دانشکده علوم-گروه فیزیک

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد فیزیک حالت جامد

مطالعه ی درهم تنیدگی کوانتومی در مدل های اسپینی

امیر علیمحمدی

استاد راهنما: دکتر سعید مهدوی فر

مهر ۸۹

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم با احترام

به مادر

فداکار

و مهربانم

چکیده

در این پایان نامه ابتدا تاریخچه ی فیزیک کلاسیک و جبرگرایی ی حاکم بر آن مطالعه شده و سپس با بر شمردن برخی نقاط ضعف فیزیک کلاسیک، اشاره می شود که مفاهیم عدم قطعیت و تعبیر احتمالاتی از طبیعت، جایگزین جبرگرایی ی حاصل از فیزیک کلاسیک شده است. با این تعبیر احتمالاتی مخالفت های زیادی شده است که اساس مخالفت ها با تعبیر احتمالاتی منطبق بر مفهومی به نام درهم تنیدگی کوانتومی است. درهم تنیدگی یک پدیده ی صرفا کوانتومی ی غیر موضعی است که نشان می دهد دو ذره ی غیر برهمکنشی در فواصل بسیار دور از هم نیز با هم در ارتباط هستند. در این پایان نامه سنجه های متفاوت و متنوع درهم تنیدگی، و همچنین برخی روش های مهم اندازه گیری ی درهم تنیدگی معرفی شده اند. در نهایت مدل زنجیره ی آیزینگ با اسپین $\frac{1}{2}$ در نظر گرفته شده و اثر برهمکنش ژایالوشینسکی- موریا در درهم تنیدگی ی اسپین های مدل فوق مطالعه شده است. نشان داده شده که برهمکنش ژایالوشینسکی- موریا باعث درهم تنیده شدن ذرات می شود و میزان درهم تنیدگی، به قدرت برهمکنش ژایالوشینسکی- موریا بستگی دارد.

فهرست

چکیده

فصل ۱: مقدمه

۱-۱ فیزیک کلاسیک و جبر گرایی ۱

۱-۲ شکل گیری ی مکانیک کوانتومی ۳

۱-۳ تفسیر کپنهاگ ۵

۱-۴ اندازه گیری ی کوانتومی ۶

فصل ۲: سیر تاریخی ی شکل گیری و مفاهیم فیزیکی ی درهم تنیدگی کوانتومی

۲-۱ درهم تنیدگی ۹

۲-۱-۱ تعریف درهم تنیدگی ۱۰

۲-۲ آزمایش فکری ی " ای پی آر" ۱۰

۲-۲-۱ شرح آزمایش ۱۱

۲-۳ نتایج آزمایش فکری ی "ای پی آر" ۱۷

۲-۴ متغیرهای پنهان ۱۸
۲-۵ نامساوی ی بل ۱۹
۲-۵-۱ آزمون تجربی ی نامساوی ی بل و مکانیک کوانتومی ۲۲

فصل ۳: سنجه های جدا پذیری و درهم تنیدگی

۳-۱ حالت خالص و آمیخته ۲۴
۳-۲ عملگر چگالی ۲۶
۳-۲-۱ خصوصیات کلی ی عملگر چگالی ۲۸
۳-۲-۲ عملگر چگالی ی کاهش یافته ۲۹
۳-۳ سنجه های جداپذیری و درهم تنیدگی ۳۰
۳-۳-۱ حالت های خالص ۳۰
۳-۳-۲ حالت های آمیخته ۳۱
۳-۴ معیارهای جداپذیری ۳۳
۳-۴-۱ تجزیه ی اشمیت و عدد اشمیت ۳۴
۳-۴-۲ معیار ترانهاده ی جزئی ی مثبت (PPT) ۳۵

فصل ۴: روش های محاسبه ی درهم تنیدگی

۴-۱ اندازه گیری ی درهم تنیدگی-رهیافت انتزاعی ۳۹

۴-۱-۱ الف) یکنواختی ۳۹
۴-۱-۲ ب) صفر شدن روی حالت های جدایی پذیر ۴۰
۴-۲ اندازه گیری ی درهم تنیدگی-رهیافت عملیاتی ۴۱
۴-۳ درهم تنیدگی ی تلخیص ۴۱
۴-۴ درهم تنیدگی ی ارزش ۴۲
۴-۵ درهم تنیدگی ی آنتروپی ۴۲
۴-۵-۱ آنتروپی ی شانون ۴۳
۴-۵-۲ آنتروپی ی فون نیومن ۴۴
۴-۵-۳ درهم تنیدگی ی آنتروپی ۴۴
۴-۶ درهم تنیدگی ی تشکیل ۴۵
۴-۷ تلاقی ۴۶

