

مبانی نسبیت خاص معادلات ماكسول و امواج الكترومغناطيسي

حسين 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.

- ۱ معادلات ماكسول و امواج الكترومغناطیسی
- معادلات ماكسول
- موج الكترومغناطیسی
- بررسی ناوردایی معادله موج الكترومغناطیسی تحت تبدیلات گالیله

آنچه گذشت: تبدیلات گالیه و نسبیت نیوتنی

- گالیه: 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.
- اصل نسبیت نیوتنی: 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.
- آیا قوانین دیگر فیزیک (مانند الکترومغناطیس) نیز در اثر تبدیلات گالیه ناوردا هستند؟



الکترومغناطیس و نظریه نسبیت

همانطور که از اولین پاراگراف اولین مقاله نسبیت اینشتین (۱۹۰۵) مشخص است، ناورادی معادلات ماکسول اصلی ترین انگیزه اینشتین برای ابداع نسبیت خاص بوده است. در واقع عنوان این مقاله این است: ”درباره الکترودینامیک اجسام متحرک“. بنابراین، برای تسلط بر انگیزه ها و مفاهیم در نسبیت خاص، لازم است که با معادلات ماکسول آشنا باشیم. مقالات سال ۱۹۰۵ به زبان انگلیسی را می توانید در کتاب جان استچل بیابید.

PAPER 3

On the Electrodynamics
of Moving Bodies

IT IS WELL KNOWN that Maxwell's electrodynamics—as usually understood at present—when applied to moving bodies, leads to asymmetries that do not seem to be inherent in the phenomena. Take, for example, the electrodynamic interaction between a magnet and a conductor. The observable phenomenon here depends only on the relative motion of conductor and magnet, whereas the customary view draws a sharp distinction between the two cases, in which either the one or the other of the two bodies is in motion. For if the magnet is in motion and the conductor is at rest, an electric field with a definite energy value results in the vicinity of the magnet that produces a current wherever parts of the conductor are located. But if the magnet is at rest while the conductor is moving, no electric field results in the vicinity of the magnet, but rather an electromotive force in the conductor, to which no energy per se corresponds, but which, assuming an equality of relative motion in the two cases,

1294 Sitzung der physikalisch-mathematischen Classe v. 10. November 1905.

Zur Elektrodynamik bewegter Systeme.

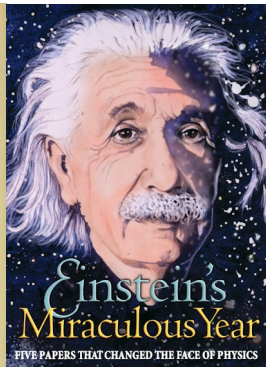
Von Prof. EMIL COHN
in Heidelberg i. E.

(Vorgelegt von Hrn. WARBURG.)

Vermutet durch eine Reihe experimenteller Untersuchungen der letzten Jahre, welche alle die Unabhängigkeit der beschriebenen Erscheinungen von der Zellbewegung darthäten, hat H. A. LORENTZ allerdings die Grundlagen der Elektrodynamik durch neue Hypothesen modifiziert. Im Folgenden beabsichtige ich zu zeigen, dass nach diesen Modifikationen die LORENTZ'schen Gleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper identischfallen mit den Gleichungen, welche sich vor einigen Jahren aufgestellt haben.

§ 1. Eine Vergleichung meines Ansatzes mit dem LORENTZ'schen war bisher in vollem Umfang nicht möglich. Es ist dies demnach begründet, dass die beiden »Theorien« durchaus verschiedener Art sind. Die meiste stellt in wenigen Gleichungen den Einfluss stichtbarer Bewegungen auf die elektromagnetischen Vorgänge in größeren Körpern dar. Sie ist auf diesem Gebiet direct mit der Erfahrung vergleichbar. Für eine zu entwickelnde Mechaniktheorie gibt sie nur eine Anweisung; dieselbe so auszubilden, dass für die mechanischen Mitteltheile eben diese Gleichungen entstehen.

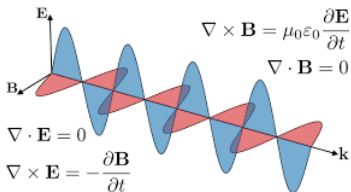
LORENTZ gibt direct eine Regel für die elektromagnetischen Wirkungen, welche sogenannte kleinste Theile ausüben und erbalten. Aus diesen sind zunächst Gleichungen zu gewinnen für diejenigen Leitungen, welche sich auf den Zustand stichtbarer Theile des Körpers beziehen und somit der Beobachtung zugänglich sind. Bis zu diesem Punkt findet sich die Theorie in den Sitzungsberichten der Amsterdammer Akademie vom 1902 entwickelt. Die Gleichungen lauten:



اهداف این جلسه

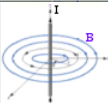
در این جلسه می خواهیم ناوردایی معادلات ماکسول و موج الکترومغناطیسی را تحت تبدیلات گالیه بررسی کنیم. برای اینکار در ابتدا معادلات ماکسول را یادآوری خواهیم کرد. سپس مفاهیم موج و موج الکترومغناطیسی را مرور می کنیم. در انتها نیز ناوردایی این قوانین تحت تبدیلات گالیه را بحث خواهیم کرد.

