

فیزیک و صنعت

راکت‌های یونی به زبان ساده



مصطفی روستایی

● راکت‌های یونی نوعی از پیشرفته‌های الکتریکی‌اند که در آنها پروت‌ها از یون و براساس قانون سوم نیوتن موسوم به قانون عمل و عکس‌العمل استفاده می‌شود. یون عبارت است از اتم یا مولکولی که در آن تعداد الکترون‌ها و پروتون‌ها با هم برابر نباشد. درواقع یون می‌تواند بار مثبت یا منفی داشته باشد. حالت یک یون همانند حالت بیشتر گازها بسیار واکنش‌پذیر است. در حالت عادی و در طبیعت فرایند منجر به ساخته شدن یون چندان معمول نیست مگر تحت شرایط خاص فیزیکی همچون شعله‌های آتش، رعدوبرق، جرقه‌های الکتریکی و نیز در پلاسماها. این یون‌های شبه‌گازی به‌سرعت با یون‌های با بار مخالف واکنش داده و به مولکول‌های خنثی یا نمک‌های یونی تبدیل می‌شوند. علاوه بر این وقتی نمک‌ها در یک حلال حل می‌شوند، یون‌ها نیز در حالت جامد یا مایع تولید می‌شوند که در این حالت بسیار پایدارند. در طبیعت و در دماهای معمولی معمولاً این حالت تثبیت‌شده بیشتر یافت می‌شود.

پیشرفته‌های یونی که در عمل نیز به‌عنوان منبع نیروی محرکه لازم در فضاییماها مورد استفاده قرار گرفته‌اند، از اصول ساده فیزیک بهره می‌جویند. نیروی پیشرانه تولیدشده توسط پیشرفته‌های یونی در مقایسه با موتورهای پیشرانه یا راکتی شیمیایی بسیار کم است، اما از ضربه ویژه یا به معنایی دیگر راندمان سوخت بسیار بالایی برخوردارند. حاصل نیروی پیشرانه اندک شتاب پایین فضاییما خواهد بود. پیشرانه یونی سبب می‌شود راکت‌های یونی برای پرتاب فضاییما به مدار زمین گزینه مناسبی نباشد، اما این نوع موتورهای پیشرانه یونی برای کاربردهای خارج از جو بسیار ایدئال است. با توجه به مواردی همچون نیازهای توان نسبتاً بالا، توان ویژه از منابع نیرومحرکه و نیز احتیاج به یک محیط زیست عاری از سایر ذرات یونیزه استفاده از پیشرفته‌های یونی در حال حاضر تنها در فضا عملی است.

با روش‌های متفاوت می‌توان به یون‌ها شتاب داد، اما در تمام روش‌ها پارامتر نسبت بار به جرم یون‌ها تعیین‌کننده است. این به آن معناست که یک نسبت اختلاف‌پتانسیل بسیار کوچک می‌تواند باعث تولید سرعت بسیار زیاد گازهای خروجی شود. این امر باعث کاهش میزان جرم عامل یا خرج یا سوخت مورد نیاز می‌شود. در پیشرفته‌های یونی به منظور شتاب‌دادن به یون‌ها از نیروهای الکتروستاتیک یا الکترومغناطیس استفاده می‌شود. عبارت «پیشرانه یونی» اغلب اوقات صرفاً برای پیشرفته‌های یونی الکتروستاتیک به کار می‌رود.

در یک مدل از پیشرفته‌های یونی از یک پتانسیل الکتروستاتیک به منظور شتاب‌دادن به یون‌ها تا سرعت‌های بسیار بالا استفاده می‌شود. یک میدان مغناطیسی شعاعی به اندازه چند ده تسلا برای نگه‌داشتن الکترون‌ها در جای خود استفاده می‌شود که در آن ترکیبی از میدان مغناطیسی و نیروی رابیایی آندی باعث گردش جریانی از الکترون‌ها در پیرامون محور پیشرانه شده و فقط سرعت رانشی اندکی در جهت محوری به سمت آند ایجاد می‌شود.

