



#### چکیده

سه قانون نیوتن پایه های مکانیک کلاسیک را میسازند و از سال 1678 تاکنون چندان تغییری نکرده اند . این قوانین براساس مشاهدات تجربی بنا شده اند و درستی یا نادرستی آن ها را دقت پیش بینی آن ها تعیین میکند .

#### سمیرا اصلانی

درس پروژه فیزیک

" ساختار مکانیک نیوتنی و قوانین سه گانه نیوتن "

Newton's three laws

در ابتدا به بیان های مختلف از این قوانین بی نظیر می پردازیم :

قانون اول نیوتن :

بیان اول : اگر به جسمی نیرو وارد نشود هر چارچوبی که در آن جسم با سرعت ثابت و راست خط حرکت کند ، یک چارچوب لخت است . (تعریف چارچوب لخت)

بیان دوم : هر جسم بر حالت خودش سکون یا حرکت یکنواخت در یک خط راست پایداری میکند مگر اینکه تحت تاثیر نیروهای مجبور به تغییر حالتش شود.

قانون دوم نیوتن :

بیان اول : اگر نیروی  $F$  به ذره ای به جرم  $m$  اثر کند ذره با شتاب  $a$  حرکت خواهد کرد .

بیان دوم : آهنگ تغییر تکانه یک ذره با نیرویی که به آن وارد میشود برابر است .

قانون سوم نیوتن :

بیان اول : اندازه نیروهایی که دو ذره به یک دیگر وارد میکنند برابر و جهت ان ها مخالف یکدیگر است و نیرو در راستای خطی است که دو ذره را به هم وصل میکنند .

بیان دوم : به ازای هر نیرویی که به یک ذره وارد میشود ، نیرویی برابر در خلاف جهت به جسم دیگری وارد میشود و نیرو ها در راستای خط واصل دو ذره اند .

سوال هایی که در این پروژه پاسخ داده میشوند :

- تعریف نیرو و جرم چیست ؟
- این قوانین در چه چارچوب مرجعی برقرارند ؟
- اصول موضوعه ی این قوانین چیست ؟
- چه لزومی برای وجود قانون اول است ؟
- این قوانین در چه ساختار فضا و زمانی ای تعریف شده اند و چرا ؟
- مکان ، زمان و حرکت از دیدگاه نیوتن چگونه تعریف می شدند و تاریخچه این تفکر به چه صورت بوده ؟
- تاریخچه ای از جدال هایی بین نسبی گرایان و مطلق گرایان

- مخالفان نیوتن چه کسانی بودند و علت مخالفتشان چه بوده است؟

چه لزومی برای حضور قانون اول در بین سه قانون است ؟ در حالی که تصور میشود میتوان قانون اول را به سادگی از دل قانون دوم بدست آورد (با قرار دادن نیروی صفر، شتاب صفر و سرعت ثابت برای ذره بدست خواهد آمد ) اما این کار غیر ممکن است !

قانون اول نیوتن در واقع بیانگر این موضوع است که اجسام در صورتی که تحت تاثیر نیرویی نباشند حالت حرکت خود را حفظ میکنند و این حالت حرکت<sup>۱</sup> است که اهمیت زیادی دارد و کسانی مثل ارسطو و گالیله هم در مورد حالت حرکت اجسام نظراتی داده اند . ارسطو ، همانطور که قبلا مدل فکری اش از عالم را تفسیر کردیم ، برای هر نوع از ماده حالت حرکت خاصی در نظر میگرفت برای مثال برای اثیر حرکت دایره ای یکنواخت را در نظر گرفته بود . گالیله نیز با استدلالی برای همه ی اجسام حالت حرکت را حرکت دایره ای یکنواخت می پنداشت و استدلالش برای این نتیجه گیری به این شرح بود :

مطابق شکل اگر جسمی را روی سطح شیب دار از ارتفاع خاصی رها کنیم روی سطح شیب دار مقابل به همان ارتفاع باز میگردد پس اگر جسمی را روی زمین رها کنیم در این صورت تا ابد ارتفاع یکسانی خواهد داشت (یعنی ارتفاع صفر) و دور کره زمین خواهد چرخید و در نتیجه این حرکت یک حرکت دایره ای یکنواخت است با این توصیف درواقع توپ مایل است از روی خط راستی مماس بر کره زمین حرکت کند اما چون امکان این حرکت به دلیل جاذبه برایش مقدور نیست به دنبال مسیر های مستقیم خواهد گشت و در نهایت خواهد ایستاد و گالیله اینگونه نتیجه گرفت که حرکت لختی طبیعی (یا همان حالت حرکت اجسام) همان حرکت دایره ای یکنواخت است .

اما نیوتن در قانون اول خود اینطور نشان داد که حالت حرکت اجسام یک حرکت مستقیم الخط با سرعت ثابت است و در رد حالت های حرکت اثبات کرد که حرکت دایره ای یکنواخت یک حرکت ثابت و لخت محسوب نمیشود .

اما قانون اول که به ظاهر یک قانون ناکارآمد تلقی میشود فرض مسلم قانون دوم محسوب میشود چرا که قانون دوم این گونه بیان میشود :

<sup>1</sup> State of motion: حالت حرکت به حالتی از سیستم گفته میشود که به سیستم نیرویی وارد نشود

"تغییر در حرکت متناسب با نیروی محرک اعمال میشود و در راستای خط مستقیمی است که این نیرو اعمال میشود ."

در این قانون از "تغییر" در "حالت حرکت" صحبت میشود و بدون دانستن "حالت حرکت" این قانون معنایی در بر ندارد .

## اصول موضوعه قوانین نیوتن

اصل موضوعه اول : ناظر لخت وجود دارد . (هر ناظری که برای او شتاب ذره نقطه ای منزوی برای هر حالت سینماتیکی صفر باشد یک ناظر لخت است .)

اصل موضوعه دوم (تعریف جرم لختی از طریق برهمکنش متقابل ) : اگر به ذره ی مرجع  $p_0$  جرم واحد  $m_0$  نسبت داده شود ثابت برهمکنش  $m$  هر ذره ی نقطه ای  $p$  با  $p_0$  سنجه ای برای جرم لختی  $p$  نسبت به جرم واحد  $m_0$  است . (تعریف کیفی : جرم لخت عبارت است از یک سنجه عددی که میزان بی میلی ذره برای شتاب پیدا کردن را میسنجد)

اصل موضوعه سوم (تعریف نیرو) : شتاب های  $a_1$  و  $a_2$  که ناظر لخت برای دو جسم در مکان های  $p_1$  و  $p_2$  اندازه میگیرد بردار هایی با جهت مخالف در راستای  $p_1-p_2$  (به راستی مشخص نیست که شتاب علت نیروست یا نیرو علت شتاب اما مفهوم نیرو یک مفهوم انتزاعیست و از درون تهی است . این اصل در جمع با قانون دوم قانون سوم را نتیجه میدهد)

اصل موضوعه چهارم (اصل برهم نهی) : شتابی که ذره نقطه ای در اثر برهمکنش با مجموعه ای از ذره های دیگر بدست می آورد با جمع شتاب هایی که در اثر برهمکنش با تک تک ذره های سامانه کسب میکند برابر است .

