

## تکامل تصویر فیزیکدان از طبیعت

پل آدرین موریس دیراک\*

دیراک در این مقاله تحول نظر بها در فیزیک را درحول وحوش نظریه کوانتومی به بحث می کشد. ضمن بررسی تحول نظریه عام فیزیکی در گذشته، وی به بیان دیدگاههای خود در زمینه تحول آن در آینده نیز می پردازد.

چهار بعد کاملاً متقارن نیستند. در تصویر چهار بعدی راس‌تاهایی وجود دارند که با راس‌تاهای دیگر متفاوت اند؛ همانهایی که راس‌تاهای صفر نامیده می شوند، و پرتونور در امتداد آنها حرکت می کند؛ بنا بر این تصویر چهار بعدی کاملاً متقارن نیست. با این حال میان این چهار بعد تقارنهای بسیاری وجود دارند. اگر فقط معادلات فیزیک را در نظر بگیریم، تنها مورد عدم تقارن بعد زمان در مقایسه با سه بعد فضا، اختلاف علامت ابعاد فضا و بعد زمان در این معادلات است. [نگاه کنید به معادله بالایی صفحه ۲۱۳].

بدین سان تصویر سه بعدی جهان تکامل یافت و به تصویر چهار بعدی منجر شد. خواننده احتمالاً از این وضعیت خشنود نخواهد بود، زیرا هنوز هم دنیا در ذهن او سه بعدی می نماید. چگونه می توان - همان طور که اینشتین از فیزیکدانان می خواهد - این تصویر ذهنی را چهار بعدی کرد؟ آنچه به ذهن ما می آید در واقع مقطعی سه بعدی از یک تصویر چهار بعدی است. برای دریافت آنچه در یک زمان به ذهنمان می رسد، باید یک مقطع سه بعدی را انتخاب کنیم؛ در زمان بعد مقطع سه بعدی متفاوت دیگری خواهیم داشت. مشکل فیزیکدان بیشتر آن است که رویدادهای یکی از این مقاطع را به رویدادهای مقطع دیگر که به زمان دیرتری مربوط می شود، پیوند

در این مقاله می خواهم درباره تحول نظریه عام فیزیکی گفتگو کنم؛ می خواهیم ببینیم نظریه عام فیزیکی در گذشته چگونه تحول یافته است و تحول آن در آینده چگونه می تواند باشد. این تحول پیوسته و مداوم را می توان یک فرایند تکاملی دانست که قرنهایست ادامه دارد.

نخستین مرحله عمده این فرایند تکاملی رانیوتون پیش آورد. قبل از نیوتون مردم، جهان را اساساً دو بعدی می دانستند؛ همان دو بعدی که می شود در آن قدم زد، و بعد بالا-پایین چیزی اساساً متفاوت به نظرشان می رسید. نیوتون با به میان آوردن نیروهای گرانشی و نشان دادن چگونگی جای-گرفتن این نیروها در نظریه فیزیکی معلوم کرد که می توان بالا-پایین را هم راستایی دانست که با دو راستای دیگر قرینه است. می توان گفت که نیوتون به ما امکان داد تا از تصویری با تقارن دو بعدی به تصویری با تقارن سه بعدی برسیم.

اینشتین گام دیگری در همین جهت برداشت و چگونگی گذار از تصویری با تقارن سه بعدی به تصویری با تقارن چهار بعدی را نشان داد. او زمان را وارد این تصویر کرد و نشان داد که چگونه نقشی که زمان ایفا می کند از بسیاری جهات با نقش سه بعد فضا قرینه است. اما این تقارن به تمامی کامل نیست. تصویر اینشتین ما را وامی دارد تا از دیدگاهی چهار بعدی به جهان بنگریم؛ اما این

بدهد. بنا بر این، تصویر با تقارن چهار بعدی تمام وضعیت موجود را به ما نشان نمی‌دهد. این امر بویژه هنگامی اهمیت پیدامی‌کند که پیشرفتهای ناشی از نظریه کوانتومی را در نظر بگیریم. نظریه کوانتومی به ما می‌آموزد که ناچار باید فرایند مشاهده را به حساب آورد، و مشاهدات هم معمولاً مستلزم آنند که بخشهای سه بعدی از تصویر چهار بعدی عالم را در نظر بگیریم.

نظریه نسبیت خاص اینشتین از ما می‌خواهد تمامی قوانین فیزیک را به صورتی درآوریم که آشکارا تقارن چهار بعدی داشته باشند. اما هنگامی که این قوانین را برای به دست آوردن نتایج مشاهدات به کار می‌گیریم، ناچاریم چیزی افزون بر تقارن چهار بعدی به میان آوریم؛ یعنی مقطعی سه بعدی را که آگاهی ما را از عالم در زمانی معین توصیف می‌کنند.

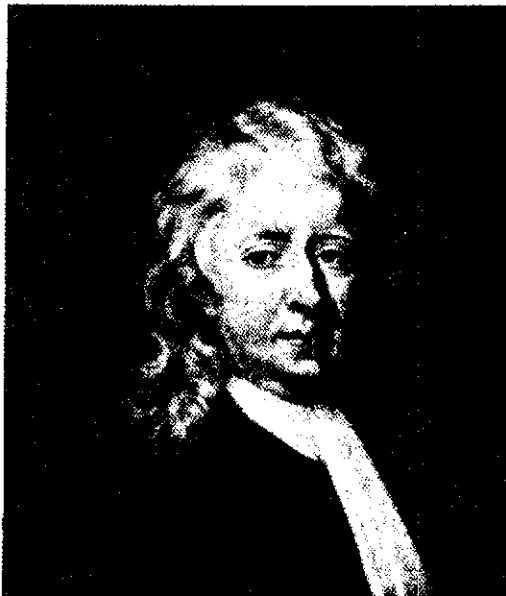
اینشتین سهم بسیار مهم دیگری در تکامل تصویر فیزیکی ما داشت: او نظریه نسبیت عام را ارائه کرد؛ این نظریه از ما می‌خواهد که فضای فیزیکی را خمیده فرض کنیم. پیشتر، فیزیکدانان همیشه بایک فضای تخت، یعنی فضای سه بعدی نیوتونی که بعداً به فضای تخت چهار بعدی نسبیت خاص گسترش یافت، سروکار داشتند. نظریه نسبیت عام به این دلیل که از ما می‌خواهد فضا را خمیده بیندازیم، سهم واقعاً مهمی در تکامل تصویر فیزیکی ما از جهان دارد. در بایستهای کلی این نظریه می‌گویند که تمامی قوانین فیزیک را می‌توان در فضای چهار بعدی خمیده فرمولبندی کرد، و اینکه این قوانین نسبت به چهار بعد، تقارن آشکار دارند. اما در اینجا هم هنگامی که وارد عرصه مشاهدات می‌شویم، که البته امری است ضروری اگر بخواهیم دیدگاه نظریه کوانتومی را اتخاذ کنیم، ناچاریم فقط بخشی از این فضای چهار بعدی را در نظر بگیریم. اگر فضای چهار بعدی خمیده باشد، هر مقطعی که از آن بسازیم نیز باید خمیده باشد؛ زیرا در حالت کلی نمی‌توان در فضای خمیده معنایی برای یک مقطع تخت قائل شد. این امر به تصویری می‌انجامد که در آن به ناچار باید مقطعی سه بعدی خمیده را در فضای چهار بعدی خمیده در نظر بگیریم و از مشاهدات این مقاطع گفتگو کنیم.

