

## شناسنامه

The Feynman Lectures on Physics, Vol. 1, Ch. 12

درسنامه‌های فیزیک فاینمن، جلد ۱، فصل ۱۲

مترجم: نوید علی اکبریان

ویراستار: یاسمین سادات پناهی

حروفچین: نگین باقری نقره‌ای

نسخه‌ی ۱۰۱ 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.

این صفحه از قصد خالی گذاشته شده است.

## فصل ۱۲

# ویژگی‌های نیرو

### ۱.۱۲ نیرو چیست؟

علی‌رغم اینکه مطالعه قوانین فیزیک برای درک و بهره‌مندی از طبیعت خود موضوعی جالب است و ارزش وقت‌گذاری را دارد، ولی باید هر از گاهی درباره این موضوع اندیشید که «این قوانین واقعاً چه معنایی دارند؟». همواره از دیرباز معنای حقیقی یک حکم برای فلاسفه مسئله‌ای جذاب بوده است و در مورد قوانین فیزیک این جذابیت دو چندان نیز می‌شود، چراکه معتقدند این قوانین بیانگر حقیقت دانش هستند؛ دانش به معنای مسئله‌ای عمیق در فلسفه. و همیشه واجب است که بپرسیم «این به چه معنا است؟». خوب است بپرسیم «معنای قوانین حرکت نیوتون، که ما آن را به نحو  $F = ma$  می‌نویسیم چیست؟ معنای نیرو، جرم و شتاب چیست؟». بسیار خوب، ما به‌طور شهودی می‌توانیم معنای جرم<sup>۱</sup> را درک کنیم و می‌توانیم با دانستن معنای مکان و زمان، شتاب<sup>۲</sup> را نیز تعریف کنیم. هدف ما بحث درباره این کمیات نیست؛ بلکه باید بر مفهوم جدیدی به نام نیرو<sup>۳</sup> تمرکز کنیم. پاسخ به همان اندازه آسان است: «اگر جسمی شتاب بگیرد، بنابراین تحت اثر نیرویی است». این همان چیزی است که قانون نیوتون بیان می‌کند. لذا دقیق‌ترین و زیباترین تعریف نیرو به سادگی قابل تصور است. نیرو برابر است با حاصلضرب جرم یک جسم در شتاب آن. فرض کنید ما قانونی داریم که می‌گویید هنگامی که مجموع نیروهای خارجی وارد بر یک جسم برابر صفر باشد، تکانه<sup>۴</sup> آن جسم ثابت است. خوب این سوال مطرح می‌شود که «معنای صفر شدن نیروهای خارجی چیست؟». یک راه پسندیده برای تعریف این عبارت این است: «وقتی تکانه کل ثابت باشد، مجموع نیروهای وارده برابر صفر است». ولیکن در اینجا یک اشتباهی نهفته است، چراکه در حقیقت هیچ چیز جدیدی بیان نشده. اگر ما قانونی بنیادین کشف کرده‌ایم که بیان می‌دارد نیرو برابر

<sup>1</sup>Mass

<sup>2</sup>Acceleration

<sup>3</sup>Force

<sup>4</sup>Momentum

است با جرم ضربدر شتاب و سپس تعریف کنیم که نیرو حاصلضرب جرم در شتاب است در حقیقت ما به هیچ چیز جدیدی دست نیافته‌ایم. همچنین می‌توان نیرو را اینگونه تعریف کرد که اگر به جسم متحرکی نیرو وارد نشود با سرعتی ثابت بر خط مستقیم در حال حرکت خواهد بود. اگر ما جسمی را مشاهده کنیم که حرکتی متفاوت از حرکت فوق داشته باشد، می‌توانیم بگوییم یقیناً تحت اثر نیرویی است. اما چنین تعریف‌هایی قطعاً نمی‌توانند از مفاد فیزیک باشند چراکه این‌ها تعریف‌هایی دایره وار هستند. اگرچه بیان نیوتونی بالا به نظر مختصر و مفیدترین تعریف نیرو است و برای یک ریاضی دان بسیار جذاب است، با این وجود کاملاً تعریفی غیر کاربردی است، چراکه ابداً هیچ پیش‌بینی نمی‌توانند زاده‌ی تعریف باشد. ممکن است فردی تمام روز بر صندلی خود لم دهد و کلمات را معنی کند. اما درک این مطلب که هنگام برخورد دو توپ به یکدیگر و یا زمانی که وزنه‌ای به یک فنر آویخته شده چه رخ می‌دهد به کلی امری مجزا است؛ چراکه چگونگی رفتار فیزیکی اجسام، موضوعی، کاملاً خارج از اختیارات تعاریف ما است.

برای مثال اگر بخواهیم بگوییم که هنگامی که جسمی را به حال خود رها می‌کنیم مکانش را حفظ می‌کند و حرکت نخواهد کرد. پس وقتی جسمی را در حال حرکت مشاهده می‌کنیم می‌توانیم بگوییم این ناشی از یک «میرو» است — میرو را نرخ تغییر مکان تعریف می‌کنیم — اکنون ما یک قانون جدید و شگفت‌انگیز داریم؛ همه چیز در حال سکون است مگر اینکه میرویی در کار باشد. همان طور که مشاهده می‌کنید این تعریف درست مشابه تعریف ذکر شده برای نیرو است و حاوی هیچ اطلاعات جدیدی نیست. مفهوم حقیقی قوانین نیوتون این است که: نیرو پدیده‌ای است که علاوه بر قانون  $F = ma$  دارای خواص مستقل دیگری است؛ اما خواص مستقل ویژه آن، به‌طور کامل نه توسط نیوتون و نه هیچ شخص دیگر توصیف نشده‌اند، بنابراین، قانون  $F = ma$  یک حکم ناقص است و بیانگر این امر است که اگر حاصلضرب جرم در شتاب را مورد مطالعه قرار دهیم و این حاصلضرب را نیرو بنامیم، و یا اگر ویژگی‌های نیرو را به عنوان یک علاقه مطالعه کنیم، نیروها را ساده و بی‌آلایش خواهیم یافت. این قانون توضیح مناسبی برای حقیقت نیرو است. این پیشنهادی برای مفهوم نیرو است که بر اساس آن نیرو مفهومی آسان خواهد بود.

اولین مثال از نیرو، گرانش<sup>۵</sup> است که توسط نیوتون ارائه شد و در توضیح این قانون به پرسش «نیرو چیست؟» پاسخ داد. اگر هیچ چیز جز گرانش نباشد، ترکیب این قانون و قانون نیرو (قانون دوم حرکت) یک نظریه کامل می‌بود. اما چیزهایی فراتر از گرانش موجود است و ما می‌خواهیم قوانین نیوتون را در وضعیت‌های متفاوتی به کار ببریم. لذا برای پیشروی، ما باید درباره‌ی خصایص نیرو صحبت کنیم. برای مثال در برخورد با نیرو این گونه فرض می‌شود که همواره نیرو برابر صفر است مگر در صورتی که جسمی موجود باشد. پس اگر ما با نیرویی مواجه شدیم باید در اطراف آن در جستجوی چیزی باشیم و آن منبع نیرو است. این فرض کاملاً متفاوت با مفهوم «میرو» است که پیش‌تر آن را معرفی نموده‌ایم. یکی از اهم خصیصه‌های نیرو وجود یک منشأ مادی برای آن است و این صرفاً یک تعریف نیست.

<sup>5</sup>Gravitation

نیوتون همچنین قانون دیگری در ارتباط با نیرو ارائه داده است که بیان می‌کند: نیروهای برهم‌کنشی بین اجسام، برابر و در جهت مخالف اند—برابری کنش و واکنش—. البته این قانون کاملاً صحیح نیست. در حقیقت قانون  $F = ma$  هم کاملاً صحیح نیست. اگر یک تعریف صرف می‌بود صحیح بود و ما مجبور بودیم بگوییم همیشه صحیح است اما این طور نیست.

ممکن است دانشجو اعتراض کند که: «این عدم دقت برای من نامطلوب است. من می‌خواهم همه چیز به دقت تعریف شود. چرا که در بعضی کتاب‌ها گفته شده هر شاخه از علم موضوعی دقیق است که در آن همه چیز تعریف شده». اگر شما مُصر به دنبال تعریفی دقیق از نیرو باشید هرگز آن را نخواهید یافت! اولاً به این علت که قانون دوم نیوتون دقیقاً صحیح نیست و ثانیاً برای درک قوانین فیزیکی باید این نکته را به یاد داشته باشید که همگی آن‌ها به نوعی چیزی جز تقریب نیستند.

هر اندیشه‌ای تقریبی است؛ همانند تصویری از یک شیء. آن شیء چیست؟ فلاسفه همیشه می‌گویند: «خب، به عنوان مثال یک صندلی را متصور شوید». نکته همین جا است. آن‌ها خودشان هم اصلاً نمی‌دانند دقیقاً درباره چه چیزی صحبت می‌کنند. صندلی چیست؟ خب، صندلی شیئی است مشخص. مشخص؟ چگونه مشخص؟ اتم‌های آن هر لحظه در حال تبخیراند (نه همه آن‌ها، فقط تعداد اندکی). غبار بر روی آن می‌نشیند و با رنگش مخلوط می‌شود. لذا تعریف دقیق یک صندلی و بیان دقیق اینکه کدام اتم‌ها جزء صندلی، کدام جزء هوا یا کدام غبار و کدام رنگ بدنه صندلی هستند امری محال است. چرا که هیچ جزء منزوی و منفردی وجود ندارد. هر شیئی ترکیبی از بی شمار جزء است. پس ما فقط قادر به احتساب آن‌ها به عنوان یک تقریب و تصویری ایده آل هستیم.