فصل ۵: مدل آیزینگ با برهم کنش ژایالوشینسکی- موریا

۵-۱ برخی جنبه های عمومی ی مدل های اسپینی ۴۸
۵-۲ نگاشت به مدل XXZ ۴۹
۵-۳ دیدگاه وردشی ی ماتریس حالت های حاصلضرب ۵۱
۵-۳-۱ انرژی ی حالت پایه ۵۱
۵-۳-۲ مغناطش ۵۵
۵-۳-۳ اسپیرال ۵۵

۵-۴ سیستم سه ذره ای ۵۶

۵-۴-۱ آیزینگ پاد فرومغناطیس $(J\rangle 0)$ ۵۹

۵-۴-۱-۱ مغناطش ۵۹

۵-۴-۱-۳ اسپیرال ۶۰

۵-۴-۱-۴ در هم تنیدگی ۶۱

۵-۴-۲ آیزینگ فرومغناطیس $(J\langle 0)$ ۶۳

۵-۴-۲-۱ مغناطش ۶۴

۵-۴-۲-۲ اسپیرال ۶۵

۵-۴-۲-۳ در هم تنیدگی ۶۵

نتیجه گیری ۶۷

مراجع ۶۸

فصل ۱

مقدمه

۱-۱ فیزیک کلاسیک و جبرگرایی[۱]

معمولا سال های علمی ی جدید را از شروع قرن شانزدهم به حساب مـی آورنـد، جـایی کـه نیکـولاس کوپرنیک[۲] ادعای مرکزیت خورشید را در سیستم خورشیدی مطرح کرد، سـپس ایـده کوپرنیـک توسـط گالیله[۳] گسترش یافت و در ادامه، نیوتون[۴] با قوانین حرکت و قانون گرانش عمـومی، حرکـت سـیارات را توجیه کرد. در حوزه الکترومغناطیس نیز ماکسول[۵] با معادلاتی که به نام خودش مشهور اسـت توصـیف نسبتا کاملی از این بخش ارائه داد.

در اواخر قرن نوزدهم به نظر می رسید فیزیک کلاسیک که شالوده هایش را مکانیک تحلیلی (شامل

۱ Determinism
۲ Nicolaus Copernicus
۳ Galilei
۴ Newton
۵ Maxwell

مکانیک ذرات، شاره ها و محیط های کشسان)، الکترومغناطیس، نظریه حرارت و مکانیک آماری تشکیل می داد، یک ساختمان نظری ی کامل است که می تواند علی الاصول گستره ی وسیعی از پدیده های طبیعی و صنعتی از ابزارآلات دقیق فنی گرفته تا حرکت کرات در منظومه شمسی را به دقت توصیف کند. در سالهای آخر قرن نوزدهم با کشف الکترون، رادیو اکتیویته (پرتوزایی)، اشعه ی ایکس، تخلیه ی الکتریکی و طیف نگاری ی گازها، یکی پس از دیگری پنجره هایی به درون دنیای میکروسکوپی گشوده شد. آیا فیزیک کلاسیک می توانست این دنیای جدید را نیز توصیف کند؟ نخستین مشاهدات با شگفتی این انتظار را برآورده کردند. چنان که رفتار اشعه ی کاتدی یعنی همان الکترون ها در لوله ی تخلیه ی الکتریکی نشان می داد الکترون درست مثل یک پرتابه در میدان الکتریکی سقوط می کند و حرکت آن تابع قوانین نیوتن است. جی جی تامسون[۱] توانست با کاربست قوانین نیوتن، نسبت جرم به بار الکترون را به دست آورد. چند سال بعد در اوایل قرن بیستم، میلیکان[۲] توانست باز هم با استفاده از همان قوانین، بار و در نتیجه جرم الکترون را بدست آورد. با در نظر گرفتن اتم ها و مولکول های گاز به صورت گوی های کوچک و به کار بردن قوانین نیوتن به همراه فرض های معقولی در مورد توزیع احتمالی ی سرعت آنها می شد در چارچوب نظریه جنبشی گازها، کمیت های ماکروسکوپی گاز مثل فشار آن را به درستی محاسبه کرد. بنابراین به نظر می رسید که گستره ی اعتبار فیزیک کلاسیک تمامی ی طبیعت، از کرات سماوی تا اتم ها و الکترونها را نیز در بر می گیرد.

