تحلیل فلسفی منطقی برهان EPR

علیرضا منصوری*

اشاره

ابتدا مروری بر اصل عدم قطعیت و آزمایش‌های فکری که در نهایت منجر به مقالهٔ EPR شد، خواهم داشت. هدف این است که از رهگذر مطالعهٔ روندِ اصلاحی آزمایش‌های فکری قبل از EPR، فهم بهتری از EPR به دست آید. سپس روایت‌های خودِ اینشتین را عرضه خواهد شد و واکنش‌هایی بررسی خواهد شد که، خصوصاً از طرف بور، به این برهان صورت گرفت. در نهایت تلاش می‌شود تا ضمن بیان روایت بوهمیِ این برهان و با توجه به نتایج حاصل از قضیهٔ بل، ملزومات و نتایج فلسفی برهان EPR را روشن گردد.

واژگان کلیدی: EPR، واقعیت فیزیکی، موضعیت، فلسفهٔ مکانیک کوانتوم، اینشتین.

***

مقدمه

مقالهٔ معروف EPR، از زمان ارایهٔ آن تاکنون، کانون توجه علاقه‌مندان به حوزهٔ فلسفهٔ

---

*. مربی فلسفهٔ علم پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی؛ آدرس پست الکترونیک: a_mansourius@yahoo.com

علم و مبانی فیزیک کوانتوم بوده و کماکان اهمیت خود را حفظ کرده است، به طوری که بررسی و بازخوانی این مقالهٔ کلاسیک از سرفصل‌های درسی دوره‌های فلسفهٔ فیزیک و فلسفهٔ مکانیک کوانتوم شده است. در این مقاله ابتدا مروری خواهم داشت بر اصل عدم قطعیت و آزمایش‌های فکری که در نهایت منجر به مقالهٔ EPR شد. مرور این آزمایش‌ها این حسن را خواهد داشت که اولاً با شیوهٔ نقد نظریه با کمک آزمایش‌های فکری آشنا شویم و در ثانی از رهگذر مطالعهٔ روندِ اصلاحیِ آزمایش‌های قبل از EPR، فهم بهتری از آزمایش EPR به دست دهیم. همچنین به ملزومات فلسفی این مقاله پرداخته می‌شود ، تا از رهگذر آن، اهمیت معرفت‌شناختی و هستی‌شناختیِ این مقاله را روشن گردد. در واقع، اگر برهان EPR، درست باشد، می‌تواند ما را به جستجوی نظریهٔ کامل‌تری رهنمون شود که شاید شامل چیزی شبیه متغیرهای نهان باشد، به طوری که نظریه کوانتوم معمولی حالت حدی آن باشد (Bohm1951: 613).

اصل عدم قطعیت و پیشینهٔ EPR

با ارایهٔ اصل عدم قطعیت، تعابیر متفاوتی از آن عرضه شد. مسئلهٔ مورد مناقشه، معنای عدم قطعیت یا معنا و مفهوم فقدان یک اندازه‌گیری دقیق بود. بنا به یک تعبیر، که به *تعبیر حداقلی* معروف است، عدم قطعیت به این معنا است که در فیزیکِ میکروسکوپی، برخلاف فیزیکِ ماکروسکوپی، نظریه و قوانین تصحیح‌کننده‌ای وجود ندارد که بتوان با یاری آن اثرات اختلالی اندازه‌گیری را با دقت لازم محاسبه کرد؛ البته هر چند معلوم نیست بتوان *عدم امکان* وجود چنین نظریه‌هایی را *اثبات* کرد، ولی به هرحال این تعبیر دست کم بر یک محدودیت معرفت‌شناختی تأکید دارد. خود هایزنبرگ در ابتدای مقالهٔ اصلی خود چنین بیانی را عرضه داشت ولی از آن فراتر رفت و دیدگاهی عملیات‌گرایانه (operationalistic) در پیش گرفت، و حتی بعدها به تعبیر حداکثری متمایل شد.

بنابر تعبیر اخیر که به *تعبیر حداکثری* جوردن (Jordan) موسوم است، مشاهدات نه تنها آنچه را قرار است اندازه‌گیری شود، مختل می‌کند، بلکه آن را *تولید* (یا خلق) نیز می‌کند، به این معنی که قبل از اندازه‌گیری بنابر اصل برهم نهش (superposition) اصلاً

نمی‌توانیم بگوییم الکترون کجا است؛ الکترون نه اینجا است و نه جای دیگر، زیرا هنوز تصمیم (یا به بیان فنی تر تقلیل صورت) نگرفته است که کجا باشد. مثلاً دربارهٔ مکان الکترون، عمل اندازه‌گیری است که، در طی فرایند *تقلیل*، الکترون را مجبور به اختیار مقدار دقیقی از مکان می‌کند و اگر در مرحلهٔ بعد بخواهیم سرعت الکترون را اندازه‌گیری کنیم، به همین ترتیب عمل اندازه‌گیری است که الکترون را مجبور به اختیار مقدار معینی از سرعت می‌کند و همین که الکترون این مقدار معین از سرعت را اختیار کرد، نتیجهٔ حاصل از آزمایش قبلی دربارهٔ مکان کاملاً محو می‌شود؛ و به اصطلاح به هم می‌ریزد (Jammer 1974:161).

تعبیر اول نسبت به تعبیر دوم، از این حیث *حداقلی* خوانده می‌شود که فرض‌های هستی‌شناختی کمتری دارد. در تعبیر دوم این فرض‌های هستی‌شناختی را داریم که: اولاً اندازه‌گیری اثر تولیدی دارد، ثانیاً قبل از اندازه‌گیری ذره حالت مشخصی ندارد و ثالثاً فرایندی به نام 'تقلیل' وجود دارد. در تعبیر جوردن گویی خواص میکروفیزیکی، دیگر صفات یا کیفیاتی نیستند که شیء *واجد* آنها است؛ یعنی نمی‌توان گفت شیء به معنای کلاسیکی دارای مکان و اندازه حرکت است، بلکه باید گفت چنین خواصی نتیجهٔ برهمکنش دستگاه اندازه‌گیری و ذره است. البته در اینجا توضیحی دربارهٔ چگونگی فرایند تقلیل وجود ندارد، علاوه بر این، معلوم نیست چطور اندازه‌گیری دوم دربارهٔ سرعت، مقادیر حاصل از اندازه‌گیری قبلی دربارهٔ مکان را محو می‌کند. در حقیقت در کل باید گفت تعبیر حداکثری، نسبت به تعبیر حداقلی *از نقطه نظر تبیینی*، مزیت چندانی ندارد؛ اگر اصلاً داشته باشد.

افزون بر این، پذیرش چنین تعبیری می‌تواند برخی نتایج غیررئالیستی داشته باشد، به این معنا که گویی وقایع عینی، مستقل از حواس و مغز آدمی نیست. البته جوردن در مخالفت با چنین نتیجه‌گیری‌های غیررئالیستی این طور استدلال می‌کند که بین جهان میکروفیزیک و جهان ماکروفیزیک تفاوت وجود دارد؛ مثلاً در اندازه‌گیری خواص ماه، چون حالت تغییر می‌کند، اندازه‌گیری مکان ماه در یک زمان معین به طور مستقل از این

عمل خاص اندازه‌گیری قابل انجام است، زیرا می‌توان در زمان‌های بعد یا قبل از t نیز این کار را انجام داد و این نتایج متأثر از مشاهده نیست. لذا به این معنا وضعیت معرفت‌شناختی مکانیک کوانتوم را نمی‌توان به موجودات ماکروسکوپیک تعمیم داد (ibid:162-3). اما دربارهٔ استدلال جوردن باید گفت آیا نمی‌توان در ماکروفیزیک هم به تأثیر و اختلال ناشی از مشاهده اعتقاد داشت، ولی آن را قابل اغماض دانست؟ از این گذشته آزمایش فکری گربهٔ شرودینگر نشان می‌دهد، در نظرگرفتن تمایز بین دنیای میکرو و ماکرو این مشکل را حل نمی‌کند. در ضمن ادعای تفاوت جهان میکرو و ماکرو بدون ارایهٔ توضیحی دربارهٔ این تفاوت، یک دعوی *استعجالی و موردی* (ad hoc) است، ضمن اینکه هنوز می‌توان ادعا کرد که تعبیر مذکور در سطح کوانتومی غیررئالیستی است.

به هر حال مطابق این تعبیر امکان نسبت دادن همزمان مکان و اندازه حرکت به ذرهٔ کوانتومی درست نیست و نمی‌توان به طور همزمان از مقادیر دقیق این کمیات سخن گفت. مشکل دیگری که قبول این دیدگاه به وجود می‌آورد این است که، این ایده، اثبات و استدلال اولیهٔ خود هایزنبرگ در رسیدن به اصل عدم قطعیت را زیر سؤال می‌برد، چرا که وی در اثبات اولیهٔ اصل عدم قطعیت و در آزمایش فکری که طرح کرده بود فرضش این بود که چنین مقادیر دقیقی وجود دارند ولی دقتشان را به واسطهٔ *اختلال غیر قابل کنترل و پیش‌بینی* از دست می‌دهند (p.165). به هر حال در دههٔ ۱۹۳۰، گرایش بر این بود که تعبیر حداکثری، که توصیف حالت برهمکنشی نیز خوانده می‌شود، برای عدم قطعیت عرضه شود، که بر اساس آن، به این ترتیب گفتن اینکه ذرهٔ اندازه حرکت مشخص p را دارد، به این معنا بود که دستگاه اندازه‌گیری مقدار p را ثبت کرده است؛ نه اینکه ذره *از قبل* مقدار مشخصی *داشته باشد*. این توصیف و تعبیر با اصلاحاتی نهایتاً منجر به توصیف "رابطه‌ای[1]" (relational) شد که مقالهٔ EPR نیز در تسریع آن مؤثر بود (ibid:165-6). به هر حال تعبیر حداکثری اعتراض اینشتین را نسبت به اصل عدم قطعیت برانگیخت که نقطهٔ اوج آن، ششمین کنفرانس سولوی بروکسل، به سال ۱۹۳۰، در قالب آزمایش فکری "ساعت در جعبه" بود.

آزمایش ساعت در جعبه. هدف اینشتین در ششمین کنفرانس سولوی صریحاً رد اصل عدم قطعیت هایزنبرگ بود. به عنوان نمونه وی آزمایشی در نظر گرفت که شامل یک جعبه و ساعتی درون آن، و شکافی مرتبط با ساعت بود (شکل ۱ را بدون وزنه و فنر و وزنهٔ تعادل درنظر بگیرید). شکافِ متصل به ساعت در یک *بازهٔ زمانی معین* در برابر شکاف دیگر قرار می‌گیرد و در این بازهٔ زمانی پالس نوری از این دو شکاف عبور می‌کند، اگر این پالس نوری در صفحه‌ای که دورتر، در *فاصله‌ای معین* از شکاف، واقع شده است آشکارسازی شود و انرژی آن[۲] با دقت دلخواه اندازه‌گیری شود به نظر می‌رسد که توانسته‌ایم انرژی و زمان را با دقت دلخواه تعیین کنیم و این به معنی نقض رابطهٔ انرژی - زمان هایزنبرگ است. با وجود این چون این تعیین مقدار انرژی و زمان مربوط به زمان گذشته است، به نظر نمی‌رسد که برای پیش‌بینی‌ها قابل استفاده باشد. زیرا هایزنبرگ (1930:15) خود تذکر داده بود که اصل عدم قطعیت برای *گذشته* برقرار نیست. در واقع وی معتقد بود که در اندازه‌گیری‌های متوالی مکان و اندازه حرکت، وقتی مکان ذره‌ای را با دقت اندازه‌گیری می‌کنیم عدم قطعیت در اندازه حرکت، مربوط به *قبل* از اندازه‌گیریِ اندازه حرکت است، و همین که اندازه حرکت را اندازه بگیریم و مقدار p_f را به دست آوریم، دیگر اصل عدم قطعیت برقرار نیست. یا دربارهٔ مثالی دیگر " اگر سرعت یک ذره را در ابتدا بدانیم، و سپس مکان را دقیقاً اندازه‌گیری کنیم، مکان الکترون را برای زمان‌های قبل از اندازه‌گیری مکان می‌توان حساب کرد. برای این مقادیر گذشته $\delta_p \delta_q$ کمتر از حد معمول است."(ibid.). بنابراین به اعتقاد هایزنبرگ، روابط عدم قطعیتِ انرژی برای اندازه‌گیری‌های پسگویانه برقرار نیست.

