تاریخچهٔ الکترومغناطیس

نگین خسروانی‌نژاد
دانشجوی کارشناسی فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف تهران
سید هدایت سجادی
(نویسنده مسئول)، عضو هیئت‌علمی دانشگاه فرهنگیان تهران

اشاره

الکتریسیته و مغناطیس در آغاز دو موضوع کاملاً متفاوت بودند. الکتریسیته به چیزهایی از قبیل میلهٔ شیشه‌ای، موی گربه، باتری، جریان الکترولیز و روشنایی مربوط می‌شد در حالی‌که مغناطیس دربارهٔ آهن‌رباها، برادهٔ آهن، عقربهٔ مغناطیسی و قطب شمال بحث می‌کرد. اما در سال ۱۸۲۰ میلادی، ارستد[۱] متوجه شد که جریان الکتریکی می‌تواند عقربه مغناطیسی را منحرف کند. کمی بعد از کشف ارستد، آمپر[۲] به درستی دریافت که تمام پدیده‌های مغناطیسی از بارهای الکتریکی متحرک ناشی می‌شوند. سپس در سال ۱۸۳۹ میلادی، فارادی[۳] کشف کرد که یک آهنربای متحرک می‌تواند جریان الکتریکی ایجاد کند. در همان زمان ماکسول[۴] و لورنتس[۵] نظر تکمیلی خود را چنین بیان کردند که الکتریسیته و مغناطیس به گونه‌ای جدانشدنی به همدیگر مربوطند. این دو را دیگر نمی‌توان به‌عنوان موضوع‌های جداگانه مطرح کرد، بلکه دو جنبه از یک موضوع واحدند: **الکترومغناطیس**. در این نوشتار به سیر تحولات نظریهٔ الکترومغناطیس پرداخته می‌شود.

کلیدواژه‌ها: الکتریسیته، مغناطیس، الکترومغناطیس، ارستد، آمپر، فارادی، ماکسول.

۱. وحدت جوهری

شناخت پدیده‌های الکتریسیته و مغناطیس به تمدن‌های اولیه برمی‌گردد. برای هزاران سال الکترومغناطیس صرفاً یک پدیده جالب و رمزآمیز بود، بدون اینکه نظریه‌ای برای توضیح آن وجود داشته باشد. بررسی این پدیده‌ها در قرن هفدهم به‌صورت علمی مطرح شد و نهایتاً در قرن نوزدهم تکامل یافت. در حال حاضر الکترومغناطیس به صورت نظریه‌ای زیبا و کامل مورد توجه فیزیک‌دانان است: الگوی ایده‌آلی که نظریه‌های دیگر می‌توانند از آن تقلید کنند. نقطه قوت این تئوری توانایی بالای آن در ایجاد **وحدت**[۶] در نهایت سادگی و خودسازگاری است. نظریهٔ الکترومغناطیس به بررسی و مطالعهٔ نیروی الکترومغناطیسی، یکی از چهار نیروی بنیادی طبیعت، در کنار نیروی هسته‌ای قوی، هسته‌ای ضعیف و گرانش می‌پردازد. این نیرو توصیف‌گر پدیده‌های اتمی و مولکولی و همچنین تمام پدیده‌هایی است که در زندگی روزمره اتفاق می‌افتند ـ به جز گرانش. در تئوری الکترومغناطیس این نیروها به وسیله میدان‌ها توصیف می‌شوند که با مجموعه‌ای از معادلات شناخته شده با عنوان معادلات ماکسول[۷] تبیین می‌شوند. وحدت پدیده‌های قابل مشاهده در طبیعت یکی از اهداف اصلی علم فیزیک است. اولین وحدت بزرگ، تئوری گرانش اسحاق نیوتن[۸] در قرن هفدهم بود که فهم پدیده جاذبه روی کره زمین را با رفتار اجسام آسمانی در فضا

یک‌پارچه کرد. دومین وحدت بزرگ، تئوری الکترومغناطیس بود کـــه درک پدیده‌های آهن‌ربا، الکتریســـیته و نور را گرد هم آورد. این تئوری در قرن بیســـتم نیز زمینه ظهور نظریه نسبیت خاص واقع شد که خود منجر به وحدت فضا و زمان و همچنین جرم و انرژی گردید.

۲. الکتریسیته و مغناطیس، پیش از قرن نوزدهم

بشـــر از قدیم با خواص عجیب و غریب کهربا[۹] و سنگ آهن مغناطیسی[۱۰] آشنا بود: کهربا وقتی مالش داده می‌شود اجسام سبک را جذب می‌کند و سنگ آهن نیز قدرت جذب اجسام آهنی را دارد. در آن زمـــان مردم درک کمی از این پدیده‌ها داشـــتند و قادر به توضیح آن‌ها نبودند. اولین شـــخصی که دربارهٔ قطب‌نما نوشـــت شن کوا[۱۱] - علامهٔ چینی- بود که در قرن یازدهم از مفهوم شـــمال برای جهت‌یابی استفاده کرد. همچنین اخیراً در سرزمین بین‌النهرین (عراق کنونی) اشیایی متعلق به دوره اشـــکانیان و ساسانیان یافت شده که شباهت زیادی بـــه پیل ولتا دارند، ولی اینکـــه کاربرد آن‌ها چه بوده بحث‌برانگیز است.

در قرون وســـطی مغناطیس یکی از معدود علومی بود که پیشـــرفت بیشـــتری کرد. در قرن دوازدهم قطب‌نما از چین بـــه اروپا رفت و در قرن ســـیزدهم نیـــز پتروپرگرینوس[۱۲] - فیزیک‌دان فرانســـوی- کشف مهمی کرد. او یک سنگ آهن کروی را برداشت و سوزن را بر روی نقاط مختلف آن قرار داد و هر بار خطی را که امتداد سوزن در آن جهت قرار می‌گرفت علامت‌گذاری کرد. او دید که این خطوط دایره‌هایی شـــبیه نصف‌النهارهای زمین تشـــکیل می‌دهند. در انتهای مخالف ســـنگ دو نقطه وجود داشـــت که تمام دایره‌هـــا از آن عبور می‌کردند، دقیقاً همان‌طور که همه نصف‌النهارها از قطب‌های شمال و جنوب زمین عبور می‌کنند. گرینوس تحت تأثیر این مشـــاهده این دو نقطه را **قطب**‌های آهن‌ربا نامید. او مشاهده کرد که جهت قرار گرفتن آهن‌رباها و جذب یکدیگر صرفاً به موقعیت قطب‌های آن‌ها بســـتگی دارد، گویی قطب‌ها محل قرارگیری قدرت مغناطیسی هستند. [۱]

