

## وحدت - چهار نیرو در ابعاد - بالا و مسئله ی مقیاس ها

فرهنگ لُران<sup>1</sup>

مسئله ی مقیاس ها در وحدت - نیروهای - الکتروضعیف و گرانش توضیح داده شده، و رهیافت های ADD و RS در حل - آن مرور می شود. در روش ADD فرض می شود که فضا زمان  $4 + n$  بعدی است، که  $n \geq 2$ . درستی - این رهیافت به این معنا است که قانون جاذبه ی نیوتن در فواصل - کوچک تر از میلی متر اصلاح می شود. در رهیافت - RS فرض بر این است که دنیای چهار بعدی - ما شامه<sup>2</sup> ای است که در یک فضای - پنج بعدی AdS قرار گرفته است.

برای - آن که به وجود - ابعاد - دیگری به جز چهار بعد - معمول، یعنی سه بعد - فضایی و یک بعد - زمان، باور داشته باشیم دلایل - متفاوتی هست. این دلایل البته هیچ کدام بر شواهد - مستقیم - آزمایش گاهی استوار نیست. در واقع، مشاهدات - تجربی، و یا انتظارات - نظری ای هست که تبیین - آن ها تا کنون به کمک - نظریه هایی که در چارچوب - چهار بعدی نوشته می شود ممکن نشده است. از این رو گروهی از فیزیک پیشه ها به سراغ نظریه هایی رفته اند که در آن ها ابعاد - فضا زمان را بیش از چهار بعد می گیرند.

نخستین نظریه از این دست نظریه ی - کالوتسا - کلاین<sup>a</sup> است که برای - وحدت بخشیدن به نیروهای - الکترومغناطیسی و گرانشی ارائه شده است. در ابتدای - قرن - بیستم سه نیروی - الکتریکی، مغناطیسی، و گرانشی به خوبی شناخته شده بودند. وحدت - بین - دو نیروی - الکتریکی و مغناطیسی، پیش تر در چارچوب - نظریه ی - الکترومغناطیس - ماکسول به دست آمده بود. می دانیم که ارائه ی - این نظریه ی - وحدت، منجر به پیش آمدهایی شد که بعداً همگی در آزمایش گاه تأیید شدند. از جمله، ثابت بودن -  $c$ ، سرعت - انتشار - امواج - الکترومغناطیسی نسبت به تمامی - ناظرهای - لخت، که بعداً پایه ی - نسبیت - خاص اینشتین شد، ولی در همان زمان باعث شد که فیزیک پیشه ها حدس بزنند که نور همان موج - الکترومغناطیسی است. حدسی که به نوبه ی - خود با آزمایش - هر تس به تأیید - تجربه رسید. در

<sup>1</sup> دانش کده ی - فیزیک، دانش گاه صنعتی - اصفهان

<sup>2</sup> توضیح - ویراستار: در فرهنگ بزرگ سخن چنین آمده: شامه، پوشش نرم و نازک سطح بعضی لوله ها یا حفره های بدن مانند قلب و کلیه.

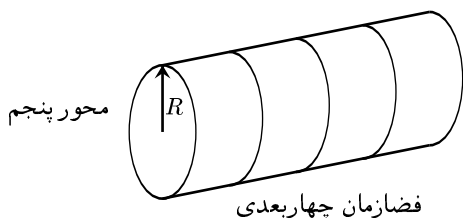
ٲودور کالوتسا در ١٩١٩ متوجه شد که معادله ی اینشتین در ٥ بعد به نوعی معادله‌ها ی ماکسول را هم در بر دارد. ایده را برای اینشتین نوشت. اینشتین او را تشویق کرد که ایده را دنبال کند. مقاله ی کالوتسا در ١٩٢١ منتشر شد.



سال ١٢٩٨ ش. (١٩١٩ م)، کالوتسا نشان داد که با فرض یک فضا زمان پنج بعدی، می‌شود از معادلات نسبیت عام برای گرانج پنج بعدی، معادلات نسبیت عام چهار بعدی و معادلات ماکسول را یک جا به دست آورد. نظریه ی نسبیت عام مدلی است که اینشتین برای توصیف دینامیک فضا زمان پیش نهاد کرد. این نظریه تا کنون از تمامی آزمایش‌ها سر بلند بیرون آمده است [1].