حال اگر بخواهیم این اندازه‌گیری پسگویانه (retrodictive) را به اندازه‌گیری پیش‌گویانه (predictive) تبدیل کنیم باید انرژی پالس را قبل از برخورد با صفحه به دست آوریم. این امر تنها وقتی امکان‌پذیر است که تبادل انرژی با شکاف متحرک را نیز به حساب آوریم. اگر شکاف با سرعت υ حرکت کند، عدم قطعیت در اندازه حرکت Δp در حین برهمکنش با تابش منجر به عدم قطعیت $\Delta E = \upsilon \Delta p$ می‌شود. چون مکان این

تبادل انرژی توسط پهنای مربوط به شکاف ثابت d معین می‌شود، لذا عدم قطعیت اندازه حرکت حداقل برابر $\frac{h}{d}$ است و از این رو، $\Delta E \geq h\upsilon / d$. برای افزایش دقت در تعیین انرژی، نسبت $\frac{\upsilon}{d}$ باید تا حدامکان کوچک شود (یا با کاهش v یا افزایش d)؛ در هر دو حالت دقت تعیین زمان به هم می‌خورد زیرا $\Delta t \approx \frac{d}{\upsilon}$ لذا خواهیم داشت:

$$\Delta E \Delta T \geq h$$

بنابراین برای اینکه برای افزایش دقت تعیین انرژی محتاج کاهش کسر v/d نشویم، اینشتین استراتژی دیگری پیشنهاد کرد، که به آزمایش 'ساعت در جعبه' مشهور شد. جعبه‌ای در نظر بگیرید (شکل ۱) که دارای دیواره‌هایی است که بازتاب کامل دارند. این جعبه حاوی اشعهٔ الکترومغناطیسی است و دریچه‌ای در یکی از دیوارهایش دارد که توسط مکانیسمی که مرتبط با یک ساعت است، باز و بسته می‌شود. تنظیمات طوری است که شکاف در زمان $t = t_0$ برای بازهٔ زمانی کوتاه و دلخواه t_2-t_1 باز می‌شود طوریکه یک فوتون بتواند از آن خارج شود. با توزین جعبه قبل و بعد از تابش فوتون در بازهٔ زمانی معین، می‌توان اختلاف انرژی جعبه را با خطای کم و دلخواه ΔE از رابطهٔ جرم- انرژی $E = mc^2$ معین کرد. این اختلاف انرژی، مطابق قانون بقای انرژی، مربوط به انرژی فوتون تابش یافته است. بنابراین انرژی فوتون و زمان رسیدن آن به صفحهٔ دور از دستگاه با عدم قطعیت دلخواه ΔE و Δt قابل پیش‌بینی است؛ که البته برخلاف رابطهٔ عدم قطعیت هایزنبرگ است. البته بور پس از یک شب، با استفاده از رابطهٔ انتقال سرخ نسبیت عامِ خودِ اینشتین، نشان داد که اصل عدم قطعیت کماکان برقرار است. بور بر اساس این رابطه:

$$\Delta T = T \frac{\Delta \varphi}{c^2}$$

پاسخ وی را به این شرح داد که رابطهٔ مذکور تغییرات ΔT حاصل از جابجایی ساعتی در میدان گرانشی از میان اختلاف پتانسیل $\Delta \varphi$، در بازهٔ زمانی T را نشان می‌دهد. وی متذکر شد، در فرآیند توزینی که مبنای استدلال اینشتین است[۳]:

$$T = \frac{\Delta T}{g\Delta q} c^2, \Delta q > \frac{h}{Tg\Delta m}$$

و لذا

$$\Delta T > \frac{h}{\Delta m c^2}$$

که با توجه به رابطهٔ $E = mc^2$، رابطهٔ $\Delta T \Delta E \geq h$ را خواهیم داشت (Jammer 1974:134-5).

آزمایش ETP. در این مقاله اینشتین و همکارانش، تولمان (Tolman) و پادولسکی (Podolsky) (از این پس ETP) با کمک یک آزمایش فکری استدلال کردند امکان توصیف مسیر گذشتهٔ یک ذره منجر به پیش‌بینی‌هایی دربارهٔ رفتار آیندهٔ ذرهٔ دوم می‌شود که در مکانیک کوانتوم مجاز نیست. لذا نتیجهٔ این مقاله این بود که اصول مکانیک کوانتوم مستلزم یک عدم قطعیت در توصیف رویدادهای گذشته نیز هست (ibid.:167-9).

به این منظور نویسندگان مقالهٔ ETP، جعبه‌ای مطابق شکل ۲، در نظر گرفتند که حاوی ذرات یکسانی است. با رها کردن دریچهٔ S برای مدت زمانی کوتاه، دو ذرهٔ همبسته یکی از مسیر SO و دیگری از مسیر SRO، بر اثر بازتاب از R به نقطهٔ O می‌رسند. حال اگر اندازه حرکت ذرهٔ اول به O را اندازه بگیریم، می‌توان با دانستن فاصلهٔ BO و محاسبهٔ سرعت ذره، زمان باز شدن دریچه را حساب کرد. در صورتیکه وزن جعبه را قبل و بعد از باز شدن دریچه داشته باشیم، کل انرژی خارج شده از جعبه معلوم می‌شود و لذا با داشتن اندازه حرکت ذرهٔ اول، به کمک قوانین بقا می‌توان انرژی و سرعت ذرهٔ دوم را تعیین کرد و با فرض اینکه فاصلهٔ BRO، نسبت به BO به قدر کافی بزرگ باشد، می‌توان با دقت دلخواه، انرژی و زمان رسیدن ذرهٔ دوم به نقطهٔ O را پیش‌بینی کرد؛ ولی این بر خلاف رابطهٔ عدم قطعیت است.

به اعتقاد نویسندگان مقالهٔ ETP، این پارادوکس به ما می‌آموزد در تعبیر اصل عدم قطعیت، باید این نکته را در نظر داشت که این اصل دربارهٔ حرکت گذشتهٔ (قبل از اندازه‌گیری) ذرهٔ اول نیز برقرار است. در واقع در آزمایش فرض شده است، ما در عین

دانستن BO، زمان دقیق باز شدن دریچه را حساب می‌کنیم، ولی، برای حفظ اعتبار عدم قطعیت دربارهٔ آیندهٔ ذرهٔ دوم، باید بپذیریم که مقدار BO، هر چند مربوط به قبل از لحظهٔ اندازه‌گیری یا گذشتهٔ ذره است، با اندازه‌گیری سرعت دچار عدم قطعیت می‌شود، به طوریکه نمی‌توانیم زمان دقیق باز شدن دریچه را بدانیم. به طور خلاصه نتیجهٔ مقالهٔ ETP این بود که روابط عدم قطعیت هم به اندازه‌گیری‌های پیشگویانه (predictive)، و هم پسگویانه (retrodictive) قابل اعمال است و اصول مکانیک کوانتوم باید شامل عدم قطعیت در توصیف رویدادهای گذشته نیز باشد. به اعتقاد من شاید بتوان این نتیجه را واکنشی به اظهارات هایزنبرگ در سال ۱۹۳۰ دانست، چراکه وی در آنجا عدم قطعیت را برای گذشته صادق نمی‌دانست (Heisenberg 1930:15). به بیان وی "اگر سرعت الکترون را در ابتدا بدانیم و موضع آن را بعداً اندازه‌گیری کنیم، می‌توان موضع آن را برای زمان‌های قبل از اندازه‌گیری محاسبه کرد.... اینکه بتوان به چنین محاسبه‌ای دربارهٔ سرگذشت گذشتهٔ الکترون، یک واقعیت فیزیکی نسبت داد مسأله‌ای است ذوقی." (ibid.:20). این نتیجه‌گیری از نقطه نظر هستی‌شناختی اهمیت دارد، زیرا عدم قطعیت را ناشی از اندازه‌گیری نمی‌داند، بلکه به عنوان یک واقعیت هستی‌شناختی، فارغ از اینکه اندازه‌گیری صورت بگیرد، در نظر می‌گیرد. از آنجا که این نتیجه، با دیدگاه کلی اینشتین نمی‌سازد، لذا به نظر من هدف اینشتین از ارایهٔ این مقاله، نشان دادن و تأکید بر نتایج عجیب اصل عدم قطعیت است.

ناسازگاری یا کامل نبودن؟ پس از 'آزمایش ساعت در جعبه' اینشتین از ۱۹۳۱ رویکرد جدیدی را دنبال کرد؛ به جای اینکه مستقیماً عدم قطعیت را مورد انتقاد قرار دهد، سعی کرد نتایج پارادکسیکال از آن بیرون بکشد. یکی از آزمایش‌های این دوره، که در واقع اصلاح همان ایدهٔ 'ساعت در جعبه' بود به این شرح ارایه شد(Jammer 1974:170-1):

فرض کنید جعبه با ساعت و فوتون وزن شوند و سپس فوتون رها شود؛ حال ما دو انتخاب داریم. یا می‌توان توزین جعبه را تکرار کرد و با این کار انرژی حمل شده توسط فوتون را حساب کرد، یا می‌توانیم جعبه را باز کنیم و ساعت را قرائت کنیم و این قرائت را

که به تعبیر بور به علت فرایند وزن‌کشی از نقطه‌نظر نسبیتی دچار اختلال شده است با مقایسهٔ با زمان استاندارد در بیرون جعبه، زمان دقیق رسیدن فوتون بازتاب یافته، از آینه‌ای که در مکان معینی دور از جعبه قرار دارد، حساب کنیم.

بنابراین بدون اینکه در فاصلهٔ زمانی بین فرار و برهمکنش بعدی، باعث اختلال فوتون شویم، *می‌توانستیم* پیش‌بینی‌های دقیقی، هم مربوط به لحظهٔ رسیدن فوتون و هم مقدار انرژی آن داشته باشیم[۴]. اما با توجه به اینکه مطابق فرمالیسم مکانیک کوانتوم، توصیف حالت یک ذرهٔ منفرد در آنِ واحد هم انرژی و هم زمان را شامل نمی‌شود، لذا به نظر می‌رسد که این فرمالیسم، ابزاری برای یک توصیف کامل ارایه نمی‌کند.

در حقیقت در این آزمایش‌های اخیر نیز ایده، همان ایدهٔ ساعت در جعبه است ولی این بار به جای اینکه مستقیماً عدم قطعیت را نشانه برود، نتیجه می‌گیرد که فرمالیسم ما کامل نیست. شاید هم بتوان گفت این فرمالیسم برای تک ذره کامل نیست و نیازمند اصلاح است. اما این سخن آیا غیر از این معنی می‌دهد که اصل عدم قطعیت در اینجا مشکل دارد؟ به هر حال، به اعتقاد من این آزمایش فکری با تعبیر خاصی از عدم قطعیت جور در نمی‌آید؛ این تعبیر که کمیت‌های ناسازگار (مثل انرژی و زمان) اصلاً نمی‌توانند، حتی قبل از اندازه‌گیری مستقیم، مقادیر دقیقی داشته باشند.

اینشتین در نامه‌ای که در سال ۱۹۴۵ به اپشتین (Epstein) نوشت، مراحلی را که در نهایت به ایدهٔ آزمایش EPR رسید، شرح می‌دهد. وی آزمایشی را ذکر می‌کند که مانند مورد قبل، تصحیحی در آزمایش 'ساعت درجعبه' بود (Jammer1974:175):

جعبهٔ B و ساعتی درون آن را در نظر بگیرید، (شکل ۳)، که روی ریلی بدون اصطکاک، به طور افقی، حرکت می‌کند. اینشتین در این طرح برخلاف آزمایش ساعت در جعبه، به منظور حذف اثر نسبیتی گرانش بر ساعت، حرکت جعبه روی ریل را به طور افقی در نظر گرفت. این ریل را به عنوان مرجع K در نظر بگیرید و فرض کنید ناظری فرضی روی جعبه نشسته و انتهای ریل هم پرده یا دستگاه اندازه‌گیری S قرار گرفته است. ساعت طوری تنظیم شده است که توسط مکانیسمی در لحظه‌ای معین دریچهٔ جعبهٔ B را

باز می‌کند.

