

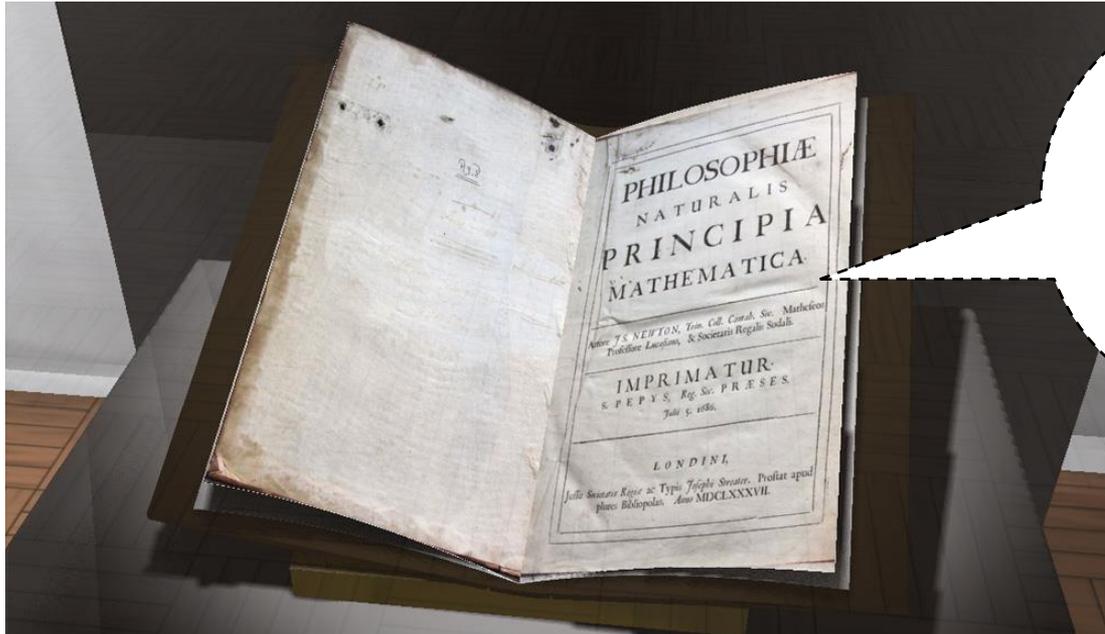
Origens eletromagnéticas da relatividade

André Noronha

andrefisica@usp.br

noronha@ifsp.edu.br

- ❑ Resumindo bastante, pode-se dizer que até o início do século XX, o paradigma newtoniano sobre o Espaço e Tempo Absolutos vigorava – ainda que com críticas, científicas e filosóficas, de diversos autores. Vamos contar aqui uma “história” breve de como esse paradigma foi abalado no fim do século XIX por desenvolvimentos no eletromagnetismo;



Espaço e Tempo são absolutos – isto é, o tamanho espacial e a duração de objetos (incluindo pessoas) são absolutos, não dependem do referencial

- ❑ Essa é a imagem que simboliza então o desfecho da Terceira Guerra Franco-Prussiana. A França é derrotada e tem seu orgulho nacional ferido. Na famosa École Polytechnique, nasce então onda neoprogressista e neoluminista visando recuperar a glória francesa. Já o Império Prussiano saiu vencedor, montado no militarismo político - há a unificação territorial e também reformas culturais.



$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

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

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{v}) - \nabla V$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \rho \nabla V - m \nabla \Psi$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{H} + \mathbf{M}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$$

$$\mathbf{j} = k \mathbf{E}$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{M} = m$$

$$\mathbf{H} = -\nabla \Psi$$



Equações acima estão com notação atual – Maxwell não utilizou vetores para exprimir suas equações

- ❑ Em 1873 já tínhamos o conjunto de equações que mais tarde chamaríamos de Equações de Maxwell – se levarmos em conta as equações com o potencial vetor \mathbf{A} e o potencial eletrostático V , elas são dezenas!
- ❑ Um desdobramento central das equações de Maxwell é a dedução da equação de onda para os campos elétrico e magnético (no vácuo):

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2}$$

sendo que a velocidade de propagação destas ondas seria dada por:

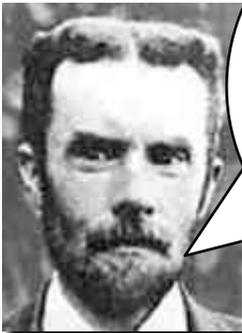
$$c \equiv \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

- ❑ Mais tarde, os maxwellianos unificaram a óptica ao eletromagnetismo. Mas “a” grande pergunta era: em relação a o quê se mede esta velocidade? A resposta era “óbvia” para a física da época: com relação ao **éter eletromagnético(-óptico)**;



A teoria de Maxwell é o sistema de equações de Maxwell

- ❑ Em 1887, Hertz, aluno de Helmholtz, realizou um famoso experimento em que detectou ondas eletromagnéticas. Isso foi entendido na época como uma corroboração das equações de Maxwell e como uma **comprovação empírica** da existência do éter eletromagnético-óptico;
- ❑ Com a criação da análise vetorial (fim do século XIX), outras pessoas reescreveram as equações do eletromagnetismo, muitas vezes sem esconder suas idiossincrasias matemáticas e filosóficas. Hertz, foi uma destas pessoas - “limpou” as equações originais de Maxwell tirando os potenciais \mathbf{A} e ψ – com o argumento de que eram meros artifícios matemáticos, e não entidades fundamentais;
- ❑ Porém, antes de Hertz, em 1884, **Oliver Heaviside** também reescreveu as equações do eletromagnetismo utilizando vetores e dispensando os potenciais:



Há uma forma nova de escrever as equações de Maxwell (...) abolindo de uma vez \mathbf{A} e V , trabalhando desde o início com \mathbf{E} e \mathbf{B}

$$\nabla \cdot \epsilon \mathbf{E} = \rho$$

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

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

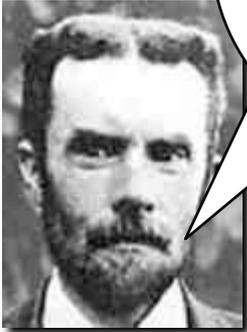
$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{J} + \mu \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

- ❑ Abandonando os potenciais, Heaviside pode tratar o problema de propagação de sinais em fios espessos de forma mais adequada. Reescreveu o que chamamos hoje de **equação diferencial do telégrafo** adicionando termos relacionados à indutância e condutância de vazamento:

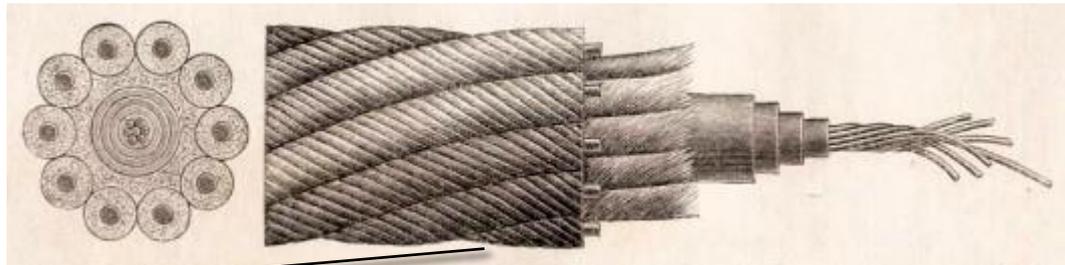
$$\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + A \frac{\partial V}{\partial t} + B V = C^2 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2}$$

- ❑ Foi sugestão de Heaviside de aumentar a indutância de fios para melhorar a propagação de ondas eletromagnéticas em situações de longas distâncias. Isso contribuiu para a proliferação de cabos telegráficos transatlânticos (submarinos).

Há de fato alguma esperança para a telegrafia pelo mar Atlântico? Sem exagerar, acho que podemos esperar grandes avanços no futuro



Pela imagem de um cabo telegráfico ao lado, note que aumentar a indutância envolve aumentar o custo na sua produção – um dos principais contra-argumento a Heaviside





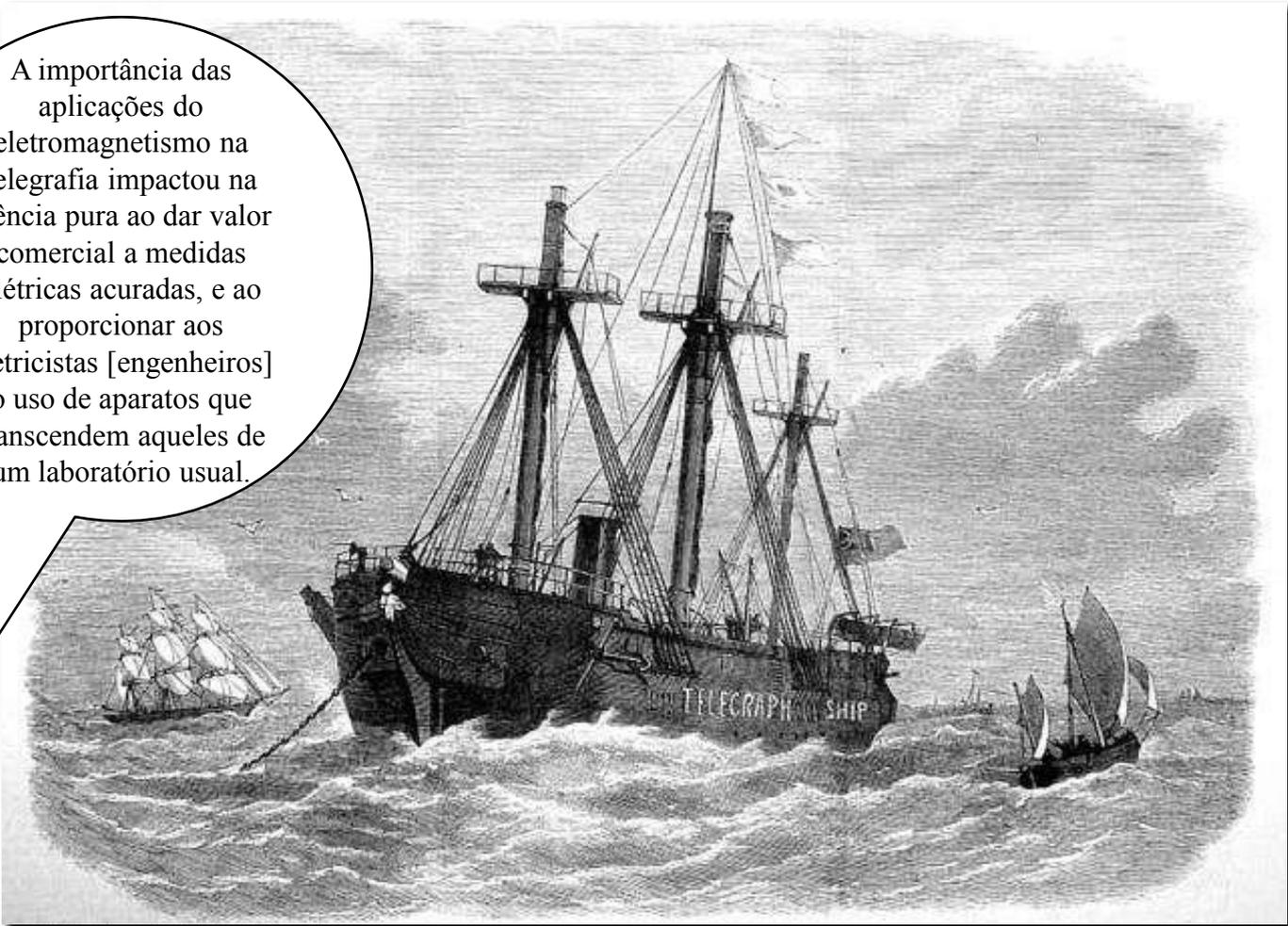
THE EIGHTH WONDER OF THE WORLD.
THE ATLANTIC CABLE.

