فلسفهٔ فیزیک

سرشناسه: مادلین، تیم، ۱۹۵۸ ـ م. Maudlin, Tim
عنوان و نام پدیدآور: فلسفه فیزیک: نظریهٔ کوانتوم/تیم مادلین؛ ترجمهٔ رعنا سلیمی.
مشخصات نشر: تهران: ققنوس، ۱۴۰۲.
مشخصات ظاهری: ۳۱۲ ص.
شابک: ۹ـ۰۴۸۵ـ ۰۴ـ۶۲۲ـ۹۷۸
وضعیت فهرست‌نویسی: فیپا
یادداشت: عنوان اصلی: .Philosophy of physics quantum theory, 2019
موضوع: کوانتوم ــ فلسفه
موضوع: Quantum theory -- Philosophy
موضوع: فیزیک ــ فلسفه
موضوع: Physics -- Philosophy
موضوع: نسبیت (فیزیک)
موضوع: Relativity (Physics)
شناسهٔ افزوده: سلیمی، رعنا، ۱۳۵۰ ـ، مترجم
رده‌بندی کنگره: QC ۱۷۴/۱۲
رده‌بندی دیویی: ۵۳۰/۱۲
شمارهٔ کتاب‌شناسی ملی: ۹۱۶۳۱۹۱

فلسفهٔ فیزیک

نظریهٔ کوانتوم

تیم مادلین

ترجمهٔ رعنا سلیمی

این کتاب ترجمه‌ای است از:

Philosophy of Physics
Quantum Theory
Tim Maudlin
Princeton University Press, 2019

انتشارات ققنوس
تهران، خیابان انقلاب، خیابان شهدای ژاندارمری،
شمارهٔ ۱۱۱، تلفن ۴۰ ۸۶ ۴۰ ۶۶
ویرایش، آماده‌سازی و امور فنی:
تحریریهٔ انتشارات ققنوس

***

تیم مادلین
فلسفهٔ فیزیک
نظریهٔ کوانتوم
ترجمهٔ رعنا سلیمی
چاپ اول
۱۱۰۰ نسخه
۱۴۰۲
چاپ ترانه
حق چاپ محفوظ است
شابک: ۹-۰۴۸۵-۰۴-۶۲۲-۹۷۸
ISBN: 978-622-04-0485-9
www.qoqnoos.ir
Printed in Iran

ترجمهٔ این کتاب را به
آقای حسین سلیمانی تقدیم می‌کنم،
به گواهی مهر و سپاسی ژرف.

فهرست

پیشگفتار مترجم ۹
مقدمه ۱۳

۱. هشت آزمایش ۲۱
۲. دستورالعمل کوانتوم ۶۵
۳. تابع موج و حالت کوانتومی ۱۱۹
۴. نظریه‌های رمبش و مسئلهٔ هستارهای موضعی ۱۳۹
۵. نظریه‌های موج راهبر ۱۹۳
۶. چندجهانی ۲۳۷
۷. نظریهٔ میدان کوانتومی نسبیتی ۲۸۱

کتابنامه ۳۰۸
نمایه ۳۱۱

پیشگفتار مترجم

برخلاف نظریهٔ نسبیت که فقط کار یک نفر (آلبرت اینشتین) است، نظریهٔ کوانتوم در واقع با تحقیقات ماکس پلانک روی تابش جسم سیاه شروع شد و سپس با تحقیقات دانشمندان مشهور زیادی از جمله اینشتین، بور، هایزنبرگ، پاولی، دیراک، شرودینگر و ... پیش رفت. مکانیک کوانتوم نظریه‌ای انقلابی است، زیرا مفاهیم علمی بسیار بدیهی و کاملاً تصدیق‌شده با تجربه را که جای تردید ندارند تغییر داده است. این نظریه، که ماکس پلانک با کشف «ثابت کنش پلانک» آن را در سال ۱۹۰۰ به منصهٔ ظهور رساند، بیش از یک قرن قدمت دارد و با وجود این‌که به نظر می‌رسد این زمان برای درک کامل مفاهیم نظریه و کنار آمدن با ایده‌های آن دربارهٔ تصادف، علّیت و سرشت واقعیت فیزیکی کافی بوده باشد، هنوز مسائل لاینحل زیادی پیش روی فیزیکدانان است.

با گذر زمان و پیشرفت علم فیزیک در شاخه‌های مختلف، این علم به‌وفور درگیر ریاضیات، فرمول‌ها و محاسبات شده است، به گونه‌ای که دیگر مجالی برای پرداختن به هستی‌شناسیِ نظریه‌های فیزیکی باقی نمی‌ماند. از آن‌جا که علم فیزیک بیش از علوم دیگر با

طبیعت در ارتباط است، ضروری است برای شناخت هرچه بیشترِ هستی درک روشنی از نظریه‌های فیزیک داشته باشیم. این کار خطیر بر عهدهٔ هستی‌شناسیِ نظریه‌هاست و در این میان هستی‌شناسیِ نظریهٔ کوانتوم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در واقع پس از ارائه نظریهٔ کوانتوم، مباحث فلسفی زیادی مطرح شد و به تفسیرها و تعبیرهای متفاوتی از این نظریه انجامید که معروف‌ترینِ آن‌ها تفسیر کپنهاگی منسوب به نیلز بور است. کتاب‌های موجود در زمینهٔ فیزیک کوانتوم غالباً کتاب‌های درسی استانداردند که با فرمول‌ها و محاسبات پیچیدهٔ ریاضی سر و کار دارند. در این کتاب‌ها به هستی‌شناسی نظریهٔ کوانتوم هیچ اشاره‌ای نمی‌شود. بسیار جای تأسف است که دانش‌آموختگان فیزیک با فرمول‌ها و محاسبات پیچیدهٔ ریاضی دست و پنجه نرم کنند، اما با مباحث هستی‌شناسی نظریه بیگانه باشند.

