

مبانی نسبیت خاص نسبیت نیوتنی و ناوردایی

حسین شناور

گروه فیزیک، دانشکده علوم



دانشگاه هرمزگان

- خواهشمندم هرگونه اشتباه نوشتاری، مفهومی و یا محاسباتی را به آدرس ایمیل من ارسال کنید تا در ویرایش های بعدی تصحیحات لازم اعمال شوند:

h.shenavar@gmail.com

- از همکاران و دانشجویان محترم در دانشگاه هرمزگان، برای همفکری ها، حمایت ها و گوشزد نمودن نکات مفید سپاسگزارم.
- برای ضبط این درس ها از نرم افزار Camtasia استفاده شده است.

- نسبیت نیوتنی و ناوردایی
- نسبیت نیوتنی و ناوردایی
- ناوردایی در عمل



آنچه گذشت: تبدیلات گالیه

در جلسه قبل با رویداد فیزیکی و مفهوم چارچوب مرجع آشنا شدیم. دیدیم که برای توصیف رویداد (E : event) از یک بردار با سه مولفه مکانی و یک مولفه زمانی به صورت زیر استفاده می‌کنیم:

$$E = \begin{pmatrix} x_E \\ y_E \\ z_E \\ t_E \end{pmatrix}$$

همچنین با این سوال برخورد کردیم که یک پدیده مشخص نسبت به ناظرهای مختلف چطور توصیف می‌شود؟ و البته چگونگی انتخاب ناظر لخت متناسب با مساله را بحث کردیم.

به علاوه با مساله اندازه‌گیری در مکانیک نیوتنی برخورد کردیم و در نهایت تبدیلات گالیه را معرفی کردیم و با برخی نتایج آن آشنا شدیم:



$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases}$$

اهداف این جلسه

- در این جلسه اصل نسبیت نیوتنی و نتایج آن را بررسی خواهیم کرد.
- به علاوه با مفهوم ناوردایی قوانین و کمیت های ناوردا تحت تبدیلات گالیله آشنا خواهیم شد. به ویژه ناوردایی برخی قوانین فیزیکی تحت این تبدیلات را مطالعه خواهیم کرد.



تبدیل سرعت ها

اجازه دهید تبدیل سرعت ها و شتاب ها در دو دستگاه مرجع لخت (تحت تبدیلات گالیه) را بیابیم. برای اینکار، در ابتدا دقت می کنیم که در تبدیلات گالیه داریم $t = t'$. در نتیجه دیفرانسیل های زمانی در این دو دستگاه نیز با هم برابرند $dt = dt'$. به عبارت دیگر، عملگر های $\frac{d}{dt}$ و $\frac{d}{dt'}$ نیز یکسان هستند. بنابراین با توجه به اینکه سرعت، همان آهنگ تغییر در موقعیت است:

$$x' = x - vt \Rightarrow \frac{d}{dt'} x' = \frac{d}{dt'} (x - vt) = \frac{d}{dt} (x - vt) = \frac{dx}{dt} - v$$

$$\frac{dy'}{dt'} = \frac{dy}{dt}$$

$$\frac{dz'}{dt'} = \frac{dz}{dt}$$

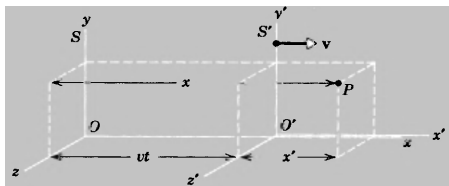
به همین صورت به راحتی می توان ثابت کرد که

و یا اگر سرعت ذره را با u نشان دهیم، خواهیم داشت:

$$u'_x = u_x - v$$

$$u'_y = u_y$$

$$u'_z = u_z$$



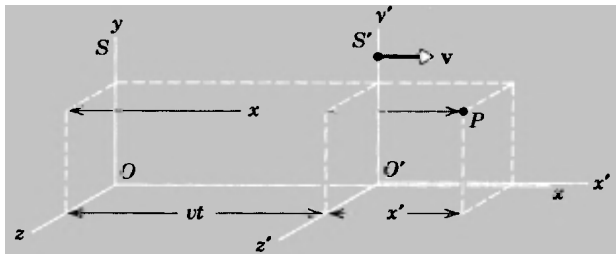
این سه رابطه را قضیه کلاسیک جمع سرعتها می نامند. البته شکل کلی تر این رابطه را در درس قبل (تبدیلات گالیه) به دست آوردیم.