Harris Constant, July 27th 1866.
I hope that it will prove a blessing to England, and the United States,
and increase the intercourse between our Country & the Eastern Hemisphere.
Yours faithfully
Cyrus W. Field.

PRINTED BY VAN NELLE & FORTWELDER, 34 NASSAU ST. N.Y.

Washington, July 29th 1866.
To Cyrus W. Field, Hearts Content.
May the Cable under the sea tend to promote harmony between the Republic
of the West and the Governments of the Eastern Hemisphere.
Andrew Johnson.

A importância das aplicações do eletromagnetismo na telegrafia impactou na ciência pura ao dar valor comercial a medidas elétricas acuradas, e ao proporcionar aos eletricitas [engenheiros] o uso de aparatos que transcendem aqueles de um laboratório usual.

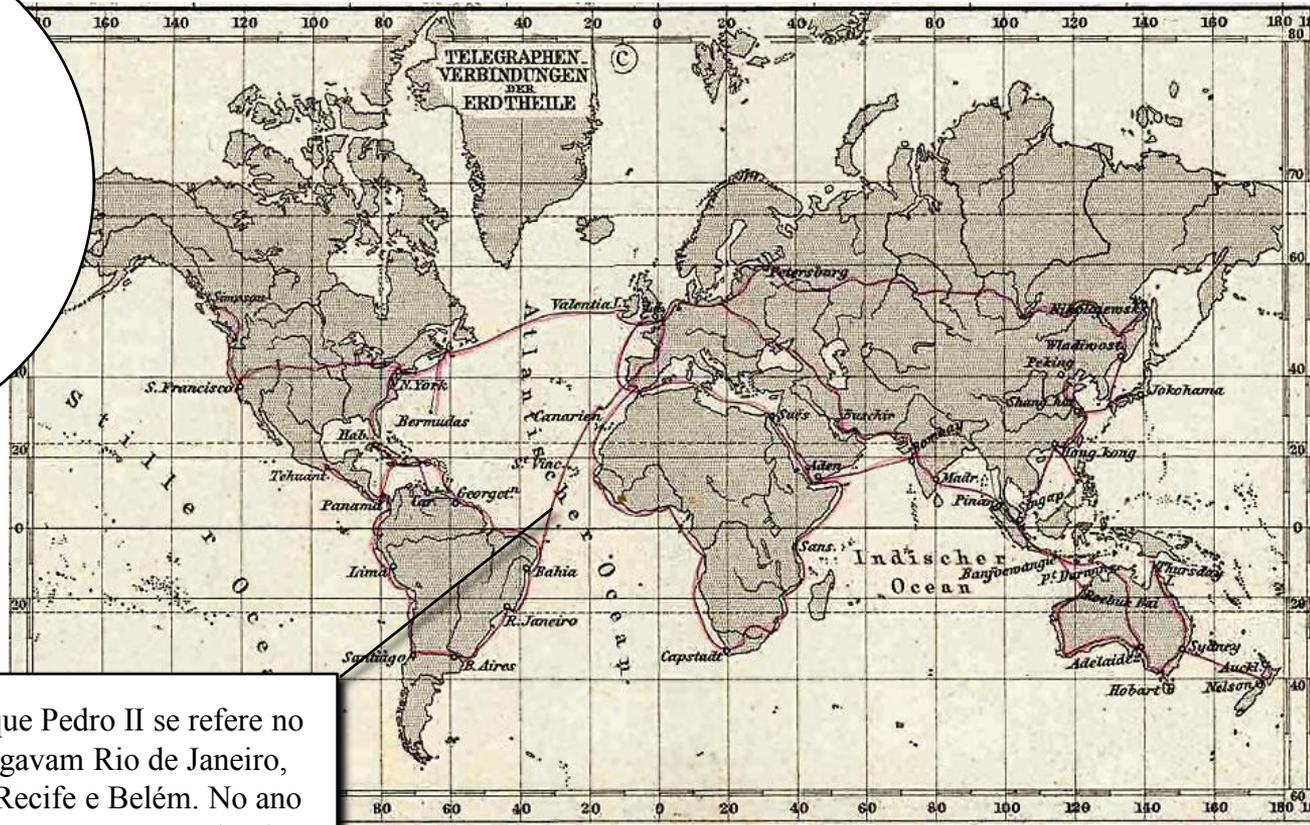


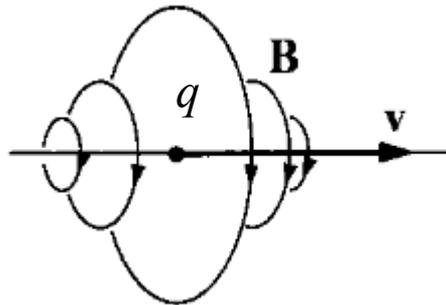
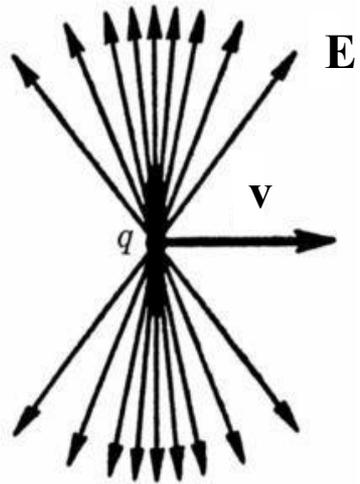
Já se acha o cabo
submarino no território
da capital do Brasil. (...)
O Imperador saúda, pois,
a Bahia, Pernambuco e
Pará por tão fausto
acontecimento, na
qualidade de seu
primeiro compatriota e
sincero amigo. Até aos
bons anos de 1874.



Dom Pedro II

Os cabos que Pedro II se refere no
excerto ligavam Rio de Janeiro,
Salvador, Recife e Belém. No ano
seguinte, inaugurou-se o primeiro
cabo Brasil-Europa, com Portugal





- ❑ Lidando com o problema da propagação de sinais em cabos telegráficos, Heaviside certamente se deparou com a questão da forma geométrica dos campos magnéticos e elétricos de cargas em movimento;
- ❑ Em um trabalho de 1888, Heaviside mostrou que as expressões do campo elétrico e do campo magnético de uma carga q com velocidade v são (notação atual):

$$\mathbf{E}(r, v) = \frac{1}{\gamma^2} \frac{kq}{r^2} \left(1 - \sin^2(\theta) v^2/c^2\right)^{-3/2} \hat{r}$$

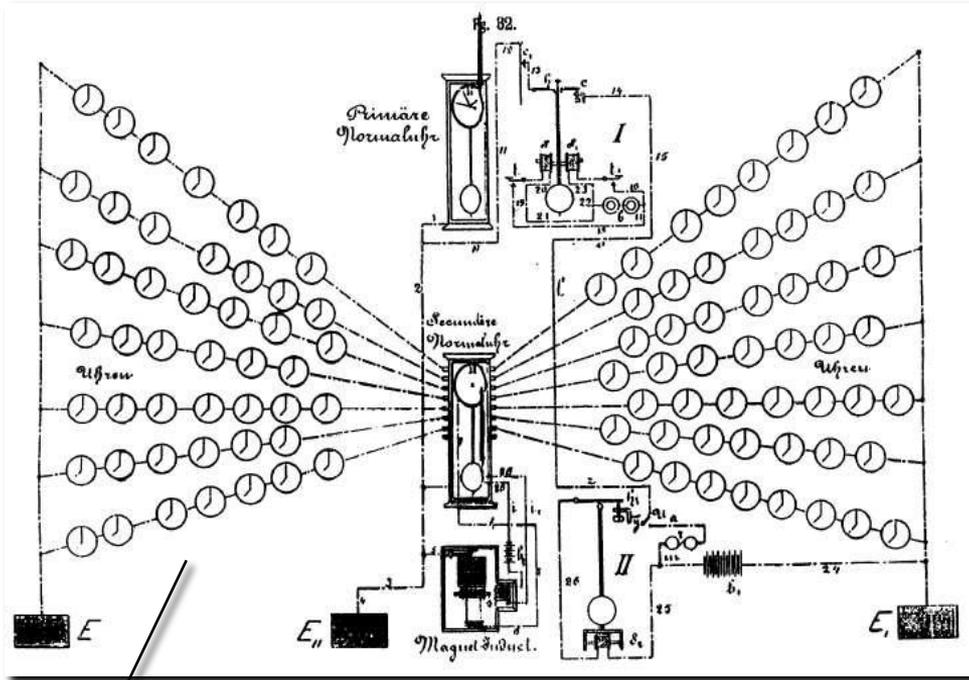
$$\mathbf{B}(r, v) = \frac{1}{\gamma^2} \frac{vq}{cr^2} \left(1 - \sin^2(\theta) v^2/c^2\right)^{-3/2} \hat{\phi}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

