

ثابت 'سرعت نور'



'سرعت نور' را نمی‌توان به‌خاطر حرکت سریع آن با یک عکس سنتی ثبت کرد. اما، دانشمندان توانسته‌اند با استفاده از دوربین‌هایی با نرخ تریلیون فریم در ثانیه، تصاویر متوالی‌ای خلق کنند که فوتون‌ها (ذرات نور) را در حال حرکت نشان می‌دهند. تصویر بالا یک تصویری هنری است.^۱

The 'speed of light' constant

نظریه نسبیت، فضا و زمان را به یک ساختار یکپارچه و پیوسته به نام فضا-زمان پیوند می‌زند. ساختاری که در آن سرعت نور به‌عنوان یک ثابت بنیادین جهان‌شمول عمل می‌کند. این ثابت نه تنها در ساختار هندسه کیهان نقش دارد، بلکه تعیین کننده حداکثر سرعت مجاز برای علت و معلول و ضریب تبدیل جرم و انرژی به یکدیگر است.

فشرده

سرعت نور یکی از ۴ ثابت بنیادین فیزیک، جنب ثابت گرانش، ثابت بولتزمن و ثابت پلانک است. ثابت‌های چهارگانه‌ای^۲ که بنیان فیزیک و جهان‌بینی فیزیکی ما را تشکیل می‌دهند.

اصطلاح 'سرعت نور' انتخاب نامناسب و محدودی است، زیرا از اهمیت بنیادین این ثابت برای سایر حوزه‌ها می‌کاهد و بر خلاف نامش تنها به نور محدود نمی‌شود. چراکه هر موج یا ذره دیگری هم که مانند ذرات نور (فوتون‌ها) بدون جرم باشد با همین سرعت انتشار می‌یابد، از جمله امواج گرانشی. سرعت مربوطه فقط یکی از ویژگی‌های این ثابت است.^۳

ثابت سرعت نور به‌عنوان یک اصل در نظریه نسبیت می‌گوید: قوانین فیزیک در تمام دستگاه‌های مرجع لخت^۴ (با سرعت ثابت و یکنواخت) شکل یکسان دارند. یعنی، در این موارد قوانین فیزیک تابع سرعت ثابت دستگاه مرجع نیستند. به عبارت دیگر، هیچ چارچوب 'مرجع مطلق' در کیهان وجود ندارد که بتوان آن را 'ثابت مطلق' دانست.

سرعت نور یک سرعت متداول نیست. چراکه در سرعت‌های رایج می‌توان اندازه‌ی آنها را با هم جمع یا تفریق کرد. اما، در مورد سرعت نور چنان امکانی وجود ندارد. به این دلیل که سرعت نور در خلاء به‌عنوان یک ثابت بنیادین مستقل از منبع نور و سرعت سنجشگر^۴ است. سرعت نور بالاترین سرعت برای انتقال اطلاعات در کیهان قابل مشاهده می‌باشد.^۵

فوتون‌ها به‌خاطر عاری بودن از جرم ساکن، ذراتی سیار محسوب نمی‌شوند. در واقع، آنچه انتشار می‌یابد، نه ذرات فوتون بلکه امواج الکترومغناطیسی است. از دیدگاه ذره فوتون، فاصله‌ای در زمان طی نمی‌شود. در نتیجه، مفهوم کلاسیک فاصله در واحد زمان برای فوتون به‌طور کامل فرومی‌پاشد.^۳ در یک چنین حالتی لازم است به این پرسش‌ها پاسخ داده شود: فوتون چیست، چگونه شکل می‌گیرد و با چه روش‌هایی می‌توان آن را تولید کرد؟

فوتون یک ذره بنیادین، یک انرژی کوانتوم، است. این ذره بدون ساختار داخلی، بدون جرم ساکن، غیرسیار و غیرقابل تقسیم به اجزاء دیگر است. این ویژگی‌ها چه اسراری را از جهان هستی فاش می‌کنند؟

گاهی، صحبت از 'فوق‌سرعت نور' است. آیا چنین چیزی صحت دارد؟ به‌ویژه، وقتی که می‌دانیم حداکثر سرعت کنش و واکنش‌ها در کیهان، کمیتی ثابت و برابر با سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی، حدود سیصد هزار کیلومتر در ثانیه، است. از این‌رو، آیا می‌توان چیزی به نام 'فوق‌سرعت نور' را پذیرا بود؟ پاسخ به‌غیر چنین باشد: شاید برای کیهان به‌عنوان یک سیستم یکتا و فضا‌های میان کهکشانی‌های دور در آن.

