

The Feynman Lectures on Physics, Vol. 1, Ch. 28

درسنامه‌های فیزیک فاینمن، جلد ۱، فصل ۲۸

مترجم: محمدرضا نصیرزاده

ویراستار: علی قبله

حروفچین: سمیه جعفری، نگین باقری نقره‌ای

نسخه‌ی ۱.۱ پاییز ۱۳۹۹

حلقه‌ی مترجمان ژرفا

این اثر با کسب مجوز از ناشر بین‌المللی به منظور انتشار رایگان نسخه‌ی الکترونیکی آن تهیه شده است و حق نشر آن برای انجمن علمی ژرفا مستقر در دانشگاه صنعتی شریف محفوظ می‌باشد. ایرادات این نسخه را با ما در میان بگذارید و در پیشبرد این پروژه‌ی عام‌المنفعه مشارکت کنید. برای دریافت ترجمه‌ی دیگر فصل‌های این کتاب به وبسایت ژرفا مراجعه کنید.

این صفحه از قصد خالی گذاشته شده است.

فصل ۲۸

تابش الکترومغناطیسی^۱

۱.۲۸ الکترومغناطیس

شگفت‌انگیزترین لحظات در پیشرفت علم فیزیک آن‌هایی بودند که در یک ترکیب عظیم دست داشتند. جایی که در گذشته پدیده‌ها متفاوت از یکدیگر به نظر می‌رسیدند و ناگهان به عنوان جنبه‌های متفاوت یک حقیقت کشف می‌شدند. تاریخ علم فیزیک مملو از چنین ترکیب‌هایی است و موفقیت در علوم فیزیکی عمدتاً در توانایی انجام چنین ترکیب‌هایی است.

شاید شگفت‌انگیزترین لحظه در پیشرفت فیزیک در طول قرن ۱۹ به دست جیمز کلارک ماکسول در یکی از روزهای سال ۱۸۶۰ اتفاق افتاده باشد، زمانی که او قوانین الکتریسیته و مغناطیس را همراه با قوانین چگونگی رفتار نور ترکیب کرد. در نتیجه آن قسمتی از مشخصات نور هویدا شد. — آن چیز قدیمی و نامحسوس به اندازه‌ای مهم و رمزآلود بود که ضرورت ایجاد یک خلقت دیگر برای آن، وقتی که متن پیدایش نوشته می‌شد، احساس می‌شد. زمانی که کشف ماکسول کامل شد او می‌توانست بگوید: «بگذارید الکتریسیته باشد و مغناطیس و سپس نور است.»

برای به دست آمدن چنین لحظه پرشکوهی، مدت زمان زیادی شامل کشف تدریجی و آشکار کردن قوانین الکتریسیته و مغناطیس، صرف شده است. این داستانیست که ما باید برای خواندن جزئیات آن در سال دیگر به یاد آوریم. گرچه این داستان خلاصه چیزی است که در ادامه می‌آید. کشف تدریجی مشخصات الکتریسیته و مغناطیس، نیروهای جاذبه و دافعه الکتریکی و نیروهای مغناطیسی نشان داد گرچه این نیروها تقریباً پیچیده هستند ولی همه آن‌ها متناسب با معکوس مربع فاصله می‌باشند. به عنوان مثال ما می‌دانیم قانون ساده کولنی برای بارهای ایستا این است که میدان نیروهای الکتریکی به طور معکوس با مربع فاصله تغییر می‌کند. به عنوان نتیجه برای مقادیر بزرگ فاصله، مقدار تأثیر

¹electromagnetic radiation

یک بار بر دیگر بسیار ناچیز است. ماکسول خاطر نشان کرد که معادلات یا قوانینی که تاکنون کشف شده‌اند، زمانی که سعی در کنار هم قرار دادن آن‌ها داشت، متقابلاً با یکدیگر سازگار نبودند؛ و از آنجا که تمام سیستم می‌بایست ثابت باقی بماند او باید یک بخش دیگر را به معادله خود اضافه می‌کرد. به همراه این بخش جدید، یک پیش‌بینی شگفت‌انگیز پدید آمد که بیان می‌کرد قسمتی از میدان الکتریکی و مغناطیسی با شدت خیلی کمتری نسبت به معکوس مربع کاهش پیدا می‌کرد که به عنوان قانون توانی فاصله از آن یاد می‌شود. در ادامه او متوجه شد که جریان الکتریکی در یک مکان می‌تواند بر بارهای دیگر در فاصله‌های دور اثر بگذارد و همینطور اصول اولیه‌ی این اثرات را که ما امروزه با آن آشنا هستیم پیش‌بینی کرد؛ مانند: فرستنده‌های رادیویی، رادار و غیره.

