

ریسمان‌ها ده بلیون بار بیشتر از انرژی‌هایی است که در سرن قابل دسترسی است. اینکه این نظریه کلاً در چه زمان با محک آزمایش سنجیده شود سؤالی است که جوابش را نمی‌توان پیش‌بینی کرد. چه بسا در کیهان انرژی‌های بالایی موجود باشد که در آنها خواص ریسمانی را بتوان مشاهده کرد.

در واقع، سؤال بزرگ و اساسی در نظریه ریسمان این است که چه خواصی از آن را می‌توان در انرژی‌های پایین‌تر که قابل دسترسی است مشاهده کرد. این مسئله بسیار سختی است که احتیاج به درک عمیق‌تری از نظریه ریسمان دارد. ارتباط عمیق این رشته با ریاضیات، چه بسا در حل این مسئله نقش مهمی بازی کند، همان طور که در رشد این نظریه تاکنون بسیار مهم بوده. ولی اگر گذشته این رشته را در نظر بگیریم، باید بگوییم نحوه پیشرفت آن در قرن ۲۱ قابل پیش‌بینی دقیق نیست.

اخبار: می‌توان گفت حدود بیست سال است که جریان علم در ایران وارد مرحله «پژوهش» شده و تولید مقالات پژوهشی در این مدت رشد روزافزونی داشته است. اما علی‌رغم این رشد کمی، به نظر نمی‌رسد از لحاظ بازده کیفی و تأثیرگذاری بر علم جهانی، جایگاه رفیعی به دست آورده باشیم. آیا به نظر شما همین رشد کمی به خودی خود در نهایت باعث ارتقای کیفیت خواهد شد یا تدابیر و راهکارهای خاصی لازم است؟

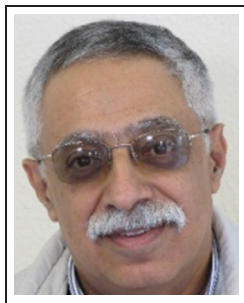
وفا: پیشرفت‌های زیادی در این زمینه در ایران صورت گرفته. رسیدن به مرحله تأثیرگذاری جهانی کاری ساده نیست و به نظر من نباید دل‌سرد شد.

بلکه باید تسهیلات بیشتری برای محققان فراهم کرد که هم آنها بتوانند کارشان را با فراغ خاطر و به صورت مؤثرتر انجام دهند و هم زمینه برای جلب بیشتر استعداد‌های درخشان مهیا شود. سرمایه‌گذاری بیشتر، چه در مورد تخصیص بودجه بیشتر تحقیقاتی، و چه برای حقوق بیشتر محققان، و چه بودجه بیشتر برای فرستادن دانشمندان به کنفرانس‌های بین‌المللی و برگزاری کنفرانس‌های درجه یک در ایران می‌تواند در ارتقای سطح تحقیقات در ایران مؤثر باشد.

اخبار: شما از جمله دانشمندان ایرانی مقیم خارج هستید که بارها (از جمله در سخنرانی مربوط به پذیرش جایزه اخیر) دلبستگی خود را به کشور زادگاهتان ابراز کرده‌اید. با چنین طرز فکر و علاقه‌ی، به نظرتان دانشمندان ایرانی و ایرانی‌تبار مقیم خارج در حال حاضر چه کمکی می‌توانند به پیشبرد علم در داخل کشور بکنند؟

وفا: افرادی نظیر من باید سعی کنند بیشتر به ایران سفر کنند و سخنرانی کنند و با دانشمندان ایران ارتباط برقرار کنند. ضمناً باید سعی کنیم جوی در خارج ایجاد کنیم که بتوانیم پذیرای دانشمندان ایرانی در کنفرانس‌ها باشیم. همین‌طور باید کمک کنیم که همکاران خارجی ما علاقه‌مند شوند در کنفرانس‌های ایران شرکت کنند. ولی باید قبول کرد که این کمک‌ها بسیار محدود هستند و نقش اساسی را دانشمندان داخل ایران ایفا می‌کنند. ■

نگاهی به دستاوردهای وفا



حسام‌الدین ارفعی *

جهانی. چند سال بعد که دیگر دکتری‌اش را گرفته بود و عضو دانشکده فیزیک دانشگاه هاروارد بود، در کنفرانسی که در رامسر برگزار شد او را ملاقات کردم. اولین کارش که منتشر شد (به همراهی ویتن) [۱] در ۱۹۸۴ در مورد محدودیت‌های شکست تقارن در نظریه‌های پیمانه‌ای بردارگونه بود که گمان می‌کنم قسمتی از رساله دکتری‌اش بود. این کار مورد توجه زیادی قرار گرفت و هنوز هم مورد توجه جدی است. از آن زمان تاکنون حدود

مقدمه

اولین بار نام کامران وفا را از کیارا نپی (Chiara Nappi) همسر ادوارد ویتن (Edward Witten) که خودش هم فیزیکدان برجسته‌ای است در یک کنفرانس شنیدم. او گفت که اد (یعنی همان ادوارد ویتن) یک دانشجوی ایرانی دارد بنام کامران وفا. گفت به نظر خیلی خوب می‌آید ولی باید ببینیم. این چنین هم شد! وفا شد یک فیزیکدان برجسته در سطح

