فلسفهٔ علم، پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
دوفصل‌نامهٔ علمی (مقالهٔ علمی ـ پژوهشی)، سال دهم، شمارهٔ دوم، پاییز و زمستان ۱۳۹۹، ۲۳-۴۲

شأن هستی‌شناختی تابع موج

مریم انصاری بناب*
علیرضا منصوری**

چکیده

در فیزیک برای نمایش هستی‌شناختی نظریه‌ها از موجودات ریاضی استفاده می‌شود. اما میان موجودات ریاضی و هستومندهای فیزیکی موردارجاع ریاضیات تمایزی وجود دارد که نادیده‌گرفتن آن منجر به نتایج عجیب و نادرستی می‌شود. مقالهٔ حاضر به این مسئله می‌پردازد که تابع موج، به‌مثابهٔ موجود ریاضیاتی، در تفسیر رئالیستی بازنمایی چه چیزی در واقعیت فیزیکی است. تأکید می‌شود که عدم تمایز میان تابع موج به‌مثابهٔ موجودی ریاضیاتی با حالت فیزیکی منجر به این نتیجهٔ عجیب می‌شود که ابعاد فضای فیزیکی در تناظر مستقیم با ابعاد ریاضی است، یا فضای پیکربندی فضایِ فیزیکی واقعی است. به‌علاوه، این پیش‌نهاد ارائه می‌شود که برای درک شأن هستی‌شناختی تابع موج نیازمند نظریه‌ای هستیم که بین هستارهای موضعی و حالت کوانتومی ارتباط برقرار کند.

کلیدواژه‌ها: تابع موج، واقع‌گرایی، رئالیسم علمی، هستارهای موضعی، فضای پیکربندی.

---

* دانشجوی دکتری فلسفهٔ علم، دانشکدهٔ حقوق الهیات و علوم سیاسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، ansariph93@gmail.com

** دانشیار گروه فلسفهٔ علم و فناوری، پژوهشگاه علوم انسانی ومطالعات فرهنگی (نویسندهٔ مسئول)، a_mansourius@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۱۳

Copyright © 2018, IHCS (Institute for Humanities and Cultural Studies). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International, which permits others to download this work, share it with others and Adapt the material for any purpose

۱. مقدمه

پس از شکل‌گیری و صورت‌بندی نظریهٔ کوانتوم تا مدت‌ها تصور می‌شد که پرسش‌های هستی‌شناسانه درمورد این نظریه نادرست است. به‌خصوص، ارائهٔ تعابیر رئالیستی ناممکن تلقی می‌شد. اما کارهای بوهم و بل تاحد زیادی این فضا را تغییر داد و مکانیک بوهمی و نظریهٔ GRW و تعبیر چندجهانی با اتخاذ رویکردی رئالیستی ارائه شد. باوجوداین، هنوز پرسش‌های مهمی دراین‌باره وجود دارد که ذهن فیزیک‌دانان بنیادی و فلاسفهٔ فیزیک را به‌خود مشغول کرده است. برای نمونه، هم‌چنان این پرسش مطرح است که در بررسی این نظریه‌ها کدام‌یک از عناصر آن‌ها را باید واقعی در نظر گرفت؟ هرکس تاحدی با مکانیک کوانتوم آشنایی داشته باشد می‌داند که «تابع موج» نقش اساسی و مهمی در این نظریه ایفا می‌کند. باوجود اهمیت و نقش کلیدیِ این عنصر در مکانیک کوانتومی شأن هستی‌شناختی آن هم‌چنان مبهم است.

در سال ۲۰۱۲، پاسی، بَرت، و رادولف در مقاله‌ای با عنوان «دربارهٔ واقعیت حالت کوانتومی» در مجلهٔ *نیچرِ فیزیک* قضیه‌ای ارائه کردند که به قضیهٔ PBR شهرت یافت. ادعای آن‌ها این بود که مدل‌هایی که در آن حالت کوانتومی صرفاً بازنمایی اطلاعاتی دربارهٔ حالت فیزیکی سیستم در نظر گرفته شود منجر به پیش‌بینی‌هایی می‌شوند که با نتایج نظریهٔ کوانتوم در تعارض است (Pussy et al 2012: 475). حتی اگر با نتایج این قضیه موافق باشیم، هنوز روشن نیست که اگر بخواهیم حالت کوانتومی یا تابع موج را رئالیستی تعبیر کنیم معنای آن چیست. هدف اصلی این مقاله پرداختن به شأن هستی‌شناختیِ تابع موج است. پرسش از شأن هستی‌شناختی تابع موج را با پرسش از «چیستی» با صورت‌بندی‌هایی به‌شکل «x چیست؟» نباید خلط کرد. پاسخ معمول به پرسش‌هایی که به‌شکل دوم طرح می‌شود معمولاً به لفاظی‌ها و تعاریف زبانی یا ذات‌گرایانه منتهی می‌شود که درنهایت به بی‌راهه می‌رود؛ درحالی‌که پرسش از شأن هستی‌شناختی تابع موج نظریه‌ای هستی‌شناسانه دربارهٔ واقعیت تابع موج می‌طلبد و این نظریه‌های فلسفی و متافیزیکی هرکدام ممکن است به نظریهٔ فیزیکی متفاوتی منجر شوند و به‌طور غیرمستقیم به آزمون تجربی گذاشته شوند، زیرا معمولاً وقتی نظریهٔ فیزیکی‌ای از نظر تجربی رد می‌شود، متافیزیک حمایت‌کنندهٔ آن نیز کنار گذاشته می‌شود (Agassi 1964: 204-205).

نظریهٔ هستی‌شناسانه‌ای که برای تابع موج ارائه می‌شود باید بتواند به مسائلی از این قبیل پاسخ دهد که آیا تابع موج موجودی ذهنی است یا واقعی؟ آیا می‌توان گفت تابع موج

صرفاً واجد عنصری معرفتی و ذهنی است؟ اگر تابع موج واقعی باشد، آیا از نوع واقعیت انضمامی است یا از نوعی دیگر؟ آیا توصیف‌کنندهٔ اطلاعات ما از سیستمی کوانتومی است یا توصیف‌کنندهٔ واقعیتی مستقل از مشاهده؟

درواقع، تعابیر مختلفی که از ساختار ریاضیاتی نظریهٔ کوانتومی ارائه شده‌اند هستی‌شناسی‌ها یا متافیزیک‌های مختلفی‌اند که پاسخ‌های متفاوتی به پرسش‌های فوق می‌دهند. درحال‌حاضر، این‌قدر می‌دانیم که در مکانیک کوانتومی رایج تابع موج نمی‌تواند صرفاً نقش معرفتی داشته باشد؛ زیرا صرفاً معرفتی‌انگاشتن این تابع متضمن قبول این امر است که در توصیف کمیت‌های فیزیکی چیزی دیگر، که در ادبیات رایج با عنوان «متغیرهای نهان» شناخته می‌شود، دخالت کند، درحالی‌که مکانیک کوانتومی رایج به‌شدت با وجود چنین متغیرهای نهان مخالف است. باتوجه‌به این‌که در مکانیک کوانتومی رایج نتایج اندازه‌گیری‌های کوانتومی رایج با کمک تابع موج به‌دست می‌آید و تابع موج هم بیان‌کنندهٔ مجموعه‌ای از روابط آماری میان کمیت‌های ماکروسکوپی معین است، می‌توان تلقی رایج از تابع موج را شبه‌قانونی(quasi-nomological) به‌شمار آورد.[۱]

در روایتی هم که دور (Dur)، زنگی (Zanghi)، و گلدشتاین (Goldstein) از مکانیک بوهمی عرضه می‌کنند، همانند تعابیر هم‌دوسی‌زدا (decoherence) و تاریخچه‌های سازگار (consistent-histories)، تابع موج یا قانونی است یا شبه‌قانونی، با این تفاوت که در این نظریه‌ها تابع موج رفتار بخشی یا چیزی دیگر را هدایت می‌کند که از نظر فیزیکی انضمامی‌تر است، اما در روایت دیوید آلبرت (۱۹۹۶) از مکانیک بوهمی فضای پیکربندی است که فضایی فیزیکی با ابعاد بالا محسوب می‌شود و تابع موج به‌مثابهٔ میدان فیزیکی واقعی در این فضا در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، می‌توان گفت در این دیدگاه جهان متشکل از دو جوهر فیزیکی اساسی است: یکی تابع موجی که روی فضای پیکربندی تعریف شده است (با عنوان تابع موج جهانی) و دیگری ذرهٔ جهانی. داستان جهان هم براساس تغییر شکل تابع موج جهانی و تغییر مکان ذرهٔ جهانی و تحول دینامیکی معادلهٔ شرودینگر و شرط راه‌نما روایت می‌شود (Albert 1996: 278-279). تعبیرِ اورت نیز تابع موج را شبه‌مادی می‌داند. اطلاق شبه‌مادی از این جهت است که در این نظریه‌ها ارتباط میان تابع موج و واقعیت مادی معمول که با آن آشناییم واضح نیست.