به نظر معجزه می‌رسید که فردی در اروپا صرفاً با اثرات تداخل الکتریکی با فردی در هزاران مایلی در لس‌آنجلس صحبت کند، این طور نیست؟ و مهم‌تر اینکه این کار چگونه ممکن است؟ دلیلش این است که میدان‌ها با معکوس مربع تغییر نمی‌کنند بلکه این تغییر تنها با معکوس قانون توانی فاصله متناسب است. نهایتاً حتی خود نور نیز به عنوان تأثیراتی از الکترومغناطیس و مغناطیس شناخته شد که در فاصله‌های پهناور گسترش پیدا می‌کند و تقریباً ناشی از نوسانات الکترون‌های بسیار سریع، که در اتم هستند، می‌باشد. تمام این پدیده‌ها را ما در کلمه تابش یا به طور خاص تر تابش الکترومغناطیسی خلاصه کردیم. البته با وجود اینکه انواع دیگر تابش هم وجود دارد ما تقریباً همیشه تابش را تابش الکترومغناطیس در نظر می‌گیریم.

و با اینکه جهان ما به هم گره خورده است، حرکات اتمی ستارگان دوردست هنوز تأثیر کافی را در این فاصله عظیم برای قراردادن اتم‌ها در چشمان ما دارند و و به این دلیل است که ما در مورد ستارگان چیزهایی می‌دانیم. اگر این قانون وجود نداشت ما همه تماماً در مقابل دنیای بیرون در تاریکی مطلق قرار داشتیم در حالی که موج‌های الکتریکی در کهکشان به اندازه ۵ میلیارد سال نوری دور شده‌اند. که این فاصله دورترین شئی است که ما تاکنون پیدا کرده‌ایم. هنوز می‌توانند تأثیرات محسوس و قابل شناسایی روی قاب‌های بزرگ در مقابل رادیوتلسکوپ‌ها به جا بگذارند و اینگونه است که ما قادر به دیدن ستاره‌ها و کهکشان‌ها هستیم.

این پدیده قابل توجه همان چیزی است که ما می‌خواهیم در این بخش در مورد آن صحبت کنیم. در ابتدای این دوره درسی، تصویری از مرز جهان را مشخص کردیم ولی اکنون بهتر است خود را برای فهمیدن بعضی جنبه‌های آن آماده کنیم. ما در آینده به سراغ بعضی قسمت‌های گفته شده البته با جزئیات بیشتر بازخواهیم گشت. ما در ابتدا بحث را با توصیف جایگاه فیزیک در اواخر قرن ۱۹ شروع کردیم. تمام آنچه که در مورد قوانین پایه‌ای می‌توانست خلاصه شود در ادامه آمده است.

نخست سه قانون نیرو: یک: قانون گرانش است که بارها نوشته شده است. نیروی وارد بر جسم دارای جرم m از طرف جسم دیگری با جرم M به صورت زیر داده می‌شود:

$$F = GmMe_r/r^2, \quad (۱۰۲۸)$$

که bmE_r بردار واحدی است که جهت آن مستقیماً از طرف m به M می‌باشد و r فاصله‌ی بین آن‌ها است.

مورد بعدی برای بررسی قانون‌های الکتریسیته و مغناطیس است که در پایان قرن ۱۹ اینگونه به یاد داریم: نیروهای الکتریکی بر ذره باردار q می‌تواند با دو میدان bmE و bmB و سرعت bmV به وسیله این معادله توصیف شود:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (۲.۲۸)$$

برای تکمیل این قانون باید فرمول‌های مربوط به bmE و bmB را در شرایط داده شده بگوییم: اگر تعداد بارها معلوم باشد، bmE و bmB هرکدام جمع سهم‌های خود از بارهای جدا هستند؛ سپس اگر ما مقادیر bmE و bmB تولید شده از یک بار را پیدا کنیم، تنها نیاز داریم تمام اثرات ناشی از تمام بارهای جهان هستی را با هم جمع کنیم تا مقدار کلی bmE و bmB را به دست آوریم که نشان‌دهنده اصل برهم نهی است.

حال به این سؤال توجه کنیم که این فرمول‌های میدان مغناطیسی و الکتریکی برای یک بار تنها بیان‌کننده چه چیزی هستند؟ جواب این سؤال بسیار پیچیده است و نیاز به مطالعه فراوان دارد و همچنین درک کردن آن نیز نیاز به مهارت فراوان دارد. اما نکته اصلی این نیست. ما این فرمول را فقط به این دلیل می‌نویسیم که خواننده را تحت تأثیر زیبایی و شگفتی طبیعت قرار دهیم. چرا که می‌توان تمام مبانی دانش را در یک صفحه همراه با نمادهایی که آشنا هستند خلاصه کرد. این فرمول تا آنجا که ما می‌دانیم برای میدان‌هایی با بار منفرد کامل و دقیق است (به غیر از مبانی کوانتوم مکانیک). اما با این حال کمی پیچیده به نظر می‌رسد. به همین علت همه جوانب آن را اکنون بررسی نمی‌کنیم. فقط به نوشتن آن برای نشان دادن یک دید کلی بسنده می‌کنیم تا نشان دهیم که این فرمول قابل نوشتن است و همینطور از چیزی که در پیش‌رو داریم تا حدودی باخبر شویم. به عنوان یک حقیقت، مؤثرترین راه برای نوشتن درست قانون‌های الکتریکی و مغناطیسی این روشی نیست که اکنون با نوشتن آن در پیش گرفتیم. اما این فرمول شامل معادلات میدانی است که ما در سال آینده فراخواهیم گرفت. نمادهای ریاضی برای این معادله متفاوت و جدید هستند، بنابراین، این قانون را به شکل نامتعارف اما با نمادگذاری‌های شناخته‌شده می‌نویسیم. میدان الکتریکی bmE به این گونه داده شده است:

$$\mathbf{E} = \frac{-q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{\mathbf{e}_{r'}}{r'^2} + \frac{r'}{c} \frac{d}{dt} \left(\frac{\mathbf{e}_{r'}}{r'^2} \right) + \frac{1}{c^2} \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{e}_{r'} \right]. \quad (۳.۲۸)$$