در سالهای اخیر عده‌ای کوشیده‌اند ایده‌های کوانتومی را در گرانرش و نیز در پدیده‌های دیگر فیزیک به کار بگیرند، و این کار به وضعیتی نامنتظره منجر شده است، یعنی هنگامی که از دیدگاه این مقطعی سه بعدی گرانرش می‌نگریم، بی می‌بریم که برخی از درجات آزادی نظریه

اینشتین سهم بسیار مهم دیگری در تکامل تصویر فیزیکی ما داشت: او نظریه نسبیت عام را ارائه کرد؛ این نظریه از ما می‌خواهد که فضای فیزیکی را خمیده فرض کنیم. پیشتر، فیزیکدانان همیشه بایک فضای تخت، یعنی فضای سه بعدی نیوتونی که بعداً به فضای تخت چهار بعدی نسبیت خاص گسترش یافت، سروکار داشتند. نظریه نسبیت عام به این دلیل که از ما می‌خواهد فضا را خمیده بیندازیم، سهم واقعاً مهمی در تکامل تصویر فیزیکی ما از جهان دارد. در بایستهای کلی این نظریه می‌گویند که تمامی قوانین فیزیک را می‌توان در فضای چهار بعدی خمیده فرمولبندی کرد، و اینکه این قوانین نسبت به چهار بعد، تقارن آشکار دارند. اما در اینجا هم هنگامی که وارد عرصه مشاهدات می‌شویم، که البته امری است ضروری اگر بخواهیم دیدگاه نظریه کوانتومی را اتخاذ کنیم، ناچاریم فقط بخشی از این فضای چهار بعدی را در نظر بگیریم. اگر فضای چهار بعدی خمیده باشد، هر مقطعی که از آن بسازیم نیز باید خمیده باشد؛ زیرا در حالت کلی نمی‌توان در فضای خمیده معنایی برای یک مقطع تخت قائل شد. این امر به تصویری می‌انجامد که در آن به ناچار باید مقطعی سه بعدی خمیده را در فضای چهار بعدی خمیده در نظر بگیریم و از مشاهدات این مقاطع گفتگو کنیم.

در سالهای اخیر عده‌ای کوشیده‌اند ایده‌های کوانتومی را در گرانرش و نیز در پدیده‌های دیگر فیزیک به کار بگیرند، و این کار به وضعیتی نامنتظره منجر شده است، یعنی هنگامی که از دیدگاه این مقطعی سه بعدی گرانرش می‌نگریم، بی می‌بریم که برخی از درجات آزادی نظریه

در سالهای اخیر عده‌ای کوشیده‌اند ایده‌های کوانتومی را در گرانرش و نیز در پدیده‌های دیگر فیزیک به کار بگیرند، و این کار به وضعیتی نامنتظره منجر شده است، یعنی هنگامی که از دیدگاه این مقطعی سه بعدی گرانرش می‌نگریم، بی می‌بریم که برخی از درجات آزادی نظریه



اسحاق نیوتون (۱۶۴۲/۱۱۰۶-۱۷۲۷) با ارائه قانون گرانرش خود تصویر تقارن دو بعدی فیزیکدان از طبیعت را تغییر داد و به تصویر متقارن سه بعدی تبدیل کرد. این تصویر را جیمز ماکاردل در سال ۱۷۶۸/۱۱۳۹ از روی تابلویی که توسط ایناک سی من نقاشی شده بود، کشیده است.

امواج وابسته به ذرات به یاری او شتافتند. او توانست عقاید دویروی را گسترش دهد و معادله‌ای بسیار زیبا، به نام معادله موج شرودینگر، برای تشریح فرایندهای اتمی، ارائه دهد. شرودینگر معادله خود را از طریق تفکر صرف به دست آورد، یعنی برخلاف هایزنبرگ، او تلاش نکرد که از نزدیک در جریان تحولات تجربی باشد، بلکه کوشید به تعمیم زیبایی از آراء دویروی دست یابد.

باید داستانی را که از شرودینگر شنیدیم به شما بگویم. باید بگویم که چطور هنگامی که فکر این معادله در ذهنش نقش بست، آن را بی درنگ در مورد رفتار الکترون در اتم هیدروژن به کار بست، و سپس نتایجی گرفت که با تجربه و آزمایش موافق و سازگار نبودند. این ناسازگاری از آنجا ناشی می‌شد که در آن زمان نمی‌دانستند الکترون دارای اسپین است. البته، این موضوع سرخوردگی بزرگی برای شرودینگر به ارمغان آورد؛ و باعث شد چند ماهی از کارش دست بکشد. پس از چندی متوجه شد که اگر تصحیحاتی را که نسبت ایجاب می‌کند به حساب نیاورد و نظریه خود را به شیوه‌ای تقریبی تر به کار بندد، در این صورت با این درجه از تقریب کار او با مشاهدات سازگار می‌شود. او نخستین مقاله‌اش را با قید این تقریب به چاپ رساند. و بدین گونه معادله موج شرودینگر به جهانیان ارائه شد. البته بعدها، هنگامی که معلوم شد چگونگی باید اسپین الکترون بدرستی به حساب آورده شود، روشن شد که اختلاف میان نتایج به کارگیری معادله نسبی شرودینگر و نتایج آزمایشها از کجا ناشی می‌شده است.

من فکر می‌کنم در این داستان درسی آموزنده نهفته است، یعنی اینکه زیبا بودن معادلات، مهمتر از جور بودن آنها با آزمایش است. اگر شرودینگر به کار خودش اطمینان بیشتری می‌داشت، می‌توانست آن را چند ماه زودتر منتشر کند، و می‌توانست معادله‌ای دقیقتر ارائه دهد. این معادله اکنون به نام معادله کلاین-گوردون مشهور است، اگرچه در حقیقت شرودینگر آن را کشف کرد؛ و در واقع او پیش از آنکه حل غیرنسبی اتم هیدروژن را پیدا کند، معادله نامبرده را کشف کرده بود. به نظر می‌رسد که اگر کسی با فکر زیبا ساختن معادله‌اش کار کند، و اگر به راستی از درک شهودی قوی برخوردار باشد، بی‌تردید پیشرفت خواهد کرد. اگر هماهنگی کاملی میان نتایج کار و آزمایش وجود نداشته باشد، نباید

حالا، می‌خواهم پیشرفتهایی را که نظریه کوانتومی فراهم آورده است بررسی کنم. نظریه کوانتومی به چیزهای بسیار کوچک می‌پردازد و موضوع اصلی علم فیزیک در ۶۰ سال گذشته بوده است. در خلال این مدت، فیزیکدانها مشغول گردآوری اطلاعات تجربی بسیار زیاد و پرداختن نظریه‌هایی مطابق با آنها بوده‌اند، و این تلفیق نظریه و تجربه به پیشرفتهای مهمی در تصویر فیزیکدان از طبیعت منجر شده است.

کوانتوم هنگامی ظاهر شد که پلانک کشف کرد که برای توضیح قانون تابش جسم سیاه باید فرض کرد که انرژی امواج الکترومغناطیسی فقط می‌تواند مضربی از یک واحد مشخص باشد و بستگی به بسامد امواج دارد. پس از آن، اینشتین همین واحد انرژی را که در پدیده فتوالکتریک ظاهر می‌شود، کشف کرد. در این کارهای اولیه بر روی نظریه کوانتومی فقط لازم بود واحد انرژی مذکور پذیرفته شود، بدون اینکه بتوان آن را درون یک تصویر فیزیکی جای داد.

نخستین تصویر نوینی که پدیدار شد، تصویر اتمی بوهر بود. در این تصویر الکترونهای متحرکی داریم که روی مدارهای کاملاً معینی در حرکت‌اند و گاه‌گاهی از یک مدار به مدار دیگر می‌جهند. نمی‌توانستیم تصور کنیم که این جهش چگونه رخ می‌دهد، فقط می‌بایست آنرا به عنوان نوعی ناپیوستگی بپذیریم. تصویر اتمی بوهر تنها در موارد خاصی صادق بود، و اساساً در موردی که فقط یک الکترون در مسئله مورد نظر حاضر اهمیت است. پس این تصویر، تصویری ناکامل و ابتدایی بود.