مطالعهٔ این کتاب دریچه‌ای تازه به دنیای فیزیک کوانتوم به رویمان می‌گشاید. تیم مادلین بر این باور است که آنچه در کتاب‌های درسی استاندارد به عنوان نظریهٔ کوانتوم مطرح شده است دستورالعملی بیش نیست که پیش‌بینی آماری خوبی از نتایج آزمایش‌ها ارائه می‌کند، اما در ارائهٔ روایت دقیق و روشنی از هستی‌شناسی ناتوان است. او در این کتاب، بر اساس چند نظریهٔ فیزیکی، روایت فیزیکی دقیقی از پدیده‌های مرتبط با هشت آزمایش که مشخصه‌هایی کاملاً کوانتوم‌ـمکانیکی دارند، مثلاً آزمایش دو شکاف، ارائه می‌دهد. نظریه‌هایی که تیم مادلین بررسی می‌کند در هستی‌شناسی‌شان موفق‌تر از بقیه بوده‌اند و تمام آن‌ها در شرایط غیرنسبیتی بررسی می‌شوند. علی‌رغم دشواریِ فیزیک کوانتوم، تیم مادلین از این مهارت برخودار است که هستی‌شناسی این نظریه‌ها را با فیزیک نسبتاً ساده‌ای بیان کند، به گونه‌ای که هر مخاطبِ علاقه‌مند به مبحث کوانتوم می‌تواند از کتاب بهره‌مند شود.

امروزه کتاب‌های بی‌شماری در زمینهٔ فلسفهٔ علم منتشر می‌شود که مدام بر شمار آن‌ها افزوده می‌شود و یکی از دیگری جذاب‌تر است، اما در کشور ما کتاب‌های فلسفهٔ علم بسیار اندک‌اند و جای خالی چنین کتاب‌هایی به‌شدت احساس می‌شود. این کتاب جلد دوم کتاب **فلسفهٔ فیزیک** اثر تیم مادلین است که به نظریهٔ کوانتوم می‌پردازد. جلد اول شامل مباحث فضا و زمان است که انتشارات ققنوس در سال ۱۳۹۶ آن را چاپ کرده است. نویسندهٔ کتاب، آقای تیم مادلین، استاد فلسفهٔ علم در دانشگاه نیویورک است.

در پایان لازم است از کلیهٔ کسانی که اینجانب را در ترجمهٔ این کتاب یاری کرده‌اند صمیمانه سپاسگزاری کنم؛ از مادر عزیزم و خانواده‌ام که پیوسته مرا حمایت کرده‌اند مراتب قدردانی و سپاس را به عمل می‌آورم. همچنین از جناب آقای امیر حسین‌زادگان، ریاست محترم گروه انتشاراتی ققنوس، و کارکنان این انتشارات که امکان انتشار جلد دوم این کتاب را نیز فراهم کردند بی‌نهایت تشکر و قدردانی می‌کنم.

رعنا سلیمی
تابستان ۱۴۰۱

مقدمه

این جلد از مجموعهٔ **فلسفهٔ فیزیک** به نظریهٔ کوانتوم می‌پردازد. ابتدا قرار بر این بود که این جلد دو مبحث نظریهٔ کوانتوم و تبیین آماری را پوشش دهد، اما این کار با توجه به محدودیت فضا شدنی نبود. نظریهٔ کوانتوم چالش بغرنجی پیش روی این کتاب می‌گذارد: پدیده‌های بسیار، تفصیل‌های فنیِ بیش از حد و مباحث مفهومیِ بنیادیِ فراوانی وجود دارد که نمی‌توان آن‌ها را در این گسترهٔ محدود به قدر کافی توضیح داد. برخلاف نظریهٔ فضا-زمان، که در مورد چگونگی درک بهترین فیزیک موجود برای آن (نسبیت عام) توافق چشمگیری وجود دارد، نظریهٔ کوانتوم همواره رزمگاه مجادله بوده است. چیزی نیست که بتوان گفت بیشتر فیزیکدانان و فلاسفه روی آن توافق دارند.

پیکربندی [و تعیین ساختار] نسخهٔ آماده‌شدهٔ کتاب مستلزم انتخاب‌های دشواری بود دربارهٔ این‌که چه چیزی ارائه شود، پیچیدگی فنی در چه سطحی باشد، شامل چه پیشینهٔ تاریخی‌ای باشد، کدام مناقشات ذکر شود و چه تفسیرهای دیگری از نظریه‌ها در نظر گرفته شود. هر تصمیمی سخت بود و می‌تواند به‌حق چالش‌برانگیز باشد. پدیده‌ها و رهیافت‌های نظری مهم ناگفته مانده‌اند. دربارهٔ ایده‌های

مربوط به سازگاری میان نظریهٔ کوانتوم و نسبیت عام ــ نظریه‌های کوانتومی گرانش ــ بحث نمی‌شود. همهٔ فصول غیر از فصل آخر فقط به نظریهٔ کوانتومی غیرنسبیتی می‌پردازند.

این انتخاب‌ها بر اساس چه اصولی بوده است؟ در تلاش برای درک یک نظریهٔ کوانتوم، مشکل اساسی این است که این نظریه چگونه می‌تواند پدیده‌های تجربی را با روشی اصولی شکل دهد. معمولاً از این مسئله به عنوان «مسئلهٔ اندازه‌گیری»[1] یاد می‌شود، زیرا عملیات آزمایشگاهی گوناگونِ مورد استفاده برای تهیهٔ داده‌ها را «اندازه‌گیری» می‌نامند. اما این مشکل دامنهٔ بسیار گسترده‌تری دارد. هر پدیدهٔ ماکروسکوپی در اصل می‌تواند یک نظریهٔ فیزیکی بنیادی را بیازماید، زیرا نظریه باید بتواند روایتی فیزیکی از آن ارائه دهد. چنان‌که مشهور است، اروین شرودینگر این پرسش را مطرح کرد که نظریهٔ کوانتوم چگونه می‌تواند برای گربه‌ای، واقع در یک محیط آزمایشگاهی خاص، مدلی ارائه دهد دربارهٔ این‌که آیا سرانجام زنده می‌ماند یا می‌میرد. در مورد مطلب مورد نظر او این‌که آیا آزمایش یک «اندازه‌گیری» محسوب می‌شود یا نه پرسش بی‌ربطی است.

جان استوارت بل برای روش انجام دادن این کار طرحی ارائه داد و آن را نظریهٔ هستارهای موضعی[2] نامید. اصطلاح «هستارها»[3] به هستی‌شناسی یک نظریه اشاره دارد: آنچه نظریه موجودیتش را مسلّم فرض می‌کند. اصطلاح «موضعی» نشان‌دهندهٔ هستاری است که در ناحیهٔ کوچکی از فضا یا فضا-زمان وجود دارد. مشخص کردن توزیع

---

1. measurement problem
2. theory of local beables

۳. جان استوارت بل در سال ۱۹۷۵ مقاله‌ای با عنوان «نظریهٔ هستارهای موضعی» ارائه داد که در آن هستار (beable) غیر از مشاهده‌پذیر (observable) است و به چیزی اشاره دارد که مستقل از ناظر وجود دارد. در این کتاب، هستارهای موضعی در فصل ۴ بررسی می‌شود.ــم.