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)	$\nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{\mathbf{J}}{c}$	$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{\ell} - \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{c} \iint \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = \frac{I}{c}$	
Gauss's (1813)	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	
Faraday's (1831)	$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$	$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{\ell} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	



نقش معادلات ماکسول در فیزیک

دسته معادلات پایین به قوانین الکترومغناطیس ماکسول (در خلاء) مشهور هستند. این معادلات (به علاوه قانون نیروی لورنتس و نسبیت خاص) اساس توصیف همه پدیده های الکترومغناطیسی هستند و طیف بسیار گسترده ای از پدیده ها را توصیف می کنند. در واقع معادلات ماکسول در توصیف تمام پدیده های روزمره، علمی و فنی (به جز گرانش) سهم دارند. این معادلات به دو شکل دیفرانسیلی و انتگرالی (در دستگاه آحاد طبیعی) در زیر آورده شده اند.

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)	$\nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{\mathbf{J}}{c}$	$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{\ell} - \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \iint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{c} \iint \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = \frac{I}{c}$	
Gauss's (1813)	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	
Faraday's (1831)	$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$	$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{\ell} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \iint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	

مفهوم معادلات ماکسول

● قانون گوس در الکتروستاتیک بیان می کند که دیورژانس میدان الکتریکی گذرنده از یک نقطه متناسب است با چگالی بار موجود در آن نقطه:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

● قانون گوس در مغناطیس بیان می کند که تک قطبی مغناطیسی وجود ندارد:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

● قانون القای فارادی بیان می کند که تغییر در میدان مغناطیسی در طی زمان، باعث القای میدان الکتریکی چرخشی می شود:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

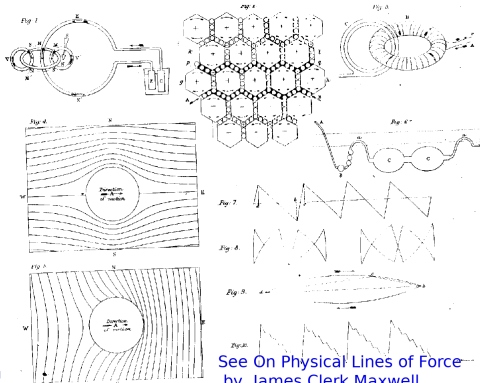
● قانون آمپر-ماکسول بیان می کند که جریان الکتریکی و تغییر در میدان الکتریکی با زمان هر دو می توانند باعث القای میدان مغناطیسی چرخشی شوند:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J} \right)$$

● این معادلات اثرات بسیار عمیقی بر علم و تکنولوژی داشته اند و تمامی دستگاه های الکتریکی بر اساس آنها طراحی شده اند. علاوه بر این، معادلات ماکسول برای اولین بار نشان دادند که نور یک موج الکترومغناطیسی است و دانش اپتیک و الکترومغناطیس را وحدت بخشیدند. در ادامه این معادلات را بررسی خواهیم کرد.

نکته بسیار مهم تاریخی

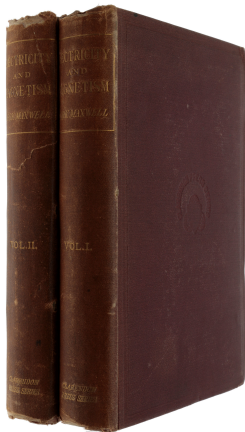
تفسیر کنونی ما از معادلات ماکسول با تفسیر ماکسول و اطرافیانش تفاوت های عمده دارد. ما در حال حاضر این معادلات را به عنوان قوانین توصیف کننده میدان های الکتریکی و مغناطیسی و بهم کنش آنها با ماده می شناسیم. از دید ماکسول (و همکاران و دانشجویانش) این معادلات در واقع ویژگی های اتر (مانند کشسانی، تنش و کرنش اتر) را به ما توضیح می دادند. با ساختن نسبت خاص، اینشتین عدم نیاز به اتر را نشان داد و تفسیر کنونی معادلات ماکسول کم کم به وجود آمد.