در سال ۱۹۲۵/۱۳۰۴، با کشف مکانیک کوانتومی، پیشرفت عظیم نظریه کوانتومی روی داد. این پیشرفت توسط دو نفر حاصل شد، نخست هایزنبرگ و اندکی بعد شرودینگر؛ این دو مستقل از یکدیگر و از دیدگاههای متفاوتی کار می‌کردند. هایزنبرگ کارهایش را در ارتباط بسیار نزدیک با شواهد تجربی که در آن زمان درباره طیفها گردآوری می‌شد، انجام می‌داد. او دریافت که چگونه می‌توان اطلاعات تجربی را در طرحی گنجانده که اکنون به نام مکانیک ماتریسی شناخته می‌شود. تمامی داده‌های تجربی طیف نمودی با زیبایی و تناسب در طرح مکانیک ماتریسی جای می‌گیرند و به تصویری کاملاً متفاوت از دنیای اتمی منجر می‌شوند. شرودینگر از یک دیدگاه ریاضی‌تر کار می‌کرد و می‌کوشید تا نظریه زیبایی برای توصیف رویدادهای اتمی یابد، عقاید دویروی درباره

یکی از عاملان بزرگ پیشرفت مکانیک کوانتومی بود، باوجود این همیشه نسبت به شکلی که این نظریه در دوران حیات او به خود گرفت و هنوز هم حفظ شده است - خصوصیت می‌ورزید.

دلایل خصوصیتی را که بعضیها نسبت به دست کشیدن از تصویر موجبی نشان می‌دهند می‌توان در مقاله اینشتین، پر دولسکی و روزن، که درباره آن فراوان بحث شده است، سراغ کرد؛ این مقاله به مشکل دستیابی به یک تصویر بدون تناقض که بتواند کماکان در چارچوب قوانین مکانیک کوانتومی نتیجه بدهد، می‌پردازد. همه می‌دانند نتایج را چگونه محاسبه کنند و چگونه نتایج محاسباتشان را با آزمایش مقایسه کنند؛ صورتبندی نظریه را همه قبول دارند. این صورتبندی آنچنان خوب کار می‌کند که هیچکس اجازه مخالفت با آن را به خود نمی‌دهد. با وجود این تصویری که مجبوریم در پس این صورتبندی برقرار کنیم کماکان مورد مناقشه است.

می‌خواهم بگویم که نباید چندان نگران این مناقشه بود. من اعتقاد راسخ دارم که مرحله کنونی فیزیک، مرحله‌ای نهایی آن نیست و تنها مرحله‌ای از تکامل تصویر ما از طبیعت است؛ و باید انتظار داشته باشیم که این فرایند تکاملی در آینده هم تداوم داشته باشد، همان‌طور که تکامل زیست‌شناختی نیز در آینده ادامه خواهد داشت. مرحله کنونی نظریه فیزیکی صرفاً سنگ بنایی است به سوی مراحل بهتری که ما در آینده خواهیم داشت. به اعتبار وجود دشواریهای فعلی در فیزیک می‌توان مطمئن بود که در آینده به مراحل بهتری دست خواهیم یافت.

اکنون می‌خواهم اندکی پیرامون مشکلات فیزیک امروزی بحث کنم. خواننده‌ای که در این موضوع خبره نیست، ممکن است فکر کند که به علت این همه مشکلات، وضع نظریه فیزیکی خیلی خراب است، و نظریه کوانتومی خیلی هم به درد نمی‌خورد. ما یلم بگویم که نظریه کوانتومی نظریه فوق‌العاده خوبی است، و بدین ترتیب این برداشت غلط را تصحیح کنم. در گستره وسیعی از پدیده‌ها، این نظریه با مشاهدات ما مطابقت دارد. تردیدی وجود ندارد که نظریه کوانتومی نظریه خوبی است، و تنها علتی که فیزیکدانان آن قدر پیرامون مشکلات موجود در آن سخن می‌گویند این است که اتفاقاً خود این مشکلات جالب توجه‌اند. کامیابیهای این نظریه همگی بدیهی تلقی می‌شوند. با تکرار مکرر موفقیتهای هرگز به جایی نخواهیم رسید اما در عوض، با بحث و گفتگو پیرامون دشواریها

دلسرد شد، زیرا این اختلاف ممکن است ناشی از جنبه‌هایی فرعی باشد که به وقت به حساب آورده نشده‌اند و بعداً با پیشرفتهای بیشتر نظریه روشن خواهند شد.

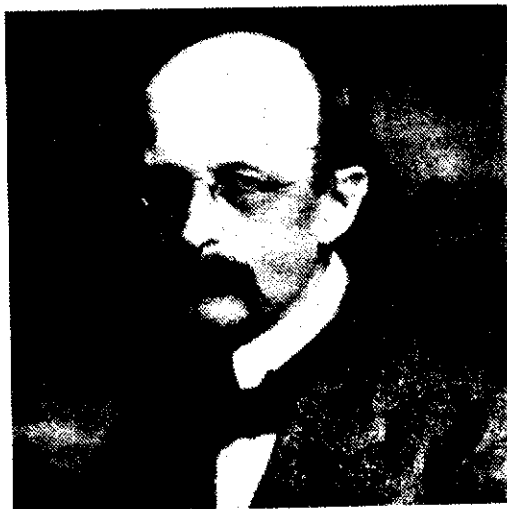


آلبرت اینشتین (۱۲۵۸-۱۳۳۴/۱۸۷۹-۱۹۵۵) با نظریه نسبیت خاص، تصویر فیزیکدان را از تصویری با تقارن سه بعدی به تصویری با تقارن چهار بعدی تغییر داد. این عکس از او وهمس و دخترشان مارگوت در سال ۱۹۲۹ گرفته شده است.

مکانیک کوانتومی بدینگونه کشف شد. این علم به تغییری ژرف در تصویر فیزیکدان از طبیعت منجر شد و شاید بزرگترین تغییری باشد که تاکنون رخ داده است. این تغییر از آنجا ناشی شد که مجبور شدیم تصویر موجبی از طبیعت را که همواره بدیهی می‌پنداشتیم به کنار بگذاریم. به نظریه‌ای سوق داده شدیم که با قطعیت نمی‌گوید در آینده چه رخ خواهد داد اما تنها اطلاعاتی پیرامون احتمال وقوع رویدادهای گوناگون به دست می‌دهد. همین رها کردن موجبیت، موضوع بسیار اختلاف انگیزی بوده است، و به ذاتاً بعضی اصلاً خوش نمی‌آید. به ویژه، اینشتین هرگز از آن خوشش نیامد. اگرچه اینشتین خود



نیلز بوهر (۱۲۶۴-۱۳۴۱/۱۳۸۵-۱۹۶۲) ارائه‌کننده این نظر بود که الکترون در مدارهای معین به دور هسته می‌گردد. عکس متعلق به سال ۱۳۵۱/۱۹۲۲، یعنی نه سال پس از چاپ مقاله اوست.



ماکس پلانک (۱۲۳۷-۱۳۲۶/۱۳۸۸-۱۹۴۷) این نظر را که تابش الکترومغناطیسی متشکل از کوانتومها یا ذرات است، ارائه کرد. عکس متعلق به سال ۱۲۹۲/۱۹۱۳، یعنی سیزده سال پس از چاپ مقاله اصلی اوست.

رسیده‌ایم و تحول دیگری مورد نیاز است. مشکلات رده دو حتی برای فیزیکدان هم مهم‌اند، زیرا دامنه کاربرد قوانین نظریه کوانتومی را برای به دست آوردن نتایجی سازگار با تجربه محدود می‌کنند.

