

آیا مدل تکیونی تبیین خوبی برای پدیده ناموضعی کوانتومی است؟

سجاد مال میر*

علیرضا منصورى**

چکیده

پدیده ناموضعی کوانتومی به معنای وجود ارتباطات علی فوق نوری بین ذرات کوانتومی درهم تنیده است. یکی از راه‌های تبیین چنین پدیده‌ای ارائه مدلی تکیونی است. در این رویکرد ذرات فوق نوری (تکیون‌ها) واسطه ارتباط علی میان نقاط دارای جدایی فضاگون می‌شوند. وجود تکیون‌ها ظاهراً با ساختار فضا - زمانی نسبت خاص سازگار است و شواهد خوبی برای این ادعا وجود دارد. اما مسئله این جا است که هر مدل تکیونی‌ای نمی‌تواند پدیده ناموضعی را تبیین کند. مدل تکیونی‌ای که بخواهد تبیین درستی از ناموضعی کوانتومی ارائه دهد به دلیل تبصره‌ای بودن و داشتن تعهدات متافیزیکی خارج از عرف «هنوز» تبیین خوبی نیست، اما وجود یک برنامه پژوهشی برای کارهای فیزیکی آینده از ویژگی‌های مثبت آن است.

کلیدواژه‌ها: ناموضعی کوانتومی، نسبت خاص، تکیون، چهارچوب‌های مرجع، متافیزیک مدل تکیونی.

۱. مقدمه

در نسبت خاص نقاط فضاگون (space-like) به نقاطی می‌گویند که برای ارتباط میان آن‌ها به سرعتی بیش‌تر از سرعت نور نیاز است. برای مثال در همین لحظه خاص من از فضا نورد ایستگاه فضایی یا از ناوایی سر کوجهان جدایی فضاگون دارم؛ یعنی نمی‌توانم

* دانشجوی دکتری فلسفه علم، پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی، sajad.malimir@gmail.com

** استادیار و عضو هیئت علمی گروه فلسفه علم، پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
a_mansourius@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۰۸

هیچ پرتو نوری‌ای به آن‌ها بفرستم و انتظار داشته باشم در همین لحظه آن را دریافت کنند. مقاله بل (Bell 1987: sec. 2) و آزمایش‌های اسپه (Aspect's experiments) در سال ۱۹۸۲ (Aspect et al. 1982) به ما نشان داد که وقایع رخ داده در دو نقطه فضا-زمانی دارای جدایی فضاگون می‌توانند به هم وابسته باشند؛ یعنی دو نقطه فضاگون می‌توانند روی هم تأثیر علی داشته باشد. اگر فرض کنیم ذراتی وجود دارند که مسئول برقراری این ارتباط علی‌اند، ناچاریم بپذیریم که با سرعتی بیش‌تر از سرعت نور حرکت می‌کنند. این ذرات فوق نوری را تکیون (tachyon) می‌نامند. درمورد این تکیون‌ها به دو سؤال باید پاسخ دهیم: «آیا نسبیت خاص اجازه می‌دهد تکیون‌ها وجود داشته باشند؟» و «آیا این تکیون‌ها می‌توانند پدیده رخ داده در آزمایش اسپه را توضیح دهند؟» استدلال‌هایی وجود دارد که باتوجه‌به آن‌ها می‌توان به سؤال اول پاسخ مثبت داد. درمورد سؤال دوم هم یک مدل اولیه وجود دارد که مادلین (Tim Maudlin) ارائه داده است و ما در این‌جا آن را «مدل تکیونی مادلین» می‌نامیم (Maudlin 2011: 70). این مدل، همان‌طور که خود مادلین هم گفته است، در تبیین آزمایش اسپه با مسائل جدی‌ای روبه‌روست (ibid.: 70-72). ما در این مقاله با بررسی مشکلات مدل تکیونی مادلین (مشکلاتی که خود او هم به آن‌ها اشاره کرده است) تلاش خواهیم کرد مدل را به‌گونه‌ای تقویت کنیم تا بتواند پدیده ناموضعی کوانتومی را تبیین کند. به‌نظر می‌رسد حتی مدل تکمیل‌شده هم با مشکلات جدی‌ای مواجه است و تبیین خوبی از ناموضعی کوانتومی ارائه نمی‌دهد.

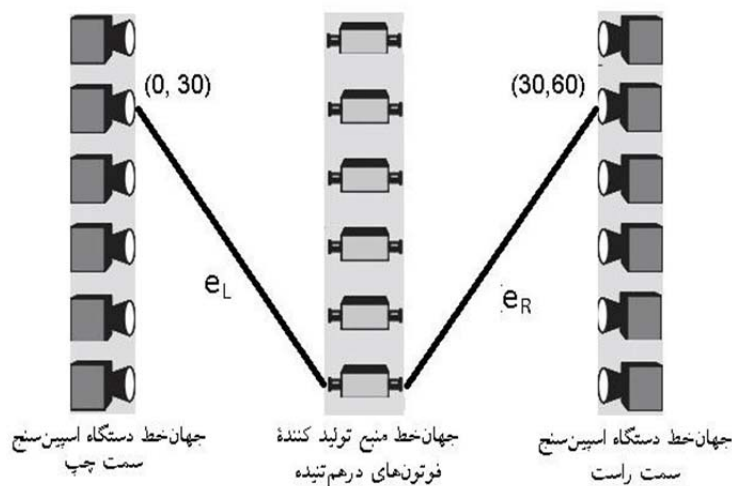
در بخش اول به معنای ناموضعی و در بخش دوم به سازگاری مدل‌های تکیونی با نسبیت خاص خواهیم پرداخت. باتوجه‌به استدلال‌های موجود در منابع به‌نظر می‌رسد فرض سازگاری ذرات تکیونی با نسبیت خاص فرض دور از ذهنی نباشد. بخش سوم را به تشریح مدل تکیونی مادلین و ایرادهای وارد بر آن اختصاص می‌دهیم. در بخش چهارم با تقویت مدل تکیونی مادلین تلاش می‌کنیم مشکلات آن را برطرف کنیم و به یک تبیین قابل قبول نزدیک شویم. در بخش پایانی هم با بحث درمورد ویژگی‌های یک تبیین فیزیکی خوب به سؤال اصلی مقاله پاسخ می‌دهیم: آیا مدل تکیونی تبیین خوبی برای پدیده ناموضعی کوانتومی است؟

۲. آزمایش اسپه و ناموضعی

یک نظریه موضعی (local) است، وقتی اجازه ارتباط علی بین نقاط فضا-زمانی دارای جدایی فضاگون را ندهد. دو نقطه فضا-زمانی جدایی فضاگون دارند، اگر برای ارتباط

میان آن‌ها به سرعتی بیش‌تر از سرعت نور نیاز باشد. بنابراین موضعیّت به این معناست که آثار علیّی نمی‌توانند با سرعتی بیش از سرعت نور منتقل شوند. بل در مقاله ۱۹۶۴ خود فرض شهودی موضعیّت را به‌چالش کشید. او با فرض موضعیّت به نامساوی‌ای رسید که نتایج آماری مکانیک کوانتومی آن را نقض می‌کرد (Bell 1987: sec. 2). بعدها این نامساوی در یک‌سری کارهای آزمایشگاهی، که اسپه و هم‌کارانش انجام دادند، هم رد شد (Aspect et al. 1982). مجموعه این عوامل معقول‌بودن فرض موضعیّت را تضعیف کرد. ما در این مقاله کاری به صحت استدلال بل و درستی نتایج آزمایش اسپه نداریم و با فرض ناموضعیّت کار را جلو می‌بریم. در این‌جا صرفاً برای پیش‌برد بحث لازم است درکی از نحوه انجام آزمایش اسپه داشته باشیم.

دو الکترون درهم‌تنیده (e_L و e_R) در منبعی تولید و از هم جدا می‌شوند. دو دستگاه اسپین‌سنج که هریک پنج متر از منبع فاصله دارند اسپین آن‌ها را اندازه می‌گیرند. دستگاه سمت راست در زوایای 30° یا 60° درجه و دستگاه سمت چپ در زوایای 0° یا 30° درجه می‌توانند اسپین‌سنجی کنند. انتخاب هریک از دو زاویه به‌صورت تصادفی است (Shimony 2013) (شکل ۱).