این قسمت‌های مختلف به ما چه می‌گویند؟ اولین قسمت، $bmE = (-qe_{r'})/4\pi\epsilon_0 r'^2$ ، البته معلوم است قانون کولن می‌باشد که هم اکنون نیز آن را می‌دانیم. q باری است که میدان را تولید می‌کند، bmE_r بردار یکه‌ایست که جهت آن از نقطه P جایی که bmE اندازه‌گیری شده است و r' فاصله از P است تا q . اما قانون کولن اشتباه است. کشفیات قرن ۱۹ نشان داد که این تأثیرات نمی‌توانند

سریع‌تر از مقدار سرعت بنیادی c که اکنون سرعت نور نامیده می‌شود، حرکت کنند. قسمت اول یا همان قانون کولن نمی‌تواند درست باشد؛ نه به این دلیل که امکان تعیین مکان بار در زمان حال وجود ندارد و یا فاصله چقدر است، بلکه به این دلیل که تنها چیزی که می‌تواند بر میدان داده شده در مکان و زمان خاصی اثر بگذارد، رفتار بار در گذشته است. چه مدت زمان در گذشته؟ تأخیر زمانی یا زمان عقب‌افتاده، زمانی است که طول می‌کشد با سرعت نور از بار به نقطه میدان P برسد. مقدار تأخیر r/c است.

پس، برای نشان دادن این تأخیر زمانی ما یک پریم کوچک روی r قرار می‌دهیم، به این معنا که فاصله‌ای که اطلاعات از بار q اکنون به نقطه P رسیده است چقدر است. فقط برای یک لحظه تصور کنید که بار نور را به همراه خود حمل می‌کند و چون نور تنها با سرعت c می‌تواند به نقطه P برسد، ما نمی‌توانیم ببینیم اکنون کجا قرار دارد، ولی مکانی را که چند لحظه پیش در آن بوده را می‌دانیم. چیزی که در فرمول ما ظاهر می‌شود جهت معلوم \mathbf{bme}_r جهتی که (مورد استفاده قرار می‌گیرد) جهت عقب‌افتاده در فاصله عقب‌افتاده r که به قدر کافی برای فهمیدن آسان است ولی همچنان اشتباه هم هست. کل موضوع پیچیده‌تر از این چیزهاست.

اینجا چندین قسمت مختلف دیگر نیز درگیر هستند. قسمت بعدی معادله در حال تلاش برای اجازه دادن به این حقیقت است که اثرات عقب‌افتاده هستند که اگر ما آن را خیلی خام و ابتدایی قرار دهیم، پیشنهاد می‌شود که بهتر است تأخیر میدان کولنی را محاسبه کنیم و یک جزء تصحیح‌کننده به آن اضافه کنیم که این جزء میزان تغییرات برحسب زمانی است که ما از آن استفاده کردیم. (به نظر می‌رسد طبیعت در تلاش است تا حدس بزند میدان در حال حاضر چه مقداری قرار است داشته باشد. با در نظر گرفتن میزان تغییرات و ضرب در میزان زمان تأخیر) با این حال هنوز کار ما تمام نشده هنوز قسمت سومی (مشتق دومی نسبت به t از بردار یکه در مسیر بار) هست. اکنون می‌توانیم بگوییم فرمول کامل شده است و آن تمام چیزی است که از یک میدان الکتریکی از یک حرکت دلخواه بار به دست می‌آید. میدان مغناطیسی اینگونه نشان داده می‌شود:

$$\mathbf{B} = -\mathbf{e}_r \times \mathbf{E}/c. \quad (۴.۲۸)$$

ما این‌ها را فقط برای نشان دادن زیبایی طبیعت نوشتیم یا به بیانی دیگر برای نشان دادن قدرت ریاضیات. ما تظاهر به فهمیدن اینکه چرا نوشتن این فرمول در چنین مکان کوچکی امکان‌پذیر است نمی‌کنیم، اما رابطه‌های (۳.۲۸) و (۴.۲۸) در بردارنده مکانیسمی است که چگونگی کارکردن مولدهای الکتریکی را بیان می‌کند و یا اینکه چگونه نور عمل می‌کند و همه‌ی پدیده‌های دیگر الکتریکی و مغناطیسی. البته که برای تمام کردن این داستان نیاز داریم تا چیزهایی در مورد چگونگی رفتار موادی که در این فرایندها دخالت داشتند بدانیم – به خصوص مشخصات ماده که با معادله (۳.۲۸) کاملاً توصیف نشده‌اند.

برای پایان دادن به توصیف جهان قرن ۱۹ ما باید به نتیجه‌ی خارق‌العاده دیگری که در این قرن رخ

داد (و ماکسول نقش مهمی در آن نیز داشت) نیز پردازیم و آن نتیجه‌گیری پدیده گرما و مکانیک بود که به زودی به مطالعه آن می‌پردازیم.