پس اگر جهان ما در واقع یک جهان پنج بعدی باشد، ولی به دلیلی پنجمین بعد از دید ما پنهان باشد، آن گاه در مدل کالوتسا - کلاین آثار گرانجی بعد پنج در جهان چهار بعدی به صورت نیروی الکترومغناطیس ماکسولی ظاهر می‌شود. کالوتسا، برای پنهان کردن بعد پنجم فرض کرد که محور فضایی نظیر پنجمین بعد، به صورت حلقه ای در آمده است، و این حلقه آن چنان ریز است که حرکت ذرات در راستای آن محسوس نیست. شکل ١ را ببینید.

کالوتسا مقاله اش را برای اینشتین<sup>(b)</sup> فرستاد، چرا که در آن زمان نشریه‌های علمی مقالات را تنها از دست فیزیک پیشه‌ها ی بنام می‌گرفتند. متأسفانه اینشتین از ایده ی کالوتسا خوشش نیامد و مقاله ی او را بیش از دو سال مسکوت گذاشت. اشکال اصلی مدل کالوتسا در این بود که در آن



شکل ۱

فرض می‌شد میدان‌ها مستقل از پنجمین درجه‌ی آزادی اند. فرضی که برای درستی آن دلیل قانع‌کننده‌ای در دست نبود. به هر حال اینشتین در سال ۱۳۰۰ ش متقاعد شد که مقاله را منتشر کند [2]. در سال ۱۳۰۵ ش، کلاین نظریه‌ی کالوتسا را کامل کرد. وی با کوانتمی کردن نظریه‌ی کلاسیک کالوتسا نشان داد که اگر شعاع این حلقه از مرتبه‌ی  $10^{-32}$  cm باشد، آن گاه این نظریه با تجربه‌ی روزمره‌ی ما که در آن شاهد مستقیمی از وجود بعد پنجم حاضر نیست می‌خواند، و اشکالی که اینشتین به آن وارد دانسته بود نیز برطرف می‌شد. می‌دانیم که در مکانیک موجی تکانه‌ی خطی در راستای محور پنجم تنها مقادیر گسسته‌ی

$$p_n = \frac{nh}{2\pi R}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

را اختیار می‌کند که در آن  $h$  ثابت پلانک<sup>(c)</sup> است. پس اگر فرض کنیم  $R \approx \ell_{p1}$  که در آن  $\ell_{p1} = 10^{-32}$  cm طول پلانک است، انرژی لازم برای نخستین برانگیختگی در راستای محور پنجم، چیزی از مرتبه‌ی انرژی پلانک،  $E_{p1}$  خواهد بود که بسیار دور از دسترس است. در نتیجه از هر میدانی تنها مُد صفرم  $n = 0$  است، حضور خواهند داشت که تابعی از پنجمین بعد نیست. به همین صورت اگر کسی در فکر آشکار کردن بعد پنجم از طریق آزمایشی مبتنی بر پراش نور در خلأ باشد، باید از فوتون‌هایی استفاده کند که طول موج شان دست بالا  $\ell_{p1}$  باشد. و از آن جا که انرژی پلانک بسیار دور از دسترس است، شاهد مستقیمی مبنی بر وجود بعد پنجم در کار نخواهد بود.

با کشف دو نیروی بنیادی دیگر، یعنی نیروهای ضعیف و قوی هسته‌ای، در میانه‌ی قرن بیستم، تلاش برای وحدت بخشیدن به چهار نیرو با علاقه‌ی روزافزونی دنبال شد. دو نیروی الکترومغناطیسی و ضعیف هسته‌ای به سرعت وحدت یافتند. معلوم شد که در انرژی‌ای از مرتبه‌ی  $E_{EW} \approx 10^3$  GeV این دو نیرو متحد می‌شوند، به این معنا که مثلاً با الکترون‌ها یک جور برهم‌کنش می‌کنند. این نظریه، که به نظریه‌ی الکتروضعیف معروف است، در شتاب‌دهنده‌هایی که رسیدن به