خرج –مانند گاز زنون– از طریق بخش آند که دارای سوراخ‌های کوچک متعدد تعبیه‌شده برروی آن است و به‌عنوان توزیع‌کننده گاز عمل می‌کند، به داخل موتور تزریق می‌شود. گاز زنون به علت جرم مولکولی بالا و پتانسیل مورد نیاز یونیزشدن پایین، در این نوع از موتورها یا پیشرفته‌ها به‌عنوان سوخت استفاده می‌شود. همان‌گونه که اتم‌های زنون داخل پیشرانه راکتی یونی افشاندن می‌شود، بر اثر برخورد با الکترون‌های در حال گردش با انرژی بالا یعنی ۱۰ تا ۲۰ الکترون‌ولت یا معادل دمای آن صد هزار تا ۲۵۰ هزار درجه کلوین یونیزه می‌شوند. پس از یونیزه‌شدن، یون‌های زنون دارای باری به‌اندازه مثبت یک یا مثبت دو واحد بار هستند. سپس یون‌های زنون توسط میدان الکتریکی بین آند و کاتد شتاب می‌گیرند. سرعت یون‌ها خیلی زود به ۱۵ هزار متر در ثانیه برای یک ضربه ویژه هزارو ۵۰۰ ثانیه‌ای (برابر ۱۵ کیلونیوتن ثانیه بر کیلوگرم) می‌رسد. با این حال یون‌ها به‌محض خروج، پخش شده و الکترون‌ها را نیز به همراه خود کشیده و این امر باعث ایجاد یک مخروط نورانی بدون بار در انتهای موتور خواهد شد. این همان مخروط نوری است که در فیلم‌های علمی-تخیلی که پیشرفته‌های یونی را به تصویر می‌کشد، دیده می‌شود.

دهه‌ها سال بود که روس‌ها (اتحاد جماهیر شوروی سابق) از پیشرفته‌های راکتی یونی برای تنظیمات مربوط به حفظ وضعیت ماهواره‌های خود استفاده می‌کردند. غریبه‌ها نیز امروزه از این فناوری استفاده می‌کنند. در ماهواره اسمارت-۱ آژانس فضایی اروپا که در سال ۲۰۰۳ پرتاب شد، از موتور یونی سنکما بی‌پی‌اس-۱۳۵۰-جی استفاده شد که از نوع یونی بود. این ماهواره در تاریخ سوم سپتامبر سال ۲۰۰۶ مأموریت خود را در یک تصادم کنترل‌شده به سطح کره ماه به پایان رساند. هاباپوسا، ماهواره متعلق به آژانس فضایی ژاپن هم که در سال ۲۰۰۳ به فضا پرتاب شد و با موفقیت کار خود را شروع کرد، از چهار موتور یونی زنون بهره گرفته است.

نظریه میدان کوانتومی یکی از مهم‌ترین دستاوردهای دانش بشری و یکی از قله‌های بلند فیزیک است که با کوشش‌های چندین دهه‌ای فیزیک‌دانان فتح شده است. این نظریه شکوه و زیبایی نامامی دارد و بنا بر آنچه مرحوم مریم میرزاخانی، ریاضی‌دان فقید کشورمان درباره ریاضیات گفته که ریاضیات زیبایی خود را به افراد صبور نشان می‌دهد، نظریه میدان کوانتومی هم زیبایی بی‌انتهای خود را به کسانی نشان می‌دهد که در آموختن آن صبور باشند. در ایران، در تمام گرایش‌های فیزیک در مقاطع کارشناسی‌اشد و دکترا، درسی با عنوان «نظریه میدان کوانتومی» وجود دارد. دانشجویان در مواجهه با این درس ابتدا دچار واهمه و سردرگمی می‌شوند که شاید دلیل آن گستردگی مطالب و سخت‌بودن ذاتی این نظریه است، اما وقتی این درس مهم را سیربی می‌کنند و بابت نرسد، بخشی از ندارند بار دیگر سراغش می‌روند و این بار زیبایی‌های آن را درمی‌یابند. متأسفانه تعداد کتاب‌هایی که در موضوع نظریه میدان کوانتومی به فارسی ترجمه شده‌اند به تعداد انگشتان دست هم نمی‌رسد. مقاله حاضر بر این سعی است تا چارچوب کلی این نظریه را به زبان ساده و قابل فهم برای عموم شرح دهد و انگیزه‌ای باشد برای کارهای بیشتر پژوهشگران. حتی در دنیا هم فیزیک‌دانانی که شهامت نوشتن کتابی استخوان‌دار و ماندگار در نظریه میدان کوانتومی دارند، در قیاس با دیگر شاخه‌های پژوهشی همچون کیهان‌شناسی، اخترفیزیک، فیزیک هسته‌ای، حالت جامد و ماده چکال و… کم است. نظریه میدان کوانتومی همچون کوه اورست است که از نوک قله آن می‌توان تا دوردست‌ها را دید، اما صعود به چنین قله‌ای و نوشتن از آن مهارت، حوصله و تجربه می‌خواهد؛ عواملی که برخی دانشمندان همچون هارالد فریش، پسکین، زی و افرادی دیگر داشته‌اند. نویسندگان این مقاله هم افتخار این را داشتند تا کتابی را در این باره ترجمه و به جامعه علمی ایران پیشکش کنند.