هستارهای موضعی در سطح میکروسکوپی موقعیت، شکل و حرکت انبوه ماکروسکوپی‌شان را مشخص می‌کند و با این روش می‌توان مسئلهٔ اندازه‌گیری و مسئلهٔ گربهٔ شرودینگر را حل کرد. آنچه برای چنین نظریه‌ای لازم است فهرستی از هستارهای موضعی و شرحی از دینامیکشان است: این‌که آن‌ها چگونه در فضا-زمان توزیع می‌شوند.

این ایدهٔ اصلی به روش‌های مختلفی قابل اجراست که می‌توان آن‌ها را در یک موقعیت غیرنسبیتی شرح داد که درک جزئیات فنی در آن راحت‌تر است. مسلماً این نظریه‌ها از لحاظ تجربی ناکافی‌اند، اما مدل‌هایی از راهبردهای کلی برای حل مسئلهٔ اندازه‌گیری ارائه می‌دهند. علاوه بر این، این نظریه‌ها بسیاری از آثار شاخص مکانیک کوانتومی را نشان می‌دهند. چالش‌های دیگر را که تعمیم‌های نسبیتی با آن‌ها روبه‌رو هستند می‌توان بعداً در نظر گرفت. بنابراین بررسی‌مان را با بحث دربارهٔ سه روش اجرای این راهبرد در حالت غیرنسبیتی پیش می‌بریم، به همراه بحث کوتاهی دربارهٔ چالش‌های دیگری که تعمیم این راهبرد به فضا-زمانِ نسبیتی با آن‌ها روبه‌روست.

این رویکرد با مخاطراتی مواجه است. اگر جواب درست مسئلهٔ اندازه‌گیری شامل هستارهای موضعی نباشد، یا اگر آن هستارها هیچ مشابه غیرنسبیتی‌ای نداشته باشند، شروع کردن با مکانیک کوانتومیِ غیرنسبیتی سودمند نخواهد بود. اما باید از جایی شروع کرد و در آغاز بهتر است با چیزی شروع کنیم که راحت‌تر درک می‌شود. دست‌کم مکانیک کوانتومی غیرنسبیتی می‌تواند نقطه‌ضعف نظریه‌های جایگزین را نشان دهد، بنابراین می‌توان دید که چگونه مفروضات مطرح‌شده شکست می‌خورند. شروع کردن با آنچه درکش می‌کنیم و مشاهدهٔ دقیق نارسایی‌هایش می‌تواند راهی برای پیشرفت مفهومی فراهم کند.

تا این‌جا، جنجالی‌ترین جنبهٔ این کتاب نه محتویاتش، بلکه

چیزهایی است که از آن حذف شده‌اند. مباحث مفصلی پیرامون نظریهٔ رمبش خودبه‌خودی[1] گیراردی-ریمینی-وبر،[2] نظریهٔ موج راهبر[3] لوئی دوبروی[4] و دیوید بوهم،[5] و نظریهٔ چندجهانی[6] هیو اِورت[7] وجود دارد. اما هیچ بحثی پیرامون معروف‌ترین «تفسیر» نظریهٔ کوانتومی، یعنی تفسیر کپنهاگی منسوب به نیلز بور و همکارانش، وجود ندارد ــ در واقع بجز این‌جا هیچ اشاره‌ای به آن نشده است. دلیل آن چیست؟

هر نظریهٔ فیزیکی باید به طور واضح و صریح به دو پرسش اساسی بپردازد: چه چیزی هست و چه کاری انجام می‌دهد. پرسش اول را هستی‌شناسی[8] نظریه و پرسش دوم را دینامیک[9] آن پاسخ می‌دهد. هستی‌شناسی باید توصیف ریاضی دقیقی داشته باشد و دینامیک باید با معادلات دقیقی تحقق یابد که بیان می‌کند هستی‌شناسی چگونه تکامل خواهد یافت یا ممکن است تکامل یابد. هر سه نظریه‌ای که بررسی خواهیم کرد این خواسته‌ها را برآورده می‌کنند.

در مقابل، تفسیر کپنهاگی چنین نمی‌کند. توافق کمی وجود دارد بر سر این‌که این رویکرد به مکانیک کوانتوم واقعاً چه چیزی را موجود فرض می‌گیرد یا این‌که چگونه می‌توان دینامیک آن را بدون ابهام فرمول‌بندی کرد. امروزه این عبارت معمولاً به عنوان کوته‌نوشتی برای نوعی ابزارگرایی عمومی به کار می‌رود که دستگاهِ ریاضی نظریه را صرفاً ابزار پیشگویانه‌ای می‌داند که هرگز به هیچ هستی‌شناسی یا دینامیکی متعهد نیست. این ابزار پیشگویانه در فصل ۲ تحت عنوان «دستورالعمل کوانتوم»[10] توصیف می‌شود. گاهی پذیرفتن تفسیر کپنهاگی در واقع به معنی تصمیم به استفاده از دستورالعمل کوانتوم

---

1. spontaneous collapse theory
2. Ghirardi- Rimini-Weber
3. pilot wave theory
4. Louis DeBroglie
5. David Bohm
6. Many Worlds theory
7. Hugh Everett
8. ontology
9. dynamics
10. quantum recipe

بدون چون‌وچراست: خفه شو و محاسبه کن. اشتیاق برای ارائهٔ نظریهٔ فیزیکی‌ای که توصیف کردیم، با چنین نگرشی از بین می‌رود. از این رو، این نظریه حتی شانسی برای توصیف جهان فیزیکی و نحوهٔ کارکرد آن ندارد. می‌توان انتقادهای صریح‌تری علیه این میراث بور مطرح کرد، اما بهتر است وقتمان را صرف ارائهٔ امور واضح کنیم تا این‌که از چیزی مبهم انتقاد کنیم.[۱]

این کتاب، علاوه بر رد واژهٔ معمول «نظریهٔ کوانتوم» در تقابل با «تفسیر نظریهٔ کوانتوم» به نفع «دستورالعمل پیشگویانه» در تقابل با «نظریهٔ فیزیکی» و علاوه بر چشمپوشی از این پرسش تاریخی که چه چیزی را (اگر چیزی باشد) باید تفسیر کپنهاگی محسوب کرد، از یک جنبهٔ سوم هم با بیشتر مباحث استاندارد تفاوت دارد. در کتاب‌های مبانی کوانتوم باب شده که مرتباً اصطلاحات «واقع‌گرا»، «واقع‌گرایانه»، «غیرواقع‌گرا» و «غیرواقع‌گرایانه» را به نحو نظام‌مند غلط به کار می‌برند. این اصطلاحات در فلسفهٔ علم معنای دقیقی دارند، معنایی که ظاهراً بیشتر فیزیکدانان با آن کاملاً ناآشنا هستند. و موضوع فقط این نیست که این فیزیکدانان آن‌ها را غلط به کار می‌برند، بلکه در واقع آن‌ها را بدون هیچ معنای مرتبطی به کار می‌برند و درباره‌شان بحث می‌کنند. این امر پیامدهای بسیار بدی برای مباحث مبانی نظریهٔ کوانتوم داشته است.