در این مقاله می‌خواهیم، پس از بیان تاریخچه ثابت 'سرعت نور'، کارکردهای آن را در زمینه‌های مختلف توضیح دهیم و در ادامه به ویژگی‌ها، روش‌های تولید فوتون، چستی ذره فوتون و چگونگی شکل‌گیری آن بپردازیم.

تاریخچه ثابت 'سرعت نور'.

انتخاب نام 'سرعت نور' برای یک ثابت بنیادین فیزیکی، نتیجه مشاهده‌ی نخستین بار آن در تاریخ این علم در حرکت نور بود. سرعت حرکت نور از دیرباز در فلسفه طبیعی مطرح بوده است. به عنوان مثال، ارسطو نزدیک به ۲۴۰۰ سال پیش سرعت نور را نامحدود، ابوعلی سینا و ابوعلی هیثم حدود ۱۰۰۰ سال پیش سرعت نور را محدود، دکارت نزدیک به ۴۰۰ سال پیش آن را نامحدود و آیزاک نیوتن و کریستیان هویگنس حدود ۳۰۰ سال پیش سرعت نور را محدود می‌دانستند.

در واقع، تا نیمه دوم قرن نوزدهم، اندازه سرعت نور، محدود، نامحدود و یا ثابت بود آن روشن نبود. در این زمان، مایکل فارادی، شیمی‌دان و فیزیکدان تجربی بریتانیایی (۱۷۹۱-۱۸۶۷)، اصول الکترومغناطیس و مفهوم خطوط نیرو را کشف کرد و جیمز کلارک ماکسول، فیزیکدان نظری اهل اسکاتلند (۱۸۳۱-۱۸۷۹)، اصول و ایده‌های فارادی را در معادلات مشهور به معادلات ماکسول فرمول‌بندی کرد و نشان داد که نور یک موج الکترومغناطیسی است. امواج الکترومغناطیسی متشکل از میدان‌های الکتریکی (با ثابت ϵ_0) و میدان‌های مغناطیسی (با ثابت μ_0) عمود بر هم و این دو عمود بر جهت انتشار. سرعت نور c در خلاء از رابطه $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ بدست می‌آید. فوتون‌ها و اطلاعات با سرعت نور انتقال می‌یابند.

به این ترتیب، پس از آیزاک نیوتن که با کشف قانون گرانش (جاذبه) اولین قدم را برای وحدت دو بخش مهم فیزیک، یعنی وحدت آسمان و زمین برداشت، جیمز کلارک ماکسول با یکپارچه‌سازی الکتریسیته و مغناطیس قدم دوم را برای وحدت این دو بخش بسیار وسیع و پُر کاربرد در علم و صنعت برداشت.

ماکسول، سرعت امواج الکترومغناطیسی (نور) را با یاری معادلات خود و در رابطه با ثابت‌های الکتریکی و مغناطیسی در خلاء برای امواج صفحه‌ای و کروی محاسبه کرد و به سرعت 310740 کیلومتر در ثانیه، یعنی اندکی بیش از سرعت نور در خلاء 299792458 کیلومتر در ثانیه، رسید.

