



# نظریهٔ ریسمان و چشم‌اندازهایش

محمد مهدی شیخ‌جباری\*

نظریهٔ ریسمان در سال‌های آخر دههٔ ۱۹۶۰ به صورت مدلی برای فیزیک هادرون‌ها و برهم‌کنش‌های هسته‌ای قوی مطرح شد و تاکنون که به چارچوبی ریاضی برای طرح مسائل متعددی در حوزهٔ فیزیک نظری بدل شده دست‌خوش تحولات بسیاری چه در سطح فرمول‌بندی و چه در سطح مفاهیم بوده است. در این نوشته به مرور و بررسی این تحولات می‌پردازیم و از این طریق به چشم‌انداز نظریهٔ ریسمان در آیندهٔ نزدیک نگاه می‌کنیم.



## ۱. مقدمه

پیش از ورود به بحث نظریهٔ ریسمان به جاست که ابتدا به تبیین دو مفهوم مدل و نظریه در قالب روش‌شناسی علمی در فیزیک پردازیم. فیزیک مانند همهٔ علوم تجربی مبتنی بر چرخهٔ مشاهده (یا آزمایش)، پردازش و تحلیل مشاهدات و داده‌ها، مدل‌سازی و نهایتاً آزمودن پیش‌بینی‌های مدل در آزمایش و مشاهده است. در بخش تحلیل مشاهدات، نتایج مشاهدات به صورت کمی و به زبان اعداد معنی‌دار بیان می‌شوند. هدف مدل‌سازی، نوشتن یا ساختن روابط ریاضی بین اعداد معنی‌دار حاصل از مشاهده است. در تمامی مدل‌ها تعداد محدودی پارامتر وجود دارد که مقادیرشان را باید با استفاده از مشاهدات تعیین کرد. در عین حال هر مدلی باید بتواند روابطی جدید بین مشاهده‌پذیرهایی جدید پیش‌بینی کند که قابلیت آزمودن در آزمایش را داشته باشد. بدون توانایی پیش‌بینی، هیچ مدلی ارزش علمی ندارد. مدل‌های فیزیکی که با روابط یا معادلات خاصی تعریف و تبیین می‌شوند باید در چارچوب‌های ریاضی متناسب با مسئلهٔ مورد نظر ساخته شوند: باید بین مدل خاص فیزیکی و چارچوب ریاضی‌ای که مدل در قالب آن فرمول‌بندی شده است تمایز قائل شد. این چارچوب‌های ریاضی در واقع همان نظریه‌های فیزیکی هستند. کار فیزیکدان نظری ساختن این چارچوب‌های ریاضی یا نظریه‌هاست. کاملاً واضح است که این چارچوب ریاضی باید متناسب و متناسب با مسئلهٔ مورد بحث و با الهام‌گیری از آنچه سرانجام مدل مبتنی بر این نظریه قصد توضیح (یا توصیف) آن را دارد تدوین شود. با توجه به آنچه گفته شد، فیزیکدان نظری باید آشنایی کافی با مبانی فرمول‌بندی‌ها و نظریه‌های ریاضی داشته باشد و از طرف دیگر مسلط به سایر مدل‌های موجود -- به خصوص در حوزهٔ مورد نظر در فیزیک -- باشد. به علاوه در برخی حوزه‌های فیزیک نظری کار تکوین نظریه‌های مربوطه

و مدل‌سازی در چارچوب آن نظریه توأمان انجام می‌گیرد و در برخی موارد -- از جمله در فیزیک انرژی‌های زیاد -- این دو، یعنی مدل‌سازی و ساختن چارچوب‌های ریاضی مورد نیاز، در دو سطح موازی دنبال می‌شود. در حوزهٔ فیزیک انرژی‌های زیاد و ذرات بنیادی، به علت پیچیدگی مسائل و مدل‌های مربوط، گاهی بین کسانی که به ساختن مدل‌ها و تحلیل آنها می‌پردازند و کسانی که به استخراج نتایج و پیش‌بینی از این مدل‌ها مشغولند (این فیزیکدان‌ها معمولاً پدیده‌شناس نامیده می‌شوند) نوعی تقسیم کاری انجام شده است.