انرژی  $E_{EW}$  را میسر می‌کنند تأیید تجربی شده است. پیش‌بینی مدل‌های وحدت که وحدت‌بخشی به نیروهای قوی هسته‌ای و الکتروضعیف را فرمول‌بندی می‌کنند این است که این نیروهای بنیادی در انرژی  $E_{GUT} \approx 10^{15}$  GeV یکی می‌شوند. این انرژی اساساً از دسترس ما دور است. بزرگ‌ترین شتابدهنده‌ای که در حال ساختن شدن است، یعنی در «برخورددهنده‌ی بزرگ هادرون‌ها»<sup>(d)</sup> یا به اختصار LHC، ما را تنها به انرژی  $E_{GUT} \sim 10^{-11}$  TeV خواهد رساند. بدتر از آن انرژی لازم برای رسیدن به وحدت با گرانش است که در  $E_{pl} \approx 10^{19}$  GeV میسر خواهد شد. این مشکل به مسئله‌ی مقیاس‌ها یا سلسله‌مراتب<sup>(e)</sup> معروف است. مسئله این است که  $E_{EW}$ ، یعنی مقیاس انرژی‌ای که در آن نیروهای الکترومغناطیسی و ضعیف یکی می‌شوند،  $10^{12}$  بار کوچک‌تر از انرژی‌ای است که در آن این دو نیرو با نیروی قوی یکی می‌شوند، و این خود  $10^4$  بار کوچک‌تر از انرژی‌ای است که این سه نیرو با گرانش یکی می‌شوند. هر نظریه‌ای که بخواهد هر چهار نیرو را یکی کند، باید بتواند این سلسله‌مراتب را توضیح دهد، و این یافتن یک نظریه‌ی یگانه را بسیار مشکل کرده است.

البته این وضعیت بد مربوط به فضا-زمان چهاربعدی است. افزودن ابعاد بیشتر، مثلاً به روش کالوتسا-کلاین، وحدت چهار نیرو را در مقیاس انرژی بسیار کم‌تری، و درست در همان حدودی که LHC در دسترس ما قرار می‌دهد امکان‌پذیر می‌کند. یکی از این مدل‌ها مدلی است که در [3] پیش‌نهاد شده است و به رهیافت ADD معروف است. در این مسئله با توجه به یافته‌های آزمایش‌گاهی نشان داده شده است که چگونه می‌شود با فرض وجود دست کم دو بعد اضافه، مسئله‌ی سلسله‌مراتب را حل کرد. این مدل در کنار زیبایی‌ها و توانایی‌هایی که دارد با چند اشکال اساسی هم روبه‌رو است، که به یکی از آن‌ها اشاره خواهیم کرد. اهمیت این رهیافت، با وجود تمام ایرادهایش، در گشودن پنجره‌ای نو و به دست دادن ایده‌هایی نو برای حل مسئله‌ی وحدت است، که می‌شود آن‌ها را صرف نظر از درستی و نادرستی خود مدل، در LHC یا سایر آزمایش‌گاه‌های امروزی سنجید. ارکانی حامد و همکارانش، بحث را با بررسی اثر وجود ابعاد بالاتر بر مقدار ثابت جهانی گرانش آغاز می‌کنند. در بعد  $4+n$ ، قانون جهانی گرانش با رابطه‌ی زیر داده می‌شود.

$$F(r) = \frac{G_{4+n} m_1 m_2}{r^{n+2}} \quad (2)$$

در این جا  $G_{4+n}$  ثابت جهانی گرانش در  $4+n$  بعد است. اگر  $n$  بعد این فضا مثل بعد پنجم در مدل کالوتسا-کلاین بسته باشد، آن گاه برای دو ذره که به اندازه‌ی کافی از هم دور هستند قانون نیرو به صورت زیر در می‌آید:

$$F(r) = \frac{G_{4+n} m_1 m_2}{R^n r^2} \quad r \gg R, \quad (3)$$

که در آن شعاع استوانه در هندسه‌ی کالوتسا-کلاین است. برای آن که ببینیم این رابطه را چه

نیما ارکانی حامد، استاد دانش‌گاه هاروارد.