ثابت سرعت نور مسئله‌ای بود که از اوایل قرن هفدهم با آزمایش گالیله، حدود سال ۱۶۲۰، وارد مرحله تجربی شد. گالیله توانست در چارچوب امکانات آن زمان برای اولین بار، با اندازه‌گیری "طول تاخیر زمان" در مشاهده‌ی نور فانوس‌هایی که با دست پوشانده می‌شدند سرعت نور را چندین کیلومتر در ثانیه محاسبه کند. حدود نیم قرن بعد اوله رُومر، اخترشناس دانمارکی (۱۶۴۴-۱۷۱۰) با استفاده از داده‌های نجومی سرعت نور را برابر با 213000 کیلومتر در ثانیه محاسبه کرد. محاسبه و اندازه‌گیری سرعت نور در طول قرن‌های پس آن همچنان ادامه یافت تا این‌که در سال ۱۹۸۳ 'اداره بین المللی وزن‌ها و مقیاس‌ها (BIPM)' سرعت نور در خلاء را دقیقاً 299792458 متر در ثانیه تعریف کرد.

آلبرت آبراهام مایکلسون، فیزیکدان آمریکایی (۱۸۵۲-۱۹۳۱) و ادوارد مورلی، فیزیکدان آمریکایی (۱۸۳۸-۱۹۲۳) در آزمایش مشهور خود از سال ۱۸۸۷ نشان دادند که سرعت نور در همه جهات یکسان است. در عین حال، این آزمایش شاهدهی قوی برای رد نظریه‌ی اتر بود. نظریه اتر، وجود اتر را برای انتشار نور ضروری می‌دانست (برای مثال مانند لزوم هوا برای انتشار صوت). افزون بر این، آزمایش مزبور راه را برای بنا و پذیرش نظریه نسبیت خاص هموار کرد.

تبدیل مختصات فضا و زمان یک رویداد بین دو چارچوب مرجع لخت که با سرعت ثابت و یکنواخت نسبت به یکدیگر حرکت می‌کنند، یعنی تبدیل کلاسیک گالیله، در سرعت‌های بالا نزدیک به سرعت نور کارایی خود را از دست می‌دهد. برای این حالت‌ها لازم است تبدیل گالیله با تبدیل نسبیتی لورنتس، فیزیکدان هلندی (۱۸۵۳-۱۹۲۸)، جایگزین شود تا سرعت نور برای همه ناظران یکسان باقی بماند. در واقع، تبدیل لورنتس مختصات فضا و زمان یک رویداد را از دید دو ناظر مختلف به هم تبدیل می‌کند. این تبدیل هسته‌ی اصلی نظریه نسبیت خاص است. تبدیل لورنتس، ثابت سرعت نور را به عنوان یک اصل (اصل نسبیت) مدنظر دارد که هرگز نمی‌توان از مقدار آن فراتر رفت.

سرعت نور در محیط‌های مادی به دلیل برهم‌کنش فوتون‌ها با اتم‌های محیط، کوچکتر از سرعت نور در خلاء است. به عنوان مثال، سرعت نور در آب حدود 225000 کیلومتر در ثانیه، در الماس تا 124000 کیلومتر در ثانیه و در آهن حدود 5 کیلومتر در ثانیه است.^۳

کارکردهای ثابت 'سرعت نور'

به طور کلی ثابت سرعت نور در سه حوزه: ۱. فضا-زمان (ساختار کیهان)، ۲. تبادل اطلاعات و ۳. تبدیل جرم و انرژی به یکدیگر، نقش تعیین کننده دارد. در زیر در باره‌ی هر یک از این سه حوزه توضیحاتی ارائه می‌شود، بی‌آن‌که وارد بحث نظریه نسبیت خاص، نظریه نسبیت عام و نتایج حاصل از این دو نظریه، مانند گسترش (اتساع) زمان، فشردگی (انقباض) طول (از دید ناظر ساکن) در سرعت‌های بالا و شرایط فیزیکی اطراف و درون سیاهچاله‌ها شویم.