See On Physical Lines of Force
by James Clerk Maxwell

نکته تاریخی

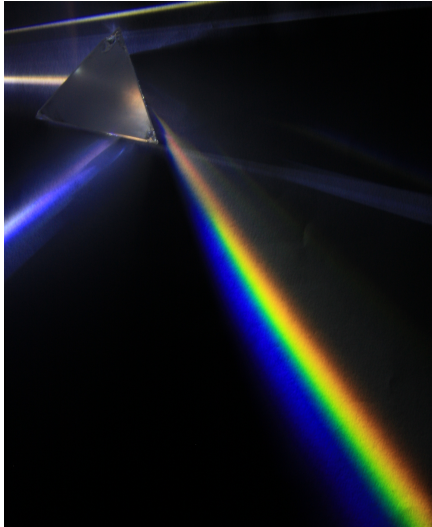
معادلات ماکسول با فرمولبندی بسیار پیچیده در ابتدا در دو مجلد (بیش از ۱۰۰۰ صفحه) چاپ شد و حتی برای متخصصان هم چندان قابل فهم نبود. ماکسول هم در سن ۴۸ سالگی فوت شد و فرصت چندان برای معرفی این اثر تاریخی نداشت. ولی بعدها مهندسی به نام هویساید (و دیگران) آنالیز برداری را پایه گذاری کرده، معادلات ماکسول را به شکل امروزی خلاصه نموده و به دنیا شناساند. پیشرفت واقعی تئوری الکترومغناطیس از اینجا شروع شد.



How Maxwell's Equations Led to VECTOR ANALYSIS

 Maxwell	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	 Heaviside
 Tait	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$	 Gibbs

موج



● در فیزیک، موج یک نوسان همراه با انتقال انرژی است که می تواند در محیط مادی و یا خلاء (بسته به نوع موج) منتشر شود. در ادامه برخی از انواع موج را نام برده ایم:

● ۱ امواج مکانیکی (مانند امواج صوتی، موج چگالی، امواج زلزله، امواج سطحی، موج در طناب و ...)

● ۲ امواج الکترومغناطیسی که موضوع اصلی درس ما خواهند بود.

● ۳ امواج گرانشی که اخیرا کشف شده اند.

● ۴ تابع موج در مکانیک کوانتومی.



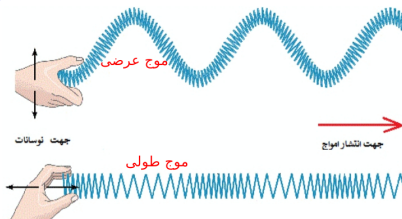
موج چیست؟

دو نوع موج داریم: موج های عرضی و موج های طولی. در موج عرضی جابجایی ذرات در جهت عمود بر راستای انتشار موج است در حالی که در موج طولی (و یا موج فشار) جابجایی ذرات در راستای انتشار موج است. منظور از راستای انتشار موج، راستای حرکت ”طرح موج“ است. فیلم مربوطه را ببینید.

موج صوتی یک نوع موج طولی است.

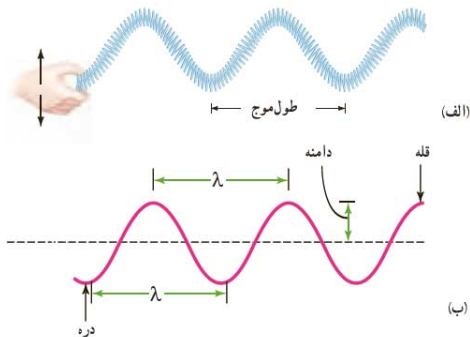
مثال هایی از موج عرضی: به ویدئوی موج مکزیکی در ورزشگاه دقت کنید. در موج مکزیکی، همه افراد از جای خود برخاسته و می نشینند؛ ولی آنها جابه جا نمی شوند. با این وجود طرح موج جابه جا می شود. در موج آب هم وضعیت مشابهی داریم.

نور یک موج الکترومغناطیسی عرضی است. بنابراین ما در ادامه بیشتر امواج عرضی را بحث خواهیم کرد.



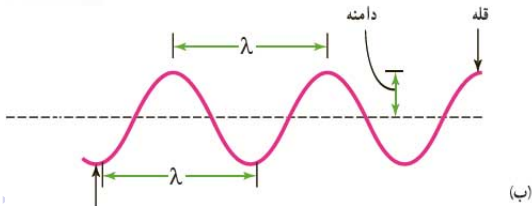
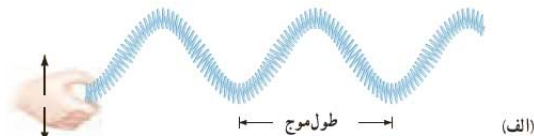
برخی ویژگی های موج

- دامنه یک موج عرضی بیشترین میزان جابه جایی عمودی در جهت بالا و یا پایین است.
- قله و دره موج نشان دهنده مکان هایی هستند که بیشترین جابجایی در جهت های عمودی و افقی اتفاق می افتند. به عبارت دیگر، به برآمدگی های موج، قله و به فرورفتگی های موج دره گفته می شود.
- فاصله بین دو برآمدگی یا دو فرورفتگی مجاور، طول موج نامیده می شود و آن را با λ نشان می دهند.