## فضا ، زمان و حرکت از دیدگاه نیوتن

از دیدگاه نیوتن زمان ، مکان و حرکت هر کدام دارای یک جنبه ی مطلق و یک جنبه ی نسبی هستند یعنی به طور مثال برای زمان هم "زمان نسبی" و هم "زمان مطلق" تعریف میکنند و هر کدام را جداگانه تعریف میکنند .

**فضا مطلق :** فضای مطلق به طور طبیعی مستقل از هر چیز خارجی همیشه یکسان و غیر قابل تغییر باقی می ماند (نیوتن وجود این فضا را با انجام آزمایش ذهنی معروف سطل<sup>۲</sup> خود اثبات میکند )

**فضا نسبی :** فضای نسبی آن بعد قابل جابه جایی یا قابل اندازه گیری از فضای مطلق است که حس ما نسبت به اجسام مختلف آن را تعیین میکند

**زمان مطلق :** زمان مطلق مستقل از هر ناظر در هر مکانی با سرعت ثابت در سراسر عالم در حال پیشرفت است (نیوتن برای این نوع از زمان یک ساعت مشخص برای تمام نقاط عالم در نظر گرفته بود )

**زمان نسبی :** زمانی قابل اندازه گیری و قابل درک از زمان مطلق است . (نیوتن معتقد بود که ما تنها میتوانیم زمان نسبی را حس کنیم و آن هم با استفاده از حرکت اجسام است که گذر زمان را متوجه میشویم )

**حرکت مطلق :** انتقال یک جسم از یک نقطه در فضای مطلق به نقطه ی دیگری در آن

**حرکت نسبی :** انتقال جسم از یک نقطه در فضای نسبی به نقطه ی دیگر در آن<sup>۳</sup>

نیوتن در کتاب "اصول ریاضی فلسفه طبیعی" خود اینگونه بیان میکند :

"من زمان ، فضا ، مکان و حرکت را آنطور که برای همه شناخته شده است تعریف نمیکنم . صرفا باید توجه کنم که عامه مردم آن کمیت ها را به واسطه مفهوم دیگری جز رابطه آن ها با ابژه های محسوس درک نمیکنند و در پی آن پیش داوری های خاصی به وجود می آید . برای برطرف کردن این پیش داوری ها بهتر است این کمیت ها را بهتر است این کمیت هارا براساس مطلق و نسبی ، حقیقی و ظاهری ، ریاضی و معمولی از هم متمایز کرد "

نیوتن در جای دیگر درباره مطلق و نسبی بودن اینطور میگوید :

"در مسائل عادی به راحتی میتوان به جای مفاهیم مطلق از مفاهیم نسبی استفاده کرد اما در جستارهای فلسفی باید از حواسمان دوری کنیم جدای از اندازه گیری های محسوس صرفا از خود آن ها استفاده کنیم "

<sup>2</sup> Bucket argument

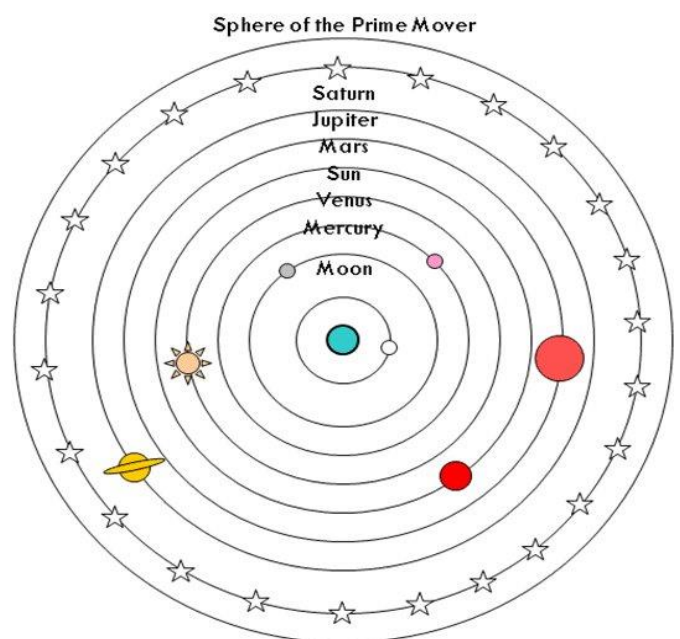
از دیدگاه فلسفی چهار نوع زمان و چهار نوع فضا داریم : زمان معقول ، زمان مدرک ، زمان فیزیکی ، زمان مطلق (برای فضا نیز این چهار<sup>3</sup> نوع وجود دارند) که به دلیل خروج از بحث اصلی به آن ها نمی پردازیم .

نیوتن در مفهوم زمان مطلق از این فرض استفاده کرده بود که میتواند در همه جای جهان به صورت همزمان ساعت هایی را تصور کرد در حالی که در این فرض ، فرض محدود بودن سرعت به سرعت نور را در نظر نگرفته بود بنابراین نمیتوان برای همه مکان های عالم یک ساعت مشخص وجود داشته باشد .

با این دید مشخص میشود که نیوتن فردی "مطلق گرا"<sup>4</sup> بوده است . حال به تاریخچه ای از تفکر نسبی گرایی و مطلق گرایی میپردازیم:

**ارسطو**<sup>5</sup>: ارسطو اولین فردی بود برای کار های نظروزرانه ای که افراد انجام میدادند نام فوسیک<sup>6</sup> را نسبت داد که به طبیعت هر چیز اشاره دارد و این طبیعت یک ایژه است که سکون و حرکتش را تعیین میکند و راه تعیین طبیعت یک ایژه این است که آن است که ایژه به حال خود رها شود. برای مثال یک سنگ یا یک حباب هنگامی که تحت تاثیر عاملی خارجی نباشد تمایلات ذاتی خود برای حرکت یا سکون را آشکار میکنند .

ارسطو برای هر نوع مختلف ماده یک حرکت طبیعی خاص متصور بود . او حرکت به سمت پایین را حرکت به سمت یک مکان خاص در نظر میگرفت و این مکان خاص مرکز جهان است ارسطو تصور میکرد که مرکز زمین مرکز جهان است و همه ی اجسام سنگین به سمت مرکز زمین حرکت میکنند که "حرکت رو به پایین" نامیده میشود (علت سقوط اجسام) و اجسام سبک از مرکز زمین دور میشوند که این "حرکت رو به بالا" نامیده میشود (علت حرکت رو به بالای حباب) و چون با این استدلال نمیتوانست حرکت سیارات ، خورشید و ستاره ها را توجیه کند از یک عنصر پنجمی استفاده کرد که نام آن را اثیر گذاشت که حرکت طبیعی آن حرکت دایره ای یکنواخت است برخلاف سایر چهار عنصر که حرکت طبیعیشان حرکت در خط راست است .



<sup>4</sup> Absolutism

<sup>5</sup> Aristotle

<sup>6</sup> physis

ارسطو با مطرح کردن "جابه‌جایی طبیعی"<sup>۷</sup> به عنوان اولین مبحث فیزیک در شکل‌گیری اولیه فیزیک و مباحثش تاثیر زیادی داشت اما با مطرح کردن نظریه زمین مرکزی، چند قرن پیشرفت علم را به تعویق انداخت ارسطو هر تغییری را جابه‌جایی نمیدانست و تغییر در مکان را (که آن را جهانی فضایی به شکل کروی میدانست) جابه‌جایی میدانست. با این حال فیزیک ارسطو یک فیزیک نسبی بود چرا که هر حرکتی نسبت به مرکز عالم بوده است اما یک چیز مطلق وجود دارد و آن جهت حرکت است که در این تئوری تغییری نمیکند و همواره به سمت مرکز است.