با این مقدمه به بحث اصلی که نظریهٔ ریسمان است باز می‌گردیم. نظریهٔ ریسمان همان‌طور که از اسم آن برمی‌آید ناظر به تدوین چارچوبی ریاضی است که بنا به نظر فیزیکدان‌های این رشته حل برخی مسائل بنیادی فیزیک -- عمدتاً در حوزهٔ فیزیک انرژی‌های زیاد -- در آن امکان‌پذیر خواهد شد.

در ادامهٔ این نوشتار ابتدا ضمن مروری تاریخی، به تبیین مسائل مطرح در فیزیک انرژی‌های زیاد می‌پردازیم. سپس مسیر تاریخی تکوین آن چه را امروزه نظریهٔ ریسمان خوانده می‌شود، دنبال خواهیم کرد. در بخش آخر به نظریهٔ ریسمان و مسائل پیش روی آن، و ضمن جمع‌بندی، به آنچه به زعم نگارنده چشم‌انداز حل مسائل موجود در قالب نظریهٔ ریسمان است خواهیم پرداخت.

\* برگرفته از جنگ‌آبی‌ام، ویرایش محمد رضا بهاری.  
\* پژوهشکدهٔ فیزیک، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی.

## ۲. فیزیک انرژی‌های زیاد و فیزیک ذرات بنیادی

بنا به نظر غالب، تمام آنچه در جهان اطراف ما — در تمامی کیهان از بدو مه‌بانگ تاکنون — گذشته است، در چارچوب دینامیک تعدادی «ذره» و برهم‌کنش و حالت‌های مقید آنها قابل توضیح است و هم از این رو این ذرات را ذرات بنیادی می‌نامند.

ذرات بنیادی عموماً ذراتی در ابعاد زیراتمی‌اند و درک دینامیک این ذرات مستلزم بررسی آنها در حوزه مکانیک کوانتومی است. بنا به مکانیک کوانتومی هر ذره ماهیتی موجی نیز دارد و طول موج متناظر با هر ذره با عکس تکانه آن ذره متناسب است. در نتیجه برای مشاهده و آشکارکردن فواصل هرچه کوچکتر نیاز به ذراتی با تکانه بزرگتر — یعنی با انرژی بیشتر — داریم. به همین علت فیزیک ذرات بنیادی و فیزیک انرژی‌های زیاد کاملاً در هم تنیده‌اند.<sup>۱</sup> در این بحث عموماً سیستمی در حوزه انرژی‌های زیاد قرار می‌گیرد که انرژی بر واحد ذره آن از حدود انرژی مدارهای اتمی بیشتر باشد. هرچند این مرزبندی خیلی دقیق نیست، اما حدود انرژی  $10^6 \text{ eV} = 1 \text{ MeV}$  حد پایین انرژی‌هایی است که معمولاً در فیزیک انرژی‌های زیاد مطرح است.<sup>۲</sup>

در آن دسته از آزمایش‌های فیزیک ذرات که در شتاب‌دهنده‌ها انجام می‌شود عموماً با فرآیندهای پراکندگی ذرات از یکدیگر و بررسی سطح مقطع پراکندگی ذرات سروکار داریم. در این آزمایش‌ها معمولاً انرژی ذرات از مقدار انرژی مستتر در جرم آن ذرات یعنی از  $mc^2$  (که  $m$  جرم ذره و  $c$  سرعت نور است) بسیار بزرگتر است؛ این ذرات اصطلاحاً نسبیتی‌اند. در این حوزه مکانیک کوانتومی به تنهای کارایی لازم را ندارد و باید فرمول‌بندی‌ای از مکانیک کوانتومی را که با نسبیت خاص سازگار است به کار گرفت. چارچوبی که این مهم را امکان‌پذیر می‌سازد نظریه میدان‌های کوانتومی است.

به لحاظ تاریخی از حدود دهه ۱۹۵۰ کم‌کم جایگاه نظریه میدان‌های کوانتومی در فیزیک ذرات بنیادی تثبیت شد و با فرمول‌بندی مدل الکترودینامیک کوانتومی (Quantum ElectroDynamics) یا QED — این چارچوب جایگاهی ویژه یافت.

در اواخر دهه ۱۹۶۰ و با انباشت مشاهدات آزمایشگاهی متعدد در مورد برهم‌کنش‌های قوی هسته‌ای و ذراتی که در این برهم‌کنش‌ها شرکت می‌کردند — اصطلاحاً هادرون‌ها — و به علت نبود مدلی موفق که مبتنی بر نظریه میدان‌های کوانتومی باشد، بسیاری از فیزیکدان‌های ذرات در بلامنازع بودن کاربرد این چارچوب برای ساخت مدل‌های ذرات تردید کردند. در این میان نطفه مدل ریسمان برای فیزیک هادرون‌ها شکل گرفت — این مدل برخلاف QED در چارچوب نظریه میدان‌های کوانتومی نبود.