شکل ۱. آزمایش اسپه در فضا - زمان

محاسبات کوانتومی و نیز نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند که بین نتایج اسپینی این دو الکترون درهم‌تنیده ارتباطاتی وجود دارد. اگر دستگاه‌های سمت راست و چپ در زاویه

یکسانی تنظیم شوند (۳۰ درجه)، نتایج اندازه‌گیری دو الکترون خلاف هم خواهد بود؛ چیدمان‌های (۳۰-۰)، (۶۰-۰)، و (۶۰-۳۰) هم به روابط دیگری می‌انجامد. این روابط را در نامساوی بل جای‌گذاری می‌کنیم و می‌بینیم که نامساوی برقرار نیست. بنابراین می‌توانیم این‌گونه استدلال کنیم: با فرض موضعیت به یک نامساوی رسیدیم. نتایج آماری مکانیک کوانتومی و نیز آزمایش‌های انجام‌شده نامساوی را رد کرد. پس فرضی که نامساوی بر آن مبتنی است، یعنی موضعیت، فرض درستی نیست. این یعنی نتیجه اندازه‌گیری اسپین سمت راست به نتیجه اندازه‌گیری اسپین سمت چپ وابسته است. به عبارت دیگر دو طرف آزمایش اسپه در هم تأثیر علی دارند.

این ارتباط علی از چه طریقی برقرار می‌شود؟ یک تبیین برای این ارتباط فرض ذراتی است که تأثیرات علی را منتقل می‌کنند. در این تبیین، به محض اندازه‌گیری اسپین e_R و مشخص شدن نتیجه اندازه‌گیری، ذره‌ای به سمت e_L فرستاده می‌شود. این ذره زاویه‌ای که در آن e_R اندازه‌گیری شده است (۳۰ یا ۶۰ درجه) و نیز نتیجه اندازه‌گیری (۱ یا -۱) را به e_L خبر می‌دهد. به عبارت دقیق‌تر این ذره تأثیرات علی‌ای را که زاویه اندازه‌گیری و نتیجه اندازه‌گیری e_R بر روی نتیجه اندازه‌گیری e_L دارد به آن انتقال می‌دهد. چون این ذره بین دو نقطه با جدایی فضاگون حرکت می‌کند باید سرعتی بیش‌تر از سرعت نور داشته باشد. در بخش بعد به این سؤال خواهیم پرداخت که آیا فرض وجود چنین ذراتی با نسبیت خاص سازگار است یا نه.

۳. نسبیت خاص و تکین‌ها

نسبیت خاص دو اصل اساسی دارد: همه چهارچوب‌های لخت معادل هم‌اند و سرعت نور در همه چهارچوب‌های لخت مقدار ثابت c است. از این دو اصل می‌توان به روابطی در مورد فواصل زمانی، فواصل مکانی، جرم، و انرژی در چهارچوب‌های متفاوت رسید. فرض کنید چهارچوب B نسبت به چهارچوب A با سرعت ثابت v در حرکت باشد. اگر در چهارچوب B ذره‌ای ساکن با جرم m_0 وجود داشته باشد (m_0 جرم سکون ذره است)، در چهارچوب A این ذره با سرعت v حرکت می‌کند و جرم m و انرژی E دارد که از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$m = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} m_0 = \gamma m_0 \quad (۱)$$

$$E = mc^2 = \gamma m_0 c^2 \quad (۲)$$

بنابراین می توان گفت اگر m_0 جرم سکون ذره باشد، جرم (m_0) و انرژی (E) آن، وقتی که سرعت ذره v باشد، از روابط ۱ و ۲ به دست می آید. روابط بالا به ما می گوید، با افزایش سرعت ذره، جرم و انرژی آن افزایش می یابد و وقتی سرعت ذره به سرعت نور (c) برسد، انرژی اش بی نهایت می شود. بنابراین می توان گفت این ذره نمی تواند به سرعت نور برسد، چراکه برای این کار باید بی نهایت انرژی صرف کرد. در مورد سرعت های بیش تر از سرعت نور هم می توان نکته مشابهی گفت. وقتی v از سرعت نور بیش تر شود، عبارت زیر رادیکال در رابطه ۱ منفی شده و γ عددی مختلط خواهد شد؛ بنابراین جرم و انرژی این ذره مختلط خواهد شد. مختلط شدن جرم و انرژی به این معناست که این ذره نمی تواند به سرعتی بیش از سرعت نور برسد. بنابراین روابط نسبیتی یک قید مهم در مورد سرعت ذرات دارد: ذراتی که سرعتی پایین تر از سرعت نور دارند نمی توانند به سرعت نور و بیش از آن برسند.

آیا این به این معناست که نسبیت خاص لازم می آورد که هیچ ذره فوق نوری ای (هیچ تکیونی) وجود نداشته باشد؟ درنگ اول پاسخ مثبت است: هر ذره فوق نوری ای بر طبق روابط نسبیتی ۱ و ۲ انرژی و جرم مختلط دارد، چون γ آن عددی مختلط است. اما اگر فرض کنیم جرم سکون (m_0) تکیون ها عددی مختلط باشد، می توان گفت نظریه نسبیت اجازه وجود تکیون ها را می دهد. در این صورت هم m_0 و هم γ تکیون ها (ذرات فوق نوری) مختلط اند و بنابراین مقادیر m و E در روابط بالا حقیقی خواهد بود. در سرعت های کم تر از سرعت نور γ حقیقی است و γm_0 مختلط خواهد شد و این یعنی تکیون ها نمی توانند به زیر سرعت نور برسند. علاوه بر این تکیون ها وقتی به سرعت نور می رسند انرژی شان بی نهایت می شود و چون دادن انرژی بی نهایت به آن ها ممکن نیست، تکیون ها هم نمی توانند به سرعت نور برسند. در این صورت قید نسبیت خاص برای سرعت ذرات به این شکل تکمیل می شود: ذراتی که سرعتی پایین تر از سرعت نور دارند نمی توانند به سرعت نور و بیش از آن برسند و ذراتی که سرعتی بیش از سرعت نور دارند (تکیون ها) نمی توانند به سرعت نور و کم تر از آن برسند.

بنابراین باتوجه به این که استدلال بالا مبتنی بر متریک خاصی است که نسبیت خاص برای فضا-زمان پیشنهاد می دهد، می توان گفت ساختار فضا-زمانی نسبیت خاص ظرفیت پذیرش تکیون ها را دارد. در واقع بعد از مقاله ۱۹۶۷ جرال فینبرگ (Gerald Feinberg) به مدت دو دهه بحث بر سر وجود تکیون ها داغ بود (Chodos and Hauser 1985). فینبرگ معتقد بود فرمالیسم میدان های کوانتومی نسبیتی اجازه وجود تکیون ها را می دهد و حالا باید

به این سؤال پاسخ داد که آیا این تکیون‌ها واقعاً در طبیعت وجود دارند و آیا اصلاً می‌توان آن‌ها را در آزمایشگاه شناسایی کرد یا نه؟ (Feinberg 1967). بعد از این مقاله آنچه بیش همه مورد توجه قرار گرفت پارادوکس‌هایی بود که فرض وجود تکیون‌ها پیش می‌آورد. قدیمی‌ترین این پارادوکس‌ها به «پارادوکس تولمان» (Tolman's Paradox) معروف است و برای گریز از آن «اصل بازتعبیر» (reinterpretation principle) معرفی شده است (Girard and Marchildon 1984). به پارادوکس‌های دیگری هم در مقالات اشاره شده است که پارادوکس تقارن و پارادوکس‌های علی از جمله این‌ها است (Basano 1980). به‌رحال گروهی فکر می‌کنند حل بعضی از این پارادوکس‌ها با فرض چهارچوب مرجع مطلق ممکن است و این یعنی نسبیت خاص را باید کنار نهاد (Girard and Marchildon 1984). عده‌ای هم معتقدند دلایل و حتی شواهد خوبی بر وجود تکیون‌ها و سازگاری آن‌ها با نسبیت خاص داریم (Vieira 2012). حتی مسئله وجود تکیون‌ها آنقدر جدی گرفته شد که در سال ۲۰۱۱ در سرن (CERN) برای یافتن یکی از این ذرات آزمایشی طراحی کردند. البته این آزمایش موفقیت‌آمیز نبود (ibid.).