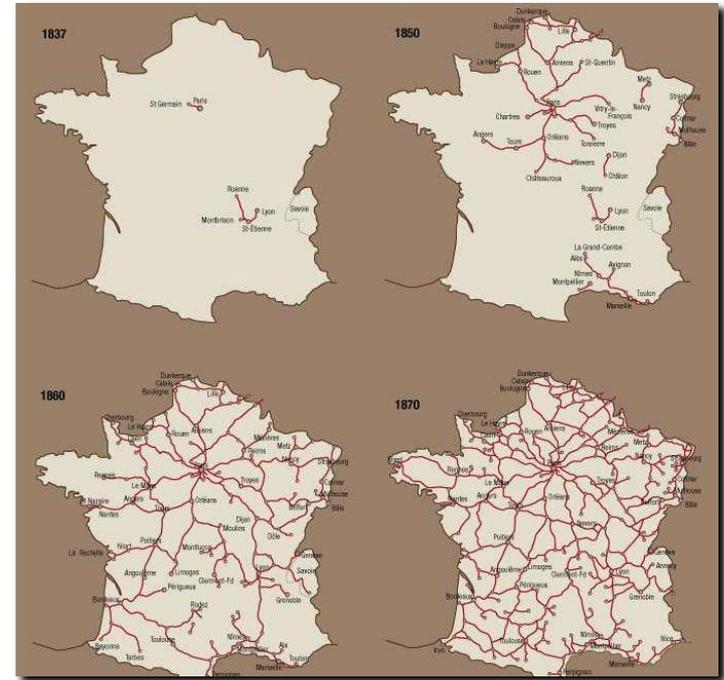
sendo c a velocidade da luz.

- ❑ A velocidade v em relação a o quê? Com relação ao éter eletromagnético-óptico. Antes de continuarmos nessa discussão, olhemos para outra questão associada aos cabos telegráficos;

- ❑ Cabos telegráficos já eram utilizados em cidades para sincronização de relógios urbanos, e, em alguns casos, um país inteiro;



Sistema tipo “relógio-central” de Viena, em 1890



- ❑ A expansão regional de cabos telegráficos acompanhou a expansão ferroviária pós revolução industrial, que exigia estações sincronizadas;

No norte da Germânia, incluindo Saxônia, reconhecemos o tempo de Berlim; na Bavária, reconhecemos o tempo de Munique; em Vurtembergga, reconhecemos o tempo de Stuttgart; em Baden, vemos o de Carlsruhe, e em Renânia Palatinado reconhecemos o tempo de Ludwigshafen.

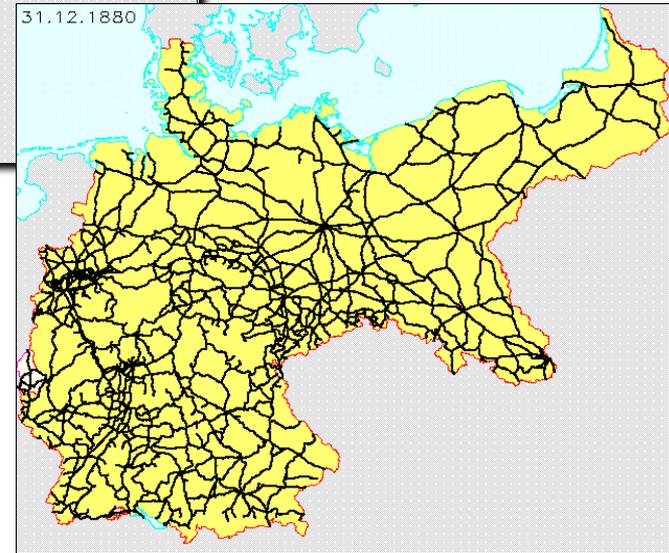


Helmuth von Moltke

Meine Herren, unidade do tempo apenas aos trilhos de trem não afastará todas as desvantagens que citei a pouco; isto só será possível quando alcançarmos a unidade do tempo em toda a Germânia, isto é, quando todos os tempos locais forem varridos.

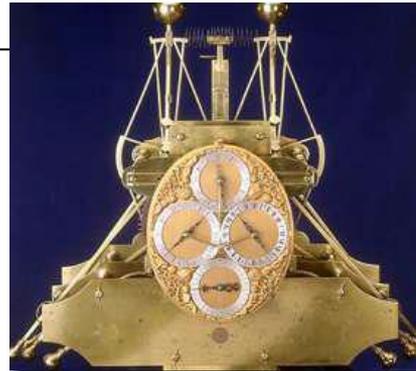
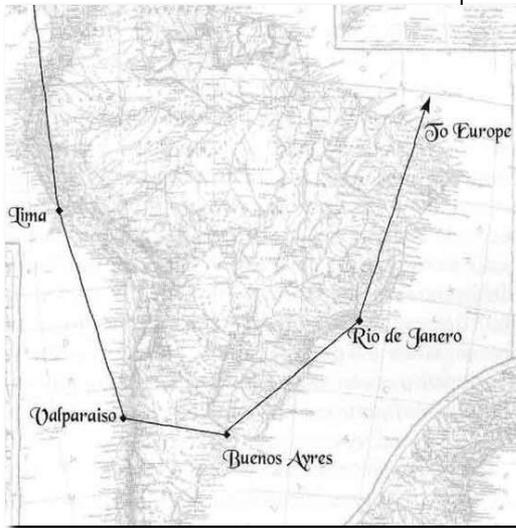


O império prussiano tinha, por volta de 1840, algumas poucas centenas de quilômetros de ferrovias – em 1880, esse número era quase 50 mil quilômetros.



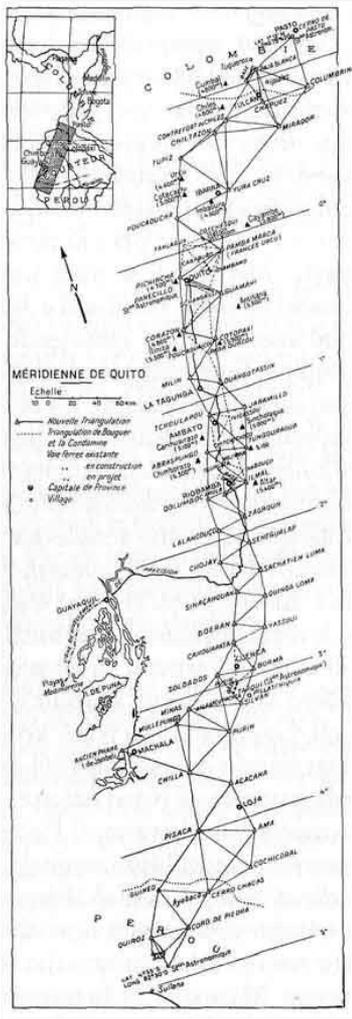


- ❑ Na França, **Henry Poincaré** trabalhava com estes e outros problemas associado aos cabos telegráficos. Um deles estava associado a cartografia. Na década de 1880 Poincaré trabalhava no Departamento de Longitudes de Paris, e acompanhou uma equipe de cartógrafos numa expedição à América do Sul;
- ❑ Poincaré teria se deparado com o problema da Longitude, central para a marinha e cartografia: como determinar com precisão a longitude de um ponto na Terra? Uma antiga solução era utilizar dois relógios gêmeos – ambos eram sincronizados com o horário do “centro”, e então um deles acompanhava os barcos que poderiam assim determinar a longitude em alto mar;

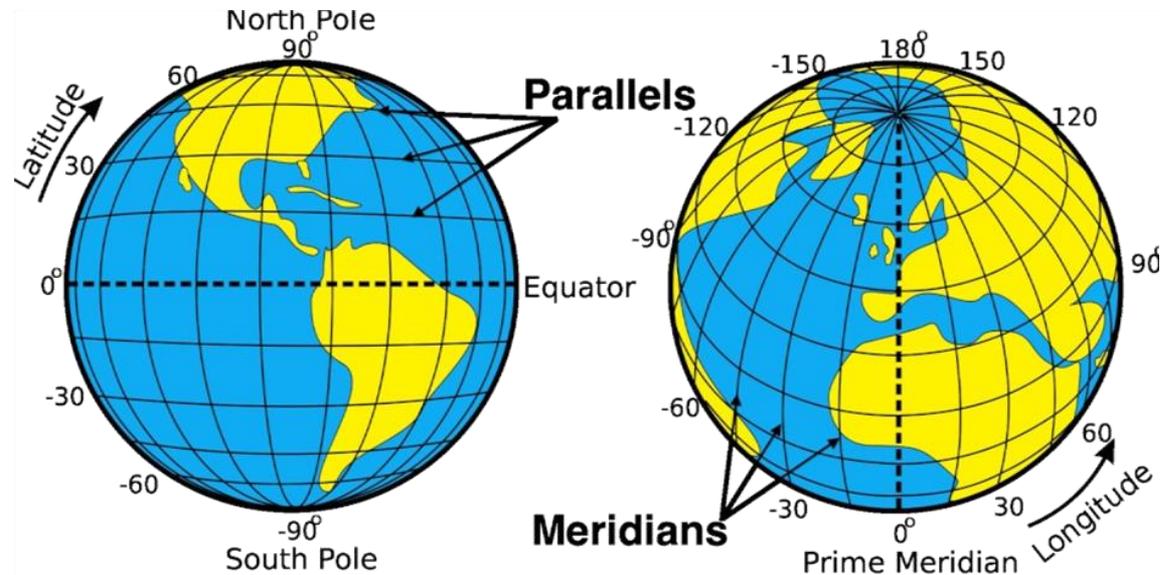




Mapa de Pieter van Keere, século XVII



- ❑ Porém, como era sabido, pequenos atrasos nestes relógios acarretam em erros da ordem de dezenas de quilômetros, o que poderia ser fatal em expedições marítimas;
- ❑ A proposta do grupo de Poincaré era utilizar cabos telegráficos ao invés de relógios sincronizados (o orgulho científico da França estava ferido, pois haviam acabado de perder a “corrida do meridiano” para Greenwich, Inglaterra);





