

مسئله اندازه‌گیری در مبانی فلسفی مکانیک کوانتوم

علیرضا منصوری*

چکیده

اندازه‌گیری در مکانیک کوانتوم یکی از وجوه افتراق اساسی آن با مکانیک کلاسیک است. در این مقاله مسئله اندازه‌گیری، به‌عنوان یک مسئله مهم در مکانیک کوانتوم طرح شده است و ضمن تحلیل مبانی فلسفی آن، راه‌حلهایی که مدل‌های مختلف نظری برای آن ارائه کرده‌اند به‌اجمال بررسی، تحلیل و مقایسه شده است تا از رهگذر آن بهترین راه‌حل یا راه‌حلهای ارائه‌شده انتخاب شود.

کلیدواژه‌ها: اندازه‌گیری، تعبیر مکانیک کوانتوم، رئالیسم، گره‌ی شرودینگر.

مقدمه

مسئله اندازه‌گیری در مکانیک کوانتوم، یکی از مسائل مهم آن از بدو پیدایش این نظریه بوده است که به‌رغم تلاش‌های فلاسفه فیزیک و فیزیکدانان، هنوز به نتیجه مورد توافقی نرسیده است. حجم زیاد تلاش‌های صورت‌گرفته در این بحث، موجب سردرگمی کسانی خواهد شد که می‌خواهند ضمن شناخت دقیق خود مسئله، بتوانند درک نسبی از وضعیت کنونی این مسئله و میزان مقبولیت آن‌ها داشته باشند. با توجه به این وضعیت در این مقاله سعی شده است که به تحلیل مسئله اندازه‌گیری بپردازیم و از طریق بررسی و مقایسه مدل‌های مختلف، بهترین راه‌حل (های) موجود را انتخاب کنیم. این بررسی، به علاقه‌مندان این موضوع کمک خواهد کرد که برنامه‌های پژوهشی بعدی در زمینه حل مسئله اندازه‌گیری را با بصیرت و دید بهتری صورت‌بندی و دنبال کنند.

* عضو هیئت علمی پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی mansouri@ihcs.ac.ir

تاریخ دریافت: ۸۹/۲/۲۸، تاریخ پذیرش: ۸۹/۶/۷

پیش فرض معمول ما درباره اندازه‌گیری این است که سیستم مورد اندازه‌گیری، واجد کمیتی است و آن کمیت دارای مقداری است که ما آن را اندازه‌گیری می‌کنیم. بنابراین اندازه‌گیری خاصیتی را آشکار می‌کند که سیستم، قبلاً واجد آن بوده است، به طوری که حتی اگر اندازه‌گیری روی سیستم صورت نگرفته بود نیز سیستم دارای این خاصیت می‌بود؛ مثلاً اندازه‌گیری مکان یک سیستم تک‌ذره‌ای را در نظر بگیرید. براساس آنچه گفتیم، ذره یا در یک محدوده فضایی هست یا نیست و اگر نظریه مکانیک کوانتوم نتواند بگوید ذره مورد نظر در فلان موقعیت مکانی هست یا خیر، ظاهراً باید بپذیریم که مکانیک کوانتوم، نظریه کاملی نیست. با چنین پیش فرضی راجع به اندازه‌گیری، پرسش ما راجع به موقعیت احتمالی مکان یک ذره چنین مطرح می‌شود که احتمال اینکه سیستم یا ذره در فلان موقعیت مکانی باشد چقدر است؟ اما اگر اصرار داشته باشیم، به رغم اینکه نظریه کوانتوم نمی‌گوید ذره، به‌طور مشخص، در کدام موقعیت مکانی است، با وجود این نظریه کامل است، لاجرم باید آن پیش فرض معمول را کنار بگذاریم و بپذیریم که ذره، قبل از اندازه‌گیری، اصلاً مکان مشخصی نداشته و تازه پس از اندازه‌گیری است که دارای موقعیت مکانی مشخصی می‌شود.

به این ترتیب در منظر جدید پرسش مذکور راجع به موقعیت احتمالی ذره را باید به این شکل طرح کرد که احتمال اینکه اگر سیستم را اندازه‌گیری کنیم، ذره در فلان ناحیه باشد چقدر است؟ اما در این صورت منظور از اینکه سیستم قبل از اندازه‌گیری، مکان مشخصی ندارد چیست؟ آیا نصفش هست یا مثلاً در ۷۰ درصد مواقع، در فلان مکان است؟ در پاسخ به چنین پرسش‌هایی، براساس تعبیر اخیر که تعبیر استاندارد است، باید گفت که قبل از اندازه‌گیری، سیستم در هیچ‌یک از این دو حالت قرار ندارد؛ بلکه در حالت خاصی قرار دارد که خود به‌صورت برهم‌نشی از آن حالات خالص است. پس به‌طور خلاصه اگر مکانیک کوانتوم کامل باشد، یک حالت ترکیبی عجیب داریم. (Lange, 2002:258)

تا اینجا مشخص شد که اگر ما نظریه مکانیک کوانتوم را کامل در نظر بگیریم، تلقی ما از اندازه‌گیری چه خواهد شد. برای توضیح دقیق‌تر فرض کنید سیستم قبلاً با یک دستگاه اندازه‌گیری برهمکنش داشته و برای اندازه‌گیری یک کمیت، مقدار مشخصی را به‌دست داده باشد، اصطلاحاً می‌گوییم سیستم در یک حالت خالص است. حالا انتظار ما این است که اگر بلافاصله مجدداً همان اندازه‌گیری را انجام دهیم، نتیجه حتماً به همان مقدار منجر شود؛ زیرا اگر سیستم در حالت خالص باشد اندازه‌گیری مقدار قطعی (با احتمال صددرصد) را به‌دست می‌دهد. در این صورت این پرسش پیش می‌آید که عنصر شانس و احتمال از کجا می‌آید؟ در

تعبیر استاندارد گفته می‌شود که عنصر شانس و احتمال ناشی از فرایند تقلیل است؛ *تقلیل*، *شانس و احتمال را وارد می‌کند*. از طرفی تأکید می‌شود که پس از اندازه‌گیری، ما همواره یک مقدار مشخص و متعین را به‌عنوان نتیجه آزمایش به‌دست می‌آوریم.

این نکته را نیز باید در نظر داشت که حالت ترکیبی برای جهان میکروفیزیک ضروری است. اگر فرض چنین حالتی به‌عنوان یک حالت واقعی ضروری نبود، مشکلی وجود نمی‌داشت، ولی همان‌طور که فاینمن اشاره کرده است، در وضعیت‌هایی که حالات از هم تمایزناپذیرند، از این حالت برهم‌نهی گریزی نیست.^۱ در واقع این حالات برهم‌نهی امکان نمایش تداخل‌ها را برای ما تضمین می‌کنند که بدون آن‌ها نمی‌توانستیم نمایش یا توضیحی برای تداخل‌ها ارائه کنیم.

با این مقدمات می‌توان مسئله اندازه‌گیری به این شکل طرح کرد که

«دینامیک کوانتومی و فرض تقلیل در تقابل آشکار با یکدیگر قرار دارند... به نظر می‌رسد فرض تقلیل، وقتی که اندازه‌گیری صورت می‌گیرد درست باشد، درحالی که دینامیک به‌طرز عجیبی در مورد آنچه هنگام اندازه‌گیری رخ می‌دهد، غلط است، و باز با وجود این به نظر می‌رسد در زمانی که اندازه‌گیری نمی‌کنیم، همین دینامیک، توصیف درستی از آنچه رخ می‌دهد، ارائه می‌دهد.» (Albert, 1992: 79)

برای حل این معضل یک طریق ممکن این است که با در نظر گرفتن تمایز دنیای ماکرو و میکرو این مشکل را حل کنیم. این رویکرد تحت عنوان تعبیر کپنهاگی به رهبری بور و همفکرانش دنبال شد. هرچند نمی‌شود نظام خیلی منسجمی در خصوص این تعبیر ارائه داد، باز این قدر می‌توان گفت که یکی از ویژگی‌های مهم آن «تر مفاهیم کلاسیکی» است، که بر این امر تأکید داشت که باید از یک زبان روشن و واضح برای معرفت عینی استفاده کرد، و این زبان نیز از طریق فیزیک کلاسیک، که در واقع فیزیکی است که آدمی در مقیاس‌های معمول روزمره با آن سروکار دارد، در اختیار ما قرار گرفته است و در بیان تجارب خود ناگزیریم این زبان را به کار بگیریم. این ایده به این منجر می‌شود که در حوزه مکانیک کوانتوم یک تمایزی بین شیء مورد اندازه‌گیری که در حوزه کوانتومی است، و خود دستگاه اندازه‌گیری که مربوط به دنیای کلاسیک است، در نظر بگیریم. البته یکی از مشکلات چنین تعبیری این است که چون این تمایز، یک تمایز معرفت‌شناسانه یا معناشناسانه است، و هستی‌شناسانه نیست، در اینکه ما این برش و تمایز را دقیقاً کجا باید بگذاریم دچار مشکل می‌شویم.