چیزی که در قرن ۲۰ به علم اضافه شد این بود که جهان شمول بودن قوانین نیوتون زیر سؤال رفت و مکانیک کوانتومی برای تصحیح آن‌ها معرفی شد. قوانین نیوتون وقتی به طور تقریبی درست بودند که مقیاس اشیاء به‌طور قابل توجهی بزرگ بود. این قوانین مکانیک کوانتومی که با قوانین الکتریکی ترکیب شده بودند به تازگی به شکل قوانین الکترودینامیک کوانتومی نامیده شدند و به همراه چندین پدیده تازه کشف شده که اولین آن‌ها رادیواکتیویته توسط بکرل (به دنبال این پدیده رادیواکتیویته بود که دانش ما در مورد هسته و نوع جدید نیرو که نه از گرانش بود و نه از نوع الکتریکی بلکه از ذره‌های جدید همراه با واکنش‌های مختلفی که هنوز هم درک نشده‌اند.) در ۱۸۹۸ بود، دوران تازه‌ای را آغاز کردند. برای خوانندگانی که اطلاعات بیشتری دارند (اساتیدی که ممکن است این متن را بخوانند) باید این نکته را اضافه کنیم که وقتی می‌گوییم معادله (۳.۲۸) توضیح کاملی از دانش ما از الکترودینامیک است، چندان دقت به خرج نداده‌ایم. مسأله‌ای وجود داشت که تا اواخر قرن ۱۹ به‌طور کامل حل نشده بود. وقتی تلاش می‌کردیم تا میدان ناشی از تمام بارها از جمله باری که خواهان اعمال میدان بر آن بودیم را حساب کنیم، برای پیدا کردن فاصله به مشکل برخوردیم؛ برای مثال، فاصله بار تا خودش و تقسیم چیزی بر آن فاصله (که صفر است). این مسأله که با آن قسمت از این میدان که از باری تولید می‌شود که می‌خواهیم میدان بر آن اعمال شود، هنوز حل نشده است. پس همین جا این مسأله را رها می‌کنیم؛ چرا که هنوز راه حل کاملی برای این معما نداریم و تا حد امکان از این معما دوری خواهیم کرد.

۲۰۲۸ تابش

از متن قبلی که خلاصه‌ای از تصویر جهان بود استفاده می‌کنیم تا در مورد پدیده تابش بحث کنیم. برای بحث در مورد این پدیده باید قسمتی را از معادله (۳.۲۸) انتخاب کنیم. البته فقط قسمتی که با فاصله رابطه عکس دارد نه آن که با مربع فاصله رابطه دارد. بعد از آن که بالاخره تکه نهایی را پیدا کردیم به قدری اوضاع ساده می‌شود که به کمک آن اجازه پیدا می‌کنیم به مطالعه اپتیک و الکترودینامیک پردازیم. این روش ابتدایی آن به عنوان قانون میدان‌های الکتریکی ناشی از بارهای در حال حرکت در فاصله دور است، که باید این را به عنوان یک قانون موقت در نظر بگیریم تا جزییات بیشتر را در سال آینده فراگیریم.

در عبارت‌های ظاهر شده در رابطه (۳.۲۸)، اولی از قرار معلوم با مربع فاصله رابطه عکس دارد و دومی تنها یک تصحیح‌کننده برای تأخیر زمانی است؛ به همین دلیل بسیار ساده است که نشان دهیم هر دو آن‌ها با معکوس مربع فاصله در حال تغییر اند. تمام اثراتی که ما به آن‌ها علاقه مندیم از عبارت

سوم برمی‌آید که خوشبختانه اصلاً هم پیچیده نیست. چیزی که این عبارت می‌گوید این است که: به بار نگاه کن و به مسیر بردار یکه توجه داشته باش (ما می‌توانیم انتهای آن را روی سطح یک کره یکه تصویر کنیم). وقتی بارها این طرف و آن طرف می‌روند، بردار یکه تکان می‌خورد و شتاب بردار یکه چیزی است که ما به دنبال آن هستیم. فقط همین. بنابراین، رابطه‌ی

$$\mathbf{E} = \frac{-q}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{d^2 \mathbf{e}_{r'}}{dt^2} \quad (5.28)$$