* پژوهشکده ذرات و شتابگرها

که دو انقلاب اساسی فیزیک، نظریه کوانتومی و نظریه گرانش، را وحدت می‌بخشد، موضوعی که دغدغه بسیاری از فیزیکدانان است. در این مسیر، نظریه ریسمان نقش مرکزی را داشته است. غالب کارهای او هم در همین راستاست، از مسائل بسیار مجرد که به ریاضیات نزدیک می‌شود تا کارهایی به منظور ساختن مدل‌هایی منبسط از نظریه ریسمان برای پدیده‌شناسی ذرات، و حتی کاربرد روش‌های غنی ناشی از این نظریه در فیزیک ماده چگال. در این میان به مسائل متعددی از نظریه میدان‌ها و کیهان‌شناسی نیز پرداخته است. محورهای اساسی افکار وفا تقارن (شامل ابرتقارن، تقارن آینه‌ای) و مفاهیم هندسی است و از این روست که پل‌هایی از یک سو با ریاضیات و از سوی دیگر با آزمایش برقرار ساخته است. اثر هندسه (که در فیزیک نظری امروز شدیداً پررنگ است) در کارهای او چنان است که تعدادی از سخنرانی‌های وفا عنوان فیزیک هندسی دارند.

وی در تحقیقاتش با تعداد زیادی فیزیکدان همکاری کرده است. دانشجویان زیادی را پرورش داده است که بسیاری از آنان خود فیزیکدانان نامداری شده‌اند. در بسیاری از پیشرفت‌های نظریه ریسمان یا به تنهایی راهی را گشوده است (مانند نظریه F) یا همراه با دیگران (مانند ساختار اربیفلد). به هر حال در آشکار کردن غنای بی‌بدیل نظریه ریسمان نقشی اساسی داشته و دارد.

در زیر به شمه‌ای از سهم او در این زمینه می‌پردازیم. شاید مشهورترین دستاوردش حل معضل آنتروپی سیاهچاله‌ها باشد. سال‌ها پیش، در اوائل دهه هفتاد میلادی، بکنشتاین و پس از او هاوکینگ کشف کردند که سیاهچاله‌ها آنتروپی متناسب با مساحتشان دارند. در فیزیک، آنتروپی یک سیستم با داده‌های ماکروسکوپی معینی، برابر لگاریتم تعداد حالت‌های سازگار با داده‌های فیزیکی (حالت‌های میکروسکوپی) ماست. اما در مورد سیاهچاله، بیش از معدودی سنج، کمتر از انگشتان یک دست، وجود ندارد که آن را معین سازد. پس این آنتروپی از کجا می‌آید؟ پس از گذشت بیش از دو دهه، وفا و استرومینگر توانستند ریشه‌های آن را در حالت‌های پنهان در فضای اضافی ریسمان‌ها بیابند. این مطلب در مقاله دیگری در این شماره بررسی شده است و من از توضیح بیشتر در مورد آن می‌گذرم.

فهرست مطالبی که در این مقاله به اختصار به آنها می‌پردازم به قرار زیر است. بر کلمه اختصار تأکید می‌کنم چون واقعاً ادای حق مطلب فضایی دیگر و حجم بیشتری را می‌طلبد. مطالب زیر مجموعه‌ای است که شاید بتواند هسته اصلی قسمتی از افکار وفا را روشن سازد.

۱. شمارش سیاهچاله‌ها

۲. اربیفلد

۳. مهندسی هندسی نظریه‌های میدان

۴. ریسمان‌های توپولوژیک

۵. نظریه F

۶. تقارن‌های آینه‌ای

سیصد اثر از او به چاپ رسیده است که حیظه وسیعی از فیزیک انرژی بالا را در بر می‌گیرد ولی تنها منحصر به آن نیست، مسائلی در ریاضیات و حتی فیزیک ماده چگال را به راحتی در میان آنها می‌توان دید.

در این گفتار به زندگینامه وفا که به راحتی در اینترنت قابل دسترسی است پیش از چند جمله نمی‌پردازم و بیشتر به توضیح و مرور کارهای علمی‌اش خواهم پرداخت. واضح است که دوره کردن تمام مقالات و کارهای او در این مختصر نمی‌گنجد. سعی می‌کنم تعدادی از آنها را به گونه موضوعی و نه یک به یک به اختصار توضیح دهم. در مواردی به ذکر عنوان اکتفا می‌کنم و به ناچار بیشتر آنها را ناگفته می‌گذارم. تلاش می‌کنم آنقدر وارد جزئیات فنی و تخصصی نشوم که خواننده غیرمتخصص خسته شود. اما برای آنکه حداقلی از محتوای علمی کارها را بیان کنم ضمیمه کوتاهی در مورد نظریه ریسمان اضافه کرده‌ام تا علت و جایگاه دستاوردهای مورد بحث در چارچوب دانش بشری را روشن کنم و معلوم شود که این تلاش‌ها و کارهای وفا و ریسمانچیان دیگر به چه منظور انجام می‌شود.

