Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Mestrado em "Física para o Ensino"

Experiências históricas para a determinação da velocidade da luz

Autor:

Rui Miguel Moreira da Silva

Prefácio

O objectivo desta tese é apresentar uma viagem pela história da ciência e descrever detalhadamente as experiências mais importantes que permitiram determinar a velocidade da luz. Como ponto de partida para este trabalho está o meu fascínio pela História, sobretudo pela História da Ciência. Daí o meu agrado pelo facto do tema seleccionado e proposto pelo meu orientador, o professor Luís Bernardo, estar relacionado com a história. Ao longo da elaboração da tese os objectivos foram-se alterando e duma tese de vertente mais prática, passei a construir uma tese com um pendor mais teórico.

Nesta busca pelo conhecimento, conheci e contactei com pessoas muito simpáticas, prestativas, compreensivas e, todos aqueles adjectivos que servem para caracterizar este género de pessoas. Além do prazer que tive em elaborar esta tese, tive esse prazer adicional. Destas pessoas realço, o professor Luís Bernardo, meu orientador, o professor Jorge Carneiro, que me ajudou e acompanhou na observação dos eclipses de Io, o professor Francisco Araújo, que me auxiliou na realização duma experiência que permitiu determinar a velocidade da luz e a professora Ana Cristina, que me ajudou a redigir a tese.

Durante uma viagem e perante um pôr do Sol esplêndido e entre umas páginas dum livro de cosmologia, questionei-me acerca do que é a luz e da sua velocidade. Uma das ideias que me surgiu é a inconstância da luz, ou seja, o facto de ela ter sido maior no início do Universo do que actualmente. Surgiu também a ideia de a velocidade da luz ser diferente na Lua, pelo facto da gravidade ser diferente. De seguida, tentei definir a luz. A ideia que me ocorreu é que ela é o espaço e o tempo ou parafraseando Carl Sagan a luz é tudo o que existiu tudo o que existe e tudo o que existirá. Tudo isto para dizer que durante a realização da tese reflecti. Muitas vezes sem lógica nenhuma outras vezes com algum sentido (o caso da velocidade da luz ter sido diferente no início do Universo é um assunto estudado).

Adorei realizar este trabalho. Espero que as pessoas que vão ler a tese sintam que os assuntos abordados são cativantes.

Rui Miguel Moreira da Silva

Índice

pág.

Introdução 7

1. A velocidade da luz até ao século XVII. 9

1.1A velocidade da luz na Antiguidade. 9

1.2A velocidade da luz na Idade Média. 12

1.2.1 Luz e Visão: A óptica de Alhazen. 13

1.2.2 A velocidade da luz no final da Idade Média 13

1.3A velocidade da luz no final do Renascimento. 16

1.3.1 A propagação da luz na óptica de Kepler. 16

1.3.2 A experiência de Galileo. 17

2. A determinação da velocidade da luz por observações astronómicas. 20

2.1 A velocidade finita da luz. 20

2.1 .1 A teoria da luz de Descartes a Fermat. 21

2.1.1 O observatório de Paris na época de Roemer. 22

2.1.2 A descoberta de Roemer. 23

2.1.3 A teoria da luz de Huygens e a descoberta de Roemer. 26

2.1.4 A descoberta de Roemer e a sua aceitação. 28

2.1.5 O problema da velocidade da luz na obra de Newton. 29

2.1.6 Cronologia dos acontecimentos 31

2.2A aberração estelar. 32

2.2.1 A descoberta de Bradley. 32

2.2.2 O ângulo de aberração. 40

2.2.3 A obra de Euler em física óptica. 43

2.2.4 Augustin Fresnel e a propagação da luz. 44

2.2.5 Experiência de Airy 46

3. A velocidade da luz no século XIX. 49

3.1 Medições da velocidade da luz no século XIX. 49

3.1.1 A refracção da luz. 49

3.1.2 Medição da velocidade da luz - A experiência de Fizeau. 55

3.1.3 A velocidade relativa da luz no ar e na água - Experiência de Foucault. 61

3.1.4 A velocidade relativa da luz no ar e na água - A experiência de Fizeau. 64

3.1.5 Medição da velocidade da luz - Experiência de Foucault. 66

3.1.6.1 Novas medições da velocidade da luz com o método da roda dentada. 68

3.1.6.1.1 A experiência de Cornu. 68

3.1.6.1.2 A experiência de Young e Forbes. 69

3.1.6.2 Novas medições da velocidade da luz com o método do espelho rotatório. 72

3.1.6.2.1 A experiência de Michelson. 72

3.1.6.2.2 A experiência de Newcomb 74

3.1.6.2.3 Experiência de Michelson em vários meios. 76

3.2 A velocidade da luz e a teoria electromagnética da luz de Maxweel. 77

3.1.1 A experiência de Weber - Kohlrausch. 77

3.1.2 A teoria electromagnética da luz. 78

3.1.3 A experiência de Hertz. 80

4 Relatividade e cosmologia. 83

4.1 Velocidade da luz e a relatividade. 83

4.1.1 O efeito de Doppler. 83

4.1.2 A experiência de Fizeau. 85

4.1.3 A experiência de Michelson. 87

4.1.4 A teoria da relatividade de Einstein. 95

4.1.5 A união do espaço e do tempo. 102

4.1.6 A teoria geral da relatividade. 105

4.2 Velocidade da luz e cosmologia. 108

5 Medições da velocidade da luz no século XX. 112

5.1 As experiências de Michelson. 112

5.2 Experiências usando a célula de Kerr. 115

5.3 Experiências com radar. 119

5.4 Cavidade ressonante. 121

5.5 Método de interferometria. 123

5.6 Método utilizando a luz modulada. 125

5.7 A modulação ultra-sónica da luz. 127

5.8 Método de espectroscópia. 128

5.9 Método com Laser. 128

6 Experiências didácticas para a determinação da velocidade da luz. 133

6.1 Determinação da velocidade da luz pelas efemérides do satélite de Júpiter- Io. 133

6.2 Determinação da velocidade da luz por modulação. 136

7. Conclusão e perspectivas futuras 139

Anexos 140

1. Artigo de Roemer publicado no Journal des Sçavants 141

2. A esfera celeste 143

3. Método geral para medir a velocidade da luz nos meios transparentes. Velocidade relativa da luz no ar e na água 146 156

4. A experiência de Young e Forbes

Bibliografia 158

Introdução

O tema desta tese é *Experiências Históricas para a Determinação da Velocidade da Luz*. Se o trabalho fosse somente a descrição detalhada das experiências mais importantes que se realizaram, ele estaria isolado do contexto em que as mesmas ocorreram. Este contexto é a própria História da Ciência, sobretudo a parte respeitante à óptica.

A luz propaga-se ou não com velocidade finita? Vários filósofos responderam a esta questão fazendo uso de diversas argumentações. Iniciámos este percurso na Antiguidade Clássica e terminamos com a descoberta de Roemer. Segue-se uma descrição detalhada das mais importantes experiências realizadas e a sua ligação com o desenvolvimento da física.

Até ao século XVII foram realizados muitos estudos acerca da propagação da luz. O primeiro capítulo do trabalho aborda o problema da velocidade da luz antes da descoberta de Roemer. A apresentação é feita em três partes. Na primeira parte, *A Velocidade da Luz na Antiguidade*, estudam-se as teorias da visão de Platão e Aristóteles, além de outros filósofos. Na segunda parte, *Velocidade da Luz na Idade Média*, um momento é dedicado a Alhazen e o outro analisa as teorias de visão dos filósofos do século XII até ao fim da Idade Média. Nesta época, os estudiosos limitavam-se a comentar e analisar as ideias dos autores clássicos acerca da propagação da luz. A terceira parte é inteiramente dedicada a dois grandes vultos da ciência: Kepler e Galileo, o Experimentador, que foi o primeiro a tentar determinar a velocidade da luz.

A descoberta da velocidade finita da luz foi realizada por Roemer, no século XVII, no Observatório de Paris. Ele determinou o tempo que a luz demora a percorrer o diâmetro da órbita terrestre. A descoberta de Roemer, uma das mais importantes na história da ciência, é talvez pouco conhecida e divulgada . Aqui é feita uma análise das implicações desta descoberta nas teorias de Newton, Huygens e Hooke sobre a luz. Segue-se uma apresentação sobre a aberração estelar, descoberta por Bradley. Nas palavras de Arthur Eddington "*só com uma extraordinária perseverança e lucidez é que permitiram a Bradley explicar*" o fenómeno. Continuando, encontra-se uma abordagem de como Fresnel e Euler estudaram o dito fenómeno e interpretaram as suas implicações na física.

No terceiro capítulo, intitulado *Medições da Velocidade da luz no Século XIX*, descreve-se detalhadamente a primeira experiência, desprovida de métodos

astronómicos, realizada por Fizeau. É feito um estudo da refracção e a forma como ela era explicada pela teoria ondulatória e corpuscular. No corolário desta discussão é descrita a experiência realizada por Foucault, em que ele verifica que a velocidade da luz é maior no ar do que na água. São apresentadas outras experiências realizadas durante esse século, onde foram utilizados os métodos da roda dentada e do espelho rotatório.

A parte final do capítulo é dedicada à teoria electromagnética da luz, elaborada por Maxwell e realçam-se os contributos das determinações do valor da velocidade da luz para a elaboração da teoria.

Um dos capítulos da tese é dedicado à Teoria da Relatividade de Einstein e a Cosmologia. Enquadra-se esta teoria na procura de explicações para os resultados obtidos nas experiências que envolvem a propagação da luz, dando ênfase às experiências realizadas por Fizeau e Michelson.

Segue-se uma abordagem superficial da relação entre a velocidade da luz e a Cosmologia. Abordam-se as implicações da descoberta de Roemer (que a luz se propaga com velocidade finita) e a descoberta da aberração, feita por Bradley, nas dimensões do Universo. No final, é feita uma referência à questão da constância da velocidade da luz, no início do Universo.

No capítulo quinto, descrevem-se pormenorizadamente as experiências realizadas ao longo do século XX. Inicia-se com as experiências realizadas por Michelson, com a utilização do método do espelho rotatório. De seguida, é feito o relato das experiências realizadas por Essen, Bergtrand e Froome, que utilizaram respectivamente a ressonância, a modulação e a interferometria, para determinar o valor da velocidade da luz. Finalmente, é feita uma abordagem às experiências recentes que utilizam a luz laser.

A última parte do trabalho é dedicada à descrição da experiência realizada pelo autor, onde foi utilizada luz modulada para determinar o valor da velocidade da luz. São referidas as observações feitas pelo autor aos eclipses dos satélites de Júpiter, que tinham como objectivo determinar a velocidade da luz e, essencialmente, repetir parte do trabalho realizado por Roemer, há quatro séculos atrás.

1

A velocidade da luz até ao século XVII

1.1 A velocidade da luz na Antiguidade

Disse Deus: Haja luz; e houve luz.
Génesis, 1:1-5.

"Quando te ergues no horizonte oriental
E enches todas as terras com a tua beleza [...]
Embora estejas longe, os teus raios estão na Terra."
Akenáton, Hino ao Sol (1370 a.C)[1]

A ciência acompanha a evolução económica, social, religiosa e técnica da época. A Grécia como centro intelectual da Antiguidade foi palco de obras notáveis nos domínios da literatura, filosofia, arquitectura, ciência, entre outros.

É na Grécia Antiga, que a física e a óptica dão os primeiros passos. Os gregos como filósofos e geómetras enunciaram as primeiras leis e teorias nalgumas áreas da física, estudando alguns fenómenos luminosos. Os filósofos gregos debruçaram-se sobre a luz, tentando explicar alguns fenómenos e desenvolvendo teorias sobre a sua natureza.

O estudo da velocidade da luz e a forma como este conceito foi evoluindo ao longo dos tempos está intimamente ligado à história da própria óptica. As preocupações que os nossos antepassados tinham no estudo da luz são diferentes das que nós temos hoje em dia. Para estudar o problema da velocidade da luz, na antiguidade, analisam-se as teorias da visão propostas pelos estudiosos.

Na obra *Catoptrique* atribuída a Euclides[2], fala-se dos raios emitidos pelo Sol que se reflectem nas superfícies, da mesma maneira que a seguir se fala dos raios

[1] Extraído do livro "Biliões e Biliões" de Carl Sagan.
[2] Euclides (330-270 a.c.) viveu em Alexandria onde escreveu *Elementos de Geometria*, onde reuniu grande parte do conhecimento matemático, deduzido a partir de axiomas. Ainda hoje se utilizam no ensino da Geometria. Demonstrou em 300 a.C. as leis da reflexão, baseado na noção de raio luminoso e propagação rectilínea.

emitidos pelos olhos que são reflectidos nas mesmas, atingindo assim os objectos. Confunde-se o problema da visão com o problema da propagação da luz.

A propagação rectilínea da luz era conhecida, o que era fácil de constatar, para tal bastava observar alguns fenómenos naturais. O fenómeno da reflexão também era conhecido, tendo Herão[3] da Alexandria explicado que a propagação rectilínea da luz e o fenómeno da reflexão se devia ao facto de a luz percorrer o caminho mais curto entre dois pontos. Na sua obra *Catoptrique*, em apenas algumas linhas de intervalo, ele refere "velocitas infinita" e "velocitas multa", para exprimir a velocidade dos raios visuais.

Exceptuando-se Empedócles[4], a grande maioria dos autores antigos tinha a ideia de que a luz se manifesta de forma instantânea, independentemente das suas ideias da visão e filosofias. Para ele a luz é parte de um dos seus quatro elementos, o fogo, sem contudo se confundir com ele. A luz aparece e desaparece instantaneamente, o que é, aparentemente uma constatação quotidiana. A propagação da luz escapa completamente aos sentidos.

Em grandes obras literárias greco-latinas comparam-se muitas vezes objectos rápidos com raios de luz. Inclusive na *Ilíada*, o autor compara os raios do Sol aos cavalos rápidos de Ulisses.

Fenómenos como o imediato surgimento e desaparecimento das imagens nos espelhos; a incidência simultânea da luz em objectos que se encontram a distâncias diferentes da fonte, assim como a incidência instantânea da luz solar quando deixa de existir obstáculo (nuvens) levaram os nossos antepassados a concluir que a luz se propaga com velocidade infinita[5].

Todos os fenómenos descritos anteriormente ocorrem em distâncias relativamente pequenas o que pode não ser suficiente para comprovar que a luz se manifesta instantaneamente. A rapidez da luz pode ultrapassar as nossas capacidades perceptivas, ela pode propagar-se a uma velocidade grande, mas finita. Mas se os nossos raios visuais atingem as estrelas no preciso momento que nós abrimos os olhos, sem

[3] Herão, viveu no século I, chegou a construir uma máquina a vapor rudimentar.

[4] Viveu no séc. V a.c. Filósofo grego que se debruçou sobre o problema da constituição da matéria. Introduziu a teoria que a matéria era constituída pela combinação de quatro elementos: terra, ar, fogo e água. Estes elementos eram representados por sólidos geométricos. Demonstrou que o ar invisível é uma substância material.

[5] O termo utilizado pelos estudiosos desta época e até à Idade Média não é se a luz se propaga com velocidade finita ou infinita, mas se esta se manifesta instantaneamente ou no tempo. As expressões utilizadas em latim para exprimir a propagação instantânea são: confertim, quod extra tempus, simul, subito,...

intervalo de tempo, e como as estrelas se encontram situadas a grandes distâncias, concluí-se então que a luz se propaga instantaneamente.

Tal (a propagação instantânea da luz) não é um fenómeno isolado nem anormal. Para fundamentá-lo Aristóteles[6] (384 - 322 a.C.) exemplifica com o caso da congelação da água, que ocorre em toda a massa no mesmo instante. Aristóteles argumentava que a luz se propaga instantaneamente; por exemplo, era impossível perceber um intervalo de tempo no seu estabelecimento entre o extremo Este e Oeste do horizonte. Ao contrário dos corpos materiais que se movem através de uma trajectória bem definida pela origem e pelo ponto de chegada, a luz difunde-se instantaneamente, exterior ao tempo, propagando-se em todas as direcções e preenchendo todo o espaço e não somente a trajectória definida pela origem e ponto de chegada. É por esta razão que nós vemos ao mesmo tempo os objectos próximos e objectos distantes. Para ele a luz não era uma emanação que se propagava dos objectos luminosos para os olhos, mas era um estado que o meio adquiria todo ao mesmo tempo a partir do objecto luminoso.

Philoponos também refere o movimento instantâneo que surge em toda a corda longa e tensa como análogo ao fenómeno da transmissão da luz.

A teoria da visão de Platão[7] previa a junção de um fogo visual com iluminação a partir de um corpo externo, resultando um fluir de substâncias materiais, luz ou fogo, e não deixa dúvidas que as substâncias materiais requerem tempo para percorrer o espaço.

Contudo, muitas dúvidas persistiam e dentro da mesma obra de um autor podemos encontrar expressões contraditórias, como referindo que a propagação da luz é instantânea, para umas linhas à frente referir que se propaga com velocidade elevada.

Santo Agostinho[8] refere que os raios visuais se propagam instantaneamente (do ponto de vista temporal, a luz propaga-se simultaneamente, mas do ponto de vista espacial, a luz propaga-se sucessivamente e atravessa as diferentes porções do espaço umas a seguir às outras), referindo a seguir que a sua velocidade é tão grande que toda a espécie de medida e estimativa é impossível, daí que afirme que: "*Os nossos raios*

[6] Discípulo de Platão, fundou em Atenas uma escola de filosofia, o Liceu. Foi preceptor de Alexandre, o Grande. Aristóteles foi principalmente um grande enciclopedista. Propôs explicações para quase todos os fenómenos naturais. Acrescentou o quinto elemento - o éter.

[7] Platão viveu entre 427 e 347 antes de Cristo. Foi discípulo de Socrates. No seu livro *Republica* fala da quebra aparente dos objectos parcialmente imersos em água.

[8] Santo Agostinho (354 - 430) morreu em 430, o ano que marca o início da Idade das Trevas. Ele retirou-se do mundo dos sentidos e aconselhou os outros a fazer o mesmo, afirmando que a curiosidade, a compreensão dos fenómenos e o seu estudo é uma doença, carregada de perigos e armadilhas, afirmando "Já não sonho com as estrelas."

visuais não atingem primeiramente os objectos próximos cedo e os objectos distantes depois, mas passa pelos dois intervalos com a mesma rapidez"[9].

Apesar de todas estas constatações a dúvida persistia: a luz propaga-se ou não no tempo?

1.2 Velocidade da luz na Idade Média

" (a luz que vai) de uma abertura para os corpos e que actua na sua superfície existe apenas num tempo, mesmo que este esteja dissimulado aos sentidos"

Alhazen, Traité de la lumière de la lune[10]

Com a extinção da cultura grega, o desenvolvimento da ciência e da física estagnou. Os romanos que se tornaram a potência dominante, interessaram-se pouco pelo pensamento abstracto, interessando-se mais pelas aplicações práticas. Com a queda do Império Romano Ocidental e com o surgimento dos estados feudais, poucos avanços surgiram a nível científico. Durante este período de mais de mil anos e com o aparecimento do Cristianismo, os centros intelectuais passaram a ser os mosteiros e como é lógico os interesses centravam-se nos problemas teológicos. A ciência grega encontrou então refugio no Império Árabe.

O século VII marca o início do domínio árabe, com a invasão do Sul da Europa e a assimilação de parte da cultura grega, com a tomada de Alexandria em 640. Os Árabes são muitas vezes conhecidos como sendo unicamente intermediários, dando a conhecer à Europa medieval a cultura grega, o que não verdade, pois desenvolveram vários ramos da ciência. Um dos ramos da ciência desenvolvida pelos árabes foi a óptica, pela mão de Alhazen[11].

[9] Grande parte da informação contida neste capitulo foi retirada do artigo de G. Picolet "La vitesse de la lumière d'apres les auteurs anciens" inserido no livro de René Taton "Roemer et la vitesse de la lumière", Vrin, Paris 1978.

[10] Extraído do livro de René Taton "Roemer et la vitesse de la lumière", Vrin, Paris 1978. Grande parte da informação contida neste capitulo foi retirada do artigo de R. Rashed "Lumiére et vision: L' application des mathématiques dans l'optique D'IBN AL-HAYTHAM" e David C. Lindberg " Medieval Latin Theories of speed of light".

1.2.1 Luz e Visão: A óptica de Alhazen

A obra de Alhazen é inovadora no domínio da óptica, visto que implementa a ideia de que é necessária a experimentação para comprovar qualquer teoria no campo da física, estabelecendo a ligação entre a matemática e a física no estudo dos fenómenos luminosos.

As suas principais ideias estão inscritas no "*Discurso da luz*", onde ele refere que a luz pode ser emitida por corpos luminosos, a denominada luz substancial, podendo também ser emitida por corpos iluminados, luz acidental.

Alhazen estudou os fenómenos da luz com a ajuda de câmaras escuras e outros dispositivos e concluiu que o olho funciona como um corpo-ecrã, visto que a luz se propaga dos objectos até ao mesmo, separando assim as condições da propagação da luz das da visão e rompendo assim com a óptica tradicional.

Quanto à questão da velocidade da luz, Alhazen conclui que a luz se transmite duma abertura a um ecrã num intervalo de tempo, mesmo que este seja imperceptível.

Este filósofo associa o fenómeno da refracção à mudança da velocidade da propagação da luz, com a mudança de meio.

Na sua obra refere ainda alguns aspectos inovadores na óptica, referindo que a luz diminui de intensidade à medida que se afasta da sua fonte, fazendo a analogia entre o movimento dos corpos pesados e o movimento da luz para explicar fisicamente as leis da óptica geométrica e os fenómenos da reflexão e refracção. Tudo indica que a luz e os corpos pesados se movam da mesma maneira apesar de a luz não estar sujeita à gravidade e o seu movimento ser extremamente rápido. Alhazen aperfeiçoou a lei da reflexão, estabelecendo que as direcções de incidência e de reflexão se encontram no mesmo plano normal à interface reflectora.

1.2.2 A velocidade da luz no final da Idade Média

No século XII o Império Árabe sucumbiu com as invasões dos mongóis, turcos e conquistas cristãs. A Europa começava a sair do ser torpor intelectual, começando a surgir as Universidades, um pouco por toda a parte. Nas universidades, os estudiosos

[11] Alhazen, filósofo árabe, que viveu no século XI. Desenvolveu uma teoria para a luz, cujo intuito era explicar todos os fenómenos da luz. Estudou espelhos esféricos e parabólicos e fez uma descrição detalhada do olho humano.

limitavam-se a comentar e traduzir as obras dos autores gregos e alguns árabes e desta forma, poucos avanços aconteciam a nível da ciência.

As respostas aos problemas físicos que os filósofos procuravam tinham de estar em harmonia com as doutrinas das várias autoridades, principalmente com a religião, limitando-se a estabelecer nos estudos relações de uma forma subtil e cuidadosa, argumentando de uma forma lógica para o absurdo de uma das alternativas.

Na Idade Média quando os autores investigavam a velocidade da luz, só podiam escolher entre duas alternativas- infinita ou finita- ou, em termos de tempo, o que era usual na época, instantânea ou no tempo. Se algo passa do objecto observado para o observador ou do observador para o objecto observado (e, possivelmente novamente para o observador) para produzir a sensação visual, com que rapidez se move?

A questão principal é saber se a percepção visual ocorre instantaneamente ou no tempo. A resposta a esta questão era ambígua e muito confusa, dependendo de como o processo visual fosse concebido.

A questão da persistência da visão era muitas vezes confundida com o problema da propagação da luz. A luz propagava-se até ao olho instantaneamente, mas aí, necessitava de tempo para produzir efeito, facto explicado com vários exemplos, como o caso de um objecto em rápida rotação, que aparece como um círculo.

A teoria da visão de Platão, que tinha prevalecido até à altura e que implicava uma velocidade finita da propagação da luz, ou fogo visual, encontrou teorias rivais ao longo do século XIII, à medida que eram traduzidas e conhecidas obras de Aristóteles e de outros filósofos.

John Pecham, filósofo medieval que tratou de questões de óptica, seguiu as opiniões de Sto. Agostinho e Aristóteles concluindo que a luz se propaga instantaneamente, contrariando assim a opinião de Alhazen.

Roger Bacon [12] (1214-1294) revê as ideias aristotélicas, e diz que a luz é uma "criação" propagando-se no espaço, que não pode ser avaliada como um corpo. Ele sustenta que a propagação da luz é diferente da do som e odor em que estes requerem tempo e a luz não. Contudo, depois afirma que a luz requer menos tempo do que o som. Concluindo, refere que a luz não pode estar simultaneamente em várias partes no

[12] Monge e filosofo inglês que descobriu os focos dos espelhos côncavos e o princípio da câmara escura, estudou mecanismo da visão e reconheceu os defeitos do calendário juliano. Sugeriu a utilização de lentes para compensar os defeitos visuais. A ele deve-se a ideia que o calor tem a sua origem nos movimentos das partículas internas dos corpos. Criticou a ignorância clerical, o que lhe valeu 14 anos de prisão.

mesmo tempo o que se assim acontecesse se igualaria a Deus. Roger Bacon, tal como Alhazen, defende que a refracção está vinculada à propagação da luz no tempo.

Vitelo, contemporâneo de Bacon, refere que a luz se propaga instantaneamente e acrescenta ainda que a luz se move mais rapidamente num ténue corpo transparente do que nos mais densos, explicando o fenómeno de refracção em que a luz é "refreada ou difundida" mais ou menos de acordo com a diversidade do meio.

Tomás de Aquino (1225 - 1274), reafirma a visão aristotélica em que a luz não requer tempo na sua propagação.

No final da Idade Média, Buridan e Blasius de Parma distinguem os dois modos de propagação da luz referindo que a progressiva iluminação de um meio resulta da apresentação de um corpo luminoso ao meio e que a propagação da luz deve ocorrer instantaneamente se o objecto luminoso for apresentado ao meio.

Blasius de Parma defende as duas possibilidades, argumentando que as duas alternativas são defensáveis. Inicialmente expõe uma série de argumentos a favor da propagação instantânea da luz. Por exemplo, colocando dois objectos situados a distâncias diferentes do olho, o objecto perto do observador não será visto antes do objecto distante. De seguida, argumenta a favor da propagação temporal da luz, referindo que antes de dirigirmos o olho para o objecto, a sua "luz" já está a ser difundida para o olho, contrariando o argumento anterior. Conclui que se a propagação da luz for temporal, então é verdade que o Sol e as estrelas não se avistam nas suas verdadeiras posições, pois movem-se para uma nova posição enquanto que a sua luz atinge os olhos do observador.

Ao longo da Idade Média nenhum consenso surgiu acerca das duas alternativas para a propagação da luz, o que era impossível devido às condições técnicas da altura; apenas se discutiam as ideias dos autores gregos. Os estudiosos expunham as suas ideias com argumentos que se mostravam inconclusivos, não surgindo nem emergindo nenhum consenso. A única ideia consensual é que a luz solar parece mover-se instantaneamente de um extremo ao outro do horizonte e que se a luz requer tempo na sua propagação, este é imperceptível.

1.3 A velocidade da luz no Renascimento

... e de que grandeza será o valor da velocidade da luz? (...) Podemos resolver este problema através de uma experiência?

(Galileo, Diálogos sobre duas novas ciências)

No final da Idade Média surge uma invenção fundamental para o desenvolvimento da ciência - a imprensa.

Com o fim da Idade Média e o surgimento do Renascimento, rico em áreas que vão desde a literatura à pintura, a óptica progride lentamente. No final do Renascimento, surge algum desenvolvimento na física, com o aparecimento de alguns sábios, entre os quais se destacam Kepler[13] (1571-1630) e Galileo[14] (1564 -1642).

1.3.1 A propagação da luz na óptica de Kepler

Apesar de alguns progressos na óptica ao longo da Idade Média chega-se à época de Kepler e ainda não existe uma teoria consistente sobre a luz. A situação da óptica atrasava o desenvolvimento da astronomia, daí o interesse de Kepler pela óptica.

Existem várias questões cruciais acerca da luz que não têm resposta. Kepler construiu uma teoria geral sobre a natureza da luz e a sua propagação, estudando fenómenos que vão desde o funcionamento de uma câmara escura, à utilização de lentes e à formação das imagens num espelho, sendo estes fenómenos susceptíveis de um estudo geométrico. Nestes estudos introduziu o conceito de raio. O essencial da sua teoria prende-se ao facto da luz ser algo imaterial que emana de uma fonte sob a forma de um fluxo e que comunica com os corpos por uma "conjugação" de dimensões. Acrescenta ainda que a luz se difunde esfericamente e se propaga instantaneamente variando de intensidade em proporção inversa ao quadrado da distância. Para ele a óptica é puramente geométrica.

[13] Kepler descobriu a reflexão interna total, obteve a aproximação para pequenos ângulos da lei da refracção, em que os ângulos de incidência e refracção são proporcionais. Descreve o funcionamento dos telescópios.

[14] Galileo é para muitos o fundador da física moderna, estuda os fenómenos pela acção da experiência e tenta traduzir os resultados em leis matemáticas. Verifica a lei do isocronismo e estuda a queda dos corpos, utilizando para tal o plano inclinado. Melhora a luneta astronómica, descobrindo quatro satélites de Júpiter. Defende o sistema heliocêntrico.

Kepler transformou profundamente a teoria da propagação da luz e a noção de luz. Por tudo isto, a sua influência fez-se sentir na óptica cartesiana[15] e na teoria ondulatória elaborada por Huygens[16].

1.3.2 A experiência de Galileo

Galileo Galilei efectuou descobertas em muitos domínios, introduzindo um novo método de trabalho, o método experimental, tentando traduzir os resultados obtidos em leis matemáticas. A primeira tentativa para determinar a velocidade de propagação da luz foi feita por Galileo.

No livro de Galileo *Diálogos sobre duas ciências novas* publicado em Leyden em 1638, encontramos uma conversa entre o professor e os seus alunos acerca da velocidade da luz. Neste diálogo, Salviati representa Galileo, Sagredo, um senador amigo de Galileo e Simplício representa a comunidade eclesiástica da época.

"Sagredo: - Mas de que tipo e de que grandeza será o valor da velocidade da luz? É instantânea, ou como qualquer outro movimento, requer tempo? Podemos resolver este problema através de uma experiência?

Simplício: - A experiência do dia a dia mostra-nos que a propagação da luz é instantânea; quando nós observamos a explosão de uma peça de artilharia, a uma grande distância, a luz atinge os nossos olhos sem intervalo de tempo; mas o som atinge os nossos ouvidos apenas depois de um pequeno intervalo de tempo.

Sagredo: - Então, Simplício, a única coisa que eu posso inferir dessa experiência familiar é que o som, ao atingir os nossos ouvidos, viaja mais lentamente do que a luz; não me informa se a propagação da luz é instantânea ou então, extremamente rápida, requerendo tempo...

Salviati: - As pequenas conclusões destas e de outras similares observações levam-me a um método pelo qual com certa coerência podemos concluir se a iluminação, isto é, a propagação da luz, é instantânea..."

Salviati passou a explicar o método da sua experiência. Galileo e outro observador ficariam, cada qual, em duas colinas, separados por uma distância de cerca

[15] Sistema filosófico de Descartes (1596-1950), que e se caracteriza pelo emprego da dúvida metódica e uma ciência mecanista da matéria

[16] Christiaan Huygens (1629-1695) é o fundador da teoria ondulatória da luz. Introduz o éter, meio no qual a luz se propaga. Holandês, viveu grande parte da sua vida em Paris, onde ajudou a fundar a Academia das Ciências. Construiu um relógio de pêndulo e inventou o relógio de mola.

de um quilómetro. Cada um tinha uma lanterna e um cobertor que funcionava como um obturador. Inicialmente, Galileo descobria a sua lanterna e quando o outro observador visse a luz, descobriria, por sua vez, a sua lanterna. O intervalo de tempo entre a descoberta da lanterna por Galileo e a observação, por Galileo, da luz da lanterna do outro observador, seria o intervalo de tempo necessário para a luz ir e vir entre os dois observadores. Salviati termina a discussão afirmando:" *De facto, eu tentei realizar a experiência usando uma pequena distância, menor que uma milha, a partir da qual eu não fiquei habilitado para assegurar com certeza se a aparição da luz oposta é instantânea ou não; mas se não é instantânea é extremamente rápida - Eu vou chamar a isso instantânea...*"

Com os meios técnicos disponíveis na sua época, Galileo tinha poucas hipóteses de determinar a velocidade da luz utilizando este método. O intervalo de tempo dependerá do tempo requerido pelo observador para perceber a luz da lanterna de Galileo e descobrir a sua. Este intervalo torna-se enorme quando comparado com o tempo que a luz demora a percorrer aquele trajecto.

Para uma distância de uma milha, é necessário determinar intervalos de tempo da ordem dos 10^{-5}s. No mesmo livro encontra-se uma frase em que Galileo estava habilitado a determinar o tempo com uma precisão de 1/10 do segundo (ou 1/10 do batimento do pulso). Galileo, apesar de ter formulado um método para determinar a velocidade da luz, não resolveu o problema. A sua experiência podia ser realizada de uma forma mais simples, substituindo a segunda pessoa por um espelho, que reenviava automaticamente a luz. Este princípio foi seguido cerca de cento e cinquenta anos depois por Fizeau[17].

Tendo em conta o enorme valor da velocidade da luz, esta só podia ser medida utilizando-se grandes distâncias ou utilizando técnicas experimentais bastante elaboradas. No livro *Saggi di naturali esperienze fatte nell'Academia del Cimento* aparece uma citação que diz que a luz percorre a distância de 6 milhas num tempo que não é observável. É provável que a experiência tenha sido repetida depois da morte de Galileo, tendo os seus seguidores usado uma distância maior.

Galileo interessou-se pela astronomia. Em Março de 1610, um ano depois de ter construído o seu telescópio, na obra *Sidereus Nuncius* de Galileu é que aparece a

[17] Hippolyte Fizeau (1819-1896) foi o primeiro a determinar a velocidade da luz com um método terrestre, o método da roda dentada. O seu trabalho foi um importante contributo para a elaboração da teoria da relatividade de Einstein. Alargou o princípio de Doppler à luz.

primeira menção da existência dos quatro satélites de Júpiter. Os seus contemporâneos ficaram incrédulos com esta descoberta. Kepler chegou a escrever uma carta pública a Galileu onde afirmava que sendo a Terra o segundo mais importante corpo celeste, a seguir ao Sol, e só tinha um satélite, não compreendia como Júpiter tinha quatro. Outros nove satélites foram descobertos em 1892.

Por essa altura era crucial determinar a longitude no mar. Galileo foi um dos primeiros filósofos a tentar responder a esta questão, em que uma análise de alguns fenómenos astronómicos, principalmente os eclipses, podiam servir para determinar a longitude de qualquer local.

2

A determinação da velocidade da luz por observações astronómicas

" Lucem sucessive propagari & spatio quasi decem minutorum primorum Sole ad Terram venice, jam constat per Phaenomena Satellitum Jovis, observationibus dversorum astronomorum confirmata..."[18]

(Isaac Newton[19], Principia mathematica)

2.1 A velocidade finita da luz.

Desde o tempo de Galileo e até ao início do século XVIII, os instrumentos de observação pouco tinham melhorado. Para evitar a irisação das imagens aumentou-se a distância focal. Por exemplo, Huygens inventou um novo método de corte e criou uma lente com uma distância focal de cerca de 70 metros. Por essa altura o inglês Dollond construiu lentes acromáticas, que despojavam as imagens de irisações, permitindo o uso de distâncias focais curtas. Na mesma altura começou-se a substituir a lente objectiva nos telescópios, por um espelho côncavo que devolvia a imagem para a ocular e para medir ângulos começou-se a utilizar o micrómetro em vez de círculos graduados. A partir destes avanços técnicos começou a ser possível determinar com mais precisão a posição das estrelas e calcular antecipadamente a localização dos planetas.

[18] "Luz propaga-se sucessivamente no espaço demorando quase dez minutos do Sol à Terra, já constatado pelos fenómenos dos satélites de Júpiter, confirmada por diversas observações astronómicas..." Tradução livre do autor.

[19] Isaac Newton (1642-1727) nasceu no ano da morte de Galileo. Defensor da teoria corpuscular, realizou experiências decisivas sobre a dispersão da luz e concluiu que a luz branca era composta por uma mistura de toda uma gama de cores independentes. Além de toda a contribuição para a óptica, ele estabeleceu o cálculo diferencial e o integral, e descobriu a lei da atracção universal.

2.1.1 A teoria da luz de Descartes e Fermat

Até ao princípio do século XVII, os físicos trabalhavam isolados. A troca de ideias era normalmente feita através de cartas. Por vezes, geravam-se grandes discussões entre os autores como a que aconteceu entre Fermat (1601-1665) e Descartes[20] (1596-1650).

Para Fermat, a luz propaga-se mais rapidamente no ar que na água e com esta divergência provocou uma querela com Descartes. Fermat reformulou o princípio de Herão do percurso mínimo, afirmando que a luz ao propagar-se de um ponto para o outro, escolhe o caminho para o qual o tempo de percurso é mínimo mesmo que, para tal, se tenha de desviar relativamente ao caminho geométrico mais curto, tentando explicar assim o fenómeno da refracção.

O modelo cartesiano exclui o transporte de matéria na sua teoria para a luz. Não há transporte de matéria, mas existe um suporte material para essa transmissão. Para ele, a luz é uma pressão que se transmite instantaneamente num meio elástico que preenche todo o espaço. A maior densidade da matéria favorece a transmissão da luz, pois há um maior suporte material necessário à transmissão. Em 1637, Descartes enunciou a lei da refracção em termos de senos, descoberta já anteriormente por Snellius[21], mas que nunca tinha sido publicada.

Existe alguma ambiguidade e incoerência no tratamento da velocidade da luz na obra de Descartes. Ele propõe simultaneamente que a luz se propaga instantaneamente e que na passagem de um meio transparente para outro mais denso, a velocidade aumenta. Com o conhecimento da experiência de Galileo, ele propõe uma experiência para pôr em evidência a duração do trajecto da luz. Para tal baseou-se nos eclipses da Lua e acrescentou que a experiência de Galileo é inútil, pois considerando uma velocidade da luz elevada, a base de medida terrestre era limitativa, o que já não acontecia por observação astronómica. Se a luz demora algum tempo a chegar da Lua à Terra, por exemplo, uma hora, durante um eclipse da Lua, o observador na Terra não deve constatar uma alinhamento Sol-Terra-Lua e só observara o eclipse passado uma hora. Como a revolução sinódica da Lua é rápida, o ângulo Sol - Terra - Lua deve ser significativamente diferente de 180°. Mas o que se observa é que a Lua eclipsada

[20] Descartes com a sua lei explicou o arco-íris. Ele inventou a geometria analítica, graças à qual se pode representar graficamente as equações algébricas.
[21] É atribuída a Snellius [Snell], van Royen (1581-1626) a lei sob a forma equivalente de *ncosec i=cose r*.

aparece sempre num ponto da eclíptica oposto ao Sol. Contudo, deixa em aberto que se possuindo melhores instrumentos de medida do tempo e utilizando distâncias astronómicas superiores à da Terra à Lua os resultados obtidos poderiam ser diferentes. Concluiu que a luz se propaga com velocidade infinita. Ele afirma numa carta a um seu amigo que "*a luz move-se num instante... e isto é para mim tão certo, que se provar falso, eu estarei pronto a confessar que eu não sei absolutamente nada de filosofia*".

2.1.2 O observatório de Paris na época de Roemer[22]

Nesta época o domínio dos mares era disputados por alguns países da Europa, sendo de importância vital o conhecimento da longitude, já que a latitude se conseguia calcular com alguma precisão. Para calcular a longitude é necessário conhecer a hora local (obtida pela observação dos astros), mas também a hora do meridiano de origem, sendo esta determinada com bastante irregularidade pelo relógio de bordo. Sem relógios precisos, podia-se utilizar as efemérides dos satélites de Júpiter para determinar o tempo. Por isso, Colbert[23] (1619-1683) começou a interessar-se pela astronomia, pois esta era indispensável à navegação, visto que era essencial conhecer a posição dos astros ao longo do ano. Houve então necessidade de construir um local onde se pudessem fazer observações, construindo-se para tal o Observatório de Paris. Colbert procurava propagar os trabalhos dos sábios franceses. Subsidiando, permitindo desta forma que a 5

[22] Olaf Roemer nasceu em Aarhus a 25 de Setembro de 1644. É em 1662 que Roemer começa os seus estudos de ciências exactas na Universidade de Copenhaga, tornando-se pouco tempo depois assistente de Erasmus Bartholin, que se tornou famoso pela descoberta da dupla refracção do cristal da Islândia. Roemer ficou encarregado de copiar as observações de Tycho Brahé. Roemer, como os astrónomos da altura tentava medir a paralaxe das estrelas fixas, tentando comprovar a hipótese de Copérnico. No decurso deste trabalho Roemer familiarizou-se com a astronomia e ajudou Picard a determinar a diferença de longitude entre os observatórios de Paris e o de Tycho, através das observações dos eclipses dos satélites de Júpiter. Depois deste trabalho, Roemer foi convidado por Picard para ir trabalhar com ele para Paris e apresentou um micrómetro por ele construindo.

Desconhece-se muito do seu trabalho realizado em Paris, visto que se perdeu muita documentação. Roemer numa carta endereçada a Huygens, revela que a sua teoria do retardamento da luz funda-se exclusivamente nas observações feitas por ele e Picard, não tendo utilizado as numerosas observações feitas por Cassini na altura. Roemer fez melhorias nalgumas máquinas e propôs a Huygens a utilização nos dentes das rodas dentadas dos relógios a forma epicicloidal.

A descoberta da velocidade finita da luz não foi aceite por todos. Cassini rejeitou a ideia, e isolado devido a doença do seu protector, Picard, Roemer resolveu regressar a Dinamarca, em 1682, ele inventa o óculo meridiano, instrumento fundamental para a astronomia e o círculo meridiano. Realizou experiências sobre o coeficiente de dilatação de alguns materiais e examinou a variação do período de oscilação de um pêndulo sob o efeito da temperatura incentivando Fahrenheit a construir termómetros baseados nestas experiências. Em Copenhaga viu-se privado de algum do seu tempo para investigação, pois trabalhou ao serviço do rei, melhorando os serviços de distribuição de água, introduzindo um novo sistema de pesos e medidas e preparou a reforma do calendário. Roemer morreu a 17 de Setembro de 1710.

de Janeiro de 1665 fosse publicado o primeiro número do *Journal des Sçavans*. Também na Inglaterra foi criada a primeira revista científica denominada *Philosophical Transactions*.

2.1.3 A descoberta de Roemer

Cassini[24], um jovem astrónomo italiano começava a ter fama em toda a Europa. Tinha previsto a trajectória de um cometa, tinha organizado tábuas para os eclipses dos satélites de Júpiter, de grande utilidade para os marinheiros, e em 1666 calculou a duração da rotação do planeta Marte. A fama dos trabalhos de Cassini chegou aos ouvidos de Colbert, que o convidou para trabalhar em Paris.