در این لحظه دو امکان وجود دارد. در حالت اول می‌توان جعبه و ناظر روی آن را به ریل، که مرجع K است، ثابت و محکم کرد. در این حالت ناظر با دستگاه اندازه‌گیری که در اختیار دارد می‌تواند با داشتن فاصلهٔ B تا S، زمان رسیدن فوتون به S را پیش‌بینی کند، یا امکان دوم این است که جعبه و ناظر روی آن را آزاد از ریل در نظر بگیریم طوری که بتواند روی آن سر بخورد. در این حالت با استفاده از روش اثر دوپلر با فرکانس پایین، می‌توان اندازه حرکت جعبهٔ B را که برابر hv/c است، حساب کرد و لذا در حالت اخیر انرژی فوتونی را که به S می‌رسد به دست آورد. به این ترتیب از طریق این دو امکان *می‌توانستیم* هم انرژی (یا اندازه حرکت) و هم زمان (یا مکان) ذره را پیش‌بینی کنیم[۵]. از طرفی چون مطابق فرمالیسم مکانیک کوانتوم، توصیف حالت یک ذره در آن واحد هم انرژی و هم زمان را شامل نمی‌شود، لذا به نظر می‌رسد که این فرمالیسم ابزاری برای یک توصیف کامل ارایه نمی‌کند[۶]. تنها امکان منطقی ممکن که مانع از این نتیجه شود این است که اندازه‌گیری انجام‌شده روی B بتواند به طور *فیزیکی* بر فوتون آمده از B تأثیر بگذارد. اما این امکان از نظر اینشتین، به این دلیل که خواص فوتون، به عنوان یک واقعیت فیزیکی، مستقل از ناظر دور است و کنش از دور منتفی است، غیر قابل قبول بود.

در سال ۱۹۳۳ پاپر هم مقاله‌ای ارایه داد که ایده‌های EPR در آن بود. آزمایش فکری پاپر به این شرح بود (1959:248-245): باریکه‌ای از ذرات A با اندازه حرکت معلوم a_1، با باریکه‌ای از نور تک رنگ شامل ذرات B با طول موج معین و لذا اندازه حرکت معلوم $|b_1|$ در نقطهٔ S برخورد و ملاقاتی دارند. پس تا اینجا اندازه حرکت دو ذره قبل از برخورد مشخص است. ذرات A پس از برخورد در جهت S_x و ذرات B در جهت S_y پراکنده می‌شوند. با استفاده از قوانین بقا می‌توان اندازه حرکت a_2 و b_2 مربوط به بعد از برخورد را حساب کرد، زیرا برای هر ذرهٔ A که در جهت S_x، با اندازه حرکت a_2 پراکنده شود، اندازه حرکت ذرهٔ B، یعنی b_2، متناظر با آن به دست می‌آید. اما a_2 را چطور به دست آوریم؟

اگر یک دستگاه اندازه‌گیری، مثلاً شمارشگر گایگر، را در محل X در سمت S_x قرار

دهیم تا ذرات A را ثبت کند، می‌توانیم زمان برخورد و، با داشتن فاصلهٔ S تا X، سرعت ذرات A را به دست آوریم. به این ترتیب می‌توانیم اندازه حرکت ذرات A را بعد از برخورد، یعنی a_2 را، به دست آوریم. بنابراین با توجه به قانون بقای اندازه حرکت می‌توان، اندازه حرکت b_2 مربوط به ذرهٔ B بعد از برخورد را به دست آورد، و از آنجا فهمید ذرهٔ B در هر لحظه در چه مکانی قرار دارد. بنابراین می‌توان برای ذرهٔ B به طور غیرمستقیم هم مکان و هم اندازه حرکت داشت.

البته اینشتین در پاسخ نامه‌ای به پاپر متذکر شد که این آزمایش قابل انجام نیست، چون برای تعیین مکان و اندازه حرکت ذرهٔ B، در واقع باید زمان و انرژیِ ذرهٔ A را به طور همزمان اندازه‌گیری کنیم که شدنی نیست (Jammer:178). یا به عبارتی، برای اینکه مسیر ذره را معین کنیم باید در یک زمان معین، با اندازه حرکت معین، مکان اولیه‌ای را نیز به طور معینی داشته باشیم. در واقع وقتی اندازه حرکت را با فیلتر اندازه‌گیری می‌کنیم، مکان مختل می‌شود، در این صورت چطور می‌توان گفت دستگاه را در فاصلهٔ 'X' دقیقی قرار می‌دهیم. جالب است که اینشتین در پاسخ خود به پاپر اشاره‌ای نیز به مقالهٔ در حال انجام EPR داشت(Popper 1959:245). با توجه به آنچه گفته شد روشن می‌شود که چطور ایدهٔ جعبهٔ تحت گرانش و فوتون داخل آن در آزمایش ساعت در جعبه، کم کم جای خود را به دو فوتون داد و جعبه حذف شد و در نهایت به آزمایش EPR تبدیل شد.

بررسی آزمایش EPR

تا اینجا پیشینهٔ تاریخی که منجر به ارایهٔ مقالهٔ EPR شد، بررسی کردیم اکنون زمان آن رسیده است که به بررسی و بیان خود مقالهٔ EPR بپردازیم که در سال ۱۹۳۵ ارایه شد. در این سال، اینشتین، پادولسکی و روزن در مقاله‌ای تحت عنوان " آیا توصیف مکانیک کوانتوم از واقعیت فیزیکی را می‌توان کامل دانست؟ "، که بعدها به مقالهٔ EPR معروف شد، نتیجه گرفتند که این توصیف کامل نیست. با توجه به اینکه نمی‌توان به سادگی ادعا کرد که هیچ نظریهٔ علمی تصویر کاملی از همهٔ پدیدارها ارایه می‌دهد، این پرسش پیش می‌آید که پس تأکید بر این امر در مکانیک کوانتوم به چه معنا است؟ در واقع "کامل" بودن

در مقالهٔ EPR، به توصیفی که تابع موج از حالت سیستم می‌دهد، مربوط می‌شود.

در مکانیک کلاسیک مقادیر کمیت‌های دینامیکی متعلق به یک شیء را می‌توان با دانستن حالت شیء به دقت تعیین کرد و این حالت توسط اندازه حرکت و مکان اجزاء سازندهٔ شیء مشخص می‌شود و لذا با داشتن این مقادیر، اندازه‌گیری کمیت دینامیکی مقادیر تکراری و اضافی به ما می‌دهد و چیز جدیدی اضافه بر آنچه از محاسبات نظری به دست آوردیم، به ما نمی‌دهد. حتی اگر محاسبات، منجر به نتایج احتمالی هم شود، این احتمال ناشی از این است که دانش ما دربارهٔ حالت شیء کامل نیست. به این معنا احتمالات در حوزهٔ مکانیک کلاسیک ناشی از نقصِ معرفتی است، اما حالت فیزیکی در مکانیک کوانتوم، حتی وقتی اطلاعات ما از شیء حداکثر باشد، با تابع موجی توصیف می‌شود که همهٔ کمیات فیزیکی را در بر نمی‌گیرد؛ به‌بیان دقیق‌تر، هیچ مقداری به طور همزمان به جفت کمیات مزدوج، که در فضای هیلبرت با اپراتورهای جابجا ناپذیر نمایش داده می‌شود، نسبت داده نمی‌شود. لذا به نظر می‌رسد که نظریه توصیف ناقصی از خواص شیء به دست می‌دهد. نتیجه‌گیری دربارهٔ ناقص بودن با این واقعیت تقویت می‌شود که کمیاتی را که مقادیرشان با تابع موج مشخص نمی‌شود، *می‌توان* در هر لحظه اندازه‌گیری کرد. با وجود این در تعبیر معمول مکانیک کوانتوم این طور فرض می‌شود که تابع موج سیستم تمام اطلاعات مربوط به سیستم را دارا است، و مقالهٔ EPR درصدد آن است که نشان دهد توصیف تابع موج از واقعیت فیزیکی کامل نیست.

حال که هدف مقاله را فهمیدیم، به بررسی ساختار منطقی مقاله می‌پردازیم. ساختار منطقی مقاله با مقدمه‌های فیزیکی-معرفت‌شناختی (a_1) و (a_2) آغاز می‌شود:

(a_1): *شرط لازم برای کامل بودن یک نظریهٔ فیزیکی*: " هر عنصری از واقعیت فیزیکی باید نمایش متناظری در نظریهٔ فیزیکی داشته باشد."

(a_2): *شرط کافی برای واقعیت فیزیکی*: " اگر بدون اختلال سیستم بتوانیم با قطعیت (احتمال برابر ۱) مقدار یک کمیت فیزیکی را اندازه بگیریم، آنگاه عنصری از واقعیت فیزیکی متناظر با این کمیت فیزیکی وجود دارد." به اعتقاد EPR، " عناصر واقعیت فیزیکی

را نباید با ملاحظات فلسفی پیشینی تعریف کرد، بلکه باید آن را با توسل به نتایج آزمایش و اندازه‌گیری مشخص کرد." (p.777). البته نویسندگان مقاله قبول داشتند که عناصر واقعیت فیزیکی را به‌طرق دیگری نیز می‌توان شناخت، اما آنها قصد داشتند نشان دهند که حتی اگر خود را محدود به این شرط کنیم تعبیر معمول مکانیک کوانتوم منجر به نتایج تناقض‌آمیز می‌شود (Bohm 1951:612). استدلال از اینجا آغاز می‌شد که براساس فرمالیسم مکانیک کوانتوم به دو کمیت جابجا ناپذیر نمی‌توان مقدار دقیقی نسبت داد[۷]. لذا یا

(I) توصیفی که تابع موج مکانیک کوانتومی از واقعیت ارایه می‌دهد کامل نیست، و یا اینکه

(II) وقتی اپراتورهای متناظر با کمیت‌های فیزیکی A و B جابجاپذیر نیستند، دو کمیت نمی‌توانند به طور همزمان واقعیت داشته باشند، زیرا اگر واقعیت داشتند، از فرض کامل بودن نتیجه می‌شد که این کمیت‌های واقعی جزء توصیف باشند؛ مثلاً می‌توان گفت وقتی کمیت A را با دقت اندازه می‌گیریم و مقدار معینی را به دست می‌آوریم عناصر واقعیتی کمیت دیگر، یعنی B، محو می‌شود.

اما به بیان EPR نفی (I) منجر به نفی تنها بدیل دیگر یعنی، (II) می‌شود. به عبارتی با فرض کامل بودن توصیف مکانیک کوانتوم می‌توان نشان داد که " دو کمیت فیزیکی با اپراتورهای جابجا ناپذیر، می‌توانند به طور همزمان واقعیت داشته باشند." به این ترتیب تنها راه این است که ناقص بودن توصیف مکانیک کوانتوم را بپذیریم. بهتر است برای روشن‌تر شدن استدلال EPR، ساختار منطقی آن را به کمک منطق گزاره‌ها نشان دهیم. برای سهولت تعاریف اختصاری زیر را در نظر بگیرید (Chibeni 2005):

کمیات مزدوج می‌توانند به طور همزمان واقعیت داشته باشند[۸]: SR

توصیف مکانیک کوانتوم از واقعیت فیزیکی کامل است: C

مکانیک کوانتوم مقادیر دقیقی را به طور همزمان به کمیات مزدوج A و B نسبت می‌دهد: QM_{AB}

1. $(SR \,\&\, C) \rightarrow QM_{AB}$	شرط کامل بودن:
2. $\neg QM_{AB}$	فرمالیسم مکانیک کوانتوم:
3. $\neg(SR \,\&\, C)$	1 , 2
4. $\neg C \vee \neg SR$	3
5. $C \rightarrow SR$	شرط واقعیت:
6. $C \rightarrow \neg SR$	4
7. $C \rightarrow (SR \,\&\, \neg SR)$	5,6
8. $\neg C$	

لازم به ذکر است که EPR بدون اینکه لزومی داشته باشد برای رسیدن بـه قـدم (2) از تعبیر ارتودکس اختلالی عدم قطعیت کمک گرفتند، در حالی که قدم (2) از خود فرمالیـسم قابل استنتاج است. همچنین در قدم (5)، معلوم نیست در رونـد اسـتدلالی EPR، کجـا از مقدمهٔ C برای رسیدن به SR استفاده شده است. در واقع نویسندگان مقاله نتیجهٔ شـرطی، یعنی SR، را مستقیماً با استفاده از همبستگی‌های کوانتومی به دست آوردند.

