

مسائل بزرگ جهان هستی منشاء و چیستی جرم



The big problems of the universe: The origin and the essence of Mass¹

مفهوم جرم نقش بسزایی در توصیف رویدادهای جاری در کیهان دارد. بدون این مفهوم هیچ پدیده‌ای قابل توصیف و فهم نیست. اما جرم چیست و چه منشایی دارد؟ آیا منشاء و چیستی جرم واقعاً درک شده است؟

فشرده

۴ نیروی اساسی شناخته شده تاکنون در طبیعت (گرانش، الکترومغناطیس، هسته‌ای قوی و ضعیف) بدون مفهوم جرم قابل فهم نیستند. برای مثال، نیروی الکترومغناطیس با ذرات الکتریکی جرم‌دار، یعنی الکترون‌ها و پروتون‌ها قابل توصیف و درک است.

اگر تمام ذرات اولیه بسان زمان انفجار بزرگ بدون جرم می‌ماندند، در این صورت همه آنها با سرعت نور از هم دور و پراکنده می‌شدند. در نتیجه شکل‌گیری اتم‌ها، ملکول‌ها، ستارگان و ... ناممکن بود. از این رو می‌پرسیم: ذرات چگونه جرم‌دار شدند؟ چه عامل و یا عواملی باعث جرم‌دار شدن آنها شده است؟ آیا ذراتی مانند فوتون‌ها که با سرعت نور حرکت می‌کنند نیز می‌توانند دارای جرم شوند؟

همه ساختارهای مشاهده شده تاکنون در کیهان در اصل از سه ذره مختلف جرم‌دار به نام‌های کوارک‌های بالا، کوارک‌های پائین و الکترون‌ها بنا شده‌اند. اما مدل استاندارد نظریه کوانتوم تا اوایل دهه دوم قرن حاضر توان توضیح جرم آنها را نداشت. شکی نیست که چنین وضعیتی نمی‌توانست رضایت‌بخش باشد. از این رو در دهه شصت قرن گذشته چندین فیزیکدان همزمان و مستقل از هم از جمله پیتر هیگز نظریه‌ای (فرضیه‌ای) را برای رفع این کاستی ارائه نمودند. طبق این نظریه، ذرات جرم خود را از طریق برهمکنشی با میدانی که اکنون به 'میدان هیگز' معروف شده است کسب می‌کنند. اما اثبات تجربی این نظریه بسیار دشوار بود و به‌همین علت حدود نیم قرن، یعنی تا سال ۲۰۱۲ به‌طول انجامید.

'نظریه هیگز'، کیهان را آکنده از میدانی می‌داند که ذرات اولیه در برهمکنشی با آن جرم‌دار می‌شوند. هر اندازه این برهمکنشی شدیدتر باشد به‌همان میزان نیز جرم ذرات بیشتر است. روشن است که همزمان با جرم‌دار شدن ذرات از سرعت حرکت آنها کاسته می‌شود و این برای شکل‌گیری انواع ساختارها در کیهان از جمله سامانه خورشیدی، کره زمین و حیات ضروری است.

در این مقاله می‌خواهیم به توضیحاتی در باره 'ذره هیگز'، 'میدان هیگز'، کشف ذره هیگز و مکانیسم جرم‌دار شدن ذرات اولیه در کنش و واکنش با میدان هیگز (ذره هیگز) بپردازیم.