Nos primeiros anos do Observatório de Paris, Cassini observou os movimentos dos satélites de Júpiter, empregando o relógio de pêndulo de Huygens. Também foram feitas observações ao Sol, aos planetas e seus satélites e às estrelas, alcançando-se assim grandes progressos na astronomia e geodesia.

Além de descobrir vários satélites de Júpiter, Cassini mediu conjuntamente com Picard[25] (1620-1682) e Jean Richer em 1672 a distância da Terra ao Sol por observações a Marte em oposição[26], feitas simultaneamente em Paris e Cayenne, tendo verificado uma paralaxe[27] de 9",5, o que corresponde a cerca de 132 milhões de quilómetros[28].

Picard em 1671, aquando da viagem à Dinamarca para tentar encontrar vestígios do observatório de Tycho Brahé[29]e medir a diferença de longitude pela observação simultânea do mesmo eclipse em dois lugares diferentes, recrutou para o observatório de Paris um jovem astrónomo chamado Olaf Roemer[30]. Roemer era assistente de

[23] Ministro de Luís XIV, o rei Sol.
[24] Giovani Domenico Cassini (1625 -1712) chega a Paris em 1669 e tornou-se o primeiro director do Observatório de Paris.
[25] Picard foi assistente do primeiro director do Observatório de Paris, Cassini.
[26] Posição de dois corpos celestes diametralmente opostos um do outro.
[27] Ângulo entre as direcções em que um astro é visto quando observado de dois pontos da Terra.
[28] Utilizando a triangulação, com o objectivo de determinar a distância da Terra ao Sol, em 1671, Jean Richer comandou uma expedição a Cayenne, na Guiana Francesa, enquanto Cassini e Picard faziam as observações em Paris. Cada um deles registou a posição de Marte no céu no mesmo momento, predeterminado. Quando a expedição de Richer chegou a Paris compararam os dados e deduziram a distância a Marte. Usando as leis de Kepler determinaram a distância de Marte ao Sol e do Sol à Terra. Medições modernas indicam que a distância da Terra ao Sol é 149,6 milhões de Km.
[29] Tycho Brahé (1546-1601) fez observações exaustivas do Sol, Lua e planetas. Estas observações ajudaram Kepler a estabelecer as leis que regem os movimentos dos planetas.

Erasmus Bathulinus[31] e ajudou Picard a fazer a observação, enquanto que Cassini fazia a mesma observação em Paris.

Roemer chega a Paris em 1672 e junta-se a Cassini e a Picard nas observações dos satélites de Júpiter. O maior número de observações foi feito por Cassini, que verificou que o período dos satélites de Júpiter comporta muitas desigualdades.

Em Setembro de 1676, Roemer anunciou à Academia que o eclipse do primeiro satélite de Júpiter, previsto para nove de Novembro seguinte, ocorrerá com exactamente dez minutos de atraso e que poderia ser verificada por observação.

Efectivamente, a nove de Novembro de 1676 às 5h 37min 49s foi feita uma observação do satélite em Paris por Picard e ocorreu 10 minutos mais tarde do que previsto pelas tabelas de Cassini. A 21 de Novembro de 1676, Roemer apresentou a sua teoria para o sucedido, baseada na propagação no tempo da luz. Ele explica que o atraso do tempo de emersão[32] do primeiro satélite é devido à velocidade da luz ser finita e não infinita. Ele refere que a luz demora cerca de 22 minutos a percorrer o diâmetro da órbita de Terra em torno do Sol. Nas actas das reuniões da Academia pode-se ler o seguinte: "*Roemer leu à Academia um artigo no qual ele mostra que o movimento da luz não é instantâneo e que se pode verificar pela desigualdade das imersões e emersões do primeiro satélite de Júpiter*". A 28 de Novembro em nova reunião da Academia, ele discute os seus resultados e é violentamente atacado por Cassini. Em 5 de Dezembro, Cassini apresenta os seus argumentos contra a teoria de Roemer. Ele refere que para os outros três satélites não se observam os mesmos padrões nos tempos de ocorrências dos eclipses. Em 7 de Dezembro seguinte, foi publicado pelo *Journal des Sçavans*[33] o artigo de Roemer *Démonstration touchant le movement de la lumière*.

Foi ao longo de oito anos de observações ao primeiro satélite de Júpiter, feitas por Roemer e Picard, que Roemer se baseou na previsão que o eclipse de 9 de Novembro de 1676 ocorreria 10 minutos mais tarde do que o previsto. Roemer poderia obter outros valores mais condizentes com o tempo que a luz demora a percorrer esse trajecto se para tal tivesse feito uma extrapolação baseada noutros resultados.

As órbitas dos quatro satélites têm excentricidade e inclinações escassas. Como o equador de Júpiter e a sua órbita fazem um ângulo pequeno com o plano da eclíptica, os satélites residem praticamente no plano da eclíptica e aparecem alinhados entre eles e

[31] Ficou famoso pela descoberta da dupla refracção da luz no espanto da Islândia.
[32] Aparecimento de um astro da sombra de outro.
[33] Em anexo encontra-se o artigo publicado no *Journal des Sçavans*.

os planetas. O período de revolução do primeiro satélite Io é cerca de 42h. Roemer analisou as observações feitas na proximidade do afélio de Júpiter, onde a distância é máxima e, portanto, o efeito de excentricidade é mínimo. Cada satélite de Júpiter orbita em torno do planeta, desaparecendo da vista, eclipsando-se, enquanto Júpiter está entre nós e o satélite. O período entre dois eclipses pode ser estimado com bastante precisão. Sendo conhecido o período de translação, pode-se estimar a data de ocorrência de sucessivos eclipses.

Supondo a Terra estacionária e Júpiter fixo, o satélite move-se em torno de Júpiter uniformemente com um período T. Nestas circunstâncias os sucessivos eclipses vão suceder-se regularmente em intervalos de tempo iguais T. Por outro lado, se a Terra se afasta de Júpiter com uma dada velocidade de modo a que a distância entre eles aumente uniformemente, o intervalo de tempo entre dois consecutivos eclipses, observados da Terra, serão aumentados de T para T + t, onde t é o tempo requerido pela luz para atravessar a distância percorrida pela Terra no tempo T + t. Por sua vez, se a Terra se aproximar de Júpiter, o tempo entre dois consecutivos eclipses, vai diminuir da mesma maneira. Agora, tendo em conta os movimentos dos planetas em torno do Sol, a distância entre a Terra e Júpiter aumenta durante a parte sinódica[34] de revolução e diminui durante a outra. Ou seja, o período T vai ter um aumento e mais tarde uma diminuição. Este aumento e diminuição, descoberto por Romer, acontece conforme a Terra se aproxima ou afasta de Júpiter. Assim, conclui-se que a luz se propagava com velocidade finita.

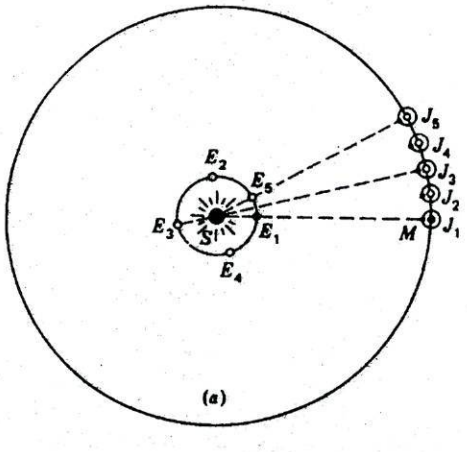


Figura 1: Princípios da determinação astronómica de Romer da velocidade da luz por observação das luas de Júpiter. A figura mostra-nos a órbita da Terra e Júpiter em volta do Sol (S) e um

dos satélites Io (M) de Júpiter. O satélite de Júpiter tem um período de revolução T_0= 42h 28 min 16s e é determinado pelo tempo de duas passagens consecutivas na sombra do planeta.

Por ventura, terá sido Cassini o primeiro a falar que a desigualdade de ocorrência dos eclipses do primeiro satélite de Júpiter se deve ao facto de a luz se propagar com velocidade finita. Analisando os manuscritos publicados na altura e principalmente o do *Journal des Sçavans*, restam-nos poucas dúvidas sobre quem teria feito a descoberta. Quando Roemer apresenta a sua teoria na Academia, a 21 de Novembro de 1676, Cassini mostra-se como o seu maior adversário, continuando ao longo de alguns anos a contrariar a ideia de Roemer.

A 26 de Março de 1678 Roemer apresenta à Academia o artigo *Confirmatio doctrinae de mora Luminus ex novis observationibus anni 1677* em que ele confirma a sua teoria do atraso da luz com novas observações feitas no ano de 1677.

Em 1693, Cassini introduz nas suas tabelas uma função empírica, que tem em atenção o facto de a luz demorar cerca de 10 minutos a percorrer a distância entre o Sol e a Terra, resultado obtido por Roemer para o primeiro satélite.

Roemer não publicou um valor para a velocidade da luz, apenas refere que a luz demora dez minutos a percorrer a distância entre o Sol e a Terra apesar de na altura já se saber o valor da distância da Terra ao Sol.[35]

2.1.4 A teoria da luz de Huygens e a descoberta de Roemer

O *Traité de la lumière* de Huygens de 1690[36], foi publicado depois da descoberta de Roemer e escrito por Huygens durante a sua estadia em Paris. Ele, desde 1672, interessou-se pela propagação da luz e edificou a sua teoria postulando para a luz uma velocidade finita. A descoberta de Roemer teve algum impacto na obra de Huygens e no desenvolvimento da sua teoria ondulatória. Para Huygens, a luz consiste num movimento da matéria, mas sem transporte de matéria. Dois factos que a experiência demonstra: a elevada velocidade a que a luz se espalha por toda a parte e a facilidade

[34] Tempo que um planeta gasta entre dois estados consecutivos de conjugação (astros com a mesma ascenção recta) com o Sol.

[35] O valor para a velocidade da luz, utilizando o valor para o diâmetro da órbita da Terra encontrado por Cassini, Picard e Richer, seria aproximadamente 215000Km/s. Na altura o mais importante era saber que a luz se propaga com velocidade finita e não propriamente o seu valor.

[36] O *Traité* foi escrito em francês e apresentado a Academia em 1678 mas só foi publicado em 1690. Huygens desejava melhorar alguns aspectos e traduzir o livro para latim, mas entretanto foi-se interessando por outros assuntos, demorando muito tempo a concluir a tarefa.

com que a luz vem de diferentes locais atravessando uns e outros. Huygens recorreu-se da analogia entre o som e a luz. Tal facto levou-o a escolher uma teoria ondulatória para explicar a propagação das ondas luminosas. Houve necessidade de recorrer a um suporte para a teoria ondulatória, o éter. Este fluído misterioso, subtil, que penetra todos os corpos e enche todo o universo, de propriedades múltiplas que só é abandonado no início do século XX, com a surgimento da teoria relatividade. Quando Huygens apresentou o seu trabalho na Academia das Ciências de Paris em 1678, a descoberta da velocidade finita da luz já tinha sido feita por Roemer, mas não se sabe se o mesmo se passou quando ele elaborou a sua teoria. No seu *Traité* ele afirma que, das observações terrestres e celestes, somente podemos concluir que a propagação da luz é extremamente rápida.

Do *Traité de la lumière* extrairmos o seguinte "*Quando consideramos a extrema velocidade com que a luz se espalha por todos os lados e como vem de diferentes regiões, mesmo para as directamente opostas, os raios atravessam uns e outros sem obstáculos. Podemos, então, entender que quando vemos um objecto luminoso, não pode ser por qualquer transporte de matéria vindo até nós do objecto, da mesma forma que uma bala atravessa o ar ... a luz leva tempo na sua passagem, e resulta que este movimento conferido à matéria é sucessivo e, que por consequência, ele se espalha, como o som, pelas superfícies por ondas esféricas*".

Como Descartes, Huygens em 1678 estuda a consequência de uma velocidade finita da luz sobre o desenrolamento observado dos eclipses da Lua. Ele atribui o tempo de dez segundos para a luz percorrer a distância Terra-Lua, facto que torna a variação do ângulo Sol-Terra-Lua imperceptível, não se podendo deduzir se o movimento da luz é instantâneo.

Huygens, ao contrário de Descartes, Newton e Hooke[37], concluiu que a velocidade da luz diminui ao penetrar em meios mais densos.

Em 16 de Setembro de 1677, Huygens escreveu a Roemer a informá-lo que tinha lido recentemente a sua comunicação de 21 de Novembro de 1676, na Academia de Ciências de Paris, felicitando-o pela sua descoberta. Com base na descoberta de Roemer, Huygens refere que a velocidade da luz é 600 mil vezes maior que a velocidade do som. Acrescenta: " *é diferente de ser instantânea, porque existe diferença*

[37] Robert Hooke (1635-1703) observou os fenómenos da difracção. Estudou os padrões de interferência coloridos formados por películas delgadas e concluiu que estes eram devido à interacção entre a luz reflectida na superfície frontal e posterior do filme.

entre uma coisa finita e infinita". Ele considerava a velocidade do som de 351m/s, o que equivale para a velocidade da luz o valor de 210000Km/s. A descoberta de Roemer, no fundo, foi reconfortante para Huygens, visto que foi de encontro ao que ele tinha postulado.

2.1.5 A descoberta de Roemer e a sua aceitação

Enquanto que em Paris aconteciam grandes descobertas, o Observatório de Greenwich com menos recursos pouco podia fazer. Flamsteed, astrónomo real, limitava-se a fazer um catálogo das estrelas. Uma tarefa que demorou vários anos a realizar, e em relação à qual teve alguma relutância em publicar. Tal facto originou picardias com outros cientistas, nomeadamente Newton.

Em Julho de 1677, é publicado no *Philosophical Transactions* um artigo sobre a experiência realizada em Paris por Roemer, que demonstra que a luz se propaga no tempo. Este artigo é uma fiel tradução dos escritos de Roemer publicados no *Journal des Sçavans* de 7 de Dezembro de 1676.

Um dos físicos da altura que tomou conhecimento desta descoberta foi Flamsteed. O seu interesse residia principalmente nas efemérides dos satélites de Júpiter, pois estava ocupado na determinação das distâncias existentes entre os planetas e as estrelas e na determinação da longitude.

Flamsteed acreditou na ideia de Roemer e divulgou-a várias vezes em conferências. Num dos seus escritos a Newton, expôs a ideia de Roemer, ficando Newton com a ideia de que a luz tinha uma velocidade finita, que fora várias vezes confirmada por astrónomos. Em Maio de 1679, Roemer visita a Inglaterra e encontra-se com Hooke, Halley e Flamsteed, além de outros membros da Academia. É natural que durante este encontro Roemer tenha falado da sua descoberta.

Hooke apesar de acreditar na qualidade de Roemer como astrónomo, não aceitou a ideia de a luz não se propagar instantaneamente, admitindo não ser esta a razão para a desigualdade da ocorrência dos eclipses dos satélites de Júpiter. Para ele a causa podia ser a influência que o Sol e os planetas, podiam ter sobre o movimento do satélite e, por outro lado, as observações não serem exactas. Mas a sua oposição baseava-se sobretudo na sua teoria da luz apresentada algum tempo depois, implicar uma transmissão instantânea da mesma. Hooke refere que o valor encontrado para a velocidade da luz

está para além da imaginação e, por isso, deixa de haver razão para não considerar a propagação da luz instantânea.

Ele observou os fenómenos da difracção e interferência explicando correctamente que a interferência da luz que ocorria em películas delgadas se devia à interacção entre a luz reflectida na primeira e última camada da película, propondo que a luz estava associada a um rápido movimento oscilatório do meio. Em 1665, no seu livro *Micrographia* ele critica o argumento de Descartes relativamente ao desenrolamento dos eclipses da Lua.

Em 1680, Hooke começou a ler nas reuniões da Royal Society a sua obra *Lectures of Light*. Ele refere que todas as experiências confirmam a propagação instantânea da luz. De seguida, refere a experiência de Roemer na qual este prova que a "*a propagação da luz não é instantânea, mas temporal e demora algum tempo a passagem da luz, de um objecto luminoso para o olho...mas se examinarmos a experiência com maior cuidado... não existem bases suficientes para retirar esta conclusão...mas, supondo que se prove que é temporária e não instantânea, consideremos isto excessivamente veloz que está para além da imaginação,...que se move num espaço igual ao diâmetro da Terra...em menos de um segundo...e, por isso, porque não pode ser considerada instantânea eu não vejo razão.*"

Huygens, aquando de uma visita a Greenwich em 1689, falou com Flamsteed acerca da ideia de Roemer sobre a velocidade finita da luz. Este assunto também foi abordado em conferências por alguns professores, em Inglaterra. Por exemplo, Molyneux[38], um amador na área das ciências, no seu livro *Dioptrica Nova* de 1692, afirma que a luz se propaga com velocidade finita ou limitada, sendo de 10 minutos, o tempo necessário para a luz percorrer o espaço entre o Sol e a Terra, fazendo alusão aos trabalhos de Halley e Flamsteed.

2.1.6 O problema da velocidade da luz na obra de Newton

Em 1675, antes da descoberta de Roemer, Newton atribuía um valor elevado à velocidade da luz referindo que "*é possível que sejam necessárias uma ou duas horas, se não mais, para a luz chegar do Sol aos nossos olhos*".

[38] Foi com a luneta de seu filho que Bradley descobriu o fenómeno da aberração estelar.

Newton começou então a atribuir à luz um carácter mecanicista. Foi a partir de uma carta sua a Oldenburg, em 1672, através de uma frase mal formulada que se atribui a Newton a preferência de uma concepção material para a luz. Ele propôs que a luz são corpúsculos, pequenos e rápidos, que são projectados dos corpos luminosos a grandes distâncias num intervalo de tempo pouco sensível.

É natural que antes de 1684 Newton não tenha conhecimento da descoberta de Roemer sobre a velocidade finita da luz. Terá sido numa carta enviada por Flamsteed a Newton que este teve conhecimento da descoberta de Roemer. Flamsteed transmite a Newton a influência da velocidade da luz no cálculo das efemérides dos satélites de Júpiter, na qual Roemer conclui que a luz demora dez minutos a percorrer a distância entre o Sol e a Terra. No seu livro *Principia mathematica,* Newton menciona que a luz se propaga com velocidade finita e que se comprovava pela observação dos fenómenos dos satélites de Júpiter, referindo que a luz demora dez minutos a percorrer a distância da Terra ao Sol.

Numa carta de Newton, ele diz "*baseei-me nas observações de Cassini nas quais a luz do Sol vem até nós em sete minutos, apesar de Cassini dizer que não é esta a causa do fenómeno*" (a desigualdade da ocorrência dos eclipses dos satélites de Júpiter). Newton no seu livro *Optics,* de 1704, fala da velocidade finita da luz e atribui essa descoberta a Roemer. Ele afirma "*a luz propaga-se no tempo, despendendo na sua passagem do Sol até nós cerca de sete minutos...*". Na edição em Latim de Opticks, em 1706, afirma que a velocidade da luz é 700000 vezes maior que a velocidade do som. No início do século XVIII, esta afirmação teve bastante influência para a aceitação da velocidade finita da luz, já que a apresentada no seu livro anterior *Principia*, não teve tantos leitores, visto que nesta altura Newton tinha uma maior reputação sendo uma autoridade magistral no mundo da ciência.

Newton considera ainda que os corpúsculos de luz vindos do Sol a elevada velocidade são os responsáveis pela cor, em função das diferentes quantidades de movimento, por um processo físico algo misterioso, dando a entender que os corpúsculos são eles mesmos os raios coloridos. Newton refere que os fenómenos da refracção e das cores estão interligados e que é impossível compreender um isolado de outro. Refere ainda, que um raio colorido possui uma singularidade que o distingue de outro raio e esta revela-se nos olhos sob a forma de cor, manifestando uma refrangibilidade única. Ele explicou a diferença na refracção das cores com a diferença de periodicidade que é uma noção principal da óptica ondulatória.

Baseando-se na obra de Descartes *Dioptrique*, Newton refere o seguinte: "*observem que os raios que se movem mais lentamente são mais refrangentes do que os que se movem mais rapidamente*"

No seu livro *Principia,* Newton refere uma hipótese quase gravitacional para os fenómenos da luz. Ao movimento dos corpos muito pequenos está associada uma força centrípeta, dirigida pela parte de um corpo muito grande. É lógico que esta força centrípeta não pode ter influência nos corpúsculos sem modificar a sua velocidade. Ele atribui uma força refringente na razão inversa das massas, concluindo que quanto menor forem os corpúsculos, mais a força os atrai. É por esta razão que Newton refere no seu livro a descoberta de Roemer, em que a luz tem uma velocidade finita. É com base nesta diferença de influência que Newton arranja um mecanismo para explicar o fenómeno da dispersão das cores.

Em 1691, Newton escreve a Flamsteed perguntando-lhe o seguinte: "*vós que fazeis as observações dos satélites de Júpiter, gostaria de saber, na largura das longas lunetas, a luz do satélite tende ao vermelho ou ao azul no instante que precede o desaparecimento do satélite, ou se a luz vem até nós mais encarnada ou mais pálida?*" Newton faz esta questão a Flamsteed porque se os corpúsculos têm velocidades diferentes, que suscitam cores diferentes, é natural que na altura dos eclipses dos satélites de Júpiter ocorram alterações na cor. Newton mais tarde abandonou esta hipótese.

2.1.7 Cronologia dos acontecimentos

1638 - É publicado o livro de Galileo, *Diálogos sobre duas Novas Ciências*, onde é relatada a primeira tentativa para determinar a velocidade da luz.

1669 - Cassini chega a Paris para se tornar director do Observatório de Paris.

1671 - Picard visita Copenhaga e convida Roemer para trabalhar no Observatório.

1672 - Chegada de Roemer a Paris.

1672/1673 - Cassini, Picard e Jean Richer determinam a distância da Terra ao Sol.

1676 - Huygens deixa Paris.

- Em Setembro, Roemer prevê que o eclipse previsto para 9 de Novembro ocorrerá dez minutos mais tarde.
- A 9 de Novembro, observa-se que o eclipse do primeiro satélite ocorre dez minutos mais tarde, como Roemer tinha previsto.

- A 21 de Novembro Roemer explica à Academia que o atraso se deve ao facto de a luz se propagar no tempo.
- A 28 de Novembro, Roemer discute os seus resultados na Academia, sendo atacado por Cassini.
- A 5 de Dezembro, na reunião da Academia, Cassini apresenta os seus argumentos contra a teoria de Roemer.
- A 7 de Dezembro, Roemer publica o seu artigo no *Journal des Sçavans*.

1677 - É publicada na *Philosophical Translations* a versão inglesa do artigo de Roemer.

- Em Setembro Huygens felicita Roemer pela sua descoberta.

1678 - Huygens regressa a Paris e apresenta à Academia o *Traité de Lumière*.

- A 26 de Março, Roemer apresenta à Academia o artigo *Confirmatio doctrinae de mora luminis ex novis observationibus anni 1667*.

1679 - Roemer visita a Inglaterra.

1680/1682 - Hooke lê *Lectures of Light* nas reuniões da Royal Society.

1682 - Roemer regressa a Copenhaga.

1684 - É publicado *Principia Mathematica* de Newton, em que ele refere a descoberta de Roemer.

1704 - É publicado *Optics* de Newton. Em vez de 10 minutos, ele atribui 7 ou 8 minutos ao tempo que a luz demora a percorrer a distância do Sol à Terra.

1710 - Roemer morre em Copenhaga.

1729 - Em Janeiro, Bradley publica os resultados da descoberta da aberração da luz.[39]

2.2 A aberração estelar

" Por fim conjecturei que todo o fenómeno (aberração) até agora mencionado procede do progressivo movimento da luz e da Terra..."

James Bradley

2.2.1 A experiência de Bradley

Em meados do século XVIII, quando a ideia de Roemer sobre a velocidade da luz estava já bastante divulgada, uma nova prova veio confirma-la. Esta prova está

contida numa carta de James Bradley[40] a Halley, a quem sucedeu em 1742 como astrónomo real, para inclusão na revista *Philosophical Transaction*. Halley tinha sucedido a Flamsteed.

Bradley desejava confirmar uma hipótese, apresentada por Hooke, no seu *livro An attemp to prove the montion of the Earth from observations* (London, 1674), querendo registar a paralaxe de uma estrela fixa. Em 1725, já se sabia que o desvio de paralaxe de uma estrela devia ser muito pequeno. Meio século antes Hooke registou, durante um ano, uma mudança na posição de γ de Dragão (uma estrela brilhante na constelação Dragão) e atribuiu esta alteração à paralaxe. Outros observadores não conseguiram confirmar os resultados de Hooke.

Bradley e Samuel Molyneux, um amador abastado na área das ciências que possuía uma luneta bem melhor do que a de Hooke, consideraram importante repetir o trabalho de Hooke com a maior precisão possível. Escolheram a mesma estrela devido ao facto de esta transitar perto do zénite (o ponto por cima das nossas cabeças), de ser possível observá-la de dia e de noite, de ser brilhante e de estar perto de estrelas "próximas". Como a estrela transita perto do zénite, a correcção devida à refracção é pequena.

A paralaxe duma estrela é o seu aparente deslocamento resultante das mudanças do ponto de observação, motivadas pelo movimento da Terra na sua órbita. Devido à paralaxe, estas estrelas parecem mudar de posição relativamente às estrelas distantes, quando são vistas de pontos diferentes da órbita terrestre. Estas mudanças permitem conhecer a distância às estrelas. Desde que o aparente deslocamento da estrela seja de 90° à frente do da Terra, verifica-se que o efeito da paralaxe é causar à estrela, que é observada numa direcção perpendicular ao plano da órbita terrestre, mover-se num pequeno círculo com uma fase diferente de $\pi/2$ do movimento da Terra. O diâmetro angular destes círculos é muito pequeno, menos do que um segundo do arco para as estrelas mais próximas[41]. Nesta altura, os críticos da teoria de Copérnico argumentavam

[39] Grande parte da informação desta parte do capítulo foi retirada do artigo *A spectacle in two acts with a prologue and an epilogue* de Andrzej Wróblewski e do livro *Roemer et la vitesse de la lumière* de René Taton.

[40] Bradley (1693-1762) realizou outras importantes descobertas entre as quais a da nutação, pequeno balanço em dezoito anos do eixo terrestre. No final da sua vida, Bradley foi mal amado pelos seus conterrâneos por introduzir em Inglaterra, com muita lógica, o calendário gregoriano.

[41] Para estas diferenças sazonais podemos calcular a paralaxe estelar heliocêntrico, o que é aproximadamente a razão entre a distância da Terra ao Sol e a distância da estrela à Terra. Estas paralaxes são muito pequenas. Para as estrelas mais próximas, de grande brilho e visíveis na latitude de Portugal, por exemplo Sírio, o ângulo de paralaxe é cerca de 0,371"; não existiam até ao início do século XIX

que a falha na detecção da paralaxe estelar era uma evidência contra a teoria heliocêntrica. Os defensores da teoria de Copérnico argumentavam que a ausência de um efeito observável era devido à maior distância entre a Terra e a estrela do que a distância entre a Terra e o Sol.

Bradley e Molineux foram ajudados por George Graham, um perito na construção de instrumentos, na construção de um telescópio que permitia detectar efeitos pequenos com uma elevada precisão. Para fazerem a observação eles usaram um círculo meridiano ligado verticalmente a um pilar de modo a ficar fixo. Quando a estrela entra no campo do telescópio montado verticalmente e atravessa o campo de visão todas as noites, até desaparecer na outra extremidade, qualquer mudança na declinação da estrela será vista como uma mudança no caminho da estrela ao longo do campo.

A 3 de Dezembro de 1725, Molineux iniciou as observações de γ de Dragão. As medições foram feitas segundo a direcção norte-sul. Molineux deitou-se no chão da sua mansão em Kew, lugar perto de Londres, e colocou o olho na ocular de um telescópio colocado na vertical, pregado ao lado Sul de uma chaminé, onde um telhado aberto, permitia fazer as observações do céu. Passavam 18 minutos da meia-noite quando a estrela γ de Dragão entrou no campo de visão do telescópio. Movendo o tubo do telescópio na direcção norte-sul, ele fez com que a linha da mira do telescópio bissectasse a estrela, durante todo o seu transito no campo de visão do telescópio. Este alinhamento servia de base de referência para as medições seguintes. Com este instrumento eles podiam ler até ao segundo do arco deslocamentos da estrela. A precisão do instrumento dependia da estabilidade da chaminé e do alinhamento da linha de prumo com a vertical. Qualquer mudança de posição das escoras que suportavam o telescópio ou qualquer deflexão da linha de prumo afectavam a posição de referência.

instrumentos que permitissem fazer tais medições. A paralaxe estelar foi medida pela primeira vez por Wilhelm Bessel em 1838. Ele obteve o valor de 0,3 segundos do arco para a estrela 61 de Cisne.

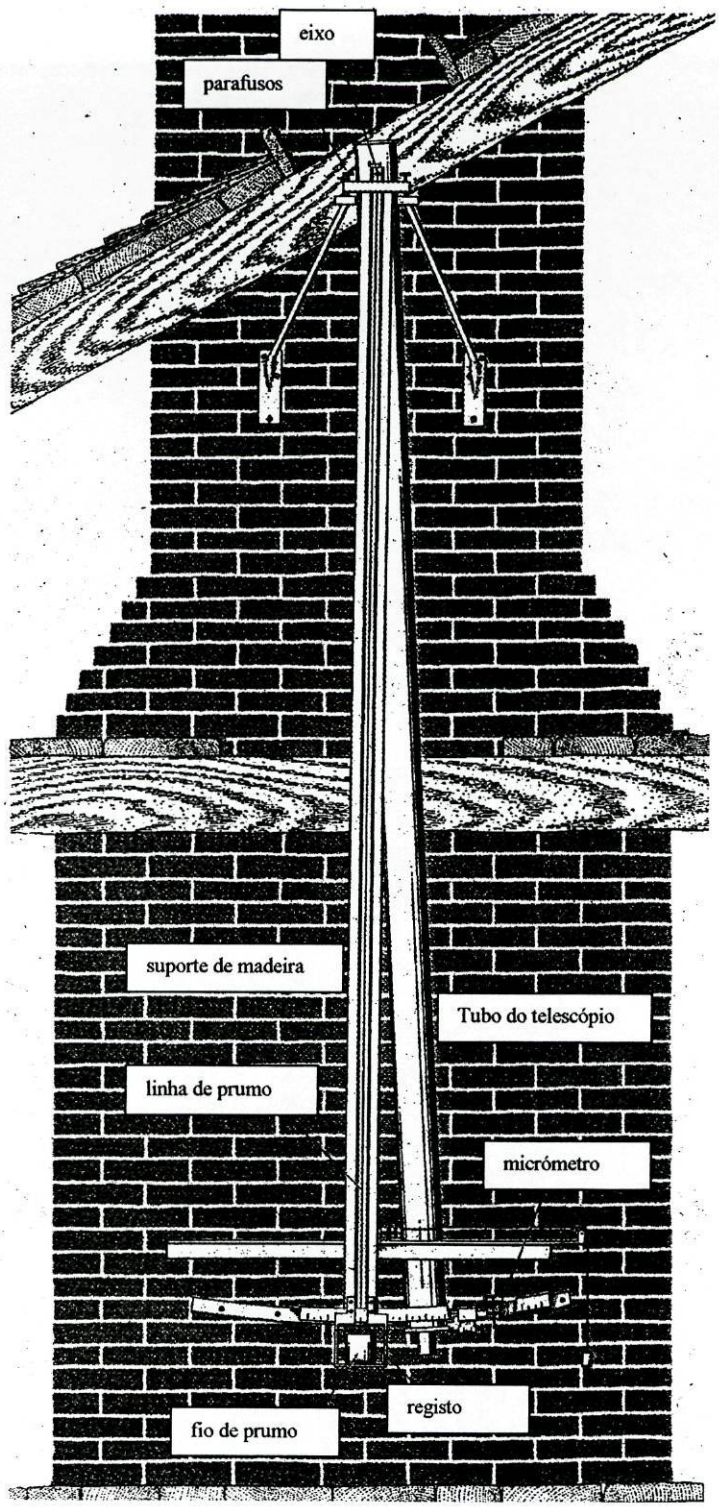


Figura 2: O telescópio usado por Bradley

A 17 de Dezembro Bradley foi a Kew e, apesar de não ter razões para observar a estrela γ de Dragão, visto que as observações de 5, 11 e 12 desse mês mostraram que a estrela se encontrava na mesma posição de 3 de Dezembro e como ele disse "*era uma altura do ano onde não se deviam registar alterações sensíveis na posição da estrela*

devido a paralaxe", resolveu observá-la e apercebeu-se que ela se encontrava numa posição mais a Sul. A 21 de Dezembro, Molyneux e Bradley observaram novamente γ de Dragão e verificaram que ela passava ao longo da linha de marca quando o telescópio é apontado para Sul 3,5" de arco relativamente ao dia 3 de Dezembro. A 26 de Março, a estrela encontrava-se 21" de arco a Sul relativamente ao dia 3 de Dezembro. A 12 de Junho a estrela encontra-se pela primeira vez a Norte e a 26 de Dezembro de 1726, encontra-se novamente a Sul, 6,9" de arco. Até 1727, eles fizeram em Kew mais de 80 observações.

A rápida mudança da declinação de 3,5" de arco, em 18 dias, em Dezembro de 1725, foi uma completa surpresa para Bradley. Ele não encontrou, imediatamente, a justificação para tal.

Bradley procurou então a causa deste fenómeno. O efeito não devia ser devido à paralaxe, pois esta seria maior em Março e Setembro, onde a mudança de um dia para o outro, do ponto de posição da Terra ao longo da direcção Norte-Sul, seria maior (hoje sabemos que a velocidade do observador faz um ângulo recto com o plano norte-sul quando γ de Dragão está por cima de nós em Dezembro e Junho e, portanto, a alteração do ângulo de aberração é maior). Além disso, a direcção do movimento da estrela é para Sul, enquanto que qualquer movimento devido à paralaxe naquela altura do ano devia ser para Norte.

Bradley ainda chegou a duvidar da precisão do instrumento, mas depois de uma análise cuidadosa abandonou essa hipótese. Molineux verificava constantemente a estabilidade das escoras de suporte do telescópio e, mesmo depois de dias de tempestade, nenhum efeito sensível foi registado.

Ele também considerou a hipótese da nutação ou o vacilar do eixo terrestre. Molineux e Bradley verificaram que a estrela Auriga, a "anti-Dragão", que cruzava o campo de visão 12 horas depois de γ de Dragão, movia-se para Norte, mas apenas 5 segundos do arco, enquanto que γ de Dragão se movia para Sul 9,1" de arco. Devido a esta diferença Bradley procurou outra explicação para o fenómeno, apesar de pensar que a nutação podia ser uma causa parcial a ter em consideração. Ele mostrou, 20 anos depois, que este fenómeno existe.

Outra das hipóteses consideradas foi a refracção atmosférica. Esta hipótese foi abandonada, pois outras observações levaram a refutá-la. Eles verificaram que a magnitude do desvio depende do ângulo da estrela com o plano da órbita terrestre.

Bradley construiu um novo instrumento para confirmar e explicar as observações feitas em Kew e montou-o em Wansted, perto de Londres. Com este novo instrumento era possível observar outras estrelas situadas em diferentes pontos da esfera celeste e, além disso, tinha maior precisão do que o utilizado em Kew, podendo ser ajustado até um quarto do segundo. Ele começou as observações a 17 de Agosto de 1727 e, ao longo de dois anos, observou um diferente número de estrelas noutras regiões do céu e descobriu que também elas têm um pequeno movimento no espaço em torno da sua posição média. Verificou que, devido à paralaxe, os desvios obtidos estavam três meses desfasados com o inicialmente esperado.

Concluiu que a mudança da declinação da estrela era determinada pela posição da Terra em relação ao solstício[42]. Ele escreveu " *eu descobri o que parece ser uma lei geral, válida para todas as estrelas...que se encontravam mais a norte ou mais a sul, quando passava sobre o meu zénite às 6 horas, seja de manhã ou de tarde... e relativamente aos pontos cardinais da eclíptica, o aparente movimento de todas as estrelas é sempre no mesmo sentido.*" Como todas as estrelas não tinham a mesma variação na declinação, ele procurou então determinar a regra que regulava este movimento. Em Setembro de 1727, ele pensou que o movimento era proporcional ao seno do ângulo entre a linha que une a estrela à Terra e a linha do plano da órbita terrestre, ou seja, o seno da latitude da estrela. Mas como as observações não correspondiam perfeitamente a esta hipótese ele resolveu estudar melhor o problema. Entretanto, Molineux morre em 1728, e seis meses mais tarde Bradley descobre a explicação do fenómeno.

Segundo Rigaud, um historiador do final do século XVIII, ele chegou à explicação do fenómeno aquando de uma viagem pelo Tamisa e inspirado numa resposta dum marinheiro. Num dia de Setembro de 1728, Bradley verificou que o vento parecia mudar constantemente de direcção e questionou o marinheiro sobre o facto observado. Ele respondeu que a mudança de direcção da bandeira no topo do mastro se devia meramente à mudança do curso do barco, mantendo o vento a mesma direcção. Bradley ficou espantado com a afirmação do marinheiro.

Substituindo o vento pela luz que vem da estrela, substituindo o barco pela Terra movendo-se em torno do Sol, a mudança de direcção do barco é agora a contínua mudança de direcção da Terra na sua órbita circular. Então a bandeira indica a aparente

[42] Momento em que o Sol alcança qualquer dos dois pontos mais afastados do equador celeste. Ocorre a 21 de Junho e a 21 de Dezembro.

direcção onde se pode ver a estrela, direcção que depende da velocidade da luz vinda da estrela e da velocidade da Terra na sua órbita. A explicação de Bradley para este efeito é que a aparente direcção da luz que vem de uma estrela para a Terra é alterada pelo movimento da Terra na sua órbita. O observador e o seu telescópio são levados pelo movimento da Terra a uma velocidade de cerca de 29,6 Km/s e se o seu movimento for perpendicular à direcção da estrela, o telescópio deve ser inclinado delicadamente no sentido do movimento da Terra. A razão é igual à que envolve uma pessoa que caminhando à chuva deve inclinar o seu guarda chuva para a frente de modo a manter os seus pés secos. Bradley, na carta escrita a Halley para ser lida à Royal Society a 9 e 16 de Janeiro de 1729, não menciona este acontecimento. Nesta carta ele refere "*por fim conjecturei que todo o fenómeno até agora mencionado procede do progressivo movimento da luz e da Terra na sua órbita. Para eu compreender isto, verifiquei que se a luz se propaga no tempo, a aparente posição de um objecto fixo não será a mesma quando o olho está em repouso, ou como quando se está a mover numa direcção qualquer que une a linha que passa pelos dois, olho e objecto; e quando o olho se move em diferentes direcções, a aparente posição do objecto será diferente.*"

Esta hipótese justificava os movimentos observados. A estrela γ de Dragão aparecia na posição mais a Sul em Março, quando observada ao nascer do Sol, porque nessa altura do ano a órbita da Terra em torno do Sol origina uma máxima velocidade na direcção Sul. A estrela aparecia numa posição mais a Norte em Setembro, quando observada no início da noite, porque nessa altura do ano o movimento da órbita da Terra origina o máximo de velocidade na direcção Norte.

Consideremos a figura que descreve a órbita da Terra em torno do Sol e uma estrela observada em intervalos de três meses. A altitude da estrela em relação à eclíptica é o ângulo θ_0. Devido ao movimento da Terra, espera-se que a altitude seja máxima quando a Terra se encontra na posição 2 e mínima quando se encontra na posição 4. Bradley verificou que a altitude era máxima na posição 3 e mínima na posição 1.

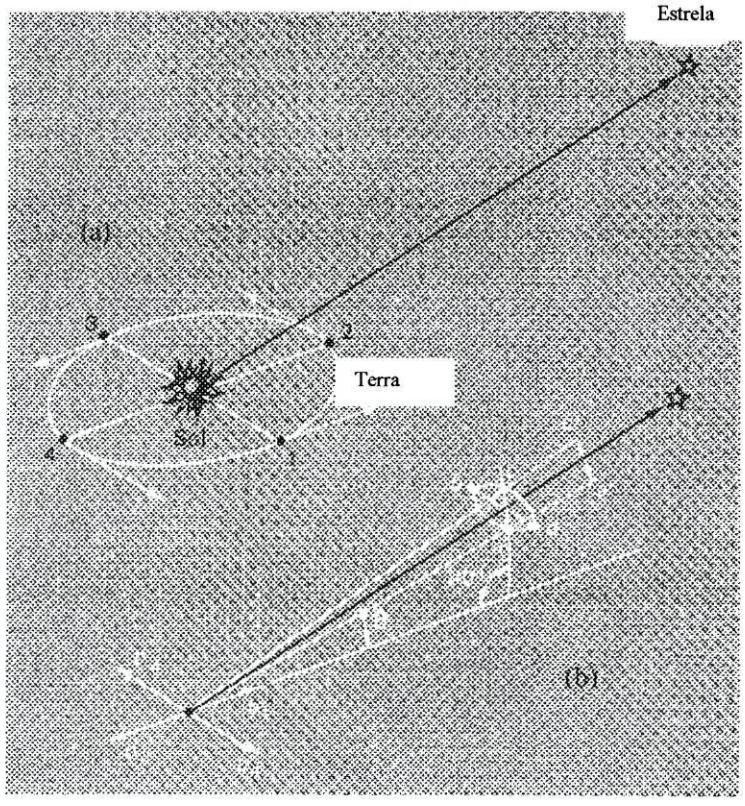


Figura 3: A aberração estelar.

A hipótese da aberração também implicava uma dependência da latitude da estrela. A amplitude máxima ocorre para uma estrela que está situada numa linha perpendicular ao plano da órbita terrestre. Para essas estrelas, a velocidade orbital da Terra faz sempre um ângulo recto relativamente à linha de visão. Para estrelas a menores latitudes, a componente da velocidade perpendicular à linha de visão é reduzida na proporção do seno do ângulo da latitude. Para estrelas na direcção do movimento orbital da Terra não haverá mudanças na declinação Norte-Sul.