استراتژی نویسندگان مقاله این بود که سیستم معینی متـشکل از دو ذرهٔ همبـستهٔ (۱) و (۲) را در نظر گرفتند، دو امکان دربارهٔ این سیستم مرکب پیش روی ما قرار دارد. اول اینکه بر اساس قانون بقای اندازه حرکت، با اندازه‌گیری اندازه حرکت ذرهٔ اول، مـی‌تـوان بـدون اختلال ذرهٔ دوم، اندازه حرکت آن را حساب کرد؛ به همین ترتیـب بـا کمـک قـانون بقـای مکان نسبی می‌توان با اندازه‌گیری مکانِ ذرهٔ اول، بدون اخـتلالِ ذرهٔ دوم، مکـانِ ذرهٔ دوم را نیز به دست آورد. پس اگر امکان اول را در نظر می‌گرفتیم. *می‌توانستیم* انـدازه حرکـت ذرهٔ دوم را با دقت پیش‌بینی کنیم و اگر امکان دوم را انتخاب می‌کردیم *می‌توانـستیم* مکـان ذرهٔ دوم را با دقت تعیین کنیم، لذا با توجه به شرط واقعیت فیزیکی (a_2)، می‌تـوان گفـت هـم مکان و هم اندازه حرکت ذرهٔ (۲) باید عنصری از واقعیت فیزیکی باشند[۹]. تا اینجا به طـور خلاصه ساختار منطقی و استراتژی کلی آن ارایه شد، حال بـرای تکمیـل بحـث، جزئیـات ریاضی را مورد مداقه قرار می‌دهیم.

مطابق اصول مکانیک کوانتوم متناظر بـا هـر کمیـت مـشاهده‌پـذیر فیزیکـی، اپراتـوری هرمیتی مثل A داریم؛ یعنی اگر تابع ویژهٔ این اپراتور φ باشد، خواهیم داشت:

$$\varphi' = A\varphi = a\varphi$$

که a ویژه مقدار A خوانده می‌شود و عددی حقیقی است. رابطهٔ فوق را می‌توان این طور تعبیر کرد که وقتی سیستم در حالت φ قرار دارد، اندازه‌گیری کمیت متناظر با A منجر به مقدار a می‌شود. حال برای سهولت فرض کنید که

$$\varphi = e^{(2\pi i/h)p_0 x}$$

باشد.

به این ترتیب کمیت فیزیکی را اندازه حرکت p با اپراتور متناظر $P = \frac{h}{2\pi i}\frac{\partial}{\partial x}$ در نظر بگیریم، رابطهٔ هرمیتی فوق الذکر را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\varphi' = A\varphi = \frac{h}{2\pi i}\frac{\partial}{\partial x}(e^{2\pi i p_0 x/\eta})$$

لذا

$$\varphi' = p_0 e^{2\pi i p_0 x/h} = p_0\varphi$$

پس در این حالت، اندازه حرکت مقدار قطعی p_0 را دارا است و بنابر شرط واقعیت فیزیکی دارای واقعیت فیزیکی است؛ اندازه حرکت در حالت فیزیکی $e^{2\pi i p_0 x/h}$ واقعیت دارد. حال اپراتور متناظر با مختصات، یعنی x، را در نظر بگیرید:

$$\varphi' = A\varphi = xe^{(2\pi i x p_0/h)} = x\varphi'$$

روشن است که در اینجا مقدار قطعی و مشخصی نداریم، اما می‌توان براساس اصول مکانیک کوانتوم احتمال این را که اندازه‌گیری مختصات منجر به نتیجه‌ای بین a و b گردد حساب کرد:

$$P(a,b) = \int_a^b \varphi\varphi^* dx = \int_a^b dx = b - a$$

بنابراین تمام مقادیر مختصات، به یک اندازه محتمل هستند و مقادیر معینی قابل پیش‌بینی نیست. روشن است اگر a = b باشد احتمال صفر می‌شود یعنی احتمال اینکه اندازه‌گیری مختصات منجر به یک مقدار دقیق و معین شود، صفر است. به عبارتی نمی‌توان

گفت کمیت مذکور در این حالت، واقعیت فیزیکی دارد[۱۰].

البته می‌توان مختصات را با اندازه‌گیری مستقیم به دست آورد، ولی این اندازه‌گیری فیزیکی سیستم را دچار اختلال می‌کند و حالت آن را تغییر می‌دهد و لذا مقداری که برای مختصات به دست می‌آید مربوط به حالت دیگری است. به طور خلاصه می‌توان گفت " وقتی اندازه حرکت یک ذره معلوم شود، مختصاتش واقعیت فیزیکی ندارد." (p.778)[۱۱] این نتیجه به طور کلی‌تر از اصل دیگر مکانیک کوانتوم به دست می‌آید: اگر دو اپراتور متناظر دو کمیت جابجا ناپذیر باشند، با دانستن یکی امکان به دست آوردن دیگری از بین می‌رود. به عبارتی هرگونه تلاش در جهت اینکه بخواهیم یکی را به طور آزمایشگاهی تعیین کنیم، منجر به تغییر حالت سیستم می‌شود به نحوی که دیگر نمی‌توان کمیت دیگر را به دست آورد.[۱۲] بنابراین یا توصیف مکانیک کوانتوم از واقعیت کامل نیست، یا اینکه دو کمیت واقعاً نمی‌توانند همزمان واقعیت داشته باشند، وگرنه یک نظریهٔ کامل باید آنها را پیش‌بینی می‌کرد. پس در این مرحله هدف این است که نشان دهیم دو کمیت فیزیکی جابجاناپذیر هستند که می‌توانند همزمان واقعیت فیزیکی داشته باشند.

به همین منظور ابتدا سیستم مرکبی شامل دو ذرهٔ همبستهٔ (۱) و (۲) با متغیرهای به ترتیب، x_1 و x_2 در نظر بگیرید. فرض ما این است که ذرات از زمان $t=0$ تا $t=T$ برهمکنش داشته اند و بعد از گذشت زمان T دیگر برهمکنشی بین این دو صورت نگرفته است. تابع موج سیستم مرکب را با Ψ نشان می‌دهیم. اما حالت هر یک از دو سیستم را بعد از برهمکنش، تنها با اندازه‌گیری بیشتر می‌توان حساب کرد؛ از طریق *تقلیل تابع موج*. ببینیم این فرایند تقلیل به چه شکل است.

به ترتیب $a_1,a_2,a_3,\ldots$ و $b_1,b_2,b_3,\ldots$ مقادیر ویژهٔ کمیت‌های A و B، متناظر با توابع ویژهٔ $u_1(x_1),u_2(x_1),u_3(x_1),\ldots$ و $v_1(x_2),v_2(x_2),v_3(x_2),\ldots$ در نظر بگیرید که متغیرهای x_1 و x_2 به ترتیب برای مشخص کردن سیستم (۱) و (۲) در نظر گرفته شده است. در این صورت تابع موج کل سیستم، Ψ، برای این دو کمیت را می‌توان به این صورت نوشت:

$$\Psi(x_1,x_2)=\sum_{n=1}^{\infty}\psi_n(x_2)u_n(x_1) \qquad (۷)$$

$$\Psi(x_1,x_2)=\sum_{n=1}^{\infty}\varphi_n(x_2)v_n(x_1) \qquad (۸)$$

که $\psi_n(x_2),\varphi_n(x_2)$ ها ضرایب بسط Ψ بر حسب توابع متعامد $u_n(x_1),v_s(x_2)$ هستند. حال اگر در اینجا کمیت A را اندازه‌گیری کنیم و این اندازه‌گیری منجر به مقدار a_k شود، می‌توان نتیجه گرفت که سیستم اول در حالتی با تابع موج $u_k(x_1)$ و سیستم دوم در حالتی با تابع موج $\psi_k(x_2)$ است. این فرایند که تقلیل تابع موج نام دارد، به این شکل است که تابع موج سیستم که توسط سری بی‌نهایت (۷) و (۸) نمایش داده می‌شد، به یک جملهٔ $\psi_k(x_1)u_k(x_2)$ تقلیل پیدا می‌کند. با توجه به آنچه گفته شد اگر به جای A، کمیت B را در سیستم (۱)، مقدار b_r به دست می‌آمد، نتیجه این می‌شد که سیستم اول در حالت $v_r(x_1)$ و سیستم دوم در حالت $\varphi_r(x_2)$ قرار دارد.

با توجه به آنچه گفته شد روشن است که در نتیجهٔ انجام اندازه‌گیری دو کمیت مختلف از سیستم اول، سیستم دوم در دو تابع موج مختلف قرار می‌گیرد. *"از طرفی چون در زمان اندازه‌گیری، دو سیستم برهمکنشی ندارند، امکان هر نوع تغییری در سیستم دوم که ناشی از انجام کاری در سیستم اول باشد، منتفی است."*

بنابراین در اینجا دو تابع موج مختلف ψ_k و φ_r به یک واقعیت فیزیکی نسبت داده می‌شود. می‌توان با ذکر مثالی نشان داد که این دو تابع موج (دو حالت) می‌توانند، دو ویژه تابع از دو اپراتور جابجا ناپذیر باشند. برای مثال، فرض کنید دو سیستمی که راجع به آنها سخن گفتیم، دو ذره باشند که تابع موج سیستم مرکب آن را به صورت زیر نمایش دهیم:

$$\Psi(x_1,x_2)=\int_{-\infty}^{+\infty}e^{(2\pi i/h)(x_1-x_2+x_0)p}dp, \qquad (۹)$$

(که x_0 یک ثابت است)، می‌توان Ψ را به دو طریق مختلف ولی معادل نوشت:

$$\Psi(x_1,x_2)=\int_{-\infty}^{+\infty}\exp[\frac{-2\pi i(x_2-x_0)p}{h}]\exp[\frac{2\pi i x_1 p}{h}]dp \qquad (10)$$

یا

$$\Psi(x_1,x_2)=\int_{-\infty}^{+\infty}\{\int_{-\infty}^{+\infty}\exp[\frac{2\pi i(x-x_2+x_0)p}{h}]dp\}\delta(x_1-x)dx$$

$$= h\int_{-\infty}^{+\infty}\delta(x - x_2 + x_0)\delta(x_1 - x)dx \qquad (۱۱)$$

روشن است که شکل پیوستهٔ معادلات (۵) و (٦) به این صورت است:

$$\Psi(x_1, x_2) = \int_{-\infty}^{+\infty}\psi_p(x_2)u_p(x_1)dp \qquad (۱۲)$$

$$\Psi(x_1, x_2) = \int_{-\infty}^{+\infty}\varphi_x(x_2)\upsilon_x(x_1)dx \qquad (۱۳)$$

حال دو حالت در نظر بگیرید:

حالت (I): از مقایسهٔ (۱۰) و (۱۲)، و بر اساس آنچه دربارهٔ معادلهٔ (۷) گفته شد داریم:

$$u_p(x_1) = \exp(2\pi i x_1 p / h)$$

ویژه تابع اپراتور اندازه حرکت خطی $\frac{h}{2\pi i}\frac{\partial}{\partial x_1}$ برای ذرهٔ (۱)، متناظر با ویژه مقدار $p_1=p$ است و

$$\psi_p(x_2) = \exp(-2\pi i(x_2 - x_0)p / h)$$

ویژه تابع اپراتور اندازه حرکت خطی $P = (\frac{h}{2\pi i})\frac{\partial}{\partial x_2}$ برای ذرهٔ ۲ متناظر با ویژه مقدار $p_2=-p$ است و این نتیجه به این معنا است که اگر اندازه حرکت ذرهٔ (۱)، p باشد (طوری که بعد از اندازه‌گیری $\Psi(x_1, x_2)$ به $\psi_p(x_2)u_p(x_1)$ تقلیل پیدا کند)، بدون اختلال ذرهٔ (۲) می‌توان نتیجه گرفت که اندازه حرکت آن p– است (p.780).

در حالت (II): با مقایسهٔ (۱۱) و (۱۳)، و براساس آنچه دربارهٔ معادلهٔ ۸ گفته شد، داریم:

$$\upsilon_x(x_1) = \delta(x_1 - x)$$

یعنی ویژه تابع اپراتور مختصات x برای ذرهٔ ۱، متناظر با ویژهٔ مقدار $x_1=x$ است و

$$\varphi_x(x_2) = h\delta(x - x_2 + x_0)$$

ویژه تابع اپراتور مختصات، $Q=x_2$ برای ذرهٔ ۲ متناظر با ویژه مقدار $x_2 = x+x_0$ است. یعنی اگر مختصات ذرهٔ (۱)، نتیجهٔ x باشد، (طوری که بعد از اندازه‌گیری $\Psi(x_1, x_2)$ به

$\psi_x(x_2)u_x(x_1)$ تقلیل یابد)، بدون اختلال ذرهٔ ۲ می‌توان نتیجه گرفت که مختصات آن $x+x_0$ است.