در نظریهٔ GRW که «جای‌گزیدگی خودبه‌خودی پیوسته» (continuous spontaneous localization) نام دارد نیز تابع موج تنها جوهر فیزیکی اصلی جهان است و هرچه را رخ می‌دهد می‌توان با تغییر شکل این تابع موج و معادلهٔ دینامیکی حاکم بر آن توضیح داد، زیرا

در نظریهٔ اطلاعات کوانتومی تابع موج شبه‌ذهنی (quasi-subjective) در نظر گرفته می‌شود. از این جهت می‌گوییم «شبه‌ذهنی» که در آرای طرف‌داران این نظریه منظور از «ذهنی‌بودن» دقیقاً روشن نیست!

چنان‌که پوپر بارها تأکید کرده است، مفاهیم مهم نیستند، بلکه نظریه‌ها مهم‌اند و مفاهیم ابزاری درخدمت نظریه‌ها محسوب می‌شوند (Popper 1963: 18-20). در این‌جا نیز می‌توان دید که تعابیر مختلفی که از نظریهٔ کوانتوم ارائه می‌شود هستی‌شناسی متفاوتی را از تابع موج برای ما ترسیم می‌کند (Goldstein and Zanghi 2013: 108).

هدف مقالهٔ حاضر که سعی دارد در مسیری واقع‌گرایانه پیش رود این است که تا جای ممکن روشن کند که اتخاذ رویکرد واقع‌گرایانه به تابع موج با چه مشکلاتی روبه‌روست و به‌طور مشخص نشان دهد نمی‌توان، آن‌چنان‌که دیوید آلبرت می‌گوید، ماهیت هستی‌شناختی تابع موج را مستقیماً از ساختار ریاضی مکانیک کوانتوم نتیجه گرفت. مقالهٔ حاضر بیش‌تر جانب رویکردی را می‌گیرد که ارائهٔ تعبیر واقع‌گرایانه از مکانیک کوانتوم را مستلزم درنظرگرفتن مقولهٔ هستی‌شناسانهٔ بنیادی و جدید می‌داند. تلاش می‌شود تاحد امکان مشخص شود که این مقولهٔ هستی‌شناسانهٔ جدید باید دارای چه ویژگی‌هایی باشد.

۲. نگاهی تاریخی به نسبت واقعیت و ساختار ریاضی

نمونه‌های تاریخی متعددی وجود دارد که نشان می‌دهد پل‌زدن از ریاضیات به واقعیت فیزیکی چندان سرراست و ساده نیست. برای مثال، تلاش‌های فوریه در بسط ترمودینامیک به‌جای طرح مسئله درمورد ماهیت گرما و ارائهٔ نظریه‌ای دربارهٔ ساختار آن جست‌وجوی معادلهٔ دیفرانسیلی برای انتقال گرما براساس توزیع دما بود. او برای جریان گرما معادله‌ای پیش‌نهاد کرد مشابه معادلهٔ پیوستگی که اویلر برای سیال در مکانیک به‌دست آورده بود. اما این معادلهٔ دینامیکی گرما، چنان‌که گفته شد، کاری با ماهیت گرما نداشت. «نظریهٔ کالریک» به ساختار گرما می‌پرداخت و گرما را سیالی فرض می‌کرد از ذراتی به‌نام «کالریک». این نظریه سؤالاتی ایجاد می‌کرد، مانند این‌که اگر گرما نوعی سیال است آیا سرما هم نوع دیگری از سیال است، یا این‌که سرما فقدان کالری است؟ درمقابلِ نظریهٔ کالری نظریهٔ جنبشی گرما بود که گرما را حرکت میکروسکوپی اتم‌ها و مولکول‌ها می‌دانست که با کارهای رامفورد، ژول، تامسون، و ماکسول به این دیدگاه انجامید که گرما نوعی انرژی است.[۲] مطابق نظریهٔ اخیر، سرما چیزی نیست جز درجات آزادی پایین برای حرکت ذرات.

به این ترتیب، پاسخ به مسئله‌ای بنیادی در هستی‌شناختی می‌تواند با طرح مسائلی جدید برنامهٔ پژوهشی جدیدی در فیزیک ایجاد کند.

نکته‌ای که در مثال فوق باید در نظر داشت این است که دو نظریهٔ رقیب گرما را در مقولات ازقبل موجود قرار دادند: گرما و حرکت. اما در برخی موارد با وضعیتی مواجه می‌شویم که برای حل مسائل پیش‌رو نیازمند مقولات و مفاهیم جدیدی هستیم؛ برای مثال، نظریهٔ الکترومغناطیس به معرفی مفهوم میدان و نظریه‌ای دربارهٔ میدان انجامید. فارادی برای توضیح پدیده‌های الکتریکی و مغناطیسی خطوطی در فضای اطراف اجسام باردار یا مغناطیزه در نظر می‌گرفت که به‌اعتقاد او نمایش نیروهای الکتریکی یا مغناطیسی بود. او دربرابر این پرسش که «آیا فضای اطراف این اجسام شامل موجود فیزیکی است یا خیر؟» معتقد بود که محمل یا محیط حامل این خطوط را باید واقعی در نظر گرفت، نه صرفاً ریاضیاتی. او هم‌چنین آن‌ها را با خطوط نیروی گرانشی مقایسه کرد که از سوی خورشید به زمین ساطع و باعث گرمادهی می‌شوند.

در این‌جا نیز با فرض این‌که خطوط نیروی الکتریکی یا مغناطیسی فراتر از موجودی ریاضیاتی واقعیت فیزیکی نیز دارند مسائل جدیدی قابل‌طرح است: آیا این خطوط چیزی مانند اتر الکترومغناطیسی است که در دسته‌بندی ماده قرار می‌گیرد؟ آیا این خطوط مسیر برخی ذرات است؟ آیا این خطوط ناحیه‌ای است که زنجیره‌ای از مولکول‌های قطبی در آن ناحیه به‌خط شده‌اند؟ یا اصلاً چیز دیگری است؟

درست مشابه حالتی که جزئیات معادلهٔ فوریه برای گرما نمی‌تواند طبیعت بنیادی آن را مشخص کند، در این‌جا هم معادلاتی که میدان الکترومغناطیسی را توصیف می‌کند نمی‌تواند طبیعت بنیادی آن را مشخص کند، بلکه هر پیش‌نهادی به مجموعه‌ای مجزا از سؤالات بیش‌تر و آزمایش‌های بعدی می‌انجامد. مثلاً اگر خطوط نیرو را مسیرهای ذرات در نظر بگیریم، می‌توان پرسید جرم و سرعت آن‌ها چه‌قدر است؟ اگر خطوط نیرو را به‌خط‌شدن مولکول‌های دوقطبی تلقی کنیم، این پرسش پیش می‌آید که قدرت قطبیدگی آن‌ها چه‌قدر است؟ اگر اتری هست، می‌شود پرسید خواص مکانیکی آن چیست؟ هریک از این پرسش‌ها برنامه‌های پژوهشی جدیدی ایجاد می‌کند که تلاش برای پاسخ به آن‌ها ممکن است به نظریه‌ای جدید بینجامد.

مثال خطوط نیروی الکترومغناطیسی نتیجهٔ آموزنده‌ای دارد. پیش‌نهادهای داده‌شده برای این خطوط در دسته‌بندی مقوله‌های فیزیکی ازقبل موجود قرار می‌گیرند، درحالی‌که درپایان، طبیعت این خطوط با واردکردن نوع جدیدی از هستومند فیزیکی تعیین شد: میدان.