زندگینامه

کامران وفا، متولد ۱۱ مرداد ۱۳۳۹ در تهران، دیپلم را از دبیرستان البرز و لیسانس خود را از دانشگاه ام.آی.تی. در آمریکا گرفت. در سال ۱۹۸۵ با درجه دکتری (تحت راهنمایی ویتن) از دانشگاه پرینستون فارغ‌التحصیل شد و پس از آن در هاروارد بوده است: از ۱۹۸۵ تا ۱۹۸۸ به عنوان عضو جوان (Junior fellow)، از ۱۹۸۸ تا ۱۹۹۰ دانشیار، از ۱۹۹۰ استاد فیزیک، و از ۲۰۰۳ تا کنون صاحب کرسی دونر (Donner) استادی علوم در دانشگاه هاروارد. در این دوران افتخارات بسیاری از آن او شده است که برخی را در اینجا ذکر می‌کنم: عضویت در آکادمی علوم و هنرهای آمریکا (۲۰۰۵)، جایزه لئونارد آیزنباود (Leonard Eisenbud) [۲] از سوی انجمن ریاضی آمریکا (۲۰۰۸) [۲]، مدال دیراک (۲۰۰۸) [۳]، عضویت در آکادمی علوم آمریکا (۲۰۰۹) و اخیراً جایزه Breakthrough (پیشگامی یا راهگشایی) در فیزیک بنیادی [۴].

وفا خود را مدیون دنیای علمی گذشته ایران و آن را منبع الهامی برای خود دانسته است. در چند سال گذشته به دفعات به ایران آمده است و نقش بارزی در برگزاری کنفرانس‌های ریسمان در پژوهشگاه دانش‌های بنیادی داشته است.

وفا به همراه همسرش آفرین صدر در بوستون زندگی می‌کند. سه فرزند دارند: فرزانه، کیان، و نیکان که مشغول به تحصیل‌اند. اخیراً او و پسرش فرزانه که دانشجوی دکتری فیزیک دانشگاه کالیفرنیا در سنتا بارباراست مقاله مشترکی را منتشر کرده‌اند [۵].

کارهای وفا

کارهای وفا طیف وسیعی از مسائل بنیادی فیزیک را در بر می‌گیرد ولی به طور عمده حول مسئله مرکزی فیزیک متمرکز است، یعنی یافتن نظریه‌ای

نکته‌ای را باید قبل از این توضیحات ذکر کنم. مرز بین این مطالب چندان روشن و شفاف نیست، به واقع همه در هم تنیده‌اند و تقسیم‌بندی بالا با تسامح و تنها به منظور انتظام بحث انجام شده است.

اربیفلد

ساختار فضای ۶ بعدی اضافی در نظریهٔ ریسمان کلید اساسی ساختار و محتوای مادی فضای ۴ بعدی است که ما در آن زندگی می‌کنیم. در ساده‌ترین حالت، این فضا یک چنبرهٔ ۶ بعدی است. برای ساختن یک نظریهٔ مناسب در فضای ۴ بعدی، این فضای ۶ بعدی باید از نوع فضای اینشتین باشد که خاصیتی موضعی است. وفا به همراه همکاران دیگر در مجموعه‌ای از مقالات نشان دادند که با تقسیم این فضا به زیرگروه‌های گسستهٔ ایزومترهای آن، فضاهای تکینه‌ای به دست می‌آیند که نظریهٔ ریسمان روی آنها خوش‌تعریف است. برخی از حالت‌های نظریهٔ ریسمان اولیه باقی می‌مانند، برخی هم از دست می‌روند و گروهی حالت نوین نیز ایجاد می‌شوند. فضاهای حاصل، تکینگی‌های مخروطی دارند و عملی‌رغم این رفتار تکینه، نظریهٔ ریسمان روی آنها تکینگی را به ارث نمی‌برد. گستردگی ریسمان است که عامل پنهان شدن تکینگی‌ها و به عبارت دیگر نرم شدن آنهاست. این روش به یکباره امکان ساختن مدل‌های جدیدی را که به پدیدهٔ شناسایی ذرات نزدیک باشد افزایش می‌دهد. در مورد خاص و در ساده‌ترین حالت، فضای چنبرهٔ ۶ بعدی را به گروه‌هایی همچون Z_2 تقسیم می‌کنیم. ساختن مدل‌های سازگار که به ۴ بعد تقلیل می‌یابند کار آسانی نیست. محدودیت‌های بسیار بر فضای فشردهٔ بعدی حاکم است و یافتن خانواده‌ای از آنها که علی‌رغم این محدودیت‌ها تکینه هم باشد هیجان زیادی را ایجاد کرد و نقطهٔ عطفی در تاریخ نظریهٔ ریسمان است. این کار با همکاری دیکسون، هاروی، و ویتن انجام گرفت [۶]، برای ملاحظهٔ توضیح بیشتر در این مورد، خواننده را به پیوست مربوط به نظریهٔ ریسمان در همین مقاله ارجاع می‌دهم.

قسمت اعظم تحولات بعدی این دستاورد توسط وفا و همکارانش، از جمله دانشجویان و همکاران پسادکتری‌اش، پیش رفته است. اربیفلدهای نامتقارن (همراه با سرمدی و نارائین)، برهم‌کنش ریسمان‌های اربیفلدی (با همکاری حمیدی)، ناهنجاری‌های فراگیر در اربیفلدها (با همکاری فرید (Freed)، اربیفلد لاندو-گینزبرگ و نقش آن در تعیین خلاهای ریسمانی (اینتر پلینگیتور)، اربیفلدهای جرم‌دار (با همکاری چکوئی)، اربیفلد با پیچش گسسته (همراه با ویتن).