۱. ثابت سرعت نور و فضا - زمان

پیوند فضا و زمان: هرمان مینکوفسکی، ریاضیدان روسی - آلمانی (۱۸۶۴-۱۹۰۹)، حدود سال ۱۹۰۷ دریافت که کارهای لورنتس (۱۹۰۴) و اینشتین (۱۹۰۵) در باره‌ی نظریه‌ی نسبیت خاص را می‌توان در چارچوب یک فضای ناقلیدسی بیان کرد. به این معنا که فضا و زمان را یک پیوستار چهاربُعدی از فضا-زمان دانست. مینکوفسکی در سخنرانی خود در ۲۱ سپتامبر ۱۹۰۸ در هشتمین گردهمایی دانشمندان علوم طبیعی. و پِژشکان آلمان می‌گوید:

"دیدگاه‌هایی که درباره‌ی فضا و زمان می‌خواهم برای شما مطرح کنم، ریشه در فیزیک تجربی دارند. در این‌جاست که قدرت آن‌ها نهفته است. آن‌ها نمایانگر رویکردی رادیکال هستند. از این پس، فضا به خودی خود و زمان به خودی خود باید کاملن در پس‌زمینه محو شوند و تنها نوعی اتحاد میان این دو است که استقلال خود را حفظ خواهد کرد."^۶

خمیدگی فضا-زمان: در سال ۱۹۱۵ اینشتین با ایجاد رابطه بین هندسه‌ی فضا-زمان و ماده (انرژی - تکانه) در معادلات معروف نظریه نسبیت عام، خمیدگی (انحنای) فضا-زمان بر اثر ماده را نشان داد. معادلاتی که در آنها سرعت نور به‌عنوان یک ثابت بنیادی حضور دارد.

خمیدگی و گرانش: خمیدگی فضا-زمان بر اثر احرام پُر جرم، مانند سیاره‌ها یا ستاره‌ها، در نظریه‌ی نسبیت عام مترادف با گرانش تعریف می‌شود. در این نظریه، اجسام در مسیرهای فضا-زمان خمیده شده توسط چنان اجرامی حرکت می‌کنند. برای مثال، نور در حین گذر از کنار خورشید، مسیر خمیده شده‌ای را طی می‌کند که خورشید در فضای اطراف خود ایجاد کرده است. به عبارت دیگر، گرانش یک نیروی کششی (جاذبه) آن‌گونه که آیزاک نیوتن تصور می‌کرد نیست. البته، ناگفته نماند که جاذبه بین اجرام بدون هیچ واسطه‌ای برای خود نیوتن پرسش‌برانگیز بود. اما، او پاسخی برایش نداشت.

۲. ثابت سرعت نور و تبادل اطلاعات

امواج الکترومغناطیسی (از جمله نور) انرژی و اطلاعات را در فضا-زمان با حداکثر سرعت که همانا سرعت نور است منتشر می‌کنند. به عبارت دیگر، هیچ سیگنالی نمی‌تواند سریع‌تر از سرعت نور باشد (اصل نسبیت^۳). این حالت توصیف اساس نظریه نسبیت خاص اینشتین است. به این ترتیب، ثابت سرعت نور حداکثر سرعت مجاز برای علت و معلول را نیز تعیین می‌کند. یعنی، حداکثر سرعت تبادل اطلاعات برای روابط علی^۴ سرعت نور است.

۳. ثابت 'سرعت نور' و تبدیل جرم و انرژی به یکدیگر

نظریه نسبیت خاص و آزمایش‌های فیزیک هسته‌ای و ذرات بنیادی نشان دادند که انرژی و جرم قابل تبدیل به هم هستند.^۹ رابطه‌ی میان این دو کمیت را اینشتین در فرمول معروف $E = mc^2$ سال ۱۹۰۵ در مقاله‌ی 'آیا اینرسی یک جسم به انرژی درونش بستگی دارد؟'^{۱۰} ارایه کرد (E انرژی، m جرم و c سرعت نور). یعنی، اینشتین نشان داد که جرم و انرژی دو جلوه از یک پدیده، به اصطلاح دو روی یک سکه، هستند. بنابراین فرمول و به‌خاطر اندازه بزرگ سرعت نور جرم‌های بسیار کوچک نیز دارای مقدار زیادی انرژی هستند. برای مثال، یک گرم آهن معادل حدود 9×10^{13} ژول انرژی است و یا یک گرم اورانیوم ۲۳۵ حدود ۸۲ میلیون کیلوژول انرژی گرمایی آزاد می‌کند. این مقدار انرژی گرمایی معادل گرمایشی حدود یک میلیون لیتر نفت خام است.

