

## شناسنامه

The Feynman Lectures on Physics, Vol. 1, Ch. 10

درسنامه‌های فیزیک فاینمن، جلد ۱، فصل ۱۰

مترجم: محمدحسین حکیمی

ویراستار: اندیشه‌سادات آزاد

حروفچین: نگین باقری‌نقره‌ای

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 ۱۰

### پایستگی تکانه

#### ۱.۱۰ قانون سوم نیوتون

بر مبنای قانون دوم نیوتون، که بیان‌کننده‌ی رابطه‌ی بین شتاب و نیروی وارد بر یک جسم است، علی‌الاصول هر مسئله‌ای در مکانیک قابل حل است. برای مثال، برای تعیین حرکت تعداد کمی ذره، می‌توان از روش‌های عددی‌ای که در بخش قبل معرفی شد استفاده کرد. ولی همچنان دلایل خوبی وجود دارند تا مطالعات بیشتری روی قوانین نیوتون انجام دهیم. ابتدا اینکه موارد نسبتاً ساده‌ای از حرکت وجود دارند که نه فقط با روش‌های عددی بلکه با تحلیل مستقیم ریاضی نیز قابل توضیح‌اند. برای مثال؛ اگرچه ما می‌دانیم که شتاب یک جسم در حال سقوط  $9.8m^2/s$  است و با استفاده از این واقعیت می‌توانیم حرکت آن را با روش‌های عددی به‌دست آوریم، ولی خیلی راحت‌تر است که تحلیل ریاضی لازم را روی این حرکت انجام دهیم و به حل عمومی  $S = S_0 + V_0 t + \frac{1}{2} a t^2$  برسیم. به همین ترتیب اگرچه می‌توانیم مکان یک نوسانگر هماهنگ را با روش‌های عددی به‌دست آوریم، ولی می‌توان با روش‌های تحلیلی نشان داد که جواب عمومی مسئله یک تابع مثلثاتی از زمان ( $t$ ) است، بنابراین دیگر لازم نیست زحمات محاسباتی زیادی را، وقتی که یک راه ساده و دقیق‌تر برای رسیدن به جواب وجود دارد، تحمل کنیم. یا به عنوان مثالی دیگر با این‌که حرکت یک جسم حول خورشید را، که توسط گرانش تعیین می‌شود، می‌توان نقطه به نقطه با روش‌های عددی فصل ۹ به‌دست آورد، که شکل کلی مدار را به ما می‌دهد، ولی به‌دست آوردن شکل دقیق، که به کمک روش‌های تحلیلی مشخص می‌شود که یک بیضی کامل است نیز بسیار کارساز است.

متأسفانه مسائل خیلی کمی وجود دارند که حل تحلیلی دقیق داشته باشند. برای مثال در مورد نوسانگر هماهنگ اگر نیروی فنر وابسته به جابه‌جایی نباشد، بلکه کمیت پیچیده‌تری باشد، باید سراغ راه‌حل‌های عددی رفت. یا اگر در مسئله‌ی حرکت یک جسم به دور خورشید به جای یک جسم، دو جسم در حال چرخش به دور خورشید باشند، یعنی تعداد کل اجسام سه باشد، دیگر راهکارهای تحلیلی یک معادله‌ی

ساده برای نشان دادن حرکت اجسام در اختیار ما نمی‌گذارد و عملاً مسئله باید عددی حل شود. مثال آخر ما مسئله‌ی معروف سه جسم است که مدت زیادی تلاش‌های تحلیلی افراد را متوجه خود کرده بود ولی به نتیجه‌ای نرسیدند؛ این هم در نوع خود جالب است که مدت زمانی طول کشید تا مردم این حقیقت را بپذیرند که توان روش‌های تحلیلی محدود است و باید خیلی جاها به سراغ روش‌های عددی بروند. امروزه خیلی از مسائلی که حل تحلیلی برای آن‌ها یافت نمی‌شود با روش‌های عددی حل شده‌اند، و مسئله‌ی قدیمی سه جسم نیز، که به نظر خیلی سخت می‌آمد، با روالی عادی و معمولی و با همان روشی که در فصل قبل معرفی شد به نتیجه رسیده است. با این وجود، مواردی هم وجود دارد که هر دو روش از حل آن‌ها باز می‌مانند. مسائل آسان را می‌توان با روش‌های تحلیلی و مسائل نسبتاً سخت را می‌توان با روش‌های عددی حل کرد ولی مسائل خیلی پیچیده‌ای هستند که هر دو روش در مواجهه با آن‌ها مغلوب هستند. یک مسئله‌ی پیچیده به عنوان مثال می‌تواند برخورد دو خودرو یا حتی حرکت مولکول‌های یک گاز باشد. تعداد بی‌شماری ذره در یک میلی‌متر مکعب گاز وجود دارد، و احتمالاً است که با این تعداد متغیر (حدود  $10^{17}$ ) بخواهیم محاسبات روش‌های عددی را انجام دهیم. هر چیزی شبیه حرکت مولکول‌ها یا اتم‌های یک گاز، یک آجر یا یک قطعه‌ی آهن، یا مثلاً حرکت ستاره‌ها در یک سحابی کروی به جای مسئله‌ی چرخش تنها ۲ یا ۳ سیاره حول خورشید - مسئله‌هایی هستند که نمی‌توانیم مستقیم به سراغ حل آن‌ها برویم، و باید به دنبال حربه‌های دیگری باشیم.

در شرایطی که نمی‌توانیم جزئیات مسئله را دنبال کنیم، لازم است که برخی ویژگی‌های کلی مسئله را بدانیم؛ یعنی تئوری‌های عمومی، یا اصولی که نتایج قوانین نیوتون هستند. یکی از آن‌ها اصل پایستگی انرژی است، که در فصل ۴ با آن آشنا شدیم. دیگری اصل پایستگی تکانه است، که موضوع این فصل می‌باشد. دلیل دوم برای مطالعه‌ی بیشتر مکانیک این است که الگوهای حرکتی معینی وجود دارند که در شرایط مختلفی تکرار می‌شوند، بنابراین خوب است که این الگوها را در یک مورد خاص بررسی کنیم. به عنوان مثال باید برخوردها را بررسی کنیم؛ زیرا که انواع مختلف برخوردها مشترکات زیادی دارند. در شارش مایعات نوع مایع تفاوت زیادی را در مسئله ایجاد نمی‌کند و قوانین شارش یکسانی داریم. مسائل دیگری هم که باید بررسی شوند ارتعاشات و نوسان‌ها، و به طور خاص پدیده‌ی عجیب صدای موج‌های مکانیکی، نوسان میله‌ها و غیره هستند.

در بحثی که درباره‌ی قوانین نیوتون داشتیم اول توضیح داده شد که این قوانین یک نوع دستور کار هستند که اولاً می‌گویند «به نیروها توجه کنید» و دوماً اینکه نیوتون فقط دو چیز درباره‌ی طبیعت نیروها به ما آموخت. یک اینکه؛ درباره‌ی گرانش، وی تمام قوانین نیروی آن را به ما آموخت و دوم اینکه در حالی که نیوتون از قوانین صحیح نیروها با خبر نبود، در مورد نیروهای خیلی پیچیده‌ی بین اتم‌ها قانونی را کشف کرد که ویژگی عمومی نیروها است و تحت قانون سوم وی بیان می‌شود. تمام دانشی که نیوتون درباره‌ی طبیعت نیروها داشت، قانون گرانش و این اصل بود.