طور می‌شود از رابطه ی (2) به دست آورد، کافی است به شباهت قانون گرانش نیوتن و قانون کولن<sup>(f)</sup> توجه کنیم. در یک فضای  $4+n$  بعدی، شار میدان الکتریکی یک بار  $q$  که از سطح کره ای به شعاع  $r$  و به مرکز بار می‌گذرد متناسب است با سطح این کره، و سطح کره با  $r^{2+n}$  متناسب است. در هندسه ی ریمانی، این رابطه برای  $r$  های بسیار کوچک درست است. اگر  $n$  بعد از این فضا مثل چنبره ای به شعاع  $R$  باشد، خط‌ها ی شار میدان الکتریکی در راستا ی چنبره محبوس می‌شود. این شار با مساحت چنبره، یعنی  $R^n$  متناسب است. شار میدان الکتریکی که در سه بعد فضایی، از کره ای به شعاع  $R$  می‌گذرد با  $r^2$  متناسب است. پس کل شار با  $R^n$  متناسب است. از این جا رابطه ی (3) به سادگی نتیجه می‌شود.

به این ترتیب  $G$ ، ثابت جهانی گرانش در فضا زمان چهار بعدی، یک کمیت بنیادی نیست، و مقدارش به ثابت بنیادی  $G_{4+n}$  و هندسه ی فضا زمان (یعنی به  $R$  و  $n$ ) بستگی دارد، به این نحو

$$G = \frac{G_{4+n}}{R^n}. \quad (4)$$

از این رو مقیاس گرانش در چهار بعد، یعنی  $E_{pl}$  هم، تابعی از مقیاس بنیادی  $E_{pl, (4+n)}$  و  $R$  و  $n$  است.

$$(E_{pl})^2 = \frac{R^n}{(hc)^n} (E_{pl, (4+n)})^{2+n}. \quad (5)$$

در این جا  $h$  ثابت پلانک و  $c$  سرعت نور است. این رابطه با تحلیل ابعادی هم به سادگی به دست



لیزا زَندل، استادِ دانش‌گاهِ هاروارد.  
در پاییز ۲۰۰۴ او پراجاع‌ترین فیزیک‌پیشه‌ی  
نظریِ پنج‌سالِ ماقبلش بود.

می‌آید. یادآوری می‌کنم که طبق تعریف،  $E_{pl}$  یک تک‌جمله‌ای بر حسب  $h$  و  $c$  و  $G$  است که بعدِ  
انرژی داشته باشد. در  $4+n$  بعد

$$(E_{pl, (4+n)})^{2+n} = \frac{h^{n+1} c^{5+n}}{G_{4+n}}. \quad (6)$$

مسئله‌ی مقیاس‌ها به این صورت برطرف می‌شود که فرض کنیم انرژیِ مقیاسِ گرانشی،  $E_{pl, (4+n)}$ ،  
که انرژیِ وحدتِ نیرویِ گرانش با سایرِ نیروها در نظریه‌ی بنیادیِ  $4+n$  بعدی است، از مرتبه‌ی  
مقیاسِ وحدتِ الکتروضعیف است، یعنی

$$E_{pl, (4+n)} \approx E_{EW} \approx 1 \text{ TeV}. \quad (7)$$

در نتیجه، برای آن که این فرض با  $E_{pl} \approx 10^{19} \text{ GeV}$  بخواند؛ یعنی با مقدارِ  $h$  و  $c$  و  
 $G$  در آزمایش‌های اساساً چهاربعدی مان به دست آورده ایم؛ باید فرض کنیم که

$$R \approx 10^{\frac{30}{n}-19} \text{ m}. \quad (8)$$

اگر همان طور که در پیشنهادِ کالوتسا - کلاین مطرح شده بود، فرض کنیم تنها یک بعدِ اضافه وجود  
دارد، یعنی  $n=1$ ، آن گاه  $R \approx 10^{11} \text{ m}$  می‌شود که تقریباً برابر است با یک واحدِ نجومی. معنیِ این  
حرف این است که انحراف از قانونِ عکس‌مجدوریِ گرانش، در فواصلی به اندازه‌ی منظومه‌ی  
شمسی قابلِ اندازه‌گیری است. این نتیجه به وضوح با تجربه نمی‌خواند. پیشنهادِ بعدیِ  $n=2$   
است، که می‌گوید  $R \approx 1 \text{ mm}$  است. این با نتایجِ آزمایش‌گاهی می‌خواند، چرا که درستیِ قانونِ  
عکس‌مجدوریِ گرانش تنها در فاصله‌هایی از مرتبه‌ی چند سانتی‌متر سنجیده شده است.