از نظر فلسفی دستاورد فیزیک کلاسیک به خصوص مکانیک کلاسیک ارائه یک بیان دقیق از علیت یا تعین بود، به این معنا که اگر مکان و سرعت ذرات یک سیستم را در یک لحظه با دقت تعیین کنیم، مسیر این سیستم در آینده با دقت معین خواهد شد [۱]. پیروزی های شگفت انگیز مکانیک کلاسیک و تعین نهفته در آن، تصویری از جهان ارائه می کرد درست مثل یک ساعت عظیم، که درآغاز زمان یک

۱ J. J. Thomson

۲ Millikan

بار تنظیم شده و تمامی ی حرکات آن در آینده تابع همان شرایط اولیه است. اگر برگی از درخت فرو می افتد، یا نسیمی می وزد، نتیجه ی جبری ی همان تنظیم اولیه است و گریزی از آن نیست. اگر انسان را نیز به مثابه دستگاهی عظیم و پیچیده از سلول ها و ارگان ها تصور کنیم که همگی تابع این قوانین هستند و فکر را نیز تابع فعل و انفعالات شیمیایی و فیزیکی تصور کنیم، تصویر مکانیکی از جهان که حالا شامل موجودات زنده نیز شده است کامل می شود. اگر در یک لحظه عملی خاص را انجام می دهیم یا احساس خاصی به ما دست می دهد، همه نتیجه ی جبری همان شرایط و تنظیمات اولیه است. البته این تصویر جبری از جهان که حتی اراده انسان را نیز در بر می گیرد مورد اجماع نبوده است زیرا در اینکه آیا می توان قوانین فیزیک را به حوزه زیست شناسی، شیمی و همچنین عرصه فکر و روان آدمی گسترش داد تردید های جدی ای وجود داشته است.

خوب حالا به نظر می رسد که اصول اساسی حاکم بر رفتار جهان فیزیکی شناخته شده است و ظاهرا همه چیز تحت فرمان مکانیک نیوتونی و الکترومغناطیس ماکسول می باشد و توصیف کاملی از طبیعت به دست آمده است که این دیدگاه، دیدگاهی جبرگرایانه بر جهان فیزیک بود که نتیجه ی فکری ی آقای نیوتن و پیشینیانش بود.

۱-۲ شکل گیری ی مکانیک کوانتومی

اما به تدریج و در آخرین سال های قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم در بنای معظم فیزیک کلاسیک شکاف ها و ترک هایی پیدا شد. معلوم شد که با وجود پیشرفت های حاصل شده در مکانیک کلاسیک، هنوز بودند برخی از پدیده های فیزیکی که توصیف شان در جزئیات در چارچوب فیزیک کلاسیک با مشکل روبرو بود از جمله پدیده هایی مانند تابش جسم سیاه، ظرفیت گرمایی ی ویژه ی جامدات، اثر

فوتوالکتریک، مدل رادرفورد در مورد ساختمان اتم، اثر کامپتون و نظایر آن، هیچ کدام در چارچوب فیزیک کلاسیک قابل تبیین نبودند. تمامی ی تلاش هایی که برای ترمیم شکاف ها و ترک ها صورت می گرفت تا بتواند این پدیده ها را توضیح دهد با شکست مواجه شد و معلوم شد که دنیای میکروسکوپیک را می بایست با مفاهیم به کلی جدید و حتی با زبان جدید و بسیار عجیب و غریبی توضیح داد. تا اینکه در اوایل قرن بیستم طی تقریبا سی سال، در فاصله سال های ۱۹۰۰ تا ۱۹۲۷ که یک دوره ی طلایی در تاریخ فیزیک قرن بیستم و شاید تمامی ی تاریخ فیزیک است، دوره ای که شاهد تولد، رشد و بلوغ مکانیک کوانتومی از یک طرف و نسبیت خاص و عام از طرف دیگر است، یک انقلاب اساسی در فیزیک رخ داد. و بدین ترتیب مکانیک کوانتومی، علمی که درباره قوانین حاکم بر طبیعت در مقیاس زیر اتمی بحث می کند و شاید عجیب ترین حوزه در بین تمام علوم طبیعی باشد، پا به عرصه وجود گذاشت.