فعالیت‌های وی در این زمینه بین سال‌های ۱۹۸۵ تا ۱۹۹۲ صورت گرفته است. در این سال‌ها کارهای متعدد دیگری نیز انجام داده است. از جمله، طبقه‌بندی نظریهٔ میدان‌های همدیس روی سطوح ریمان، نقش ابرریسمان در کیهان‌شناسی ریسمانی، ارتباط گروه بازهنجارش و فضاهای کلابی-یاو، مدل‌های ماتریسی، و چندین کار دیگر که مجال ذکر آنها نیست [۶].

در فیزیک نظری، تقارن به شکل‌های مختلف از دیرباز موضوع و وسیلهٔ مهمی در شناخت طبیعت و ساختن مدل‌های آن بوده است. آنجا که از دینامیک دقیق پدیده‌های فیزیکی ناآگاهیم، تقارن‌ها ما را به شناخت و کشف آنها هدایت می‌کنند. وفا نیز به این مسئله توجه بسیار داشته است و بخش قابل توجهی از کارهایش مستقیم و غیرمستقیم در راستای شناخت تقارن‌های نظریهٔ ریسمان و نظریهٔ میدان بوده است. در این میان، ابرتقارن و تقارن‌های آینه‌ای جایگاه ویژه‌ای دارند. مقوله‌ای که به عنوان مهندسی هندسی نظریه‌های میدان‌های کوانتومی شناخته شده است از این دست است. او در مجموعه مقالات مربوط به این موضوع نشان داده است که ابرتقارن‌های برخی نظریه‌های ابرمستقارن با دو مولد ابرتقارن $N = 2$ در ۴ بعد ناشی از دوگانی‌های نظریهٔ ریسمان است. دوگانی‌ها خود نوعی تقارن هستند که دو نظریهٔ مختلف را به یکدیگر مربوط می‌کنند و به دفعات به آنها باز خواهیم گشت. دو نظریه یا مدل را دوگان یکدیگر می‌خوانیم هرگاه دارای دو فرمول‌بندی کاملاً متفاوت اما محتوای فیزیکی یکسان باشند. به عبارت دیگر، دارای طیف‌ها و برهم‌کنش‌های یکسان باشند. مهندسی هندسی راه را برای یافتن خلاهای نظریه‌های $N = 2$ هموار کرد. به عنوان مثال، وفا نشان داده است که نتایج دقیق (غیراختلالی) نظریهٔ ریسمان نوع II و نتایج نابدیهای نظریهٔ میدان $N = 2$ در ۴ بعد از دوگانی‌های نوع T ناشی می‌شوند. در مثال دیگری نشان داده است که برخی نظریه‌های $N = 2$ ، باز هم در ۴ بعد، هم از فشرده‌سازی ریسمان نوع II روی چندگونه‌های کلابی-یاو با ۳ بعد مختلط، و هم از فشرده‌سازی نظریهٔ ریسمان هتروتیک روی $T_2 \times K_3$ به دست می‌آیند. وی همراه با کتس با غوطه‌ور کردن نظریه‌های میدان در گونه‌های با بعد بیشتر نظریهٔ ریسمان (که نام فنی آنها نظریهٔ M یا F است) نتایج را به نظریه‌های میدان $N = 1$ تعمیم داد [۷].

تقارن‌های آینه‌ای

تقارن آینه‌ای تعمیمی از تقارن‌هایی است که آنها را دوگانی می‌نامیم. مثلاً دو نظریهٔ ریسمان یکی روی دایره‌ای به شعاع R و دیگری روی دایره‌ای به شعاع $1/R$ از هر نظر معادلند؛ این موضوع دوگانی T خوانده می‌شود. دو نظریه که دوگان یکدیگرند دارای طیف و برهم‌کنش یکسان‌اند. این مطلب نمونه‌های دیگری هم دارد و در شرایط پیچیده‌تری هم رخ می‌دهد، شرایطی که در آنها فقط ارتباط دو طول مختلف مطرح نیست. در این مقوله نیز وفا سهم بسزایی داشته است. پس از تشخیص اهمیت فضاهای کلابی-یاو، او از اولین کسانی بود (همراه با لرخه و وارنر در ۱۹۸۹) که متوجه شد نظریه‌هایی وجود دارند که لزوماً از یک فضای کلابی-یاو نمی‌آیند. به عبارت دیگر، فشرده‌سازی روی فضاهای کلابی-یاو مختلف می‌تواند منجر به نظریه‌های یکسان گردد.

وی در یکی از مقاله‌های آغازینش (۱۹۹۱) در این زمینه که رنگ و بوی ریاضی آن غالب است، معادل بودن تقارن آینه‌ای را با هم‌ارزی دو نوع مختلف از نظریه‌های توپولوژیک یعنی مدل‌های توپولوژیک سیگما و مدل‌های توپولوژیک لاتداو - گینزبرگ نشان می‌دهد.