این اصل بیان می‌کند که: «عمل برابر عکس‌العمل است.»

محتوای این جمله چیزی شبیه این است: فرض کنید که دو جسم کوچک داریم، مثلاً دو ذره، و تصور کنید اولی به دومی اثری وارد می‌کند و آن را با نیرویی مشخص هل می‌دهد. در این صورت، بنا بر قانون سوم نیوتون هم‌زمان ذره‌ی دوم با نیرویی برابر، ذره‌ی اول را هل می‌دهد ولی در جهت عکس؛ و در همان خط اثر نیروی اول. این نظریه یا قانونی بود که نیوتون ارائه داد، و به نظر می‌آید که این قانون تا حدی دقیق باشد، ولی کاملاً دقیق نیست (بعدا درباره‌ی خطاها صحبت می‌کنیم). فعلاً این را درست فرض می‌کنیم که عمل و عکس‌العمل برابرند. البته اگر ذره‌ی سومی وجود داشته باشد و در همان راستایی که دو ذره‌ی دیگر قرار گرفته‌اند نباشد، این قانون دیگر برآیند نیروهای وارد بر ذره‌ی اول را برابر نیروهای وارد بر ذره‌ی دوم نمی‌داند، زیرا که ذره‌ی سوم هم نیروی خود را به هر کدام از دو ذره‌ی اول وارد می‌کند. نتیجه این‌که برآیند نیروها روی دو ذره‌ی اول در دو جهت مختلف است و نیروهای وارد شده به دو ذره‌ی اول نه اندازه‌ی برابر دارند و نه جهت‌های مخالف هم. با این حال نیروهای وارد شده بر هر ذره را می‌توان به بخش‌هایی تجزیه کرد، طوری که هر بخش مربوط به نیروی یکی از ذرات باشد. در این صورت هر جفت ذره، مؤلفه‌های نیروی عمل و عکس‌العمل مشترکی دارند که اندازه‌ی برابر و جهات مخالف هم دارند.

## ۲۰۱۰ پایستگی تکانه

حالا می‌رویم سراغ نتایج جالبی که اصل بالا در پی خواهد داشت. برای راحتی کار فرض می‌کنیم دو ذره با جرم‌های متفاوت داریم که با ۱ و ۲ آن‌ها را شماره‌گذاری کرده‌ایم. نیروهای بین آن‌ها برابر و در دو جهت خلاف هم است. خب، این عبارت چه نتایجی را در پی خواهد داشت؟ با توجه به قانون دوم نیوتون، نیرو تغییرات تکانه بر حسب زمان است، پس نتیجه می‌گیریم که تغییرات تکانه‌ی  $p_1$ ، مربوط به ذره‌ی ۱، برابر منفی تغییرات  $p_2$ ، مربوط به ذره‌ی ۲، است. یا:

$$dp_1/dt = -dp_2/dt \quad (۱۰۱۰)$$

اگر نرخ تغییرات تکانه‌ها همیشه برابر و منفی یکدیگرند، به این نتیجه می‌رسیم که برآیند تغییرات در تکانه‌ی ذره‌ی ۱، برابر و منفی تغییرات تکانه‌ی ذره‌ی ۲ است؛ و این یعنی اگر تکانه‌ی ذره‌ی ۱ را با تکانه‌ی ذره‌ی ۲ جمع کنیم، نرخ تغییرات این جمع صفر است. یا:

$$d(p_1 + p_2)/dt = 0 \quad (۲۰۱۰)$$

از ابتدا فرضمان این بود که نیروی دیگری در مسئله نیست. صفر بودن همیشگی نرخ تغییرات این جمع، بیان دیگری است از این که کمیت  $p_1 + p_2$  ثابت است. (این کمیت همچنین به شکل  $m_1v_1 + m_2v_2$  نوشته شده و به آن برآیند تکانه‌ی دو ذره گفته می‌شود.) پس به این نتیجه می‌رسیم که تکانه‌ی کل دو ذره با نیروهای داخلی و مشترک بین آن‌ها تغییری نمی‌کند. این عبارت قانون پایستگی تکانه را در یک مثال خاص

بیان می‌کند. نتیجه می‌گیریم که هر نوع نیرویی هم که بین دو ذره وجود داشته باشد، صرف نظر از پیچیدگی آن، مقدار  $m_1v_1 + m_2v_2$ ، که جمع دو اندازه حرکت است، قبل و بعد اثرگذاری نیروها مقدار یکسانی دارد و تکانه‌ی کل پایسته است.

اگر مسئله را به سه یا تعداد بیشتری ذره تعمیم دهیم و حالات پیچیده‌تری را در نظر بگیریم، تا جایی که مربوط به نیروهای داخلی است، مشخص است که تکانه‌ی کل تمام ذرات ثابت می‌ماند، زیرا که افزایش در تکانه‌ی یک ذره، تحت تاثیر ذره‌ی دیگر، همیشه همراه با کاهش تکانه‌ی ذره‌ی دوم، تحت اثر ذره‌ی اول است. یعنی تمام نیروهای داخلی با یکدیگر به تعادل می‌رسند و نمی‌توانند تکانه‌ی کل سیستم را تغییر دهند. پس اگر هیچ نیرویی از بیرون در کار نباشد (نیروی خارجی) نیرویی نخواهیم داشت که بتواند تکانه‌ی کل را تغییر دهد، پس تکانه‌ی کل ثابت می‌ماند.

بررسی نیروهایی که از فعل و انفعال مشترک بین ذرات ناشی نمی‌شوند نیز می‌تواند مفید باشد: فرض کنید ذراتی که در واکنش با هم هستند را ایزوله کنیم. اگر فقط نیروها و انفعالات مشترک بین آن‌ها وجود داشته باشند تکانه‌ی کل مثل قبل، صرف نظر از اینکه نیروها چه مقدار پیچیده‌اند، تغییری نمی‌کند. از سوی دیگر فرض کنید نیروهایی هم هستند که از ذراتی خارج از محدوده‌ی ذرات ایزوله‌شده‌ی ما ناشی می‌شوند. هر نیرویی که از اجسام خارجی به اجسام داخلی ایزوله شده وارد می‌شود را خارجی می‌نامیم. بعداً باید به این نتیجه برسیم که برآیند تمام نیروهای خارجی برابر با نرخ تغییرات تکانه‌ی کل ذرات ایزوله شده است، که انصافاً نظریه‌ی پر فایده‌ای است.

پایستگی تکانه‌ی کل تعدادی ذره‌ی در واکنش با هم را، اگر نیروی خارجی‌ای وجود نداشته باشد، می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$m_1v_1 + m_2v_2 + m_3v_3 + \dots = \text{ثابت} \quad (3.10)$$

که جرم‌ها و سرعت‌های مربوط به هر کدام با اعداد ۱ و ۲ و ۳ و ۴ و ... شماره‌گذاری شده‌اند. صورت عمومی قانون دوم نیوتون برای هر ذره به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$F = \frac{d}{dt}(mv) \quad (4.10)$$

و به طور خاص برای مؤلفه‌های نیرو و تکانه در یک راستای خاص نیز درست است: بنابراین مؤلفه‌ی  $x$  نیروی وارد بر یک ذره برابر نرخ تغییرات تکانه‌ی آن ذره در جهت  $x$  است، یا:

$$F_x = \frac{d}{dt}(mv_x) \quad (5.10)$$

و به طور مشابه برای مؤلفه‌های  $y$  و  $z$  هم به همین ترتیب معادلاتی را خواهیم داشت. پس معادله‌ی (۳.۱۰) در عمل سه معادله است و برای هر راستا یک معادله خواهیم داشت.