نکته مهم دیگری که از کار ارسطو نتیجه میشود ضرورت وجود فضا است و این فضا است که به یک تئوری فیزیکی معنا میبخشد و بدون وجود آن تعریف چیزی ممکن نیست بنابراین ارسطو ابتدا فضای کروی نظریه خود را طراحی و سپس به معنی مفاهیمی مثل حرکت و سکون و... در آن پرداخت.

دکارت: دکارت در کتاب "اصول فلسفه"<sup>۸</sup> نظراتش را اینطور بیان میکند:

جوهره‌ی ماده "انبساط"<sup>۹</sup> است همچنین "انبساط" طبیعت فضا است بنابراین فضا و ماده هر دو از یک جنس اند و این نظریه در جا وجود خلا را رد میکند چون هر ناحیه از فضا ناحیه‌ی ماده است پس ناحیه‌ی ای که در آن ماده‌ی نباشد وجود ندارد پس جهان مورد تصور دکارت یک جهان هیدرودینامیکی<sup>۱۰</sup> محسوب میشده است یعنی پر از ماده (انبساط) سیار و با شکل‌های مختلف و بدون هیچ شکافی.

حرکت در این فضا: ابتدا تصور میشود که حرکت در این فضا امکان پذیر نیست چرا که اگر ماده‌ی ای حرکت کند در محل اولیه‌اش یک شکاف ایجاد میکند در حالی که دکارت اینگونه توجیه میکند که در این فضا حرکت به سادگی صورت میگیرد به طوری که هنگامی که ذره‌ی ای فضا را ترک میکند ذره‌ی دیگر از ماده‌ی جای آن را پر میکند در واقع هیچ شکافی در فضا ایجاد نمیشود و این به معنی است که حرکت یک ذره حرکت نسبت به ذرات دیگر است و هیچ حرکتی به حرکت دیگر ارجعیت ندارد.

---

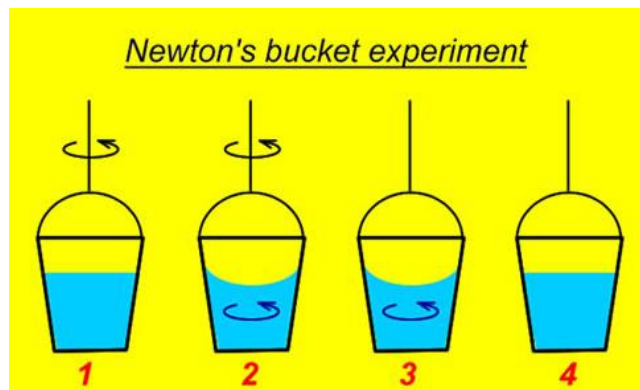
<sup>7</sup> locomotion

<sup>8</sup> *Principles of Philosophy*

<sup>9</sup> extension

<sup>10</sup> hydrodynamic

این دو نظریه قبل از نیوتن نشان می‌دهند که افراد قبل از نیوتن نسبی‌گرا<sup>۱۱</sup> بوده‌اند و نیوتن با مکانیک خود مفهوم مطلق بودن همه چیز را تا زمان نسبیت عام اینشتین در میان مردم رواج داد البته بعد از نیوتن و همزمان با او افرادی بودند که با این بخش از نظریه او مخالفت کردند و سعی در تغییر عقیده او دادند اما با گذشت قرن‌ها همچنان



مکانیک نیوتنی بدون فرض مطلق بودن زمان و فضا تبیین نمیشود همچنین نظریه نسبیت خاص اینشتین هم با این فرض مطلق بودن فضا و زمان است اما نسبیت عام اینطور نیست .

حال ابتدا به آزمایش ذهنی معروف نیوتن که همان آزمایش سطل است می‌پردازیم :

این آزمایش ذهنی دارای چهار مرحله است :

ابتدا فرض میکنیم که یک سطل پر از آب در یک فضای تهی قرار دارد و به یک طناب وصل است (محل اتصال طناب مشخص نیست ) طناب چرخانده میشود و رها میشود

1. در ابتدا سطل شروع به چرخش میکند اما آب درون آن ساکن و سطحش تخت است .
2. سپس آب درون سطل به دلیل اصطحاکای که با دیواره های سطح دارد در جهت مخالف با سطل شروع به چرخش میکند و سطح آن رفته رفته گود میشود .
3. پس از اندک مدتی سطل از حرکت می ایستد ولی آب همچنان در حال چرخش است (دقیقا برعکس مرحله 1) اما سطح آب همچنان گود است .
4. سطل و آب هر دو از حرکت می ایستند و سطح آب صاف میشود .

افرادی مثل لایب نیتس که به نسبی بودن همه چیز معتقد بودند هنگامی که با نیوتن مخالفت کردند نیوتن این آزمایش را ارائه داد تا وجود فضای مطلق را به اثبات برساند . شرح این استدلال به صورت زیر است :

<sup>11</sup> relativism



"اگر واقعا تمامی حرکت های موجود در عالم نسبی باشند یعنی نباید فرقی بین این باشد که جسم یک با سرعت ۷ نسبت به جسم دو حرکت کند یا اینکه جسم دو با سرعت ۷- نسبت به جسم یک حرکت کند و برای چرخش هم این موضوع برقرار است و نباید فرقی بین وقتی که سطل در حال چرخش است و آب ساکن است و برعکس آن (بین مرحله 1 و 3) وجود داشته باشد درحالی که این آزمایش ذهنی نشان میدهد که بین مرحله 1 و 3 یک چیز متفاوت است و آن گود بودن سطح آب در مرحله سوم است و نیوتن این گود بودن را اینطور توجیه میکند که این گودی حاصل چرخش آب نسبت به فضای مطلق است نه صرفا یک چرخش نسبت به فضای نسبی ."

در اینجا مخالفان نیوتن این گودی را اینطور توجیه میکند که این گودی شاید حاصل چرخش آب نسبت به سطح نباشد ولی حاصل چرخش آب نسبت به بقیه عالم است .

پس از اینکه نسبی گرا ها توانستند علتی برای گود شدن سطح آب ارائه دهند نیوتن آزمایش دیگری ارائه داد که باز هم میتوان پاسخی مناسب برای نسبی گرا ها پیش بینی کرد. آزمایش که برای بار دوم مطرح شد آزمایش دو گوی بود که با یک طناب در یک فضای خالی از هر چیزی به یک دیگر وصل شده اند و دور مرکز جرم مشترکشان میگردند و اینگونه بیان میکند که اگر دو گوی مستقلا دور مرکز جرم میچرخند چرا باید طناب بین این دو گوی کشیده شود و نسبت به چه چیزی جز فضای مطلق کشیده میشود ؟ در واقع فرض اینکه چیزی جز این دو گوی در عالم وجود ندارد اشتباه بوده است چرا که علت کش آمدن این طناب " بقیه عالم " بوده است و بدون وجود این عالم کش آمدنی وجود نخواهد داشت .