در سال ۱۹۰۰ ماکس پلانک[۱] که به نوعی آغازگر این انقلاب کوانتومی بود توانست با وارد کردن مفاهیم کوانتومی، طیف ناشی از تابش جسم سیاه را توجیه کند که نظریه ی کلاسیک قادر به سازگار کردن نتایج مربوط به مشاهده طیف با تئوری نبود. سپس در سال ۱۹۰۵ آلبرت آینشتاین[۲] با سه مقاله خود در زمینه نسبیت، اثر فوتوالکتریک و حرکت براونی سهم قابل توجهی در پیشرفت مکانیک کوانتومی ایفا کرد که با ارائه اثر فوتوالکتریک موفق به دریافت جایزه نوبل شد. در سال ۱۹۱۳ نیلز بوهر[۳] با وارد کردن مفاهیم کوانتومی توانست اتم ئیدروژن را توصیف کند که نظریه ی کلاسیک توصیف موفقی ارائه نداده بود. بعد ها در سال ۱۹۲۳ لوئی دوبروی[۴] به صورتی کاملا اتفاقی به این ایده رسید که سرگشتگی موجود در اپتیک به سادگی به این موضوع بر می گردد که اشتباهی در فهم ماهیت ذره مادی وجود

۱ Max Planck
۲ Albert Einstein
۳ Niels Bohr
۴ Louis de Broglie

دارد و به همین دلیل تابع موجی را به ذرات نسبت داد همان طور که قبلا به امواج خاصیت موجی نسبت داده شده بود و بدین ترتیب اصل مکملیت (دوگانگی موج-ذره) توسط دوبروی پایه گذاری شد که با استفاده از ثابت پلانک ارتباط بین خاصیت موجی و ذره ای را این گونه بیان کرد:

$$p = \frac{h}{\lambda} \qquad (۱.۱)$$

که بخاطر سالها کار در عرصه کوانتوم و تلاش برای ارتباط دادن خاصیت موجی و ذره ای موفق به دریافت جایزه نوبل شد. در سال ۱۹۲۵ بود که ورنر هایزنبرگ[۱] اصل مشهور به نام خودش یعنی اصل هایزنبرگ را ارائه کرد که عدم قطعیت را در ذات فیزیک کوانتومی می دانست که نمی توان با هیچ ترفندی از شر آن خلاص شد. اروین شرودینگر[۲] نیز در سال ۱۹۲۶ معادله ی موسوم به نام خودش، یعنی معادله ی شرودینگر را عرضه کرد. در همان سال نیز تعبیر احتمالاتی از تابع موج توسط ماکس بورن[۳] معرفی شد هر چند آینشتاین مفهوم آن را از قبل می دانست. بدین ترتیب مکانیک کوانتومی در این سالها به نقطه ی قابل توجهی در مسیر تکامل خود رسید.

۱-۳ تفسیر کپنهاگ[۴]

همانطور که قبلا ذکر شد آقای بوهر کارهای درخشانی در حوزه مکانیک کوانتومی انجام داد که به همین دلیل در سال ۱۹۲۲ موفق به دریافت جایزه نوبل شد. بدین سبب و به جهت شهرت ایشان حکومت دانمارک مجوز تاسیس انستیتو فیزیک نظری را به بوهر اعطا کرد که بوهر این انستیتو را در کپنهاگ تاسیس کرد و ملاقات های علمی متعددی را در آنجا سازماندهی کرد که تعداد زیادی از

۱ Werner Heisenberg
۲ Erwin Schrödinger
۳ Max Born
۴ Copenhagen Interpretation

دانشمندان جوان از سرتاسر دنیا و همچنین دانشمندان بنامی همچون داشـمندان یـاد شـده در بخـش قبلی به آنجا آمدند و بدین ترتیب کپنهاگ مرکزی برای مطالعه مکانیک کوانتومی در سالهای اولیه رشد خود شد که بعدها با گسترش اینستیتو و شهرت آن، فکر و تفسیر این دانشمندان از مکانیک کوانتـومی به تفسیر کپنهاگ شهرت یافت که دیدگاه غالب حاکم بر جهان کوانتوم تا کنون نیز می باشد. مهم ترین مفاهیم حاکم بر این دیدگاه عبارتند از:

۱) یک سیستم فیزیکی بطور کامل بوسیله تابع موج مربوط به آن توصیف می شود که معرف تمامی ی اطلاعات و دانش مشاهده گر در مورد سیستم فیزیکی می باشد.