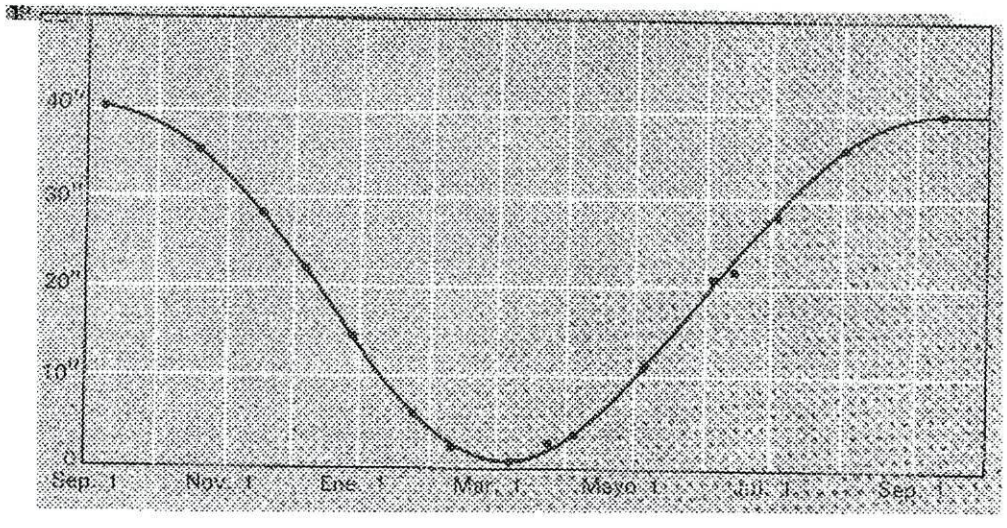


Figura 4: Dados de Bradley acerca da componente norte-sul da aberração da estrela γ de Dragão

O gráfico mostra alguns valores das observações feitas por Bradley à estrela γ de Dragão. Podemos verificar que a posição aparente da estrela varia na direcção norte-sul (declinação) no decurso de um ano. A componente este-oeste (ascensão recta) não foi registada, por dificuldades práticas. Os dados de Bradley correspondem ao eixo menor da elipse da aberração.

Bradley não pode fazer uma prova teórica do valor obtido pois nessa altura o valor da velocidade da luz não era conhecido com uma precisão suficiente. Mas, como ele estava certo da explicação do fenómeno, utilizou os dados do ângulo da aberração e o valor da velocidade da Terra em redor do Sol para determinar um valor mais preciso para a velocidade da luz. Ele (utilizando as observações de oito estrelas em Wansteead) obteve o valor médio de 20,25 segundos de arco para o ângulo de aberração de uma estrela no zénite. Utilizou este valor para calcular a tangente do ângulo de aberração, isto é, a razão da velocidade orbital da Terra e a velocidade da luz e obteve o valor de 1/10210. Com este valor e o da distância da Terra ao Sol, concluiu que são necessários 16 minutos e 26 segundos para a luz percorrer a distância igual ao diâmetro da órbita terrestre. Concluiu também que as suas observações forneciam o valor mais preciso para a velocidade da luz obtida até essa época.

Relativamente à questão da paralaxe, Bradley concluiu que o ângulo não devia ser maior do que dois segundos de arco para as oito estrelas que observou em Wanstead e menor do que um segundo de arco para a estrela γ de Dragão.

A descoberta da aberração de Bradley introduziu uma nova precisão nas medições astronómicas e ajudou a defender a teoria de Copérnico. Além disso, foi uma das primeiras contribuições para a teoria da relatividade, conduzindo à interpretação do fenómeno por Fresnel e à experiência de Michelson.

2.2.2 O ângulo de aberração

No nosso dia a dia estamos familiarizados com fenómenos que envolvem estes princípios. Por exemplo, num carro parado num dia de chuva vemos as gotas de chuva cair na vertical. Mas quando o carro se move, as gotas de chuva parecem vir de uma direcção oblíqua.

Se a luz passa pelo centro de um telescópio e é vista pelo olho, o telescópio deve ser inclinado ligeiramente na direcção do movimento do observador. Se o

telescópio é usado para medir o ângulo entre a direcção da estrela e uma direcção de referência (a direcção ao longo do equador celestial ou ao longo do plano da eclíptica), então o ângulo é aumentado se o movimento do observador se afasta da direcção de referência e diminui se o movimento é contrário a esta direcção.

Na figura 5, a luz da estrela X entra no telescópio em A de modo a que o observador veja a estrela no meio do campo de vista. O telescópio, devido à velocidade orbital da Terra v Km/s, moveu-se na direcção EE_1. Como a velocidade da luz é finita, o telescópio moveu-se para a posição E_1B. Para o observador, a estrela parece estar na direcção E_1B devido ao telescópio ter sido inclinado levemente para a verdadeira direcção da estrela na direcção em que o observador se move.

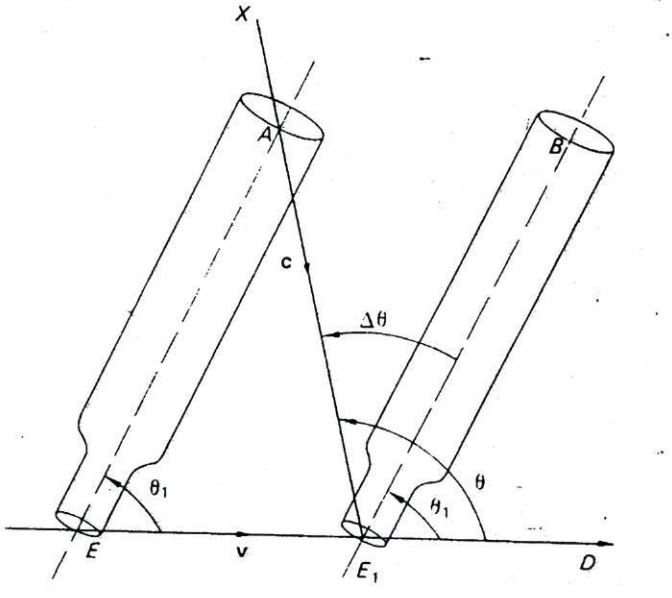


Figura 5: O efeito da aberração.

O ângulo de aberração, $\Delta\theta$, é obtido considerando o ΔAEE_1 onde a distância EE_1 e AE_1 são proporcionais a v e a c respectivamente. Se considerarmos $\measuredangle AE_1D = \theta$ e $\measuredangle AED = \theta_1$, então

$$\frac{\operatorname{sen} AEE_1}{AE_1} = \frac{\operatorname{sen} EAE_1}{EE_1}$$

ou

$$\frac{\operatorname{sen}\theta_1}{c} = \frac{\operatorname{sen}(\theta - \theta_1)}{v}$$

Então,

$$\operatorname{sen}(\theta - \theta_1) = \frac{v}{c}\operatorname{sen}\theta_1 .$$

Relembrando que θ - $\theta_1 = \Delta\theta$ é um pequeno ângulo ($v/c \sim 1/10000$), podemos exprimir $\Delta\theta$ em segundos de arco, ou seja,

$$\Delta\theta = 206265\frac{v}{c}\operatorname{sen}\theta ,$$

ou

$$\Delta\theta = k\ sen\ \theta .$$

A constante k é designada por constante de aberração e o seu valor é 20",496. O ângulo de aberração $\Delta\theta$ depende evidentemente do valor de θ, o ângulo entre a direcção da estrela e a direcção instantânea em que o observador se desloca. O efeito da aberração não seria detectado se a Terra se movesse sempre à mesma velocidade, mas as variações do sentido do movimento dão lugar a uma variação da posição aparente. Na figura 3, a posição do vector velocidade da Terra em 1 e 3 e a linha recta que une o Sol à estrela formam um ângulo θ_0. Nas posições 2 e 4 a velocidade da Terra e a linha que une o Sol à estrela formam um ângulo recto. A Terra movimenta-se, a direcção é conhecida como "ápice da Terra", onde a longitude é sempre 90° menor que a do Sol e este possui esta longitude sempre três meses antes. Aqui Bradley encontrou a explicação para o facto das suas observações estarem três meses desfasadas do inicialmente previsto por ele. No caso da aberração estelar, a estrela parece mover-se numa elipse com uma posição heliocêntrica e, precisamente no caso da aberração, é facilmente demonstrado que o maior eixo da elipse, com o valor de 40",992, é paralelo à eclíptica. Este valor pode ser obtido pela expressão

$$2\frac{v}{c} .$$

O eixo menor da elipse é obtido pela expressão

$$2\frac{v}{c}sen\theta_0 .$$

O valor do eixo maior é igual para todas as estrelas e o valor do eixo menor depende da altura θ_0 relativamente à eclíptica. A forma desta elipse depende obviamente da posição da estrela na esfera celeste. Para uma estrela na eclíptica, a elipse degenera num arco de comprimento 2k, para um estrela no pólo da eclíptica a elipse degenera num círculo.

A descoberta de Bradley pôs um ponto final na aceitação da teoria de Roemer sobre a velocidade finita da luz em Inglaterra, quarenta e três anos depois da sua grande descoberta.

2.2.3 A obra de Euler em óptica física.

A descoberta, de Roemer e de Bradley, de que a luz se propaga com velocidade finita é decisiva em toda a obra de Euler, levando-o a tratar a luz como um processo cinemático.

Euler seguiu a óptica ondulatória e, tal como Huygens, comparou a luz com o som que é transmitido pelo ar, enquanto que a luz é transmitida pelo éter, esse fluído subtil, de escassa densidade mas com uma elasticidade enorme. Ele refere que a fonte dos fenómenos eléctricos é o mesmo éter onde a luz se propaga. Euler[43] caracterizou o raio pela sua frequência, e a frequência mantém-se constante ao longo de todo o percurso óptico. Faltava então responder à questão: onde é que a frequência é maior? Na luz vermelha ou violeta? Euler oscila entre as duas respostas e mais tarde opta pela correcta.

A descoberta da aberração por Bradley fez com que Euler se interessasse pelo problema. Este fenómeno era facilmente explicado pela teoria corpuscular (a chuva deslocando-se verticalmente em relação a um observador em repouso na Terra, parece incidir no solo num ângulo diferente quando o observador se encontra em movimento), enquanto que para ser explicado pela teoria ondulatória era necessário que o éter se mantivesse imperturbado à medida que a Terra o atravessa. Ele estuda o problema, calculando o seu efeito em todos os domínios da teoria ondulatória. Assim estudou o caso do observador que está em repouso e o emissor em movimento; o caso do emissor que está em repouso e o observador que está em movimento e efectua um desvio a uma velocidade uniforme ao sistema inteiro. Repetindo o cálculo utilizando a decomposição das velocidades, ele obteve um resultado diferente do primeiro, uma diferença de segunda ordem em *v/c*. Eis, como Euler explica o facto: *"... cometeu-se um erro no raciocínio...a razão desta diferença reside no facto de supormos que a luz como o som se propaga com movimento ondulatório. É sabido que o movimento do objecto que emite os raios não afecta a velocidade deles e na realidade se o meio está em*

[43] Léonhard Euler (1707-1783) estuda o conceito de energia e define trabalho de uma força. Lançou as bases da denominada mecânica analítica.

movimento, ele combina o seu movimento com os dos raios. Deste modo ele acelera ou retarda a propagação das ondas conforme o movimento do meio segue ou opõem-se aos movimentos dos raios. É claro que argumentamos de igual forma para a luz e para o som... Uma perfeita semelhança será conservada se a luz for emitida não por um fenómeno ondulatório, mas por emissão de corpos luminosos. Se nós considerarmos que as partículas de luz que constituem o raio são injectadas de corpos em repouso com velocidade c que atribuiremos à luz, então se esses mesmos corpos se movem, eles acrescentarão o seu movimento ao dos raios, mas quer o meio se mova, ou esteja em repouso, ele não afectará de todo o movimento dos raios que pode ser considerado como no vazio..."

Euler descobriu assim a diferença fundamental entre as teorias ondulatória e corpuscular. A esta diferença chamamos hoje de princípio da relatividade (a base de toda mecânica) que é válido para a mecânica corpuscular mas não para a ondulatória, onde o éter é definido como referencial absoluto. Estas diferenças constituem uma primeira contribuição para a teoria da relatividade de Einstein. Compor duas velocidades é fácil, mas fazer o inverso, determinar um movimento observado nas suas componentes onde uma é o movimento do observador, é uma questão difícil[44]. Nunca ninguém tinha previsto a aberração e mesmo Bradley depois de a ter observado pela primeira vez, demorou alguns anos a encontrar a explicação.

2.2.4 Augustin Fresnel e a propagação da luz

Quando Fresnel[45] estudava a interferência da luz polarizada, seguindo algum do trabalho já realizado por Malus, convenceu-se que as vibrações luminosas não se podem produzir longitudinalmente, mas devem-se efectuar transversalmente, estudando assim o problema da propagação da luz. Fresnel contribuiu para a ruína da hipótese corpuscular, definindo "superficie de onda", a partir da qual explica a propagação rectilínea da luz e renova a interpretação do fenómeno de difracção. É a noção de comprimento de onda que aparece como primeira, a velocidade não é propriamente introduzida nem explícita. Esta hipótese de conceito mecanicista, necessitava de um

[44] No livro de George Gamow "The Greatest Physists from Galileo to Einstein" ele descreve um caso particular de um exercício de solução simples, mas que os físicos até ao século XX não conseguiam resolver.

[45] Augustin-Jean Fresnel (1788-1827) era um teórico, mas ao mesmo tempo, um experimentador habilidoso. Estuda a difracção da luz e descobre o carácter transversal das vibrações luminosas.

suporte material, o éter. Ele entende por comprimento de onda, que representou por λ, ao intervalo compreendido entre dois pontos do éter onde as mesmas oscilações se executam simultaneamente e no mesmo sentido.

Fresnel deve às suas reflexões sobre as propriedades elásticas do meio à "descoberta da dupla refracção". Ele analisou a transversalidade das vibrações, mostrando que o raio ordinário, caracterizado por uma mesma velocidade de propagação, qualquer que seja a direcção, efectua-se perpendicularmente ao plano levado por cada um destes raios ao eixo do cristal; enquanto que as vibrações de um raio extraordinário se produzem paralelamente ao plano conduzido pelo eixo. A velocidade de propagação, correspondente ao raio extraordinário, dependerá da direcção tomada por este último, no interior do cristal. A desigualdade da elasticidade do meio, na qual penetra o raio de luz, tem como consequência a formação de dois sistemas de ondas e, por conseguinte, de dois raios pelos quais a luz caminha com velocidades diferentes.

No século XIX, as medidas ópticas da velocidade da luz trouxeram a esperança de, por procedimentos ópticos, por em evidência o movimento absoluto da Terra. Arago estuda o problema do movimento da Terra que através do éter podia originar diferenças entre o comportamento da luz vinda de fontes terrenas e externas. Ele faz uma série de experiências destinadas a mostrar que a refracção é, conforme a teoria da emissão, variável com a velocidade da luz: o desvio produzido por um prisma não deve ser o mesmo se a luz, que penetra no prisma, vier de uma estrela quando a Terra se dirige ou se afasta da mesma. Ele não descobre qualquer diferença a nível experimental, comportando-se a Terra como se estivesse em repouso relativamente ao éter. É este aspecto que ele comunica a Fresnel.

Fresnel, em 1818, interessa-se pela experiência da aberração da luz estelar e pela experiência imaginada por Boscovich que consiste em estudar o fenómeno da aberração com uma luneta repleta de um líquido refringente e tenta encontrar uma explicação com a teoria ondulatória para o fenómeno da aberração. Para Fresnel, a hipótese conveniente é de um arrastamento parcial do éter. Há a possibilidade de ocorrer um possível arrastamento quando uma onda (ou um corpúsculo) se propaga num meio móvel, se considerarmos que o seu modo de propagação no éter seja similar às ondas em meios materiais (ar, água, etc...). O arrastamento das ondas era devido ao movimento do éter, arrastado pelo movimento da matéria, ou então o éter encontrava-se estacionário, enquanto que a matéria se movia nele, de modo que o arrastamento das ondas é causado pela acção do movimento da matéria nas ondas à medida que elas passam pela matéria.

Assim Fresnel pode explicar, de uma forma satisfatória, o problema da aberração com base na teoria ondulatória. Fresnel supõe a "densidade do éter" diferente para diferentes substâncias. Se a densidade do éter no espaço livre for ρ e numa substância qualquer ρ', quando um pedaço de matéria se move através do espaço pode ser considerado como que leva o éter como se este estivesse fixo a ele; enquanto que o éter exterior é arremessado em frente e corre esfericamente para trás, da mesma forma que um fluido onde um corpo sólido se move. Fresnel assume que a velocidade de propagação em qualquer meio varia inversamente à raiz quadrada da densidade do éter naquele meio, de forma que:

$$\frac{\sqrt{\rho'}}{\sqrt{\rho}} = \frac{v}{v'} = \frac{seni}{senr}.$$

Neste ponto de vista o éter exterior ao corpo pode ser visto como fixo, enquanto cada unidade de volume do corpo arrasta com ele e permanentemente ligada a ele uma quantidade ρ'-ρ com a velocidade v do corpo. É equivalente dizer que todo o éter dentro do corpo não é arrastado para a diante com a velocidade do corpo, mas com uma velocidade v' menor que v e determinada pela equação $\rho'v'=(\rho'-\rho)v$.

A equação para v' é:

$$v' = \left(1 - \frac{\rho}{\rho'}\right)v = \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)v$$

Fizeram-se de seguida várias experiências, como a de Fizeau e Airy, que vieram validar a hipótese de arrasto de Fresnel.

2.2.5 Experiência de Airy

A experiência imaginada por Boscovich e analisada por Fresnel, foi realizada por Airy (1801-1892), em 1872. Ele mediu o ângulo de aberração da luz usando um telescópio cheio de água. Airy verificou que o ângulo de aberração é o mesmo para o telescópio cheio de ar ou de água. Este resultado podia ser explicado assumindo que a luz é arrastada pela água no telescópio, o que veio demonstrar que a equação de Fresnel devia de estar correcta.

Supusemos, quando estudámos o problema da aberração da luz que o telescópio estava vazio, de modo que a velocidade da luz em P se mantivesse a mesma quer se movesse com o tubo ou exteriormente a este. Se o tubo for cheio com um meio no qual

a luz em P se mova com uma velocidade v', e se supusermos que o movimento da luz em P, é arrastado pelo movimento do meio que enche o tubo, a inclinação do tubo deve ser alterada para seguir a nova velocidade v'. Em relação ao movimento do meio que preenche o tubo, a luz pode ser arrastada na direcção do movimento do tubo e devido a este movimento deve ocorrer uma compensação para a inclinação do tubo se manter inalterada. Também pode ocorrer refracção na superficie do meio com o tubo, sendo difícil dizer se aberração da estrela será a mesma com o tubo cheio com uma substância ou vazio.

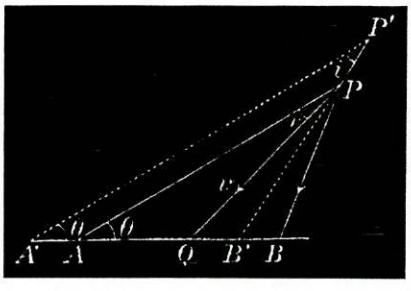


Figura 6: Experiência de Airy.

Sendo AP (ver figura 6) a direcção do eixo do telescópio e PP' a direcção da luz incidente proveniente do espaço, se o telescópio for meramente um tubo vazio, a frente de onda em P move-se para B' na direcção original de PP'. Mas, quando o telescópio é cheio com um meio refractivo, o eixo AP é normal à superficie reflectora e então o ângulo de incidência é APB', de forma a que a direcção do raio refractado é a linha PQ, fazendo um ângulo r com AP supondo o telescópio estacionário. $P'B'$ representa c, a velocidade da luz no vazio, e $A'B'$ representa v, a velocidade do observador, logo a direcção em que o tubo deve ser apontado quando vazio é $A'P'$. Mantendo a direcção do telescópio inalterada quando se enche com uma substância refractora, devemos obter a linha AP paralela a $A'P'$. Consequentemente, se PQ (c/n) representa a velocidade da luz na substância refractora em repouso e, se não houver arrastamento, a luz vai seguir pelo tubo como se o meio estivesse em repouso e, consequentemente, não atingirá Q enquanto A não atingir o ponto B determinado pela igualdade $AB=v=A'B'$. Mas se as ondas são arrastadas, a luz a partir de P será arrastada com o meio não se deslocando ao longo de PQ, mas ao longo do caminho PB em adiantamento a PQ. Quando PB é tal que $AB=v$, então o arrastamento é tal que ocorreu uma compensação completa. Para expressar isto designaremos QB pela velocidade do arrastamento, isto é, a razão em que a luz é arrastada na direcção do movimento. Denominando por v' obtemos

$$AQ=v-v',$$

e consequentemente

$$\frac{v-v'}{v}=\frac{AQ}{PQ}=\frac{senr}{sen\theta}.$$

Mas denotando $A'P'B'=APB'$ por i obtemos

$$\frac{sen\theta}{seni}=\frac{c}{v}$$

onde c é a velocidade da luz no vazio. Combinando estas duas equações, obtemos

$$\frac{v-v'}{v}=\frac{senr}{seni}\frac{v}{c}=\frac{v}{nc};$$

isto é,

$$v-v'=\frac{v^2}{n\ c}=\frac{v}{n^2},$$

e, finalmente,

$$v'=\left(1-\frac{1}{n^2}\right)v$$

Esta lei do arrastamento indica-nos que as ondas do éter devem ser levadas pela matéria em movimento com a velocidade v' na direcção do movimento, sendo esta velocidade menor do que a velocidade total da matéria na razão $(n^2-1)/n^2$.[46]

[46] A maioria da informação desta parte do capítulo foi retirada do artigo *The discovery of stellar aberration* de Albert B. Stewart e do livro *Theory of Light* de Preston.

3

Medições da velocidade da luz no século XIX.

A luz move-se mais rapidamente no ar do que na água.
(Léon Foucault[47], *Les Memoires*)

3.1.1 A Refracção da luz.

Apesar dos resultados obtidos por Roemer e por Bradley, impunha-se uma medição precisa da velocidade da luz, pois esta era uma das principais constantes da teoria das ondulações. Era imprescindível a medição da velocidade da luz em vários meios e comparar com os valores do comprimentos de onda, obtendo-se assim a duração das vibrações luminosas. Era também necessário obter noções precisas sobre a constituição do meio e, por sua vez, do éter. Uma outra preocupação dos cientistas da altura era comparar a velocidade da luz no ar e noutro meio mais denso, visto que na altura as teorias corpuscular e ondulatória eram antagónicas quanto ao valor da velocidade da luz. No início do século XIX e depois dos trabalhos de Fresnel e Young (1773-1829), poucos eram ainda os que apoiavam a teoria corpuscular de Newton. A

[47] Jean Bernard Lèon Foucault (1819 – 1868) viveu sempre em Paris. Começou os estudos em medicina, tornou-se redactor científico do *Journal des Débats*, e depois com uma tese sobre a medida da velocidade da luz, doutor em ciências físicas em 1853.Em 1862, tornou-se membro do Bureau des Longitudes e, em 1865, membro do Institut.Dois anos depois, uma cruel paralisia atacou sucessivamente as mãos, os olhos, a língua, o cérebro deste homem brilhantemente dotado e morreu em 1868, com somente quarenta e nove anos. Os trabalhos de Foucault reportaram-se a três ramos da física: óptica, electricidade e mecânica. Resolveu questões das mais diversas, com experiências decisivas. Na óptica estudou as placas fotográficas, a interferência da luz, a óptica das superfícies para a construção de telescópios. Na electricidade construiu um relógio eléctrico e estudou as correntes de indução. Na mecânica estudou o pêndulo cónico, construiu o giroscópio e helióstato e provou o movimento de rotação da terra com a rotação do plano de oscilação de um pêndulo.

teoria de Fresnel explicava os fenómenos da difracção, interferência e a propagação rectilínea da luz.

De acordo com a teoria corpuscular, quando as partículas de luz penetram num meio mais denso recebem um impulso atractivo perpendicular à superfície reflectora. O momento conserva-se na componente paralela à superfície reflectora, sendo o índice de refracção dado pela expressão *n(água)=v(água)/v(ar)*. Na teoria ondulatória, o tempo de propagação da luz é uniforme na direcção perpendicular à paralela dos raios refractados, sendo o índice de refracção dado pela expressão *n(água)=v(ar)/v(água)*.

Imaginemos um raio de luz a incidir na superfície de separação da água e ar num ponto *O*. Se o corpúsculo luminoso avança ao longo daquele raio com velocidade V_0, a teoria corpuscular admite que, muito próximo do ponto de incidência, o corpúsculo inflecte a sua trajectória, em consequência de uma "atracção" das partículas da água (mais "pesadas" que as do ar). O ângulo de refracção *r* é menor que o ângulo de incidência *i* de acordo com a experiência e, também, com esta hipótese. Ora a "atracção" referida tem de ser entendida como uma força, normal à superfície de separação ar-água, que vai pois alterar a componente vertical da velocidade da luz, e supondo que a componente horizontal não se modifica, podemos verificar através da figura que:

$$V_0 = ABseni\,,\ V_a = A'B'senr \text{ e, como } A'B'=AB,$$

teremos:

$$\frac{V_0}{V_a} = \frac{1/seni}{1/senr} = \frac{n_0}{n_a}$$

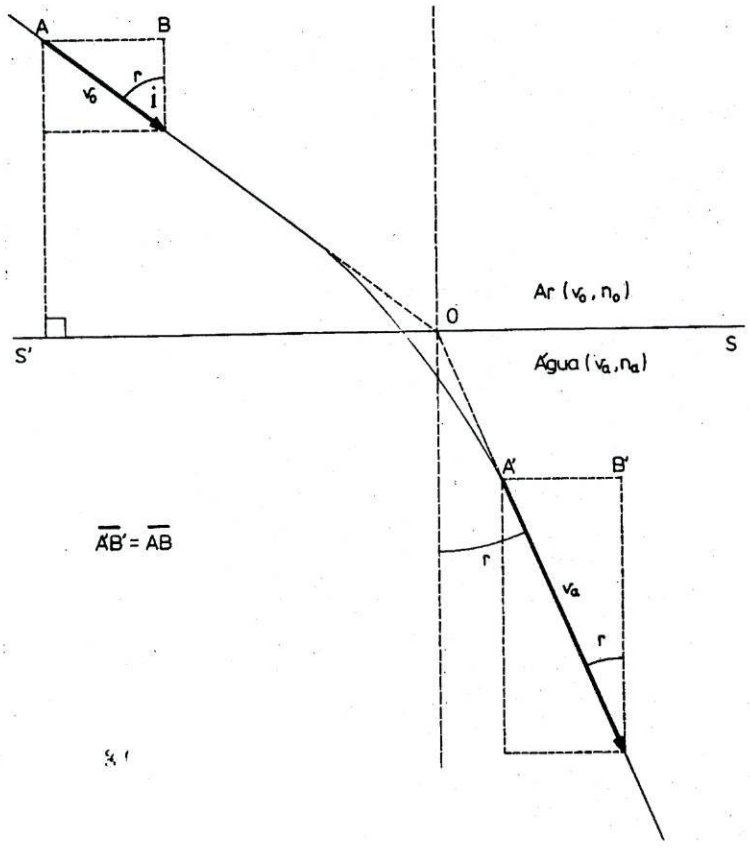


Figura 7: Refracção da luz de acordo com a teoria corpuscular.

A teoria ondulatória explica a refracção da seguinte forma. Atendendo à figura 8 e à lei de Descartes, observa-se a incidência de uma onda plana *AB* (correspondendo a um raio incidente *IO*) sobre a superficie plana *S'S* de separação de dois meios, ar e água. Escolhendo o ponto *B* de *AB* de tal modo que a perpendicular tirada de *B* à onda plana *AB* atinge a superficie de separação dos dois meios num ponto *B'*, tal que $BB'=V_0$ em que V_0 é a velocidade da luz no ar. É óbvio que a distância *BB'* é percorrida na unidade de tempo. A distância percorrida no interior do líquido a partir de *A* é a distância $AA'=V_A$ em que V_A a velocidade da luz na água. A onda refractada será representada por uma recta com origem em *B'* e tangente à circunferência com centro em *A* e raio V_A, igual à velocidade da luz na água, ou seja, o percurso na unidade de tempo a partir do ponto *A*.

Através figura, verifica-se que o ângulo $BAB'=i$

e como,

$$sen\ BAB'=BB'/AB' \text{ e } BB'=V_0$$

temos

$$seni=V_0/AB'.$$

Analogamente, verifica-se que o ângulo $AB'A'=r$ como $senAB'A=AA'/A'$ e $AA'=V_A$ temos $senr=V_A/AB'$. Comparando as duas expressões obtidas deduz-se que

$$\frac{seni}{senr}=\frac{V_0}{V_a}.$$

Mas, segundo Descartes

$$\frac{seni}{senr}=\frac{n_a}{n_0},$$

podemos escrever que

$$\frac{n_a}{n_0}=\frac{V_0}{V_a}$$

e concluir que a velocidade da luz na água é menor que no ar.

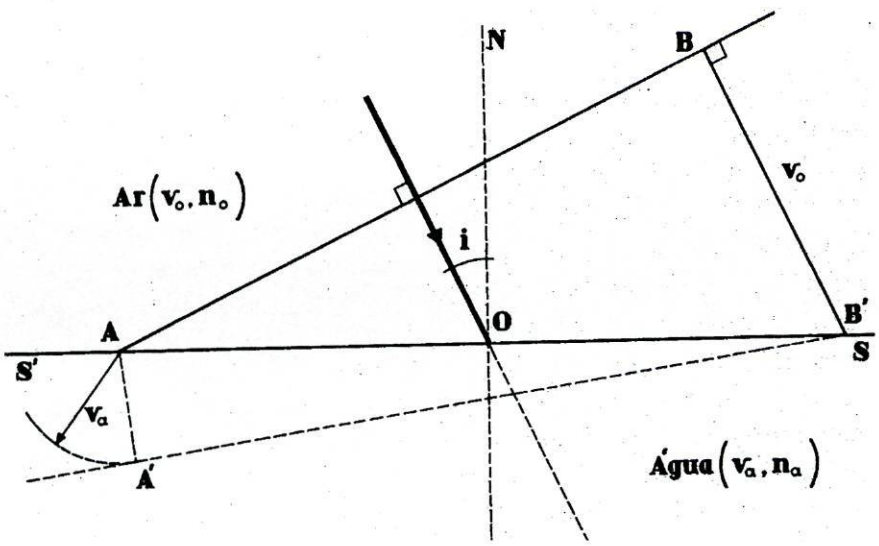


Figura 8.1: A refracção da luz de acordo com a teoria ondulatória.

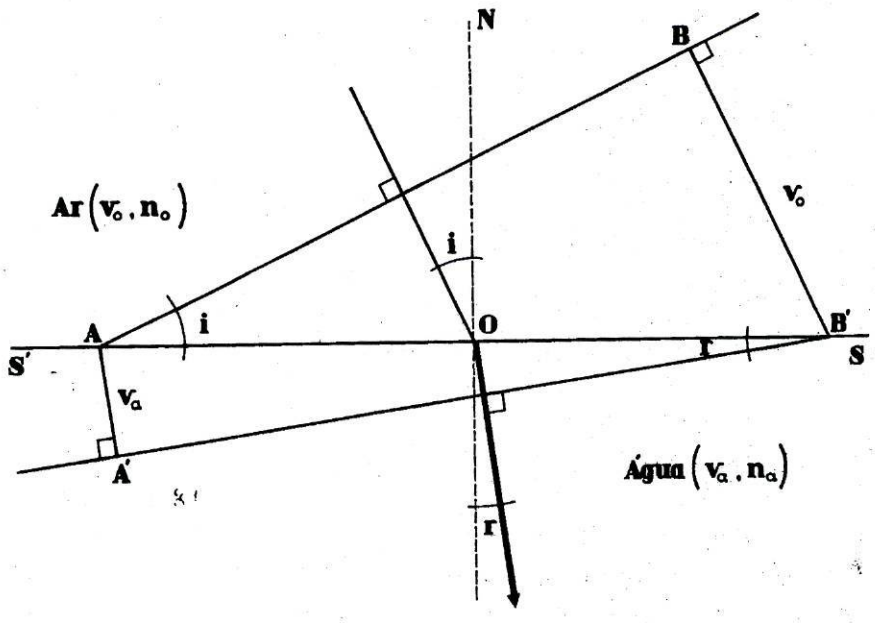


Figura 8.2: A refracção da luz de acordo com a teoria ondulatória.

A primeira tentativa para determinar a velocidade da luz usando um método terrestre deve-se a Galileo. Apesar do fracasso, principalmente devido aos meios técnicos da época, Galileo não se contentou em afirmar se esta era ou não finita e daí tentou medir o seu valor experimentalmente.

Depois de Galileo a primeira proposta para a determinação da velocidade da luz por meios terrestres coube a Wheastone (1802-1875), que foi mais tarde desenvolvida por Arago[48] (1786-1853) e Bessel (1784-1846) e que foi posta em prática por Foucault, com a utilização do método do espelho rotatório. Entretanto, Fizeau antecipou-se e imaginou um método utilizando uma roda dentada.

Wheastone tentou medir a velocidade de propagação de um agente imponderável e, embora a sua experiência fosse para a electricidade e não para a luz, ele viu o seu nome ligado à questão da determinação da velocidade da luz por ter utilizado o espelho rotatório. Wheastone, em 1834, sugeriu um dispositivo que tinha imaginado para determinar a duração de transmissão dos fenómenos eléctricos, procedimento que podia servir para medir intervalos de tempo pequenos e, para tal, utilizou um espelho rotatório que trabalhava até as 800 r.p.s., que tinha como função criar um desvio angular por reflexão de faíscas eléctricas. Wheastone deduziu a partir desta experiência um valor

[48] Dominique François Jean Arago foi um dos directores do Observatório de Paris. Trabalhando com Biot ajudou a introdução do sistema métrico, sendo o metro uma décima da milionésima parte da distância do pólo ao equador. Entre muitas outras contribuições para a óptica, verificou que a aberração é igual para todas as cores.

para a velocidade da electricidade que não estava de acordo com os resultados de medições recentes. Apesar do seu trabalho oferecer matéria para discussão, com fenómenos acessórios que complicaram o fenómeno principal, ele contribui para as realizações seguintes com a utilização do espelho rotatório com a propriedade preciosa de separar, por desvio angular de certas imagens, os instantes muito próximos que correspondem à aparição dos fenómenos "instantâneos".

Wheastone comunicou a sua ideia a outros físicos, como Arago. Em 1838, Arago foi o primeiro a sentir a importância na realização de uma experiência, que sem nos conduzir ao valor exacto da velocidade da luz em meios de refringência diferentes, se podia por em evidência a sua diferença de modo a que os físicos podessem interpretar a refracção. O instrumento utilizado por Wheastone foi adoptado por Arago, como podendo servir para julgar de uma forma decisiva as duas teorias que disputavam a explicação dos fenómenos luminosos. Arago com um dispositivo semelhante ao de Wheastone tentou medir a velocidade da luz em meios mais densos, mas nunca conseguiu concluir a experiência. Arago propôs-se a operar sobre dois raios que partiam de duas fontes situadas sobre a mesma vertical, e percorriam, ao longo de um tubo, um através do ar e o outro através de um líquido, um pequeno trajecto, até incidirem no espelho rotatório; a marcha dos dois feixes era de diferente rapidez a atravessar os dois meios diferentes. O espelho rotatório tinha como função restituir de modo diferente os instantes da sua chegada à superfície reflectora. O raio mais lento era reflectido com um ângulo maior. A sua experiência era de simples concepção, mas de difícil execução.[49] Em 1843, ele desiste de concluir a sua experiência sem ter obtido resultados conclusivos.

Ele remete para Fizeau e Foucault a tarefa de procurar a forma de concluir a sua experiência para verificar se a luz se propaga mais rapidamente na água ou no ar. Nessa altura Fizeau e Foucault deixaram de colaborar por desentendimentos pessoais, tendo cada um procurado individualmente realizar a experiência. Podia-se obter resultados conclusivos com a experiência de Arago se se utilizasse um espelho plano para fazer regressar a luz desviada ao longo do caminho para a fonte, onde se forma uma imagem fixa, mas ligeiramente desviada. Segundo Cornu a ideia foi de Foucault, mas segundo o próprio Foucault e Arago a ideia deve-se a Bessel[50].

[49] A experiência está descrita detalhadamente no livro *Memoires* de Léon Foucault e no artigo de W. Tobin da revista *Vista in Astronomy* de 1993.
[50] Informação retirada do artigo de Wiliam Tobin.

Entretanto, Fizeau antecipou-se e determinou o valor da velocidade da luz, mas não utilizou o espelho rotatório para medir pequenas fracções de tempo, mas sim, uma roda dentada, que funcionava como um obturador de luz. A ideia da utilização da roda dentada prende-se com o facto de na altura Fizeau estudar a mudança de frequência das ondas sonoras quando a fonte e o observador estavam em movimento relativo. A roda dentada servia para produzir notas de baixas frequências para as experiências.

3.1.2 Experiência de Fizeau

Fizeau depositou uma descrição da sua ideia em Janeiro de 1849 na *Académie des Sciences.*



Figura 9: O esquema da experiência de Fizeau depositado na Académie des Sciences em Janeiro de 1849.

Numa colina de Paris, Fizeau montou um aparelho constituído por duas partes distintas. Uma parte constituída por duas lunetas dirigidas uma para a outra e situadas a uma grande distância, destinadas a limitar o curso dos feixes luminosos e a reenviá-los exactamente ao ponto de partida. Uma outra parte era constituída por uma roda dentada com dentes e espaços repartidos em intervalos iguais, montada sobre um rodado ligado a um maquinismo de relógio conduzido por pesos, atingindo velocidades variáveis visíveis num contador que permitia estimar a velocidade de rotação.

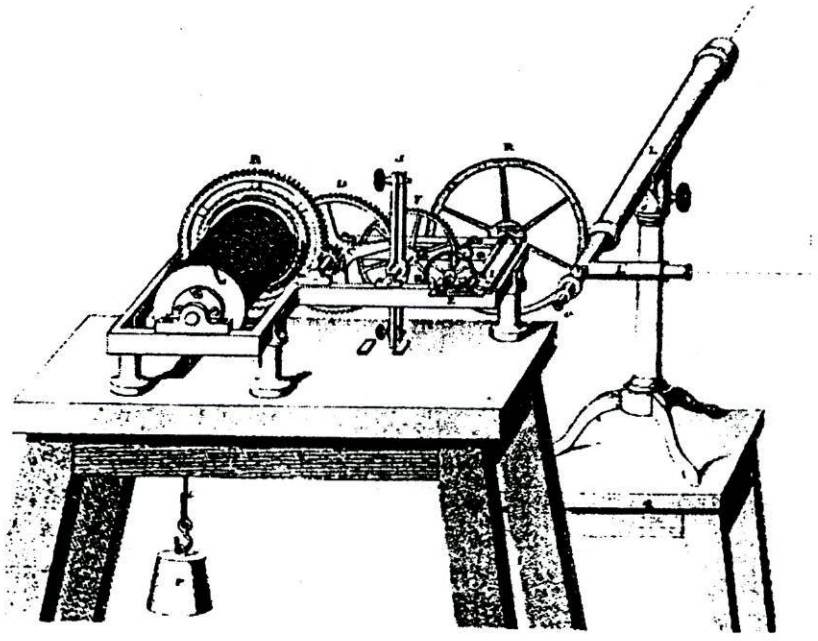


Figura 10: A roda dentada usada por Fizeau.

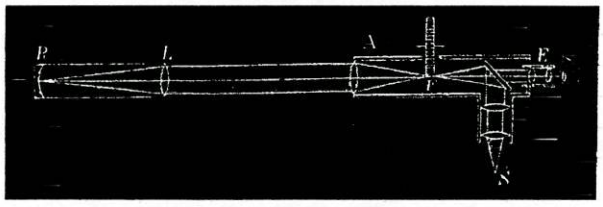


Figura 11: A determinação da velocidade da luz usando uma roda dentada.

As duas lunetas *A* e *L* são dirigidas uma para a outra, de modo a que a imagem da objectiva de uma delas se forme no foco da outra. A luz provém lateralmente de uma fonte forte sendo dirigida pelo eixo de um sistema constituído por uma lamina de vidro de faces paralelas inclinada 45° sobre este eixo e colocada entre a ocular e o foco da luneta A. Toda a luz que incide na objectiva A, depois de atravessar o foco dá lugar a uma imagem muito pequena na objectiva da outra luneta L e dirige-se, novamente, para si em obediência à lei dos focos conjugados. Em virtude da mesma lei, os raios em seguida vão incidir no foco da segunda lente L, originando uma imagem que representa, em pequenas dimensões, a objectiva da primeira; depois esta imagem incide num espelho, sendo o feixe reflectido sobre si mesmo, atravessando novamente as duas objectivas, qualquer que seja a sua distância e vem incidir exactamente no foco da objectiva A, seu ponto de partida. O feixe incide na lâmina de vidro inclinada, onde em

parte é reflectido e transmitido. A parte transmitida é recebida pela ocular e entra no olho do observador, e apercebemo-nos de um ponto luminoso idêntico a uma estrela.

O tempo que a luz demora a atravessar duas vezes o dispositivo em todo o seu comprimento depende evidentemente da distância das duas lunetas. E quando se utilizam distâncias bastantes elevadas, pode-se medir esse tempo utilizando uma roda dentada.

A posição da roda é definida pela condição de paralelismo do seu eixo de rotação com o eixo óptico comum às duas lunetas, e pela necessidade de fazer passar os dentes pelo ponto de reencontro dos raios que se cruzam no foco de A antes e depois da sua incursão pelo dispositivo, de modo a que ao rodar a luz sucessivamente intercepte e passe entre os dentes.

Se estas condições foram satisfeitas, a roda em movimento pode periodicamente deixar passar ou não os raios luminosos, na ida ou na volta. Como a velocidade da luz não é infinita e como a distância a percorrer é grande, o instante preciso da partida e o da volta de um raio não coincidem exactamente, eles são posteriores um ao outro, e é possível imprimir à roda uma velocidade tal que um raio que passa livremente entre dois dentes seja interceptado na sua volta por um dente que entretanto funciona como um obstáculo. É também possível imprimir à roda dentada uma velocidade que permita que todo o raio que passe na volta não seja interceptado por nenhum dente.

Vamos supor a roda em repouso e então a luz atravessa o espaço entre os dentes. Neste caso, o feixe passa e uma imagem é vista no campo do observador. Mas se aparece um dente, a luz que chega é directamente reflectida para o olho.

Se a roda se movimentar lentamente, a imagem no campo de visão vai aparecer e desaparecer sucessivamente à medida que os espaços e os dentes passam, mas se a velocidade aumenta de modo a que vários dentes passem por segundo, as sucessões de claridade e obscuridade serão tão rápidas que, tendo em conta a persistência da visão, uma imagem permanente será observada. Se a largura angular de um espaço for α e de um dente for β, de modo que a largura combinada de um dente e um espaço seja $\alpha+\beta$, e se a intensidade da imagem observada quando a roda está em repouso for I_0, a intensidade quando a roda está a rodar lentamente (mas o suficiente rápida para causar uma contínua impressão) será:

$$I = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} I_0 .$$

Se a velocidade da luz fosse infinita, a iluminação da imagem manter-se-ia constante para qualquer velocidade, mas se a luz se propaga no tempo, então a intensidade dependerá da velocidade de rotação. Alguma da luz transmitida pelo espaço irá no retorno ser interceptada pelo dente adjacente e se a velocidade é elevada o suficiente, de modo que quando a luz retorna, o dente moveu-se para a posição ocupada anteriormente pelo espaço. Então, toda a luz que retorna será interceptada, desde que o dente seja no mínimo tão largo como o espaço, assim a completa extinção da imagem ocorrerá.