رمز کار در همین ایده آل پنداری است. با تقریب بسیار قابل قبول ۱ در  $10^{10}$  تعداد اتم‌های صندلی در گذر زمان تغییر نمی‌کنند. و اگر ما بیش از اندازه ریزبین نباشیم احتمالاً می‌توانیم صندلی را به عنوان یک شیء تعریف شده تلقی کنیم. درست به همین صورت بایستی به طریق ایده آل درباره ویژگی‌های نیرو بیندیشیم. ممکن است فردی از نگرش تقریبی درباره طبیعت که فیزیک همواره به دنبال ایجاد آن بوده (تلاشی پایسته برای افزایش دقت اینگونه تقریب‌ها). ناراضی باشد و تعاریف ریاضی را ترجیح دهد؛ لکن تعاریف ریاضی در جهان واقعی ناکارآمدند. این تعاریف فقط مناسب دنیای ریاضیاتند چرا که استدلال در سرتاسر قلمرو آن دنبال می‌شود. اما جهان فیزیکی پیچیده است؛ همان طور که در چند مثال مانند امواج دریا و پیاله شراب نشان دادیم. هنگامی که ما سعی بر آن داریم قطعه‌ای از آن را جدا کنیم یا راجع به یک جسم صحبت کنیم — مثلاً لیوان و شراب — چگونه وقتی یکی در دیگری حل شده می‌توانیم تشخیص دهیم که کدام یک، کدام است؟ نیروهای وارد بر یک جسم نیز دارای تقریب‌هایی هستند و اگر ما بخواهیم درباره مجموعه‌ای از عالم واقعیت صحبت کنیم بلاشک آن مجموعه باید با تقریباتی از این قبیل عجین باشد؛ حداقل با دانش امروزی ما اینگونه است.

این کاملاً بیگانه با ریاضیاتی است که در آن همه چیز قابل تعریف است و ما نمی‌دانیم دقیقاً در حال صحبت راجع به چه موضوعی هستیم. فی الواقع شکوه ریاضیات در همین است که ما مجبور

نیستیم بگوییم دقیقاً درباره چه چیزی صحبت می‌کنیم. شکوه این است که قوانین، براهین و منطق، مستقل از این هستند که موضوع مورد بحث چیست اگر ما هر مجموعه‌ی دیگری داشته باشیم مانند هندسه اقلیدسی<sup>۶</sup> که اعضای آن از اصول مشخصی پیروی کنند، اگر بر اساس منطق و استدلال تعریفاتی انجام دهیم تمامی نتایج به دست آمده صحیح است و هیچ فرقی نمی‌کند که موضوع آن چیست. اما در طبیعت هنگامی که خطی رسم می‌کنیم یا توسط دوربین مهندسی و پرتو نور خطی ایجاد می‌کنیم آیا هنگام اندازه‌گیری آن به معنای اقلیدسی اندازه‌گیری می‌کنیم؟ البته که نه. ما تقریب می‌زنیم. یک تار مو هم حتی ضخامتی دارد در صورتی که یک خط هندسی فاقد ضخامت است؛ بنابراین چه هندسه اقلیدس برای اندازه‌گیری به کار رود چه نه، یک مسئله فیزیکی، پرسشی ریاضیاتی نیست. ولیکن از نقطه نظر تجربی و نه ریاضیاتی ما محتاج دانستن این هستیم که آیا احکام هندسه اقلیدس مناسب اندازه‌گیری‌های ما هستند یا نه پس ما قضیه‌ای را بنا می‌کنیم و مشاهده می‌کنیم که تقریباً به خوبی کار می‌کند اما دقیق نیست چراکه خطوط اندازه‌گیری شده‌ی ما واقعاً خطوط هندسی نیستند. اینکه آیا این خطوط اقلیدسی را، که کاملاً انتزاعی هستند، می‌توان به جای خطوط تجربی به کار برد یا نه پرسشی برای تجربه است که پاسخ محرز ندارد.

مشابه‌ها ما نمی‌توانیم  $F = ma$  را یک تعریف بنامیم، همه چیز را ریاضیاتی تلقی کنیم و مکانیک را نظریه‌ای ریاضیاتی متصور شویم. چراکه مکانیک توصیفی واقعی از طبیعت است. همواره می‌توان با بهره‌گیری از استدلال‌های منطقی، نظامی ریاضیاتی تولید نمود. مانند کاری که اقلیدس کرد. اما ما نمی‌توانیم ریاضیات جهان را تولید کنیم. زیرا دیر یا زود به این پرسش بر می‌خوریم که آیا فرضیاتی که اختیار کرده‌ایم برای اجسام طبیعی نیز معتبرند یا خیر. پس نهایتاً با اجسام پیچیده و « زشت » طبیعت درگیر خواهیم شد. ولیکن تقریب، همیشه در افزایش دقت موثر خواهد بود.

## ۲.۱۲ اصطکاک<sup>۷</sup>

توجه به موارد فوق نشان می‌دهد که درک صحیح قوانین نیوتون مستلزم بررسی نیرو است و هدف این فصل چنین بررسی‌ای به عنوان تکمیل قوانین نیوتون است. ما پیش‌تر تعریف شتاب و دیگر مفاهیم مرتبط را مورد مطالعه قرار داده‌ایم. اکنون زمان بررسی خواص نیروها است. همچنین به علت پیچیدگی بیش از اندازه‌ی نیروها، مطالعات ما در این فصل بر خلاف فصل قبل از دقت بالایی برخوردار نیست. به عنوان اولین نیرو، اجازه دهید نگاهی به نیروی اصطکاک<sup>۸</sup> وارد بر یک هواپیمای در حال پرواز بیندازیم. چه رابطه‌ای برای این نیرو موجود است؟ (یقیناً برای هر نیرویی قانونی وجود دارد. باید رابطه‌ای داشته باشیم!) ممکن است کسی به شدت معتقد باشد که قاعده این نیرو بسیار ساده است. سعی کنید تصور کنید چه چیزهایی می‌توانند یک هواپیمای در حال پرواز را تحت تاثیر نیروی خود قرار دهند.

<sup>6</sup>Euclid's Geometry

<sup>8</sup>Drag Force

<sup>7</sup>Friction

فشار هوای وارد شده به بال‌ها، چرخش باله عقب، هر تغییر اطراف هواپیما و بسیار پیچیدگی‌های دیگر. در نتیجه مشاهده می‌کنید که چندان هم قاعده ساده‌ای نیست. از سوی دیگر جالب توجه است که نیروی اصطکاک وارد بر هواپیما به طور تقریبی برابر است با حاصلضرب یک ثابت در مربع سرعت یا  $F \approx cv^2$ .

وضعیت این چنین قانونی چیست؟ آیا مشابه  $F = ma$  است؟ به هیچ وجه. اولاً به این علت که این رابطه یک رابطه کاملاً تجربی است که با آزمایش در تونل باد حاصل شده. شما می‌گویید: «بسیار خوب،  $F = ma$  هم به نوعی یک فرمول تجربی است». اما این نکته وجه تمایز این دو قانون نیست. تفاوت این نیست که یکی تجربی و دیگری حاصل مشاهده‌ی ما از طبیعت است. در حقیقت این فرمول حاصل پیچیدگی‌های بسیاری است و اساساً به هیچ عنوان چیز ساده‌ای نیست. اگر ما به مطالعه هر چه بیشتر آن ادامه دهیم و اندازه‌گیری‌هایمان را دقیق و دقیق‌تر کنیم این قاعده هم به سوی پیچیده شدن پیش می‌رود. به عبارت دیگر هر چه نیروی اصطکاک وارد بر یک هواپیما را دقیق و دقیق‌تر مطالعه کنیم، بیشتر متوجه می‌شویم که این رابطه نادرست است. هرچه عمیق‌تر شویم و با دقت بیشتری اندازه‌گیری کنیم، حقیقت برای ما پیچیده‌تر می‌شود. بنابراین ما نشان دادیم که این نتیجه یک امر ساده نیست که با گمانه زنی‌های ما تطابق داشته باشد. برای مثال، اگر سرعت آن قدر کم باشد که یک هواپیمای معمولی نتواند پرواز کند و فقط به آرامی توسط هوا هل داده شود، رابطه تغییر می‌کند و بستگی اصطکاک هوا به میزان سرعت به سمت خطی شدن میل می‌کند. یا به عنوان مثالی دیگر نیروی اصطکاک وارد بر یک توپ یا حباب یا هر چیز دیگری که درون یک سیال لزج مانند عسل به آرامی در حال حرکت است با سرعت متناسب است اما اگر این حرکت آنقدر سریع باشد که سیال را به چرخش وادارد (در مورد عسل این اتفاق نخواهد افتاد ولی در مورد هوا و آب چرا) آن‌گاه فرمول به سمت تناسب با توان دوی سرعت می‌رود ( $F = cv^2$ ). اگر سرعت بیش از حد افزایش یابد این فرمول دیگر کار نمی‌کند. کسانی که می‌گویند: «خب! به نوعی فقط ضریب است که قدری تغییر می‌کند». در حقیقت مغلطه می‌کند. ثانیاً پیچیدگی‌های دیگری نیز وجود دارد. آیا نیروی وارد بر هواپیما از نیروی وارد بر بال، دماغه و ... قابل تفکیک است؟ حقیقتاً بله. اگر که خیلی نگران گشتاورهای موجود باشیم می‌توانیم این کار را بکنیم. اما در این صورت باید به فکر قانونی ویژه و مجزا برای بال‌ها، دماغه یا ... باشیم. این امر که نیروی وارد بر یک بال متأثر از بال دیگر است واقعاً جالب است. به عبارت دیگر اگر ما اجزای هواپیما را از یکدیگر جدا کرده و برای مثال فقط یک بال ساکن را در هوا قرار دهیم نیروی وارد بر آن متفاوت با نیرویی است که به هواپیمای در حال سکون در هوا وارد می‌شود دلیلش هم واضح است؛ هوایی که به دماغه‌ی هواپیما اصابت می‌کند به اطراف بال‌ها کشیده شده و باعث تغییر نیروی وارد بر بال می‌شود. واقعاً اعجاب‌انگیز است که فرمولی چنین تجربی و شیوا می‌تواند در طراحی هواپیماها مورد استفاده قرار گیرد. لکن این قانون در رده‌ی قوانین بنیادین فیزیک نیست. به علاوه مطالعه‌ی هرچه بیشتر، آن را پیچیده و پیچیده‌تر می‌کند. بررسی نحوه بستگی ضریب به شکل هواپیما به جهت افزایش دقت این فرمول، کسل‌کننده است و قاعده صریحی برای تعیین ضریب  $c$ ، بر اساس شکل هواپیما در دست نیست. بر