تبدیل شتاب ها

به همین ترتیب، با توجه به اینکه دایفرانسیل زمان در دو دستگاه S و S' برابر است، می توان دید که برای دو دستگاه که با سرعت ثابت نسبت به هم حرکت می کنند، شتاب در همه جهت ها برابر است:

$$\begin{cases} \frac{du'_x}{dt'} = \frac{du_x}{dt} & \Rightarrow & a'_x = a_x \\ \frac{du'_y}{dt'} = \frac{du_y}{dt} & \Rightarrow & a'_y = a_y \\ \frac{du'_z}{dt'} = \frac{du_z}{dt} & \Rightarrow & a'_z = a_z \end{cases}$$

و یا $\vec{a}' = \vec{a}$. معنای نتیجه اخیر این است که شتاب های اندازه گیری شده در دو چارچوب مرجعی که با سرعت ثابت نسبت به هم حرکت می کنند، با هم برابرند. یعنی حرکت نسبی یکنواخت چارچوب های مرجع تاثیری بر مولفه های شتاب ذره ندارد. این نتیجه برای سرعت ها درست نبود!



قوانین نیوتن در دستگاه های لخت مختلف

با توجه به اینکه در مکانیک کلاسیک، مقدار جرم به دستگاه های مرجع و حرکت های آنها وابسته نیست، می توان نتیجه گرفت که مقدار $m\vec{a}$ نیز برای تمام ناظرهای لخت یکسان خواهد بود. بنابراین، با توجه به قانون دوم نیوتن می توان نوشت

$$\vec{F} = m\vec{a} = m\vec{a}' = \vec{F}'$$

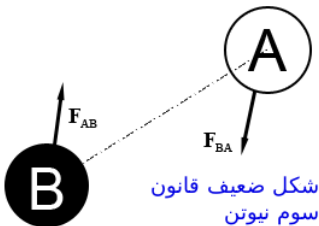
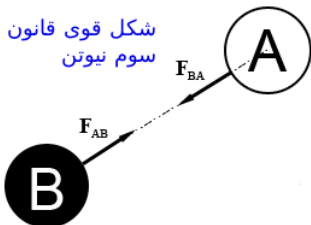
یعنی **قانون دوم نیوتن تحت تبدیلات گالیلئو تغییر نخواهد کرد.**

قانون اول نیوتن نیز در هر دستگاه لخت برقرار است. بنابراین تبدیلات گالیلئو قانون اول را نیز بدون تغییر باقی می گذارند.

قانون سوم نیوتن چطور؟ درستی یا نادرستی قانون سوم نیوتن به نوع نیروهای دخیل در مساله بستگی دارد. اگر نیروها فقط به فاصله دو ذره (و کمیت های اسکالر مانند جرم و بار الکتریکی) بستگی داشته باشند، آنگاه قانون سوم نیوتن تحت تبدیلات گالیلئو بدون تغییر باقی خواهد ماند (چون فاصله دو نقطه تحت تبدیلات گالیلئو بدون تغییر باقی می ماند). مثال: نیروی گرانش نیوتن و نیروی کولن.

ولی اگر نیروها به سرعت و یا دیگر کمیت هایی که با تبدیلات گالیلئو تغییر می کنند، وابستگی داشته باشند، آنگاه قانون سوم نیوتن برقرار نخواهد ماند (ممکن است نیروها در راستای خط واصل دو بار نباشند؛ هرچند اندازه آنها برابر است.).

شکل قوی و ضعیف قانون سوم نیوتن



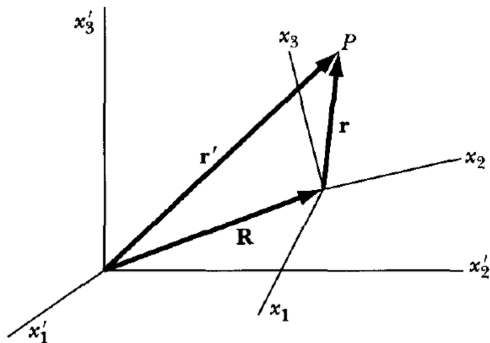
● شکل قوی قانون سوم نیوتن: اندازه نیروهای کنش و واکنش با هم برابرند، بردارهای نیرو در جهت مخالف هم هستند ($\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$) و نیروها در راستای خط واصل دو ذره اند.