از اینکه بگذریم، خصوصیت دوم این تعبیر مربوط می‌شد به محدودیت‌هایی که از جانب تعبیر خاصی از «اصل عدم قطعیت هایزنبرگ» در به‌کارگیری این مفاهیم صورت می‌گرفت. این تعبیر که به تعبیر «مکملیت» معروف است محدودیتی را در استفاده از مفاهیمی که مکمل یکدیگر بودند، ایجاد می‌کرد. بر این اساس این مفاهیم هرچند هر دو در توصیف یک سیستم فیزیکی لازم هستند؛ ولی در یک زمان نمی‌توان آنها را به‌کار برد.^۲

ویژگی آخر این تعبیر این بود که در این تعبیر به‌رغم اینکه یک شکاف و تمایز مفهومی بین مشاهده‌شونده و ناظر یا مشاهده‌گر وجود دارد، این دو با هم یک کل لایتجزا (indivisible whole) را می‌سازند، که بور از آن به «پدیده‌های کوانتومی» تعبیر می‌کند. در واقع برخلاف فیزیک کلاسیک برهمکنش متقابل بین دستگاه اندازه‌گیری و سیستم مورد اندازه‌گیری وجود دارد که قابل اغماض نیست و درعین حال نمی‌توان آن را به زبان کلاسیکی توضیح داد و به همین دلیل ما با تظاهرات غیرعلی از پدیده‌های کوانتومی مواجهیم. نکته اینجاست که هدف رهیافت کپنهاگی این بود که صرفاً با ارائه دستگامی تعبیری و مفهومی، و با رویکردی معنائشناسانه و معرفت‌شناسانه، معضلات نظریه کوانتوم را توضیح دهد و در حل این معضلات خود را درگیر فرمالیسم نکند.^۳

به‌رحال شروودینگر برای اینکه نتایج خلاف شهود راه حل تعبیر کپنهاگی را نشان دهد، آزمایش فکری زیر را ارائه کرد که به آزمایش فکری گربه شروودینگر شهرت یافت. وی با این آزمایش نشان داد که اگر قرار باشد مکانیک کوانتوم در هر دو جهان میکرو و ماکرو صادق باشد، از مواجهه با این نتایج خلاف شهود گریزی نیست.

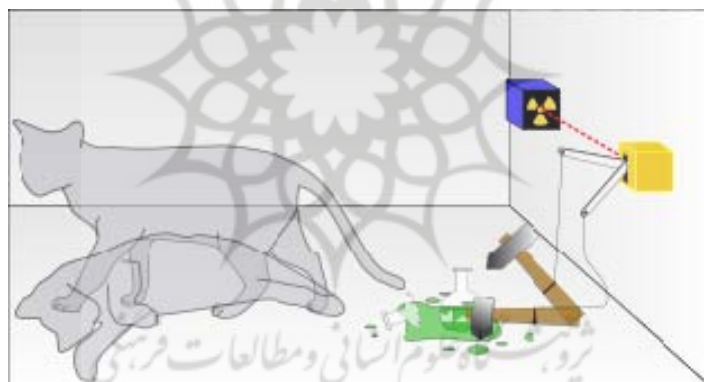
آزمایش گربه شروودینگر

جعبه‌ای را در نظر بگیرید که درون آن گربه‌ای است. درون جعبه ظرفی شیشه‌ای حاوی یک ماده سمی قرار دارد که در صورت انتشار در فضای جعبه، موجب مرگ گربه می‌شود. همچنین چکشی بالای این ظرف شیشه‌ای تعبیه شده است که به طریقی به یک آشکارساز ذره کوانتومی متصل است به نحوی که به محض آشکارسازی، چکش رها می‌شود و ظرف شیشه‌ای می‌شکند و بلافاصله گربه را می‌کشد. فرض کنید در جعبه بسته است. براساس مکانیک کوانتوم باید گفت که قبل از اندازه‌گیری، یعنی قبل از اینکه در جعبه باز شود، تابع موج گربه، ترکیبی است از دو حالت گربه زنده و گربه مرده. پس از اندازه‌گیری، حالت گربه به یکی از این دو حالت تقلیل می‌یابد. اما معنی اینکه گربه قبل از اندازه‌گیری در

حالت زنده و مرده است چیست؟ این آزمایش نشان می‌دهد آن عدم تعیین در سطح کوانتومی می‌تواند به سطح ماکرو نیز تسری یابد و در این صورت ما با نتایج خلاف شهود مواجه خواهیم شد.

یک راه‌حل این است که خود گربه را به‌عنوان یک ناظر در نظر بگیریم که خودش و دستگاه را مورد اندازه‌گیری قرار می‌دهد. در این صورت تابع موج گربه همواره در حالت خالص است: یا زنده یا مرده. اما این شیوه پاسخی به مسئله موجب می‌شود که پرسیم چه چیزی را می‌توان یک دستگاه اندازه‌گیری به‌شمار آورد؟ وقتی دو ذره با هم برهمکنش داشته باشند، هیچ تقلیل تابع موجی در نظر نمی‌گیریم، ولی وقتی یک ذره با آنچه ما یک «دستگاه اندازه‌گیری» به‌شمار می‌آوریم، برهمکنش داشته باشد، تابع موج دچار تقلیل می‌شود. ولی مگر دستگاه اندازه‌گیری چیزی غیر از مجموعه‌ای از ذرات است؟

شکل ۱. آزمایش فکری گربه شرودینگر



صورت‌بندی دقیق‌تر مسئله اندازه‌گیری

ما مسئله اندازه‌گیری را به این شکل مطرح کردیم که

«دینامیک کوانتومی و فرض تقلیل در تقابل آشکار با یکدیگر قرار دارند... به نظر می‌رسد فرض تقلیل، وقتی که اندازه‌گیری صورت می‌گیرد درست باشد، در حالی که دینامیک به‌طرز عجیبی در مورد آنچه هنگام اندازه‌گیری رخ می‌دهد، غلط است، و باز با وجود این به نظر می‌رسد در زمانی که اندازه‌گیری نمی‌کنیم، همین دینامیک، توصیف درستی از آنچه رخ می‌دهد، ارائه می‌دهد.» (Albert, 1992: 79)

هرچند بررسی دقیق‌تر راه‌حل‌های ارائه‌شده برای مسئله اندازه‌گیری، نشان می‌دهد که هر تعبیری از نظریه کوانتوم صورت‌بندی متفاوتی از مسئله اندازه‌گیری ارائه می‌کند؛ اگر بخواهیم یک صورت‌بندی کلی از مسئله اختیار کنیم باید گفت مشکل اینجاست که فرمالیسم مکانیک کوانتوم بدون فرض اپراتور تصویر نمی‌تواند توضیح درستی از تجارب ما به‌دست دهد. برای اینکه بتوانیم به بررسی شیوه مواجهه مدل‌های مختلف برای حل این مسئله بپردازیم، بهتر است از تحلیل و تفکیکی که مادلین (Maudlin, 1995: 7-15) از این مسئله ارائه کرده است استفاده کنیم تا هم مسئله قدری روشن‌تر شود و هم بتوانیم مدل‌ها و تعابیر مختلف را با هم مقایسه کنیم. به‌طور خلاصه می‌توان گفت مسئله اندازه‌گیری حاصل جمع سه ادعای دوه‌دو ناسازگارند:

الف) تابع موج کامل است.

ب) معادله تحول دینامیکی، یک معادله خطی است.

ج) ما در نهایت در اندازه‌گیری به نتایج متعینی می‌رسیم.

مدل‌هایی که برای رفع تناقض بین این سه ادعا، اولی را کنار می‌گذارند، مدل‌هایی هستند که تحت عنوان کلی متغیرهای نهان شناخته می‌شوند. آن‌ها که «ب» را رها می‌کنند، مدل‌های تقلیلی هستند و دسته آخر که به یک معنا ادعای «ج» را کنار می‌گذارند، یکی از انواع مدل حالت نسبی اورت هستند.

قبل از بررسی بیشتر این سؤال مطرح است که مدل‌هایی که برای حل این مسئله ارائه شده است به‌طورکلی، و خصوصاً از نظر فلسفی، چه تفاوتی با هم دارند؟ حقیقت این است که انتخاب هر کدام از این موارد تعهداتی متافیزیکی را به‌دنبال خواهد داشت که در نهایت می‌تواند به فیزیکی متفاوت از دیگری منجر شود. مثلاً اگر گزینه متغیرهای نهان را انتخاب کنیم، باید مشخص کنیم که این متغیرهای نهان چیستند و قوانین حاکم بر آن‌ها چگونه‌اند؟ درحالی‌که اگر مثلاً مدل‌های تقلیلی را که مبتنی بر ارائه یک معادله غیرخطی هستند انتخاب کنیم، باید به این پرسش پاسخ دهیم که بالأخره کی و چطور این تقلیل رخ می‌دهد؟

در مورد سوم هم باید بگوییم منظور از اینکه نتایج متعینی نداریم چیست و لااقل توضیحی برای این داشته باشیم که پس چرا در آزمایش‌ها «به نظرمان می‌آید» که با نتایج متعین مواجه می‌شویم؟ نکته جالب توجه در اینجا این است که در اینجا به‌روشنی دادوستد فیزیک و فلسفه را می‌توان دید. از یک طرف متافیزیک‌های متفاوتی که در پس هر یک از این مدل‌ها خوابیده است ما را به سمت طرح پرسش‌های فیزیکی متفاوت هدایت می‌کند و

از طرف دیگر می‌بینیم که چگونه نظریه‌پردازی‌های متفاوت متافیزیکی، امکان‌های متفاوت فیزیکی را فراهم می‌کند.

مادلین، در ادامه تحلیل خود از مسئله اندازه‌گیری، آن را به سه قسمت تحلیل کرد: مسئله نتایج، مسئله آماری، و مسئله اثر. این تفکیک و تقسیم‌بندی این حسن را دارد که ضمن اینکه مانع بدفهمی مسئله اندازه‌گیری می‌شود در عین حال برای ما مشخص می‌کند که هر مدلی که قرار است برای حل مسئله اندازه‌گیری ارائه شود، باید بتواند تبیین مناسبی برای هر یک از این سه مؤلفه ارائه کند.