خلاف گرانث که مطالعه‌ی هر چه بیشتر آن حاکی از سادگی آن است. ما فقط راجع به دو نوع اصطکاک صحبت کردیم؛ اصطکاک ناشی از حرکت سریع در هوا و اصطکاک ناشی از حرکت آهسته در عسل. اما نوع دیگری از اصطکاک نیز وجود دارد، به نام اصطکاک خشک<sup>۹</sup> یا اصطکاک جنبشی<sup>۱۰</sup>. این اصطکاک زمانی پدید می‌آید که جسم جامدی بر روی جسم جامد دیگری بلغزد. وجود این نیرو مستلزم تداوم حرکت است و منبع آن ماهیتی بسیار پیچیده دارد. هر دو سطح درگیر در مقیاس اتمی بسیار ناهموارند. در بسیاری از نقاط اتم‌های دو جسم به یکدیگر می‌چسبند و هنگامی که جسمی روی جسم دیگر شروع به حرکت می‌کند اتم‌ها به نحو مهبیبی با یکدیگر برخورد می‌کنند که منجر به بروز ارتعاشاتی در مجموعه می‌شود — چیزی شبیه به این باید رخ داده باشد — پیش‌تر مکانیسم چنین اصطکاک‌کی بسیار ساده به نظر می‌رسید. سطح اجسام صرفاً پر از ناهمواری و اصطکاک ناشی از برخورد جسم فوقانی به این دست اندازها است. اما نمی‌تواند اینگونه باشد. چراکه در این صورت نمی‌بایست هیچ انرژی‌ای تلف شود. حال آنکه در واقعیت در این اثنا توان مصرف می‌شود. اتلاف توان به این علت اتفاق می‌افتد که جسم متحرک به ناهمواری‌های جسم زیرین ضربه وارد می‌کند و و این ضربه، باعث تغییر شکل این ناهمواری‌ها می‌شود که این امر خود موجب گسیل امواج و حرکت‌های اتمی و پس از مدتی ایجاد گرما در دو جسم می‌شود. مجدداً این نوع از اصطکاک هم، بنا بر تجربه توسط یک قانون بسیار ساده قابل توصیف است و این امری حائز اهمیت است. این قانون بیان می‌کند که برای حرکت جسمی بر روی جسم دیگر نیرویی لازم است تا بر اصطکاک غلبه کند و این نیرو متناسب با نیروی عکس‌العمل سطح<sup>۱۱</sup> (نیروی عمود بر سطح) مابین دو سطح است. در حقیقت با یک تقریب منصفانه و مطلوب، نیروی اصطکاک نیز متناسب با این نیروی عکس‌العمل سطح است و یک ضریب ثابت کوچک یا بزرگ این تناسب را به تساوی بدل می‌کند که به صورت رابطه‌ی زیر است:

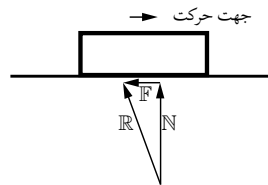
$$F = \mu N, \quad (1.12)$$

که در آن به  $\mu$  ضریب اصطکاک<sup>۱۲</sup> گفته می‌شود (شکل ۱.۱۲). اگرچه ضریب اصطکاک در حقیقت مطلقاً ثابت نیست ولیکن این فرمول، قانون تجربی مناسبی برای محاسبه مقدار تقریبی مورد نیاز در یک رویداد عملی و مهندسی است. اگر نیروی عمودی سطح و یا سرعت بیش از حد بزرگ باشند این قانون محکوم به شکست است. چراکه گرمای بسیار زیادی تولید می‌شود. بسیار حائز اهمیت است که از یاد نبریم هرکدام از این قوانین تجربی در محدوده‌ی مشخصی از شرایط معتبرند. و خارج از آن‌ها کارآمد نخواهند بود.

صحت تقریبی رابطه‌ی  $F = \mu N$  با یک آزمایش ساده قابل تأیید است. ابتدا یک سطح مسطح و شیب‌دار با زاویه‌ی کوچک  $\theta$  فراهم می‌آوریم و جسمی به وزن  $W$  روی آن قرار می‌دهیم. زاویه را آنقدر افزایش می‌دهیم تا جسم فقط تحت تأثیر نیروی وزن خود شروع به حرکت کند. مؤلفه نیروی وزن در راستای سطح شیب‌دار برابر  $W \sin \theta$  است. چنان چه جسم به صورت یکنواخت حرکت کند، این مؤلفه می‌بایست با نیروی اصطکاک برابر باشد. مؤلفه نیروی وزن در راستای عمود بر سطح شیب‌دار

<sup>9</sup>Dry Friction<sup>10</sup>Sliding Friction<sup>11</sup>Normal Force<sup>12</sup>Coefficient of Friction





شکل ۱.۱۲: رابطه‌ی بین نیروی اصطکاک و نیروی عمود بر سطح برای یک جسم در حال حرکت

نیز  $W \cos \theta$  است که برابر نیروی عکس العمل سطح،  $N$  است. با احتساب این مقادیر، فرمول  $W \sin \theta = \mu W \cos \theta$  حاصل می‌شود. بر این اساس در می‌یابیم که، اگر این قانون کاملاً صحیح باشد، یک جسم درست در زاویه‌ای مشخص شروع به سُرخوردن می‌کند. اگر به جسم مورد نظرمان وزنه اضافه کنیم، اگرچه  $W$  سنگین‌تر شده اما تمامی نیروهای فرمول به یک نسبت افزایش یافته‌اند و  $W$  از طرفین معادله ساده خواهد شد. اگر  $\mu$  ثابت باشد دوباره جسم در همان شیب شروع به لغزش خواهد کرد. اینکه زاویه  $\theta$  به کمک آزمایش با وزنه‌ی اولیه، تعیین شده نشانگر این است که وزنه‌های متفاوت نیز حدوداً در همان زاویه حرکت خواهند کرد و این قضیه حتی اگر جسمی ده‌ها بار سنگین‌تر باشد نیز صحیح است. بنابراین نتیجه می‌گیریم که ضریب اصطکاک مستقل از وزن اجسام است.

درحین انجام این آزمایش این نکته قابل توجه است که وقتی سطح شیب‌دار به زاویه‌ی مشخص  $\theta$  می‌رسد، جسم به صورت یکنواخت سُرخورد و طی حرکتی نامنظم پایین می‌آید. ممکن است در نقطه‌ای متوقف شود و یا در نقطه‌ای با شتاب حرکت کند و این حاکی از آن است که ثبات ضریب اصطکاک کاملاً تقریبی بوده و می‌تواند در نقاط مختلف متفاوت باشد. این تفاوت چه در هنگامی که جسم را سنگین کرده باشیم و چه در هنگامی که سنگین نکرده باشیم قابل مشاهده است. چنین تفاوت‌هایی ناشی از تغییر درجات سختی، نرمی، آلودگی، زنگ زدگی و موضوعات خارجی دیگر است. جدول‌هایی که میزان  $\mu$  را برای «استیل بر استیل»، «مس بر مس» و مشابه این‌ها نشان می‌دهند تماماً نادرست‌اند چرا که از عوامل بیان شده در بالا که مشخص کننده میزان دقیق  $\mu$  هستند چشم‌پوشی می‌کنند. اصطکاک هرگز به علت وجود «مس بر مس» و ... نیست بلکه به علت ناهمواری‌های موجود بر سطح مس است.

در آزمایش‌های مشابه آزمایش مذکور نیروی اصطکاک تقریباً مستقل از سرعت است. بسیاری از مردم معتقدند که اصطکاکی که باید بر آن غلبه کرد تا جسم شروع به حرکت کند (اصطکاک ایستایی<sup>۱۳</sup>) قوی‌تر از اصطکاکی است که برای تداوم حرکت جسم باید بر آن غلبه نمود (اصطکاک جنبشی). اما در مواد خشک اظهار این تفاوت بسیار مشکل است. این عقیده احتمالاً از تجربیاتی نشئت می‌گیرد که پای روغن یا روان کننده دیگری در میان باشد و یا مواقعی که جسم در ارتباط با یک فنر یا جسم مرتجع دیگری باشد.