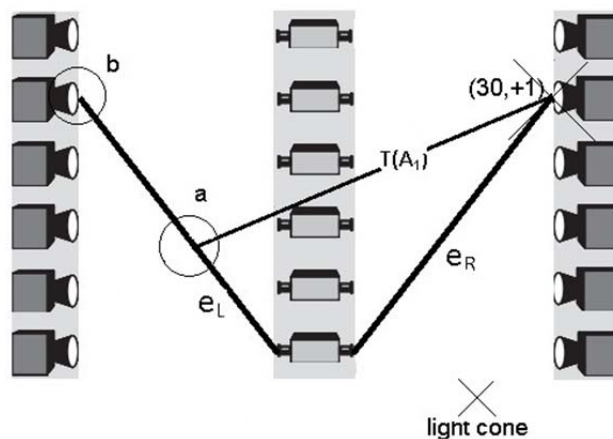
به‌رحال مسئله وجود تکیون‌ها و نیز سازگاری آن‌ها با نسبیت خاص هنوز مسئله‌ای باز است. همان‌طور که اشاره شد، چون شواهد و دلایل قابل توجهی داریم که تکیون‌ها وجود دارند و ساختار فضا-زمانی نسبیتی اجازه وجود آن‌ها را می‌دهد، می‌توان تکیون‌ها را برای تبیین پدیده ناموضعی کوانتومی به کار گرفت و در مورد آن بحث کرد. با توجه به آنچه در این بخش و بخش قبلی گفته شد، در ادامه با فرض قبول تبعات آزمایش اسپه در مورد پدیده ناموضعی کوانتومی و نیز فرض امکان استفاده از ذرات تکیونی برای تبیین ناموضعی، مدل تکیونی پیشنهادی مادلین را ارزیابی می‌کنیم.

۴. مدل تکیونی مادلین و تبیین آزمایش اسپه

تاکنون فرض گرفتیم که ارتباط علی فوق نوری بین دو سوی آزمایش اسپه برقرار است و ذرات تکیونی با ساختار فضا-زمانی نسبیت خاص سازگارند. حال به سؤال اصلی خواهیم پرداخت. آیا تکیون‌ها می‌توانند ارتباط علی دو سوی آزمایش را تبیین کنند؟ پیش از پاسخ به این سؤال به یک مسئله مهم درباره انرژی ذرات درهم‌تنیده می‌پردازیم. همان‌طور که مادلین هم اشاره کرده است (Maudlin 2011: 65-66). در مکانیک کوانتومی رایج (standard quantum mechanics) تابع موج جفت ذره درهم‌تنیده مطابق همیلتونی تحول می‌یابد و همیلتونی هم با انرژی مرتبط است. به محض جدایی دو ذره، همیلتونی برهم‌کنش

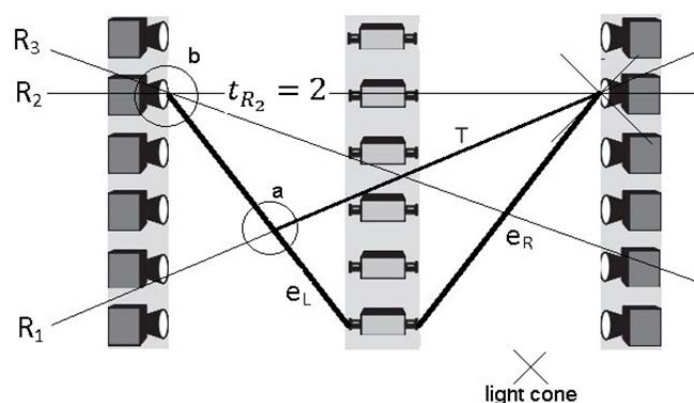
بین آن‌ها صفر می‌شود و تغییر انرژی جفت درهم‌تنیده موضوعیت ندارد. بنابراین تبادل آثار علی بین دو ذره درهم‌تنیده جدا از هم نباید به تغییر انرژی ذرات بینجامد. به عبارت دیگر، نظریه مکانیک کوانتومی اجازه تبادل انرژی بین دو ذره درهم‌تنیده جدا از هم را نمی‌دهد. با این نکته مهم که در این مقاله آن را «برهم‌کنش بدون انرژی» می‌نامیم در ادامه کار بیش‌تر مواجه خواهیم شد. اما به اجمال باید گفت باتوجه به این نکته فقط تکیون‌هایی می‌توانند واسطه ارتباط دو الکترون درهم‌تنیده شوند که انرژی‌شان صفر باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در مدل تکیونی پیشنهادی ذرات واسطه باید ذراتی با سرعت بی‌نهایت باشند.

با این مقدمه به توضیح مدل تکیونی مادلین می‌پردازیم (ibid.: 65-72). در شکل ۲ تبادل تکیون T بین دو الکترون درهم‌تنیده آزمایش اسپه نشان داده شده است. وقتی اسپین الکترون سمت راست (e_R) اندازه‌گیری می‌شود، بلافاصله تکیونی به سمت الکترون سمت چپ (e_L) فرستاده می‌شود. این تکیون قبل از اندازه‌گیری اسپین e_L به آن می‌رسد (در منطقه a) و باعث می‌شود نتیجه اندازه‌گیری اسپین e_L در حین اندازه‌گیری (در منطقه b) با نتیجه سمت راست مرتبط شود. نوع اطلاعاتی که تکیون منتقل می‌کند می‌تواند به ویژگی‌های آن مربوط باشد. مثلاً با ایده گرفتن از پیشنهاد مادلین (ibid.: 71) فرض می‌گیریم اگر اندازه‌گیری اسپین در زاویه 30° درجه نتیجه $+1$ (اسپین بالا) داشت، تکیونی با ویژگی A_1 ، اگر زاویه اندازه‌گیری 30° درجه و نتیجه -1 (اسپین پایین) بود، تکیونی با ویژگی A_2 ، در حالت -60° بالا تکیونی با ویژگی A_3 و در حالت -60° پایین تکیونی با ویژگی A_4 ارسال شود. ویژگی‌های تکیون ارسالی به الکترون سمت چپ اجازه انتخاب می‌دهد و مسئله ارتباط دو طرف آزمایش حل می‌شود.



شکل ۲. مدل تکیونی مادلین؛ ارتباط میان دو طرف آزمایش اسپه با استفاده از تکیون

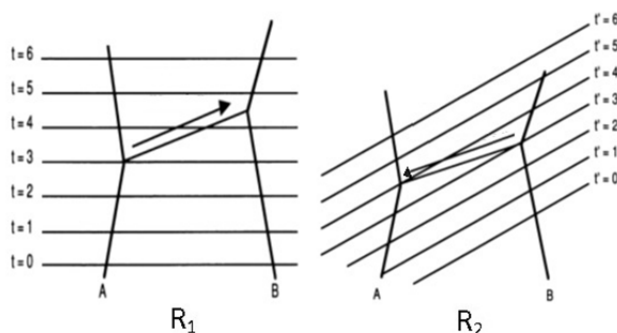
از آنجاکه در نسبیت خاص همه چهارچوب‌های مرجع لخت معادل هم‌اند، اگر روایت بالا درست باشد، باید بتواند مسئله ارتباط دو سوی آزمایش را از دید همه ناظرها تبیین کند. مادلین در سه چهارچوب متفاوت درستی این تبیین را بررسی می‌کند (70: ibid.). در چهارچوب R_1 (در شکل ۳) ابتدا e_R و پس از آن e_L اندازه‌گیری می‌شود؛ هنگام اندازه‌گیری e_L ، e_R هنوز به دستگاه اندازه‌گیری نرسیده است. به محض اندازه‌گیری e_R تکیونی با سرعت مشخص، که باتوجه به نکته ابتدای این بخش این سرعت باید بی‌نهایت باشد، به سمت e_L می‌رود و آثار لازم را در منطقه a روی e_L ایجاد می‌کند تا وقتی که به دستگاه اندازه‌گیری رسید (منطقه b) نتیجه اندازه‌گیری با نتیجه e_R مرتبط باشد. بنابراین در چهارچوب R_1 تکیون T می‌تواند ارتباط لازم را بین دو الکترون ایجاد کند.