درآمدی بر نظریه میدان کوانتومی

نظریه میدان کوانتومی پیونددهنده مکانیک کلاسیک، نظریه میدان و فیزیک کوانتومی است. ۳۰۰ سال قبل مکانیک نیوتنی توسط «ایزاک نیوتن» دانشمند بریتانیایی ارائه شد. مکانیک کلاسیک برای دستگاه‌هایی که شامل تمام سرعت‌های بسیار پایین‌تر از سرعت نور هستند، معتبر است. اگر سرعت‌ها نزدیک به سرعت نور باشد، مکانیک کلاسیک نیوتنی باید توسط مکانیک نسبیتی که به سال ۱۹۰۵ «آلبرت اینشتین»، آلمانی معرفی کرد، جایگزین شود. سپس «جیمز کلارک مکسول» میدان‌های الکترومغناطیسی را معرفی کرد. معادلات مکسول توصیف‌کننده دینامیک این میدان‌هاست. به زبان دیگر، الکترودینامیک شاخه مهم دیگری از فیزیک است که رفتار بارهای الکتریکی و میدان‌های الکترومغناطیسی را توصیف می‌کند. نظریه الکترودینامیک کلاسیک توسط فیزیک‌دان اسکاتلندی جیمز کلارک مکسول به سال ۱۸۶۴ ارائه شد. معادلات مکسول، معادلات زیربنایی الکترودینامیک هستند. اگرچه مکسول با هوش سرشار خود توانست معادلات چهارگانه الکترودینامیک را فرمول‌بندی کند، سزوار است از مایکل فارادی هم نام ببریم که مفهوم میدان مغناطیسی را به جهان علم ارائه داد. همه ما از دبیرستان به یاد داریم که عناصر سازنده ماده ذرات هستند. در ادامه هم می‌آموزیم که همه چیز از کوارک‌ها و الکترون‌ها تشکیل شده؛ اما در این میان حقیقتی بزرگ مخفی مانده است. مطابق با قوانین خوش‌تعریف فیزیک واحدهای سازنده ساختمان عالم صرفاً ذرات گسسته همچون الکترون و کوارک نیستند بلکه چیز سیال‌گون پیوسته‌اند که به زبان ساده به آن میدان می‌گوییم. در نظریه میدان کوانتومی میدان بنیادی‌تر از ذرات تلقی می‌شود.