حال در اینجا این پرسش مطرح است که هم‌ارزی جرم و انرژی حاصل از چیست؟ این سوال بسیار مهمی است و اینشتین پاسخ به آن را در سال ۱۹۰۵ در مقاله ذکر شده ارایه نمود. او در این مقاله نشان می‌دهد که هم‌ارزی جرم و انرژی یک اصل کلی و حاصل از تقارن^{۱۱} فضا و زمان است.^۹

ویژگی‌ها و روش‌های تولید فوتون

بیش از پرداختن به چیستی و چگونگی شکل‌گیری فوتون نگاهی داریم به ویژگی‌های بنیادین و روش‌های تولید این ذره.

ویژگی‌های فوتون

ذره فوتون، کوانتوم میدان الکترومغناطیسی (مرئی و نامرئی) یا یک بسته غیرقابل تقسیم بنیادی از انرژی است که اندازه آن به بسامد میدان بستگی دارد. فوتون، یک ذره بوزونی با اسپین ۱، بدون جرم سکون و بدون بار الکتریکی است. در واقع، ذره فوتون کوچک‌ترین واحد نور و سایر اشکال امواج الکترومغناطیسی است. ذره فوتون، در اندازه‌گیری‌ها ویژگی دوگانه از خود نشان می‌دهد، یعنی هم به‌شکل ذره و هم به شکل موج ظاهر می‌شود. این‌که کدام یک از این ویژگی‌ها دیده شود بستگی به نوع آزمایش دارد. برای مثال، فوتون در آزمایش هویگنس (تداخل امواج) خصلت موجی و در آزمایش فوتوالکتریک (برخورد مکانیکی) خصلت ذره‌ای از خود نشان می‌دهد.

فوتون، در فیزیک کوانتومی به عنوان یک ذره بوزون پیمانه‌ای یا واسطه نیروی الکترومغناطیسی بین ذرات باردار شناخته می‌شود. یعنی، ذره‌ای است که کنش و واکنش‌های میان ذرات الکتریکی را امکان‌پذیر می‌کند.

روش‌های تولید فوتون

فوتون را می‌توان با روش‌های فیزیکی مختلف تولید کرد. رایج‌ترین این روش‌ها عبارتند از: ۱. گذار الکترونی در اتم‌ها، ۲. فرایند هسته‌ای، ۳. بار الکتریکی شتاب‌یافته (تسریع‌شده)، ۴. نابودی ماده و پادماده^{۱۱} و ۵. تابش گرمایی. در زیر کوتاه به هر یک از این روش‌ها می‌پردازیم.

۱. گذار الکترونی در اتم‌ها: یک الکترون در یک اتم توسط انرژی الکتریکی از یک سطح انرژی به یک سطح انرژی بالاتر برانگیخته می‌شود. این الکترون پس از زمان کوتاهی به سطح انرژی پائین‌تر خود بازمی‌گردد. در بازگشت، اختلاف انرژی میان دو سطح مزبور به صورت یک فوتون (انرژی کوانتوم) انتشار می‌یابد.

۲. فرایند هسته‌ای: در فرایند هسته‌ای، مانند واپاشی گاما، فوتون‌هایی با انرژی بسیار بالاتر از حالت گذار الکترونی تولید می‌شوند. یعنی، در اینجا نیز وقتی هسته‌ای اتم از یک حالت کمتر پایدار (برانگیخته) به یک حالت پایدارتر دست می‌یابد، فوتون تولید می‌شود.

۳. بار الکتریکی شتاب‌یافته: هر بار الکتریکی شتاب‌یافته در یک میدان الکتریکی، امواج الکترومغناطیسی منتشر می‌کند. این امواج می‌تواند به شکل‌گیری فوتون منجر شود. توجه داریم که الکترون‌های اتم به‌خاطر چرخش دور هسته اتم دارای شتاب هستند، اما تابش نمی‌کنند. چرا که آن‌ها بر اساس قوانین مکانیک کوانتومی در سطوح مختلف انرژی ثابت قرار دارند.