شکل ۳. مدل تکیونی مادلین از چهارچوب‌های مرجع متفاوت

در چهارچوب R_2 (در شکل ۳) دو طرف آزمایش هم‌زمان (مثلاً فرض کنید در لحظه $t_{R_2} = 2$) اندازه‌گیری می‌شوند. در این چهارچوب تکیون ارسالی در زمان رو به عقب حرکت می‌کند و اطلاعاتی به گذشته e_L (یعنی به منطقه a) می‌دهد تا در آینده (یعنی در منطقه b) نتیجه اندازه‌گیری e_L با e_R مرتبط باشد. در چهارچوب R_2 اتفاق عجیبی روی داده است؛ اولاً علیت رو به عقب داریم و ثانیاً چون تکیون در زمان رو به عقب حرکت می‌کند باید برای آن انرژی منفی در نظر بگیریم (68: ibid.). مورد اول با شهود سازگار نیست، اما در مورد انرژی منفی اوضاع حتی پیچیده‌تر هم می‌شود. اگر انتشار تکیون با انرژی منفی را مجاز بدانیم، یک ذره می‌تواند مدام تکیون‌هایی با انرژی منفی گسیل کند و انرژی خود را افزایش دهد (69: ibid.). در چنین شرایطی سیستم ناپایدار خواهد بود.

برای فرار از این انرژی منفی و تبعات ناخوشایند آن اصل بازتعبیر به کار گرفته می شود (ibid.). در واقع، همان طور که در بخش قبل گفته شد، استفاده از اصل بازتعبیر برای پرهیز از پارادوکس پیشنهاد شده بود. این اصل انتقال تکیونی با انرژی منفی از نقطه a به نقطه b را معادل انتقال همان تکیون با انرژی مثبت از نقطه b به نقطه a می داند (Girard and Marchildon 1984). برای مثال در چهارچوب مرجع R_1 در شکل ۴ ذره A تکیونی با انرژی مثبت به سمت ذره B فرستاده و انرژی اش کم می شود؛ با رسیدن تکیون انرژی ذره B زیاد می شود. در چهارچوب R_2 ذره A مقداری انرژی منفی از دست می دهد و انرژی اش افزایش می یابد. این تکیون با انرژی منفی به ذره B می رسد و انرژی آن را کم می کند. حال با استفاده از اصل بازتعبیر می توان توصیف چهارچوب مرجع R_2 را تغییر داد: ذره B تکیونی با انرژی مثبت به سمت ذره A می فرستد؛ انرژی B کاهش و انرژی A افزایش می یابد.



شکل ۴. اصل بازتعبیر: ردوبدل شدن تکیون از نگاه دو چهارچوب مرجع متفاوت

در واقع اصل بازتعبیر با هدف پرهیز از ناپایداری سیستم جای فرستنده و گیرنده تکیون را در بعضی از چهارچوب ها عوض می کند. اما با معرفی اصل بازتعبیر مشکل چهارچوب R_2 در شکل ۳ حل نمی شود (Maudlin 2011: 70). با استفاده از این اصل باید گفت در این چهارچوب e_L از منطقه a تکیونی با انرژی مثبت به سمت الکترون e_R می فرستد. اما این تکیون به کار ارتباط دو طرف آزمایش اسپه نمی آید. اساساً در منطقه a روی e_L اندازه گیری ای انجام نشده است و بنابراین نمی توان انتظار داشت این ذره در مورد زاویه اندازه گیری اسپین و نتیجه اندازه گیری اطلاعاتی به سمت e_R منتقل کند و اثری روی آن بگذارد.

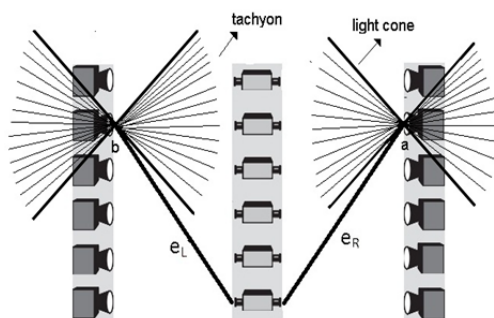
آنچه در مورد چهارچوب R_2 شکل ۳ گفتیم در چهارچوب R_3 هم برقرار است. باز هم تکیون در زمان رو به عقب حرکت کرده است و انرژی اش منفی است. بنابراین طبق اصل

بازتعبیر باید بگوییم تکیون از نقطه a به محل اندازه‌گیری e_R فرستاده شده است. اما در این چهارچوب e_L در منطقه a هنوز اندازه‌گیری نشده است و در نتیجه نمی‌تواند تکیون کارآمدی به سمت e_R بفرستد.

باتوجه به آنچه در مورد این سه چهارچوب گفته شد، مدل تکیونی مادلین، همان‌طور که خودش هم اشاره کرده است، فقط در بعضی از چهارچوب‌ها به کار می‌آید و بنابراین در تبیین ناموضعیات کوانتومی (یعنی در تبیین پدیده روی داده‌شده در آزمایش اسپه) به کار نمی‌آید. اگر مدل مادلین درست باشد باید در همه چهارچوب‌های مرجع لخت مسئله ناموضعیات را حل کند. در بخش بعد تلاش می‌کنیم برای پرهیز از انتقادات وارد بر مدل تکیونی مادلین آن را تقویت کنیم. خواهیم دید که اگر چه مدل‌های تقویت‌شده مشکلات مدل تکیونی مادلین را ندارند، اما یکی پس از دیگری با مشکلات جدیدی روبه‌رو می‌شوند.

۵. مدل‌های تکیونی تقویت‌شده

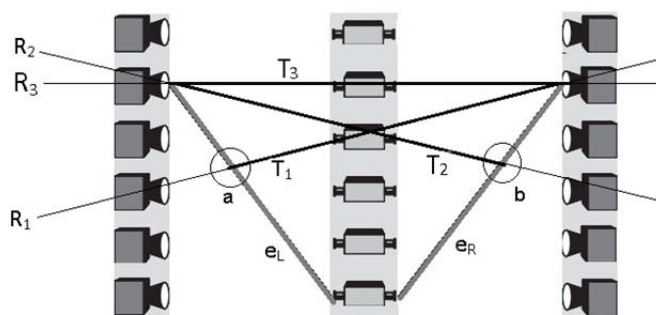
اولین مدل تقویت‌شده، یعنی ت ۱، را با یک تمثیل انسان‌انگارانه شرح می‌دهیم. ذرات درهم‌تنیده با هم قرار می‌گذارند هر اتفاق جدیدی که برایشان روی داد تکیونی به سمت دیگری ارسال کنند. اما ذرات پس از جدایی از هم در هر جایی می‌توانند وجود داشته باشند بنابراین این قرار باید جدی‌تر شود: بعد از هر اتفاق جدیدی باید به همه نقاطی که ممکن است دیگری حضور داشته باشد تکیون بفرستیم. به بیان فیزیکی‌تر ذرات درهم‌تنیده به گونه‌ای رفتار می‌کنند که هرگاه برهم‌کنشی برای یکی از آنها روی می‌دهد، تکیونی‌هایی برای ارتباط با ذره دیگر به همه نقاط ممکن ارسال می‌کنند. این ارسال‌ها در مورد آزمایش اسپه و در یک فضا-زمان دوبعدی در شکل ۵ آمده است. در واقع در آزمایش اسپه اتفاق جدید اندازه‌گیری اسپینی خواهد بود.