● شکل ضعیف قانون سوم نیوتن: اندازه نیروهای کنش و واکنش با هم برابرند، بردارهای نیرو در جهت مخالف هم هستند ($\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$) ولی نیروها در راستای خط واصل دو ذره نیستند.

● مثالی از شکل ضعیف قانون دوم نیوتن، برهمکنش بین بارهای الکتریکی و میدان مغناطیسی (نیروی لورنتس) است. این مورد را به تفصیل در بخش الکترودینامیک نسبیتی بحث می کنیم و راه حل نسبیت خاص برای چنین نیرویی را نشان خواهیم داد.

قانون دوم در دستگاه های نالخت

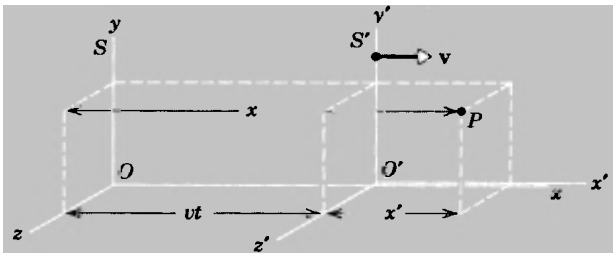
دستگاه مختصات دلخواهی را در نظر بگیرید که با شتاب در حال حرکت است و دوران هم دارد. شکل قانون دوم نیوتن در چنین دستگاهی چگونه خواهد بود؟ پاسخ: در این صورت تعدادی جملات از جنس حاصلضرب های جرم در شتاب به وجود خواهند آمد. این جملات را شبه نیرو می نامند؛ هرچند این ها نیرو نیستند بلکه حاصل نوشتن قانون دوم نیوتن در یک دستگاه نالخت اند.



$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}_f = m\ddot{\mathbf{R}}_f + m\mathbf{a}_r + m\dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{r} + m\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) + 2m\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_r$$

ناوردایی قوانین و کمیت های ناوردا

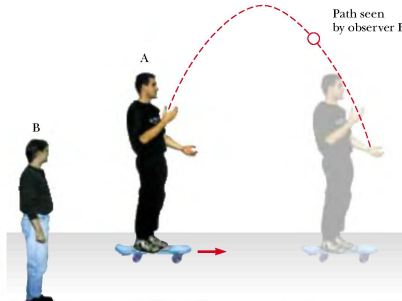
- قوانین حرکت نیوتن و معادلات حرکت ذره در تمام دستگاه های لخت شکل یکسانی دارند. در این حالت می گوئیم قوانین نیوتن تحت تبدیلات گالیه ناوردا (تغییر ناپذیر : Invariance) هستند.
- منظور ما از "ناوردایی یک قانون فیزیکی تحت تبدیلات مشخص" این است که شکل آن قانون تحت آن تبدیلات مشخص بدون تغییر باقی می ماند.
- همچنین برخی کمیت های فیزیکی تحت تبدیلات مشخصی بدون تغییر باقی می مانند. مثلاً، فاصله، جرم، شتاب و ... تحت تبدیلات گالیه بدون تغییر باقی می مانند. می گوئیم فاصله، جرم و شتاب تحت تبدیلات گالیه ناوردا (invariant) هستند.



مفهوم ناوردایی قوانین

- با توجه به ناوردایی قوانین حرکت نیوتن تحت تبدیلات گالیله، می توان ناوردایی قوانین پایستگی انرژی، پایستگی اندازه حرکت خطی و پایستگی اندازه حرکت زاویه ای تحت تبدیلات گالیله را نیز نتیجه گرفت.
- تمرین: گزاره بالا را اثبات کنید.

