فلسفهٔ علم، پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
دوفصل‌نامهٔ علمی ـ پژوهشی، سال ششم، شمارهٔ دوم، پاییز و زمستان ۱۳۹۵، ۱۲۵-۱۵۵

تلقی واقع‌گرایانه از مکانیک کوانتومی

سعید معصومی*

چکیده

در این مقاله، با بررسی مواضعی که در آن‌ها به‌نظر می‌رسد مکانیک کوانتومی با آموزهٔ واقع‌گرایی در تعارض باشد، نشان خواهیم داد که با اتخاذ موضع واقع‌گرایانه‌ای که اکنون بیش‌تر فلاسفه علم درمورد مفهوم واقع‌گرایی علمی دارند می‌توان تلقی واقع‌گرایانه از مکانیک کوانتومی داشت. باتوجه‌به ادبیات علمی و فلسفی درمورد مکانیک کوانتومی می‌توان سه نوع واقع‌گرایی علمی را از هم بازشناسی کرد و براساس این تمایز نشان داده خواهد شد که آن‌چه به‌عنوان تعارض میان واقع‌گرایی و مکانیک کوانتومی شناخته می‌شود براساس تعاریف دوم و سوم واقع‌گرایی است.

کلیدواژه‌ها: واقع‌گرایی علمی، مکانیک کوانتومی، نظریه‌های علمی، مشاهده‌پذیر، مقدار.

۱. مقدمه

در اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم، فیزیک کلاسیک با دو مسئلهٔ مهم روبه‌رو شد که یکی مسئلهٔ کشف اتر و دیگری تابش جسم سیاه بود. تلاش برای حل مسئلهٔ اول منجر به ظهور نظریهٔ نسبیت خاص شد و مسئلهٔ دوم نهایتاً با نظریهٔ مکانیک کوانتومی پاسخ داده شد. هم نظریهٔ نسبیت و هم مکانیک کوانتومی مفروضات بنیادین فیزیک کلاسیک را با چالش جدی مواجه کردند. مفاهیم زمان و مکان (فضا) در نسبیت تعاریف تازه‌ای یافتند. زمان و مکان دیگر اموری مستقل و مجزا در نظر گرفته نمی‌شدند. بااین‌حال، اگرچه نظریهٔ نسبیت در مفاهیم زمان و مکان تجدید نظر کرد، ولی دیگر مفاهیم و مبانی اساسی فیزیک کلاسیک، یعنی موجبیت، واقعیت اشیای فیزیکی، و استقلال مقادیر کمیات قابل‌اندازه‌گیری

* استادیار پژوهشکدهٔ مطالعات بنیادین علم و فناوری، دانشگاه شهید بهشتی، s_masoumi@sbu.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۰۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۰۲

اشیای فیزیکی را هم‌چنان پذیرفت. به این جهت می‌توان گفت فیزیک کلاسیک با نظریهٔ نسبیت تلائم بیش‌تری داشت تا مکانیک کوانتومی.

درواقع مکانیک کوانتومی منجر به بازبینی در تمام این مفاهیم شد. به‌عبارت‌دیگر، مکانیک کوانتومی انقلابی بنیادین در مفروضات فیزیک کلاسیک ایجاد کرد که مجادلات و منازعات فلسفی مهمی از آن ناشی شده است و کماکان ادامه دارد. یکی از آموزه‌های فلسفی مهم که ادعا شده است که مکانیک کوانتومی با آن دچار مشکل است آموزهٔ واقع‌گرایی است.

ادعای محوری این مقاله این است که حداقل سه نوع یا سه قرائت از آموزهٔ واقع گرایی علمی وجود دارد و مکانیک کوانتومی فقط با دو نوع از این آموزه ناسازگار است (یا می‌تواند باشد چون در تعریف دوم ناسازگاری بستگی دارد به این‌که مکانیک کوانتومی بتواند عناصر واقعیت را نشان دهد) و قرائت دیگر واقع‌گرایی با مکانیک کوانتومی به‌طور کلی سازگار است، البته به‌استثنای تعبیر خاصی از مکانیک کوانتومی که عمل خلق هویات را به شعور نسبت می‌دهد.

باتوجه به این قرائت اول یا تعریف اول از واقع گرایی علمی (که البته خود اقسام گوناگونی دارد)، که به‌نظر می‌رسد اکنون تلقی غالب فلاسفهٔ علم از واقع‌گرایی علمی این نوع از واقع گرایی علمی است،[1] رویکردهای واقع‌گرایانه و ضدواقع‌گرایانه به مکانیک کوانتومی خواهیم داشت. به‌عبارت‌دیگر، براساس این قرائت، ضدواقع‌گرادانستن مکانیک کوانتومی معنا ندارد (البته همان‌طورکه ذکر شد به‌استثنای تعبیری از آن که شعور را در واقعیت‌بخشیدن به کمیات دخیل می‌داند که به‌نظر نمی‌رسد تعبیر چندان موجهی باشد)، بلکه این موضع فلسفی درمورد مکانیک کوانتومی است که واقع‌گرایانه یا ضدواقع‌گرایانه تلقی می‌شود و از این منظر تمایزی میان مکانیک کوانتومی و مکانیک نیوتنی وجود ندارد؛ یعنی در مواجهه با مکانیک کوانتومی و نیوتنی هم می‌توان ضدواقع‌گرا بود، هم واقع‌گرا.

ابتدا لازم است که پرسشی اساسی را درمورد این سه تعریف پاسخ دهیم: چرا این سه نوع تعریف تعاریف واقع‌گرایی در نظر گرفته شده‌اند؟ درپاسخ باید گفت، درواقع این سه نوع تعریف از واقع‌گرایی علمی براساس ادبیات فلسفی به‌طور کلی و ادبیات فلسفی و علمی مکانیک کوانتومی به‌طور خاص، طرح شده‌اند که هنگام تعریف هر یک از آن‌ها خاستگاهشان را بیان خواهیم کرد.

در بخش نخست مقاله، دو نوع واقع‌گرایی توضیح داده می‌شود. سپس در بخش دوم به‌طور مختصر مفروضات اساسی فیزیک کلاسیک بیان می‌شود و سازگاری فیزیک

کلاسیک با آموزهٔ واقع‌گرایی روشن می‌شود. در بخش سوم صورت‌بندی و تعبیر در مکانیک کوانتومی را به‌اجمال شرح می‌دهیم و نهایتاً در بخش چهارم به مشکلات واقع گرایی با مکانیک کوانتومی، خصوصاً تعبیر استاندارد آن، می‌پردازیم و آرای برخی از بزرگان و بنیان‌گذاران مکانیک کوانتومی در این موضوع را بررسی خواهیم کرد. بخش پنجم هم نتیجه‌گیری بحث خواهد بود.

۲. واقع‌گرایی علمی

به‌طور کلی می‌توان گفت واقع‌گرایی دیدگاهی است که در آن اعتقاد بر این است که هویات این جهان مستقل از ما وجود دارند و کسب معرفت از آن‌ها امکان‌پذیر است. در همین باره استیون فرنچ (Steven French) می‌گوید:

> این‌که چگونه می‌توان واقع‌گرایی علمی را مشخص کرد خود محل مناقشه است و بنابراین همین مطلب درمورد آن چیزی برقرار است که شکل ارزش‌مند ضدواقع‌گرایانه تلقی می‌شود. اما اگر بخواهیم به‌طور کلی سخن بگوییم واقع‌گرایی علمی می‌پذیرد که واقعیتی مستقل از ذهن آن‌جا در خارج وجود دارد که ما می‌توانیم از چنین واقعیتی آگاهی داشته باشیم و این‌که علم بهترین شکل چنین آگاهی‌ای را فرآهم می‌آورد (1 :2014).

واقع‌گرایی علمی نوع اول را می‌توان به‌صورت زیر تعریف کرد:

تعریف ۱: واقع‌گرایی علمی اذعان به این امر است که هویات مندرج در نظریات علمی مستقل از ذهن وجود دارند و گزاره‌های بیان‌کنندهٔ نظریه‌ها صدق و کذب‌پذیرند و نیز نظریه‌های علمی بالغ و موفق تقریباً صادق‌اند.

واقع‌گرایی علم نوع دوم را به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

تعریف ۲: نظریه‌ای را واقع‌گرایانه می‌نامیم که گزاره‌های آن صدق و کذب‌پذیرند و در آن هر عنصری از واقعیت فیزیکی، که مستقل از ذهن است، همتایی در نظریهٔ فیزیکی دارد. هنگامی‌که بتوانیم بدون هیچ‌گونه اخلال در سیستمی، با قطعیت (یعنی با احتمال برابر با ۱) مقدار یک کمیت فیزیکی را پیش‌بینی کنیم، درآن‌صورت عنصری از واقعیت فیزیکی متناظر با این کمیت فیزیکی وجود دارد.

اگر شرط زیر را به این تعریف اضافه کنیم نظریه، علاوه‌بر واقع گرایانه‌بودن از نوع دوم، موجبیتی هم خواهد بود:

اگر عنصری از واقعیت فیزیکی همتایی در نظریهٔ فیزیکی داشته باشد، آن‌گاه می‌توان در شرایطی با قطعیت (یعنی، احتمال برابر ۱) مقدار آن کمیت را پیش‌بینی کرد.

و واقع‌گرایی علمی نوع سوم را نیز به‌طریق زیر بیان می‌کنیم:

تعریف ۳. نظریه‌ای واقع‌گرایانه است که در آن شروط زیر برقرار باشد:

۱. گزاره‌های نظریه‌های علمی را باید به‌صورت لفظی (literal) در نظر گرفت؛ به‌عبارت‌دیگر این گزاره‌ها صدق و کذب‌پذیرند؛

۲. تمام مشاهده‌پذیرهایی که برای نظریه‌های علمی تعریف شده‌اند مستقل از ذهن‌اند و دارای مقادیر معین در تمام زمان‌ها هستند؛

۳. اگر نظریه‌های علمی دارای کمیتی (مقدار یک مشاهده‌پذیر) باشد، آن‌گاه آن نظریه‌ها این کمیت را مستقل از هر زمینه‌ای از اندازه‌گیری واجد است؛ یعنی مستقل از این‌که چطور مقدار آن نهایتاً اندازه‌گیری می‌شود.

این نوع از واقع‌گرایی قسم دیگری هم دارد و آن این‌که به‌جای گزارهٔ ۳ از گزارهٔ ۳′ استفاده کنیم:

۳′. با تغییر تنظیم قطعه‌ای از ابزاری در دوردست نمی‌توان مقدار دقیق مشاهده‌پذیری مشخص را به مقدار دقیق دیگری تبدیل کرد.[۲]

تفاوت ۳ و ۳′ این است که اولی را می‌توان ملهم از قضیهٔ کوچن ــ اشپکر دانست و بعدی را ملهم از قضیهٔ بل. یک مسئله مهم در این‌جا سنجش نسبت میان این تعاریف است. برای قرار گیری در موقعیت بهتر برای مقایسهٔ دو نظریه باید ابتدا قدری درمورد این دو نوع واقع‌گرایی و الزامات آن‌ها توضیحاتی ارائه دهیم.

۱.۲ نوع اول واقع‌گرایی

در تعریف اول از واقع‌گرایی علمی سه جنبهٔ اساسی مدنظر است که در ادبیات فلسفهٔ علمی معاصر آن‌ها را به‌ترتیب چنین می‌شناسند: ۱. جنبهٔ مابعدالطبیعی (metaphysical)؛ ۲. جنبهٔ معناشناختی (semantical)؛ و ۳. جنبهٔ معرفت‌شناختی (epistemological). سیلوس (Psillos) در کتاب خود با عنوان *واقع‌گرایی علمی: چگونه علم در پی حقیقت می‌رود* (*Scientific Realism: How Science Tracks Truth*) این سه جنبه را به‌صورت زیر بیان می‌کند:

۱. دیدگاه متافیزیکی مبین آن است که جهان دارای ساختار معین و طبیعی مستقل از ذهن است؛

۲. دیدگاه معناشناختی نظریه‌های علمی را در شکل ظاهری آن، توصیفاتی در نظر می‌گیرد که در حیطهٔ موردنظر، یعنی حوزهٔ مشاهده‌پذیرها (observables) و مشاهده‌ناپذیرها (non-observables) دارای ارزش صدق‌اند. بنابراین نظریه‌های علمی قابل صدق و کذب‌اند؛

احکام نظری (theoretical assertions) به اظهاراتی درمورد رفتار مشاهده‌پذیرها تحویل‌پذیر نیستند؛ هم‌چنین آن‌ها صرفاً ابزاری برای برقراری ارتباط میان مشاهده‌پذیرها نیستند. عبارت نظری که در نظریه‌ها یافت می‌شوند دارای مرجع واقعی عرفی‌اند. بنابراین اگر نظریه‌های علمی صادق باشند، هویات مشاهده‌ناپذیری که آن‌ها در نظر می‌گیرند (فرض می‌کنند) جهان را اشغال کرده‌اند؛

۳. موضع معرفتی نظریه‌های علمی بالغ و موفق در پیش‌بینی را دارای تأیید خوب و به‌طور تقریبی درمورد جهان صادق می‌داند؛ بنابراین هویات مفروض این نظریه‌ها یا هویاتی که خیلی شبیه به آن‌هایند واقعاً در طبیعت وجود دارد (Psillos 1999: xvii).