او، به موازات کارهای دیگر، این مطلب را برای مدتی طولانی پی‌گرفت و از مطالب جالبی که در این راستا به آنها پرداخته است به دست آوردن نظریه‌های یکسان از فشرده‌سازی نظریه‌های مختلف ریسمان روی فضاهاى مختلف است، مثلاً اینکه فشرده‌سازی نظریه ریسمان هتروپیک روی فضای $K3 \times T^2$ همان نتیجه‌ای را می‌دهد که فشرده‌سازی ریسمان گونه II روی فضاهاى کلاسی-یاو (با همکاری فرارا، هاروی، و استرومینگر ۱۹۹۵). از ذکر کارهای دیگرش می‌گذرم ولی لازم است که بر اثبات تقارن آینه‌ای که در سال ۲۰۰۰ به همراه کنتار و هوری ارائه کرده است اشاره کنم. شاید برای خواننده این نکته جالب باشد که تقارن آینه‌ای موج عظیمی در ریاضیات به وجود آورده است که هنوز هم فرو نشسته است؛ کاربرد وسیعی در هندسه شمارشی داشته است. اما روش کلی یافتن جفت‌های فضاهاى کلاسی-یاو که متقارن آینه‌ای اند هنوز به دست نیامده است [۸].

ریسمان‌های توپولوژیک

این مقوله نوعی نظریه ریسمان است که در آن تنها خواص توپولوژیک بخش فشرده ابعاد اضافی مهم‌اند. وفا روش‌هایی در این زمینه ابداع کرده است که ما را قادر به محاسبه کمیت‌هایی می‌سازد که از سوئی تحت ابرتقارن ناوردا هستند و از سوی دیگر به کمیات اندازه‌پذیر فیزیکی مانند ضریب جفت‌گذاری یوکاوا در ۴ بعد مربوط می‌شوند. به علاوه، در چارچوب هندسه شمارشی امکان شمارش خم‌های روی فضای کلاسی-یاو را فراهم می‌سازند. او همچنین توانست دامنه برهم‌کنش ریسمان‌های توپولوژیک را با دقت زیاد و در برخی موارد برای تمام سطوح ریمان به دست آورد. وی در استفاده از ریسمان‌های توپولوژیک همچنین موفق شد دوگانی‌های گوناگونی را مشاهده و ثابت کند که در میان آنها می‌توان به دوگانی بین نظریه‌های چرن-سیمونز و ریسمان‌های بسته توپولوژیک اشاره کرد. همچنین با همکاری گویا کومار فرمول‌بندی جدیدی از ریسمان توپولوژیک به عنوان نظریه‌ای برای شمارش حالت‌های BPS (حالت‌های ویژه‌ای در نظریه ریسمان که در کمینه انرژی قرار دارند و منشاء عمیق درک ما از نظریه شده است) در نظریه M ارائه کرد. او کارهای متعدد دیگری هم در ارتباط با ریسمان توپولوژیک و ارتباط آن با قسمت‌های دیگر نظریه ریسمان انجام داده است، همچون ارتباط آن با ابرریسمان، نقش آن در دوگانی گراش و نظریه‌های پیمان‌های و در نظریه‌های یانگ-میلز و سیاهچاله‌های ۲ بعدی.

نظریه F

این نظریه شکلی از نظریه ریسمان است که در سال ۱۹۹۶ در مقاله‌ای با عنوان «شاهدی بر نظریه F» توسط وفا مطرح شده و سرآغاز کشف‌های

جدیدی در نظریه ریسمان و خانواده‌ای از مدل‌های پدیده‌شناختی آن گردیده است. در این رهیافت، ابتدا نظریه به ۱۲ بعد ارتقاء می‌یابد و با فشرده‌سازی ۲ بعد جدید اضافی به صورت یک چنبره ۲ بعدی امکانات نوری پیش روی ما قرار می‌گیرد. این نظریه برای درک دوگانی قوی/ضعیف (همسانی دو نظریه یکی با برهم‌کنش قوی و دیگری با برهم‌کنش ضعیف) در گونه‌ای از نظریه که نوع دوم B خوانده می‌شود شکل گرفت. فشرده‌سازی روی فضاهاى مختلف منجر به یافتن دوگانی‌های متعدد گردیده است.

به علاوه، این نظریه خانواده بزرگی از خلأهای ریسمانی را آشکار کرد که با ارضاء برخی ویژگی‌های مورد انتظار فیزیک ذرات، ما را قدمی به مدل‌های واقع‌بینانه‌تر نزدیک کرد (منظور از خلأ، حالتی دارای کمترین انرژی است که می‌توان یک نظریه فیزیکی را بر آن بنا کرد). این آن چیزی است که نظریه F را بیشتر مورد توجه قرار داد. وفا در چند مقاله با همکاری کسانی همچون موریسون، هکمان و بیزلی مدل‌هایی پدیده‌شناختی از نوع وحدت بزرگ ساخت که علاوه بر بازسازی ساختار ذره‌ای مدل‌هایی مثل مدل کمیته ابرمتقارن (MSSM)، مسائل دیگر امروز فیزیک چون ثابت کیهان‌شناسی را هم مورد بحث قرار می‌دهد. به علاوه، او و همکارانش مهندسی هندسی را که در بالا ذکر آن رفت در این ساختارها به کار می‌بندند. ساختن چنین مدل‌هایی در دیدگاه‌های دیگر نظریه ریسمان حداقل به سادگی امکان‌پذیر نیست. در این مدل‌ها حتی ماتریس VKM که خارج از مدل استاندارد است و رفتار نوترینوها را به تصویر می‌کشد به دست می‌آید. سلسله‌مراتب جرم کوارک‌ها از دیگر توفیق‌های این روش پدیده‌شناختی است. نقش وفا در آغاز و پیشبرد آن بارز و متمایز از دیگران است.