برخی ویژگی های موج

- دوره تناوب به فاصله زمانی بین دو قله متوالی موج گفته می شود. دوره تناوب را معمولا با T نشان می دهند.
- عکس دوره تناوب را فرکانس می نامند که واحد آن هرتز است و معمولا با $f \equiv 1/T$ نشان داده می شود.
- سرعت انتشار موج عبارت است از $v \equiv \frac{\lambda}{T} = \lambda f$.



معادله موج

• برای پدیده های موجی مختلف می توان معادله موج را به شکل کلی $\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = v^2 \nabla^2 f$ به دست آورد که در آن v سرعت موج و f مقدار کمیت در حال نوسان (فشار، میدان الکتریکی و ...) است.

• معادله موج یک بعدی را نیز می توان به صورت $\frac{\partial^2 f(t, x)}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 f(t, x)}{\partial x^2}$ نوشت. روش های زیادی برای حل این معادله وجود دارد؛ ولی یک روش ساده استفاده از تغییر متغیر $\xi = x - vt$ و $\eta = x + vt$ می باشد که معادله موج را به صورت $\frac{\partial^2 f(\xi, \eta)}{\partial \xi \partial \eta} = 0$ تغییر می دهد. جواب این معادله به صورت زیر است:

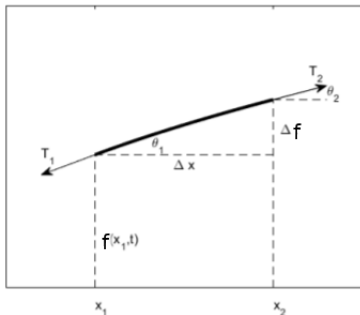
$$f = F(\xi) + G(\eta) = F(x - vt) + G(x + vt)$$

• تمرین: درباره روش های دیگر پیدا کردن این جواب تحقیق کنید.

• تمرین: نشان دهید که هر تابع به شکل کلی $F(x - vt)$ و یا $G(x + vt)$ در معادله موج یک بعدی

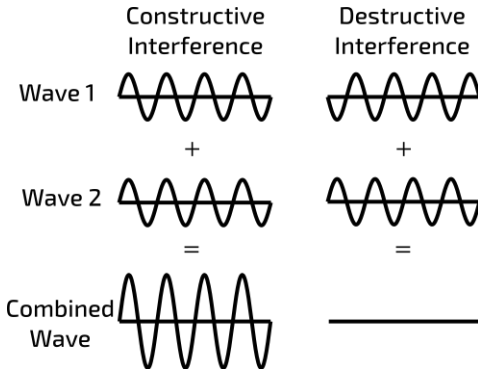
$$\frac{\partial^2 f(t, x)}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 f(t, x)}{\partial x^2}$$

صدق می کند.



برهم نهی امواج

دو موج با فرکانس مشابه را در نظر بگیرید. اگر این دو موج در نقطه برخورد هم علامت باشند، نتیجه موجی با دامنه تقویت شده خواهد بود. به این حالت تداخل سازنده می‌گویند. اگر دو موج علامت مخالف داشته باشند، نتیجه موجی با دامنه کوچکتر خواهد بود. این وضعیت را نیز تداخل ویرانگر می‌گویند.



موج الکترومغناطیسی

فرض کنید که بار و یا مجموعه ای از بارها در نقطه ای از فضا در حال حرکت هستند. قوانین الکترومغناطیس ماکسول به ما می گویند که در ناحیه V در نزدیکی این مجموعه بار، ما میدان های الکتریکی و مغناطیسی خواهیم داشت. دقت کنید که در حجم V باری وجود ندارد؛ بنابراین معادلات ماکسول بدون منبع به صورت زیر نوشته خواهند شد:

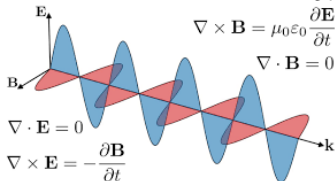
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

برای پیدا کردن معادله موج میدان الکتریکی، کرل معادله سوم را محاسبه کرده و سپس با استفاده از اتحاد مربوط به کرل کرل یک بردار، یعنی $\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) - \vec{\nabla}^2 \vec{A} = \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A})$ ، و معادله چهارم ماکسول معادله موج را به دست می آوریم:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \vec{\nabla} \times \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right) \Rightarrow \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \vec{\nabla}^2 \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{\nabla} \times \vec{B} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

و یا $\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$. به همین ترتیب می توان

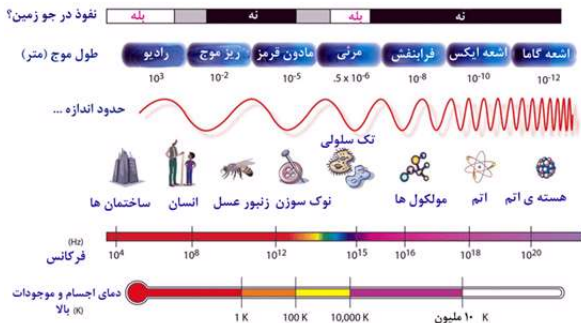
معادله موج $\vec{\nabla}^2 \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$ را نیز برای میدان مغناطیسی منتشر شده در فضا یافت.