معرفی میدان به طرح این مسئله می‌انجامد که برای میدان چه نظریهٔ هستی‌شناسانه‌ای می‌توان ارائه داد؟ یعنی، میدان در چه نوع یا دسته‌ای از موجودات (being) قرار می‌گیرد؟

امروزه ما با مفهوم میدان آشناییم و صریحاً پاسخ می‌دهیم که ضرورتی ندارد میدان الکترومغناطیسی در طرح هستی‌شناختی ازقبل موجودی قرار بگیرد و این قدم اول برای شناخت و فهم میدان الکترومغناطیسی و خطوط فارادی است. مفهوم میدان را به‌شیوه‌های گوناگونی می‌توان فهمید. در قدم اول، با نمایش ریاضی میدان شروع می‌کنیم. نمایش ریاضی می‌تواند شکل‌های مختلفی به‌خود بگیرد: یک جفت از میدان‌های برداری؛ یک تانسور منفرد؛ یا مانند فارادی، مجموعه‌ای از خطوط در فضا.

مستقیماً نمی‌توان ویژگی‌های فیزیکی هستومند فیزیکی را از نمایش ریاضیاتی نتیجه گرفت. مثلاً فارادی نمی‌گفت خطوط ریاضیاتی که نیوتن برای نمایش نیروی گرانشی بین اجسام استفاده می‌کرد نمایش خطوط فیزیکی یا مستقل نیرو است، بلکه تنها خطوط ایدئالی‌اند که جهت خروج نیرو را نمایش می‌دهند.

بنابراین، می‌توان گفت فارادی شکاف میان استفاده از موجود ریاضیاتی در نظریه و وجود هستومند فیزیکی را (که به‌طریقی با آن موجود ریاضیاتی مطابقت دارد) تشخیص داد و به این نتیجه رسید که تنها در شرایطی خاص می‌توان از نمایش ریاضیاتی فراتر رفت و وجود هستومندی فیزیکی را در هستی‌شناسی فرض کرد. باتوجه‌به آن‌چه گفته شد، ایده یا مفهوم فیزیکی ممکن است نمایش‌های ریاضی مختلف داشته باشد و این‌طور نیست که همهٔ این نمایش‌ها را بتوان متناظر با واقعیت دانست، زیرا هستی‌شناسی‌های متفاوتی را نتیجه می‌دهند که با هم قابل‌جمع نیستند. بنابراین، در این زمینه باید محتاط بود. هم‌چنین از یک فرمالیسم ریاضی ممکن است تعابیر هستی‌شناسانهٔ متفاوتی ارائه شود؛ نمی‌توان الزاماً از آن تعبیر خاصی کرد.

ما از ریاضیات به‌مثابهٔ ابزاری برای نمایش و صورت‌بندی نظریه‌ها استفاده می‌کنیم؛ به‌عبارتی ریاضیات در این‌جا به‌مثابهٔ فناوری به‌کار گرفته می‌شود، فناوری‌ای برای بازنمایی نظریه. این کارکرد ریاضیات سرراست نیست و ممکن است انواع ابزارهای ریاضی را بتوان برای نمایش به‌کار گرفت. ارزیابی این‌که کدام‌یک ابزار مناسب‌تری است تا بتوان از آن صورت‌بندی و نمایش نتایجی را برای واقعیت فیزیکی استخراج کرد نیازمند سعی و خطاست. همان‌طورکه لاکاتوش در اثر خود، *اثبات و ابطال‌ها*، توضیح می‌دهد، بین صورت‌بندی صوری و ریاضیاتیِ از مفاهیم غیرصوری رابطه‌ای دوسویه برقرار است. این رابطهٔ دوسویه یا تعامل دیالکتیکی نشان می‌دهد که رابطهٔ نمایش ریاضیاتی نظریه و واقعیت

سرراست نیست و انتخاب صورت‌بندی مناسب برای نظریه و استنتاج واقعیت فیزیکی در فرایند حدس و ابطال و اصلاح صورت می‌گیرد. برای مثال، به‌طور متعارف فضای اقلیدسی سه‌بعدی فضایی هندسی است و R^3 (مجموعهٔ سه‌تایی‌های مرتب) نیز فضایی استعاری است. درست است که دومی را می‌توان به‌مثابهٔ نمایش ریاضی اولی به‌کار برد، اما کسی نمی‌تواند بگوید فضای واقعی‌ای که در آن زندگی می‌کنیم شامل سه‌تای‌هایی از اعداد حقیقی است (Maudlin 2014: 8).

۳. نسبت هستی‌شناسی و نمایش ریاضی در نظریهٔ کوانتوم

در نظریهٔ کوانتوم نیز باید این آموزهٔ روش‌شناختی را به‌کار بست و بین نمایش ریاضیاتی و هستومند فیزیکی تمایز قائل شد. همان‌طورکه فارادی میان خطوط فیزیکی و خطوط ایدئال صرفاً ریاضیاتی تمایز قائل شد و از این طریق نتایج هستی‌شناختی گرفت، در نظریهٔ کوانتوم نیز باید این تمایز را میان هستومندهای فیزیکی و ریاضیاتی محترم داشت؛ زیرا ریاضیات صرفاً ابزاری برای نمایش و توصیف واقعیت فیزیکی است، نه خود آن.

درمورد «شأن هستی‌شناختی تابع موج» نیز این نکته حائز اهمیت است که تابع موج در وهلهٔ اول «تابع» است و «تابع» موجودی ریاضیاتی که در فرمالیسم ریاضی مکانیک کوانتوم غیرنسبیتی وجود دارد، روی فضای پیکربندی تعریف می‌شود، و دامنهٔ آن اعداد مختلط است. دینامیک نظریهٔ کوانتوم، یعنی معادلهٔ شرودینگر، توصیفی است از تحول چنین موجود ریاضیاتی‌ای. به این ترتیب، اگر تابع موج موجودی ریاضیاتی باشد، سؤال از شأن هستی‌شناختی آن فی‌نفسه و لزوماً ربطی به واقعیت فیزیکی ندارد. برای ایجاد ارتباط با واقعیت فیزیکی با این مسئلهٔ اصلی روبه‌روییم که این موجود ریاضی در تناظر یا تطابق با چه هستومند فیزیکی‌ای است و این تطابق را باید چگونه تفسیر کرد؟

باید به این نکته توجه کرد که در مقولات هستی‌شناسانهٔ معمول هستومندی متناظر با تابع موج سراغ نداریم. به همین دلیل، اغلب اوقات تعبیر «تابع موج سیستم» را به‌کار می‌بریم که گمراه‌کننده است. در این مقاله به‌اقتفای مادلین از لفظ «حالت کوانتومی» (quantum state) برای ارجاع به این هستومند فیزیکی استفاده می‌کنیم. مسئله این است که شأن هستی‌شناختی این «حالت کوانتومی» را روشن کنیم. باتوجه‌به این‌که تابع موجْ نمایش ریاضیاتیِ «حالت کوانتومی» است، یکی از اصلی‌ترین مسائل پیش‌رِو مشخص‌کردن نوع این نمایش است.

ساده‌ترین حالت ممکن برای این نمایش رابطهٔ یک‌به‌یک (one to one relation) است، به این معنا که هر عنصر ریاضی یک امکان فیزیکی مشخص و منحصربه‌فرد را نمایش دهد. به‌عبارت‌دیگر، هر امکان فیزیکی دقیقاً با یک موجود ریاضیاتی نمایش داده می‌شود (Maudlin 2013: 129). آلبرت در مقالهٔ «متافیزیک بنیادی کوانتوم» همین رویکرد را در پیش می‌گیرد. او متناظر با هر نمایش ریاضیاتیْ واقعیتی فیزیکی در نظر می‌گیرد، و درنتیجه، تابع موج را نمایش نوعی میدان به‌شمار می‌آورد. ازآن‌جاکه هر میدان را در جهانی که میدان در آن وجود دارد می‌توان با دو عدد (یکی دامنه و دیگری فاز) مشخص کرد، پس به‌اعتقاد آلبرت می‌توان گفت هر تابع موجی با دامنه و فازی در فضای پیکربندی مشخص می‌شود. درواقع، ادعای او این است که مقادیر دامنه و فاز خصوصیت ذاتی نقاطی در فضای پیکربندی‌اند و این‌که انتگرال توان دوم دامنهٔ تابع موج روی کل فضای پیکربندی یک می‌شود قانونی فیزیکی یا شرط اولیه است (Albert 1996: 278). قبلاً بل به ایدهٔ واقعیت تابع موج اشاره کرده بود و درعین‌حال تذکر داده بود که اگر تابع موج را صرفاً دامنهٔ احتمال ندانیم و برای آن واقعیتی قائل شویم باید توجه کنیم که این موجود (میدان) نه در فضای سه‌بعدی، بلکه در فضای ۳Nبعدی منتشر می‌شود (Bell 1987: 128-204).