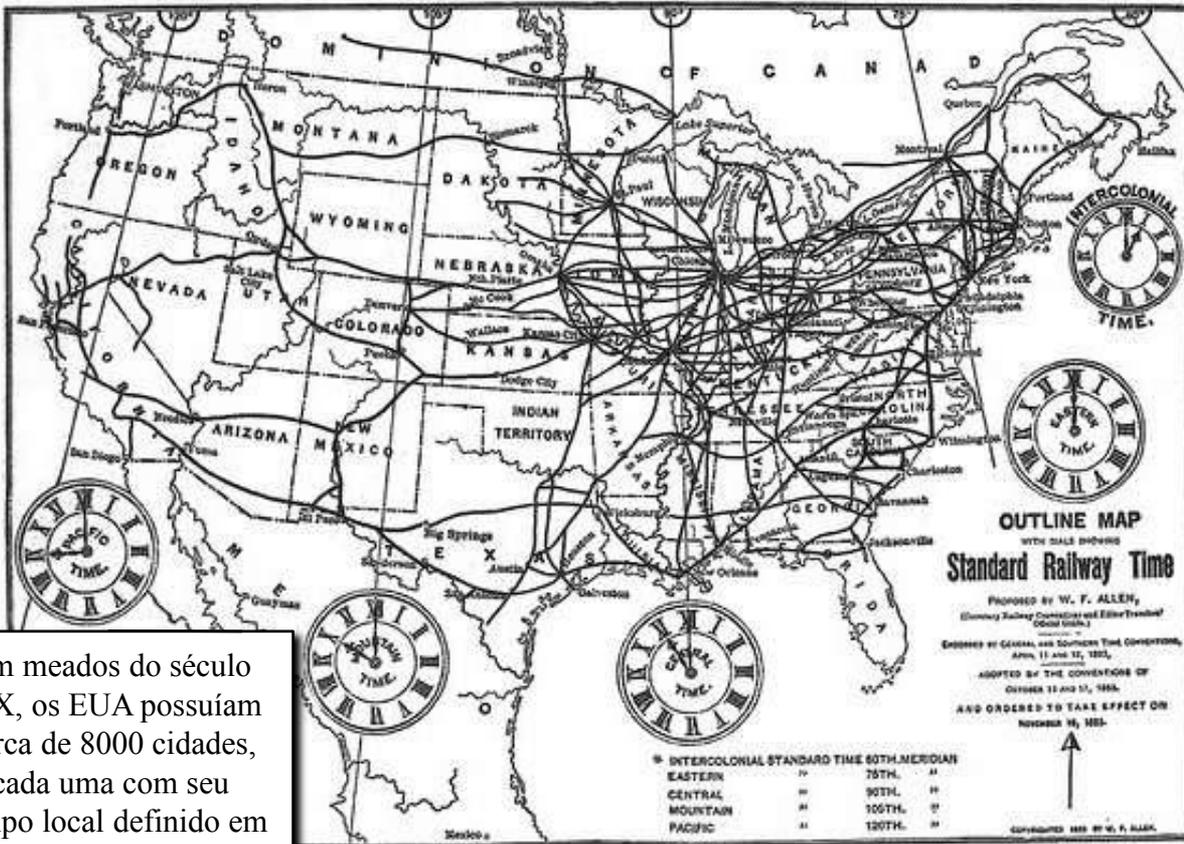
Smalley & Lewis, 201 & 217, rue St. Louis, Québec



1014700 80.
80-80102-1710

THE ALLEN PLAN MAP

- 1—Through railroad lines in existence in 1883.
- 2—Standard of time governing in each zone.
- 3—Points where the time passed from one hour zone to another.



INTERCOLONIAL STANDARD TIME 60TH MERIDIAN

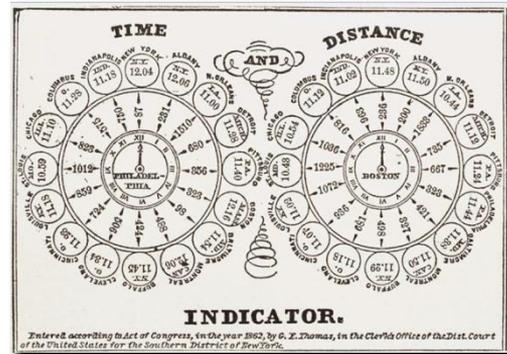
EASTERN	75TH	90TH
CENTRAL	90TH	105TH
MOUNTAIN	105TH	120TH
PACIFIC	120TH	

OUTLINE MAP Standard Railway Time

PROPOSED BY W. F. ALLEN,
Eminent Railway Commissioner and Editor
PUBLISHED BY GENERAL AND SOUTHERN TIME CONVENTION,
APRIL 11 AND 12, 1883,
ADOPTED BY THE CONVENTION OF
OCTOBER 12 AND 13, 1883,
AND ORDERED TO TAKE EFFECT ON
NOVEMBER 16, 1883.

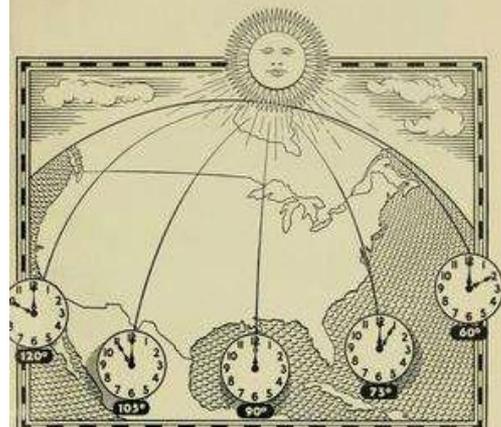
COPYRIGHTED 1883 BY W. F. ALLEN.

Time zones are caused by using cities as a basis for dividing lines, an entirely new idea developed in the Allen plan, instead of

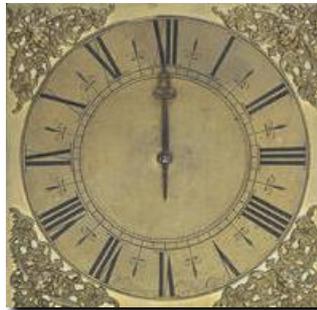


Entered according to Act of Congress, in the year 1882, by G. T. Thomas, in the Clerk's Office of the Dist. Court of the United States for the Southern District of New York.

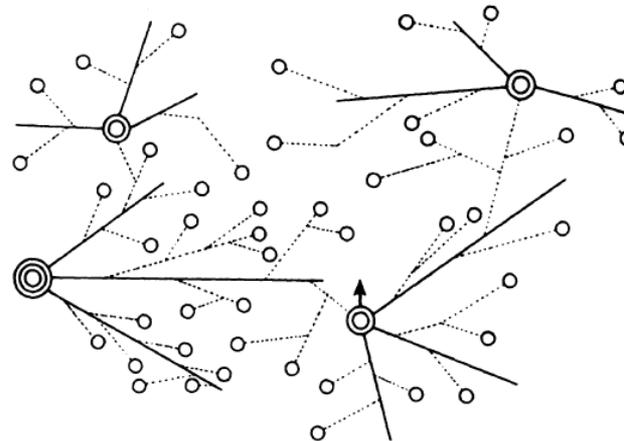
The Day of Two Noons



Em meados do século XIX, os EUA possuíam cerca de 8000 cidades, cada uma com seu tempo local definido em função do Sol à pino



- No início do século XIX era comum os relógios populares não terem ponteiros de minuto. E algum tempo depois, não se tolerava mais atrasos de segundos (isso tem a ver tanto com uma exigência burguesa como uma exigência industrial). No início do século XX, na França, astrônomos e matemáticos franceses fizeram parte do “comitê científico” francês no projeto de sincronização dos relógios de toda Paris. Seria adotado o sistema “relógio-mãe”, ou relógio-mestre. Por motivos de engenharia, a implementação de sincronização pneumática de relógios (dutos subterrâneos) fracassou (ar vazava e logo os relógios da cidade perdiam a sincronização). Alternativa encontrada foi a eletricidade, a “recém” domesticada na sociedade europeia.



Legende.

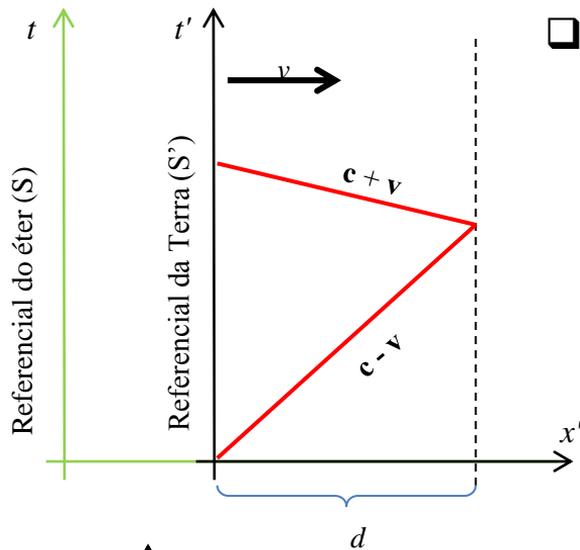
- ⊙ Horloge-mère réglante
- ⊙ Horloge-mère réglée
- ⊙ Horloge-mère réglée et réglante
- Fils principaux de groupe
- - - - Fils secondaires d'embranchement
- Compteurs électro-chronométriques

Fig. 282



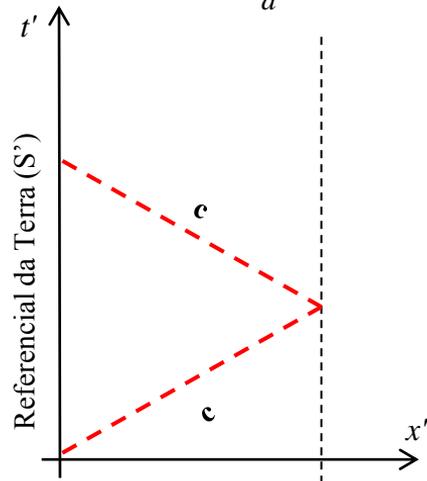
(...) não temos intuição direta da igualdade entre dois intervalos de tempo (...) É difícil separar os problemas qualitativos da simultaneidade do problema quantitativo da mensuração do tempo.