O que ocorre é que, primeiramente, é observada uma imagem que vai diminuindo de intensidade à medida que a velocidade de rotação aumenta e finalmente extingue-se se a largura dos dentes for igual ou maior que o espaço. Se β é maior que α, a luz mantém-se eclipsada até que a velocidade seja suficientemente grande para impedir o dente de obstruir a passagem da luz e trazer o espaço para a posição do regresso da mesma. A imagem reaparece e a intensidade aumenta à medida que a velocidade aumenta. Atinge um máximo e depois passa novamente para a escuridão e assim, sucessivamente, para velocidades cada vez maiores. Se $\alpha=\beta$, ou seja, se os dentes e os espaços são iguais em largura, então para uma determinada velocidade, a luz eclipsa-se completamente, mas reaparece para velocidades maiores ou menores. Se β é menor que α a luz nunca se eclipsará completamente, mas alternar-se-á entre mínimos e 'máximos.

A observação consiste em medir a velocidade de rotação da roda no preciso momento em que ocorre um máximo e um mínimo de intensidade.

Na experiência de Fizeau, os dentes e os espaços tinham a mesma largura, cada qual com um quarto de grau, já que a roda possuía 720 dentes. Neste caso, se D é a distância entre a roda dentada e o espelho reflector, c a velocidade da luz e T o tempo necessário para a luz percorrer a distância 2D, obtemos:

$$T = \frac{2D}{c} .$$

Durante este tempo a roda rodou de um ângulo $\omega T=2\pi NT$, onde N é o número de revoluções por segundo. Consequentemente, se α é a largura angular de um espaço, o primeiro eclipse ocorrerá quando:

$$\alpha = 2\pi N_1 T = \frac{4\pi N_1 D}{c},$$

onde N_1 é a velocidade de revolução a que corresponde o primeiro eclipse.

Se a velocidade aumenta, a imagem reaparecerá e aumentará de intensidade até atingir um máximo:

$$2\alpha = \frac{4\pi N_2 D}{c}.$$

À medida que a velocidade aumenta a intensidade vai diminuir, e um segundo eclipse ocorrerá quando:

$$3\alpha = \frac{4\pi N_3 D}{c}.$$

Similarmente, o eclipse de ordem n ocorrerá à velocidade N_{2n-1} quando:

$$(2n-1)\alpha = \frac{4\pi N_{2n-1} D}{c}$$

donde:

$$c = \frac{4\pi D N_{2n-1}}{(2n-1)\alpha} = \frac{4mD N_{2n-1}}{2n-1},$$

onde

$$m = \frac{\pi}{\alpha}$$

é o número de dentes contidos na roda. Reconhecendo o primeiro máximo de intensidade que ocorre depois do primeiro eclipse, é claro que o máximo de ordem n de intensidade ocorrerá à velocidade N_{2n} expressa pela seguinte equação:

$$2n\alpha = \frac{4\pi N_{2n} D}{c}.$$

Foram só necessários seis meses para Fizeau completar um protótipo e demonstrar a praticabilidade do mesmo. O dispositivo experimental foi construído por Fromet[51] (1815-1865). A experiência foi realizada ao início da noite quando a atmosfera era mais calma.

Fizeau esforçou-se por determinar a velocidade a que ocorrem os sucessivos eclipses, mas esta é uma matéria de extrema dificuldade e incerteza. Em primeiro lugar, a intensidade da luz que retorna ao telescópio é bastante fraca por transmissão por todo

[51] Fromet era um técnico laboratorial com alguns conhecimentos de ciência. Em 1837, graduou-se na École Polytechnyque e em 1840 montou a sua própria oficina. Construiu várias máquinas eléctricas. Ajudou Foucault a construir o pêndulo com o qual demonstrou a rotação da Terra.

o aparato, e por reflexão na lâmina de vidro, de modo que a imagem observada é necessariamente fraca mesmo num máximo de intensidade. É também distribuída menos distintivamente pela iluminação extra no campo do telescópio, causada pela reflexão nos dentes da roda. Quando a roda gira, a luz que não passa entre os dentes é reflectida para o campo de visão e causa geralmente uma iluminação de todo o campo. Para evitar isto, os dentes devem ser pretos ou recortados de modo a reflectirem a luz contra os lados da luneta que também são pretos. Ao assegurarmos isto não haverá mais iluminação no campo, excepto quando a luz passa por entre os dentes e retorna depois de reflectida no espelho distante.

Fizeau colocou a luneta ocular num terraço de uma casa situada em Suresnes e a luneta de reflexão no alto de Montmartre, a uma distância aproximada de 8633m.

A luz era produzida por uma lâmpada de éter, em que a chama, alimentada por oxigénio, era projectada sobre um fragmento quente de maneira a provocar uma viva incandescência.

Nos primeiros ensaios com este método obteve um valor da velocidade da luz um pouco diferente do determinado pelos astrónomos. A média, deduzida a partir de vinte e oito observações, originou o valor de 70948 léguas de 25 graus. Isto representa uma velocidade de cerca de 315000 Km/s.

Em Julho de 1849 o trabalho de Fizeau foi publicado como um extracto nos *Comptes renduz de l'Académie des Sciences.*

Quando comunicou a Arago o seu resultado, ele respondeu-lhe que não tinha resolvido o problema que lhe havia proposto, pois com o método utilizado era impossível medir a velocidade da luz na água.

Mais tarde, Fizeau tentou melhorar o aparato de forma a obter maior precisão com a utilização do método da roda dentada, mas era dificil colocar o motor a rodar com velocidade uniforme de modo a ajustar essa mesma velocidade aos valores em que ocorrem os eclipses. Em 1849, a Academia de Ciências de Paris financiou um melhoramento do aparato. Fizeau pensava que em cerca de seis meses os melhoramentos estariam concluídos. Mas as dificuldades foram surgindo, em especial com o motor que deveria conduzir a roda dentada a uma velocidade uniforme. Este estava a ser construído por Fromet, que entretanto morreu em 1865. No início de 1870, Cornu inicia novas medições, já com um melhor aparato.

3.1.3 Método geral para medir a velocidade da luz nos meios transparentes. Velocidade relativa da luz no ar e na água

Havia a necessidade de encontrar um método que permitisse calcular a velocidade da luz em poucos metros, para se poder calcular a velocidade da luz na água. É também em 1849 que Fizeau refere que a experiência idealizada por Arago pode tornar-se realizável se a luz for reflectida de volta para o espelho rotatório por um espelho côncavo. De acordo com Cornu, este foi o último dia de colaboração entre Fizeau e Foucault. Os dois partem na procura da resolução da experiência de Arago. Foucault em conjunto com Fromet e Fizeau com Bréguet. Coube agora a Foucault a invenção. Em vez de uma roda dentada, Foucault serviu-se de um espelho accionado por uma pequena turbina a vapor. A peça mais importante desta experiência é a máquina que deve conferir movimento ao espelho rotatório. A construção dessa máquina tinha sido confiada a Breguet (1804 -1883).

O método que Foucault utilizou envolve pequenas distâncias e permite calcular o tempo que a luz demora a percorrer alguns metros, o que possibilita operar em meios diferentes e dá-nos a solução à importante questão colocada por Arago há quinze anos atrás.

É necessário referir a importância da observação de uma imagem fixa de uma imagem móvel. O espelho rotatório origina uma imagem móvel de um objecto fixo. Contudo, não deixa de ser também verdade e ainda mais evidente[52], que a partir de uma reflexão sobre um espelho fixo côncavo (ver figura), o mesmo sistema óptico origina uma imagem fixa de uma móvel.

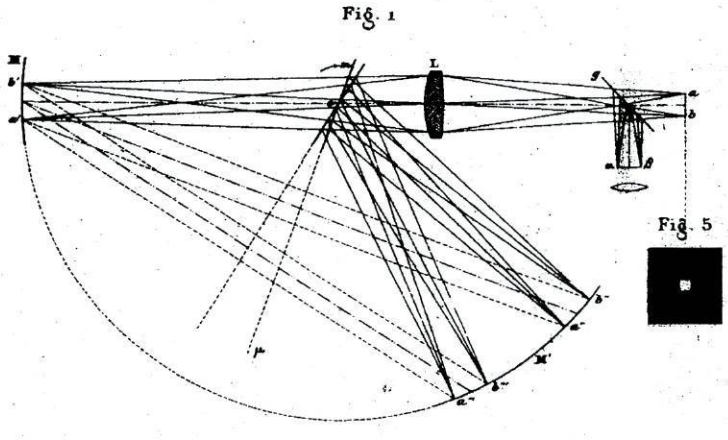


Figura 12.1 : Importância da utilização do espelho côncavo.

O movimento do espelho rotatório produz um desvio da imagem fixa, um desvio que possibilita obter o valor da velocidade da luz em função de quantidades de medição fácil. A mudança de meio, mantendo inalteradas as outras condições, permite modificar o desvio, de modo a demonstrar como a velocidade da luz está relacionada com o índice de refracção. Esta é a razão principal do trabalho de Foucault.[53]

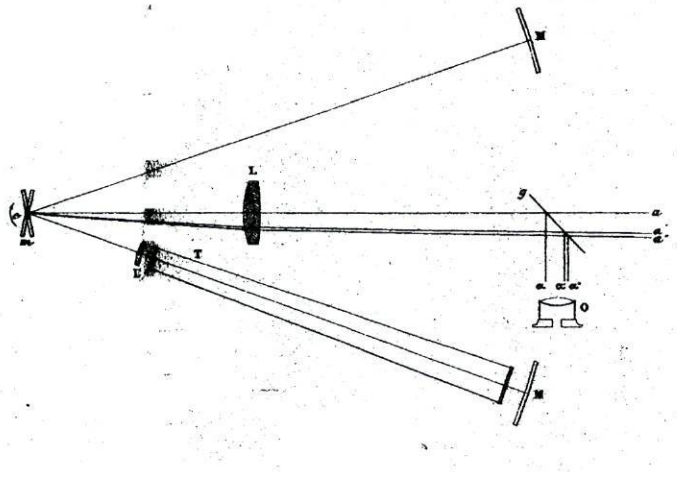


Figura 12.2: Determinação da velocidade relativa da luz no ar e na água.

Dirige-se e fixa-se por um helióstato um feixe de luz solar. A luz é transmitida através de uma abertura atravessada por um fio fino de platina e incide numa lente acromática, onde depois é reflectida para um espelho rotatório plano, que pode rodar rapidamente em torno do eixo vertical. Um espelho fixo côncavo é colocado a uma certa distância. A superficie desse espelho fixo é esférica e este está orientado de forma que o seu centro de curvatura coincidida com o centro do espelho rotatório. Quando esta condição é satisfeita, o feixe giratório é reflectido sobre si mesmo. Vamos supor primeiramente o espelho rotatório em repouso, de modo que a luz reflectida nele incida no espelho fixo M e forme nele uma imagem real da abertura. O feixe reflectido em M retorna através do anterior caminho, sendo reflectido em *m*, passa pela lente uma segunda vez e incide no foco *a*, formando uma imagem sobreposta da abertura. Para uma conveniente observação, uma lâmina de vidro de faces paralelas é colocada perto de *a* no caminho do feixe de luz e inclinada num ângulo de 45°. O feixe reflectido por

[52] Físicos proeminentes, como Wheastone, Arago, Foucault e Fizeau, demoraram alguns anos a constatar esta evidência.

[53] Em anexo encontra-se a descrição detalhada da experiência retirada do livro "Mesure de la vitesse de la lumière" Mémoires de Léon Foucault

M quando retorna a *a* incide na lâmina, onde em parte é reflectido, e forma uma imagem de *a* em α, que é observada através de uma ocular.

A objectiva *L* tem 1,90m de foco, a ocular do micrómetro aumenta de 10 a 20 vezes, o espelho rotatório tem de diâmetro 0,014m e o raio de curvatura do espelho côncavo é de 4m. A distância do espelho rotatório à objectiva pode variar entre limites bastante extensos e a posição da objectiva é colocada pela necessidade de o objecto e a superfície do espelho côncavo estarem no seu foco conjugado.

Coloca-se, agora, o espelho em marcha e fazemo-lo girar de uma maneira contínua. À medida que a luz passa de *m* para M, vai aparecer uma imagem iluminada em α e é importante notar, que tendo em conta a curvatura de M e sua disposição, como já foi descrito, a imagem α permanece fixa à medida que *m* muda de posição, mas quando *m* roda de modo a que o feixe reflectido não incida em M não haverá iluminação em α. Se a rotação é bastante lenta, brilho e escuridão vão suceder-se alternadamente em α, e quando a velocidade de rotação é demasiado elevada a persistência da imagem leva-nos ao aparecimento de uma imagem permanente em α. O brilho desta imagem será obviamente muito menor do que quando o espelho está em repouso, visto que a relação dos dois vem do arco M para toda a circunferência.

Quando o espelho gira com uma velocidade elevada surge o desvio. Este desvio mostra que a duração da propagação da luz entre os dois espelhos não é nula. É fácil de ver que o valor deste desvio está ligado à velocidade da luz, ao número de voltas do espelho por unidade de tempo e às distâncias que separam as diferentes peças do dispositivo.

O mesmo método aplica-se à medição da velocidade da luz em todos os meios homogéneos e transparentes que se coloquem entre o espelho rotatório e o espelho côncavo. Se o meio é alterado em toda a extensão do trajecto, o desvio varia na simples relação da velocidade da luz no novo e antigo meio. Se, por exemplo, preenchermos com água o espaço compreendido entre os dois espelhos, sem qualquer alteração da montagem, o índice de refracção da água é sensivelmente igual a *4/3*. O desvio deve aumentar na relação de 3 para 4, para confirmar a teoria ondulatória ou diminuir na relação de 4 para 3, para justificar a teoria da emissão.

Mas quando interpomos uma coluna de água entre os dois planos paralelos, somos obrigados a deixar entre os dois planos e cada um dos espelhos uma certa distância. Então, a distância *l* encontra-se dividida em duas partes, uma *P* ocupada por

um meio refringente e outra Q onde persiste o ar. Num caso como este, o desvio observado dá somente a velocidade média da luz no espaço ocupado numa parte por água e noutra por ar.

No fundo, para resolver a questão, o que interessa num grau mais elevado da teoria, não é propriamente medir a velocidade da luz na água, nem se preocupar com os meios para o conseguir. Basta constatar qual o sentido do desvio que se produz quando se opera unicamente com ar e verificar como se modifica interpondo-se uma coluna de água com algum comprimento para produzir um efeito sensível. Convém dispor no dispositivo duas linhas de experiência: uma só com ar e outra para o ar e água, observando, assim, simultaneamente os dois desvios correspondentes. A comparação torna-se então bastante fácil, sendo inútil proceder a alguma medida.

No dia 17 de fevereiro de 1850, Foucault consegue ver o raio desviado. No dia 27 de Abril, à uma hora, comprova que a luz se propaga mais rapidamente no ar do que na água, facto verificado às quatro horas da tarde por quatro testemunhas.

Os valores utilizados por Foucault foram:

$r = 3m;\ n = 500rot/s$

$l = 4m;\ P = 3m$

$l' = 1{,}18m;\ Q = 1m,$

e obteve para a imagem no ar um desvio de 0,375 mm e para a imagem na água um desvio de 0,469 mm, uma diferença evidente de mais para escapar à observação.

Estes desvios estão relacionados com a medida do tempo correspondente a uma mesma distância. Foucault chegou a uma conclusão definitiva e inconcebível com a teoria da emissão, em que a luz se move mais rapidamente no ar do que na água.

Foucault mandou publicar uma pequena nota no *Journal des Débats* anunciando a sua descoberta e esta também foi anunciada a 6 de Maio de 1850 à Academia. Apesar da prova que a velocidade da luz era maior no ar do que na água, não foi possível medir o seu valor, pois a velocidade do espelho era determinada pelo tom do bater do ponto de apoio, logo não era determinada com suficiente precisão.

3.1.4 Experiência de Fizeau

No mesmo dia em que Foucault anunciou à Academia os resultados da sua experiência, Fizeau e Bréguet comunicaram à mesma instituição que a sua experiência estava pronta para se realizar, logo que as condições atmosféricas o permitissem. As

condições atmosféricas, nas semanas anteriores, não permitiram que eles fizessem qualquer observação, pois para a realização da experiência era necessário luz solar, já que a intensidade das luzes artificiais não era suficiente.

Segundo Cornu, Fizeau teria ganho a "corrida" se um problema não tivesse surgido com o tubo que continha água. Este tubo era de zinco e com o tempo, a água tornou-se turva, de modo que impedia a detecção do raio transmitido. Só passadas sete semanas é que Fizeau e Bréguet conseguiram realizar a sua experiência. Os resultados obtidos vieram confirmar os obtidos por Foucault.

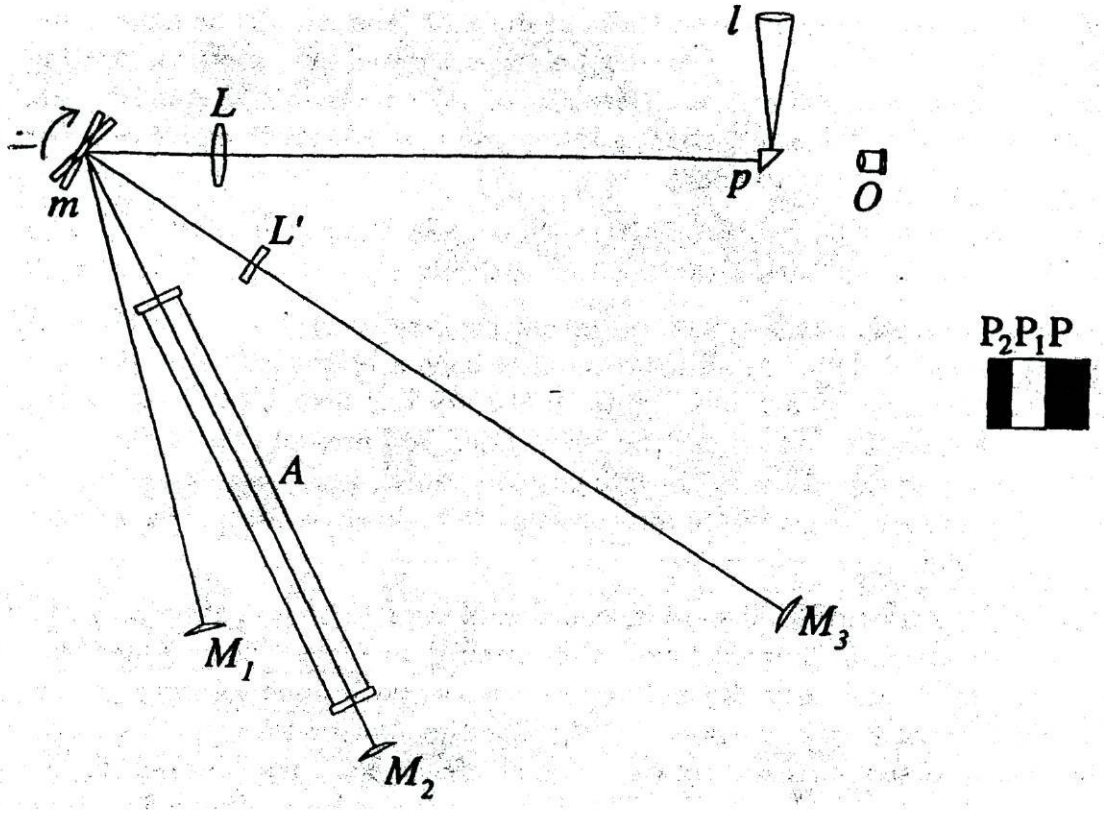


Figura 13: Aparato utilizado por Fizeau[54].

Fizeau utilizou um menor percurso na água e o espelho rodava à velocidade de cerca de 1500rot/s. A fonte de luz era a face de um pequeno prisma iluminado pela reflexão interna de um feixe de luz solar. Foram usadas lentes plano convexas M, prateadas nas faces planas, em vez de espelhos côncavos, que são mais difíceis de construir. Usou três braços com comprimentos tais que a luz demorava o mesmo tempo a percorrer M_1 e M_2 de acordo com a teoria da emissão, e M_2 e M_3 de acordo com a teoria ondulatória. O limite da face do prisma p actua como alvo e ponto de referência.

[54] Informação extraída do artigo *Toothed wheels and rotating mirrors* de William Tobin.

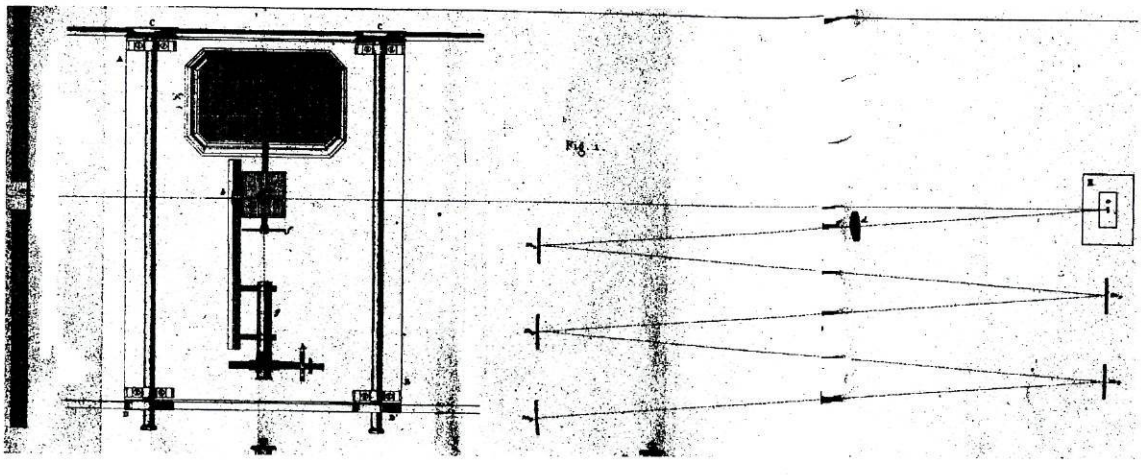
A imagem que regressa é examinada pela ocular. A imagem que retorna do percurso na água, P_2 sofre um maior desvio do que a imagem do percurso no ar, P_1. Estes resultados estavam de acordo com a teoria ondulatória.

Vencia assim a teoria de Fresnel, em que a velocidade da luz na água era menor do que no ar. Este resultado era contrário ao formulado pela teoria corpuscular. A descoberta de Foucault assegurou o triunfo da teoria ondulatória da luz, contudo quanto à natureza do éter nada se esclareceu.

3.1.6 Experiência de Foucault para a determinação da velocidade absoluta da luz (1862)

Aquando da apresentação dos resultados da experiência acerca da velocidade da luz em meios de refrangência diferentes, em 6 de maio de 1850, Foucault indicou que o mesmo procedimento poderia ser utilizado para determinar o valor da velocidade da luz no espaço.

É a 22 de Setembro de 1862 que Le Verrier apresenta uma nota de Foucault à Academia de Paris dizendo que a velocidade da luz é 298000 $\pm$ 500 Km/s[55]. O novo aparato utilizado por Foucault, construído por Fromet, incorpora três novas alterações. O espelho rotatório já não era conduzido por vapor, mas por ar fornecido a pressão elevada, através de um conjunto de foles e regulada por uma válvula, que permitia regular e ajustar a velocidade do espelho rotatório. A segunda inovação foi a utilização de uma roda dentada, rodando exactamente uma vez por segundo, que servia para ajustar a velocidade do espelho rotatório. A terceira alteração foi a utilização de cinco espelhos côncavos de modo a aumentar o percurso para 20m.



[55] Informação extraída do livro de Léon Foucault *Les Mémoires.*

Figura 14: Aparato usado por Foucault para determinar a velocidade absoluta da luz.

A luz é dirigida por um helióstato para iluminar um retículo de vidro prateado *b*, com 30 linhas transparentes distantes umas das outras de um décimo de milímetro. A luz incidia depois no espelho rotatório, que depois de reflectida era focada por uma lente acromática num espelho côncavo m_1. O espelho m_1 é ligeiramente desviado de modo a que o feixe não incidisse novamente no espelho rotatório, mas fosse incidir noutro espelho côncavo, e assim sucessivamente. O último espelho côncavo estava colocado de modo a que o feixe retornasse para espelho o rotatório, indo depois incidir numa lâmina de faces paralelas, onde era reflectido para o foco nos dentes de uma roda dentada, de modo a que ao rodar a luz interceptasse e passasse pelos dentes.

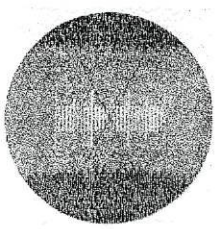


Figura 15: Imagem observada pelo microscópio de Foucault

A figura mostra a vista do microscópio. O fluxo do ar é ajustado até não haver movimento estroboscópico dos dentes da roda. Ao princípio, Foucault planeou usar um micrómetro para medir o desvio da imagem, mas as medidas iniciais foram discordantes. A solução encontrada por Foucault foi colocar o retículo, o vidro de faces paralelas, a roda dentada, o microscópio e o micrómetro numa carruagem, de modo a ajustar a distância ao espelho rotatório para obter um desvio da imagem de 0.7 mm.

Designemos por V a velocidade da luz, n o número de voltas por segundo do espelho, l a distância entre o espelho rotatório e o último espelho côncavo, r a distância do espelho rotatório à mira e d o desvio, e obtém-se a seguinte expressão para a velocidade da luz:

$$V = \frac{8\pi nlr}{d}.$$

O espelho tinha 0,014m de diâmetro, estando montado directamente sobre o eixo de uma pequena turbina de ar, construída por M. Fromet. O ar era fornecido por um conjunto de foles, a altas pressões de grande fixidez à saída, onde o ar atravessa um regulador cuja a pressão não varia mais do que 1/5 do mm sobre uma coluna de água de

0,30m. Para determinar a velocidade de rotação do espelho, colocou-se uma roda dentada entre o microscópio e o vidro de reflexão parcial. A imagem era focada nos dentes da roda dentada. Com a roda a girar a uma velocidade uniforme e se a imagem for contínua, os dentes ocultam-se à vista pela rapidez do movimento. Mas se a imagem não for permanente, ela resulta de uma série de aparições descontínuas que são em número igual ao número de revoluções do espelho. No caso dos dentes, se sucederem no mesmo número, produz-se no olho uma ilusão como se a roda não rodasse. Se o disco tiver *n* dentes e se a sua circunferência fizer uma volta por segundo, quando se coloca a turbina em funcionamento, regula-se o ar de forma a obter uma aparente fixação dos dentes, e assim podemos ter a certeza que o espelho roda *n* voltas por segundo. Froment que tinha construído a turbina, construíu também a roda cronométrica.

A velocidade do espelho utilizada foi de 400r.p.s e era possível manter durante alguns minutos. Foucault, na altura da apresentação do resultado, tinha planos para aumentar o percurso da luz nalgumas centenas de metros, com a utilização de lentes, mas foi-se interessando por outras actividades que não permitiram que ele concluísse a experiência.

As experiências realizadas por Fizeau e Foucault foram melhoradas mais tarde e aperfeiçoadas graças ao progresso da técnica e da ciência.

3.1.6.1 Novas medições utilizando o método da roda dentada.

3.1.6.1.1 Experiência de Cornu (1870-1876)

Apesar do resultado obtido por Foucault ter sido aceite, Fizeau comunicou à Academia de Paris algumas possíveis causas de erro, entre as quais se incluíam a excentricidade da superfície do espelho rotatório e o não paralelismo das faces da lâmina.

Era necessário proceder-se a novas medições da velocidade da luz, pois esta adquiria cada vez maior importância. Cornu utilizou o método da roda dentada para determinar a velocidade da luz. Os princípios ópticos utilizados por Cornu são idênticos aos de Fizeau, modificando essencialmente o método para a determinação da velocidade de rotação da roda dentada, no qual adoptou um método gráfico.

A precisão é difícil de obter pelo método de observação utilizado por Fizeau, pois é quase impossível determinar quando é que a imagem fica exactamente eclipsada.

Para eliminar esta dificuldade, Cornu colocou o mecanismo da roda dentada electricamente ligado a um cronógrafo para marcar cada 100 revoluções. Ao mesmo tempo, um relógio marca segundos e a décima parte de segundo que são registados por meio de uma mola vibradora. O observador pode registar a velocidade a qualquer instante. Através do registo cronográfico a velocidade e a sua taxa de variação podem ser obtidas a qualquer instante. Ao permitir que a velocidade aumente, a iluminação vai diminuir até um certo valor e a velocidade é então assinalada. Depois de desaparecer, a imagem surge novamente e quando atinge brilho anterior a velocidade é novamente registada. A velocidade correspondente a um zero de intensidade é metade dos dois valores e é descoberta através do registo do cronógrafo.

Em 1872, Cornu começou por utilizar um percurso de 10Km, que ele próprio mediu por triangulação. Para diminuir a incerteza na determinação dos eclipses, ele trabalhou com os valores para os eclipses de 2ª até à 7ª ordem. O valor final obtido, com excelentes condições atmosféricas e corrigido para o vácuo foi 298500Km/s, com uma incerteza de uma parte em 300, um valor muito próximo do obtido por Foucault.

Na experiência final, Cornu utilizou uma distância D entre as duas estações de 23 Km, de modo que era possível observar eclipses de ordem 30, isto é, passarem 15 dentes da roda antes do feixe de luz regressar do espelho distante. Este percurso tinha já sido pensado por Fizeau e medido por triangulação por Cassini III.

O método, no entanto, não é o mais apropriado, uma vez que não é capaz de fazer medidas em relação à quantidade directamente estimada, nomeadamente, o brilho da imagem. Os eclipses não ocorrem a uma velocidade bem determinada, mas são graduais sendo difícil dizer precisamente o momento em que eles ocorrem. Apesar do método usado por Cornu, para escapar a esta dificuldade, a medição continua a apresentar grandes incertezas.

O valor final obtido para a velocidade da luz foi de 300330 Km/s no ar, o que corresponde a 300400 Km/s no vácuo. Este resultado, embora seja elevado quando comparado com recentes experiências, estabeleceu que a velocidade da luz é indubitavelmente perto de 300000 Km/s.

A determinação da velocidade da luz, usando o aparato original de Fizeau e modificado por Cornu, foi feita anos mais tarde por M. Perrotin, no Observatório de Nice. Os resultados obtidos depois de 1500 medições foram de 299900 $\pm$ 80 Km/s.

3.1.6.1.1 Experiência de Young e Forbes (1882)

Young e Forbes utilizaram o método de Fizeau para determinar a velocidade da luz, modificando o aparato[56]. Eles repetiram a experiência, cortando os dentes de modo a que a luz reflectida por estes incidisse na parte negra do telescópio e fumaram a roda, para diminuírem o poder reflector o mais possível. Mas, mesmo quando a imagem é distinta, é difícil decidir o instante em que ela se extingue completamente, sendo bem mais fácil dizer quando duas imagens vistas simultaneamente têm a mesma intensidade, do que quando uma variação da intensidade é máxima e mínima. As determinações deduzidas de observações directas da velocidade, num máximo e mínimo de intensidade, são consequentemente acompanhadas de consideráveis incertezas.

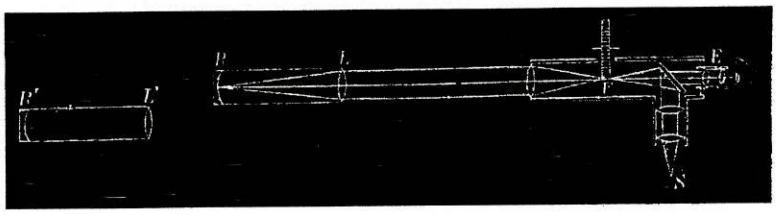


Figura 16: Aparato usado por Young e Forbes.

A novidade introduzida foi a utilização de uma segunda luneta reflectora colocada atrás da primeira e perto da mesma linha, de modo a que duas imagens sejam vistas juntas, no corte da roda dentada. A razão das distâncias das duas lunetas reflectoras à roda dentada é 12/13. Denominando essas distâncias por D e D' e a velocidade correspondente à imagem primeiro eclipsada por N_1 e N'_1, é evidente que se D' maior que D, então N_1 maior que N'_1, ou seja a imagem da luneta reflectora mais afastada será a primeira a ser eclipsada. À medida que a velocidade aumenta, uma imagem I' extingue-se mais rapidamente do que outra I. E, quando a primeira se extingue, a segunda mantém-se no campo de observação, se o comprimento do espaço for menor do que o do dente. A imagem de I' pode surgir antes da imagem I estar totalmente extinta ou pode estar extinta antes da anterior reaparecer, encontrando-se as duas imagens extintas. No primeiro caso, o reaparecimento de I' crescerá em intensidade com o aumento da velocidade, enquanto I aproxima-se de um eclipse e diminuirá de intensidade, até que a uma determinada velocidade terão a mesma intensidade: I=I', ou

$$I_0\left(k-\frac{n}{2N_1}\right)=I'_0\left(k-1+\frac{n}{2N'_1}\right).$$ [57]

[56] Extraído do livro *Theory of light* de Preston.
[57] Dedução feita em anexo.

Aumentando a velocidade, a intensidade I' aumentará e I diminuirá até zero e depois do eclipse reaparecerá, enquanto I' passa por um máximo e começa novamente a diminuir de intensidade. À medida que I' diminui, I aumenta, até ficarem com a mesma intensidade, obtemos então:

$$I_0\left(k-1+\frac{n}{2N_1}\right)=I'_0\left(k+1-\frac{n}{2N'_1}\right),$$

e, em geral esta igualdade ocorre sempre entre p e $p+1$ eclipses de ambos e então obtemos:

$$I_0\left(k-p+\frac{n}{2N_1}\right)=I'_0\left(k+p-\frac{n}{2N'_1}\right).$$

Se nova igualdade de intensidade for obtida depois do próximo eclipse de I', ou seja, depois do p eclipse de I e do $p+1$ de I', então a intensidade de I diminui e a de I' aumenta e se a velocidade for n', obtemos:

$$I_0\left(k+p-\frac{n'}{2N_1}\right)=I'_0\left(k-(p+1)+\frac{n'}{2N'_1}\right).$$

Seja $I'_0=\rho I_0$ e $N'_1=gN_1$, então $g=D/D'$, e das equações anteriores obtemos

$$k-p+\frac{n}{2N_1}=\rho\left(k+p-\frac{n}{2gN_1}\right),$$

$$k+p-\frac{n'}{2N_1}=\rho\left(k-(p+1)+\frac{n'}{2gN_1}\right),$$

subtraindo estas duas expressões, obtemos:

$$2p+\rho(2p+1)=\frac{1}{2N_1}(n+n')\left(1+\frac{\rho}{g}\right).$$

Se as distâncias D e D' forem escolhidas de modo que a sua razão g seja igual a $2p/(2p+1)$, obtemos:

$$2p\frac{g+p}{g}=\frac{(n+n')}{2N_1}\frac{g+p}{g},$$

ou

$$N_1=\frac{n+n'}{4p},$$

com N_1 em função de quantidades observáveis, e obtemos a expressão para a velocidade da luz na forma de:

$$v = 4mDN_1 = \frac{mD(n+n')}{p}.$$

As observações foram feitas à décima segunda igualdade e g era aproximadamente 12/13. O valor obtido para a velocidade da luz foi de 301382000 metros por segundo. A fonte de luz utilizada foi uma lâmpada eléctrica Siemens e a velocidade foi registada electricamente. As distâncias D e D' foram respectivamente 3.18845 e 3.44928 milhas.

Sabendo que qualquer acromatismo nas lentes e qualquer absorção atmosférica comunicará cor à imagem, eles verificaram que uma imagem era geralmente vermelha e outra azul respectivamente, quando a intensidade aumentava ou diminuía. Concluíram então sobre a diferença de velocidade de raios de refrangibilidades diferentes. Se os raios azuis se movem mais rapidamente do que os vermelhos, então os raios vermelhos eclipsam-se a menor velocidade do que os azuis, de modo que quando se aumenta a velocidade da roda dentada, os raios vermelhos do fim do espectro serão primeiramente eclipsados e a imagem em extinção aparece azul. O mesmo raciocínio é aplicado à imagem emergente.

Para testar esta hipótese, a experiência foi repetida com luz azul e vermelha obtida do espectro de um prisma.

Young e Forbes concluíram a partir de uma série de medições que os raios azuis movem-se 1.8% mais rapidamente que os vermelhos. Estes resultados não foram aceites devido à enorme diferença. A causa para esta diferença não foi determinada e em outras experiências para determinar a velocidade da luz (como a de Foucault) não foi observada a formação de cor.

3.1.6.2 Novas medições utilizando o método do espelho rotatório.

3.1.6.2.1 Experiência de Michelson (1879)

Em 1879, Michelson repetiu a experiência de Foucault, mas com algumas modificações. Na experiência de Foucault o desvio da imagem é muito pequeno para ser medido com suficiente precisão. Michelson modificou o dispositivo experimental de forma a obter um desvio da imagem 200 vezes maior do que o obtido por Foucault. Com um desvio desta magnitude, já não era necessária a presença da lâmina de faces paralelas e a imagem de regresso podia ser observada directamente com um micrómetro acoplado a uma ocular, colocado no mesmo sítio da abertura pela qual a luz é

transmitida. A ocular era uma simples lente de 2 polegadas de distância focal. No foco desta e perto do mesmo plano vertical que a face da abertura, é colocada na vertical, uma fibra de seda. Para medir o desvio, a ocular é colocada de modo a que a fibra divida a abertura e depois é movida até que a fibra divida a imagem ,desviada da abertura.

A imagem da abertura tem de ser melhor trabalhada relativamente à imagem do fio de metal na experiência de Foucault, porque se utiliza uma distância elevada entre os espelhos, daí que a imagem se tornasse pouco nítida.

O espelho rotatório era um disco plano de vidro prateado de 1,25 polegadas de diâmetro e 0,2 polegadas de espessura. As lentes, com uma distância focal de 150 pés, estavam colocadas entre os dois espelhos, de forma a assegurar uma imagem de elevada intensidade. O espelho rotatório estava inserido 15 pés no interior do foco da lente e a distância entre os dois espelhos era cerca de 2000 pés. Na primeira fase da experiência o espelho era plano, de cerca de 7 polegadas de diâmetro, com um telescópio preso para fazer pequenos ajustamentos. A lente acromática tinha 8 polegadas de diâmetro, facto pouco relevante, tendo em conta a sua grande distância focal, comparável com a sua abertura. A distância da abertura ao espelho rotatório era cerca de 28 pés. Inclinaram-se os eixos do espelho rotatório para que a luz que incidisse nele, vinda da abertura, não fosse reflectida para a ocular onde predominaria a cada revolução do espelho.

O espelho rotatório era colocado em movimento por uma turbina de ar e a sua velocidade era controlada por uma corda, ligada à válvula da turbina. Para se medir a velocidade de rotação utilizou-se um diapasão, de aspecto igual ao dente de um garfo de aço espelhado. Este era mantido a vibrar por uma corrente eléctrica. O diapasão era colocado de forma a que a luz do espelho rotatório incidisse nele e fosse reflectida para a ocular do micrómetro, e daí para o olho. Quando o diapasão e o espelho rotatório estavam em repouso, a imagem do espelho rotatório era observada. Quando a frequência do espelho era igual à do diapasão que vibrava, a imagem estava reduzida a uma, que era estacionária. Esta situação também ocorria quando o número de voltas era um submúltiplo do número de vibrações. Quando era múltiplo, a diferença é que surgiam mais imagens. Quando o espelho rotatório faz um certo número de voltas, é somente necessário puxar a corda ligada à válvula para a direita ou para a esquerda, até a imagem do espelho rotatório se tornar estacionária. Deste modo, é possível manter o espelho com velocidade constante durante 4 ou 5 cinco segundos, tempo suficiente para fazer a observação. Para grande número de medições em que a velocidade era cerca de

258 voltas por segundo, o valor médio obtido para a velocidade da luz no vácuo foi 299910 ± 50 Km/s.

3.1.6.2.2 Experiência de Newcomb (1880 -1882)

Entre 1880 e 1882, Newcomb realizou uma série de experiências para determinar a velocidade da luz utilizando o método do espelho rotatório[58]. Nestas experiências, a quantidade medida directamente não era o desvio linear da imagem que regressava, mas o desvio angular.

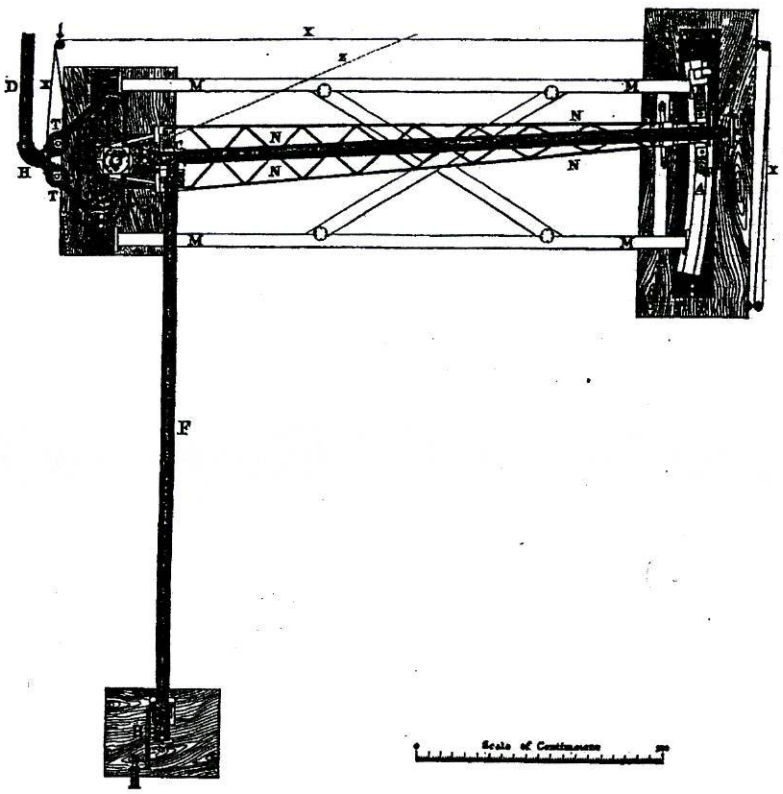


Figura 17: Aparato usado por Newcomb.