۴. نابودی ماده و پادماده^{۱۱}: وقتی یک ذره مانند الکترون با پادماده خود، یعنی پوزیترون برخورد می‌کند، هر دو جرم خود را از دست می‌دهند و به فوتون (انرژی) تبدیل می‌شوند.

۵. تابش گرمایی: اجسام همواره دارای دمایی بالاتر از صفر مطلق هستند. به همین دلیل آن‌ها توان انتشار فوتون را دارند. برای مثال، بدن انسان از خود فوتون‌هایی را، بیشتر در طیف مادون قرمز، منتشر می‌کند.

چیستی و شکل‌گیری فوتون

فوتون، کوانتوم میدان الکترومغناطیسی، بسته بنیادی غیرقابل تقسیم از انرژی است. فوتون یک ذره بوزونی با اسپین ۱، بدون جرم سکون و بدون بار الکتریکی است. این ذره در آزمایش دوشکاف ویزگی دوگانه موج-ذره از خود نشان می‌دهد. توصیف چیستی و شکل‌گیری ذره فوتون نیازمند شناخت از میدان الکترومغناطیسی و برانگیختگی این میدان است. در زیر پس از توصیف کوتاه میدان الکترومغناطیسی، برانگیختگی این میدان و شکل‌گیری فوتون را توضیح می‌دهیم.

میدان الکترومغناطیسی

ذرات باردار الکتریکی، مانند الکترون‌ها و پروتون‌ها، در حالت سکون در فضای اطراف خود یک میدان الکتریکی ایجاد می‌کنند. این میدان به عنوان یک واسطه و انتقال دهنده نیروی الکتروستاتیک بین بارهای الکتریکی عمل می‌کند. جهت خطوط این میدان از بارهای الکتریکی مثبت (به سمت بیرون) به سمت بارهای الکتریکی منفی است. ذرات الکتریکی هم‌نام یکدیگر را دفع و ناهم‌نام یکدیگر را جذب می‌کنند. دفع یا جذب ذرات باردار الکتریکی نتیجه نیروی الکترواستاتیک (نیروی کولن) میان آن‌ها است.

منشاء میدان‌های الکترومغناطیسی، ذرات باردار الکتریکی شتابدار هستند. میدان الکترومغناطیسی ترکیبی از دو میدان، یعنی میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی است. انتشار امواج الکترومغناطیسی (تابش) حاصل تغییر همزمان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی است. در امواج الکترومغناطیسی (مانند نور)، بُردار میدان الکتریکی و بُردار میدان مغناطیسی در هر نقطه از فضا و در هر لحظه بر یکدیگر عمود هستند و این هر دو نیز بر جهت انتشار موج.

برانگیختگی میدان و شکل‌گیری فوتون

نظریه کلاسیک، میدان الکترومغناطیسی را امواجی پیوسته تصور می‌کند. این دیدگاه بر پایه معادلات ماکسول استوار است. اما، این نظریه نمی‌تواند برخی از پدیده‌های تجربی، مانند گسسته (کوانتیده) بودن انرژی در 'تابش جسم سیاه' (ماکس پلانک ۱۹۰۰) و یا ویژگی ذره‌ای فوتون در 'اثرفوتوالکتریک' (آلبرت اینشتین ۱۹۰۵) را توجیه کند. در مقابل، نظریه

جدید، یعنی میدان‌های کوانتومی توان توضیح این نوع پدیده‌ها را دارند. نظریه جدید، میدان الکترومغناطیسی را نه سیستمی پیوسته بلکه گسسته، کوانتیزه شده، می‌داند. در واقع، نظریه کوانتومی نه فقط میدان الکترومغناطیسی بلکه کل واقعیت‌های جهان فیزیکی را در ریزترین اندازه‌ها به‌صورت بسته‌های کوچک از انرژی‌ها (و روابط) ارزیابی می‌کند. از این‌رو، میدان الکترومغناطیسی در نظریه جدید دیگر فقط یک موج نیست، بلکه می‌تواند برانگیخته و به‌صورت بسته‌های انرژی پدیدار شود. این بسته‌های گسسته، همان کوانتوم‌های الکترومغناطیسی، فوتون‌ها، از جمله فوتون‌های نور هستند.