در سال ۲۰۱۲ 'ذره هیگز' ('بوزون هیگز') در آزمایشگاه سرن کشف شد. روش بکاررفته برای اثبات وجود این ذره، مکانیسمی به نام 'مکانیسم هیگز' است که جرم‌دار شدن ذرات اولیه را نشان می‌دهد. نظریه مربوط به این مکانیسم در دهه شصت قرن گذشته (۱۹۶۴) از جانب پیتر هیگز فیزیکدان انگلیسی (۱۹۲۹-۲۰۲۴) و مستقل از او در همان زمان از جانب فرانسوا انگلرت فیزیکدان بلژیکی (۱۹۳۲-۲۰۱۳) و رابرت براوت فیزیکدان آمریکایی - بلژیکی (۱۹۲۸-۲۰۱۱)، جerald گورالنیک فیزیکدان آمریکایی (۱۹۳۶-۲۰۱۴)، سی آر هیگن فیزیکدان آمریکایی (۱۹۳۷*) و توماس والتز بنزمن کیبل فیزیکدان انگلیسی (۱۹۳۲-۲۰۱۶) ارائه گردید. صحت این نظریه (فرضیه) پس از نزدیک به نیم قرن با کشف ذره هیگز ثابت شد. در سال ۲۰۱۳ پیتر هیگز به همراه فرانسوا انگلرت از این بابت جایزه نوبل فیزیک را از آن خود کردند. ما در این مقاله صرفن به‌خاطر دوری از تکرار اسامی نام‌برده و طولانی نکردن نوشته حاضر تنها از نام هیگز استفاده می‌کنیم.

ذره هیگز و میدان هیگز

مدل استاندارد نظریه کوانتوم تا اوایل دهه دوم قرن حاضر قادر به توضیح چرایی جرم ذرات اولیه نبود. اما اکنون این مدل با کشف ذره هیگز، یک برانگیختگی پُرانرژی میدان هیگز، گسترش پیدا کرده و می‌تواند نحوه‌ی جرم‌دار شدن ذرات اولیه را بیان دارد. خوب است بدانیم، ۱. مدل استاندارد نظریه کوانتوم کل دانش ده‌ها سال پژوهش در باره‌ی ذرات اولیه را دربرمی‌گیرد. ۲. ماده در اصل از ذراتی به نام‌های کوارک‌های بالا، کوارک‌های پائین و الکترون‌ها تشکیل شده است.

طبق 'نظریه هیگز'، کیهان آکنده از یک میدان نامرئی است و یک ذره اولیه زمانی جرم‌دار می‌شود که با این میدان تعامل داشته باشد. به این ترتیب این نظریه بیان از چگونه جرم‌دار شدن ذرات نیرو و ذرات اولیه دارد. با این همه ما هنوز نمی‌دانیم چرا اصولن 'میدان هیگز' وجود دارد، منشاء آن چیست و چگونه شکل‌گرفته است؟ ما همچنین دقیق نمی‌دانیم چرا بعضی از ذرات در برهمکنشی با میدان هیگز نسبت به بعضی از ذرات دیگر به جرم زیادتری دست می‌یابند.

برای آشنایی با مکانیسم هیگز، نحوه جرم‌دار شدن ذرات اولیه، در زیر به دو "همانندسازی" از دنیای کلاسیک می‌پرازیم:

۱. تصور کنیم دو شخص هموزن یکی در کنار استخر و دیگری در ته استخر عمیقی پُر از آب راه می‌روند. شخص کنار استخر حس عادی دارد. اما شخص داخل استخر مقاومت قابل توجهی ("مقاومت اصطکاکی") را حس می‌کند. انگار که به جرم او افزوده شده است.^۲ در این "همانندسازی"، آب استخر به مثابه 'میدان هیگز'، شخص درون آب به مثابه 'ذره' وارد شده به 'میدان هیگز' و 'گرداب در آب' به مثابه "ذره هیگز" است.

۲. تصور کنیم افراد زیادی در یک سالن مهمانی حضور دارند. وقتی فرد معروفی وارد سالن می‌شود از جانب حاضرین "محاصره" و در نتیجه سبب کاهش سرعت حرکت او می‌شوند. در حالی‌که چهره‌های کمتر شناخته شده بدون توجه چندان می‌توانند به حرکت عادی خود ادامه دهند. در این "همانندسازی"، 'معروفیت' فرد باعث حرکت کند او می‌شود. هرچه کنش و واکنش او به‌عنوان 'ذره' با جمیعت به‌عنوان 'میدان هیگز' شدیدتر باشد به‌همان میزان نیز از سرعت حرکت او بیشتر کاسته می‌شود. علت کاسته شدن سرعت حرکت فرد به عنوان "ذره" را می‌توان از دید 'جرم ذره' دانست. در واقع 'نظریه هیگز' مشابه کوانتومی چنین سناریوای را برای 'میدان هیگز' و 'جرم‌دار' شدن ذرات اولیه قائل است.