۲) توصیف طبیعت لزوما آماری و احتمالاتی است.

۳) اصل عدم قطعیت، که بیان می کند دو مشاهده پذیر خاص که جابجا نمی شوند بطور همزمان نمی توانند با دقت کامل اندازه گیری شوند.

۴) اصل مکملیت، که عنوان می کند جنبه های موجی و ذره ای ی تابش الکترو مغناطیسی مکمل اند.

با توجه به این تفسیر از کوانتوم مکانیک، طرفداران این مکتب که در راس آنها آقای بـوهر قـرار داشـت اصرار داشتند که مکانیک کوانتومی با این تعبیر، توصیف کاملی از طبیعت به دست می دهد و نیازی بـه نظریه ی کامل تر نمی باشد.

۱-۴ اندازه گیری ی کوانتومی

شاید بهتر باشد برای فهم بهتر مفاهیم کوانتومی و یا به عبارتی فهم تفسیر حاکم بر کوانتوم یعنی همان تفسیر کپنهاگ، کمی در مورد اندازه گیری ی کوانتومی صحبت کنـیم. بنـابر مکانیـک کوانتـومی، یـک خصلت معین از یک ذره، از قبل یک مقدار مشخص ندارد که توسط عمل اندازه گیری "مشاهده" یا

"آشکار" شود، بلکه عمل اندازه گیری یکی از مقادیر کمیت مشاهده پذیر را "خلق" می کند. هر گاه که قائل به وجود چنین کمیتی به عنوان کمیتی واقعی و از قبل موجود شویم، تناقض های آشکار با آزمایش ها را مشاهده خواهیم کرد. به عنوان مثال مولفه ی اسپین یک ذره در یک راستای معین، قبل از اندازه گیری اندازه ی معینی ندارد و نمی توان از مقدار "واقعی" ی آن قبل از اندازه گیری سخن به میان آورد. زیرا می دانیم که نتایج اندازه گیری ی مولفه های اسپین یک ذره ی اسپین-$\frac{1}{2}$ در هر راستایی همیشه دو مقدار $\frac{\hbar}{2}$ و $-\frac{\hbar}{2}$ را بدست می دهد، در صورتی که نمی توان برداری را تصور کرد که مولفه های آن در هر راستایی تنها همین دو مقدار را اختیار کند.

این یک سوال بسیار عمیق است که چه چیزی "واقعی" هست و چه چیزی "واقعی" نیست و این که آیا فیزیک می بایست پدیده های عالم واقعی و خارج از ذهن را توصیف کند یا تنها نتایج مشاهدات و اندازه گیری های ما در آزمایشگاه را نظم ببخشد و به کمک یک مدل نظری تبیین کرده و قدرت پیشگویی به ما بدهد. ادعای مکانیک کوانتومی آن است که فیزیک کاری به شناسایی عالم واقع ندارد، بلکه تنها به تنظیم داده های آزمایشگاهی که از طریق اندازه گیری های دقیق بدست می آیند می پردازد و سپس این داده ها را در یک چارچوب نظری ی سازگار تبیین کرده و سرانجام به پیش بینی ی پدیده ها به کمک این نظم نظری می پردازد [۱]. در این دیدگاه هر آنچه را که نتوان از طریق آزمایش، لااقل آزمایش ذهنی و ایده آل به محک اندازه گیری و سنجش درآورد به حوزه ی فیزیک تعلق ندارد. در حوزه ی کوانتوم ما فقط می توانیم با زبان احتمالات صحبت کنیم و پیشگویی هایمان بر اساس احتمال است و نمی توانیم با قطعیت در مورد آینده ی سیستم فیزیکی و اینکه قطعا چه اتفاقی حادث می شود اظهارنظری بکنیم. هایزنبرگ می گوید که ما باید پیش فرضیات مان درباره دنیا را که از تجارب و احساساتمان ناشی می شوند، از ذهنمان خارج کنیم و در عوض اجازه دهیم ریاضیات راه را به