خلاء کوانتومی، پائین‌ترین حالت انرژی (حالت پایه) در نظریه میدان‌های کوانتومی است. البته، این خلاء به‌معنای یک فضای خالی نیست، بلکه آکنده از ذرات و پادذرات مجازی است که برای کسری از ثانیه ظاهر و بی‌درنگ هم‌دیگر را خنثی (نابود) می‌کنند. انرژی خلاء کوانتومی بنابر اصل عدم قطعیت همواره در نوسان است.

ذره فوتون کوچکترین واحد انرژی، حالت برانگیختگی میدان الکترومغناطیسی، یک ذره کوانتومی است. انرژی هر فوتون نسبت مستقیم با بسامد (فرکانس) آن دارد ($E = hf$ ؛ انرژی، h ثابت پلانک و f بسامد). معادله $E = pc$ رابطه بین انرژی E ، تکانه p و سرعت نور c را برای فوتون (به‌طور کلی برای ذرات بدون جرم) توصیف می‌کند.

اثرفوتوالکتریک به‌خوبی درستی این معادلات را نشان داد. یعنی، روشن شده است که امواج الکترومغناطیسی در برهم‌کنش با ماده شبیه ذرات تکان‌دار و در برهم‌نهی شبیه امواج رفتار می‌کنند. ویژگی دوگانه‌ی که خود را در شکل ذره و موج نشان می‌دهد. به‌طور خلاصه: فوتون یک برانگیختگی یا ارتعاش کوانتومی میدان الکترومغناطیسی است.

مراجع

1. <https://www.istockphoto.com/de/vektor/kurvenlichteffekt-der-blauen-linie-gm2149307532-570542341?searchscope=image%2Cfilm>
2. Hassan Bolouri, The natural constants and epistemology
۲. حسن بلوری، 'ثابت‌های طبیعی و شناخت‌شناسی'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه فوریه سال ۲۰۲۱
3. <https://de.wikipedia.org/wiki/Lichtgeschwindigkeit>
4. Hassan Bolouri, The Concept of Space
۴. حسن بلوری، 'مفهوم فضا'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه جولای سال ۲۰۲۰
5. Hassan Bolouri, The concept of matter in Philosophy and Science
۵. حسن بلوری، 'مفهوم ماده در فلسفه و علم'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه می سال ۲۰۲۰
6. https://de.wikipedia.org/wiki/Hermann_Minkowski
7. Hassan Bolouri, Causal Asymmetry
۷. حسن بلوری، معلول و علت، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه می سال ۲۰۱۹
8. Hassan Bolouri, Principle of Causality?
۸. حسن بلوری، اصل علیت، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه ژانویه سال ۲۰۲۰
9. Hassan Bolouri, The big problems of the universe: The origin and the essence of energy
۹. حسن بلوری، 'مسائل بزرگ جهان هستی، منشاء و چیستی انرژی'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه جولای سال ۱۰۲۴
10. Albert Einstein, **Symmetry**: the key to recognizing the cosmos
۱۰. حسن بلوری، 'تقارن: کلید شناخت کیهان'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه مارچ سال ۲۰۲۰
- ?11. Hassan Bolouri, why is there something rather than nothing
۱۱. حسن بلوری، 'چرا به‌جای هیچ، چیزی وجود دارد؟ ماده و پادماده'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه آوریل سال ۲۰۲۰
12. Hassan Bolouri, Vacuum and its structure – a discussion about “Nothing”
۱۱. حسن بلوری، 'خلاء کوانتومی، بحثی در باره هیچ'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه آوریل سال ۲۰۲۳