- ❑ Poincaré tinha um pensamento múltiplo: era ao mesmo tempo engenheiro, filósofo, matemático e físico. Isso o fez enxergar no problema da cartografia telegráfica um problema físico (como sincronizar relógios distantes no éter?) e também filosófico (o que é o tempo?);
- ❑ O problema físico, para Poincaré, caía num ciclo tautológico: para sincronizar relógios em pontos distanciados no éter por meio de pulsos telegráficos é preciso saber com precisão a velocidade dos pulsos – para saber com precisão a velocidade dos pulsos é preciso ter relógios sincronizados nos pontos distanciados.
- ❑ O ciclo tautológico acima, Poincaré ponderou, refletia-se em problemas centrais da física da época. Experimentos ópticos feitos ao longo do século XIX, e em especial experimentos interferométricos, mostravam que não se podia medir a velocidade da Terra com relação ao éter. Assim, como não conseguimos sincronizar precisamente relógios com troca de pulsos pelo éter, Poincaré conclui que a simultaneidade de eventos distanciados é fruto de uma convenção. Expressou essa conclusão em uma importante obra de 1898;



- Pouco depois, em 1900, Poincaré mostrou que se tentarmos sincronizar dois relógios distanciados de d que se movem com relação ao éter – isso porque observadores na Terra não vão conseguir medir uma suposta variação da velocidade da luz. Assim, **por convenção**, os observadores irão considerar que a luz leva o mesmo tempo pra ir e voltar – isso acarretará em uma dessincronização inobservável dos relógios quando distanciados, dado, em primeira ordem, por:

$$\delta t \cong \frac{vd}{c^2}$$



- Com isso, Poincaré estabeleceu o que chamou de **Convencionalidade da Simultaneidade** – pois, dados que relógios distanciados não conseguirão se sincronizar pelo processo de troca de pulsos, suas conclusões sobre simultaneidade de eventos dependerão da convenção do tempo de ida e volta desses pulsos;
- Poincaré notou que esse resultado, inevitável em teorias de éter, atacava a ideia de Tempo Absoluto newtoniano – não raro anunciava em seus trabalhos “ventos de mudança”;

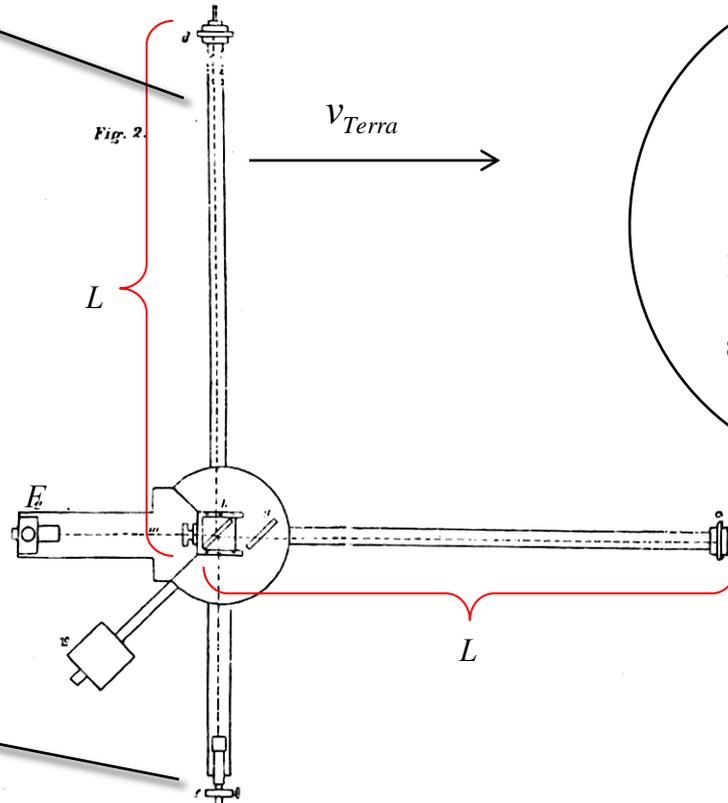


- ❑ Que experimentos ópticos foram estes? Os principais foram os experimentos de François Arago (1810), Henry Fizeau (1850), Eleuthère Mascart (1860) e os experimentos interferométricos de Albert Michelson (1881, 1886, 1887);
- ❑ Nenhum experimento evidenciava a velocidade da Terra com relação ao éter – isso fazia proliferar teorias de éter (luminífero) opostas. Muitas questões estavam abertas: Qual é a natureza física do éter? Ele interage com a matéria? Como? Depois da unificação promovida por Maxwell e os maxwellianos, estas perguntas passaram a orbitar também o eletromagnetismo;
- ❑ Por volta de 1880, existiam três fortes teorias de éter eletromagnético-óptico em disputa: a teoria do éter estacionário (Young); a teoria do éter totalmente arrastado (Stokes), e; a teoria do éter parcialmente arrastado (Fresnel). A preferida dos britânicos era a teoria de Stokes – no continente europeu, por outro lado, a teoria de Fresnel era bem quista;
- ❑ O experimento de Fizeau corroborava a teoria de Fresnel, enquanto os experimentos de Michelson tendiam a corroborar a teoria de Stokes – uma celeuma que perturbava os físicos da época. Uma solução para esse impasse começou a ser desenhada na Holanda;

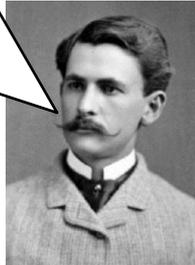
- ❑ O “famoso” experimento de Michelson e Morley de 1887 é muitas vezes citados em livros como “experimento crucial” o surgimento da relatividade por Einstein em 1905 – isso é historicamente falso.

O interferômetro de Michelson utilizado em 1887 tinha formato de “L”, com braços de aproximadamente 11 metros. Era apoiado numa base de mercúrio, de modo a diminuir ruídos. Em F havia a entrada da fonte de luz (terrestre ou não), que percorreria então ambos os braços.

Michelson (ou, poderíamos dizer a comunidade de físicos da época) esperava que, alinhando um dos braços ao sentido de movimento da Terra, naquele trecho a luz demoraria mais para percorrer seu percurso, gerando uma interferência mensurável na volta dos feixes – foi observada apenas uma interferência da ordem dos ruídos.



Parece, com base no que precede, razoavelmente certo que se há qualquer movimento relativo entre a Terra e o éter luminífero, ela deve ser pequena; pequena o suficiente para refutar a explicação de Fresnel para a aberração.



- ❑ Como um físico da “Europa continental”, Hendryk Lorentz não coadunava com a visão mecanicista de éter característica dos britânicos. Lorentz tinha um apreço especial pela teoria do éter de Fresnel – estudando o fenômeno de dispersão óptica, notava que ela era condizente com as equações do eletromagnetismo;
- ❑ A celeuma levantada pelos experimentos ópticos atraiu Lorentz, que tinha uma predisposição pela teoria de Fresnel. Notavelmente, mostrou que a teoria de Stokes do éter apresentava inconsistências internas – “sobrando” apenas a teoria de Fresnel como forte candidata. O experimento de Michelson, “refutando-a”, perturbava Lorentz;

A hipótese de Fresnel (...), que funciona admiravelmente bem para dar conta de todos os fenômenos observados, não o faz para o experimento interferométrico do Sr. Michelson, (...) Estou totalmente perdido em como resolver esta contradição, e acredito que se nós tivermos de abandonar a teoria de Fresnel, não teremos nenhuma teoria adequada.



- Lorentz era um físico teórico “ousado” para a época – em especial, porque era atomista, algo bastante controverso para a época. Defendia que a origem dos campos magnéticos e elétricos era microscópica, algo que os britânicos não arriscavam muito fazer. Por isso, reescreveu as equações de Maxwell-Hertz em 1886 explicitando esse ponto (o que ficou conhecido como equações de Maxwell-Lorentz):

$$\nabla \cdot \varepsilon \mathbf{e} = \rho$$

$$\nabla \cdot \mathbf{b} = 0$$

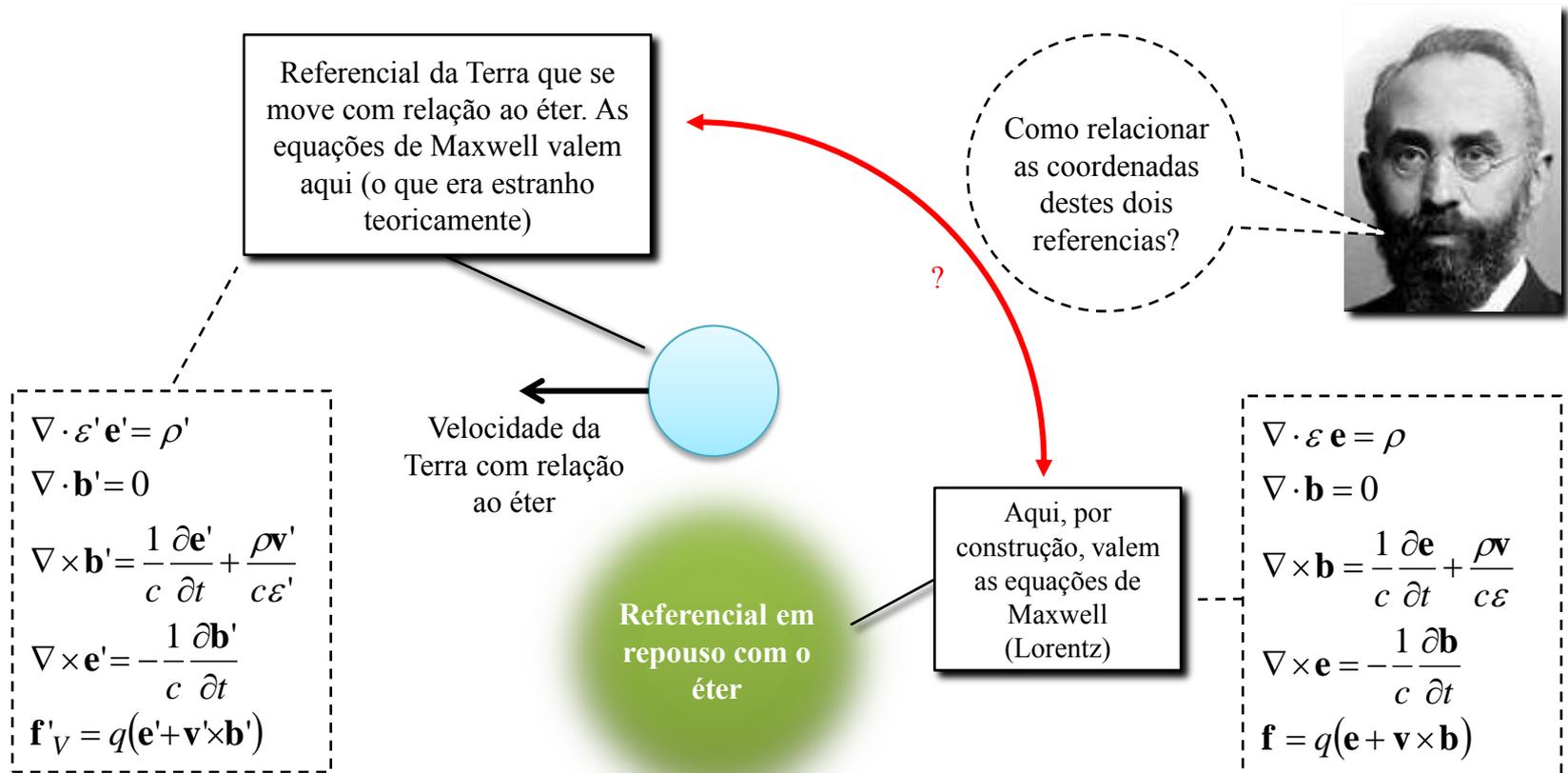
$$\nabla \times \mathbf{b} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} + \frac{\rho \mathbf{v}}{c \varepsilon}$$