Dois telescópios estavam colocados com os seus dois eixos em ângulo recto, um para lançar um feixe de luz para o espelho rotatório - telescópio emissor - e o outro usado para receber o feixe - telescópio receptor. A luz do Sol, passa através de um helióstato, entrando na abertura do telescópio emissor (F), sendo depois reflectida por um espelho plano para uma lâmina de vidro. Incide depois no espelho rotatório (m) sendo reflectida para um espelho distante fixo (através da linha z) que o reenvia para o espelho rotatório. O telescópio receptor (L) encontra-se imediatamente por baixo da

[58] Informação retirada do livro *The Theory of Light de Preston.*

lâmina de vidro, estando o eixo do telescópio montado de forma a mover-se horizontalmente em torno do seu eixo vertical, coincidindo este com o eixo de rotação do espelho rotatório. No final do telescópio estavam colocados dois pares de microscópios (p e h) para lerem as divisões do arco graduado. O espelho rotatório estava colocado de forma a que a luz, depois de o atingir na face vinda do telescópio emissor e depois reflectida no espelho fixo, no regresso, não incida na mesma face do espelho rotatório, mas noutra face de modo a entrar no telescópio receptor. Desta forma, era possível observar uma imagem nítida da abertura. Pode-se fazer o espelho girar alternadamente em sentidos opostos, podendo ser observados desvios em lados opostos do zero. Foram usados dois espelhos fixos, colocados lado a lado para se obter uma imagem de maior intensidade. Os espelhos fixos eram côncavos, com uma abertura de cerca de 40 cm e um raio de curvatura de cerca de 3000 metros. O espelho rotatório consistia num prisma quadrado de aço, de comprimento vertical de 85 mm e de secção horizontal quadrada de 37,5 mm de lado. As quatro faces verticais do prisma estavam prateadas com níquel, actuando cada face como um reflector durante cada revolução. Nas extremidades do prisma estavam instaladas um par de lâminas circulares, cada qual segurando uma caixa de doze foles, onde o ar comprimido era injectado, colocando o espelho em rotação. O espelho pode rodar alternadamente em sentidos opostos. A velocidade de rotação era determinada directamente por um sistema de rodas engrenado a uma pequena asa fixa ao eixo do espelho. Esta asa estava engrenada a um conjunto de rodas, que interrompiam um circuito eléctrico a um determinado número de revoluções, que ficavam gravadas num cronógrafo.

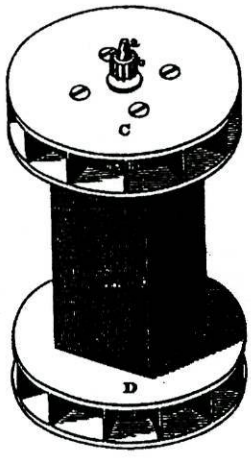


Figura 18: o espelho rotatório usado por Newcomb.

O telescópio receptor estava colocado numa posição fixa correspondendo a um determinado desvio da imagem e, para tal, a velocidade do espelho era controlada por meio de umas cordas (X) ligadas às válvulas (T), de modo a que a imagem, que regressa, entre no campo de visão do observador. Com o registo cronográfico obtém-se a velocidade de rotação. Newcomb verificou que quanto maior for a velocidade de rotação maior a delicadeza com que se pode ajustar a imagem às marcas de observação.

Os resultados finais obtidos para a velocidade da luz foram 299728 Km/s no ar e 299810 Km/s no vazio, com um erro estimado em 50 Km/s.

3.1.6.2.3 Experiência de Michelson em vários meios.

Foucault tinha provado que a luz se desloca mais rapidamente no ar do que na água, mas não fez uma estimativa para a razão das velocidades. Em 1883, Michelson, utilizando o aparato de Foucault, determinou essa razão. O tubo continha água destilada, com cerca de 3 metros de comprimento e a distância entre os espelhos era de 5 metros. A velocidade do espelho rotatório utilizada foi de 256 revoluções por segundo e a razão medida entre a velocidade da luz no ar e a velocidade da luz na água foi 1,330. O índice de refracção da água para luz amarela é 1,333 e a diferença entre estes dois valores foi considerada estar dentro do erro dos valores experimentais. No caso do bissulfito de carbono o índice de refracção para o raio amarelo foi 1,64 e a razão das velocidades foi de 1,758. Este resultado é 7 por cento maior, não podendo esta discrepância ser atribuída aos erros experimentais. Ele repetiu a experiência para as diferentes cores no bissulfito de carbono. Os resultados obtidos indicaram que a luz vermelha se desloca 1 ou 2 por cento mais rapidamente do que a luz azul no bissulfito de carbono.

Ele concluiu que a velocidade da luz é invariável no vazio, qualquer que seja a cor, mas difere nos meios transparentes.

3.2 A velocidade da luz e a teoria electromagnética da luz de Maxweel

"A velocidade das ondulações transversais (...) calculadas a partir de experiências de electromagnetismo efectuadas por Weber-Kohlrausch, tem um valor tão próximo do valor da velocidade da luz calculado a partir de experiências de óptica realizadas por Fizeau, que é difícil evitar a inferência de que a luz consistirá em ondulações transversais do mesmo meio que é a causa dos fenómenos eléctricos e magnéticos"

Maxweel[59]

Em 1845 Faraday (1791-1867) verificou que a direcção de polarização de um feixe de luz ao passar por entre os pólos de um electroíman era alterada. Duas coisas diferentes como o magnetismo e a luz a exercerem influência uma sobre a outra? Um século antes, Euler já tinha desconfiado da existência de uma relação entre a luz e o magnetismo.

3.2.1 Experiência de Weber-Kohlrausch

Em 1785, Coulomb[60] estabeleceu experimentalmente que as forças entre duas cargas q_1 e q_2 variam directamente com o produto das duas cargas e inversamente com o quadrado da distância entre elas, estabelecendo a seguinte lei: $F= k_1q_1q_2/d^2$.Com as unidades de força e distância já estabelecidas, colocando $k_1 =1$, definindo a unidade de carga como sendo a carga que exerce uma força de um dine numa carga similar que se encontra a uma distância de 1 cm. Este sistema de unidades é conhecido como sistema electrostático. Coulomb estabeleceu que a força entre pólos magnéticos pode ser expressa numa equação idêntica à anterior (não existem pólos magnéticos isolados, mas uma barra magnética comporta-se como se estivéssemos perante pólos de sinais opostos na sua extremidade) e obteve a seguinte relação: $F= k_2m_1m_2/d^2$. A relação entre a electricidade e o magnetismo já tinha sido demonstrada experimentalmente por

[59] James Clerk Maxwell (1831-1879) nasceu em Edimburgo, na Escócia. Aos dezassete anos já tinha publicado três artigos com os resultados das suas investigações. Organizou o laboratório de Cavendish, na Universidade de Cambridge, centro mundial da investigação em física. Contribuiu para o desenvolvimento da teoria cinética dos gases, da mecânica estatística, da termodinâmica e da visão a cores. O seu maior trabalho foi a teoria electromagnética.

Oersted[61], Ampere (1775-1836) e Faraday, sendo possível derivar unidades de outras quantidades eléctricas da unidade de pólo magnético, definido a partir de $k_2=1$ na equação anterior. Este sistema de unidades é conhecido como sistema electromagnético c.g.s.. Para solucionar problemas práticos foi necessário estabelecer uma relação entre estes dois sistemas de unidades. A relação pode ser determinada medindo o valor de uma carga eléctrica, uma d.d.p. ou uma capacidade, por dois métodos diferentes, fornecendo o resultado em unidades diferentes. A primeira medida foi realizada por Wilhelm Weber (1804-1891) e Rudolph Kohlrausch (1809-1858) em 1857. Eles mediram a carga de um condensador, usando uma " Garrafa de Leyden[62]". O valor para a capacidade foi obtido em unidades electrostáticas e este valor foi comparado com a capacidade eléctrica de uma esfera e o seu potencial, que foi também determinada em unidades electrostáticas por um electrómetro. A carga é o produto da capacidade pelo potencial. A carga em unidades electromagnéticas é determinada descarregando o condensador através de uma bobina do galvanómetro. A corrente transitória comunica ao magnete do galvanómetro uma certa velocidade angular. Este balança num ângulo θ até ser levado ao repouso por oposição do campo magnético terrestre. O desvio máximo θ do galvanómetro oferece o valor de Q em unidades electromagnéticas através da fórmula

$$Q = \frac{H}{G} x \frac{T}{\pi} \operatorname{sen} \theta/2$$

onde H é a intensidade da componente horizontal do campo terrestre, G é uma constante do instrumento, e T é o tempo de uma vibração simples do galvanómetro. O valor obtido foi 310740 Km/s.

3.2.2 A teoria electromagnética da luz.

Maxwell continuou os trabalhos de Faraday e retomou as suas ideias. Se a luz consiste em vibrações do éter, é possível que o magnetismo consista na vibração de outro éter. Para tal é necessário calcular a velocidade a que se propagam estas vibrações.

[60] Charles Augustin Coulomb (1738-1879) estuda ciência e matemática e começa a sua carreira como engenheiro militar. Enquanto estudava máquinas inventou a balança de torção.

[61] Hans Christian Oersted (1777-1851)verificou experimentalmente a relação entre a electricidade e o magnetismo, ao verificar que uma corrente eléctrica ao atravessar um fio eléctrico provoca um desvio numa agulha magnética.

Analisando as equações, Maxweel concluiu que para calcular este valor só era necessário dividir a unidade de carga eléctrica, dada pela equação de Coulomb, pela unidade de carga eléctrica, dada pelos trabalhos de Ampere. Estas duas novas unidades já tinham sido determinadas pelos alemães Weber e Kohlrausch. A divisão dava um valor aproximado ao valor da velocidade da luz. Maxweel concluiu que os dois éter são um só, e que as vibrações electromagnéticas e luminosas não passam do mesmo fenómeno. Ele agregou todos os conhecimentos experimentais sobre os fenómenos eléctricos e magnéticos num conjunto de equações matemáticas. Mostrou que o campo electromagnético se podia propagar como uma onda transversa no éter e obteve a sua velocidade em função das propriedades eléctricas e magnéticas do meio.

Das equações de Maxwell:

$$rot\vec{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

e

$$rot\vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t},$$

deduz-se as seguintes:

$$Lap\vec{E} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

e

$$Lap\vec{H} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}.$$

Qualquer destas equações é uma equação de propagação de uma onda. A equação geral de propagação de uma onda é:

$$LapS = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 S}{\partial t^2}.$$

Conclui-se que

$$\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

tem as dimensões de uma velocidade e, portanto,

$$\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

[62] É um dispositivo que permite armazenar carga eléctrica. O nome deve-se ao físico Pieter Van Musschenbroek, professor de física em Leyden. Estes aparelhos têm actualmente o nome de

é a velocidade de propagação do campo electromagnético no vazio. Podemos rescrever as equações anteriores

$$Lap\vec{E} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

e

$$Lap\vec{H} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}$$

e obter a relação

$$\varepsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}.$$

Com este resultado matemático e com o conhecimento dos resultados da experiência de Weber e Kohlrausch, Maxwell afirma que a luz é " *uma perturbação electromagnética que, sob a forma de ondas*", se propaga no éter. E mais, desenrolou um panorama de ondas de diferentes comprimentos de onda que ia das ondas eléctricas às ondas visíveis. O mundo científico teve uma atitude céptica e trocista pelo facto de Maxweel afirmar que a luz consiste em ondas electromagnéticas.

3.2.3 A experiência de Hertz

Em 1880, a Academia de Berlim atribuía um prémio para quem verificasse a hipótese de Maxwell, ou seja, a produção por meios exclusivamente eléctricos de ondas de luz.

Coube a Hertz,[63] em 1887, a confirmação experimental da teoria de Maxweel. Ele notou que saltavam faíscas aquando da descarga de uma bobina de indução. Ele produziu ondas electromagnéticas com um oscilador e verificou que estas possuíam propriedades idênticas às da luz. O oscilador de Hertz era constituído por duas esferas metálicas, cada uma portadora de uma haste com uma pequena esfera metálica na extremidade, estando ambas as hastes ligadas aos terminais de uma bobine de Ruhmkorf[64].

condensadores.

[63] Heinrich Hertz (1857-1894) nasceu em Hamburgo, na Alemanha. Estudou matemática e física na universidade de Berlim. Em 1882 dedica-se ao estudo do electromagnetismo e analisa o trabalho de Maxwell. Em 1884 inicia a série de experiências em que descobre as ondas electromagnéticas. Durante estes trabalhos descobre o efeito fotoeléctrico.

[64] Bobine construída por Ruhmkorff (1803-1877). Consiste em duas bobinas coaxiais em que na bobina interior o eixo é ocupado por ferro macio. À bobina interior chama-se bobina primária ou indutora e a

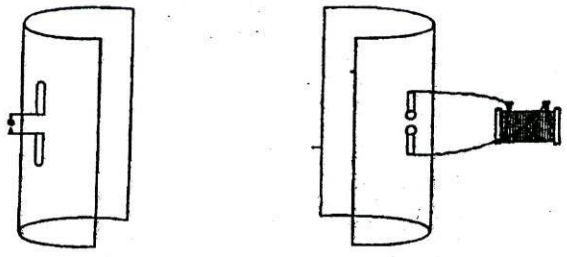


Figura 19: Montagem usada por Hertz.

Hertz construiu um dispositivo que permitia identificar as ondas produzidas pelo oscilador. Este dispositivo era constituído por um grosso fio de cobre formado por uma circunferência interrompida num arco muito pequeno, em cujos extremos existe uma pequena esfera de latão e um parafuso que permite variar o comprimento do arco. Quando o receptor capta as ondas electromagnéticas saltam faíscas entre a pequena esfera e a ponta do parafuso. Hertz descarregou uma garrafa de Leyde e, num espaço ao lado, recolheu no final de um fio de cobre pequenas faíscas. A descarga da garrafa produzia ondas no espaço, sendo estas ondas capazes de excitar à distância um receptor. Hertz tinha criado assim as T.S.F. Ele conseguiu fazer convergir a radiação, determinou o seu estado de polarização, refractou-a, reflectiu-a e fê-la interferir. Ele afirma " *Consegui raios distintos de força eléctrica, e com eles levei a cabo algumas das experiências elementares feitas habitualmente com a luz e calor radiante... Poderemos, talvez designá-los por raios de luz com um grande comprimento de onda. De qualquer modo, as experiências descritas parecem-me poder eliminar quaisquer dúvidas acerca da natureza comum da luz, do calor radiante e das ondas electromagnéticas*". Com esta experiência, Hertz colocou à mercê dos físicos, não só as ondas eléctricas - ondas hertzianas - mas toda uma vasta gama de radiações.

Blondlot, em 1891, determinou experimentalmente a velocidade das ondas electromagnéticas no vazio. Obteve o valor 297600 Km/s concluindo que era coincidente com o da velocidade da luz e com a razão entre as unidades electrostáticas e electromagnéticas, dentro da precisão da experiência.

O campo electromagnético ficava definido como uma perturbação do éter. O trabalho de Maxwell mostrou que a luz é uma propagação de ondas electromagnéticas e,

bobina exterior designa-se por secundária ou induzida. A passagem da corrente na bobina primária magnetiza o ferro macio; quando se abre o interruptor, dá-se uma variação brusca do campo magnético que provoca na bobina induzida uma força electromotriz. Se nos extremos do enrolamento da bobina induzida tivermos duas esferas saltará entre elas uma faísca.

de uma forma sucinta, estabeleceu uma teoria matemática que envolvia os fenómenos da luz, electricidade e magnetismo.

4

Relatividade e Cosmologia

" a luz propaga-se no vazio com uma velocidade bem definida c, independente do estado do movimento do observador"

Albert Einstein[65], 1905

4.1 A Velocidade da luz e a Relatividade

Antes de 1900, o electromagnetismo e a óptica estavam relacionados e explicados pela teoria ondulatória baseada nas equações de Maxwell. Como para qualquer movimento ondulatório existe um meio para as ondas se propagarem, admitia-se que a luz se propagava num meio, o éter, que preenchia todo o espaço e tinha múltiplas propriedades. Sabia-se que as leis da mecânica eram as mesmas em sistemas de coordenadas diferentes, que se deslocavam entre si com movimento uniforme.

4.1.1 Efeito de Doppler

No tempo de Galileo poucos eram os que acreditavam no movimento da Terra em torno do Sol. As objecções eram muitas, destacando-se o facto de nós não percebermos o movimento da Terra. Galileo que era defensor da teoria heliocêntrica, no livro *Diálogos sobre Dois Grandes Sistemas,* através da personagem de Salviati relata o

[65] Albert Einstein (1879-1955) nasceu em Ulm na Alemanha, tornando-se mais tarde cidadão suíço e posteriormente americano. Em 1905 termina a tese de doutoramento Sobre uma nova determinação das dimensões moleculares e publica quatro artigos. Dois sobre o movimento browniano, um sobre a relatividade restrita e um sobre a hipótese do quantum de luz. Em 1905 realiza o seu mais importante trabalho, a teoria da relatividade generalizada. Em 1922 recebe o prémio Nobel pela descoberta da lei do efeito fotoeléctrico.

seguinte: "*Feche-se com um amigo numa grande sala sob a ponte de um navio e arranjem moscas a voar, borboletas e outros pequenos animais. Tenha também um grande vaso com água contendo peixes e suspenda um balde, cuja água cai gota a gota por um orifício, noutro vaso com um gargalo estreito pousado no chão. Com o navio parado observe cuidadosamente os pequenos animais a voar, os peixes a nadar com a mesma velocidade para todos os lados, as gotas caindo no vaso pousado no chão. E, você mesmo, lance ao seu amigo um objecto verificando que o pode fazer com a mesma facilidade numa e noutra direcção, quando as distâncias são iguais; também pode constatar que saltando de pés juntos você atravessa espaços iguais em todos os sentidos. Quando tiver observado com cuidado todas estas coisas (embora não se duvide que tudo se passa assim com o navio parado) faça avançar o navio tão velozmente quanto queira, desde que o movimento seja uniforme sem oscilações para cá e para lá. Você não descobrirá nenhuma mudança em todos os efeitos precedentes e nenhum deles lhe dirá se o navio está em marcha ou parado... e a razão pela qual todos estes efeitos permanecem iguais é que o movimento é comum ao navio e a tudo que nele contém incluindo o ar*". Deste texto podemos concluir que as leis da mecânica são válidas num referencial, também o são num outro referencial que se mova relativamente ao primeiro com um movimento rectilíneo e uniforme. No início do século XX, as hoje conhecidas como transformações de Galileo eram consideradas ideias básicas do senso comum. Consideremos dois sistemas de coordenadas cartesianas ortogonais: S e S'. O sistema S' move-se com velocidade constante V relativamente ao sistema S. Considerando as origens coincidentes para o instante $t=t'=0$. A transformação de Galileo é $x = x'+Vt'$ e $t = t'$. A transformação inversa é: $x' = x - Vt$. Se um corpo tiver velocidade

$$v_x = \frac{dx}{dt}$$

no referencial S, a sua velocidade no referencial S' será:

$$v'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx'}{dt} = \frac{dx}{dt} - V = v_x - V .$$

As leis da mecânica clássica são invariantes sob as transformações de Galileo.

Em 1842, Christian Doppler, um professor na Universidade de Viena, quando vê passar um comboio nota que o silvo da locomotiva parece cada vez mais agudo à medida que ela se aproxima, e cada vez mais grave à medida que se afasta. As ondas sonoras comprimem-se mais umas contra as outras no primeiro caso, sendo o som mais

agudo, e na segunda situação afastam-se, sendo o som mais grave. As ondas sonoras vibram longitudinalmente na direcção da sua propagação e obtém-se a frequência das ondas através da expressão $f = v/\lambda$. Ele estuda a variação da frequência do som emitido por uma fonte sonora quando esta se desloca em relação ao observador. De acordo com a teoria clássica, quando um corpo está simultaneamente animado de duas velocidades estas compõem-se. No caso simples de movimentos na mesma direcção e no mesmo sentido, a velocidade resultante obtém-se a partir da expressão $v=v_1+v_2$. Em movimentos na mesma direcção mas em sentidos opostos, a velocidade resultante é $v = v_1 - v_2$. O som emitido por um comboio em andamento uniforme, com velocidade v_c, tem quando se aproxima do observador a velocidade $v = v_s + v_c$ (v_s é a velocidade do som com o comboio parado). Quando o comboio se afasta do observador a velocidade é $v' = v_s - v_c$. A frequência, quando se aproxima é $f = 1/\lambda(v_s + v_c)$ e quando se afasta é $f' = 1/\lambda(v_s - v_c)$, obtendo-se $v_c=\lambda/2(f-f')$, que permite obter a velocidade da fonte através da variação da frequência.

Doppler pensou que o mesmo acontecia com as ondas luminosas. Assim, se a estrela se aproxima é azul; se a estrela se afasta é vermelha. Este raciocínio não era completamente correcto, pois para que tal acontecesse era necessário que a velocidade da estrela fosse próxima da velocidade da luz. Fizeau corrigiu o raciocínio de Doppler, em 1848, tornando-se o efeito Doppler-Fizeau um princípio importante na astrofísica. No caso do afastamento da estrela, há deslocação para o vermelho das riscas espectrais e, no caso da aproximação, há deslocação para o azul das riscas espectrais. A partir da variação da frequência pode-se determinar a velocidade da estrela ou galáxia.

4.1.2 Experiência de Fizeau - Velocidade da luz num meio móvel

Em meados do século XIX, foram feitas várias experiências envolvendo a propagação da luz para determinar propriedades do éter, meio onde se supunha que a luz se propagava. A ideia era saber de que forma é que a velocidade da luz é influenciada pelo movimento do meio em que esta se propaga. Comparando, o caso do som com o da luz, sabemos que o som é influenciado pelo movimento do meio em que este se propaga. Será que acontecia o mesmo com a luz? Sabia-se nessa altura que a velocidade do som é maior quando se propaga no sentido do vento do que no sentido

contrário, por uma quantidade igual à velocidade do vento. Acontecerá o mesmo com a luz, quando esta se propaga no éter?

Uma experiência importante foi idealizada por Fizeau em 1859. Fizeau decidiu medir a velocidade de propagação da luz ao longo de um tubo com água que se deslocava com uma determinada velocidade. A velocidade da água adicionava-se ou subtraia-se a velocidade da luz?

Utilizando o método de Fizeau e Foucault o resultado obtido foi nulo. É evidente que, neste caso, a mudança do valor da velocidade da luz é mínima, uma vez que o valor da velocidade da água, que se pode obter, é muito pequeno quando comparado com o valor da velocidade da luz. Mas como se pretende saber unicamente se há diferenças para o valor da velocidade da luz em água móvel ou parada, poder-se-á utilizar um método de interferência de dois raios de luz.

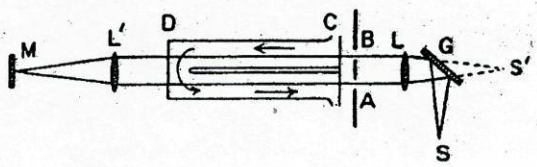


Figura 20: Velocidade da luz num meio móvel.

A luz monocromática de uma lâmpada de mercúrio é focada numa pequena abertura incidindo depois numa lâmina de vidro e numa lente, emergindo da lente um feixe paralelo que passa por duas aberturas, originando dois feixes. Os dois feixes de iguais intensidades passam por dois tubos contendo água a mover-se rapidamente em direcções opostas. Depois de passarem pelos dois tubos, os feixes são focados por uma lente num espelho. Após reflexão em M, os feixes atravessam novamente os tubos, passam pelas aberturas e são focados num ponto S', formando um sistema de franjas de interferência. Observando a figura, verifica-se que os feixes percorreram caminhos iguais. Se a água nos dois tubos se encontrar em repouso, os feixes percorrem o mesmo caminho. Atendendo à figura observa-se que um feixe se desloca a favor da corrente de água, enquanto que o outro se desloca contra a corrente de água. Se a luz se deslocar mais lentamente num percurso do que noutro, o percurso óptico aumenta e ocorrerá um deslocamento no sistema de franjas.

Usando tubos de 150 cm de comprimento e a água a uma velocidade de 7 m/s, Fizeau obteve um desvio de 0,46 franjas quando a direcção do movimento da água foi alterada. Fizeau chegou a um resultado diferente das duas possibilidades esperadas. A

velocidade da luz é diferente em água parada ou móvel, mas essa diferença é menor do que a velocidade da água. Verificou, observando as franjas de interferência, que a velocidade da luz aumenta cerca de 44% do valor da velocidade da água na direcção da propagação da água, enquanto que na direcção contrária decresce na mesma percentagem.

Fizeau, através dos resultados experimentais, deduziu a seguinte fórmula empírica,

$$V = \frac{c}{n} \pm \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) v \quad ,$$

onde n é o índice de refracção do meio e v é a velocidade do meio,
validando a hipótese do arrastamento parcial do éter, contida na fórmula de Fresnel.

Mais tarde, esta experiência foi repetida por Michelson e Morley que utilizaram o seu interferómetro. Eles obtiveram um desvio correspondendo a uma alteração na velocidade da luz em 0,434 vezes a velocidade da água, confirmando que a velocidade da luz é afectada pelo movimento do meio transparente onde se propaga. Mais tarde Lorentz mostrou que a expressão $1-1/n^2$ na equação de Fresnel devia ser substituída nos meios dispersivos por $1-1/n^2 - 1/n \, . \, (\lambda \, dn/d\lambda)$, o que viria a ser mais tarde confirmado experimentalmente.

4.1.3 Experiência de Michelson

No final do século XIX levantou-se uma dificuldade quando foi necessário estabelecer para o éter propriedades que se usam para descrever outro tipo de materiais. O fenómeno da polarização da luz tinha levado à conclusão de que a sua propagação ocorre através de vibrações transversais e estas só podem existir em materiais sólidos, pois estes resistem à tentativa de mudar a sua forma. Mas se era assim, como se explicava, por exemplo, o movimento dos planetas em torno do Sol ao longo dos tempos, sem encontrar resistência? O meio éter teve tantas propriedades que inclusive Mendeleev colocou, na sua Tabela Periódica dos Elementos, um espaço para o éter, tendo este o número atómico zero. No artigo de Maxweel escrito para a 9ª edição da *Encyclopedia Britannica* podemos ler "*Não pode haver dúvidas de que os espaços interplanetários e interestelares não estão vazios, mas sim ocupados por uma substância ou corpo material, que é certamente o maior e, provavelmente, o mais uniforme de que alguma vez tivemos conhecimento... Foram inventados éteres para*

enquadrar o movimento dos planetas, para constituir atmosferas eléctricas...O único que sobreviveu foi inventado por Huygens para explicar a propagação da luz".

Em 1879 Maxwell, escreveu a D.P.Todd para agradecer umas tabelas astronómicas acerca das efemérides de Júpiter cedidas pelo U.S. Nautical. Ele queria saber se era possível medir a velocidade do Sistema Solar através do éter mediante observação dos eclipses das luas de Júpiter. O período de Júpiter são doze anos terrestres e, como consequência, ele não avança muito na sua órbita no decurso de um ano, quando a Terra passa de A para B. Observando o período dos satélites com a Terra em A e B sucessivamente, podemos determinar o tempo que a luz demora a percorrer a distância igual ao diâmetro da órbita da Terra e foi desta forma que Roemer verificou que a luz se propaga com velocidade finita.

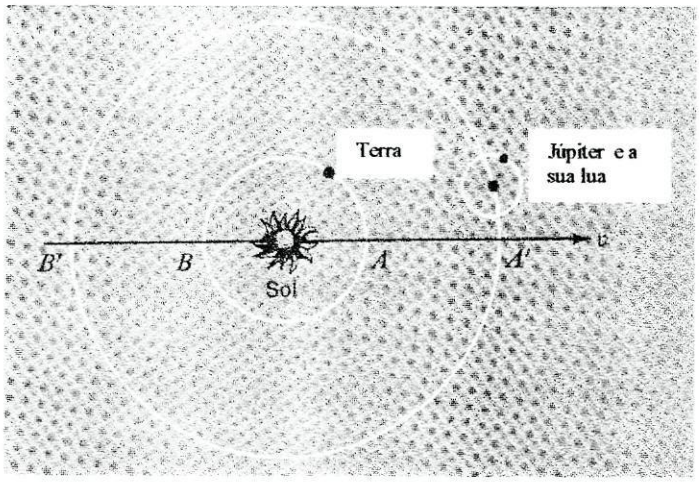


Figura 21: Experiência realizada por Maxweel para determinar a velocidade do Sistema Solar no éter.

Seria possível descobrir se o Sistema Solar se move através do éter com velocidade v, medindo o período dos satélites quando Júpiter se encontra primeiramente em A' e, passados seis anos, em B'. Se l é o diâmetro da órbita terrestre, espera-se que $t_1 = l/(c+v)$ e $t_2 = l/(c-v)$, com a diferença de tempos

$$\Delta t = t_2 - t_1 \approx \frac{2lv}{c^2} = \frac{2v}{c}\frac{l}{c},$$

em que l/c é aproximadamente 16 minutos. A detectar diferenças de tempo na casa dos segundos, o valor de v seria aproximadamente 150 Km/s. A dificuldade de obter esta diferença era enorme, para medidas efectuadas em intervalos de 6 anos. Os dados disponibilizados a Maxweel não eram suficientemente precisos para analisar esta

questão. Esta experiência é de primeira ordem, pois o seu efeito é proporcional à primeira potência de v/c. Nas experiências anteriormente realizadas intervinha um feixe de luz que voltava ao ponto de partida. Se a distância percorrida for l e se o movimento da Terra for no sentido do feixe, com uma velocidade v, o tempo total que a luz demora a ir e voltar é

$$t = \frac{l}{c+v} + \frac{l}{c-v} = \frac{2lc}{c^2 - v^2} \approx \frac{2l}{c}\left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right),$$

ou seja a variação de tempo devido ao movimento é

$$\Delta t \approx \frac{2l}{c}\frac{v^2}{c^2}.$$

Neste caso, o efeito é de segunda ordem. Maxwell pensou que este efeito seria tão pequeno que seria impossível detectá-lo. A carta de Maxwell a Todd foi lida por A.A.Michelson, um jovem instrutor naval, que no ano anterior, 1978, tinha feito uma medição da velocidade da luz. Ele não considerou impossível determinar o efeito de segunda ordem e pensou num método para consegui-lo. Michelson, de licença da Marinha, efectuava um trabalho de pós graduação no laboratório de Helmholtz, em Berlim, e concluiu que Maxwell tinha depreciado a precisão com que as experiências terrestres podiam ser efectuadas.

O éter na vizinhança da Terra devia ser arrastado pelo movimento da mesma. Como a Terra gira em torno do Sol à velocidade de 30 Km/s, a velocidade da luz deve ser maior no sentido do movimento da Terra do que numa direcção perpendicular. A experiência de Michelson e Morley segue o mesmo princípio da de Fizeau, só que neste caso não era possível ter dois tubos em que o éter se movesse em direcções diferentes. Podia-se medir o tempo de propagação da luz na direcção esperada do éter e numa direcção perpendicular a esta. Michelson inicialmente, e mais tarde com ajuda de Morley, realizou a experiência, cujos os princípios básicos tinham sido idealizados por Maxweel que tentava investigar a existência do arrastamento do éter. A experiência que consistia basicamente na divisão de um feixe de luz em dois, em que um se move no sentido do movimento da Terra e outro num sentido perpendicular. De seguida, reunia esses feixes fazendo-os interferir. Analisando as franjas de interferência, podia-se verificar se a velocidade dos dois feixes era ou não a mesma, quando se deslocava o aparato 90°.

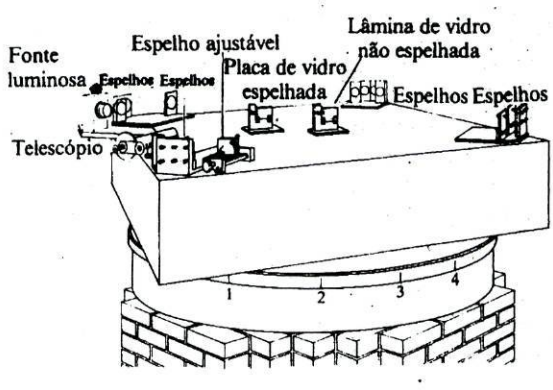


Figura 21: Experiência de Michelson-Morley.

Assumiu-se que o interferómetro é levado pelo movimento da Terra na direcção OM_1 com velocidade v relativamente ao éter e que as distâncias $OM_1 = OM_2$.

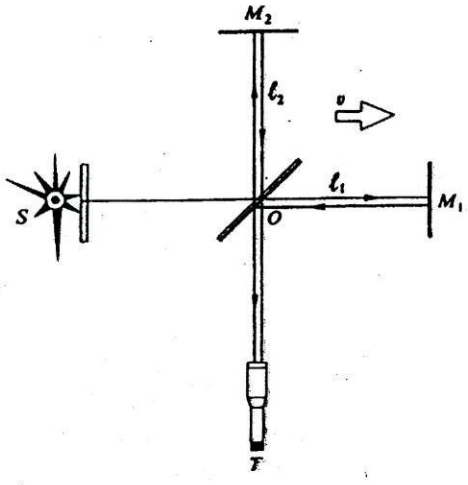


Figura 22: Experiência de Michelson-Morley. Cofiguração geral.

O tempo necessário para a luz percorrer a distância OM_1 é:

$$t_1' = \frac{l_1}{c - v}$$

No percurso de volta, M_1O, o feixe propaga-se a favor do vento éter, e o tempo necessário é:

$$t_1'' = \frac{l_1}{c + v}$$

O tempo total, $t_1' + t_2'$, do percurso OM_1O é:

$$t_1 = \frac{l_1}{c + v} + \frac{l_1}{c - v} = \frac{2cl_1}{c^2 - v^2}$$

que se pode escrever na forma:

$$t_1 = \frac{2l_1}{c}\gamma^2,$$

com

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

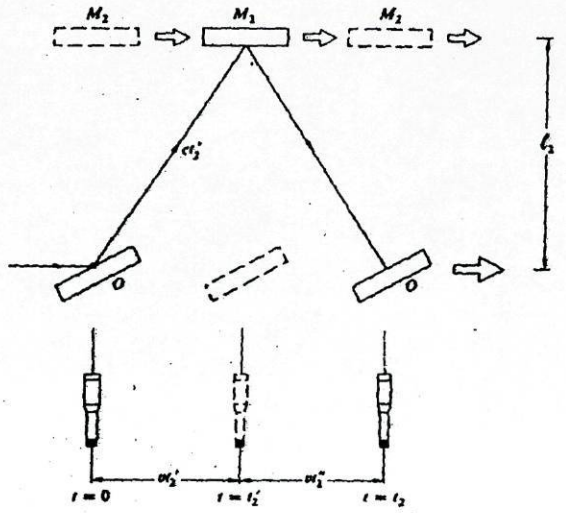


Figura 23 :Experiência de Michelson. Geometria do feixe transverso.

O tempo necessário para percorrer OM_2O, para o triângulo da direita será:

$$c^2 t'^2_2 = v^2 t'^2_2 + d_2^2,$$

logo:

$$t'_2 = \frac{l_2}{c}\gamma.$$

Este tempo é igual ao t_2", então $t_2 = t_1' + t_2'$

$$t_2 = \frac{2l_2}{c}\gamma.$$

Estas duas expressões pode ser simplificadas, obtendo-se:

$$t_1 = \frac{2cl}{c^2 - v^2} = \frac{2l}{c}\left(1 + \frac{v^2}{c^2} + \frac{v^4}{c^4} + \ldots\right) \approx \frac{2l}{c}\left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right)$$

e

$$t_2 = \frac{2l}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2l}{c}\left(1 + \frac{v^2}{2c^2} + \frac{3v^4}{4c^4} + \ldots\right) \approx \frac{2l}{c}\left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right).$$

A diferença de tempo, que seria nula para o interferómetro estacionário, é

$$t_1 - t_2 = \frac{2l}{c}\left(1+\frac{v^2}{c^2}\right) - \frac{2l}{c}\left(1+\frac{v^2}{2c^2}\right) = l\frac{v^2}{c^3}.$$

Uma diferença de tempo entre os dois percursos corresponde a uma diferença entre as medidas de OM_1O e OM_2O.

Mudando o resultado para obter a diferença de percursos (multiplicando por c), obtém-se:

$$\Delta = l\frac{v^2}{c^2}.$$

Se o interferómetro rodar 90°, a direcção de v é inalterada mas os dois percursos do interferómetro serão alterados. Isto introduzirá uma diferença de percurso Δ em oposição ao obtido anteriormente. Agora espera-se uma mudança duas vezes superior. Representando ΔN como o número de pares de franjas que se observavam no telescópio, se algum atraso ΔT fosse introduzido, ficava:

$\Delta N = \Delta T/\tau$, onde τ seria o período.

O interferómetro continha vários espelhos de modo a tornar o percurso do feixe o maior possível, cerca de 11m. Estava assente numa pedra que flutuava numa tina cheia de mercúrio. Michelson rodava a mesa e observava continuamente o padrão de interferências. Para uma velocidade de translação da Terra, cerca de 29,9 Km/s e para λ_0=550nm, o deslocamento provocado nas franjas pela rotação de 90° seria:

$$\Delta N = \frac{2l}{\lambda}\left(\frac{v}{c}\right)^2 \text{ ou } \Delta N = 0.4.$$

Foram feitas várias observações, onde seria possível detectar qualquer deslocamento equivalente a uma fracção diminuta de franja, mas nada foi detectado.

Quando analisou os resultados da experiência, Michelson verificou que a velocidade dos dois feixes de luz era igual, ou seja, a velocidade da luz é a mesma nos dois sentidos. Ele pensou que a razão de tal resultado se devia ao facto de a experiência não ter sido realizada com a suficiente precisão. Ele repetiu várias vezes a experiência, agora com a ajuda de Morley e, apesar da precisão ser maior, os resultados publicados em 1887 continuavam a ser os mesmos. Michelson concluiu o seguinte "*Demonstra-se, assim, a incorrecção do resultado da hipótese de um éter estacionário, seguindo-se a necessária conclusão de que a hipótese é errónea*".

Deste modo, ficava demonstrado que não existia nenhuma prova física do movimento da Terra relativamente ao éter. Assim, no final do século XIX e início do século XX, existia um sentimento dúbio acerca da propagação da luz.

A maioria dos físicos considerava o modelo ondulatório o mais adequado para a propagação da luz, pois explicava facilmente o fenómeno de interferência, difracção, polarização e refracção da luz. O resultado da experiência de Michelson e o fenómeno da aberração da luz eram facilmente explicados com o modelo corpuscular, em que a velocidade é definida univocamente à fonte e não ao meio. Segundo a teoria ondulatória, a aberração estelar era explicada considerando que a Terra se move relativamente ao éter, mas para explicar os resultados da experiência de Michelson-Morley era necessário que a Terra não se movesse relativamente ao éter. A experiência de Fizeau e de Airy corroborava a hipótese do arrastamento parcial da luz devido ao movimento do meio. Será o éter arrastado com o movimento da Terra? O acumular de dificuldades e contradições no que diz respeito à natureza do éter (responsável pelas interacções electromagnéticas e propagação da luz) tornou-o confuso.

Em 1900, Poicaré começa a perceber as implicações da inexistência de quaisquer efeitos experimentais do movimento da Terra relativamente ao éter e afirmou "*O éter existirá na realidade? Não acredito que observações mais precisas possam alguma vez revelar algo mais do que movimentos relativos*". E acrescentou " *Sabemos donde provém a nossa crença no éter...[a luz] já não está na estrela, mas não está ainda na Terra. Tem de estar nalguma parte, sustentada, por assim dizer, nalgum suporte material*".

Fitzgerald tentou interpretar os resultados obtidos por Michelson, referindo que o facto da velocidade da luz ser igual nas duas direcções se explica devido ao interferómetro se contrair no sentido do movimento da Terra, de modo a compensar a diferença de velocidade. Fitzgerald propôs que os corpos materiais que se movem com velocidade v no éter contraem-se na direcção do movimento. Esta contracção, que é a mesma para todos os corpos, reduz a distância entre a lâmina central e o espelho que se encontra na direcção do movimento do éter, de modo que o tempo de chegada seja igual, eliminando qualquer alteração nas franjas de interferência. Foram feitas então várias tentativas para explicar a contracção, incluindo a interacção das forças eléctricas e magnéticas entre os átomos que formam os materiais.

Fenómeno	Explicação com o modelo Corpuscular	Explicação com o modelo ondulatório
Propagação rectilínea da luz	Adequada	Válido se o comprimento de onda << comprimento do raio
Interferência e difracção da luz	Inadequado	Adequado
Polarização da luz	Inadequado	Adequado
Velocidade da luz independente da velocidade da fonte	Inadequado	Adequado
Velocidade da luz maior no ar do que na água	Inadequado	Adequado
Experiência de Fizeau e Airy	Arrastamento parcial da luz pelo meio	Arrastamento parcial da luz pelo meio
Aberração da luz	Adequado	Adequado se a Terra se mover em relação ao éter
Experiência de Michelson-Morley	Adequado	Adequado se a Terra não se mover em relação ao éter.

Tabela 1: Teoria ondulatória /Teoria corpuscular.

Em 1892, num artigo sobre a teoria electromagnética atomística, Lorentz refere, acerca da experiência de Michelson, que se o comprimento for l na última posição do interferómetro, a hipótese do éter de Fresnel pode ser mantida, se o comprimento na posição inicial l' for

$$l' = l\left(1 - \frac{v^2}{2c^2}\right),$$

que é a chamada contracção de Fitzgerald-Lorentz até à segunda ordem em v/c.

Em 1899, Lorentz escreve as transformações $x' = \gamma(x - vt)$; $y'=y$; $z'=z$; e

$$t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right), \text{ com } \gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}},$$

que relacionam um conjunto de sistemas de coordenadas de espaço-tempo (x',y',z',t') com outro (x,y,z,t) que se move com velocidade constante v, relativamente ao primeiro. Lorentz e Poincaré demonstraram que estas equações de transformação eram invariantes para o electromagnetismo, o que não acontecia com as transformações de Galileo.

Em 1905, Poincaré afirma " *Talvez devamos construir uma nova mecânica, da qual possamos apenas captar um pormenor... em que a velocidade da luz se torne um limite inultrapassável. [...] Parece que esta impossibilidade de demonstrar o movimento*

absoluto é uma lei geral da Natureza". Ele também colocou em causa as definições anteriores da simultaneidade dos fenómenos e afirma " *Não há tempo absoluto; dizer que dois intervalos de tempo são iguais é uma asserção que não tem significado por si só...*" E acrescenta: "*É difícil separar os problemas qualitativos da simultaneidade do problema quantitativo da medida do tempo. Ou se utiliza um cronómetro, ou se tem em conta uma velocidade de transmissão, como a da luz, visto não podermos medir tal velocidade sem medir um intervalo de tempo.*"

4.1.4 A teoria da relatividade de Einstein

Em 1905, Einstein começou por retirar o éter da teoria da propagação da luz. Mas sem o éter a preencher todo o espaço, não pode haver movimento absoluto. Segundo Einstein, só pode haver movimento de um corpo relativamente a outro, ou de um sistema de referência relativamente a outro. É natural que os resultados obtidos na experiência de Michelson-Morley fossem negativos, não sendo possível detectar se a Terra estava ou não a mover-se no espaço.

A teoria de Einstein baseia-se em dois postulados, o primeiro dos quais é uma renovação da ideia de Galileo sobre a relatividade.

Postulado 1- Não se pode perceber o movimento absoluto.

Por sistema galileano, entendem-se os sistemas livres de todas as forças, onde se verifica o princípio da inércia. As leis da física são as mesmas para todos os sistemas que se encontrem em movimento rectilíneo uniforme relativamente a outro.

O segundo postulado aparece como uma lei física, susceptível de ser verificado pela experiência.

Postulado 2- A velocidade da luz é independente do movimento da fonte.

Este postulado modifica profundamente o estatuto da velocidade da luz: de entidade cinemática e essencialmente relativa, ela é agora um fenómeno descrito por uma lei invariante. Em qualquer referencial inercial a velocidade da luz é sempre a mesma, quer seja emitida por um corpo em repouso, quer por um corpo em movimento uniforme.