اما چنین ایده‌ای (یعنی فرض وجود چنین رابطهٔ یک‌به‌یکی بین فرمالیسم و واقعیت فیزیکی) نتیجه‌اش این است که هر تفاوتی در نمایش ریاضیاتی به‌معنای تفاوت در اعداد مختلط منتسب به آن نقطه در فضای پیکربندی تلقی شود که ناگزیر به‌معنای تفاوت در خواص فیزیکی ذاتی آن نقطه است. بااین‌وصف، باید بپذیریم که متناظر با همهٔ این اعداد مختلطِ متفاوت حالت‌های کوانتومی مجزای فراوانی وجود داشته باشد، درحالی‌که چنین چیزی در مکانیک کوانتوم استاندارد که حالت کوانتومی با برداری در فضای هیلبرت نمایش داده می‌شود قابل‌قبول نیست (Maudlin 2013: 12)، زیرا اگر رویکرد آلبرت را بپذیریم، نتیجه‌اش این است که برای مثال، اگر به فاز تابع موج ریاضیاتی مقداری ثابت اضافه کنیم، این تغییر ریاضیاتی به‌معنایِ پیدایش حالت کوانتومی جدیدی باشد، درحالی‌که براساس مکانیک کوانتوم استاندارد این نمایش ریاضیاتی جدید متناظر با همان تابع حالت قبلی است و حالت کوانتومی جدیدی را مشخص نمی‌کند. به‌عبارتی، آلبرت متناظر با هر تغییر فازی در نمایش ریاضیاتی درجات آزادیِ فیزیکیِ مشاهده‌ناپذیرِ جدیدی در نظر می‌گیرد. او (Albert 1996: 278) هم‌چنین این واقعیت را که انتگرال مربع دامنهٔ تابع موج جهانی (یعنی تابع موجی که روی فضای پیکربندی تعریف می‌شود) بر روی کل فضای پیکربندی برابر یک است قانون فیزیکی یا شرط اولیه محسوب می‌کند. به این ترتیب او نه‌تنها فاز، بلکه

قدرمطلق دامنهٔ تابع موج را متناظر با عنصری از واقعیت فیزیکیِ حالت کوانتومی می‌داند. به‌عبارتی، اصل فیزیکی جدیدی را فرض می‌کند، درحالی‌که در چهارچوب استاندارد تنها از برای بردارهای بهنجار (normalized) استفاده می‌شود.

علاوه‌براین‌ها، بحث‌برانگیزترین مسئله‌ای که آلبرت بیان می‌کند این است که او فضای ریاضیاتی را که تابع موج در آن تعریف شده است نمایش فضای فیزیکی بنیادی می‌داند، به این معنی که این نمایش ریاضیاتی دقیقاً نمایش فضای فیزیکی با ابعاد بالاست و به‌زعم او فضا ـ زمان با ابعاد پایین که در زندگی روزمره از آن صحبت می‌کنیم «توهم» است (ibid.: 277). شاید واقعیت‌های کوانتومی مانند درهم‌تنیدگی و جدایی‌ناپذیری را بتوان به‌نوعی مقوم چنین رویکردی دانست، زیرا در این واقعیت‌ها خواص فیزیکی Nذرهٔ درهم‌تنیده را نمی‌توان جمع خواص Nزیرسیستم در فضای سه‌بعدی در نظر گرفت؛ بااین‌حال، در این‌جا با این مسئله (که آن را «مسئلهٔ ادراک» نامیده‌اند) مواجه می‌شویم که این «توهم» چگونه ایجاد می‌شود؟ یک پیش‌نهاد این بوده است که این توهم را نوعی تصویر سه‌بعدی از تابع موج در فضای Nبعدی تلقی کنیم (Lewis 2004: 717-719)؛ اما پیش‌نهاد خوبی به‌نظر نمی‌رسد، زیرا با این مشکل مواجه است که این تصویر مستلزم وجود مختصات ارجحی است که تصویر به‌دست دهد (Gao 2017: 72).

پیش‌نهاد بعدی (که خود آلبرت ارائه داده است) این است که زبان معمول چندذره‌ای در فضای سه‌بعدی به‌نحوی مبتنی‌بر زبان بنیادی فضای پیکربندی فیزیکی و واقعی است و می‌توان با استفاده از دینامیک نظریهٔ کوانتوم توضیح داد که باوجوداین‌که فضای فیزیکی واقعی فضای پیکربندی است، چگونه ما به غلط تصور می‌کنیم فضایی سه‌بعدی است. می‌توان توضیح او را به این شکل خلاصه کرد: فرض کنید یک تک‌ذرهٔ جهانی در فضای پیکربندی کلاسیک Nبعدی شناور است. این ذرهٔ جهانی با هامیلتونی آزاد هدایت می‌شود که مسیر آن خط مستقیم در فضای پیکربندی است و سرعت حرکت آن نیز ثابت است. به‌اعتقاد آلبرت توهم فضایی با ابعاد پایین احتمالاً باید برای ما ناشی از وجود چیزی غیر از هامیلتونی آزاد باشد؛ یعنی مؤلفهٔ برهم‌کنشی اضافه در هامیلتونی است که به‌صورت انرژی پتانسیل وابسته به مختصهٔ مکانی در هامیلتونی ذره ظاهر می‌شود. این مؤلفهٔ اضافه می‌تواند نقش فیزیکی معناداری ایفا کند. وجود این مؤلفهٔ اضافی در هامیلتونی باعث می‌شود فضای فیزیکی سه‌بعدی به‌نظر برسد (Albert 1996: 28). او تلاش می‌کند که این هامیلتونی را تعیین کند و آن‌چه در تعیین این هامیلتونی برای او مهم است این است که بتوان نمود دنیای سه‌بعدی معمولی را از آن استخراج کرد. درواقع، از نظر آلبرت اگر ساکنان فضای پیکربندی

امور را از خیلی نزدیک مشاهده نکنند، آن‌ها را کلاسیک می‌بینند، زیرا در تقریب‌های روزمره تحول تابع موج در فضای پیکربندی در مکانیک کوانتوم با تحول یک نقطه در فضای پیکربندی کلاسیک مطابقت دارد. بنابراین، بااین‌که تابع موج واقعیت دارد و جهانْ ۳Nبعدی است، بر ما به‌صورت سه‌بعدی ظاهر می‌شود.

اما راه‌حل آلبرت، چنان‌که لوئیس می‌گوید، نه ممکن است و نه لازم (Lewis 2004). از این جهت ممکن نیست که قوانین دینامیکی در فضای پیکربندی ۳Nبعدی ناوردا نیستند، درحالی‌که تحت تبدیلات مختصات فضای سه‌بعدی ناوردایند. این نشان می‌دهد که فضای پیکربندی ساختاری سه‌بعدی دارد. به‌عبارت‌دیگر، گرچه تابع موج تابعی است با ۳N پارامتر مستقل، ولی این ویژگی‌های تبدیلی که ذکر آن رفت مستلزم این است که این پارامترها تنها به سه جهت مختلف فضایی ارجاع دهند. پس، در فضای سه‌بعدی هامیلتونی با هر مختصاتی یک شکل دارد و بنابراین انتخابی وجود ندارد که بگوییم یکی ساده‌تر است. راه‌حل آلبرت ضروری و لازم هم نیست، زیرا این نتیجه که مختصات سه‌تایی دسته‌بندی شوند به‌صورت طبیعی در ساختار فضای پیکربندی تعبیه شده است و نیاز نیست بگوییم که سه‌بعدی‌دیدن محصول فرایندی است مبتنی‌بر سادگی دینامیکی.

مسئلهٔ دیگر واقعی‌دانستن فضای پیکربندی ۳Nبعدی این است که این فضا ظرفیت لازم برای نمایش ویژگی‌هایی مانند بار و جرم را به‌نحوی متمایز برای ذرات سیستم چندذره‌ای ندارد. اگر سیستم فیزیکی مدنظر ما شامل دو ذره باشد به جرم‌های m_1 و m_2، نمایش این سیستم دوذره‌ای در فضای پیکربندی شش‌بعدی یک نقطه است. در فضای سهبعدی این دو ذره با دو نقطهٔ مجزا نمایش داده می‌شوند و نسبت‌دادن جرم m_1 و m_2 به آن‌ها مشکلی ایجاد نمی‌کند، درحالی‌که در فضای شش‌بعدی نمی‌توانیم مستقیماً به یک نقطه دو جرم نسبت دهیم. این نشان می‌دهد که این فضای انتزاعی را نمی‌توان واقعی در نظر گرفت؛ مگر این‌که بگوییم هر گروه‌بندی سه‌تایی آن متناظر با نمایش ذره در فضای سه‌بعدی معمول است (Gao 2017: 76-77).