شایان ذکر است چنین نیست که تمام مدافعان آموزهٔ واقع‌گرایی علمی با تلقی نخست به هر سه مؤلفهٔ واقع‌گرایی علمی اعتقاد و باور داشته باشند، بلکه ممکن است برخی صرفاً به یک یا دو مؤلفهٔ آن معتقد باشند و بقیه را رد کنند. برای مثال، می‌توان صرفاً به مؤلفهٔ اول واقع‌گرایی علمی باور داشت و دو مؤلفه بعدی را انکار کرد. دراین‌صورت مدافع این موضع واقع‌گرای شیئی (entity realist) نامیده می‌شود. توجه به نکتهٔ بالا دارای اهمیت است؛ زیرا برخی از فیلسوفان و دانشمندانی که آن‌ها را ضدواقع‌گرا می‌نامند درحقیقت بعضی از مؤلفه‌های واقع‌گرایی را انکار می‌کنند. به همین دلیل آن‌ها را فقط از جهاتی می‌توان ضدواقع‌گرا نامید، ولی از جهات دیگر واقع‌گرا هستند.

البته به‌نظر می‌رسد اذعان به مؤلفهٔ اول واقع‌گرایی علمی، یعنی فرض وجود اشیای مستقل از ذهن یا چیزی که به‌لحاظ هستی‌شناختی شأن شیء را دارا باشد، مانند ساختاری که برای برخی فیلسوفان ازجهت هستی‌شناسی مبنایی‌تر از شیء است، برای واقع‌گرادانستن شخص ضروری است.

کارل پوپر واقع‌گرایی را چنین تعریف می‌کند:

> موضوع محوری در این‌جا واقع‌گرایی است. یعنی اذعان به واقعیت جهان فیزیکی که ما در آن زندگی می‌کنیم، این واقعیت که این جهان مستقل از ما وجود دارد و براساس بهترین فرضیه‌های ما پیش از این‌که زندگی وجود داشته باشد موجود بوده است و این‌که می‌دانیم جهان فیزیکی باوجود گذشت مدت زمان بسیار از نابودی ما موجود خواهد بود (Popper 1982: 2).

ملاحظه می‌کنید که پوپر در عبارات بالا واقع‌گرایی را صرفاً براساس مؤلفهٔ هستی‌شناختی آن تعریف کرده است. بااین‌حال ما در این مقاله وقتی از لفظ واقع‌گرایی نوع اول بدون پسوند استفاده می‌کنیم، منظورمان اذعان به هر سه مؤلفهٔ آن است.

تعریف دیگری از واقع‌گرایی علمی وجود دارد که متعلق به ون فراسن (van Fraassen) است. وی معتقد است که صدق نقش مهمی در مفهوم واقع‌گرایی علمی بازی می‌کند، هم‌چنین هر ارائه‌ای از این آموزهٔ فلسفی، باید روشن‌کنندهٔ معنای پذیرش (acceptance) نظریهٔ علمی باشد (van Fraassen 1980: 8).

بر این اساس، تعریف وی از واقع‌گرایی علمی بیان‌گر آن است که هدف علم ارائهٔ داستانی لفظاً صادق از جهان است (این بخش از تعریف نمایان‌گر نقش صدق است). هم‌چنین معنای پذیرش یک نظریهٔ علمی باور به صدق آن نظریه است (قسمت اخیر معنای پذیرش را در واقع‌گرایی علمی روشن می‌سازد). تعریف واقع‌گرایی علمی که ون فراسن در کتاب *تصویر علمی* (*Scientific Image*) ارائه کرده است چنین است: «هدف علم در نظریه‌های خود ارائهٔ تصویری است لفظاً صادق از آن‌چه جهان مانند آن است و پذیرش نظریهٔ علمی شامل این باور است که آن [داستان] صادق است» (ibid.).

ملاحظه می‌کنید که با تعریف ون فراسن واقع‌گرایی صرفاً مربوط است به باور فردی که به یک نظریهٔ علمی باور دارد؛ یعنی نظریه به‌خودی‌خود نه واقع‌گرایانه است و نه ضدواقع‌گرایانه؛ به‌عبارت‌دیگر، با این تعریف، نظریه‌های واقع‌گرایانه و ضدواقع‌گرایانه نخواهیم داشت، بلکه صرفاً این افرادند که واقع‌گرا یا ضدواقع‌گرا هستند. دراین‌صورت فردی می‌تواند به نظریهٔ مکانیک کوانتومی و تعبیر استاندارد آن باور داشته باشد (که صادق است) و بنابراین واقع‌گرا باشد. بنابراین، این تعریف هم درزمرهٔ تعاریف نوع اول واقع‌گرایی قرار می‌گیرد.

باتوجه‌به تعریف نوع اول از واقع‌گرایی علمی دو نکته واجد اهمیت است: نکتهٔ اول درمورد عبارات نظری است. در این تعریف، به وجود مرجع عرفی (putatively referring) برای عبارات نظری یا به‌اصطلاح (البته نادرست) عبارات مشاهده‌ناپذیر تصریح شده است. توضیح این‌که به‌طور کلی دو نوع از مفاهیم یا عبارات وجود دارد: عبارات غیرنظری و عبارات نظری. عبارات غیرنظری عباراتی دربارهٔ اشیای مشاهده‌پذیرند. مانند درخت و لیوان و اسب. دستهٔ دیگری از عبارات یا مفاهیم وجود دارند که درمورد اشیا یا هویات مشاهده‌ناپذیرند؛ مانند الکترون و پروتن و نوترون. البته در این‌که آیا این تقسیم‌بندی قاطع و کاملاً مشخص و قابل‌قبول است یا نه اختلافات و نزاع های فراوانی میان فیلسوفان علم وجود داشته است، ولی به‌نظر می‌رسد که وجود مرز قاطع میان این دو دسته از مفاهیم

چندان قابل‌دفاع نباشد. بااین‌حال، می‌توان در حوزه‌هایی پذیرفت که اشیایی مشاهده‌پذیر یا مشاهده‌ناپذیرند؛ مثلاً لیوان یک امر مشاهده‌پذیر است و الکترون مشاهده‌ناپذیر. البته ممکن است برخی مولکول‌ها وجود داشته باشند که در حالت مرزی قرار داشته باشند و نتوان آن‌ها را دقیقاً به یکی از این دو دسته متعلق دانست، ولی این بدان معنی نیست که مشاهده‌پذیربودنِ هیچ هویتی را نمی‌توان معین کرد.

پرسش اصلی در این‌جا این است: چه چیزی باعث می‌شود تا ما به وجود مرجع واقعی برای عبارات یا مفاهیم نظری باور داشته باشیم، اگر نتوانیم علی‌الاصول آن‌ها را مشاهده کنیم. این پرسش به این جهت مهم است که تجربه‌گرایان فقط به وجود هویات مشاهده‌پذیر تعهد معرفتی دارند و صرفاً گزاره‌های علمی‌ای را که درمورد آن‌ها هستند صادق می‌دانند. وجود مرجع واقعی برای عبارات نظری از مواضع مهم موردمناقشهٔ واقع‌گرایان نوع اول و ضدواقع‌گرایان نوع اول است. ضدواقع‌گرایان نوع اول به وجود مرجع واقعی برای عبارات نظری قائل نیستند، بلکه بنابر مشرب فلسفی خود آن‌ها را تحویل‌پذیر به جملات مشاهدتی، یا ابزار مناسبی برای تلخیص داده‌ها، یا ساخته و پرداختهٔ جامعهٔ علمی، یا واجد کفایت تجربی می‌دانند. اما واقع‌گرایان به وجود واقعی و مستقل از ذهنِ عبارات نظری قائل‌اند (البته باید توجه داشت که قبول مرجع واقعی یا رد آن به جنبهٔ مابعدالطبیعی واقع‌گرایی علمی مربوط می‌شود). در این مورد هر سه نوع واقع‌گرایی اشتراک دارند و به وجود مستقل از ذهن هویات فوق اذعان دارند.

نکتهٔ دوم موضوع صدق است. باید توجه داشت که مفهوم صدق هم جنبهٔ معناشناختی دارد، هم جنبهٔ معرفت‌شناختی. جنبهٔ معناشناختی آن مربوط می‌شود به مؤلفهٔ دومِ واقع‌گرایی علمی؛ یعنی گزاره‌های علمی دارای ارزش صدق و کذب‌اند، بنابراین گزاره‌هایی اخباری‌اند که یا صادق‌اند یا کاذب، و جنبهٔ معرفت‌شناختی آن هم مربوط می‌شود به مؤلفهٔ سوم واقع‌گرایی علمی؛ یعنی نظریه‌های علمی بالغ و موفق به‌طور تقریبی صادق‌اند.

نکتهٔ مهم درمورد تعریف صدق این است که در تعریف نوع اول از واقع‌گرایی پاسخ به این پرسش که آیا گزاره‌ای معین صادق است یا نه با نظریه‌های علمی معین می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، ما گزاره‌های علمی را صادق یا تقریباً صادق می‌دانیم و این فرض درواقع به این معنی است که صدق را نظریه‌های علمی معین می‌کنند. ولی در تعاریف دوم و سوم نظریه‌هایی که شروط تعاریف را برآورده نکنند واقع‌گرایانه نیستند؛ یعنی واقعیت مستقل از ذهن را نشان نمی‌دهند و بنابراین مطابق با واقعیت مستقل از ذهن هم نخواهند بود؛ یعنی، صادق نخواهند بود. این تمایز مهم تعریف نوع اول و تعاریف نوع دوم و سوم است.

۲.۲ نوع دوم واقع‌گرایی علمی

این نوع از واقع‌گرایی را با مقالهٔ EPR و موضع نویسندگان مقاله درمورد واقعیت توضیح می‌دهیم. اینشتاین به دلیل خصلت احتمالاتی مکانیک کوانتومی نظر مساعدی به این نظریه نداشت. ازاین‌رو درحاشیهٔ پنجمین کنفرانس سولوی که در ۱۹۲۷ برگزار شد، با ارائهٔ تعدادی آزمایشی ذهنی، درپی اثبات نقض‌پذیربودن روابط عدم قطعیت هایزنبرگ بود؛ البته وی موفق به این کار نشد و این مباحثات در کنگرهٔ ششم سولوی در ۱۹۳۰ هم ادامه یافت. باز هم اینشتاین کام‌یاب نشد و بور در دفاع از مکانیک کوانتومی و تعبیر استاندارد آن موفق بود، باوجوداین، او باز هم قانع نشد، اما بعدها راه‌برد خود را از یافتن تناقض در مکانیک کوانتومی به نشان‌دادن ناقص‌بودن آن تغییر داد و به این منظور در ۱۹۳۴ مقالهٔ معروف EPR را هم‌راه با دو تن دیگر، یعنی پودولسکی (Podolsky) و روزن (Rosen)، نوشت (گلشنی ۱۳۸۵: ۱۷۸–۱۷۹).

در این مقاله نویسندگان «گاهی از کامل‌بودن نظریه سخن می‌گویند و گاهی از کامل‌بودن توصیف حاصل از نظریه درمورد واقعیت فیزیکی یاد می‌کنند. [درواقع می‌توان گفت:] آن‌ها اولی را به‌منزلهٔ کوته‌نوشتی برای دومی به‌کار می‌برند» (Hughes 1989: 158). هم چنین آن‌ها معتقدند که هر معنایی که به عبارت «کامل» بدهیم باید دارای این شرط لازم باشد که «هر عنصری از واقعیت فیزیکی باید همتایی در نظریهٔ فیزیکی داشته باشد» (EPR 1934). فرض مقاله این است که نظریهٔ فیزیکی باید بازنمایی واقعیت فیزیکی باشد و مفاهیم فیزیکی‌ای که نظریه با آن‌ها کار می‌کند به‌گونه‌ای لحاظ می‌شوند که متناظر با واقعیت عینی‌اند (.ibid).