از طرفی روشن است که $PQ-QP = h/2\pi i$

به طور خلاصه می‌توان گفت که با توجه به معادلات ۷ و ۸ ما ψ_k و φ_r را دو ویژه تابع از اپراتورهای جابجا ناپذیر P و Q، به ترتیب متناظر با p_k و q_k در نظر گرفتیم. بنابراین اگر یکی از کمیات A یا B را اندازه می‌گرفتیم، *می‌توانستیم* با قطعیت و بدون اختلال سیستم دوم، یا مقدارکمیت P، (یعنی p_k) و یا مقدار کمیت Q (یعنی q_k) را پیش‌بینی کنیم و بنابر شرط واقعیت می‌توان گفت P و Q عنصری از واقعیت هستند. اما چنانکه گفتیم هر دو تابع موج ψ_k و φ_r متعلق به یک واقعیت هستند (p.780). به این ترتیب، نویسندگان مقاله نتیجه گرفتند که هر دو عنصر واقعیت فیزیکی دارند، و از آنجا که فرمالیسم به طور همزمان نمایشی برای این دو کمیت ندارد لذا مجبوریم بپذیریم تابع موج توصیف کاملی ارایه نمی‌کند. اینشتین و همکارانش در انتهای مقالهٔ خود متذکر شدند که (p.780):

در حالی که نشان داده‌ایم تابع موج توصیف کاملی از واقعیت فیزیکی فراهم نمی‌کند، این پرسش را باز گذارده‌ایم که آیا چنین توصیفی وجود دارد یا خیر. با وجود این به باور ما چنین نظریه‌ای ممکن است.

البته EPR توضیح نمی‌دهند که این توصیف آیا مکمل توصیف کنونی خواهد بود یا به طور کلی با آن تفاوت خواهد داشت. حال این پرسش را مطرح می‌کنیم که آیا چنین نتیجه‌گیری، یعنی ناقص بودن توصیف مکانیک کوانتوم، الزام‌آور است؟ باید گفت خود نویسندگان مقاله متذکر شدند که شاید کسی معیار واقعیت را به این جهت که به قدر کافی مانع (restrictive) نیست مورد انتقاد قرار دهد؛ یعنی ممکن است گفته شود که کمیات فیزیکی را تنها زمانی می‌توان به عنوان عناصر همزمان فیزیکی واقعی در نظر گرفت که به طور همزمان اندازه‌گیری یا پیش‌بینی شوند. اما اگر شرط واقعیت فیزیکی اینقدر محدودکننده باشد، واقعیت P و Q مربوط به ذرهٔ دوم وابسته به فرایند اندازه‌گیری انجام‌گرفته روی سیستم اول، که سیستم دوم را مختل نمی‌کند، می‌شود و این تعریف از

واقعیت فیزیکی، از نظر نویسندگان مقاله، تعریف معقولی به نظر نمی‌رسد. برای روشن‌تر شدن موضوع می‌توان گفت در مقالهٔ EPR، دو فرض اساسی به تفکیک در نظر گرفته شده است:

۱- *جدایی‌پذیری:* وقتی روی سیستم اول اندازه‌گیری صورت می‌گیرد، هرچند سیستم اول و دوم درهم تنیده‌اند (entangled)، یعنی به نوعی باهم درارتباط‌اند، با وجود این سیستم دوم هویت مجزای خود را حفظ می‌کند و واقعیت فیزیکی آن مستقل از اولی است.

۲- *موضعیت:* نتیجهٔ اندازه‌گیری روی سیستم اول نمی‌تواند هیچ تغییر "واقعی" در سیستم دوم ایجاد کند. به عبارتی در جریان اندازه‌گیری، دو سیستم بر همکنشی ندارند.

همهٔ این فرض‌ها در نتیجه‌گیری EPR، مؤثرند. در واقع اندازه‌گیری سیستم اول، موجب تقلیل تابع موجِ سیستم مرکب و تعیین ویژه حالت مکان برای سیستم دوم می‌شود. با 'فرض جدایی‌پذیری' است که می‌توانیم، این ویژه حالت را به واقعیتِ سیستمِ دوم نسبت دهیم و مکان سیستم دوم را تعیین کنیم و هر چند این پیش‌بینی وابسته به اندازه‌گیری انجام‌شده روی سیستم اول است، ولی به دلیل 'فرض موضعیت'، می‌توانیم ادعا کنیم که این پیش‌بینی، اختلالی در *واقعیت* سیستم دوم، ایجاد نمی‌کند، و بنابر *شرط واقعیت*، مکان پیش‌بینی‌شدهٔ متناظر با ویژه حالت مکان، عنصری از واقعیت فیزیکی است. به یاد بیاورید که استدلال EPR ، بر پایهٔ یک شرطی خلاف واقع بود، به این شکل که "اگر در اندازه‌گیری کمیت P از ذرهٔ اول مقدار p را به دست می‌آوردیم، *می‌توانستیم* طی عملیاتی برای ذرهٔ دوم مقدار کمیت مذکور را p- پیش‌بینی کنیم." و فرض تلویحی این بود که به چنین شرطی خلاف واقعی می‌توان ارزش صدق نسبت داد، هرچند نسبت دادن ارزش صدق به شرطی‌های خلاف واقع خود یک بحث مناقشه‌خیز فلسفی است، ولی با وجود این، به نظر می‌رسد در مقالهٔ EPR، با پذیرش فرض *رئالیسم* و *موضعیت* ، این اجازه را داشته باشیم که- حداقل در این مورد خاص _ به شرطی خلاف واقع ارزش صدق نسبت دهیم. در واقع اگر مطابق فرض رئالیسم معتقد باشیم که فرایند اندازه‌گیری

یک کمیت فیزیکی صرفاً خاصیتی مستقل از ما را که قبل از عمل اندازه‌گیری نیز وجود داشته است، آشکار می‌کند، باید بر اساس فرض موضعیت بگوییم این واقعیت عینی با انجام عملی فیزیکی در فاصله‌ای دور نمی‌تواند به طور آنی تغییر کند، و در ضمن اگر قادر باشیم مقدار کمیتی متعلق به شیء دور را با عملیات معینی پیش‌بینی کنیم، آنگاه این نتیجه الزام‌آور خواهد بود که کمیت مذکور حتی قبل از اندازه‌گیری در دور و انجام عملیات مربوطه همچنان آن مقدار را داشته است.

توجه به این نکته مهم است که بدون فرض موضعیت و رئالیسم تضمینی وجود ندارد که پس از پیش‌بینی مکان سیستم دوم و انتساب واقعیت به آن، بتوانیم استدلال کنیم که سیستم دوم، مکان را به عنوان عنصری از واقعیت فیزیکی، *حتی در غیاب اندازه‌گیری* روی سیستم (۱)، دارا باشد. در واقع این فرض موضعیت است که ما را به این نتیجه می‌رساند که واقعیت سیستم دوم، غیر زمینه‌ای و مستقل از سیستم اول است. اگر فرض موضعیت نبود، می‌توانستیم بگوییم که مکان و اندازه حرکت هر کدام در زمینهٔ جداگانهٔ اندازه‌گیری واقعی هستند و لزومی ندارد که *به طور همزمان* واقعی باشند، همچنین می‌توانستیم بگوییم مکان برای سیستم دوم یا وجود نداشته و یا تعریف نشده و با اندازه‌گیری سیستم اول امکان وجود و تعریف پیدا کرده است. فرض موضعیت این امکان‌ها را منتفی می‌کند. البته EPR، خود به طور تلویحی به ضرورت فرض موضعیت در پاراگراف یکی به آخر مقالهٔ خود اشاره کرده بودند (p.780).

تا اینجا استدلال مقالهٔ EPR، و مهم‌ترین مفروضات آن را گفتیم. اکنون این نکته را اضافه می‌کنیم که نسخهٔ نهایی این مقاله توسط پادولسکی تنظیم شد و اینشتین قبل از چاپ مقاله آن را ندید، و از این بابت بعداً از ساختار مقاله و محورهای مورد تأکید مقاله اظهار ناخرسندی کرد. خود وی روایت‌های دیگری نیز از این برهان عرضه کرد که مروری بر آنها، در قسمت بعدی مقاله، فهم ایدهٔ اصلی اینشتین را روشن می‌کند.

روایت‌های اینشتینی

اینشتین بعد از انتشار مقالهٔ EPR، سعی کرد برهان مربوط به آن را با وضوح بیشتری

روی محورهایی که خود مهم می‌دانست، ارایه کند. یکی از این روایت‌های بعدی در مکاتبه با شرودینگر بود که بعداً ایدهٔ آن در مقالهٔ ۱۹۳٦ اینشتین و ترجمهٔ آن در سال ۱۹٥٤ به چاپ رسید. این روایت‌های بعدی که اینشتین ارایه کرد، هر چند باهم تفاوت‌هایی داشت، متشکل از یک سیستم مرکب بود که به طریقی شرایطی برای اندازه‌گیری از راه دور بدون اختلال را فراهم می‌کرد. توضیحات اخیر اینشتین، دیگر شامل *شرط واقعیت* نبود و به دنبال این نبود که مقادیر یک کمیت را می‌توان به عنوان "عناصر واقعیت" پذیرفت. همچنین اینشتین مثل پادولسکی به دنبال و دلمشغول محاسبات ریاضی نبود. علاوه بر این حتی در ۱۹۳٥ اعلام کرد که خصوصاً وی تأکیدی بر مقادیر همزمان کمیت‌های ناسازگار، مثل مکان و اندازه حرکت ندارد.

توجه وی همچنانکه به شرودینگر اعلام کرد، معطوف به *کامل بودن* بود و استدلال خود را دربارهٔ وضعیتی که تنها شامل یک متغیر (مکان یا اندازه حرکت) بود، نیز به کار برد. به طور خلاصه، اینشتین در نوشته‌های بعد از EPR ، بر این نکته تأکید داشت که بین پذیرش *موضعیت* و *جدایی‌پذیری* از یک طرف، و کامل بودن توصیف سیستم‌های منفرد توسط توابع موج، از طرف دیگر، ناسازگاری وجود دارد (Fine 2004).

اینشتین در نامه‌ای که به شرودینگر نوشت این ناسازگاری و دوراهی را به این شکل مطرح کرد: برهمکنشی بین سیستم‌های (۱) و (۲) در نظر بگیرید که در آن مکان نسبی بقا داشته باشد. به اندازه حرکت (یا هر کمیت دیگر) کاری نداریم تابع موج سیستم مرکب (۱+۲) را در نظر بگیرید.

حال اصل موضعیت ـ جدایی‌پذیری را در نظر بگیرید. اینکه یک خاصیت فیزیکی برای سیستم (۲) بر قرار است، وابسته به این نیست که چه اندازه‌گیری روی سیستم (۱) انجام شود. اگر مکان سیستم (۱) را اندازه بگیریم، بقای فاصلهٔ نسبی نتیجه می‌دهد که می‌توانیم، بلافاصله مکان سیستم (۲) را نتیجه بگیریم. یعنی می‌توانیم نتیجه بگیریم که سیستم (۲) مکان معینی دارد و با فرض *موضعیت–جدایی‌پذیری*، نتیجه می‌شود که درست قبل از اینکه روی سیستم (۱) اندازه‌گیری صورت گیرد، سیستم (۲) مکان معینی داشته است.

اما قبل از اینکه روی سیستم (۱) اندازه‌گیری صورت بگیرد، سیستم (۲) تابع حالت مستقلی نداشته است، بلکه تابع حالت آن ترکیبی و مربوط به سیستم مرکب ۱و ۲ بوده است. این تابع حالت مرکب، نمی‌تواند مکانی را که ما برای سیستم (۲) یافته‌ایم، پیش‌بینی کند؛ یعنی به صورت حاصل ضرب نیست که یکی از فاکتورهای آن یک ویژه حالت برای مکان سیستم (۲) باشد. بنابراین، توصیفی که تابع حالت کوانتومی از سیستم (۲) ارایه می‌کند ناقص است.