شکل ۵. مدل ت ۱ و آزمایش اسپه

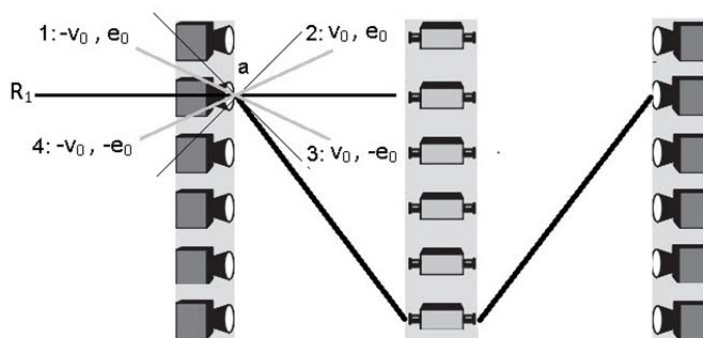
همان‌طور که در شکل هم مشخص است، به نقاط درون مخروط نوری محل اندازه‌گیری هیچ تکیونی ارسال نشده است. در واقع به این نقاط اصلاً نمی‌توان تکیون فرستاد، چون سرعت تکیون‌ها باید بیش‌تر از سرعت نور باشد و اگر ارتباطی لازم باشد، ذراتی زیر سرعت نور نیاز است. علاوه بر این می‌توان نشان داد وقتی دو ذره درهم‌تنیده از هم جدا می‌شوند دیگر درون مخروط نوری هم قرار نمی‌گیرند، مگر این‌که موقعیت آن‌ها دقیقاً در یک نقطه فضا - زمانی خاص بر هم منطبق شود که در این صورت هم ارتباط دو ذره لزومی ندارد. بنابراین نه می‌توان تکیونی برای گزارش وضعیت به آن نقاط فرستاد و نه لازم است که این کار انجام شود. همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است، فرستادن تکیون به همه نقاط ممکن فضا - زمان در یک فضا - زمان دوبرعده‌ای به این معناست که هر ذره در لحظه اندازه‌گیری تکیون‌هایی با انرژی‌های متفاوت، چه انرژی منفی و چه مثبت، هم به سمت راست و هم به سمت چپ خود بفرستد.

به نظر می‌رسد این راه‌حل مشکل مدل تکیونی‌مدلین را حل می‌کند. از منظر هر چهارچوب مرجعی یکی از این بی‌نهایت تکیون‌ها وظیفه ارتباط را بر عهده دارد (بنگرید به شکل ۶). در چهارچوب R_1 تکیون T_1 با سرعت بی‌نهایت و انرژی صفر از سوی e_R به سوی e_L می‌رود و بدون آن‌که مبادله انرژی‌ای بین دو ذره درهم‌تنیده روی دهد اطلاعات یکی به دیگری منتقل می‌شود. از دید ناظر چهارچوب R_2 تکیون T_1 به کار نمی‌آید. در این چهارچوب تکیون T_1 با انرژی منفی از سوی e_R به سمت e_L می‌رود و ناچاریم به اصل بازتعبیر متوسل شویم. وقتی هم اصل بازتعبیر را به کار می‌بریم تکیون T_1 که از سوی e_L به سمت e_R می‌رود اطلاعات مفیدی را با خود حمل نمی‌کند. در این چهارچوب وظیفه ارتباط میان دو ذره را تکیون T_2 ، که از e_L به سمت e_R می‌رود و در منطقه b به آن می‌رسد، عهده‌دار است. در چهارچوب R_3 هم تکیون T_3 (انرژی صفر و سرعت بی‌نهایت) ارتباط را برقرار می‌کند.



شکل ۶. مدل ت ۱ از سه چهارچوب متفاوت

به همین ترتیب در هر چهارچوبی یکی از تکیون‌ها به کار می‌آید. در این مورد که در واقع امر کدام تکیون‌ها چنین ارتباطی را برقرار کرده‌اند در ادامه بیش‌تر صحبت می‌کنیم. یکی از مسائلی که مدل تکیونی ت ۱ با آن مواجه است ناپایداری ذرات است. به هر حال در لحظه اندازه‌گیری هر ذره بی‌نهایت تکیون نشر می‌کند که هر کدام انرژی مشخصی دارند؛ ممکن است انرژی ذره به دلیل نشر بی‌نهایت تکیون، مثبت بی‌نهایت، یا منفی بی‌نهایت شود. اگر این اتفاق روی دهد سیستم ناپایدار می‌شود. از یک چهارچوب خاص (R_1) به ذره اندازه‌گیری شده سمت چپ نگاه و در مورد ناپایداری آن بحث می‌کنیم. در شکل ۷ این ذره در فضا - زمان دویعدی نشان داد شده است.

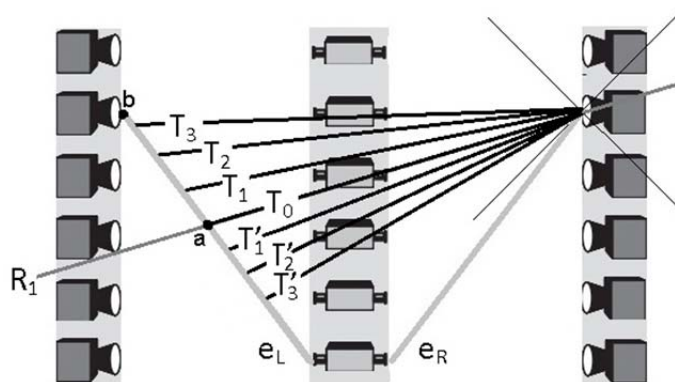


شکل ۷. انرژی و تکانه تکیون‌های منتشر شده از ذرات درهم‌تنیده

در لحظه اندازه‌گیری تکیونی با سرعت v_0 و انرژی e_0 و تکیونی با سرعت v_0 و انرژی $-e_0$ به سمت راست فرستاده می‌شود. در جهت مخالف هم همین‌گونه است؛ تکیونی با سرعت $-v_0$ و انرژی e_0 و تکیونی با سرعت $-v_0$ و انرژی $-e_0$ به سمت چپ می‌رود. اول از همه باید اصل بازتعبیر را به کار بگیریم. برای پرهیز از انرژی منفی باید بگوییم دو تکیون با انرژی $+e_0$ و سرعت v_0 به دو سمت ارسال می‌شود (تکیون‌های ۱ و ۲) و دو تکیون با انرژی $+e_0$ و سرعت v_0 از دو طرف به نقطه a می‌رسند. این چهار تکیون انرژی و تکانه ذره را تغییر نمی‌دهند، چراکه مجموع تکانه و انرژی آن‌ها روی هم صفر خواهد بود. برای چهارتایی‌های تکیونی دیگر هم اوضاع مشابه است. در نهایت در لحظه اندازه‌گیری بی‌نهایت تکیون ارسال و دریافت می‌شود و انرژی و تکانه ذره هم تغییر نمی‌کند. آنچه در مورد چهارچوب R_1 گفته شد در مورد هر چهارچوب فرضی دیگری هم برقرار است. در هر چهارچوبی می‌توان چهارتایی‌هایی از تکیون‌ها یافت که مجموع انرژی و تکانه آن‌ها صفر

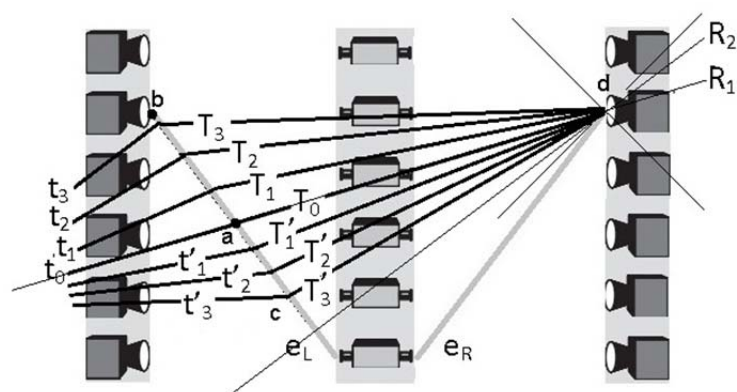
است. جمع همه چهارتایی‌ها هم به تغییر انرژی و تکانه صفر می‌انجامد. بنابراین می‌توان گفت ذرات درهم‌تنیده با وجود انتشار بی‌نهایت تکیون انرژی و تکانه‌شان تغییر نمی‌کند و در پایداری سیستم خللی ایجاد نمی‌شود.