حال به شرح اصل نسبیت گالیله میپردازیم : گالیله در کتابش<sup>۱۲</sup> که در سال 1632 به چاپ رسید بیان کرد که " دو ناظری که نسبت به هم حرکت انتقالی یکنواخت دارند توصیف یکسان از پدیده های مکانیکی بدست می دهند " در واقع منظور از "حرکت انتقالی یکنواخت " همان ناظر های نسبت به هم لخت هستند .

ابتدا به مطالعه فضای گالیله میپردازیم فضای گالیله  $R \times R^3$  است و  $R$  زیر فضای زمان و  $R^3$  زیر فضای سه بعدی است که ساختار اقلیدسی دارد یعنی علاوه بر اینکه می توان ویژگی های  $R^3$  را روی آن پیاده کرد و حساب را تعریف کرد می توان فاصله را هم تعیین کرد . گالیله یک سری تبدیلات مشخص دارد که هنگامی که روی یک

<sup>12</sup> Dialogue on the two chief world system

ناظر (یا همان دستگاه مختصات) عمل کنند آن ناظر لخت باقی میماند با استفاده از اصل نسبیت گالیله تحت این تبدیلات مکانیک یکسانی را دریافت میکنند این تبدیلات عبارتند از: چرخش، انتقال مبدا، حرکت خطی با سرعت یکنواخت <sup>۷</sup>.

برای اینکه بتوانیم نظرات لایب نیتس، کلارک، ماکس و برکلی را هم بدانیم نیاز است که کمی با ساختار مکانیکی که نیوتن پایه گذاری کرده بود آشنا شویم:

**ساختار فضا و زمانی مکانیک نیوتنی:** چیزی که توانست نیوتن رو از سایر فیزیک دانان (نظریه پردازان) پیقبلی اش جدا کند اشتراک در ساختار فیزیکی بود. به این معنی که تمایزی بین فیزیک روی زمین و اخترفیزیک قائل نبود در حالی که ارسطو برای هر نوع از انواع ماده یک ساختار معین در نظر میگرفت.

ابتدا به معرفی مفهومی از فضا و ساختار به صورت ریاضیاتی می پردازیم:

فضا تشکیل شده است از مجموعه ای از اشیا ریاضیاتی (که نقاط آن فضا را تشکیل می دهند) و یک ساختار که روی نقاط فضا عمل میکند (ساختارها مجموعه ای از عملگرها و روابط بین نقاط است) و این ساختار است که به نقاط فضا معنی و مفهوم میبخشد و نوع یک فضا را ساختار آن معین میکنند.



نیوتن معتقد بود که فضای مکانیک اش یک فضای هندسه اقلیدسی است و این به این معنی است که در مکانیک نیوتنی اصول موضوعه هندسه اقلیدسی برقرار است. در بحث فیزیکی نقاط فضا اشیا فیزیکی هستند.

<sup>۱۳</sup> اصول موضوعه هندسه اقلیدسی <sup>۱۴</sup>:

1. از هر دو نقطه در فضا فقط یک پاره خط میگذرد. (خط کش)
2. هر پاره خط را می توان تا بی نهایت در امتداد خط راست ادامه داد.

<sup>13</sup> from Raphael's *The School of Athens* / *Euclid or Archimedes*

<sup>14</sup> *Euclidean geometry*

3. برای هر پاره خط ، میتوان دایره ای به شعاع آن پاره خط و مرکز یک سوی آن پاره خط رسم کرد.  
(پرگار)

4. تمام زاویه های راست بر هم عمودند .

5. اصل توازی : گر ۲ خط، خط سومی را قطع کنند به طوری که مجموع زاویه های داخلی در یک طرف آن از ۲ زاویه راست کمتر باشد، آن ۲ خط در صورتی که به اندازه کافی ادامه پیدا کنند متقاطعند.

حال چند ساختار را معرفی میکنیم :

ساختار توپولوژیکی<sup>۱۵</sup> : بنیادی ترین سطح ساختار یک فضا توپولوژی آن فضا است . که معین کننده ی پیوستگی فضا است و فرق بین یک خط پیوسته با دو خط در یک راستا را مشخص میکند . هنگامی که یک تبدیل توپولوژیکی روی میدهد خطوط راست و خطوط خمیده فرقی ندارند همچنین فاصله بین نقاط از اهمیت خاصی برخوردار نیست و تنها چیزی که در این تبدیل بنیادی اهمیت دارد حفظ پیوستگی در هندسه است . در واقع تغییر شکل ها نمیتواند به صورت شکستن یا چسباندن اشکال هندسی باشد . در نتیجه با این ساختار میتوان فرق بین یک منحنی پیوسته و چندین منحنی ناهمبند را تشخیص داد که وجودش برای یک فضا ضروری است.

ساختار مستوی<sup>۱۶</sup> : در هندسه اقلیدسی برای اینکه نشان دهیم که خطی که از بین دو نقطه عبور میکند خط راست است در فضا به ساختار مستوی نیاز است که این ساختار فرق بین خط راست از خط خمیده را نشان میدهد در حالی که ساختار توپولوژی فرقی بین آن ها قائل نیست . تبدیلی که راست بودن خطوط را تغییر نمیدهد و فقط طول آن را تغییر میدهد تبدیل مستوی می گویند

ساختار متریکی<sup>۱۷</sup> : برای اینکه بتوانیم اندازه فاصله بین دو نقطه مورد نظر را بدست آوریم به یک ساختار متریکی نیاز داریم و این کار از عهده ی ساختار مستوی بر نمی آید. این ساختار اصل موضوعه ی سوم اقلیدس را تضمین میکند چرا که یک دایره مکان هندسی نقاطیست که از یک نقطه مشخص به یک فاصله است . به تبدیلی که فاصله بین نقاط را تغییر نمیدهد و ساختار متریکی را حفظ میکند تبدیل طول پای<sup>۱۸</sup> است .

---

<sup>15</sup> Topological structure

<sup>16</sup> Affine Structure

<sup>17</sup> Metric structure

<sup>18</sup> isometry

در هندسه جدید ساختار دیگری نیز معرفی میشود که ساختاری بین ساختار توپولوژی و مستوی است که ساختار مشتق پذیر<sup>۱۹</sup> نامیده میشود. که فرقی بین مربع و دایره قائل است و نقاط تیز از این نظر برایش متفاوت است. تبدیلی که ساختار مشتق پذیر را حفظ میکند و ابربخشی<sup>۲۰</sup> نام دارد.

اصل پنج هندسه اقلیدسی تاثیر چندانی در مکانیک نیوتنی ندارد مکانیک نیوتنی حتی در فضاهایی که اصلا شامل خطوط موازی نباشند هم برقرار است ولی وجود ساختار مستوی و ساختار متریکی برای معنا دار شدن قوانینش ضروری است.

همانطور که میدانیم قانون اول نیوتن بیان میکند که اگر هیچی نیرویی به جسمی وارد نشود جسم به حرکت یکنواختش در یک خط راست ادامه می دهد. می خواهیم با استفاده از این قانون ساختار مکانیک نیوتنی را تعیین کنیم. طبق قانون اول اگر به جسم ساکنی نیرو وارد نشود ساکن خواهد ماند یعنی همواره یک نقطه از فضا را اشغال خواهد کرد.