اینشتین برهان دیگری نیز عرضه کرد که به وضوح روی تعبیر توابع حالت کوانتومی تأکید داشت و چیزی راجع به مقادیر همزمان (واقعی یا غیرواقعی) برای کمیات ناسازگار نمی‌گفت. دو سیستم در نظر بگیرید که در برهمکنش آن دو، مکان نسبی بقا[۱۳] داشته و اندازه حرکت کل صفر باشد، و در ضمن دو سیستم دور از یکدیگر قرار داشته باشند. می‌توانیم یا مکان و یا اندازه حرکت سیستم اول را اندازه‌گیری کنیم و در هر دو صورت می‌توانیم مکان و اندازه حرکت سیستم دوم را نتیجه بگیریم. از تقلیل تابع موج کل نتیجه می‌شود که بسته به اینکه ما مکان یا اندازه حرکت سیستم اول را اندازه بگیریم، سیستم دوم به ترتیب در ویژه حالت مکان یا ویژه حالت اندازه حرکت می‌ماند. با فرض اینکه سیستم دوم واقعیت فیزیکی مستقل دارد (شرط جدایی‌پذیری) و اندازه‌گیری سیستم اول روی "واقعیت" فیزیکی سیستم دوم تأثیری ندارد (شرط موضعیت)، بسته به اینکه فرد بخواهد چه اندازه‌گیری را روی سیستم اول انجام دهد، واقعیت فیزیکی سیستم دوم با توابع حالت کاملاً متفاوتی نمایش داده می‌شود. حال اگر "توصیف کامل" را توصیفی بدانیم که در آن توصیف یک حالت فیزیکی با توابع حالتی با نتایج فیزیکی مجزا مجاز نباشد، آنگاه باید گفت توصیف مکانیک کوانتوم ناقص است. در حقیقت اینجا با یک دو راهی بین موضعیت ـ جدایی‌پذیری، از یک طرف و کامل بودن از طرف دیگر مواجهیم. سال‌ها بعد اینشتین این وضعیت را به این شکل بیان کرد که پارادوکس ما را مجبور می‌کند که یکی از این موارد زیر را رد کنیم:

(۱) توصیف ارایه‌شده توسط تابع موج کامل است.

(۲) حالات واقعی اشیایی که از لحاظ فضایی جدا از هم هستند، مستقل از یکدیگرند.

لذا به نظر می‌رسد که نکتهٔ اصلی EPR این بود که استدلال کند در تعبیر توابع حالت کوانتومی ما با دو بدیل فوق مواجهیم.

چنانکه دیدیم، اینشتین در استدلال‌های متأخر خود برای کامل نبودن نظریهٔ کوانتوم، از جدایی‌پذیری و موضعیت استفاده می‌کند که البته به طور تلویحی در مقالهٔ EPR به آنها اشاره شده است. وی در نامه‌ای به ماکس بورن به وضوح عقاید خود را به این شکل بیان می‌کند که:

این ویژگی اشیاء فیزیکی است که طوری در نظر گرفته شوند که گویی در یک پیوستار فضا-زمانی چیده شده‌اند. یک ویژگی اساسی این چیدمان این است که این اشیاء در هر زمان، وجودی مستقل از دیگری دارند، ایدهٔ منتج مبین استقلال نسبی اشیاء (A و B) است که از نظر فضایی دور از هم هستند: تأثیر خارجی روی A هیچ تأثیر مستقیمی روی B ندارد.

البته به اعتقاد اینشتین برای استنتاج "کامل نبودن"، یعنی نشان دادن اینکه تابع حالت سیستم توصیف کاملی از امور واقع مربوط به سیستم نمی‌دهد، حتی فرض موضعیت و جدایی‌پذیری ضروری نیست. تابع موج براساس اصل برهم نهش مخلوط و ترکیبی از از این دو حالت را به دست می‌دهد[۱۴]. حال که تأکیدات اینشتین را در روایت‌های خودش از برهان EPR یادآور شدیم، به واکنش‌هایی که به این برهان صورت گرفت، می‌پردازیم.

واکنش به برهان EPR

بلافاصله پس از انتشار مقالهٔ EPR، تبلیغات زیادی روی آن صورت گرفت به طوری که در نهایت واکنش تند اینشتین را نسبت به مقاله‌ای در نشریهٔ نیویورک تایمز، برانگیخت و اعتراض وی به تبلیغاتی شدن بحث را موجب شد. به هر حال، به بیان یامر اولین واکنش قابل اعتنا از آن کمبل بود. اولاً وی معتقد بود که نسبت دادن دو تابع موج مختلف به یک ذره، تنها ناقص بودن مکانیک کوانتوم را نتیجه نمی‌دهد، بلکه از آن فراتر می‌رود و به معنایی درستی آن را زیر سؤال می‌برد. آن طور که از گزارش یامر بر می‌آید، از ویژگی‌های

نقد کمبل این بود که وی تعبیری آنسامبلی از تابع موج ارایه می‌داد، و در ضمن معتقد بود تابع موج صرفاً ابزاری محاسباتی و ذهنی است و توصیفی از واقعیت فیزیکی نیست. پادولسکی در مقاله‌ای، که منتشر نشد ولی یامر گزرشی از آن ارایه کرده است، در پاسخ کمبل بر این نکته تأکید کرد که نظریهٔ کوانتوم به منزلهٔ یک نظریهٔ آماری درست و کامل است ولی اگر حوزهٔ اعتبار آن را به *مجموعه‌ای* از ذرات محدود کنیم نقد کمبل به EPR اساساً قابل طرح نیست؛ چون EPR، خود را محدود به این تعبیر آنسامبلی نمی‌کند. از طرفی تابع موج را نمی‌توان موجودی صرفاً ذهنی دانست زیرا اگر شناخت ما از سیستم فیزیکی چیزی بیش از اینکه یک قوهٔ معین ذهنی نباشد، در این صورت صرف تغییر در آگاهی ما نسبت به سیستم بایست موجب تغییر حالت سیستم شود و این برخلاف تصوری است که ما از واقعیت فیزیکی به عنوان موجودی مستقل از ذهن داریم. به گزارش یامر، کمبل پس از رؤیت مقالهٔ پادولسکی قبول کرد که اتهام مغالطه به برهان EPR درست نبوده است، بلکه اختلاف آنها ناشی از عدم توافق در تعبیر مکانیک کوانتوم بوده است (p.191-2).

همان طور که قبلاً گفتیم، روایت‌های خود اینشتین، برخلاف مقالهٔ EPR، بر *شرط واقعیت* تأکید ندارد، و دو راهی که اینشتین در روایت‌های خود از برهان EPR، بر آن تأکید می‌کرد در مقالهٔ EPR چندان برجسته نیست و احتمالاً به همین دلیل اینشتین از شیوهٔ ارایهٔ برهان در مقالهٔ EPR، که صورت‌بندی نهایی آن توسط پادولسکی تهیه شده بود، چندان راضی نبود. ولی به هر حال اغلب فیزیکدانان و خود بور بیشتر همین بیان مقالهٔ EPR، و نه روایت‌های اینشتین، را مد نظر قرار دادند.

بور (Bohr 1935) در مقاله‌ای با همان عنوان به EPR پاسخ داد. لب جواب بور این بود که استدلال EPR مغالطه‌آمیز است، چون مبتنی بر این فرض است که بدون توجه به آرایش تجربی، می‌توان از حالت یک سیستم فیزیکی صحبت کرد. بعبارت دقیق‌تر، به زعم وی آنچه در مقالهٔ EPR تحت عنوان 'معیار واقعیت فیزیکی' ارایه شده است در حوزهٔ پدیدارهای کوانتومی ابهامی ذاتی دارد که نیازمند ایضاح است و ایضاح و مقید کردن

تعریف واقعیت فیزیکی به کمک اصل مکملیت، کامل بودن مکانیک کوانتوم را تضمین می‌کند[15]. ممکن است به بور به این دلیل که معتقد بود نمی‌توان به صورت پیشینی و با مفاهیم فلسفی صرف معنای دقیق و غیر مبهمی به 'واقعیت فیزیکی' نسبت داد، و این کار باید با اتکا به آزمایش صورت بگیرد، دیدگاه پوزیتیویسم را نسبت دهند. ولی در این خصوص نمی‌توان چندان مطمئن بود[16]، زیرا هرچند بور بعدها دیدگاهی شبه پوزیتیویستی اختیار کرد ولی پاسخ وی به EPR ضرورتاً متکی به چنین دیدگاهی نیست زیرا وی صراحتاً در پاسخ خود اذعان می‌دارد که وقتی مکان ذرهٔ اول اندازه‌گیری شود "... مبنایی برای محاسبهٔ مکان اولیه ذرهٔ دیگر نسبت به دستگاه ساکن در اختیار خواهیم داشت" (p.696). بنابراین بور با EPR از این جهت موافق است که با اندازه‌گیری مکان (و یا اندازه حرکت) ذرهٔ اول، می‌توان مکان ذرهٔ دوم را واجد عنصری از واقعیت فیزیکی دانست چه مکان آن، واقعاً اندازه‌گیری شود یا نشود. پس، از این نقطه‌نظر پاسخ بور متکی به این فرض شبه پوزیتیویستی یا ایدئالیستی نیست که یک سیستم داده شده فقط وقتی واقعیت دارد که واقعاً اندازه‌گیری شود(Halvorson & Clifton 2001:4).

بور برای رد برهان EPR، این ادعا را که عناصر واقعیت فیزیکی ذرهٔ دوم مستقل از انجام اندازه‌گیری روی ذرهٔ اول است، مورد حمله قرار داد. طبق دیدگاه بور برای سیستم‌های کوانتومی وقتی یک‌بار ملاقات روی دهد، دیگر جدایی میسر نیست، به عبارتی وی معتقد بود که اندازه‌گیری روی ذرهٔ اول *می‌تواند* موجب ساخته شدن عناصر واقعیت فیزیکی برای ذره‌ای که به طور فضاگونه جدا از ذرهٔ اول است، شود. در واقع آنچه دربارهٔ ذرهٔ دوم واقعی قلمداد می‌شود به طریقی وابسته به اندازه‌گیری انجام شده روی سیستم اول است.

بنابراین بور با بررسی شرط *واقعیت فیزیکی* بر این نکته تأکید می‌ورزد که عبارت 'بدون اینکه به هیچ طریقی سیستم را مختل کند' مبهم است زیرا هرچند اندازه‌گیری سیستم اول موجب تأثیر 'مکانیکی' مستقیم روی سیستم دوم نمی‌شود ولی وقتی مکان سیستم اول را اندازه‌گیری کردیم و به‌واسطهٔ آن مکان سیستم دوم را نتیجه گرفتیم، دیگر

نمی‌توانیم اندازه حرکت سیستم دوم را به دست آوریم؛ در واقع، اندازه‌گیری مکان سیستم اول به ما اجازهٔ این کار را نمی‌دهد. لذا بسته به اینکه چه متغیرهایی را روی سیستم اول اندازه‌گیری کنیم، مجبوریم پیش‌بینی‌های متفاوتی دربارهٔ اندازه‌گیری‌های بیشتر روی سیستم دوم داشته باشیم.

نکته‌ای که در پاسخ بور اهمیت دارد این است که بور تا پیش از این، رابطهٔ مکملیت را به نحوی بکار می‌برد که براساس آن رابطهٔ عدم قطعیت و ویژگی آماری نظریهٔ کوانتوم را بر مبنای تأثیرات و اختلالات غیرقابل کنترل در سیستم تحت اندازه‌گیری تفسیر می‌کرد، ولی در پاسخ به EPR می‌پذیرد که در روش غیرمستقیم تعین مکان سیستم دوم در EPR، تأثیرات مذکور مکانیکی نیست، بلکه نوعی اختلال 'اطلاعاتی' است؛ اختلال در اطلاعات موجود برای پیش‌بینی رفتار آیندهٔ سیستم دوم. به عبارتی درست است که تأثیر مکانیکی سیستم روی ذرهٔ دوم ناشی از اندازه‌گیری ذره اول منتفی است ولی روش اندازه‌گیری تأثیر ذاتی روی شرایطی دارد که تعریف کمیات فیزیکی بر مبنای آن‌ها صورت می‌گیرد. به بیان بور، اندازه‌گیری مکان (اندازه حرکت) ذرهٔ اول روی شرایطی که برای تعریف مکان (اندازه حرکت) ذرهٔ دوم مورد نیاز است تأثیر می‌گذارد. بور معتقد بود در فیزیک کوانتومی برخلاف فیزیک کلاسیک، تفاعل بین سیستم مورد مطالعه و وسیلهٔ مورد آزمایش (که شامل ناظر هم می‌شود) قابل اغماض یا جبران نیست، و لذا برای توضیح بی ابهام پدیده‌های کوانتومی باید *تمام* تدارکات تجربی را مشخص کرد، و از آنجا که پدیدهٔ تحت مطالعه و آزمایشگر یک واحد تجزیه ناپذیر می‌سازند، و در ضمن یک سیستم کوانتومی بعضی خواص مانعه‌الجمع دارد، پس برای توصیف اشیای اتمی باید تمام جهات ذیربط تدارکات تجربی را ذکر کرد. در واقع در اینجا یکی از نقاط افتراق مکانیک کلاسیک و کوانتوم روشن می‌شود؛ برخلاف مکانیک نیوتنی، در اینجا با یک کل‌گرایی مواجهیم.