اما این ناپایداری ابعاد جدی‌تری هم دارد. بیایید از چهارچوب R_1 در شکل ۸ به تبادل نگاه کنیم. همان‌طور که گفته شد T_0 تکیونی است که در این چهارچوب به کار می‌آید. چون انرژی T_0 صفر است، بدون تغییر انرژی e_L از سوی e_R اطلاعات لازم میان دو ذره را مبادله می‌کند. اما همان‌طور که گفته شد، در این چهارچوب، e_R (و نیز e_L) در لحظه اندازه‌گیری بی‌نهایت تکیون منتشر می‌کنند که به‌غیر از یکی هیچ‌کدام به کار نمی‌آیند. یعنی در چهارچوب R_1 تنها تکیونی که اطلاعات درستی منتقل می‌کند و درعین حال «برهم‌کنش بدون انرژی» دارد (بنگرید به پاراگراف اول بخش ۳) تکیون T_0 است و تکیون‌هایی مانند T_1, T_2, T_3 و T'_1, T'_2, T'_3 به کار نمی‌آیند. این تکیون‌ها به e_L می‌رسند و انرژی آن را مدام تغییر می‌دهند. مثلاً بی‌نهایت تکیون با انرژی منفی (T'_1, T'_2, T'_3 و ...) پیش از نقطه a به e_L می‌رسند و در نتیجه انرژی e_L در نقطه a منفی بی‌نهایت خواهد بود (در واقع به خاطر اصل بازتعبیر باید آن را این‌چنین خواند: تا قبل از نقطه a بی‌نهایت تکیون با انرژی مثبت (T_1, T_2, T_3 و مانند آن) از سوی e_L به سمت محل اندازه‌گیری e_R گسیل می‌شود). انرژی بی‌نهایت در یک سیستم فیزیکی مطلوب ما نیست و نظریه‌ای که چنین نتایجی دارد نباید نظریه درستی باشد. در مورد چهارچوب‌های دیگر و نیز در مورد ذره e_R هم می‌توان نکته مشابهی گفت؛ جاهایی انرژی مثبت بی‌نهایت می‌شود و سیستم ناپایدار خواهد بود و جاهای هم منفی بینهایت می‌شود که باز هم مطلوب نیست.



شکل ۸ ناپایداری سیستم

برای حل این مشکل باید مدل را پیچیده‌تر کنیم. نام این مدل پیچیده‌تر را T_2 می‌گذاریم. در مدل T_2 ذرات درهم‌تنیده در هر لحظه به همه نقاطی از فضا-زمان که جفتشان ممکن است حضور داشته باشد تکیون می‌فرستند و گزارش وضعیت می‌دهند. این حرف به آن معناست که همه نقاط روی جهان خط e_L و e_R درست مثل دو نقطه a و b در شکل ۵ هستند. در این صورت، با نگاه به چهارچوب R_1 در شکل ۹ می‌توان گفت: به ازای هر تکیونی با انرژی e و تکانه p که به نقطه فرضی x روی جهان خط e_L وارد (T_0, T_1, T_2) یا از آن خارج (T'_1, T'_2, T'_3 و ...) می‌شود، تکیونی با انرژی e و تکانه $-p$ وجود دارد که به همان نقطه وارد (t_0, t_1, t_2, t_3 و ...) یا از آن خارج (t'_1, t'_2, t'_3 و ...) می‌شود.



شکل ۹. مدل تکیونی T_2 معضل ناپایداری را ندارد.

مدل T_2 با وجود مزیت‌هایی که بر دو مدل قبلی دارد، یعنی حل مشکل ناپایداری و انرژی بی‌نهایت، با مشکلات جدیدی مواجه می‌شود. یکی از مشکلاتی که این مدل و حتی مدل‌های قبلی با آن مواجه است مسئله «تکیون‌های گمراه‌کننده» است. فرض کنید زاویه اندازه‌گیری اسپین e_L 30° درجه و نتیجه آن $+1$ باشد. اگر از چهارچوب R_2 به تکیون T'_3 نگاه کنیم (شکل ۹). باید بگوییم این تکیون از e_R به سمت e_L (نقطه c) فرستاده می‌شود، و اطلاعات $(+1|30)$ را به آن جا می‌برد، تکیونی که ویژگی A_1 را دارد. اما از چهارچوب R_1 تکیون T'_3 که از e_L به سمت e_R می‌رود اطلاعات خاصی را منتقل نمی‌کند، چون هنوز اندازه‌گیری‌ای روی e_L انجام نشده است. بنابراین در این چهارچوب تکیون T'_3 تکیونی خشی و مثلاً با ویژگی B است. در واقع با تغییر چهارچوب، علاوه بر جهت تکیون ارسالی، ویژگی آن هم تغییر می‌کند؛ یعنی در

چهارچوبی تکیون T'_3 ویژگی A_1 و در چهارچوب دیگر ویژگی B دارد. به نظر می‌رسد وابسته به ناظر بودن ویژگی تکیون مطلوب نیست اما گزینه بدیل هم چندان خوشایند نیست. اگر هر دو چهارچوب یک ویژگی برای تکیون T'_3 قائل شوند تکیون ارسالی از نقطه c به d تکیونی گمراه‌کننده خواهد بود. درحین اندازه‌گیری e_R تکیون T'_3 با ویژگی A_1 به نقطه b می‌رسد. e_R با وجود تکیون ورودی تصور می‌کند روی e_L در زاویه 30° درجه اندازه‌گیری‌ای انجام و نتیجه $+1$ حاصل شده است. بنابراین نتیجه می‌گیرد درحین اسپین‌سنجی 30° درجه در نقطه d باید نتیجه -1 بگیرد. بنابراین تکیون T'_3 در این چهارچوب گمراه‌کننده خواهد بود. اگر تکیون T'_3 ویژگی B داشته باشد، هم مشکل مشابهی در چهارچوب R_1 روی می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در چهارچوب R_1 نتیجه اسپین‌سنجی $e_R +1$ و در چهارچوب $R_2 -1$ خواهد بود.

مشکل دیگر این مدل «تکیون‌های بدون منبع» است. به شکل ۹ نگاه کنید. طبق اصل بازتعبیر تکیون t'_3 از نقطه‌ای خارج از c به e_L رسیده است. به عبارت دیگر، این تکیون از سوی e_L گسیل نشده است. اگر این گونه است، فرستنده باید e_R باشد. اما مسیر حرکت e_R به ما می‌گوید چنین چیزی ممکن نیست. درواقع این مشکل کم‌وبیش برای مدل t هم برقرار است. حل این مسئله احتمالاً باز هم نیازمند تقویت مدل تکیونی است. می‌توانیم فرض کنیم که ذره‌ای دیگر این تکیون را ارسال کرده است. درواقع در مدل جدید که آن را t می‌نامیم هر ذره‌ای در هر لحظه به همه نقاط فضا - زمان تکیون می‌فرستد و دریافت می‌کند تا وضعیت خود را به آن‌ها اطلاع دهد و از وضعیت آن‌ها مطلع شود. اما این ذرات قرار است چه چیزی را گزارش دهند؟ چند نوع تکیون و با چه ویژگی‌هایی باید فرض کرد؟ چرا شواهد این نوع ارتباط فوق نوری فقط در مورد ذرات درهم‌تنیده وجود دارد؟ این مدل باید به همه این سؤال‌ها پاسخ دهد تا بتوان آن را یک تبیین از پدیده ناموضعیست کوانتومی دانست.

۶. آیا مدل تکیونی مدل موفق است؟

آیا مدل تکیونی، با همه حک و اصلاح‌هایی که در آن شد و در بخش قبل دیدیم، مدل موفق برای تبیین پدیده ناموضعیست کوانتومی است؟ برای پاسخ به این سؤال ابتدا باید درکی از موفقیت یک نظریه فیزیکی داشته باشیم. به نظر می‌رسد یک نظریه علاوه بر تبیین پدیده مورد بحث باید شرایط دیگری را هم برآورده کند تا بتوان آن را موفق دانست. یک نظریه فیزیکی موفق باید با نظریات کلان فیزیک، مثل نسبیت خاص، مکانیک کوانتومی،

نسبیت عام، و نیز اصول پذیرفته شده این علم (مثل اصول پایستگی و مانند آن) سازگار باشد. این نکته به خصوص در مورد نظریاتی که فقط قرار است یک یا چند پدیده خاص و موضعی را توضیح بدهند صدق می‌کند. نکته دیگر در مورد یک نظریه خوب شهود پذیر بودن است. البته اشکالی ندارد که یک نظریه نتایج متافیزیکی جدید و حتی شهودگریزی داشته باشد، اما به شرطی که ویژگی‌های مثبت دیگری هم داشته باشد. بسیاری از نظریات خوب فیزیکی مثل نسبیت خاص، نسبیت عام، مکانیک کوانتومی، و ... وقتی مطرح شدند بسیار خلاف شهود بودند، اما به این دلیل پذیرفته شدند که پیش‌بینی‌های بدیعی داشتند، آزمون پذیر بودند و آن‌گونه که لاکاتوش می‌گوید (Lakatos 1978: sec. 1)، یک برنامه پژوهشی به دانشمندان معرفی می‌کردند. نکته دیگر در مورد یک نظریه موفق به صرفه بودن آن است؛ به این معنی که هویت‌های زیادی را جعل نکند، اصول متعدد نداشته باشد و با تعداد کم اصول و هویت بتواند پدیده‌های زیادی را تبیین و پیش‌بینی کند. در ادامه بررسی خواهیم کرد که آیا مدل تکیونی چنین شرایطی را برآورده می‌کند یا نه.