تاریخ جدید الکتریســـیته و مغناطیس از سال ۱۶۰۰ آغاز می‌شود: زمانی که ویلیام گیلبرت[۱۳] - پزشک انگلیسی - کتاب «درباره آهن‌ربا» را نوشـــت. او به تفاوت نیروهای الکتریکی و مغناطیســـی پی برد و آزمایش‌هایی درباره این دو نیرو انجام داد. گیلبرت در این آزمایش‌ها کشـــف کرد که مواد دیگری به جز کهربا مانند گوگرد، موم، شیشـــه و ... نیز دارای خواص الکتریکی هســـتند. او دریافت مواد دارای خاصیت الکتریکی همدیگـــر را جـــذب می‌کنند و همچنین فهمیـــد حرارت و رطوبت از عواملی هســـتند که خاصیت الکتریکی اجسام را از بین می‌برند. گیلبرت در بسیاری از آزمایش‌های خود، زمین را به صورت یک ســـنگ آهن بزرگ به نـــام ترلا (terrella) مدل‌سازی می‌کرد و معتقد بود دلیل چرخش قطب‌نماها به سمت قطب شـــمال این است که زمین خاصیت مغناطیسی دارد - پیش از او معتقد بودند که ستاره قطبی یا یک جزیره مغناطیسی بزرگ در قطب شمال قطب‌نماها را به خود جذب می‌کنند. او اولین کسی بود که به درستی استدلال کرد مرکز زمین از جنس آهن است و این ویژگی مهم آهن‌ربا را فهمید که اگر قطعه‌قطعه شـــود، هر قطعهٔ آن یک آهن‌ربای جدید با قطب‌های شـــمال و جنوب خواهد بود. گیلبرت گرانش را نیز یک نیروی مغناطیسی در نظر می‌گرفت. [۱]

کار گیلبـــرت را رابرت بویل[۱۴] - شـــیمی‌دان و فیزیک‌دان انگلیســـی - دنبال کرد. بویل در ســـال ۱۶۷۵ کشف کرد که جاذبـــه و دافعـــهٔ الکتریکی در خلأ هم وجـــود دارد و به هوا به‌عنوان یک ماده میانجی (medium) نیازی نیست. او صمغ را هم به فهرست شناخته‌شده مواد دارای خاصیت الکتریکی اضافه کرد.

اتفاق مهم دیگری که در قرن هفدهم رخ داد، ساخت ژنراتور الکتریکی بود. در ســـال ۱۶۶۳ اتوفـــون گریکه[۱۵] - مهندس آلمانی - توانست با اســـتفاده از یک کُره در حال چرخش از جنس گوگرد که به یک تکه پارچه مالیده می‌شد الکتریسیتهٔ ساکن تولید کند. بعد از او هویگنس[۱۶] استفاده از کره کهربایی و اســـحاق نیوتن اســـتفاده از کره شیشـــه‌ای را به جای کره گوگردی پیشـــنهاد کردند. هدف اصلی گریکه از ساخت این ژنراتـــور، آزمایش کردن تئوری گیلبرت درباره گرانش بود. او در همین راســـتا، پمپ خلأ را هـــم اختراع کرد تا فضای بین سیارات را شبیه‌سازی کند. [۲] ولی نظر نیوتن با نظر گیلبرت و گریکه فرق می‌کرد. نیوتن در پرینســـیپیا[۱۷] نوشت: «نیروی گرانش ماهیت متفاوتی از نیروی مغناطیسی دارد. زیرا بعضی اجسام بیشتر به آهن‌ربا جذب می‌شوند، بعضی اجسام کمتر، بعضی اجســـام هم جذب نمی‌شوند. برخلاف گرانش، نیروی مغناطیسی یک جسم یکسان ممکن است افزایش یا کاهش یابد، و بعضاً به مقدار مادهٔ آن جسم ارتباطی ندارد.» [۱]

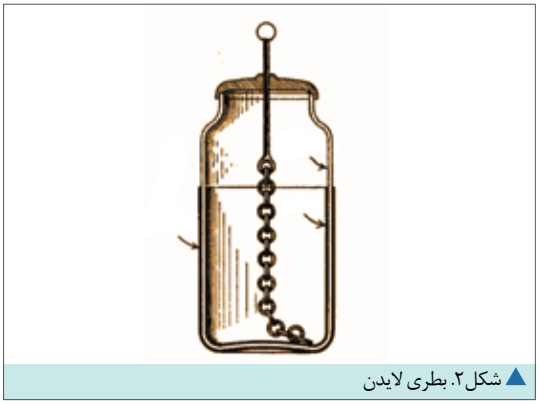
▲ شکل ۱: گریکه و کره گوگردی

در حال حاضر الکترومغناطیس به صورت نظریه‌ای زیبا و کامل مورد توجه فیزیک‌دانان است: الگوی ایده‌آلی که نظریه‌های دیگر می‌توانند از آن تقلید کنند

قرن هجدهم قرن بسیار مهمی در تاریخ الکتریسیته و مغناطیس بود. در سال ۱۷۲۹، استفان گری[۱۸] - رنگرز و ستاره‌شناس انگلیسی - مشاهده کرد الکتریسیته‌ای که با مالش دادن یک لوله شیشه‌ای تولید می‌شود، می‌تواند از راه دور از طریق سیم نازک آهنی با استفاده از نخ‌های ابریشمی به‌عنوان عایق منتقل شود. پس او مواد را به دو دسته تقسیم کرد: مواد **غیرالکتریکی** (مانند فلز و آب که بارها را انتقال می‌دادند) و مواد **الکتریکی** (مانند شیشه و صمغ و ابریشم که بارها را نگه می‌داشتند). بعد از او جان دزاگولیه[۱۹] - دستیار تجربی نیوتن - آن‌ها را **هادی** و **عایق** نامید. دزاگولیه همچنین ادعا کرد: «آزمایش‌های الکتریکی گری از همه آزمایش‌های الکتریکی که دانشمندان دیگر در قرن هفدهم و هجدهم انجام دادند بیشتر است.» [۳]

در سال ۱۷۳۴ شارل دو فی[۲۰] با الهام از آزمایش‌های الکتریکی گری، تمایز بین دو نوع الکتریسیته را کشف کرد. الکتریسیتهٔ **صمغی** که از مالش کهربا و صمغ با ابریشم و کاغذ تولید می‌شود، و **الکتریسیتهٔ شیشه‌ای** که با مالیدن شیشه و سنگ‌های قیمتی با مو و پشم تولید می‌شود. او همچنین اصل جاذبهٔ متقابل نوع‌های مخالف و دافعه دو نوع مشابه را مطرح کرد و گفت: «با این اصل می‌توان تعداد زیادی از پدیده‌های الکتریکی را توضیح داد.» بعدها بنجامین فرانکلین[۲۱] اصطلاحات مثبت و منفی را جایگزین صمغی و شیشه‌ای کرد.

