

مهدیه یوسفی

جهان از میلیاردها کهکشان ساخته شده است؛ اما پشت این عظمت، ذراتی پنهان شده‌اند که کوچک‌ترین اجزای سازنده‌ی هستی را تشکیل می‌دهند.

تبلیغات

تا به حال از خودتان پرسیده‌اید که جهان، با همه‌ی عظمت و پیچیدگی‌اش، از چه چیزی ساخته شده است؟ اگر سنگی را خرد کنیم و بعد دوباره تکه‌هایش را خرد کنیم و این کار را آنقدر ادامه بدهیم تا دیگر چیزی برای خرد شدن باقی نماند، به چه چیزی می‌رسیم؟ پاسخ این پرسش ما را به یکی از هیجان‌انگیزترین شاخه‌های فیزیک می‌برد: فیزیک ذرات بنیادی.

فهرست مطالب

•	ذرات بنیادی چیست؟
•	مدل استاندارد ذرات بنیادی؛ نظریه‌ای موفق با پرسش‌هایی بی‌پاسخ
•	فرمیون‌ها و بوزون‌ها؛ سنگ‌بنای ماده و نیرو در مدل استاندارد
•	نوترینو؛ چهارمین ذره‌ی ماده
•	سه‌نسلی بودن ذرات بنیادی؛ الگویی عجیب در دل فیزیک
•	چرا ذرات بنیادی همیشه به صورت چهارتایی ظاهر می‌شوند؟
•	سه نیروی بنیادی و ذرات حامل آن‌ها
•	بوزون هیگز؛ اکتشافی بزرگ
•	فیزیک بعد از مدل استاندارد ذرات بنیادی؛ گام بعدی چیست؟

ذرات بنیادی، کوچک‌ترین آجرهای سازنده‌ی جهان و حاملان نیرو در جهان هستند. این ذرات، پایه‌های تشکیل‌دهنده‌ی همه‌چیز در جهان هستند؛ از ستاره‌ها و کهکشان‌ها تا بدن ما، هوایی که تنفس می‌کنیم و نوری که به ما می‌تابد. اما این داستان فقط درباره‌ی کوچکی نیست.

این ذرات مستقیماً در برهم‌کنش‌های بنیادی مانند نیروی الکترومغناطیسی، نیروی هسته‌ای قوی و ضعیف و احتمالاً گرانش نقش دارند. شناخت این ذرات برای درک ساختار اتم‌ها، پایداری هسته‌ها، منشأ جرم و حتی شکل‌گیری جهان ضروری است. به‌همین دلیل، فیزیک ذرات بنیادی یکی از اساسی‌ترین شاخه‌های علم فیزیک به‌شمار می‌رود. در این مطلب، می‌خواهیم سفری جذاب و قابل فهم را به دنیای شگفت‌انگیز ذرات بنیادی آغاز کنیم: ذراتی که جهان را ساخته‌اند و هرچه بیشتر آن‌ها را بشناسیم، بیشتر خودمان و هستی را درک خواهیم کرد.

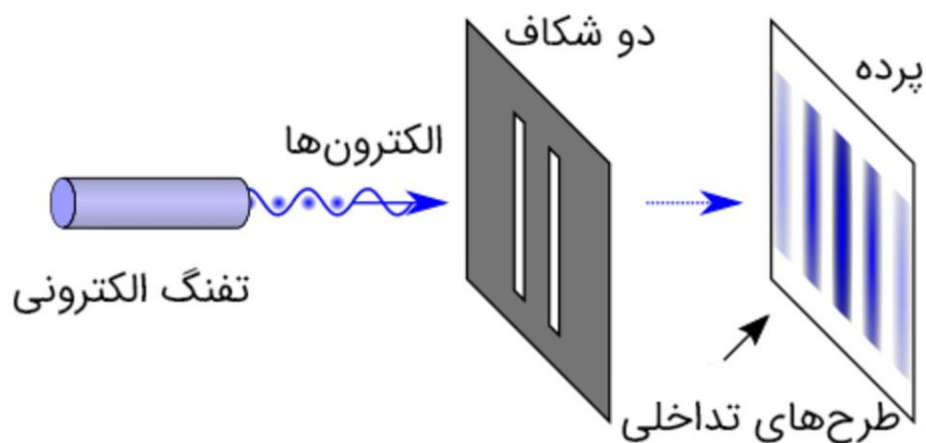
ذرات بنیادی چیست؟

ذرات بنیادی، کوچک‌ترین و ساده‌ترین اجزای سازنده‌ی طبیعت به‌شمار می‌آیند و تا به امروز، هیچ ساختار درونی‌ای برای آن‌ها پیدا نشده است. یعنی فیزیکدانان آن‌ها را به‌عنوان نقاطی بدون بُعد در نظر می‌گیرند که فضایی اشغال نمی‌کنند. بیش از دو هزار سال پیش، دموکریت، فیلسوف یونانی، اصطلاح اتم را برای کوچک‌ترین جزء ماده به‌کار برد؛ ذره‌ای که دیگر قابل تقسیم نبود. او باور داشت اگر ماده را بارها نصف کنیم، درنهایت به واحدی می‌رسیم که دیگر تجزیه‌پذیر نیست. این تصور، آغاز سفری بود که امروز ما را به فیزیک ذرات بنیادی رسانده است.



دموکریت از اصطلاح اتم برای کوچک‌ترین بخش سازنده‌ی ماده استفاده کرد

اما ذره‌ی بنیادی دقیقاً چیست؟ در نگاه **فیزیک کوانتوم**، ذرات صرفاً اجسام مادی و نقطه‌ای نیستند، بلکه رفتارشان تلفیقی از خاصیت موج و ذره است. این رفتار دوگانه‌ی موج-ذره، در پدیده‌هایی مانند آزمایش دوشکاف به‌وضوح مشاهده می‌شود و نشان می‌دهد که ذرات، ماهیتی فراتر از تصور فیزیک کلاسیک دارند.



آزمایش دو شکاف، تأییدی بر رفتار دوگانه‌ی ذرات

[Github](#)

برای توصیف دقیق‌تر ذرات، نظریه‌ی میدان کوانتومی ارائه شد؛ نظریه‌ای که زمان و فضا را به شکل یکپارچه در نظر می‌گیرد و ذرات را به عنوان موج‌هایی گسسته در میدان‌هایی در حال نوسان توصیف می‌کند. اگر انرژی کافی به این میدان‌ها داده شود، برانگیختگی‌هایی ایجاد می‌شوند که ما آن‌ها را به عنوان «ذره» شناسایی می‌کنیم. حتی در خلأ، این میدان‌ها بی‌حرکت نیستند و نوسانات دائمی آن‌ها می‌تواند باعث پیدایش ذرات مجازی شود.

شبیه‌سازی نوسانات میدان کوانتومی در خلأ

[Wikipedia](#)

در نگاه امروز فیزیک، ذره‌ی بنیادی چیزی جز یک موج گسسته و موقت در یک میدان کوانتومی نیست. ما تاکنون ذرات بسیاری را شناسایی کرده‌ایم، اما ممکن است همچنان لایه‌های عمیق‌تری در انتظار کشف باشند. فیزیک، مثل صحنه‌ی جرم، به سرنخ‌هایی نیاز دارد که گاه پیدا و گاه پنهان هستند، اما همیشه ما را به داستان بزرگ‌تری درباره‌ی جهان هدایت می‌کنند.

مدل استاندارد ذرات بنیادی؛ نظریه‌ای موفق با پرسش‌هایی بی‌پاسخ

حدود چهارصد سال پیش، [گالیله](#) نخستین گام‌ها را برای شناسایی قوانین بنیادین طبیعت برداشت، قوانینی که امروز آن‌ها را پایه‌های فیزیک مدرن می‌دانیم. قرن‌ها پس از او، فیزیکدانان با تکیه بر نظریه‌های پیشرفته و آزمایش‌های دقیق، توانستند ساختار ماده را با جزئیاتی بی‌سابقه بررسی کنند. نتیجه‌ی این تلاش‌ها، شکل‌گیری نظریه‌ی جامعی به نام مدل استاندارد فیزیک ذرات (Standard Model of Fundamental Particles) بود؛ چارچوبی که دقیق‌ترین تصویر موجود از رفتار ذرات بنیادی و نیروهای میان آن‌ها را در اختیار ما قرار می‌دهد.

ذرات به وجود آورنده‌ی ماده (فرمیون‌ها)			ذرات حامل نیرو (بوزون‌ها)	
I	II	III		
جرم بار اسپین				
$\approx 2.2 \text{ MeV}$ $+2/3$ $1/2$	$\approx 1.3 \text{ GeV}$ $+2/3$ $1/2$	$\approx 173 \text{ GeV}$ $+2/3$ $1/2$	0 0 1	$\approx 125 \text{ GeV}$ 0 0
u بالا	c افسون	t سر	g گلوئون	H هیگز
$\approx 4.7 \text{ MeV}$ $-1/3$ $1/2$	$\approx 96 \text{ MeV}$ $-1/3$ $1/2$	$\approx 4.2 \text{ GeV}$ $-1/3$ $1/2$	0 0 1	
d پایین	s شگفت	b ته	γ فوتون	
$\approx 0.511 \text{ MeV}$ -1 $1/2$	$\approx 106 \text{ MeV}$ -1 $1/2$	$\approx 1.777 \text{ GeV}$ -1 $1/2$	$\approx 80.4 \text{ GeV}$ ± 1 1	
e الکترون	μ میون	τ تاو	W بوزون W	
$< 1.0 \text{ eV}$ 0 $1/2$	$< 0.17 \text{ eV}$ 0 $1/2$	$< 18.2 \text{ MeV}$ 0 $1/2$	$\approx 91.2 \text{ GeV}$ 0 1	
ν_e الکترون نوترینو	ν_μ میون نوترینو	ν_τ تاو نوترینو	Z بوزون Z	