مسئلهٔ دیگری که با واقعی‌دانستن تابع موج یا حالت کوانتومی با آن دست‌به‌گریبان می‌شویم نحوهٔ ارتباط این موجود با تجربه است. همان‌طورکه مادلین می‌گوید، حالت کوانتومی را نمی‌توان در شمار مشاهده‌پذیرهای اولیهٔ نظریه آورد، زیرا حالت کوانتومی را نمی‌توان مستقیماً مشاهده یا تجربه کرد. آن‌چه مشاهده‌پذیر است چیزی است که با استفاده از نمایش ریاضیِ تحول حالت کوانتومی در فضای پیکربندی پیش‌بینی می‌شود. در مکانیک کلاسیک تحول سیستم با پیکربندی و مشتقات اولیهٔ آن و مجموعه‌ای از مشخصه‌های

فیزیکی دیگری چون جرم و بار مشخص می‌شود که آن‌ها را حالت کلاسیک می‌نامیم. بنابراین، در مکانیک کلاسیک دینامیک سیستم را می‌توان با تابعی در فضای فاز آن سیستم نشان داد. به این ترتیب، اگر حالت کلاسیک را با تابع اسکالری در فضای فاز نمایش دهیم، درآن‌صورت این تابع اسکالر می‌تواند تعیین‌کنندهٔ میدان سرعت در فضای فاز باشد. درواقع، در مکانیک کلاسیک این تابع اسکالر تابع هامیلتونی است: هر تابع هامیلتونی تعریف‌شده بر روی فضای فاز یک سیستم باعث ایجاد میدان برداری هامیلتونی و جریان هامیلتونی می‌شود که تحول سیستم در زمان را نشان می‌دهد. ایدهٔ کلی وجود چنین تابعی قابل‌درک است، اگرچه ممکن است ریاضیات آن پیچیده باشد. تابع هامیلتونی تمام حقایق مربوط به دینامیک سیستم را در خود دارد و مکان و تکانهٔ ذرات را ذخیره می‌کند؛ بنابراین، با مشخص‌کردن مکان و تکانه برای سیستم مسیر آن، که توسط مسیر در فضای فاز نمایش داده می‌شود، مشخص می‌شود.

در مکانیک کوانتوم نیز با درنظرگرفتن پیکربندی در زمان حال، به‌هم‌راه برخی ویژگی‌های فیزیکی دیگر، تحول سیستم معین می‌شود. مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکیِ اضافی میدان برداری را روی فضای پیکربندی مشخص می‌کنند. راحت‌ترین روش برای نشان‌دادن میدان برداری بر روی فضای ریاضیاتی قراردادن میدان اسکالر بر روی فضا و گرفتن گرادیان است. پس ساده‌ترین نمایش ریاضی‌ای که برای حالت کوانتومی می‌توان پیش‌نهاد کرد میدان برداری است که روی فضای پیکربندی تعریف می‌شود؛ چنین میدانی هم معمولاً با گرادیان تابع اسکالر روی آن فضا مشخص می‌شود. بنابراین، اگر «حالت کوانتومی» تنها هستومند فیزیکی‌ای است که تحول پیکربندی سیستم را معین می‌کند می‌توان انتظار داشت که تابع اسکالر روی فضای پیکربندی سیستم بتواند نمایش ریاضیاتی مناسبی برای حالت کوانتومی باشد.

همان‌طورکه در مکانیک کلاسیک، نمایشِ واقعیت فیزیکی سیستم با تابع هامیلتونی روی فضای فاز چیزی دربارهٔ طبیعت متافیزیکی آن واقعیت فیزیکی نمی‌گوید و تنها نسخه‌ای کلی به‌دست می‌دهد که براساس آن، با کمک مکان و تکانه و سایر ویژگی‌های فیزیکی مربوط بتوانیم نحوهٔ تحول سیستم را مشخص کنیم، به همین ترتیب، می‌توان گفت نمایش حالت کوانتومی با میدان اسکالر روی فضای پیکربندی چیزی بیش از این نمی‌گوید که دینامیک نظریه، یعنی معادلهٔ شرودینگر که معادله‌ای درجهٔ اول برحسب زمان است، تنها نمایشی از تحول حالت کوانتومی به‌دست می‌دهد و بس، و دربارهٔ هستی‌شناسی حالت کوانتومی چیزی بیش از این نمی‌گوید. هم‌چنین، از این‌که درجات آزادیِ میدان برداری‌ای

که برای نمایش ریاضیاتی حالت کوانتومی استفاده می‌شود پیمانه‌ای است نمی‌توان نتیجه گرفت که درجات آزادی فیزیکی حالت کوانتومی نیز لزوماً متناظر با آن باشد، زیرا مثلاً روشن است که اگر از تابع اسکالر گرادیان بگیریم تا میدانی برداری به‌دست آید، با اضافه‌کردن یک میدان اسکالر ثابت، میدان برداری تغییری نمی‌کند و چنین افزودنی تنها تغییر پیمانه است.

آن‌چه گفته شد را می‌توان به این شکل جمع‌بندی کرد که فرمالیسم ریاضی می‌تواند راه‌نمایی برای شناخت ساختار فیزیکی باشد، ولی این امری سرراست و ساده نیست، و در این راه‌نمایی‌گرفتن باید محتاط بود؛ زیرا چگونگی استفاده از نمایش ریاضی و قراردادهایی که با استفاده از موجودات جبری و ریاضی برای نمایش هستومندهای فیزیکی به‌کار گرفته می‌شود اهمیت دارد. در نمایش ریاضیاتی ممکن است از قراردادها یا عملیات جبری‌ای استفاده شود که استنتاج مستقیمِ هستی‌شناسانه از آن‌ها برای هستومندی فیزیکی درست نباشد.

۴. نسبت هستی‌شناسی تابع موج و نمایش ریاضی

آن‌چه درمورد نسبت هستی‌شناسی و ریاضیات در مکانیک کوانتوم گفته شد به‌طور مشخص دربارهٔ تابع موج نیز می‌توان گفت. هر تابع موجی با دامنه و فاز در فضای پیکربندی مشخص می‌شود. در نمایش ریاضی تابع موج فاکتور فاز به‌صورت $e^{i\theta}$ است؛ حال اگر فاز تابع موج را با افزودن مقداری ثابت تغییر دهیم، باعث تغییر در نمایش ریاضی تابع موج شده‌ایم و قاعدتاً مطابق دیدگاه آلبرت باید بگوییم که حالت کوانتومی جدیدی را به‌نمایش گذارده‌ایم، درحالی‌که هر مکانیک کوانتوم استانداردی بر این نکته تأکید دارد که این نمایش ریاضیاتی جدید همان تابع حالت قبلی را نمایش می‌دهد. در دیدگاه استاندارد حالت کوانتومی از طریق اپراتورها با پدیده‌های مشاهده‌پذیر و شواهد تجربی پیوند برقرار می‌کند و این پیوند از طریق اندازه‌گیری است. در این طرح، تابع موج به‌هم‌راه اپراتورها برای به‌دست‌آوردن احتمالات نتایج ممکن مختلف اندازه‌گیری استفاده می‌شود و از نظر ریاضی، تغییر فاز کل تابع موج احتمالات را تغییر نمی‌دهد. بنابراین، اگر نتایج قابل‌آزمون تجربی نظریه به‌وسیلهٔ این احتمالات بررسی شود، هر تغییر فیزیکی متناظر با تغییر فاز کلی (اگر اصلاً وجود داشته باشد) کاملاً مشاهده‌ناپذیر است. پس به‌صورت خلاصه و صریح می‌توان گفت: آن‌چه در مکانیک کوانتومی مشاهده‌پذیر یا (دقیق‌تر) قابل‌آزمون تجربی است

احتمالات است و تغییر فاز کلی تابع موج به تغییری در احتمالات قابل‌اندازه‌گیری نمی‌انجامد. بنابراین، درعین‌حال که تغییر فاز کل به‌نوعی تغییر در نمایش ریاضیاتی محسوب می‌شود، ولی درنظرگرفتن حالت جدید کوانتومی ادعایی قابل‌آزمون تجربی نیست. این وضعیت مختص مکانیک کوانتوم استاندارد نیست. در نظریهٔ GRW و مکانیک بوهمی هم تغییر فاز کلیِ (global phase) تابع موجْ به تغییراتی در پیش‌بینی‌های تجربی نمی‌انجامد، بنابراین، از دیدگاه تجربی، تغییرات کلیِ فاکتور فازِ تابع موجْ امکانات فیزیکی متفاوت و درنتیجه حالت‌های کوانتومی متفاوتی نشان نمی‌دهد.