بیان قانون‌های تابش است؛ چرا که این تنها قسمت مهم برای زمانی است که ما به اندازه کافی دور از میدان‌هایی که با فاصله رابطه عکس دارد قرار گرفته‌ایم. (قسمت‌هایی که با مربع فاصله در ارتباطند، به دلیل مقدار اندکی که دارند مورد توجه ما نیستند.) اکنون، می‌توانیم مطالعاتمان راجع به رابطه (۵.۲۸) را کمی بیشتر جلو ببریم تا ببینیم چه معنایی دارد. فرض می‌کنیم بار، به هر ترتیبی، در حال حرکت است و ما در فاصله‌ای مشخص در حال مشاهده آن هستیم. برای لحظه‌ای تصور می‌کنیم که به هر صورتی بار روشن می‌شود (حالا این نور است که داریم توضیح می‌دهیم)؛ بار را به صورت یک نقطه سفید کوچک تصور می‌کنیم. سپس، مشاهده می‌کنیم که این نقطه سفید در حال حرکت به این طرف و آن طرف است. اما به دلیل تأخیر زمانی که قبلاً به آن اشاره شد، دقیقاً نمی‌بینیم چگونه در زمان حال حرکت می‌کند. آنچه مهم است این است که در لحظات قبل چگونه حرکت می‌کرده است. بردار یکه $bme_{r'}$ به موقعیت ظاهری بار اشاره می‌کند. البته انتهای $bme_{r'}$ یک خمیدگی اندک دارد، در نتیجه، شتاب آن دو جزء دارد. یکی قسمت عرضی به دلیل بالا و پایین رفتن آن و دیگری قسمت شعاعی به دلیل قرارگیری در کره. این کار آسانی است که نشان دهیم دومی به مقدار قابل توجهی کوچک‌تر است و با معکوس مربع r ، وقتی r خیلی بزرگ است، تغییر می‌کند. دیدن این مورد کار راحتی است، وقتی تصور می‌کنیم که ما منبع داده شده را به جاهای دور و دورتر حرکت می‌دهیم که نتیجه آن حرکت‌های $bme_{r'}$ با معکوس فاصله کوچک و کوچک‌تر به نظر می‌رسد، اما جزء شعاعی نسبت به معکوس فاصله شتاب تغییرات سریع‌تری دارد. پس برای اهداف کاربردی تمام کاری که باید انجام دهیم این است که حرکت را بر یک صفحه در فاصله یکه تصویر کنیم. در نتیجه، این قاعده را پیدا می‌کنیم: تصور کنید ما داریم یک بار در حال حرکت را مشاهده می‌کنیم و تمام چیزی که می‌بینیم تأخیر زمانی دارد (مانند نقاشی که سعی در طراحی منظره‌ای در صفحه‌ای به فاصله یکه دارد). البته، یک نقاش واقعی توجهی به این ندارد که نور با سرعت معینی حرکت می‌کند، بلکه دنیا را همانگونه که می‌بیند طراحی می‌کند. می‌خواهیم ببینیم طراحی او چه شکل و شمایلی خواهد داشت. پس ما نقطه‌ای می‌بینیم که بیان‌کننده حرکت بار در تصویر است. شتاب این نقطه با میدان الکتریکی متناسب است. همه‌اش همین — همه چیزی که لازم داریم.

بنابراین، معادله (۵.۲۸)، معادله‌ای کامل و درست برای تابش است؛ حتی اثرات نسبیت در آن لحاظ شده است. ولی اغلب می‌خواهیم که همچنان آن را برای شرایط ساده‌تر که در آن‌ها بارها فقط در

فاصله‌های بسیار کم و با سرعت‌های نسبتاً آهسته حرکت می‌کنند، به کار ببریم. از آنجا که آن‌ها دارند به آرامی حرکت می‌کنند، جابجایی محسوسی نسبت به مکان آغاز ندارند، در نتیجه، زمان تأخیر عملاً ثابت است. پس، به دلیل ثابت بودن تأخیر زمانی، قانون باز هم ساده‌تر است. بنابراین، تصور می‌کنیم که بار حرکت بسیار کمی در یک فاصله b - به‌طور مؤثر - ثابت دارد. تأخیر در فاصله r به صورت r/c است. پس، قاعده ما به این صورت در می‌آید: اگر جسم باردار شده در مقیاس بسیار کوچکی در حال حرکت باشد و فاصله جابه‌جایی جانبی آن $x(t)$ باشد، آنگاه زاویه‌ای که بردار یکه $bme_{r'}$ جابه‌جا می‌شود x/r است و چون عملاً r ثابت است، مؤلفه x عبارت $d^2 bme_{r'}/dt^2$ به طور واضح شتاب خود x در زمان قبل‌تر تقسیم بر r است و بنابراین، سرانجام به قانونی که می‌خواستیم رسیدیم که چنین است:

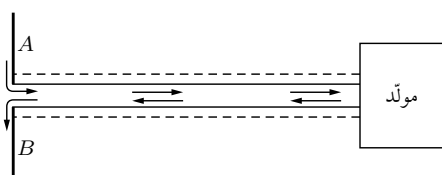
$$E_x(t) = \frac{-q}{4\pi\epsilon_0 c^2 r} a_x \left(t - \frac{r}{c} \right). \quad (۶.۲۸)$$

فقط جزء a_x عمود بر خط دید مهم است. اجازه دهید دلیلش را بگوییم. از قرار معلوم، اگر بار داخل و بیرون مستقیم به طرف ما حرکت کند، بردار یکه که اصلاً جابه‌جا نمی‌شود و شتابی ندارد. پس، فقط حرکات جانبی هستند که ما مهم‌اند؛ فقط شتابی که تصویر آن را در صفحه می‌بینیم.