کوارک‌ها

لپتون‌ها

بوزون‌های پیمانه‌ای

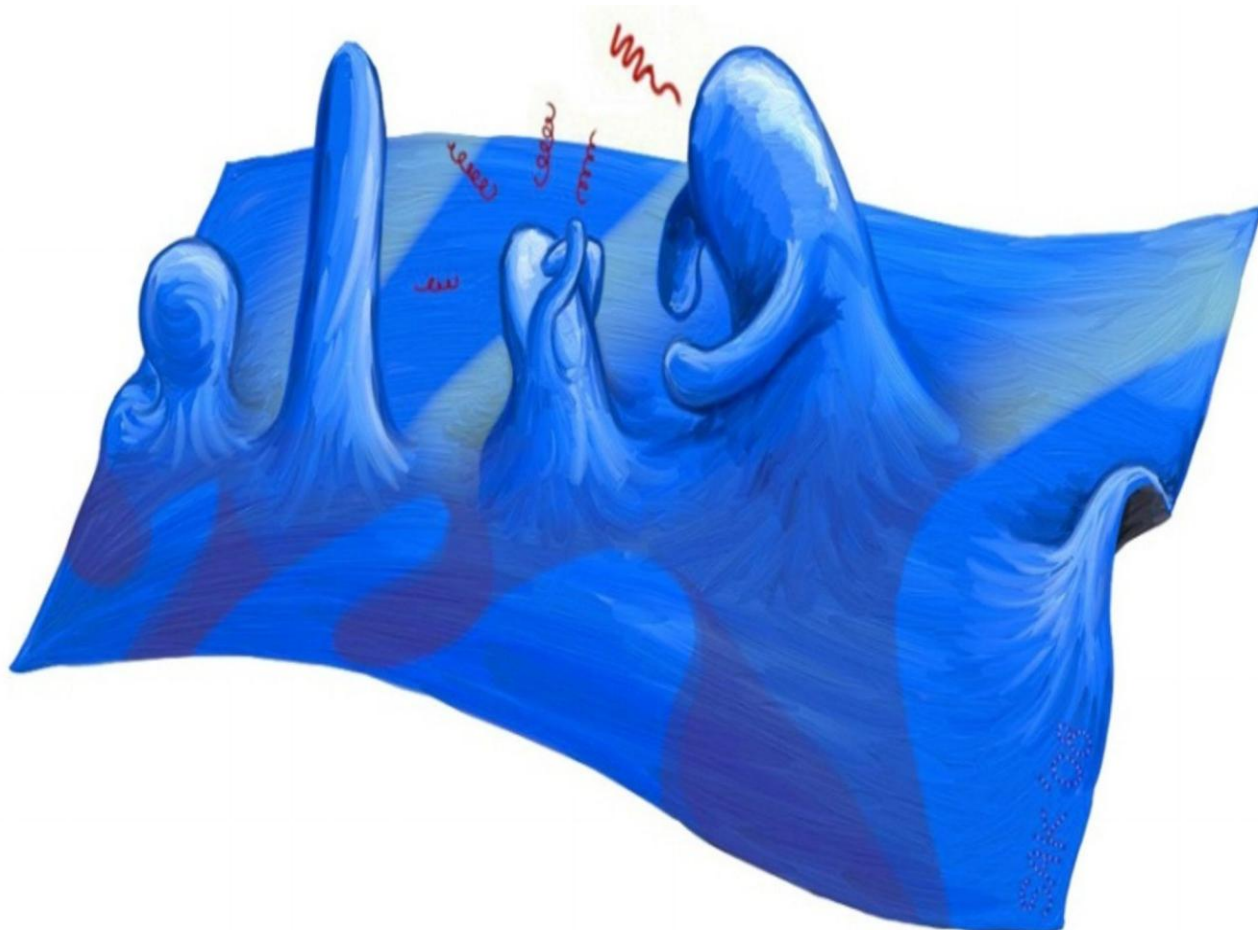
بوزون‌های برداری

بوزون‌های اسکالر

مدل استاندارد، ذرات بنیادی شناخته‌شده‌ی طبیعت را در سه دسته‌ی اصلی طبقه‌بندی می‌کند: فرمیون‌ها (سازنده‌ی ماده)، بوزون‌ها (حامل نیروها) و بوزون هیگز. کوارک‌ها و لپتون‌ها در سمت چپ، ذرات سازنده‌ی ماده هستند که با ترکیب آن‌ها، اتم‌ها شکل می‌گیرند. در سمت راست، بوزون‌هایی دیده می‌شوند که نیروی الکترومغناطیسی، هسته‌ای قوی و هسته‌ای ضعیف را منتقل می‌کنند. ذره‌ی هیگز، که در سال ۲۰۱۲ کشف شد، نقشی کلیدی در ایجاد جرم برای ذرات دارد و تکمیل‌کننده‌ی این جدول نظری است. این چارچوب، تا امروز دقیق‌ترین توصیف علمی ما را از دنیای زیراتمی ارائه می‌دهد

Tiks

براساس این مدل، تمام مواد موجود در جهان از ۱۲ ذره‌ی بنیادی ساخته شده‌اند. این ذرات تحت تأثیر سه نیروی اصلی طبیعت، الکترومغناطیسی، هسته‌ای ضعیف و هسته‌ای قوی، با یکدیگر برهم‌کنش می‌کنند. این نیروها ساختار اتم‌ها را شکل می‌دهند، رفتار ذرات را در مقیاس زیراتمی تعیین می‌کنند و نقش اساسی در پایداری ماده دارند؛ اما اتصال نهایی این سیستم پیچیده، به کمک ذره‌ای ویژه به نام بوزون هیگز انجام می‌شود. بوزون هیگز توضیح می‌دهد که چرا برخی از ذرات جرم دارند و برخی ندارند. این ذره در واقع سازوکار جرم‌دهی به ذرات را در دل میدان هیگز فراهم می‌کند. مدل استاندارد به زبانِ نظریه‌ی میدان‌های کوانتومی نوشته شده و به ما می‌گوید که ماده در سطح بنیادی، واقعاً از ذره ساخته نشده است. در واقع، آنچه در دل طبیعت وجود دارد، میدان‌هایی هستند که شبیه به یک سیال، تمام فضای جهان را پر کرده‌اند.



در نگاه فیزیک مدرن، جهان از ذرات ساخته نشده، بلکه از میدان‌هایی تشکیل شده است که در سراسر فضا گسترده شده‌اند. برآمدگی‌های این میدان‌ها، همان چیزی است که ما به صورت «ذره» مشاهده می‌کنیم.

Damtp

این میدان‌ها با نظم‌ی شگفت‌انگیز و هماهنگ، در چارچوب قوانین فیزیک با یکدیگر برهم‌کنش دارند و آنچه ما به صورت ذرات می‌بینیم، چیزی جز اثرات برهم‌کنش‌های میدان‌ها نیست. با اینکه واقعیت در سطح بنیادین ماهیتی میدان‌محور دارد، برای ساده‌سازی و درک بهتر مدل استاندارد، معمولاً از زبان ذرات استفاده می‌شود.

مدل استاندارد، با دقتی بسیار بالا، رفتار ذرات را تا مقیاسی حدود یک‌هزارم شعاع هسته‌ای اتم توضیح می‌دهد؛ در ابعادی بسیار کوچک که حتی با پیشرفته‌ترین میکروسکوپ‌ها هم نمی‌توان دید. این نظریه موفق شده است بیشتر پدیده‌های شناخته‌شده‌ی زیراتمی را به‌درستی پیش‌بینی و توصیف کند، از برهم‌کنش‌های میان کوارک‌ها تا واپاشی ذرات ناپایدار. اما با تمام موفقیت‌هایش، هنوز پرسش‌هایی بی‌پاسخ باقی مانده‌اند. به عنوان مثال، مدل استاندارد تنها سه نیروی اصلی طبیعت، الکترومغناطیسی، هسته‌ای قوی و هسته‌ای ضعیف، را توصیف می‌کند، اما نیروی چهارم، یعنی گرانش، در این چارچوب جایی ندارد. از سوی دیگر، پدیده‌هایی مانند ماده‌ی تاریک، انرژی تاریک و نوسانات نوترینوها، با وجود شواهد تجربی قوی، در مدل استاندارد توضیح روشنی ندارند. همین کاستی‌ها باعث شده‌اند تا فیزیکدانان به دنبال نظریه‌ای کامل‌تر بروند که بتواند فراتر از مرزهای مدل استاندارد، تصویری جامع‌تر از جهان ارائه دهد.



بسیاری از پژوهشگران حوزه‌ی نظری فیزیک تلاش می‌کنند تا این سه نیروی الکترومغناطیسی، هسته‌ای قوی و هسته‌ای ضعیف را با نیروی چهارم طبیعت، یعنی گرانش، در یک نظریه‌ی واحد به نام «نظریه‌ی همه‌چیز» (Theory of Everything) ترکیب کنند. اگرچه فعلاً این نظریه در مرحله‌ی پیشنهاد و ریاضی باقی مانده است، نشانه‌هایی امیدوارکننده وجود دارند که شاید در آینده، جهان را با دقت و سادگی بی‌سابقه‌ای توصیف کند.

فرمیون‌ها و بوزون‌ها؛ سنگ بنای ماده و نیرو در مدل استاندارد

وقتی شروع به ساختن مدل استاندارد می‌کنیم، با تعداد زیادی از ذرات روبه‌رو می‌شویم که هر کدام اسم خاصی دارند؛ اسم‌هایی که ممکن است در نگاه اول کمی گیج‌کننده به نظر برسند. اما نگران نباشید؛ در بین تمام دسته‌بندی‌های مختلف، فقط یک تقسیم‌بندی واقعاً حیاتی و مهم وجود دارد: هر ذره‌ای یا فرمیون است یا بوزون.

فرمیون‌ها، مانند کوارک‌ها و لپتون‌هایی مثل الکترون، میون و نوترینو همان ذرات ماده هستند، اجزایی که خود ماده را می‌سازند. در مقابل، بوزون‌ها ذراتی هستند که نیروها را منتقل می‌کنند، یعنی نقش واسطه، بین ذرات ماده را دارند. تفاوت اصلی این دو گروه، ریشه در قوانین دنیای کوانتومی دارد.