حرکت یکنواخت در یک خط راست: اگر نقاط فضای مطلق با گذر زمان بر جای بمانند هنگامی که جسم در حال حرکت یکنواخت است روی این فضا از خود مسیری به جای میگذارد اما برای اینکه تشخیص دهیم که این مسیر بر روی خطی راست است باید فضای مطلق مورد تصور نیوتن دارای ساختار مستوی باشد که فرق بین "خط راست" را از سایر منحنی ها تشخیص دهد. همچنین فضا باید دارای ساختار توپولوژیکی باشد که بتوان تشخیص داد که مسیری که جسم طی میکند یک مسیر پیوسته است و اصلا مسیر برای یک جسم است یا چندین جسم اما برای اینکه بتوانیم لفظ "حرکت یکنواخت در یک خط راست" را در ساختار فضا داشته باشیم هنوز در مورد یکنواخت بودن حرکت صحبتی نکرده ایم لفظ یکنواخت بودن حرکت به این معنی است که جسم در بازه های زمانی یکسان بازه های فضایی یکسانی را بپیماند در اینجا از "بازه" سخن گفتیم و ساختار های توپولوژی و مستوی قادر به اندازه گیری یک بازه نیستند بنابراین برای اینکه بتوانیم بازه های زمانی و مکانی را معنی کنیم به ساختار متریکی احتیاج داریم که این ساختار هم باید روی فضای مکانی باشد هم روی فضای زمانی. پس قانون اول نیوتن علاوه بر فضای مطلق مستلزم زمان مطلق نیز هست. فضای مکانی برای یک حرکت باید هر سه ساختار بیان شده را داشته باشد اما چون فضای زمانی یک بعدیست ساختار متریکی و توپولوژی برای توصیف آن کافیه از طرفی فضای زمانی مستلزم یک ویژگی است که برای فضای مکانی در نظر گرفته نمیشود و آن داشتن یک جهت مشخص است. نیوتن همواره فرض میکرد که فضای مکانی

<sup>19</sup> Differentiable structure

<sup>20</sup> Diffeomorphism

مورد تصور همان فضای هندسی  $E^3$  است و فضای دیگری را هم برای قوانینش تصور نمیکرد برای همین در مورد ساختار فضایی مورد نظرش صحبت خاصی نکرده است .

در مورد دستگاه مختصات دکارتی که امروز بر این فضای هندسی اقلیدسی مورد تصور نیوتن سوار می شود( در کتاب های مکانیکی مانند گلدستاین ) این فضای هندسی  $E^3$  ایجاب میکند که دستگاه مختصات دکارتی وجود داشته باشد و این ساختار هندسی ذاتی که فضا و زمان آن را داراست نیز ایجاب میکنند که دستگاه های مختصات لخت وجود داشته باشند چون خود نیوتن در مکانیکی که بنا کرده بود تماما از روابط هندسی (با ساختار  $E^3$ ) استفاده میکرد و اجسام در این فضا حرکت میکردند نیازی به بیان چارچوب مرجع لخت پیدا نکرد . دستگاه های مختصاتی که معمولا استفاده میشوند دارای دو (یا سه) مختصه عمود بر هم که هر مختصه خود خطی راست تا بی نهایت است و این نشان میدهد که شرط اینکه دستگاه مختصات به این شکل بتواند بنا شود این است که فضایی که در آن قرار میگیرد دارای ویژگی های ساختاری خاصی باشند و برای این نوع رایج دستگاه مختصات فضا باید اولاً دارای ساختار توپولوژیکی باشند (برای نشان دادن اینکه مختصه ها هر کدام خطی پیوسته اند ) سپس ساختار مستوی (برای راست بودن خطوط مختصه ها ) و بعد از آن ساختار متریکی داشته باشد که بتوان عمود بودن آن ها به هم را نشان داد .

نیوتن فضای مطلقى که برای فرمول بندى دینامیک اش استفاده کرده بود فضایی بود با هندسه سه بعدی اقلیدسی و نقاط فضای مطلق در گذر زمان در آن برجا میمانند و نسبت های هندسیشان تغییری نمیکند . اما این مفروضات برای نوشتن قوانین نیوتن بیشتر از حد نیاز اند و قوانین بدون نیاز به فضا و زمان مطلق قابل فرمول بندی هستند و برای توضیحشان نیازی به هندسه اقلیدسی نیست .

لایب نیتس<sup>21</sup> : لایب نیتس دارای دو برهان اصلی در مکاتبات خود با کلارک و نیوتن بود

در مکاتبات خود با کلارک به بیان برهان PRS<sup>22</sup> (اصل دلیل کافی) پرداخت در مورد قابل قبول بودن قوانین نیوتن این نامه نگاری ها صورت گرفته و برهان دیگر برهان PII<sup>23</sup>(اصل وحدت نامتمایزان) در حمله مستقیم خود به نیوتن بود .

<sup>21</sup> Gottfried Wilhelm Leibniz

<sup>22</sup> Principle of sufficient reason

<sup>23</sup> Principle of Identity of indiscernibles

اصل PRS در نامه های لایب نیتس به کلارک اینطور بیان شده است : با این اصل دلیل کافی ، یعنی باید جهت عقلی کافی وجود داشته باشد برای اینکه بتوان تشخیص داد چرا باید چنین باشد و نه طور دیگری ، هر کسی میتواند وجود خداوند و تمام بخش های دیگر متافیزیک و تا حدی اصول دینامیکی یا اصول نیرو را ثابت کند و این جهت کافی چیزی جز اراده محض خداوند نیست .

در واقع خداوند نمیتواند میان امکان های متفاوت اگر وجود داشته باشند دست به انتخاب بزند .

هنگامی که لایب نیتس در حال بیان برهان اول خود برای کلارک است برهان دوم را بیان میکند در این پروژه چیزی که اهمیت دارد برهان دوم است . اما ذکر این نکته مهم است که اصل PII از اصل PRS نتیجه میشود و در صورتی که در درستی اولی شکی وارد شود نتیجه ی آن هم بی معنی میشود . نقل قول از نامه های لایب نیتس :

فضا چیزی جز ترتیب یا نسبت نیست و بدون حضور اجسام فضا چیزی نیست جز امکان قرار دادن اجسام ، در حالت فعلی یا در حالت عکس آن ، در مقام دو حالت اصلا با یکدیگر تفاوت ندارند . تفاوتشان در این فرض است که ما برای فضا به خودی خود واقعیت قائل شده ایم اما یکی از آن دو درست و با دیگری یکسان است . آن ها مطلقا تمیزناپذیرند و جایی برای پرس و جو در پی جهتی برای رجحان یکی بر دیگری ندارد .

اصلا وحدت نامتمایزان (PII) یکی از اصول هستی شناسی است که لایب نیتس آن را در کتاب<sup>24</sup> خود مطرح کرد. که به این اصل به عبارتی "قانون لایب نیتس" میگویند. که بیان میکند که هیچ دو شی متمایزی دقیقا یک شکل نیستند و ویژگی های یکسانی ندارند<sup>25</sup> . بیان ریاضیاتی این قانون :

دو شی  $x$  و  $y$  یکسانند اگر و فقط اگر برای ویژگی  $F$  اگر شی  $x$  آن ویژگی را داشته باشد  $y$  هم همان ویژگی را داشته باشد :  $\forall F(Fx \leftrightarrow Fy) \rightarrow x=y$

یعنی اگر  $x$  و  $y$  متمایز باشند حداقل یک ویژگی وجود دارد که  $x$  دارد و  $y$  ندارد یا برعکس .