به معنی واقعی کلمه، نظریه‌های فیزیکی نه واقع‌گرا و نه غیرواقع‌گرایند. این موضوع، چنان‌که معمولاً می‌گوییم، خطایی مقوله‌ای است. نگرش شخص به نظریهٔ فیزیکی است که واقع‌گرایانه یا غیرواقع‌گرایانه است. مثلاً نظریهٔ کپرنیک دربارهٔ ساختار منظومهٔ شمسی واقع‌گرایانه بود یا غیرواقع‌گرایانه؟ این پرسش هیچ محتوایی

---

۱. جزئیات بیشتر دربارهٔ این ابهام در Norsen (2017)، فصل ۶ و در Beller (1999) یافت می‌شود. همچنین به Becker (2018) مراجعه کنید.

ندارد. این نظریه همان بود که بود: کپرنیک فرض کرده بود سیارات مختلف و زمین حرکت‌های خاصی دارند. وقتی اوسیاندر[1] مقدمه‌ای بر کتاب **دربارهٔ گردش**[2] [اجرام آسمانی] نوشت، به‌شدت مدافع نگرشی غیرواقع‌گرایانه به این نظریه شد: این نظریه را به معنای واقعی کلمه درست ندانید، بلکه آن را فقط به صورت ابزاری به مثابهٔ روش مناسبی برای انجام دادن پیش‌بینی‌های خاص در نظر بگیرید. او این کار را برای محافظت کپرنیک از خشم کلیسای کاتولیک انجام داد. نگرش خودِ کپرنیک و گالیله خلاف این بود: آن‌ها می‌خواستند با رجوع به قدرت تبیین و سادگی نظریه استدلال کنند که به معنای واقعی کلمه درست است. و آن‌ها به دلیل نگرششان مسائل فیزیکی خاصی (مثلاً، مسائل مکانیک زمینی) را به ارث بردند. اما نظریه‌ای که نزد اوسیاندر غیرواقع‌گرایانه و نزد گالیله واقع‌گرایانه بود نظریه‌ای واحد است. خودِ نظریه هیچ‌یک از آن دو نیست.

واقع‌گرای علمی مدعی است که دست‌کم در برخی موارد، دلایل آشکار خوبی برای پذیرش نظریه‌ها یا ادعاهای نظری به عنوان صادق، یا تقریباً صادق، یا در مسیر صدق داریم. غیرواقع‌گرای علمی این را رد می‌کند. این نگرش‌ها درجاتی دارند: شما می‌توانید کمی، تقریباً یا به‌شدت واقع‌گرای علمی باشید و به طور مشابه، کمی، تقریباً یا به‌شدت غیرواقع‌گرای علمی باشید. در نهایت این پرسشی است که معرفت‌شناسی[3] و نظریهٔ تأیید[4] به آن می‌پردازد. اما این کتاب دربارهٔ معرفت‌شناسی یا نظریهٔ تأیید نیست، بنابراین این موضوع که باید واقع‌گرای علمی باشیم یا غیرواقع‌گرای علمی و تا چه حد، هرگز حتی مطرح هم نمی‌شود. خودِ اصطلاحات «واقع‌گرا» و «غیرواقع‌گرا» مانند «تفسیر کپنهاگی» جز در این مقدمه دیده نمی‌شوند.

---

1. Andreas Osiander
2. *De Revolutionibus*
3. epistemology
4. confirmation theory

اِعمال نادرست اصطلاح «واقع‌گرا» بر نظریه‌ها به جای اعمال آن بر نگرش افراد به نظریه‌ها موجب آسیبی جدی شده که امیدهای کاذبی پدید آورده است. مثلاً، خواهیم دید که بر اساس قضیهٔ بل[1] و داده‌های گزارش‌شده، هیچ نظریهٔ فیزیکیِ از حیث تجربی رضایت‌بخشی که به معنای دقیق کلمه «موضعی» باشد وجود ندارد. قضیهٔ پیوزی،[2] بارِت[3] و رودولف[4] (PBR)، به همراه داده‌هایی که با پیش‌بینی‌های نظریهٔ کوانتوم مطابقت دارند، احتمال هر نظریهٔ فیزیکی «سای‌ـمعرفتی»[5] از حیث تجربی رضایت‌بخش را منتفی می‌کند. اما معمولاً هنگام گزارش این نتایج سرنوشت‌ساز، اصطلاح «واقع‌گرا» یا «واقع‌گرایانه» پنهانی وارد می‌شود. مثلاً گفته می‌شود بل تمام نظریه‌های واقع‌گرایانهٔ موضعی را رد کرد. و این شیوهٔ بیان قویاً تلقین می‌کند که با گفتن این‌که واقع‌گرایی آن چیزی است که باید کنار گذاشته شود، می‌توان از ناموضعیت اجتناب کرد و از نتیجهٔ بل طفره رفت. اما این تلقین مهمل است. ختم کلام، بل ثابت می‌کند که هیچ نظریهٔ موضعی‌ای نمی‌تواند موارد نقض نامساوی‌اش را پیش‌بینی کند. این‌که نگرش برخی افراد به این نظریه واقع‌گرایانهٔ علمی است یا نه اهمیتی ندارد. اگر به انتخاب من بود، به کار بردن اصطلاحات «واقع‌گرا» و «غیرواقع‌گرا» را در این مباحث اساسی ممنوع می‌کردم. و در کتاب خودم این اختیار را دارم، پس دیگر به این اصطلاحات اشاره‌ای نخواهم کرد.

من مدیون افراد زیادی هستم که انرژی‌شان را صرف بهبود این کتاب کردند. نظرات بسیار سودمندی از کریس میشام، چیستی اِستویکا، دَن پینکل، بِرت سوئیت، دو داور ناشناس و دانشجویانم

---

1. Bell's theorem
2. Matthew Pusey
3. Jonathan Barrett
4. Terry Rudolph

۵. psi-epistemic یا Ψ-epistemic؛ برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد سای‌ـمعرفتی به فصل ۳ مراجعه کنید. ــم.