همان طور که دیدیم، در رهیافتِ ADD با فرضِ وجودِ دو بعدِ اضافه، مسئله‌ی مقیاس‌ها حل  
می‌شود. اما این مدل به نوبه‌ی خود صورتِ دیگری از مسئله‌ی مقیاس‌ها را به وجود می‌آورد. در

واقع  $R \approx 1 \text{ mm}$  مقیاسی از انرژی معرفی می‌کند که آن هم خود  $10^{16}$  بار کوچک‌تر از  $E_{EW}$  است. اندکی بعد از این داستان، رندل<sup>(g)</sup> و ساندرام<sup>(h)</sup> پیش‌نهاد دیگری کردند که اشکال بالا به آن وارد نبود. آن‌ها فرض کردند که جهان ما یک دنیای پنج‌بعدی پادسپته<sup>(i)</sup> (AdS) با تقارن  $Z_2$  باشد. فضای AdS یک حل از معادله‌ی اینشتین است با چگالی انرژی صفر و ثابت کیهان‌شناختی منفی. در مدل اول رندل - ساندرام [4] که به مدل RS1 معروف است، متریک فضای AdS با

$$ds^2 = e^{-2kR\phi} \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + R^2 d\phi^2 \quad (9)$$

داده می‌شود که در آن  $x^\mu$  ها چهار مختصه‌ی فضا-زمان چهاربعدی اند و  $\eta_{\mu\nu}$  متریک مینکوفسکی است. بعد پنج‌م یک  $S^2/Z_2$  است که با  $0 \leq \phi \leq \pi$  مختصه‌بندی شده است (تقارن  $Z_2$  در این مدل این‌همانی تحت  $-\phi \rightarrow \phi$  است). شعاع  $S^1$  است.  $k$  هم از مرتبه‌ی عکس طول پلانک است. در عمل می‌شود  $S^1/Z_2$  را یک پاره‌خط به طول  $\pi R$  گرفت. می‌شود دید که فضای  $AdS/Z_2$  حل معادله‌ی اینشتین در پنج بعد است که در آن دو انتهای این پاره‌خط نظیر دو شامه‌ی چهاربعدی تخت اند؛ یکی با تنش مثبت و دیگری با تنش منفی. تنش همان جمله‌ی کیهان‌شناختی روی شامه است. مقدار این تنش‌ها بر حسب مقدار ثابت کیهان‌شناختی فضای پنج‌بعدی، و از شرط سازگاری تقارن  $Z_2$ ، یعنی تقارن تحت  $-\phi \rightarrow \phi$  به دست می‌آید. در مدل RS1، شامه‌ای که تنش آن منفی است نظیر جهان چهاربعدی ما است. این انتخاب به این علت است که انرژی پلانک،  $E_{pl}$ ، به عنوان ثابت جفت‌شدگی در نظریه‌ی مؤثر گرانش روی پادشامه، بر حسب کمیت بنیادی  $E_{pl, (5)}$ ، با رابطه‌ی زیر داده می‌شود.

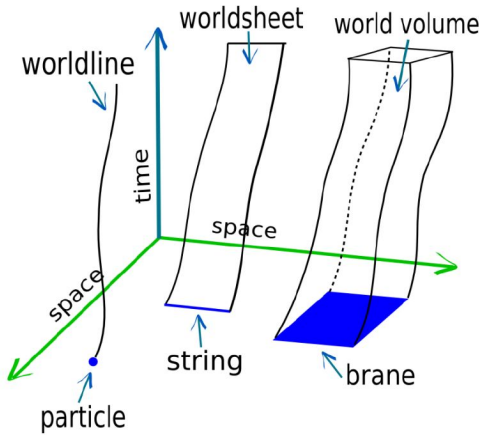
$$E_{pl}^2 = \frac{E_{pl, (5)}^3}{k} (1 - e^{-2kR\pi}). \quad (10)$$