۳.۲۸ تابشگر دوقطبی

به عنوان قانون اصلی تابش الکترومغناطیس، فرض را بر آن می‌گذاریم که معادله (۶.۲۸) درست است؛ یعنی، میدان الکتریکی تولید شده توسط بار شتاب‌داری که به صورت غیرنسبیتی در حرکت است، در فواصل بسیار دور r چنین شکلی خواهد داشت. میدان الکتریکی با معکوس فاصله r و متناسب با شتاب بار تصویر شده بر روی «صفحه دید» تغییر می‌کند. و این شتاب، شتاب فعلی نیست، بلکه شتابی است که در زمانی قبل‌تر داشته و مقدار تأخیر زمانی r/c است. در ادامه این بخش، باید درباره این قانون به گونه‌ای صحبت کنیم که بهتر متوجه جنبه‌های فیزیکی آن شویم؛ چرا که باید از آن‌ها برای توضیح تمام پدیده‌های نور و انتشار رادیویی از قبیل بازتاب، شکست، تداخل، پراش و پراکندگی استفاده کنیم. این قانون، یک قانون مرکزی است و تمام آن چیزی است که لازم داریم. باقی معادله (۳.۲۸) فقط برای آماده شدن شرایط، نوشته شد تا بتوانیم درک کنیم معادله (۶.۲۸) کجا و چگونه عمل می‌کند.

ما معادله (۳.۲۸) را سال آینده توضیح خواهیم داد. در حال حاضر، باید آن را به عنوان یک حقیقت قبول کنیم ولی نه فقط برپایه نظریه‌ها. ما شاید چندین آزمایش برای به تصویر کشیدن ویژگی این قانون طراحی کنیم. بدین منظور، به یک بار شتاب‌دار نیاز داریم. آن بار باید یک بار منفرد باشد اما اگر بتوانیم تعداد خیلی زیادی بار را، همه به یک شکل، به حرکت درآوریم (چون می‌دانیم که میدان، جمع

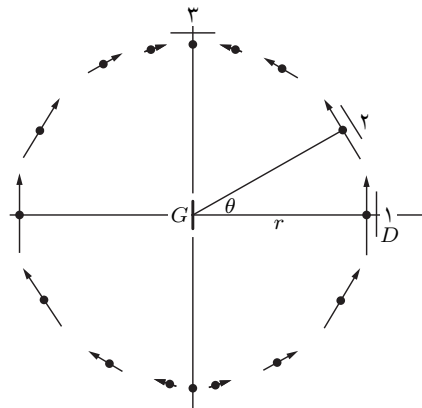


شکل ۱۰.۲۸: یک مولد سیگنال بسامد بالا بارها را در دو سیم به بالادست و پایین دست به حرکت درمی آورد.

اثرات هرکدام از بارهای منفرد است) فقط آن‌ها را با هم جمع می‌کنیم. به عنوان مثال، همانگونه که در شکل ۱۰.۲۸ نشان داده شده است، دو تکه سیمی را که به یک مولد متصل شده‌اند در نظر بگیرید. ایده اصلی این است که مولد، اختلاف پتانسیل یا میدانی ایجاد می‌کند که الکترون‌ها را در یک لحظه از نقطه A به سمت نقطه B هل می‌دهد و لحظه بسیار ناچیزی بعد از آن، این اثرات برعکس می‌شود و الکترون‌ها از B بیرون کشیده و به A بازگردانده می‌شوند. پس بگذارید اینطور بگوییم که در این دو سیم، بارها در لحظه‌ای در سیم A و سیم B بالاسو و لحظه‌ای بعد در این دو سیم پایین سو شتاب می‌گیرند. این حقیقت که ما به دو سیم و یک مولد نیاز داریم، صرفاً راهی برای انجام این کار است. نتیجه خالص این است که ما صرفاً بارهایی داریم که به بالا و پایین شتاب می‌گیرند، گویی A و B یک تک سیم هستند.

سیمی که طول آن در مقایسه با مسافتی که نور در یک دوره تناوب نوسان طی می‌کند، بسیار کوتاه باشد، نوسان‌گر دوقطبی الکتریکی نامیده می‌شود. پس در شرایطی هستیم که لازم است قانون مان را به کار ببریم؛ این قانون به ما می‌گوید که این بار، میدان الکتریکی‌ای می‌سازد و ما به ابزاری نیاز داریم که این میدان را آشکار کند (همان وسیله که استفاده کردیم) (یک جفت سیم مشابه سیم‌های A و B) اگر میدان الکتریکی به چنین دستگاهی اعمال شود، نیرویی تولید خواهد کرد که الکترون‌های هر دو سیم A و B را به بالا یا پایین می‌برد. این سیگنال با یکسوکننده‌ای که بین A و B نصب شده، آشکار می‌شود و سیم خیلی کوچک و ریزی اطلاعات را به تقویت‌کننده می‌برد. در تقویت‌کننده، اطلاعات تقویت می‌شود تا بتوانیم نوای فرکانس صوتی را که با آن، فرکانس رادیویی پردازش شده است را بشنویم. وقتی این کاوشگر (پرآب) حضور میدان را حس می‌کند، نویز بلندی از بلندگو بیرون می‌آید و وقتی میدان الکتریکی‌ای برای تحریک آن نباشد، نویزی هم نخواهد بود.