رابطه‌ای که آن‌ها بین واقعیت فیزیکی و بازنمایی ریاضی نظریه ارائه می‌دهند چنین است:

در مدلی که از ریاضیات نظریه به‌دست می‌آید فقط برخی عناصر خصوصیات واقعیت فیزیکی را نشان می‌دهند (.ibid). به‌عبارت‌دیگر، برخی مفاهیم موجود در نظریه نمایانندهٔ عنصری از واقعیت فیزیکی نیستند. اکنون پرسش اساسی این است: در چه صورتی مفهومی در نظریهٔ بازنمایی عنصری از واقعیت فیزیکی است؟ پاسخ نویسندگان مقاله همان چیزی است که از آن با عنوان معیار واقعیت EPR یاد می‌شود: «اگر بدون هرگونه اخلال در سیستمی بتوانیم با قطعیت (یعنی با احتمال برابر با واحد) مقدار یک کمیت فیزیکی را پیش‌بینی کنیم، درآن‌صورت عنصری از واقعیت فیزیکی متناظر با این کمیت فیزیکی وجود دارد» (.ibid).

آن‌ها در این مقاله از دو مقدمه استفاده می‌کنند: نخست، اگر مکانیک کوانتومی کامل باشد، درآن‌صورت کمیات ناسازگار[۳] نمی‌توانند دارای مقادیر واقعی هم‌زمان باشند؛ دوم، اگر مکانیک کوانتومی کامل باشد، درآن‌صورت کمیات ناسازگار به ویژه مکان و اندازهٔ حرکت دارای مقادیر واقعی هم‌زمان‌اند (Fine 2013).

ملاحظه می‌شود که این دو مقدمه آشکارا ناسازگارند. بنابراین از این مقدمات نتیجه می‌شود که مکانیک کوانتومی ناکامل است. البته هر دوی این مقدمات باید توجیه شوند و نویسندگان مقاله این کار را انجام می‌دهند؛ ولی توجیه مقدمهٔ دوم که کار اصلی مقالهٔ ERP است مناقشه‌برانگیز شده است و مدافعان مکتب کپنهاگی آن را نمی‌پذیرند (ibid.).

باید توجه کرد که اگر ما موضع افرادی چون بور را که ضد موضع نویسندگان مقالهٔ EPR است اتخاذ کنیم، به‌نظر می‌رسد با مقدمهٔ اول مشکل چندانی نداشته باشیم. چون حتی اگر معیاری را که در مقاله شرط لازم برای کامل‌بودن است بپذیریم، به‌سادگی می‌توانیم فرض کنیم هر مفهومی که در نظریه وجود ندارد عنصری از واقعیت نیست و ازطرف‌دیگر صورت‌بندی مکانیک کوانتومی نشان می‌دهد که مشاهده‌پذیرهای ناسازگار دارای مقادیر هم‌زمان نیستند. نکته این‌جاست که دو گزارهٔ زیر از تعریف دوم واقع‌گرایی حاصل می‌شوند و نویسندگان مقاله معتقدند که می‌توان مقدم گزارهٔ برا محقق کرد:

الف) اگر مکانیک کوانتومی کامل باشد، آن‌گاه مشاهده‌پذیرهای ناسازگار که نمی‌توانند هم‌زمان خوش‌تعریف باشند هم‌زمان وجود ندارند؛

ب) اگر بتوانیم مقدار مشاهده‌پذیرهای ناسازگار را با احتمال ۱ و بدون هیچ‌گونه اختلالی هم‌زمان پیش‌بینی کنیم، آن‌گاه واقعیت هم‌زمان دارند، ولی مکانیک کوانتومی نمی‌تواند به‌طور هم زمان وجود آن‌ها را بپذیرد؛ پس نظریه‌ای که نمی‌تواند عنصری از واقعیت را در خود جای دهد کامل نیست.

می‌توان گزاره‌های الف و ب را براساس تعریف دو از واقع‌گرایی به‌دست آورد. برای روشن‌شدن استدلال، تعریف دوم واقع‌گرایی را به صورت مقدمات یک استدلال می‌نویسیم.

مقدمهٔ ۱. اگر بدون هرگونه اخلالی در یک سیستم بتوانیم با قطعیت (احتمال برابر ۱) مقدار کمیت فیزیکی f_A را پیش‌بینی کنیم، آن‌گاه عنصری چون A از واقعیت متناظر این کمیت وجود دارد؛

مقدمهٔ ۲. اگر A عنصری از واقعیت فیزیکی باشد که مستقل از ذهن است، آن‌گاه باید همتایی چون f_A در نظریهٔ فیزیکی داشته باشد؛

مقدمهٔ ۳. در نظریهٔ واقع‌گرایانه گزاره‌های نظریه صدق و کذب‌پذیرند.[۴]

مقدمهٔ ۱ را معمولاً «معیار واقعیت EPR» می‌نامند (.ibid) که اگر برقرار باشد می‌توانیم مطمئن شویم که عنصری از واقعیت دارای متناظری در نظریه است. مقدمهٔ ۲ شرط کامل‌بودن نظریه را می‌دهد. درواقع، به‌راحتی می‌توان ملاحظه کرد که مقدمات ۱ و ۲ گزاره‌های الف و ب را نتیجه می‌دهند.

در تعریف دومِ واقع‌گرایی علمی دو نکتهٔ زیر حائز اهمیت است:

۱. کامل‌بودن ارتباط نزدیکی با صدق دارد. درواقع، می‌توان گفت نظریهٔ کامل نظریه‌ای است که صادق باشد؛ به این معنی که در یک نظریهٔ کامل جهان ممکن توصیف‌شده توسط آن نظریه با جهان واقعی و بالفعل مطابقت دارد و هر عنصر از جهان واقعی همتایی در آن نظریه دارد؛

۲. نکتهٔ بعدی درمورد وجود عبارات نظری است. عبارات نظری عضو مجموعه‌ای از عبارات در نظریهٔ فیزیکی است که از آن با عنوان «همتای عنصر واقعیت در نظریه» یاد می‌شود. عنصری از واقعیت که متناظر عبارات نظری است همان مرجع عبارات نظری خواهد بود.

۳.۲ واقع‌گرایی نوع سوم

این واقع‌گرایی براساس مفهوم متغیرهای نهان (hidden variable) بیان شده است. در بیان این تعریف مفهومی از واقع‌گرایی علمی در نظر گرفته شده است که مراد فیلسوفان و دانشمندان از آموزهٔ واقع‌گرایی علمی است که در بیان دو قضیهٔ مهم عدم امکان متغیرهای نهان (no go theorems) در مکانیک کوانتومی آمده است.[۵]

خصلت احتمالاتی پیش‌بینی های مکانیک کوانتومی، برخلاف موجبیتی‌بودن مکانیک کلاسیک و برخی مشکلات مفهومی، برخی از دانشمندان را بر آن داشت وجود متغیرهایی را در نظر بگیرند که با فرض آن‌ها بتوان پیش‌بینی‌های دقیق انجام داد. اگر چنین امری ممکن باشد، احتمالات در مکانیک کوانتومی هم‌چون احتمالات در مکانیک آماری (statistical mechanics) کلاسیک ناشی از جهل خواهد بود و احتمالات عینی منتفی خواهد شد.

آلبرت اینشتاین از دانشمندانی بود که این راه‌برد را دنبال می‌کردند. «اینشتاین اظهار می‌داشت مکانیک کوانتومی تقریباً وضعیتی مشابه با مکانیک آماری در چهارچوب مکانیک کلاسیک خواهد یافت» (Sheldon 2006).

متغیرهای یادشده را متغیرهای نهان می‌نامند. به‌طور کلی دو رده از نظریه‌های متغیر نهان وجود دارد: نظریه‌های متغیر نهان غیرزمینه‌ای (non-contextual)؛ نظریه‌های متغیر نهان زمینه‌ای (contextual). در نظریه های غیرزمینه‌ای، حالت کامل یک سیستم مقدار یک مشاهده‌پذیر یا کمیت فیزیکی را، که متناظر است با مقدار ویژهٔ عمل‌گری هرمیتی در فضای هیلبرت، که با روشی مقبول برای اندازه‌گیری آن حاصل می‌شود، معین می‌کند، بدون توجه به این‌که چه مشاهده‌پذیرهایی به‌طور هم زمان اندازه‌گیری می‌شوند یا این‌که حالت کلی سیستم و ابزار اندازه‌گیری چه چیزی می‌تواند باشد (Shimony 2009). در نظریه‌های زمینه‌ای مقدار به دست‌آمده برای یک کمیت فیزیکی به این‌که چه کمیاتی با هم اندازه‌گیری می‌شوند و این‌که حالت کامل ابزار اندازه‌گیری چیست بستگی دارد. مثال نوع نخست نظریه‌ها نظریه‌های متغیر نهان کوچن ـ اشپکر است و مثال دوم نظریهٔ بوهمی است (.ibid).

اما قضایایی در مکانیک کوانتومی به‌اثبات رسیده است که نشان می‌دهد اگر مکانیک کوانتومی صادق باشد، به‌نظر می‌سد که ارائهٔ نظریهٔ متغیرهای نهان امکان‌پذیر نباشد. اولین گونه از قضایای عدم امکان را فون نویمان در ۱۹۳۲ در کتاب خود، *مبانی ریاضیاتی مکانیک کوانتومی* که اساس ریاضی مکانیک کوانتومی را بنا نهاد، ارائه کرد. وی ادعا کرد که به‌شکل ریاضیاتی اثبات کرده است که نمی‌توان پارامترهای نهانی تعریف کرد که ملاحظات آماری آنسامبل هم‌گن (homogeneous ensemble) صرفاً متوسطی از تمام حالات واقعی‌ای باشد که این آنسامبل از آن‌ها ترکیب یافته باشند (Von Neumann 1932: 324). اما جان بل نشان داد که «اثبات صوری فون نویمان نتیجهٔ غیرصوری او را توجیه نمی‌کند» (Bell 1966).

اما قضیهٔ کوچن ـ اشپکر با مفروضات دیگری آغاز می‌کند. این قضیه تناقضی میان دو گزاره، که ظاهراً برای واقع‌گرایان و معتقدان به نظریهٔ متغیرهای نهان قابل‌قبول‌اند، و مکانیک کوانتومی برقرار می‌کند. بنابراین به‌لحاظ منطقی یکی از این دو باید انکار شود تا تناقض از میان برود. اولین گزاره چنین زیر است: «VD[۶] تمام مشاهده‌پذیرهایی که برای سیستمی از مکانیک کوانتومی تعریف شده‌اند دارای مقادیر معین در تمام زمان‌ها هستند» (Held 2006).

این گزاره‌ای است که به‌نظر می‌رسد قائلان به وجود متغیرهای نهان باید آن را بپذیرند. گزارهٔ دومی که در قضیهٔ کوچن ـ اشپکر از آن استفاده شده است چنین است: «NC[۷] اگر سیستم مکانیک کوانتومی دارای خاصیتی (مقدار یک مشاهده‌پذیر) باشد، آن‌گاه آن سیستم این خاصیت را مستقل از هر زمینه‌ای از اندازه‌گیری واجد است. یعنی مستقل از این‌که چطور آن مقدار نهایتاً اندازه‌گیری می‌شود» (.ibid).

این گزاره نیز در بادی نظر چنین می‌نماید که دارای محتوای واقع‌گرایانهٔ قابل‌قبولی درمورد اندازه‌گیری فیزیکی باشد، که از خواص اساسی علم است. این آموزه «استقلال زمینه‌ای» نام دارد. ملاحظه می‌شود که در تعریف سوم عیناً از این دو گزاره استفاده کرده‌ایم.

قضیهٔ کوچن ـ اشپکر تناقضی میان مکانیک کوانتومی و VD+NC برقرار می‌کند. پس قبول مکانیک کوانتومی ما را به انکار یکی از دو گزارهٔ NC و VD وادار می‌کند. به‌نظر می‌رسد که ارائهٔ تعبیر واقع‌گرایانه از مکانیک کوانتومی مبتنی‌بر دوگزارهٔ فوق باتوجه‌به این قضیه با چالش جدی مواجه است. بنابراین برای حل تناقض و حفظ واقع‌گرایی باید تعریف سوم را به‌نحوی تغییر داد و قرائتی جدید از آموزهٔ واقع‌گرایی ارائه کرد؛ مثلاً VD را برای واقع‌گرایی شرط لازم ندانیم.