می‌بینیم که در حد  $kR$  بزرگ  $E_{pl, (5)} \approx E_{pl}$  است. یادآوری می‌کنم که از ابتدا فرض کردیم  $E_{pl} \approx \hbar c k$  است. از سوی دیگر روی پادشامه، مقدار جرم فیزیکی  $m$ ، نظیر جرم بنیادی  $m_0$ ، با این رابطه داده می‌شود:

$$m = e^{-kR\pi} m_0. \quad (11)$$

پس کافی است  $10^{15} \approx e^{kR\pi}$  باشد، که یعنی  $R \approx 50 \ell_{pl}$  باشد تا مقیاس الکتروضعیف  $(m c^2 \approx 1 \text{ TeV})$  روی پادشامه، نظیر یک مقیاس بنیادی  $10^{19} \text{ GeV} \approx E_{pl, (5)} \approx m_0 c^2$  باشد. یعنی با فرض  $R \approx 50 \ell_{pl}$  می‌شود در نظریه‌ی بنیادی پنج‌بعدی، مقیاس الکتروضعیف و گرانش را تقریباً برابر گرفت. به این ترتیب مسئله‌ی مقیاس‌ها حل می‌شود. همان طور که می‌بینید  $R$  چندان از  $\ell_{pl}$  بزرگ‌تر نیست، و در نتیجه مسئله‌ی مقیاس‌ها دوباره تکرار نمی‌شود.

## ذره، ریسمان، شامه.



در نظریه‌های متداول ذره‌ها ی بنیادی، هر ذره ی بنیادی یک نقطه است که در فضا ی 3 بعدی حرکت می کند، پس تحولش در فضا زمان یک خط است. خود نقطه یک موجود 0 بعدی است. در نظریه‌ها ی ریسمان، به جای ذره‌ها ی 0 بعدی، ریسمان‌ها یی 1 بعدی در نظر گرفته می شود که در فضا یی  $n$  بعدی حرکت می کنند. مسیر ریسمان در فضا زمان  $n + 1$  بعدی، رویه‌ای  $1 + 1$  بعدی است - یک بعد در امتداد ریسمان و یک بعد در امتداد زمان. ایده را می توان ادامه داد و موجودهایی در نظر گرفت که در فضا  $d$  بعدی اند. تحول این‌ها در

فضا زمان آبرویه‌ها یی  $d + 1$  بعدی است. این‌ها را غشاء می گویند.

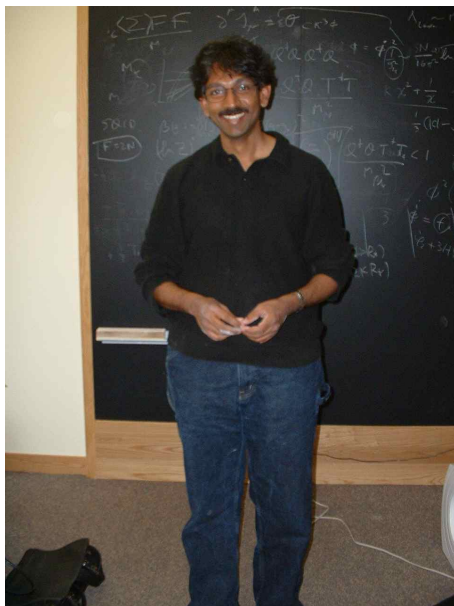
ریسمان، که موجودی است 1 بعدی، می تواند باز یا بسته باشد، به این معنی که یا دو انتها ی متفاوت داشته باشد، یا مانند یک حلقه باشد. دو سر یک ریسمان باز می تواند آزاد باشد، یا مقید باشد روی زیرمجموعه ی خاصی از فضا زمان  $n + 1$  بعدی حرکت کند. فضا زمان را  $n + 1$  بعدی بگیریم، و ریسمان‌ها یی را در نظر بگیریم که دو سرشان مقید است روی یک زیرفضا ی  $d$  بعدی باشد. به این زیرفضا ی  $d$  بعدی شامه ی  $d$  بعدی می گویند.