مشاهده‌ناپذیری فاز کلی باعث ایجاد سؤال دیگری می‌شود: اصلاً چرا فاز کلی باید نمایش درجهٔ آزادی فیزیکی واقعی در نظر گرفته شود. درواقع، چنین درجهٔ آزادی فیزیکی مشاهده‌ناپذیری را می‌توان حذف کرد و هستی‌شناسی نظریه را تقلیل داد و درعین‌حال همان نتایج تجربی را حفظ کرد. اما اگر بخواهیم کلاً فاز کلی را حذف کنیم، چگونه این کار را انجام دهیم که نظریهٔ جدید از نظر تجربی با نظریهٔ قدیمی مطابقت داشته باشد؟ برای این کار دو راه‌حل وجود دارد که یکی از آن‌ها سطحی و بدیهی (trivial) است و دیگری عمیق و سخت.

در روش اول اصلاً روی ابزار ریاضی تغییری انجام نمی‌دهیم. می‌دانیم که حالت کوانتومی $|\psi\rangle$ توسط برداری در فضای هیلبرت نمایش داده می‌شود. آن‌چه در این نمایش مهم است جهت بردار است؛ طول بردار اهمیتی ندارد، زیرا اگر بردار را در عدد مختلط اختیاری مانند c ضرب کنیم، حالت نتیجه‌شده همان حالت قبلی اصلی است و درواقع می‌توان گفت که حالت‌های کوانتومی در فضای هیلبرت با جهات (rayes) مشخص می‌شوند، نه بردارها. البته در این روش هنوز حالت‌های کوانتومی با بردارهایی در فضای هیلبرت نمایش داده می‌شوند، اما یک اصل‌موضوع به فرمالیسم ریاضی وارد می‌شود، مبنی‌بر این‌که بردارهای متعلق به یک جهتْ حالت‌های کوانتومی یک‌سانی را نمایش می‌دهند. درحقیقت، در این رویکرد شأن ریاضیات چنان است که تغییری نکند و تنها تعبیر فیزیکیِ (physical significance) آن تغییر می‌کند.

بااین‌حال، اتخاذ این موضع که تمام توابع موجی که جهت یک‌سان دارند در فضای هیلبرت نمایش‌دهندهٔ حالت‌های فیزیکی یک‌سانی‌اند قیودی را به ریاضیات تحمیل می‌کند. به‌خصوص، دینامیک نظریه نیز باید واجد این ویژگی باشد که تابع موج مربوط به جهت بعد از گذشت زمانی مشخص به تابع موجی در جهت مشخص دیگری تحول یابد. اگر این‌طور نباشد، و توابع موجی که جهت یک‌سان دارند به توابع موجی تحول یابند که

مربوط به جهت‌های مختلفی باشند، دراین‌صورت دیگر حالات فیزیکی‌ای نمی‌توان به آن جهات نسبت داد. خطی‌بودن دینامیک (معادلهٔ شرودینگر) که به‌جای جهت برحسب بردار بیان می‌شود این خصوصیت را تضمین می‌کند.

بنابراین، یک شرط ضروری داریم مبنی‌بر این‌که برخی ویژگی‌های نمایش ریاضی صرفاً درجهٔ آزادی پیمانه‌ای‌اند و متناظر با هیچ ویژگی فیزیکی‌ای نیستند. اگر می‌شد این شرط لازم را به‌صورت شرط کافی نیز داشته باشیم، آن‌گاه می‌شد با تحلیل ریاضیاتی محض بین درجات آزادی پیمانه‌ای و ساختارهای ریاضیاتی که نمایش ویژگی‌های فیزیکی واقعی‌اند تمایز گذاشت. اما مسئله به این سادگی نیست، چون ممکن است فضای حالت ریاضی را به کلاس‌های هم‌ارزی دسته‌بندی کرد که هر عضو یک کلاس هم‌ارزی با دینامیکی تحول یابد که عضوی از کلاس هم‌ارزی دیگری شود. این درحالی است که اعضای هریک از کلاس‌های هم‌ارزیْ امکان‌های فیزیکی متفاوتی را نمایش می‌دهند. این کار را هم نمی‌خواهیم بکنیم که همهٔ فضای ریاضی را متعلق به یک کلاس هم‌ارزی تلقی کنیم. درست است که دراین‌صورت شرط لازم احراز می‌شود، ولی نمی‌خواهیم به این نتیجه منتهی شود که فقط یک حالت فیزیکی ممکن وجود دارد. ما مجدداً به موضوع تمایز درنظرگرفتن بین آن قسمت از ریاضیات که نمایش ویژگی‌های فیزیکی است و قسمتی که نیست بازمی‌گردیم.

همان‌طورکه گفتیم، روش دوم بنیادی‌تر، ولی دشوارتر است. فرض کنید به هر دلیلی تصمیم بگیریم برخی ویژگی‌های ریاضی را که صرفاً پیمانه‌ای‌اند نیز به‌حساب آوریم. دراین‌صورت، نتیجه می‌شود که موجودات ریاضیِ مجزای فراوانی وضعیت فیزیکی یک‌سانی را نمایش دهند. آن‌چه روش دوم در این وضعیت پیش‌نهاد می‌دهد این است که ریاضیات را تغییر دهید. به‌جای استفاده از بردارها در فضای هیلبرت به‌عنوان نمایش ریاضیاتی حالت کوانتومی و دسته‌بندی آن‌ها به کلاس‌های هم‌ارزی که متناظر با وضعیت فیزیکی یک‌سانی است، چرا فرمالیسم ریاضی را مستقیماً و از همان ابتدا برحسب مجموعهٔ متمایزی از موجودات ریاضی متناظر با خود کلاس‌های هم‌ارزی صورت‌بندی نکنیم؟ نتیجهٔ چنین اصلاحی از ریاضیات کنارگذاشتن مشخصهٔ ساختاری فضای هیلبرت است. به‌ویژه، ازآن‌جاکه فضای هیلبرت فضای برداری مختلط است، هر برداری را می‌توان در عدد مختلطی ضرب کرد یا یک جفت‌بردار را می‌توان با هم جمع کرد تا به بردار جدیدی برسیم. اما فضای هیلبرت پروجکتیو (projective hilbert space) اصلاً فضای برداری نیست. برای مثال در فضای هیلبرت پروجکتیو بی‌معناست که بپرسیم مجموع دو عنصر از این فضا چیست؟

حال نگاه جزئی‌تری به این مسئله می‌اندازیم. ساده‌ترین حالت ممکن، یعنی حالت اسپین ذره‌ای با اسپین $1/2$، را در نظر می‌گیریم. برای نمایش حالت‌های ممکن اسپین در فضای هیلبرت استاندارد از ماتریس‌های مختلط $\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$ استفاده می‌شود که در آن a و b اعداد مختلط‌اند. جهات سه‌گانهٔ عمودبرهم در فضا را انتخاب می‌کنیم و آن‌ها را جهات x ، y، و z می‌نامیم. با انتخاب محورها می‌توانیم دستگاه اشترن گرلاخی را بسازیم که در جهت z جهت‌دار است. دراین‌صورت، حالت کوانتومی "$z-up$" حالتی از اسپین است که در آن ذره‌ای با اسپین $1/2$ آماده شده است که اگر از دستگاه اشترن گرلاخ عبور کند، در جهت z مثبت منحرف شود (Maudlin 2013: 132-134).

با این تعریف نمی‌توان به‌سادگی از وجود حالت کوانتومی صحبت کرد. این‌که «آیا می‌توان ذرات با اسپین $1/2$ را طوری آرایش داد تا به دستگاه اشترن گرلاخ به این صورت پاسخ دهند؟» سؤال بازی است. آن‌چه تعیین کنندهٔ جواب این سؤال است آزمایش است، چراکه ما قادر به آماده‌کردن باریکه‌ای با آرایش مربوطه‌ایم. پس در این مورد وجود چنین حالت‌هایی به‌صورت آزمایشگاهی معین می‌شود (ibid.: 132-133).