در سال ۱۷۴۵ استادان دانشگاه لایدن نخستین وسیله برای جمع‌آوری و نگه‌داری بار الکتریکی را اختراع کردند: بطری لایدن[۲۲]، یک خازن ساده، شامل یک بطری شیشه‌ای نیمه‌پر از آب و یک سیم رسانای ضخیم بود. این سیم می‌توانست بار الکتریکی را در ولتاژ بالا از یک منبع خارجی بگیرد و روی هادی‌های الکتریکی داخل و خارج بطری شیشه‌ای ذخیره کند. یک سال بعد ویلیام واتسون[۲۳] - پزشک و دانشمند انگلیسی- نمونهٔ پیچیده‌تری از بطری لایدن را ساخت. او داخل و خارج ظرف را با فویل فلزی پوشاند تا ظرفیت آن برای ذخیرهٔ بار افزایش یابد. در سال ۱۷۴۷ واتسون مشاهده کرد که تخلیهٔ الکتریسیتهٔ ساکن باعث جریان الکتریکی می‌شود و مفهوم پتانسیل الکتریکی - ولتاژ - را خلق کرد. [۴]



▲ شکل ۲. بطری لایدن

در حالی که نظریهٔ الکتریسیته داشت بر پایه و اساس محکمی، توسط دانشمندان بزرگ قرن هجدهم، فراگیر می‌شد، تحولات برجسته‌ای هم در نظریه مغناطیس در حال رخ دادن بود. جاذبهٔ بین آهن‌رباها قبل‌تر از قانون جاذبه اجسام دارای بار الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته بود. جان میشل[۲۴] -زمین‌شناس انگلیسی- در سال ۱۷۵۰، زمانی که دانشجوی کالج کویین کمبریج[۲۵] بود، نوشت: «هرجا مغناطیس یافت شود - چه در خود آهن‌ربا، چه قطعه‌ای از آهن و غیره که توسط آهن‌ربا برانگیخته شده است - همیشه دو قطب وجود دارد که شمالی و جنوبی خوانده می‌شود. قطب شمال همیشه قطب‌های جنوب را به خود جذب می‌کند و قطب‌های شمال دیگر را دفع می‌کند، و برعکس. ضمناً جاذبه و دافعه آهن‌ربا با مربع فاصله از قطب‌های آن کاهش می‌یابد.» [۱]

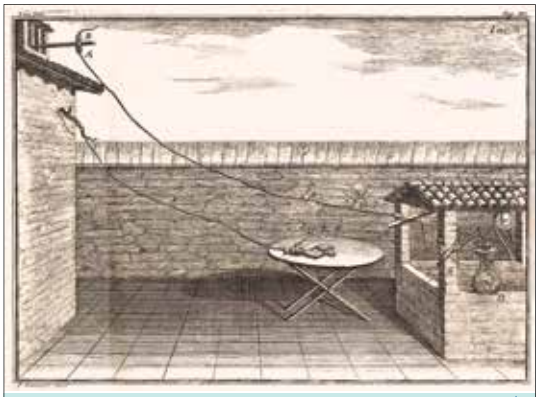
در آمریکا بنجامین فرانکلین - نویسنده، دانشمند و سیاست‌مدار آمریکایی - در سن چهل‌سالگی چاپخانه، روزنامه و سالنامهٔ خود را فروخت تا وقتش را صرف انجام آزمایش‌های الکتریسیته کند. او در سال ۱۷۵۲ یک بادبادک را در طوفان به پرواز درآورد و مقداری از بار آن را به بطری لایدن منتقل کرد و نشان داد که خواص رعد و برق همان بار تولیدشده توسط یک ژنراتور الکتریکی است. او این فرضیه را مطرح کرد که یک سیال الکتریکی وجود دارد - بلکه همان اتر- که در همه مواد در کل فضا وجود دارد. اگر غلظت این سیال در داخل و خارج جسمی یکسان باشد، بار آن جسم خنثی خواهد بود و اگر جسم دارای مقدار بیشتری از این سیال باشد بارش مثبت است، اگر کمتر باشد بارش منفی است. این ایده مخالف ایده دو فی به نظر می‌رسد، اما حقیقت این است که هر دو صحیح هستند. نظریه فرانکلین صحیح است؛ زیرا بیشتر جریان‌های الکتریکی نتیجه حرکت الکترون‌ها - **تک‌سیال** - هستند. در عین حال، ذرات دو نوع بار منفی و مثبت دارند، که از این نظر هم نظریهٔ دو فی - **دو سیال** - درست است. [۴]

در سال ۱۷۸۴ هنری کاوندیش[۲۶] - فیزیک‌دان انگلیسی - اولین کسی بود که از جرقهٔ الکتریکی استفاده کرد تا با انفجار هیدروژن و اکسیژن با نسبت‌های مناسب آب خالص تولید کند. کاوندیش همچنین ظرفیت القایی دی‌الکتریک‌ها - عایق‌ها - را کشف و ظرفیت القایی مواد مختلف را نسبت به هوا اندازه‌گیری کرد. بخش بزرگی از کارهای کاوندیش تا اواخر قرن نوزدهم که ماکسول نوشته‌های او را برای انتشار ویرایش می‌کرد، ناشناخته مانده بود و تا آن زمان بسیاری از آن‌ها به نام دیگران ثبت شده بود. آزمایش‌های او در زمینه رسانایی الکتریکی یک قرن از زمان خود جلوتر بودند. کاوندیش پیش‌بینی کرده بود که: «ذرات باردار همدیگر را با معکوس توانی کمتر از توان سوم فاصله جذب می‌کنند.» کمی بعد شارل آگوستن دو کولن[۲۷] - فیزیک‌دان فرانسوی -

بخش بزرگی از کارهای کاوندیش تا اواخر قرن نوزدهم که ماکسول نوشته‌های او را برای انتشار ویرایش می‌کرد، ناشناخته مانده بود و تا آن زمان بسیاری از آن‌ها به نام دیگران ثبت شده بود

پیش‌بینی او را اثبات کرد. در سال ۱۷۸۵ آنچه را که اکنون به‌عنوان قانون کولن شناخته می‌شود کشف کرد: «نیروی بین دو جسم کوچک الکتریکی به‌طور معکوس با مربع فاصله تغییر می‌کند.» بخش بزرگی از پدیده‌های الکتریکی با کشف کولن قابل توضیح شدند. [۵]

در ۱۷۹۱ لوییجی گالوانی[۲۸] - فیلسوف و پزشک ایتالیایی - سعی کرد تئوری رعدوبرق فرانکلین را آزمایش کند. او هنگام وقوع طوفان، پاهای قورباغه‌ای را روی یک داربست فلزی آویزان کرد. اما متوجه شد که پاها حتی وقتی طوفانی وجود ندارد حرکت می‌کردند. او این حرکت را به چیزی به نام **الکتریسیتهٔ حیوانات** نسبت داد. او معتقد بود این الکتریسیته، منشاء زندگی و قدرت و انگیزه حیوانات است، به‌طوری که انگار موجودات زنده نوعی بطری لایدن هستند.