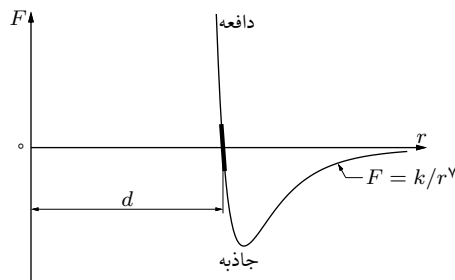
ارزیابی دقیق آزمایش‌های اصطکاک تقریباً ناممکن است و قوانین مربوط به اصطکاک هنوز هم به

<sup>13</sup>Static Friction

طور دقیق تشریح نشده‌اند؛ به رغم ارزش والایی که دیدگاه مهندسی برای ارزیابی دقیق قائل است. گرچه در صورت استاندارد بودن سطوح  $F = \mu N$  تخمین خوب و مناسبی است، اما دلیل اینگونه بودن این قانون دقیقاً درک نشده است. اثبات عدم بستگی تقریبی ضریب  $\mu$  به سرعت، محتاج تعدادی آزمایش ظریف است؛ چراکه اگر سطح زیرین به سرعت ارتعاش کند، اصطکاک ظاهری، بسیار کاهش خواهد یافت. اگر آزمایش در سرعت‌های بسیار بالا تکرار شود، باید توجه کنیم که اجسام نسبت به یکدیگر ارتعاش نخواهند داشت؛ زیرا کاهش ظاهری اصطکاک در سرعت‌های بالا اغلب به سبب ارتعاش آن‌ها است. قانون اصطکاک به هر شکلی که باشد نمودی از همان قوانین نیمه تجربی است که به‌طور کامل شناخته نشده‌اند و شگفت‌انگیز است که با وجود تمام تلاش‌های به عمل آمده، درک بیشتر این پدیده‌ها میسر نیست. درحقیقت در حال حاضر تخمین ضریب اصطکاک بین دو سطح امری غیرممکن است.

در بالا اشاره شد که تلاش برای اندازه‌گیری به روش حرکت دادن دو جسم خالص بر روی یکدیگر مانند مس بر روی مس منجر به نتایج ناصحیح می‌شود؛ چراکه سطوح در تماس با یکدیگر، به‌طور خالص مس نیستند و در حقیقت ترکیبی از اکسیدها و بقیه ناخالصی‌ها است. اگر سعی کنیم تا مس خالصی داشته باشیم، اگر سطوح را صیقل دهیم و از آلودگی پاک کنیم و در محیطی خلأ و بدون اتمسفر قرار دهیم و هرگونه احتیاط لازم را لحاظ کنیم کماکان به  $\mu$  دست نخواهیم یافت. چنانچه ما سطح را تا حد کاملاً عمودی شیب دهیم مشاهده می‌کنیم که جسم سقوط نخواهد کرد. — دو قطعه مس به یکدیگر خواهند چسبید! — ضریب  $\mu$  که معمولاً برای سطوح سخت و عادی کوچک‌تر از یک است، چندین برابر می‌شود! دلیل این رفتار غیرمنتظره این است که وقتی اتم‌های در تماس با یکدیگر تماماً از یک نوعند، هیچ راهی برای پی‌بردن به این موضوع که کدام یک برای این قطعه مسی و کدام یک عضو قطعه دیگر است وجود ندارد. هنگامی که پای اتم‌های دیگر مانند اکسید و چربی و یک لایه نازک و پیچیده از مواد آلاینده دیگر در میان باشد، اتم‌ها می‌دانند که هریک عضو کدام قطعه هستند. ما نشان دادیم که نیروهایی بین اتم‌های مس برقرار است که آن‌ها را به یکدیگر متصل می‌کند و این موضوع ایجاب می‌کند که محاسبه دقیق ضریب اصطکاک مواد خالص غیرممکن است.

با یک آزمایش خانگی بسیار ساده با استفاده از یک سطح صاف شیشه‌ای و یک لیوان شیشه‌ای می‌توان پدیده‌ای مشابه را مشاهده کرد. اگر لیوان روی سطح قرار گیرد و با استفاده از یک ریسمان کشیده شود، کاملاً عادی حرکت خواهد کرد و می‌توان ضریب اصطکاک را احساس کرد. شاید کمی نامنظم باشد اما کماکان ضریب اصطکاک حضور دارد. اکنون اگر کف لیوان و سطح را مرطوب کنیم و دوباره آزمایش را تکرار کنیم، مشاهده می‌کنیم که لیوان به سطح می‌چسبد و اگر نزدیک‌تر شویم متوجه ترک‌هایی خواهیم شد؛ زیرا آب، آلودگی‌ها و چربی‌ها را به بالا می‌رانند و ما پیوند مطلقاً شیشه به شیشه خواهیم داشت. این پیوند آن‌چنان محکم است که تا حد شکسته شدن لیوان در مقابل حرکت مقاومت می‌کند. که این مقاومت، باعث ایجاد ترک‌های یاد شده می‌شود.



شکل ۲.۱۲: تابع نیروی بین دو اتم بر حسب فاصله آنها

### ۳.۱۲ نیروهای مولکولی<sup>۱۴</sup>

در ادامه باید درباره نیروهای مولکولی سخن به میان آوریم. این نیروها، نیروهای بین اتم‌ها و منشأ اصلی اصطکاک هستند. نیروهای مولکولی هرگز بر پایه فیزیک کلاسیک به خوبی تشریح نشده‌اند و برای درک کامل آنها محتاج مکانیک کوانتومی<sup>۱۵</sup> هستیم. ولیکن به‌طور تجربی نیروی بین مولکولی به صورت نموداری در شکل ۲.۱۲ به تصویر کشیده شده است که در آن  $F$ ، نیروی بین دو اتم، برحسب، فاصله بین آنها، رسم شده است. انواع مختلفی از نیروی بین مولکولی موجود است. برای مثال در مولکول آب، بار منفی بیشتر بر اتم اکسیژن واقع شده و محل تجمع بارهای مثبت و منفی یک جا نیست. در نتیجه مولکول آب دیگری که در نزدیکی این مولکول قرار گرفته است، نیروی نسبتاً بزرگی احساس می‌کند که به آن نیروی دو قطبی-دوقطبی<sup>۱۶</sup> گفته می‌شود، اما برای بسیاری مواد، بارها در تعادل بهتری توزیع شده‌اند؛ مثلاً گاز اکسیژن که اتم هایش کاملاً متقارند؛ به این معنا که بار مثبت و منفی به‌طور یکسان توزیع شده‌اند. این توزیع به نحوی است که مرکز بارهای مثبت و منفی بر هم منطبق می‌شود. مولکولی را که مرکز بارهایش بر همدیگر منطبق نباشد، قطبی<sup>۱۷</sup> و حاصلضرب بار در فاصله مرکز بارها را گشتاور دو قطبی<sup>۱۸</sup> می‌نامند. مولکول ناقطبی<sup>۱۹</sup> مولکولی است که مرکز بارهای آن بر یکدیگر منطبق باشد. علی‌رغم اینکه نیروهای الکتریکی در مولکول‌های ناقطبی همدیگر را خنثی می‌کنند، این نیروها در فواصل بسیار دور به صورت جاذبه عمل می‌کنند و با توان هفتم معکوس فاصله متناسب است؛ یا  $F = k/r^7$ ، که در آن  $k$  یک ثابت وابسته به نوع مولکول است. دلیل این نوع تناسب را باید در مکانیک کوانتومی جست. هنگامی که مولکول دو قطبی باشد، این نیروها قوی‌تر می‌شوند. زمانی که اتم‌ها و یا مولکول‌های بیش از حد به یکدیگر نزدیک شوند، با دافعه‌ای بسیار عظیم همدیگر را عقب می‌زنند. این همان چیزی است که ما را از سقوط به طبقه پایین مصون می‌دارد!

نیروهای مولکولی را می‌توان به روش‌های نسبتاً مستقیمی نشان داد: یکی آزمایش اصطکاک

<sup>14</sup>Molecular Forces

<sup>15</sup>Quantum Mechanics

<sup>16</sup>Dipole-Dipole

<sup>17</sup>Polar Molecule

<sup>18</sup> Dipole Moment

<sup>19</sup>Non-polar Molecule

با لیوان شیشه‌ای و روش دیگر، آزمایش با دو سطح بسیار هموار و پرداخت شده است. به دلیل هموار بودن بسیار زیاد این سطوح، می‌توان آن‌ها را تا حد زیادی به یکدیگر نزدیک کرد. به عنوان مثال بلوک ژوهانسون<sup>۲۰</sup> از این قبیل سطوح است که در کارگاه‌های تراشکاری برای تولید طول‌های بسیار دقیق کارآمد است. اگر یکی از این بلوک‌ها کاملاً محتاطانه روی دیگری بلغزد، در هنگام بلند کردن جسم بالایی مشاهده می‌شود که جسم زیرین توسط نیروهای مولکولی به جسم فوقانی چسبیده و بلند می‌شود. این نمونه‌ای از تاثیر نیروهای مولکولی یک بلوک بر بلوک دیگر بود.

با این همه، جاذبه‌های بین مولکولی نیروهایی بنیادین نیستند؛ برخلاف گرانش که نیرویی بنیادی است. این‌ها ناشی از برهم‌کنش‌های فوق‌العاده پیچیده‌ی مابین الکترون‌ها و هسته‌ی یک اتم با تمام الکترون‌ها و هسته‌ی اتمی دیگر است. با هر فرمول ساده‌ای ما فقط به تقریبی از پیچیدگی‌ها دست خواهیم یافت. بنابراین هنوز ما با پدیده‌ای بنیادین مواجه نیستیم.