ازطرف‌دیگر، یک‌تایی این حالت‌های اسپینی هم موضوع متفاوتی است. آیا تنها یک حالت فیزیکی اسپین است که باعث انحراف در جهت به‌خصوصی می‌شود، یا ممکن است تعداد بیش‌تری باشد؟ پیش‌نهاد آلبرت برای فهم متافیزیک حالت کوانتومی (که از ریاضیات استاندارد شروع می‌کند تا واقعیت‌های آزمایشگاهی) این است که بی‌نهایت حالت کوانتومی ممکن وجود دارد که این وضعیت‌ها را ایجاد می‌کند. تفاوت این حالت‌ها نتیجهٔ تفاوت در فاز کلی تابع موج خواهد بود؛ اما ازآن‌جاکه این تفاوت‌های فیزیکی فرض‌شده هیچ رفتار مشاهده‌پذیر متفاوتی ایجاد نمی‌کنند، فرض استاندارد بر این است که هریک از این حالت‌های اسپینی یک‌سان است؛ برای مثال، تنها یک حالت "$z-up$" به‌صورتی‌که تعریف کردیم وجود دارد؛ اگر بپذیریم که فاز کلی نمایش ریاضی حالات کوانتومی معنای فیزیکی ندارد، دراین‌صورت، انتخاب ماتریس $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ برای نمایش $[z-up]$اختیاری است. به همین ترتیب می‌توانیم بگوییم:

$$[z-up]=\begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix}\ \ [z-down]=\begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix}\ [x-up]=\tfrac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix}1\\1\end{bmatrix}\ \ [x-down]=\tfrac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix}1\\-1\end{bmatrix}$$

$$[y-up]=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix}1\\ i\end{bmatrix}\ [y-down]=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix}1\\ -i\end{bmatrix}$$

هرکدام از این جفت‌بردارها پایه‌های متعامد برای فضای برداری ماتریس‌های مختلط 2×1 را تشکیل می‌دهند.

برای مثال، یک ماتریس اختیاری $\begin{bmatrix}a\\ b\end{bmatrix}$ را می‌توان به‌صورت $a\begin{bmatrix}1\\ 0\end{bmatrix}+b\begin{bmatrix}0\\ 1\end{bmatrix}$ نوشت، حتی به این صورت:

$$[x-up]=\frac{1}{\sqrt{2}}[z-up]+\frac{1}{\sqrt{2}}[z-down]$$

در این‌جا می‌بینیم که نمایش ریاضیاتی حالت $[x-up]$ را می‌توان به‌صورت برهم‌نهی نمایش ریاضیاتی دو حالت اسپینی دیگر نوشت. بااین‌حال، می‌دانیم که عمل فیزیکی متناظری برای جمع خود حالت‌ها وجود ندارد. به‌طور خلاصه می‌توان گفت: اگرچه عمل خوش‌تعریفی برای جمع نمایش ریاضیاتی حالت‌های کوانتومی و ضرب آن‌ها با اعداد مختلط وجود دارد، هیچ عمل فیزیکی متناظری برای «جمع» خود حالت‌ها وجود ندارد؛ بنابراین، برخلاف نمایش‌های ریاضیاتی که فضای برداری تشکیل می‌دهند، خود حالت‌های فیزیکی نمایش‌داده‌شده فضای برداری تشکیل نمی‌دهند.

این وضعیت که خود حالت‌های کوانتومی (برخلاف نمایش ریاضیاتی‌شان) فضای برداری و به‌طریق اولی فضای هیلبرت تشکیل نمی‌دهند اهمیت چندانی ندارد، زیرا در مکانیک کلاسیک هم حالت‌های فیزیکیِ سیستم‌ها فضای برداری تشکیل نمی‌دهند. آن‌چه مهم است و شلینگ (Schiliing) و آشتکار (Ashtekar) هم تأکید کرده‌اند ساختار خطی فضای هیلبرت است که نقشی حیاتی در نمایش استاندارد نظریهٔ کوانتومی بازی می‌کند. درواقع، نمی‌توان بدون ارجاع به خطی‌بودن فضای هیلبرت مکانیک کوانتوم را صورت‌بندی کرد. اما باید به این مسئله دقت کرد که اگرچه بردارها می‌توانند در فضای هیلبرت مختلط جمع شوند، یا اعداد مختلط را می‌توان در آن‌ها ضرب کرد، جهت‌ها این ویژگی را ندارند. بنابراین، اگر در نظریهٔ کوانتومی به‌جای فضای هیلبرت با فضای هیلبرت پروجکتیو کار کنیم، پیش‌نهادهای هستی‌شناختی آلبرت درمورد حالت کوانتومی بی‌معنا می‌شود. برای اکثر فیزیک‌دانان اهمیتی ندارد که آیا در فضای هیلبرت کار می‌کنیم یا در فضای هیلبرت پروجکتیو، زیرا وضوح هستی‌شناسانه برای آن‌ها اهمیت چندانی ندارد. اما اگر هستی‌شناسی و وضوح آن برای ما اهمیت داشته باشد باید به این مسئله که از چه ریاضیاتی استفاده می‌کنیم و این‌که آیا جای‌گزینی برای آن وجود دارد یا خیر حساس‌تر باشیم.

راه‌نمای ما برای انتخاب ریاضیاتی که هستی‌شناسی آن شفاف باشد معرفتی است: قبول فضای هیلبرت، آن‌طورکه آلبرت توضیح می‌دهد، ما را به وجود فیزیکیِ درجات آزادی ریاضیاتی متعهد می‌کند که صرفاً پیمانه‌ای است و دردست‌رس تجربه هم نیست؛ پس دلیلی وجود ندارد که این درجات آزادی را فیزیکی در نظر بگیریم و به خود حالت نسبت دهیم. مثلاً اگر از تابعِ اسکالرْ گرادیان ساده گرفته شود تا میدان برداری به‌دست آید که برای نمایش ریاضی حالت کوانتومی استفاده می‌شود، با اضافه‌کردن میدانِ اسکالر ثابت میدان برداری تغییری نخواهد کرد و چنین جملهٔ اضافه‌ای تنها نوعی تغییر پیمانه است. ازآن‌جاکه روشی که میدان برداری در مکانیک بوهمی از نمایش ریاضیاتی حالت کوانتومی استخراج شده بسیار پیچیده‌تر است، در این‌جا استفاده از درجات آزادی پیمانه‌ای در ریاضیات بسیار گسترده است. اگر سیستم فیزیکی دارای حالت ψ باشد معادلهٔ راه‌نما به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{dQ_j}{dt} = \frac{\hbar}{m_j} Im \frac{\psi^* \nabla_j \psi}{\psi^* \psi}(Q_1, \dots, Q_N)$$

واضح است که ضرب حالت کوانتومی ϕ در یک ثابت $\frac{dQ_j}{dt}$ را تغییر نخواهد داد، بنابراین هم فاز کلی و هم مقیاس کلی ϕ درجات آزادی پیمانه‌ای‌اند. برخلاف ادعای آلبرت که استفاده از توابع موج نرمالیزه نشان‌دهندهٔ قانون فیزیکی یا شرط اولیهٔ به‌خصوص است، می‌بینیم که تغییر مقیاس دامنهٔ تابع موج تفاوت فیزیکی روی هستی‌شناسی اولیه و مشاهده‌پذیرهای اولیه ایجاد نمی‌کند. بنابراین، هیچ دلیل تجربی‌ای نداریم برای این‌که فکر کنیم فاز کلی و مقیاس تابع موج مطابق واقعیت فیزیکی است (ibid.: 149).

۵. نتیجه‌گیری

مشاهده‌ناپذیری تجربی ثابت نمی‌کند که چیزی واقعیت فیزیکی ندارد؛ بااین‌حال از نظر روش‌شناختی هرچه فرضیات و حدس‌های نظری ما از نظر تجربی نقدپذیرتر باشد، بهتر است. اگر بتوان بدون آسیب به شأن تبیینی و نتایج تجربی نظریه هستی‌شناسی متورم را تقلیل داد قاعدتاً بهتر است. درمورد فاز کلی تابع موج دیدیم که درنظرگرفتن نقدپذیری تجربیِ آن‌چه نمایش ریاضی به آن ارجاع دارد نقش مهمی در توصیف واقعیت حالت فیزیکی بازی می‌کند. بی‌تردید، شأن راه‌نمونی و پیش‌نهاددهندگی نمایش ریاضی برای هستی‌شناسی و متافیزیک مهم است، اما احتیاط و حساسیت درمورد این‌که کدام

ویژگی‌های پیش‌نهادشده را باید برای سیستم واقعی دانست لازم است، وگرنه استنتاج مستقیم و سرراست هستی‌شناسی از نمایش ریاضی می‌تواند به هستی‌شناسی‌ای متورم و غیرضروری بینجامد که ارزیابی تجربی آن ممکن نیست.