می‌خواهم اندکی بیشتر درباره مشکلات رده یک بگویم. احساس می‌کنم نباید زیاد نگران آنها بود. زیرا آنها مشکلاتی هستند متعلق به مرحله کنونی از تکامل تصویر فیزیکی ما، و تقریباً محقق است که با پیشرفت‌های آتی تغییر خواهند کرد. به نظر من دلیلی قوی وجود دارد براینکه چرا می‌توان کاملاً مطمئن بود که این مشکلات تغییر خواهند کرد؟ در طبیعت چند ثابت بنیادی وجود دارند. بار الکترون (که با  $e$  نشان داده می‌شود)، ثابت پلانک تقسیم بر  $2\pi$  (که با  $\hbar$  نشان داده می‌شود)، و سرعت نور که با  $c$  نشان داده می‌شود. از این ثابت‌های بنیادی می‌توان عددی ساخت بدون ابعاد: یعنی عدد  $\hbar c / e^2$ . آزمایش نشان می‌دهد که این عدد مساوی ۱۳۷، یا چیزی بسیار نزدیک به ۱۳۷ است. اما هیچ دلیلی پیدا نشده است که توضیح دهد چرا این عدد باید همین عدد خاص باشد و نه عددی دیگر. اشخاص مختلف نظرهایی در این باره ابراز داشته‌اند، اما نظریه پذیرفته شده‌ای وجود ندارد. باز هم می‌توان

می‌توان به پیشرفت امیدوار بود.

مشکلات نظریه کوانتومی از دو نوع‌اند. می‌توان آنها را مشکلات رده یک و مشکلات رده دو بنام. مشکلات رده یک همانهایی هستند که ذکر کردم: چگونه می‌توان با تکیه بر قوانین فعلی نظریه کوانتومی به تصویر سازی گاری از طبیعت دست یافت؟ این مشکلات رده یک زیاد موجب نگرانی فیزیکدان نمی‌شوند. اگر فیزیکدان بدانند چگونه نتایج را محاسبه و آنها را با آزمایش مقایسه کند، و اگر این نتایج با آزمایش‌های او تطبیق کنند، راضی خواهد شد و فقط همین‌ها را بسنده است. مشکلات رده یک فقط موجبات نگرانی فلاسفه را فراهم می‌آورند، چرا که ایشان می‌خواهند به توصیف قانع‌کننده‌ای از طبیعت دست یابند.

افزون بر مشکلات رده یک، مشکلات رده دو نیز وجود دارند، و از این امر ناشی می‌شوند که قوانین کنونی نظریه کوانتومی برای ارائه همه نتایج مورد نظر همیشه به‌تنهایی کافی نیستند. اگر این قوانین را در شرایط فوق‌الماده حدی - یعنی در پدیده‌هایی که مستلزم انرژی‌های خیلی بالا یا فواصل بسیار کوتاه هستند - به کار بگیریم، گاهی به نتایجی می‌رسیم که یا مبهم‌اند و یا اصلاً معقول نیستند. آنوقت آشکار می‌شود که ما به حدود نهایی کاربرد نظریه

درخواهیم یافت که این همه بحث دربارهٔ نقش مشاهدات در نظریه‌ها تا چه حد بی‌فایده بوده است. زیرا در آن هنگام دیدگاه خیلی بهتری خواهیم داشت که آن چیزها را بنگریم. بنا بر این می‌گوییم که اگر بتوانیم راهی بیاییم که روابط عدم قطعیت حالت نامعین مکانیک کوانتومی کنونی را توصیف کنند و مطابق ذائقهٔ فلسفی ما باشند می‌توانیم خود را نیکبخت به حساب آوریم. اما اگر نتوانیم چنین راهی را پیدا کنیم، دیگر موجبی برای پریشانی وجود ندارد. فقط باید در نظر داشته باشیم که در مرحله‌ای گذرا هستیم و شاید ارائهٔ یک تصویر قابل قبول برای این مرحله کاملاً ناممکن باشد.

من با بیان این مطلب - که مشکلات ردهٔ یکم در واقع چندان مهم نیستند و اگر بتوانیم به کمک آنها پیشرفتی حاصل کنیم چه بهتر و اگر نتوانیم چیزی که مایهٔ نگرانی جدی باشد وجود ندارد - عملاً این رده از مشکلات را کنار گذاشتم. مشکلات واقعاً جدی، مشکلات ردهٔ دوم هستند. این مشکلات در درجهٔ اول از این واقعیت ناشی می‌شوند که اگر بخواهیم نظریهٔ کوانتومی مان با نسبیت خاص سازگار باشد باید آن را در مورد میدانها به کار بگیریم، و آن را بر اساس مقطعهای سه بعدی که ذکر شدند تفسیر کنیم. در این صورت به معادلاتی دست خواهیم یافت که در نگاه اول بدون عیب به نظر می‌رسند. اما هنگامی که سعی در حل آنها می‌کنیم، می‌بینیم جوابی ندارند. در این مرحله باید بگوییم که نظریه‌ای نداریم. اما در اینجا فیزیکدانان زیرکی فراوانی به خرج می‌دهند و راهی یافته‌اند تا علی‌رغم این مانع به پیشرفت ادامه دهند. آنها وقتی می‌خواهند به حل این معادلات بپردازند در می‌یابند که در دسر آنجاست که کمیت‌های معینی که باید متناهی و محدود باشند، در واقع نامحدودند. انتگرالهایی به دست می‌آیند که به جای آنکه همگرا باشند و به حد معینی میل کنند، و اگر هستند، فیزیکدانان پی برده‌اند که راهی وجود دارد که با این بی‌نهایتها مطابق باشد - هاستور. های معینی عمل کنند و به نتایج معینی دست یابند. این روش به روش باز بهنجارش معروف است.

این مفهوم را صرفاً با کلمات توضیح خواهم داد. با نظریه‌ای آغاز می‌کنیم که در برگیرندهٔ تعدادی معادله است. در این معادلات پارامترهای معینی یافت می‌شوند:  $e$  بار الکترون،  $m$  جرم الکترون، و چیزهایی از این قبیل، سپس معلوم می‌شود که این کمیتها که در معادلات اولیه پدیدار می‌شوند، با مقادیر اندازه‌گیری شدهٔ بار

تقریباً مطمئن بود که روزی فیزیکدانان این مسئله را حل خواهند کرد و توضیح خواهند داد که چرا این عدد دارای این مقدار است. در آینده فیزیکی خواهیم داشت که اگر مقدار  $hc/e^2$  برابر ۱۳۷ باشد، معتبر است و آنگاه که مقدار دیگری داشته باشد، اعتبار خود را از دست می‌دهد. البته، فیزیک آینده نمی‌تواند هر سه کمیت  $h$ ،  $e$  و  $c$  را به عنوان کمیت‌های بنیادی دربر داشته باشد. تنها دو تای آنها می‌توانند بنیادی باشند و کمیت سوم را باید از آن دو مشتق کرد. تقریباً مسلم است که  $c$  یکی از آن دو کمیت بنیادی خواهد بود. سرعت نور، یعنی  $c$ ، بقدری در تصویر چهار بعدی مهم است، و با ربط دادن واحدهای فضا و زمان نقش آنچنان بنیادی در نظریهٔ نسبیت ایفا می‌کند که باید به ناچار کمیتی بنیادی باشد. پس ما با این حقیقت مواجه هستیم که از دو کمیت  $e$  و  $h$  یکی باید بنیادی و دیگری مشتق شده باشد. اگر  $h$  بنیادی باشد، باید به طریقی بر حسب ریشهٔ دوم  $h$  تبیین شود و بسیار نامحتمل به نظر می‌رسد که یک نظریهٔ بنیادی بتواند  $e$  را بر حسب یک ریشهٔ دوم به دست دهد، چرا که ریشه‌های دوم در معادلات پایه یافت نمی‌شوند. محتملتر آن است که  $e$  کمیت بنیادی باشد و  $h$  بر حسب  $e$  توضیح داده شود. در این صورت ریشهٔ دومی در معادلات پایه وجود نخواهد داشت. فکر می‌کنم بدون واهمه بشود حدس زد که در یکی از مراحل آتی،  $e$  و  $c$  در تصویر فیزیکی کمیت‌های بنیادی خواهند بود و  $h$  از آنها مشتق خواهد شد. اگر  $h$  به جای بنیادی بودن، کمیتی فرعی باشد، کل مجموعهٔ مفاهیم ما دربارهٔ عدم قطعیت تغییر می‌یابد.  $h$  کمیت بنیادی است که در رابطهٔ عدم قطعیت هایزنبرگ - که مقدار عدم قطعیت در وضعیت و اندازه حرکت را به یکدیگر ربط می‌دهد - وارد می‌شود. رابطهٔ عدم قطعیت نمی‌تواند در نظریه‌ای که در آن خود  $h$  کمیتی بنیادی نیست یک نقش بنیادی ایفا کند. به نظر من می‌توان با اطمینان گفت که روابط عدم قطعیت در شکل کنونی‌شان در فیزیک آینده ماندگار نخواهند بود.