از آنجا که نیروهای مولکولی در فواصل زیاد به صورت جاذبه و در فواصل کم به صورت دافعه عمل می‌کنند، مطابق شکل (۲.۱۲)، می‌توانیم اجسامی تولید کنیم که اتم‌هایشان به سبب جاذبه گرد هم می‌آیند و هنگام نزدیکی بیش از حد، به دلیل وجود دافعه، رانش می‌کنند. در فاصله معین  $d$  (در نمودار شکل (۲.۱۲)) محل برخورد با محور) برآیند نیروها صفر می‌شود، و این به منزله‌ی تعادل آن‌ها است. بنابراین مولکول‌ها در این فاصله از یکدیگر باقی خواهند ماند. چنانچه مولکول‌ها از مقدار  $d$  به هم نزدیک‌تر شوند، همانند بخش بالای محور  $r$  در نمودار شکل (۲.۱۲) از خود دافعه بروز خواهند داد. اگر فقط کمی دو مولکول را به یکدیگر نزدیک کنیم نیروی بسیار بزرگی حاصل خواهد شد؛ چراکه در فواصل کمتر از  $d$ ، با کاهش فاصله، نیرو به سرعت رشد می‌کند. اگر مولکول‌ها قدری از یکدیگر دور شوند، موجب جاذبه‌ای می‌شود که با افزایش این جدایی شدت می‌یابد و اگر به قدر کافی دور شوند، به کلی جدا خواهند شد، پیوند شکسته می‌شود.

اگر مولکول‌ها نسبت به  $d$  مقدار بسیار کمتری، دور یا نزدیک شوند، مطابق آنچه در نمودار شکل ۲.۱۲ نمایش داده شده، انحنای نمودار بسیار ناچیز است؛ به نحوی که می‌توان آن را با یک خط مستقیم تقریب زد. بنابراین در بسیاری از پدیده‌ها اگر جابه‌جایی خیلی بزرگ نباشد، نیرو متناسب با این جابه‌جایی است. این اصل که با نام قانون هوک<sup>۲۱</sup> و یا قانون کشسانی<sup>۲۲</sup> شناخته می‌شود، بیان می‌کند که نیروی جسمی که تحریک شده و سعی دارد حالت اولیه‌ی خود را بازیابد با این میزان تحریک متناسب است. البته صحت این قانون تا زمانی است که میزان تحریک کوچک باشد. هنگامی که بیش از اندازه بزرگ باشد، بسته به نوع تحریک، جسم از هم می‌گسلد و یا آسیبی به آن وارد می‌شود. بزرگی نیروی هوک به شدت تحت تأثیر نوع ماده است؛ به عنوان مثال برای خمیر یا بتونه این نیرو بسیار کوچک است، در صورتی که برای استیل مقدار نسبتاً بزرگی را دارا است. قانون هوک را می‌توان به خوبی توسط فنی فلزی که به صورت عمودی آویخته شده نشان داد. آویزان کردن یک وزنه مناسب به انتهای تحتانی فنر ایجاد خم کوچکی در سراسر فنر

<sup>20</sup>Johansson Block<sup>22</sup>Law of Elasticity<sup>21</sup>Hooke's Law

می‌کند که منجر به پیچشی در تمامی دورهای فنر می‌شود که در صورتی که تعداد دورها زیاد باشد باعث ایجاد جابه‌جایی بزرگی در فنر خواهد شد. اگر افزایش طول تولید شده توسط یک وزنه صد گرمی را اندازه‌گیری کنیم، خواهیم دید که اگر صد گرم دیگر اضافه کنیم، افزایش طول اضافه شده با تقریب بسیار خوبی با افزایش طول اولیه برابر است. چنانچه فنر را بیش از اندازه سنگین کنیم ضریب تناسب رابطه نیرو با جابه‌جایی تغییر خواهد کرد. بنابراین دامنه‌ی اعتبار قانون هوک چندان وسیع نیست.

## ۴.۱۲ میدان‌ها و نیروهای بنیادی<sup>۲۳</sup>

اکنون وقت آن است تا درباره نیروهای بنیادی باقی مانده سخن به میان آوریم. به علت سادگی بنیادین قوانین حاکم بر این نیروها، به آن‌ها نیروهای بنیادی می‌گوییم. بحث خود را با نیروی الکتریکی<sup>۲۴</sup> آغاز می‌کنیم. الکترون‌ها و پروتون‌ها از جمله حاملان بارهای الکتریکی هستند. اگر دو جسم از نظر الکتریکی باردار شده باشند بین آن‌ها نیرویی موسوم به نیروی الکتریکی برقرار می‌گردد که اگر بزرگی بارها به ترتیب،  $q_1$  و  $q_2$  باشد این نیرو متناسب با عکس مجذور بارها خواهد بود؛ یا  $q_1 q_2 / r^2$  (ثابت)  $F = ?$ . برای بارهای ناهمنام این قانون شبیه به قانون گرانش است. لکن برای بارهای همنام این نیرو به صورت دافعه است و علامت (جهت) آن قرینه می‌شود. بارهای  $q_1$  و  $q_2$  ذاتاً می‌توانند مثبت یا منفی باشند و در هر مورد خاص اگر علامت مثبت و منفی بارها به درستی مشخص شود جهت نیرو صحیح خواهد بود. جهت این نیرو درست در راستای خط واصل دو بار است. بدیهی است که ضریب ثابت درون فرمول به واحدهای مورد استفاده برای نیرو، بار و فاصله مرتبط است. در حال حاضر واحد بار ذره کولومب<sup>۲۵</sup>، فاصله، متر و نیرو نیوتون است. فلذا مقدار عددی این ثابت (که به دلایل تاریخی به صورت  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  نگاشته می‌شود) برای محاسبه‌ی نیرو در واحد نیوتون برابر است با:

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ coul}^2 / \text{newton} \cdot \text{m}^2$$

یا

$$1/4\pi\epsilon_0 = 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{coul}^2.$$

بنابراین، رابطه نیرو برای بارهای ایستا به صورت زیر است:

$$F = q_1 q_2 r / 4\pi\epsilon_0 r^2. \quad (2.12)$$

در طبیعت مهم‌ترین بار، بار یک الکترون است که برابر است با  $1.6 \times 10^{-19}$  کولومب. بسیاری از مردم در هنگام کار با نیروی الکتریکی مابین ذرات بنیادی ترجیح می‌دهند عبارت  $(q_{el})^2 / 4\pi\epsilon_0$  را ترکیب

<sup>23</sup>Fundamental forces. Fields

<sup>25</sup>Coulomb

<sup>24</sup>Electric Force

<sup>۲۶</sup>به صورت کولن نیز نگاشته می‌شود. (م)

کنند که در آن  $q_{el}$  برابر بار الکترون در نظر گرفته می‌شود. این نوع ترکیب بسیار رایج است و برای ساده سازی محاسبات از نماد  $e^2$  نیز استفاده می‌شود که در دستگاه واحد  $MKS$  مقداری برابر  $(1.6 \times 10^{-19})^2$  را دارد. ارزش نگارش ضریب ثابت به صورت یاد شده در آن است که نیروی بین دو الکترون به نیوتون را می‌توان به سادگی به صورت  $e^2/r^2$  نمایش داد که در آن  $r$  بر حسب متر است و هیچ ضریب ثابت دیگری در کار نیست. نیروهای الکتریکی از آنچه در فرمول ساده‌ی بالا نشان داده شد پیچیده‌تر هستند. چراکه فرمول فقط نیروی بین دو جسم باردار ایستا را به ما می‌دهد. پس می‌بایست اندکی به صورت عمومی‌تر بحث کنیم.

برای بررسی انواع بنیادی‌تر نیروها (نیروهایی از قبیل گرانش و نیروی الکتریکی، نه اصطکاک و ...)، مفهوم بسیار مهم و مهیجی گسترش یافته. از آنجا که در نگاه اول این نیروها بسیار پیچیده‌تر از قوانین عکس مجذوری بیان شده در بالا به نظر می‌رسند و این قوانین اعتبار خود را فقط تا زمان ایستا بودن اجسام مورد مطالعه حفظ می‌کنند، روشی کارآمد برای کار با این نوع نیروها لازم است که حتی در هنگام حرکت های پیچیده نیز معتبر باشد. تجربه ثابت می‌کند مفهوم شناخته شده‌ای به نام «میدان» در مطالعه این نوع از نیروها بسیار سودمند است. به جهت تبیین این ایده برای نیروی الکتریکی فرض کنید دو بار  $q_1$  و  $q_2$  که به ترتیب در نقاط  $P$  و  $R$  واقع شده‌اند، در اختیار داریم. نیروی بین دو بار برابر است با:

$$F = q_1 q_2 r / 4\pi\epsilon_0 r^3. \quad (3.12)$$

برای بررسی این نیرو به کمک مفهوم میدان، می‌توانیم بگوییم بار  $q_1$  واقع بر مکان  $P$ ، «خاصیتی» در نقطه  $R$  القا می‌کند که هنگامی که بار  $q_2$  در مکان  $R$  قرار می‌گیرد نیرویی «احساس» می‌کند. این روشی، شاید عجیب، برای توصیف نیرو است. می‌توانیم نیروی  $F$  وارد بر  $q_2$  در محل  $R$  را به صورت دو بخش بنویسیم؛ حاصلضرب  $q_2$  در مقدار  $E$  که حتی در صورت عدم حضور بار  $q_2$  وجود خواهد داشت. (البته با فرض اینکه بارهای غیر از  $q_2$  در محل خودشان حضور داشته باشند). طبق فرض ما  $E$  «خاصیت» تولید شده توسط  $q_1$  و  $F$  واکنش  $q_2$  به نسبت به  $E$  است.  $E$  کمیتی برداری است که به آن میدان الکتریکی<sup>۲۷</sup> می‌گوییم. فرمول میدان  $E$  تولید شده در  $R$  توسط بار  $q_1$  واقع بر  $P$  برابر است با ضرب  $q_1$  در ضریب ثابت  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  تقسیم بر  $r^2$  (فاصله  $P$  تا  $R$  است) و در جهت بردار شعاع عمل می‌کند (حاصل تقسیم بردار شعاع  $r$  بر اندازه‌اش). بنابراین بیان  $E$  به صورت زیر نگاشته می‌شود:

$$E = q_1 r / 4\pi\epsilon_0 r^3. \quad (4.12)$$

که می‌نویسیم:

$$F = q_2 E, \quad (5.12)$$

رابطه‌ی بالا مبین ارتباط نیرو، میدان و بار واقع در میدان می‌باشد. ظرافت این نوع نگارش در چیست؟ در اینکه تحلیل ما به دو بخش تقسیم می‌شود. یک بخش بیان می‌کند چیزی میدانی تولید می‌کند و بخش

<sup>27</sup>Electric Field

دیگر می‌گویید چیزی تحت تأثیر میدان قرار می‌گیرد. این امر ما را مجاز می‌کند که به این دو جزء به صورت مستقل نگاه کنیم. این استقلال تحلیل مسئله در وضعیت‌های متفاوت را آسان‌تر می‌کند. اگر بخواهیم چندین بارالکتریکی را مورد مطالعه قرار دهیم، ابتدا برآیند میدان‌های حاصل از بارها را در نقطه  $R$  محاسبه می‌کنیم، سپس فقط با دانستن اینکه چه باری در  $R$  قرار گرفته می‌توانیم نیرو را محاسبه کنیم.