قضیهٔ معروف بعدی عدم امکان قضیهٔ بل است که «نامی است بر مجموعه‌ای از نتایج که همگی نشان‌دهندهٔ عدم امکان ارائهٔ تعبیری واقع‌گرایانه و موضعی برای مکانیک کوانتومی‌اند» (Shimony 2009). در این قضیه، با فرض مکانیک کوانتومی وجود متغیرهای نهان، موضعیت، و واقع‌گرایی، به نامساوی‌هایی می‌رسیم که این نامساوی‌ها در تجربه نقض شده‌اند؛ بنابراین، تجربه ارائهٔ بیانی از مکانیک کوانتومی را که متعهد به این سه فرض باشد رد می‌کند. در مقاله ۱۹۶۴ بل، واقع‌گرایی با اضافه‌کردن حالتی کامل (complete state) به حالت کوانتومی بیان می‌شود (Bell 1964). این حالت نتایج اندازه‌گیری را در سیستم معین می‌کند (Shimony 2009) و موضعیت (locality) شرطی است که روی سیستم‌های مرکب گذاشته می‌شود که دارای اجزائی‌اند که به‌طور فضایی از هم جدایند (ibid.).

در ارائهٔ این تعریف هر دوی این قضایا مدنظر بوده‌اند و به این دلیل دو قسم از این تعریف را ارائه کردیم که یکی ملهم از قضیهٔ کوچن ـ اشپکر است و دیگری ملهم از قضیهٔ بل. اما به‌دلیل‌این‌که وجه ممیزهٔ مهم این تعریف شرط دوم آن است که در هر دو قسم این تعریف وجود دارد، این اقسام ذیل تعریف سوم قرار گرفته‌اند.

۳. مقایسه میان تعاریف واقع‌گرایی

دیدیم که کامل‌بودن را می‌توان معادل صادق‌بودن دانست و تقریباً صادق را هم می‌توان با تقریباً کامل مرادف گرفت که ربط مؤلفهٔ معرفت‌شناختی تعریف اول را با مفهوم کامل‌بودن نشان می‌دهد. هم‌چنین شروط دوم و سوم (که خود دو قسم داشت) از تعریف سوم به‌نوعی نمایانندهٔ مفهوم صدق است.

درعین‌حال، مقدمهٔ دوم تعریف دوم (در تعریفی از آن که به‌صورت مقدمات استدلال بیان شد، بنگرید به بخش ۱.۲) به‌نوعی مبین مؤلفهٔ متافیزیکی تعریف اول است و شرط دوم از تعریف سوم را می‌توان مرتبط با این دو دانست.

مقدمهٔ سوم تعریف دوم و شرط اول از تعریف سوم هم آشکارا متناظر مؤلفهٔ معناشناختی تعریف اول‌اند.

اما بااین‌حال این سه تعریف موارد افتراق مهمی دارند، ازجمله موارد زیر:

۱. همان‌طورکه گفته شد، صدق در تعریف اول از واقع‌گرایی با نظریه‌های علمی معین می‌شود، ولی در تعاریف دوم و سوم برای واقع‌گرابودن شرایطی وجود دارد که یک نظریه باید برآورده کند؛ به‌عبارت‌دیگر، شرایطی وجود دارد تا بتوان نظریه‌های را صادق یا تقریباً صادق دانست؛

۲. بنابر تعریف اول نظریه به‌خودی‌خود، واقع‌گرایانه یا ضدواقع‌گرایانه نیست، بلکه این موضع فلسفی درمورد نظریه است که واقع‌گرایانه یا ضدواقع‌گرایانه است. اما بنابر تعریف دوم و سوم نظریه می‌تواند واقع‌گرایانه باشد یا ضدواقع‌گرایانه و همان‌طورکه درادامه خواهیم دید، مکانیک نیوتنی نظریه‌ای واقع‌گرایانه است، درصورتی‌که مکانیک کوانتومی نظریه‌ای ضدواقع‌گرایانه است؛

۳. براساس تعریف اول به‌لحاظ واقع‌گرایانه‌بودن یا نبودن هیچ تفاوتی میان تعابیر[۸] گوناگون نظریه وجود ندارد (به‌استثنای تعابیری که در آن شعور آدمی را در واقعیت‌بخشی به هویات عالم دخیل می‌دانند که چندان تعابیر موجهی نیستند)، ولی در نگاه دوم و سوم تعابیر گوناگون می‌توانند واقع‌گرایانه و ضدواقع‌گرایانه شوند؛

۴. در دیدگاه اول و دوم لزومی ندارد که کمیات فیزیکی همواره و در تمام زمان‌ها داری مقدار باشند، درحالی‌که این امر در نگاه سوم لازمهٔ واقع‌گرایانه‌بودن خود نظریه است.

برای روشن‌شدن تمایز سه تعریف، که بر چیستی نظریهٔ علمی و تعبیر آن متکی است، باید کمی این مفاهیم را توضیح دهیم.

۴. صورت‌بندی و تعبیر

پرسش اساسی این بخش چیستی صورت‌بندی و تعبیر است. پاسخ به این پرسش نیازمند آن است که ابتدا روشن کنیم که نظریهٔ علمی چیست؟ در فلسفهٔ علم معاصر، سه دیدگاه در این مورد وجود دارد: ۱. دیدگاه نحوی؛ ۲. دیدگاه معناشناختی؛ و ۳. دیدگاه عمل‌گرایانه (GrønfeldtWinther 2015). رویکرد سوم به‌تازگی در ادبیات فلسفی ظهور پیدا کرده است.

رویکرد نحوی یا دیدگاه متداول (نامی که پاتنم بـه آن داد) به‌لحاظ تاریخی مقدم بـر رویکـرد معناشـناختی و اکنـون جریانی مغلوب است. در این نظریه، نظریه‌ای چون T مجموعه‌ای از گزاره ها (قضایا) در یک زبان ویژه است. مجموعـهٔ عبارات این زبان به دو بخش، یعنی دو زیرمجموعه از عبارات، تقسیم می‌شود: ۱. مجموعهٔ عبارات مشاهدتی؛ ۲. مجموعهٔ عبارات نظری. اهمیت تجربی هر نظریه (empirical import) در نتایج مشاهدتی آن است و مجموعهٔ مشاهدتی نظریه واجد معنای تجربی یا شناختی (cognitive) نظریه است. در این ره‌یافت، مجموعهٔ گزاره‌های نظریه از مجموعهٔ اصول موضـوع اسـتخراج مـی‌شود. به‌بیان دقیق‌تر، نظریهٔ T مجموعه‌ای از گزاره‌ها در زبـانی چـون L اسـت کـه تحت استلزام منطقی بسته باشد (Enderton 2001: 155). و زیرمجموعه‌ای از نظریهٔ T کـه بتوان از آن، با استلزام منطقی، کل نظریه را (تمام گزاره های آن را) اسـتخراج کـرد اصـول موضوع (axioms) آن نظریه است. عبارات نظری با قواعد تناظر (correspondence rules) تعبیر مشاهدتی جزئی (partial) می‌یابند که به این ترتیب واژگان (vocabulary) نظری بـه واژگان مشاهدتی مربوط می‌شود (معصومی ۱۳۹۴). رویکرد نحوی اشکالات مهمی داشت، ازجمله این‌که بازسازی نظریه براساس آن بسیار غیرعملی بود و تمایز مشاهدتی و غیرمشاهدتی چندان خوش‌تعریف نیسـت؛ توضـیحی که این دیدگاه درمورد مدل‌ها و نقش آن‌ها در علم می دهد رضایت‌بخش نیست و ...؛ ازایـن‌رو دیدگاه دوم درمورد نظریه‌های علمی مطرح شد؛ یعنی دیدگاه معناشناختی که اکنون رویکرد غالب است. در این دیدگاه، سوپیز (Suppes)، با الهـام از تعریفـی کـه تارسـکی در ۱۹۳۵ از مفهوم مدل ارائه کرد، دیدگاهی نوین در فلسفهٔ علم را پایه‌گذاری کـرد، البتـه بـه‌همراه افرادی دیگری هم‌چون بث (Beth) و ساپی (Suppe). سوپیز متذکر می‌شود که مـی‌توان همان مفهومی را که تارسکی برای مدل عنوان کرد برای مدل‌ها در علم نیز به‌کار بـرد (همان).

با بیان نقل‌قول‌های متعددی از علوم که به‌منظور نشان‌دادن اهمیت مـدل‌ها و فراوانـی استفادهٔ آن‌ها در علم است تا تأییدی باشد بر رویکرد مأخوذ خود، در رویکردی که وی پایه‌ریزی کرد، نظریه‌های علمی با رده‌ای از مدل‌ها برابرند (این قرائت ون فراسن (7 :1991) اسـت) و یا با رده‌ای از مدل‌ها ارائه می‌شوند (قرائت متعلق به داکوستا (da Costa) و فرنچ (French) است). در تعریف رویکرد نظریهٔ مدلی (model-theoretic) نظریه‌ها، داکوستا و فرنچ چنین عنوان می‌کنند:

> [نظریه‌ها] به‌صورت توصیفی از مجموعه‌ای از مدل‌ها به‌معنی سـاختارهای رابطـه‌ای ارائـه می‌شوند که در آن تمام گزاره‌ها در یک صورت‌بندی زبانی ویژه از نظریه خواص صـادقی

درمورد این ساختار بیان می‌کنند، وقتی ساختار به عنوان تعبیری یا "تحقق ممکنی" (possible realization) از نظریه عمل می‌کند (Suppes 1957)، دراین‌صورت ما اعلام می‌کنیم که اصل موضوع‌سازی یک نظریه به‌کاربردن این‌روش‌های نظریهٔ مدلی است (da Costa and French 2003: 25).

در این مقاله تحلیل ما بر اساس دو دیدگاه اول خواهد بود.[۹] صورت‌بندی ریاضی و تعبیر این ساختار را می‌توان اجزای اساسی نظریهٔ فیزیکی در رویکرد نحوی دانست. این‌که تعبیر چیست و خصوصاً معنای تعبیر مکانیک کوانتومی را چگونه می‌توان معین کرد امری مناقشه‌برانگیز است (Jammer 1974: 9). باید توجه کرد که نمی‌توان بدون هیچ اشاره‌ای به جهان فیزیکی ساختار ریاضی نظریه را معرفی کرد. بنابراین به‌نظر می‌رسد ما ناچار به استفاده از یک تعبیر حداقلی در معرفی نظریه‌ایم (Isham 2001: 79-80). بااین‌حال، در دیدگاه نحوی، تمام تعابیر گوناگون نظریه که صورت‌بندی یک‌سانی دارند دارای کفایت تجربی یک‌سان‌اند، درغیراین‌صورت ما با دو نظریه مواجهیم. در این نگاه، وظیفهٔ تعبیر برعهدهٔ «قواعد تناظر» است. این قواعد یک وظیفهٔ دیگر هم دارند و آن تحویل (reduction) است، مانند کاری که این قواعد در ارتباط‌دادن میان دمایی که بر اساس دماسنج قرائت می‌شود با متوسط انرژی جنبشی ذرات در مکانیک آماری انجام می‌دهند (GrønfeldtWinther 2015).

اما در دیدگاه معناشناختی تعبیر خود مدلی از نظریه است و درواقع تعابیر مختلف مدل‌های مختلف نظریه‌اند. ون فراسن، که یکی از مدافعان دیدگاه معناشناختی است، تعبیر را بسیار مشابه معرفی متغیرهای نهان می‌داند؛ به‌عبارت‌دیگر، یگانه تفاوت این دو، درنظر او، این است که متغیرهای نهان ممکن است به یک رشته نتایج تجربی غیر از نتایج تجربی حاصل از نظریه بینجامد که دراین‌صورت دیگر نمی توان آن را تعبیر نظریه دانست[۱۰] (van Fraassen 1991: 243).

درواقع، ون فراسن تعبیر را برابر آن چیزی می‌داند که نظریه درمورد جهان می‌گوید؛ یعنی جهان ممکنی را که نظریه تمام اجزای آن را توصیف می‌کند (چه مشاهده‌پذیر، چه مشاهده‌ناپذیر) می‌توان تعبیر نظریه نامید؛ یعنی مدلی که جهان را به‌طور کامل بازنمایی می‌کند.

پرسش اصلی در این‌جا این است: سه تعریف بالا از واقع گرایی علمی چه نسبتی با دو دیدگاه نحوی و معناشناختی دارند؟ آیا نمی‌توان در دیدگاه نحوی به نوع اول از واقع گرایی علمی قائل شد؟ پاسخ این است که ظاهراً در بیش تر موارد مشکلی وجود ندارد، مگر در مواردی هم‌چون تعبیری که فون نویمان برای مشکل اندازه‌گیری[۱۱] در مکانیک کوانتومی

عنوان می‌کرد و شعور را در آن دخیل می‌کرد. البته این تعبیر چندان دقیق نیست و اگر بخواهیم بیان دقیقی از تعبیر فون نویمان بدهیم باید از قاعدهٔ تعبیر فون نویمان استفاده کنیم (درادامه بیان می‌شود). دراین‌صورت به‌نظر نمی‌رسد که تلقی مبتنی‌بر دیدگاه نحوی از مکانیک کوانتومی با تعریف نوع اول واقع گرایی علمی تعارض داشته باشد؛ یعنی می‌توان یک نظریه را، ازمنظر نحوی، واقع‌گرایانه یا ضدواقع‌گرایانه تلقی کرد.