سرعت انتشار موج الکترومغناطیسی همان سرعت نور است!

از مقایسه با معادله موج $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = v^2 \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}$ می توان به سادگی دید که مقدار $v = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ باید سرعت این موج باشد. ولی با جایگذاری مقادیر ثابت μ_0 و ϵ_0 می توان به راحتی دید که $v \approx 3 \times 10^8$ m/s و بسیار نزدیک به مقدار سرعت نور $c = 299792458$ m/s است. در اینجا حدس ماکسول این بود که نور باید همان موج الکترومغناطیسی باشد. در واقع، بعدها معلوم شد که نور مرئی فقط بخش کوچکی از طیف الکترومغناطیسی است. شکل زیر را ببینید.

طیف الکترومغناطیسی



انواع مختلف سرعت نور!

کمیت c یا همان سرعت نور در جاهای مختلفی از فیزیک خود را نشان می دهد. با وجودی که ما این کمیت را سرعت نور می نامیم، ولی این معادله در جاهایی از فیزیک که هیچ ارتباطی با اپتیک و الکترومغناطیس ندارد نیز ظاهر می شود (مانند معادله امواج گرانشی، تبدیلات لورنتس، متریک توصیف کننده هندسه فضا، حداکثر سرعت انتشار اثرات علی و ...). یعنی کاملاً ممکن است که دنیایی بدون الکترومغناطیس را تصور کرد که باز هم کمیت c در توصیف معادلات آن حضور خواهد داشت. مقاله ایس در این زمینه را از آرکایو ببینید.


Cornell University

We gratefully acknowledge support from the Simons Foundation, [member institutions](#), and all contributors.
 [Donate](#)


astro-ph > arXiv:astro-ph/0703751

Search...
 All fields

[Help](#) / [Advanced Search](#)

Astrophysics

[Submitted on 29 Mar 2007]

Note on Varying Speed of Light Cosmologies

George F R Ellis (Mathematics Department and Applied Mathematics, University of Cape Town, South Africa)

The various requirements on a consistent varying speed of light ("VSL") theory are surveyed, giving a short check-list of issues that should be satisfactorily handled by such theories.

Comments: 6 pages; to appear in the GRG Journal
 Subjects: **Astrophysics (astro-ph)**
 Cite as: arXiv:astro-ph/0703751
 (or arXiv:astro-ph/0703751v1 for this version)
<https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/0703751> 
 Journal reference: Gen.Rel.Grav.39:511-520,2007
 Related DOI: <https://doi.org/10.1007/s10714-007-0396-4> 

Submission history

From: George F. R. Ellis [[view email](#)]
 [v1] Thu, 29 Mar 2007 08:26:50 UTC (10 KB)

Access Policies

- View PDF
- TeX Source
- Other Formats

[View Source](#)

Current browse context: **astro-ph**

[prev](#) | [next](#)
[new](#) | [recent](#) | [2007](#)

References & Citations

- INSPIRE HEP
- NASA ADS
- Google Scholar
- Semantic Scholar

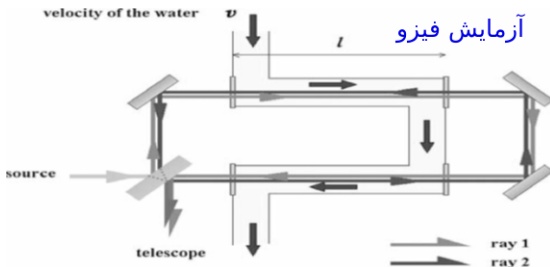
[Export BibTeX & Co.](#)

[Bookmark](#)



سرعت انتشار موج الکترومغناطیسی به چه عواملی بستگی دارد؟

- سرعت انتشار موج الکترومغناطیسی (EM) به محیط انتشار موج بستگی دارد.
- سرعت چشمه مولد موج EM تاثیری بر سرعت انتشار موج ندارد. البته سرعت چشمه بر طول موج و فرکانس نور تاثیر می گذارد (اثر داپلر)، ولی سرعت انتشار را عوض نمی کند.
- اگر محیطی که موج در آن منتشر می شود حرکت کند، آنگاه سرعت انتشار با سرعت محیط جمع خواهد شد (یا کم خواهد شد، بسته به جهت حرکت).
- سرعت انتشار نور c است. ولی می توانیم از خود پرسیم که این سرعت در کدام دستگاه مرجع اندازه گیری شده است؟ همچنین محیط انتشار نور چیست؟ اینها سوالات مهم در ذهن دانشمندان هم عصر اینشتین بودند.