با پیشرفت آزمایش‌ها در اوایل دهه ۱۹۷۰ و با تکوین نظریه کرومودینامیک کوانتومی (QCD: Quantum ChromoDynamics)، چارچوب نظریه میدان‌های کوانتومی جایگاه خود را در فیزیک ذرات باز یافت. در همین اثنا مدل برهم‌کنش‌های هسته‌ای ضعیف در اواسط دهه ۱۹۷۰ توسط سلام، واینبرگ و گلاشو پایه‌ریزی و پس از تکوین و اصلاح با عنوان مدل الکتروضعیف شناخته شد. این مدل نیز در چارچوب نظریه

میدان‌های کوانتومی فرمول‌بندی شده بود. از اوایل دهه ۱۹۸۰ تلفیق دو مدل الکتروضعیف و QCD مدل استاندارد فیزیک ذرات بنیادی نامیده شد و تاکنون این مدل از تمام مشاهدات و آزمایش‌ها سر بلند بیرون آمده و آزمایش‌ها یا مشاهده‌ای که به گونه‌ای قاطع دال بر نیاز این مدل به اصلاح باشد دیده نشده است. لازم به ذکر است که به صرف استفاده از چارچوب نظریه میدان‌های کوانتومی موضعی (local) و روش‌هایی که در حال حاضر برای بررسی نظریه میدان‌های کوانتومی شناخته شده، از این مدل‌ها نتایجی مشاهداتی حاصل می‌شوند (اثرات تصحیح کوانتومی در سطح حلقه‌ها و همچنین بستگی پارامترهای مدل به انرژی به علت اثرهای کوانتومی) که همگی با مشاهدات فعلی مطابقت دارند. در حال حاضر نظریه میدان‌های کوانتومی موضعی چنان جایگاه بلامنازعی در فیزیک ذرات یافته که تقریباً تمامی مدل‌های پیشنهادی برای مدل استاندارد در قالب نظریه میدان‌های کوانتومی فرمول‌بندی می‌شوند.

## ۳. نظریه ریسمان در چهل سال گذشته

چنان‌که گفته شد، در اواخر دهه ۱۹۶۰ نظریه ریسمان به عنوان مدلی برای فیزیک هادرون‌ها — ذرات بنیادی‌ای که در برهم‌کنش‌های هسته‌ای قوی شرکت می‌کنند — ساخته شد: طبق مدل ریسمان، هادرون‌ها به واقع ذرات نقطه‌ای نیستند بلکه موجوداتی یک‌بعدی به نام ریسمانند. در این مدل، ابعاد ریسمان‌ها از مرتبه  $10^{-18}$  تا  $10^{-17}$  متر در نظر گرفته می‌شد و در نتیجه در آزمایش‌های با قدرت تفکیک کمتر از این ابعاد، ریسمان‌ها همانند ذرات نقطه‌ای به نظر می‌آیند. اما با موفقیت مدل کوآرک — که طبق آن هر هادرون متشکل از دو یا سه کوآرک به نام کوآرک ظرفیت است — و با تأیید این مدل در آزمایش‌ها، مدل ریسمان عملاً در اوایل دهه ۱۹۷۰ عرصه را به مدل کوآرک و نظریه QCD واگذار کرد.

در همان اوایل دهه ۱۹۷۰ مدل ریسمان، پس از شکست به عنوان مدلی برای فیزیک هادرون‌ها، با یک جهش مفهومی به عنوان مدلی برای حل مسئله‌ای در حوزه‌های دیگر در فیزیک انرژی‌های زیاد — و نه الزاماً ذرات بنیادی — مطرح شد: مدلی برای حل برخی مسائل نظری در نسبیت عام. در پی این جهش مفهومی بود که مدل ریسمان به نظریه ریسمان و چارچوبی برای مسئله گرانش کوانتومی تبدیل شد.