حال میخواهیم از این اصل در مکانیک نیوتنی استفاده کنیم : طبق فضای مطلق نیوتن هنگامی که ماده در یک نقطه از فضا موقعیتی بدست میآورد و سپس موقعیت دیگری در فضا را اشغال میکند این دو حالت با یک دیگر

<sup>24</sup> Discourse on Metaphysic

<sup>25</sup> این اصل در زمینه ی کوانتومی با شکست مواجه میشود

فرق دارند و قابل تمیز اند (ماده در فضا تغییر مکان داده است .) درحالی که طبق قانون لایبنیتس دو شی که کاملاً از هم قابل تفکیک باشند نمیتوانند وجود داشته باشند یا دو شی تمیز ناپذیر عیناً نمیتوانند وجود داشته باشند پس چون نظریه نیوتن منجر به وجود اشیا تمیزناپذیر میشود باید اشکال متافیزیکی داشته باشد و این اشکال همان فرض فضای مطلق است .

در حالی که وجود فضای اقلیدسی خالی از ماده قانون لایبنیتس را رد میکند چرا که وجود این فضا با بی نهایت نقطه یکسان خود یک تناقض با این قانون به حساب می آید . توجیه هایی که لایب نیتس برای این قانون خود ارائه میدهد پایه های مستحکمی ندارند و بیشتر به دیدگاه تجربه گرایی به آن می اندیشد که اینکه بتوان دو موقعیت متفاوت اما تمیز ناپذیر را تصور کرد کمی گیج کننده خواهد بود .

در علوم طبیعی پدیده های زیادی وجود دارند که مشاهده ناپذیرند مثلاً نیروی گرانش که گرچه قابل مشاهده نیست اما این مفهوم در ذهن افراد قابل تصور است . نظریه نیوتن هم به پرسش هایی را مطرح میکند که با مشاهدات قابل حل نیستند اما سوال "در کجای فضای مطلق هستیم ؟" کمی سخت به نظر می آید چرا که نقاط فضای مطلق از یکدیگر تمیزناپذیرند . همانطور که قبلاً ذکر شد فضای مطلق (زمان و حرکت مطلق نیز) در مکانیک نیوتنی واقعیت های مشاهده ناپذیرند اما این واقعیت که نتوانیم چیزی را به طور تجربی تعیین کنیم دلیل نمیشود که آن چیز وجود ندارد و ضرورتی وجود ندارد که جهان و حواس ما طوری باشند که هر واقعیت فیزیکی قابل مشاهده باشد اما هر واقعیت فیزیکی با اصل موضوع متفاوت است ممکن است یک واقعیت مشاهده ناپذیر باشد و پذیرفته شود اما مشاهده پذیر بودن اصل موضوع یک نظریه جایی برای شک در آن نظریه میگذارد و وقتی که وجود یک واقعیت فیزیکی مشاهده ناپذیر روی رفتار مشاهده پذیر اشیا تاثیری نداشته باشد پس این واقعیت هیچ نقشی در آن نظریه نخواهد داشت بنابراین نظریه ای که عاری از این واقعیت باشد بار هستی شناسی کمتری خواهد داشت پس بر اساس استرکام<sup>۲۶</sup> (تیغ اکام) نظریه ای بدون آن واقعیت فیزیکی مشاهده ناپذیر برنظریه های دارای آن ارجحیت دارد .

نیوتن برای واقعیت های مشاهده پذیر از لفظ نسبی و برای واقعیت های مشاهده ناپذیر خود از لفظ مطلق استفاده کرد. لایب نیتس معتقد است که بخش های مشاهده ناپذیر نظریه نیوتن زاید هستند و بخش مشاهده پذیر آن برای نظریه اش کافیت .

یک اصل معرفت شناختی است که بیان میکند که باید در تبیین امور تاجایی که ممکن است به موجودات کمتری متوسل : *Occam's Razor* <sup>26</sup> شد یعنی باید تبیینی را بپذیریم که کمترین پیچیدگی را داشته باشد . (دیدگاه دارای بار هستی شناسی پایین تر)

یکی دیگر از مشکلاتی که لایبنیتس مجبور به حلشان بود این بود که بتواند فرق بین حرکت مطلق و حرکت نسبی را بدون استفاده از فضای مطلق تبیین کند که برای این کار از این فرض استفاده کرد که جسمی در حال حرکت مطلق است که «علت قریب تغییر» در درون خود آن جسم باشد. اما این تعریف از حرکت مطلق که بدون توسل به مکان مطلق است خالی از ابهام نیست چرا که مشخص نمیکند که منظورشان از «علت قریب تغییر» چیست.

از قرن نیوتن و لایبنیتس تا قرن ۲۰ام هیچ چالشی برای مکانیک نیوتنی وجود نداشت و فضای مطلق نیوتن تقریباً پذیرفته شده بود افرادی مثل نیومان و لانگه در این فاصله سعی در یافتن چارچوب های مرجعی برای قوانین نیوتن کردند.

ماخ<sup>۲۷</sup>: ماخ هرگز یک نظریه کامل مانند نیوتن ارائه نداد اما برای آزمایش های ذهنی نیوتن دلایل نسبتاً محکمی آورد. از نظر ماخ ایراد نظریه نیوتن یک ایراد فلسفی بوده است و این گونه تصور میکرد که چون سکون های فیزیک جزء خواص مشاهده پذیر اجسام مشاهده پذیر است پس فیزیک آن اجسام هم باید برحسب خواص مشاهده پذیر فرمول بندی شود و با همین استدلال وجود فضا و زمان مطلق و همچنین نظریه اتمی را انکار کرد. از طرفی خود نیوتن میدانست که فضا و زمان مطلق مشاهده ناپذیرند اما از آن برای تبیین هر چه بهتر واقعیت های مشاهده پذیر استفاده کرد در واقع از آن ها به عنوان اصل موضوعه استفاده کرد. در نتیجه در نظریه نیوتن یک نوع عدم مشاهده پذیری ذاتی وجود دارد که میتوان با تغییر وجودشناسی از فضا و زمان این ساختار مشاهده ناپذیر را حذف کرد.

### حذف ساختار های مشاهده ناپذیر :

اگر بخواهیم به طریقی دینامیک نیوتن را حفظ اما توصیف وی از فضا و زمان را رد کنیم به ساختار های دیگری نیاز داریم که بتوانیم قانون اول را تدوین کنیم. راه رسیدن به این ساختار فضا-زمان است.

---

<sup>27</sup> Ernst Mach



حال به شرح اصل نسبیت گالیله میپردازیم: گالیله در کتابش<sup>28</sup> که در سال 1632 به چاپ رسید بیان کرد که "دو ناظری که نسبت به هم حرکت انتقالی یکنواخت دارند توصیف یکسان از پدیده های مکانیکی بدست می دهند" در واقع منظور از "حرکت انتقالی یکنواخت" همان ناظر های نسبت به هم لخت هستند.