البته به موجبیت نظریهٔ فیزیکی کلاسیک باز نخواهیم گشت. فرایند تکامل به عقب باز نمی‌گردد؛ ناچار باید به پیش برود. باید تحول‌نویینی پیش‌آید که کاملاً نامنتظره باشد؛ و نتوان دربارهٔ چگونگی‌اش حدسی زد. تحولی که ما را باز هم از مفاهیم کلاسیک دورتر خواهد کرد و مبحث روابط عدم قطعیت را به تمامی دگرگون خواهد ساخت؛ و هنگامی که این تحول نوین پدید آید،

$e$  و  $m$  اولیه باید برابر یا منهای ینهایت مناسبی باشند تا  $\Delta e$  و  $\Delta m$  را ، که ینهایت بزرگ هستند ، جبران کنند. از این نظریه می توان برای به دست آوردن نتایجی که بتوانند با آزمایش مقایسه شوند - بویژه در الکترو-دینامیک - استفاده کرد. شگفت اینکه در الکترو-دینامیک نتایجی به دست می آیند که سازگاری بسیار خوبی با آزمایش دارند. این مطابقت تا چندین رقم با دقت است؛ این درجه از دقت قبلاً در اخترشناسی وجود داشت. علت اینکه فیزیکدانان با وجود سرشت غیر منطقی نظریه باز بهنجارش برای آن ارزش قائل اند، همین مطابقت خوب آن یا آزمایش است.

قرار دادن این نظریه با شالوده های محکم ریاضی کاملاً ناممکن به نظر می رسد. زمانی نظریه فیزیکی به تمامی بر پایه ریاضیاتی که ذاتاً باصلابت بود ساخته می شد. من نمی گویم فیزیکدانان همیشه ریاضیات موجه را به کار می گیرند؛ آنان در محاسبات خود اغلب از استدلالهای ناموجه استفاده می کنند. اما می توان گفت ، قبلاً که این کار را انجام می دادند ، از روی تنبلی بوده است. آنها می خواستند بدون انجام کار غیر لازم ، هر چند سریعتر به نتیجه برسند. برای ریاضیدان محض همیشه این امکان وجود داشت که پیش یابد و استدلالهای بیشتری به میان آورد و احتمالاً با وارد کردن مقدار زیادی نماد گذاری دست و پا گیر و دیگر چیزهایی که از دیدگاه ریاضی ، برای بیان دقیق هر چیزی ، مطلوب است ولی به مفاهیم فیزیکی چیزی نمی افزاید ، نظریه فیزیکی را بر پایه های محکمی قرار دهد.

ریاضیات پیشین را همیشه می توانستیم به این شیوه مستحکم کنیم. اما نظریه باز بهنجارش، نظریه ای است که تمامی کوششهای ریاضیدان در جهت مستحکم کردن پایه های ریاضی آن با شکست مواجه شده است. به گمان من نظریه باز بهنجارش چیزی است که در آینده نخواهد پایید ، و مطابقت قابل توجه میان نتایج این نظریه و آزمایش را باید يك حسن تصادف دانست.

شاید این حسن تصادف زیاد هم تعجب آور نباشد ، چرا که در گذشته موارد مشابهی وجود داشته اند. نظریه مدار الکترون بوهر هم ، در حقیقت ، وقتی محدود به مسائل تك الکترونی می شد ، با مشاهدات خوب مطابقت می کرد. فکر می کنم حالا خواهند گفت که این مطابقت يك حسن تصادف بوده است ، چرا که جای مفاهیم اصلی نظریه مدار بوهر را چیزی اساساً متفاوت گرفته است.

و جرم الکترون برابر نیستند. مقادیر اندازه گیری شده به اندازه مقادیر تصحیح کننده معینی - یعنی  $\Delta e$  ،  $\Delta m$  و جز اینها - با کمیت های نامبرده تفاوت دارند ، به طوری که بار کل برابر  $e + \Delta e$  و جرم کل براب  $m + \Delta m$  است. این تغییرات بار و جرم از طریق برهم کنش ذره بنیادی ما با چیزهای دیگر پیش می آیند. پس می گویم که چون  $e + \Delta e$  و  $m + \Delta m$  ، چیزهای مشاهده شده هستند ، بنا بر این کمیت های مهم نیز همانها هستند.  $e$  و  $m$  اولیه فقط پارامترهای ریاضی و غیر قابل مشاهده اند ، و بنا بر این ابزارهایی بیش نیستند و وقتی آنقدر پیش رفته باشیم که بتوانیم چیزهایی را که قابل مقایسه با مشاهدات هستند وارد معادله کنیم ، می توانیم آنها را کنار بگذاریم.



لویی دیبروی (۱۲۷۱-۱۸۹۲-) این مفهوم را که ذرات با امواج وابسته اند ، ارائه کرد. عکس متعلق به سال ۱۹۲۹ ، یعنی پنج سال پس از ارائه مقاله اوست.

اگر  $\Delta e$  و  $\Delta m$  ، مقادیر بسیار کوچکی بودند (یا حتی اگر خیلی کوچک نبودند اما منتهای بودند) ، این روش می توانست روش کاملاً درستی باشد. لکن بر طبق نظریه ای که اکنون وجود دارد ،  $\Delta e$  و  $\Delta m$  ، ینهایت بزرگ اند. علی رغم این امر ، هنوز هم می توان از این بیان صوری سود برد و نتایجی بر حسب  $e + \Delta e$  و  $m + \Delta m$  به دست آورد. این نتایج را می توان این گونه تفسیر کرد که مقدار

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

**تقارن چهار بعدی**، که نظریه نسبت خاص ارائه می‌کند، کامل نیست. این معادله بین فاصله ناورد در فضا-زمان چهار بعدی است. در این معادله فاصله ناورد،  $c$  سرعت نور،  $t$  زمان،  $x$  و  $y$  و  $z$  سه بعد فضا هستند.  $ds$  نماد های دیفرانسیل اند. کامل نبودن تقارن از آنجاست که علامت عبارت مربوط به بعد زمان ( $c^2 dt^2$ ) با علامت مربوط به ابعاد فضا ( $-dx^2$  و  $-dy^2$  و  $-dz^2$ ) یکی نیست.

$$\left( \frac{ih}{2\pi mc} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{e^2}{cr} \right) \Psi = \left[ m^2 c^2 - \frac{h^2}{2\pi^2} \left( \frac{\partial^2}{dx^2} + \frac{\partial^2}{dy^2} + \frac{\partial^2}{dz^2} \right) \right] \Psi$$

**فصلتین معادله موج شرودینگر**، از آنجاکه در آن اسپین الکترون به علت ناشناخته بودن در آن زمان به حساب آورده نشده بود، با نتایج آزمایش مطابقت نداشت. این معادله، تعمیم معادله دوبروی برای حرکت یک الکترون آزاد است. در این معادله  $e$  بار الکترون،  $h$  ثابت پلانک،  $r$  فاصله از هسته،  $\Psi$  تابع موج شرودینگر، و  $m$  جرم الکترون را نشان می‌دهد. اما علامت مشتقات پاره‌ای اند.

$$\left( E + \frac{e^2}{r} \right) \Psi = - \frac{h^2}{8\pi^2 m} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \Psi$$

**دومین معادله موج شرودینگر** تقریبی از معادله اصلی است که تغییراتی را که نسبت ایجاد می‌کند به حساب نمی‌آورد.

فیزیک عبارت خواهد بود از حل این مسائل یکی پس از دیگری و پس از حل هر یک از آنها هنوز مجهول بزرگی درباره چگونگی پرداختن به مسئله بعدی وجود خواهد داشت.