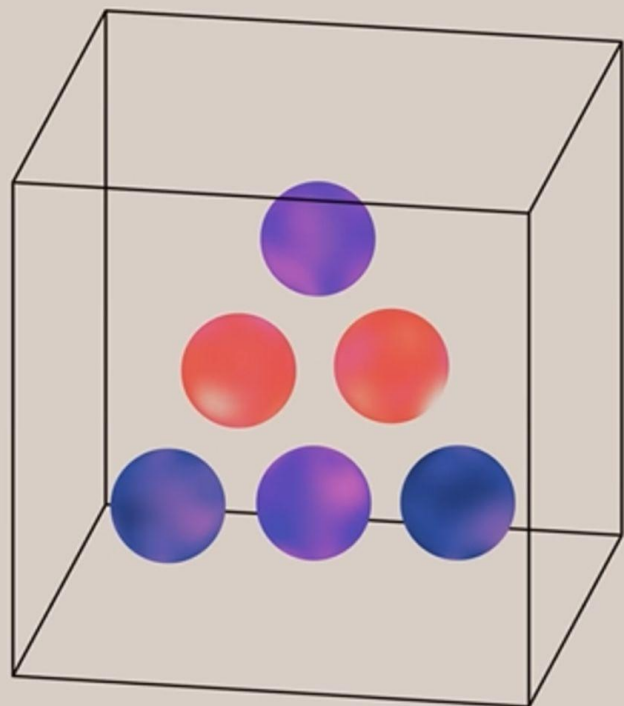
بوزون‌ها در جدول مدل استاندارد ذرات بنیادی

کوارک‌ها	$\approx 2.2 \text{ MeV}$ $+\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u بالا	$\approx 1.3 \text{ GeV}$ $+\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c افسون	$\approx 173 \text{ GeV}$ $+\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t سر
	$\approx 4.7 \text{ MeV}$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d پایین	$\approx 96 \text{ MeV}$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s شگفت	$\approx 4.2 \text{ GeV}$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b ته
	$\approx 0.511 \text{ MeV}$ -1 $\frac{1}{2}$ e الکترون	$\approx 106 \text{ MeV}$ -1 $\frac{1}{2}$ μ میون	$\approx 1.777 \text{ GeV}$ -1 $\frac{1}{2}$ τ تاو
لپتون‌ها	$< 1.0 \text{ eV}$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e الکترون نوترینو	$< 0.17 \text{ eV}$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ میون نوترینو	$< 18.2 \text{ MeV}$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ تاو نوترینو

فرمیون‌ها در جدول مدل استاندارد ذرات بنیادی

فرمیون‌ها باید از قانونی به نام اصل طرد پائولی پیروی کنند. این قانون به زبان ساده می‌گوید: «دو فرمیون نمی‌توانند دقیقاً در یک حالت کوانتومی یکسان قرار بگیرند». همین ویژگی باعث می‌شود که فرمیون‌ها بتوانند ساختارهای پیچیده‌ای مانند اتم‌ها، مولکول‌ها و در نهایت تمام مواد آشنای اطراف ما را تشکیل دهند.

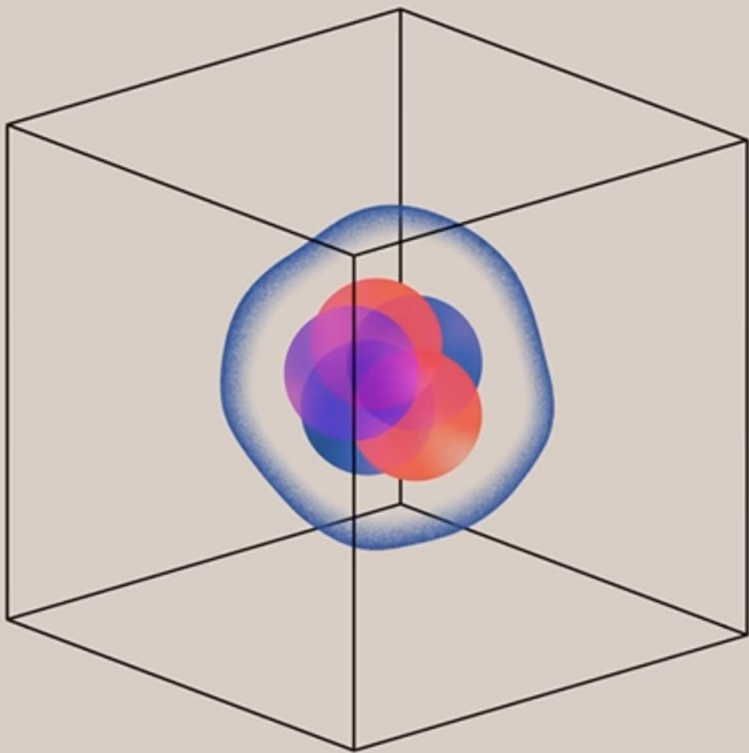
فرمیون‌ها ذرات سازنده‌ی ماده



فرمیون‌ها، دسته‌ای از ذرات بنیادی هستند که نقش اصلی در ساختار ماده دارند. کوارک‌ها و لپتون‌ها، از جمله الکترون، میون و نوترینو، همگی از نوع فرمیون هستند و با کنار هم قرار گرفتن آن‌ها، تمام مواد شناخته‌شده‌ی جهان شکل می‌گیرند.

بوزون‌ها اما داستان متفاوتی دارند. آن‌ها تابع این محدودیت نیستند و می‌توانند هرچقدر که بخواهند در یک حالت یا نقطه با هم جمع شوند. این ویژگی باعث می‌شود بوزون‌ها بتوانند به عنوان حامل نیروها عمل کنند؛ نیروهای مثل الکترومغناطیسی یا هسته‌ای.

بوزون‌ها ذرات حامل نیرو



بوزون‌ها ذرات بنیادی‌ای هستند که نیروی بین فرمیون‌ها را منتقل می‌کنند. هر یک از نیروهای طبیعت—مانند نیروی الکترومغناطیسی، هسته‌ای قوی و ضعیف—به‌وسیله‌ی بوزونی خاص اعمال می‌شوند، از جمله فوتون، گلوئون، بوزون W و Z .

فعالاً بیایید از فرمیون‌ها شروع کنیم؛ یعنی ذراتی که ماده‌ی قابل مشاهده‌ی جهان را تشکیل می‌دهند.

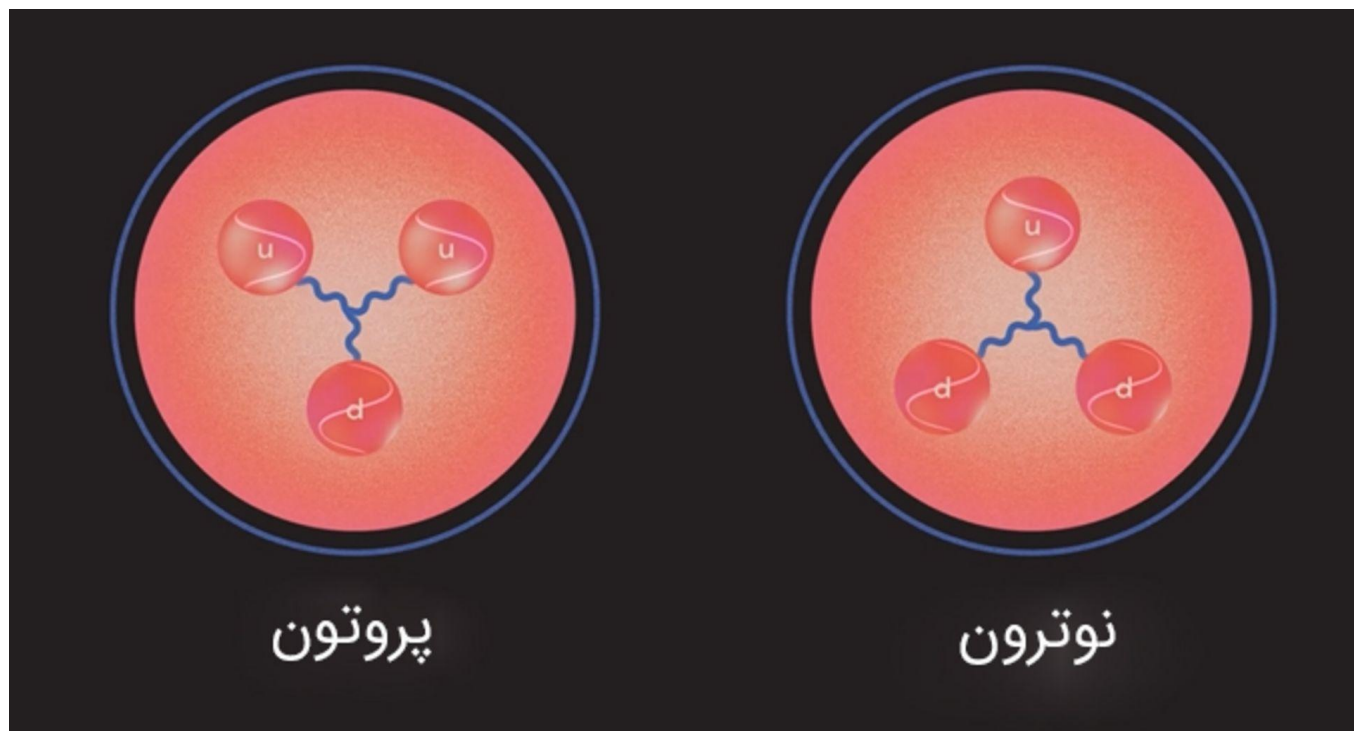
اگر بخواهیم دقیق‌تر نگاه کنیم، هر آنچه شما، من، زمین، ستاره‌ها و کیهانشان‌ها را می‌سازد، در نهایت به سه ذره‌ی بنیادی بازمی‌گردد: الکترون، کوارک بالا (up) و کوارک پایین (down).



سه ذره‌ی بنیادی اصلی

کوارک‌ها، از بنیادی‌ترین ذرات شناخته‌شده هستند که هرگز به‌تنهایی در طبیعت دیده نمی‌شوند. آن‌ها همیشه در گروه‌های دوتایی یا سه‌تایی ظاهر و با نیروی هسته‌ای قوی به‌هم متصل می‌شوند. این نیروی قدرتمند، باعث می‌شود کوارک‌ها در کنار هم، ذرات مرکبی مثل پروتون و نوترون را تشکیل دهند.

پروتون‌ها و نوترون‌ها، که اجزای اصلی هسته‌ی اتم هستند، هرکدام از سه کوارک ساخته شده‌اند. پروتون از دو کوارک بالا و یک کوارک پایین تشکیل شده است، درحالی‌که نوترون از دو کوارک پایین و یک کوارک بالا ساخته می‌شود.