$$\nabla \times \mathbf{e} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t}$$

$$\mathbf{f} = q(\mathbf{e} + \mathbf{v} \times \mathbf{b})$$

- Lorentz, assim como Maxwell anos antes havia incompatibilidades entre as equações do eletromagnetismo e as leis da mecânica – em especial, as transformações de coordenadas entre o éter e qualquer outro referencial que se move com relação a ele eram “estranhas”;

- ❑ O problema das transformações de coordenadas é resumido no esquema abaixo:



- ❑ Em 1895 Lorentz criou um teorema para tentar relacionar as variáveis \mathbf{e} , \mathbf{b} , \mathbf{e}' e \mathbf{b}' . Ao fazer isso, notou que teria de mexer na variável tempo nos dois referenciais – isto é, ele foi levado a definir uma variável t' , o “tempo local” na Terra. Em primeira aproximação:

$$\mathbf{e}' \cong \mathbf{e} + \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{b}}{c}$$

$$\mathbf{b}' \cong \mathbf{b} - \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{e}}{c}$$

$$t' \cong t - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}}{c^2}$$

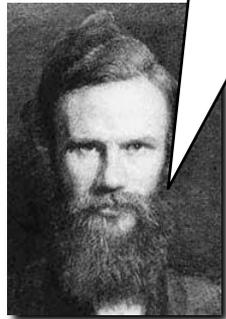
Lorentz notou que este conjunto de transformações era coerente com a teoria de Fresnel do éter parcialmente arrastado

[Tempo local] é o resultado da tentativa de dois observadores em sincronizar seus relógios usando *sinais de luz* e convencionando que a *velocidade de ida do sinal é igual a velocidade volta*.

- ❑ Lorentz não conseguiu a princípio interpretar o tempo local – quem fez isso foi Poincaré, em 1901, associando-o ao atraso inobservável que surge entre dois relógios ao se tentar sincronizá-los (isto relaciona-se, claro, ao problema da longitude que lidara anos antes). De quebra, Poincaré enunciou o que chamou de **Princípio do Movimento Relativo**, no qual afirmava que, uma vez que não conseguimos detectar o movimento da Terra com relação ao éter, todos os referenciais são fisicamente equivalentes.



Eu sugeriria que a única hipótese que pode conciliar essa oposição é de que o comprimento dos corpos materiais muda, de acordo com o movimento deles no éter ou através ele, por uma quantidade proporcional ao quadrado da razão da velocidade deles pela velocidade da luz.

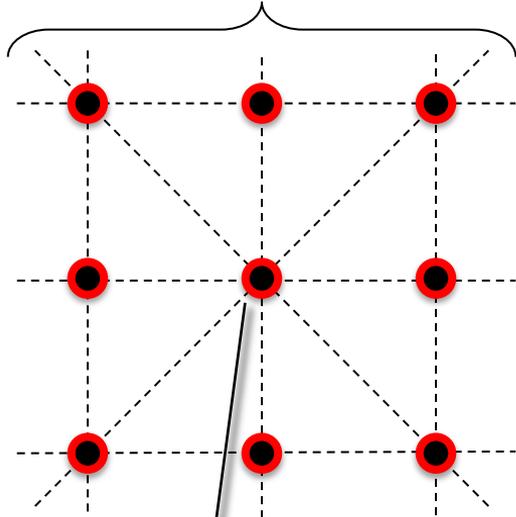


- ❑ Com essas primeiras transformações de coordenadas, Lorentz tentou então analisar o experimento de Michelson que refutava a teoria de éter de Fresnel. Para isso, em um primeiro momento, fez uma suposição ousada – afirmou que o braço do interferômetro paralelo à direção de movimento em relação ao éter sofria uma **contração espacial** que compensava o trajeto dos feixes e explicava o resultado nulo encontrado;
- ❑ Anos antes, em 1889, um físico irlandês, [George FitzGerald](#), havia feito uma hipótese muito semelhante. FitzGerald procurou justificar a hipótese apelando para a natureza eletromagnética da matéria, argumentando que “forças moleculares poderiam ser afetadas” pelo movimento relativo ao éter.

$$\Delta x' \cong \Delta x' (1 - v^2/c^2)$$

- ❑ Curiosamente, essa hipótese de fato explicava os resultados do experimento de Michelson, e salvava a teoria de éter de Fresnel – cabia agora a Lorentz “explicar” essa hipótese, isto é, mostrar de onde ela vem.

Em repouso (com relação ao éter)



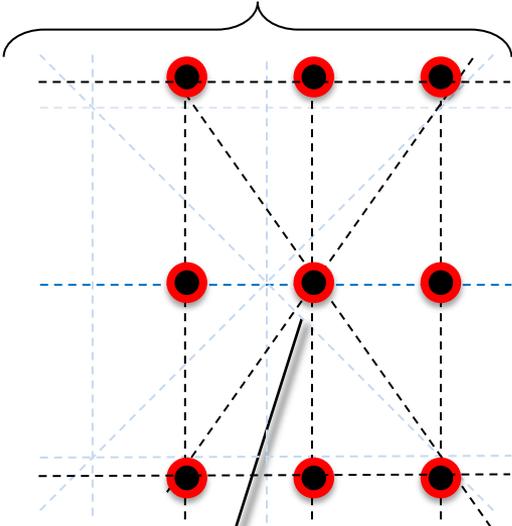
Quando em repouso com relação ao éter, cada molécula no cristal está em equilíbrio por seis forças elétricas que se cancelam

- ❑ Em 1900, Lorentz e Poincaré engendraram uma longa jornada para explicar microscopicamente a hipótese da contração espacial que “salvava” a teoria de éter (de Fresnel) – e eles conseguiram isso com a ajuda das equações de Heaviside dos campos elétrico e magnético de uma carga em movimento (com relação ao éter);
- ❑ Para entendermos essa explicação, imaginemos um modelo de um cristal 2D, primeiramente em repouso com relação ao éter – por volta de 1900 já existia o **modelo atômico de Thomson** (pudim de passas), e se supunha então que as moléculas que compõem os corpos se “equilibravam” por forças eletromagnéticas;
- ❑ Nesse cristal, a estrutura geométrica é garantida pelo equilíbrio de forças elétricas entre as moléculas – quando em repouso em relação ao éter, os campos elétricos são radiais. Quando se movem, de acordo com Heaviside, há uma alteração na simetria desses campos;
- ❑ O raciocínio de FitzGerald, Lorentz e Poincaré era relativamente simples: quando em movimento, os campos elétricos “deformados” desse cristal iriam afetar a geometria do corpo como um todo.

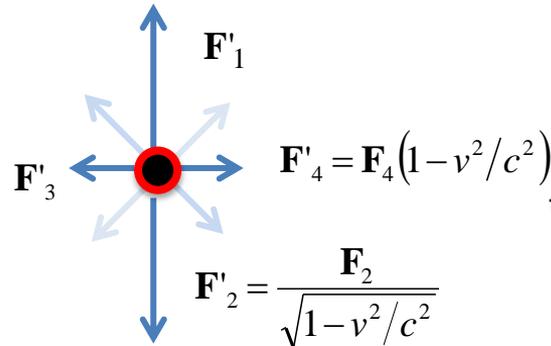
- Lembrando da fórmula de Heaviside para o campo elétrico:

$$\mathbf{E}(r, v) = \frac{1}{\gamma^2} \frac{kq}{r^2} \left(1 - \sin^2(\theta) v^2/c^2\right)^{-3/2} \hat{r}$$

Em movimento (com relação ao éter)



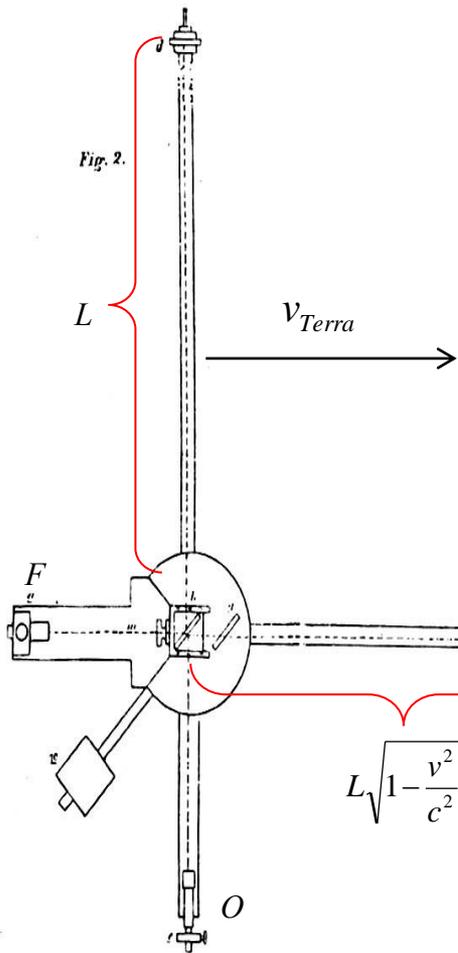
assim, temos que na direção do movimento ($\theta = 0$) o campo elétrico (e logo a força elétrica) será menos intensa, enquanto que na direção perpendicular ($\theta = \pi/2$), a força elétrica será mais intensa – isso acarretará numa **contração** na direção do movimento e uma **dilatação** na direção perpendicular:



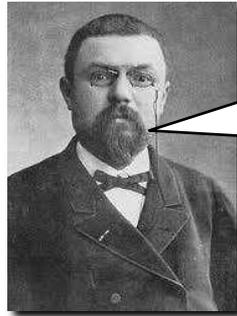
O conjunto dessas deformações fornece uma **contração efetiva** na direção do movimento, em conformidade com a hipótese de Lorentz e FitzGerald (sem aproximações):

$$\Delta x' = \Delta x \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Mesmo em movimento, as seis forças agindo em cada molécula irão se cancelar, garantindo a “estabilidade” do cristal



- ❑ A contração espacial dos corpos era outro sinal para Poincaré de que o castelo filosófico newtoniano (Espaço e Tempo absolutos) estava ruindo. É curioso ver que, embora “salvo”, o éter se configurava então como uma entidade física que “fugia” de qualquer tentativa de medi-lo diretamente (todavia, pensar numa física sem éter na época era algo extremamente ousado). Poincaré chegou a afirmar por volta de 1900:

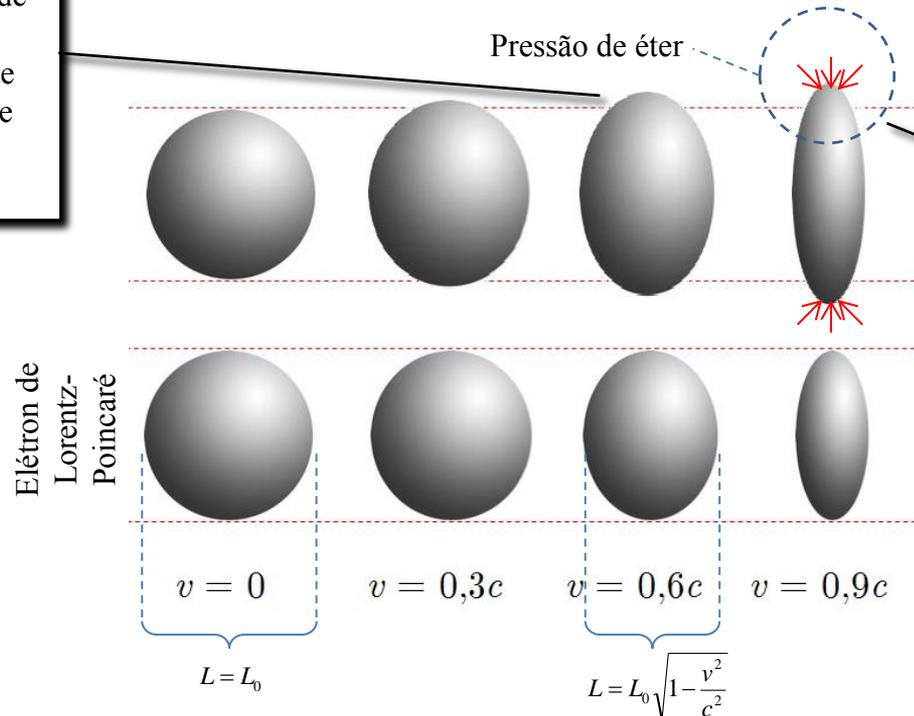


Pouca importa se o éter realmente existe (...) Relevante é que para nós tudo acontece como se ele existisse, e que a hipótese de sua existência é conveniente para que expliquemos os fenômenos

- ❑ Após este episódio de sucesso, Lorentz e Poincaré voltaram-se à teoria do elétron para aplicar estas novas e ousadas ideias;

- ❑ O problema do elétron já vinha sendo tratado a alguns anos – em geral, as hipóteses orbitavam a ideia de que o elétron era uma pequena esfera rígida, de raio extremamente pequeno, e que (segundo Lorentz) “criava” um campo elétrico no espaço ao redor. Poincaré forneceu um auxílio imprescindível para Lorentz neste processo;

Um problema de se tratar o elétron como uma esfera rígida mecânica é que, do processo de contração na direção do movimento, esperar-se-ia que (mecanicamente) o elétron se esticasse transversalmente, mantendo seu volume fixo.



Poincaré argumentou que o volume do elétron deve ser contraído, e para isso, o éter realiza um trabalho mecânico sobre o elétron, fornecendo-lhe uma energia proporcional a:

$$E \approx m_e c^2$$

$$x' = \gamma(x - vt)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right)$$

Chamadas hoje de
**Transformações
de Lorentz**

$$E = mc^2$$

$$\Delta x' = \Delta x / \gamma$$

$$\Delta t' = \gamma \Delta t$$

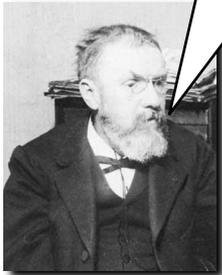
$$v' = \frac{v - V}{1 - vV/c^2}$$

- ❑ Entre 1905 e 1906, Lorentz e Poincaré completaram o que ficou conhecido na época como **Eletrodinâmica de Lorentz-Poincaré**, e consistia dos seguintes pontos, entre outros:

- ✓ Um conjunto de equações de transformação de coordenadas;
- ✓ A hipótese de que o éter interage com a matéria e é parcialmente arrastado pelo movimento de corpos materiais;
- ✓ A hipótese de que a origem dos campos elétricos e magnéticos são microscópicos;
- ✓ A hipótese de que o elétron sofre o mesmo tipo de contração que corpos macroscópicos;
- ✓ A hipótese de que o éter realiza trabalho mecânico sobre o elétron, deixando somente que contraia na direção de movimento;
- ✓ A hipótese de que a massa do elétron aumenta com a velocidade;
- ✓ Das hipóteses se deduz que o comprimento de corpos é alterado na direção de movimento. Também se deduz a fórmula de dessincronização de relógios distanciados;
- ✓ Poincaré mostrou que das transformações decorre uma nova lei de soma de velocidades;

- ❑ O aumento da energia do elétron estaria associado com o aumento de sua inércia.

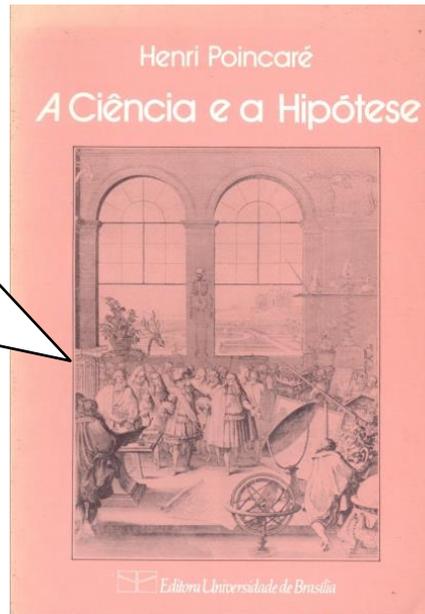
Parece que a impossibilidade de detectarmos o movimento absoluto da Terra é uma lei geral da natureza; (...) a chamaremos de *Postulado da Relatividade*



- ❑ Além disso, a eletrodinâmica de Lorentz-Poincaré carregava dois princípios que principalmente Poincaré aprimorou com o passar dos anos. São eles:
 - ✓ **Princípio da relatividade:** Era impossível determinar experimentalmente a velocidade de um corpo com relação ao éter – como mostrado pelos experimentos ópticos até então. As leis da física têm a mesma forma em todos os referenciais com velocidade relativa uniforme, o que faz com que não determinemos nenhuma velocidade absoluta.
 - ✓ **Princípio da luz:** Devido à contração dos comprimentos e ao atraso dos relógios, a luz se comporta em todos os referenciais como se tivesse sempre a mesma velocidade.
- ❑ Com a eletrodinâmica de Lorentz-Poincaré, podia-se explicar quase todos os fenômenos eletromagnéticos conhecidos até então. Matematicamente, é uma teoria “simples”. Conceitualmente - em termos do conceito éter e arrasto parcial -, é um pântano transitável para poucos.

- ❑ Poincaré era também um profícuo divulgador da ciência, e não raro publicava livros para público leigo. Um deles, até hoje apreciado, se chama *Ciência e Hipótese*, publicado em 1902. Neste, Poincaré arrisca conclusões ousadas sobre Espaço e Tempo, e sumariza suas conclusões obtidas nos anos que antecederam:

1. Não existe espaço absoluto e só concebemos movimentos relativos (...);
2. Não existe tempo absoluto; dizer que dois períodos de tempo são iguais é uma afirmação que não tem, nela própria, nenhum sentido e só pode vir a ter sentido por convenção.
3. Não só não temos a intuição direta de dois períodos de tempo, como também não temos, sequer, a da simultaneidade de dois acontecimentos que se dão em lugares diferentes



Este livro, em especial, tirou noites de sono de um particular grupo de estudantes da Escola de Engenharia de Zurique em empolgantes discussões filosóficas...

- ❑ No início de 1905 Poincaré publica outro livro importante, *O Valor da Ciência* – nele faz “profecias” de uma nova mecânica a surgir, mas geral que a newtoniana (que ele chama de “vulgar”), que leva em conta os resultados encontrados por ele e outros na eletrodinâmica:

Talvez também devemos construir toda uma mecânica nova que apenas entrevemos, onde, crescendo a inércia com a velocidade, a velocidade da luz se tornaria um limite intransponível. A mecânica vulgar, mais simples, permaneceria uma primeira aproximação, já que seria verdadeira para as velocidades que não fossem muito grandes, de modo que encontraríamos ainda a antiga dinâmica sob a nova.