مسئله نتایج: مسئله نتایج در مورد این است که در مکانیک کوانتوم ما با حالاتی مواجهیم که به اصطلاح حالت برهم‌نهی نام دارند. این حالت‌ها ترکیب خطی از حالت‌های دیگر هستند، و مهم است که توجه داشته باشیم که این حالات خود یک حالت مستقل به‌شمار می‌روند و با حالت‌هایی که ماهیتاً مستقل نیستند و مخلوطی از حالات دیگر هستند، فرق دارند. مسئله اینجاست که پس از عمل اندازه‌گیری سیستم مورد نظر ما یکی از حالات موجود در ترکیب خطی را اختیار می‌کند و به یک نتیجه معین از مقادیر ممکن برای کمیت مشاهده‌پذیر منجر می‌شود.

مسئله آمار: مسئله آمار، این است که نتایجی که نظریه پیشنهاد می‌کند، براساس قاعده بورن، احتمالی‌اند. یعنی وضعیت‌های اندازه‌گیری که با توابع موج اولیه یکسان توصیف می‌شوند، به نتایج متفاوتی منجر می‌شوند و احتمال حصول هر نتیجه با قاعده بورن داده می‌شود. مسئله اینجاست که اگر تابع موج، به صورتی دترمینیستی تحول یابد، در این صورت دو سیستمی که با توابع موج یکسان شروع می‌کنند، قاعدتاً به توابع موج یکسانی نیز منتهی می‌شوند و اگر تابع موج کامل باشد، در این صورت توابع موج یکسان باید از هر جهت یکسان باشند، این درحالی‌است که به جهت قاعده بورن، توابع موج یکسان ممکن است منجر به نتایج یکسانی نشوند.

مسئله اثر: این مسئله ناشی از این است که در فرایند اندازه‌گیری، تقلیل نقش سومی را به عهده دارد و آن این است که حالت سیستم عوض می‌شود و تحول آینده سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ یعنی حالت سیستم کوانتومی بعد از اندازه‌گیری باید ویژه حالت متناظر با نتیجه اندازه‌گیری شده باشد. انگیزه اساسی برای این وضعیت این است که اندازه‌گیری‌ها قابل تکرارند؛ بنابراین بعد از انجام اندازه‌گیری، سیستم در حالتی خالص قرار می‌گیرد به گونه‌ای که اندازه‌گیری که بلافاصله پس از آن صورت بگیرد، با قطعیت منجر به همان نتیجه می‌شود.

مثلاً اگر الکترونی با اسپین x - بالا داشته باشیم و این الکترون وارد دستگاهی شود که مؤلفه z اسپین را اندازه‌گیری می‌کند در این صورت الکترون خروجی یا دارای اسپین z بالا یا پایین است. حالا فرض کنید اگر نتیجه اندازه‌گیری اول «بالا» باشد، نتیجه اندازه‌گیری‌ای که بلافاصله بعد از آن صورت می‌گیرد نیز حتماً و قطعاً «بالا» خواهد بود؛ این را مسئله اثر می‌گویند. تحلیلی که از مسئله اندازه‌گیری ارائه شد این انتظار را ایجاد می‌کند که هر طرحی که برای حل مسئله اندازه‌گیری ارائه شود، باید بتواند از عهده این سه مسئله ناشی از مسئله اندازه‌گیری برآید.

طرح‌های ارائه‌شده برای مسئله اندازه‌گیری

در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان گفت که راهبردهای ارائه شده برای این مسئله یا (۱) تعبیر استاندارد را می‌پذیرند و برآن‌اند که اصلاحی در دینامیک خطی نظریه اعمال کنند یا (۲) دینامیک خطی را بپذیرند و در تعبیر استاندارد اصلاحاتی وارد کنند یا (۳) هم تعبیر استاندارد و هم دینامیک خطی را می‌پذیرند؛ ولی سعی دارند تفاوت بین حالت خالص و مخلوط را برای مقاصد عملی قابل چشم‌پوشی جلوه دهند. به‌عنوان مثال نظریه GRW راهبرد اول را دنبال می‌کند. درحالی‌که نظریه متغیر نهان بوهم، تعبیر چندجهانی اورت و تعابیر وجهی طریق دوم را طی می‌کنند و در نهایت نظریه‌های همدوس‌زدایی، در مسیر سوم به حل معضل فوق می‌پردازند. (Bub, 1998) از طرفی ارائه یک راه حل برای مسئله اندازه‌گیری به این امر بستگی دارد که مکانیک کوانتوم را نظریه‌ای کامل بدانیم یا ناقص. اگر مکانیک کوانتوم را نظریه‌ای کامل ندانیم، به‌دسته‌ای از نظریه‌ها می‌رسیم که نظریه‌های متغیرهای نهان خوانده می‌شوند، که اکنون به بررسی اجمالی آن پرداخته می‌شود.

متغیرهای نهان

شاید اولین تعبیری که در این رویکرد برای حل مسئله اندازه‌گیری به ذهن برسد این باشد که بگوییم، در اینجا با یک تقلیل معرفتی مواجهیم؛ نه تقلیل واقعی. مسئله مذکور ناشی از این فرض بود که تابع موج توصیف کاملی از واقعیت فیزیکی ارائه می‌کند. اما اگر QM را ناقص در نظر بگیریم، می‌توانیم بگوییم سیستم قبل از اندازه‌گیری هم در آن حالت بوده است، متنها چون توصیف مکانیک کوانتوم ناقص بوده، به همین دلیل نتوانسته حالت متعین ذره را برای ما مشخص کند و صرفاً برهم‌نشی از حالات ممکن را برای ما مشخص کرده است. اگر چنین

فرضی را در پیش بگیریم در این صورت تابع موج دانش ما از سیستم را توصیف می‌کند و تقلیل تابع موج دیگر یک تغییر فیزیکی و واقعی نیست، بلکه صرفاً یک تغییر معرفتی است؛ یعنی معرفت ما نسبت به حالت سیستم، قبل از انجام عمل اندازه‌گیری، صرفاً به برهم‌نهی از حالت‌های ممکن منحصر بود، و با وجودی که سیستم واقعاً در یک حالت معین قرار داشته است، ولی شناختی نسبت به این حالت متعین سیستم نداشتیم، اما براساس فرض تقلیل، پس از انجام عمل اندازه‌گیری، ما نسبت به حالت متعین سیستم شناخت پیدا می‌کنیم؛ به این معنی تقلیل تابع موج بیانگر یک تغییر معرفتی است و از نقطه نظر فیزیکی تفاوتی بین وضعیت سیستم، قبل و بعد از اندازه‌گیری، وجود ندارد. تنها تبیین این است که بگوییم ۷۰ درصد احتمال داشته که در اینجا بیفتد و ۳۰ درصد نیفتد. اگر هم رویدادی رخ داد که ۳۰ درصد احتمال رخ دادن آن بود، توضیح این است که رویدادهای نامحتمل هم ممکن است، روی دهد. شاید در نظر اول چنین تعبیر و تلقی از تابع موج، جذاب و جالب باشد؛ اما مشکلات جدی در پی خواهد داشت، مثلاً نمی‌توانیم با چنین تعبیری از تابع موج پدیده تداخل را توضیح دهیم. توابع موجی که تنها بیانگر دانش ما از سیستم باشند، دیگر واقعی نیستند، لذا نمی‌توانند تداخل کنند. بنابراین در این رویکرد باید طریق دیگری برای حل معضل اندازه‌گیری ارائه کرد.

برای جلوگیری از معضل فوق تعبیر خود را از تابع موج به این شکل تعدیل می‌کنیم که منظور از اینکه تابع موج بیانگر توصیف ما از سیستم است این نیست که خود در امر تداخل شرکت دارد تا با این مسئله مواجه شویم که چگونه هویتی ذهنی در جهان خارج، تداخل ایجاد می‌کند، بلکه منظور این است که ما از آن صرفاً برای محاسبه و پیش‌بینی پدیده تداخل استفاده می‌کنیم. در این توصیف به‌رغم پیش‌بینی درست، باید گفت دلیل اصلی برای پدیده‌های تجربی جای دیگری است. اما کجا؟

فرض این است که باید اطلاعات نهفته و نهانی وجود داشته باشد که در حال حاضر در حیطه معرفت ما از سیستم قرار نگرفته‌اند و لذا در تابع موج وجود ندارند. به این ترتیب در این نظریه، چیزی تحت عنوان تقلیل تابع موج نداریم. تابع موج می‌تواند برای همه امکان‌ها یکی باشد، آنچه موجب یک امکان خاص می‌شود، همین متغیرهای اضافه نهان هستند. بنابراین در اینجا، تقلیل تابع موج نداریم؛ زیرا تابع موج، مثل تعبیر چندجهانی، همواره همه امکان‌ها را شامل می‌شود، متناهی برخلاف تعبیر چندجهانی همگی تحقق نمی‌یابند؛ زیرا هریک از ذرات مسیرهای انحصاری معین را دنبال می‌کنند. چنین توصیفی ما را به سمت ارائه نظریه‌های متغیرهای نهان سوق می‌دهد. (اسکوایرز، ۱۹۹۴: ۶۶)

این نظریه رویکردی کاملاً متفاوت با نظریه استاندارد دارد و اول بار توسط دوبروی در سال ۱۹۳۰ ارائه شد و پس از آن در دهه ۱۹۵۰ توسط بوهم بسط داده شد. نظریه بوهم از نظر محتوای تجربی مثل مکانیک کوانتوم است، اما متافیزیک آن تفاوت دارد و از این نظر در واقع شبیه مکانیک کلاسیک است.