سفری به درازای چنددهه

مکانیک کوانتومی باکارهای «ماکس پلانک»^۱ آلمانی در ابتدای قرن گذشته شروع شد. فیزیک کوانتومی در سال ۱۹۰۰ هنگامی که ماکس پلانک مقاله‌ای درباره کوانتش انرژی در فرایندهای الکترومغناطیسی نوشت، آغاز شد. او ثابت بنیادی جدید h را معرفی کرد. کمی بعد هم «آلبرت اینشتین»^۲ نور را کوانتیده کرد و پیشنهاد باریکه نور طاسخ‌شده که از ذرات فوتون تشکیل شده است را ارائه داد. نور مجموعه‌ای از ذرات است که فوتون نام دارد. انرژی فوتون توسط حاصل‌ضرب ثابت پلانک و بسامد نور داده می‌شود. در سال ۱۹۲۴ «لونی دوبروی»^۳ نظریه امواج مادی را منتشر کرد. یک ذره، برای مثال یک الکترون، درست همانند مورد فوتون، به طور هم‌زمان موج نیز است. طول موج توسط نسبت ثابت پلانک به تکانه الکترون داده می‌شود. به این ترتیب الکترون‌ها و فوتون‌ها شبیه یکدیگرند، اما فوتون با سرعت نور حرکت می‌کند. در حالی که الکترون می‌تواند هر سرعتی کوچک‌تر از سرعت نور را داشته باشد. در سال ۱۹۲۷ «ورنر هایزنبرگ»^۴ کشف کرد که در فیزیک کوانتومی مشاهده‌پذیرها را نمی‌توان به طور دقیق تعیین کرد: آنها عدم قطعیت بنیادی دارند که به ثابت پلانک مربوط می‌شود. برای مثال حاصل‌ضرب عدم قطعیت موقعیت با مکان یک ذره و عدم قطعیت تکانه نمی‌تواند کوچک‌تر از ثابت پلانک باشد. به سال ۱۹۲۶ «اروین شرودینگر»^۵ مکانیک موجی را معرفی کرد. او از امواج مادی با عنوان توابع موج تعبیر کرد. تحول زمانی این توابع موج توسط یک معادله دیفرانسیل، موسوم به معادله شرودینگر توصیف می‌شود. او نشان داد این مکانیک موجی معادل

علم

پژوهش در مرزهای فیزیک

نظریه میدان کوانتومی از چه سخن می‌گوید؟

حسن فتاحی ـ وحدت محب‌ملکی



مکانیک ماتریسی است. با پیروی از این مکتب فکری، «ماکس بـورن»^۶ از مربع تابع موج با عنوان چگالی احتمال تعبیر کرد. به سال ۱۹۲۹ بود که ورنر هایزنبرگ و «ولفگانگ پائولی»^۷ میدان مغناطیسی را کوانتیده کردند. کوانتتش میدان به‌وسیله فوتون‌ها که ذراتی بدون جرم بودند، توصیف شد. این موضوع به نظریه الکترودینامیک کوانتومی که توصیف‌گر برهم‌کنش الکترون‌ها و فوتون‌ها است، منجر شد. برای مثال کوارک جرم در نظر گرفت. این جرم مؤثر توصیف‌کننده کوارک سر، کوارک ته، کوارک افسون و کوارک شگفت. اگرچه کوارک‌ها محبوس‌اند، اما می‌توان برای هر تکـ کوارک جرم در نظر گرفت. این جرم مؤثر کوارک‌های بالا و پایین بسیار کوچک است؛ چیزی نزدیک به صفر. اما جرم چهار کوارک دیگر بیشتر است؛ برای مثال جرم کوارک بالا 174GeV است. همچنین ذرات جدید سنگین جدیدی نیز که شبیه الکترون هستند، کشف شده است. نام این ذرات میون و تائو است. جرم الکترون فقط 0.5MeV است، درحالی‌که جرم میون کمی بیشتر و معادل 106MeV است. اما جرم تائو با فاصله‌ای زیاد برابر با 1.7GeV است. میون و تائو هر دو ناپایدارند و هر دو به الکترون و ذره جدید خنثایی به نام نوترینو واپاشی می‌کنند. هر لپتون باردار به یک نوترینو هم‌بسته است. بنابراین شش لپتون و شش کوارک وجود دارد. واپاشی میون و تائو به‌سبب نوع جدیدی از برهم‌کنش به نام برهم‌کنش ضعیف است. این برهم‌کنش هم به‌وسیله نظریه پیمانه‌ای یا به عبارت بهتر نظریه پیمانه‌ای الکتروضعیف که توصیف‌گر برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسی و ضعیف است، شناخته می‌شود. چهار بوزون پیمانه‌ای وجود دارد. در کنار فوتون بدون جرم، سه بوزون پیمانه‌ای پرچرم، دو بوزون W باردار و یک بوزون Z خنثی هم وجود دارد. این ذرات در سال ۱۹۸۳ در سرن کشف شدند. جرم بوزون Z چیزی حدود 80GeV است و جرم بوزون Z هم تقریباً 91GeV است. کوارک بالا و پایین، به همراه الکترون و نوترینوش، چهار عضو اول خانواده لپتون–کوارک هستند. خانواده دوم هم مشتمل بر کوارک‌های شگفتی و افسون، میون و نوترینوش است. سومین خانواده هم شامل کوارک سرونه و تائو و نوترینوش است. سه خانواده یا دسته، کوارک‌ها و لپتون‌ها به همراه نظریه پیمانه‌ای الکتروضعیف و نیز نظریه کرومودینامیک کوانتومی بخشی از نظریه استاندارد فیزیک ذرات بنیادی هستند. این نظریه توصیف‌کننده ذرات مشاهده شده و برهم‌کنش‌هایشان است.