در سمینار فارغ‌التحصیلی‌ام در دانشگاه نیویورک دریافت کردم که به ارزیابی یک نسخهٔ پیشین عادت داشتند. زی پِری از سر لطف برخی تصاویر اولیهٔ من را به صورت شکل‌های زیبایی درآورد: تمایز آن‌ها واضح خواهد بود. سید وِستمورلند کار ویراستاری فنی نسخهٔ دست‌نویس را بسیار عالی انجام داد.

اگر سال‌ها مباحثه با دیوید آلبرت، دِتلِف دُر، بَری لوئر، رابرت وِینگارد فقید، نینو زَنگی و مهم‌تر از همه شِلی گلدشتاین، که این تلاش ناچیز به او هدیه می‌شود، نبود، هرگز نمی‌توانستم این کار را انجام دهم.

اگر ویشنیا مادلین نبود، نه این کتاب وجود داشت و نه هیچ کار ارزشمند دیگری در زندگی‌ام. آنچه او به من بخشیده است بی‌حد و اندازه است و در وصف نمی‌گنجد و هرگز صرفاً با کلمات نمی‌توان به نحو شایسته از او قدردانی کرد.

۱

هشت آزمایش

فیزیک، از دیرباز، علم مادهٔ متحرک[1] توصیف شده است. این توصیف هرچند تقریبی است، جایگاه فیزیک را نسبت به سایر علوم تجربی روشن می‌کند. موضوعات علوم تجربی گوناگون دیگر هرچه باشد، همه نمونه‌هایی از مادهٔ متحرک‌اند. هر سیستم زیست‌شناختی، هر نظام اقتصادی، هر نظام روان‌شناختی و هر سیستم نجومی نیز مادهٔ متحرک است و از این رو در حوزهٔ فیزیک قرار می‌گیرد. اما چنین نیست که هر سیستم فیزیکی حتماً زیست‌شناختی، اقتصادی، روان‌شناختی، یا نجومی باشد. این بدان معنا نیست که این علوم تجربی به فیزیک تقلیل می‌یابند، یا این‌که علومِ دیگر درکی از سیستم‌ها متمایز از روایت صرفاً فیزیکی فراهم نمی‌کنند. با این حال، فیزیک در آرزوی نوعی جهان‌شمولی است که در میان علوم تجربی منحصربه‌فرد است و به این معنا تا حدی جایگاهی اساسی در میان آن‌ها دارد.

عبارت «مادهٔ متحرک» دو هدف را برای تحلیل‌های بیشتر ارائه می‌دهد: «ماده» و «حرکت». فیزیک معاصر «حرکت» هر جسم را با مسیرش در فضا-زمان توضیح می‌دهد. درک دقیق این موضوع

1. matter in motion

مستلزم توضیح ساختار فضا-زمان است. روایت فیزیکی ساختار فضا-زمان طی سال‌ها تغییر کرده و در حال حاضر نظریهٔ نسبیت عام بهترین نظریه است. خودِ ماهیت فضا-زمان و ساختار هندسی فضا-زمان موضوع جلد دیگر است: **فلسفهٔ فیزیک: فضا و زمان**.[۱] جلد حاضر به این پرسش پاسخ می‌دهد: ماده چیست؟ در حال حاضر، بهترین نظریهٔ موجود در باب ماده نظریهٔ کوانتوم است. وظیفهٔ اصلی ما این است که بفهمیم نظریهٔ کوانتوم دربارهٔ ماهیت اجزای مادی جهان چه ادعایی دارد.

هر چقدر هم که این وظیفه واضح به نظر برسد، ابتدا باید با پارادوکس بزرگی در مورد فیزیک مدرن روبه‌رو شویم. دو ستونی که فیزیک مدرن بر آن‌ها تکیه دارد نظریهٔ نسبیت عام و نظریهٔ کوانتوم است، اما وضعیت این دو سیستم نظری کاملاً متفاوت است. نسبیت عام، با معیارهای خودش، کاملاً واضح و دقیق است. این نظریه روایت تازه‌ای از ساختار فضا-زمان ارائه می‌دهد که درک کامل آن نیازمند پشتکار و تلاش است، اما آنچه این نظریه می‌گوید بدون ابهام است. هرچه بیشتر روی آن کار کنیم، واضح‌تر می‌شود و مناقشهٔ زیادی میان هواداران نسبیتِ عام دربارهٔ چگونگی فهم آن وجود ندارد. (در این نظریه، فقط هنگام نشان دادن توزیع ماده، با استفاده از تانسور تنش-انرژی، کمی ابهام وجود دارد. اینشتین یادآوری کرد که این بخش از نظریه‌اش «چوب بی‌کیفیت» است، حال آن‌که بخشی که خودِ ساختار فضا-زمان را توصیف می‌کند «مرمر ناب»[۲] است.) در مقابل، در میان فیزیکدانان هیچ اتفاق نظری در خصوص نحوهٔ درک نظریهٔ کوانتوم وجود ندارد. نظریهٔ فیزیکی روشن و دقیقی به

---

۱. *Philosophy of Physics: Space and Time*، این کتاب جلد اول کتاب حاضر است که انتشارات ققنوس در سال ۱۳۹۶ منتشر کرده است.ـــم.

2. Einstein (1950), p. 84.

نام «نظریهٔ کوانتوم» وجود ندارد که در این صفحات ارائه شود. در عوض، مشاجرهٔ شدیدی وجود دارد.

چطور ممکن است؟ هرچه باشد کتاب‌های درسی زیادی دربارهٔ نظریهٔ کوانتوم منتشر شده است و هر ساله هزاران دانشجوی فیزیک نظریهٔ کوانتوم را فرامی‌گیرند. در تاریخ بشر، برخی از پیش‌بینی‌های نظریهٔ کوانتوم در معرض سخت‌ترین و دقیق‌ترین آزمون‌ها قرار گرفته و آن‌ها را پشت سر گذاشته‌اند. کلِ صنعت میکروالکترونیک به محاسبات کوانتوم‌ـمکانیکی بستگی دارد. چگونه می‌توان موفقیت تجربی آشکار و چشمگیر نظریهٔ کوانتوم را با عدم قطعیت کامل دربارهٔ ادعای این نظریه در باب ماهیت ماده سازگار کرد؟

از قرار معلوم، آنچه در کتاب‌های فیزیک متوسطه ارائه می‌شود، آنچه دانشجویان می‌آموزند و محققان به کار می‌برند به‌هیچ‌وجه نظریهٔ فیزیکی دقیقی نیست. این آموزه‌ها دستورالعمل بسیار کارآمد و دقیقی برای انجام دادن برخی پیش‌بینی‌های خاص‌اند. آنچه دانشجویان فیزیک می‌آموزند طرز استفاده از این دستورالعمل است. این قابلیت، در تمام مقاصد عملی، برای طراحی ریزتراشه‌ها و پیش‌بینی نتایج آزمایش‌ها، کفایت می‌کند. اما اگر از قضا دانشجوی فیزیک صرفاً به یادگیری تکنیک‌های ریاضی برای انجام دادن پیش‌بینی‌ها راضی نشود و در عوض بپرسد که این نظریه دربارهٔ جهان فیزیکی چه ادعایی دارد، احتمالاً با این پاسخ متداول مواجه می‌شود: خفه شو و محاسبه کن!