۱.۶ مدل تکیونی تقویت شده و نسبیت خاص

همان‌طور که گفته شد استدلال‌های خوبی وجود دارد که تکیون‌ها با ساختار فضا-زمانی نسبیت خاص سازگارند. البته وجود تکیون‌ها می‌تواند پارادوکس‌هایی ایجاد کند و بحث‌های زیادی هم در مورد آن‌ها شکل گرفته است. ما در این جا وارد بحث پارادوکس‌ها نشدیم؛ اما می‌دانیم به یک‌باره نمی‌توانند فرض وجود تکیون‌ها را نامعقول کند. در واقع بحث سازگاری تکیون‌ها با نسبیت خاص آن قدر جدی گرفته شده است که بعضی از فیزیک‌دانان به فکر طراحی آزمایش‌هایی برای آشکارسازی آن‌ها بیفتند.

۲.۶ مکانیک کوانتومی رایج و نسبت آن با مدل تکیونی

در مدل تکیونی تقویت شده در هر لحظه، و بنابراین پیش از اندازه‌گیری نیز، میان ذرات درهم‌تنیده ارتباطات تکیونی وجود دارد. بنابراین باید بگوییم ذرات درهم‌تنیده پیش از اندازه‌گیری هم باید در فضا-زمان وجود داشته باشند. مکانیک کوانتومی رایج البته در این مورد مبهم است: می‌توان فرض کرد تا قبل از اندازه‌گیری هیچ آثاری از تابع موج در فضا-زمان نیست یا این که هست ولی ذراتی با حالت نامعین داریم. مورد اخیر با مدل تکیونی سازگار است.

نکته دیگر در مورد ارتباطات تکیونی میان جفت درهم تنیده این است که این ارتباطات نباید به گونه‌ای باشند که موجب انتقال انرژی بین دو ذره شوند. در مدل ت ۳ فرض گرفتیم که هر ذره در هر لحظه به بقیه جهان تکیون می‌فرستد تا وضعیت خود را گزارش دهد؛ در این ارسال‌ها در مجموع هیچ انرژی‌ای رد و بدل نمی‌شود (انرژی کسب‌شده و از دست داده‌شده با هم موازنه دارند) و ارتباطات ذرات جهان از طریق تکیون‌ها موجب تغییر انرژی یک ناحیه فضا - زمانی نمی‌شود. بنابراین می‌توان گفت مدل تکیونی تقویت‌شده اصل برهم‌کنش بدون انرژی را رعایت می‌کند و با مکانیک کوانتومی تضادی ندارد.

۳.۶ برنامه‌های پژوهشی پیش‌روی مدل

الف) همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، برای حل مسئله تکیون‌های بدون منبع ناچار شدیم مدل را تقویت کنیم و به مدل ت ۳ رسیدیم؛ فرض گرفتیم ذرات درهم‌تنیده در هر لحظه (یا بهتر بگوییم در هر نقطه فضا - زمان که باشند) به همه نقاط ممکن فضا - زمان تکیون می‌فرستند تا به جفتشان اطلاعات لازم را بدهند. این یعنی هر کدام از ذرات جهان در هر لحظه باید به بقیه نقاط فضا - زمان تکیون بفرستند (از بقیه نقاط تکیون بگیرند) تا در مورد وضعیت خود به جهان اطلاعات بدهند (از جهان اطلاعات بگیرند). البته هنوز سؤالات زیادی در مورد مدل ت ۳ وجود دارد که باید به آن پاسخ داد؛ در پایان بخش قبل به آن‌ها اشاره شد.

ب) تفاوت دیدگاه چهارچوب‌ها مرجع: دیدیم که تبدلات تکیونی فراوانی بین جفت درهم‌تنیده وجود دارد و همه چهارچوب‌ها بر آن صحنه می‌گذارند. اما تفاوت در این است که در هر چهارچوبی یکی از تکیون‌ها به کار ارتباط ذرات درهم‌تنیده می‌آید؛ معنای این حرف چیست؟ آیا باید گفت چون مدل ت ۳ در هر چهارچوبی به یکی از تکیون‌ها نقش می‌دهد، کارایی ندارد؟ آیا اجازه نداریم بگوییم به دلیل این‌که هر چهارچوبی یکی از تکیون‌های را مسئول ارتباط ذرات درهم‌تنیده می‌داند بنابراین همه تکیون‌ها، و نه یکی به تنهایی، مسئول ارتباط است؟ پاسخ ما به سؤال اخیر مثبت است و استدلال نیز در واقع چند تمثیل متفاوت برای شهودپذیر کردن این مدعا است. این ماجرا مشابه وقتی است که دو ناظر از دو چشم‌انداز متفاوت به قاب عکسی نگاه می‌کنند و دو تصویر متفاوت می‌بینند. قاب عکس طوری ساخته شده است که از چشم‌اندازی گل است و از چشم‌اندازی بلبل. ظاهراً قاب عکس هر دو ست و هر ناظری قسمتی از آن را می‌بیند. اگر این مشابَهت درست

باشد در این جا هم باید بگوییم مجموع همه تکیون‌های ارسالی است که ذرات درهم تنیده را مرتبط می‌کند. در واقع در نسبیت خاص با موارد این‌چنینی زیاد مواجه می‌شویم. این‌که ناظرهای گوناگون به یک ذره انرژی‌های متفاوتی نسبت می‌دهند به این معنی نیست که انرژی پدیده‌ای فیزیکی نیست و نباید از آن صحبت کرد. در مورد تکیون‌ها هم همین‌طور است. این‌که ناظرهای گوناگون تکیون‌های متفاوتی را مسئول ارتباط ذرات درهم تنیده می‌دانند به این معنی نیست که تکیون اصلاً واسطه ارتباط نیست.

ج) آنچه در بخش قبل در مورد «تکیون‌های گم‌راه‌کننده» گفته شد یکی از مشکلات جدی مدل ت ۳ است. در واقع ما با یک دوراهی مواجهیم. یا باید قبول کنیم ذرات درهم تنیده بدون هیچ دلیلی به جفت خود تکیون‌هایی می‌فرستند که حاوی اطلاعات غلط است، یا باید بپذیریم ویژگی ذرات هم می‌تواند به چهارچوب‌های مرجع وابسته باشد. شق اول این دوراهی پذیرفتنی نیست. پذیرش این شق یعنی کنار نهادن اصل علیت. همه عللی که باعث می‌شود e_L تکیونی با ویژگی B از نقطه c به d ارسال کند فراهم است، اما به‌جای آن تکیونی با ویژگی A_1 ارسال می‌شود (به تکیون T'_3 از چهارچوب R_1 شکل ۹ نگاه کنید؛ در بخش قبل مفصلاً به آن پرداخته شده است). کنار نهادن اصل علیت در این مثال با آنچه ظاهراً در تعبیر کینماژی مکانیک کوانتومی روی می‌دهد متفاوت است. در آن‌جا شرایط اولیه و قوانین شرایط نهایی را با احتمال بالا معین می‌کند و در درصد پایینی از موارد گویی قوانین طبیعت به ذره مورد بررسی حق انتخاب می‌دهد. در این‌جا ما قانون را می‌دانیم و بعد می‌بینیم همین قانون به‌وضوح نقض می‌شود. به‌علاوه اگر قرار باشد تکیون $(A_1) T'_3$ جدی گرفته شود نتیجه اندازه‌گیری e_R در چهارچوب R_1 باید -1 باشد (و در چهارچوب $R_2 +1$) که به‌وضوح خلاف آن را در آزمایشگاه می‌بینیم.