به همین نحو دیدگاه معناشناختی با تعریف اول از واقع‌گرایی علمی کاملاً سازگار است. براساس دیدگاه معناشناختی نیز می‌توان نظریه را واقع‌گرایانه یا ضدواقع‌گرایانه دانست.

اما درمورد واقع‌گرایی‌های نوع دوم و سوم وضع کاملاً متفاوت است. در این دو تعریف، چه موضع نحوی درمورد نظریه‌های علمی اتخاذ شود چه موضع معناشناختی، صرفاً آن تعابیری از نظریه پذیرفته می‌شوند که شروط این تعابیر را برآورده کنند. به این ترتیب ما تعابیر واقع‌گرایانه و تعابیر ضدواقع‌گرایانه از علم خواهیم داشت. این مطلب وقتی روشن‌تر می‌شود که توجه کنیم، درواقع، تعریف دوم برگرفته از نوعی تعبیر است که به آن واقع‌گرایی اینشتاین می‌گویند (ibid.: 241).

باید توجه داشت که بین رویکرد نحوی و رویکرد معناشناختی در این‌جا تفاوتی وجود دارد و آن این است که اگر در در رویکرد معناشناختی مدلی از مدل‌های نظریه شروط این دو تعریف را برآورده نکند، نظریهٔ ما با واقع‌گرایی علمی دچار مشکل خواهد شد، چون نظریه یا رده‌ای از مدل‌هاست یا با آن نشان داده می‌شود که درهرصورت وجود مدلی که شروط واقع‌گرایانه را برآورده نمی‌کند ما را دچار مشکل می‌کند. اما در رویکرد نحوی، اگر قواعد تناظر با شروط دو تعریف واقع‌گرایی تعارضی نداشته باشند، این امکان وجود دارد که تعبیری واقع‌گرایانه از نظریه داشته باشیم. درعین‌حال امکان وجود تعابیر ضدواقع‌گرایانه هم هست؛ یعنی این دو تعبیر هم‌زمان ممکن است برای یک نظریهٔ علمی برقرار باشد.

نکتهٔ مهمی که در این‌جا وجود دارد و به پرسش اصلی مقاله مربوط است این است که چرا به‌نظر می‌رسد که مکانیک کوانتومی و واقع‌گرایی دچار تعارض‌اند و برای مثال، چرا این مسئله درمورد مکانیک نیوتنی چندان مطرح نمی‌شود. بررسی نسبت فیزیک کلاسیک (به‌ویژه مکانیک نیوتنی) و مکانیک کوانتومی با سه نوع واقع‌گرایی علمی روشن خواهد کرد که اصولاً چرا درمورد واقع‌گرایی علمی، معمولاً، درمورد مکانیک کوانتومی نگرانی وجود دارد. برای این کار ابتدا باید درمورد فیزیک کلاسیک و مکانیک کوانتومی توضیحاتی ارائه دهیم.

۵. فیزیک کلاسیک

درتعبیر غالب فیزیک کلاسیک (مکانیک نیوتنی و الکترومغناطیس ماکسول)، شیء مادی دارای خواصی است که متعلق به خود است و مستقل از ناظر یا ابزار اندازه‌گیری است. درواقع، ازآن‌جاکه در فیزیک کلاسیک زمان و مکان مطلق در نظر گرفته می‌شوند، هر شیء مادی دارای مکان، زمان، و سرعت مطلق است که این خواص نسبت‌به چهارچوب مرجع جهانی (که چهارچوبی مرجح است) اندازه‌گیری می‌شوند. این چهارچوب را در قرن نوزدهم چهارچوب مرجع اتر (ether) می‌نامیدند.

مفهوم کمیت و خاصیت فیزیکی سیستم با مفهوم فضایی چون S از حالات سیستم ارائه می‌شود که در هر زمان مفروض عضوی از S به این سیستم اسناد داده می‌شود (Isham 2001: 69). درک این مفهوم موجب اتخاذ موضع فلسفی مناسب درمورد نظریه‌های فیزیکی می‌شود. باید توجه داشت که مفهوم حالت هم در فیزیک کلاسیک و هم در مکانیک کوانتومی بسیار مهم است. در فیزیک کلاسیک فرض بر این است که شرایط زیر برآورده می‌شود:

s_1. تعیین حالت در هر زمان برای مشخص‌کردن مقادیر تمام کمیات فیزیکی متعلق به آن سیستم در آن زمان کفایت می‌کند.

s_2. حالت در هر زمان t_2 به‌طور یکتا با هر حالت در زمان پیشین معین می‌شود. اصل علیت این است که چگونه موجبیت اکید راه خود را در فیزیک باز می‌کند (ibid.: 69-70).

در این‌جا شرط سومی هم وجود دارد که آیشام به آن اشاره نکرده است و آن این است که،

s_3. کمیات فیزیکی، در تمام زمان‌ها، دارای مقدار معین‌اند.

این شرط اخیر جزء شروط واقع گرایی نوع سوم بود، به این ترتیب، فیزیک کلاسیک کاملاً با این نوع از واقع‌گرایی، همانند دو نوع دیگر از واقع‌گرایی، سازگار است.

اما علاوه‌بر این شروط حالت نقش دیگری هم دارد. درواقع، «برای انواع بسیاری از سیستم‌ها (برای مثال، ذرات نقطه‌ای نیوتنی، میدان الکترو مغناطیسی کلاسیک) حالت s در زمانی چون t_1 نه‌تنها حالت را در زمان بعدی $t_2 > t_1$ معلوم می‌کند، بلکه حالت را در هر زمان پیشین چون $t_0 < t_1$ هم معین می‌کند؛ یعنی، این حالت که به s در بازهٔ زمانی $t_0 - t_1$ تحول می‌یابد» (ibid.: 70).

شرط اول به‌علاوهٔ شرط سوم این امر را محقق می‌کند که هر کمیت فیزیکی مقداری دارد که با حالت معین می‌شود (به این ترتیب، شرط واقع‌گرایی نوع سوم را برآورده می‌کند).

استلزام ریاضیاتی شرط اول این است که به‌ازای هر کمیت فیزیکی چون A در یک سیستم (برای مثال سرعت این ذرات، مکان یکی از آن‌ها، انرژی کل) تابعی چون $f_A : S \longrightarrow \square$ متناظر است، به‌طوری‌که مقداری است که A دارد، اگر حالت s باشد.

شرط دوم مستلزم وجود خانواده‌ای دوپارامتری از نگاشت های دینامیکی چون $T_{t_2 t_1} : S \longrightarrow S$ است به‌طوری‌که اگر حالت سیستم در زمان t_1 ، $s \in S$ باشد، آ ن‌گاه حالت در زمانی (بعدی) چون t_2، $T_{t_2 t_1}(s)$ خواهد بود. نگاشت $T_{t_2 t_1}$ آشکارا شرایط زیر را برآورده می‌کند: به‌ازای هر t که $t \in \square$ ، $T_{t_2 t_1} = id$،

اگر $t_1 \le t_2 \le t_3$ آن‌گاه $T_{t_3 t_2} T_{t_2 t_1} = T_{t_3 t_1}$ (ibid.: 70).

در این‌جا سؤال مهمی مطرح می‌شود که در مکانیک نیوتنی و در مکانیک کوانتومی پاسخ‌های متفاوتی به آن داده می‌شود:

اگر در زمان $t = t_1$ کمیت فیزیکی A دارای مقدار a باشد، مقدار آن در زمان بعدی $t = t_2$ چه خواهد بود؟ این پرسش را فقط هنگامی می‌توان پاسخ داد که حالتی که در آن A دارای مقدار a است یکتا باشد؛ یعنی $f_A^{-1}(\{a\}) = \{s\}$. در این حالت مقدار A در زمان t_2 دقیقاً $f_A(T_{t_2 t_1}(s))$ است. درحالت کلی زیرمجموعهٔ $f_A^{-1}(\{a\})$ از S بیش از یک عنصر دارد. در این حالت چیزی بیش از این نمی‌توان گفت (ibid.: 70-71).

حالت اول حالتی است که در فیزیک کلاسیک با آن مواجهیم و حالت بعدی آن چیزی است که در مکانیک کوانتومی رخ می‌دهد.

هم‌چنین باید تأکید کنیم که در فیزیک کلاسیک فرض بر این است که عمل اندازه‌گیری تداخلی در کمیت اندازه‌گیری‌شده ایجاد نمی‌کند (یا علی‌الاصول تداخلی ایجاد نمی‌کند و تداخلات ایجادشدهٔ ناشی از فرایند اندازه‌گیری قابل‌تقلیل است و میزان آن‌ها را می‌توان محاسبه کرد) و این یعنی اندازه‌گیری فقط آن چیزی را که در واقعیت است (با تقریب بسیار خوبی) به ما می‌نمایاند.

به‌علاوه، در فیزیک کلاسیک اشیای بزرگ از اشیای مادی خرد تشکیل شده‌اند که رفتار آن‌ها را می‌توان کاملاً براساس رفتار اشیای مادی خرد معین کرد؛ به‌عبارت‌دیگر، دیدگاه اتمیستی و تحویل‌گرایانه بر آن حاکم است؛ یعنی کل براساس اجزا به‌طور کامل معین می‌شود.[۱۲]

مطالب ذکرشده را می‌توان این‌گونه خلاصه کرد: «پیوستگی و علیت و امکان بیان تغییر به‌وسیلهٔ حرکت در زمان و فضا» (جینز ۱۳۸۱: ۱۵۰). عناصر اصلی فلسفهٔ ماده‌گرایانه و موجبیتی سازندهٔ مبانی تعبیر رایجِ فیزیک کلاسیک است. ملاحظه خواهیم کرد که تمام این مفروضات در مکانیک کوانتومی با چالش مواجه خواهند شد. بنابراین روشن است که فیزیک کلاسیک با تلقی عموم ما از دنیای اطراف در تلائم و سازگاری است.

اکنون ببینیم که نسبت پرسش اصلی مقاله با فیزیک کلاسیک چیست؟ درمورد نوع اول از واقع گرایی علمی، به‌سادگی ملاحظه می‌شود که می‌توان درمورد فیزیک کلاسیک موضعی واقع‌گرایانه یا ضدواقع‌گرایانه گرفت؛ به این معنی که اگر هویات فیزیک کلاسیک را مستقل از ذهن بدانیم، فیزیک کلاسیک را تقریباً صادق بدانیم و گزاره های فیزیک کلاسیک را صدق و کذب‌پذیر تلقی کنیم، موضع واقع‌گرای علمی، از نوع اول، دربارهٔ فیزیک کلاسیک داریم، اما اگر هریک از این مؤلفه ها را نپذیریم، به نوعی ضدواقع‌گرایی از نوع اول پای‌بندیم.

اما درمورد نوع دوم و سوم واقع گرایی ملاحظه می‌شود که شروط S_1 و S_2، به‌همراه توضیحاتی که در آغاز این بخش داده شد، تمام شرایط این تعاریف را برآورده می‌کند؛ یعنی مقادیر کمیت‌های فیزیکی، که مستقل از ذهن‌اند، با معین‌بودن حالت سیستم مشخص‌اند و مقادیر یکتایی دارند و مقادیر این کمیات در زمان‌های بعدی هم به‌طور یکتا مشخص است. بنابراین بر اساس این تعریف فیزیک کلاسیک نظریه‌ای (یا به‌تعبیر دقیق‌تر واجد نظریه‌هایی) واقع گرایانه است. البته فرض اساسی هم این است که هر عنصر واقعیت همتایی در نظریه دارد؛ زیرا باتوجه به این‌که اصولاً پیش‌بینی‌ها در فیزیک کلاسیک موجبیتی است، یعنی با احتمال یک است، موردی پیدا نمی‌شود که بتوان مشاهده‌پذیرهایی را با قطعیت پیش‌بینی کرد، ولی نظریه نتواند امکان وجود آن‌ها را به‌طور هم‌زمان منتفی بداند، حالتی که بنابر ادعای نویسندگان مقالهٔ EPR درمورد مکانیک کوانتومی پیش می‌آید.

۶. مکانیک کوانتومی

۱.۶ مقدمه

در صورت‌بندی مکانیک کوانتومی دو مقصود مهم همواره مدنظر است: «۱. تعیین مجموعهٔ مقادیر ممکن کمیت فیزیکی (مشاهده‌پذیر) که مقادیر آن حقیقی است؛ ۲. به‌دست‌آوردن احتمال نتایج اندازه‌گیری کمیت فیزیکی» (Redhead 1984: 4).