A partir destes dois postulados Einstein deduziu as transformações de Lorentz, que não conhecia. Até Einstein, as transformações de Lorentz eram consideradas como um mero truque matemático, sem nenhum significado físico. Com Einstein, estas

fórmulas passaram a ter um significado real com consequências nas noções de espaço, tempo e movimento.

A partir das transformações de Lorentz, Einstein deduz a contracção dos comprimentos de Fitzgerald-Lorentz e a dilatação dos tempos, dando uma nova interpretação à contracção do espaço. O comprimento varia com o observador, ou seja, se um observador está em movimento relativamente a um determinado comprimento, este é mais curto do que para um observador que está em repouso relativamente a esse mesmo comprimento. Não existe espaço nem tempo absoluto.

Consideremos dois eventos que ocorrem em x_0 nos instantes t'_1 e t'_2, no referencial S'. O referencial S' move-se com velocidade V relativamente ao referencial S. No referencial S esses eventos ocorrerão, usando a transformação de Lorentz, nos instantes:

$$t_1 = \gamma\left(t'_1 + \frac{Vx'_0}{c^2}\right) \text{ e } t_2 = \gamma\left(t'_2 + \frac{Vx'_0}{c^2}\right)$$

em que a diferença dos tempos é $t_2 - t_1 = \gamma\left(t'_2 - t'_1\right)$.

Conclui-se que o intervalo de tempo entre dois acontecimentos que ocorrem no mesmo local, num determinado referencial, é sempre menor que o intervalo de tempo entre os mesmos acontecimentos medido noutro referencial, em que os eventos ocorrem em diferentes locais.

Consideremos uma barra em repouso no referencial S', com uma extremidade em x'_1 e outra em x'_2. O comprimento desta barra é $L = x'_2 - x'_1$ no referencial S'. No referencial S o comprimento é $L = x_2 - x_1$, onde x_2 é a posição da extremidade num instante t_2 e x_1 a posição da outra extremidade no mesmo instante($t_2 = t_1$). Obtemos, usando as transformações de Lorentz, que $x'_2 = \gamma\left(x_2 + Vt_2\right)$ e $x'_1 = \gamma\left(x_1 + Vt_1\right)$ em que $t_2 = t_1$, e $x'_2 - x'_1 = \gamma\left(x_2 - x_1\right)$.

Conclui-se que o comprimento da barra é menor quando medido num referencial onde a barra está em movimento.

Na mecânica de Newton não existia limite superior para a velocidade de um corpo material. Einstein em 1905 deduz a expressão $E=mc^2$, em que E representa a energia, m a massa e c a velocidade da luz. Devido a esta equivalência, a energia de um corpo devido ao seu movimento adicionar-se-á à sua massa, ou seja, será cada vez mais difícil aumentar a sua velocidade. De facto, um corpo nunca pode atingir a velocidade

da luz, porque seria necessária uma quantidade infinita de energia para incrementar indefinidamente a massa.

Einstein através das transformações de Lorentz deduz a adição relativista das velocidades e conclui que " *velocidades superiores à da luz não têm possibilidade de existência*". Einstein não deduziu a fórmula de Fresnel, que é uma consequência imediata da lei relativista da adição de velocidades. Esta dedução foi realizada por Max Von Laue que afirma "*de acordo com o principio da relatividade, a luz é completamente arrastada pelo corpo [isto é, pelo fluído em movimento], mas, precisamente devido a esse facto, a respectiva velocidade para um observador que não participa no movimento do corpo não é igual à soma vectorial da sua velocidade relativa ao corpo e [da velocidade] do corpo relativamente ao observador*". Não existe então o arrastamento do éter por fluídos em movimento e o resultado obtido é simplesmente a adição relativista da velocidade da luz e do líquido. Num meio móvel de índice de refracção n, a propagação da luz sofre, segundo Fresnel, um efeito de arrastamento parcial. Na relatividade restrita este efeito não é mais do que uma sequência da lei relativista da composição das velocidades.

A fórmula relativista para a adição de duas velocidades, v_1 e v_2 é:

$$V = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}.$$

A fórmula relativista da adição de velocidades explica os resultados empíricos da experiência de Fizeau, realizada cinquenta anos antes.

Seja:

$$v_1 = \frac{c}{n}$$

velocidade da luz na água e $v_2 = v$ velocidade da água, obtemos:

$$V = \frac{\frac{c}{n} + v}{1 + \frac{cv}{nc^2}} = \frac{\frac{c}{n} + v}{1 + \frac{v}{nc}}\left(1 - \frac{v}{nc}\right)$$

$$V = \frac{(\frac{c}{n} + v)}{1 - \frac{v^2}{nc^2}}\frac{(\frac{c}{n} + v)}{n} = \frac{\frac{c}{n} + v - \frac{v}{n^2} + \frac{v^2}{nc^2}}{1 - \frac{v^2}{n^2 c^2}}$$

Se v menor que c, então v/c é um número muito pequeno, e $(v/c)^2$ também, podemos então desprezar este termo, obtemos então:

$$V = \frac{c}{n} + v - \frac{v}{n^2} = \frac{c}{n} + v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

que é a fórmula empírica obtida por Fizeau e deduzida por Fresnel.

No mesmo artigo de 1905, deduz a expressão relativista da aberração da luz no zénite. Se a velocidade da luz não se alterar devido ao movimento relativo do observador e da fonte, observam-se alterações no comprimento de onda (efeito de Doppler) e na direcção de observação (aberração da luz).

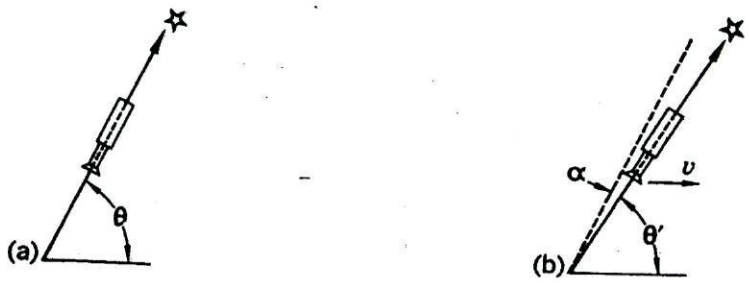


Figura 24: Aberração da luz

Consideremos S um sistema com o Sol em repouso e S' o sistema em que a Terra se move com uma velocidade orbital V em relação a S. partindo do suposto que a direcção da estrela, medida desde o plano da órbita terrestre é θ no sistema S e θ' no sistema S', obtemos v_x=-$c\cos\theta$ e v_y=-$c\,sen\theta$ para as componentes da velocidade da luz, medida em S. Utilizando as equações de transformação de Lorentz, obtém-se:

$$v_x' = \frac{-(c\cos\theta + V)}{1 + V\cos\theta/c} \quad \text{e} \quad v_y' = \frac{-c\,sen\theta}{\gamma\left(1 + V\cos\theta/c\right)}.$$

Na direcção θ' observada em S'

$$\cos\theta' = \frac{-v_x'}{c} = \frac{\cos\theta + V/c}{(1 + V\cos\theta)/c}$$

e designando $\beta = \frac{V}{c}$ obtemos a expressão:

$$\cos\theta' = \frac{\cos\theta + \beta}{1 + \beta\cos\theta}.$$

Como

$$\cos\theta' \approx (\cos\theta + \beta)(1 - \beta\cos\theta),$$

obtém-se

$$\cos\theta' \approx \cos\theta + \beta sen^2\theta \,. \quad (1)$$

O ângulo de aberração α, deduzido num capitulo anterior é

$$\alpha = \theta - \theta'$$

e como $\beta = \frac{V}{c}$ é aproximadamente igual a 10^{-4}, obtém-se

$$\cos\theta' = \cos\theta\cos\alpha + sen\theta sen\alpha \,.$$

Como α é um ângulo muito pequeno cosα=1 e senα=α e, como consequência:

$$\cos\theta' \approx \cos\theta + \alpha sen\theta \,. \quad (2)$$

Comparando esta equação (2) com a anterior (1), verificamos que $\alpha = \beta sen\theta$, que é a equação para a aberração obtida por Bradley. Como vimos, pensava-se que o ângulo de aberração se alterava se enchêssemos o telescópio de água. A explicação relativista é que com o telescópio vazio o observador vê a estrela no centro do campo de visão quando o eixo do telescópio é colocado numa direcção normal à direcção da estrela. Enchendo o telescópio com água não se altera esta condição.

No efeito de Doppler acústico (no início do capítulo), verificamos que há uma variação da frequência do silvo de um comboio quando este se aproxima ou se afasta do observador. Neste caso existe um meio, o ar, no qual a fonte ou o observador se movem. No caso da luz, que se propaga no vazio, não existe tal distinção.

Consideremos o caso da fonte em movimento e o receptor em repouso relativamente ao meio. Seja f_0 a frequência da fonte. Num certo intervalo de tempo Δt, a fonte emite um certo número de ondas N dado pela equação $N=f_0\Delta t$. A frente de onda percorre a distância $v\Delta t$, enquanto que a fonte percorre a distância $v_s\Delta t$, onde v_s é a velocidade da fonte relativamente ao meio. Uma vez que N ondas emitidas estão na distância $(v-v_s)\,\Delta t$, o comprimento de onda na frente da onda é:

$$\lambda = \frac{(v - v_s)\Delta t}{N} = \frac{v - v_s}{f_0} \,.$$

A frequência é

$$f' = \frac{v}{\lambda} = \frac{f_0}{1 - \frac{v_s}{v}} \,.$$

Atrás da fonte que se afasta, o comprimento de onda é

$$\lambda = \frac{(v + v_s)\Delta t}{N} = \frac{v + v_s}{f_0}$$

e a frequência

$$f' = \frac{v}{\lambda} = \frac{f_0}{1 + \frac{v_s}{v}}.$$

A situação é um pouco diferente se a fonte estiver em repouso relativamente ao meio e o observador se mover em relação à fonte. Seja v_r a velocidade do receptor relativamente à fonte. A frequência quando o observador se aproxima é

$$f' = \frac{f_0}{1 + \frac{v_r}{v}}.$$

Quando o observador se afasta a frequência é

$$f' = \frac{f_0}{1 - \frac{v_r}{v}}.$$

Nas deduções anteriores admitimos que a velocidade da fonte era menor que a velocidade da onda. Se a fonte sonora se move com uma velocidade maior do que a velocidade da onda, não haverá ondas na frente da fonte. Atrás da fonte as ondas acumulam-se umas sobre as outras formando uma onda de choque, que estão confinadas a um cone. A razão entre a velocidade da fonte e a velocidade da onda é o número de Mach. Este fenómeno também existe na radiação electromagnética emitida quando uma partícula carregada se move num meio com velocidade maior do que a velocidade da luz nesse meio. Esta radiação é conhecida como radiação de Cerenkov. No entanto, é impossível que uma partícula tenha velocidade maior do que a velocidade da luz no vazio.

Surge então um problema quando se estuda o efeito de Doppler para a luz que se propaga no vácuo. As equações do efeito de Doppler para o som parecem implicar a possibilidade de percebermos o movimento absoluto em relação ao vácuo. Esta observação contradiz o princípio da relatividade que refere que é impossível percebermos o movimento absoluto. No caso do som, existe um meio em relação ao qual o movimento ocorre. Isto significa que as equações anteriores são apenas aproximações. Para a luz, o efeito de Doppler é o mesmo quer seja a fonte ou o

observador que estejam em movimento, isto é, o efeito depende somente do movimento relativo entre a fonte e o receptor.

É necessário deduzir as equações do efeito de Doppler para a luz. Consideremos uma fonte que se move na direcção de um receptor, com velocidade V. Seja N o número de ondas electromagnéticas emitidas pela fonte. A primeira onda percorrerá a distância $c\Delta t_r$ e a fonte percorrerá a distância $V\Delta t_r$ no intervalo de tempo Δt_r, medido no referencial do receptor. O comprimento de onda será:

$$\lambda = \frac{(c\Delta r_r - V\Delta t_r)}{N}$$

e a frequência

$$f' = \frac{c}{\lambda'} = \frac{1}{1-\frac{V}{c}} \frac{N}{\Delta t_r}.$$

Se a frequência da fonte for f_0 ela emitirá $N=f_0\Delta t_s$ ondas no intervalo de tempo Δt_s medido pela fonte. Este intervalo de tempo Δt_s é o intervalo de tempo próprio. Os intervalos de tempo Δt_r e Δt_s estão relacionados pela equação da dilatação do tempo $\Delta t_r=\gamma\Delta t_s$. Assim quando a fonte e o receptor estão em aproximação, a frequência é:

$$f' = \frac{1}{1-\frac{V}{c}} \frac{f_0\Delta t_s}{\Delta t_r} = f_0\sqrt{\frac{1+\frac{V}{c}}{1-\frac{V}{c}}}.$$

Quando a fonte e o receptor se afastam um do outro a frequência é:

$$f' = \frac{1}{1+\frac{V}{c}} \frac{f_0\Delta t_s}{\Delta t_r} = f_0\sqrt{\frac{1-\frac{V}{c}}{1+\frac{V}{c}}}.$$

Este resultado difere do obtido com a teoria clássica pela presença do factor de dilatação do tempo. As expressões obtidas serão as mesmas se os cálculos forem realizados no referencial da fonte.

Einstein descobre o efeito de Doppler transverso, em que f' difere de f mesmo que o movimento da fonte seja perpendicular à direcção de observação. A lei de

transformação para as frequências é: $f' = \gamma f\left(1 - v\cos{}^{\phi}/_{c}\right)$[66], em que ϕ é o ângulo entre um raio de luz monocromática com frequência f e a direcção x.

Einstein, aquando do estudo do problema da radiação do corpo negro e do efeito fotoeléctrico, deduz a relação E=hγ e afirma " *a teoria ondulatória da luz, que opera através de funções contínuas de variáveis espaciais, provou ser uma ferramenta excelente para a descrição de fenómenos puramente ópticos [..] [contudo] é concebível que [esta] teoria possa conduzir a conflitos com a experiência quando for aplicada aos fenómenos de geração e conversão de luz.*" Ele considera boa a teoria de Maxwell-Lorentz do campo electromagnético "livre" e que, " *provavelmente, nunca será substituída por outra*", mas tal já não acontece no que se refere à interacção da luz com a matéria.

4.1.4 A união do espaço e tempo

Até Einstein o espaço e o tempo eram considerados duas entidades independentes. Para Newton a definição de espaço implicava a existência de um sistema absoluto de referência e a definição de tempo implicava a existência de um tempo padrão universal que podia ser conseguido com cronómetros sincronizados.

A verificação que a velocidade é finita e é a mesma para qualquer referencial inercial acarreta implicações nas definições de espaço e tempo.

Consideremos uma barra com comprimento L. Se a barra é colocada verticalmente, a sua projecção vertical é 0 e a sua projecção horizontal é L. Se a barra é colocada horizontalmente, a sua projecção vertical é L e a sua projecção horizontal é 0. Se a barra é colocada com um certo ângulo θ, ambas as projecções são diferentes de 0. Mas, qualquer que seja o ângulo θ obtemos (usando o teorema de Pitagoras):

$$\Delta x^2 + \Delta y^2 = L^2 .$$

Esta analogia conduziu Minkowski à conclusão que o tempo pode ser considerado, de certa forma, como uma quarta coordenada, complementar às três coordenadas espaciais. O movimento de um sistema em relação a outro pode ser tratado como uma rotação da quarta coordenada. Minkowski conclui que para o tempo ser considerado a quarta dimensão, este devia ser medido utilizando as mesmas unidades

[66] A dedução desta equação encontra-se no livro *Relatividad Especial* de A.P.French.

das outras três dimensões. Isto pode ser realizado multiplicando o tempo por uma velocidade padrão. A velocidade lógica que deveria ser escolhida é a velocidade da luz no vazio, que é invariável. Então obtemos as quatro coordenadas *x, y, z* e *ct*.

Na conferência de 1908, sobre o espaço e o tempo, Minkoski afirma " *Os pontos de vista sobre o espaço e o tempo que pretendo apresentar-lhes... são radicais. Daqui em diante o espaço, por si só, e o tempo, por si só, estão condenados a desvanecer-se em meras sombras, e apenas um tipo de união dos dois conservará uma realidade independente*".As três coordenadas espaciais são as intermudadas. O que não pode existir totalmente entre estas três coordenadas e a coordenada temporal. É necessário então que esta quarta coordenada tenha características especiais, diferentes das coordenadas espaciais.

Suponhamos que enviamos um sinal das coordenadas $x=0$, $y=0$, $z=0$ no instante $t=0$. No instante *t*, o sinal de luz atinge um determinada posição com coordenadas espaciais *x,y e z* e, de acordo com o teorema de Pitágoras a distância para a origem é

$$\sqrt{x^2+y^2+z^2}\,.$$

Como a luz se propaga com velocidade *c*, esta distância é igual a *ct* e podemos escrever

$$\sqrt{x^2+y^2+z^2}=ct$$

ou

$$x^2+y^2+z^2-(ct)^2=0\,,$$

mas como $i^2=-1$ podemos rescrever a equação

$$x^2+y^2+z^2+(ict)^2=0\,.$$

Noutro sistema de coordenadas que se move relativamente à origem do sistema anterior, obtemos:

$$x'^2+y'^2+z'^2+(ict')^2=0.$$

A equação $x_1^2+x_2^2+x_3^2+x_4^2$ com $x_4=ict$ é invariante, não interessando a partir de que sistema de referência dois eventos são observados.

Minkowski identificou as transformações de Lorentz com pseudo rotações para as quais $x_1^2+x_2^2+x_3^2+x_4^2$ é invariante, $x_4=ict$ e x_1, x_2, x_3 representam as variáveis espaciais. As três dimensões do espaço e a dimensão do tempo mudaram, mas as quatro dimensões separadas dadas pela expressão anterior mantiveram-se inalteradas. Usando *ict* como quarta coordenada, chegamos à união matemática do espaço e tempo e

podemos considerar que todos os eventos físicos têm lugar no espaço quadridimensional.

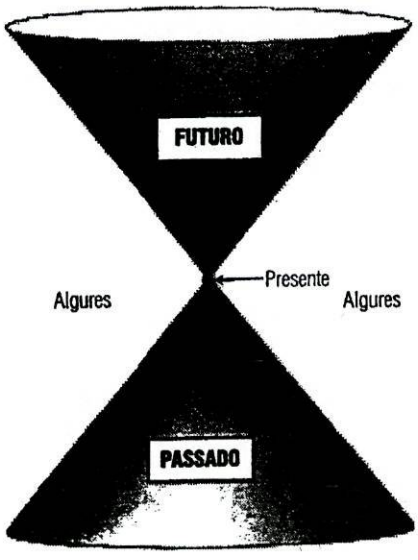


Figura 25: O espaço e o tempo

A superfície cónica divide o contínuo em "passado", "presente" e "futuro". Esta superfície cónica com 90° de abertura, conhecida como cone de luz, corresponde a eventos que podem estar ligados por um sinal de luz.

Observações do espaço e intervalo de tempo de um sistema móvel podem ser interpretados geometricamente como uma rotação da quarta coordenada, onde o eixo do tempo roda segundo um dado ângulo. Como a velocidade do movimento nunca pode ser maior do que a velocidade da luz, o ângulo θ com que roda o eixo *ict* nunca pode ser maior do que 90°. Considerando as coordenadas $x=0$, $y=0$ *e* $t=0$ todos os eventos localizados na parte superior do cone correspondem ao futuro, não interessando a velocidade a que nos movemos, visto que algum tempo passará até o vermos. Os eventos localizados na parte inferior do cone correspondem ao passado e não interessa a velocidade a que nos movemos, pois não o veremos. Os acontecimentos passados podem influenciar-nos, mas nós não podemos influenciá-lo. Entre a parte superior e a parte inferior do cone encontra-se o presente.

4.1.6 Teoria geral da relatividade

Antes da descoberta de Roemer, a grande maioria dos cientistas pensava que a luz se deslocava com velocidade infinita, de maneira a que a gravidade não se ria capaz de alterar a sua velocidade. A descoberta de Roemer significava que a gravidade podia ter algum efeito na propagação da luz.

No livro de Newton, *Optics*, podemos ler " *Não actuam os corpos sobre a luz à distância, e pela sua acção encurvam os seus raios, e não é esta acção (caeteris paribus) a mais forte quando a distância é menor*". A deflexão da luz sob a influência da gravitação nunca foi examinada por Newton apesar de ser uma característica da teoria corpuscular da luz.

Em 1907 Einstein tem " *o pensamento mais feliz da vida*". Quando uma pessoa cai livremente não sente o seu próprio peso. Para um observador que cai livremente do telhado de uma casa não existe campo gravitacional. Einstein encontrou nesta equivalência, mais do que um fenómeno mecânico similar. Ele estabeleceu a relação entre movimentos acelerados e a força da gravidade. Ele descreve uma experiência imaginária que ocorre num quarto fechado, em que uma raio de luz é emitido numa nave interestelar. Se colocarmos um laser no extremo dessa nave e enviarmos um feixe de luz ao longo da nave e se colocarmos lâminas de vidro fluorescentes ao longo do trajecto em posições equidistantes poderemos ver o feixe a atravessar as lâminas em linha recta, sendo impossível dizer se a nave esta em repouso ou em movimento uniforme. Se a nave se move com aceleração constante, o tempo que a luz demora a atingir as laminas de vidro vai aumentar progressivamente. A trajectória que se vai obter é idêntica a trajectória de uma pedra lançada horizontalmente. Se a nave for acelerada, todos os objectos serão atirados para o chão como se neles actua-se uma força gravítica que os puxa-se para baixo. Isto demonstra a equivalência entre gravidade e aceleração. Se a equivalência entre aceleração e gravidade for estendida aos fenómenos electromagnéticos, os raios de luz são atraídos pelo campo gravitacional. A luz curva-se no campo de aceleração e tendo em conta o principio da equivalência, devia acontecer o mesmo num campo gravitacional. Ele pensa que este efeito é demasiado pequeno para ser detectável.

Einstein em 1911 publica o artigo *Sobre a influência da gravitação na propagação da luz* e, acerca das considerações de 1907 verifica que o encurvamento da

luz é possível de verificação experimental. O desvio da luz pelo Sol devia ser detectável. A expressão

$$c_1 = c_2\left(1+\frac{\phi}{c^2}\right)$$

é aplicada à uma deflexão de um raio de luz originada no infinito e movendo-se no campo de uma fonte gravitacional pontual (potencial 1/r). Einstein obtém que este raio sofre um desvio α na direcção da fonte dado por

$$\alpha = \frac{2GM}{Rc^2},$$

onde R é a distância de maior aproximação, M a massa da fonte, G constante Gravitacional. Para um raio que passe junto ao Sol e aplicando o principio de Huygens, o raio sofre o desvio de é 0,87". Einstein refere que as relações deduzidas são válidas em primeira aproximação. Quatro anos mais tarde, aquando da publicação da teoria geral da relatividade, ele acrescenta o factor 2[67].

Já anteriormente, em 1801, o astrónomo alemão Soldner tinha respondido a questão de Newton. Ele tratou a luz como um corpo pesado e afirma " *Não se pode pensar de uma coisa que existe e impressiona os nossos sentidos que não tenha a propriedade da matéria*". Os cálculos estavam baseados na teoria da emissão de Newton. O trabalho de Soldner só foi conhecido em 1921.

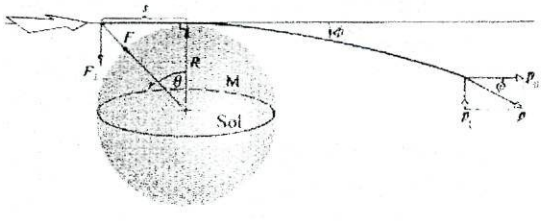


Figura 26: O encurvamento da luz.

Consideremos um fotão emitido no infinito e que passa junto ao Sol. Segundo a teoria de Newton a força exercida pelo Sol no fotão é

$$F = \frac{GMm}{r^2}$$

e $r=R/\cos\theta$. A componente da força na direcção perpendicular é

[67] A dedução encontra-se no livro *Principles of cosmology and Gravitation* de M.V.Berry.

$$F = \frac{GMm\cos\theta}{R^2 \sec^2\theta}.$$

Como $cdt=ds=d(tan\theta)=Rsec^2\theta d\theta$, a componente perpendicular do momento linear é:

$$p = \int Fdt = \frac{GMm}{cR}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta d\theta = 2GMm/cR.$$

Como $tan\varphi=p\perp/p\| =2GM/c^2R\simeq\varphi$. Soldner obteve $\varphi=0,84''$, utilizando os valores de G, M, R e da velocidade da luz aceites naquela época.

A teoria da relatividade restrita era inconsistente com a teoria da gravitação de Newton. De acordo com a teoria de Newton, deslocando um corpo, a força exercida sobre o outro mudaria instantaneamente, ou seja, o efeito gravitacional deslocar-se-ia com velocidade infinita. Einstein propôs a teoria geral da relatividade, em que a gravidade é uma consequência do facto do espaço-tempo não ser plano, mas ser curvo devido à distribuição de massa e de energia.

Passam alguns anos para compreender que a curvatura do espaço modifica o encurvamento da luz. Em 1915 descobre que a relatividade generalizada implica que o encurvamento da luz pelo Sol é o dobro do previsto pela teoria de Newton. Este factor 2 estabeleceu a confrontação entre as teorias de Newton e Einstein.

A 29 de Maio de 1919 um eclipse Solar total proporciona a oportunidade para a medição do encurvamento da luz, o que é feito sobre a direcção de Eddington na ilha do Príncipe e sob a de Crommelin no Norte do Brasil. Antes da viagem, Eddington escreve " *As actuais expedições ao eclipse poderão demonstrar pela primeira vez o peso da luz [isto é, o valor de Newton], ou poderão confirmar a teoria esquisita de Einstein do espaço não euclidiano, ou poderão levar a um resultado de consequências ainda mais vastas - ausência de deflexão*". A 6 de Dezembro de 1919 é anunciado que as observações de Maio confirmam as previsões de Einstein.

Uma outra consequência é a alteração do tempo e frequência da luz num campo gravitacional.[68] O tempo deve de decorrer mais lentamente perto de um corpo maciço. Uma outra previsão da teoria da relatividade geral são os buracos negros. Se a

[68] O desvio gravitacional para o vermelho pode ser entendido de uma maneira simples. Para escapar de um campo gravitacional um fotão deve despender energia. Depois de escapar o fotão perdeu energia e por isso é vermelho.

densidade de um corpo for suficientemente elevada, a sua atracção gravitacional será tão grande, que dentro de um certo raio, nem a luz pode escapar.[69]

4.2 Velocidade da luz e cosmologia

Eu olhei longe no espaço, mais do que qualquer ser humano antes de mim. Eu observei estrelas em que a luz, e pode ser provado, pode demorar dois milhões de anos a chegar à Terra. Se esses corpos distantes deixarem de existir há milhões de anos atrás, nós devemos de continuar a vê-los, na medida que a luz viaja depois do corpo desaparecer

William Herschel, 1813

Com o falhanço de detectar o paralaxe de uma estrela, significava que as estrelas mais próximas tinham de estar a uma distância não inferir a 400000 U.A. Já em 1668 James Gregory propôs que a se as estrelas tivessem a luminosidade do Sol, elas apareciam fracas porque se encontravam a uma enorme distância. Newton, em 1690, comparou o brilho dum planeta com o do Sol e por sua vez com a estrela Sírio, verificando que esta se encontrava a uma distância de cerca de um milhão de U.A.

Em 1702 Whiston afirma, numa conferência acerca da velocidade da luz, que é desprezável a comparação da velocidade da luz e a velocidade de translação da Terra. Por isso o fenómeno que Bradley designou como aberração da luz não tinha sido previsto. Bradley mesmo depois de descobrir o fenómeno demorou alguns anos a explicar o fenómeno considerando várias soluções até chegar à correcta explicação: a velocidade da Terra em torno do Sol, apesar de pequena quando comparada com a velocidade da luz, é suficiente para afectar a posição das estrelas fixas.

A descoberta de Bradley provou o movimento da Terra em torno do Sol e, forneceu o valor de 8 min e 13 segundos para o tempo que a luz demora a chegar do Sol à Terra. Revelou também que a mesma estrela observada num intervalo de seis meses tinha uma posição alterada em cerca de 41" do arco.[70]Aquando da descoberta da

[69] Grande parte da informação contida nesta parte do capítulo foi retirada do livro *Subtil é o Senhor* de A. Pais.

[70] Esta quantidade era bastante elevada quando comparada com o valor esperado da paralaxe das estrelas próximas.

nutação, Bradley introduz um novo método de observação denominado método da dupla estrela.[71]

Com esta descoberta procurou-se os movimentos próprios das estrelas no espaço e o movimento do Sistema Solar pelo espaço. Comparou-se a posição da estrelas na esfera celeste com a posição por elas ocupadas na Antiguidade, a partir de observações feitas séculos antes. Halley verificou que a posição de três estrelas eram diferentes.

No início do século XVIII começou a ser reconhecido que os objectos distantes não são vistos na posição que no momento se encontram, mas numa posição diferente, em consequência de a luz se propagar com velocidade finita. Foi com o telescópio construído por Herschel e com a sua capacidade de observar objectos distantes no céu que se começou a olhar para o passado. Ele comparou a quantidade de luz recebida pelo seu olho com a quantidade de luz recebida pelo espelho do seu telescópio de diâmetro 4 pés e a partir da relação verificou que um amontoado de 50 mil estrelas seria visíveis no seu telescópio a uma distância de 12 milhões de milhões de milhões de milhas, cerca de dois milhões de anos-luz. Podia ser possível observar fenómenos no seu estado inicial.

Em meados do século XIX com telescópios de espelhos de 6 pés foi possível observar ainda mais longe e ainda mais no passado, pelo menos a 30 milhões de anos.

Com o surgir da espectroscopia no final do século XIX, começou a ser possível falar em objectos que se encontram a distâncias até mil anos luz. Isto forneceu uma possível resposta ao paradoxo de Olbers[72]. A luz de partes distintas do universo ainda não chegou a Terra o que implica que não podemos saber nada sobre a sua existência.

No final do século XIX começou-se a aplicar o efeito Doppler-Fizeau em astronomia para medir os valores da velocidade de estrelas, valores obtidos em Km/s e, que podiam ser obtidos para qualquer objecto, situado a qualquer distância, por espectroscopia. Mediram-se várias velocidades radiais de estrelas, por análise espectral.

Em 1924 Hubble estabeleceu que a luz de Andrómeda demora cerca de um milhão de anos a chegar até nós, tendo demonstrado que existiam muitas galáxias. De seguida passou a catalogar a distância entre elas e a analisar os seus espectros. Verificou

[71] Este método baseava-se tomando uma estrela distante como ponto de referência fixo, a partir do qual se media o aparente desvio de paralaxe de outra estrela relativamente perto do sistema solar. As duas estrelas estavam perto uma da outra na esfera celeste, estando as duas imunes ao efeito da aberração, pois ambas eram afectadas pelo fenómeno.

[72] Heinrich Olbers (1758-1840) escreveu um artigo a explicar o porquê do céu ser escuro à noite. O significado disto é que o universo não pode ser estático, infinitamente velho, e haver um número infinito de galáxias, porque, senão qualquer linha dirigida para fora da Terra terminaria numa estrela e consequentemente o céu deveria brilhar. Existem soluções para o paradoxo, e uma delas diz que a luz vinda de estrelas longínquas ainda não teve tempo de chegar até nós.

que a maior parte dos espectros encontrava-se deslocados para o vermelho. Além disso, verificou que este desvio é directamente proporcional à distância que a galáxia está de nós e que, para onde quer que se olhe, as galáxias afastam-se velozmente, ou seja, o universo encontra-se em expansão. Até a essa época, a maior parte das pessoas acreditava num universo estático e imutável.

Já em 1783 John Mitchel, um professor de Cambridge, escreveu um artigo publicado nos *Philosophical Transactions*, em que refere que uma estrela suficientemente maciça pode ter um campo gravitacional que nem a luz pode escapar. Mais tarde Laplace retomou estas ideias, mas com o abandono da teoria corpuscular em favor da teoria ondulatória este assunto foi esquecido.

No fim de 1920 começou-se a compreender o ciclo de vida de uma estrela. Chandrasekhar, um jovem estudante indiano, descobriu qual poderia ser o tamanho máximo de uma estrela para que ela se sustivesse contra a própria gravidade depois de ter esgotado todo o combustível. Quando uma estrela se contrai, as partículas de matéria aproximam-se uma das outras e, segundo o princípio de exclusão de Pauli, têm de haver velocidades muito diferentes, o que leva a que elas se afastem. Pode então ocorrer um equilíbrio entre a atracção da gravidade e a repulsão que resulta do princípio de exclusão. A teoria da relatividade impõe um limite máximo à velocidade das partículas na estrela: a velocidade da luz. Se a estrela for suficientemente densa, a repulsão é menor que a atracção gravitacional, o que poderá originar o colapso gravitacional.

Em 1939 Oppenheimer retomou este trabalho e aplicou-lhe a teoria da relatividade geral. O campo gravitacional da estrela altera as trajectórias dos raios luminosos no espaço-tempo. Os cones de luz, que indicam as trajectórias seguidas no espaço-tempo, são ligeiramente curvados para dentro da superfície da estrela. À medida que a estrela se contrai, o campo gravitacional aumenta e os cones de luz encurvam-se mais para dentro. Há uma altura em que o campo gravitacional é tão intenso que os cones de luz se encurvam para dentro de tal modo que a luz já não pode escapar e, como nada se desloca mais depressa do que a luz, mais nada pode escapar. Há, portanto, uma região chamada buraco negro, onde nada escapa.

Uma das consequências de todos os observadores medirem a mesma velocidade da luz, independentemente da velocidade do seu movimento é que nada pode deslocar-se mais depressa do que a luz. No entanto pode-se conceber velocidades meramente geométricas, como a expansão do espaço, tão grandes quanto se queiram. A expansão

do universo pode estender-se no espaço-tempo mais depressa do que a luz, porque nada se move através do espaço-tempo[73]. Por isso, a inflação exponencial do universo proposta por Guth e por outros cosmologistas pode, na verdade, ocorrer numa região do espaço-tempo muitíssimo mais pequena do que um protão, fazendo dilatar-se até um volume com um diâmetro de 100 milhões de anos luz, numa fracção mínima do segundo. Outros cosmologistas propõem que a velocidade da luz no início do Universo não tinha o valor actual e que este valor variou ao longo dos tempos.

[73] Se assumirmos um espaço euclidiano, e atendendo a lei de Hubble, as galáxias que se encontrem a grandes distâncias podem-se afastar a velocidades superiores a da luz. Luz dessas galáxias nunca pode chegar até nós, o que significa que há uma distância limite de que podemos observar o universo.

5

Medições da velocidade da luz no século XX

O metro é o comprimento do trajecto percorrido pela luz no vazio no tempo de 1/299792458 segundos.

Definição do metro adoptado pela Conferência Geral de Pesos e Medidas em 1983.

As experiências realizadas no século XIX para determinar a velocidade da luz foram melhoradas e aperfeiçoadas no decorrer do século XX. Além disso, surgiram novos métodos que permitiram obter resultados mais precisos.

5.1 Experiências de Michelson (1924-1935)[74]

Michelson passou parte da sua vida a aperfeiçoar o método de Foucault, melhorando e optimizando, minuciosa e inteligentemente, todas as condições que influenciavam o resultado. As últimas séries de experiências foram realizadas em 1924-1926 e mais tarde entre 1931-1935. Estas últimas com a colaboração de Pearson e Pease, já que Michelson faleceu em 1931, quando só tinha realizado 36 das 233 séries de observação. Ele seguiu a sugestão de Newcomb e usou um espelho rotatório com um variado número de faces.

[74] Grande parte da informação deste capítulo foi retirada do livro *The velocity of light and radio waves* de Froome e Essen e dos artigos *Some recent determinations of the velocity of light* de Joseph F. Mulligan.

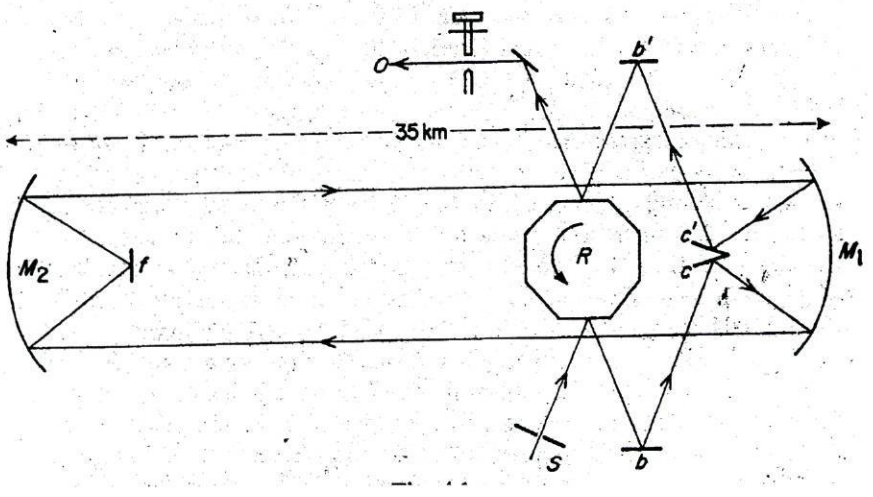


Figura 27: Experiência de Michelson de 1926

Na experiência realizada em 1925, a luz incidia numa face de um espelho octogonal depois de passar por uma abertura estreita, sendo de seguida reflectida por pequenos espelhos para um enorme espelho côncavo de abertura 60 cm e com uma distância focal de 10 m. Obtinha-se um feixe de luz paralelo que se deslocava entre dois montes. A luz chegava a um segundo espelho côncavo similar ao primeiro, sendo focada num pequeno espelho plano, que a reenviava por múltiplas reflexões até à ocular. A velocidade do espelho rotatório era ajustada para que a luz depois de reflectida no espelho distante, incidisse na face seguinte do espelho rotatório. O objectivo era obter um desvio mínimo, ou nulo, em que o tempo que a luz demora a percorrer o trajecto fosse igual ao tempo que a luz demora a rodar 1/n voltas, em que n é o número de faces do espelho. Assim, a posição da imagem mantinha-se quer o espelho estivesse em movimento ou em repouso. A posição da imagem era determinada por um micrómetro.

O espelho rotatório era movido por ar comprimido e a velocidade era determinada por estroboscopia[75]. Um pequeno espelho, preso no garfo de um diapasão eléctrico, reflectia a luz do espelho rotatório de modo a obter-se uma imagem estacionária durante alguns segundos nos quais se media a posição da imagem. A velocidade do espelho rotatório era controlada através de uma válvula. A frequência do diapasão era medida por um pêndulo e comparada com a de um pêndulo livre cedido pela U.S. Coast e Serviços Geodésicos Americanos. Estes também mediram a distância

[75] Estroboscopia é um processo de observação e decomposição de movimentos muito rápidos baseado na persistência retiniana das imagens.

entre os dois espelhos por triangulação com uma margem de erro de cerca de 3 mm. O percurso utilizado foi de 22 milhas entre o Monte S. António e o Monte Wilson.

Primeiramente, observa-se a imagem com o espelho rodando numa direcção e depois rodando à mesma velocidade, mas na direcção inversa. Se as duas deflexões forem α_1 e α_2, a deflexão dupla da imagem de regresso será:

$$2\phi = \pi - (\alpha_1 - \alpha_2) = \frac{16\pi nD}{c}$$

onde D é a distância percorrida pela luz, n o número de rotações por segundo e c a velocidade da luz. O valor obtido foi 299802Km/s± 30Km/s para a velocidade da luz no vazio.

Nas medições finais de 1926 Michelson usou o mesmo aparato, mas melhorou o mecanismo que permitia determinar a velocidade de rotação do espelho. O diapasão era controlado por uma válvula e a sua frequência era comparada directamente com a de um pêndulo padrão. O valor obtido foi 299796 ± 4Km/s para a velocidade da luz no vazio.

Nas últimas séries de experiências realizadas em conjunto com Pease e Pearson, eles utilizaram espelhos rotatórios de 8, 12 e 16 faces e confinaram o caminho a uma milha num tubo, de modo a eliminar os efeitos do índice de refracção da atmosfera. O tubo de aço tinha 1 metro de diâmetro e a pressão no interior foi mantida entre 0,5 e 5,5 mmHg. O sistema óptico era idêntico ao usado em 1925. Para obter um maior percurso óptico (no interior do tubo) eles usaram um conjunto de espelhos que reflectia o feixe várias vezes. Quando o espelho se encontrava em repouso, o feixe incidia na face que era a mesma em que incidia depois de regressar da reflexão no espelho distante. A velocidade de rotação do espelho foi medida como anteriormente, por estroboscopia.

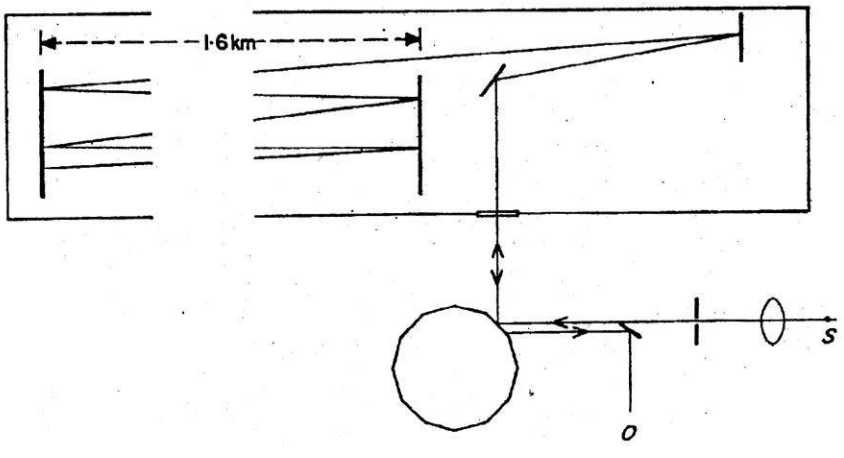


Figura 28: Experiência de Michelson de 1934

O valor obtido para a velocidade da luz no vazio foi 299774 Km/s com uma margem de erro de 11 Km/s, valor que prevaleceu até 1941, como o mais preciso.

5.2 Experiência usando a célula de Kerr

Entre 1925 e 1940, surgiram inovações em termos experimentais. Renovou-se a experiência de Fizeau, com a utilização da célula de Kerr. Esta célula permite modular a luz a um ritmo rápido até frequências de 10 MHz. O emissor e o receptor foram colocados a uma determinada distância um do outro, sendo a luz reflectida por um espelho numa das extremidades. A variação da fase entre a corrente fotoeléctrica e a tensão aplicada na célula, permite determinar com bastante precisão a "extinção", como na versão original de Fizeau.

Em 1925, Gaviola utilizou um dispositivo experimental idêntico ao de Fizeau, só que em vez de uma roda dentada, ele utilizou um obturador eléctrico-óptico (célula de Kerr), capaz de interromper o feixe de luz várias centenas de vezes mais rapidamente do que a roda dentada. Por isso, pode-se utilizar uma distância menor, podendo a experiência ser realizada dentro de um edifício e assim controlar as condições atmosféricas.