ابتدا به مطالعه فضای گالیله میپردازیم فضای گالیله  $R \times R^3$  است و  $R$  زیر فضای زمان و  $R^3$  زیر فضای سه بعدی است که ساختار اقلیدسی دارد یعنی علاوه بر اینکه می توان ویژگی های  $R^3$  را روی آن پیاده کرد و حساب را تعریف کرد می توان فاصله را هم تعیین کرد. گالیله یک سری تبدیلات مشخص دارد که هنگامی که روی یک ناظر (یا همان دستگاه مختصات) عمل کنند آن ناظر لخت باقی میماند با استفاده از اصل نسبیت گالیله تحت این تبدیلات مکانیک یکسانی را دریافت میکنند این تبدیلات عبارتند از: چرخش، انتقال مبدا، حرکت خطی با سرعت یکنواخت  $v$ .

کلارک و نیوتن هر دو با این نسبیت گالیله موافق بودند. کلارک هدف خاصی را دنبال میکرد او میگفت که «اگر همه ی عالم مادی با سرعت یکنواخت در فضای مطلق اقلیدسی در حال حرکت باشد پس فرقی بین حرکت های نسبی وجود نخواهد داشت» همچنین نیوتن معتقد بود که یافتن پاسخ بسیاری از پرسش ها از طریق کاملاً تجربی امکان پذیر نیست. نیوتن این اصل نسبیت را به عنوان پنجمین نتیجه منطقی از قوانین حرکتش اینطور بیان میکند:

حرکت اجسامی که در یک فضای مفروض قرار دارند میان خودشان یکسان است خواه آن فضا ساکن باشد خواه در حال حرکت یکنواخت.

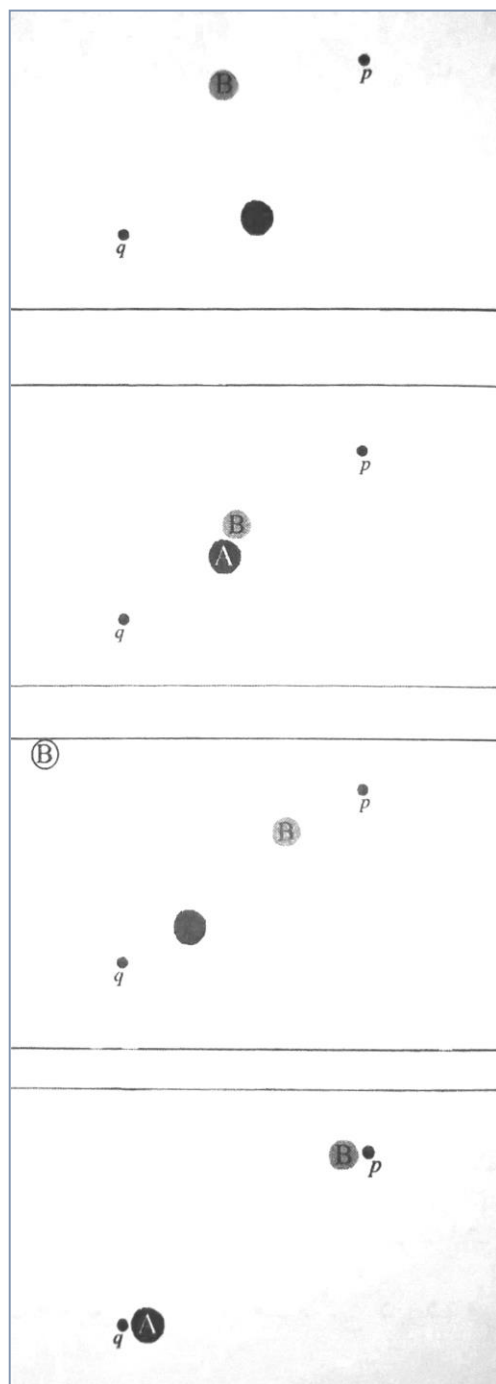
بر اساس این نتیجه نمیتوان تشخیص داد که در حال سکونیم یا حرکت یکنواخت. اما اصل PII لایب نیتس مشاهده های کاملاً یکسان از یک پدیده را نمیپذیرد. (نسبیت گالیله ای) و همچنین با گذاره ی کلارک هم موافق نبود

اما چطور میتوانیم این فرض های مطلق در نظریه نیوتن را کنار بگذاریم و هنوز بتوانیم مکانیک نیوتنی را با همان قدرت قبلی اش تبیین کنیم؟

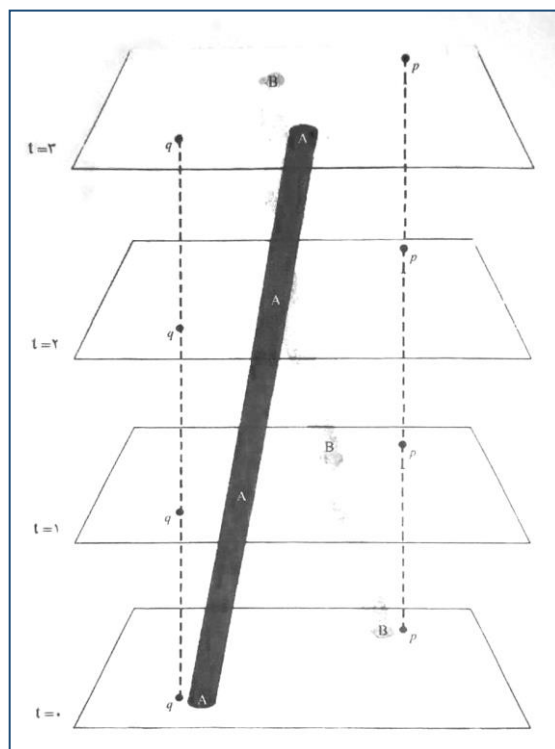
گالیله ادعا میکند که «همه چارچوب های لخت یکسان اند»

<sup>28</sup> Dialogue on the two chief world system

حال به بحث فضا-زمان خود باز میگردیم که با استفاده از نسبیت گالیله ای تدوین شد تا قوانین نیوتن در آن با فضا-زمان سازگار باشد .



ابتدا فرض میکنیم فضای مطلق اقلیدسی مورد نظر نیوتن دو بعدیست (برای سادگی) و نقاط فضا با گذر زمان بر جای میمانند . این دو جسم که با گذر زمان (از شکل پایین به بالا  $t=0$  تا  $t=3$ ) وقتی در این فضا عبور میکنند از خود رد هایی میگذارند که اگر قادر به نمایش بودیم بی نهایت تصور میشد رسم کرد که از وصل کردن رد های آن ها میتوانستیم مسیر آن هارا به وضوح ببینیم . حال اگر همین تصویر ها از فضا در بازه های زمانی با فاصله مساوی را یک بعد از فضا-زمان و بعد دیگر را زمان قرار دهیم به طوری که شکل بعدی ساخته شود خطی که برای هر جسم نقاط فضا را در تمام طول زمان به طور پیوسته ادامه میدهد جهان خط<sup>29</sup> نامیده میشود و این نمودار ، نمودار فضا-زمان نامیده میشود . به دلیل وجود خاصیت متریکی زمان میتوانیم چنین نموداری را رسم کنیم .