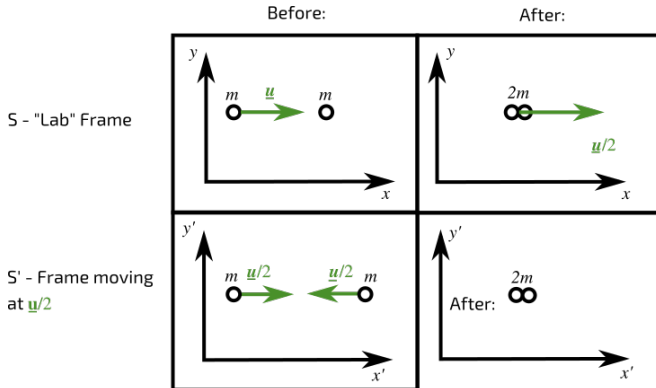
● دقت کنید که مقادیر سرعت در دستگاه های لخت مختلف متفاوت است. بنابراین، در حالت کلی، ناظرهای لخت متفاوتی را برای کمیت های انرژی، اندازه حرکت خطی و ... اندازه خواهند گرفت. ولی همه این ناظرها توافق خواهند داشت که قانون پایستگی انرژی (و یا اندازه حرکت های خطی و زاویه ای) در دستگاه مختصات ایشان برقرار است. به مثال بعد دقت کنید.



پایستگی تکانه در دو دستگاه متفاوت

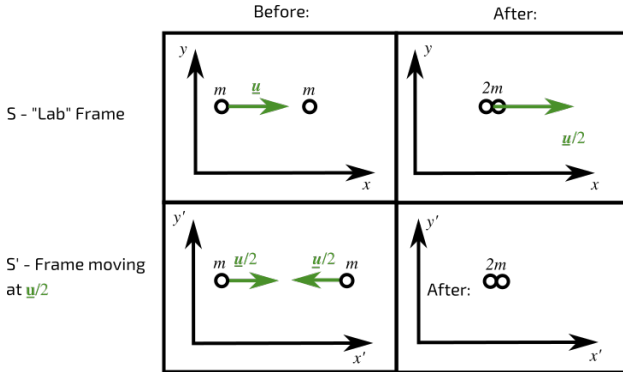
- برخورد کاملاً ناکشسان زیر را در نظر بگیرید. ذره ای با جرم m و سرعت u به ذره هم جرمی برخورد کرده و به آن می چسبد و دو ذره با سرعت $u/2$ به سمت راست حرکت می کنند. یعنی، تکانه کل سیستم قبل و بعد از برخورد برابر mu است. بنابراین تکانه خطی در این دستگاه پایسته است:

$$mu = 2m(u/2) \Rightarrow P_i = P_f$$



پایستگی تکانه در دو دستگاه متفاوت

- حال دستگاه S' را در نظر بگیرید که با سرعت $u/2$ به سمت راست حرکت می کند. سرعت ذره سمت چپ در این دستگاه برابر $u/2$ و سرعت ذره سمت راست در این دستگاه برابر $-u/2$ است (این گزاره را اثبات کنید). بنابراین، تکانه کل قبل از برخورد برابر صفر است. در دستگاه S' ، تکانه کل پس از برخورد هم برابر صفر است. بنابراین، با وجودی که مقادیر تکانه ذرات و تکانه کل در دو دستگاه تغییر می کنند، قانون پایستگی تکانه در هر دو دستگاه برقرار است.



ناوردایی معادلات حرکت تحت تبدیلات گالیه

فرض کنید که نیروی بین دو ذره از شکل قوی قانون سوم نیوتن پیروی می کند و این نیرو فقط تابع فاصله دو ذره است. می توان ثابت کرد که چنین نیرویی حتما پایستار خواهد بود. نشان دهید که معادله حرکت هرکدام از این ذرات تحت تبدیلات گالیه ناوردا است.