Em 1928, Karolus e Mittelstaedt repetiram a experiência tendo usado o seguinte dispositivo experimental. Uma célula de Kerr é colocada entre dois prismas. A luz é transmitida pelo sistema até se aplicar uma grande d.d.p. nos eléctrodos.[76] Utilizou-se um oscilador eléctrico que trabalha na banda das radiofrequências e interrompe o feixe à razão de milhões de vezes por segundo.

[76] Em 1875 o físico escocês John Kerr (1824-1907) descobriu o efeito electro-óptico, verificando que substâncias isotrópicas transparentes podiam-se tornar birrifringentes, quando submetidas a uma campo eléctrico $\vec{E}$. A célula de Kerr é um pequeno contentor de vidro cheia de nitrobenzeno com dois eléctrodos dispostos lado a lado A célula de Kerr está colocada entre dois polarizadores lineares cruzados, com os eixos de transmissão a 45° em relação ao campo eléctrico E. Quando a tensão aplicada aos eléctrodos é nula, não há luz transmitida. Quando se aplica uma tensão de modulação o campo eléctrico varia, e a célula comporta-se como uma lâmina de atraso de fase variável. O atraso é dado pela expressão $\Delta\phi = 2\pi KlV^2 / d^2$, onde K é a constante de Kerr, d é a distância entre os eléctrodos, V o potencial e l o comprimento dos eléctrodos.

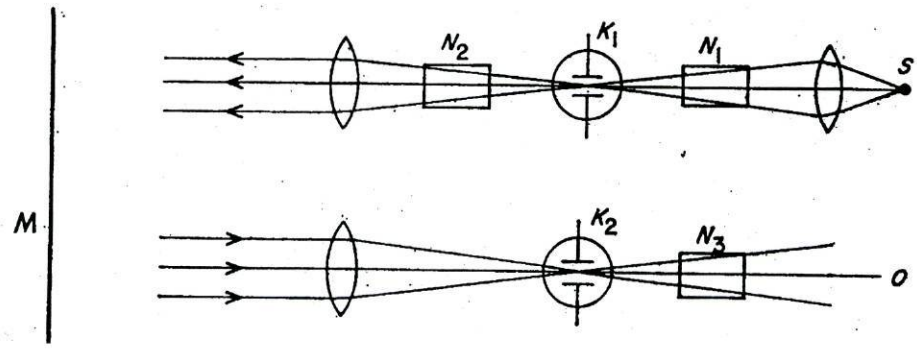


Figura 29.1: Experiência de Karolus e Mittelstaedt

A célula é precedida por um prisma polarizador Nicol[77] N_1, seguida por um analisador de Nicol N_2 e o feixe incidente é polarizado 45° na direcção do campo. A intensidade do feixe emergente é: $I = I_0 sen^2\phi/2$. O feixe que retorna passa por um segundo obturador eléctrico, outra célula de Kerr K_2, que opera em fase com K_1 e o prisma de Nicol N_3. A quantidade de luz que passa por este obturador depende da fase do feixe e tem um mínimo de intensidade para um determinado valor da frequência, como o determinado por Fizeau.

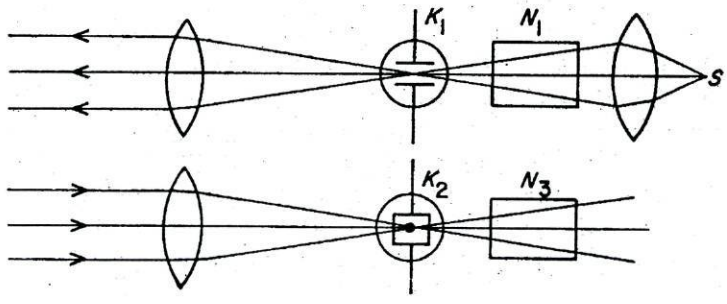


Figura 29.2: Experiência de Karolus e Mittelstaedt

Mais tarde, a experiência foi repetida eliminado o segundo prisma Nicol N_2 e a luz que retorna a K_2 continuava com polarização elíptica. Rodou-se K_2 90° relativamente a K_1 para produzir uma polarização oposta e converter a luz que regressa num feixe de luz com polarização plana. O prisma nicol N_3 é cruzado relativamente a N_1 e a luz não chega ao observador quando a frequência é tal que o caminho é um número inteiro de comprimentos de onda. A frequência foi medida por comparação com um som harmónico de um diapasão. A experiência foi realizada num corredor de 40m de distância e o percurso total foi obtido por múltiplas reflexões. A distância foi medida

por meio de um fio de aço sob uma tensão de 20 Kg. O valor obtido para a velocidade da luz no vazio foi 299778 ± 20Km/s.

Em 1941, Anderson melhorou o dispositivo e utilizou uma única célula de Kerr, dividindo o feixe por meio de um espelho semi-prateado. O receptor, não era uma célula de Kerr, mas uma célula fotoeléctrica, o que permitia usar frequências maiores. Uma outra alteração foi a utilização de dois caminhos ópticos.

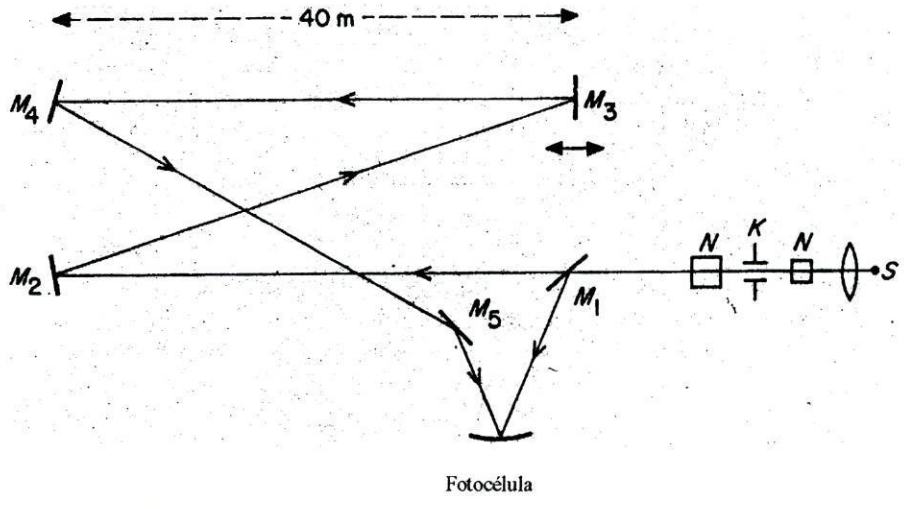


Figura 30.1: Experiência de Anderson

A posição do espelho M_3 era ajustada para se obter um mínimo de intensidade do sinal da fotocélula. Assumindo que as intensidades da luz nos dois caminhos são iguais, as tensões desenvolvidas pela célula são: $E_1 = E_0 sen\omega t$ e $E_2 = E_0 sen(\omega t + \phi)$, onde

$$\phi = \frac{S\omega}{c}$$

é a diferença de fase. A tensão resultante é:

$$E_1 + E_2 = E_0[sen\omega t + sen(\omega t + \phi)] = 2E_0 \cos\phi / 2 sen(\omega t + \phi/2).$$

Obtém-se um mínimo quando:

$$\phi = \frac{S\omega}{c} = n\pi$$

ou

$$c = \frac{\omega S}{n\pi} = \frac{2fS}{n}$$

onde n=1,2,3, ... $\omega=2\pi f$, f é a frequência da tensão e S é a diferença do caminho óptico.

[77] Prisma óptico de calcite, que serve para obter luz polarizada e analisar luz planopolarizada e que foi construído pelo inglês W. Nicol (1768-1851).

O mínimo de intensidade é obtido alterando o caminho óptico. O sinal recebido pela fotocélula é modulado em frequência. Este podia ser rectificado para operar como um medidor. O valor obtido foi de 299771Km/s para a velocidade da luz no vazio.

Na experiência final foram feitos alguns melhoramentos. O dispositivo foi modificado para facilitar a medição da diferença do percurso óptico.

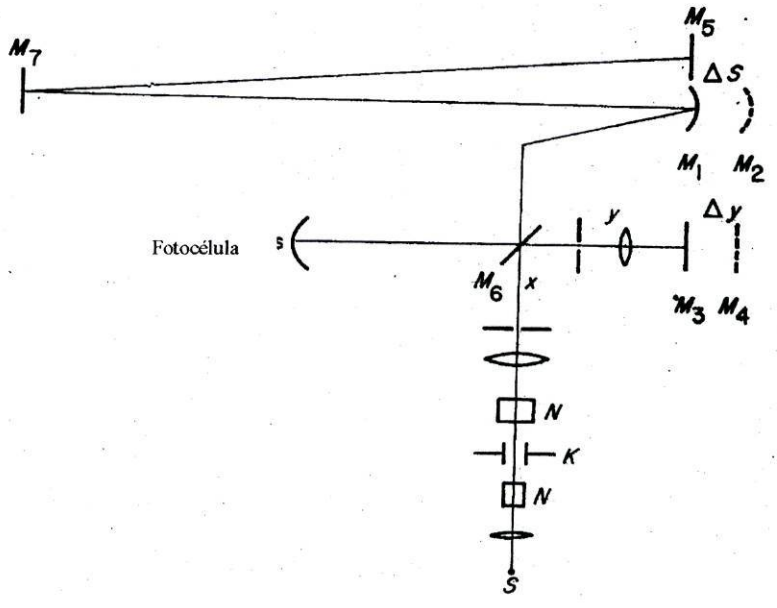


Figura 30.2: Experiência de Anderson

A luz da fonte era dividida por um espelho semi-reflector M_6, sendo uma parte do feixe transmitida por um caminho curto até M_3 regressando novamente a M_6 e daí para o detector. A outra parte do feixe percorria um longo caminho por reflexões em M_1, M_7, M_5 e M_6, até ao detector. Este é um fotomultiplicador, que responde às ondas luminosas com modulação sinusoidal. A luz combinada passava por uma lente com uma pequena distância focal para se obter praticamente um ponto imagem na célula. O espelho M_3 estava colocado num torno mecânico e a sua distância era ajustada até se obter um sinal mínimo. A diferença de percurso é um número ímpar de meios comprimentos de onda e $2S + 2x - 2y = (2n+1)/\lambda/2$, onde λ é o comprimento de onda da modulação de radiofrequências, S é o caminho longo, x é o caminho curto adicional entre M_6 e M_1 e y é o caminho entre M_6 e M_3. M_1 e M_2 rodavam de modo que M_1 não fosse usado e M_2 reflectisse a luz directamente para M_6. M_3 era ajustado para a posição M_4 para se obter um novo mínimo. Então, $2S + 2\Delta S - 2y - 2\Delta y = \lambda/2$ e $2S - 2\Delta S + 2\Delta y = n\lambda$.

Anderson fez cerca de 2895 observações e obteve o valor de 299776 ± 14 Km/s para a velocidade da luz no vácuo.

5.3 Experiência com Radar

A precisão dos radares foi testada na Segunda Guerra Mundial e no final desta, com o intuito de detectar aviões inimigos e direccionar bombas no seu trajecto. Para tal, escolheram-se boas bases topográficas, de algumas dezenas a centenas de quilómetros de extensão, onde o ar é muito seco e sem obstáculos incomodativos para o radar. O radar começou a ser atractivo para a geodesia, na medição de distâncias.

Em 1942, Aslakson encontrou uma divergência nos resultados de distâncias obtidos por triangulação e radar em bases topográficas. Em 1947, o exército americano concluiu a medida de 47 distâncias entre 100 e 600 Km na zona das Caraíbas. Concluiu também que era possível existir um erro no valor aceite para a velocidade de propagação das ondas de rádio. Aslakson propôs-se então medir a velocidade da luz. As experiências ocorreram no Inverno nas planícies do Canadá onde o ar é seco e onde não existem obstáculos naturais para o radar.

A posição de um objecto é obtida a partir do tempo de percurso de um sinal de rádio. O tempo de percurso de um feixe de luz para um avião distante e o seu regresso é gravado directamente numa escala de tempo, deduzida através de uma frequência padrão. A frequência padrão pode ser escolhida de modo a que escala de tempo indique directamente a distância. Impulsos de ondas, com duração na ordem dos μs são enviadas do avião para as estações A e B onde são recebidas e reenviadas para o mesmo. À medida que o avião passa pelas linhas A e B a soma das distâncias varia aproximadamente como uma parábola, correspondendo o mínimo ao ponto de passagem. Analisando o gráfico da soma das distâncias é possível determinar com bastante precisão o mínimo.

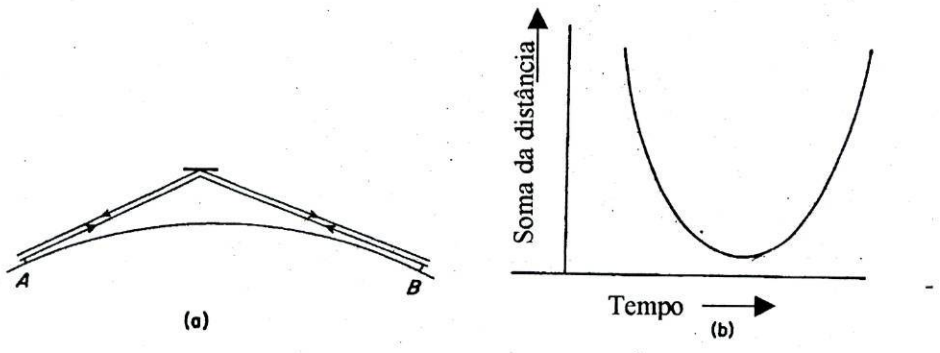


Figura 31: Experiência com radar

Algumas distâncias foram medidas por triangulação geodésica com o propósito de determinar a velocidade da luz cujo o valor obtido foi c_0=299792,4 ± 2.4Km/s.

Apesar dos resultados obtidos, este método está limitado ao uso de longas distâncias (que não podem ser medidas com a mesma precisão usada num laboratório) e é difícil determinar o termo de correcção devido à variação do índice de refracção, que varia com a altitude. Mais tarde, em 1950, foram feitas melhorias no equipamento, que permitia determinar o tempo. Foram comparados os valores das distâncias obtidas pelo radar com os valores das distâncias obtidas por triangulação geodésica. Observando a coluna 1 e 2, verifica-se que a discrepância dos valores é proporcional à distância e esta pode ser removida adoptando um novo valor para a velocidade da luz. Aslakson determinou o melhor valor de c_0 usando o método dos mínimos quadrados e o obteve o valor de c_0=299794,2 ± 1,4Km/s.

Distância Geodésica	**Distância baseada em c_0=299776 km/s**	**Distância baseada em c_0=299794,2 km/s**
40,6131	40,6041	40,6066
96,7171	96,7049	96,7108
145,8427	145,8276	145,8365
277,0569	277,0347	277,0515
320,1519	320,1271	320,1466

Tabela 3: Determinação da velocidade da luz pelo método do radar.

5.4 Cavidade ressonante

Com uma cavidade ressonante, pode-se medir a frequência na região espectral dos microondas. Se estas ondas se deslocarem num cilindro de metal oco e se o cilindro for fechado em ambas as extremidades, sendo o comprimento exactamente um número inteiro de meios comprimentos de onda, estabelece-se a ressonância. Se uma das lâminas terminais for ligada a um micrómetro, alterando-se o comprimento da cavidade, uma larga banda de frequências em ressonância são obtidas. O comprimento de onda é obtido tomando as diferenças de comprimento lidas no micrómetro. As frequências de ressonância também podem ser determinadas pelas dimensões da cavidade. O valor da velocidade da luz é obtido utilizando a relação $c=\lambda f$, em que λ é o comprimento de onda e f é a frequência.

Em 1945 e 1946, Essen mediu as dimensões de cavidades comerciais dum ondímetro e comparou os valores teóricos e os valores medidos das frequências de ressonância. Os resultados podiam ser interpretados como uma medição da velocidade da luz. O valor obtido foi de 299770 ± 30Km/s, com uma precisão experimental que era maior do que a conseguida anteriormente. Ele concluiu que os resultados podiam ser melhorados se as medições fossem feitas no vácuo com uma cavidade ressonante construída especialmente para determinar a velocidade da luz.

A cavidade pode ser construída para um simples modo de ressonância. Podem-se escolher valores apropriados do diâmetro e comprimento fixando a frequência. Além da frequência de ressonância outro parâmetro a considerar é o factor de qualidade, Q, que determina a penetração da ressonância, dependendo da condutividade da parede e da forma da cavidade ressonante. O principal efeito das perdas na frequência de ressonância deve-se à penetração do campo nas superfícies do metal aumentando, assim, as dimensões da cavidade. Este efeito de redução de frequência pode ser calculado através da análise do factor de qualidade Q. Por isso, é necessário ter em atenção a escolha do material e as dimensões da cavidade ressonante. Essen e Smith, em 1947, escolheram o cobre, um material de grande condutividade.

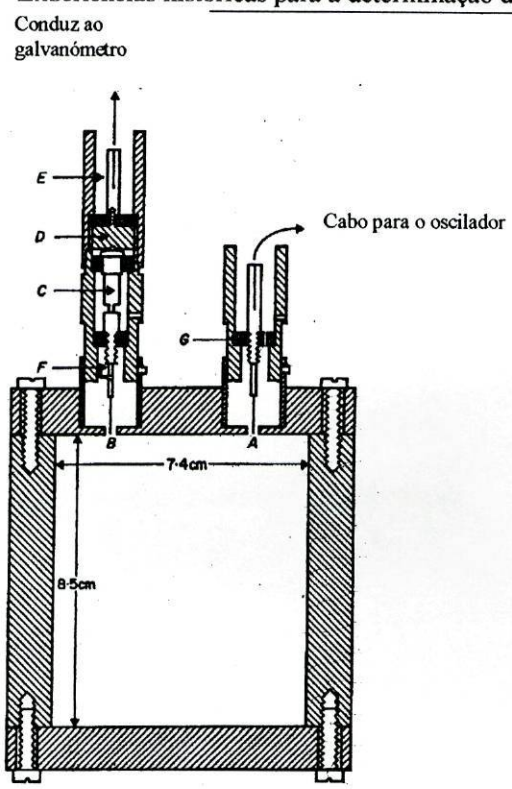


Figura 32: Cavidade ressonante.

A figura 33 mostra-nos o esquema do aparato usado para determinar a velocidade da luz. A sonda de metal B está ligada um detector de cristal C e a um galvanómetro, sendo este, por vezes, substituído por um cabo coaxial que se liga a um receptor "superheterodyne". A outra sonda A da cavidade ressonante está ligada ao oscilador.

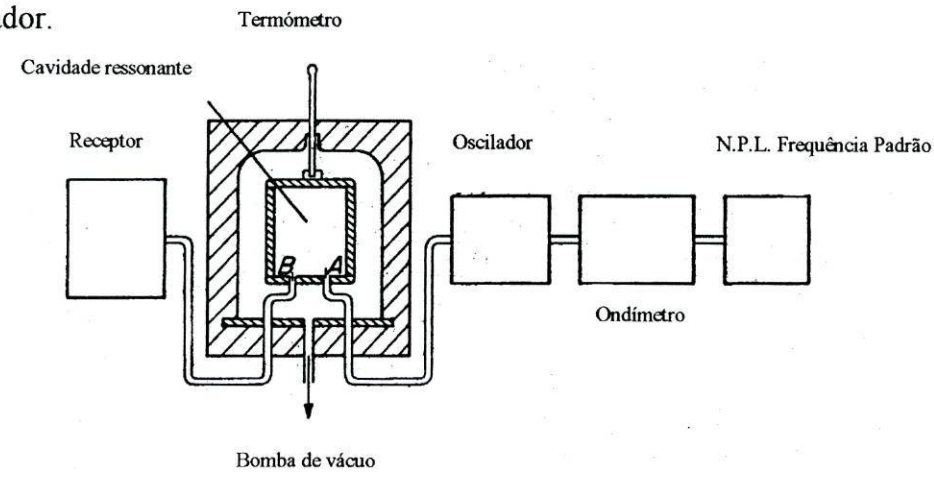


Figura 33: Determinação da velocidade da luz com o método da cavidade ressonante.

O oscilador trabalhava de modo a obter-se um máximo de deflexão no galvanómetro ou no receptor, enquanto que se media simultaneamente a frequência do oscilador por meio de um ondímetro "heterodyne". O Q da cavidade ressonante foi medido através da frequência que conduzia a uma redução da corrente a metade do seu

valor. As dimensões foram medidas numa sala com controlo de temperatura. Para medir o diâmetro interno usou-se um "comparater" horizontal. Este era uma combinação estreita e adequada de medidas-padrão que serviam de base de referência e a diferença desta para o diâmetro era indicada na escala óptica do "comparator". As medidas-padrão foram medidas por um interferómetro em função de um comprimento de onda padrão. O comprimento foi medido por um "comparater" vertical que tinha uma ponta de contacto curva e uma escala óptica similar ao comparator horizontal.

As medições foram feitas usando vários modos. O valor obtido para a velocidade da luz no vazio foi 299792 Km/s.

A experiência foi repetida em 1950 por Essen. O valor obtido foi 299792,5 ± 3 Km/s para a velocidade da luz no vazio.

5.5 Métodos de interferometria

Nos anos 50, utilizou-se a interferometria para determinar a velocidade da luz. O método tem a vantagem de medir o comprimento de onda com bastante precisão. Um interferómetro que opere com uma frequência conhecida, permite determinar a velocidade da luz utilizando a relação $c=\lambda f$, em que λ é o comprimento de onda e f é a frequência.

Um dispositivo com espelhos reflectores móveis provoca uma variação na fase da radiação que incide num detector, relativamente à fase da radiação da mesma fonte que incide no mesmo detector mas fazendo um outro percurso. O detector pode ser o olho ou uma célula fotoeléctrica.

Nesta experiência é necessário ter em atenção a difracção, que pode causar erro na medida do comprimento de onda, deduzido através do desvio do espelho. É necessário eliminar esse efeito. A abertura de um espelho comparada com o comprimento de onda da radiação microondas, emitida ou reflectida por um componente de igual tamanho, deve devido à difracção, mudar a fase e a amplitude de parte da frente de onda progressivamente com a distância para o componente.

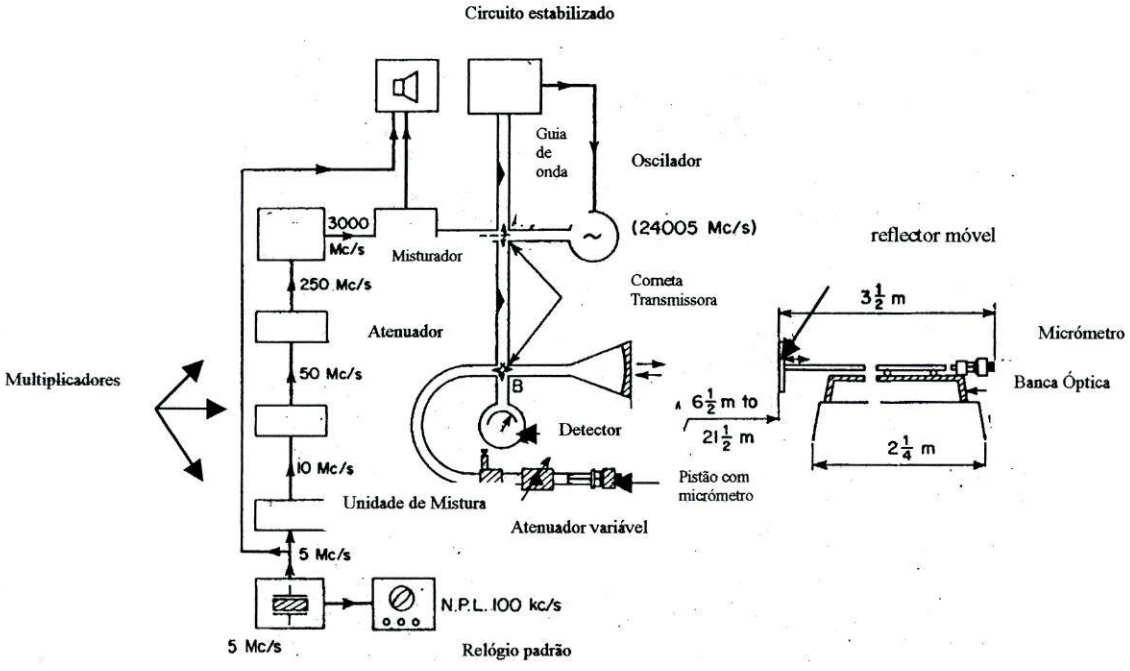


Figura 34: Determinação da velocidade da luz por interferometria.

Em 1952, Froome determinou a velocidade da luz utilizando um oscilador que operava na banda das microondas. O feixe era dividido em A em duas partes. Uma parte servia para operar num circuito estabilizado, e a outra parte constituía o feixe do interferómetro. Este feixe era dividido em B em duas partes de iguais intensidades. Uma (parte móvel) passava para uma corneta transmissora e regressava novamente após reflexão num espelho móvel distante. A outra parte do feixe (parte fixa) passava por um guia de onda e um atenuador, onde depois ia ser reflectida por um pistão ajustável. Esta parte servia para equilibrar as reflexões na outra parte do dispositivo, que ocorriam na superfície frontal da corneta transmissora. A interferência entre os dois feixes reflectidos nos dois percursos ocorre no guia de onda que contém o instrumento de detecção. A medição do comprimento de onda é feita deslocando o espelho móvel num número exacto de mínimos de intensidade por meio de um micrómetro. A intensidade do feixe da parte fixa pode ser equilibrada relativamente à da parte móvel ajustando o atenuador variável, registando-se no detector o valor zero, quando as fases dos dois feixes forem opostas. Para a detecção é usado um receptor "superheterodyne". A frequência foi medida de forma análoga à medição feita por Essen no método da cavidade ressonante.

Para um dado espelho, utilizaram-se diferentes distâncias corneta-espelho, obtendo-se λ usando o método dos mínimos quadrados. Utiliza-se assim um método de

aproximação. O valor final para a velocidade da luz obtido por Froome foi de c_0=299792,6 ± 0,7Km/s. Mais tarde ele repetiu a experiência substituindo o espelho móvel por outra corneta reflectora, obtendo o valor de 299792,75 ± 0,10Km/s.

Em 1967 Simkin, repetiu o método usado por Froome. A principal inovação foi a utilização de uma frequência maior e um maior desvio do espelho, cerca de 447 cm. A distância foi medida por meio de um interferómetro óptico. O índice de refracção do ar foi determinado por um refractómetro de uma cavidade ressonante. O valor obtido foi de c_0=299792,56 ± 0,11Km/s.

5.6 Método utilizando a luz modulada

Bergstrand implantou o método da célula de Kerr num equipamento padrão de um instrumento geodésico comercial chamado Geodímetro. A ideia de utilizar feixes de luz modulada para medir distâncias geodésicas entre pontos fixos foi concebida em 1943. Para melhorara a precisão do instrumento, Bergstrand fez várias determinações da velocidade da luz. O Geodímetro representa um grande avanço nas técnicas de medição de longas distâncias, em conjunto com um instrumento semelhante que opera no microondas o Telurómetro.

O Geodímetro substituiu o método antigo de triangulação. Este método introduziu uma maior precisão e maior rapidez na medição das distâncias.

A corrente fotoeléctrica lida no fotodetector tem uma variação sinusoidal à medida que a distância aumenta por se mover o espelho reflector. Um ciclo desta variação representa meia-onda da modulação do comprimento de onda correspondente a frequência utilizada.

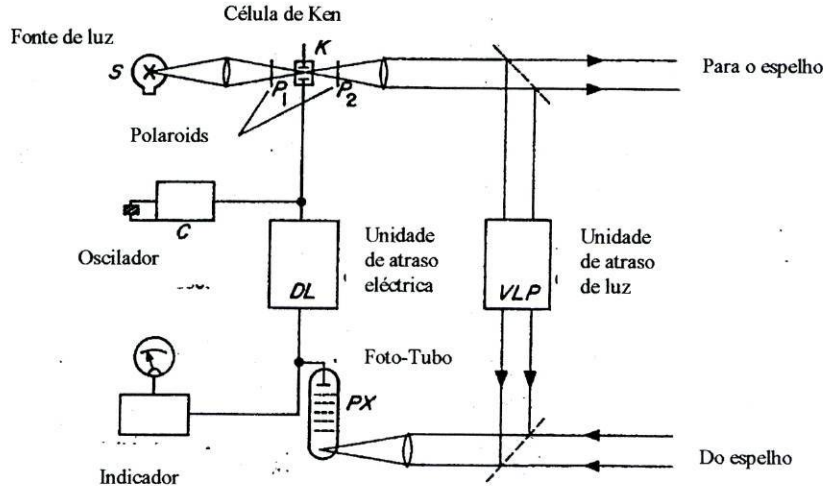


Figura 35: Determinação da velocidade da luz usando um geodímetro.

A figura 35 mostra em detalhe o sistema Geodímetro. S é uma fonte de luz, que é focada por meio de uma lente, para formar uma imagem entre as lâminas da célula de Kerr; P_1 e P_2 são prismas de polarização de Nicol, cruzados; o plano de polarização de P_1 é 45° relativamente à direcção do campo eléctrico no nitrobenzeno na célula de Kerr. C representa o oscilador quartzo que fornece à célula de Kerr uma elevada tensão alternada. No seguimento do oscilador é colocado uma linha de atraso eléctrico, DL, com o propósito de variar a fase do sinal aplicado ao fotomultiplicador. Quando se usa o Geodímetro este atraso variável opera até se ler zero no indicador. Para calibração variou-se o caminho óptico (VLP), podendo ser colocado em frente ao instrumento e usado para transferir com uma modulação de fase variável a porção de luz transmitida para o sistema receptor

A primeira determinação de Berstrand's foi feita em Linkoping na Suécia usando uma distância de 9,07 Km. A medição foi feita deslocando o espelho reflector de junto ao Geodímetro para o fim da linha de base. O valor obtido para a velocidade da luz foi c_0=299796 ± 2 Km/s.

Em 1951 ele fez uma nova determinação e obteve o valor de 299793,04 ± 0,40Km/s.

Nos final dos anos 50 substituiu-se o Geodímetro pelo Telurómetro para determinar a velocidade da luz. Wadley em 1957 na Inglaterra usou uma base de 11,3 Km e obteve o valor para a velocidade da luz no vazio de 299792,6 ± 1,2Km/s.

5.7 A modulação ultra-sónica da luz

Karolus e Helmberger desenvolveram um modulador baseado na difracção da luz. A luz passava por um sistema ultra-sónico de ondas gerado por um oscilador de quartzo imerso num líquido, geralmente em tetracloreto de carbono ou parafina. A velocidade do som nos líquidos investigados é da ordem dos 1Km/s de modo que o espaço do sistema de ondas é na região de 0,1 mm para frequências de 10 MHz.

Atendendo à figura 36, é usado um divisor de feixe (BD1) para produzir um sinal de referência para o cátodo do fotomultiplicador e a fase deste sinal pode ser alterada por meio de um micrómetro que operava no caminho óptico variável. A luz é transmitida ao longo de uma linha de cerca de 48m. Um duplo sistema de espelhos é usado para fazer regressar a luz. Um segundo divisor de feixe (BD2) combina a luz modulada vinda dos reflectores com a do percurso variável antes de entrar no fotomultiplicador, sendo a saída deste detectada por um filtro e detector.

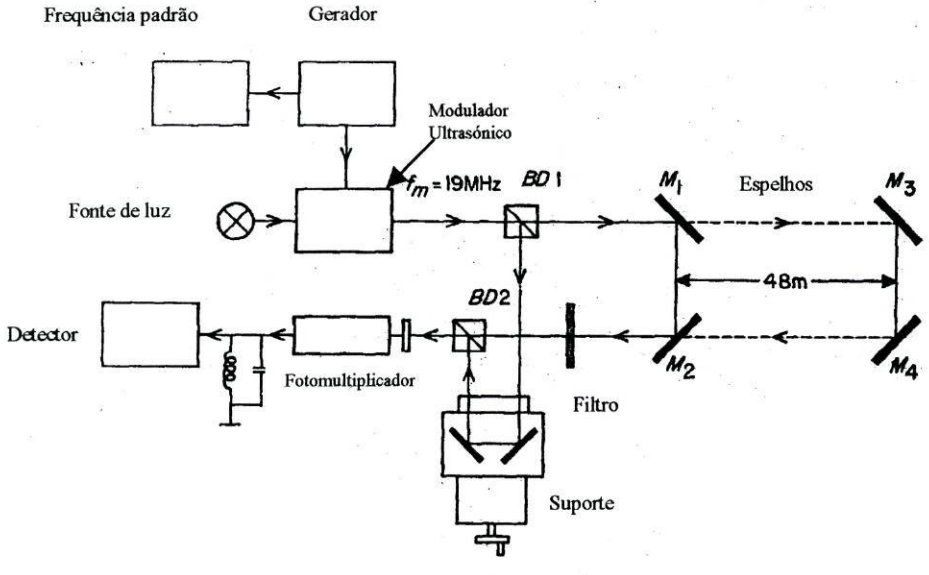


Figura 36: Determinação da velocidade da luz por modulação ultra-sónica.

Se a luz modulada da linha de base chega ao cátodo do fotomultiplicador em fase com a vinda de um caminho variável obteremos um máximo de intensidade. Obteremos um mínimo se a luz chegar em antifase. Para tal coloca-se um filtro na linha de base. Para obter uma maior precisão é necessário ajustar as intensidade. São detectados movimentos no caminho variável da luz menores que 0,1 mm. A distância da

linha de base foi medida com um interferómetro. O valor obtido foi de 299792,1 $\pm$ 0,2Km/s, para a velocidade da luz no vazio.

5.8 Método de Espectroscopia

A frequência de uma linha espectral é dada pela equação de Bohr $f = (E_1 - E_2)/h$ onde E_1 e E_2 são as energias dos estados atómicos e h a constante de Planck. Em resultado da transição a onda emitida propaga-se no espaço com um comprimento de onda $\lambda = c/f$. O valor da velocidade da luz pode ser obtido através da expressão $c=\lambda f$, medida através da linha espectral de uma frequência rádio, mas também é possível obter c medindo as constantes espectroscópicas de uma linha espectral em termos da frequência e comprimento de onda.

Este método foi seguido em 1952 por Rank, Ruth e Sluis examinando a rotação das bandas da molécula de HCN e associaram o valor infra-vermelho da mesma constante rotacional com o valor na região microondas do espectro medido por Nenhorcot, Klein e Townes. A velocidade da luz podia ser obtida pelos dois valores de B, a constante rotacional, através da expressão

$$c = \frac{B(microondas)}{B(\text{inf } ra - vermelho)}.$$

Eles obtiveram o valor de 299776 $\pm$ 6 Km/s, para a velocidade da luz no vazio.

5.9 Método com laser

Com a descoberta do laser na década de 60, os físicos tinham à sua disposição uma luz colimada e de uma extrema pureza espectral. A pequenez do comprimento de onda, por exemplo, no laser de hélio-néon, permite utilizar uma cavidade do tipo Frabry-Perot com espelhos separados, onde a largura dos espelhos é grande relativamente ao comprimento de onda e, por isso, as perdas por difracção são muito pequenas, podendo-se assim aumentar o Q. A cavidade ressonante entra num estado de oscilação por excitação eléctrica do gás rarefeito que ocupa parte do seu volume e pode-se obter um único modo. Para obter uma maior pureza espectral e coerência espacial, introduz-se na cavidade um filtro atómico bastante selectivo. Obtém-se um grau de resolução na frequência de: $\delta\gamma/\gamma = 1000/5x10^{14} = 2x10^{-12}$.

Em 1958, Froome mediu, depois de vários melhoramentos na técnica e nos métodos, a velocidade da luz com uma elevada precisão que não foi ultrapassada até 1972. Mesmo com a frequência utilizada por Froome os efeitos da difracção não são desprezáveis, apesar do inovador factor de correcção usado por Froome ter minimizado esses efeitos. Para melhorar os resultados do método utilizado por Froome era necessário utilizar radiação visível, mas até ao início dos anos 70 não era possível medir directamente frequências da luz visível. Nestes últimos anos foi possível medir, com diferentes técnicas, a frequência da luz visível com grande precisão. O comprimento de onda era medido com uma precisão elevada com técnicas de interferometria e medindo simultaneamente a frequência podia-se obter a velocidade da luz como o produto da frequência pelo comprimento de onda.

O método de interferometria com radiação na banda dos microondas utilizado por Froome na década de 50 é semelhante ao método em que se utiliza o laser onde se mede o comprimento de onda e a frequência com uma precisão elevada, de uma fonte monocromática. É necessário referir a importância que consiste a estabilização da frequência de saída do laser e só assim é possível determinar a frequência com grande precisão. O trabalho pioneiro nesta área foi feito pela equipa de Javan no MIT. A medida de uma frequência não é fácil, pois é necessário compara-la com uma frequência na região do microondas, geralmente com a do relógio a césio, que é um padrão de frequências.

Existem duas técnicas para determinar a frequência de um laser. Uma, "transferência de frequências", consiste em modular a luz visível à saída a frequências na banda de microondas, obtendo-se indirectamente a frequência. A outra é designada "síntese de frequências" e envolve a comparação directa da frequência de uma laser infra-vermelho, com a frequência padrão na região das microondas do ^{133}Cs, por um processo de passos em que intervêm frequências de laser intermédias e osciladores Klystron no microondas.

A ideia da multiplicação de frequências e detecção "super-heterodínica" de sinais de rádio foram primeiramente aplicadas por síntese de frequências com luz visível pela equipa de Javan e seus colegas do MIT. Eles usaram um díodo com uma ponta de contacto especial para medir directamente a frequência de um laser de HCN que foi comparada com a de um gerador na banda do microondas. Os detectores usados na determinação das frequências laser desempenham um papel importante, pois são a chave para a geração harmónica, a mistura de frequências. Estes eram díodos de cristais

de silício com pontas de contacto de tungsténio e conservavam o seu poder de misturar e multiplicar até no domínio das radiações visíveis. Podemos passar das frequências do microondas para as visíveis, por uma série de multiplicadores de frequências. A cada etapa mistura-se a frequência múltipla com um laser intermediário de frequência muito próxima, de qualidade metrológica, determinando de uma maneira continua a frequência. Este laser é ao mesmo tempo utilizado como uma fonte auxiliar muito pura para a multiplicação seguinte e, assim sucessivamente, até à frequência do raio vermelho do néon. Os laser intermediários servem para restaurar a pureza espectral do sinal que é deteriorado no processo de multiplicação. Assim pode-se medir directamente a frequência da luz visível, que terá como consequência uma nova redefinição do metro. De seguida procederam-se a novas medições da velocidade da luz.

A primeira medida da frequência da luz visível foi realizada por Bay, Luther e Wlte em 1972. Eles mediram a frequência de um laser estabilizado de He-Ne na cor vermelha 6328 Å por modulação à saída do laser com a frequência padrão do ^{133}Cs. Para tal usaram um interferómetro do tipo Fabry-Perot. O valor das frequências era obtido a partir da medição da diferença e da razão dessas frequências. Eles obtiveram a frequência 473612166 ± 29 MHz para o laser He-Ne na cor vermelha de 6328 Å.

Ao mesmo tempo uma equipa comandada por Eucson mediram directamente a frequência na banda do infravermelho próximo por uma elaborada cadeia de lasers. A técnica usada é uma extensão da técnica usada pela equipa de Javan. Começaram com uma frequência microondas, conhecida com bastante precisão, que era comparada com a frequência do laser na banda do infravermelhos longínquos usando díodos com pontas de contacto que funcionavam como misturadores e detectores. O processo repetia-se até à frequência do laser He-Ne de 3,39 μm na banda do infravermelho próximo. O valor obtido para a frequência da linha do laser He-Ne de 3,39 μm foi $88376{,}181627 \pm 0{,}000010$GHz.

As medições do comprimento de onda foram realizadas por interferometria em vácuo numa cavidade do tipo Fabry-Perot. Relativamente ao trabalho de Froome a precisão foi aumentada, principalmente devido a uma maior precisão na medição de pequenos comprimentos de onda, na redução dos efeitos de refracção e na eliminação dos efeitos de correcção do índice de refracção do meio. Uma limitação na precisão das medidas é imposta, não pelas técnicas de medidas usadas, mas pela incerteza do comprimento de onda padrão do ^{86}Kr.

Linha Laser	Experimentadores	Molécula estabilizada	Comprimento de onda no vácuo (μm)	Frequência (MHz)	Velocidade da luz (m/s)	Limite de erro (m/s)
He-Ne 3,39μm	Equipa de Barger e Evenson	CH_4	3,392231390	88376181,627	299792457,4	1.1
He-Ne 3,39μm	Equipa de Baird e Evenson	CH_4	3,39223140	88376181,627	299792458	2
He-Ne 0,633μm	Bay, Luther e White	Neon	0,63299147	473612166	299792462	18
CO_2 9.32μm	Baird, Chang e Evenson	CO_2	9,317246348	32176079,482	299792459,0	0,8

Tabela 4: Determinações da velocidade da luz com o laser.

Em 20 de Outubro de 1983 o Comité Consultivo para a Definição do Metro recomendou a adopção do seguinte valor para a velocidade da luz no vazio c_0=299792458 ± 1,2m/s. A precisão não foi alterada desde 1983, sendo limitada pela imprecisão na medição de λ devido aos defeitos do padrão actual de comprimento, a risca espectral alaranjada da lâmpada de krypton 86, adaptada a esta função, e reconhecido como válido pela Comissão Consultiva para a Definição do Metro. Esta risca apresenta uma ligeira assimetria mal explicada. A escolha de uma risca laser visível como a risca vermelha do néon como padrão de comprimento de onda aumentará a precisão nas medidas de comprimento, e além disso outras riscas podem ser utilizados como padrão. As riscas laser visíveis poderão desempenhar um padrão de frequência e de comprimento. Em consequência da nova definição do metro foram reajustadas as outras constantes fundamentais[78].

[78] Uma fonte de recursos acerca das experiências realizadas no século XX para determinar a velocidade da luz é o artigo de Harry E. Bates de Agosto de 1988 na revista Am. J. Phys.

Ano	Experimentadores	Método	Incerteza (Km/s)	Velocidade da luz
1926	Michelson	Espelho rotatório	4	299798,8
1935	Michelson	Espelho rotatório	1,1	299774
1949	Bergstrand	Geodímetro	2	299796
1950	Essen	Radar	2,4	299792
1950	Bergstrand	Geodímetro	0,25	299792,700
1950	Essen	Cavidade ressonante	3,0	299792,500
1951	Bergstrand	Geodímetro	0,2	299793,100
1952	Rank...	Espectroscopia	6	299776
1958	Froome	Interferometria	0,1	299792,5
1972	Bay...	Medição directa da frequência	0,018	299792,462
1977	Blaney	Medição directa da frequência	0,0006	299792,459
1978	Woods	Medição directa da frequência	0,0002	299792,4588
1987	Jennings	Medição directa da luz visível	0,0003	299792,4586

Tabela 5: Algumas das medições da velocidade da luz realizadas no século XX.

