وجود دارد. قضیه‌ای به نام کلمن-مندولا وجود دارد که بیان می‌کند به جز عملگرهای تکانه خطی و زاویه‌ای، نمی‌توان عملگر پایسته‌ی دیگری معرفی کرد؛ مگر اینکه تحت تبدیل لورنتس بدیهی باشد (اسکالر لورنتسی). در نتیجه‌ی همین قضیه، تقارن‌های داخلی همگی اسکالرهای لورنتسی هستند. اما نکته‌ای که در اینجا متمایز است این است که عملگری که برای تبدیل ابرتقارن معرفی می‌کنیم، در واقع یک عملگر اسپینوری است که در شرایط قضیه کلمن-مندولا صدق نمی‌کند. در واقع عملگر تبدیل ابرتقارن و عملگرهای تکانه خطی و زاویه‌ای جبری

تحت عنوان ابرجبر لی تشکیل می دهند که تعمیم جبر لی است. با تحقیق بیشتر می توانیم به رابطه ی پادجابجایی زیر برای جبر ابرتقارن برسیم:

$$\{Q_a, \bar{Q}_b\} = 2(\sigma^\mu)_{ab} P_\mu$$

با محاسبات بیشتر می توان دید که این عملگر خاصیت خواسته شده را برقرار می کند. همچنین با بررسی بیشتر این جبر می توان تئوری ای برای گرانش نوشت. این تئوری با عنوان ابرگرانش شناخته می شود که بررسی آن در این مقاله نمی گنجد.

## جرم بوزون هیگز

در مدل استاندارد، جرم بوزون های پیمانه ای نیروی الکتروضعیف و در ادامه ی آن جرم ذرات مدل استاندارد به شکست خود به خودی تقارن در مکانیسم هیگز وابسته است. به طور خاص پس از شکست تقارن، جرم ذره هیگز و بوزون پیمانه ای  $W^+$  به صورت زیر هستند:

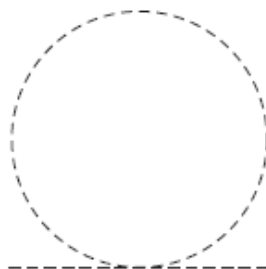
$$M_H = \sqrt{2} \mu$$

$$M_W = \frac{g\mu}{\sqrt{\lambda}}$$

$g$  ثابت جفتشدگی و  $\mu$  و  $\lambda$  به ترتیب ضرایب جمله ی جرمی و خود برهمکنشی میدان هیگز هستند:

$$V = -\mu^2 \phi^\dagger \phi + \frac{\lambda}{4} (\phi^\dagger \phi)^2$$

تا اینجا کار مشکلی وجود ندارد. اما حال بیایید بازبهنجارش جرم بوزون هیگز در یک تک حلقه را بررسی کنیم:



شکل 1- تک حلقه خود انرژی هیگز

طبق انتظار در حساب فاینمن به بی نهایت برمی خوریم و نیاز داریم نظریه را بازبهنجار کنیم. این کار در مدل استاندارد به این صورت است که یک حد قطع انرژی برای حد بالای انتگرال در نظر می گیریم:

$$\int^{\Lambda} d^4k f(k, \text{تکانه های خارجی})$$

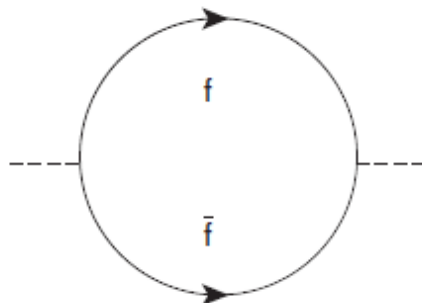
تفسیر فیزیکی انرژی قطع  $\Lambda$  به این صورت است که آن را حد بالای انرژی در نظر می گیریم که در آن مدل استاندارد قابل استفاده نیست و نیاز داریم به تئوری بنیادی تری دست پیدا کنیم. به عنوان مثال می توانیم از جرم پلانک برای این حد بالا استفاده کنیم:

$$M_P \simeq 1.2 \times 10^{19} \text{Gev}$$

حال با محاسبه ی انتگرال به این نتیجه می رسیم که باید یک جمله ی تصحیح به فرم  $\lambda \Lambda^2 \phi^\dagger \phi$  به جمله ی جرمی لاگرانژی هیگز اضافه کنیم. در واقع این تصحیح را می توان به صورت رابطه ی زیر تفسیر کرد:

$$\mu_{phy}^2 \equiv \mu^2 - \lambda \Lambda^2$$

اما مشکل از آنجایی آغاز می شود که رابطه ی بالا به صورت درجه دو تابعی از انرژی قطع است. همچنین پیش تر دیدیم که جرم تمام ذرات مدل استاندارد به این عبارت بستگی دارند و در نتیجه در انتخاب  $\Lambda$  دست بازی نداریم و ناچار به تنظیم ظریف هستیم. این یک معضل برای طبیعی بودن مدل استاندارد است که اولین بار کی. جی ویلسون آن را با لئونارد ساسکایند، در یک مکالمه مطرح کرد. اما ابرتقارن چگونه بر این مشکل فائق می آید؟ در نظریه ابرتقارنی با به وجود آمدن یک جفت بوزونی برای هر فرمیون و بلعکس، جمله ی درجه دو به صورت خود به خود حذف می شود. به عنوان مثال در شکل زیر یک حلقه شامل یک فرمیون و ابرهمراه آن مشارکت دارند:



شکل 2 - مشارکت فرمیون و ابرهمراه آن در حلقه

با محاسبه حلقه بالا، به عبارت زیر برای جمله ی درجه دو می رسیم:

$$(\lambda - g_f^2) \Lambda^2 \phi^\dagger \phi$$

که  $g_f$  ثابت جفت‌شدگی فرمیون با میدان هیگز است. با اختیار کردن  $\lambda = g_f^2$  عبارت درجه دو حذف شده و وابستگی جرم ذرات به تنظیم ظریف انرژی قطع از بین می‌رود. البته می‌توان دید جملات مرتبه لگاریتمی که در ادامه ظاهر می‌شوند نیز می‌توانند مشکل ساز باشند اما به دلیل یکسان بودن جرم ذرات در ابرتقارن شکسته نشده این جمله نیز حذف می‌شود.<sup>1</sup>

## ماده تاریک سرد

ماده تاریک چیزی حدود 85 درصد از ماده موجود در جهان را شامل می‌شود. این ماده اسرارآمیز برهمکنشی جز برهمکنش گرانشی با ماده قابل مشاهده انجام نمی‌دهد که کشف ماهیت آن را بسیار پیچیده‌تر کرده‌است. در اواخر سال 1970 دیده شد که در نظریه ابرتقارنی، تمام ذرات ابرهمراه می‌توانند به ذره‌های سبک‌تر واپاشی کنند بجز سبک‌ترین آن‌ها که با نام سبک‌ترین ابرهمراه یا LSP شناخته می‌شود. این ذرات کاندیدای مناسبی برای ماده تاریک هستند. در این مدل، در ابتدای جهان پس از سرد شدن، جهان اولیه شامل ذرات فوتون، نوترینو، الکترون، ذرات بالا و پایین و LSP ها بوده است. این LSP ها پس از سرد شدن، ماده تاریک سرد را برای جهان فراهم کردند. اگر جرم ابرهمراه‌ها (شامل جرم LSP) به دست آورده شود می‌توان نسبت باقیمانده LSP ها را محاسبه و آن را با ماده تاریک موجود در جهان مقایسه کرد. پس در نتیجه نیاز داریم در ابتدا این ذرات را در آزمایشگاه‌های زمینی مشاهده کنیم. همچنین باید دید آیا نیمه عمر این ذرات پایداری کافی برای کاندیدای ماده تاریک بودن را دارد یا خیر. با این حال تلاش‌ها برای توصیف ماده تاریک با این مدل ادامه دارند.

## جمع بندی

نظریه ابرتقارن یک ساختار ریاضی زیبا بر پایه نظریه گروه تبدیلات برای حل مشکلات پایه‌ای نظریه استاندارد ارائه می‌دهد. همچنین این تقارن در نظریه‌ی ابررسمان یا ابرگرانش نیز وجود دارد که در تلاش هستند نظریه‌ای بنیادی‌تر از مدل استاندارد ارائه دهند. با این حال هنوز هیچ‌کدام از ذرات ابرهمراه در برخورد دهنده‌ها مشاهده نشده‌اند که برای اثبات تجربی این نظریه ناامید کننده است. با این حال جستجو ادامه دارد و حتی اگر روزی به نتیجه برسیم که باید

---

<sup>1</sup> این حذف دیگر در مدل ابرتقارنی که تقارن آن به صورت نرم شکسته شده باشد وجود ندارد. با این حال اثر این موضوع کمتر است و همچنان به دنبال شکست نرم خودبه‌خود تقارن در این نظریه هستیم.

نظریه ابرتقارن را کنار بگذاریم، این نظریه کاربرد خود را در عرصه های دیگر فیزیک مانند فیزیک ماده چگال یا اپتیک حفظ می کند.

## منابع

[1] Ian J . R. Aitchison, *Supersymmetry In Particle Physics: An Elementary Introduction*

[2] GORDON L. KANE, *Supersymmetry: What? Why? When?*

[3] Pierre FAYET, *The Supersymmetric Standard Model*

[4] Matteo Bertolini, *Lectures on Supersymmetry*

[5] Scott Hershberger, *The Status of Supersymmetry*

[6] David Griffiths, *Introduction to Elementary Particles*