با این حال باید اذعان کرد که 'نظریه هیگز' نه توان توصیف منشاء هیگز، نه چگونه شکل‌گیری 'میدان هیگز' و نه بیان دقیق جرم‌دار شدن ذرات در اندازه‌های مختلف را دارد. این وضع نشان می‌دهد که ما در این‌باره در آغاز کار پژوهشی قرار داریم.

فیزیکدان‌های نامبرده در بالا، نظریه (فرضیه) خود را با باور به وجود یک میدان جهانشمول همگن و همسانگرد ارائه دادند. فرضیه آنها اکنون با کشف 'ذره هیگز' یا 'ذره بوزون' (Higgs-Boson) به مقام یک نظریه فیزیکی ارتقاء یافته و میدان مربوطه به 'میدان هیگز' (Higgs field) یا میدان براوت - انگلرت - هیگز (BEH-field) معروف شده است.

کشف ذره هیگز

برای کسب اطمینان از صحت فرضیه هیگز و تبدیل شدن آن به یک نظریه، لازم بود این نظریه نیز مانند هر نظریه دیگری در علم فیزیک مورد راستی آزمایشی قرارگیرد. به این منظور فیزیکدان‌ها در پی اثبات وجود 'ذره هیگز' شدند.

برای رسیدن به این هدف نیاز به گسترش وسیع و زمان‌بر آزمایشگاه معروف سرن بود. به‌همین خاطر با تلاش فراوان همه‌جانبه بزرگترین برخورددهنده هادرونی جهان (Large Hadron Collider) در تونلی با محیط ۲۶٫۷ کیلومتر و در عمق ۱۰۰ متری در زیر مرز سوئیس - فرانسه نزدیک شهر ژنو ساخته شد. LHC بزرگترین برخورددهنده ذرات با بالاترین انرژی در جهان است. این برخورددهنده بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۸ در همکاری با ده هزار دانشمند و صدها دانشگاه و آزمایشگاه از بیش از صد کشور ساخته شد.^۳

"درون برخورددهنده LHC بیش از ۱۵۰۰ آهن‌ربا در اندازه‌ها و نوع‌های مختلف جای داده شده است: تعداد ۱۲۳۲ آهن‌ربای دوقطبی هر یک با طول ۱۵ متر و ۳۰ تن وزن (جرم) برای خم کردن پرتوها و ۳۹۲ آهن‌ربای چهارقطبی هر یک با طول ۵ تا ۷ متر برای تمرکز پرتوها.^۴ در واقع وظیفه این آهن‌رباها هدایت پرتوهای ذرات در امتداد مسیر دایره‌ای شتاب‌دهنده و تمرکز پرتوها می‌باشد.

سیستم خنک‌کننده این برخورددهنده، بزرگترین یخچال در جهان است. دمای همه آهن‌رباها با ۱۰۰۸۰ تن نیتروژن مایع ابتدا تا -193°C - خنک‌سازی و سپس با حدود ۶۰ تن هلیوم مایع تا $-271/3^{\circ}\text{C}$ -، یعنی نزدیک به دمای صفر مطلق که برای انجام آزمایش ضروری است پائین برده می‌شود.

در بالاترین درجه توان برخورددهنده، ذرات پروتون در هر ثانیه ۱۲۴۵ بار در حلقه شتاب‌دهنده می‌چرخند تا به سرعتی نزدیک به سرعت نور دست یابند. برای جلوگیری از برخورد ذرات با اتم‌های گاز درون برخورددهنده، آنها در دو لوله در خلاء بسیار بالا حرکت می‌کنند. این لوله‌ها به اندازه فضای بین سیاره‌ها خالی هستند. فشار در داخل برخورددهنده برابر است با 10^{-13} اتمسفر. این فشار ۱۰ بار کمتر از فشار روی کره ماه است. دو پرتوهای پروتون‌ها با یک حداکثر انرژی ۸ ترا الکترون ولت (8TeV) و با ۱۶ ترا الکترون ولت با هم برخورد می‌کنند (تصویر ۲). در مجموع در هر ثانیه یک میلیارد برخورد پروتون-پروتون رخ می‌دهد. وقتی پروتون‌های دو پرتو با هم برخورد می‌کنند، دمایی را ایجاد می‌کنند که ۱۰۰۰۰۰ بار بیش از دمای داخل خورشید، متمرکز در فضای بسیار ناچیز است. در عین حال دمای اطراف آهن‌رباها سردتر از دمای کیهان حدود منهای 270°C ($2/73$ کلوین) است.^۵