مدل RS1 در کنار این موفقیت چشم‌گیرش، چند اشکال دارد که به یکی از آن‌ها اشاره می‌کنم. همان طور که پیش‌تر گفتیم، برای آن که پیکربندی مفروض برای شامه‌ها میسر باشد، جمله ی کیهان‌شناختی روی شامه‌ها باید صرف نظر از یک علامت  $\pm$ ، دقیقاً مساوی ثابت کیهان‌شناختی در فضای AdS باشد. چرایی وجود چنین «تنظیم دقیقی» چندان قابل توضیح نیست.

نکته‌ای که در مدل RS1 به آن پرداخته نشده است سازگاری مدل با قانون عکس مجذوری گرانث است، که همان طور که پیش‌تر گفته شد دلیل محکمی بر چهاربعدی بودن دنیای ما است. زیندل و ساندرام در مقاله ی بعدی شان [5] به این موضوع پرداختند، و نشان دادند که حتی اگر بعد پنجم بی اندازه هم گسترده باشد، باز قانون گرانث با دقت خوبی همان قانون عکس مجذوری است. این رهیافت به مدل RS2 معروف است، و همان طور که تشخیص خواهید داد تنها به مسئله ی گرانث می‌پردازد، و موضوع آن مسئله ی مقیاس‌ها نیست.

در مدل RS2، ما روی شامه ای زندگی می‌کنیم که تنش آن مثبت است، و شامه ی دیگر در دوردست، نظیر  $R \rightarrow \infty$  است. در این مدل می‌شود نشان داد که میدان گرانث روی شامه جای‌گزیده است، و دامنه ی امواج گرانثی که میدان گرانثی از شامه به بیرون می‌برد به شکل نمایی، یعنی متناسب با  $e^{-kx^5}$  کاهش می‌یابد ( $x^5$  مختصه ی بعد پنجم است). البته یک طیف پیوسته از





رامان ساندرام می خواست فیزیک را کنار بگذارد و به اقتصاد بپردازد، که رندل به او پیش نهاد کرد با هم روی شامه ها کار کنند. دو مقاله ای که با هم نوشتند از پراجاع ترین مقاله ها ی چند سال اخیر بوده است.

مُد های کالوتسا - کلاین هست که قانون عکس مجذوری - گرانش را به شکل زیر اصلاح می کند.

$$V(r) = G_N \frac{m_1 m_2}{r} \left( 1 + \frac{1}{k^2 r^2} \right). \quad (12)$$

با توجه به این که  $k \leq M_{pl}$  است، نتیجه ی بالا با تجربه می خواند. ره یافت RS2 سر آغاز مطالعه ی

مدل های گوناگونی شده است که در آن ها گرانش روی شامه ها جای گزیده است [6].

در پایان چند ویژگی و تفاوت مهم ره یافت های ADD و RS را مرور می کنیم.

(۱) در مدل ADD، جهان دست کم شش بعدی است، اما در RS یک بعد بالاتر کافی است.

(۲) در مدل ADD، جرم پلانک با  $R$  یعنی اندازه ی ابعاد بالاتر متناسب است، و در نتیجه این

ابعاد نمی توانند چندان گسترده باشند. در حالی که در مدل RS این بستگی به شکل نمایی

است، و به سادگی می شود فرض کرد که  $R$  بسیار بسیار بزرگ است ( $R \rightarrow \infty$ ).

(۳) مقیاس بنیادی در مدل ADD مقیاس انرژی الکتروضعیف، یعنی  $E_{EW} \approx 1 \text{ TeV}$  است، اما

در RS1 انرژی پلانک  $E_{pl} \approx 10^{19} \text{ GeV}$  است.

(۴) در ره یافت ADD مسئله ی مقیاس ها (سلسله مراتب) بین مقیاس ها ی الکتروضعیف و

پلانک حل نمی شود، بل که جای خود را به مسئله ی مقیاس ها بین دو طول  $R \approx 1 \text{ mm}$  و

$\frac{hc}{E_{EW}} \approx 10^{-19} \text{ m}$  می دهد. اما در مدل RS1 مسئله ی مقیاس ها به نحو مطلوب تری حل

می شود.