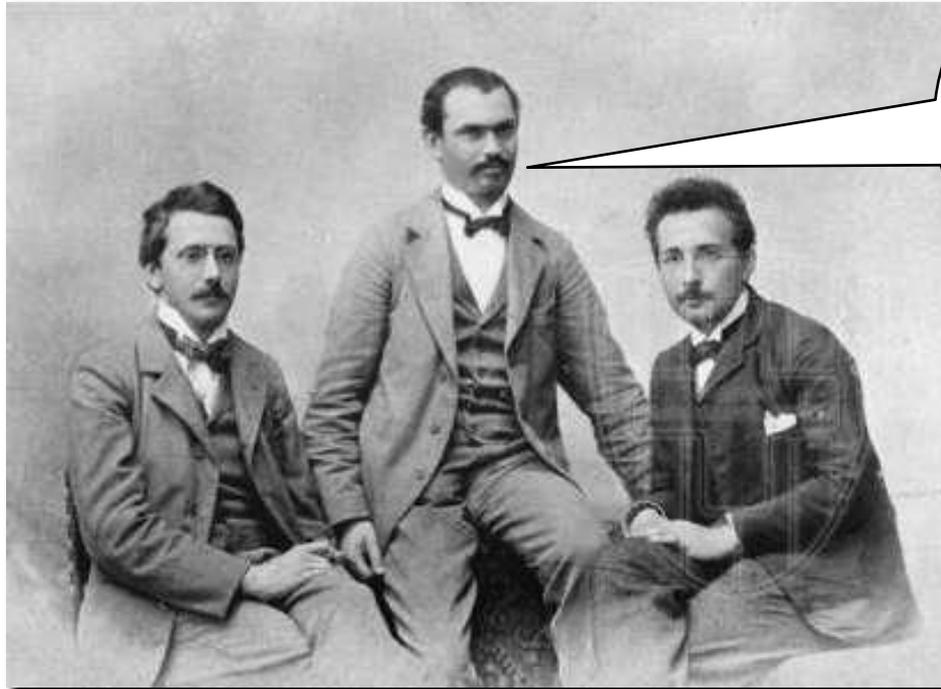
- ❑ Antes de 1900, um jovem físico, desconhecido, recém formado na Escola Superior de Engenharia de Zurique, ponderava sobre os fundamentos filosóficos-científicos da eletrodinâmica que então se erguia. Em uma carta a um amigo, em 1889, registrou:

Estou cada mais convencido de que a eletrodinâmica de corpos em movimento, como é apresentada hoje, não está de acordo com a verdade, e que deve ser possível apresentá-la de uma maneira mais simples. A introdução do termo “éter” nas teorias eletromagnéticas levou a uma noção de *meio* do qual se atribui movimento sem no entanto haver significado físico para essa asserção.



Durante sua formação em Zurique, Einstein aparentemente não teve contato direto com a teoria de Maxwell (ou suas reformulações), e procurou, a partir de 1898, estudá-la por meio de alguns livro-textos da época. Há evidências diretas e indiretas de que por volta de 1892 Einstein já teria lido trabalhos de Drude (em especial um livro-texto no qual Drude afirma que a ideia de éter é supérflua), Helmholtz, Hertz (trabalho referente à geração de ondas eletromagnéticas), Lorentz (os trabalhos referentes às transformações de coordenadas e à hipótese de contração), Voigt, Wien, Föppl, Boltzmann e Kirchhoff.

- ❑ Sem se a ter a detalhes biográficos de Einstein, é interessante mencionar que depois de formado, manteve por um tempo um grupo de “discussões filosóficas” com amigos. O grupo era apelidado de **Academia Olimpia**. Liam diversos autores, entre eles Ernst Mach, David Hume e Poincaré;

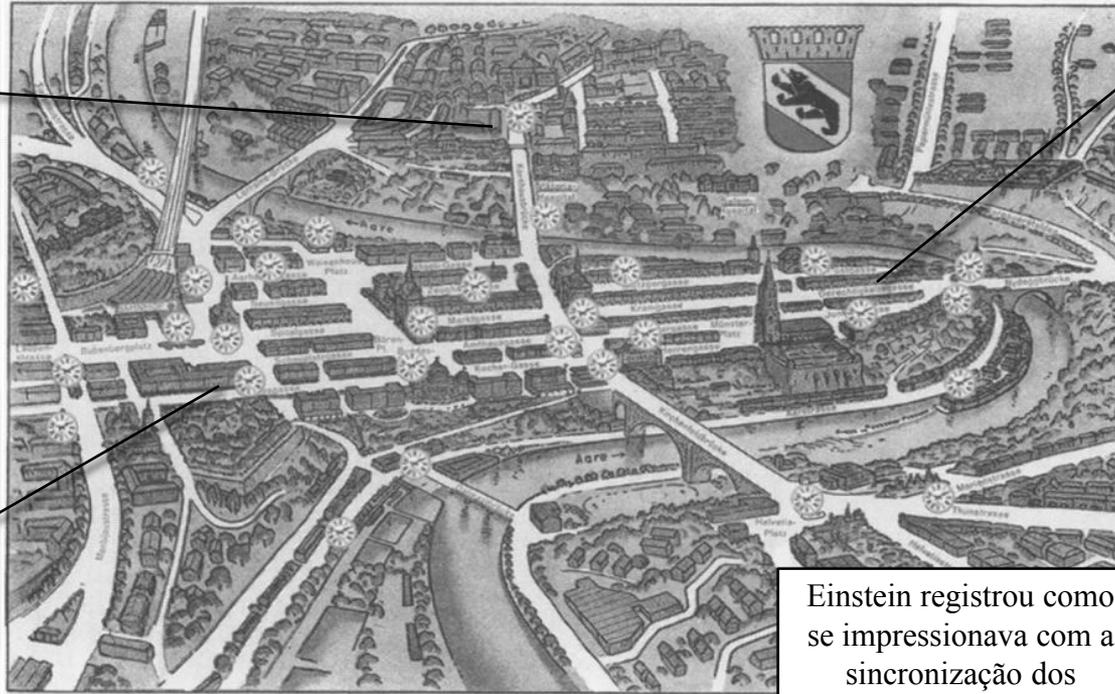


Poincaré nos impressionou profundamente e nos deixou sem respiração por semanas.

Maurício Solovine, amigo de Einstein, se referia ao livro *Ciência e Hipótese*

- ❑ Entre 1902 e 1909, Einstein, já casado e pai, trabalhou em um escritório de patentes em Berna, Suíça. Ao contrário do que pode parecer, esse serviço pode ter influenciado sua forma de pensar – foi lá que Einstein analisou vários pedidos de patentes de máquinas sincronizadoras de relógios, por exemplo.

Ao norte da cidade, perto de um grande torre de relógio, ficava o escritório onde Einstein trabalhava – lá, analisou cerca de 14 patentes de máquinas de sincronização em 1904



Só a rua que Einstein morava (rua Kramgasse) continha quase uma dezena de relógios de torre, incluindo a mais famosa da cidade (até hoje)

A cidade Berna “cultuava” relógios de torre (era uma questão nacionalista) – ela tinha várias delas espalhadas pela cidade

Einstein registrou como se impressionava com a sincronização dos relógios pela cidade



❑ O caminho de Einstein em Berna:



- ❑ Pulando muita história, o fato é que Einstein publicou em 1905 o que depois se tornou o artigo de física mais famoso de todos os tempos, de título: **Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento.**

Max Planck era editor chefe da revista *Annalen* onde Einstein publicou. Ele já tinha publicado um famoso artigo em 1900 que é tido como um dos pontos da física quântica

Paul Drude elaborou um interessante modelo de elétrons em sólidos que, além de ter sido ousado à época, utilizamos até hoje em algumas situações



891

3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper;
von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhäufeln scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welche an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

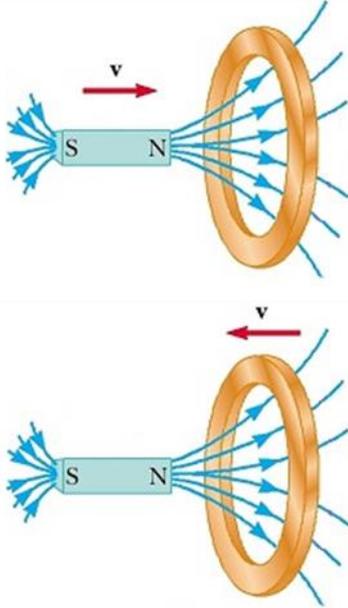
Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Will man diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

O título do trabalho de Einstein traduz a mensagem no título de nossa apresentação

O artigo de Einstein tem características interessantes. Não há nenhuma citação formal. Einstein usa exemplos “pouco ortodoxos” (parecendo por vezes um relatório técnico). Além disso, ele também “abre” todas as contas, o que não era tão comum à época

Físicos da época: quando o imã se **move**, ele gera uma força eletromotriz na espira:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -c^{-1} \partial \mathbf{B} / \partial t$$



Físicos da época: quando a espira **se move**, suas cargas livres sofrem força magnética de Lorentz:

$$\mathbf{f} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

- ❑ Na introdução de seu famoso artigo, Einstein ataca o que chama de uma assimetria nas equações de Maxwell(-Lorentz) por meio de um exemplo simples (figura ao lado). Seu ataque se resume no ponto de que um fato mensurável (surgimento de corrente na espira) é explicada de duas maneiras teóricas diferentes em função ou do imã “estar em movimento” ou da espira “estar em movimento”;
- ❑ Einstein argumenta que as ideias de “repouso absoluto” e “movimento absoluto”, inerentes à explicação usual à época ao exemplo, se fazem presente pela ideia de éter – aqui Einstein fez três argumentos, dois deles implícitos:
 - ❑ 1. Argumento empírico: experimentos ópticos e eletromagnéticos (provavelmente se referia aos experimentos de Fizeau e Michelson e Morley) não detectaram o movimento absoluto da Terra;
 - ❑ 2. Argumento filosófico: das leituras de Mach, Einstein abraçava à época a tese de que algumas entidades físicas inobserváveis, como o éter, deveriam ser banidas da física;
 - ❑ 3. Argumento de simplicidade: Einstein raciocinava que, se o fato observado é o mesmo, a explicação teórica deve ser a mesma – isto é, no caso do exemplo, o fenômeno só deve depender do movimento **relativo** entre o imã e a espira.

Referências