در پایان، شایان ذکر است که علاوه بر موارد فوق وفا کارهای مهم دیگری چه به تنهایی و چه با همکاری دیگران انجام داده که اهمیتشان شاید کمتر از موارد بالا نباشد لیکن پرداختن به آنها در اینجا میسر نیست. شمارش تعداد حالت‌های سیاهچاله، اثبات حدس AdS/CFT در برخی حالت‌های خاص، روشن ساختن قسمتی از خلأهای ریسمان، و مشارکت در پایه‌ریزی کیهان‌شناسی ریسمانی از جمله آنها هستند.

پایوست: نظریه ریسمان در چند خط!

نظریه ریسمان یکی از غنی‌ترین ساختارهای ذهنی بشر است. فقط از روی احتیاط و اجتناب از افتادن در دام بحث و جدل است که آنرا غنی‌ترین نمی‌نامم. این را هم مستقل از این بحث که آیا این نظریه به درستی جهان ما را توصیف می‌کند یا نه می‌گویم. تشریح آن در یکی دو پاراگراف که در حوصله مجله‌ای چون اخبار بگنجد آسان نیست. تلاشی کرده‌ام و امیدوارم بس بی‌راه نرفته باشم. به تاریخچه این نظریه و ریشه‌های فیزیکی-فلسفی و ریاضی آن هم کاری ندارم. در فیزیک متعارف، ذرات بنیادی تشکیل‌دهنده ماده نقطه‌ای تصور می‌شوند که در پس‌زمینه هندسی خاصی حضور دارند، چه در شکل کلاسیک نیوتونی و چه در نگاه کوانتومی. خواص و نحوه رفتار آنها مستلزم ساخت و پرداخت نظریه‌هایی است که از خارج از این فرض بر آنها اعمال می‌کنیم، نظریه‌هایی به شکل‌های متعدد مانند الکترودینامیک و دینامیک

(کلاسیک و کوانتومی)، کرومودینامیک کوانتومی، گرانش که نوع کلاسیک آن را می‌شناسیم و از نوع کوانتومی‌اش اطمینان نداریم. صرفاً برای نام‌گذاری صرف و نه بیش از آن، بگذارید آن را در مقابل نظریه ریسمان، نظریه ذره‌ای بنامیم.

نظریه ریسمان (به شکل کوانتومی آن) از هر نظر در مقابل این طرز فکر قرار دارد. نقطه با یک ساختار جدید به شکل یک خم پویا (باز و بسته) جایگزین می‌شود. دینامیک نظریه ذره‌ای را به طور کمی به ریسمان تعمیم می‌دهیم. در نگاه (نگاه را به جای کلمه پارادایم به کار می‌برم) کلاسیکی اتفاق عجیبی نمی‌افتد. انگار نوسانات یک نخ یا کش با سیم دارای تنش را مطالعه می‌کنیم. اختلاف و تقابل اصلی وقتی رخ می‌دهد که از نگاه کوانتومی به این موجود می‌پردازیم. حالت‌های مختلف ریسمان مثل حالت‌های نوسانی یا دورانی و ترکیب آنها به صورت ذراتی با جرم‌ها و اسپین‌های (تکانه زاویه‌ای ذاتی) گوناگون ظاهر می‌شوند. این پدیده جهانی را به ما هدیه می‌دهد آکنده از موجوداتی که در نظریه ذره‌ای با زحمت بسیار آنها را باید بسازیم. برهم‌کنش آنها هم که در نظریه ذره‌ای با مرارت بسیار حاصل می‌شود به آسانی به دست می‌آید. اما دنیای کوانتومی با احتمال سر و کار دارد و بقاء احتمال حیاتی است. به عبارت فنی، نظریه‌های کوانتومی باید یکنانی باشند یعنی جمع احتمال تمام امکانات باید ۱ باشد! به نظریه اهمیت می‌آید ولی این قید بر نظریه ریسمان نیز اعمال شود. نتیجه‌اش بس شگفت‌آور است. بعد فضایی که ریسمان در آن می‌زید معین می‌شود: 10^6 بعد! جرم ذرات را تعیین می‌کند! و درجات آزادی آنها را، به طوری که ذرات با جرم صفر که در ساختن نظریه‌های ذره باید بر نظریه تحمیل کنیم خود به خود از پس پرده به در می‌آیند. ذراتی با اسپین‌های صفر (که مانند ذره هیگز است) و $1/2$ (شبیه الکترون و کوارک) و یک (همچون فوتون و گلوئون) و $3/2$ (که چیزی از آن نمی‌دانیم) و ۲ (پسان گراویتون) با جرم صفر. اینها برای درک این جهان لازم‌اند. جالب‌تر آنکه نوع برهم‌کنش آنها هم از جنسی است که لازم داریم: برهم‌کنش پیمان‌های و گرانشی. از همین شرط ساده پایداری احتمال، معادلات مختلف حاکم بر آنها هم در می‌آید: معادله‌های یانگ - میلز و ماکسول و اینشتین. یعنی دینامیک فضایی را که در آن زندگی می‌کند و نمود خود در این فضا را هم به ما می‌دهد؛ یعنی آجرهای بنای باشکوه تمام فیزیک بنیادی که می‌شناسیم یک‌جا ساخته می‌شود.