پاسخ: ما کمیت های مربوط به ذرات ۱ و ۲ را با شماره های ۱ و ۲ نمایش می دهیم. همچنین کمیت های مربوط به دستگاه S را بدون علامت پریم و کمیت های مربوط به دستگاه S' را با علامت پریم نشان خواهیم داد. در اینجا می خواهیم نشان دهیم که اگر معادله

$$m_1 \frac{d^2 \vec{r}_1}{dt^2} = -\vec{\nabla} U(r(x_1, y_1, z_1))$$

در دستگاه S برای جرم ۱ برقرار باشد، آنگاه معادله ای با همین فرم در دستگاه S' هم برقرار خواهد بود. قبلا درستی رابطه $\vec{a} = \vec{a}'$ را نشان داده ایم. از اینجا نتیجه می شود

$$m_1 \frac{d^2 \vec{r}_1}{dt^2} = m_1 \frac{d^2 \vec{r}'_1}{dt'^2}$$

حالا به سراغ جمله دینامیکی معادله حرکت می رویم. پیشتر نشان داده ایم که فاصله دو ذره تحت تبدیلات گالیه تغییر نمی کند: $r = r'$. حال مثلا برای مشتق گیری در جهت x داریم:

$$\frac{\partial U}{\partial x_1} = \frac{dU}{dr} \frac{\partial r}{\partial x_1} = -\frac{dU}{dr} \frac{x_2 - x_1}{r} = -\frac{dU}{dr} \frac{x'_2 - x'_1}{r'} = \frac{dU}{dr'} \frac{\partial r'}{\partial x'_1} = \frac{\partial U}{\partial x'_1}$$

توجه! توجه!

- توجه: در جلسه قبل ثابت کردیم که فاصله بین دو نقطه ۱ و ۲ تحت تبدیلات گالیه تغییر نمی کند:

$$\begin{aligned}
 r &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \\
 &= \sqrt{(x'_2 + vt - [x'_1 + vt])^2 + (y'_2 - y'_1)^2 + (z'_2 - z'_1)^2} \\
 &= \sqrt{(x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2 + (z'_2 - z'_1)^2} = r'
 \end{aligned}$$

همچنین داریم:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial r}{\partial x_1} &= \frac{\partial}{\partial x_1} \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \\
 &= - \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}} = - \frac{x_2 - x_1}{r}
 \end{aligned}$$

توجه: $(u^n)' = nu'u^{n-1}$. به همین ترتیب نشان دهید:

$$\frac{\partial r'}{\partial x'_1} = - \frac{x'_2 - x'_1}{r'}$$

ناوردایی معادلات حرکت تحت تبدیلات گالیه

- فرض کنید که نیروی بین دو ذره از شکل قوی قانون سوم نیوتن پیروی می کند و این نیرو فقط تابع فاصله دو ذره است. می توان ثابت کرد که چنین نیرویی حتما پایستار خواهد بود. نشان دهید که معادله حرکت هرکدام از این ذرات تحت تبدیلات گالیه ناوردا است.

ادامه پاسخ: به همین ترتیب می توان برای مشتق گیری در جهت های y و z اثبات کرد:

$$\frac{\partial U}{\partial y_1} = \frac{\partial U}{\partial y'_1} \quad \frac{\partial U}{\partial z_1} = \frac{\partial U}{\partial z'_1}$$

در نتیجه در حالت کلی برابری $\vec{\nabla} U(\mathbf{r}) = \vec{\nabla}' U(\mathbf{r}')$ را اثبات کرده ایم. بنابراین، نشان داده ایم که شکل قانون دوم نیوتن در دستگاه های لخت متفاوت تغییری نمی کند:

$$m_1 \frac{d^2}{dt^2} \vec{r}_1 = -\vec{\nabla} U(\mathbf{r}(x_1, y_1, z_1)) \quad \Leftrightarrow \quad m_1 \frac{d^2}{dt'^2} \vec{r}'_1 = -\vec{\nabla}' U(\mathbf{r}'(x'_1, y'_1, z'_1))$$

همین محاسبات را می توان برای معادله حرکت جرم m_2 نیز نوشت. بنابراین ناوردایی معادلات حرکت تحت تبدیلات گالیه را نتیجه می گیریم.