اگرچه شق دوم چندان شهودپسند نیست، اما تالی فاسد کم‌تری دارد: بعضی هویت وجود دارند که از چهارچوب‌های متفاوت ویژگی‌های متفاوتی دارند. در واقع مواردی از ویژگی‌های متفاوت یک ذره نسبت به ناظرهای متفاوت وجود دارد و تکیون T'_3 اولین آن‌ها نیست. الکترونی را در نظر بگیرید که نسبت به چهارچوب O_1 به سمت شمال حرکت می‌کند. این الکترون بنابر قاعده دست راست میدان مغناطیسی‌ای اطراف خود ایجاد می‌کند که جهت آن به سمت جنوب است. پس اسپین این الکترون رو به سمت جنوب است. حال چهارچوب دیگری را در نظر بگیرید که در آن همان الکترون به سمت جنوب در حرکت است. با استدلالی مشابه اسپین الکترون در این چهارچوب به سمت شمال خواهد بود. بنابراین ویژگی اسپینی چنین الکترونی برای هر ناظری به‌شکلی است. وقتی یک مورد از

این دست سراغ داریم می‌توانیم بگوییم متفاوت بودن ویژگی تکیون T'_3 (A_1 یا B) نسبت به چهارچوب‌های متفاوت ممکن است. بنابراین شق دوم قابل قبول‌تر است. هر مدل فیزیکی‌ای که قرار باشد از تبدلات تکیونی بهره‌بردار باید به نکات اشاره‌شده در این بخش (و به‌خصوص موارد الف، ب، و ج) توجه کند. مدل باید سازوکاری معرفی کند که تغییر ویژگی‌های تکیون نسبت به چهارچوب‌های متفاوت را تبیین کند. یعنی لازم است یک قانون برای تحول تکیون‌ها معرفی شود که در همه چهارچوب‌ها برقرار است. این ویژگی یا قانون باید مستقل از چهارچوب بگوید: (۱) چرا در یک چهارچوب یکی از تکیون‌ها مسئول برقراری ارتباط جفت درهم‌تنیده معرفی می‌شود و در چهارچوب دیگر تکیونی دیگر؛ (۲) چرا تغییر چهارچوب‌ها موجب تغییر ویژگی تکیون‌ها می‌شود. بنابراین مدل تکیونی تقویت‌شده هنوز، و تا وقتی که در مورد ماهیت تکیون‌ها فهم درستی پیدا نکنیم، از جهت فیزیکی کامل نیست.

نکته دیگر این است که برای تبیین مسئله ناموضعییت کوانتومی مجبور شدیم بی‌نهایت تکیون جعل کنیم. چنین فرضی از جهت متافیزیکی به‌صرفه نیست، به‌خصوص فرض وجود بی‌نهایت تکیون هنوز نه به‌کار تبیین سایر پدیده‌ها می‌آید و نه پیش‌بینی بدیعی فراهم می‌کند. در واقع فرض تکیون‌ها تا این‌جا کار به این معناست که محیطی مثل اتر داریم که تأثیرات فوق‌نوری از طریق آن انجام می‌شود. این‌که این محیط اترگونه چه ویژگی‌هایی دارد و چگونه می‌توان آن را کشف و آشکار کرد مشخص نیست. مشکل ناموضعییت با فرض وجود چیزهایی که باعث این تأثیرات ناموضعی می‌شود حل شده است و در مورد این چیزها هم حرفی نزنیم. با این راه‌حل اساساً مسئله حل نشده است، بلکه آن را با یک مسئله عجیب و غریب‌تر جانشین کرده‌ایم. می‌توان از تبیین‌هایی تا این حد مرموز بهره‌گرفت، بدون آن‌که نیازی باشد پای ابرتکیونی را به‌میان بیاوریم. مثلاً می‌توان گفت تابع موج ذرات درهم‌تنیده اساساً جدایی‌ناپذیر است و به همین سبب است که دو ذره درهم‌تنیده هرچقدر هم که از هم دور شوند در هم تأثیر دارند. یگانه تفاوت در این است که در تبیین تکیونی ما از ذراتی حرف می‌زنیم که این تأثیرات را منتقل می‌کنند. این ذرات مسیر حرکت مشخصی دارند و این نقطه قوت آن‌هاست، اما وقتی این نقطه قوت یک ابرتکیونی مرموز و ناشناخته، درست مثل اتر، باشد ما فقط یک ارتباط مرموز را با یک ابرتکیونی مرموز که همه جهان در آن شناور است تبیین کرده‌ایم.

البته این همه ماجرا نیست. درست است که مدل تکیونی تقویت‌شده یک مدل متافیزیکی ابتدایی است و هنوز از جهت فیزیکی مدل کاملی نیست، اما نکته مثبت در مورد

آن این است که یک برنامه پژوهشی پیش‌روی فیزیک‌دانان قرار می‌دهد. می‌دانیم مدل فیزیکی مطرح‌شده هرچه باشد باید ارتباط میان همه ذرات جهان را بپذیرد و تغییر ویژگی‌ها نسبت به چهارچوب در آن گنجانده شود. با این توضیحات مدل تکیونی «هنوز» کامل نیست و بنابراین موفق نشده است پدیده ناموضعی کوانتومی را تبیین کند.

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله با طرح مشکلات مدل تکیونی مادلین آن را در چند مرحله تقویت کردیم. نشان دادیم که مدل تقویت‌شده تبیینی، هرچند هنوز ناکامل، از ناموضعی کوانتومی ارائه می‌دهد. مدل اشیا و انواع طبیعی متعددی را جعل می‌کند، ویژگی‌های فیزیکی و نیز جهت حرکت تکیون‌ها را به چهارچوب وابسته می‌کند و ارتباط تنگاتنگ ذرات جهان با هم را الزام می‌آورد. به‌علاوه در این مدل در هر چهارچوبی یکی از تکیون‌ها ارتباط جفت ذره درهم‌تنیده را برقرار می‌کند، ولی برای حفظ سازگاری مجبوریم فرض کنیم مجموع تکیون‌ها با هم مسئول برقراری ارتباط‌اند. به‌رحال باین که مدل تکیونی تقویت‌شده هنوز ناکامل و تبصره‌ای است و تبیین خوبی از پدیده ناموضعی کوانتومی نیست، اما داشتن یک برنامه پژوهشی می‌تواند نقطه قوت آن باشد.

پی‌نوشت

۱. در واقع به دلیل اصل بازتعبیر باید آن را این‌چنین خواند: تا قبل از نقطه a بی‌نهایت تکیون با انرژی مثبت (T'_1, T'_2, T'_3) و مانند آن از سوی e_L به سمت محل اندازه‌گیری e_R گسیل می‌شوند.

کتاب‌نامه

- Aspect, A., J. Dalibard and G. Roger (1982), "Experimental Tests of Bell's Inequalities Using Time-varying Analyzers", *Physical Review Letters*, vol. 49.
- Basano, L. (1980), "Farewell to tachyons?", *Foundations of Physics*, vol. 10, no. 11-12.
- Bell, J. S. (1987), *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Chodos, Alan and I. Hauser Avi (1985), "The Neutrino as a Tachyon", *Physics Letters*, vol. 150B, no. 6.
- Feinberg, G. (1967), "Possibility of Faster-than-Light Particles", *Physical Review*, vol. 159.

Girard, Réjean and Marchildon, Louis (1984), "Are tachyon causal paradoxes solved?", *Foundations of Physics*, vol. 14, no. 6.

Lakatos, Imre (1978), *The Methodology of Scientific Research Programmes*, Cambridge University Press.

Maudlin, Tim, (2011), *Quantum Non-Locality and Relativity, Metaphysical Intimations of Modern Physics*, Blackwell.

Recami, Erasmo (1978), "How to recover causality in special relativity for tachyons", *Foundations of Physics*, vol. 8, no. 5-6.

Ricardo S. Vieira (2012), "An Introduction to the Theory of Tachyons", available at: <https://arxiv.org/abs/1112.4187>.

Shimony, Abner (2013), "Bell's Theorem", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2013 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = <http://plato.stanford.edu/archives/win2013/entries/bell-theorem/>.