اما مشکل اصلی این است که این نظریه 10^6 بعد برای فضا پیش‌بینی می‌کند در حالی که ظاهراً ما در ۴ بعد هستیم. در دید نخست، این موضوع بد و هولناک جلوه می‌کند ولی پس از کمی کندوکاو و غور در آن می‌بینیم نه تنها این موضوع بد نیست بلکه عامل مهمی در غنای نظریه است. اینکه چگونه فضای ۴ بعدی را از این 10^6 بعد بیرون بکشیم علی‌الاصول به دو گونه انجام شده است: روش اول ملهم از روش کالوتزا و کلاین در استخراج الکترومغناطیس در پس‌زمینه گرانشی با استفاده از گرانش ناب ۵ بعدی است و به روش کالوتزا-کلاین شهرت دارد. در این روش، فضای ۶ بعدی اضافی را فشرده و کوچک تجسم می‌کنیم انگار که به هر نقطه از فضای ۴ بعدی ما یک فضای ۶ بعدی کوچک چسبیده است. ساده‌ترین شکل

این تجسم این است که همه این فضاها یکسان باشند مثلاً یک چنبره کوچک ۶ بعدی یا یک کره ۶ بعدی. خواص توپولوژیک این فضا نقش تعیین‌کننده‌ای در تقارن، میدان‌ها و برهم‌کنش آنها در فضای ۴ بعدی ما دارند و از این رو این ویژگی‌ها اهمیت زیادی دارند و بسیاری از کارهای انجام شده در نظریه ریسمان به آنها اختصاص دارد. سازگاری و خواست وجود ابرتقارن در ۴ بعد، این فضای ۶ بعدی را محدود به فضاهایی می‌کند که انحنا ریچی آنها صفر باشد. گروه مهمی از آنها فضاهای کلاسی-یاو هستند که در تقابل بعد از 10^6 به ۴ در نظریه ریسمان نقش مهمی دارند.

نحوه دیگر تقابل از 10^6 بعد به ۴ بعد، استفاده از موجوداتی است که آنها را برین "Brane" (برگرفته از membrane) می‌خوانیم. این موجودات که از دل نظریه درمی‌آیند مانند غشاء هستند ولی می‌توانند ابعاد بیشتر یا کمتر داشته باشند. اگر یک بعد داشته باشند شبیه ریسمان، در حالت ۲ بعدی شبیه پوسته و اگر ۳ بعدی باشند مانند ژله‌اند. بعدهای بالاتر هم می‌توانند داشته باشند که نمی‌توان آنها را شبیه موجودات ۳ بعدی که می‌شناسیم تصور کرد. برین‌ها مانند ریسمان دارای تنش یا به عبارت دیگر چگالی انرژی‌اند. می‌توانیم جهان ۴ بعدی خود را به شکل برینی تصور کنیم که در 10^6 بعد غوطه‌ور است. برین‌ها این خاصیت را دارند که انتهای ریسمان‌های باز باید روی آنها چسبیده باشد. ریسمان‌های باز خود را به شکل ذرات مادی (الکترون، کوارک، و نوترینو) و بردارهای پیمان‌های (همچون فوتون و گلوئون) متجلی می‌سازند و ریسمان‌های بسته، همچون گرانش. در این نحوه تقابل ابعاد می‌بینیم که ذرات مادی حول و حوش برین یعنی در ۴ بعد زندگی می‌کنند و گرانش در 10^6 بعد.

هر دوی این روش‌ها و ترکیب آنها برای ساختن مدل‌های مختلف جهان ما به کار می‌رود. در متن بالا به کرات به این فضاها اشاره شده است. اما نکته آخر: مقیاس نظریه ریسمان مقیاس پلانکی است: به متر، حدود 10^33 به توان منهای ۳۳! یعنی بسیار کمتر از آنچه بتوان مستقیماً در آزمایشگاه ذرات با امکانات امروزی دید.

مراجع

1. C. Vafa, and E. Witten, *Restrictions on symmetry breaking in vector-like gauge theories*, Nuclear Physics B **234** (1) (1984), 173-188.
2. جایزه‌ای برای کار درخشان در فیزیک و ریاضی به یاد لئونارد آیزنبرگ استاد دانشگاه ایالتی نیویورک که از سال 2008 برقرار شده است و هر سه سال یکبار اهدا می‌شود. وفا در سال 2008 یعنی اولین دور به همراه آندرو استرومینگر و هیروشی آگوری نائل به دریافت آن شد.
3. مدال دیراک از سال 1985 در سالروز تولد دیراک فیزیکدان بزرگ قرن گذشته از سوی ICTP به فیزیکدان‌هایی که نقشی اساسی در پیشبرد فیزیک داشته‌اند اهداء می‌شود. وفا در سال 2008 به دریافت آن نائل شد.
4. درباره این جایزه به صفحه ۴ در همین شماره اخبار نگاه کنید.
5. B. Lian, C. Vafa, F. Vafa, and Sh.Ch. Zhang, *Chernsimons theory and Wilson Loops in the Brillouin zone*, B. Rev. Phys. **95** (2017), 094512.