راه‌پیش‌رو

بسیاری از فیزیک‌دانان بر این باورند که در انرژی بسیار بالا برهم‌کنش‌های جدید و ذرات جدید نقش مهمی را ایفا می‌کنند. بسیار شگفت‌انگیز است که در نظریه پیمانه‌ای الکتروضعیف و کرومودینامیک کوانتومی در انرژی‌های بسیار بالا متحد می‌شوند. تقریباً ۸۰ درصد از ماده در عالم ما، ماده هسته‌ای درون ستارگان نیست، بلکه ماده تاریک است که صرفاً از طریق برهم‌کنش‌های گرانشی مشاهده می‌شود. بنابراین معلوم نیست که چه چیزی ماده تاریک را فراهم می‌کند. ممکن است ماده تاریک به سبب نوع جدیدی از ذرات پایدار خنثی باشد. این موضوع یکی از پژوهش‌های اصلی ذرات بنیادی در شتاب‌دهنده بزرگ هادرونی، ال‌ای.جی، سی، است. ذرات می‌توانند در



پروفسور ماری گل–مان (سمت راست)، برنده جایزه نوبل فیزیک و پروفسور هارالد فریش، برنده جایزه دیراک؛ هر دو از توسعه‌دهندگان نظریه میدان کوانتومی هستند.

جفت برخورد‌های پروتون‌های بسیار پرانرژی تولید شوند. هرچند موفقیت بسیار دور از انتظار می‌نماید. در سال‌های اخیر مشاهده شده است انبساط کیهان، بر اساس آنچه از برهم‌کنش گرانشی میان کهکشان‌ها انتظار داریم، نه‌تنها کندشونده نیست، بلکه به دلیل وجود «انرژی تاریک» شتاب مثبت هم دارد. به نظر می‌رسد انرژی تاریک از جمله کیهان‌شناختی در معادلات میدان گرانش که آلبرت اینشتین در سال ۱۹۱۷ ارائه کرده، نشئت گرفته باشد. در مدل استاندارد ذرات، انتظار می‌رفت نوترینوها هم مثل فوتون‌ها بدون جرم باشند. اما در سال‌های اخیر مطالعات صورت‌گرفته در فیزیک نوترینوها که از لایه‌های بالایی جو و از خورشید می‌آیند، نشان می‌دهد که نوترینوها نوسان می‌کنند. برای مثال، مشاهده شده است نوترینوی الکترون کسبیلی از خورشید وقتی به زمین می‌رسد، بخشی از نوترینوسی میون می‌شود که ثابت می‌کند نوترینوها نمی‌توانند بدون جرم باشند. البته جرم نوترینوها باید بسیار کم باشد. به این‌گونه است که هنوز سوالات بسیاری در فیزیک برای پژوهش وجود دارد.

چرا نظریه میدان کوانتومی سخت‌است؟

نظریه میدان کوانتومی موضوعی دشوار و به عبارت دقیق‌تر، پیچیده است. به زبانی دیگر، این نظریه شامل تمام سرزمین وسع فیزیک است؛ میدانی که می‌تواند به شیوه‌های مختلف برهم‌کنش ده‌ها و صدها هزار ذره را توصیف کند. حتی اگر فضا خالی از ذرات باشد و خلأ به شمار رود، باز هم نظریه میدان کوانتومی آنجا حضور دارد. این پیچیدگی است که فهم این نظریه را دشوار کرده است. حتی فهم هیچ چیز هم در این نظریه دشوار است. نظریه میدان کوانتومی با میدان و ذرات و پادذرات سروکار دارد و کوپی رازهای پسرده زیرین طبیعت را در دل خود جای داده است.