(۵) ره‌یافتِ ADD با شواهدِ آزمایش‌گاهی که درستیِ قانونِ عکس‌مجذوریِ گرانش را تا فاصله‌هایی به کوچکی 0.1 mm تأیید کرده اند [8] می‌خواند، ولی مدلِ RS1 نه. هر چند این اشکال در مدلِ RS2 برطرف می‌شود، اما در مدلِ RS2 دوباره با مسئله‌ی مقیاس‌ها روبرو می‌شویم.

(۶) در مدلِ ADD، مُدهایِ کالوتسا - کلاین گسسته اند. البته با فرضِ  $R \approx 1 \text{ mm}$  این مُدها خیلی سبک اند و این خود یکی از اشکالاتِ مدلِ ADD است. در مدلِ RS2 مُدهایِ کالوتسا - کلاین طیفِ پیوسته دارند.

در هیچ یک از این دو ره‌یافت که مرور کردیم، توضیحی برای آن که چرا میدان‌هایِ ذراتِ بنیادی رویِ شامه‌ی چهاربعدیِ ما جای‌گزیده اند ارائه نشده است. یادآوری می‌کنم که درستیِ قانونِ عکس‌مجذوریِ کولن تا فواصلِ  $\approx 10^{-19} \text{ m}$  به  $\frac{hc}{E_{EW}}$  تجربه تأیید شده است. برای توضیحِ این جای‌گزیدگی راه‌هایی پیش‌نهاد شده است. بعضی از این ایده‌ها در [7] مرور شده اند.

## 1 مراجع

- [1] C. M. Will, *Was Einstein Right? Putting General Relativity to the Test*, Basic-Books (HarperCollins) 1993.  
ترجمه ای از این کتاب به فارسی منتشر شده است: کلیفرد ویل: آیا اینشتین درست می‌گفت؟ آزمون نسبیت عام، سازمان چاپ و انتشارات وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی، تهران، ۱۳۸۳
- [2] Barry R. Parker, *Search for a Supertheory: from atoms to superstrings*, Plenum Press, New York, 1987.  
ترجمه ای از این کتاب به فارسی منتشر شده است: باری پارکر، نظریه جهانشمول فیزیکی، نشر مرکز، تهران، ۱۳۷۴، صص ۱۹۸ تا ۲۰۰.
- [3] N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos, G. Dvali, "The hierarchy problem and new dimensions at a millimeter", *Physics Letters* vol. B 429 (1998) pp. 263-272 (arXiv: hep-ph/9803315).
- [4] L. Randall, R. Sundrum, "A large mass hierarchy from a small extra Dimension", *Physical Review Letters*, vol. 83 (1999) pp. 3370-3373.

- [5] L. Randall, R. Sundrum, “An alternative to compactification”, *Physical Review Letters*, vol. 83 (1999) pp. 4690-4693.
- [6] Philip D. Mannheim, *Brane-localized gravity*, World Scientific, 2005,
- [7] V. A. Rubakov, “Large and infinite extra dimensions: An Introduction”, *Physics-Uspekhi*, vol. 44 (2001) pp. 871-893, (an English translation of: *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, vol 171 (2001) pp. 913-938), ([arXiv:hep-ph/0104152](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0104152))
- [8] D. J. Kapner *et al.*, “Tests of the Gravitational Inverse-Square Law below the Dark-Energy Length Scale”, *Physical Review Letters*, vol. 98 (2007) 021101.

## نامها و اصطلاحها ي خاص

<sup>a)</sup> Theodor Franz Eduard Kaluza (1885 - 1954), Oscar Klein (1894 - 1977), <sup>b)</sup> A. Einstein, <sup>c)</sup> M. Planck, <sup>d)</sup> Large Hadron Collider, <sup>e)</sup> hierarchy problem, <sup>f)</sup> Charles-Augustin de Coulomb, <sup>g)</sup> Lisa Randall, <sup>h)</sup> Raman Sundrum, <sup>i)</sup> Anti-de Sitter,