چون در اتاقی که در آن موج‌ها را اندازه می‌گیریم اجسام دیگری نیز وجود دارد، میدان الکتریکی ما، الکترون‌های اجسام دیگر را به لرزه در می‌آورد؛ این میدان الکتریکی این بارهای دیگر را بالا و پایین می‌برد که این بالا و پایین رفتن‌ها اثراتی بر کاوشگر می‌گذارد. در نتیجه، برای یک آزمایش موفق، باید اجسام را کاملاً نزدیک یکدیگر قرار دهیم تا اثرات دیواره‌ها و خودمان (موج‌های بازتابی) نسبتاً کم شوند. پس، در می‌یابیم که پدیده مورد نظر ما دقیق و همخوان با معادله (۶.۲۸) نخواهد بود اما

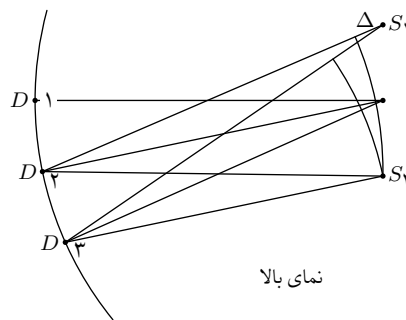


شکل ۲.۲۸: میدان الکتریکی لحظه‌ای روی کره‌ای به مرکز بار نوسان‌گر خطی جایگزیده.

به اندازه کافی به آن نزدیک است تا بتوانیم این قانون را درک کنیم. حال، مولد را روشن می‌کنیم و سیگنال صوتی را می‌شنویم. زمانی متوجه یک میدان قوی خواهیم شد که آشکارساز D موازی با مولد G در نقطه ۱ باشد (شکل ۲.۲۸). ما متوجه حضور همان مقدار میدان در هر زاویه در سمتی دیگر حول محور G خواهیم شد؛ چرا که میدان، اثر وابسته به جهت ندارد. از طرفی، وقتی آشکارساز در نقطه ۳ باشد، میدان صفر است. نتیجه کاملاً درستی است؛ چرا که رابطه ما می‌گوید باید میدان شتاب بار تصویر شده عمود بر خط دید باشد. بنابراین، وقتی به G نگاه می‌کنیم، بار در حال دور شدن از D است و هیچ اثری ندارد. پس، قانون اول را تأیید می‌کند که می‌گوید وقتی بار در حال حرکت به سمت ماست، هیچ اثری ندارد. دوم این‌که رابطه می‌گوید میدان الکتریکی باید عمود بر r و در صفحه G و r باشد؛ پس اگر D را در نقطه ۱ قرار دهیم ولی آن را 90° درجه بچرخانیم، نباید هیچ سیگنالی دریافت کنیم. این درست چیزی است که دریافتیم و این‌که میدان الکتریکی عمودی است نه افقی. وقتی D را به یک زاویه بینابینی منتقل می‌کنیم، درمی‌یابیم که قوی‌ترین سیگنال وقتی رخ می‌دهد که همان‌طور که نشان داده شده است، جهت‌گیری کرده باشد؛ زیرا اگرچه G عمودی است ولی میدانی را که موازی خودش باشد تولید نمی‌کند - این تصویر شتاب عمود بر خط دید است که مهم است - سیگنال به دلیل اثر تصویر شدن، در ۲ ضعیف‌تر از ۱ است.

۴.۲۸ تداخل

در این بخش، می‌خواهیم بیازماییم که وقتی دو منبع کنار هم و با فاصله چند طول‌موج از هم (شکل ۳.۲۸) در اختیار داریم، چه رخ می‌دهد. قانون این است که وقتی هر دو منبع به یک مولد متصل باشند و هر دو به یک شکل بالا و پایین بروند، باید اثرات خود را در نقطه ۱ به یکدیگر اضافه



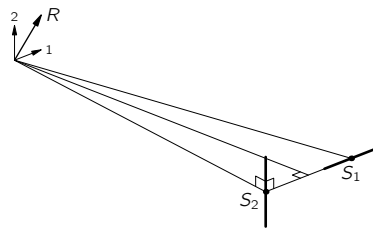
شکل ۳.۲۸: نمایش تداخل منبع‌ها.

کنند؛ در نتیجه، میدان الکتریکی کل، جمع هر دو و دو برابر قوی‌تر از مقداری است که قبلاً داشته است.

اکنون پای یک احتمال جالب به میان می‌آید. فرض کنید بارها را در S_1 و S_2 به بالا و پایین شتاب دارند اما برای بار S_2 با تأخیر زمانی چنین می‌کنیم تا 18° درجه اختلاف فاز داشته باشند. پس در هر لحظه، میدان تولید شده توسط S_1 در یک جهت و میدان حاصل از S_2 در جهت مخالف آن خواهد بود و بنابراین، ما هیچ اثری در نقطه ۱ نخواهیم داشت. فاز نوسان به خوبی به وسیله لوله‌ای که سیگنال را به S_2 می‌برد، قابل تنظیم است. با تغییر طول این لوله، زمانی را که نیاز است سیگنال به S_2 برسد و در نتیجه، فاز نوسان را تغییر می‌دهیم. با تنظیم این طول، با توجه به این حقیقت که هم S_1 و هم S_2 در حال حرکت‌اند، حتماً می‌توانیم مکانی را پیدا کنیم که در آن هیچ سیگنالی باقی نمانده باشد. می‌توان این حقیقت را که هر دوی آن‌ها در حال حرکت‌اند را بررسی کرد؛ زیرا اگر ما یکی از آن‌ها را قطع کنیم، می‌توانیم حرکت دیگری را متوجه شویم. در نتیجه، اگر همه چیز به درستی تنظیم شده باشد، هر دو آن‌ها با هم میدان صفر تولید می‌کنند.