در مورد دستورالعمل چطور؟ آیا دست‌کم این یکی کاملاً دقیق است؟ نه نیست. جان استوارت بل[1] عیناً این شکایت را مطرح کرد:

> شرح مقدماتی این مفاهیم را «نظریهٔ میدان کوانتومی بدون ناظرها، مشاهده‌پذیرها، اندازه‌گیری‌ها، سیستم‌ها، تجهیزات، رمبش تابع

1. John Stewart Bell

موج[۱] یا هر چیزی شبیه آن» نامیدند. این امر توانست به عده‌ای تلقین کند که موضوع مورد بحث فلسفی است. اما تأکید می‌کنم که نگرانی من کاملاً حرفه‌ای است. تصور می‌کنم فرمول‌بندی‌های متعارف نظریهٔ کوانتوم و مخصوصاً نظریهٔ میدان کوانتومی به طور غیرحرفه‌ای مبهم و نامشخص است. فیزیکدانان نظری حرفه‌ای باید بتوانند بهتر عمل کنند.[۲]

شکایت بل این است که دستورالعمل پیشگویانهٔ موجود در کتاب‌های درسی از عباراتی استفاده می‌کند مانند «ناظر»، «اندازه‌گیری» و «تجهیزات»، که کاملاً دقیق و واضح نیستند. این شکایت از نظریهٔ کوانتوم را بل آغاز نکرد: مشهور است که اینشتین پرسید آیا یک موش فقط با نگاه کردن به عالم می‌تواند موجب تغییرات اساسی در آن شود.[۳] مقصود اینشتین این بود که برخی از فرمول‌بندهای نظریهٔ کوانتوم در پی ربط دادن تغییر ناگهانی خاصی در حالت فیزیکیِ عالم («رمبش تابع موج») به اَعمال ناظر است. اگر قرار است نظریهٔ کوانتوم نظریهٔ فیزیکی دقیقی به حساب آید، پس باید توصیف فیزیکی دقیقی از مشاهده ارائه دهد. همان‌طور که بل بیان کرد: «آیا تابع موج جهان هزاران میلیون سال منتظر پرش بود تا این‌که یک موجود تک‌سلولی ظاهر شود؟ یا برای سیستمی دارای صلاحیت بیشتر با مدرک دکترا بایست بیشتر صبر می‌کرد؟»[۴]

این بی‌دقتی‌ها در فرمول‌بندی دستورالعمل کوانتوم تأثیرات عملی

---

۱. collapse of the wavefunction؛ که آن را فروکاهش تابع موج یا فروریزش تابع موج نیز ترجمه کرده‌اند و به تقلیل تابع موج (reduction of the wavefunctin) نیز معروف است. در فصل‌های بعدی دربارهٔ رمبش تابع موج مطالب بیشتری ارائه می‌شود و در فصل ۴ نظریه‌های رمبش بررسی می‌شوند. ــم.

2. Bell (2004), p. 173.

۳. هیو اورت آن را در Everett (2012), p. 157 گزارش کرده است.

4. Bell (2004), p. 216.

قابل توجهی در پیش‌بینی‌ها ندارد. فیزیکدانان به‌خوبی می‌دانند که چه وقت عملیات آزمایشگاهی خاصی مشاهده محسوب می‌شود و چه چیزی مشاهده می‌شود. نظریهٔ کوانتوم نتایج این آزمایش‌ها را با دقت حیرت‌انگیزی پیش‌بینی می‌کند. اما اگر بیشتر به ماهیت جهان فیزیکی علاقه‌مند باشید تا تولید پیش‌بینی‌های عمل‌گرایانه، این قابلیت مایهٔ آسودگی خاطر نیست. زیرا دستورالعمل در واقع حاوی هیچ روایت بدون ابهامی از خودِ جهان نیست. دستورالعمل استاندارد، برای روشن کردن این موضوع، از یک عملیات ریاضی استفاده می‌کند که می‌توان آن را «رمبش تابع موج» نامید. اما اگر بپرسید آیا این عملیات ریاضی با یک تغییر فیزیکی واقعی در خودِ جهان مطابقت دارد، دستورالعمل چیزی نمی‌گوید. و فیزیکدانان کارآزموده بر سرِ جواب توافق ندارند. برخی خطر نمی‌کنند و از اظهارنظر دربارهٔ آن امتناع می‌ورزند.

شکوهٔ بل ممکن است شگفت به نظر برسد. اگر مسائل مربوط به نظریهٔ کوانتوم «صرفاً فلسفی» نیستند، بلکه از آن‌جا ناشی شده‌اند که محتوای این نظریه به عنوان فیزیک به طور غیرحرفه‌ای مبهم و نامشخص است، چرا در کتاب‌های فیزیک به این موضوع اشاره نمی‌کنند؟ با انتخاب اصطلاحات گمراه‌کننده بر بخش زیادی از این مشکل سرپوش گذاشته‌اند. متقابلاً پاسخ متداولی که ممکن است بشنوید این است: مکانیک کوانتوم به عنوان نظریهٔ فیزیکی کاملاً دقیق است (به هر حال، از آن برای انجام دادن پیش‌بینی‌های بسیار دقیق استفاده کرده‌اند!)، اما تفسیر این نظریه جای بحث دارد. و علاوه بر آن، ممکن است بشنوید که تفسیر مسئله‌ای فلسفی است نه فیزیکی. اصلاً فیزیکدانان می‌توانند تمایلی به تفسیر آن نداشته باشند و فقط با نظریه کار کنند. تفسیر، هرچه باشد، صرفاً باید تجملی غیرضروری باشد، مانند صندلی‌های گرم اتومبیل که به شما احساس راحتی بیشتری می‌دهند، اما عملاً در رساندن شما از جایی به جای دیگر هیچ نقشی ندارند.