▲ شکل ۳. آزمایش گالوانی

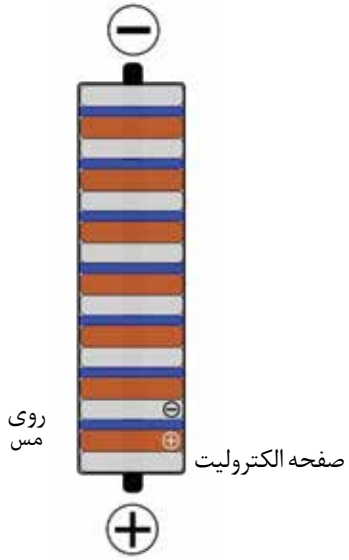
در سال ۱۷۹۳ الساندرو ولتا[۲۹] - فیزیک‌دان و شیمی‌دان ایتالیایی - در نامه‌ای به انجمن سلطنتی از آزمایش‌های لوئیجی گالوانی تمجید کرد و آن‌ها را «زیباترین و مهم‌ترین اکتشافات» نامید. ولی خودش متقاعد نشد که الکتریسیته گالوانیک یک پدیده جدید - به جز همان نیروی الکتریکی که در سایر فرایندهای طبیعی یافت می‌شود - است. او شروع به بررسی رفتار فلزات با دهان خودش کرد و دید که اگر از دو فلز مختلف استفاده شود - نقره و قلع یا مس و غیره - طعم ترش و احساس سوزن‌سوزنی ایجاد می‌شود. او دریافت که وقتی یک فلز در تماس با دو سیال مختلف قرار می‌گیرد هم اثرات مشابهی تولید می‌شود. تلاش‌های ولتا برای مخالفت با گالوانی منجر به ساخت پیل ولتا یا اولین **باتری** در سال ۱۸۰۰ میلادی شد؛ این پیل می‌توانست جریان ثابت تولید کند. پس دیگر نیازی نبود که برای تولید الکتریسیته از مالش و اصطکاک کره گوگردی و ... استفاده شود. پیل ولتا به سرعت تبدیل به تجهیزات رایج در هر آزمایشگاه شد و عصر جدیدی را به روی آزمایش‌های الکتریکی گشود و این سرآغازی برای تاریخ مدرن الکترومغناطیس شد. [۶]

پیل ولتا از دو الکترود تشکیل می‌شد: یکی از جنس روی و دیگری از مس. به عنوان الکترولیت هم از آب‌نمک و یا محلول اسیدسولفوریک استفاده می‌شد. فلز روی - که در سری‌های الکتروشیمیایی بالاتر از مس و هیدروژن است - اکسیده می‌شد، سپس به کاتیون‌های روی (Zn^{2+}) تبدیل می‌شد و الکترون‌هایی آزاد می‌کرد که به سمت الکترود مس حرکت می‌کردند. یون‌های مثبت هیدروژن این الکترون‌ها را از الکترود مس جذب می‌کردند و حباب‌های گاز هیدروژن (H_2) تشکیل می‌دادند. این اتفاق میلهٔ روی را به الکترود منفی و میلهٔ مسی را به الکترود مثبت تبدیل می‌کرد. بنابراین دو پایانه به وجود می‌آمد کهصص در صورت ایجاد اتصال بین آن‌ها جریان الکتریکی جاری می‌شد.

واکنش‌های شیمیایی رخ داده در پیل ولتا به شرح زیر است:

روی: $zn \rightarrow zn^{2+} + 2e^-$

الکترولیت: $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$



▲ شکل ۴. پیل ولتا

۳. الکترومغناطیس کلاسیک در قرن نوزدهم

در سال ۱۸۰۰ الساندرو ولتا اولین دستگاهی را اختراع کرد که می‌توانست جریان الکتریکی زیاد تولید کند. این دستگاه بعدها باتری نام گرفت. ناپلئون بناپارت[۳۰] - امپراطور فرانسه - که از کار ولتا آگاه بود، در سال ۱۸۰۱ او را برای اجرای آزمایش‌های خود فراخواند. ولتا مدال‌ها و افتخارات زیادی از جمله لژیون دونور - بالاترین نشان افتخار فرانسه[۳۱] - را نیز دریافت کرد.

در سال ۱۸۰۶ سر همفری دیوی[۳۲] - شیمی‌دان انگلیسی - با استفاده از یک پیل ولتای تقریباً ۲۵۰ سلولی، پتاس و سودا

طوفان گالوانی هنگام وقوع پاهای قورباغه‌ای را روی یک داربست فلزی آویزان کرد. اما متوجه شد که پاها حتی وقتی طوفانی وجود ندارد حرکت می‌کردند

را تجزیه کرد تا نشـــان دهد این مواد به ترتیب اکســـیدهای پتاسیم و سدیم - فلزاتی که تا آن زمان شناخته‌شده نبودند- هستند. دیوی یک سخنران بسیار محبوب در انجمن سلطنتی بود که اســـتعداد نمایشی زیادی داشت. وقتی او به سخنرانی عصر جمعه می‌پرداخت، ســـالن‌های سخنرانی پر می‌شدند. افرادی که نمی‌توانســـتند وارد شـــوند هم در خیابان منتظر می‌ماندند تا آنچه را که اتفاق می‌افتاد بشـــنوند. آزمایش‌های دیوی آغاز الکتروشیمی بود. او با استفاده از باتری‌های بزرگ‌تر و بزرگ‌تر، نمایش‌های عجیب‌تری از قدرت اثر الکتروشیمیایی ارائه می‌داد. در ســـال ۱۸۰۹ همفری دیوی با یک پیل ولتای ۲۰۰۰ ســـلولی اولین نمایش عمومی از لامپ قوسی - نوعی لامـــپ که در آن با کمک یونش گاز میان دو الکترود و تولید قوس الکتریکی نور تولید می‌شود - را ارائه داد. [۵]

دیوی از رابطهٔ میان الکتریسیته و پیوند شیمیایی مواد عمیقاً تحت تاثیر قرار گرفت. او معتقد بود که باید یک نیروی واحد در کل طبیعت وجود داشته باشد و این وظیفهٔ فلاسفه است که این نیرو را به صورت تجربی کشف کنند. او در این ایده تحت تأثیر فلسفهٔ ایده‌آلیستی ایمانوئل کانت[۳۳] قرار داشت. کانت در سال ۱۷۸۱ در کتاب «نقد عقل محض»[۳۴] این‌طور استدلال کرده بود که ما هرگز به ماهیت حقیقی اجســـام - آن‌طور که خودشان هســـتند - دسترسی نداریم، پس هیچ دلیلی ندارد که فرض کنیم اجسام غیرقابل‌مشاهده (sub-sensible) مانند اجسام قابل‌مشـــاهده (sensible) هستند. کانت همچنین در سال ۱۷۸۶ در کتاب «مبانی متافیزیکی علوم فیزیکی»[۳۵] ادعا کرده بود که ممکن اســـت همه مواد صرفـــاً مظهری از نیرو باشند - یک نیروی واحد. [۶]