گویا آلبرت (۱۹۹۶) معتقد است که می‌توان ساختار متافیزیکی را مستقیماً و به‌صورتی سرراست و شفاف از نمایش ریاضیاتی حالت کوانتومی نتیجه گرفت. اما هزینه‌ای که با این توصیه باید بپردازیم این است که برای فضای پیکربندی واقعیتی در هستی‌شناسی فیزیکی قائل شویم و برای درجات آزادی صرفاً ریاضی که مستقیماً قابل‌ارزیابی تجربی نیست اهمیت فیزیکی قائل شویم. آلبرت فرمالیسم ریاضی را قبول می‌کند و هستی‌شناسی‌ای می‌سازد که بازتاب این فرمالیسم ریاضی باشد. اما او تحلیلی از این‌که این فرمالیسم از کجا آمده است ارائه نمی‌کند. اگر این کار را می‌کرد شاید مشخص می‌شد که کدام ویژگی ریاضیاتی باید جدی گرفته شود. او فضایی فیزیکی با ساختار هندسی ایزومورفیک، فضای پیکربندی، و یک دسته خواص فیزیکی ایزومورفیک با دامنه و فاز تابع موج فرض می‌گیرد. اما اگر به این مسئله دقت کنیم که فرمالیسم ریاضی از کجا آمده و هم‌چنین بخش‌هایی از آن به این دلیل توسعه یافته است که برای آزمودن رفتار مشاهده‌پذیرهای نظریه استفاده شود، دیگر عجولانه یک ساختار فیزیکی را از فرمالیسم ریاضی نتیجه نمی‌گیریم.

نکتهٔ اصلی که باید در ذهن داشت این است که ریاضیاتی که نظریه بر آن بنا شده است برای فهم هستی‌شناسی نظریه کافی نیست، زیرا روش‌های مختلفی برای ساخت فرمالیسم ریاضی وجود دارد، ولی تنها یکی از این روش‌ها به ساختار ریاضی نمایش‌دهندهٔ هستی‌شناسی فیزیکی می‌انجامد. در چنین موردی ممکن است نمایش ریاضی در معنای مناسب با اشیای فیزیکی که آن را نمایش می‌دهند ایزومورفیک باشد، ولی اغلب نمایش‌های ریاضی به این صورت نیستند و صرفاً نمایش‌دهندهٔ درجات آزادی پیمانه‌ای‌اند. موجودات ریاضی خواص عددی و جبری را به‌دست می‌دهند که اشیای فیزیکی فاقد آن‌اند.

برای درک هستی‌شناسی مکانیک کوانتوم استنتاج سرراست از فرمالیسم رویکرد درستی نیست. برای آزمون نظریه‌ها ازجمله مکانیک کوانتوم به مشاهده‌پذیرها نیازمندیم؛ اما چنان‌که بل نیز تأکید می‌کرد، هرچند مشاهده‌پذیرهایی که مکانیک کوانتوم معرفی می‌کند از نظر ریاضیاتی دقیق‌اند و آن‌ها را با عمل‌گرهای خودالحاقی (self-adjoint operator) نمایش می‌دهیم، با چیزی که در واقعیت با آن مواجهیم تفاوت دارند. همهٔ آن‌ها مقادیر ویژهٔ هم‌زمانی ندارند و جابه‌جاناپذیرند. به همین دلیل بود که بور می‌گفت زبانی که در مکانیک کوانتوم به‌کار می‌بریم با زبان کلاسیک تفاوت دارد، ولی درنهایت برای توضیح مشاهدات

خود مجبوریم زبان کلاسیک را به‌کار ببریم. به‌نظر می‌رسد این راه‌برد بل درست باشد که درباب مکانیک کوانتوم باید به‌دنبال نظریه‌ای باشیم که به‌جای این‌که این زبان کلاسیک را به گفت‌وگوهای حاشیه‌ای واگذار کند آن را وارد معادلات کند، نظریه‌ای که او با نام «نظریهٔ هستارهای موضعی» از آن یاد می‌کرد. مشاهده‌پذیرهای اصلی و اساسی باید تابعی از «هستارهای موضعی» (local beables) باشند. این هستارها باید موضعی و در فضای سه‌بعدی باشند تا بتوان نظریه‌ها را به‌کمک آن‌ها به محک تجربه زد و مفهوم علیت را در آن‌ها صورت‌بندی کرد. مشاهده‌پذیرهای اصلی یا اولیهٔ نظریه از این هستارهای موضعی ساخته می‌شوند (Bell 1987: 52-53, 175). بنابراین، آن‌چه فرمالیسم کنونی مکانیک کوانتومی معرفی می‌کند، یعنی «حالت کوانتومی»، را نمی‌توان در شمار این هستارهای موضعی قرار داد، چون این ناموضعی است. توضیح بل ما را به این سمت هدایت می‌کند که برای فهم هستی‌شناسی دقیق مکانیک کوانتوم و به‌تبع آن، تابع موج شناخت و تشخیص «هستارهای موضعی» و نحوهٔ ارتباط آن با حالت کوانتومی در درجهٔ اول اهمیت قرار دارد.

پی‌نوشت‌ها

۱. در فلسفه وقتی به چیزی nomological اطلاق می‌کنیم منظور این است که پدیدار یا روی‌داد یا هستومند مربوط مطابق قانونی رفتار می‌کند که از نظر منطقی ضروری نیست، و فقط می‌دانیم طبیعت این‌گونه رفتار می‌کند. توضیح بیش‌تری هم دراین‌باره وجود ندارد که چرا طبیعت این‌گونه و براساس این قانون رفتار می‌کند.

۲. برای توضیح تفصیلی این مطلب، بنگرید به فصل دوم کتاب Harman 1982.

کتاب‌نامه

Agassi, J. (1964), "The Nature of Scientific Problems and Their Roots in Metaphysics", in: *Critical Approaches to Science and Philosophy*, Mario Bunge (ed.), Free Press of Glencoe.

Albert, D. Z. (1996), "Elementary Quantum Metaphysics", in: *Bohmian Mechanics and Quantum Theory: An Appraisal*, J. Cushing, A. Fine and S. Goldstein (eds.), Dordrecht: Kluwer.

Allori , V. (2013), "Primitive Ontology and the Structure of Fundamental Physical Theories", in: A. Ney and D. Z. Albert (eds.), *The Wave Function: Essays in the Metaphysics of Quantum Mechanics*, New York:, Oxford University Press.

Bell, J. S. (1987), *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge: Cambridge University Press.

Faraday, M. (1952), "Experimental Researches in Electricity", in: *Great Books of the Western World,* vol. 45, Chicago: Encyclopedia Brittanica.

Gao, S. (2017), *The Meaning of the Wave Function*, Cambridge: Cambridge University Press.

Goldstein, S. and Zangh`ı, N. (2013), "Reality and the Role of the Wave Function in Quantum Theory", in: A. Ney and D. Z. Albert (eds.), *The Wave Function: Essays in the Metaphysics of Quantum Mechanics*, New York: Oxford University Press.

Harman, P. M. (1982), *Energy, Force, and Matter*, Cambridge: Cambridge University Press.

Lewis, P. J. (2004), "Life in Configuration Space", The British Journal for *the Philosophy of Science*, vol. 55, Issue 4.

Maudlin, T. (2013), "The Nature of the Quantum State", in: *The Wave function*, A. Ney and D. Z. Albert (eds.), *The Wave Function: Essays in the Metaphysics of Quantum Mechanics*, New York: Oxford University Press.

Maudlin, T. (2014), *New Foundations for Physical Geometry*, New York: Oxford University Press.

Popper, K. (1963), "On the Sources of Knowledge and Ignorance", in: *Conjectures and Refutations*, New York: Harper & Row Publishers.

Pussy, M. F., J. Barrett, and T. Rudolph (2012), "On the Reality of the Quantum State", *Nature Physics*, vol. 8.