اتر

در فلسفه باستان اِتر (اثير، گوهر پنجم ether, aether, fifth element, quintessence) عنصری بود به جز عناصر چهارگانه (آب، هوا، خاک و آتش)، که فضای خالی بین کرات آسمانی را پر می کرد. از لحاظ تاریخی، احتمالاً ارسطو اولین کسی بوده است که عدم امکان خلاء را تئوریزه کرده است (طبیعت از خلأ بیزار است!) و آن را به صورت یک اصل معرفی کرده است. بعدها، وقتی متفکرین با امکان فضای خالی مواجه می شدند، غالباً آن را با اتر پر می کردند.

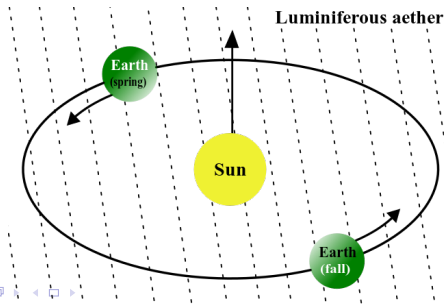
Schema huius praeiixae diuisionis Sphaerarum .



اثر

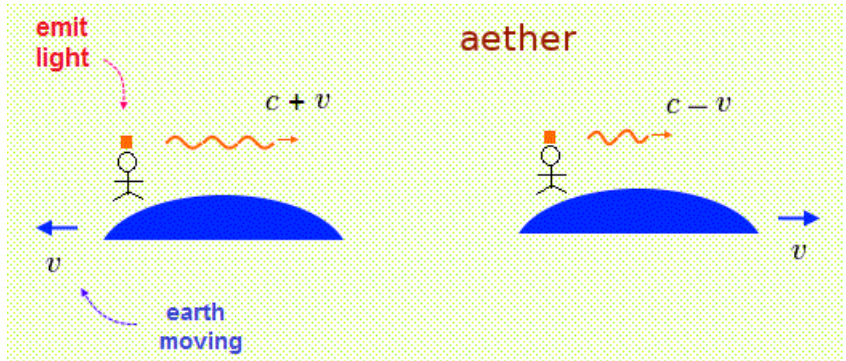
از اواخر قرن شانزدهم میلادی، دانشمندان تلاش کردند برخی از پدیده های فیزیکی (مانند گرانش، نور، ابیراهی و ...) را به کمک اثر توضیح دهند. به ویژه، اکثر دانشمندان اعتقاد داشتند که همه امواج (و از جمله امواج الکترومغناطیسی) برای انتشار خود نیاز به محیط دارند. این تلاش ها، منجر به نتایج بعضا متناقضی شده بود. مثلا اثر باید آنقدر سبک (و بدون اصطکاک) می بود که سیارات به راحتی از درون آن حرکت کنند و همزمان آنقدر سختی بالایی می داشت که سرعت بسیار بالای انتشار نور را توضیح دهد!

فرضیه اثر حامل نور (Luminiferous aether) مدل حاکم بر اپتیک پیش از اینشتین بود.



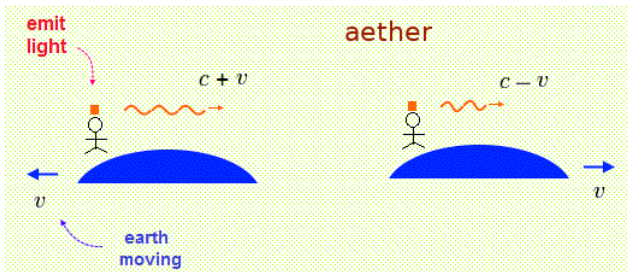
اتر و اصل نسبیت

- اگر اتر حامل نور باشد، آنگاه سرعت نور در اتر را می توان c در نظر گرفت. در این صورت، بنا به تبدیل گالیه ای سرعت ها، ناظری که با سرعت v نسبت به چارچوب اتر در حال حرکت است باید سرعتی بین $c - v$ تا $c + v$ را برای انتشار نور مشاهده کند. این ایده بسیار ساده اساس بسیاری از آزمایشات برای یافتن اتر بود.