در کنار قانون پایستگی تکانه نتیجه‌گیری جالب دیگری هم از قانون دوم نیوتون، که بعداً آن را اثبات خواهیم کرد و فعلاً فقط معرفی‌اش می‌کنیم، نیز وجود دارد. این نتیجه‌گیری می‌گوید که قوانین فیزیک چه ما ساکن باشیم و چه با سرعت ثابت در یک راستا حرکت کنیم، یکسان باقی می‌مانند. برای مثال کودکی که در هواپیما با یک توپ بازی می‌کند، رفتار توپ و بالا و پایین پریدن‌های آن را همان‌طور می‌یابد که در روی زمین بود. با اینکه هواپیما با سرعت بالایی حرکت می‌کند، اگر تغییری در سرعتش ایجاد نشود، قوانین با زمانی که هواپیما روی زمین ساکن بوده یکسان به نظر می‌آیند. این اصل معروف به نسبیت است. با توجه به معنایی که اینجا از این کلمه ارائه می‌کنیم بهتر است عبارت "نسبیت گالیه‌ای" را به جای نسبیت به کار بریم تا تفاوت آن با نسبیت اینشتین مشخص باشد، مبحثی که بعداً به آن خواهیم پرداخت.

ما فقط قانون پایستگی تکانه را از قوانین نیوتون استخراج کردیم و می‌توانیم از این نقطه به سمتی برویم که قوانین ویژه‌ای را برای توضیح برخوردها به دست آوریم. ولی برای ایجاد کمی تنوع، مرور نوعی استدلال که در موارد دیگری هم در فیزیک کاربرد خواهد داشت و اینکه شاید کسی با قوانین نیوتون آشنایی نداشته باشد و احتمالاً روش دیگری را اتخاذ کند، قوانین برخورد را از دیدگاه کاملاً متفاوتی بررسی می‌کنیم. پایه‌ی بحث خود را اصل نسبیت گالیه‌ای که در بالا به آن اشاره شد قرار می‌دهیم و با رسیدن به قانون پایستگی تکانه بحث را می‌بندیم.

از این نقطه باید شروع کنیم که اگر در حال دویدن با سرعت و جهت ثابت به طبیعت بنگریم، طبیعت شبیه آن چیزی به نظر می‌رسد که هنگام ساکن بودن ما به نظر می‌رسید. قبل از بررسی برخوردهایی که در آن دو جسم به یکدیگر برخورد می‌کنند و به یکدیگر می‌چسبند، یا اینکه بعد از برخورد دوباره از هم جدا می‌شوند، باید ابتدا دو جسمی را که با یک فنر یا چیز دیگری در کنار هم نگه داشته شده‌اند و سپس رها می‌شوند و فنر هر دوی آن‌ها را به دو طرف هل می‌دهد یا با یک انفجار کوچک از هم فاصله می‌گیرند بررسی کنیم.

همچنین باید فعلاً حرکت را تنها در یک راستا در نظر بگیریم. ابتدا، بگذارید فرض کنیم که دو جسم کاملاً یکسان‌اند و اجسام متقارنی هستند، و انفجار کوچکی بین آن‌ها رخ می‌دهد. بعد از انفجار، یکی از دو جسم در جهتی، مثلاً راست، با سرعت  $v$  حرکت می‌کند. منطقی به نظر می‌رسد که جسم دوم در جهت چپ با سرعت  $v$  حرکت کند، زیرا اگر اجسام یکسان باشند دلیلی وجود ندارد که چپ یا راست بر دیگری ترجیحی داشته باشد، پس اجسام رفتاری را نشان می‌دهند که تقارن داشته باشد. این نوعی از تحلیل و فکر کردن است که در خیلی از مسائل می‌تواند به کمک ما بیاید و اگر فقط به معادلات مسئله‌ی برخورد می‌پرداختیم این نوع تحلیل کردن را نمی‌دیدیم.

اولین نتیجه در آزمایش قبل ما این بود که اجسام یکسان سرعت برابر خواهند داشت، ولی حالا فرض کنید که دو جسم داریم که از مواد متفاوتی ساخته شده‌اند، مثلاً مس و آلومینیوم، ولی جرم آن‌ها یکسان است. حالا باید فرض کنیم که اگر آزمایش قبل را با این دو جسم انجام دهیم با این حال که دو جسم یکسان نیستند، سرعت‌های برابر خواهند داشت. ولی شاید کسی این‌طور اعتراض کند که: "می‌توان این مسیر را

برعکس ترسیم کرد، لزومی ندارد چنین فرضی کنیم. بلکه می‌توان تعریف دو جرم برابر را داشتن سرعت برابر در آزمایش قبل دانست". ما این پیشنهاد را پی می‌گیریم و انفجار کوچکی را بین یک قطعه مس و یک قطعه‌ی بزرگ آلومینیومی ایجاد می‌کنیم، آلومینیوم را آن قدر سنگین می‌گیریم که مس بعد از انفجار سرعت بالایی بگیرد ولی آلومینیوم به سختی و تنها کمی حرکت کند. برای اینکار مقدار زیادی آلومینیوم لازم است، پس مقدار آلومینیوم را کم می‌کنیم تا جایی که فقط یک تکه‌ی کوچک باقی بماند، حالا اگر انفجار رخ دهد آلومینیوم سرعت زیادی می‌گیرد و در عوض مس به سختی و با سرعتی کم حرکت می‌کند. این مقادیر خیلی مطلوب نیستند و بدیهی است که مقدار مطلوبی بین این مقادیر وجود دارد؛ پس این اندازه‌ها را آنقدر تغییر می‌دهیم تا به سرعت‌های برابر مورد نظر خود برسیم. خیلی هم خوب، بگذارید این کار را انجام دهیم و دست آخر هم این‌طور بگوییم که وقتی سرعت‌ها برابر شدند، به جرم‌های برابر رسیده‌ایم. این عبارت فقط یک تعریف ساده به نظر می‌آید و خیلی قابل توجه است که می‌توانیم قوانین فیزیک را به تعاریف تبدیل کنیم. به هر حال قوانینی هم وجود دارند و اگر این تعریف جرم برابر را بپذیریم می‌توانیم یک قانون را به شرح زیر از آن استخراج کنیم.