به‌طور کاملاً مشابه می‌توانیم تعاریف فوق را به نیروی گرانش نیز تعمیم دهیم. در این مورد رابطه نیرو به صورت  $F = Gm_1m_2/r^3$  است و ما می‌توانیم به‌طور مشابه اینگونه تحلیل کنیم: نیروی وارد بر یک جسم در یک میدان گرانشی<sup>۲۸</sup> برابر حاصلضرب جرم جسم در میدان  $C$  است. نیروی وارد بر  $m_2$  برابر با  $m_2$  ضربدر میدان  $C$  تولید شده توسط  $m_1$  است. در نتیجه،  $F = m_2C$  و میدان تولید شده توسط  $m_1$  به‌صورت  $C = Gm_1/r^3$  و راستای آن نیز مشابه میدان الکتریکی شعاعی است.

علی‌رغم آنچه در نگاه اول به نظر می‌رسد جداسازی این دو بخش اصلاً امری پیش پا افتاده و عبث نیست. اگر قوانین حاکم بر یک نیرو ساده باشند، تعمیم تعریف فوق برای آن نیرو امری بدیهی و صرفاً بازنویسی به‌صورت دیگری از آن نیرو است. ولی اگر قوانین حاکم بر آن نیرو بسیار پیچیده باشند، وضع متفاوت خواهد بود. میدان‌ها ماهیتی تقریباً مستقل از اجسام سازنده خود دارند. می‌توان باری را به حرکت واداشت و در فاصله از آن میدانی تولید کرد. اگر کسی حرکت بار را متوقف کند، میدان که پیش‌تر تولید شده کماکان وجود خواهد داشت؛ چراکه برهم‌کنش میان دو بار لحظه‌ای نیست. این فرآیند روشی است که به کمک آن می‌توانیم تحولات گذشته را به خاطر بسپاریم. چنانچه نیروی وارد بر یک بار، وابسته به مکانی باشد که بار دیگری دیروز در آن واقع شده، پس ما نیازمند ابزاری خواهیم بود که آنچه در گذشته سپری شده است را به خاطر بسپارد؛ و این ویژگی میدان است. در نتیجه زمانی که نیروها پیچیده‌تر شوند، میدان حقیقی و حقیقی‌تر می‌شود و این تفکیک، دیگر امری تصنعی نخواهد بود.

برای تحلیل نیروها به کمک مفهوم میدان به دو قانون در ارتباط با میدان‌ها نیازمندیم. اول، چگونگی واکنش اجسام نسبت به میدان، که به کمک آن به معادلات حرکت جسم دست خواهیم یافت. برای مثال واکنش یک جرم به میدان گرانشی موجود اینگونه است که نیرو برابر حاصلضرب جرم مذکور در میدان گرانشی است. و یا برای یک بار و میدان الکتریکی، نیرو برابر است با بار ضربدر میدان الکتریکی. دومین قانون مورد نیاز برای مطالعه طبیعت در این قالب، قانونی برای تعیین قدرت و چگونگی تولید میدان است. گاهی به این قوانین، معادلات میدان<sup>۲۹</sup> نیز گفته می‌شود که ما جلوتر بیشتر به آن‌ها خواهیم پرداخت ولی ابتدا باید چند نکته درباره آن‌ها متذکر شویم.

مهم‌ترین نکته که کاملاً صحیح و بدیهی است، این است که برآیند کل میدان‌های تولید شده توسط چندین منبع، برابر جمع برداری میدان‌های تک تک آن‌ها است. به عبارت دیگر اگر تعداد قابل شمارشی بار مولد میدان داشته باشیم که هرکدام میدان  $E_1$ ،  $E_2$  و ... را تولید کرده باشند، برای محاسبه میدان کل فقط کافی است تمامی آن‌ها را به صورت برداری جمع کنیم. این اصل را می‌توان به‌صورت زیر

<sup>28</sup>Gravitational Field<sup>29</sup>Field Equations

بیان کرد:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3 + \dots \quad (6.12)$$

و یا بر اساس تعریف مزبور:

$$\mathbf{E} = \sum_i \frac{q_i \mathbf{r}_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^3} \quad (7.12)$$

آیا این روش را برای گرانش هم می‌توان به کار برد؟ به بیان نیوتون نیروی مابین دو جرم  $m_1$  و  $m_2$  به صورت  $F = Gm_1m_2/r^2$  است ولی بر اساس مفهوم میدان، می‌گوییم احتمالاً جرم  $m_1$  یک میدان  $C$  در تمامی فضا ایجاد کرده و نیرو وارد بر جرم  $m_2$  به صورت زیر است:

$$\mathbf{F} = m_2 \mathbf{C}. \quad (8.12)$$

که با مقایسه با میدان الکتریکی:

$$\mathbf{C}_i = -Gm_i \mathbf{r}_i / r_i^2 \quad (9.12)$$

و میدان کل تولید شده توسط چندین جرم برابر است با:

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}_1 + \mathbf{C}_2 + \mathbf{C}_3 + \dots \quad (10.12)$$

در هنگام حل مسئله‌ی حرکت نجومی در فصل ۹، ما به صورت ناخودآگاه از این اصل استفاده نمودیم. ما به راحتی تمامی بردار نیروها را با یکدیگر جمع کردیم و برآیند نیروهای وارد بر سیاره را به دست آوردیم. اگر در آن سوال تمامی جملات را بر جرم سیاره تقسیم کنیم، به معادله (۱۰.۱۲) خواهیم رسید.

معادلات (۶.۱۲) و (۱۰.۱۲) مبین ماهیت اصل برهم نهی<sup>۳۰</sup> میدان‌ها است. این اصل بیان می‌کند که میدان کل ناشی از چندین منبع، برابر مجموع تک تک آن‌ها است. بنابراین، بر اساس آنچه که اکنون آموختیم، قانون کاملاً تضمین شده‌ای در الکتریسیته وجود دارد که حتی در هنگام پیچیدگی ناشی از حرکت بارها معتبر است. تناقضات آشکاری وجود دارد ولیکن تحلیل‌های دقیق‌تر نشان می‌دهند که این تناقضات به علت چشم پوشی از برخی حرکت‌های بارها است. اما با وجود اینکه اصل برهم نهی برای نیروهای الکتریکی کاملاً صادق است، برای نیروهای گرانشی بسیار قوی، تقریباً صحیح نیست و معادله (۱۰.۱۲) نیوتون در حقیقت فقط تقریبی از نظریه گرانش اینشتین<sup>۳۱</sup> است.

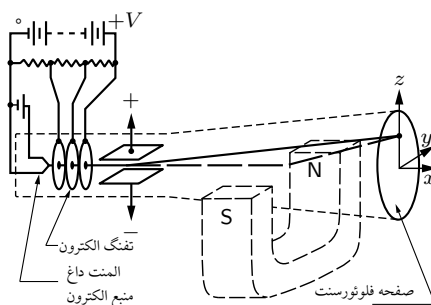
نیروی دیگری که وابستگی بسیار نزدیکی به نیروی الکتریکی دارد، نیروی مغناطیسی<sup>۳۲</sup> است که به طور مشابه به عنوان نوعی میدان نیز بررسی شده است. برخی ارتباطات کیفی بین نیروهای الکتریکی

<sup>30</sup>Principle of Superposition

<sup>32</sup>Magnetic Force

<sup>31</sup>Einstein's Gravitational Theory





شکل ۳.۱۲: مجرای تابش الکترون

و مغناطیسی را می‌توان تحت آزمایش با یک مجرای تابش الکترون (شکل ۳.۱۲) مشاهده کرد. در یک انتهای چنین مجرای منبعی است که جریانی از الکترون‌ها را به بیرون پرتاب می‌کند. در داخل مجرا، ساز و کاری موجود است که الکترون‌ها را تا سرعت‌های بالا شتاب داده و به صورت یک پرتو باریک به صفحه فلئورسنتی که در انتهای دیگر مجرا وجود دارد شلیک می‌کند. محل برخورد الکترون‌ها به صفحه، به صورت یک نقطه نورانی نمایان می‌شود و بدین ترتیب، می‌توانیم مسیر حرکت الکترون را آشکارسازی کنیم. جریان الکترون‌ها در مسیر حرکت خود از فضای باریک میان دو صفحه فلز موازی که به صورت افقی نصب شده‌اند، عبور می‌کنند. می‌توان اختلاف پتانسیلی<sup>۳۳</sup> میان دو صفحه ایجاد کرد. وجود اختلاف پتانسیل منجر به ایجاد یک میدان الکتریکی بین دو صفحه خواهد شد.