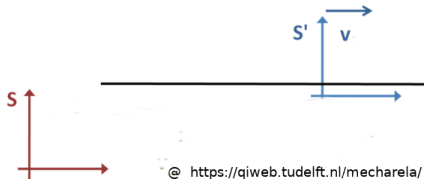
- تمرین: اگر نیروی مورد نظر پایستار نباشد و به سرعت بستگی داشته باشد، آیا می توان همچنان ناوردایی معادلات حرکت تحت تبدیلات گالیه را اثبات کرد؟

ناوردایی معادله پیوستگی سیال تحت تبدیلات گالیله

• معادله پیوستگی سیال در حالت کلی به صورت $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = \sigma$ نوشته می شود که در آن ρ چگالی سیال، $\vec{u}$ سرعت سیال در یک دستگاه خاص و σ چشمه و یا چاهک جریان است (در این مساله فرض کنید $\sigma = 0$). فرض کنید سیالی داریم که چگالی آن فقط به زمان و متغیر x بستگی دارد ($\rho = \rho(t, x)$) و در راستای محور x هم در حال حرکت است. برای این شاره، ناوردایی معادله پیوستگی تحت تبدیلات گالیله ($x' = x - vt$, $t' = t$) را اثبات کنید.

پاسخ: برای سیال داده شده و در دستگاه ساکن S می توان معادله پیوستگی سیال را به صورت $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} = 0$ نوشت (چرا مشتق گیری نسبت به y و z وارد نشده اند؟). با توجه به قاعده مشتق گیری زنجیره ای می توان نوشت:

$$\frac{\partial f(x(t', x'))}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x'} \frac{\partial x'}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial t'} \frac{\partial t'}{\partial x} \Rightarrow \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial x'}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x'} + \frac{\partial t'}{\partial x} \frac{\partial}{\partial t'}$$



@ <https://qiweb.tudelft.nl/mecharela/>

ناوردایی معادله پیوستگی سیال تحت تبدیلات گالیه

معادله پیوستگی سیال در حالت کلی به صورت $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = \sigma$ نوشته می شود که در آن ρ چگالی سیال، $\vec{u}$ سرعت سیال در یک دستگاه خاص و σ چشمه و یا چاهک جریان است (در این مساله فرض کنید $\sigma = 0$). فرض کنید سیالی داریم که چگالی آن فقط به زمان و متغیر x بستگی دارد ($\rho = \rho(t, x)$) و در راستای محور x هم در حال حرکت است. برای این شاره، ناوردایی معادله پیوستگی تحت تبدیلات گالیه ($x' = x - vt$, $t' = t$) را اثبات کنید.

ادامه پاسخ: حال با توجه به تبدیلات گالیه می توان نوشت:

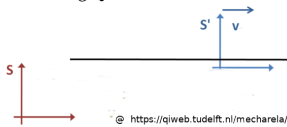
$$\frac{\partial x'}{\partial x} = 1 \quad \text{and} \quad \frac{\partial t'}{\partial x} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x'}$$

به همین ترتیب برای مشتق جزئی نسبت به زمان داریم:

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial t'}{\partial t} \frac{\partial}{\partial t'} + \frac{\partial x'}{\partial t} \frac{\partial}{\partial x'}$$

و باز هم با توجه به تبدیلات گالیه داریم:

$$\frac{\partial x'}{\partial t} = -v \quad \text{and} \quad \frac{\partial t'}{\partial t} = 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t'} - v \frac{\partial}{\partial x'}$$



ناوردایی معادله پیوستگی سیال تحت تبدیلات گالیله

معادله پیوستگی سیال در حالت کلی به صورت $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = \sigma$ نوشته می شود که در آن ρ چگالی سیال، $\vec{u}$ سرعت سیال در یک دستگاه خاص و σ چشمه و یا چاهک جریان است (در این مساله فرض کنید $\sigma = 0$). فرض کنید سیالی داریم که چگالی آن فقط به زمان و متغیر x بستگی دارد ($\rho = \rho(t, x)$) و در راستای محور x هم در حال حرکت است. برای این شاره، ناوردایی معادله پیوستگی تحت تبدیلات گالیله ($x' = x - vt$, $t' = t$) را اثبات کنید.

ادامه پاسخ: بنابراین معادله پیوستگی سیال را که در دستگاه S به صورت $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} = 0$ نوشته می شود، در دستگاه متحرک S' به صورت زیر به دست می آوریم:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t'} - v \frac{\partial \rho}{\partial x'} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x'} = 0$$

که البته با توجه به ثابت بودن v و فرمول تبدیل سرعت ها ($u' = u - v$) می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t'} - v \frac{\partial \rho}{\partial x'} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x'} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial \rho}{\partial t'} + \frac{\partial (\rho u')}{\partial x'} = 0$$

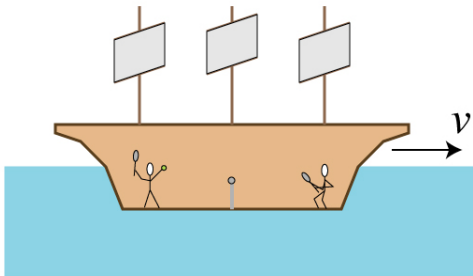
البته تابع چگالی یک تابع اسکالر است؛ بنابراین مقدار آن در هر دو دستگاه برابر است $\rho = \rho'$.