فرض کنید با انجام دادن آزمایش گذشته دریافتیم که دو قطعه‌ی  $A$  و  $B$ ، از مس و آلومینیوم، جرم یکسانی دارند. جسم سومی را، مثلاً یک قطعه طلا، با قطعه‌ی مسی به همان شیوه‌ی قبل مقایسه می‌کنیم و مطمئن می‌شویم که جرم آن با قطعه‌ی مسی برابر است. حالا اگر آزمایش را بین قطعه‌ی آلومینیوم و قطعه‌ی طلا انجام دهیم، از منطق چیزی نداریم که لازم بدانند جرم این دو هم برابر باشد؛ با این حال، آزمایش نشان می‌دهد که این دو واقعا جرم یکسانی دارند. پس حالا، با آزمایش، قانون جدیدی را پیدا کرده‌ایم. یک بیان این قانون می‌تواند به این صورت باشد: اگر دو جرم، هر کدام با جرم سومی برابر باشند (چیزی که با سرعت‌های برابر در این آزمایش تعیین شد)، آنگاه آن دو جرم هم برابر هستند (این نتیجه به هیچ وجه از اصل مشابهی در ریاضی که درباره‌ی مقادیر ریاضی است به دست نمی‌آید). از این مثال می‌توانیم ببینیم که، اگر بی احتیاطی کنیم، چقدر سریع شروع به استنتاج می‌کنیم. این که دو جرم برابرند وقتی سرعت برابر دارند فقط یک تعریف نیست، زیرا برای اینکه دو جرم را برابر بدانیم باید قوانین برابری ریاضی را به کار ببریم، که پیش‌بینی‌هایی درباره‌ی آزمایش‌ها به ما می‌دهد.

برای مثال دوم فرض کنید که  $A$  و  $B$  در انفجاری با قدرت مشخص، که سرعتی برابر به دو جسم داده، جرم یکسانی نشان داده‌اند؛ حالا اگر آزمایش را با انفجاری قوی‌تر انجام دهیم آیا صحیح است که بگوییم سرعت‌های دو جسم باز هم برابر خواهد بود؟ اینجا هم از حیطه‌ی منطق چیزی نداریم که جواب این سوال را به ما بدهد، ولی آزمایش نشان می‌دهد که صحیح است. پس قانون دیگری را پیدا کردیم: وقتی دو جسم جرم‌های برابر دارند، که با سرعت‌های برابر خاصی به این نتیجه رسیده‌ایم، این دو جسم در سرعت‌های دیگر هم جرم برابر خواهند داشت. در این مثال‌ها دیدیم که جمله‌ای که در ظاهر فقط یک تعریف ساده بود، شامل چند قانون فیزیکی می‌شود.

در ادامه باید این را فرض کنیم که دو جرم برابر بعد از انفجاری که بین آن‌ها رخ دهد سرعت‌های برابر



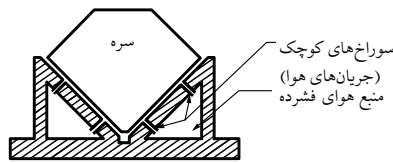
خواهند داشت. همچنین باید فرض دیگری را در حالت عکس داشته باشیم: «اگر دو جسم یکسان که در دو جهت مخالف با سرعت‌های برابر حرکت می‌کنند، با هم برخورد کنند و به یکدیگر بچسبند در چه جهتی حرکت خواهند کرد؟»

این باز یک مسئله‌ی متقارن است، بدون وجود اولییتی برای به چپ یا به راست رفتن مجموعه. پس فرض می‌کنیم که دو جسم بعد از برخورد می‌ایستند. در نهایت فرض جدید این می‌شود که اگر دو جسم با جرم‌های برابر، حتی وقتی که از مواد مختلفی ساخته شده‌اند، با سرعت‌های برابر با یکدیگر برخورد کنند و به هم بچسبند، بعد از برخورد می‌ایستند.

### ۳.۱۰ تکانه پایسته است!

فرض‌های بالا را می‌توانیم با آزمایش تایید کنیم: فرض اول این بود که اگر دو جسم ثابت هم جرم با یک انفجار از هم جدا شوند، با سرعت‌های برابر از هم فاصله می‌گیرند. و فرض دوم این‌که اگر دو جسم هم جرم با سرعت‌های یکسان به هم برسند، برخورد کنند و به یکدیگر بچسبند، همان‌جا می‌ایستند. این آزمایش‌ها را روی یک اختراع جالب به نام ریل هوا، وسیله‌ای که اصطکاک را می‌تواند حذف کند تا مشکلی که گالیله را آزرده بود از بین برود، می‌توانیم انجام دهیم (شکل ۱.۱۰). گالیله نمی‌توانست آزمایش‌های برخورد را انجام دهد زیرا نمی‌توانست شرایطی را ایجاد کند تا اجسام آزادانه سر بخورند ولی امروزه ما می‌توانیم این کار را انجام دهیم. اجسام ما با سرعت ثابت همان‌طور که گالیله می‌خواست سر می‌خورند، که به یمن حضور ریل هوا این امکان فراهم شده است. از آنجا که هوا اصطکاک کمی را ایجاد می‌کند، اگر نیرویی به اجسام وارد نشود، روی ریل هوا با سرعت ثابت حرکت می‌کنند. برای انجام دادن آزمایش‌ها از دو قطعه‌ای که با دقت خوبی ساخته شده‌اند تا وزن یکسانی داشته باشند (یا جرم یکسان که متناسب با وزن است) استفاده می‌کنیم. یک کلاهک انفجاری در سیلندر بسته‌ای بین دو قطعه قرار می‌دهیم (شکل ۲.۱۰). دو قطعه را ساکن در وسط ریل قرار می‌دهیم و سپس با یک جرقه‌ی الکتریکی و ایجاد انفجار دو قطعه را به دو طرف حرکت می‌دهیم. چه اتفاقی باید رخ دهد؟ اگر سرعت آن‌ها بعد از انفجار برابر باشد؛ باید هم‌زمان به دو انتهای ریل برسند. بعد از رسیدن به انتهای ریل هر دو جسم با همان سرعت‌ها در جهت عکس بر می‌گردند و در وسط ریل دوباره به هم برخورد می‌کنند و می‌ایستند. این آزمایش مفیدی است و بعد از انجام دادن آن به همین نتایج می‌رسیم (شکل ۳.۱۰).

حالا چیزی که می‌خواهیم بررسی کنیم این است که در شرایطی که دیگر تا این حد ساده نباشد چه اتفاقی می‌افتد. فرض کنید دو جرم یکسان داریم، یکی متحرک با سرعت  $v$  و دیگری ساکن، این دو به یکدیگر برخورد می‌کنند و به هم می‌چسبند؛ چه اتفاقی می‌افتد؟ جسمی به جرم  $2m$  در حال حرکت داریم. سرعتش چقدر است؟ پس صورت مسئله را فهمیدیم. برای پیدا کردن جواب از این فرض استفاده می‌کنیم که اگر در یک خودروی در حال حرکت با سرعت ثابت باشیم فیزیک تغییری نمی‌کند. از این‌جا شروع می‌کنیم که وقتی



شکل ۱۰.۱: نمایی از انتهای ریل هوا

دو جسم یکسان با سرعت برابر در دو جهت مختلف به هم برخورد کنند و به یکدیگر بچسبند در همان محل برخورد می‌ایستند. فرض کنید وقتی این اتفاق می‌افتد ما در یک خودرویی که با سرعت  $v$  در حال حرکت است نشسته‌ایم. سوال این است که در این حالت برخورد دو جسم را چگونه می‌بینیم؟ چون همراه یکی از جسم‌ها، هم جهت و هم سرعت با آن، در حال حرکت هستیم آن را ثابت می‌بینیم و سرعت جسم دیگر را که با سرعت  $v$  در جهت خلاف ماشین در حال حرکت است  $2v$  می‌بینیم (شکل ۴.۱۰). در نهایت دو جسم به هم چسبیده‌ی بعد از برخورد را می‌بینیم که با سرعت  $v$  از ما دور می‌شوند پس نتیجه می‌گیریم که وقتی یک جسم با سرعت  $2v$  به یک جسم ساکن ولی با جرمی برابر جرم خودش برخورد کند و به آن بچسبد، هر دوی آن‌ها با سرعت  $v$  در همان جهت حرکت جسم اول حرکت می‌کنند. دقت کنید که اگر سرعت و جرم هر جسم را قبل از برخورد در هم ضرب کنیم و مقادیر به دست آمده به ازای هر جسم را با یکدیگر جمع کنیم  $mv + 0$  و همین محاسبه را بعد از برخورد انجام دهیم، که به  $2m \times \frac{v}{2}$  برسیم، مقادیر یکسانی را به دست خواهیم آورد. پس فهمیدیم که بعد از برخورد یک جسم با سرعت  $v$  با یک جسم هم جرم خودش، ولی ساکن، چه رخ می‌دهد.