نیمه اول قرن نوزدهم در تاریخ الکتریســـیته و مغناطیس بســـیار تأثیرگذار بود. هانس کریســـتین ارستد - فیزیک‌دان دانمارکی- در سال ۱۸۱۳ نوشت: «مقایسه نیروی مغناطیسی با نیروی الکتریکی همیشـــه وسوسه‌کننده بوده است ... باید تلاش کرد و دید که آیا الکتریســـیته کنش و تأثیری بر روی آهن‌ربا دارد یا نه.» او در ســـال ۱۸۲۰ در حال تدریس دربارهٔ پدیده‌های الکتریکی، ســـوزن یک قطب‌نما را در کنار ســـیم پلاتینی حـــاوی جریان الکتریکی قرار داد. ســـوزن در زاویه قائمه نســـبت به سیم منحرف شد. هنگامی که ارستد جهت جریان را تغییر داد، ســـوزن در جهت مخالف منحرف شـــد. کشف ارستد نتایج بسیار گسترده‌ای داشت و سرنخی از رابطه نزدیک و متقابل الکتریسیته و مغناطیس به دانشمندان داد. آندره ماری آمپر - ریاضی‌دان و فیزیک‌دان فرانسوی - مانند اکثر دانشمندان آن زمان اروپا شـــروع به بررسی تعامل این نیروها کرد. او در ســـال ۱۸۲۱ تئوری معروف خود را درباره الکترودینامیک، به شرح زیر، اعلام کرد:[۵]

I. دو قســـمت موازی مدار اگر جریان‌های هم‌جهت داشته باشـــد یک‌دیگر را جذب می‌کنند و اگر جریان‌هایشان خلاف جهت هم باشند، یک‌دیگر را دفع می‌کنند.

II. دو قســـمت از مدار کـــه از روی یک‌دیگر عبور می‌کنند، اگر جریان هر دو به ســـمت نقطه تقاطع بیاید یا هر دو از آن دور شـــود یک‌دیگر را جذب می‌کنند؛ ولی اگر جریان یکی به سمت نقطه بیاید و جریان دیگری از آن دور شود یک‌دیگر را دفع می‌کنند.

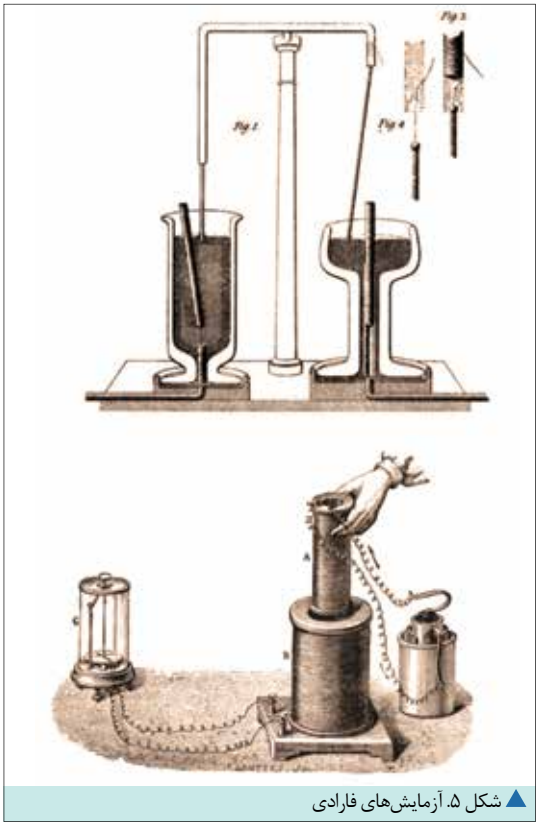
III. هنگامی که یک قسمت مدار بر قسمت دیگر نیرو وارد می‌کند، این نیرو تمایل دارد که قسمت دیگر را عمود بر جهت خودش هدایت کند.

آمپر همچنین یکی از اولین افرادی بود که به ســـاخت ابزار اندازه‌گیری الکتریکی فکر کرد. او با اســـتفاده از یک ســـوزن متحـــرک ابزاری برای اندازه‌گیری جریان الکتریکی ســـاخت که نهایتاً منجر به اختراع گالوانومتر توســـط یوهان شوایگر[۳۶] - شـــیمی‌دان و فیزیک‌دان آلمانی- شد. [۵] در سال ۱۸۲۶ جورج زیمون اهـــم[۳۷] - فیزیک‌دان آلمانـــی- قانون مقاومت الکتریکـــی (V=I.R) را در ژورنال[۳۸] شـــوایگر بیان کرد و در رساله[۳۹] برجسته‌اش نیز، در سال ۱۸۲۷ ، منتشر ساخت. واحد مقاومت الکتریکی (Ω) به افتخار او نام‌گذاری شده است. [۷]

در فیزیک نیوتنی قرن هجدهم و اوایل قرن نوزدهم، نیروها این‌گونه شـــناخته می‌شـــدند که در خط مستقیم از جسمی به جســـم دیگر عمل می‌کننـــد. پیر ســـایمون لاپلاس[۴۰] - ریاضی‌دان، فیزیک‌دان، و فیلســـوف فرانسوی- این موضوع را یک اصل اساســـی در فیزیک می‌دانســـت. ولی معلوم شد که نیروی الکترومغناطیسی از این اصل پیروی نمی‌کند و حالت **چرخشـــی** دارد. برخی از نظریه‌پردازان تلاش کردند تا این نیروهـــا را به حالت خاصی از نیروهـــای نیوتنی تقلیل دهند. اما مایکل فارادی -شـــیمی‌دان و فیزیک‌دان انگلیســـی- این ویژگی‌ها را به عنوان ویژگی‌های بنیادین در نظر گرفت. او در نوجوانی، هنگامی که در یک کتاب‌فروشی شاگردی می‌کرد، در سخنرانی‌های همفری دیوی در انجمن سلطنتی نیز شرکت می‌کرد. پس از مدتی خودش هم به عنوان دســـتیار دیوی به انجمن سلطنتی پیوست و کم‌کم شروع به سخنرانی و تدریس کرد. در نهایت کارهای او به طور چشمگیری عمیق‌تر از کارهای همفری دیوی از آب درآمد. او یک آزمایش‌گر بسیار دقیق بود که در زمینه‌های الکترومغناطیس و پیوند شـــیمیایی تحقیق می‌کرد. در دهه ۱۸۲۰ از او خواسته شد گزارشی از تاریخچه الکترومغناطیس تهیه کند. آن‌قدر کارهای زیادی در این زمینه انجام شده بود که برای فارادی سخت بود بفهمد چه کسی چه کاری را انجام داده اســـت. بنابراین او خودش همه آزمایش‌ها را تکرار کرد. [۶] آزمایش‌های مایکل فارادی در ســـال ۱۸۳۱ منجر به کشف قانون القای الکترومغناطیسی شد. او هنگامی به موفقیت دست یافت که دو سیم عایق‌بندی‌شده را به دور یک حلقه عظیم آهنی پیچید و مشاهده کرد که با عبور جریان از طریق یک سیم‌پیچ، یک جریان الکتریکی لحظه‌ای در سیم‌پیچ