اکنون، بسیار جالب به نظر می‌رسد تا نشان دهیم مجموع دو میدان، همان جمع برداری است. ما فعلاً آن را برای حرکت‌های بالاسو و پایین‌سو بررسی کردیم، اما حال دو جهت غیر موازی را بررسی می‌کنیم. نخست، S_1 و S_2 را به حالت هم‌فاز برمی‌گردانیم؛ یعنی آن‌ها دوباره همراه با هم حرکت می‌کنند. اما اکنون S_1 را با 90° درجه مانند آنچه در شکل ۴.۲۸ نشان داده شده است، می‌چرخانیم. حال باید در نقطه ۱ جمع دو اثر را داشته باشیم. یکی عمودی و دیگری افقی.

میدان الکتریکی، جمع برداری این دو سیگنال هم‌فاز است (هر دوی آن‌ها در یک زمان قوی‌اند و با هم نیز صفر می‌شوند). میدان کل باید سیگنال R در 45° درجه باشد. اگر D را برای رسیدن به نویز بیشینه بچرخانیم، تقریباً باید در زاویه 45° درجه چنین باشد و نه در زاویه عمود. و اگر آن را طوری بچرخانیم که با آن جهت، زاویه عمود داشته باشد، باید صفر دریافت کنیم که اندازه‌گیری آن نیز آسان است مسلماً درست است که چنین رفتاری را مشاهده می‌کنیم.



شکل ۴.۲۸: نمایش ویژگی برداری ترکیب منبع‌ها.

حال، سؤال این است که تأخیر چه می‌شود؟ چگونه می‌توانیم نشان دهیم که سیگنال دارای تأخیر هست یا نه؟ می‌توانیم با تجهیزات خاصی زمان رسیدن سیگنال را اندازه بگیریم، اما روش بسیار ساده دیگری نیز وجود دارد. با نگاه دوباره به شکل ۳.۲۸، فرض کنید S_1 و S_2 هم‌فاز باشند. هر دو آن‌ها با هم نوسان می‌کنند و هر دو در نقطه ۱ میدان الکتریکی یکسان تولید می‌کنند. اما فرض کنید به نقطه معین ۲ برویم که به S_2 نزدیک‌تر و از S_1 دورتر است. پس با توجه به این اصل که شتاب باید تأخیری به مقدار r/c داشته باشد، اگر تأخیرها یکسان نباشند، سیگنال‌ها دیگر هم‌فاز نمی‌مانند. در نتیجه، باید بتوان مکانی را یافت که در آن فاصله‌های D از S_1 و S_2 به اندازه مقدار Δ متفاوت باشند طوری که سیگنال خالصی نباشد. یعنی، فاصله Δ فاصله‌ایست که نور در یک نیمه نوسان مولد طی می‌کند. حتی می‌توانیم باز هم پیش‌تر برویم و مکانی را پیدا کنیم که تفاوتش به اندازه یک چرخه کامل بزرگ‌تر است؛ یعنی می‌توان گفت سیگنال آنتن اول با تأخیر زمانی‌ای که درست به اندازه مدت زمانی که طول می‌کشد جریان الکتریکی یک مرتبه نوسان کند، بزرگ‌تر از تأخیر زمانی آنتن دوم است که به نقطه ۳ می‌رسد و بنابراین، هر دو میدان الکتریکی تولید شده در ۳ باز هم‌فاز می‌شوند. در نقطه ۳ سیگنال دوباره قوی می‌شود.

این قسمت بحث ما را راجع به تأیید تجربی بعضی ویژگی‌های مهم معادله (۶.۲۸) را کامل می‌کند. البته هنوز تغییرات $1/r$ قدرت میدان الکتریکی یا این حقیقت را که میدان مغناطیسی نیز همراه با میدان الکتریکی هست، واقعا بررسی نکرده‌ایم. برای چنین کاری به تکنیک‌های نسبتاً پیچیده‌ای نیاز است و در این مقطع، چیزی به درک ما نمی‌افزاید. به هر حال، آن ویژگی‌هایی را که برای کاربردهای بعدی بیشترین اهمیت را داشت، بررسی کردیم و سال آینده به مطالعه بعضی دیگر از ویژگی‌های امواج الکترومغناطیس خواهیم پرداخت.

SUMMARY LECT 29. ELECTROMAGNETIC RADIATION

Far from accelerating charges the electric field varies as $\frac{1}{R}$. (R =distance)
 If the charge moves non-relativistically ($v \ll c$) the field is given by:

$$\vec{E} = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{1}{R} \text{ (Projection of Retarded Accel on Plane } \perp \text{ to line of sight)}$$

$\therefore E$ is \perp to line of sight. (= note $\frac{\vec{R}}{R}$) $\rightarrow R/c$

depends only on accel at time earlier by R/c .

$$4\pi\epsilon_0 c^2 = 10^7 \text{ exactly. MKS.}$$

$$c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/sec.}$$