به منظور تحقق اهداف بالا دو مفهوم اساسی موردنیاز است: حالت (state)؛ مشاهده‌پذیر (observable). حالت یک سیستم درواقع معین‌کنندهٔ احتمالات حاصل از اندازه‌گیری است و می‌توان آن را بسته‌ای از توابع احتمال دانست. حالت در مکانیک کوانتومی با بردار های یک فضای هیلبرت (Hilbert space) نشان داده می‌شود و مشاهده‌پذیرها با عمل‌گرهای هرمیتی (Hermitian operators) مشخص می‌شوند که روی فضای هیلبرتی تعریف شده‌اند که اعضای آن نمایانندهٔ بردارهای حالت سیستم اند. پس متناظر با هر سیستم کوانتومی فضای هیلبرتی تعریف می‌شود که مشاهده‌پذیرهای سیستم عمل‌گرهای این فضای هیلبرت است و بردارهای فضای هیلبرت حالات سیستم را معین می‌کند.[۱۳]

۲.۶ مکانیک کوانتومی و واقع‌گرایی

اکنون نسبت مکانیک کوانتومی و پرسش اصلی این مقاله را بررسی می‌کنیم؛ یعنی این‌که چه نسبتی بین تعاریفی که از واقعیت دادیم و مکانیک کوانتومی برقرار است؟

به‌نظر می‌رسد چالش اساسی مکانیک کوانتومی مواجهه با تعریف دوم و خصوصاً تعریف سوم از واقع گرایی علمی باشد؛ ازاین‌رو، ما مواردی را در مکانیک کوانتومی، که به‌نظر می‌رسد واقع گرایی علمی با تعریف دوم و سوم با آن‌ها ناسازگار است، طرح می‌کنیم و در هر مورد نسبت آن را با سه تعریفی که از واقع‌گرایی علمی دادیم بیان می‌کنیم.

این موارد از این قرار است: ۱. وجود مشاهده‌پذیرهای ناسازگار؛ ۲. مسئلهٔ اندازه‌گیری؛ و ۳. قضایای عدم امکان (یعنی قضایای Bell و کوچن ـ اشپکر). مورد سوم در تعریف واقع‌گرایی نوع سوم بررسی شد. بنابراین اکنون موارد اول و دوم را بررسی می‌کنیم.

۱.۲.۶ وجود مشاهده‌پذیرهای ناسازگار

با استفاده از قوانین حاکم بر عمل‌گرها در فضای هیلبرت می‌توان نشان داد، هرگاه Ω, Λ دو عمل‌گر هرمیتی و دارای خاصیت زیر باشند:

$$[\Omega, \Lambda] = i\Gamma$$

(در این‌جا $[\Omega, \Lambda] = \Omega\Lambda - \Lambda\Omega$ است که به آن جابه‌جاگر (commutator) می‌گویند)، آن‌گاه رابطهٔ زیر برقرار است:

$$(\Delta\Omega)^2(\Delta\Lambda)^2 \geq \frac{1}{4} < \psi | [\hat{\Omega}, \hat{\Lambda}]_+ | \psi >^2 + \frac{1}{4} < \psi | \Gamma | \psi >^2 \quad (*)$$

معروف‌ترین مشاهده‌پذیرهای ناسازگار مشاهده‌پذیرهای مکان و اندازهٔ حرکت‌اند. البته اندازهٔ حرکت باید با مؤلفه مکانی، که با آن مقایسه می‌شود، هم‌جهت باشد. اگر Ω و Λ به‌ترتیب X و P باشند، درآن‌صورت داریم:

$$[X, P] = ih$$

که دراین‌صورت رابطهٔ عدم قطعیت به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$(\Delta X)(\Delta P) \geq h/2$$

این اولین رابطهٔ عدم قطعیتی است که هایزنبرگ آن را در سال ۱۹۲۷ با استفاده از نظریهٔ تبدیل دیراک ــ یوردن (Dirac-Jordan transformation theory) به‌دست آورد (گلشنی ۱۳۸۵: ۲۳۳).

باید توجه داشت که اگر در روابط عدم قطعیت یکی از دو کمیت ΔX یا ΔP برابر صفر شوند (که به این معنی است که مقدار کمیتی که عدم قطعیت آن صفر شده است به‌طور دقیق و با احتمال برابر ۱ به دست آمده است) عدم قطعیت کمیت دیگر برای ارضای نامساوی باید برابر بی‌نهایت باشد؛ یعنی مقداری به کمیت دیگر نمی‌توان اسناد کرد و به‌طور دقیق‌تر باید گفت کمیت دوم خوش‌تعریف نیست.

دو نتیجهٔ مهم از این رابطه استنباط می‌شود: طرد موجبیت (determinism) (که مربوط به بحث ما نیست)؛ و عدم امکان اسناد واقعیت فیزیکی هم زمان، بر اساس تعریف سوم از واقع گرایی علمی، به کمیاتی که دارای عمل‌گرهای ناسازگارند. همین‌طور، اگر طریقی پیدا کنیم که با احتمال ۱ مقادیر مشاهده‌پذیر های ناسازگار را پیش‌بینی کنیم، چون در مکانیک کوانتومی این دو مشاهده‌پذیر به‌طور هم‌زمان قابل‌تعریف نیستند، براساس واقع‌گرایی نوع دوم هم مکانیک کوانتومی واقع‌گرایانه نیست.

بنابراین، به‌نظر می‌رسد که واقع گرایی های نوع دوم و سوم، با وجود مشاهده‌پذیر های ناسازگار در مکانیک کوانتومی، در تعارض باشد؛ به این معنی که این کمیات را نمی‌توان عنصری از واقعیت دانست یا این کمیات در هر زمانی دارای مقدار نیستند، زیرا مشاهده‌پذیر های ناسازگار هم‌زمان خوش‌تعریف نیستند و اگر یکی از آن‌ها در نظریهٔ خوش‌تعریف باشد دیگری تعریف‌شده نیست و این یعنی اگر فرض کنیم هردو عنصری از واقعیت باشند، هردو هم‌زمان در نظریه تعریف‌شده نیستند و این معیار واقعیت، یعنی مقدمهٔ اول تعریف دوم، را نقض می‌کند. اما اگر فرض کنیم که هرآن‌چه مکانیک کوانتومی می‌گوید عنصری از واقعیت است، نوع دوم واقع گرایی با وجود مشاهده‌پذیرهای ناسازگار

در تعارض قرار نمی‌گیرد، ولی باز نوع سوم واقع گرایی در این مسئله، یعنی وجود مشاهده‌پذیرهای ناسازگار، با مکانیک کوانتومی در تعارض خواهد بود.

اما به‌سادگی می‌توان دید واقع گرایی از نوع اول با وجود مشاهده‌پذیرهای هم‌زمان ناسازگار نیست؛ زیرا می‌توان این مشاهده‌پذیرها را اولاً مستقل از ذهن دانست؛ ثانیاً احکام مکانیک کوانتومی درمورد آن‌ها را تقریباً صادق دانست؛ یعنی، این‌که مکانیک کوانتومی می‌گوید «اگر عدم قطعیت یکی از دو کمیت فیزیکی ناسازگار صفر شده و به‌طوردقیق و با احتمال برابر ۱ به دست آمده است، کمیت دیگر دارای عدم قطعیت بی‌نهایت است و مقداری خوش‌تعریف ندارد» صادق یا تقریباً صادق است؛ و ثالثاً گزاره‌هایی که این احکام را بیان می‌کنند صدق و کذب‌پذیرند. بنابراین نظریه به‌خودی‌خود نه واقع گرایانه است نه ضدواقع گرایانه، بلکه این موضع فلسفی دربارهٔ نظریه است که واقع گرایانه یا ضدواقع گرایانه می‌شود.

ممکن است گفته شود هیچ ناسازگاری‌ای درمورد تعاریف دوم و سوم وجود ندارد؛ زیرا مکانیک کوانتومی فقط آن‌چه را ما می‌توانیم بدانیم می‌گوید، ولی در واقعیت این‌ها همواره دارای مقادیر معین‌اند و به این ترتیب تناقضی وجود ندارد. اما مشکل این‌جاست که قضایای عدم امکان، که قبلاً اشاره کردیم، امکان چنین امری را رد می‌کنند.

۲.۲.۶ مشکل اندازه‌گیری

تحول دینامیکی برای آزمایش اشترن ـ گرلاخ را می‌توان براساس مکانیک کوانتومی با معادلهٔ شرودینگر و تابع موج زیر بیان کرد.

$$\psi_0 \equiv (\alpha\psi_+ + \beta\psi_-)\phi_0 \xrightarrow[t\to+\infty]{} \psi_{out} = \alpha\psi_+\phi_{up} + \beta\psi_-\phi_{down}$$

اما بر اساس صورت‌بندی مکانیک کوانتومی و کاهش تابع حالت، که فون نویمان آن را به‌طور مفصل در کتاب *بنیان‌های ریاضی مکانیک کوانتومی*[۱۴] توضیح داده است، تابع حالت مربوط به دستگاه با کاهش حالت تابع سیستم مرکب به‌دست می‌آید و به‌صورت $\psi = \alpha\psi_+ + \beta\psi_-$ خواهد بود؛ هم‌چنین تابع حالت الکترون برابر $\phi = \alpha\phi_{up} + \beta\phi_{down}$ می‌شود. بنابراین، در هر دوی این موارد ما با تابعی به‌شکل $\alpha\psi_1 + \beta\psi_2$ (یا شکل کلی‌تر آن $\sum c_i\psi_i$) مواجهیم که به آن حالت ترکیبی (superposition) می‌گویند که ترکیبی از بردارهای ویژهٔ عمل‌گری است که اندازه‌گیری می‌شود. اما واقعاً این‌که حالت دستگاه در $\alpha\phi_{up} + \beta\phi_{down}$ است به چه معناست؟

همه می‌دانیم که با مراجعه به دستگاه همواره حالتی معین را مشاهده خواهیم کرد؛ یعنی دستگاه یا اسپین را بالا نشان می‌دهد یا پایین. اما مکانیک کوانتومی می‌گوید قبل از مشاهدهٔ دستگاه نه اسپین پایین را نشان می‌دهد نه بالا را و این عمل مشاهده است که منجر به تقلیل تابع موج می‌شود و اسپین یا بالا می‌شود یا پایین. یعنی عمل مشاهده هم وضعیت دستگاه را معین می‌کند و هم اسپین الکترون را.

پس مشاهدهٔ ما دو خصوصیت از دو شیء را معین می‌کند، و به‌نظر می‌رسد که فرض وضعیت حالت ترکیبی برای دستگاه و هم‌چنین برای اسپین الکترون در واقعیت خلاف شهود ماست که در دنیای اشیایی با ابعادی بسیار بزرگ‌تر از ابعاد اتم شکل گرفته است. بنابراین به‌نظر می‌رسد که این مشاهده است که هم خصوصیت موردنظر را واقعیت می‌بخشد و هم آن را برای ما مشخص می‌کند.

اگر در مکانیک کوانتومی عمل مشاهده را طوری تعبیر کنیم که ناظر در واقعیت‌بخشیدن به اشیای کوانتومی نقش داشته باشد، دراین‌صورت آشکارا این نوع تعبیر از مکانیک کوانتومی با هر سه نوع تعریف از واقع‌گرایی در تعارض است. اما می‌توان انواع تعابیری واقع‌گرایانه از مکانیک کوانتومی داشت؛ ازجمله قرائتی از تعبیر کپنهاگی ارائه کرد که با واقع‌گرایی نوع اول سازگار باشد.[۱۵]

برای روشن‌شدن مطلب، مواضع بور و هایزنبرگ را در تعریف اندازه‌گیری در نظر بگیرید. این مواضع مشخص‌کنندهٔ جهت‌گیری های آن‌هاست. تعریفی که بور از اندازه‌گیری ارائه می‌دهد به‌نوعی متافیزیکی است و تعریفی که هایزنبرگ از اندازه‌گیری بیان می‌کند کاملاً پوزیتیویستی است. تعریف بور از اندازه‌گیری به‌صورت زیر است: «اگر کمیتی چون Q در سیستم S و در زمان t اندازه‌گیری شود، آن‌گاه Q دارای مقدار ویژه‌ای در S و در زمان t است» (Krips 2007)، درصورتی‌که هایزنبرگ چنین تعریفی ارائه می‌دهد: «بی‌معنی خواهد بود که به Q مقداری چون q برای سیستم S و در زمان t اسناد کنیم، مگرآن‌که Q اندازه‌گیری شود و مقدار q را در t داشته باشد» (ibid).