بی‌نهایت‌ها:

۱– ماکس پلانک فیزیک‌دان آلمانی ناموری بود که به سال ۱۸۵۸ به دنیا آمد و در سال ۱۹۴۷ در سال بعد از اتمام جنگ جهانی دوم چشم از جهان فروبست. او به سال ۱۹۱۸ جایزه نوبل فیزیک را از آن خود کرد. شهرت پلانک به خاطر کشف بزرگ رابطه تابش جسم سیاه است که آن را آغاز عصر کوانتوم می‌دانند. استادان راهنمای پلانک فردریش هیرل، گبریشف و هلمهولتز بودند. از دانشجویان معروف او می‌توان به لیزه مایتر اشاره کرد که در فیزیک هسته‌ای چهره‌ای شناخته‌شده است. خانه پلانک محل رفت‌وآمد دانشمندان بسیاری بود؛ که از جمله آلبرت اینشتین، پلانک برخلاف اینشتین باره‌ای ملی‌گرایانه پررنگی داشت.

۲– آلبرت اینشتین دانشمند آلمانی است و شاید سرشناس‌ترین چهره فیزیک در عصر حاضر باشد. او در خانواده‌ای یهودی در آلمان به دنیا آمد و در سال ۱۹۵۵ در ریاستون آمریکا درگذشت. شهرت اینشتین در فیزیک به خاطر دو نظریه مهم نسبیت خاص و نسبیت عام است که به ترتیب به سال ۱۹۰۵ و ۱۹۱۶ ارائه شد. زندگی اینشتین بسیار پرفراز و نشیب بود. تحصیلات دانشگاهی‌اش در زوریخ سوئیس بسیار پرییخ‌وخم بود. از همسر اولش که بانویی فیزیک‌دان بود، جدا شد. مجبور شد به آمریکا مهاجرت کند و بعد از قاعحه هیروشیما و ناکازاکی به‌شدت در بی‌منوعیت استفاده از سلاح‌های هسته‌ای بود.

۳– لوئی دوبروی فیزیک‌دان معروف فرانسوی است که به خاطر کشف طبیعت موجی الکترون و نیز امواج در خانواده‌ای یهودی در آلمان به دنیا آمد و در سال ۱۹۵۵ در ریاستون آمریکا درگذشت. شهرت اینشتین در فیزیک به خاطر دو نظریه مهم نسبیت خاص و نسبیت عام است که به ترتیب به سال ۱۹۰۵ و ۱۹۱۶ ارائه شد. زندگی اینشتین بسیار پرفراز و نشیب بود. تحصیلات دانشگاهی‌اش در زوریخ سوئیس بسیار پرییخ‌وخم بود. از همسر اولش که بانویی فیزیک‌دان بود، جدا شد. مجبور شد به آمریکا مهاجرت کند و بعد از قاعحه هیروشیما و ناکازاکی به‌شدت در بی‌منوعیت استفاده از سلاح‌های هسته‌ای بود.

۴– ورنر هایزنبرگ فیزیک‌دان سرشناس آلمانی است که به خاطر عدم قطعیت جازیه نوبل فیزیک را دریافت کرد. او از بنیان‌گذاران مکانیک کوانتومی است. هایزنبرگ در بازه زمانی جنگ جهانی دوم در آلمان باقی ماند و شواهدی وجود دارد مبنی بر همکاری‌اش با ارتش آلمان نازی برای ساختن بمب اتم که البته هرگز محقق نشد. او کتاب بسیار معروفی دارد با نام جزء و کل که به فارسی هم ترجمه شده است.

۵– اروین شرودینگر فیزیک‌دان اتریشی است که به سال ۱۹۳۳ موفق به دریافت جایزه نوبل شد. معادله شرودینگر که در فیزیک کوانتومی از اساسی‌ترین معادلات است، حاصل تلاش اوست.