ماکسول نیز پس از کامل کردن تحصیلات ریاضی‌اش در کمبریج، وارد عرصهٔ الکتریسیته شد و تحقیقات فاریدی فریبندهٔ فارادی در زمینهٔ جریان‌های الکتریکی و قطب‌های مغناطیسی توجهش را جلب کرد

دیگر القا می‌شود. او دریافت که اگر یک آهن‌ربا را درون حلقه سیم جابه‌جا کند -یا برعکس- یک جریان الکتریکی در سیم جریان می‌یابد. فارادی از این اصل برای ساخت دینام الکتریکی استفاده کرد. مدل ذهنی فارادی از خطوط شار منتشر شونده از اجسام باردار و آهن‌رباها زمینه‌ساز تعریف میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی شد. [۵] اگرچه فارادی ریاضیات زیادی بلد نبود، اما پایه و اســاس تئوری الکترومغناطیس را بنیان‌گذاری کرد. کشف او مبنی بر اینکه یک میدان مغناطیسی در حال تغییر باعث ایجاد میدان الکتریکی می‌شود، اگر به زبان ریاضی نوشته شود یکی از معادلات ماکسول است.



▲ شکل ۵. آزمایش‌های فارادی

پس از ارائهٔ قانون القای فارادی، هاینریش لنز[۴۱] - فیزیک‌دان آلمانی - روسی، قانون معروف خود را که به قانون لنز معروف اســت ارائه داد. او نتیجه مشاهدات خود را در سال ۱۸۳۳ در آکادمی علمی سنت‌پترزبورگ اعلام کرد. براساس این قانون اگر یک شار مغناطیسی در حال افزایش - یا کاهش - نیروی الکتریکی را القــا کند، جریان الکتریکــی حاصل در جهتی خواهد بود که با افزایش یا کاهش بیشــتر شــار مغناطیسی مخالفــت کند. قانون لنز در واقع تفســیر فیزیکی از علامت مثبت یا منفی در قانون القای فارادی است. [۵]

در سال ۱۸۴۲ ویلیام تامسون[۴۲] معروف به لرد کلوین[۴۳] - ریاضی‌دان و فیزیک‌دان و مهندس انگلیسی - در سن هجده ســالگی یک قیاس ریاضی بین میدان الکترواستاتیک و شار گرمایــی ارائه داد. این قیاس در واقع ســازگاری ریاضی بین **مدل میدان‌ها** - نسبت دادن یک کمیت فیزیکی از جنس عدد یا تانســور به هر نقطه از فضا - و مدل کنش از راه دور - اثر متقابل غیرموضعی اجسام در فضا، بدون اینکه با هم تماس فیزیکی داشته باشند - را نشان می‌دهد. [۶]

میدان	جسمی که نامتقارن گرم شده باشد
محیط دی‌الکتریک	جسم هدایت‌کنندهٔ گرمایی
رسانای الکتریکی	جسم هدایت‌کنندهٔ گرمایی ایده‌آل
حرکت ذرات از پتانسیل کمتر به بیشتر	جریان گرما از دمای بیشتر به دمای کمتر
سطح رسانا	سطحی که گرما وارد آن می‌شود
سطح رسانا	سطحی که گرما از آن خارج می‌شود
جسم باردار	جسم گرماگیر

کلوین همچنین در مقاله‌ای در سال ۱۸٤٦ روشی ریاضیاتی - عملگر کرل - را برای مدل‌سازی نحوهٔ پیچش نیروی مغناطیسی در اطراف سیم حامل جریان معرفی کرد. سبک توصیف کلوین از پدیده‌ها کاملاً فیزیکی بود. اما نسل بعد فیزیک‌دانان - مانند ماکســول - ترجیح دادند از مدل ریاضی به‌عنوان توصیف یک واقعیت فیزیکی ناشناخته استفاده کنند. [۶]

جیمز کلرک ماکسول - فیزیک‌دان اسکاتلندی- دو ماه پس از مرگ فارادی متولد شــد. در دهه ۱۸۵۰ که او دانشــجوی کمبریــج[۴۴] بود، الکترومغناطیس خــوراک رایج ریاضی‌دانان این دانشــگاه نبود. برنامه آموزشی آن‌ها روی علوم ریشه‌داری مانند مکانیک سماوی، اپتیک موجی و هیدرودینامیک متمرکز بود. دانشگاه‌های انگلستان حتی آزمایشگاه‌های آموزشی برای فیزیک هم نداشتند. ولی ماکسول در دیداری که در نوزده‌سالگی با لرد کلوین داشت توانست با نبوغ خود توجه او را جلب کند. کلوین که در آن زمان استاد جوانی در دانشگاه گلاسکو[۴۵] بود ماکسول را تشویق کرد تا در خانهٔ روستایی‌شان، کریستال‌های حســاس به مغناطیس تولید کند. ماکسول نیز پس از کامل کردن تحصیلات ریاضی‌اش در کمبریج، وارد عرصهٔ الکتریسیته شد و تحقیقات فریبندهٔ فارادی در زمینهٔ جریان‌های الکتریکی و قطب‌های مغناطیسی توجهش را جلب کرد. کلوین هم که از قبل روی این معماها کار می‌کرد، او را راهنمایی کرد. سرانجام ماکسول و دیگر فارغ‌التحصیلان توانستند به جنگ الکتریسیته بروند. همه‌چیز در زمان مناسب رخ داد. [۸]

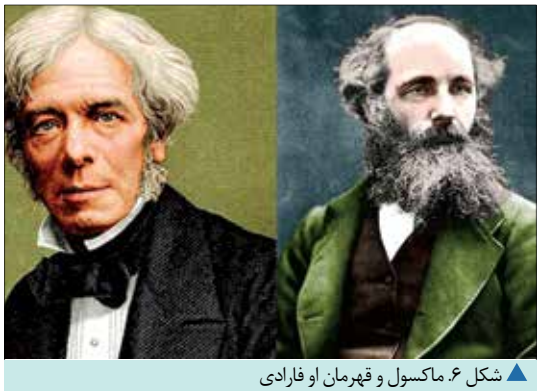
ماکسول سرانجام در سال ۱۸٦۵ مقاله معروف خود را منتشر کرد: «یک تئــوری دینامیکی در باب الکترومغناطیس». او در این مقاله معادلاتی را که به نام خودش «معادلات ماکســول» نــام گرفت بیان کرد و نشــان داد که میدان‌هــای الکتریکی و مغناطیســی دو جنبه مکمل از الکترومغناطیس هستند. او