این شیوهٔ بیان گمراه‌کننده است، زیرا با آنچه نشانهٔ نظریه‌ای فیزیکی، یا دست‌کم یک نظریهٔ فیزیکی بنیادی، است مطابقت ندارد. نظریهٔ فیزیکی باید شامل هستی‌شناسی فیزیکی باشد: یعنی شامل چیزی که نظریه وجودش را به عنوان واقعیت فیزیکی مسلم فرض می‌کند. و باید شامل دینامیک نیز باشد: یعنی شامل قوانینی (قطعی یا احتمالی) که نحوهٔ رفتار این موجودات واقعی فیزیکی را توصیف می‌کنند. در یک نظریهٔ فیزیکی دقیق، هم هستی‌شناسی و هم دینامیک برحسب مفاهیم ریاضی دقیق نشان داده می‌شوند. اما دقیقاً به همین معناست که دستورالعمل مکانیک کوانتومیِ پیش‌بینی نظریه‌ای فیزیکی نیست. این دستورالعمل مشخص نمی‌کند که از حیث فیزیکی چه چیزی وجود دارد و نحوهٔ رفتارش چگونه است، بلکه روشی (کمی مبهم) برای پیش‌بینی‌های آماری دربارهٔ نتایج آزمایش‌ها ارائه می‌دهد. و آنچه معمولاً «تفسیرهای بدیل نظریهٔ کوانتوم» می‌نامند تا حدی نظریه‌های فیزیکی دقیق بدیل با هستی‌شناسی‌ها و دینامیک‌های فیزیکی کاملاً مشخصی هستند که (اگر درست باشند) توضیح می‌دهند چرا دستورالعمل کوانتوم به این خوبی کار می‌کند.

چنین نیست که همهٔ نظریه‌های فیزیکی ادعایی در مورد ارائهٔ هستی‌شناسی بنیادی کاملاً مشخصی داشته باشند. نظریهٔ فیزیکی ممکن است با این هشدار صریح ارائه شود که صرفاً یک تقریب است، و به هر حال آنچه را بدون تحلیل‌های بیشتر ارائه می‌دهد اشتقاقی است و از نظریهٔ عمیق‌تری برآمده که هنوز در دسترس ما نیست. در چنین حالتی، در برخی شرایط ممکن است در واقع، سطح‌پایین‌ترین هستی‌شناسی که در نظریه به آن اشاره شده کاملاً مشخص نشده باشد. در بقیهٔ این کتاب، فرض من این است که نظریه‌های مورد بحث هستی‌شناسی بنیادی‌ای ارائه می‌دهند که قابل تجزیه و تحلیل بیشتر دانسته نمی‌شود، مگر آن که نشان دهم غیر از این است.

به این معنی، هیچ نظریهٔ فیزیکیِ به‌دقت تعریف‌شده‌ای هرگز در مفروضات اساسی‌اش عباراتی مانند «مشاهده»، «اندازه‌گیری»، «سیستم» یا «دستگاه» را به کار نمی‌برد. در عوض، دقیقاً می‌گوید که چه چیزی وجود دارد و چگونه رفتار می‌کند. اگر این توصیف درست باشد، نظریه نتایج تمام آزمایش‌ها را توضیح خواهد داد، زیرا آزمایش‌ها شامل چیزهای موجودی هستند که به نحوی رفتار می‌کنند. اِعمال چنین نظریهٔ فیزیکی‌ای بر یک موقعیت آزمایشگاهی هرگز مستلزم این نیست که آزمایشگاه به «سیستم» و «دستگاه» تقسیم شود یا در این باره قضاوت شود که آیا یک برهم‌کنشِ اندازه‌گیری محسوب می‌شود یا نه. در عوض، این نظریه توصیفی فیزیکی از آزمایشگاه را مفروض می‌گیرد و، با استفاده از دینامیک، آنچه را دستگاه انجام خواهد داد (یا ممکن است انجام دهد) پیش‌بینی می‌کند. سپس می‌توان این پیش‌بینی‌ها را با داده‌های گزارش‌شده مقایسه کرد.

پس، تا این‌جا سه چیز را متمایز کرده‌ایم: یک نظریهٔ فیزیکی، دستورالعملی برای پیش‌بینی، و آن نوع داده‌ها یا پدیده‌هایی که ممکن است آزمایش‌گرایان گزارش کنند. آنچه معمولاً «نظریهٔ کوانتوم» نامیده می‌شود دستورالعمل یا نسخه‌ای است برای استفاده از برخی اصطلاحاتِ تا حدی مبهم، به منظور انجام دادن پیش‌بینی‌هایی دربارهٔ داده‌ها. اگر به ماهیت جهان فیزیکی علاقه‌مند باشیم، آنچه نیاز داریم در عوض یک نظریه است ــ بیان دقیقی از آنچه وجود دارد و نحوهٔ رفتار جهان فیزیکی، نه‌فقط در آزمایشگاه، بلکه در تمام مکان‌ها و زمان‌ها. این نظریه باید بتواند موفقیت دستورالعمل و در نتیجه همچنین پدیده‌ها را توضیح دهد.

پژوهشمان را با برخی پدیده‌ها یا داده‌ها آغاز می‌کنیم. سعی خواهیم کرد این پدیده‌ها را «بدون جانبداری از نظریه» شرح دهیم، هرچند که در نهایت، این امر کاملاً امکان‌پذیر نخواهد بود. اما، به

قول ارسطو، هر پژوهش علمی مناسب باید با چیزی شروع شود که نزد ما واضح‌تر و آشناتر است و به آنچه طبیعتاً واضح‌تر است ارتقا یابد (*Physics* 184a16). ما با آنچه می‌توانیم ببینیم شروع می‌کنیم و سعی می‌کنیم پژوهش خود را با نظریهٔ کاملاً واضحی دربارهٔ آنچه واقعاً هست به پایان برسانیم.