۶– ماکس بورن فیزیک‌دان و ریاضی‌دان یهودی‌تبار آلمانی بود. وی در سال ۱۹۵۴ جایزه نوبل فیزیک را از آن خود کرد. او یکی از انفری بود که بیانیه راسل– اینشتین را امضا کردند. ماکس بورن تحصیلات خود را در دانشگاه‌های برسلاو و هایدلبرگ و زوریخ انجام داد. او در طول تحصیلات در مقطع دکترا و نیز انجام تحقیقاتش برای دریافت عنوان دانشیاری در گوتینگن، با دانشمندان و ریاضی‌دانان برجسته‌ای مانند فلیکس کلاین، داوید هیلبرت، هرمان مینکوفسکی، اوتو رونکه، ویگکت و کارل شوارزشیلد در تماس بود. در ۱۹۰۹ مدرس دانشگاه گوتینگن شد و در ۱۹۱۲ به دانشگاه شیکاگو رفت. در ۱۹۱۹ مدتی در ارتش آلمان خدمت کرد و سپس استاد دانشگاه فرانکفورت شد.

۷– ولفگانگ پائولی فیزیک‌دان اتریشی بود که به سال ۱۹۴۵ جایزه نوبل فیزیک را به خاطر اصل طرد پائولی تصاحب کرد. او به سال ۱۹۵۸ و خیلی زودتر از انتظار در ۵۸سالگی درگذشت.

دنیای شگفت‌انگیز نجوم

ماده تاریکِ داغ‌وسرد



سحر سرگلزایی

● عامل اصلی در شکل‌گیری ساختارها در عالم، در مقیاس بزرگ افت‌وخیز چگالی ماده تاریک است. ساختارهایی که در عالم کنونی مشاهده می‌کنیم آشکارا به نوع افت‌وخیزهای ماده تاریک ارتباط دارند. حال می‌خواهیم نگاهی دقیق‌تر به این افت‌وخیزها بیندازیم.

با مراحل بسیار اولیه ابعاد عالم یعنی زمانی که صد میلیون بار کوچک‌تر از اندازه فعلی‌اش است، شروع می‌کنیم. می‌دانیم که دمای عالم متناسب با عکس انبساط تغییر می‌کند. یعنی می‌توان با تقریبی مناسب این‌طور فرض کرد که وقتی ابعاد عالم صد میلیون مرتبه کوچک‌تر بود، دمایش هم صد میلیون بار بیشتر بود؛ چیزی حدود ۳۰۰ میلیون درجه کلوین. در این دما ماده به‌صورت سوبونی داغ از پلاسما بود. این ماده باید با توزیعی نسبتاً یکنواخت بوده باشد؛ با افت‌وخیزهای ناچیزی در چگالی. در فیزیک با داشتن افت‌وخیزهای چگالی در مقیاس‌های مختلف می‌توان میزان این افت‌وخیزها را مشخص کرد. پرسش اساسی این است که الگوی این افت‌وخیزها چیست؟ فیزیک‌دانان ماده تاریک را به دو دسته داغ و سرد تقسیم می‌کنند. این دو نوع ماده تاریک به الگوهای مختلف افت‌وخیز چگالی در عالم منجر می‌شوند؛ بنابراین برای شکل‌گیری ساختارها مراحل تحولی متفاوتی به دست می‌آید.