فارادی معتقد بود که نور نیز سرشت الکتریکی دارد. تئوری ماکسول تأییدی درخشان برای این فرضیه فراهم کرد و به زودی اپتیک - یعنی مطالعه عدسی‌ها، آینه‌ها، منشورها، تداخل و پراش- نیز در بحث الکترومغناطیس گنجانده شدند

قوانین اساسی حوزه الکترومغناطیس را در یک پاورقی به صورت زیر نوشت:

I. نیروی الکتریکی در یک نقطه تمایلی به انحراف به سمت داخل یا خارج ندارد.
II. نیروی مغناطیسی در یک نقطه تمایلی به انحراف به سمت داخل یا خارج ندارد.
III. با تغییرات نیروی مغناطیسی، یک نیروی الکتریکی چرخشی پادساعت‌گرد در اطراف آن پیچیده می‌شود.
IV. با تغییرات نیروی الکتریکی، یک نیروی مغناطیسی چرخشی ساعت‌گرد در اطراف آن پیچیده می‌شود.

گزاره‌های اول و دوم بیان می‌کنند که این خود میدان است - و نه بارهای داخل میدان - که دیورژانس ایجاد می‌کند. در گزاره‌های سوم و چهارم نیز یک ثابت قابل محاسبه وجود دارد که تغییرات میدان‌ها در فضا را به تغییرات در زمان مربوط می‌کند. ماکسول با استفاده از این ثابت، سرعت ارتعاش میدان‌های الکترومغناطیسی را ۳۱۰۷۴۰۰۰۰ متر بر ثانیه به دست آورد و نوشت: «این سرعت به قدری به سرعت نور نزدیک است که به نظر می‌رسد دلیل محکمی داریم تا نتیجه بگیریم نور یک آشفتگی الکترومغناطیسی به شکل امواج منتشر شده از طریق میدان‌ها با قوانین الکترومغناطیس است.» به خاطر مرگ زودرس ماکسول (۱۸۷۹-۱۸۳۱) به دلیل سرطان روده، دفاع از کار او به چند دانشمند جوان[۴۶] سپرده شد. آن‌ها از سودمندی تئوری ماکسول در کاربردهای عملی در صنایع جدید الکتریکی حمایت کردند و نسخهٔ جدیدی از این تئوری را با زبان آنالیز برداری بیان کردند. [۶]


شکل ۶. ماکسول و فهرمان او فارادی

در سال ۱۸۸۷ هاینریش هرتز - فیزیک‌دان آلمانی - وقتی به‌عنوان دانشیار در دانشگاه کیل[۴۷] مشغول بود، در مجموعه‌ای از آزمایش‌ها توانست موج الکترومغناطیسی تولید کند. هرتز که خودش از شاگردان هرمان فون هلمهولتز[۴۸] - فیزیک‌دان آلمانی - بود، نشان داد که این امواج همان‌طور که ماکسول و فارادی پیش‌بینی کرده بودند، در فضای آزاد و به صورت عرضی منتشر می‌شوند. او سرعت امواج الکترومغناطیسی را نیز اندازه‌گیری کرد و با آزمایش‌هایش بازتاب، شکست، قطبش و تداخل این امواج را توضیح داد. استاد او هلمهولتز، وقتی می‌خواست خبر این کشف را به جامعهٔ فیزیک برلین اعلام کند، گفت:«آقایان! امروز باید خبر مهم‌ترین اکتشاف قرن را به شما برسانم.»[۶]

فارادی معتقد بود که نور نیز سرشت الکتریکی دارد. تئوری ماکسول تأییدی درخشان برای این فرضیه فراهم کرد و به زودی اپتیک - یعنی مطالعه عدسی‌ها، آینه‌ها، منشورها، تداخل و پراش- نیز در بحث الکترومغناطیس گنجانده شدند. هرتز[۴۹] که با آزمایش‌های قاطع خود در سال ۱۸۸۸ میلادی بر تئوری ماکسول مهر تأیید زد، این مطلب را چنین شرح داد: «حال ارتباط بین نور و الکتریسیته محرز است ... در هر شعله، در هر ذرهٔ منوّر، یک فرایند الکتریکی مشاهده می‌کنیم ... از این‌رو قلمرو الکتریکی بر سرتاسر طبیعت گسترده است. حتی بر خود ما هم تأثیرگذار است: به این دلیل آن را درک می‌کنیم که دارای ... ابزاری الکتریکی به نام چشم هستیم.»[۹] بدین ترتیب تا سال ۱۹۰۰ میلادی سه شاخهٔ عمدهٔ فیزیک یعنی الکتریسیته، مغناطیس و اپتیک در یک تئوری واحد گنجانده شدند. کمی بعد هم آشکار شد که نور مرئی تنها یک پنجره باریکی از طیف وسیع تابش الکترومغناطیسی را - که از امواج رادیویی، میکروموج‌ها، پرتوهای فروسرخ و فرابنفش، تا پرتوهای x و گاما تشکیل شده‌اند - به نمایش می‌گذارد.

۴. الکترومغناطیس و نظریه‌های فیزیک در قرن بیستم

مفاهیم نظری الکترومغناطیس منجر به ارائهٔ نظریهٔ نسبیت خاص توسط آلبرت اینشتین در سال ۱۹۰۵ شد. نسبیت خاص نظریه‌ای فیزیکی دربارهٔ اندازه‌گیری در چارچوب‌های مرجع لخت است که در سال ۱۹۰۵ میلادی توسط آلبرت اینشتین - فیزیک‌دان آلمانی - مطرح شد. اینشتین این اصل را با در نظرگرفتن پدیده سرعت ثابت نور گسترش داد؛ پدیده‌ای که به تازگی در آزمایش مایکلسون - مورلی[۵۰] مشاهده شده بود. او همچنین بیان نمود که این اصل برای تمام قوانین فیزیک - که در آن زمان شامل قوانین مکانیک و الکترومغناطیس می‌شد - صادق است. [۱۰]

تئوری الکترومغناطیس با نسبیت خاص سازگار است. معادلات ماکسول تحت تبدیلات لورنتس - معادلات تبدیل در نسبیت خاص - ناوردا (معادل فرهنگستان برای Invariant) هستند و نیازی به اصلاح ندارند. در واقع لورنتس معادلات تبدیل خود را در ابتدا با تکیه بر لزوم ناوردایی معادلات ماکسول به دست آورد. در بیانیه‌ای که اینشتین

تئوری الکترومغناطیس با نسبیت خاص سازگار است. معادلات ماکسول تحت تبدیلات لورنتس - معادلات تبدیل در نسبیت خاص - ناوردا (معادل فرهنگستان برای Invariant) هستند و نیازی به اصلاح ندارند

در سال ۱۹۵۲ برای کنفرانس بزرگداشت صدمین سال تولد مایکلسون فرستاد نوشت:

«تأثیر تجربهٔ سرنوشت‌ساز مایکلسون - مورلی روی کوشش‌های من نسبتاً غیرمستقیم بوده است. من از طریق بررسی قاطع لورنتس در مورد الکترودینامیک اجسام متحرک در سال ۱۸۹۵ که قبل از گسترش نظریه نسبیت خاص با آن آشنا بودم، از این تجربه آگاه شدم ... چیزی که مرا کم و بیش مستقیماً به نظریه نسبیت خاص هدایت کرد این اعتقاد بود که نیروی متحرک الکتریکی وارد بر یک جسم متحرک در داخل یک میدان مغناطیسی چیزی جز میدان الکتریکی نیست.'' [۱۱]

اینشتین سال‌های پایانی عمرش را در جستجوی **نظریه همه‌چیز** گذراند، اما متأسفانه تلاشش به نتیجه نرسید. نظریه همه‌چیز به نظریه‌ای اطلاق می‌شود که بتواند هر چهار نیروی بنیادی طبیعت -گرانش، هسته‌ای قوی، هسته‌ای ضعیف و الکترومغناطیس- را با هم متحد کند. چنین چیزی تاکنون به طور کامل تحقق نیافته است، زیرا گرانش نیروی سرکشی است که به این راحتی در قاب سه نیروی دیگر جا نمی‌گیرد. توصیفی که در فیزیک ذرات برای یک‌پارچه‌سازی دو نیروی الکترومغناطیسی و هسته‌ای ضعیف به کار می‌رود، نیروی الکتروضعیف نام دارد. این به آن معناست که ریاضیات حاکم بر نیروهای ضعیف و الکترومغناطیسی یکسان هستند. هر دو نیرو با تقارن ریاضی یکسانی مقید می‌شوند و بازتاب متفاوتی از یک نظریه اساسی و واحد هستند. تقارن، به‌واسطه برهم‌کنش میدان هیگز[51] با ذرات حامل نیروی ضعیف به طور خودبه‌خود می‌شکند، نه به خاطر برهم‌کنش با ذره‌های حامل نیروی الکترومغناطیسی. این شکست خودبه‌خود تقارن طبیعت، باعث می‌شود که این دو نیرو به عنوان دو نیروی مجزا و جداگانه در مقیاس‌هایی که ما می‌توانیم اندازه‌گیری کنیم ظاهر شوند: با کوتاه‌برد بودن نیروی ضعیف و بلندبرد ماندن نیروی الکترومغناطیسی. اگرچه این دو نیرو در انرژی‌های پایین کاملاً متفاوت رفتار می‌کنند، اما در انرژی‌هایی با گسترهٔ ۱۰۰ گیگاالکترون ولت یکی می‌شوند که همان نیروی الکتروضعیف پیش‌گفته است. بنابراین مدت کوتاهی پس از بیگ‌بنگ که کیهان به حد کافی داغ بوده است -تقریباً ۱۰۱۵ کلوین- این دو نیرو یکی بوده‌اند. [۱۲] از افرادی که بر روی یک‌پارچه‌سازی این دو نیرو کار کردند می‌توان به شلدون گلاشو، استیون واینبرگ و عبدالسلام[52] اشاره کرد که برای کارشان برنده جایزه نوبل فیزیک در سال ۱۹۷۹ میلادی شدند. اوج تلاش برای این وحدت به دهه ۱۹۸۰ و تئوری ابرریسمان مربوط می‌شود -که براساس آن تمام چهار نیرو را در یک تئوری خلاصه می‌کند. در هر مرحله از این سلسله‌مراتب، مشکلات ریاضی افزون و گاف بین نظریه‌ها و آزمون آزمایشگاهی وسیع‌تر می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

1. Hans Christian Orsted
2. André-Marie Ampère
3. Michael Faraday
4. James Clerk Maxwell
5. Hendrik Lorentz
6. Unification
7. $\nabla \times B = \frac{1}{C^2}\frac{\partial E}{\partial t} + \mu . J_{tot}$, $\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$, $\nabla . B = 0$, $\nabla . E = \frac{1}{\epsilon_0}\rho_{tot}$
8. Sir Isaac Newton
9. Amber (ἤλεκτρον)
10. Magnetic iron ore (μαγνῆτις λίθος)
11. Shěn Kuò
12. Petrus Peregrinus de Maricourt
13. William Gilbert
14. Robert Boyle
15. Otto von Guericke
16. Christiaan Huygens
17. Principia
18. Stephen Gray
19. John Theophilus Desaguliers
20. Charles François de Cisternay du Fay
21. Benjamin Franklin
22. Leyden jar
23. Sir William Watson
24. John Michell
25. Queens' College, University of Cambridge
26. Henry Cavendish
27. Charles-Augustin de Coulomb
28. Luigi Galvani
29. Alessandro Volta
30. Napoléon Bonaparte
31. Légion d'honneur
32. Sir Humphry Davy
33. Immanuel Kant
34. Critique of Pure Reason
35. Metaphysical Foundations of Natural Science
36. Johann Schweigger
37. Georg Simon Ohm
38. Für Chemie und Physik
39. Die galvanische Kette mathematisch bearbeitet
40. Pierre-Simon Laplace
41. Heinrich Friedrich Emil Lenz
42. William Thomson
43. Lord Kelvin
44. University of Cambridge
45. University of Glasgow
46. F.S. FitzGerald, O. Lodge and O. Heaviside, and later H. Hertz
47. University of Kiel
48. Hermann von Helmholtz
49. Heinrich Hertz
50. Michelson–Morley
51. Higgs field
52. Sheldon Glashow, Steven Weinberg, and Abdus Salam

منابع

[1] Whittaker, A history of the theories of aether and electricity, Dublin University Press series, 1910.
[2] J. L. Heilbron, A study of early Modern physics. University of California Press, 1979.
[3] David H. Clark, Stephen P. H. Clark, Newton's tyranny, New York: Freeman, 2001.
[4] The Encyclopædia Britannica, Electromagnetism: A Historical Survey, 2020.
[5] The Encyclopedia Americana, Electricity: its History and Progress, 1918.
[6] Nathan Camillo Sidoli, Waseda University, SILS, History of Modern Physical Sciences, 2019.
[7] Georg Simon Ohm, The Discovery of Ohm''s Law, Juliantrubin.com, Retrieved 15 November 2011.
[8] Simon Schaffer, The laird of physics, Nature 471, 289–291, 2011.
[9] Heinrich Rudolph Hertz, History, Institute of Chemistry, Hebrew Univ. of Jerusalem website. 2004.
[10] Edwin F. Taylor and John Archibald Wheeler, Spacetime Physics, 1992.
[11] R. S. Shankland, American Journal of Physics: Vol 32, No 1, 1964.
[12] Lawrence M. Krauss, A Brief History of the Grand Unified Theory of Physics, nautil.us, 2017.