اثر و اصل نسبیت

بنابراین، سرعت نور تحت تبدیلات گالیه ناوردا (تغییرناپذیر) نیست. یعنی اگر تبدیلات گالیه را بر پدیده های نوری و الکترومغناطیسی اعمال کنیم، آنگاه فقط و فقط یک دستگاه (دستگاه متصل به اتر) وجود دارد که در آن سرعت نور دقیقا برابر $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ می باشد. یعنی به کمک آزمایشات اپتیکی و یا الکترومغناطیسی باید بتوان یک چارچوب مطلق فیزیکی (چارچوب اتر) را یافت. این البته با ایده اصل نسبیت (عدم وجود چارچوب مطلق) در تضاد است.



تبدیلات گالیه و قوانین الکترومغناطیس

شیوه دیگر برای فهم مشکل چنین است: معادله موج الکترومغناطیسی شامل ثابت $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ است. از طرف دیگر، بنا به تبدیلات گالیه این سرعت در چارچوب های لخت مختلف متفاوت است. بنابراین، اثرهای الکترومغناطیسی در چارچوب های لخت متفاوت خواهند بود. به عبارت دیگر، شکل معادلات ماکسول در اثر تبدیلات گالیه ناوردا (بدون تغییر) باقی نخواهد ماند. در واقع، حتی شکل معادله موج هم تحت تبدیلات گالیه ($x' = x - vt$, $t' = t$) تغییر خواهد کرد. این را برای معادله موج یک بعدی نشان خواهیم داد.

تابع $f = f(t', x')$ را در نظر بگیرید. در جلسه قبل دیدیم که در حالت کلی می توان تبدیل های عملگری زیر را بر اساس تبدیلات گالیه به دست آورد:

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x'}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t'} - v \frac{\partial}{\partial x'}$$

در نتیجه معادله موج به صورت زیر تبدیل می شود:

$$\frac{\partial^2 f(t, x)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 f(t, x)}{\partial x^2} \Rightarrow \left(\frac{\partial}{\partial t'} - v \frac{\partial}{\partial x'} \right) \left(\frac{\partial}{\partial t'} - v \frac{\partial}{\partial x'} \right) f = c^2 \left(\frac{\partial}{\partial x'} \right) \left(\frac{\partial}{\partial x'} \right) f$$

$$\frac{\partial^2 f(t', x')}{\partial t'^2} + v^2 \frac{\partial^2 f(t', x')}{\partial x'^2} - 2v \frac{\partial^2 f(t', x')}{\partial x' \partial t'} = c^2 \frac{\partial^2 f(t', x')}{\partial x'^2}$$

که به وضوح با شکل ابتدایی معادله موج متفاوت است.

تبدیلات گالیه و قوانین الکترومغناطیس: انتخاب های ممکن

- اگر فرض کنیم که تبدیلات گالیه درست هستند، آنگاه مجبوریم بپذیریم معادلات ماکسول فقط در یک دستگاه مرجع خاص (دستگاه مرجع مطلق متصل به اتر) درست هستند و در دستگاه های دیگر شکل آنها متفاوت است. یعنی اصل نسبیت گالیه درباره قوانین نیوتن صدق می کند ولی برای قوانین ماکسول درست نیست. در نتیجه باید یکی از موارد زیر درست باشد:
- ❶ اصل نسبیت درباره مکانیک درست و درباره الکترومغناطیس نادرست است. در نتیجه باید بتوان با آزمایشات الکترومغناطیسی و اپتیکی، اثر چارچوب اتر را به صورت تجربی یافت.
- ❷ یک اصل نسبیت ممکن است موجود باشد که تحت آن قوانین مکانیک و الکترومغناطیس هر دو درستند؛ ولی قوانین فعلی الکترومغناطیس ماکسول درست نیستند و باید قوانین درست EM را یافت. البته انحراف از قوانین ماکسول باید به صورت تجربی در آزمایشگاه ها تایید شود.
- ❸ یک اصل نسبیت ممکن است موجود باشد که تحت آن قوانین مکانیک و الکترومغناطیس هر دو صادق اند؛ ولی قوانین مکانیک نیوتن درست نیستند و باید قوانین درست مکانیکی را یافت. در این صورت، انحراف از قوانین مکانیک نیوتنی باید به صورت تجربی در آزمایشگاه ها تایید شود.

کدام نیاز به بازبینی دارد؟!

- کدام مورد از موارد زیر غلط و کدامین درست است؟ کدام نیاز به تصحیح دارد؟ اینشتین پاسخ درست را در اختیار ما قرار می دهد.