نظریه نسبیت عام، که در اواخر دهه ۱۹۱۰ پیشنهاد شد، متضمن مدلی برای برهم‌کنش‌های گرانشی بود. در چارچوب نسبیت عام، مدل عکس مجذوری گرانش نیوتونی — که یک مدل کنش از دور بود — جای خود را به یک نظریه میدان موضعی می‌دهد.

با موفقیتی که نظریه‌های میدان در عرصه فیزیک ذرات کسب کرده بودند، از اواسط دهه ۱۹۵۰ به بعد فیزیکدان‌هایی که در فیزیک ذرات و به‌خصوص در جنبه‌های نظری آن کار می‌کردند به مطالعه نسبیت عام به عنوان یک نظریه میدان و به‌ویژه رفتار این نظریه به صورت یک نظریه میدان کوانتومی پرداختند. آنچه یافتند، اما، ناسازگاری ذاتی نسبیت عام

ایده فشرده‌سازی که راه‌حل پیشنهادی برای حل مسئله ابعاد اضافی در نظریه ریسمان‌ها بود خود مشکلی بزرگتر را پیش آورد: حتی با تعیین برخی از ناوردهای توپولوژیک، تعداد فضاهای شش‌بعدی (یا به بیان دقیق‌تر ریاضی خمینه‌های فشرده شش‌بعدی) عملاً بی‌نهایت است و این یعنی اینکه یا نظریه ریسمان باید خود متضمن سازوکاری دینامیکی برای انتخاب این فضاهای شش‌بعدی باشد و یا نظریه ریسمان به «مدلی» فیزیکی در چهار بُعد منجر نخواهد شد و به عبارت صریح‌تر نظریه ریسمان نظریه‌ای فیزیکی نیست. از اواسط دهه ۱۹۹۰ تحول و یا «انقلاب» بعدی در نظریه ریسمان در تلاش برای یافتن راه‌حل این مشکل و به واقع برای نجات نظریه ریسمان شکل گرفت. کلید واژه این انقلاب دوگانگی (duality) بود.

ایده کلی این بود که نظریه‌های متعدد ریسمان در چهار بُعد همگی نظریاتی مستقل نیستند بلکه بسیاری از آنها وجوه مختلفی از یک نظریه هستند و لذا نباید آنها را نظریه‌های مختلفی به شمار آورد. هرچند حدس‌های دوگانگی (duality conjectures) مشکل تعدد نظریه ریسمان‌ها در چهار بُعد را به طور کلی مرتفع نمی‌کرد اما گامی مهم در راستای حل آن بود. این مشکل شاید هنوز مهم‌ترین مسئله در فهم ما از نظریه ریسمان باشد. در بخش بعدی به این موضوع باز خواهیم گشت.

اگر حدس‌های دوگانگی درست باشند یکی از تبعاتش برای نظریه ریسمان‌ها الزام حضور موجوداتی جدید به نام D-برویه‌ها (D-branes) در نظریه ریسمان‌هاست. از سال ۱۹۹۵ که حضور D-برویه‌ها در نظریه ریسمان تثبیت شد، دینامیک D-برویه‌ها تمام مطالعات در نظریه ریسمان‌ها را تحت‌الشعاع قرار داد. کشف D-برویه‌ها منجر به دو تحول بسیار مهم و دامنه‌دار در نظریه ریسمان شد: یکی پیشرفت در فهم فیزیک سیاه‌چاله‌ها و دیگری دوگانگی معروف به AdS/CFT یا دوگانگی گرانش-نظریه میدان پیمانه‌ای. نظریه میدان‌های پیمانه‌ای همان چارچوبی است که مدل استاندارد ذرات بنیادی و به ویژه نیروهای هسته‌ای قوی و کرومودینامیک کوانتومی در آن فرمول‌بندی می‌شود. مطابق دوگانگی گرانش-نظریه میدان‌های پیمانه‌ای، گرانش کوانتومی قابل فرمول‌بندی برحسب یک نظریه میدان پیمانه‌ای است که الزاماً در آن گرانش وجود ندارد.