حال ببینیم وضعیت پاسخ بور در قبال روایت اینشتینی برهان EPR، چگونه خواهد بود. همان طور که گفته شد با اندازه‌گیری مکان سیستمِ اول می‌توان با قطعیت، مکانِ ذرهٔ دوم را به دست آورد. از طرفی به واسطهٔ اصل موضعیت می‌توانیم بگوییم که ذرهٔ دوم قبل

از اندازه‌گیری هم این مقدار مکان را داشته است و لذا مکان جزئی از واقعیت فیزیکی سیستم دوم محسوب می‌شود. مطابق فرض موضعیت اندازه‌گیری در محل ذرهٔ اول روی *واقعیت* ذرهٔ دیگر تأثیر ندارد. حال اگر مثل بور، به *اختلال اطلاعاتی* اعتقاد داشته باشیم، این امر نافی موضعیت و لذا مانع نتیجه‌گیری EPR، نخواهد بود مگر اینکه این اطلاعات را جزء *واقعیت* سیستم دوم در نظر بگیریم. اما مشکل اینجا است که اطلاعات مربوط به سیستم اول چطور ممکن است جزء واقعیت سیستم دوم باشد؟ به هر حال هر چند با بسط مفهوم واقعیت فیزیکی به شکلی که نظریهٔ کوانتوم را به طریقی غیر موضعی کند، به کامل بودن توصیف مکانیک کوانتوم خدشه‌ای وارد نمی‌شود. ولی این مفهوم غیرموضعی خود تبیین مقبولی ندارد[۱۷].

روایت بوهمی و قضیهٔ بل

بوهم در کتابی درسی که تحت عنوان *نظریهٔ کوانتوم* نوشت، روایتی از برهان EPR عرضه کرد که براساس اندازه‌گیری اسپین بود و به EPR-B مشهور شد (Bohm 1951:614-5). روایت اسپینی به دلایل آزمایشگاهی اهمیت داشت، زیرا مبنای آزمایش‌هایی شد که بعدها دربارهٔ قضیهٔ بل مورد توجه قرار گرفت. بوهم واپاشی یک مولکول دو اتمی، مثل هیدروژن، را در نظر گرفت[۱۸] که در این واپاشی اندازه حرکت زاویه‌ای یا اسپینی کل صفر بود و، بنا به اصل بقا، پس از واپاشی ثابت باقی می‌ماند.

وقتی اتم‌ها قبل از واپاشی یک مولکول را تشکیل می‌دادند، هر اتم اندازه حرکت زاویه‌ای معینی داشت که خلاف جهت اندازه حرکت زاویه‌ای اتم دیگر بود تا اندازه حرکت زاویه‌ای کل صفر باشد. حال وقتی اتم‌ها جدا می‌شوند هر یک اندازه حرکت زاویه‌ای مربوط به خود را که خلاف جهت اتم دیگر است دارا است. بنابراین بردارهای اندازه حرکت زاویه‌ای یا اسپینی دو ذره همبسته‌اند و منشأ این همبستگی از زمانی است که دو (اتم) در تشکیل یک مولکول به اندازه حرکت اسپینی صفر شرکت داشتند. این همبستگی با جدا شدن دو ذره با معادلات موجبیتی حرکت هر بردار اسپین حفظ می‌شود. پس از واپاشی، دو ذره از هم دور می‌شوند، حال اگر نتیجهٔ اندازه‌گیری اسپین ذرهٔ اول،

جهت مثبت محور عمود بر مسیر پرواز را به دست *می‌داد*، لاجرم بنابر اصل بقا، اسپین ذرهٔ دیگر می‌بایست در جهت منفی محور مذکور *می‌بود*، و بالعکس اگر اندازه‌گیری اسپین ذرهٔ اول جهت منفی را نتیجه *می‌داد*[۱۹]، ذره دوم می‌بایست در جهت مثبت باشد. چون برای اندازه‌گیری اسپین ذرهٔ اول می‌توان هر جهت دیگری نیز انتخاب کرد و مقدار معینی را برای ذرهٔ اول به دست آورد، لذا بدون اختلال سیستم دوم می‌توان اندازه حرکت معینی را برای آن پیش‌بینی کرد. با توجه به شرط واقعیت فیزیکی می‌توان گفت اسپین ذرهٔ دوم در تمام جهات واقعیت فیزیکی دارد، و این در حالی است که تابع موج در هر زمان حداکثر یکی از اینها را می‌تواند نشان دهد. پس به نظر می‌رسد که تابع موج توصیف کاملی از واقعیت فیزیکی ارایه نمی‌کند. اگر این برهان درست باشد، پس گویا باید به دنبال توصیف کامل تری بگردیم.

مختصری دربارهٔ قضیهٔ بل

بل با استفاده از ساز و کار EPR-B آزمایشی ترتیب داد که نتایج بسیار جالبی داشت و مثل EPR، جنجال‌برانگیز شد. بل با استفاده از مدل بوهم به یک نامساوی رسید، که بنابر نظریهٔ کوانتوم این نامساوی نقض می‌شود. پس یا باید نظریهٔ کوانتوم غلط باشد و یا یکی از شرایطی که نامساوی بل را نتیجه می‌دهد غلط باشد. از آنجا که نظریه با تجربه سازگار است مجبوریم شق دوم را بپذیریم. اما این مفروضات چیست و کدام یک را باید نشانه رفت؟ یکی از فرضیات به کار رفته در به دست آوردن نامساوی بل، موضعیت، با همان توضیحی که در آزمایش EPR دادیم، است و تفسیر غالب این است که بنابر قضیهٔ بل، نظریهٔ کوانتوم غیرموضعی است. البته این اثرات ناموضعی غیرقابل کنترل است. یعنی نمی‌توان از این اثرات ناموضعی برای ارسال اطلاعات استفاده کرد. خود بوهم در انتهای روایت خود از برهان EPR، خاطرنشان می‌کند که در این برهان فرضی صورت گرفته است که در جهان کوانتومی صادق نیست، در واقع در این برهان به طور تلویحی فرض شده است که جهان از 'اجزاء واقعیتی' تشکیل شده است که جدا از هم وجود دارند، در صورتی که این فرض در سطح کوانتومی درست نیست.

نتیجه

حال اگر به EPR، بازگردیم و دو راهی کامل بودن و موضعیت را بـه یـاد بیـاوریم، بـه نظر می‌رسد که قضیهٔ بل با نقض موضعیت، بر کامل بودن مکانیک کوانتوم صـحه گذاشـته باشد، بنابراین می‌توان دربارهٔ دو راهی اینـشتین راه اول را انتخـاب کـرد و گفـت مکانیـک کوانتوم کامل، ولی غیر موضعی است. البته این *امکان منطقی* وجود دارد که برهان EPR را با در نظر گرفتن و زیر سؤال بردن فرض‌های دیگر مثل جدایی‌پذیری، تقلیل و یـا اتـصال ویژه حالت–ویژه مقدار) باطل کنیم، و نظریه‌ای را بپذیریم کـه هـم موضـعی و هـم کامـل باشد[۲۰]؛ برخی از تعابیر مثل تعبیر اورت از این گونه‌اند. مؤلفـانِ EPR، اگـر موضـع اولیـهٔ هایزنبرگ دربارهٔ خواص فیزیکی، یعنی نظریهٔ قوه و فعل، را می‌پذیرفتند، مطابق همان روال استدلالی می‌توانستند ثابت کنند نظریه کوانتـوم، در عـوض کامـل نبـودن، *بـیش از انـدازه پیش‌بینی کننده* (overdetermined) است. هایزنبرگ در ابتدا معتقد بود تابع موج توصیف کنندهٔ استعدادهای سیستم است و لذا جهان کوانتومی جهان فعلیت‌ها نیـست، بلکـه جهـان استعدادها است که وی آن را به نوعی شبیه قوهٔ ارسطویی می‌دانست. به این ترتیب ستدلال مؤلفین EPR می‌توانست این طور باشد که، در فرایند اندازه‌گیـری روی ذرهٔ اول در نتیجـهٔ برهمکنش با دستگاه اندازه‌گیری، یکی از قوه‌های سیستم مشاهده شده فعلیت می‌یابد، مثلاً دارای اندازه حرکت دقیقی می‌شود. از طرفی فرمالیسم مکانیـک کوانتـوم دارای مکانیـسمی است که با داشـتن انـدازه حرکـت ذرهٔ اول، انـدازه حرکـت ذرهٔ دوم را، علـی‌رغـم اینکـه اندرکنشی با آن ندارد، نتیجه می‌دهد؛ به این معنا نظریه بیش از اندازه پیش‌بینی‌کننـده اسـت و بنابراین می‌بایست فرمالیسم را طوری اصلاح کرد که این چنین همبستگی‌ها دیگـر جـزو نظریه نباشد(Jammer 1974:186).

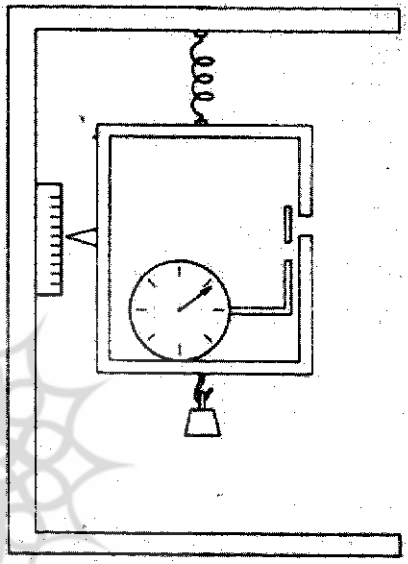
در مقدمهٔ بحث گفتیم که اگر برهـان EPR درسـت باشـد، مـی‌توانـد زمینـه و توجیـه جستجو برای نظریه‌ای کامل‌تر، مثلاً از نوع متغیرهای نهان، را فراهم آورد. حال با توجه بـه نتایجی که به دست آوردیم این پرسش به ذهن می‌رسد کـه آیـا بـا تـشکیک یـا رد برهـان EPR ، جستجو بـرای نظریـه‌ای کامـل‌تـر منتفـی اسـت؟ هـر چنـد ویگنـر قـضیهٔ بـل را

"قانع‌کننده‌ترین برهان علیه نظریهٔ متغیرهای نهان" می‌دانست[۲۱] ولی به یاد بیاورید که اینشتین در نامهٔ خود به شرودینگر، از فرض موضعیت در اثبات ناقص بودن مکانیک کوانتوم استفاده نکرد. پس می‌توان از میان دوراهی اینشتین هر دو را رد کرد و گفت مکانیک کوانتوم غیرموضعی و در عین حال ناقص است. باید گفت حداقل نظریه‌ای مثل نظریهٔ بوهم چنین امکانی را تحقق بخشیده است. افزون بر این، به رغم اظهار نظر ویگنر، خود بل چنین برداشتی از قضیه‌اش نداشت، و بالعکس از هواداران نظریهٔ بوهم بود، و باید انصاف داد که نظریه‌ای مثل نظریهٔ بوهم صرفاً یک *امکان* نیست. البته ما در اینجا با یک عدم تعین بین چند توضیح نظری از نقطه‌نظر شواهد تجربی مواجهیم، ولی با وجود این اگر معیارهای تبیین‌کنندگی را لحاظ کنیم، می‌توانیم نسبت به انتخابی معقول از بین امکان‌های مختلف خوش‌بین باشیم. در نظر گرفتن همین معیارهای دیگرِ غیر از شواهد تجربی است که با گذشت زمان، به رغم موضع‌گیری‌های اولیهٔ منفی در زمان ارایهٔ نظریهٔ بوهم، موجب اقبال بیشتری به آن شد، و حتی کسانی مثل پاتنم که زمانی مخالف آن بودند، اخیراً در یک عقب‌نشینی آشکار موضع خوش‌بینانه‌ای نسبت به آن دارند (Putnam 2005:622-3,631).

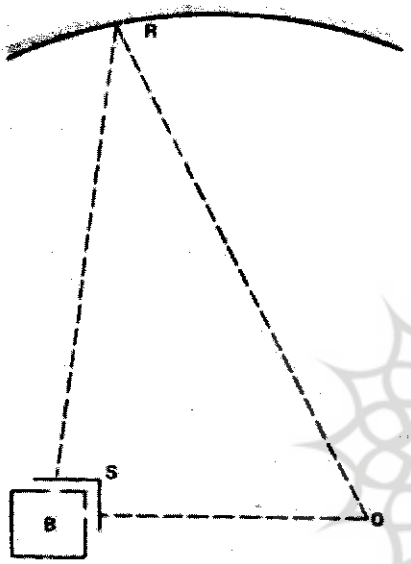
قدردانی

در پایان از مجموعهٔ پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی، که این تحقیق با حمایت آنجا انجام شده است، به ویژه جناب آقای دکتر مهدی گلشنی که در مراحل مختلف تحقیق، به طور مستقیم و غیرمستقیم از راهنمایی‌های ایشان بهره بردم، تشکر می‌کنم. همچنین برای روشن شدن پاره‌ای ابهامات با برخی صاحبنظران، ازجمله هیلگوورد (Hilgevoord)، آرتور فاین (Arthur Fine)، و ژوزف آگاسی (Josef Agassi)، مکاتبه شد، که هرچند آنها این مقاله را نخواهند دید، ولی وظیفهٔ خود می‌دانم که از توضیحات آنها سپاسگزاری کنم. بدیهی است مسؤولیت هرگونه نقص و کاستی بر عهدهٔ نگارنده است.