شاید بهتر باشد برخی از ایده‌هایم را درباره چگونگی پرداختن به این مسائل توضیح بدهم. هیچ یک از این ایده‌ها را زیاد بررسی نکرده‌ام و امید چندانی به آنها ندارم. اما فکری که من مختصر تذکری درباره آنها خالی از فایده نباشد.

یکی از این افکار، به کار گرفتن چیزی شبیه اتر است که هواخواهان زیادی در میان فیزیکدانان سده نوزدهم داشت. بیشتر از این گفتیم که تکامل فیزیک آن را به عقب نمی‌برد. هنگامی که از میان آوردن دوباره اتر سخن می‌گویم، منظورم احیای تصویر انسان سده نوزدهم از اتر نیست، بلکه می‌خواهم تصویر نوینی از اتر را که منطبق بر مفاهیم کنونی نظریه کوانتومی است، ارائه بدهم. ایراد مفهوم قدیمی اتر این بود که اگر فرض کنیم اتر سیالی است که تمامی فضا را پر می‌کند، در این صورت در هر مکان سرعت معینی دارد، که این امر تقارن چهار بعدی را که اصل نسبت خاص اینشتین می‌خواهد، از میان خواهد برد. نظریه نسبت خاص اینشتین این مفهوم اتر را از میان برداشت. اما به اعتبار نظریه کوانتومی امروزیمان، دیگر مجبور نیستیم سرعت معینی به هر چیز فیزیکی مشخص نسبت بدهیم، زیرا سرعت پیرو روابط عدم قطعیت است. هر قدر جرم چیز مورد نظر کوچکتر باشد، روابط عدم قطعیت اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند، اما مطمئناً اتر جرم بسیار

من برای ماورم که موقعیت نظریه باز بهنجارش همانند کامیابیهای نظریه مداری بوهر در مورد مسئله تک الکترونی است.

اگر بتوان سرشت غیر منطقی حذف بینهایتها را پذیرفت، نظریه باز بهنجارش برخی از مشکلات رده دوم، اما نه همرا، از میان برداشته است. تعداد قابل ملاحظه‌ای مسئله در مورد ذرات، به جز آنهایی که در الکترو دینامیک می‌آیند، باقی مانده است؛ مانند مزونهای گوناگون نو ترینوها. این نظریه در این موارد هنوز هم در مراحل ابتدایی است. تقریباً مشخص است که پیش از اینکه بتوان این مسائل را حل کرد، به ناچار تغییرات مهمی در مفاهیم ما به وجود خواهند آمد. یکی از مسائل توضیح عدد ۱۳۷ است که قبلاً از آن گفتگو کردم. مسائل دیگر عبارت اند از چگونگی معرفی طول بنیادی در فیزیک به نحوی طبیعی، چگونگی توضیح نسبتهای جرمهای ذرات بنیادی و چگونگی تبیین خواص دیگر آنها. به گمان من، برای حل هر یک از این مسائل متفاوت، مفاهیم مجزایی مورد نیاز خواهد بود و این مسائل به نوبت در مراحل پی در پی تکامل آتی فیزیک حل خواهند شد. در این مورد با بسیاری از فیزیکدانان موافق نیستم. عقیده آنان بیشتر بر این است که یک مفهوم کلیدی کشف خواهد شد و تمامی این مسائل را با هم حل خواهد کرد. به نظر من این یک توقع بیش از حد است که امیلوار باشیم کسی بتواند تمامی این مسائل را یکجا حل کند؛ این مسائل را باید تا حد امکان از یکدیگر مجزا کرد و سپس به تک تک آنها پرداخت. و من معتقدم که تکامل آینده





اروین شرودینگر (۱۲۶۶-۱۳۴۰/۱۳۸۷-۱۹۶۱) با تعمیم دادن نظر دو بروی-مبنی بر اینکه امواج با ذرات وابسته هستند - به الکترونها در حال حرکت به دور هسته، معادله موج خود را ابداع کرد. عکس بالا، متعلق به سال ۱۳۵۸/۱۹۲۹، یعنی چهار سال پس از چاپ مقاله دوم اوست.

که در طبیعت یافت می شوند باید مضربی از يك واحد بنیادی، یعنی  $e$  باشند. چرا توزیع پیوسته بار در طبیعت رخ نمی دهد؟ تصویری که من پیشنهاد می کنم به خطوط نیروی فاراده برمی گردد و این مفهوم را گسترش می دهد. خطوط نیروی فاراده راهی برای تصویر کردن میدانهای الکتریکی اند. اگر يك میدان الکتریکی در ناحیه ای از فضا داشته باشیم، بنابر نظر فاراده می توانیم مجموعه ای از خطوط ترسیم کنیم که در راستای میدان الکتریکی باشند، نزدیکی این خطوط به یکدیگر شدت میدان را تعیین می کند - جایی که میدان قوی باشد این خطوط به هم نزدیکتر و جایی که میدان ضعیف باشد، از یکدیگر دورترند. خطوط نیروی فاراده تصویر مناسبی از میدان الکتریکی طبق نظریه کلاسیک به دست می دهد.

وقتی به نظریه کوانتومی روی می آوریم، به نوعی

کمی خواهد داشت و از این رو روابط عدم قطعیت برای آن پنهانیت مهم خواهند بود. بنا بر این، نباید سرعت اتر را در يك مكان بخصوص معین و مشخص تصور کرد، زیرا این سرعت پیرو روابط عدم قطعیت خواهد بود و مقدار آن می تواند هر چیزی در گستره وسیعی از مقادیر باشد. بدین گونه می توان بر مشکلات وفق دادن وجود يك نوع اتر با نظریه نسبیت خاص فائق آمد.

این امر تغییر مهمی در تصویر ما از خلا به وجود خواهد آورد. آنچنان که نسبیت خاص اقتضا می کند می خواهیم خلا را ناحیه ای در نظر بگیریم که در آن، تقارن کامل میان چهار بعد فضا-زمان موجود باشد. اگر اتر پیرو روابط عدم قطعیت باشد وجود این تقارن به طور دقیق ممکن نخواهد بود. جا دارد فرض کنیم که سرعت اتر می تواند - بدون تفاوت - هر چیزی باشد در گستره وسیعی از مقادیر که این تنها تقارنی تقریبی به دست می دهد. نمی توانیم از هیچ طریق مشخصی به این حد برسیم که بگذاریم این سرعت تمام مقادیر بین بعلاوه و منهای سرعت نور را اتخاذ کند. در صورتی که اگر خواهیم تقارن درست داشته باشیم باید این کار را انجام بدهیم. بنا بر این، خلا حالتی دست نیافتنی می شود. من فکر نمی کنم این يك ایراد فیزیکی به نظریه باشد، بلکه چنین معنی می دهد که خلا حالتی است که می توانیم بسیار به آن نزدیک بشویم و برای این نزدیکی حدی وجود ندارد، اما هرگز نمی توانیم به آن برسیم. به اعتقاد من این امر برای فیزیکدان تجربی کاملاً رضایتبخش خواهد بود، اما به هر حال به منزله انحراف از مفهوم کوانتومی خلا است زیرا در آنجا با حالتی از خلا آغاز می کنیم که دقیقاً تقارن مطلوب نسبیت را در بر دارد.