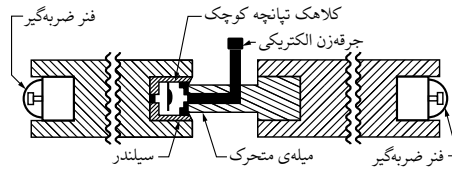
به روش مشابه می‌توانیم پیش‌بینی کنیم که در پی برخورد دو جسم هم جرم با سرعت‌های دلخواه، چه رخ می‌دهد.

فرض کنید دو جسم یکسان با سرعت‌های  $v_1$  و  $v_2$  داریم که به هم برخورد می‌کنند و به یکدیگر می‌چسبند. بعد از برخورد چه سرعت‌هایی خواهند داشت؟ دوباره سوار خودرویی می‌شویم که این بار با سرعت  $v_2$  هم جهت با جسم دوم حرکت می‌کند. بنابراین جسم دوم را از درون خودرو ساکن می‌بینیم. سرعت حرکت جسم شماره ۱ را برابر  $v_1 - v_2$  می‌بینیم، و در نهایت به موردی مشابه مثال قبل می‌رسیم. پس وقتی برخورد تمام می‌شود دو جسم در دو جهت مخالف با سرعت  $\frac{1}{2}(v_1 - v_2)$  نسبت به ماشین حرکت می‌کنند. در این حالت سرعت آن‌ها روی زمین چه خواهد بود؟

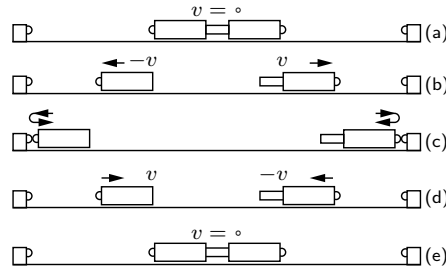
این سرعت  $v_2 + \frac{1}{2}(v_1 - v_2)$  یا  $v = \frac{1}{2}(v_1 + v_2)$  خواهد بود. (شکل ۵.۱۰)

$$mv_1 + mv_2 = 2m(v_1 + v_2)/2 \quad (6.10)$$

پس با استفاده از این اصل، هر نوع برخوردی را که در آن دو جرم برابر به هم برخورد می‌کنند و به یکدیگر می‌چسبند، می‌توانیم تحلیل کنیم. در واقع با وجود اینکه فقط در یک بعد تحلیل‌هایمان را انجام داده‌ایم، با



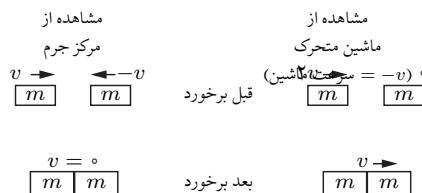
شکل ۲.۱۰: نمای بخشی که سره‌ها با کلاهک انفجاری بر هم کنش انجام می‌دهند



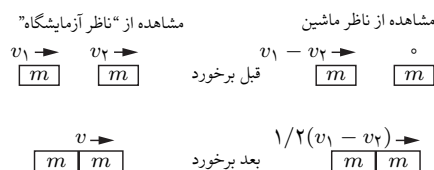
شکل ۳.۱۰: نمایش مقایسه‌ی آزمایش‌های کنش-واکنش با جرم‌های برابر

تصور اینکه در خودرویی در حال حرکت در جهت مناسب برای حل مسئله نشستیم و به مسئله می‌نگریم، می‌توانیم اطلاعات زیادی را درباره‌ی برخوردهای پیچیده‌تر نیز بیابیم. در نتیجه اصول یکسان هستند و جزئیات آن‌ها که کمی پیچیده‌تر می‌شوند.

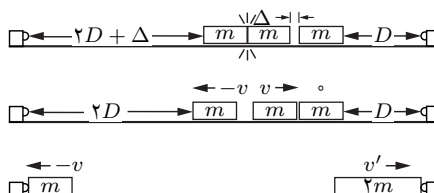
برای آزمایش کردن اینکه آیا برخورد یک جسم متحرک با سرعت  $v$  با جسم یکسان ثابت، منجر به حرکت دو جسم با سرعت  $\frac{v}{2}$  می‌شود یا خیر، باید آزمایشی را با ریل هوا طراحی و اجرا کنیم. لازم است تا سه قطعه‌ی هم‌جرم را روی ریل قرار دهیم که دو قطعه‌ی آن از ابتدا به هم متصل‌اند و یک سیلندر انفجاری نیز درون آن‌ها تعبیه شده است؛ قطعه‌ی سوم، با مقداری مواد چسبنده روی خود، بسیار نزدیک به دو قطعه‌ی دیگر ولی جدا از آن‌ها قرار گرفته است. لحظه‌ای بعد از انفجار، دو قطعه با سرعت‌های یکسان  $v$  ولی در جهت‌های مخالف داریم. لحظه‌ای بعد از این یکی از جسم‌های متحرک با جسم سوم برخورد می‌کند و به آن می‌چسبد و در نتیجه‌ی آن قطعه‌ای به جرم  $2m$  خواهیم داشت که تصور این است که سرعتش  $\frac{v}{2}$  باشد. حالا



شکل ۴.۱۰: دو نما از برخورد غیر کشسان بین جرم‌های برابر



شکل ۵.۱۰: دو نما از یک برخورد غیر کشسان دیگر بین دو جرم برابر

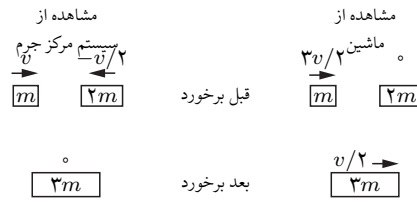


شکل ۶.۱۰: آزمایشی برای تأیید اینکه اگر یک جسم با جرم  $m$  و سرعت  $v$  با یک جسم به جرم  $m$  و سرعت صفر برخورد کند، پس از برخورد عملاً معادل با حالتی می‌شود که جسمی به جرم  $2m$  با سرعت  $\frac{v}{2}$  حرکت کند.