۶. مراجع اربیفولد
- T. Hollowood, A. Iqbal, and C. Vafa, *Matrix models, geometric engineering and elliptic genera*, Journal of High Energy Physics **03** (069) (2008).
 - L. Dixon, J.A. Harvey, C. Vafa, and E. Witten, *Strings on orbifolds (I, II)*, Nuclear Physics B **261** (1986), 678-686, and Nuclear Physics B **274** (2) (1985), 285-314.
 - ۸. مراجع تقارن‌های آینه‌ای
 - S. Ferrara, J.A. Harvey, A. Strominger, and C. Vafa, *Second-quantized mirror symmetry*, Physics Letters B **361** (1-4) (1995), 59-65.
 - M.H. Sarmadi, and C. Vafa, *Asymmetric orbifolds KS Narain*, Nuclear Physics B **288** (1987), 551-577.
 - K. Hori and C. Vafa, *Mirror symmetry*, arXiv preprint hep-th/0002222, 2000-arxiv.org.
 - M.H. Sarmadi and C. Vafa, *Asymmetric orbifolds: Path integral and operator formulations KS Narain*, Nuclear Physics B **356** (1) (1991), 163-207.
 - M. Aganagic and C. Vafa, *Mirror symmetry, D-branes and counting holomorphic discs*, arXiv preprint hep-th/0012041, 2000.
 - S. Hamidi and C. Vafa, *Interactions on orbifolds*, Nuclear Physics B **279** (3-4) (1987), 465-513.
 - K. Hori, A. Iqbal, and C. Vafa, *D-branes and mirror symmetry*, arXiv preprint hep-th/0005247, 2000.
 - D.S. Freed and C. Vafa, *Global anomalies on orbifolds*, Communications in Mathematical Physics **110** (3) (1987), 349-389.
 - S. Katz, P. Mayr, and C. Vafa, *Mirror symmetry and exact solution of 4d N=2 gauge theories I*, arXiv preprint hep-th/9706110, 1997.
 - C. Vafa, *Landau-Ginzburg Orbifolds K Intriligator*, Nuclear Physics B **339** (1) (1990), 95-120.
 - A. Aganagic, A. Klemm, and C. Vafa, *Disk instantons, mirror symmetry and the duality web*, Zeitschrift für Naturforschung A (2002), degruyter.com.
 - S. Cecotti and C. Vafa *Massive orbifolds*, Modern Physics Letters A **7** (19) (1992), 1715-1723.
 - Y.H. He, K.D. Kennaway and C. Vafa, *Dimer models from mirror symmetry and quivering amoebae*, Advances in Theoretical Mathematica Physics **12** (3) (2008).
 - C. Vafa and E. Witten, *On orbifolds with discrete torsion*, Journal of Geometry and Physics **15** (3) (1995), 189-214.
 - H. Ooguri and C. Vafa, *Knot invariants and topological strings*, Nuclear Physics B **577** (3) (2000), 419-438.
 - S. Katz, A. Klemm, and C. Vafa, *Geometric engineering of quantum field theories*, Nuclear Physics B **497** (1-2) (1997), 173-195.
 - B. Acharya, M. Aganagic, K. Hori, and C. Vafa, *Orientifolds, mirror symmetry and superpotentials*, arXiv preprint hep-th/0202208, 2002.
 - S. Katz and C. Vafa, *Geometric engineering of N=1 quantum field theories*, Nuclear Physics B **497** (1-2) (2001), 196-204.
 - C. Vafa, *Mirror symmetry and closed string tachyon condensation*, arXiv preprint hep-th/0111051, 2001.
 - M. Bershadsky and C. Vafa, *Global anomalies and geometric engineering of critical theories in six dimensions*, arXiv preprint hep-th/9703167.
 - M. Aganagic and C. Vafa, *Mirror Symmetry and supermanifolds*, arXiv preprint hep-th/0403192, 2004.
 - C. Vafa, *Geometric origin of Montonen-Olive duality*, arXiv preprint hep-th/9707131.
 - M. Aganagic and C. Vafa, *Mirror symmetry and a G₂ flop*, Journal of High Energy Physics **JHEP05** (061) (2003).
 - k.k. F. Cachazo, K. Intriligator, and C. Vafa, *A large N duality via a geometric transition*, Nuclear Physics B **603** (1) (1997), 3-41.
 - M. Aganagic and C. Vafa, *G₂ manifolds, mirror symmetry and geometric engineering*, ArXiv preprint hep-th/01110171, 2001.
 - S. Katz and C. Vafa, *Matter from geometry*, Nuclear Physics B **497** (1-2) (2001), 146-154.
 - M. Aganagic and C. Vafa, *Large N duality, mirror symmetry, and a Q-deformed A-polynomial for knots*, arXiv preprint arXiv:1204.4709, 2012.
 - S. Katz, A. Klemm, and C Vafa, *Geometric engineering of quantum field theories*, Nuclear Physics B **497** (1-2) (1997), 173-195.
 - I. Brunner and K. Hori, *Orientifolds and mirror symmetry*, Journal of High Energy Physics **JHEP 0411** (005) (2004).
 - C. Vafa, *Geometric origin of Montonen-Olive duality*, arXiv preprint hep-th/9707131.
 - C. Vafa, *Extending mirror conjecture to Calabi-Yau with bundles*, Communications in Contemporary Mathematics **01** (65) (1999).
 - M. Bershadsky and C. Vafa, *Global anomalies and geometric engineering of critical theories in six dimensions*, arXiv preprint hep-th/9703167.
 - T. Hollowood, A. Iqbal, and C. Vafa, *Matrix models, geometric engineering and elliptic genera*, Journal of High Energy Physics **JHEP0803** (069) (2008).
 - M. Aganagic and C. Vafa, *G₂ Manifolds, Mirror Symmetry and Geometric Engineering*, arXiv preprint hep-th/01110171.