قسمت اول آزمایش، اعمال ولتاژ منفی به صفحه تحتانی است. به این معنی که الکترون‌های بیشتری روی صفحه پایینی مستقرند. به علت دافعه میان بارها، نقطه نورانی به محل بالاتری روی صفحه فلئورسنت منتقل می‌شود. (می‌توانیم به نحو دیگری نیز توجیه کنیم: الکترون‌ها میدان را «احساس» کرده و با انحراف به بالا به آن واکنش نشان می‌دهند). سپس ولتاژ را معکوس می‌کنیم. در نتیجه پتانسیل صفحه فوقانی منفی خواهد شد. نقطه نورانی این بار نسبت به مرکز رو به پایین جهش خواهد کرد که نشانگر دافعه آن‌ها با صفحه فوقانی است. (و یا دوباره می‌گوییم الکترون‌ها به میدان «پاسخ» داده و در جهت مخالف منحرف شدند).

در بخش دوم آزمایش، اختلاف پتانسیل صفحات را قطع می‌کنیم و اثر یک میدان مغناطیسی را روی جریان الکترون‌ها مورد مطالعه قرار می‌دهیم. این آزمایش به کمک یک آهنربای نعلی شکل که بزرگی بازوهای آن برای سوار شدن بر روی مجرای الکترون کافی باشد، میسر خواهد بود. فرض کنید در ابتدا آهنربا را به مثابه حرف U به نحوی زیر مجرا ننگه داریم که قطب‌های آن در بالا و با فاصله، دو طرف لوله قرار بگیرند. در این صورت مشاهده خواهیم کرد که محل نقطه نورانی جابه‌جا شده. بنابراین جریان الکترون توسط آهنربا دفع می‌شود. اما چنانچه آهنربا را بدون جابه‌جا کردن قطب‌هایش وارونه کنیم، و از بالا روی مجرا نصب کنیم، دیگر به این سادگی‌ها نخواهد بود. نقطه نورانی همچنان رو به بالا منحرف می‌شود. فلذا این بار، الکترون‌ها برخلاف آزمایش پیشین، جذب آهنربا می‌شوند. حال اگر

<sup>33</sup>Voltage

بازهم آهنربا را به حالت اولیه‌اش باز گردانیم، شاهد انحراف رو به بالا خواهیم بود. اما این بار آهنربا را  $180^\circ$  درجه حول محور عمودی دوران می‌دهیم، به نحوی که محل قرارگیری قطب‌ها جابه‌جا شود. می‌توانید مشاهده کنید که این بار نقطه مورد نظر رو به پایین جهش کرده است. اگر مشابه آزمایش قبل باز هم آهنربا را به همین ترتیب از بالا بر مجرا سوار کنیم، همین نتیجه را کسب خواهیم کرد.

برای توصیف این رفتار نامتعارف نیازمند ترکیب جدیدی از نیروها خواهیم بود. ما این پدیده را اینگونه توجیه می‌کنیم: درون آهنربا، میدان مغناطیسی<sup>۳۴</sup> برقرار می‌شود که جهت آن همواره از قطبی مشخص (که می‌توانیم آنرا علامت گذاری کنیم) به قطب دیگر است. وارون کردن آهنربا جهت میدان را تغییر نخواهد داد. اما جابه‌جا کردن قطب‌ها موجب تغییر جهت این میدان می‌شود. برای مثال، اگر سرعت الکترون‌ها در راستای محور  $x$  و میدان مغناطیسی در راستای محور  $y$  باشد، نیروی مغناطیسی وارد بر الکترون‌های در حال حرکت در راستای محور  $z$  خواهد بود. و رو به بالا یا رو به پایین بودن آن به جهت میدان بستگی دارد.

همچنین فعلاً نمی‌توانیم نیروی برقرار شده بین دو بار که در مسیرهایی دلخواه حرکت می‌کنند را بیابیم؛ چراکه متأثر از یکدیگرند. در نتیجه‌ی این پیچیدگی، فقط به هنگام اشراف کامل به چگونگی وضعیت میدان می‌توانیم نیروها را به طور کامل فرمول بندی کنیم. نیروی وارد بر یک بار متحرک وابسته به نحوه حرکت آن است. اگر هنگامی که بار در توقف کامل است، بر آن نیرویی وارد شود، این نیرو متناسب با میزان بار است و ضریب تناسب همان چیزی است که پیش‌تر آن را میدان الکتریکی نامیدیم. هنگامی که بار در حال حرکت است، نیرو می‌تواند متفاوت باشد. میزان تصحیح، مابه‌التفاوت نیرو، به صورت کاملاً خطی به میزان سرعت بستگی دارد؛ لکن فقط در صورت عمود بودن بردار سرعت  $v$  بر کمیت برداری جدیدی که آن را میدان مغناطیسی  $B$  نامیدیم. چنان چه مختصات میدان الکتریکی  $E$  و میدان مغناطیسی  $B$  به ترتیب  $(E_x, E_y, E_z)$  و  $(B_x, B_y, B_z)$  باشند و همچنین سرعت  $v$  نیز دارای مختصات  $(v_x, v_y, v_z)$  باشد، نیروی کل الکتریکی و مغناطیسی وارد بر یک بار متحرک  $q$  دارای مختصاتی به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} F_x &= q(E_x + v_y B_z - v_z B_y), \\ F_y &= q(E_y + v_z B_x - v_x B_z), \\ F_z &= q(E_z + v_x B_y - v_y B_x). \end{aligned} \quad (11.12)$$

برای مثال اگر تنها مختصه میدان مغناطیسی  $B_y$  و تنها مختصه سرعت  $v_x$  باشد، نیروی مغناطیسی فقط در راستای  $z$ ، هم عمود بر  $v$  و هم عمود بر  $B$  خواهد بود.

<sup>34</sup>Magnetic Field

۵.۱۲ نیروهای مجازی<sup>۳۵</sup>

انواع دیگری از نیرو را که می‌خواهیم راجع به آن‌ها بحث کنیم می‌توان نیروی مجازی نامید. در فصل ۱۱ به بررسی ارتباط دو شخص به نام‌های جو و مو که از دو دستگاه مختصات متفاوت استفاده می‌کردند پرداختیم. فرض کنید مکان یک ذره توسط جو  $x$  و توسط مو  $x'$  اندازه‌گیری شده است. بنابراین روابطی به صورت زیر خواهیم داشت:

$$x = x' + s, \quad y = y', \quad z = z',$$

که در آن  $s$  برابر فاصله دستگاه مو نسبت به دستگاه جو است. اگر فرض کنیم قوانین حرکت در دستگاه جو صحیح است، مو این قوانین را چگونه خواهد دید؟ می‌دانیم که:

$$dx/dt = dx'/dt + ds/dt.$$

پیش از این مسئله را در صورت ثبات بررسی کرده‌ایم و دریافتیم که تغییری در قوانین حرکت ایجاد نمی‌کند؛ چراکه  $\frac{ds}{dt} = 0$  است. در نتیجه قوانین فیزیک در هر دو دستگاه یکسان خواهند بود. ولیکن می‌توانیم فرض کنیم  $s = ut$  است به نحوی که  $u$  سرعتی ثابت بر مسیری صاف باشد. در این صورت  $s$  ثابت نخواهد بود و  $\frac{ds}{dt}$  غیر صفر و برابر مقدار ثابت  $u$  خواهد بود. با این همه هنوز هم  $\frac{d^2x}{dt^2}$  برابر می‌گردد؛ چراکه  $\frac{du}{dt}$  است. این اثباتی است برای قانونی که در فصل ۱۰ از آن استفاده می‌کردیم و بیان می‌کرد: اگر در دستگاهی که با سرعتی ثابت در حال حرکت است حاضر باشیم، قوانین فیزیک همان گونه خواهند بود که در توقف به سر ببریم. این قانون تبدیل گالیله‌ای<sup>۳۶</sup> نام دارد. اما ما می‌خواهیم درباره نمونه‌ای مهیج که در آن  $s$  باز هم پیچیده‌تر می‌شود صحبت کنیم؛ مثلاً در حالتی که  $s = at^2/2$  است. بنابراین  $\frac{ds}{dt} = at$  و  $\frac{d^2s}{dt^2} = a$  خواهد بود. یعنی، حرکتی با شتاب ثابت. و یا حتی در موردی پیچیده‌تر به نحوی که شتاب، خود تابع زمان باشد. این به آن معنا است که گرچه قوانین حرکت در نگاه جو به صورت زیر است:

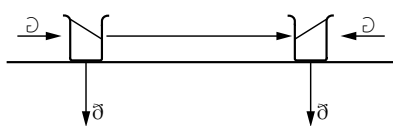
$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_x,$$

این قوانین در نظر مو به صورت زیر خواهد بود:

$$m \frac{d^2x'}{dt^2} = F_{x'} = F_x - ma.$$

در صورتی که دستگاه مختصات مو نسبت به دستگاه جو شتاب داشته باشد، جمله  $ma$  اضافه خواهد شد و مو می‌بایست برای به‌کارگیری قوانین نیوتون نیروهای خود را توسط این جمله‌ی ظاهر شده، تصحیح کند.

<sup>35</sup>Pseudo Forces<sup>36</sup>Galilean Transformation



شکل ۴.۱۲: نمودی از نیروهای مجازی

به عبارت دیگر، پای یک نیرو جدید و بسیار مرموز، با منشأیی ناشناخته در کار است. البته این موضوع به خاطر اتخاذ دستگاه مختصات نادرست توسط ما است. این مثالی از نیروی مجازی بود. مثال‌های دیگر را می‌توان در دستگاه‌های مختصات دوار جستجو کرد.