تصویر ۲: تصویر زیر نتیجه آزمایش برخورد پروتون-پروتون با انرژی ۸ ترا الکترون ولت در سال ۲۰۱۲ در آزمایشگاه سرن را نشان می‌دهد. در این برخورد، انرژی پرتوهای پروتون به ذرات ثانوی تبدیل و توسط آشکار سازها ثبت می‌شد.^۶

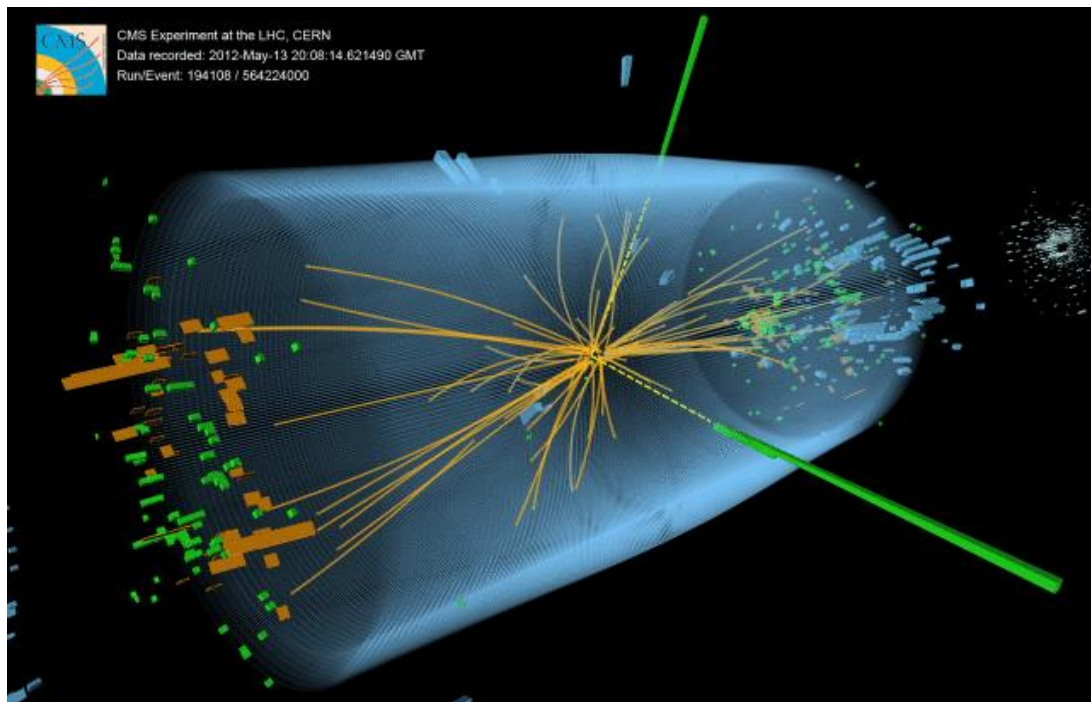


Figure 1. Event recorded with the CMS detector in 2012 at a proton-proton centre of mass energy of 8 TeV. The event shows characteristics expected from the decay of the SM Higgs boson to a pair of photons (dashed yellow lines and green towers). (Image: CERN)⁶