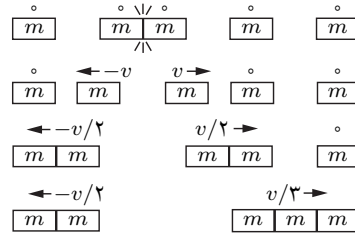
چگونه باید این تصور خود را بیازماییم؟ با تنظیم کردن مکان اولیه‌ی قطعات، طوری که فاصله‌ی آن‌ها از دو انتهای ریل یکسان نباشد ولی نسبت دو فاصله ۲ به ۱ باشد. یعنی جرم اول که با سرعت  $v$  حرکت می‌کند دو برابر دو جرمی که به یکدیگر چسبیده‌اند فاصله طی کند تا به انتهای ریل برسد (با احتساب مسافت کوچک طی شده توسط جرم دوم، قبل از برخوردش با سومی) اگر تصور ما از سرعت دو جسم صحیح باشد دو جرم  $m$  و  $2m$  باید همزمان به دو انتهای ریل برسند و وقتی آزمایش را انجام می‌دهیم همین اتفاق هم می‌افتد. (شکل ۶.۱۰)

مسئله بعدی که می‌خواهیم به آن بپردازیم وقتی است که دو جسم با جرم‌های متفاوت داریم. بگذارید یک جرم را  $m$  و دیگری را  $2m$  قرار دهیم و انفجاری بین آن‌ها ایجاد کنیم. حرکت دو جسم چگونه خواهد بود؟ اگر در پی انفجار،  $m$  با سرعت  $v$  حرکت کند  $2m$  چه سرعتی خواهد داشت؟ آزمایش قبلی را می‌توان با فاصله‌ی صفر بین جسم دوم و سوم تکرار کرد و همان نتیجه‌ی قبلی تکرار خواهد شد. جرم‌های  $m$  و  $2m$  با سرعت‌های  $v$  و  $\frac{v}{2}$  حرکت می‌کنند. پس یک انفجار بین  $m$  و  $2m$  همان نتیجه را می‌دهد که یک انفجار بین  $m$  و  $m$  و برخورد یکی از آن‌ها به جرم سوم  $m$  و چسبیدن آن را در پی خواهد داشت. اگر کمی صبر کنیم تا دو جرم  $m$  و  $2m$  به دو انتهای ریل برخورد کنند، سرعتشان عکس شود، به سمت هم حرکت کنند و به هم برخورد کنند، اگر به یکدیگر بچسبند، خواهیم دید که در محل برخورد خواهند ایستاد. (شکل ۶.۱۰)

سوال بعدی که می‌توان پرسید این است که اگر جرم  $m$  با سرعت  $v$  به جرم  $2m$  ساکن برخورد کند و به آن بچسبد چه اتفاقی می‌افتد؟ جواب دادن به این سوال با استفاده از نسبیت گالیله‌ای خیلی راحت است، زیرا که خیلی راحت، همان‌طور که بارها گفته‌ایم، برخورد را از درون ماشینی که با سرعت  $\frac{-v}{2}$  حرکت



شکل ۷.۱۰: دو نما از برخورد غیر کشسان بین دو جرم  $m$  و  $2m$



شکل ۸.۱۰: کنش و واکنش بین دو جرم  $2m$  و  $3m$ .

می‌کند، (شکل ۷.۱۰) نگاه می‌کنیم که در نتیجه‌ی آن سرعت‌ها به قرار زیر به نظر خواهند آمد:

$$v'_1 = v - v_{(car)} = v + v/2 = 3v/2$$

و

$$v'_2 = -v/2 - v_{(car)} = -v/2 + v/2 = 0.$$

بعد از برخورد؛ جرم  $3m$  در نظر ما، که در خودرو نشسته‌ایم، با سرعت  $\frac{v}{3}$  حرکت می‌کند. پس الآن ما جواب مسئله را داریم، نسبت سرعت‌ها قبل و بعد از برخورد ۳ به ۱ است: اگر جسمی با جرم  $m$ ، با جسمی ساکن به جرم  $2m$  برخورد کند، آن‌گاه دو جسم بعد از چسبیدن به هم با  $\frac{1}{3}$  سرعت اول  $m$  حرکت خواهند کرد. قانون عمومی باز هم این است که مجموع ضرب جرم‌ها در سرعت‌هایشان ثابت باقی می‌ماند.  $mv + 0$  برابر  $3m \times \frac{v}{3}$  است؛ کم کم داریم قانون پایستگی تکانه را می‌سازیم. پس حالا جواب یک مقابل دو را داریم. با استفاده از روش‌های مشابه می‌توانیم نتایج یک مقابل سه، یا دو مقابل سه و غیره را به‌دست آوریم. مثال دو در مقابل سه که از حالت سکون شروع شود در شکل ۸.۱۰ نشان داده شده است. در هر مورد می‌بینیم که جرم جسم اول ضرب در سرعت آن به علاوه‌ی جرم جسم دوم، ضرب در سرعت آن، برابر با حاصل ضرب جرم جسم نهایی و سرعت آن است. این‌ها همه‌ی مثال‌های ما از پایستگی تکانه بودند. از مثال‌های ساده و مقارن شروع کردیم و قانونی را برای موارد پیچیده‌تر پیدا کردیم. در واقع می‌توانیم این راه‌حل‌ها را برای هر نسبت جرم گویا انجام دهیم و از آن‌جا که برای هر نسبتی می‌توان نسبتی گویا به اندازه‌ی دلخواه نزدیک

به آن پیدا کرد، پس می‌توانیم هر نسبت جرمی را با هر دقتی بررسی کنیم.

## ۴.۱۰ تکانه و انرژی

همه‌ی مثال‌هایی که مرور شد، مواردی بودند که در آن‌ها یا اجسام به هم برخورد می‌کردند و به هم می‌چسبیدند یا از اول به هم چسبیده بودند و با یک انفجار از هم جدا می‌شدند. ولی مواردی هم وجود دارند که در آن‌ها دو جسم یکی نمی‌شوند. برای مثال، دو جسم هم جرم که به یکدیگر برخورد می‌کنند و دوباره باز می‌گردند برای لحظه‌ی کوتاهی فشرده شده، و در تماس با یکدیگرند. در لحظه‌ی بیشینه‌ی فشردگی، هر دو سرعتی برابر با صفر دارند و انرژی در بدنه‌های الاستیک آن‌ها، مانند فنر، ذخیره شده است. این انرژی از همان انرژی جنبشی اجسام قبل از برخورد ناشی می‌شود، و وقتی سرعت‌ها صفر شود، انرژی جنبشی هم صفر می‌شود. البته از دست رفتن انرژی جنبشی فقط برای چند لحظه دوام دارد. حالت فشردگی شبیه کلاهک انفجاری است که در مثال انفجار، انرژی آزاد می‌کند. دو جسم به سرعت از حالت فشردگی، خارج شده و دوباره به طرفین پرتاب می‌شوند؛ که شبیه این اتفاق را قبلاً کامل بررسی کرده‌ایم - دو جسم با سرعت‌های برابر به دو طرف می‌روند. البته عموماً سرعت بازگشت دو جسم از سرعت اولیه‌ی آن‌ها کم‌تر است، زیرا که همه‌ی انرژی اولیه تبدیل به انرژی انفجاری نمی‌شود و مقدار انرژی تبدیل شده وابسته به جنس دو جسم است. اگر جنس اجسام خمیر مانند باشد، اکثر انرژی جنبشی بازگردانده نمی‌شود. ولی اگر جنس صلب‌تری باشد، معمولاً مقداری از انرژی جنبشی بازگردانده می‌شود. بعد از برخورد، بقیه‌ی انرژی جنبشی به گرما و انرژی لرزشی تبدیل می‌شود و اجسام گرم و لرزان می‌شوند. انرژی لرزشی هم البته خیلی زود به گرما تبدیل می‌شود. این امکان وجود دارد که مواد را از مواد خیلی الاستیک، مانند فولاد و با بامپ‌هایی که به خوبی طراحی شده‌اند، ساخت تا برخورد گرما و لرزش خیلی کمی را ایجاد کند. با این شرایط سرعت بازگشت دو جسم عملاً برابر سرعت اولیه‌ی آن‌ها خواهد بود و برخوردی که این ویژگی را داشته باشد، الاستیک نامیده می‌شود.