برای شروع بحث ابتدا باید دو مفهوم داغ و سرد را درباره ماده تاریک بدانیم. فرض دانشمندان بر این است که ماده تاریک نوعی ذره عجیب است و فرض می‌شود ذرات ماده تاریک از نظر الکتریکی خنثی هستند. در واقع ویژگی کلیدی این ذره جرم آن خواهد بود. بیایید فرض کنیم جرم ذره ماده تاریک در قیاس با دیگر ذرات بنیادی شناخته‌شده در مدل استاندارد بسیار کم باشد. برای درک بهتر جرم الکترون پنج‌دهم مگالکترون‌ولت است. حال فرض کنید جرم ذره ماده تاریک ۱۰ الکترون‌ولت است؛ یعنی پنجاه ۵۰ هزار بار سبک‌تر از الکترون. از آنجایی‌که در عالم اولیه فاصله‌ها بسیار کمتر بود، تمام ذرات با هم برخورد می‌کردند و برهم‌کنش داشتند یعنی به دمای مشترکی رسیده بودند. در فیزیک دمای یک سامانه معیاری است از انرژی جنبشی تک‌تک ذرات آن سامانه. با این حساب در عالم اولیه یا حتی بهتر است بگوییم عالم بسیار اولیه هم ذرات ماده تاریک و هم الکترون‌ها باید انرژی جنبشی یکسانی می‌داشتند، اما از آنجایی‌که ذرات ماده تاریک مطابق با همان فرض اولیه بسیار سبک‌تر از الکترون است، برای آنکه انرژی جنبشی یکسانی با الکترون داشته باشد باید بسیار سریع‌تر حرکت می‌کرد. همچنان که با انبساط عالم دما پایین آمده و عالم سرد می‌شد، مرحله‌ای فرا رسید که ذره ماده تاریک کاملاً از بقیه ماده جدا شد. اگرچه هنوز هم ذره ماده تاریک با سرعت زیادی حرکت می‌کرد. صفت «داغ» به این معناست که وقتی ذره ماده تاریک از بقیه ماده جدا شد کم‌اکان با سرعت خیلی زیاد، سرعتی قابل‌مقایسه با سرعت نور حرکت می‌کرد. از سوی دیگر اگر ذره ماده تاریک بسیار سنگین‌تر از ذرات بنیادی شناخته‌شده باشد، وضعیتی که در بالا توصیف شد برعکس می‌شود. برای مثال جرم پروتون، ذره‌ای که خود از سه کوارک ساخته شده و در ساختار هسته یافت می‌شود، یک گیگا الکترون‌ولت است. حال ذره ماده تاریکی را در نظر بگیرید که ۵۰ برابر پروتون یعنی ۵۰ گیگا‌الکترون‌ولت جرم دارد. بر اساس استدلالی که بالا گفته شد در عالم اولیه چنین ذره ماده تاریکی کاملاً سبک‌تر از الکترون و پروتون داشتند و وقتی از ماده معمولی جدا شدند سرعت بسیار کمتری داشت. چنین ذره ماده تاریکی، ماده تاریک «سرد» نامیده می‌شود.

الگوی افت‌وخیزهای چگالی موجود در ماده تاریک در خلال مراحل اولیه تحول عالم به اینکه ماده تاریک از نوع سرد بوده یا داغ بستگی داشت.

چنانچه ذرات بیش از حد سریع حرکت کنند، افت‌وخیزهای چگالی کوچک–مقیاس در ماده تاریک نمی‌توانند تقویت شوند. حرکت سریع ذرات موجب یکسان‌سازی چگالی ماده تاریک خواهد شد، اما اگر طول موج افت‌وخیز چگالی بزرگ‌تر از میانگین فاصله‌ای باشد که ذرات ماده تاریک پیمودند، آن‌گاه این فرایند نمی‌تواند مؤثر باشد. به همین دلیل است که درحالی‌که افت‌وخیزهای بزرگ–مقیاس ماده تاریک باقی می‌مانند؛ افت‌وخیزهای کوچک–مقیاس از بین می‌روند.

در ادامه باید جرم ماده تاریک را بدانیم. هیچ نوع اطلاعات مستقیمی در دست نیست. یکی از احتمالات مربوط به جرم ماده تاریک داغ، نوترینو است؛ با این پیش‌فرض که جرم نوترینو را غیرصفر در نظر بگیریم. فیزیک‌دانان از این واقعیت آگاه‌اند که جرم نوترینوی الکترون، نوترینوی میون و نوترینوی تـاو به ترتیب ۱۲، ۲۵۰ کیلوالکترون‌ولت و ۳۵ مگالکترون‌ولت است. سناریوهای دیگری هم برای ذره ماده تاریک سرد وجود دارد. این تمام ماجرا نیست. در عالم عامل ناشناخته دیگری وجود دارد که «انرژی تاریک» نام گرفته و بیشترین سهم از آنچه عالم را تشکیل داده، به خودش اختصاص داده مهمی در تحول عالم دارد.