این ایده ای است برای تکامل آینده فیزیک که تصویر ما را از خلا تغییر خواهد داد، اما این تغییر به گونه ای خواهد بود که برای فیزیکدان تجربی پذیرفتنی نیست. معلوم شده است که پیش بردن این نظریه مشکل است، زیرا این کار نیاز به تدوین ریاضی روابط عدم قطعیت برای اتر دارد و تاکنون نظریه قانع کننده ای در این جهت پیدا نشده است. اگر می توانستیم این نظریه را به نحوی رضایتبخش بهرورانیم، میدانی از نوع جدید در نظریه فیزیکی پیدا می شد که ممکن بود به تبیین برخی ذرات بنیادی کمک کند.

تصویر ممکن دیگری که تذکر آن را لازم می دانم درباره این پرسش است که چرا تمامی بارهای الکتریکی

به عنوان کمیتی بنیادی ظاهر می شود. من هنوز هیچ دستگاه معادلات حرکت قابل قبولی برای این خطوط نیرو نیافته‌ام، و از این دو این ایده را تنها به عنوان تصویر فیزیکی ممکن می دانم که احتمال دارد در آینده داشته باشیم، مطرح می کنم.

جنبه بسیار گیرایی در این تصویر وجود دارد که بحث باز بهنجارش را کاملاً تغییر خواهد داد. باز بهنجارشی که ما اکنون در الکتروپنایمک داریم از نقطه آغاز، که آن را الکترون برهنه - یعنی الکترون بدون بار - می نامند ناشی می شود. در مرحله معینی از نظریه، بار را به میان می آورند و آن را روی الکترون می گذارند و بدین ترتیب آن را وادار به سرهم کش با میدان الکترومغناطیس می کنند. این کار اختلالی در معادلات وارد می کنند و سبب پیدایش تغییری در جرم الکترون، یعنی  $\Delta m$ ، می شود که باید به جرم اولیه الکترون افزوده شود. این روش نسبتاً دور و دراز است، زیرا با مفهوم غیر فیزیکی الکترون بدون بار آغاز می شود. احتمالاً در تصویر فیزیکی اصلاح شده ای که در آینده خواهیم داشت، الکترون بدون بار اصلاً وجود نخواهد داشت.

این وضع درست همان وضعی است که در صورت وجود خطوط گسته خواهیم داشت. می توانیم خطوط نیرو را همچون تکه های نخ تصور کنیم. بنابراین، الکترون در این تصویر عبارت است از انتهای نخ. خود نخ به مثابه نیروی کولن اطراف الکترون است. یک الکترون بدون بار به معنی الکترونی است که دورش نیروی کولن وجود ندارد. تصور چنین چیزی غیر ممکن است، درست همان طور که اندیشیدن به انتهای یک نخ بدون اندیشیدن به خود نخ غیر قابل تصور است. فکر می کنم این روشی است که باید با آن در تکامل تصویر فیزیکی خود بکوشیم - یعنی مفاهیمی ارائه کنیم که چیزهایی را که نمی خواهیم داشته باشیم، تصویفاً بپذیرد. این بار تصویری داریم که معقول به نظر می رسد. اما من معادلات مناسبی برای کامل کردن آن نیافته‌ام.

می خواهم تصویر سومی را هم ذکر کنم که اخیراً به آن پرداخته‌ام. در این تصویر از تصویر کردن الکترون به شکل یک نقطه دست برمی داریم و آن را نوعی کره با اندازه متناهی در نظر می گیریم. البته، این فکر که الکترون را همچون کره تصویر کنیم، کاملاً قدیمی است، اما بیشتر از این، مشکل بحث در مورد کره ای که در معرض شتاب و حرکت نامنظم است وجود داشته است. چون کره اوجاج پیدا می کند

نایبوستگی در تصویر بنیادی برمی خوریم. می توانیم فرض کنیم که تعداد اندکی خط نیروی گسته که هیچ خط نیروی دیگری میان آنها نیست، جانشین توزیع پیوسته خطوط نیروی فاراده که در تصویر کلاسیکی داریم، می شوند. اما نقاط پایانی خطوط نیرو در تصویر فاراده جاهایی هستند که بار وجود دارد. بنابراین، با در نظر گرفتن خطوط نیروی کوانتیده فاراده، نامعقول نخواهد بود اگر فرض کنیم بار وابسته به هر خط، که اگر خط نیرو انتهای داشته باشد این بار باید در انتهای آن باشد، همیشه (سواً علامتش) یکسان است و برابر با همان بار الکترون، یعنی  $e$  یا  $-e$  است. این امر منجر به تصویری از خطوط نیروی گسته فاراده می شود که هر کدام با یک بار  $e$  یا  $-e$  همراه است. به هر خط چپتی وابسته است به طوری که دو انتهای هر خطی که دو انتها داشته باشد یکسان نیستند و بار  $e$  در یک سر و بار  $-e$  در سر دیگر آن واقع است. البته می توانیم خطوط نیرویی داشته باشیم که تا بینهایت امتداد دارند و در این صورت دیگر باری وجود ندارد.

اگر فرض کنیم که این خطوط نیروی گسته فاراده چیزهایی بنیادی در فیزیک هستند، و در کنه تصویر میدان الکترومغناطیسی ما قرار دارند، خواهیم فهمید که چرا بارها همیشه به صورت مضاربی صحیح از  $e$  ظاهر می شوند. دلیل این رویداد آن است که اگر ذره ای با چند خط نیرو داشته باشیم که به آن ختم می شوند، تعداد این خطوط باید عدد صحیحی باشد. به این ترتیب، تصویری به دست می آوریم که از نظر کیفی کاملاً معقول است.

فرض می کنیم این خطوط نیرو بتوانند جابه جاشوند. برخی از آنها، که حلقه های پسته ای را تشکیل می دهند یا فقط از منتهای بینهایت تا بینهایت امتداد می یابند، نظیر امواج الکترومغناطیسی خواهند بود. برخی دیگر، پایانهایی خواهند داشت و انتهای این خطوط همان بارها خواهند بود. می توان خطوط نیرویی داشت که گاهی می شکنند. هنگامی که این پدیده روی می دهد، دو انتها پدیدار می شوند و باید در هر دو انتها باری وجود داشته باشد. این فرایند - یعنی شکستن یک خط نیرو - تصویر آفرینش یک الکترون ( $e^-$ ) و یک پوزیترون ( $e^+$ ) خواهد بود. این یک تصویر کاملاً معقول خواهد بود و اگر بشود آن را کامل کرد نظریه ای فراهم خواهد آمد که در آن  $e$

درست پایدارترین حالت بعد از الکترون خواهد بود که در آن، شیء متحمل نوعی نوسان می شود. این ایده ای است که من اخیراً روی آن کار کرده ام. مشکلاتی، بویژه مشکل وارد کردن اسپین، بر سر راه پروراندن این تصویر موجود است. من سه طریق ممکن را که از آنها می توان به تکامل تصویر فیزیکی اندیشید، ذکر کرده ام. بی گمان راههای دیگری هم هستند که دیگران به آنها خواهند اندیشید. شاید عده ای امیدوار باشند که دیر یا زود کسی به فکر مناسبی دست یابد که به پیشرفتی عظیم منجر شود. من در این باره زیاد خوشبین نیستم و فکر می کنم که هیچ يك از آنها به اندازه کافی مطلوب نخواهد بود. پیشرفت آینده فیزیک پایه - یعنی پیشرفتی که بر راستی یکی از مسائل بنیادی مانند وارد کردن طول بنیادی یا محاسبه نسبت جرمها را حل خواهد کرد - احتمالاً مستلزم تغییر بسیار بزرگتری در تصویر فیزیکی ما خواهد بود. این موضوع به آن معنی است که در کوششهای کنونی مان در جهت اندیشیدن به يك تصویر فیزیکی نوین، مفاهیمی را در مخیله خود به کار می گیریم که برای این منظور کافی نیستند. اگر بر راستی چنین باشد، چگونه می توان امیدوار بود که در آینده پیشرفتی حاصل شود؟