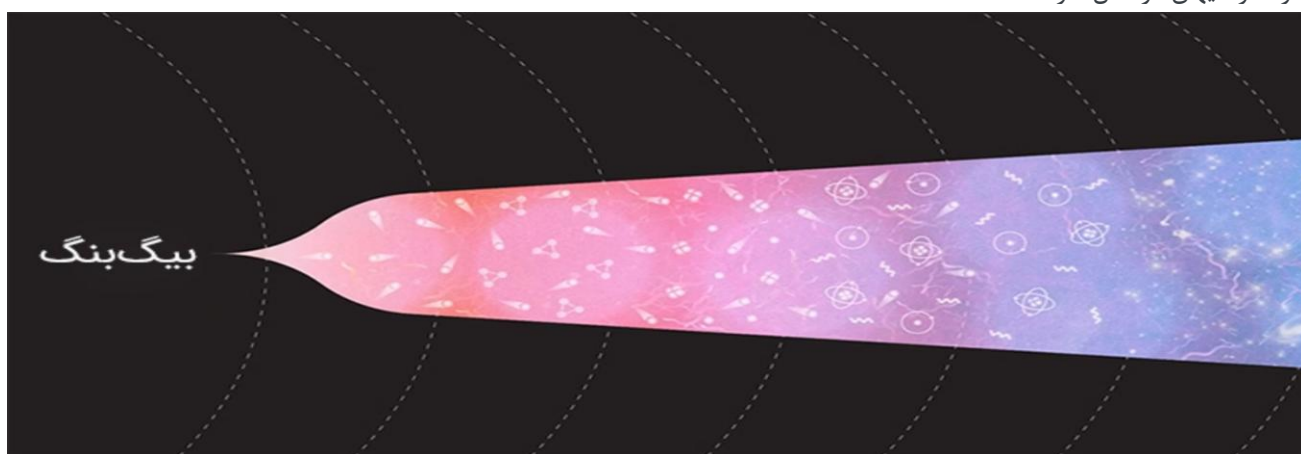


ساختار داخلی نوترون و پروتون

پروتون‌ها و نوترون‌ها با قرار گرفتن در کنار هم، هسته‌ی اتم را تشکیل می‌دهند. با اضافه کردن الکترون، ساختار اتم کامل می‌شود. در ادامه، میلیاردها اتم با آرایش‌های مختلف به هم متصل می‌شوند و مواد پیچیده‌تری مانند مولکول‌ها، سلول‌ها و تمام اجسام جهان، به وجود می‌آیند. شگفت‌انگیز است که همه‌ی این تنوع‌های خیره‌کننده و پیچیدگی‌های دنیای ما، از همین سه ذره‌ی ساده پدید آمده‌اند؛ ذراتی که فقط با چینش‌های متفاوت کنار هم قرار گرفته‌اند.

نوترینو؛ چهارمین ذره‌ی ماده

در ادامه، نوبت به چهارمین ذره‌ی ماده می‌رسد؛ ذره‌ای به نام نوترینو. نوترینو با بقیه‌ی ذرات فرق دارد. این ذره، فوق‌العاده سبک است و تقریباً با هیچ چیز برهم‌کنش ندارد. اکنون که دارید این جمله را می‌خوانید، چیزی حدود ۱۰۰ تریلیون نوترینو از درون بدنتان عبور کرده‌اند، بدون اینکه کوچک‌ترین اثری بگذارند. بیشتر این نوترینوها از خورشید آمده‌اند، اما بسیاری از آن‌ها از نخستین ثانیه‌های پس از بیگ‌بنگ تاکنون، بی‌وقفه در سراسر کیهان در حال حرکت هستند.

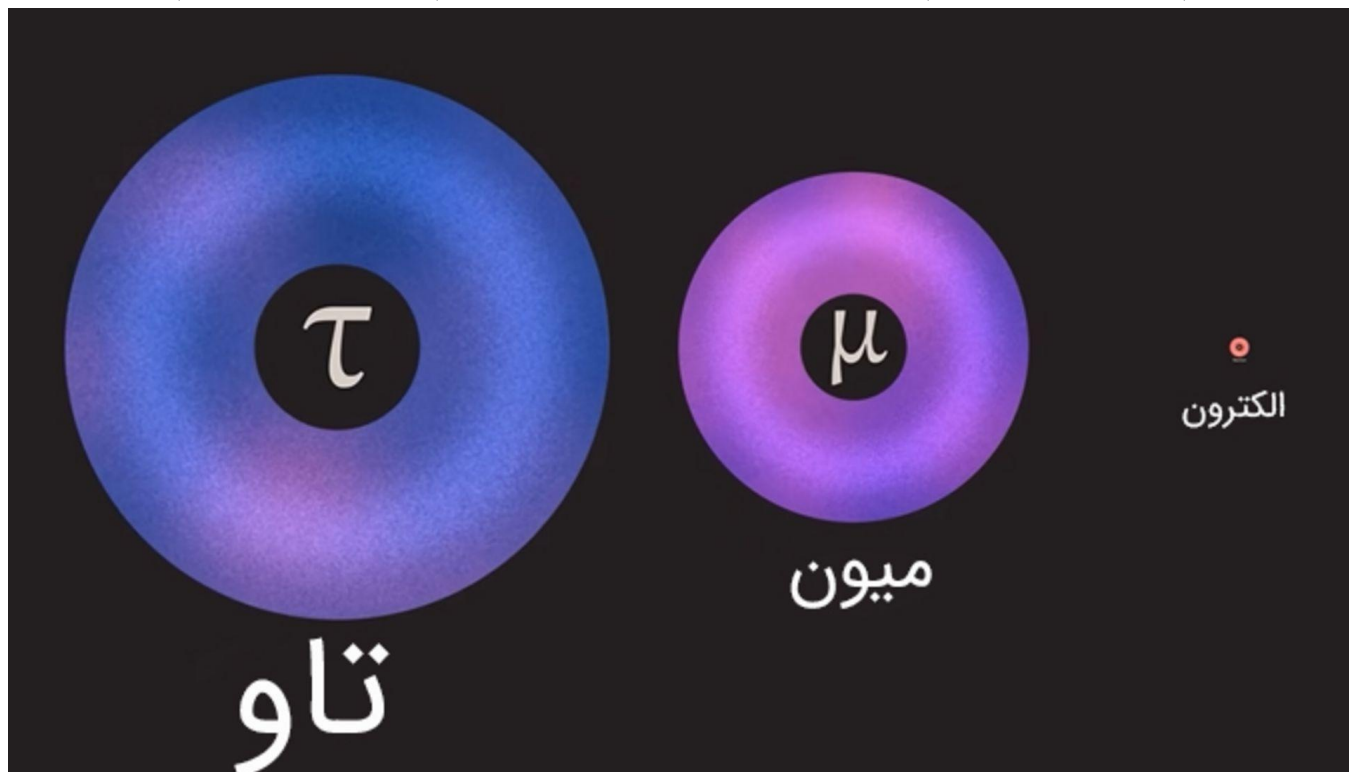


بسیاری از نوترینوها از لحظه‌ی بیگ‌بنگ تاکنون در سراسر کیهان پخش شده‌اند

بنابراین، چهار ذره‌ی ماده داریم: سه تا از آن‌ها بدن ما، زمین، حیوانات و هر آنچه را که می‌شناسیم، می‌سازند و ذره‌ی چهارم، نوترینو، ذره‌ای عجیب و فراری است که بی‌صدا و بی‌اثر، همیشه در میان ما جریان دارد.

سه نسلی بودن ذرات بنیادی؛ الگویی عجیب در دل فیزیک

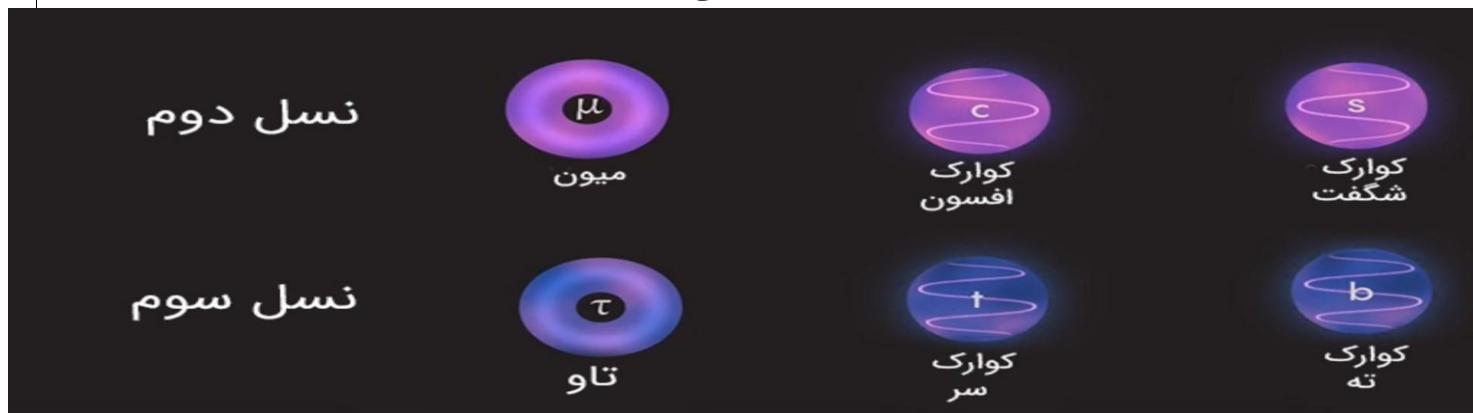
از اینجا به بعد، ماجرا کمی عجیب‌تر می‌شود. طبیعت به چهار ذره‌ای که تا اینجا درباره‌ی آن‌ها صحبت کردیم، بسنده نکرد و بنا به دلایلی که هنوز به‌طور کامل درک نکرده‌ایم، تصمیم گرفته است که مجموعه‌ی چهار ذره‌ای الکترون، نوترینو، کوارک بالا و کوارک پایین را دوبار دیگر نیز تکرار کند. به بیان دیگر، ما فقط یک نوع الکترون نداریم، بلکه سه نسخه‌ی متفاوت از آن وجود دارند. در کنار الکترون که آن را خوب می‌شناسیم، دو ذره‌ی دیگر به‌نام «میون» و «تاو» نیز داریم. این دو ذره از نظر رفتاری تقریباً مشابه الکترون هستند؛ بار منفی دارند و در برهم‌کنش‌های مشابهی شرکت می‌کنند. اما یک تفاوت مهم بین آن‌ها وجود دارد: جرم. میون حدود ۲۰۰ برابر سنگین‌تر از الکترون و جرم تاو تقریباً ۳۵۰۰ برابر جرم الکترون است.



دو نسخه‌ی متفاوت از الکترون به‌نام‌های میون و تاو که فقط از نظر جرم متفاوت هستند.

چرا طبیعت این نسخه‌های سنگین‌تر را ساخته است؟ هنوز پاسخ قاطعی برای این پرسش نداریم. این مسئله یکی از رازهای بازنشده‌ی فیزیک ذرات محسوب می‌شود؛ رازهایی که فیزیکدان‌ها همچنان در تلاش هستند تا آن‌ها را کشف و درک کنند.

همین الگوی سه‌نسلی که برای الکترون‌ها وجود دارد، در مورد کوارک‌ها هم دیده می‌شود. کوارک پایین (Down Quark) دو نسخه‌ی سنگین‌تر به نام «کوارک شگفت» (Strange Quark) و «کوارک ته» (Bottom Quark) دارد و کوارک بالا (up quark) نیز با دو نسخه‌ی سنگین‌تر به‌نام «کوارک افسون» (Charm Quark) و «کوارک سر» (Top Quark) تکمیل می‌شود.