اینکه سرعت اجسام قبل و بعد از برخوردهای الاستیک برابر است، ربطی به پایستگی تکانه ندارد بلکه اینجا بحث، بحث پایستگی انرژی است و سرعت برابر دو جسم یکسان، بعد از پرتاب شدن به دو طرف در پی یک انفجار است که مربوط به پایستگی تکانه می‌شود.

احتمالاً بتوانیم برخورد بین اجسام با جرم‌های مختلف، سرعت‌های اولیه متفاوت و یا الاستیسیته‌های مختلف را نیز تحلیل کرده و سرعت‌های نهایی و مقدار انرژی تلف شده را به دست آوریم؛ ولی بهتر است که سراغ این ریزه‌کاری‌ها نرویم.

برخوردهای الاستیک به طور خاص درباره‌ی اجسامی که هیچ‌گونه "چرخ‌دنده، چرخ و قسمت" داخلی‌ای ندارند جالب توجه است. زیرا وقتی که برخورد انجام می‌شود قسمت اضافی‌ای در این اجسام وجود ندارد که انرژی جذب آن شود، چون اجسامی که از هم دور می‌شوند دقیقاً در همان شرایطی هستند که هنگام برخورد

بودند. پس بین اجسام خیلی بنیادی برخوردها همیشه کاملاً الاستیک یا حداقل خیلی نزدیک به الاستیک است. برای مثال برخورد بین مولکول‌ها یا اتم‌ها در یک گاز، کاملاً الاستیک در نظر گرفته می‌شود. اگرچه این تقریب بسیار خوبی است ولی این دست برخوردها هم به طور کامل الاستیک نیستند؛ اگر این‌طور بود کسی نمی‌توانست توضیح دهد نور یا گرمایی که از گازها تابیده می‌شود، از کجا می‌آید. هر از چند گاهی در یک برخورد درون گاز، یک پرتوی فرو سرخ کم‌انرژی تابیده می‌شود. ولی این اتفاق خیلی نادر است و انرژی آن پرتو هم خیلی ناچیز. پس می‌بینیم که فرض کاملاً الاستیک بودن این برخوردها برای بسیاری از اهداف معقول است.

به عنوان یک مثال جالب، برویم سراغ یک برخورد الاستیک بین دو جسم هم جرم. اگر این دو جرم با سرعت برابر به هم برسند بنابر تقارن با سرعت برابر هم از یکدیگر دور می‌شوند. همین مثال را در شرایطی که یکی از اجسام با سرعت  $v$  حرکت می‌کند و دیگری ثابت است نگاه کنید. به نظرتان چه بر سر این دو جسم خواهد آمد؟ ما قبلاً هم این مسئله را حل کرده‌ایم. می‌توانیم داخل خودرویی که با سرعت مناسب هم‌جهت با جسم متحرک در حرکت است بنشینیم و برخورد متقارنی را از درون آن شاهد باشیم و با تبدیلات مناسب سرعت، به این نتیجه می‌رسیم که اگر یک جسم در حال حرکت با یک جسم ساکن برخورد الاستیک داشته باشد، جسم متحرک می‌ایستد و جسمی که ساکن بود با همان سرعت اولیه‌ی جسم متحرک شروع به حرکت می‌کند؛ خلاصه اینکه دو جسم، خیلی ساده، حرکتشان را با هم معاوضه می‌کنند. این رفتار به سادگی با یک آزمایش مناسب قابل مشاهده است. عبارت عام‌تری که می‌توانیم بگوییم این است که، اگر هر دو جسم، با سرعت‌های متفاوت، در حرکت باشند خیلی ساده در هنگام اصابت سرعت‌هایشان را معاوضه می‌کنند.

مثالی دیگر از برخوردهای تقریباً الاستیک را باید در مغناطیس پیدا کنیم. اگر دو عدد آهنربای  $U$  شکل را در قطعه‌های روی ریل هوا تعبیه کنیم که وقتی دو قطعه به هم نزدیک شدند همدیگر را دفع کنند؛ در پی نزدیک شدن دو قطعه، قطعه‌ی متحرک سرعتش کم می‌شود تا کامل بایستد و قطعه‌ی دیگر بدون اصطکاک شروع به حرکت می‌کند.

اصل پایستگی تکانه بسیار پر کاربرد است، زیرا این امکان را به ما می‌دهد که بدون دانستن خیلی از جزئیات، مسائل متعددی را حل کنیم. برای نمونه ما جزئیات حرکت گاز درون کلاهک انفجاری را نمی‌دانستیم ولی حرکت قطعه‌ها را بعد از انفجار توانستیم پیش‌بینی کنیم. مثال خیلی جذاب دیگر پیش رانش موشک است. یک موشک با جرم زیاد  $M$ ، یک قسمت کوچک از خود را به جرم  $m$  با سرعت زیاد  $V$  جدا می‌کند. بعد از این جدا شدن اگر موشک ابتدا ساکن بوده باشد با سرعت کوچک  $v$  شروع به حرکت می‌کند. که با استفاده از اصل پایستگی تکانه می‌توان این  $v$  را به دست آورد.  $v = \frac{m}{M}V$ . تا زمانی که از موشک جرم جدا می‌شود، می‌تواند بر سرعت خود بیافزاید. این مدل پیش رانش موشک دقیقاً شبیه همان مکانیزم لگد زدن تفنگ است و مثل همان جا، اینجا هم هم نیازی به هوا برای هل دادن نیست.

## ۵.۱۰ تکانه‌ی نسبیتی

در دوران ما قانون پایستگی تکانه با تغییراتی روبرو شده است. البته امروزه هم کلیت این قانون همچنان پابرجا است و بیشتر، تصحیحاتی روی تعریف‌ها انجام شده است. در نظریه‌ی نسبیت دیده می‌شود که ما قانون پایستگی تکانه را همچنان داریم؛ ذرات جرم دارند و تکانه هنوز با  $mv$ ، حاصل ضرب جرم و سرعت، داده می‌شود. ولی جرم با تغییر سرعت، تغییر می‌کند، بنابراین تکانه هم تغییراتی را خواهد داشت. رابطه‌ی جرم و سرعت به شکل زیر است:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (۷.۱۰)$$

که  $m_0$  جرم جسم در حال سکون و  $c$  سرعت نور است. از صورت معادله پر واضح است که  $m$  و  $m_0$  تفاوت چندانی نخواهند داشت مگر اینکه  $v$  خیلی بزرگ باشد، بنابراین برای سرعت‌های معمولی معادله‌ی تکانه به همان صورت قبلی باقی می‌ماند. مؤلفه‌های تکانه برای یک تک ذره به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$p_x = \frac{m_0 v_x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad p_y = \frac{m_0 v_y}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad p_z = \frac{m_0 v_z}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (۸.۱۰)$$

که  $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ . اگر مؤلفه‌ی  $x$  تکانه‌ی همه‌ی ذرات درگیر، یک‌بار قبل از برخورد و یک‌بار بعد از آن جمع زده شوند به دو مقدار برابر می‌رسیم؛ یعنی تکانه در راستای  $x$  پایسته است. همین رویه برای راستاهای دیگر نیز برقرار است.