سال ۲۰۰۳، رویداد بسیار مهمی در فیزیک انرژی‌های زیاد و کیهان‌شناسی جهان نخستین بود: اکت‌وخیزهای تابش ریزموج زمینه کیهانی با دقتی حیرت‌آور در آزمایش WMAP مشاهده و نتایج آن منتشر شد. به اعتقاد بسیاری، نتایج WMAP درباره کیهان‌شناسی جهان نخستین اصولاً کیهان‌شناسی را به جرگه فیزیک قابل محک وارد کرد. در سطح نظری نتایج WMAP به خوبی با مدل تورمی برای جهان نخستین سازگار بود. مطابق مدل تورمی در زمانی در حدود  $10^{-37}$  ثانیه (پس از مه‌بانگ) جهان در یک دوره رشد بسیار سریع، دوره تورم، حداقل حدود  $10^{25}$  برابر بزرگ شد و از آن پس تورم با انتقال انرژی به سایر «ذرات» خاتمه پیدا کرد و جهان «دوباره گرم» شد. برای تصور بهتر این سازوکار مثال زیر را در نظر بگیرید: گلوله تویی را تصور کنید که با سرعت بسیار زیادی حرکت می‌کند (دوره تورم) و ناگهان وارد مخزنی پر از مایعی بسیار چگال می‌شود. در

به صورت نظریه میدان کوانتومی بود. پس از بررسی‌های متعدد، این نتیجه و مشکل نسبیت عام با دینامیک کوانتومی میدان‌ها از اواخر دهه ۱۹۶۰ به عنوان مسئله گرانث کوانتومی در حوزه فیزیک نظری تثبیت شد. از همان دوران با این مسئله دو نوع برخورد می‌شد: عده‌ای آن را نتیجه ناکارایی تکنیک‌های موجود نظریه میدان‌های کوانتومی برای بررسی نسبیت عام می‌دانستند، یعنی آن را یک مشکل تکنیکی و نه بنیادی می‌پنداشتند. اما عده‌ای دیگر معتقد بودند که این مشکل ناشی از مسئله‌ای بنیادی در فهم ما از مدل گرانشی، نسبیت عام با دینامیک کوانتومی است.

این دو دیدگاه پس از گذشت حدود پنجاه سال از طرح مسئله هنوز طرفداران خود را دارند و هنوز اتفاق نظر و پیشرفتی در این خصوص پدید نیامده، هرچند رفته‌رفته دیدگاه دوم طرفداران بیشتری پیدا کرده است.

از سال ۱۹۷۴ تا حدود ده سال بعد نظریه ریسمان در دست معدودی فیزیکدان -- شاید به تعداد انگشتان دو دست -- آرام آرام در حال تکوین بود. این فیزیکدان‌ها غالباً با زمینه و از دیدگاه ذرات بنیادی به نظریه ریسمان می‌نگریستند. اما در سال‌های میانی دهه ۱۹۸۰ در دو جبهه تحولی بنیادین و به تعبیری «انقلاب» در نظریه ریسمان ایجاد شد و جایگاه آن را به صورت نظریه‌ای قابل طرح و بررسی و مطالعه تثبیت کرد. یکی از این دو تحول، تکوین نظریه میدان‌های هم‌مدیس در دو بُعد بود که ابزاری بسیار کارآمد برای مطالعه نظریه ریسمان به حساب می‌آمد و دوم محاسبه‌ای بود که نشان می‌داد نظریه ابرریسمان کوانتومی -- که از افزودن و تلفیق مفهوم ابرتقارن با نظریه ریسمان ساخته شده بود -- در ده بُعد، یعنی نه بُعد فضایی و یک بُعد زمان، دارای ناهنجاری نیست؛ این مهم برای ادامه حیات این نظریه الزامی بود.<sup>۳</sup>

تا سال ۱۹۸۷ حوزه نظریه ریسمان از پنج نظریه ابرریسمان کوانتومی سازگار که همگی در ده بُعد فضازمانی فرمول‌بندی می‌شدند و مجموعه‌ای از تکنیک‌های نظریه میدان‌های دو بُعدی و مطالعه ناهنجاری‌ها تشکیل می‌شد. تا این زمان نظریه ریسمان چارچوبی بالقوه برای طرح مسائل گرانش کوانتومی آن هم در ده بُعد بود و هنوز جوابی مشخص برای مسائل مطرح در حوزه نسبیت عام نظری نداشت. «ریسمان‌کاران» که غالباً پیش‌زمینه فیزیک ذرات بنیادی داشتند در سال ۱۹۸۷ در تلاشی برای بازگشت به خاستگاه خویش و مرتبط کردن نظریه ریسمان‌ها به جهان واقع -- جهانی با سه بُعد فضایی و یک بُعد زمانی -- و ساختن مدل‌های ذرات بنیادی در قالب نظریه ریسمان مفهوم فشرده‌سازی (compactification) را مطرح کردند: شش بُعد فضایی اضافی در نظریه ریسمان به لحاظ هندسی روی فضایی با حجم بسیار کوچک -- با ابعادی کوچکتر از دقیق‌ترین مشاهداتی که تاکنون انجام شده یعنی کوچکتر از  $10^{-18}$  متر -- پیچیده شده‌اند و به همین علت در دسترس نیستند و تاکنون مشاهده نشده‌اند. به علاوه در این ایده تمامی پارامترهای مدل‌های فیزیکی در چهار بُعد فضازمانی همگی برآمده از خواص هندسی -- اعم از موضعی و توپولوژیک -- شش بُعد اضافی فشرده هستند. از این زمان تا سال‌های میانی دهه ۱۹۹۰ ریسمان‌کاران بیشتر به تکوین مفاهیم و تکنیک‌های مورد نیاز در «فشرده‌سازی» پرداختند.