پیش فرض این نظریه این است که هر ذره مادی در جهان همواره موقعیت مشخصی دارد و این نظریه تحول زمانی این موقعیت‌ها را به صورتی کاملاً موجیتی توصیف می‌کند. تحول احتمالی جهان یا ظاهری و ناشی از جهل ما به حالت دقیق آن است و لذا/ایده احتمال تنها به عنوان ایده‌ای معرفتی وارد می‌شود؛ به همان صورتی که در مکانیک آماری کلاسیک وارد می‌شود. در این نظریه علاوه بر ذرات و میدان‌های نیرو، توابع موج نیز وجود دارند و این توابع موج هستند که باعث حرکت ذرات در مسیرهای مشخص و هدایت آن‌ها می‌شوند و چگونگی این کار با قوانینی اضافی غیرمکانیک کوانتومی توصیف می‌شود. (Albert, 1992: 135)

سؤال اینجاست که در این نظریه، مسئله اندازه‌گیری چه پاسخی خواهد داشت؟ در این نظریه از آنجا که توصیف تابع موج، توصیف کاملی در نظر گرفته نمی‌شود و توصیف وضعیت پس از اندازه‌گیری، علاوه بر تابع موج مشتمل بر مقادیر متغیرهایی است که نتیجه را ثبت می‌کنند؛ لذا چیزی به اسم مسئله اندازه‌گیری منتفی می‌شود. همان‌طور که گفته شد این دسته از تعابیر، با این فرض شروع می‌شوند که تابع موج سیستم، توصیف کاملی از سیستم ارائه نمی‌کند، حال به آن دسته از نظریه‌ها می‌پردازیم که مکانیک کوانتوم را کامل می‌دانند.

تقلیل و آگاهی

اگر مکانیک کوانتوم را کامل بدانیم، نمی‌توان گفت که سیستم، قبل از اندازه‌گیری یک حالت متعین و مشخص را داراست، چون نظریه یک حالت برهنه‌ی به ما می‌دهد. از طرفی تابع موجی که به صورت ترکیبی از چند حالت بیان شود، حالت مخلوط نام دارد. با این اوصاف آیا می‌توان آن حالت برهنه‌ی را یک حالت مخلوط در نظر گرفت؟

از آنجا که براساس معادله دینامیکی استاندارد مکانیک کوانتوم، توابع موج به طریق جبری با زمان تغییر می‌کند، لذا صرفاً براساس این معادلات، حالت محض نمی‌تواند به یک حالت مخلوط تبدیل شود؛ یعنی نمی‌توان به سادگی آن حالت برهنه‌ی را حالتی مخلوط در نظر گرفت، بلکه باید آن حالت برهنه‌ی را نیز به مثابه حالت خالص تلقی کنیم. از

طرفی ما در اندازه‌گیری‌ها تنها به یک نتیجه می‌رسیم، نتیجه‌ای که متناظر با همهٔ جملات نیست، بلکه متناظر یک حالت خالص خاص است؛ به عبارتی گویی اندازه‌گیری مستلزم انتخابی از بین حالات موجود در حالت برهنه‌ش است. لذا برای حل این معضل این‌طور فرض می‌شود که پس از اندازه‌گیری است که سیستم واجد یک حالت مشخص می‌شود، این فرض تقلیل تابع موج است. پس پیش‌بینی مکانیک کوانتوم با آنچه اندازه می‌گیریم در تعارض است، مگر اینکه اصل تقلیل را وارد کنیم. این راهی بود که فون‌نویمان در کتاب *مبانی ریاضی مکانیک کوانتوم* ارائه کرد و به این نتیجه رسید که باید دو قانون داشته باشیم:

قانون اول: وقتی هیچ اندازه‌گیری صورت نمی‌گیرد، حالت همهٔ سیستم‌های فیزیکی براساس معادلات دینامیکی حرکت، تحول می‌یابد؛ یعنی معادلهٔ شرودینگر.

قانون دوم: وقتی اندازه‌گیری انجام می‌شود، تحول حالت براساس اصل تقلیل صورت می‌گیرد، نه براساس معادلات دینامیک حرکت.

به عبارتی برهنه‌کنش با دستگاه اندازه‌گیری علت این است که حالت ترکیبی به یک حالت مشخص تغییر یابد. اگر مکانیک کوانتوم کامل باشد، قبل از اندازه‌گیری، نظریهٔ کوانتوم چیزی را از قلم نینداخته است؛ چیزی به اسم متغیرهای نهان نداریم. همین‌جاست که مسئلهٔ اندازه‌گیری ظاهر می‌شود: چه چیزی یک دستگاه اندازه‌گیری محسوب می‌شود؟ حال این پرسش پیش می‌آید که با توجه به تحلیلی که از مسئلهٔ اندازه‌گیری ارائه دادیم آیا تعبیر استاندارد، راه حلی برای آن سه مسئله دارد؟

ابتدا همان مسئلهٔ نتیجه را در نظر می‌گیریم. در آنچه «تعبیر استاندارد» خوانده می‌شود این مفروضات حاکم است که اولاً تابع موج کامل است و ثانیاً زبان دنیای کلاسیک را باید برای دستگاه‌های اندازه‌گیری ماکروسکوپی که با آن‌ها سروکار داریم، به‌کار برد؛ برخلاف موضعی که در مدل‌ها و تعابیر حالت نسبی اورت اتخاذ می‌شود. به‌هرحال این دو فرض به همراه این واقعیت که توصیف نظریهٔ کوانتوم از دنیای میکروسکوپی به حالت‌های عجیبی منجر می‌شود که آن‌ها را حالت‌های برهنه‌ش می‌نامیم، فائلان به تعبیر استاندارد را به سمت مدل‌های تقلیلی سوق داد. چون همان‌طور که گفتیم شما از یک طرف در نظریه با حالت‌های برهنه‌شی سروکار دارید و از طرف دیگر با زبانی دنیای کلاسیکی را توصیف می‌کنیم که در آن نتایج دنیای ماکروسکوپی متعین هستند، یعنی بالأخره شما خود را با یک نتیجهٔ مشخص مواجه می‌بینید. البته این مدل‌های تقلیلی تفاوت‌هایی با هم دارند، مثلاً خود فون‌نویمان، تقلیل را صرفاً به‌صورت یک اصل در اصول موضوع مکانیک کوانتوم وارد کرد،

و معنای مبهمی هم دارد؛ زیرا در توضیح این تقلیل، از همان مفاهیم مبهم «مشاهده» و «اندازه‌گیری» استفاده می‌شود.

به نظر می‌رسد که راه‌حل فون‌نویمان به پاسخ به این پرسش متکی است که معنای «اندازه‌گیری» چیست؟ زیرا از یک سو وقتی دو ذره با هم برهمکنش دارند، تابع موج تقلیل نمی‌یابد، و تقلیل تنها با برهمکنش با آنچه «دستگاه اندازه‌گیری خوانده می‌شود، رخ می‌دهد. این وضعیت به این پرسش منجر می‌شود که مگر دستگاه اندازه‌گیری چیزی غیر از مجموعه‌ای از ذرات است؟ به علاوه برای اینکه بینیم کدام قانون را باید اختیار کنیم، ابتدا باید بدانیم *اندازه‌گیری انجام شده است یا خیر؟*

همچنین تعبیر رایج از یک طرف به اصل بورن متکی است که براساس آن به نتایج اندازه‌گیری یک کمیت فیزیکی، احتمالی را نسبت می‌دهد. خود این قسمت به نظر می‌رسد که کمی مشکل دارد. چون این اصل نیاز به توضیح دارد و بدون اینکه ما توضیحی برای این اصل داشته باشیم، این اصل صرفاً یک ابزار محاسباتی است برای محاسبه احتمالات نتایج اندازه‌گیری. غیر از این برای به‌کاربردن این اصل باید مفهوم اندازه‌گیری را نیز مشخص کرد. اندازه‌گیری چیست؟ آیا یک برهمکنش ساده فیزیکی است یا فراتر از آن است و آن را نیز در بر دارد؟ آیا مستلزم یک ذهن آگاه است؟ با این وصف حتی یک ابزارانگار هم نمی‌تواند از این اصل به تنهایی چندان خرسند باشد. پس سؤال اساسی گویا این است که باید ابتدا مشخص کرد اصلاً «اندازه‌گیری چیست؟»

اگر اندازه‌گیری در اصل تقلیل، واقعاً یک برهمکنش فیزیکی معمولی باشد، پس لابد باید بتوان یک مدل فیزیکی برای آن ارائه کرد. در غیاب چنین مدلی کار ناتمام است و این اصل به‌خودی‌خود چیزی به ما نمی‌گوید جز اینکه بدون آن نمی‌توانیم نظریه را با نتایج تجربی تطبیق دهیم. اما ممکن است اصلاً آن را یک برهمکنش فیزیکی تلقی نکنیم. در این صورت این سؤال پیش می‌آید که آیا می‌توان اصول مکانیک کوانتوم را طوری صورت‌بندی کرد که به مفهوم اندازه‌گیری نیازی نباشد؟ از نقطه نظر فلسفی بله می‌شود و این کار با در نظر گرفتن تعبیر خاصی برای «حالت» کوانتومی سیستم امکان‌پذیر است، تعبیری که شأنی بیش از یک ابزار محاسباتی برای حالت کوانتومی قائل باشد. خصوصاً باید معنای مشخصی برای اصل برهم‌نهی پیدا کرد. فون‌نویمان تنها برای ویژه‌حالت یک مشاهده‌پذیر یک معنای فیزیکی ارائه می‌کند، ولی برای برهم‌نهی از ویژه‌حالات تعبیری ندارد.