بی‌تردید کشف ذره هیگز در LHC و اعلام رسمی آن در تاریخ ۴ ژوئیه سال ۲۰۱۲ در سمیناری در آزمایشگاه سرن موفقیت بسیار بزرگی محسوب می‌شود. این ذره در دو طیف‌سنج جداگانه کشف شد. جرم آن برابر با 1.6×10^{-25} kg یا $2/230$ و جرم ساکن آن برابر با $125/11$ GeV است. ذره هیگز بدون بار الکتریکی (خنثی) و بدون اسپین، یعنی یک بوزون است. میدان هیگز یک میدان اسکالر است. طول عمر متوسط این ذره حدود 10^{-22} s است. این طول عمر نشان می‌دهد که ذره هیگز در لحظه بوجود آمدن به ذرات ثانوی فرومی‌پاشد (تصویر ۲). از این‌رو، ذره هیگز فقط از طریق این ذرات ثانوی قابل شناسایی است.

ذره بنیادی اولیه

کشف ذره هیگز به‌عنوان یک ذره بنیادی اولیه دارای جرم، درستی پیش‌بینی هیگز را در تمام اندازه‌گیری‌ها در محدوده خطای تجربی نشان داد. به این ترتیب روشن شد که ذرات اولیه، جرم خود را در برهمکنشی با میدان هیگز بدست می‌آورند.

به عنوان مثال جرم الکترون ناشی از قدرت واکنش الکترون با میدان هیگز است. در مقابل ذره فوتون به دلیل فقدان واکنش یا واکنش ضعیف با میدان هیگز بدون جرم یا تقریباً بدون جرم است. شاید فوتون نیز در برهمکنشی پی‌درپی با میدان هیگز جرم‌دار شود (۴).

با کشف ذره هیگز، ناتوایی مدل استاندارد نظریه کوانتوم در توضیح جرم ذرات اولیه که تا سال ۲۰۱۲ ادامه داشت، برطرف گردید. به عبارت دیگر، نظریه هیگز مدل استاندارد را توسعه داده و توان پیش‌بینی‌های دقیق برای نتایج آزمایش‌ها در برخوردهای ذرات بنیادی در انرژی‌های بالا را فراهم کرده است.

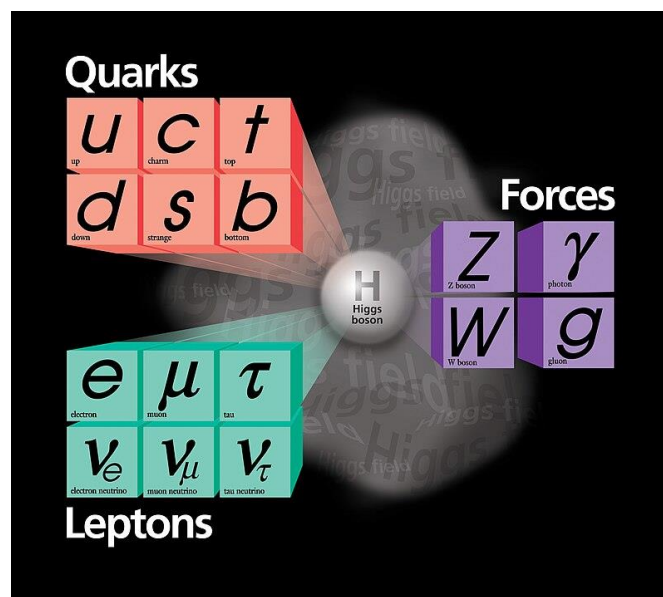
"کشف ذره هیگز، پنجره‌ی تازه‌ای را به منشاء جرم و با آن به ساختار عناصر اساسی طبیعت گشوده است."^۱

اگر مکانیسم هیگز یا هر نوع مکانیسم دیگری که به ذرات جرم دهد وجود نداشت، کیهان آن‌گونه که اکنون مشاهده می‌کنیم نبود. با این همه لازم به تاکید است که منشاء میدان هیگز و همین‌طور چپستی جرم همچنان بر ایمان ناشناخته شده است.

مسائلی مانند منشاء و چپستی انرژی^۷، منشاء میدان هیگز، چپستی جرم، ساختار خلاء کوانتومی^۸، مفهوم انفرماسیون در فیزیک^۹ و وحدت نیروهای اساسی در طبیعت^{۱۰}، از جمله مسائلی از خط مقدم دنیای فیزیکی هستند که بی‌پاسخ مانده‌اند.