پس معادله پیوستگی در دستگاه S' به صورت مقابل به دست می آید:

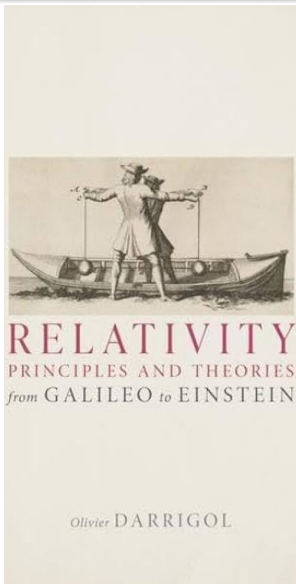
$$\frac{\partial \rho'}{\partial t'} + \frac{\partial (\rho' u')}{\partial x'} = 0$$

ناوردایی قوانین

می توان نشان داد که دیگر قوانین مکانیک نیز تحت تبدیلات گالیله ناوردا (بدون تغییر) هستند. این نکته اهمیت فوق العاده ای دارد زیرا نشان می دهد که ”هیچ آزمایش مکانیکی که در یک چارچوب کاملاً لخت انجام گرفته باشد نمی تواند اطلاعاتی در مورد حرکت آن چارچوب لخت نسبت به چارچوب های لخت دیگر به ما بدهد“. در واقع، به نظر می رسد یکی از شروطی که ما یک معادله را قانون فیزیک بنامیم این است که آن معادله تحت تبدیلات خاصی برقرار باقی بماند و مخصوصاً با تغییر فضا و یا زمان، تغییر نکند. در غیر اینصورت، فرمول های مورد نظر فقط در شرایط بسیار خاصی برقرار هستند و چندان مفید نیستند. در نتیجه قانون فیزیکی نامیده نمی شوند.



اصول نسبیت گالیله، نیوتن و اینشتین



● گالیله اولین بار اهمیت این موضوع را توضیح داد: با مشاهده حرکت اجسام در یک اتاق بسته، هیچ راهی برای تشخیص اینکه آیا اتاق ساکن است و یا با سرعت یکنواخت در حال حرکت است وجود ندارد. این را گاهی اصل نسبیت گالیله ای می گویند.

● اصل نسبیت نیوتنی ویرایش تکنیکی تر اصل نسبیت گالیله است: دستگاهی ساکن و یک دستگاه دیگر که با سرعت ثابت نسبت به دستگاه اول در حرکت است، را در نظر بگیرید. قوانین مکانیک در این دو دستگاه یکسان هستند. و یا حرکت اجسام واقع در یک فضای معین نسبت به یکدیگر، خواه این فضا ثابت باشد و یا با سرعت یکنواخت در امتداد خط راستی حرکت کند، یکی است.

● اینشتین اصل نسبیت را به تمام قوانین فیزیک (از جمله الکترودینامیک) توسعه داد: قوانین فیزیک در تمام دستگاه های لخت یکسان هستند. هیچ دستگاه لخت مرجعی وجود ندارد.

● برای مرور سیر تحول تاریخی اصل نسبیت کتاب مقابل را ببینید.