ممکن است گفته شود که آیا اینکه تقلیل را به صورت یک اصل وارد کنیم، جدای از اصول دیگر، نوعی اصلاح موضعی (ad hoc) نظریه نیست؟ البته برخی افراد چنین نظری دارند؛ ولی مسئله کمی پیچیده تر است. در واقع به نظر می رسد که فون‌نویمان از این کار مقصودی داشت و آن این بود که ساختار نظریه کوانتوم نباید واجد ترم‌ها یا مفاهیمی باشد که ما مجبور شویم خود آن‌ها را باز با نظریه توضیح دهیم. از این منظر اضافه کردن یک اصل یا وارد کردن عناصری در هستی‌شناسی، برای فون‌نویمان مجاز بود و مفهوم شعور (consciousness) برای وی، حالا سوای از انتقادات دیگری که ممکن است بر آن وارد باشد، به خوبی این وظیفه را ایفا می کرد. اندازه‌گیری برای فون‌نویمان معادل با ادراکات بود و حوزه مطالعه این ادراکات خارج از قلمرو فیزیک بود. در عین حال وی معتقد بود که ادراکات ما باید یک مابه‌ازایی عینی در واقعیت فیزیکی داشته باشند، که آن را تحت عنوان اصل «توازی فیزیکی - روانی» (physical parallelism - psycho) بیان می کرد. ضمناً وقتی شما اصل تقلیل را کنار معادله خطی شرودینگر بگذارید یک عدم تقارن می بینید: از این جهت که معادله شرودینگر مثل بقیه قوانین فیزیک نسبت به زمان تقارن دارد، در حالی که تقلیل یک فرایند برگشت‌ناپذیر است و نسبت به زمان تقارن ندارد. این برگشت‌ناپذیری نیاز به توضیح داشت و فون‌نویمان از آنجا که اندازه‌گیری را به آگاهی و ذهن ارتباط می داد، این برگشت‌ناپذیری را نیز به کمک دوآلیسم ذهن - بدن توضیح می داد.

به بیان وی تقلیل زمانی رخ می دهد که فرایند اندازه‌گیری از مرز بین واقعیت عینی و تجربه ذهنی عبور می کند، بنابراین علت نهایی چنین فرایندی در محدوده بررسی‌های فیزیکی نیست. در واقع بهتر است بگوییم وی با کمک آن دوآلیسم، از توضیح فیزیکی آن شانه خالی می کرد. با این توضیحات، در اینکه اصل تقلیل وی را یک اصلاح موضعی بخوانیم باید قدری احتیاط به خرج داد، چون به هر حال وی یک پشتوانه فلسفی، هرچند مبهم، برای آن داشت. در حالی که برای بسیاری از طرف‌داران تعبیر رایج، صحبت از واقعیت مشاهده‌نشده، «مهمل» به نظر می رسید، برای فون‌نویمان این تقلیل یا «اختلال اولیه»، واقعیت مشاهده‌شده را خلق می کرد.

البته در خصوص نقش شعور، برنامه دیگری در زمینه برنامه فون‌نویمان ادامه یافت که مبتنی بر این ایده بود که شعور، عامل تقلیل تابع موج است، و باید به نحوی شعور را وارد فیزیک کنیم. این طرحی بود که در سال ۱۹۶۱ از طرف ویگنر ارائه شد. اما این راهبرد، مشکلاتی جدی ایجاد می کند؛ مثلاً یک سؤال جدی اینجاست که دقیقاً کی تقلیل روی می دهد؟

براساس این طرح تمام اشیای فیزیکی مطابق دینامیک خطی تحول می‌یابند؛ اما هرازچندگاهی، تحت شرایط اندازه‌گیری ذهن در ارتباط با مغز مشاهده‌گر در جریان این تحول، چشم خود را باز می‌کند و باعث می‌شود که کل سیستم، اعم از سیستم مورد اندازه‌گیری و دستگاه اندازه‌گیری و مغز همگی دچار تقلیل شود. ذهن مرتبط با مغز چشمان درونی خود را باز می‌کند و به مغز می‌نگرد و این موجب تقلیل کل سیستم می‌شود. پس از جایی به بعد خود مغز نیز جزئی از سیستم می‌شود. بعد از تقلیل، چشم درونی ذهن بسته می‌شود و دوباره سیستم مطابق با دینامیک خطی تحول می‌یابد تا اینکه مجدداً یک حالت ترکیبی ایجاد شود و ذهن دوباره به‌عنوان عامل تقلیل‌دهنده وارد شود.

این طرح ویگنر مستلزم این است که ما در جهان به وجود دو نوع سیستم ماهیتاً متفاوت قائل باشیم. یکی سیستم‌های فیزیکی و مادی محض، و دیگری سیستم‌های واجد آگاهی. سیستم‌های فیزیکی محض همواره مطابق معادلات دینامیکی حرکت کار می‌کنند، اما سیستم‌هایی که واجد ناظر آگاه هستند براساس قواعد پیچیده‌تری تحول می‌یابند که توضیح آن گذشت. اما مشکل سابق همچنان باقی است؛ زیرا برای اینکه بدانیم باید از کدام یک از این دو قانون برای توصیف سیستم خود بهره بگیریم باید به‌طور دقیق مشخص کنیم که معنای دقیق «شعور» چیست؟ اما همان‌طور که فون‌نویمان معنای دقیقی برای «اندازه‌گیری» ارائه نکرد، ویگنر نیز معنای «شعور» را مبهم باقی گذاشت.

اگر شعور را وارد کنیم باید بگوییم که تقلیل تابع موج، به‌واسطه مشاهده، توسط ناظر آگاه صورت می‌گیرد. از آنجا که شعور در سیستم‌هایی با درجاتی از پیچیدگی یافت می‌شود، این نظر به‌وجود آمده است که پیچیدگی سیستم‌هاست که موجب تقلیل تابع موج می‌شود. همچنین باید توجه داشت که برای ناظر آگاه کافی نیست که صرفاً از قسمتی از تابع موج که مربوط به مقدار مشاهده شده است، اطلاع داشته باشد، زیرا اگر صرف اطلاع‌داشتن تمام چیزی بود که اتفاق می‌افتاد، در آن صورت نمی‌توانستیم مطمئن باشیم که ناظر دیگر نیز همان مقدار مشاهده‌شده را خواهد دید. بنابراین باید بگوییم عمل مشاهده آگاهانه، واقعاً تابع موج را تغییر می‌دهد. برای توجیه این ایده نیز استدلالی ارائه می‌شود مبنی بر اینکه عمل و عکس‌العمل با هم اتفاق می‌افتد، یعنی اگر A بر B اثر کند، B نیز بر A اثر می‌کند. بنابراین، چون جهان فیزیکی به‌طور آشکار بر ذهن آگاه اثر می‌گذارد، انتظار می‌رود که عکس آن نیز صورت پذیرد.

به‌هر حال وارد کردن «شعور»، به‌عنوان عامل یک اختلال فعال که یک اثر فیزیکی را

روی یک حالت کوانتومی اعمال کند، برای بسیاری از فیزیکدانان قابل قبول نبود و به همین دلیل هم برخی به سراغ این رفتند که فرایند تقلیل را یک فرایند کاملاً فیزیکی در نظر بگیرند و در خصوص چگونگی فرایند فیزیکی نظریه پردازی کردند که مشهورترین آن‌ها، مدل GRW است.

مدل GRW

اگر بگوییم برهمکنش با اشیای ماکروسکوپیک علت تقلیل است، دوباره به آن پرسش تکراری برمی‌خوریم که معنای «ماکروسکوپیک بودن» چیست و چه مرزی بین میکرو و ماکرو وجود دارد؟ یک راه‌حل برای دورزدن این پرسش‌ها در باب دستگاه اندازه‌گیری یا وارد کردن شعور در فیزیک، این است که برای ارائه یک توصیف واحد از سطح میکرو و ماکرو، معادله دینامیکی استاندارد را طوری اصلاح کنیم که بعد از زمان معینی، فرم تابع موج عوض شود، به نحوی که دامنه یکی از جملات بزرگ شود و دیگری به سمت صفر میل کند. به این ترتیب حالت سیستم از یک حالت ترکیبی محض به یکی از حالات محض مشخص و متعین مندرج در حالت مخلوط تقلیل می‌یابد. اصلاح معادله دینامیکی به این شکل، موجب می‌شود به‌طور خودبه‌خود تقلیل تابع موج صورت گیرد و این امر امکان ارائه یک توصیف واحد هم در سطح میکرو و هم ماکرو را فراهم می‌کند.

شکل اولیه این مدل، در سال ۱۹۸۵ و ۱۹۸۶، توسط گیراردی، ریمینی و وبر ارائه شد، که اکنون به نظریه GRW شهرت دارد و انواع بعدی هریک گونه‌ای تغییر یافته از این نظریه اولیه به‌شمار می‌روند. مفروضات اولیه در ارائه مدل GRW به شرح زیر است:

فرض ۱: توصیف QM کامل است و لذا بردار حالت، توصیف جامع و کاملی از سیستم فیزیکی منفرد می‌دهد.

فرض ۲: هدف ما این است که توصیف واحدی از دینامیک سیستم در سطوح میکرو و ماکرو ارائه دهیم.