در مورد نوترینوها نیز همین ترتیب تکرار می‌شود. به جای یک نوع نوترینو، سه نوع متفاوت وجود دارند: نوترینوی الکترونی، نوترینوی میونی و نوترینوی تاوی. این ذرات نیز مانند همتایان خود در سه نسل طبقه‌بندی می‌شوند، هر چند به دلیل برهم‌کنش بسیار ضعیفشان با ماده، شناسایی آن‌ها به شدت دشوار است.

نکته‌ی جالب اینجاست که ذرات نسل دوم و سوم در دنیای روزمره‌ی ما حضور ندارند. این ذرات بسیار ناپایدار هستند و تنها در شرایط خاص، مثلاً در برخوردهای پرنرژی مانند آنچه در شتاب‌دهنده‌های ذرات اتفاق می‌افتد، به وجود می‌آیند. پس از تولید، آن‌ها در کسری از ثانیه به ذرات سبک‌تر و پایدارتر نسل اول تجزیه می‌شوند؛ یعنی به الکترون، کوارک بالا یا کوارک پایین.

ساختار سه‌نسلی ذرات بنیادی یکی از شگفت‌انگیزترین الگوهای فیزیک ذرات است

فیزیکدان‌ها مطمئن هستند که این ذرات وجود دارند و توانسته‌اند آن‌ها را در شتاب‌دهنده‌های ذرات شناسایی کنند. حتی در برخی آزمایش‌ها، موفق شده‌اند مسیر حرکت این ذرات را به صورت تصویری ثبت کنند، ردهایی ناپایدار اما قابل ردیابی که از دل برخوردهای پرنرژی بیرون می‌آیند. بنابراین، هر چند ما در زندگی روزمره فقط با ذرات نسل اول سروکار داریم، اما برای درک کامل قوانین طبیعت، شناخت این ساختار سه‌نسلی در فیزیک ذرات کاملاً ضروری است.

چرا ذرات بنیادی همیشه به صورت چهارتایی ظاهر می‌شوند؟

شاید برایتان این سؤال پیش آمده باشد که چرا ذرات ماده همیشه به صورت مجموعه‌هایی چهارتایی ظاهر می‌شوند. چرا هر نسل از ذرات بنیادی دقیقاً چهار ذره دارد؟ این یکی از ویژگی‌های جالب مدل استاندارد است.

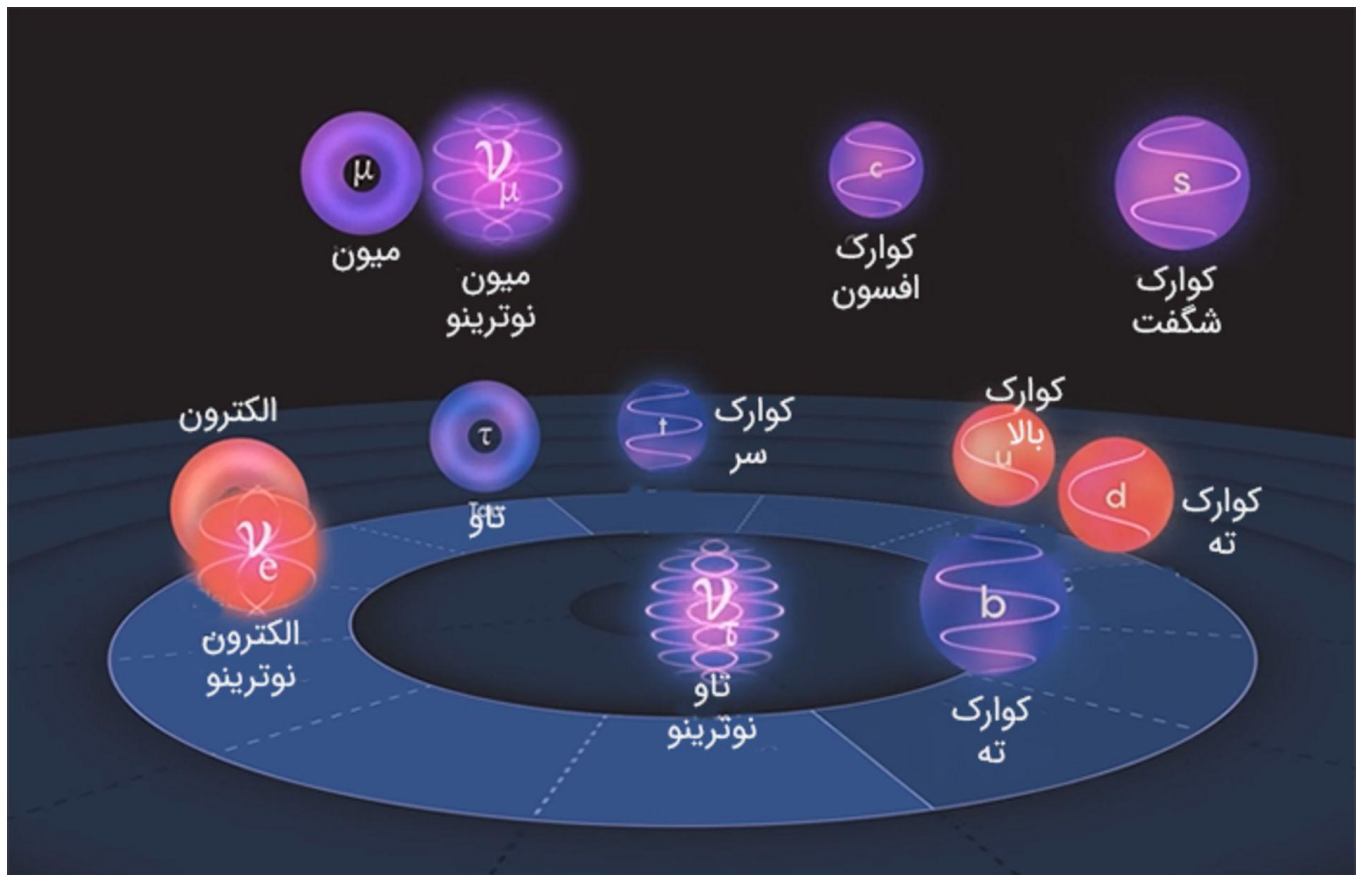
بخش‌هایی از این ساختار را به خوبی درک کرده‌ایم. به عنوان مثال، می‌دانیم که وجود این چهار ذره در کنار هم، یک الزام ریاضی در دل نظریه است.

مدل استاندارد برای آنکه از نظر ریاضی پایدار و سازگار باقی بماند، نیاز دارد که این ذرات همیشه با همدیگر ظاهر شوند.

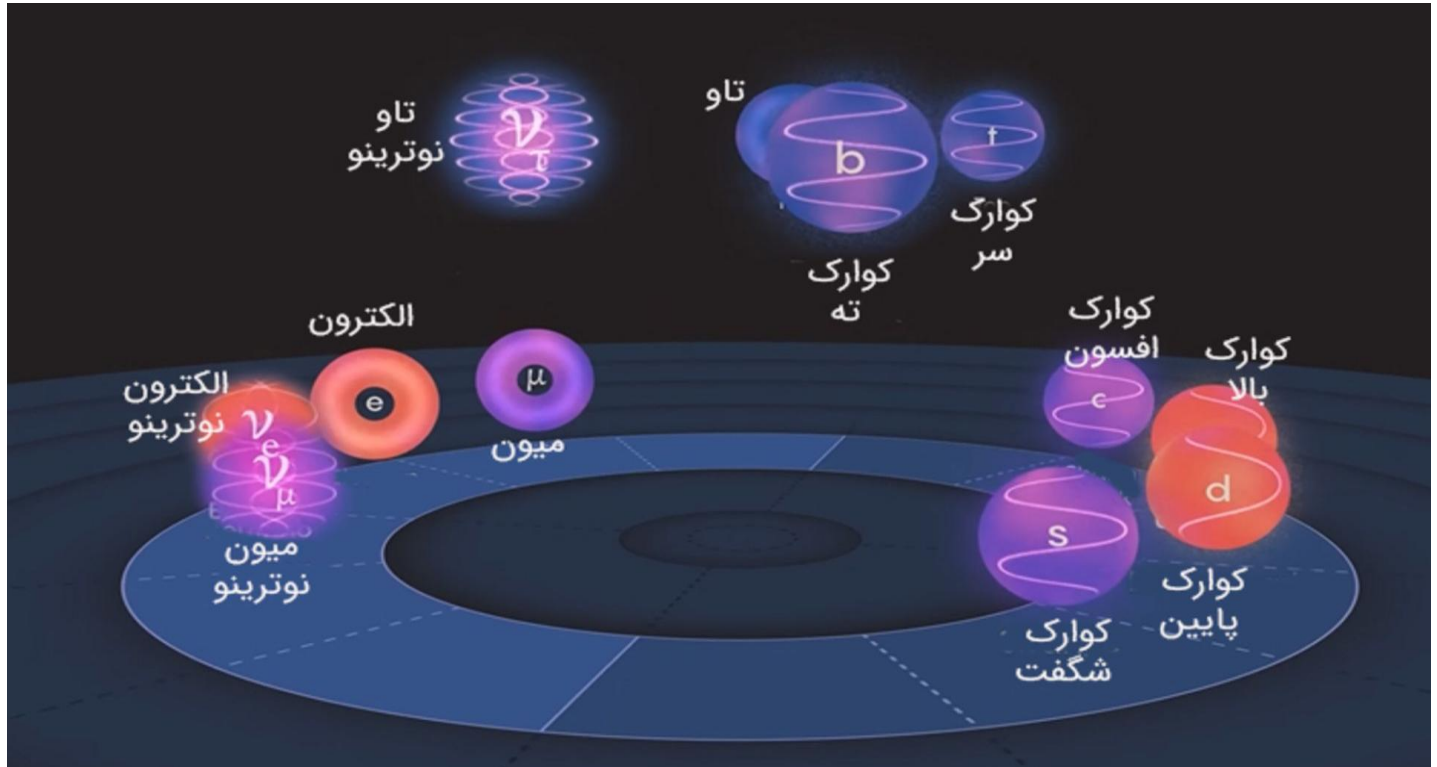
به زبان ساده، نمی‌توان یکی از این ذرات بنیادی را به تنهایی در طبیعت داشت؛ اگر یکی باشد، سه‌تای دیگر هم باید باشند. حضورشان به نوعی به یکدیگر گره خورده است.