شکل‌ها

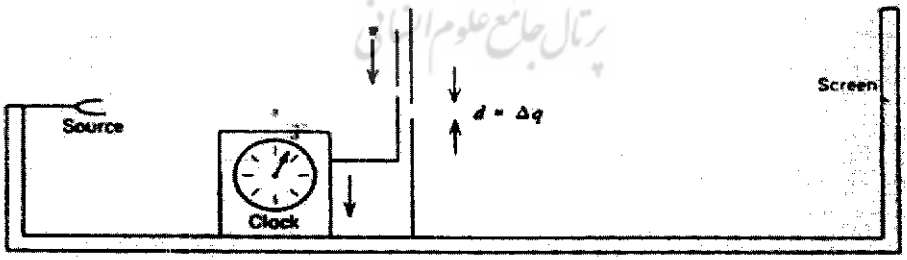


شکل ۱



شکل ۲

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی



شکل ۳

پی‌نوشت‌ها

۱. در این نگرش بور، مکملیت به نسبی بودن توصیف‌ها، بسته به ساز و کار و تدارکات آزمایشگاهی فروکاسته می‌شود.

۲ این روابط را در نظر داشته باشید: $p = \frac{h}{\lambda}, E = h\nu, c = \lambda\nu$

۳ توجه کنید که: $\Delta p = \Delta(m\upsilon), \upsilon = gT, \varphi = mgq$؛ ضمناً تعیین مکان با عدم قطعیت Δq، منجر به عدم قطعیت Δp در اندازه حرکت می شود که رابطهٔ $\Delta p \Delta q \approx h$ بین آنها برقرار است.

٤ به شیوهٔ بیان *خلاف واقع* (counterfactual) عبارت توجه شود.

٥ به شکل بیان *خلاف واقع* توجه شود.

٦ در واقع این بیان از کامل نبودن که در آزمایش EPR هم وجود دارد، با در نظر گرفتن تعبیر خاصی از اصل عدم قطعیت، ناسازگار است. بی دلیل نیست که آلبرت نیز در تحلیل خود از EPR، گاه از"غلط" یا پاردوکس بودن سخن می گوید (Albert 1992:65-6,63). در مکاتبه ای که با هیلگوورد و فاین داشتم آنها نیز اینطور اظهار عقیده کردند که کامل نبودن مکانیک کوانتوم به این معنا که در آزمایش EPR هم وجود دارد، با تعبیر حداکثری از اصل عدم قطعیت سازگار نیست.

۷ در مقالهٔ EPR به این مطلب اشاره شده است که در مکانیک کوانتوم در مورد دو کمیت فیزیکی که با دو اپراتور جابجاناپذیر نمایش داده شود، بنا به اصل عدم قطعیت، شناخت و اطلاعات راجع به یکی از این دو، موجب منع شناخت دیگری می شود، یعنی در مورد هر دو بطور همزمان نمی توان اطلاعات و شناخت داشت. در صورتیکه لزومی نداشت این تعبیر خاص از عدم قطعیت در نظر گرفته شود.

۸ مخفف Simultaneous Reality

۹ البته در اینجا تلویحاً فرض *موضعیت* و *جدایی پذیری* در نظر گرفته شده است، به این معنی که امکان هر نوع تغییری در سیستم دوم ناشی از انجام کاری در سیستم اول، منتفی است. در صفحات آتی به این موضوع خواهیم پرداخت.

۱۰ البته شرط واقعیت فیزیکی، یک شرط کافی است، نه لازم؛ یعنی به صرف اتکا به آن شرط نمی توان به این نتیجه رسید که مکان واقعیت فیزیکی ندارد. چرا که آن شرط نافی این نیست که ممکن است کمیتی واقعیت فیزیکی داشته باشد و در عین حال نتوانیم آن را پیش‌بینی یا اندازه‌گیری کنیم. اینکه EPR چطور در اینجا نتیجه گرفته‌اند که کمیت مذکور واقعیت فیزیکی ندارد، براساس اضافه کردن این

فرض می‌توان تفسیر کرد که تابع موج کامل است. اگر تابع موج کامل باشد باید بتوان هر کمیتی را که واقعی باشد پیش‌بینی کرد و چون در اینجا نمی‌توان پیش‌بینی کرد، پس لاجرم واقعی نیست. البته ممکن است موضع EPR لاادری باشد، یعنی بگوید حداقل بر اساس این شرط نمی‌توانیم واقعیت آن را نتیجه بگیریم، ولی اینکه *در اصل* واقعیت دارد یا خیر، ما نمی‌دانیم.

۱۱ همان طور که قبلاً گفته شد این نتیجه الزام آور نخواهد بود اگر تابع موج سیستم را کامل در نظر نگیریم.

۱۲ همان طور که گفته شد، لزومی ندارد که به این تعبیر اختلالی توسل جوییم، کافی است که بگوییم در فرمالیسم مکانیک کوانتوم نمایشی برای توصیف این وضعیت نداریم.

۱۳ مقصود از 'بقای نسبی مکان' این است که دو ذره در فاصلهٔ معین و مشخصی از هم باشند، طوری که دانستن مختصات یکی، برای پیدا کردن مختصات دیگری کافی باشد.

۱٤ اینشتین در مکاتبه‌ای که با شرودینگر داشت با ذکر مثالی شبیه به گربهٔ شرودینگر بر این نکته تأکید می‌ورزد. در واقع هر چند پارادوکس گربهٔ شرودینگر خود برهانی مستقل در بحث اندازه‌گیری است ولی ایدهٔ اولیهٔ آن در این نامهٔ اینشتین به چشم می‌خورد.

۱۵ برای توضیح بیشتر توجه داشته باشید که تلفیق نتیجهٔ EPR ، یعنی کامل نبودن QM ، و *تعبیر حداکثری* از عدم قطعیت معجون معرفت‌شناختی عجیبی به دست می‌دهد: از یک طرف براساس نتیجهٔ EPR ، مکانیک کوانتوم به این دلیل که نمایشی برای برخی از عناصر واقعیت فیزیکی ندارد، کامل نیست، و از طرف دیگر بنابر تعبیر حداکثری از عدم قطعیت *علی‌الاصول* (چه اندازه‌گیری مستقیم صورت بگیرد، و چه نگیرد) امکان شناخت این عناصر واقعیت فیزیکی وجود ندارد. روشن است که نتیجهٔ EPR ، با این تعبیر از اصل عدم قطعیت سازگار نیست. به این ترتیب اگر در شرط واقعیت فیزیکی EPR ، محتوای تعبیر حداکثری درج و در نظر گرفته شود، استدلال EPR مؤدی به نتیجهٔ موردنظر نخواهد بود. البته بور در تعبیر و توجیه اصل عدم قطعیت به اصل مکمیت (و تدارکات آزمایشگاهی مانعه‌الجمع) متکی بود و به همین دلیل در جواب خود به EPR معتقد بود که اگر این اصل در بیان شرط واقعیت فیزیکی درج و لحاظ می‌شد، اساساً به نتیجهٔ EPR نمی‌رسیدیم . (Hilgevoord & Uffink 2000)

۱٦ دربارهٔ رئالیست، پوزیتیویست یا ایدئالیست بودن بور دیدگاه قطعی وجود ندارد؛ برای اطلاع از دیدگاه های مختلف در این زمینه رک: (گلشنی ۱۳۸۰: ۷۷-۷٦، ۹۹)

۱۷ برای پاسخ بور تعبیر دیگری نیز می‌توان ارایه کرد، که به تعبیر رابطه‌ای (relational) یا زمینه‌ای (contextual) معروف است. این رهیافت که به نظر تا اندازه‌ای زبانی و سمانتیکی است و یادآور رویکردی عملیات‌گرایانه است می‌گوید قبل از اینکه فرد مکان سیستم اول را اندازه بگیرد، صحبت از مکان سیستم دوم، بی محتوا و خارج از بحث است و بعد از اندازه‌گیری مکان سیستم اول، امکان صحبت از مکان سیستم دوم وجود دارد. به عبارتی دستکاری موضعی در محل ذرهٔ یک، که دور از ذرهٔ دوم است، می‌تواند روی آنچه از نظر زبانی در مورد سیستم دوم معنادار است تأثیرگذار باشد. اما به نظر نمی‌رسد بحث های زبانی در اینجا مناسب باشد.

۱۸ یک تکنیک دیگر می‌تواند این باشد که یک اتم پوزیترونیوم را، که متشکل از یک پوزیترون و یک الکترون است، در حالت اندازه حرکت زاویه‌ای مداری و اسپینی صفر تهیه کنیم. این کار با یونیزه کردن اتم پوزیترونیوم امکان‌پذیر است(Greenstein & Zajonc 1997: 110)

۱۹ به شکل بیان *خلاف واقع* توجه شد.

۲۰ در فلسفهٔ علم به چنین وضعیتی *تعین ناقص نظریه به شواهد تجربی* گفته می شود. برای توضیحی فارسی در این مورد به اثر (۱۳۸٤) رجوع کنید.

۲۱ نقل از (Goldstein 2002)

منابع

Albert, D., *Quantum Mechanics and Experience*, Harvard UP: Cambridge MA, 1992.

Bell, J.S., 1964, "On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox", in Bell (1987), Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics, New York: Cambridge University Press.

Bohm, D., 1951, Quantum Theory, New York: Prentice Hall.

Bohm, D., and Aharonov, Y., 1957, "Discussion of Experimental Proof for the Paradox of Einstein, Rosen and Podolsky", *Physical Review*, 108:1070-1076.

Bohr, N., 1935a, "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?", Physical Review, 48: 696-702.

Chibeni Silvio Seno (2005), "A logico-conceptual analysis of the Einstein-

Podolsky-Rosen argumet", in
http://www.unicamp.br/~chibeni/public/epr.pdf.

Einstein, E., Podolsky, B., and Rosen, N., 1935, "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?", *Physical Review*, 47:777-780.

Fine, Arthur (2004), "The Einstein-Podolsky-Rosen Argument in Quantum Theory", in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Edward N. Zalta (ed.), URL = http://plato.stanford.edu/archives/sum2004/entries/qt-epr/.

Goldstein, Sheldon (2002), "Bohmian Mechanics", The Stanford Encyclopedia of Philosophy, Edward N. Zalta (ed.), URL = <http://plato.stanford.edu/archives/win2002/entries/qm-bohm/>.

Greenstein, G. and Zanjonc, A. C. (1997), *The Quantum Challenge: Modern Research on Foundations of Quantum Mechanics,* Jones and Bartlett Publishers, Massachusetts.

Halvorson, Hans and Clifton, Rob (2001) 'Reconsidering Bohr's reply to EPR.' http://philsci-archive.pitt.edu/documents/disk0/00/00/04/45/index.html.

Heisenberg, W. (1930), *The Physical Principles of Quantum Mechanics*, Chicago: University of Chicago Press.

Hilgevoord, J. and Uffink, J. (2001), "The Uncertainty Principle", The Stanford Encyclopedia of Philosophy, Edward N. Zalta (ed.), URL = <http://plato.stanford.edu/archives/win2001/entries/qt-uncertainty/>.

Jammer, M., 1974, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, New York: Wiley.

Popper, K. (1959), *The Logic of Scientific Discovery,* London, Hutchinson.

Putnam, H. (2005), "A Philosopher Looks at Quantum Mechanics (again)", *Brit. J. Phil. Sci.*, 56, 615-634.

گلشنی، مهدی (۱۳۸۰)، *تحلیلی از دیدگاههای فلسفی فیزیکدانان معاصر*، ویراستهٔ جدید با اضافات، نشرفرزان.

منصوری علیرضا (۱۳۸٤)، "بررسی نتایج غیر رئالیستی عدم تعیین نظریه با شواهد تجربی"، *نامهٔ مفید: نامهٔ فلسفی*، ج ۱، ش ۲، ۳٦-۲۷.