هرچند مدل GRW، در مقایسه با دیگر نظریه‌ها، از جهاتی متضمن تغییرات زیادی در نظام نظری ما نیست و هم‌وردایی لورنتسی را نیز محترم می‌دارد، ولی از بعضی جنبه‌ها این یک تغییر رادیکال است. مثلاً در مدل GRW مکان را به‌عنوان یکی از ویژگی‌های عینی هر سیستم فیزیکی در سطح ماکرو در نظر گرفتیم؛ ولی آیا مکان تنها خاصیت عینی است؟ در مدل GRW برخلاف مدل دو بروی - بوهم ممکن است خواص عینی دیگری هم غیر از

مکان داشته باشیم، ولی عدم تقارنی وجود دارد که نیازمند توضیح است: در این مدل، مکان تنها در حوزه ماکرو عینیت دارد. برای این وضعیت نامتقارن در مدل GRW چه توضیحی می‌توان ارائه داد؟ چرا سطح ماکرو و میکرو در خصوص تعیین مکان با هم تفاوت دارد؟ اما چنین توضیحی وجود ندارد. زیرا همان‌طور که خود گیراردی نیز اعتراف دارد، این مدل صرفاً پدیدارشناسانه است؛ یعنی قدرت تبیین‌کنندگی ندارد. در واقع اصلاح معادله شرودینگر به صورتی انجام گرفته است که به جواب‌های درست منجر شود. این اصلاح مصنوعی و دستی قدرت تبیین‌کنندگی ندارد؛ مگر اینکه به واقعیت یا قوانینی عمیق‌تر متکی باشد. (Ghirardi, 2002)

مشکل دیگر این است که GRW یک نظریه برگشت‌ناپذیر است. این مسئله به این نتیجه منجر می‌شود که انرژی بقا ندارد. پرسشی که در اینجا طرح می‌گردد این است که آیا ما مجازیم نظریه‌ای را بپذیریم که در اصول موضوعه خود قوانینی دارد که به صورتی بنیادی یک برگشت‌ناپذیری را وارد می‌کند؟ آیا چنین نظریه‌ای را می‌توان جدی گرفت؟ در بسیاری از مواقع نسبت به این امر واکنش منفی وجود دارد، ولی برخی مثل آلبرت این را یکی از نقاط قوت این نظریه می‌دانند. (Ghirardi, 2005: 426-27)

از طرفی وقتی ما در این دینامیک جدید مکان ذره را به عنوان یک مشخصه عینی به‌طور دقیق مشخص کنیم، براساس اصل عدم قطعیت، اندازه حرکت دچار یک گستردگی می‌شود. به عبارتی جایگزیدگی لحظه‌ای به وجود آمدن مؤلفه‌های بزرگ سرعت در همه ذرات جهان منجر می‌شود و این انرژی جنبشی بالایی را موجب می‌گردد که کمیتی معادل دمای سیستم خواهد بود. بنابراین این جایگزیدگی در مجموع باید موجب گرم شدن جهان شود که این اثر قابل بررسی آزمایشی است. جالب است بدانیم که میزان افزایش گرمای ناشی از این بی‌شمار جایگزیدگی‌ها، از زمان انفجار بزرگ تا حالا معادل یک صدم دمای تابش زمینه‌ای جسم سیاه جهان است. اینکه چطور می‌توان چنین تغییرات دمایی را در این مقیاس بزرگ اندازه‌گیری کرد، امری دیگر است.

مسئله دیگر امکان نسبیته کردن این مدل است. در این زمینه هرچند تلاش‌هایی صورت گرفته است ولی هنوز تعمیم نسبیته این نظریه، از مشکلات بزرگ آن است. به هر حال به نظر می‌رسد این نظریه با مسئله نتایج مشکلی ندارد. غیر این تعبیر و تعبیر استاندارد، تعبیر دیگری نیز وجود دارد که با فرض کامل بودن مکانیک کوانتوم ارائه شده است؛ یکی از آن‌ها برنامه همدوس‌زدایی است.

برنامه همدوس‌زدایی

این برنامه، بر آن است تا در چهارچوب همان فرمالیسم و تعبیر استاندارد به حل مسئله اندازه‌گیری پردازد. ایده این طرح مبتنی بر این پیش‌فرض است که جهان را می‌توان به «سیستم‌ها» و «محیط» اطرافشان تقسیم کرد و «محیط» را باید به‌عنوان «بقیه» سیستم در نظر گرفت و به حساب آورد، به این معنی که درجات آزادی آن تحت تأثیر و در ارتباط با مشاهده ما نیستند؛ اما با وجود این محیط شامل همه آن درجات آزادی است که در تحول حالت سیستم دخالت دارند. لذا برخلاف رویکرد کلاسیک، سیستم مورد مطالعه، منزوی در نظر گرفته نمی‌شود، بلکه هر سیستم کوانتومی باید در برهمکنش با محیط اطراف خود در نظر گرفته شود و همین برهمکنش است که موجب گذار سیستم از حالت‌های ترکیبی کوانتومی به حالات متعین کلاسیکی می‌شود.

این دوگانگی سیستم - محیط، با درهم‌تنیدگی کوانتومی نیز در ارتباط است و موجب همبستگی‌هایی بین اجزای جهان می‌شود. در واقع، در این مدل تا مادامی که ما جهان را به اجزائی (یعنی سیستم‌ها) تقسیم نکرده باشیم، مسئله اندازه‌گیری نیز به وجود نمی‌آید. بردار حالت کل جهان به صورت موجیتی براساس معادله شرودینگر تحول می‌یابد که هیچ مشکل تعبیری را به وجود نمی‌آورد. فقط وقتی ما فضای حالت هیلبرت H جهان را به صورت حاصل ضرب دو فضای حالت هیلبرت $H_1 \otimes H_2$ در نظر بگیریم، و بردار حالت مشترک $|\psi\rangle = |\psi_1\rangle|\psi_2\rangle$ را در نظر بگیریم و بخواهیم به هریک از دو سیستم، یک حالت منفرد نسبت دهیم، در اینجا است که مسئله اندازه‌گیری بروز پیدا می‌کند.

هرچند برای افرادی این رویکرد، از این نظر که در چهارچوب نظریه استاندارد به مسئله اندازه‌گیری می‌پردازد، جذابیت داشته است، با وجود این بسیاری از افرادی که ابتدا به این نظریه اقبال داشتند، در حال حاضر آن را راه‌حل مناسبی برای حل مسئله اندازه‌گیری نمی‌دانند. (Schlosshauer, 2005: 1268-1269) زیرا حتی اگر برهمکنش محیط با سیستم را نیز در نظر بگیریم، ایده همدوس‌زدایی صرفاً به ما می‌گوید برهمکنش‌های زیادی وجود دارد که حالات جایگزیده ماکروسکوپی با حالت‌های مختلفی از محیط جفت می‌شوند. این حالات جایگزیده ماکروسکوپی می‌توانند حالات نشانگر دستگاه اندازه‌گیری در نظر گرفته شوند که جهات مختلف اسپین را ثبت می‌کنند. اما حالا باید گفت که حالت سیستم مرکب الکترون، دستگاه و محیط، مجموع حالات متناظر با محیط با دستگاه جفت شده است که

حالت خود دستگاه هم با مقادیر $1/2 +$ و $1/2 -$ اسپین الکترون، جفت شده است. بنابراین در نهایت باز با یک حالت مرکب کوانتومی نهایی مواجهیم. (Bacciagaluppi, 2007)

اگر بخواهیم از زاویه تحلیل مدلین از مسئله اندازه‌گیری، که شرح آن گذشت، این مدل را ارزیابی کنیم در وهله اول باید ببینیم که مواجهه این مدل با مسئله نتایج چیست. همان‌طور که گفتیم مسئله نتایج در مورد این است که در مکانیک کوانتوم با حالاتی مواجهیم که به اصطلاح حالت سوپریپوزیشنی یا برهم‌نهی نام دارند. این حالت‌ها ترکیب خطی از حالت‌های دیگر هستند، و مهم است که توجه داشته باشیم این حالات خود، یک حالت مستقل به‌شمار می‌روند و با حالت‌هایی که ماهیتاً مستقل نیستند و مخلوطی از حالات دیگر هستند، فرق دارند. مسئله اینجاست که پس از عمل اندازه‌گیری سیستم مورد نظر ما یکی از حالات موجود در ترکیب خطی را اختیار می‌کند و به یک نتیجه معین از مقادیر ممکن برای کمیت مشاهده‌پذیر منجر می‌شود. به عبارت دیگر باید توجه داشت که برخلاف آنچه گاهی گفته می‌شود مسئله اندازه‌گیری این نیست که ما چگونه از حالات مخلوط به حالات برهم‌نهی می‌رسیم. مدلین این مسئله را به‌صراحت بیان کرده است که این مسئله هرچه هست، مسئله اندازه‌گیری نیست و اگر حلی هم برای آن بیان شده نباید آن را حل مسئله اندازه‌گیری در نظر گرفت. خیلی راحت‌تر بگوییم، اگر تعبیر همدوس‌زدایی مسئله را این‌گونه صورت‌بندی کند، این مسئله، مسئله اندازه‌گیری نیست. چون بالأخره یا دو فرض «الف» و «ب» را قبول داریم یا خیر.

اگر قبول کنیم که راه‌حلی برای حصول نتایج متعین از یک حالت نامتعین ارائه نکرده‌ایم و چگونگی رسیدن به یک حالت برهم‌نهی از حالت مخلوط، جواب مسئله اندازه‌گیری نیست. اگر هم «الف» و «ب» را قبول نکنیم که دیگر آنچه برنامه همدوس‌زدایی دنبال می‌کند، برای مسئله اندازه‌گیری اضافی است. چون ادعای برنامه همدوس‌زدایی این بود که با قبول «الف» و «ب» راه‌حلی ارائه کند و با رد «الف» یا «ب»، مسئله حل شده است البته به شرطی که بگوییم «الف» یا «ب» چطور رد می‌شوند و چه چیزی جایگزین آن‌ها می‌گردد.