در فصل چهارم دیدیم که قانون پایستگی انرژی آن‌چنان قابل استفاده نیست مگر اینکه بفهمیم انرژی اولیه به چه صورت‌هایی (الکتریکی، مکانیکی، تابشی یا گرمایی) تبدیل شده است. برای بعضی از این صورت‌های انرژی، مثلاً انرژی گرمایی، بعضی اوقات لفظ انرژی پنهان به کار می‌رود. این انرژی پنهان جرقه‌ای را در ذهن ما می‌زند که: ”آیا مانند انرژی پنهان، تکانه‌های پنهان هم وجود دارند؟ مثلاً تکانه‌ی گرمایی؟” البته پنهان کردن تکانه به دلایلی که در ادامه می‌آید کار بسیار دشواری است.

حرکت کاتوره‌ای اتم‌های یک جسم، معیاری برای اندازه‌گیری انرژی گرمایی است. به نوعی جمع مربع سرعت‌ها که کمیتی بدون راستا است معیار اندازه‌ی این انرژی است. مستقل از اینکه جسم ما حرکت کند یا ثابت باشد انرژی گرمایی آن، وجود دارد و پایستگی انرژی در صورت گرمایی خیلی واضح نیست. از طرف دیگر اگر کسی سرعت‌ها را جمع کند، که حاصل کمیتی جهت‌دار خواهد بود و اگر به مقداری غیر صفر برسد، به این معنی است که حرکتی به یک سمت برای کل جسم وجود دارد و یک تکانه‌ی برآیندی دیده شده است. پس هیچ گونه تکانه‌ی داخلی گمشده و پنهانی وجود ندارد زیرا جسم ما فقط وقتی تکانه خواهد داشت که به عنوان یک کل حرکت کند، پس پنهان کردن تکانه، به عنوان یک کمیت مکانیکی، کار دشواری است. با این حال تکانه در مواردی می‌تواند پنهان باشد مثلاً در الکترومغناطیس این اتفاق می‌افتد که یک اثر نسبیتی است.



یکی از باورهای نیوتون این بود که فعل و انفعالات بین دو جسم، که با فاصله‌ای از هم قرار گرفته‌اند، به صورت آنی رخ می‌دهد. امروزه می‌دانیم که این باور در مواردی مانند نیروهای الکتریکی صادق نیست. اگر یک بار الکتریکی در جایی به طور ناگهانی حرکت داده شود، اثر این تغییر روی یک بار دیگر در جایی دیگر، آنی دیده نمی‌شود و تأخیری وجود خواهد داشت. در این موارد اگر نیروها برابر هم باشند تکانه‌ها تطبیق ندارند؛ بازه‌ی زمانی کوتاهی وجود دارد که در آن با مشکلاتی روبرو می‌شویم، زیرا در بازه‌ی ذره‌ی اول نیروی عکس‌العمل مشخصی را احساس می‌کند، و مقداری تکانه می‌گیرد، در حالی که در همین مدت ذره‌ی دوم هنوز چیزی را حس نکرده و تغییری در تکانه‌ی آن دیده نمی‌شود. مدت زمانی طول می‌کشد تا اثر تغییرات؛ فاصله‌ی بین دو ذره را، با سرعت  $186000 \text{ mph}$  طی کند. در این مدت کوتاه تکانه‌ی ذرات، پایسته نمانده است. اگرچه بعد از اینکه ذره‌ی دوم اثر تغییرات ذره‌ی اول را حس کرد و همه چیز ساکن شد، تکانه‌ها به خوبی با قانون پایستگی تکانه تطبیق پیدا می‌کنند، ولی در طول آن بازه‌ی زمانی کوتاه تکانه پایستگی ندارد. برای حل این مشکل این فرض را می‌کنیم که نوع دیگری از تکانه غیر از تکانه‌ی ذرات،  $mv$  وجود دارد که تکانه‌ی میدان الکترومغناطیسی است. اگر تکانه‌ی میدان را به دیگر تکانه‌هایمان اضافه کنیم در همه‌ی لحظات پایستگی تکانه را خواهیم داشت. این که میدان الکترومغناطیسی می‌تواند تکانه و انرژی داشته باشد، این میدان را خیلی واقعی نشان می‌دهد، و بنابراین برای فهم بهتر مطلب ایده‌ی اولیه‌مان که فقط بین ذرات نیروهایی وجود دارند را باید این طور تصحیح کنیم که ک ذره یک میدان ایجاد می‌کند و آن میدان روی ذره‌ی دیگر اثر می‌گذارد. خود میدان هم ویژگی‌های آشنایی مانند انرژی و تکانه را داراست، درست مانند ذرات که صاحب این ویژگی‌ها هستند. به عنوان مثالی دیگر؛ یک میدان الکترومغناطیس موج‌هایی دارد که به آن‌ها نور می‌گوییم. امروزه این را می‌دانیم که نور هم حامل تکانه است، پس وقتی نور روی جسمی اثر می‌گذارد مقدار مشخصی تکانه را در هر ثانیه به آن وارد می‌کند؛ که این متناظر با وارد کردن نیرو به جسم است. زیرا اگر جسم روشن شده با نور، مقداری تکانه را در هر ثانیه دریافت کند، تکانه‌ی آن تغییر می‌کند و این دقیقاً مانند این است که نیرویی به آن وارد شود. نور می‌تواند با بمباران کردن یک شیء به آن فشار وارد کند، که البته این فشار خیلی کم است؛ ولی با ابزارهای دقیق قابل اندازه‌گیری است.

امروزه در مکانیک کوانتوم مفهوم تکانه متفاوت از تصور قبلی ما است و دیگر برابر  $mv$  نیست. سخت است که بگوییم دقیقاً منظور از سرعت یک ذره در کوانتوم چیست ولی مفهوم تکانه هنوز وجود دارد. تفاوتی که در کوانتوم وجود دارد این است که وقتی ذرات به عنوان ذره در نظر گرفته می‌شوند تکانه‌شان  $mv$  است، ولی وقتی ذرات به عنوان موج در نظر گرفته می‌شوند، تکانه‌ی آن‌ها با تعداد موج در سانتی‌متر اندازه‌گیری می‌شود؛ هرچه این عدد بزرگتر باشد تکانه بزرگتر است. جدا از این تفاوت، قانون پایستگی تکانه هنوز برقرار است. اگرچه قانون  $f = ma$  دیگر اینجا جایگاهی ندارد و تمام دست‌آوردهای نیوتون درباره‌ی پایستگی تکانه در کوانتوم غلط است ولی در نهایت این قانون خاص، خودش را حفظ می‌کند.

Summing Lect 10 on Cons. of Mom.

If all forces are internal — no external forces —  
the total momentum remains constant.