<sup>29</sup> worldline

در این نمودار اجسامی که در سکون مطلق اند جهان خطی عمودی دارند و اجسامی که دارای حرکت یکنواخت مطلق هستند با خطوط راست نشان داده میشوند. پس در نتیجه برای اجسام لخت (چه در سکون مطلق چه در حال حرکت یکنواخت) جهان خطی به شکل خط راست متصور میشویم و هنگامی که خط راسنی در این نمودار باشد به معنی حرکت لختی است. همچنین اگر اجسام حرکت شتاب دار به هر شکلی داشته باشند جهان خط آن ها خمیده است. پس در اینجا با تعریف جدیدمان از فضا - زمان لازم است که قوانین را بازنویسی کنیم:

"قانون اول: در یک نمودار فضا-زمان مسیر یک جسم با یک خط راست نمایش داده میشود مگر اینکه جسم بر اثر نیرو وارد شده مجبور به تغییر حالتش شود"

"قانون دوم: اثر نیروی وارد شده با انحنا یا خمیدگی جهان خط ها نمایش داده میشوند"

یعنی اینکه این انحنا متناسب با نیروی وارد شده است و جهان خط در جهت نیرو خم میشود. حال تعریف دوباره از جرم لختی:

"جرم لختی جسم اندازه گیری میزان مقاومت جهان خط جسم در برابر خم شدن در اثر نیرو"

در اینجا مفهوم دینامیک از  $F=ma$  به  $F=mv$  تغییر میکند. که  $F$  همان خمیدگی جهان خط است.

حال در اینجا توانستیم بدون توسل به این دیدگاه نیوتن که نقاط فضای مطلق در گذر زمان بر جای میماند مکانیک آن را به طور کامل تبیین کنیم پس میتوانیم تعریف نیوتن از فضا و زمان را نیز تغییر دهیم. در تعریف جدید از رویداد ها<sup>30</sup> سخن به میان می آید. یک رویداد در اصل "یک مکان در فضا در یک زمان" پس از این پس باید به نقاط فضا-زمان به شکل یک رویداد نگاه کنیم. حال که مهم ترین عنصر هستی شناسی فضا-زمان رویداد ها هستند روشن شدن ساختار رویداد ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

ساختار زمانی فضا-زمان گالیله ای:

بین هر دو رویداد یک بازه زمانی مطلق فرض میشود پس این ساختار جدید زمان مطلق نیوتنی را میپذیرد در نتیجه این زمان هم مانند زمان نیوتن یک ساختار متریکی دارد که بین هر دو رویداد زمان میتواند صفر یا کمتر

---

<sup>30</sup> event

و بیشتر از آن باشد هنگامی که این زمان بین دو رویداد صفر باشد در واقع آن رویداد ها همزمانند . این رویداد های همزمان در کنار یک دیگر یک مجموعه کامل از رویداد ها را تشکیل میدهند که به هر کدام از آن ها برش های همزمانی میگوییم که فضا-زمان را به برش های زمانی تقسیم میکند که به آن لایه لایه شدن فضا-زمان<sup>31</sup> میگویند .

ساختار فضایی فضا-زمان گالیله ای :

هر برش همزمانی در فضا-زمان یک فضای اقلیدسی<sup>3</sup>  $E^3$  است . اما مسئله ای که اینجا وجود دارد این ساختار جدید از فضا-زمان باید مشخص کند که میان رویداد ها در زمان های مختلف (برش های هم زمانی متفاوت) چه ساختار هندسی ای حکم فرماست . نیوتن در مکانیک خود برای این ساختار فرض معروف خود را داشت که نقاط فضا با گذر زمان بر جای میماند . اما در این ساختار این فرض حذف شده و باید جایگزینی برای آن بیابیم . برای این منظور متوجه میشویم که این فضا-زمان باید در درجه اول ساختار توپولوژی داشته باشد که بتوانیم پیوستگی یا ناپیوستگی مسیر رویداد ها (جهان خط ها) را دریابیم . از طرفی این فضا-زمان باید ساختار مستوی داشته باشد که راست یا منحنی بودن جهان خط ها را بتوانیم تشخیص دهیم که به اصطلاح به این ساختار ، ساختار لختی فضا-زمان میگوییم .

در فضا-زمان نیوتن بین سکون مطلق و حرکت یکنواخت (سرعت ثابت) حالت های متفاوتی از حرکت هستند اما فضا-زمان گالیله ای آن ها را یکسان میبیند چرا که هر دو را با خط راست مشخص میکند و ساختاری برای اینکه عمود بودن این خط را تشخیص دهد ندارد بنابراین این دو را یکسان میبیند . در تمام کتاب ها و منابع استاندارد ساختار مکانیک نیوتنی ساختار فضا-زمان گالیله ای فرض شده است همانطور که گلدشتاین که از معروف ترین کتاب های مکانیک کلاسیک است جایی ذکر میکند " فرض کنید ۲ یک بردار شعاعی ذره ای از مبدا مفروض باشد " این مبدا مفروض نمیتواند برای هر زمانی در جای مختلفی باشد چرا که در این صورت مفهوم مبتدلی محسوب میشود و باید یک مبدا ای فرض شود که لخت باشد یعنی تحت تبدیلات مستوی (لخت ، گالیله ای ) یکسان باقی بماند و باید یک مسیر لختی باشد .

اینک میتوانیم مفهوم دستگاه مختصات لخت را بهتر درک کنیم در این ساختار فضا-زمان گالیله ای روی هم چهار مختصه داریم سه مختصه فضایی و یک مختصه زمانی اگر سه مختصه زمانی را ثابت نگه داریم و اجازه بدهیم در بعد زمان جسم حرکت کند این جسم در نمودار فضا-زمان یک مسیر پیوسته (توپولوژی) میسازد اگر

<sup>31</sup> foliation

این مسیر بین برش های زمانی یک منحنی مستقیم باشد این دستگاه مختصات لخت است و در غیر این صورت نالخت است .

در پایان ذکر این نکته ضروری است که اگر مکانیک نیوتنی و ساختار فضا-زمان گالیلای برای تبیین همه پدیده های مشاهده پذیر کافی بود نیازی به این نبود که بعد ها نسبیت های عام و خاص به وجود بیایند . همچنین کنار گذاشتن فضا و زمان به عنوان یک موجودیت که خواسته ی ماخ و لایبنیتس بود پس از آن خیلی ادامه پیدا نکرد چرا که قابل مشاهده نبودن فضا و زمان نمیتواند دلیل خوبی برای وجود نداشتن آن ها باشد و حتی اگر وجود هم نداشته باشند فرض وجود آن ها به حل مسائل فیزیکی و تصور ما از عالم کمک شایانی میکنند همانطور که اتم ها هم به دلیل اینکه مشاهده نمیشوند حذف نشدند .

پس از این جنجال ها بر سر مکانیک نیوتنی سرانجام فضا و زمان مطلق نیوتنی به نفع نسبیت خاص کنار گذاشته شدند .

## منابع :

- فلسفه فیزیک فضا و زمان از تیم مادلین
- سایت پلاتو استنفورد
- کتاب اصول ریاضی فلسفه طبیعی نیوتن
- کتاب فلسفه علم سمیر اکاشا
- کتاب فلسفه و فیزیک سر جیمز هاپوود جینز
- کتاب نظریه نسبیت خاص / ماکس بورن
- Understanding space-time / Robert Disalle
- کتاب مکانیک کلاسیک فیروز آرش
- دانشنامه عمومی ویکی پدیا
- سایت physics stack exchange