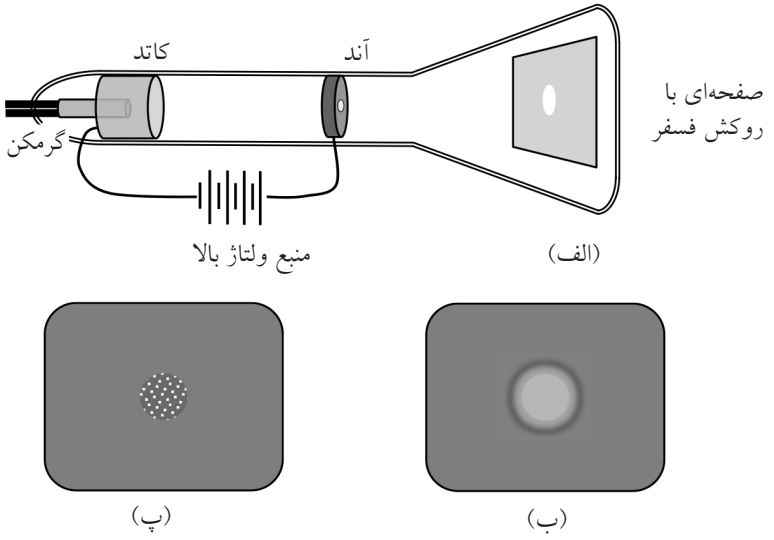
پدیده‌های مورد نظر ما در هشت آزمایش گنجانده شده‌اند.

آزمایش ۱: لامپ پرتوِ کاتدی

دو سر یک باتری الکتریکی را «الکترود» می‌نامند. الکترود مثبت آنُد است و الکترود منفی کاتُد. این دو الکترود را با سیم به دو صفحهٔ رسانا متصل کنید، در آند روزنه‌ای ایجاد کنید، صفحه‌ای با روکش فسفر آن سوی آند قرار دهید و تمام دستگاه را در لولهٔ خلأ محصور کنید. در پایان، المنت گرمکن قابل کنترلی به کاتد اضافه کنید. این دستگاه، منهای المنت گرمکن، را فردیناند براون[1] در سال ۱۸۹۷ اختراع کرد و بعداً آن را لامپ پرتو کاتدی[2] (CRT) نامیدند. المنت گرمکن را جان بی. جانسون[3] و هاری واینهارت[4] در دههٔ ۱۹۲۰ اضافه کردند.

اولین آزمایش شامل تنظیم المنت گرمکن است، طوری که کاتد گرم شود. وقتی کاتد کاملاً گرم شد، نقطه‌ای نورانی، تقریباً به شکل روزنهٔ روی آند، روی صفحهٔ فسفرسان ظاهر می‌شود (شکل ۱ الف و ۱ ب). هرچند حرارت المنت گرمکن را کمتر کنیم، این نقطه کم‌نورتر می‌شود. سرانجام نقطه دیگر به طور پیوسته نمی‌درخشد، درعوض، در همان ناحیه، فلش‌های[5] [یا درخشش‌های] منفرد نور ظاهر می‌شود (شکل ۱ پ). با کاهش بیشتر گرما، تعداد این فلش‌های منفرد کمتر و کمتر می‌شود تا این‌که هر بار یک فلش و با فاصلهٔ

1. Ferdinand Braun
2. Cathode Ray Tube
3. John B. Johnson
4. Harry Weinhart
5. flash



شکل ۱

زمانی زیادی از دیگر فلش‌ها ظاهر می‌شود. اما اگر رد این فلش‌های منفرد را ثبت کنیم، به مرور زمان همان ناحیه‌ای را مشخص می‌کنند که نقطهٔ پایدار اولیه.

این‌ها پدیده‌ها یا داده‌ها هستند. آن‌ها فوراً موجب مطرح شدن فرضیه‌های خاصی دربارهٔ اتفاقات درون لامپ می‌شوند، اما در حال حاضر می‌خواهیم چنین فرضیه‌هایی را از خودِ داده‌ها متمایز کنیم. مثلاً، این پدیده‌ها نشان می‌دهند که چیزی از کاتد (جایی که گرما اعمال می‌شود) با عبور از روزنهٔ آند به صفحهٔ فسفرسان می‌رود. می‌توانیم این فرضیه را با حرکت دادن صفحه به طرف آند، در حالی که نقطهٔ نورانی پیوسته است، بیازماییم. نقطهٔ نورانی پیوسته می‌مانَد و با نزدیک شدن به آند کم‌عرض و درخشان می‌شود. درست مقابل کاتد، شکل نقطهٔ نورانی شبیه روزنه است. می‌توان صفحه‌ای را بین کاتد و آند قرار داد، که در این صورت این صفحه با تابش بیشتر،

درخشان‌تر و پراکنده‌تری روشن می‌شود. بنابراین به نظر می‌رسد چیزی از کاتد گسیل می‌شود و به صفحه می‌رود. این چیز را ابتدا پرتوهای کاتدی[1] نامیدند.

با کاهش گرما، این پرتوهای کاتدی نوعی خاصیت گسسته یا دانه‌ای از خود نشان می‌دهند و هر بار یک فلش تولید می‌کنند. ما نمی‌توانستیم این رفتار را پیش‌بینی کنیم: امکان داشت نقطهٔ نورانی بدون تفکیک شدن به فلش‌های منفرد، فقط به طور یکنواخت کم‌نور شود. این رویدادهای گسستهٔ منفرد موجب مطرح شدن فرضیهٔ دیگری می‌شوند، این‌که پرتوهای کاتدی از مجموعه‌ای از ذرات منفرد تشکیل شده‌اند. سرانجام این ذرات فرضی را الکترون نامیدند و گاهی از کلِ دستگاه کاتد/آند به عنوان تفنگ الکترونی یاد می‌شود.

واقعیتی که در ادامه می‌آید مدل مطرح‌شده با عبارت «تفنگ الکترونی» را تقویت می‌کند. افزایش ولتاژ باتری «سرعت» پرتوهای کاتدی را افزایش می‌دهد، به این معنی که اگر زمان بین اتصال باتری و مشاهدهٔ نقطهٔ نورانی را اندازه بگیریم، می‌بینیم که این زمان در ولتاژهای بیشتر کمتر است. این رابطه روایتی را به دست می‌دهد: گرم کردنِ کاتد الکترون‌ها را تحریک می‌کند و کاتدِ دارای بار منفی الکترون‌های دارای بار منفی را دفع و آندِ دارای بار مثبت جذبشان می‌کند. هرچه اختلاف ولتاژ میان این دو بیشتر باشد، سرعت الکترون‌ها بیشتر می‌شود و برخی از آن‌ها، با عبور از روزنهٔ آند، به صفحه می‌رسند.

در واقع مقاومت در برابر این فرضیهٔ ذره‌ای دشوار است، اما فعلاً باید در برابرش مقاومت کنیم. فرض گرفتن ذرات منفردی که از کاتد به طرف صفحه می‌روند خود بخشی از داده‌ها نیست، هرچند ممکن است بخشی از نظریه‌ای باشد که بناست داده‌ها را توضیح دهد.

---

1. cathode rays