جمع‌بندی

یافته‌های تجربی نشان می‌دهند که کیهان آکنده از یک میدان نامرئی، همگن و همسانگرد به نام 'میدان هیگز' است و وقتی یک ذره‌ی اولیه وارد کنش و واکنش با این میدان شود، جرم‌دار می‌شود (تصویر ۳).



تصویر ۳: نمایش رابطه ذرات بنیادی با میدان و ذره هیگز^{۱۱}

با کشف ذره هیگز، مدل استاندارد نظریه کوانتوم اکنون توان توضیح چرایی جرم‌دار شدن ذرات بنیادی را دارد. تصویر ۳ ذرات بنیادی مدل استاندارد متشکل از ۱۲ ذره اولیه (۶ ذره کوآرک‌ها و ۶ ذره لپتون‌ها) و ۳ ذره حامل ۳ نیرو و از ۴ نیروی اساسی فیزیک (سوی نیروی گرانش)، یعنی نیروی قوی هسته‌ای (g گلوئون)، نیروی ضعیف هسته‌ای (z- بوزون و w^\pm - بوزون) و نیروی الکترومغناطیسم (γ فوتون) را نشان می‌دهد. در پس‌زمینه این ذرات، میدان هیگز و ذره هیگز به تصویر درآمده است. مدل استاندارد حاضر، جرم برخی از این ذرات ۱۲ گانه را حاصل از کنش و واکنش آنها با این پس‌زمینه (بوزون هیگز) ارزیابی می‌کند.

کشف ذره هیگز، مشکل توضیح مدل استاندارد نظریه کوانتوم در رابطه با جرم ذرات اولیه را برطرف کرد. مکانیسم ارائه شده در نظریه هیگز توان پیش‌بینی مدل استاندارد را توسعه داده است. به این معنا که امکان پیش‌بینی دقیق نتایج آزمایش‌ها در برخوردهای ذرات بنیادی در انرژی‌های بالا را فراهم کرده است. با این همه، چرایی اندازه جرم ذره هیگز و چرایی جرم از جمله مسائلی هستند که کماکان بی‌پاسخ مانده‌اند.

مراجع

1. <https://cerncourier.com/a/the-origin-of-particle-masses/>
2. https://www.youtube.com/watch?v=ACD_qndPwws
3. Highfield, Roger (16 September 2008). "Large Hadron Collider: Thirteen ways to change the world". The Daily Telegraph. London. Archived from the original on 24 September 2009. Retrieved 10 October 2008.
3. <https://home.cern/resources/image/physics/higgs-collection-images-gallery>
4. https://www.weltmaschine.de/cern_und_lhc/lhc/wie_funktioniert_der_lhc
5. https://www.weltmaschine.de/cern_und_lhc/lhc/zahlen_und_fakten/
6. <https://home.cern/resources/image/physics/higgs-collection-images-gallery>
7. Hassan Bolouri, The big problems of the universe: The origin and the essence of energy
۷. حسن بلوری، 'مسائل بزرگ جهان هستی - منشاء و چرایی انرژی'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه ژوئیه سال ۲۰۲۴
8. Hassan Bolouri, Vacuum and its structure – a discussion about “Nothing”.
۸. حسن بلوری. 'خلاء و ساختار آن - بحثی در باره "هیچ"', منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه آوریل سال ۲۰۲۳
9. Hassan Bolouri, The concept of information - The concept of information in physics
۹. حسن بلوری. 'مفهوم اطلاعات - مفهوم اطلاعات در فیزیک'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه فوریه سال ۲۰۲۴
10. Hassan Bolouri, Quantum Cosmos: The Origin of the Universe
۱۰. حسن بلوری، 'کیهان کوانتومی: منشاء هستی'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه ژوئیه سال ۲۰۲۳
11. https://fa.wikipedia.org/wiki/%D8%A8%D9%88%D8%B2%D9%88%D9%86_%D9%87%D8%B%8C%DA%AF%D8%B2

XX