ما نشان دهد چون مثلا الکترون در دنیایی که ما زندگی می کنیم زیست نمی کند بلکه در فضای هیلبرت[۱] که ریاضیات پیشنهاد می کند زندگی ی خود را سر و سامان می دهد که این فضا هم مستقل از فیزیک گسترش یافته است. یا اینکه اشاره می کند چیزی به عنوان واقعیت در خارج از ذهن ما وجود ندارد. برای فهم بیشتر فرض می کنیم کسی از ما سوال کند که در داخل یک کلاس درس چند دانشجو وجود دارد؟ با توجه به دیدگاه کپنهاگ اساسا این سوال قبل از اندازه گیری اشتباه است بلکه فقط بعد از اندازه گیری می توان به این سوال پاسخ داد، بدین صورت که قبل از اندازه گیری ما تابع حالتی داریم که برهم نهی از دو ویژه حالت ۱) دانشجوهست، ۲) دانشجو نیست می باشد و فقط بعد از اندازه گیری است که اگر تابع حالت ما اولی بشود موجودی به نام دانشجو خلق می شود و در غیر این صورت اصلا داشجویی وجود خارجی ندارد. که البته بسیار عجیب است و با ذهن کلاسیکی ی ما همخوانی ندارد.

[۱] Space Hilbert

فصل ۲

سیر تاریخی ی شکل گیری و مفاهیم فیزیکی ی

درهم تنیدگی کوانتومی

۲-۱ درهم تنیدگی[۱]

حال ممکن است این وسوسه به سراغ ما بیاید که اگر تئوری ی کوانتوم نمی تواند به فهم ما از واقعیت کمک کند پس چه فایده ای دارد؟

البته این تعبیر احتمالاتی از طبیعت مخالفانی را نیز به همراه داشت که در راس این مخالفان آقای آینشتاین قرار داشت و به دنبال نظریه ی کامل تر و جایگزین برای این تفسیر بود. چنان که می دانیم آینشتاین به دلیل علاقه و اعتقاد عمیقی که به نظریه ی فیزیکی به عنوان توصیف کننده ی جهان خارج داشت، یعنی جهانی واقعی که مستقل از تصورات و مشاهدات ما وجود عینی دارد هرگز نتوانست

۱ Entanglement

مکانیک کوانتومی را به عنوان یک نظریه ی فیزیکی ی کامل بپذیرد. تا اینکه این دغدغه ها منجر به مطرح شدن پدیده ای عجیب تر از مفهوم اندازه گیری و اصل برهم نهی به نام درهم تنیدگی شد. احتمال وجود این پدیده اولین بار توسط شرودینگر در سال ۱۹۲۶ مطرح گردید ولی به طور رسمی و تحت عنوان همین نام یعنی درهم تنیدگی، برای اولین بار توسط آینشتاین پا به عرصه کوانتوم گذاشت.

۱-۲-۱ تعریف درهم تنیدگی

درهم تنیدگی یک پدیده ی صرفاً کوانتومی ی غیرموضعی است که نشان می دهد دو ذره در فواصل بسیار دور از هم نیز (میلیون ها سال نوری)، به طور شگفت انگیزی با هم مرتبط هستند، به طوری که آنچه برای یکی اتفاق می افتد به طور آنی بر دیگری تأثیر می گذارد.

۲-۲ آزمایش فکری ی "ای پی آر"[۱]

اما مفهوم درهم تنیدگی در قالب آزمایش مشهوری موسوم به آزمایش فکری ی "ای پی آر" در اوج مخالفت ها با مکتب کپنهاگ به سال ۱۹۳۵ در مقاله ای با عنوان "آیا توصیف مکانیک کوانتومی از واقعیت فیزیکی می تواند کامل در نظر گرفته شود؟" چاپ شد [۲].

در آن سال آقایان آینشتاین[۲]، پودولسکی[۳] و روزن[۴] با چاپ این مقاله تلاش کردند که ثابت کنند مکانیک کوانتومی با تفسیر رایج کامل نیست و نیازمند نظریه ی کاملتری است که وجه تسمیه این عنوان برای مقاله نیز با توجه به ابتدای اسامی ی این آقایان است.