اولین گروه ۴ تایی ذرات بنیادی



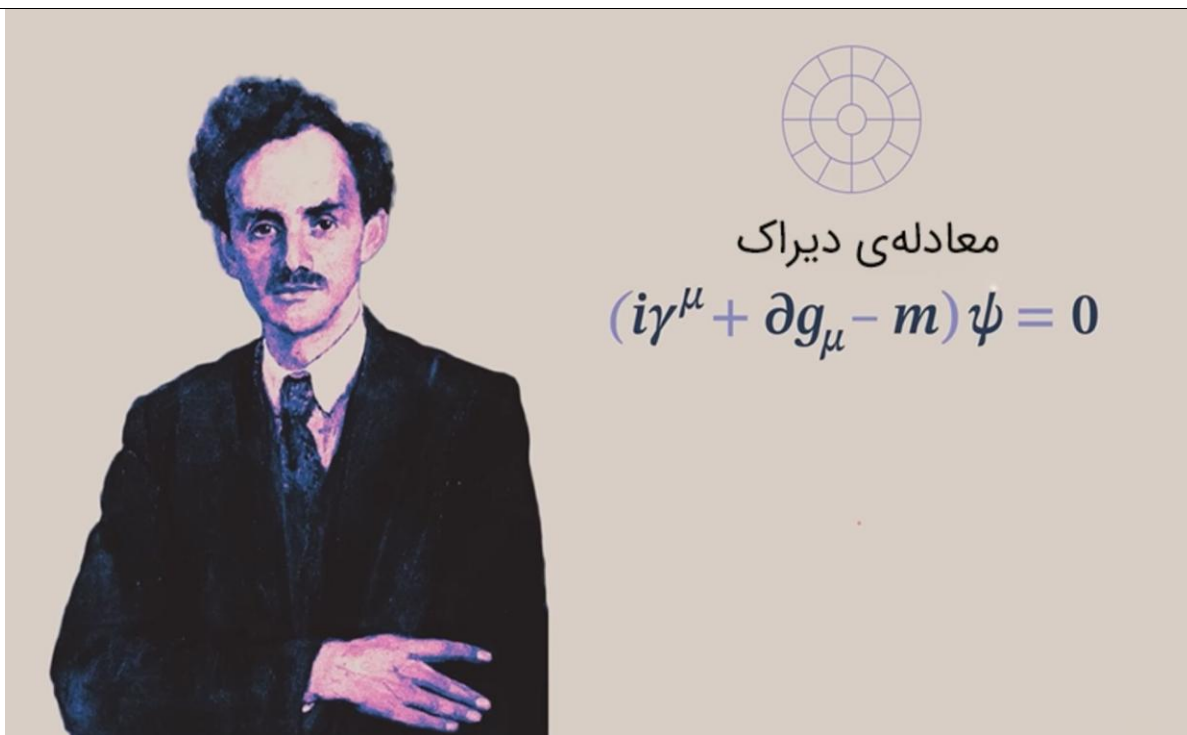
دومین گروه ۴ تایی ذرات بنیادی



دومین گروه ۴ تایی ذرات بنیادی

فیزیکدانان هنوز نمی‌دانند چرا این ذرات بنیادی دقیقاً در سه نسل ظاهر می‌شوند، نه کمتر و نه بیشتر. این موضوع یکی از رازهای حل‌نشده‌ی مدل استاندارد محسوب می‌شود و تاکنون هیچ توضیح قطعی و پذیرفته‌شده‌ای برای آن ارائه نشده است.

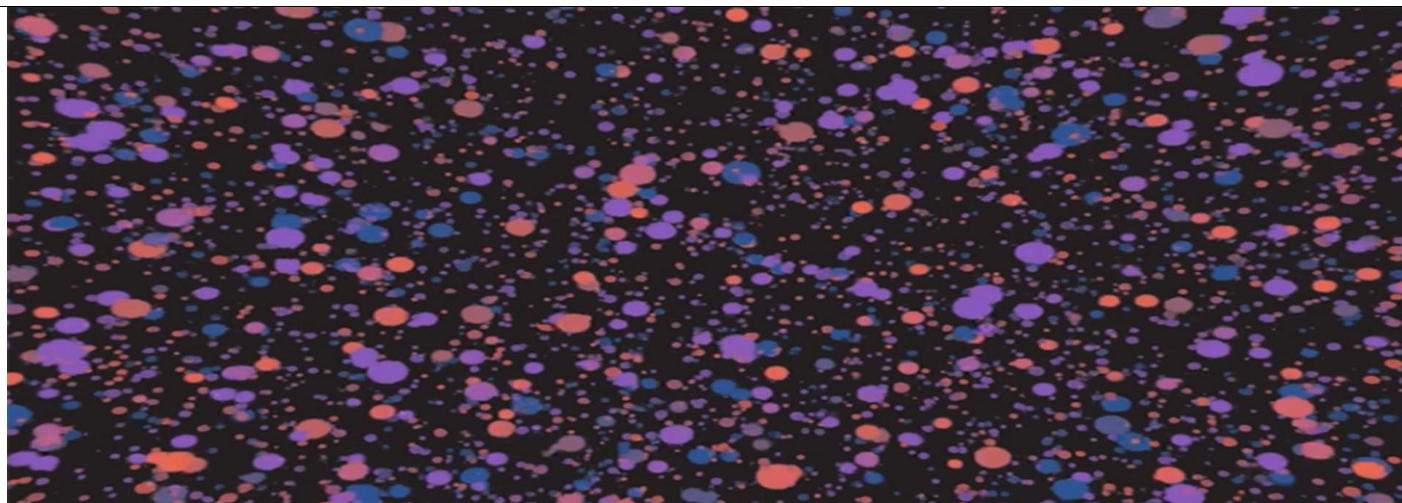
در این میان، یک نکته‌ی شگفت‌انگیز وجود دارد: با وجود تفاوت‌هایی که ذرات مختلف در جرم یا نوع برهم‌کنش دارند، همه‌ی آن‌ها با یک چارچوب ریاضی واحد توصیف می‌شوند؛ معادله‌ای به‌نام معادله‌ی دیراک. این معادله را **پل دیراک**، فیزیکدان بریتانیایی در دهه‌ی ۱۹۲۰ برای توصیف الکترون ارائه داد. اما بعدها مشخص شد که نه تنها الکترون، بلکه تمام ذرات بنیادی ماده (از جمله نوترینوها و کوارک‌ها) نیز با همین معادله، یا شکل‌های تعمیم‌یافته‌ی آن، قابل توصیف هستند. اکنون، تقریباً مطمئن هستیم که اگر در آینده ذره‌ی بنیادی جدیدی را کشف کنیم، از همین معادله پیروی خواهد کرد.



معادله‌ی دیراک

سه نیروی بنیادی و ذرات حامل آن‌ها

تا اینجا با ذرات بنیادی تشکیل‌دهنده‌ی ماده یا فرمیون‌ها آشنا شدیم؛ اما هنوز یک بخش حیاتی را بررسی نکرده‌ایم: نیروها. در غیاب نیروهای بنیادی، جهان چیزی جز مجموعه‌ای از ذرات بی‌هدف و جدا از هم نبود. ذرات، بدون هیچ‌گونه برهم‌کنش یا تبادل، در فضا پراکنده می‌ماندند؛ نه اتمی شکل می‌گرفت، نه مولکولی به‌وجود می‌آمد و نه ساختاری ایجاد می‌شد.



جهان بدون نیرو

در مدل استاندارد سه نیروی بنیادی وجود دارند که به کمک آن‌ها می‌توانیم جهان اطرافمان را توضیح دهیم: نیروی الکترومغناطیسی، نیروی هسته‌ای قوی و نیروی هسته‌ای ضعیف. هر یک از این نیروها، با ذره‌ای خاص که نقش «حامل نیرو» را ایفا می‌کند، تعریف می‌شود. همان‌طور که گفتیم این ذرات، بوزون نام دارند و آن‌ها را در کنار فرمیون‌ها (ذرات ماده) می‌شناسیم. بوزون‌ها، ذراتی هستند که نیروها را منتقل می‌کنند. برای درک بهتر این مفهوم، تصور کنید که فرمیون‌ها، مثلاً الکترون‌ها یا کوارک‌ها، در حال ردوبدل کردن بوزون‌ها هستند.

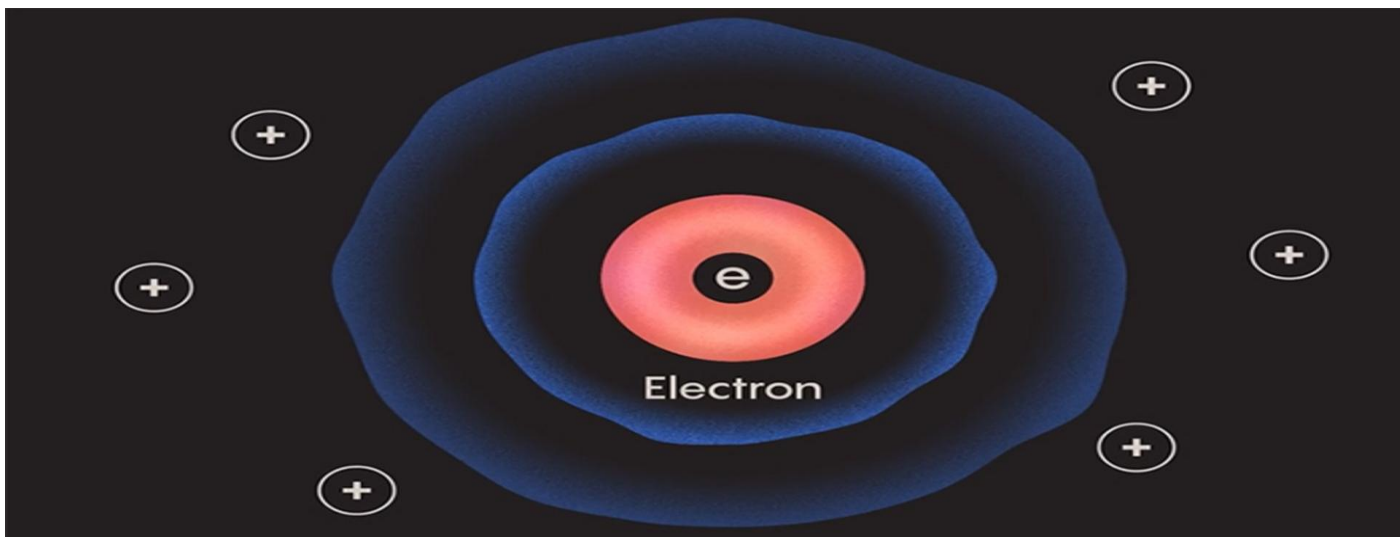


ردوبدل بوزون بین دو فرمیون

این تبادل باعث می‌شود مسیر حرکت ذرات تغییر کند، یا به بیان ساده‌تر، نوعی کشش یا فشار میان آن‌ها احساس شود. این اثر فیزیکی را به عنوان «نیرو» می‌شناسیم. از این زاویه، بوزون‌ها نقش پیام‌رسان‌هایی را دارند که قوانین فیزیک از طریق آن‌ها اعمال می‌شود. اکنون که با فرمیون‌ها به عنوان اجزای بنیادی ماده آشنا شدیم، وقت آن است که نگاهی دقیق‌تر به نقش بوزون‌ها و نیروهای بنیادی بیندازیم. اگر ذرات ماده را بازیگران اصلی نمایش کیهان در نظر بگیریم، نیروها نقش کارگردان‌هایی را دارند که صحنه را هدایت و نظم را برقرار می‌کنند. پس برای درک کامل فیزیک جهان، باید بدانیم که این نیروها چگونه عمل می‌کنند و بوزون‌ها چطور آن‌ها را منتقل می‌کنند. بیایید از نیرویی شروع کنیم که بیش از هر نیروی دیگری با آن آشناییم: نیروی الکترومغناطیسی.