مثالی دیگر از نیروی مجازی پدیده‌ای است که با نام «نیروی گریز از مرکز<sup>۳۷</sup>» شناخته می‌شود. ناظری که در یک دستگاه مختصات در حال چرخش، برای مثال یک جعبه چرخان، واقع شده باشد، متوجه نیروی مرموزی خواهد شد که ناشی از هیچ منبع شناخته شده‌ای نیست و اجسام را به بیرون دیواره‌ها می‌راند. این نیروها تنها به این علت ظاهر می‌شوند که دستگاه مختصات ناظر، دستگاه مختصات نیوتونی نیست.

نیروی مجازی به کمک آزمایشی مهیج به آسانی قابل مشاهده است. به این صورت که ظرف آبی را به صورت شتاب‌دار بر روی میز به حرکت وا می‌داریم. گرانش در راستای عمود بر لیوان اثر می‌کند. همچنین شتاب افقی وارده، منجر به یک نیروی مجازی در راستای افقی و در خلاف جهت شتاب می‌شود. برآیند این دو نیرو با راستای عمود زاویه‌ای می‌سازد که سطح آب درون ظرف به صورت مایل و عمود بر راستای برآیند خواهد بود. شیب حاصل به نحوی است که در عقب لیوان سطح آب بالاتر از جلوی لیوان قرار می‌گیرد. هنگامی که ظرف را مجبور به توقف می‌کنیم، سرعت ظرف به علت حضور اصطکاک کاهش می‌یابد، لذا جهت نیروی مجازی قرینه می‌شود و آب در جلوی ظرف بالاتر می‌ایستد (شکل ۴.۱۲).

یکی از ویژگی‌های بسیار مهم نیروهای مجازی این است که به مثابه نیروی گرانش این نیروها نیز با جرم متناسبند. پس گمان می‌رود که گرانش هم خود به نوعی نیروی مجازی باشد. آیا ممکن نیست گرانش به معنای عدم صحت دستگاه مختصات منتخب ما باشد؟ با این همه، با فرض اینکه جسمی در حال حرکتی شتاب‌دار باشد، همواره می‌توان نیرویی متناسب با جرمش برای آن متصور شد. برای مثال فردی که درون جعبه‌ای ساکن در سطح زمین قرار گیرد، احساس می‌کند، با نیرویی متناسب با جرمش به سمت کف جعبه کشیده می‌شود. اما اگر زمینی در کار نباشد و جعبه کماکان در حال سکون باشد، شخص مورد نظر می‌تواند درون جعبه معلق شود. از سوی دیگر، اگر در جایی به دور از زمین، چیزی جعبه را با شتاب به حرکت درآورد، بر اساس تحلیل فیزیکی شخص درون جعبه درمی‌یابد که نیروی مجازی او را به سمت کف جعبه می‌راند، درست مشابه گرانش.

اینشتین فرضیه معروف خود را این چنین مطرح کرد. براساس این فرضیه هرگونه شتابی در حقیقت بدلی از گرانش است، به گونه‌ای که نیروی حاصل از شتاب (نیروی مجازی) و گرانش، دو امر کاملاً تمیز

<sup>37</sup>Centrifugal Force

ناپذیرند. نمی‌توان گفت چه میزان از نیروی وارد بر جسمی گرانش و چه میزان نیروی مجازی است. به نظر می‌رسد احتساب گرانش به عنوان نوعی نیروی مجازی اقدامی به جا است. می‌توانیم بگوییم، ما به این علت بر سطح زمین فرو می‌افتیم که همگی در حال شتاب‌گیری رو به بالا هستیم. اما راجع به افراد مقیم ماداگاسکار، در سوی دیگر زمین، چه می‌توان گفت؟ آیا آن‌ها نیز به‌طور مشابه در حال شتاب‌گیری هستند؟ اینشتین دریافت گرانش را در لحظه می‌توان نیرویی مجازی فقط در یک نقطه پنداشت و براساس فرضیات وی هندسه جهان پیچیده‌تر از هندسه اقلیدسی است. البته بحث فعلی ما صرفاً بحثی کیفی است و به هیچ عنوان چیزی فراتر از ابلاغ مفاهیم کلی نیست. به جهت هضم این فرضیه‌ی نابهنجار، بیان چگونگی احتساب گرانش به عنوان یک نیروی مجازی، ما به ناچار دست به دامن نمودی کاملاً هندسی و به دور از واقعیت، از این فرضیه می‌شویم. فرض کنید ما در جهانی دو بعدی زندگی می‌کنیم و هیچ درکی نسبت به بعد سوم نداریم. در این صورت تصور می‌کنیم بر روی یک صفحه در حال زندگی هستیم. اما فرض کنید در حقیقت امر ما در حال زندگی بر روی سطح یک کره باشیم. و همچنین فرض کنید جسمی را بر روی سطح پرتاب می‌کنیم، به نحوی که تحت اثر هیچ نیرویی نباشد. جسم پرتاب شده به کجا خواهد رفت؟ در ظاهر بر روی یک مسیر صاف حرکت خواهد کرد، اما از آنجا که روی سطح یک کره هستیم و کوتاه‌ترین مسیر بین دو نقطه مسیری روی یک دایره بزرگ است، بنابراین بر روی یک مسیر دایروی بزرگ حرکت خواهد کرد. اگر به صورت مشابه جسم دیگری را در جهت دیگری پرتاب کنیم، روی یک دایره بزرگ دیگر حرکت خواهد کرد. از آنجا که ما تصور می‌کنیم روی یک سطح صاف قرار گرفته‌ایم، توقع داریم دو جسم در دو مسیر صاف و از هم دور شونده به حرکت خود ادامه دهند. اما مشاهده‌ی دقیق نشان می‌دهد اجسام پس از کمی دور شدن دوباره به یکدیگر نزدیک خواهند شد؛ درست مشابه اینکه یکدیگر را جذب می‌کنند. لکن در واقعیت، آن‌ها همدیگر را جذب نمی‌کنند و این اتفاق صرفاً یک خرق عادت هندسی است. همچنین نشان می‌دهد اگر به صورتی مناسب، هندسه‌مان را دستکاری کنیم، می‌توان گرانش را به نوعی مرتبط با نیروی مجازی در نظر گرفت. این ایده‌ی اصلی نظریه گرانش اینشتین است.

## ۶.۱۲ نیروهای هسته‌ای<sup>۳۸</sup>

نتیجه‌گیری این فصل را با بحث کوتاهی پیرامون آخرین نیروهای شناخته شده‌ی باقی مانده که به آن‌ها نیروهای هسته‌ای گفته می‌شود به پایان می‌بریم. سیطره‌ی تأثیرگذاری این نیروها داخل هسته اتم‌ها است و علی‌رغم اینکه درباره آن‌ها بحث‌های بسیاری به عمل آمده، تا به حال هرگز کسی نیروی بین دو هسته را محاسبه نکرده و در واقع در حال حاضر هیچ قاعده و قانونی برای نیروهای هسته‌ای در دست نیست. این نیروها به شدت کوتاه بردند؛ در همان مرتبه ابعاد هسته، حدوداً  $10^{-13}$  سانتی متر. برای ذرات بسیار ریز

<sup>38</sup>Nuclear Forces

و در فواصل بسیار کوچک تنها مکانیک کوانتومی معتبر است و قوانین نیوتون فاقد اعتبارند. البته در تحلیل‌های هسته، چندان درگیر نیروها نمی‌شویم و در حقیقت می‌توانیم مفهوم انرژی برهمکنش ذرات را جایگزین مفهوم نیرو کنیم؛ موضوعی که جلوتر به آن خواهیم پرداخت. هر فرمولی که بخواهیم بنویسیم چیزی جز یک تقریب نسبتاً خام و چشم‌پوشی از بسیاری پیچیدگی‌ها نخواهد بود. برای مثال این نیروها به جای تناسب با معکوس مجذور فاصله، در فاصله مشخص  $r$  به صورت نمایی کاهش می‌یابند؛ یا  $F = (1/r^2) \exp(-r/r_0)$  که در آن  $r_0$  همان حدود هسته  $10^{-13}$  سانتی‌متر است. به عبارت دیگر به محض دور شدن بیش از اندازه ذرات، این نیروها رنگ خواهند باخت. اگرچه در فواصل حدود  $10^{-13}$  سانتی‌متر بسیار قوی عمل می‌کنند. فلذا بر اساس آنچه امروز آموختیم، این قوانین حاکم بر نیروهای هسته‌ای بسیار پیچیده است و نمی‌توان آن‌ها را به صورتی ساده سازی شده فرا گرفت. در حقیقت نظام بنیادین حاکم بر نیروهای هسته‌ای هنوز مشخص نیست و تلاش‌های صورت گرفته برای حل آن نیز منجر به کشف بسیاری ذرات عجیب شده است — برای مثال، مزون پی<sup>۳۹</sup> —. اما کماکان منشأ این نیروها ناشناخته است.

Summary of Lect 12 on Forces

1. Drag forces are complicated, not fundamental.  
Air resistance varies <sup>roughly</sup>  $v^2$  high vel,  $v$  very low vel.  
Sliding friction force sometimes =  $\mu \cdot$  Normal force
2. Molecular Forces also complicated.  
Elastic force proportional to displacement for small displacements.
3. Gravity & Elect, & Magnetism have relatively simpler laws
4. Fields. Gravity force on object mass  $m$  written  $\vec{F} = m\vec{C}$   $\vec{C} =$  field  
Electric force on object charge  $q$  written  $\vec{F} = q\vec{E}$   $\vec{E} = -\frac{GM}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$   
Magnetic force on charge  $q$  is  $\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B} - v_z \vec{B}_z)$   $\vec{E} = \frac{q'\vec{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3}$   
etc.