---

۱ Thought Experiment "EPR"
۱ Einstein
۲ Podolsky
۳ Rosen

طبق تئوری ی کوانتوم حالت سیستم فیزیکی به طور کامل با بردار حالت آن مشخص مـی شـود ولـی آینشتاین، پودولسکی و روزن با فرض گرفتن این شرط برای پدیده های فیزیکی که به آن "واقع گرایـی ی موضعی" گفته می شود می خواستند نشان دهند که پیش بینی هایی که تئوری ی کوانتوم از بـردار حالت یک زوج درهم تنیده می کند با این شرایط و در نتیجه با طبیعت در تناقض اسـت و ادعـا کردنـد که تئوری ی کوانتوم ناقص است. ایشان شرایط زیر را برای پدیده های فیزیکی در نظر گرفتند:

۱) شرط حقیقی:

اگر بدون هر گونه آشفته کردن یک سیستم، ما بتوانیم با قطعیت مقدار یک کمیت فیزیکـی را پـیش گویی کنیم در نتیجه یک عاملی از واقعیت فیزیکی مطابق با این کمیت فیزیکی وجود دارد.

۲) شرط موضعی:

اگر در زمان اندازه گیری، دو سیستم از هم جدا باشند و نتوانند با هم برهمکنش کنند، نتـایج انـدازه گیری ی یک سیستم نمی تواند به وسیله اندازه گیری ی سیستم دیگر تغییر کند.

در این آزمایش فکری، ادعای "ای پی آر" این بود که چون ما می توانیم قبل از اندازه گیری هم، نتیجه آزمایش را با قطعیت پیش بینی کنیم، که بر خلاف ادعای مکانیک کوانتومی است، پس مکانیک کوانتومی ی رایج ناقص است. البته ماهیت غیر موضعی ی این پدیده نیز ظاهرا در تناقض با نسبیت خاص است که در ادامه در می یابیم که این پدیده هیچ تناقضی با این نظریه ندارد.

۲-۲-۱ شرح آزمایش

نسخه ی اصلی ی آزمایش که در سال ۱۹۳۵ ارائه شد از اندازه حرکت خطی و مکان ذره برای توضیح آزمایش استفاده کرد. اما در سال ۱۹۵۰ دیوید بوهم[۱] آزمایش "ای پی آر" را با استفاده از ذرات اسپین-

۱ David Bohm

$\frac{1}{2}$ دوباره فرمول بندی کرد [۳]. که ما به شرح آزمایش طبق فرمول بندی ی آقای بوهم می پردازیم.

ابتدا بعضی از مفاهیم ریاضی ی اولیه ی مورد نیاز برای شرح آزمایش را بیان می کنیم:

کیوبیت[۱]:

همان طور که می دانیم کامپیوترهای کلاسیکی اطلاعات ذخیره شده را بر مبنای واحدهایی که بیت[۲] نامیده می شود پردازش می کنند. بر همین اساس در نظریه ی اطلاعات کلاسیکی، واحد بنیادی ی تقسیم ناپذیر برای سنجش اطلاعات بیت است. ولی در نظریه ی اطلاعات کوانتومی این واحد بنیادی، بیت کوانتومی یا به اختصار کیوبیت نامیده می شود که معادل کوانتومی بیت است. در حالتی که یک بیت کلاسیکی فقط می تواند در یکی از دو حالت ۰ یا ۱ باشد؛ که این ۰یا ۱ به ترتیب می توانند به عنوان مثال معرف خاموش یا روشن بودن یک لامپ و یا خالی یا پر بودن یک خازن باشند، یک کیوبیت در حالت کلی می تواند برهم نهی از دو حالت ۰ و ۱ باشد که مثلا می تواند معادل یک اتم دو ترازه و یا اسپین یک الکترون باشد.

حالت کلی ی یک کیوبیت به صورت یک بردار حالت در فضای هیلبرت دو بعدی ی مختلط با بردارهای پایه $|0\rangle$ و $|1\rangle$ که نشانگر یک سیستم کوانتومی ی دو حالته در یک فضای هیلبرت دو بعدی است، به صورت زیر توصیف می شود:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \qquad (۱.۲)$$

که α و β اعداد مختلطی هستند که شرط زیر را ارضا می کنند:

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \qquad (۲.۲)$$

البته واحد اطلاعات کوانتومی می تواند شامل سه بردار پایه ی $|0\rangle$، $|1\rangle$ و $|2\rangle$ به شکل زیر نیز باشد:

---

۱ Qubit

۲ Bit