می‌توان گفت، درنظر هایزنبرگ کمیتی چون Q صرفاً وقتی بامعناست که بتوان آن را اندازه‌گیری کرد؛ یعنی وی تعریف‌پذیری (definability) را براساس قابلیت امکان اندازه‌گیری (measurability) بنیان می‌نهد و اولی را به دومی تحویل می‌کند. یعنی برای او تمام مفاهیمی که در فیزیک کلاسیک برای توصیف سیستم‌های مکانیکی به‌کار می‌روند می‌توانند به‌طور همانند برای فرایند اتمی نیز به‌طور دقیق تعریف شوند ... چون تعریف

مفهوم به‌معنای توصیف روشی است برای اندازه‌گیری کمیتی که مفهوم یادشده به آن ارجاع می‌دهد (Jammer 1974: 68).

به‌نظر می‌رسد که بیان هایزنبرگ نشان‌دهندهٔ این باشد که در این تلقی اسناد واقعیت به اشیا، در حالتی که اندازه‌گیری صورت نیافته باشد، معنی محصلی ندارد و به این معنی کمیات اتمی به اندازه‌گیری بستگی دارند. اگر اندازه‌گیری را به ناظر و به‌طور مشخص ذهن انسانی وابسته کنیم آشکار است که مؤلفهٔ متافیزیکی نوع اول از تعریف واقع‌گرایی دچار مشکل می‌شود و نوع دوم و سوم از واقع‌گرایی علمی هم آشکارا با این تلقی در تعارض‌اند.

در نگرش فوق، روابط عدم قطعیت صرفاً برای اندازه‌گیری هم زمان کمیات (مشاهده‌پذیرهای) ناسازگار محدودیت ایجاد می‌کنند، ولی هریک از این کمیات به‌تنهایی به‌طور دقیق قابل‌اندازه‌گیری‌اند. پس اگر کمیات فیزیکی را براساس روابط عدم قطعیت تعریف کنیم، مشکلی وجود نخواهد داشت (.ibid). به‌عبارت‌دیگر، هرگاه ما مکان الکترونی را به‌طور دقیق تعریف کنیم (یعنی اندازه‌گیری کنیم)، دیگر نمی‌توانیم برای این الکترون اندازهٔ حرکت خوش‌تعریف داشته باشیم. در این‌جا می‌توان گفت الکترون اندازهٔ حرکت ندارد و این نظری است که فون نویمان نیز به‌نوعی به آن معتقد است. شایان ذکر است که در این‌جا به‌دلیل‌این‌که عمل اندازه‌گیری در مشخص‌شدن (و به‌تعبیری واقعیت‌یافتن) کمیات فیزیکی دخالت می‌کند، ما به‌نوعی در اسناد واقعیت فیزیکی به این کمیات با مشکل مواجه می‌شویم، ولی به طور مفهومی صرف‌این‌که دو کمیت ناسازگار باشند نظریه را با واقع گرایی نوع اول در تعارض قرار نمی‌دهد (همان‌طورکه در بخش پیشین گفته شد).

اما برخلاف هایزنبرگ بور این نوع تحویل تعریف‌پذیری به قابلیت امکان اندازه‌گیری را غیرقابل‌قبول می‌داند. درواقع برای بور، برخلاف نظر فیلسوفانی نظیر کوهن (Kuhn) و فایرابند (Feyerabend)، مفاهیم در نظریه های متوالی قیاس پذیر (commensurable) هستند و معنای آن‌ها تغییر نمی‌کند (Faye 2007). می‌توان گفت بور به نوعی رابطه‌گرایی نهان (hidden relationalism) معتقد بود و این به‌معنی کلاسیک و نیوتنی آن مدنظر وی بوده است (Krips 2007)؛ یعنی در حوزهٔ اتمی روابط میان اشیای اتمی که بور قائل به وجود آن‌ها بود طوری است که منجر به برقراری روابط عدم قطعیت می‌شود که می‌توان آن‌ها را مبین مکملیت (complementation) میان خواص سینماتیک (Kinematic) مثل مکان و زمان و خواص دینامیک (dynamic) مثل انرژی و اندازه حرکت دانست. باید توجه داشت که بور معتقد به تعریف عملیاتی (operatinally) مفاهیم کلاسیک نبود و هم چنین هرگز از تحویل

تابع موج یا تقلیل بستهٔ موج سخنی نگفت، چون وی اساساً تابع موج را به‌مثابهٔ امری واقعی در نظر نمی‌گرفت، بلکه صورت‌بندی مکانیک کوانتومی را صرفاً نمایشی نمادین لحاظ می‌کرد (Faye 2007).

بور معتقد بود که تعریف سالم یا به‌عبارت‌دیگر تعریف خوش‌تعریف (well-defined) از کمیات ناسازگار با روابط عدم قطعیت محدود می‌شود و «عدم قطعیت متقابلی که همواره مقادیر این کمیات را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد اساساً نتیجه‌ای است از دقت متقابلی که همواره مقادیر این کمیات را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. اساساً نتیجه‌ای از دقت محدودی است که با آن تغییرات در انرژی و اندازه حرکت می‌توانند تعریف شوند (نه‌این‌که اندازه گیری شوند)» (Jammer 1974: 69).

بور به واقعی‌بودن تقلیل تابع موج قائل نبود. این اصلی است که فون نویمان برای بیرون‌آمدن از تناقضی که حاصل قاعدهٔ تعبیری او و وجود حالات ترکیبی در فرایند اندازه گیری است آن را ابداع کرد. اما ببینیم که تقلیل تابع موج چه مشکلی در واقع گرایی ایجاد می‌کند. برای این منظور مثال زیر را در نظر بگیرید:

ذرهٔ منفرد آزادی را که در یک بعد حرکت می‌کند به‌مثابهٔ سیستم در نظر بگیرید. اکنون برای آن مشاهده‌پذیر انرژی را در نظر بگیرید. از حل معادلهٔ شرودینگر، برای ذرهٔ آزاد، جواب‌های حالت سیستم $|\psi_+\rangle = |E,+\rangle = |p = (2mE)^{1/2}\rangle$ و $|\psi_-\rangle = |E,-\rangle = |p = -(2mE)^{1/2}\rangle$ به‌دست می‌آید (Shankar 194: 151-152). جواب اول به این معنی است که ذرهٔ ما با اندازهٔ حرکت p به‌سمت راست در حرکت است و جواب دوم به این معنی است که ذرهٔ ما با همان اندازهٔ حرکت p به‌سمت چپ در حرکت است. تا این‌جا هیچ مشکلی نداریم و وضعیت در مکانیک کلاسیک هم وجود دارد، پس اگر حالت ذره یکی از این دو حالت باشد، تعارضی با شهود و تجربهٔ معمول ما ندارد و مشابه وضعیت کلاسیک است.

اما با خاصیت خطی‌بودن جواب‌ها می‌توان نشان داد که اگر $|\psi_+\rangle$ و $|\psi_-\rangle$ جواب‌های معادلهٔ شرودینگر یک سیستم باشند، درآن‌صورت ترکیب خطی آن‌ها هم جواب معادله خواهد بود. یعنی وضعیت‌هایی با حالت زیر هم به‌عنوان جواب قابل‌قبول سیستم وجود دارد که کاملاً با وضعیت کلاسیک و شهود و تجربهٔ معمول ما متفاوت است.

$$\alpha,\beta \neq 0\,;\ |\psi\rangle = \alpha\,|E,+\rangle + \beta\,|E,-\rangle = \alpha\,|p = (2mE)^{1/2}\rangle + \beta\,|p = -(2mE)^{1/2}\rangle$$

اگر حالت سیستم چنین باشد، درواقع ما عبارت درستی برای بیان آن نداریم و به‌مسامحه می‌توان گفت ذره با اندازهٔ حرکت $p = (2mE)^{1/2}$ به‌سمت راست و چپ در

حرکت است. اما مسئله این‌جاست که ما در اندازه‌گیری حالت ذره را در حالت ترکیبی فوق به‌دست نمی‌آوریم، بلکه همواره یا ذره را درحال حرکت به‌سمت راست با اندازهٔ حرکت p می‌یابیم، یا درحال حرکت به‌سمت چپ با اندازهٔ حرکت p. در این حالت پرسش اصلی این است که عمل مشاهده و اندازه‌گیری چگونه حالت ذره را معین می‌کند؟

تعبیر استاندارد[۱۶] این پرسش را براساس قاعدهٔ تعبیر فون نویمان پاسخ می‌دهد. قاعدهٔ تعبیر فون نویمان می‌گوید که مشاهده‌پذیری چون B مقداری چون b اسناد می‌شود، اگر و تنها اگر سیستم اندازه گیری‌شده در حالت ویژه‌ای از مشاهده‌پذیر فوق قرار داشته باشد (van Fraassen 1991: 274).

براساس این تعبیر، در پایان فرایند اندازه‌گیری گذاری غیرعلّی (acausal) از حالت ترکیبی به یکی از حالات ویژه مشاهده‌پذیر رخ می‌دهد. شایان ذکر است که بنابر تعبیر یادشده این انتقال غیرعلّی کاملاً تصادفی است. مثلاً اگر تابع حالت سیستمی را با $\sum c_i\psi_i$ نشان دهیم، درآن‌صورت احتمال این‌که به حالت ویژهٔ ψ_k تقلیل یابد، برابر $|c|^2$ است و این احتمال عینی (objective) است، نه ذهنی (subjective) و ناشی از جهل. مسئلهٔ مهم این است که عمل مشاهده یا اندازه گیری چگونه منجر به چنین گذاری می‌شود و چه نوع تفاوتی میان برهم‌کنش اندازه‌گیری و دیگر برهم‌کنش‌ها وجود دارد که این عمل را قادر به تقلیل می‌کند.

بروز این مشکل به‌علت خصوصیت خطی دینامیک حاکم بر مکانیک کوانتومی و قاعدهٔ تعبیر فون نویمان است:

> ازآن‌جاکه دینامیک مکانیک کوانتومی که با معادلهٔ مستقل از زمان شرودینگر درمورد حرکت توصیف می‌شود خطی است، فوراً از این مطلب اصل تعبیر رسمی نتیجه می‌شود که می‌گوید پس از اندازه‌گیری میان دو سیستم مکانیک کوانتومی که یکی را می‌توان اندازه گیری‌ای تعبیر کرد که یک سیستم روی سیستم دیگر انجام می‌دهد، حالت سیستم مرکب حالت ویژه‌ای از مشاهده‌پذیری که در برهم‌کنش اندازه گیری شده نیست و حالت ویژهٔ مشاهده‌پذیر نمایش‌گر هم، که به‌منزلهٔ نشان‌گر عمل می‌کند، نیست. بنابراین براساس تعبیر رسمی مشاهده‌پذیر اندازه گیری‌شده و قرائتی که از نشان‌گر حاصل شده است بعد از برهم‌کنش مناسب که قرائت‌های نشان‌گر را با مقادیر مشاهده‌پذیرهای اندازه گیری‌شده در تضایف قرار داده است دارای مقادیر معین نیستند. این مشکل اندازه‌گیری مکانیک کوانتومی است (Bub 1997: 2).

باتوجه‌به قاعدهٔ فون نویمان، شما صرفاً وقتی می‌توانید قرائتی از مشاهده‌پذیری معین داشته باشید که بردار حالت مشاهده‌پذیر یکی از بردارهای ویژهٔ آن باشد. اما همان‌طورکه

گفته شده است، خصوصیت خطی معادلهٔ شرودینگر منجر می‌شود به بروز حالت‌های ترکیبی که بردار ویژه‌ای از مشاهده‌پذیر نیستند. در چنین حالتی بر اساس قاعدهٔ تعبیر فون نویمان مشاهده‌پذیر دارای مقدار نیست؛ پس اگر چنین است ما درعمل چگونه برای کمیات مقدار مشاهده می‌کنیم؟ برای حل این تناقض است که فون نویمان قاعدهٔ تصویر را معرفی می‌کند. اما به‌نظر می‌رسد راه‌حل وی، که اضافه‌کردن اصلی است که صرفاً برای رفع تناقض است، راه‌حلی خلق‌الساعه (ad hoc) است و اگر ناظر را در این عمل دخیل کنیم، با آموزهٔ واقع‌گرایی در تعارض قرار می‌گیرد؛ ازاین‌رو، بسیاری از تعابیری که رویکرد واقع‌گرایانه دارند این اصل را رد می‌کنند.