تا اینجا مسئله اول اندازه‌گیری را بررسی کردیم، حالا وضعیت مدل‌ها در قبال مسئله دوم را بررسی می‌کنیم همان‌طور که قبلاً هم گفته شد، مدل‌های طرح‌شده باید بتوانند قاعده بورن را در تبیین خود جای دهند و توضیحی راجع به آن داشته باشند. از بین مدل‌هایی که تا حالا راجع به آن‌ها صحبت کردیم، مدل متغیرهای نهان از آن جهت که در آن حالت فیزیکی سیستم، چیزی بیش از آن است که در تابع موج انعکاس یافته است، در این صورت

سیستم‌هایی با توابع موج یکسان ممکن است از نقطه نظر فیزیکی متفاوت باشند (به دلیل وجود آن متغیرهای نهان). سیستم‌های با توابع موج نهایی یکسان نیز ممکن است از نظر فیزیکی متفاوت باشند، پس دو آشکارساز ممکن است در نهایت نتایج متفاوتی را ثبت کنند. پس این مدل با مسئله آمار مشکلی ندارد.

در مدل تقلیلی غیرخطی مثل مدل GRW نیز این مسئله با کاتوره‌ای در نظر گرفتن فرایند تقلیل، توضیح داده می‌شود. توابع موج اولیه یکسان به دلیل غیرخطی بودن تابع موج، به صورتی متفاوت از هم، تحول می‌یابند و لذا به نتایج متفاوت منجر می‌شوند. اما مدل‌های حالت نسبی اورت، مثل مدل چندجهانی، در این قسمت مشکل جدی دارند.

حالت نسبی

مدل حالت نسبی در واقع راه دیگری برای حل مسئله اندازه‌گیری است که با فرض کامل بودن مکانیک کوانتوم ارائه شده است و در آن اساساً تقلیلی صورت نمی‌گیرد. اورت در ۱۹۵۷، در واکنش به مسئله اندازه‌گیری، امکان صدق معادلات دینامیکی حرکت را برای کل جهان مطرح کرد و اصل تقلیل را کنار گذاشت و برای توضیح اینکه چگونه ناظر در فرایند اندازه‌گیری در نهایت به نتایج متعین دست می‌یابد، این ایده را مطرح کرد که دستیابی به نتایج متعین تجربی ناشی از تجربه ذهنی ناظرانی است که خود آن‌ها را باید به‌عنوان یک سیستم فیزیکی که با مکانیک کوانتوم توصیف می‌شوند، در نظر گرفت.

به دلیل ابهاماتی که در نظریه اورت وجود داشت، بازسازی‌های مختلفی از آن صورت گرفت که به نظریه‌های چندجهانی، چندذهنی، چندتاریخچه‌ای، واقعیت نسبی مشهور شد. به‌عنوان مثال به‌دنبال کار اورت، دویت (Dewitt)، تعبیری براساس آن ارائه کرد که به نظریه چندجهانی شهرت یافت. بر مبنای این نظریه باید دو مؤلفه حالت ترکیبی را نمایش دو جهان فیزیکی مجزا بدانیم. ایده این است که در جریان اندازه‌گیری تعداد جهان‌های فیزیکی از یکی، به چند تا تکثیر پیدا می‌کند و هریک از مؤلفه‌ها در یکی از این جهان‌ها، که کاملاً مستقل از هم هستند، رخ می‌دهد.

هرچند تابع موج، به‌صورت ترکیبی از حالات است، ولی نکته اینجاست که ناظر همه اجزای تابع موج را نمی‌بیند، بلکه تنها یک جزء آن را می‌بیند، در عین اینکه همه اجزای ممکن وجود دارند و همگی تحقق یافته‌اند. هرگاه یک اندازه‌گیری صورت بگیرد، مثل این است که جهان به مجموعه‌ای از جهان‌ها تقسیم می‌شود که هرکدام یک نتیجه ممکن

اندازه‌گیری است یا به عبارتی در هر یک از جهان‌ها یکی از این نتایج ممکن تحقق یافته است و به همین دلیل چنین تعبیری به تعبیر چندجهانی معروف است. یکی از مشکلات این تعبیر این است که پاسخ به این پرسش که چه جهان‌هایی وجود دارد، به این بستگی پیدا می‌کند که چه جملاتی در بردار حالت کلی وجود دارد و این امر خود به این بستگی دارد که بردار را در چه پایه‌هایی از فضا بنویسیم. درحالی‌که در خود فرمالیسم مکانیک کوانتوم چیزی وجود ندارد که برای یکی از پایه‌های خاص ارجحیتی قرار دهد. لذا اگر قرار باشد امری عینی در مورد این جهان‌ها وجود داشته باشد، باید به نحوی یک اصل کلی به فرمالیسم اضافه شود تا یک پایه خاص را به عنوان پایه درست ارجحیت بخشد و این اصل درعین حال باید تضمین کند که جهان‌هایی را به ما نشان دهد که نتیجه اندازه‌گیری به عنوان واقعیاتی در آن جهان‌ها باشند و لذا مشکل بتوان متغیرهای فیزیکی پیدا کرد که بتوانند چنین چیزی را برای ما فراهم کنند.

مشکل دیگر این است که با در نظر گرفتن جهان‌های متعددی که هر یک از مؤلفه‌های حالت ترکیبی سیستم قرار است در آن جهان‌ها رخ دهند، مفهوم «احتمال» معنای خود را از دست می‌دهد. چون هر یک از این حالات در جهان مربوط به خود قطعاً رخ می‌دهد. (Albert, 1992: 114-115)

مدل حالت نسبی این تفاوت را با تعبیر استاندارد دارد که درعین حال که تابع موج را توصیف کاملی از واقعیت فیزیکی می‌داند، زبان کلاسیکی را برای توصیف اندازه‌گیری مناسب نمی‌داند. البته انتظار این است که این نظریه توضیح دهد، اگر در واقع اصلاً نتایج متعینی وجود ندارد، پس چرا حداقل اینطور «به نظر می‌رسد»؟ تعبیر مختلفی که از این مدل ارائه شده به یک معنا پاسخ‌های مختلف به همین پرسش هستند.

در مورد تعبیر آماری یا آنسامبلی هم به یک معنا اصلاً این مسئله برایش طرح نمی‌شود چون تابع موج در آنجا کامل نیست، یعنی «الف» را نداریم و به طبع مسئله اندازه‌گیری به وجود نمی‌آید که بخواهد حل شود. یعنی نمی‌توانیم بگوییم مسئله حل شده است. یعنی توافقی وجود ندارد که این مدل‌ها چه توضیحی در خصوص قاعده بورن و احتمال خواهند داشت. چون شما وقتی از احتمال رویدادی صحبت می‌کنید که آن رویداد به طور متعین رخ دهد و ما به دلایلی تنها احتمال وقوع آن را حساب می‌کنیم، ولی در تعبیر چندجهانی، همان‌طور که قبلاً اشاره کردیم، اصلاً نتایج متعین ندارید. به طور خلاصه این تعبیر راه‌حل مناسبی برای مسئله آمار ندارد.

با توجه به آنچه گفته شد به نظر می‌رسد تا اینجا مدل GRW و مدل متغیر نهان موفق‌تر از بقیه بوده‌اند. البته تعابیر قابل ذکر دیگری نیز وجود دارد؛ مثل تعبیر وجهی که از جانب مثلاً ون‌فراسن ارائه شده است. متنها این تعبیر با مسئله آخری، یعنی مسئله تأثیر، مشکل دارد. در این تعابیر هم، مثل متغیرهای نهان، متغیرهایی اضافه، به نام «حالت مقدار» در نظر گرفته می‌شود که حاوی مشخصاتی اضافه برای سیستم هستند و تابع موج نیز که ون‌فراسن آن را «حالت دینامیکی» می‌نامد، تقلیل نمی‌یابد، و لاجرم نتایج متعینی که در اندازه‌گیری به آن‌ها می‌رسیم باید در حالت مقدار منعکس شود و به این نحو مسئله نتیجه را از سر می‌گذرانند.

مواجهه آن با مسئله آمار نیز به این شکل است که در اینجا فرض می‌شود که احتمالات نسبت داده‌شده به حالت‌های مقدار، براساس قاعده بورن است ولی جزئیات دینامیکی این حالت‌های مقدار داده نمی‌شود. در واقع تفاوت چنین تعبیری با نظریه متغیرهای نهانی مثل بوهم در همین جاست؛ زیرا در نظریه بوهم دینامیک کلی حاکم بر متغیرهای نهان ارائه می‌شود و بعد نشان داده می‌شود که قاعده بورن در اندازه‌گیری‌ها کار می‌کند و صادق است در حالی که در تعبیر وجهی، تازه بعد از اندازه‌گیری، و با کمک قاعده بورن، احتمالات را به این متغیرهای اضافی (یعنی حالات مقدار) نسبت می‌دهند. به این ترتیب، تعبیر وجهی، دو مسئله اول را به نحوی پشت سر می‌گذارد؛ ولی در خصوص مسئله آخر مشکل پیدا می‌کند. اما مدل GRW و بوهم در این مورد نیز در وضعیت بهتری قرار دارند.

مدلی از نوع GRW، در این مورد مشکلی ندارد، چون در فرایند تقلیل، نتیجه اندازه‌گیری اول حفظ می‌شود. یعنی دینامیکی که در این مدل برای تابع موج در نظر گرفته شده است، اثر اندازه‌گیری اول را به آینده منتقل می‌کند و تابع موج ذره وقتی که به ذره دوم می‌رسد اثر اندازه‌گیری اول را با خود دارد.