مسیر دیگری هم وجود دارد که در آن می توان به کمک ابزار نظری پیش رفت. به نظر می رسد که یکی از خصیصه های بنیادی طبیعت این باشد که قوانین بنیادی فیزیک بر حسب نظریه های ریاضی بسیار زیبا و توانمندی تشریح می شوند که برای درک آنها به ریاضیات سطح کاملاً بالا نیاز است. شاید از خود پرسید که چرا طبیعت به چنین روالی ساخته شده است؟ تنها پاسخ، این است که ظاهراً دانش کنونی نشان می دهد که طبیعت این چنین ساخته شده است و این واقعیت را ناچار باید بپذیریم. شاید بتوان با گفتن اینکه خدا ریاضیدانی از مرتبه عالی است و ریاضیات بسیار پیشرفته ای را در ساختار عالم به کار برده، وصف حال کرد. کوششهای عاجزانه ما در ریاضیات تا آن حد به ما توانایی می بخشد که قسمتی از عالم را درک کنیم، و بتدریج که ریاضیات را پیشتر و پیشتر می بریم، می توانیم به درک بهتری از عالم امیدوار باشیم.

این دیدگاه شیوه دیگری ارائه می کند تا بتوانیم از طریق آن به پیشرفتهایی در نظریه های خود نائل آییم. صرفاً با مطالعه ریاضیات جا دارد امیدوار باشیم آن نوع ریاضیاتی را که در فیزیک آینده وارد خواهد شد، حدس بزنیم، عده زیادی در حال حاضر به



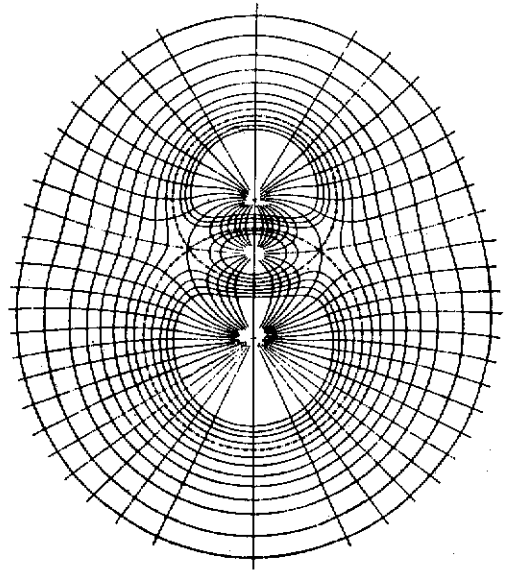
دورهایز نبرگ (۱۲۸۰-۱۳۵۵/۱۹۰۱-۱۹۷۶)  
مکانیک ماتریسی را ارائه داد که مانند نظریه شرودینگر  
حرکتهای الکترون را تبیین می کرد. عکس متعلق به سال  
۱۹۲۹/۱۳۰۸ است.

و باید دید چگونه می شود این اعوجاج را به حساب آورد؟ پیشنهاد می کنم که بگذاریم الکترون در حالت کلی، شکل و اندازه دلخواهی داشته باشد. در بعضی از شکلهای و اندازه های الکترون انرژی کمتری دارد تا در شکلهای و اندازه های دیگر. الکترون گرایش خواهد داشت به اینکه شکلی کروی با اندازه ای معین - که در آن انرژی اش کمینه است - به خود بگیرد.

تصویر الکترون گسترده با کشف مزون، یا میون، که یکی از ذرات جدید فیزیک است جانی تازه گرفت. میون دارای خاصیت غیرمنتظره ای است. این ذره تقریباً با الکترون یکسان است، مگر در يك مورد، و آن اینکه جرمش حدود ۲۰۰ برابر جرم الکترون است. جدا از تفاوت در جرم، میون شباهت قابل توجهی به الکترون دارد، و با تقریب بسیار خوب - به نسبت جرمش - اسپین گشتاور مغناطیسی آن همانند الکترون است. این همانندیها، منجر به پیدایش این نظر شد که میون را باید همچون الکترونی برانگیخته دانست. اگر الکترون يك نقطه باشد، تصویر کردن اینکه چگونه يك نقطه می تواند برانگیخته شود، امری بسیار دشوار می شود. اما اگر الکترون پایدارترین حالت برای يك شیء با اندازه متناهی باشد، میون

کشف معادله موج به توسط شرودینگر طی کرد. شرودینگر معادله اش را درحالی کشف کرد که صرفاً در جستجوی معادله ای بود که از نظر ریاضی زیبا باشد. هنگامی که این معادله نخستین بار کشف شد، معلوم شد که از برخی جهات مناسب است. اما اصول عامی که برطبق آنها باید این معادله را به کار برد، تازه در حدود دویا سه سال بعد کشف شدند. کاملاً ممکن است که پیشرفت بعدی فیزیک در راستای چنین مسیری رخ بدهد. اشخاص نخست معادلات را کشف می کنند؛ سپس برای دست یافتن به مفاهیم فیزیکی نهفته در پس این معادلات به گذشت چندسال تکاملی نیاز خواهد بود. باور خود من این است که احتمال پیشرفت از این مسیر بیشتر است تا از راه حدس زدن تصاویر فیزیکی. البته، ممکن است این مسیر پیشرفت نیز به موفقیت نینجامد، و در این حال تنها راهی که باقی می ماند، راه تجربه است. فیزیکدانان تجربی به طور کاملاً مستقل به کارشان ادامه می دهند و ذخیره انبوهی از اطلاعات گرد می آورند. دیر یا زود هایزنبرگ جدیدی پیدا خواهد شد که بتواند خصیصه های مهم این اطلاعات را جدا کرده و ببیند چگونه می تواند مانند خود هایزنبرگ که معلومات تجربی درباره طیفها را جهت ساختن مکانیک ماتریسی اش به کار گرفت، از آنها استفاده کند. فیزیک، سرانجام در امتداد این مسیرها تکامل خواهد یافت، و این امری اجتناب ناپذیر است. اما اگر ایده های هوشمندانه ای برای تکامل بخشیدن به جنبه های نظری پیدا نشود، ممکن است ناچار شویم زمان درازی در انتظار باشیم.

ترجمه بهرام معلمی



خطوط نیرو اگر در نظریه کوانتومی فرض شود خطوط نیرو در میدان الکترومغناطیسی، گسسته هستند، می توان پی برد که چرا همیشه بارهای الکتریکی مضربهای درستی از بار الکترون اند. به نظر دیراک، وقتی خط نیرویی دو سر داشته باشد، ذره ای شاید یک الکترون، با بار  $e$  - در یک سر و ذره ای، شاید یک پوزیترون، با بار  $e$  +، در سر دیگر وجود دارد. هنگامی که خط نیروی بسته ای شکسته شود، یک زوج الکترون-پوزیترون به وجود می آیند.

بررسی شالوده ریاضی نظریه کوانتومی مشغول اند، و می کوشند این نظریه را بهتر درک کنند و آن را توانمندتر و زیباتر سازند. اگر کسی خطوط درست پیشروی در این راه را تصادفاً بیابد، می تواند در آینده پیشرفتی را موجب شود که در نتیجه آن اشخاص ابتدا معادلات را کشف کنند و سپس، بعد از آزمودن آنها، به تدریج چگونگی کاربردشان را فراگیرند. این تقریباً شبیه روندی است که