۷. نتیجه‌گیری

اما ببینیم که پرسش اصلی مقاله در این‌جا چگونه پاسخ می‌یابد. درمورد واقع‌گرایی نوع اول به‌نظر می‌رسد که اگر ما اندازه‌گیری را به ذهن انسانی نسبت ندهیم، هر سه مؤلفهٔ واقع‌گرایی می‌توانند با مکانیک کوانتومی در تلائم باشند، حتی باوجود مسئلهٔ اندازه‌گیری می‌توان در مواجهه با مکانیک کوانتومی واقع‌گرای نوع اول بود. یعنی می‌توان: (۱) هویات نظریه را مستقل از ذهن دانست؛ (۲) خود نظریه را تقریباً صادق دانست؛ و (۳) گزاره‌های نظریه را صدق و کذب‌پذیر تلقی کرد. درواقع درتعبیر کپنهاگی دیدگاه واقع‌گرایانه از نوع اول داشت.[۱۷]

اما مطلب درمورد واقع‌گرایی‌های نوع دوم و سوم متفاوت است. درمورد واقع‌گرایی نوع دوم، اگر عنصری در واقعیت (یعنی کمیتی باشد که بدون اخلال در سیستم با احتمال ۱ پیش‌بینی شود) وجود داشته باشد که ما در نظریه دخیل نکرده باشیم، نظریهٔ تصویر صادق یا تقریباً صادقی از جهان نداده‌ایم. باید توجه داشت، بااین‌که مفهوم «تقریباً صادق» دچار مشکلاتی است، اما با فرض این‌که ما مفهوم قابل‌قبولی از تقریباً صادق ارائه دهیم، اگر نظریه‌ای برای تعدادی از عناصر واقعیت نتواند همتاهای ارائه دهد، به‌طوری‌که مفهوم صدق تقریبی را نتوان بر آن اعمال کرد، این نظریه واقع‌گرایانه نخواهد بود. تفاوت آن با تعریف اول این است که ما در تعریف اول ازپیش نظریه را صادق یا تقریباً صادق می‌دانیم و بنابراین نظریه همواره این معیار را برآورده می‌کند. پس به این ترتیب، اگر کسانی ادعا کنند که مکانیک کوانتومی قادر نیست به تعداد قابل‌توجهی از عناصر واقعیت همتا نسبت دهد، آنان مکانیک کوانتومی را واقع‌گرایانه نخواهند نامید. اما تعریف سوم بیش‌ترین تعارض را با

مکانیک کوانتومی دارد و آشکار است که چون ما نمی‌توانیم همواره و در همهٔ زمان‌ها به تمام کمیات آن مقدار نسبت دهیم، براساس این تعریف، مکانیک کوانتومی غیرواقع‌گرایانه خواهد بود.

از مجموع مطالبی که مطرح شد می‌توان براساس قرائت قاطبهٔ فلاسفهٔ علم از واقع‌گرایی، در مواجهه با مکانیک کوانتومی، حتی با تعبیر کپنهاگی، موضعی واقع‌گرایانه داشت.

پی‌نوشت‌ها

۱. برای مثال بنگرید بـه: Boyd, Gasper, 1991: 1991; Psillos, 1999: xvii; Ladyman, 2000: 158. هم‌چنین به مدخل استنفورد درمورد واقع‌گرایی مراجعه کنید.

۲. این تعریف ملهم است از: Readhead 1989: 82.

۳. در ادامهٔ مقاله، تعریف کمیات ناسازگار در مکانیک کوانتومی ارائه خواهد شد.

۴. اگر مقدمهٔ زیر را به این تعریف اضافه کنیم نظریه موجبیتی هم خواهد بود:

مقدمهٔ ۴. اگر عنصری از واقعیت فیزیکی چون A، همتایی چون f_A در نظریهٔ فیزیکی داشته باشد، آن‌گاه می‌توان در شرایطی با قطعیت (یعنی، احتمال برابر ۱) مقدار آن کمیت را پیش‌بینی کرد.

۵. یعنی قضایایی در اثبات عدم امکان وجود متغیرهای نهان برای مکانیک کوانتومی است.

۶. مخفف value definiteness است.

۷. مخفف non contextually است.

۸. در بخش ۳ مفهوم تعبیر روشن خواهد شد.

۹. برخی این دو دیدگاه را رضایت‌بخش ندانسته‌اند و رویکرد سومی معرفی کرده‌اند به‌نام دیگاه عمل‌گرایانه. به‌طور کلی، در دیدگاه عمل‌گرایانه رشته‌ای از فرض‌ها درمورد نظریهٔ علمی وجود دارد که به‌نظر می‌رسد در آن‌ها دیدگاه‌های نحوی و معناشناختی اشتراک دارند: با تقریب زیاد می‌توان گفت نظریه باید: صریح، ریاضیاتی، مجرد، نظام‌مند، به‌آسانی فردی‌شونده (individualizable)، متمایز از داده‌ها و آزمایش‌ها، و به‌میزان بالایی تبیین‌کننده و پیش‌بینی‌کننده باشد (GrønfeldtWinther 2015). در این نگاه ساختار نظریه‌های علمی، متفاوت با دو نگاه پیشین، دارای انواع برنهادهاست، ازجمله این‌که محدودیت دارد و نمی‌تواند مبنای استواری برای آن نوع عمل پیش‌بینی‌کنندگی و تبیین‌کنندگی باشد که مدافعان دیدگاه نحوی و دیدگاه معناشناختی از آن انتظار دارند. در این رویکرد علم تکثرگرایانه است، هم در مؤلفه‌های درونی (جنبه‌های ریاضیاتی، استعاره‌ها ، تشابه‌ها، ...) و

هم در مؤلفه‌های بیرونی (مکانیکی‌بودن، تاریخی‌بودن، مدل‌های ریاضی، و ...) و نیز جنبه‌های غیرصوری دارد و ... (ibid.).

۱۰. در این‌جا ما با نظریه‌ای جدید مواجهیم.

۱۱. درادامه مشکل اندازه‌گیری توضیح داده می‌شود.

۱۲. شومر (Schommer) دو خصوصیت را برای مکانیک نیوتنی (که درواقع قسمت اصلی فیزیک کلاسیک است و سایر بخش‌های فیزیک کلاسیک باتوجه‌به مبانی آن تبیین می‌شوند) اساسی می‌داند:

> ۱. عناصر جهان، که در فضای مطلق و زمان مطلق در حرکت‌اند، کوچک، جامد، و اشیای تباهی‌ناپذیرند که همواره دارای جرم و شکل ثابت‌اند. ...
>
> ۲. مکانیک نیوتنی رابطهٔ تنگاتنگی با موجبیت دقیق دارد؛ یعنی مسیر آیندهٔ شیء درحال حرکت را (مثلاً یک سیاره را) می‌توان به‌طور کامل پیش‌بینی و گذشته آن را کاملاً آشکار کرد، مشروط‌براین‌که حالت کنونی آن با تمام جزئیات معلوم باشد.
>
> ازدیدگاه نیوتن، تصویر واقعیت با تصور زیر ارائه می‌شود: درآغاز، خدا اشیای مادی را آفرید؛ آن‌ها و معادلات حرکت را آفرید. سپس، کل جهان در حرکت قرار گرفت و آن حرکت از آن هنگام ادامه داشته است و مثل یک ماشین، معادلات حرکت بر آن حاکم بوده است (Schommers 1989: 3).

در این‌جا شرط ۲ متناظر با S_2 است که در بالا به آن اشاره کردیم.

۱۳. برای ملاحظهٔ بحث جامع و به‌لحاظ ریاضی دقیق به *مکانیک کوانتومی در فضای هیلبرت* (*Quantum Mechanics in Hilbert Space*) نوشتهٔ Eduard Prugovercki مراجعه کنید.

14. Mathematical Foundations of Quantum Mechanics.

۱۵. هم‌چنین باید توجه داشت که صرف وجود حالت ترکیبی، به‌خودی‌خود، با واقع‌گرایی در تعارض قرار نمی‌گیرد، بلکه واردکردن اصل تقلیل تابع موج، که نوعی اصل تعبیری است، ما را با نوعی واقع‌گرایی دچار مشکل می‌کند.

۱۶. این تعبیر را می‌توان همان تعبیر کپنهاگی که ذکر کردیم دانست؛ البته باید توجه داشت که تعبیر کپنهاگی تعبیری واحد و کاملاً منسجمی نیست، ولی می‌توان مشترکاتی برای آن در نظر گرفت که آن را از دیگر تعابیر جدا می‌کند.

۱۷. تعبیر بور تأییدی برای این مطلب است و صرف درنظرگرفتن قاعدهٔ تعبیر فون نویمان برای واقع‌گرایی نوع اول مشکلی ایجاد نمی‌کند. البته باید توجه داشت، براساس نقل‌قولی که از هایزنبرگ ذکر شد، اگر عمل اندازه‌گیری را به ناظر و ذهن انسانی اسناد دهیم و مقداریافتن را مقوم واقعیت مستقل بدانیم، این تلقی با واقع‌گرایی نوع اول و البته

واقع‌گرایی نوع دوم و سوم دچار مشکل می‌شود. این مطلب درمورد نظری که فون نویمان درمورد تقلیل تابع موج داشت و آن را به شعور اسناد می‌داد نیز بر قرار است. ولی به‌نظر نمی‌رسد این‌ها تعابیر صورت‌بندی‌شده و دقیقی باشند.

کتاب‌نامه

جینز، جیمز هاپود (۱۳۸۱)، *فیزیک و فلسفه*، ترجمهٔ علی قلی بیانی، تهران: علمی فرهنگی.

شانکار، رامامورتی (۱۳۸۷)، *اصول مکانیک کوانتومی*، ترجمهٔ حسین صالحی، تهران: دانش‌نگار.

گلشنی، مهدی (۱۳۸۵)، *تحلیلی از دیدگاه‌های فلسفی فیزیک‌دانان معاصر*، تهران: پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی.

معصومی، سعید (۱۳۹۴)، «چیستی نظریه‌های علمی: رویکردهای نحوی و معناشناختی»، *فلسفهٔ علم*، پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی، س ۵، ش ۱.

Bell, J. S. (1964), 'On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox', *Physics*, vol. 1.

Bell, J. S. (1966), 'On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics', *Reviews of Modern Physics*, vol. 38.

Bub, J. (1997), *Interpreting the Quantum World*, Cambridge: Cambridge University Press.

Boyd, R., P. Gasper, and J. D. Trout (eds.) (1991), *The Philosophy of Science*, Cambridge, MA: The MIT Press.

d'Espagnat, B. (ed.) (1976), *Conceptual Foundations of Quantum Mechanics*, 2nd edn, Reading, Mass.: Benjamin.

Einstein, A, B. Podolsky, and N. Rosen (1935), "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?", *Phys. Rew*., vol. 47.

Faye, J. (2008), 'Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics', available at: http://plato.stanford.edu/entries/qm-copenhagen/.

Fine, A. (2009), 'The Einstein-Podolsky-Rosen Argument in Quantum Theory', available at: http://plato.stanford.edu/entries/qt-epr/.

French, S. (2014), *The Structure of the World Metaphysics and Representation*, Oxford: Oxford University Press.

Goldstein, S. (2006), "Bohmian Mechanics", available at: http://plato.stanford.edu/entries/qm-bohm/.

Held, C. (2006), "The Kochen-Specker Theorem", available at: http://plato.stanford.edu/entries/kochen-specker/.

Hughes, R. I. G. (1989), *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*, Cambridge, Mass.: Harvard University Press.

Isham, C. (2001), *Lectures on Quantum Theory Mathematical and Structural Foundations*, London: Imperial College.

Jammer, M. (1974), The Philosophy of Quantum Merchanics, New York: John Wiley & Sons.

Krips, H. (2007), “Measurement in Quantum Theory”, available at:
http://plato.stanford.edu/entries/qt-measurement/

Ladyman, James (2002), *Understanding philosophy of science*, London and New York: Routledge.

Popper, K. (1982), *Quantum Theory and Schism in Physics*, London: Unwin Hyman Ltd.

Prugovecki, E. (1981), *Quantum Mechanics in Hilbert Space*, New York and London: Academic Press.

Psillos, S. (1999), *Scientific Realism: How Science Tracks Truth*, London and New York: Routledge.

Redhead, M. (1987), *Incompleteness, Non-Locality, and Realism*, Oxford: Oxford University Press.

Schommers, M. (ed.) (1989), *Quantum Theory and Picture of Reality*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Shimony, A. (2009). “Bell’s Theorem”, available at: http://plato.stanford.edu/entries/bell-theorem/.

Van Fraassen, B. C. (1980), *Scientific Image*, Oxford: Oxford University Press.

Van Fraassen, B. C. (1991), *Quantum Mechanics: an Empiricist View*, Oxford: Oxford University Press.

Von Neumann, J. (1955), *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton: Princeton University Press.