نکات مهم این درس

انتظار این است که در انتهای این درس شما بتوانید مفاهیم نسبیت نیوتنی و ناوردایی را به درستی توضیح داده و برخی کاربردهای آن ها را بیان کنید. به ویژه انتظار می رود که بتوانید پرسش های زیر را پاسخ دهید:

- ۱ منظور از کمیت ناوردا تحت یک تبدیل خاص (مثلا تبدیلات گالیه) چیست؟
- ۲ منظور از ناوردایی یک قانون تحت یک تبدیل خاص (مثلا تبدیلات گالیه) چیست؟
- ۳ به جز قوانین یاد شده در این درس چه قوانین دیگری در مکانیک کلاسیک تحت تبدیلات گالیه ناوردا هستند؟
- ۴ تحقیق کنید که آیا تبدیلات گالیه کلی ترین تبدیلاتی هستند که قوانین مکانیک کلاسیک را ناوردا نگه می دارند؟
- ۵ شکل قوی و ضعیف قانون سوم نیوتن را توضیح دهید. چه نیروهایی در شکل قوی قانون سوم صدق نمی کنند؟

اگر درباره هر کدام از مفاهیم یاد شده بالا مشکلی احساس می کنید، لطفا درس را یک بار دیگر مرور کنید.

فراموش نکنیم که بهترین راه برای درک و ” درونی سازی ” مفاهیم ریاضی و فیزیک، حل مساله است. به همین دلیل سعی کنید دانسته های خود را با حل سوالات زیر محک زده و تقویت کنید.



تمرین ها: زمان تحویل ۲۷ مه‌رم‌ه

• لطفا تمرین های ۳ تا ۸ از فصل اول کتاب رزنیک را حل کنید.

• نیروی مقاومت وارده به یک جسم در یک شاره را نیروی پسار (drag) می نامند. اگر جسمی در شاره ساکن باشد این نیرو (معمولا) متناسب با مجذور سرعت شاره است $F \propto v_f^2$. در اینجا v_f سرعت شاره است. الف) نشان دهید که اگر جسمی (مثلا یک دوچرخه سوار) با سرعت v_b در چنین شاره ای حرکت کند، نیروی وارده در دستگاه متصل به دوچرخه متناسب با $F \propto (v_f - v_b)^2$ خواهد بود. ب) آیا معادلات حرکت در این مساله تحت تبدیلات گالیله ناوردا هستند؟ پ) آیا دستگاه متصل به جسم یک دستگاه لخت است؟



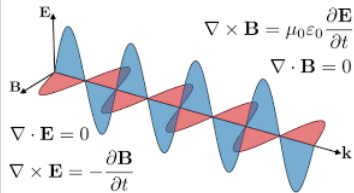
• ناوردایی معادله حرکت $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$ تحت دوران دستگاه مختصات در صفحه xy را نشان دهید.

• توضیح دهید که یک نیروی وابسته به سرعت، مانند نیروی لورنتس $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ چگونه تحت تبدیلات گالیله تغییر می کند.

مبحث بعدی: معادلات ماکسول و امواج الکترومغناطیسی

● معادلات ماکسول و موج الکترومغناطیسی تحت تبدیلات گالیله ناوردا نیستند. این مساله ذهن بسیاری از دانشمندان قرن نوزدهم را به خود مشغول کرده بود. برخی معتقد بودند که برای رفع این مشکل باید معادلات ماکسول تغییر کنند. برخی نیز اعتقاد به تغییر قوانین مکانیک داشتند. اینشتین با ابداع نظریه نسبیت خاص معادلات ماکسول را نجات داد و مکانیک جدیدی را کشف کرد. در جلسه بعد قوانین ماکسول را یادآوری کرده و مفهوم موج و موج الکترومغناطیسی را نیز مرور خواهیم کرد.

Law	Differential Form	Integral Form	Pictorial Form
Coulomb's (1785)	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho$	$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \iiint \rho dV = Q$	
Ampere's (1820, 1861)	$\nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{\mathbf{J}}{c}$	$\oint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\ell} - \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \iint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{c} \iint \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = \frac{I}{c}$	
Gauss's (1813)	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	
Faraday's (1831)	$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$	$\oint \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \iint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	



مراجع

- ➊ Introduction to Special Relativity; Robert Resnick
- ➋ Relativity: Special, General, and Cosmological; Wolfgang Rindler
- ➌ General Relativity: An Introduction for Physicists; M. P. Hobson, G. P. Efstathiou, A. N. Lasenby
- ➍ Introduction To Special Relativity; Markus Klute
<https://ocw.mit.edu/courses/8-20-introduction-to-special-relativity-january-ia>
- ➎ Leonard Susskind's Special Relativity, Find in YouTube

با سپاس از توجه شما