این صورت گلوله توپ می‌ایستد (انتهای تورم) و مایع گرم می‌شود (دوره بازگرمایش). نتایج WMAP و افست‌وخیزهای تابش زمینه کیهانی در واقع ردپایی از رویدادهای دوره تورم است. پس از انتشار نتایج WMAP، مدل تورمی بخشی لاینفک از مدل استاندارد کیهان‌شناسی شد.

از همین دوره بسیاری از ریسمان‌کاران — که هنوز عمدتاً از عرصه فیزیک ذرات بنیادی می‌آمدند — به کیهان‌شناسی جهان نخستین رو آوردند، زیرا نظریه ریسمان به هر حال نظریه‌ای برای گرانش کوانتومی است که انتظار می‌رود چارچوبی برای فهم و مدل‌سازی جهان نخستین فراهم کند.

#### ۴. نظریه ریسمان-مشکلات پیش رو و چشم‌اندازها

چنان‌که گفته شد نظریه ریسمان از زمان شکل‌گیری تاکنون تحولات متعددی در سطح مفاهیم به خود دیده است، با این همه هنوز فهم کاملی از این نظریه وجود ندارد و حتی به عنوان چارچوبی ریاضی در مراحل تکوین است. البته این تکوین — همان‌طور که در مورد هر نظریه علمی باید باشد — با عنایت به مسائلی است که نهایتاً این چارچوب باید به صورت بستری برای مدل‌سازی آنها به کار برود.

هرچند نظریه ریسمان و ریسمان‌کاران — بیشتر به دلایل تاریخی — از خاستگاه فیزیک ذرات بنیادی آمده‌اند اما این روند با پیشرفت مشاهدات کیهان‌شناسی و نیاز به چارچوب‌های کامل‌تر و کارآمدتر در آن حوزه، رفته‌رفته تغییر یافته است و افرادی با زمینه کیهان‌شناسی به نظریه ریسمان به عنوان چارچوبی برای ساختن مدل‌های کیهان‌شناسی جهان نخستین رو آورده‌اند. این روند شاید به علت تقارن زمانی با شکست نسبی مدل‌های معمول «وحدت بزرگ» و از رونق افتادن این مدل‌ها در فیزیک ذرات نیز تشدید شده باشد. در یک جمع‌بندی می‌توان فعالیت‌های فعلی و آینده نظریه ریسمان، و شاید به طور عمومی‌تر، فیزیک انرژی‌های زیاد در شاخه نظری را به دو دسته کلی تقسیم کرد: (۱) تکوین و درک بهتر چارچوب نظریه ریسمان و، (۲) تلاش برای مدل‌سازی با ابزاری که این چارچوب در اختیار می‌گذارد. (در مورد ۱) چند مسئله اساسی وجود دارد:

۱-۱ رابطه بین نظریه ریسمان‌ها در ده بعد و نظریه ریسمان‌ها در چهار بعد:

همان‌طور که گفته شد عملاً بی‌نهایت امکان برای فشرده‌سازی شش بعد وجود دارد. تحولات چند سال اخیر نظریه ریسمان ما را به وجود سازوکاری دینامیکی در بطن نظریه ریسمان برای شاخص بودن یک یا معدودی از این بی‌نهایت امکان رهنمون نشده است.