نیروی الکترومغناطیسی

نیروی الکترومغناطیسی همان نیرویی است که باعث می‌شود اتم‌ها در کنار هم باقی بمانند، مولکول‌ها تشکیل شوند و در نهایت، دنیای پیچیده‌ی شیمی و تکنولوژی شکل بگیرد. بسیاری از فناوری‌های امروزی، از گوشی‌های هوشمند تا میکروویوها، بر پایه‌ی همین نیرو عمل می‌کنند. نیروی الکترومغناطیسی روی تمام ذراتی که بار الکتریکی دارند، مانند الکترون‌ها و کوارک‌ها، اثر می‌گذارد. اما روی نوترینوها به دلیل نداشتن بار الکتریکی، هیچ تأثیری ندارند. وقتی یک الکترون در فضا قرار بگیرد، میدان الکتریکی‌ای به صورت شعاعی اطراف آن ایجاد می‌شود که می‌تواند ذرات باردار را جذب یا دفع کند؛ اما ورای این میدان، سازوکار دقیق‌تری وجود دارد.



میدان الکتریکی اطراف الکترون

نیروی الکترومغناطیسی از طریق ذراتی به نام فوتون منتقل می‌شود. فوتون‌ها، ذراتی بدون جرم هستند که هنگام برهم‌کنش میان دو ذره‌ی باردار، میان آن‌ها مبادله می‌شوند. به زبان ساده، وقتی دو ذره‌ی باردار، مثل دو الکترون، همدیگر را دفع می‌کنند یا وقتی یک آهنربا یک قطعه فلز را جذب می‌کند، بین آن‌ها تعدادی فوتون ردوبدل می‌شوند. این فوتون‌ها حامل نیروی الکترومغناطیسی هستند، هرچند ما نمی‌توانیم آن‌ها را مستقیماً ببینیم.

نیروی هسته‌ای قوی

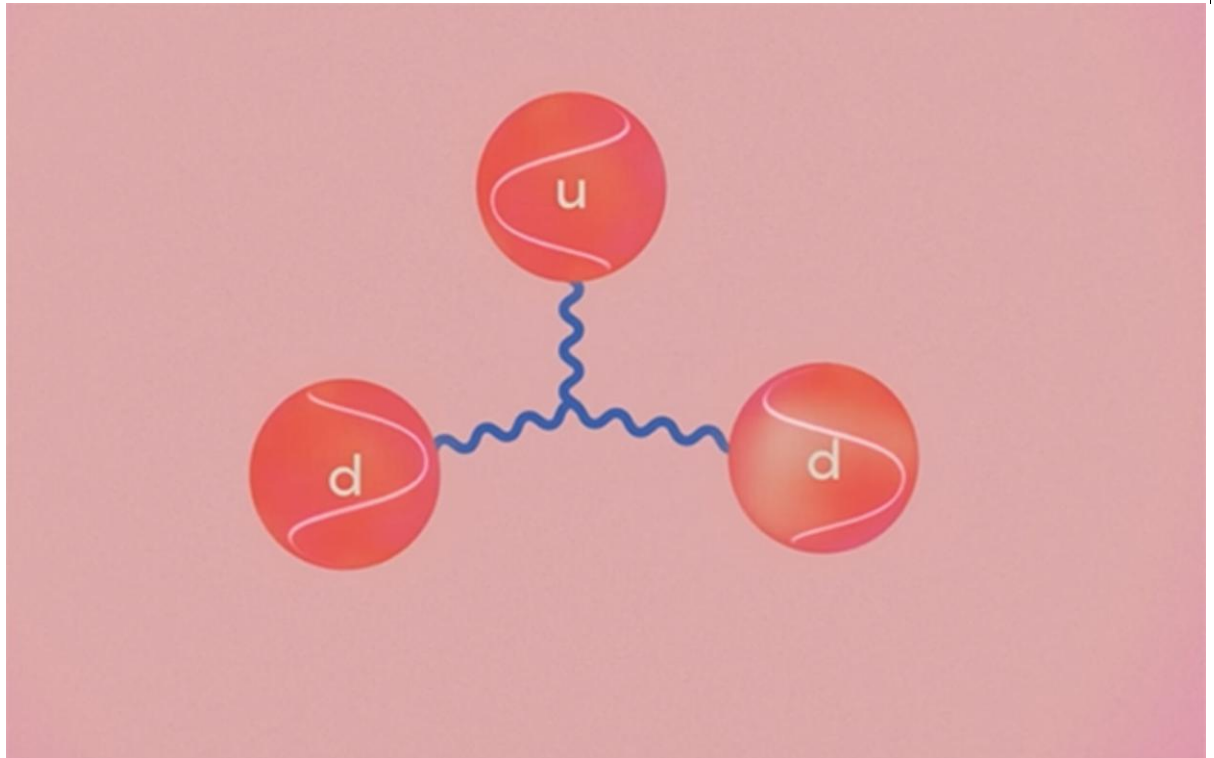
حالا می‌رسیم به قوی‌ترین نیروی بنیادی طبیعت؛ نیرویی که نامش کاملاً برازنده‌ی آن است: نیروی هسته‌ای قوی. این نیرو فقط روی کوارک‌ها اثر می‌گذارد، ذراتی که درون پروتون‌ها و نوترون‌ها قرار دارند. در نتیجه، نیروی قوی نقشی کلیدی در کنار هم نگه داشتن اجزای هسته‌ی اتم دارد. بدون این نیرو، هیچ هسته‌ای شکل نمی‌گرفت و ماده‌ای وجود نداشت. این همان نیرویی است که در فرایند شکافت هسته‌ای یا انفجار اتمی، انرژی آزاد می‌کند.

همان‌طور که نیروی الکترومغناطیسی از طریق فوتون منتقل می‌شود، نیروی هسته‌ای قوی هم ذره‌ی مخصوص به خودش را دارد: گلوئون (gluon). نام این ذره از واژه‌ی چسب (glue) گرفته شده، چون وظیفه‌اش چسباندن کوارک‌ها به یکدیگر است.

بدون نیروهای بنیادی، ذرات تنها و بی‌هدف در فضا رها می‌مانند و نه اتمی شکل می‌گرفت، نه جهان معنا پیدا می‌کرد

همان‌طور که الکترون در فضا میدان الکتریکی ایجاد می‌کند، یک کوارک هم می‌تواند در اطراف خود میدانی به نام میدان گلوئونی ایجاد کند؛ اما این میدان تفاوتی شگفت‌انگیز با میدان الکتریکی دارد: میدان گلوئونی مثل میدان الکتریکی، به شکل کروی نیست و در همه‌ی جهات گسترش پیدا نمی‌کند.

در این حالت، میدان به شکل رشته‌ای باریک از انرژی شکل می‌گیرد؛ چیزی که فیزیکدانان به آن ریسمان شار (flux tube) می‌گویند. این رشته‌ی انرژی، کوارک را به یک کوارک دیگر متصل می‌کند و تنها زمانی پایان می‌یابد که به یک کوارک متفاوت برسد. به بیان ساده، کوارک‌ها انگار با یک بند نامرئی اما بسیار نیرومند به هم بسته شده‌اند.



ریسمان شار بین کوارک‌ها

دقیقاً همین ویژگی است که نیروی قوی را «قوی» می‌سازد. هرچه دو کوارک را بیشتر از هم دور کنیم، این ریسمان بیشتر کشیده می‌شود و مقاومت بیشتری نشان می‌دهد. در واقع، برای جدا کردن دو کوارک، باید انرژی بسیار زیادی مصرف کنیم؛ اما به جای اینکه این انرژی صرف جدا شدن آن‌ها شود، در نهایت باعث می‌شود جفت‌های جدیدی از کوارک و پادکوارک از دل فضا پدیدار شوند. به همین دلیل، ما هیچ‌وقت کوارک‌ها را به تنهایی در طبیعت نمی‌بینیم. آن‌ها همیشه درون ذرات بزرگ‌تری مانند پروتون‌ها و نوترون‌ها زندانی باقی می‌مانند. فیزیکدانان این ویژگی شگفت‌انگیز را حبس کوارک‌ها یا confinement می‌نامند.

نیروی هسته‌ای ضعیف

سومین و آخرین نیروی مدل استاندارد، نیروی هسته‌ای ضعیف است؛ نیرویی که شاید از نظر نام «ضعیف» به نظر برسد، اما نقشی حیاتی در پویایی جهان ایفا می‌کند. برخلاف نامش، این نیرو تأثیراتی دارد که بدون آن، بسیاری از فرایندهای اساسی طبیعت اصلاً رخ نمی‌دادند. برخلاف نیروی قوی که کوارک‌ها را درون پروتون‌ها و نوترون‌ها کنار هم نگه می‌دارد، نیروی ضعیف کارش برهم‌زدن ترکیب ذرات است. این نیرو باعث می‌شود برخی ذرات بنیادی، مثل کوارک‌ها، هویت خود را تغییر دهند. به عنوان مثال، یک کوارک پایین می‌تواند به کوارک بالا تبدیل شود و در این فرایند، یک الکترون و یک نوترینو آزاد شوند. این یعنی یک نوترون می‌تواند به یک پروتون تبدیل شود. به این پدیده، واپاشی بتا می‌گویند. واپاشی بتا، نه تنها در رادیواکتیویته اهمیت دارد، بلکه موتور محرکه‌ی همجوشی هسته‌ای درون خورشید نیز است. یعنی اگر نیروی ضعیف وجود نداشت، خورشید نمی‌توانست انرژی تولید کند و بدون انرژی خورشید، زمین هرگز به محیطی مناسب برای شکل‌گیری حیات تبدیل نمی‌شد.