در مورد مسئله اثر این را هم باید اضافه کرد که گاهی تصور می‌شود که اگر اندازه‌گیری به یک نتیجه متعین منجر شود، حالا سیستم هم لزوماً باید ویژه‌حالت متناظر با آن نتیجه باشد. اما باید توجه داشت که هرچند اگر سیستم در ویژه‌حالتی از یک مشاهده‌پذیر معین از سیستم باشد، اندازه‌گیری این مشاهده‌پذیر به ویژه‌مقدار متناظر با آن ویژه‌حالت منجر می‌شود، ولی عکس این مطلب الزام‌آور نیست. یعنی نیاز نیست فرض کنیم که به دست آمدن یک نتیجه متعین در اندازه‌گیری مستلزم این است که حالت کوانتومی لزوماً ویژه‌حالت متناظر با آن باشد. این فرض که یک تناظر یک‌به‌یک بین ویژه‌مقادیر، به عنوان نتیجه اندازه‌گیری و ویژه‌حالت‌ها وجود دارد تحت عنوان ارتباط ویژه‌حالت (ویژه‌مقدار)

(Eigenstate – eigenvalue link) (اصل ارتباط و-و) خوانده می‌شود. نظریه متغیرهای نهانی و مودال این اصل را کنار می‌گذارند. در خصوص نظریه بوهم باید گفت که در این نظریه تابع موج واقعاً تقلیل پیدا نمی‌کند تا بگوییم اندازه‌گیری دوم، نتیجه اندازه‌گیری اول را به دست می‌دهد. نتیجه اندازه‌گیری اول صرفاً در متغیرهای نهانی یا اضافی، یعنی همان مکان ذرات، منعکس می‌شود، اما دینامیک آن متغیرها به نحوی است که اطلاعات را به آینده منتقل می‌کند و بنابراین ذره‌ای که در اندازه‌گیری اول برایش اسپین z - بالا پیدا شده، قطعاً در اندازه‌گیری دوم نیز همین مقدار را خواهد داشت.

باید توجه داشت که اصل ارتباط و-و، هم‌ارز اصل تقلیل نیست، چون، مثلاً نظریه‌های حالت نسبی در عین اینکه این اصل را فرض می‌گیرند، با وجود این فرایندی به نام تقلیل در خود ندارند. ولی می‌توان گفت پیش‌فرض اصل تقلیل، پذیرش اصل ارتباط و-و است. شما در آزمایش به نتایج متعین دست پیدا می‌کنید و از اینجا نتیجه می‌گیرید که پس حالت سیستم نباید یک حالت برهم‌نهی باشد، بلکه باید یک ویژه‌حالت متناظر با آن نتیجه متعین باشد و این یعنی پذیرش اصل و-و. پس وقتی شما این اصل را پذیرفتید و به تناظر یک‌به‌یک بین فرمالیسم و تجربه نیز قائل بودید در این صورت باید توضیح دهید که چگونه تقلیل خواهید داشت.

در مجموع با توجه به مقایسه مدل‌ها در خصوص مسئله اندازه‌گیری، به نظر می‌رسد که دو مدل GRW و بوهم، از اقبال بیشتری، نسبت به بقیه برخوردارند. با وجود این باید توجه داشت مدل‌های GRW و بوهم، هرچند در خصوص مسئله اندازه‌گیری موفق بوده‌اند؛ ولی به اعتراف خود طرف‌داران آن‌ها هنوز در خصوص نسبی‌سازی کردن نظریه نیازمند کار بیشتری هستند. به‌علاوه ما مسئله مهم دیگری را نیز در این حوزه داریم و آن مسئله ناموضعی در مکانیک کوانتوم است، بسیاری معتقدند این مسئله هم بی‌ارتباط با مسئله اندازه‌گیری نیست. لذا اگر بخواهیم در ارزیابی کلی مدل‌ها نظر بدهیم و همه این ملاحظات را در نظر بگیریم، تصمیم‌گیری دشوار می‌شود.

موارد فوق نمونه‌هایی از مدل‌های ارائه شده برای حل مسئله اندازه‌گیری بود. در پایان می‌توان گفت از بین این مدل‌ها، مدل GRW و مدل بوهم، به‌رغم مشکلات خاصی که خصوصاً در زمینه تعمیم نسبی دارند، توجه بیشتری را به خود جلب کرده‌اند. شاید از این جهت که این انتظار شهودی را محترم می‌دارند که یک تعبیر قابل قبول از مکانیک کوانتوم باید ارتباط قابل قبولی بین توصیف صوری ما از واقعیت فیزیکی و رویدادهایی که ما در

فضای سه‌بعدی «می‌بینیم» برقرار کند. خود بل از میان مدل‌ها و نظریه‌های مختلف، دو نظریه بوهوم و GRW را دو نظریه مهم و شایسته توجه می‌دانست. (Ghirardi, 2005: 436)

چنان‌که می‌دانیم نظریه استاندارد مکانیک کوانتوم به شکافی بین دنیای کوانتوم و کلاسیکی منجر می‌شود. از منظر استاندارد مسئله اندازه‌گیری نیز به پژوهشی بیشتر نیازی ندارد و باید آن را قبول کرد. به تعبیر بل، تحت تأثیر فلسفه‌های پوزیتیویستی و ابزارگرایانه، بسیاری به این باور رسیده‌اند که نه تنها رسیدن به یک تصویر سازگار از عالم دشوار است، بلکه طی این راه اساساً غلط و غیرحرفه‌ای است. این دیدگاه با گذر زمان بسیار تغییر کرده است. ابتدا راه‌حل‌هایی ارائه شد که بیشتر برای رفع و رجوع مقاصد عملی پیشنهاد می‌شد و بنیان نظری محکمی نداشت. سپس بوهوم آمد و با ارائه مکانیک بوهومی نشان داد که دلیل اصولی و الزام‌آوری برای پذیرش آن شکاف عمیق بین دنیای کلاسیک و کوانتوم وجود ندارد. در همین راستا نظریه‌های تقلیل ارائه شد که حتی مدعی پیش‌بینی‌هایی متفاوت با نظریه استاندارد است، هرچند بنا به ملاحظات تکنولوژیک انجام آن آزمایش‌ها فعلاً امکان‌پذیر نیست. (ibid. 427)

حتی اگر این پیش‌بینی‌ها را در نظر نگیریم باز هم ارائه این مدل‌ها ارزشمند است و کنار گذاشتن این‌ها به صرف اینکه از نظر پیش‌بینی با نظریه استاندارد تفاوتی ندارند، استدلال محکمی نیست. باید توجه داشت که توجه به همین مدل‌ها و بررسی‌های مفهومی بود که بل را به سمت نامساوی مشهورش کشاند. برای بسیاری از فیزیکدانان، جست‌وجوی یک نظریه وحدت‌بخش یک توجیه مهم برای جست‌وجوی چنین مدل‌هایی است، حتی توجیهی قوی‌تر از اینکه ما در سطح ماکرو با برهنه‌ش‌ها مواجه نیستیم.

پی‌نوشت

۱. برای توضیح بیشتر در این مورد رک: Feynman, et al. 1965. P3.
۲. البته بور در جاهای مختلف بیان‌های مختلفی از این اصل مکملیت ارائه داد که می‌توانید به گلشنی (۱۳۸۵/۱۳۶۹) مراجعه کنید.
۳. باید توجه داشت که برخلاف تصور معمول، تعبیر ارتودوکس و رایج از مکانیک کوانتوم همان تعبیر کپنهاگی نیست. بین آنچه تعبیر ارتودوکس یا رایج خوانده می‌شود و آنچه تعبیر کپنهاگی است، تفاوت وجود دارد. در واقع کسانی که می‌شود آن‌ها را طرفدار تعبیر رایج دانست اساساً به بحث‌های تعبیری علاقه‌ای ندارند و از نظر آن‌ها مهم فرمالیسم است. درست است که شاید

تعبیر کپنهاگی منسوب به بور نیز دارای مشکلات جدی باشد، اما حداقل در یک چهارچوب فلسفی تا حدی مشخص بیان می‌شود درحالی‌که در تعبیر رایج چنین چهارچوبی انکار می‌شود و از قضا به همین دلیل که فاقد یک چهارچوب مفهومی و فلسفی مشخصی هستند، در توضیح معضلات نظریه کوانتوم معمولاً یا دچار مانورهای موضعی ad hoc می‌شوند یا اینکه خود این توضیحات مشکلات مفهومی جدیدی را ایجاد می‌کنند.

منابع

اسکوایرز، ی.ج. ۱۳۷۶. *اسرار جهان کوانتومی*، ترجمه کمال‌الدین سید یعقوبی، تهران: سروش.
گلشنی، مهدی ۱۳۸۵/۱۳۶۹. *تحلیلی از دیدگاه‌های فلسفی فیزیکدانان معاصر*، تهران: پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی.

- Albert, D. 1992. *Quantum Mechanics and Experience*, Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Bacciagaluppi Guido 2007. "The Role of Decoherence in Quantum Mechanics", *Stanford Encyclopedia of philosophy*, in <http://plato.stanford.edu>.
- Barrett Jeffrey 2008. "Everett's Relative – State Formulation of Quantum Mechanics", *Stanford Encyclopedia of philosophy*, <http://plato.stanford.edu>.
- Bub, J. 1998. "Quantum measurement problem", *Routledge Encyclopedia of Philosophy*, Version 1.0, London: Routledge.
- Feynman R. P. et al 1965. *Lectures on physics*, Vol. 3, Addison – Wesley Publishing Company.
- Ghirardi G. 2005. *Sneaking a Look at God's Cards: Unraveling the Mysteries of Quantum Mechanics*, Princeton University Press.
- Ghirardi G. 2002. "Collapse Theories", *Stanford Encyclopedia of philosophy*, <http://plato.stanford.edu>.
- Krips Henry 2007. "Measurement in Quantum Theory", *Stanford Encyclopedia of philosophy*, <http://plato.stanford.edu>.
- Lange, M. 2002. *An Introduction to the Philosophy of Physics*, Blackwell Publishers.
- Maudlin, Tim 1995. "Three measurement problems", *Topoi*, Vol. 14. No. 1, pp.7 – 15
- Schlosshauer 2005. "Decoherence, the Measurement Problem, and interpretations of Quantum Mechanics", *Reviews of Modern Physics*, Vol. 76, 1267 – 1305.