با منطقی فعلی حاکم بر علوم و به خصوص فیزیک، این به معنای شکست یک نظریه علمی است، زیرا با وجود بی‌نهایت امکان و پارامتر آزاد این چارچوب بستری مناسب برای ساختن مدلی که قابلیت پیش‌بینی داشته باشد نیست. از این رو برخی از ریسمان‌کاران ناگزیر به اصل «انسان‌مدارانه» (anthropic principle) برای حل این معضل متوسل شده‌اند. در این دیدگاه این معضل بدین صورت

حل می‌شود که فقط معدودی از این بی‌نهایت انتخاب ممکن در چهار بعد می‌تواند منجر به جهان فیزیکی‌ای شود که متضمن ایجاد حیات است و البته بدون وجود بشر دیگر این سؤال مطرح نمی‌بود! این رهیافت اما نوعی بدعت در فلسفه علم است و مقبولیتی وسیع ندارد.

۱-۲ مسئله‌های مطرح در گرانش کوانتومی:

این مسئله‌ها خود به دو دسته کلی مسئله تکینگی‌ها در نسبیت عام — به ویژه تکینگی سیاه‌چاله‌ها و تکینگی مه‌بانگ در جهان نخستین و مسئله فیزیک سیاه‌چاله‌ها و پارادوکس اطلاعات تقسیم می‌شود. دوگانی گرانش — نظریه میدان‌های پیمانه‌ای یا AdS/CFT بستری مناسب برای طرح این مسائل را فراهم آورده است، هر چند در این بستر به نتیجه نهایی دست نیافته‌ایم، در حال حاضر، در چارچوب نظریه ریسمان، AdS/CFT امیدوارکننده‌ترین رهیافت در این خصوص به شمار می‌رود.

در خانواده مسائلی که در دسته دوم جای می‌گیرند دو دسته کلی قابل تشخیص است:

۲-۱ استفاده از ابزار ریاضی و فرمول‌بندی‌هایی که در تحول نظریه ریسمان تکوین پیدا کرده‌اند برای حل مسائلی در حوزه‌های مختلف ریاضیات یا فیزیک که حتی در حوزه فیزیک انرژی‌های زیاد قرار ندارد — مثل استفاده از مفاهیم AdS/CFT در حل برخی مسائل در حوزه فیزیک ماده چگال این انتظار می‌رود که در سال‌های آتی این روند گسترش بیشتری پیدا کند.

۲-۲ استفاده از نظریه ریسمان برای مدل‌سازی در کیهان‌شناسی جهان نخستین و همچنین مدل‌های واری مدل استاندارد ذرات بنیادی.

۲-۳ ارائه رهیافت برای حل مسئله حبس‌شدگی کوارک‌ها در QCD و در بیانی کلی‌تر فهم و توضیح مسائل مطرح در حوزه جفت‌شدگی قوی در QCD.

حال باید دید که آیا ریسمان‌کاران در سال‌های آینده پیشرفتی در هر یک از جهاتی که گفته شد خواهند داشت یا نه.

#### یادداشت‌ها

۱. برخی از خواص ذرات بنیادی مانند دوقطبی‌های الکتریکی و مغناطیسی — به رغم این که ممکن است ریشه در فیزیک بنیادی در انرژی‌های زیاد داشته باشند — خواص هستند که در انرژی‌های کم یا انرژی‌های زیراتمی قابل مشاهده‌اند.

۲. به عنوان معیاری برای مقایسه، پیشینه انرژی مطرح در فیزیک اتمی — انرژی بستگی الکترون‌ها به هسته‌اتم حدود  $10^5 \text{ eV} = 1 \text{ MeV}$  است. این حدود انرژی مربوط به فوتون‌های پرتو x سخت است. باز هم برای مقایسه انرژی فوتون‌هایی که از لامپ معمولی گسیل می‌شود حدود  $10^1 \text{ eV}$  تا  $10^2 \text{ eV}$  است.

۳. مفهوم ابرتقارن برای حل برخی مسائل دیگر نظیر مسئله تکین‌ها به نظریه ریسمان‌ها اضافه شده بود. این راه‌حل — یعنی افزودن ابرتقارن — الزاماً تنها راه‌حل نبود اما به صورت بهترین رهیافت برای حل برخی مسائل نظریه ریسمان‌ها پذیرفته شد، هرچند در اواخر دهه ۱۹۹۰ راه‌حل‌های دیگری نیز برای حل مسئله تکین‌ها پیشنهاد شد.