مکانیک نیوتنی

اصل نسبیت
تحت تبدیلات گالیه

الکترومغناطیس
ماکسول

نکات مهم این درس

انتظار این است که در انتهای این درس شما بتوانید مفاهیم مربوط به معادلات ماکسول، امواج الکترومغناطیسی و ناوردایی این دو تحت تبدیلات گالیه 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. عناوین مقالات سال ۱۹۰۵ اینشتین را در نت جستجو کرده و درباره اهمیت آنها تحقیق کنید. کدام مقاله اینشتین در این سال سرانجام جایزه نوبل را برای او به ارمغان آورد.
 ۲. معادلات ماکسول را به شکل دیفرانسیلی و انتگرالی نوشته و معنای هر کدام را توضیح دهید.
 ۳. تحقیق کنید که معادله موج در یک طناب چطور به دست می آید.
 ۴. منظور از تداخل امواج چیست؟ منظور از پراش موج چیست؟
 ۵. درباره آزمایش فیزو تحقیق کنید.
 ۶. درباره آزمایش مایکسلون-مورلی تحقیق کنید.
 ۷. تحقیق کنید که دیدگاه فیلسوفان درباره اتر در اعصار مختلف چگونه بوده است.
 ۸. درباره تئوری یوهان برنولی درباره اتر تحقیق کنید. درباره نظریه جیکوب برنولی درباره اتر تحقیق کنید.
 ۹. درباره آزمایشات فیزیکی برای آشکارسازی اثر اتر تحقیق کنید.
 ۱۰. آیا معادلات دیگری (به جز الکترومغناطیس) می شناسید که تحت تبدیلات گالیه ناوردا نباشند؟
 ۱۱. آیا یک ذره می تواند در محیطی با سرعتی بزرگتر از سرعت نور حرکت کند؟
- 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 ۴ آبان ماه

- اگر تک قطبی مغناطیسی را کشف کنیم، آنگاه معادلات ماکسول باید به چه صورتی بازنویسی شوند؟
- معادله موج یک بعدی را $\frac{\partial^2 f(t, x)}{\partial x^2} = v^2 \frac{\partial^2 f(t, x)}{\partial t^2}$ را در نظر بگیرید. اثبات کنید که با استفاده از تغییر متغیر $\xi = x - vt$ و $\eta = x + vt$ می توان معادله موج را به صورت $\frac{\partial^2 f(\xi, \eta)}{\partial \xi \partial \eta} = 0$ نوشت.
- معادله موج حاکم بر انتشار میدان مغناطیسی، یعنی $\vec{\nabla}^2 \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$ را با استفاده از معادلات ماکسول در فضای تهی بیابید.
- نشان دهید که جواب کلی معادله موج $\vec{\nabla}^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}$ به صورت $f = f_0(\hat{k} \cdot \vec{x} - vt)$ می باشد که در آن $\hat{k}$ بردار یکه در جهت انتشار موج است.
- با استفاده از مقادیر μ_0 و ϵ_0 مقدار سرعت نور را از فرمول $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ یافته و آن را با مقدار پذیرفته شده، یعنی $c = 299792458$ ، مقایسه کنید.

تمرین ها: زمان تحویل ۴ آبان ماه

- ناظری با سرعت ثابت $\vec{v}$ در جهتی دلخواه در حال حرکت است. در این حالت می توان تبدیلات گالیه را به صورت زیر نوشت:

$$\begin{cases} t' = t \\ \vec{x}' = \vec{x} - \vec{v}t \end{cases}$$

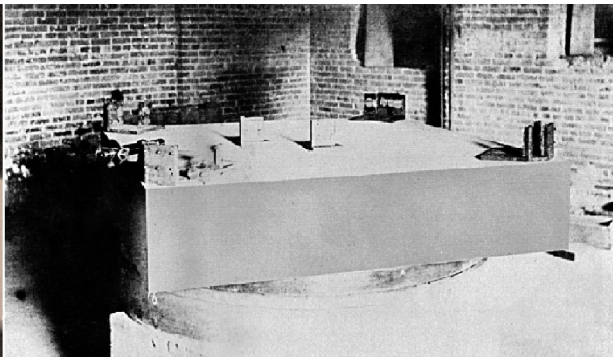
نشان دهید که برای این تبدیلات، عملگرهای مشتق به صورت زیر تبدیل می شوند:

$$\begin{cases} \vec{\nabla} = \vec{\nabla}' \\ \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x'} - \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \end{cases}$$

حال نشان دهید که معادلات ماکسول تحت تبدیلات گالیه چطور تغییر می کنند.

مبحث بعدی: آزمایش مایکلسون-مورلی

در قرن نوزدهم، بسیاری از فیزیکدانان تجربی تلاش کردند که اثر حرکت زمین در اتر را کشف کنند. مشهورترین تلاش در این جهت آزمایش مایکلسون-مورلی بود که در جلسه بعد آن را به تفصیل بررسی خواهیم کرد. برخی دیگر از دانشمندان نیز تلاش کردند الکترودینامیک را اصلاح کنند. نکته جالب اینجاست که در آن زمان کمتر کسی تصور می کرد که مکانیک نیوتنی نیازمند اصلاح باشد.



مراجع

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

با سپاس از توجه شما