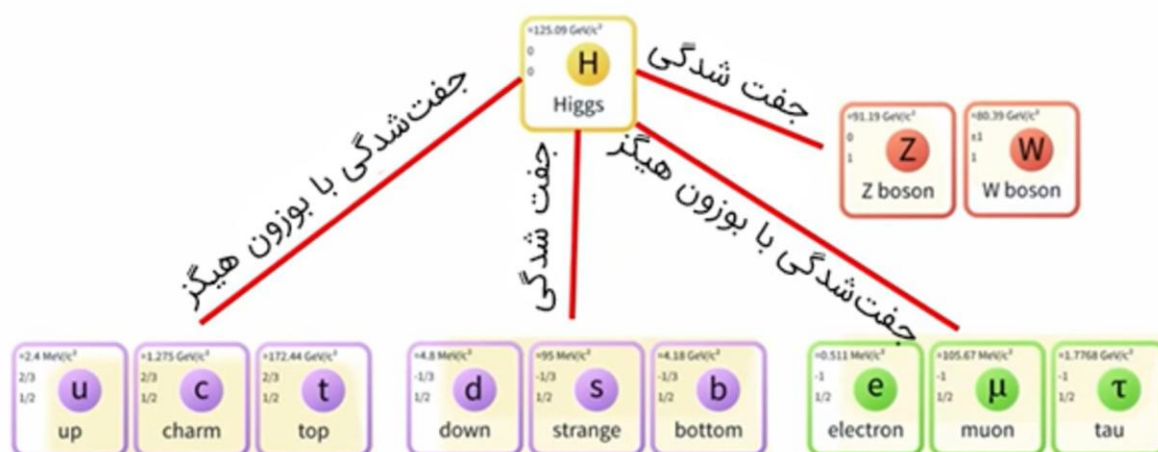
از پیوند کوارک‌ها تا واپاشی خورشیدی، همه حاصل تبادل ذراتی نامرئی است که قوانین فیزیک را در پس‌زمینه جهان اجرا می‌کنند

نیروی ضعیف همچنین توضیح می‌دهد که چرا ذرات سنگین‌تر مانند میون‌ها یا کوارک‌های شگفت، به سرعت به ذرات سبک‌تر و پایدارتر فرو می‌پاشند. این یکی از دلایلی است که ما در جهان روزمره فقط ذرات نسل اول، مانند الکترون، کوارک بالا و پایین را مشاهده می‌کنیم. یکی دیگر از ویژگی‌های خاص این نیرو آن است که بر همه‌ی ذرات مدل استاندارد اثر می‌گذارد، حتی بر نوترینوها. در حقیقت، نیروی ضعیف تنها نیرویی است که نوترینوها آن را تجربه می‌کنند. مشابه دو نیروی دیگر، نیروی ضعیف هم حاملان مخصوص به خود را دارد: بوزون‌های W و Z . این ذرات، نقش پیام‌رسان نیروی ضعیف را ایفا می‌کنند و مسئول انتقال آن بین ذرات مختلف هستند. هر بار که یک واپاشی هسته‌ای یا تغییر در نوع یک کوارک رخ می‌دهد، احتمالاً پای یکی از این بوزون‌ها در میان است.

بوزون هیگز؛ اکتشافی بزرگ

اکنون وقت آن رسیده است که با آخرین قطعه‌ی پازل مدل استاندارد آشنا شویم، ذره‌ای که به‌نوعی همه‌چیز را به هم پیوند می‌دهد: بوزون هیگز. برای اینکه درک کنیم چرا این ذره تا این حد ویژه است، باید به یک نکته‌ی شگفت‌انگیز اشاره کنیم: در معادلات مدل استاندارد، هیچ‌یک از ذرات بنیادی به‌طور ذاتی جرم ندارند. حتی بدتر از آن، این معادلات، وجود جرم را برای این ذرات ممنوع می‌دانند. به عنوان مثال، فوتون که واقعاً بدون جرم است، مجبور است همیشه با سرعت نور حرکت کند.

چرا ذرات ماده مانند فوتون‌ها، بدون جرم با سرعت نور حرکت نمی‌کنند؟ پاسخ این معما در وجود میدان هیگز نهفته است. بوزون هیگز، ذره‌ای است که وجود این میدان را تأیید می‌کند، میدانی که در سراسر جهان گسترده شده است و همانند شربت کیهانی، به ذراتی مانند الکترون و کوارک‌ها چسبیده و به آن‌ها جرم می‌دهد.



جفت‌شدگی ذرات بنیادی با بوزون هیگز

وقتی ذره‌ای از میان این میدان عبور می‌کند، مثل این است که در یک مایع چسبناک گیر می‌افتد. این کند شدن، از دید ما همان «جرم داشتن» است. اگرچه این تمثیل ساده‌سازی زیادی دارد، اما کمک می‌کند تا نقش میدان هیگز را بهتر درک کنیم.

دانشمندان سال‌ها نشانه‌هایی از وجود میدان هیگز را در رفتار ذرات مشاهده کرده بودند، اما تا مدت‌ها مدرک مستقیمی برای تأیید آن در دست نداشتند. این وضعیت در سال ۲۰۱۲ تغییر کرد، زمانی که برخورددهنده‌ی بزرگ هادرونی (LHC) در مرکز تحقیقات سرن، با برخورد دادن پروتون‌ها در انرژی‌های بسیار بالا، موفق شد موجی در میدان هیگز ایجاد کند. این موج به‌صورت یک ذره‌ی واقعی آشکار شد: بوزون هیگز. کشف این ذره، نه‌تنها یکی از بزرگ‌ترین موفقیت‌های علمی قرن به‌شمار می‌رود، بلکه تأییدی قدرتمند بر درستی مدل استاندارد نیز بود.



پیتر هیگز در حال پاک کردن اشک‌هایش در لحظه‌ی اعلام کشف بوزون هیگز

فیزیک بعد از مدل استاندارد ذرات بنیادی؛ گام بعدی چیست؟

تا اینجا با مدل استاندارد و ذرات بنیادی آشنا شدیم: چارچوبی علمی که جهان را با ۱۲ ذره‌ی بنیادی ماده، سه نیروی اصلی و یک میدان ویژه به‌نام میدان هیگز توصیف می‌کند. این مدل، حاصل ۴۰۰ سال تلاش علمی است و بی‌اغراق می‌توان گفت یکی از زیباترین دستاوردهای فیزیک نظری به‌شمار می‌آید؛ اما داستان فیزیک در اینجا تمام نمی‌شود.

مدل استاندارد هنوز نمی‌تواند گرانش، ماده‌ی تاریک و انرژی تاریک را توضیح دهد

بسیاری از فیزیکدان‌ها معتقد هستند مدل استاندارد آنقدر خوب کار می‌کند که حتی جای نگرانی دارد، چرا؟ چون برای ادامه‌ی مسیر علم، ما باید به جایی برسیم که مدل استاندارد دیگر پاسخگو نباشد؛ جایی که نتایج تجربی با پیش‌بینی‌های نظری سازگار نباشند. تنها در این صورت است که می‌توانیم قدمی فراتر بگذاریم و چیزهای جدیدی کشف کنیم.

یکی از پرسش‌های اساسی و حل‌نشده‌ی فیزیک این است: آیا واقعاً سه نیروی بنیادی، الکترومغناطیسی، هسته‌ای قوی و هسته‌ای ضعیف، نیروهایی جداگانه هستند؟ یا شاید همه‌ی آن‌ها، صورت‌های مختلف یک نیروی یگانه و بنیادی‌تر باشند؟ فیزیکدانان این ایده را نظریه‌ی وحدت بزرگ می‌نامند. برخی محاسبات و مدل‌های نظری این ایده را تأیید می‌کنند، اما هنوز هیچ شواهد تجربی قطعی‌ای برای اثبات آن در دست نیست.

اگرچه مدل استاندارد تصویر کاملی از بسیاری از پدیده‌های زیراتمی ارائه می‌دهد، هنوز یک بخش کلیدی از پازل فیزیک غایب است: گرانش. نظریه‌ی نسبیت عام اینشتین، رفتار گرانش را در مقیاس‌های بزرگ، مانند مدار سیارات یا شکل‌گیری کهکشان‌ها، با دقت بالا توصیف می‌کند. اما فیزیکدانان هنوز نتوانسته‌اند گرانش را با فیزیک کوانتوم ترکیب کنند. اگرچه در سال‌های اخیر موفق به ثبت امواج گرانشی شده‌اند (نوسانات واقعی در بافت فضا-زمان)، ذره‌ی حامل این نیرو، یعنی گراویتون، همچنان از دید ابزارهای آزمایشگاهی پنهان مانده است.



همچنین، مدل استاندارد هیچ پاسخی برای ۹۵٪ محتوای پنهان کیهان ندارد: ماده‌ی تاریک و انرژی تاریک. شواهد زیادی وجود دارند که نشان می‌دهند ماده‌ی تاریک از ذراتی تشکیل شده است که با نور برهم‌کنش ندارند. شاید حتی این ذرات، نیروها و بوزون‌های حامل نیروی مخصوص به خودشان را داشته باشند.

سؤالات بزرگ دیگری هم وجود دارند. به‌عنوان مثال، چرا میون باید ۲۰۰ برابر سنگین‌تر از الکترون باشد؟ چرا جرم کوارک بالا حدود ۳۵۰ هزار برابر جرم الکترون است؟ و چرا نوترینوها تا این اندازه سبک هستند؟ هنوز هیچ‌کس نمی‌داند. تنها راه فعلی برای دانستن جرم این ذرات، آزمایش‌های تجربی است.

نظریه‌ی همه‌چیز تلاش می‌کند تا نیروهای بنیادی را در چارچوبی یگانه توضیح دهد

بااین‌حال، میان جرم ذرات الگوهایی دیده می‌شوند که تصادفی به نظر نمی‌رسند؛ الگوهایی که نشان می‌دهند شاید ساختاری عمیق‌تر و منسجم‌تر پنهان باشد. همین نشانه‌ها فیزیکدانان را امیدوار کرده‌اند که در آینده، با ترکیب آزمایش‌های دقیق‌تر و نظریه‌های نو، بتوانند این لایه‌ی پنهان را آشکار کنند و گام بعدی را در مسیر شناخت واقعیت بردارند.

تا آن زمان، سفر گاليله را ادامه می‌دهیم، با آرزوی رسیدن به آن رؤیای بزرگ: نظریه‌ای جامع برای توضیح کل جهان و هر آنچه در آن هست، نظریه‌ی همه‌چیز.