6

Experiências didácticas para a determinação da velocidade da luz.

6.1 Determinação da velocidade da luz pelas efemérides do satélite de Júpiter- Io.

Existem quatro eventos possíveis de observar aos satélites de Júpiter. Esses eventos são o trânsito, a sombra, o eclipse e a ocultação. Dois destes fenómenos, o trânsito e a ocultação, são geocêntricos (alinhamento da Terra, Júpiter e satélite) estando afectados pelo deslocamento da Terra. O trânsito é a passagem do satélite pelo disco de Júpiter e podemos assinalar o princípio e o fim. Devido a Júpiter ser muito mais brilhante que o satélite é difícil determinar o instante a que o evento ocorre. Para determinar o instante preciso são necessárias condições especiais. A ocultação do satélite ocorre quando o satélite passa por de trás do disco de Júpiter. As dificuldades de observação são idênticas às anteriores só que agravadas pelo facto de não vermos o satélite. Os outros dois eventos - eclipse e sombra - são heliocêntricos, não são condicionados pela localização do observador. No caso da sombra projectada pelo satélite sobre o disco de Júpiter, não é fácil determinar com precisão o evento devido ao encandeamento provocado pelo brilho de Júpiter. O eclipse ocorre quando o satélite entra no cone de sombra de Júpiter. Aqui o satélite passa de uma zona iluminada para uma zona escura (ou o contrário), estando afastado do disco brilhante do planeta, o que favorece a observação, permitindo determinar o período do satélite de Júpiter com mais precisão. Porém não é um acontecimento fácil de localizar no tempo. Conhecendo os

elementos orbitais de Io, podemos calcular o tempo que o seu disco demora a mergulhar no cone de sombra de Júpiter, cerca de 3 minutos e 30 segundos.

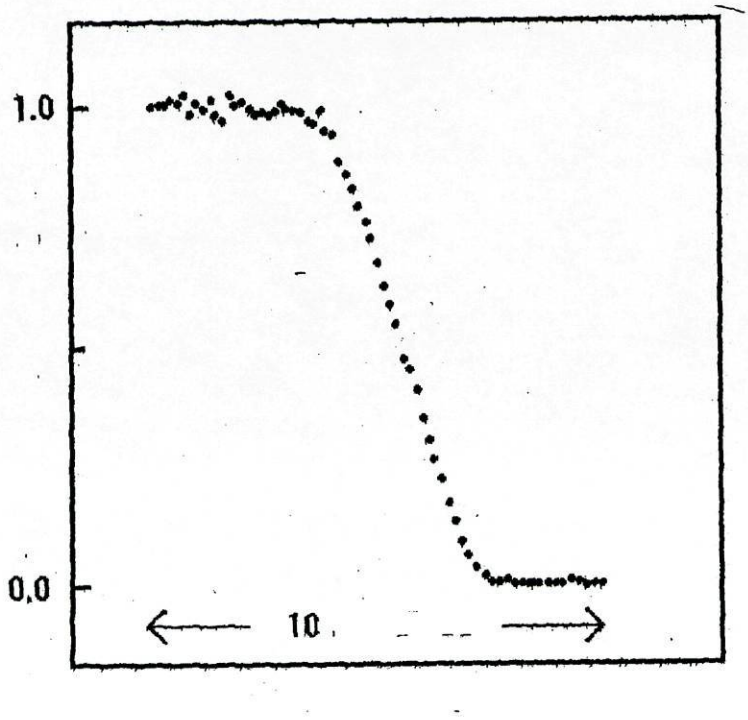


Figura 37: Variação da intensidade luminosa de Io durante um eclipse.

Na figura observa-se a variação do fluxo luminoso de Io, por fotometria, durante o eclipse, e apercebemos que não é um acontecimento instantâneo. É ainda mais difícil definir o evento por observação visual, e depende muito da prática do observador. É necessário fixar o instante que queremos que represente o evento nos 210 segundos que demora o fenómeno. Os valores obtidos por observação directa reflectem esta imprecisão. No período de um ano ocorrem 206 eclipses de Io. Metade destes eclipses ocorrem quando o Sol está abaixo do horizonte e a outra metade ocorre quando Júpiter esta acima do horizonte. É razoável afirmar que em média só 50 eclipses são observáveis por ano. Se levarmos em consideração que metade da noite ocorre depois da meia-noite e se contarmos com os imponderáveis atmosféricos ficamos com um número de eventos observáveis bastante reduzido.

Foram feitas várias tentativas para observar os eclipses de Io. Em Outubro não foi possível observar nenhum devido ao mau tempo. Em Novembro observámos três eventos. A partir de Dezembro não foi possível observar mais nenhum evento, devido ao constante tempo de chuva (foi um dos Invernos mais chuvosos dos últimos anos).

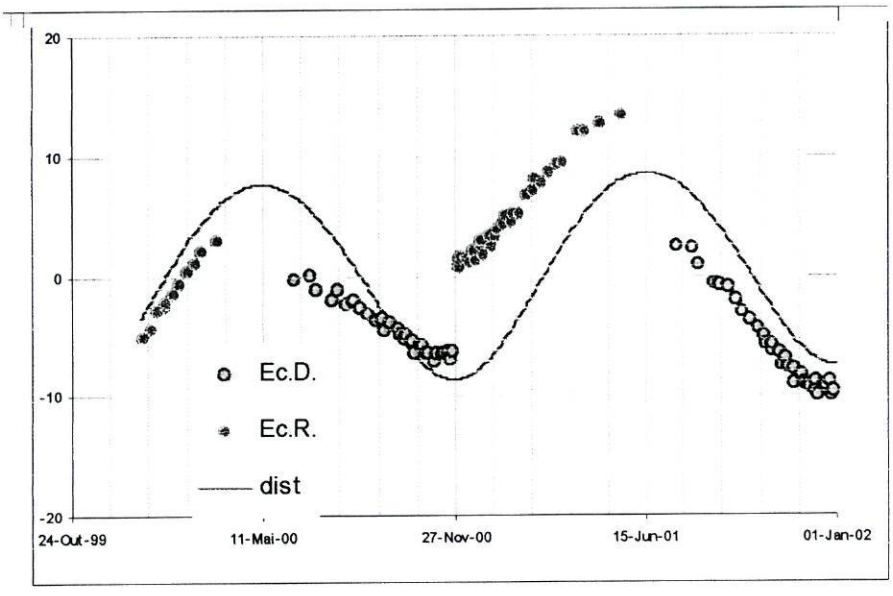
Eis os resultados obtidos:

Data	Observado	Calculado
6 de Novembro	20:18:22	20:17:9
16 de Novembro	20:12:48	22:12:4
24 de Novembro	00:07:16	00:07:0

Tabela 7: Observações dos eclipses de Io.

A análise anterior evidência a dificuldade em conduzir este trabalho num curto intervalo de tempo. A análise dos valores observados não permite obter qualquer conclusão, apenas se pode concluir que os tempos obtidos para o evento estão em concordância, dentro das limitações da observação directa, com os valores a que as efemérides ocorrem.

Para se obter a velocidade da luz, pode-se juntar os resultados das observações realizadas com as observações virtuais realizadas sobre as efemérides rigorosas dos satélites. No gráfico marcou-se os desvios na ocorrência dos eclipses de Io ao longo de um período de tempo. Em abcissas está representada uma escala de tempo uniforme onde a unidade de tempo é a revolução de Io em torno de Júpiter. Em ordenadas está representado o desvio de cada evento observado relativamente à escala (teórica) das abcissas. No gráfico foram inseridos dois fenómenos distintos: eclipse de Io por imersão no cone de sombra de Júpiter e emergência de Io desse cone. A uma sequência de várias imersões (Ec.D.) segue-se outra série de emergências (Ec. R.), mas desfasadas no tempo em cerca de 132 minutos, tempo que o satélite leva para atravessar o cone de sombra. São várias as razões para os dados não serem concordantes, o que provoca flutuações no período observado de Io. Io não atravessa o cone de sombra sempre no mesmo plano equatorial, quer porque a sua órbita é ligeiramente inclinada relativamente ao equador de Júpiter, quer porque o plano da órbita de Io vai rodando quando vista da Terra (os 132 minutos são um valor típico da travessia de Io no cone de sombra de Júpiter). A excentricidade da órbita de Io e da órbita de Júpiter fazem variar a distância Terra-Io, introduzindo variações sinusoidais não triviais no período observado.



Para determinar o valor da velocidade da luz podemos considerar uma série de emersões ou emergências de Io. Podemos obter a velocidade da luz através do diâmetro médio da órbita terrestre e da diferença do período de Io, quando Júpiter se encontra em quadratura com a Terra e quando se encontra em oposição. Atendendo ao gráfico e, por exemplo, considerando o período entre Julho e Outubro de 2000, observa-se que o período do satélite diminui cerca de 7 minutos. Este valor é aproximadamente igual ao tempo que a luz demora a percorrer o raio da órbita terrestre.

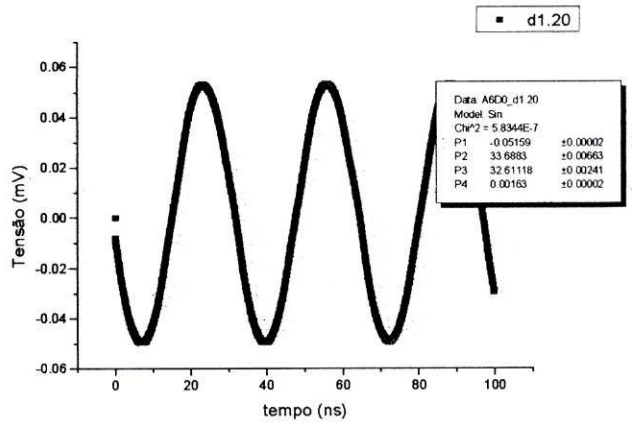
6.2 Método utilizando a modulação da luz

O objectivo da experiência é determinar a velocidade da luz por modulação. A luz de um laser infra-vermelho é modulada a 50 MHz por meio de um oscilador. Este feixe de luz é inserido numa fibra óptica e incide num espelho móvel que se encontrava a uma distância de cerca de 2 metros. Este feixe é reflectido para uma fibra óptica que o conduz a um detector. O detector estava ligado a um osciloscópio, que por sua vez estava ligado a um computador. No computador estava instalado o programa LabView que permitia trabalhar a função sinosoidal do sinal recebido pelo detector. Para alinhar o sistema utilizou-se um laser de hélio- néon. A luz do laser foi introduzida na fibra óptica indo incidir no espelho móvel, que depois de reflectida era recolhida por outra fibra óptica que a encaminhava para o detector e para o osciloscópio. Depois de se obter o sinal no osciloscópio, substituía-se a luz do laser de hélio-néon na fibra óptica pela luz modulada do laser infra-vermelho.

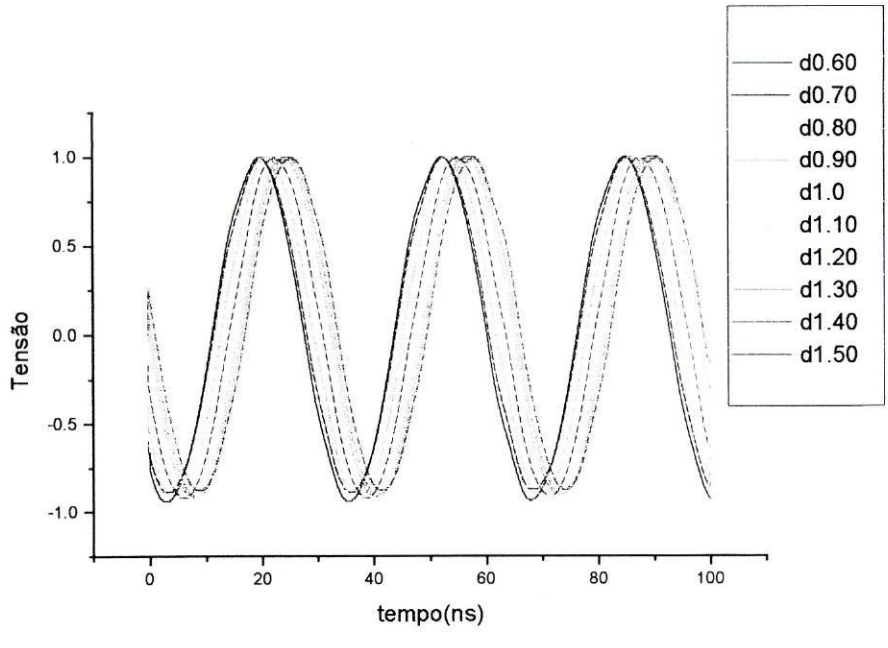
O sinal do osciloscópio foi transferido para o computador e recolhido pelo programa LaBView. Os dados foram depois trabalhados no programa Microsoft Origin (um programa de análise de dados e gráficos), de modo a obter-se os parâmetros da equação sinosoidal observada no osciloscópio. A equação foi obtida por ajuste dos parâmetros P1, P2 e P3, que são respectivamente a amplitude, o intervalo de tempo e o período. A equação sinusoidal é dada pela expressão

$$y = P1sen\frac{P2}{P3}.$$

Um exemplo da equação sinusoidal obtida para um determinado deslocamento do espelho foi:



O gráfico com todas as equações normalizadas, para diferentes distâncias ao espelho é:

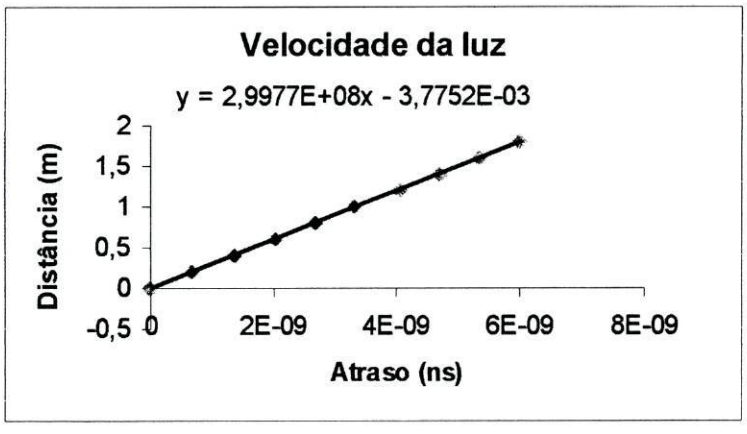


Destas equações podemos construir a seguinte tabela:

Atraso (ns)	Distância (m)
0,690	0,2
1,35	0,4
2,025	0,6
2,674	0,8
3,314	1,0
4,051	1,2
4,695	1,4
5,344	1,6
6,006	1,8

Tabela 8: Valores experimentais.

A partir da tabela podemos traçar o gráfico distância em função do atraso temporal e obter a velocidade da luz através do declive.



Os resultados obtidos podiam ser mais precisos, se na medição do desvio do espelho se tivesse usado um micrómetro, em vez de uma régua, e simultaneamente um gerador de sinal de frequências elevadas.

7 Conclusão e perspectivas futuras

O trabalho apresentado é uma descrição detalhada das experiências mais importantes que permitiram determinar a velocidade da luz, com a contextualização dessas experiências no desenvolvimento da ciência e em particular da óptica. Apesar de ter realizado duas experiências que permitiram calcular o valor da velocidade da luz, a tese é essencialmente teórica. O tema relatividade e cosmologia e a parte experimental poderiam ter sido mais desenvolvidos.

Esta tese tenta introduzir uma nova perspectivada da história da ciência e da história do universo.

Relativamente ao aspecto do ensino, com a realização deste mestrado fiquei mais habilitado e melhor preparado para leccionar, principalmente os temas relacionados com a óptica e a astronomia.

Quanto à qualidade da tese, ela podia ser melhor. As frases podiam estar melhor construídas, as ideias estarem mais explícitas e existir uma melhor ligação entres os diferentes assuntos, de forma a torná-los mais cativantes.

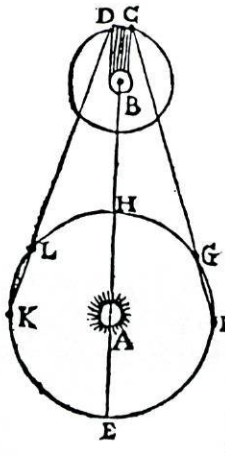
Anexos

1. Artigo de Roemer publicado no Journal des Sçavans

DEMONSTRATION TOVCHANT LE mouvement de la lumiere trouvé par M. Römer de l'Academie Royale des Sciences.

IL y a long-temps que les Philoſophes ſont en peine de decider par quelque experience, ſi l'action de la lumiere ſe porte dans un inſtant à quelque diſtance que ce ſoit, ou ſi elle demande du temps. Mr Römer de l'Academie Royale des Sciences s'eſt aviſé d'un moyen tiré des obſervations du premier ſatellite de Jupiter, par lequel il démontre que pour une diſtance d'environ 3000 lieuës, telle qu'eſt à peu prés la grandeur du diametre de la terre, la lumiere n'a pas beſoin d'u-

ne ſeconde de temps.



Soit A le Soleil, B Jupiter, C le premier Satellite qui entre dans l'ombre de Jupiter pour en ſortir en D, & ſoit E F G H K L la Terre placée à diverſes diſtances de Jupiter.

Or ſuppoſé que la terre eſtant en L vers la ſeconde Quadrature de Jupiter, ait veu le premier Satellite, lors de ſon émerſion ou ſortie de l'ombre en D ; & qu'en ſuite environ 42. heures & demie aprés, ſçavoir aprés une revolution de ce Satellite, la terre ſe trouvant en K, le voye de retour en D : Il eſt manifeſte que ſi la lumiere demande du temps pour traverſer l'intervalle L K, le Satellite ſera veu plus tard de retour en D, qu'il n'auroit eſté ſi la terre eſtoit demeurée en K, de ſorte que la revolution de ce Satellite, ainſi obſervée par les Emerſions, ſera retardée d'autant de temps que la lumiere en aura employé à paſſer de L en K, & qu'au contraire dans l'autre Quadrature F G, où la terre en s'approchant, va au devant de la lumiere, les revolutions des Immerſions paroiſtront autant accourcies, que celles des Emerſions avoient paru alongées. Et parce qu'en 42 heures & demy, que le Satellite employe à peu prés à faire chaque revolution, la diſtance entre la Terre & Iupiter dans l'un & l'autre Quadrature varie tout au moins de 210. diametres de la

Terre, il s'enſuit que ſi pour la valeur de chaque diametre de la Terre, il faloit une ſeconde de temps, la lumiere employeroit 3 ½ min. pour chacũ des intervalles GF, KL, ce qui cauſeroit une differẽce de prés d'un demy quart d'heure entre deux revolutions du premier Satellite, dont l'une auroit eſte obſervée en FG, & l'autre en KL, au lieu qu'on n'y remarque aucune difference ſenſible.

Il ne s'enſuit pas pourtant que la lumiere ne demande aucun temps : car apres avoir examinè la choſe de plus prés, il a trouvé que ce qui n'étoit pas ſenſible en deux revolutions, devenoit tres-conſiderable à l'égard de pluſieurs priſes enſemble, & que par exemple 40 revolutions obſervées du coſté F, eſtoient ſenſiblement plus courtes, que 40. autres obſervées de l'autre côté en quelque endroit du Zodiaque que Iupiter ſe ſoit rencontré ; & ce à raiſon de 22. pour tout l'intervalle H E, qui eſt le double de celuy qu'il y a d'icy au ſoleil.

La neceſſité de cette nouvelle Equation du retardement de la lumiere, eſt établie par toutes les obſervations qui ont eſté faites à l'Academie Royale, & à l'Obſervatoire depuis 8. ans, & nouvellement elle a eſté confirmée par l'Emerſion du premier Satellite obſervée à Paris le 9. Novembre dernier à 5. h. 35.′ 45.″ du ſoir, 10. minutes plus tard qu'on ne l'eût deû attendre, en la déduiſant de celles qui avoient eſté obſervées au mois d'Aouſt, lors que la terre eſtoit beaucoup plus proche de Iupiter ; ce que Mr Römer avoit predit à l'Acade-

mie dés le commencement de Septembre.

Mais pour oſter tout lieu de douter que cette inégalité ſoit cauſée par le retardement de la lumiere, il demontre qu'elle ne peut venir d'aucune excentricité, ou autre cauſe de celles qu'on apporte ordinairement, pour expliquer les irregularitez de la Lune & des autres Planetes : bien que neanmoins il ſe ſoit aperceu que le premier Satellite de Iupiter eſtoit excentrique, & que dailleurs ſes revolutions eſtoient avancées ou retardées à meſure que Iupiter s'aprochoit ou s'éloignoit du ſoleil, & même que les revolutions du premier Mobile eſtoient inégales ; ſans toutesfois que ces trois dernieres cauſes d'inégalité empêchent que la premiere ne ſoit manifeſte.

2. A esfera celeste

Os nossos antepassados pensavam que a Terra era o centro do Universo. Eles pensavam que as estrelas estavam inseridas na superficie de uma grande esfera que tinha como centro a Terra. A essa esfera chamaram esfera celestial, que é um conceito com utilidade, mas diferente nos nossos dias.

Se estendermos o plano do equador terrestre, ele vai cortar a esfera celestial num grande círculo designado por equador celestial. O equador celestial divide o céu no hemisfério Norte e Sul celestial. Podemos também projectar os pólos Norte e Sul da Terra pelo espaço e obter o pólo Norte e Sul celestial. O equador celestial, o pólo Norte e Sul celestial são usados para definir um sistema de coordenadas com que podemos definir as posições de qualquer objecto no espaço. O sistema de coordenadas que usa dois ângulos, a ascensão recta (R.A.) e declinação (DEC), que são similares, respectivamente, à longitude e latitude chama-se sistema equatorial.

2.1 Sistema equatorial

Em adição ao facto de a Terra rodar em torno do seu eixo em 24 horas, a Terra roda em torna do Sol em 365,2 dias, originado as estações do ano, causadas pela conjugação do movimento de translação da Terra e da inclinação do eixo de rotação, em relação ao plano da órbita da Terra em torno do Sol (plano da eclíptica).

À medida que a Terra se move em torno do Sol, a posição do Sol relativamente ao fundo estelar vai-se modificando, traçando um caminho ao longo do ano. Este caminho aparente do Sol na esfera celestial chama-se eclíptica. Devido à inclinação do eixo de rotação terrestre, o equador celeste e a eclíptica estão inclinados cerca de 23,5°. A eclíptica e o equador celestial interceptam-se em dois pontos: no ponto do equinócio da Primavera (ponto do equinócio vernal) e no ponto do equinócio do Outono (ou ponto de equinócio outonal). O equinócio vernal marca o início da Primavera no hemisfério Norte, e o equinócio autunal marca o início do Outono no hemisfério Norte.

A declinação de um objecto é a sua distância angular, norte ou sul do equador celestial, medida ao longo do meridiano que passa pelos dois pólos celestiais.

As declinações são contadas dentro dos limites 0° a + 90° na direcção do pólo celeste norte e de 0° a - 90° na direcção do pólo celeste sul.

Uma outra coordenada que individualiza a posição do círculo horário do astro é a ascensão recta α. A ascensão recta é medida a partir de um ponto específico do equador celeste, o equinócio vernal. Este é um dos dois pontos onde o Sol passa pelo equador celestial durante o seu movimento anual. A ascensão recta de um objecto é a distância angular do equinócio vernal no sentido Este ao longo do equador celestial, até ao meridiano usado para medir a declinação.

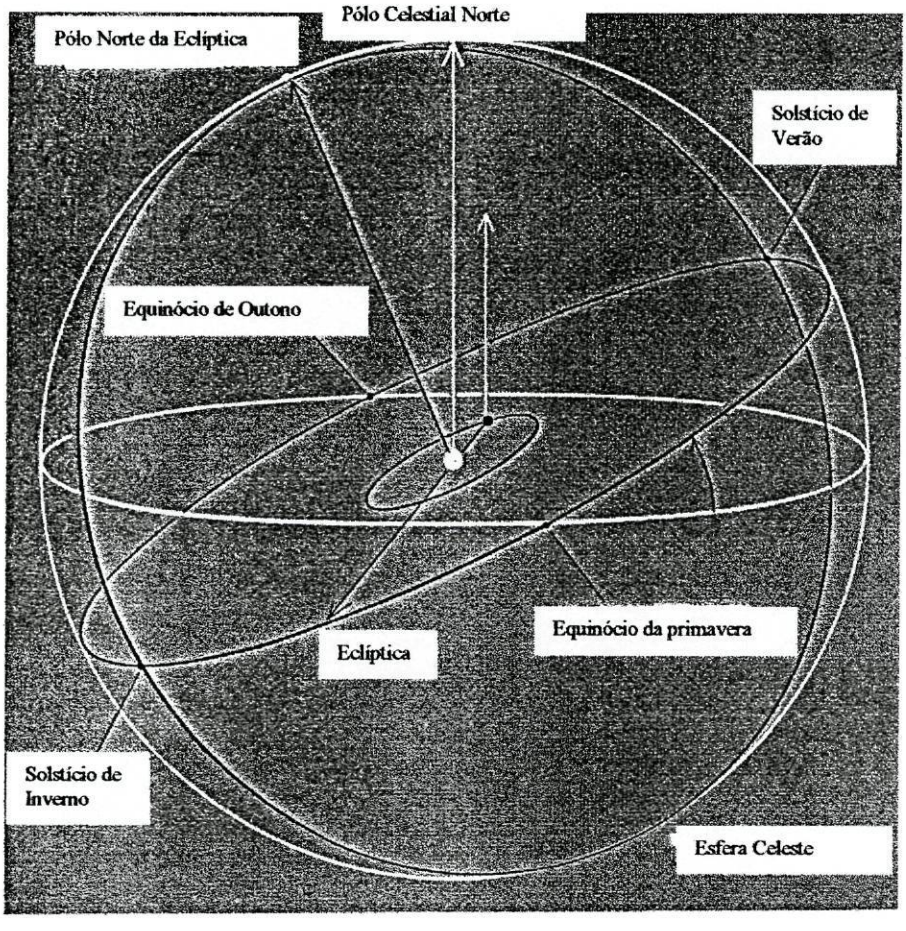


Figura 1: A esfera celeste

As ascensões rectas contam-se no sentido contrário à rotação diária da esfera celeste, dentro dos limites de 0° a 360°.

As medições da distância zenital ou as da altura do Sol ao meio-dia (isto é, no instante da sua culminação superior), sempre à mesma latitude geográfica, permitiram estabelecer que a declinação do Sol varia dentro dos limites de + 23°26′ a - 23°26′, passando duas vezes pelo zero durante o ano. As observações da variação do aspecto do céu, à noite, demonstram que a ascensão recta do Sol durante o ano também varia lentamente de 0° a 360° ou de 0^{h} a 24^{h}. Com efeito, à meia-noite a culminação superior

atinge as estrelas cujas ascensões rectas diferem 180° da ascensão recta do Sol. As observações tornam evidente que com o decorrer dos dias as estrelas atingem, à meia-noite, a culminação, cuja ascensão recta cresce de dia para dia e, por conseguinte, a ascensão recta do Sol aumenta também de dia para dia.

Um ponto na superfície da Terra é definido por duas coordenadas, longitude e latitude, baseado no equador e no meridiano de Greenwich. A longitude expressa em ângulos pode ser convertida em tempo, da seguinte maneira: dividindo a amplitude 0° a 360° em 24 partes iguais, verifica-se que cada parte corresponde a 15° que equivale a uma hora. Usando esta equivalência, podemos expressar longitude em horas, minutos, e segundos do tempo.

A longitude pode ser expressa em medidas angulares ou em unidades de tempo relacionadas umas com as outras pela seguinte tabela:

$360° = 24^h$

$1° = 4^m$	$1^h = 15°$
$1' = 4^s$	$1^m = 15'$
$1'' = 1/15^s$	$1^s = 15''$

No sistema equatorial, uma das coordenadas da estrela, a declinação, é constante no tempo. A outra, R. A., muda de posição com a passagem do tempo e, portanto, é inconveniente para usar como catálogo das posições estelares.

3. Método geral para medir a velocidade da luz nos meios transparentes. Velocidade relativa da luz no ar e na água

Eis como Foucault descreve a sua experiência:[79]

"Coloca-se sobre uma mesma linha horizontal: 1° uma mira formada por um fio fino de platina colocado no meio de uma abertura de 2mm de largura, adaptada a uma lâmina opaca; 2° o centro óptico de uma objectiva acromática; 3° o centro de um espelho plano, susceptível de rodar em torno de um eixo vertical que passa perto da superfície reflectora. Dirige-se e fixa-se por um helióstato um feixe de luz solar no alinhamento destas três peças. A mira deixa passar uma certa porção de luz que incide sobre a objectiva colocada a uma distância um pouco menor que o dobro da sua distância focal principal; refractada por essa objectiva, a luz reflecte-se no espelho plano e vai formar no espaço uma imagem ampliada da abertura e do seu fio. Como podemos dispor à vontade da distância da mira à objectiva, podemos fazer variar arbitrariamente a distância da sua imagem ao espelho e, quando esta começa a rodar, a imagem move-se no espaço sobre uma circunferência onde o raio pode tomar a amplitude que quisermos. Assim, obtém-se uma imagem móvel onde se pode receber e distinguir o traço num ecrã. Para obter uma imagem fixa, é necessário colocar sobre a circunferência descrita pela imagem móvel, a superfície reflectora de um espelho esférico côncavo, orientado de forma que o seu centro de curvatura venha coincidir com o centro do espelho rotatório. Quando esta condição é satisfeita, o feixe giratório é reflectido sobre si mesmo sempre que ele encontra o espelho côncavo em que todos os elementos são normais ao seu eixo; e, depois, o feixe continua a percorrer o dispositivo até à mira, seu ponto de partida, sobrepondo-se uma imagem direita de dimensão natural, onde todos os pontos da imagem se sobrepõem aos pontos homólogos da mira.

[79] Retirado do livro "Mesure de la vitesse de la lumière" Mémoires de Léon Foucault

Fig. 1

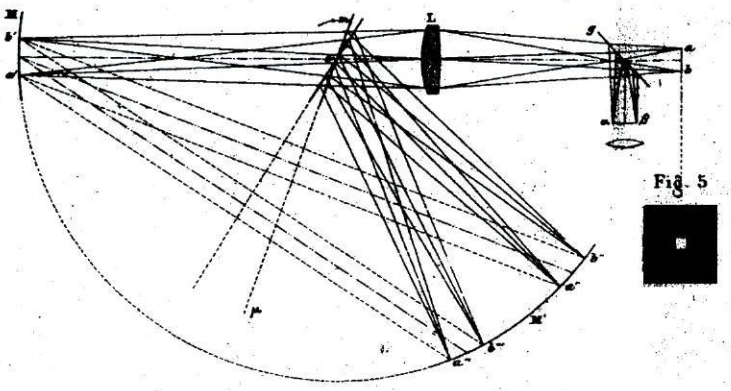


Fig. 5

Com efeito, seja *ab* um objecto, e *a'b'* a sua imagem, formada pela objectiva *L* e que incide na superfície reflectora de um espelho côncavo *M*; e seja *c* o ponto do espaço onde se colocará o centro de um espelho rotatório. Se o espelho côncavo tem o seu centro de curvatura no ponto *c*, o feixe reflectido na sua superfície irá tornar a passar em grande parte pela objectiva para formar sobre o objecto *ab* uma imagem direita e de dimensão natural porque no momento em que a luz que regressa incide na objectiva, a imagem a'b' do objecto onde o ponto *a'* está no foco conjugado de *a*, e o ponto *b'* está no foco conjugado de *b*. Então, toda a luz que vem de *a'* e que passa pela objectiva incide em *a*, toda a luz que vem de *b'* também incide em *b*, e assim para todos os outros pontos. Então, o objecto *ab* é recoberto por uma imagem igual a ela mesma.

Agora coloquemos o espelho plano *m* com uma obliquidade qualquer e para saber onde se vai formar a imagem reflectida *a"b"*, recorremos a uma construção bem conhecida. Prolonguemos o traço *cμ* do plano do espelho e determinemos, para os pontos *a"b"* as posições simétricas de uma parte do plano com as quais ocupam, da outra parte, os pontos *a'b'* ; coloquemos agora o espelho côncavo em *M'* e orientemo-lo de modo que o seu centro de curvatura seja o ponto *c*; o feixe luminoso retorna ao espelho plano, espalhando-se na objectiva, como se viesse de *a'b'* e vai formar uma imagem do objecto *ab* sobre o objecto.

Com esta construção obtém-se sempre o mesmo resultado, para qualquer obliquidade do espelho plano, onde a demonstração é independente do valor do ângulo de incidência; portanto, é indiferente que a imagem móvel incida em *a"b"* ou em *a'''b'''*, e qualquer que seja a sua posição à superfície do espelho *M'*, a imagem, ao regressar, coincide invariavelmente com o objecto *ab*.

Para constatar, por experiência, a invariabilidade da posição da imagem, coloca-se obliquamente ao eixo da objectiva *L*, entre esta e o objecto *ab* uma lâmina de faces

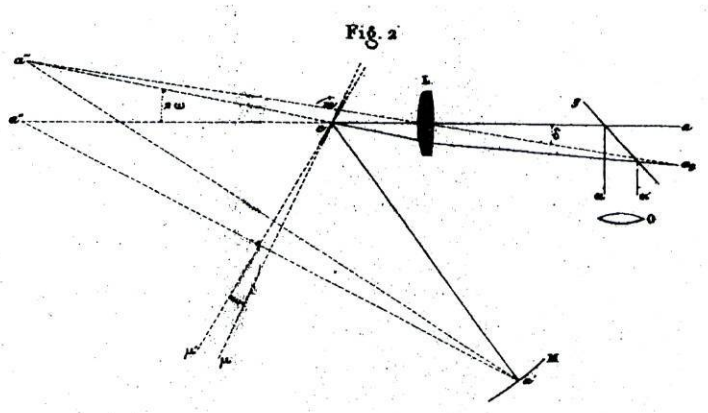
paralelas onde a superfície g origina, por via de reflexão parcial, uma imagem $\alpha\delta$ de fácil observação. Examinando com uma ocular O, a imagem $\alpha\delta$ ocupa a mesma posição, qualquer que seja a direcção da parte móvel do feixe compreendido entre os dois espelhos plano e côncavo; ela é realmente a imagem fixa de uma imagem móvel.

No aparelho utilizou, o objecto ab e a mira (fig 5) anteriormente descrita; a objectiva L tem 1,90m de foco, e a ocular do micrómetro (fig 10) aumenta de 10 a 20 vezes, o espelho rotatório tem de diâmetro 0,014m, e o raio de curvatura do espelho côncavo é de 4m. A distância do espelho rotatório à objectiva pode variar entre limites bastante extensos e a posição da objectiva é colocada pela necessidade de o objecto e a superfície do espelho côncavo estarem os dois no seu foco conjugado.

Coloca-se, agora, o espelho em marcha e fazemo-lo girar lentamente e de uma maneira contínua, no sentido indicado pela seta (fig 1).

O ângulo de incidência varia progressivamente e o ângulo de reflexão deverá manter-se igual ao anterior. O feixe reflectido incide em torno do ponto c, como no espelho, mas com uma velocidade angular dupla; a imagem circula sobre esta circunferência de círculo e, a cada volta do espelho plano, ela passa uma vez sobre o espelho côncavo fazendo provir, para o observador, a imagem $\alpha\delta$, que se mantém em todo o tempo compreendido entre duas passagens consecutivas. Assim, quando o número de voltas do espelho é inferior a trinta por segundo, a imagem brilha por intermitência; para velocidades superiores, as aparições sucedem-se rapidamente para se confundirem umas com as outras, devido à persistência da visão; a imagem $\alpha\delta$ aparece permanente e a sua intensidade é reduzida, para o observador, por um factor da relação da circunferência inteira a metade do arco reflector do espelho côncavo.

Mas quando o espelho roda com a velocidade elevada, um outro efeito se produz, surgindo um fenómeno importante, o desvio. A imagem $\alpha\delta$ desloca-se da marca do micrómetro ocular e no sentido que nós diremos ser devido ao movimento do espelho. Este desvio mostra que a duração da propagação da luz entre os dois espelhos não é nula e que pode ser medida pelo valor do desvio.



Para simplificar a demonstração reduzimos a fonte de luz a um ponto único *a* (Fig.2), não considerando que o raio central *ac* do feixe se alista no aparelho, e estudemos a sua marcha no momento em que o espelho rotatório se apresenta na incidência, enviando o raio para originar a imagem a' sobre um elemento normal qualquer da superfície do espelho côncavo *M*. Reflectido no espelho *M*, este raio vem incidir novamente sobre o espelho plano, que já rodou, e o raio é reflectido uma segunda vez numa nova incidência, originando uma nova direcção, que o impede de formar uma imagem no seu ponto de partida, mas que o obriga a produzir a_4 uma imagem desviada no sentido do movimento de rotação e, por conseguinte, uma imagem α' igualmente desviada para o observador.

É fácil de ver que o valor deste desvio está ligado à velocidade da luz, ao número de voltas do espelho por unidade de tempo e às distâncias que separam as diferentes peças do dispositivo.

Designemos por *r* a distância *oa* do centro óptico da objectiva à mira, por *l* e *l'* as distâncias do espelho rotatório ao espelho fixo e ao mesmo centro óptico *o*; designemos por *n* o número de voltas do espelho por segundo, π a relação da circunferência com o diâmetro, e *v* a velocidade da luz ou o espaço que ela percorre num segundo, *d* o arco do desvio aa_4, igual $\alpha\alpha'$, e tomemos *w* para designar o ângulo que o espelho roda no tempo em que a luz percorre o espaço entre os dois espelhos.

A fim de se obter um ângulo de desvio δ exactamente duplo do ângulo *w*, começarei por negligenciar a distância *l'*, ou seja, supõe-se que a objectiva é colocada a uma distância insensível do espelho rotatório. Com esta hipótese, se imprimirmos ao espelho uma velocidade de *n* voltas por segundo, o desvio *d* que se observa dará a conhecer o ângulo $w = \delta/2$, devido à rotação do espelho, enquanto a luz transpõe a distância *2l*. A relação do ângulo *w* a *n* vezes quatro ângulos rectos ou a relação do

desvio d a $2n$ vezes a circunferência inteira $2\pi r$ é então igual à relação da distância $2l$, na qual a luz transpõe em um segundo ou igual a $2l/V$, em que se obtém

$$d = \frac{8\pi \ln r}{V}$$

Mas, na realidade, a objectiva não se confunde com o espelho rotatório, e a experiência exige mesmo que se estabeleça entre eles uma distância cujo desvio deste diminui notavelmente. A correcção que é necessária fazer sentir ao valor resulta claramente da construção representada na Fig.2.

Prolongando os traços $c\mu$, $c\mu'$ do plano do espelho rotatório nas duas posições que ele ocupa, nos instantes precisos que limitam a duração da excursão da luz no espelho côncavo e construindo-se, relativamente a esses traços, os pontos a'' e a''' simétricos ao ponto a'. O ângulo $a''ca'''$ é então igual a $2w$ e será assim igual ao ângulo de desvio, se a objectiva tiver o seu centro aplicada em c; mas como, na realidade, esta condição não pode ser preenchida e como a objectiva está sempre colocada a uma certa distância l' do espelho, o ângulo de desvio é igual ao ângulo oposto $a''oa'''$, este menor que $a''ca'''$ igual a $2w$. Estes ângulos sendo mais pequenos e os vértices de dois triângulos que tem a mesma base $a''a'''$ dão, sensivelmente, com as suas alturas l e $l+l'$, a proporção:

$$\delta : 2w :: l : l+l';$$

onde se pode obter simplesmente:

$$\delta = 2w, \quad \delta = 2w\frac{l}{l+l'}.$$

Como consequência, obtém-se o verdadeiro valor do desvio,

$$d = \frac{8\pi l^2 nr}{V(l+l')},$$

e para a velocidade da luz,

$$V = \frac{8\pi l^2 nr}{d(l+l')}.$$

Esta fórmula pode servir com efeito para calcular a velocidade da luz no ar com uma aproximação que depende da precisão com que se mede o desvio, como as diversas quantidades representadas pelas letras l, l', r e n.

Chega-se à mesma fórmula, raciocinando de outra forma. A velocidade da luz é o espaço que ela percorre por unidade de tempo,

$$V = \frac{e}{t};$$

e

$$e = 2l, \quad t = \frac{d(l + l')}{4\pi drn};$$

substituindo e e t na primeira equação, obtemos, como anteriormente,

$$V = \frac{8\pi l^2 nr}{d(l + l')}.$$

O mesmo método aplica-se à medição da velocidade da luz em todos os meios homogéneos e transparentes que se coloquem entre o espelho rotatório e o espelho côncavo. Se o meio é alterado em toda a extensão do trajecto, o desvio varia na simples relação da velocidade da luz no novo e antigo meio. Se, por exemplo, preenchermos com água o espaço compreendido entre os dois espelhos, sem qualquer alteração da montagem, o índice de refracção da água é sensivelmente igual a *4/3*, o desvio deve aumentar na relação de 3 para 4 , para confirmar a teoria ondulatória ou diminuir na relação de 4 para 3, para justificar a teoria da emissão.

Mas quando interpomos uma coluna de água entre os dois planos paralelos, somos obrigados a deixar entre os dois planos e cada um dos espelhos uma certa distância. Então, a distância l encontra-se dividida em duas partes, uma P ocupada por um meio refringente e outra Q onde persiste o ar. Num caso como este, o desvio observado dá somente a velocidade média da luz U no espaço ocupado numa parte por água e noutra parte por ar.

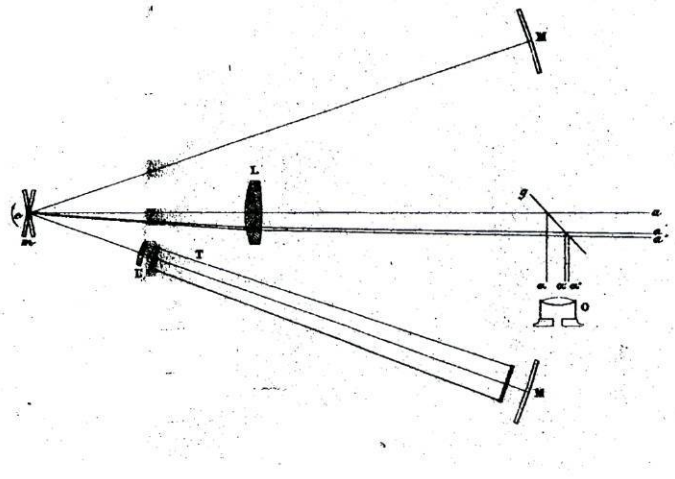
Mas como a velocidade V no ar já é conhecida e como a velocidade U se obtém da mesma maneira, como se pode medir directamente os comprimentos P e Q, onde a soma é igual a l, obtém-se facilmente a velocidade V' da luz na água. Com efeito, a velocidade média da luz no trajecto $P+Q$ é:

$$U = \frac{(P + Q)VV'}{PV + QV'};$$ donde se obtém:

$$V' = \frac{PVU}{(P + Q)V - QU}.$$

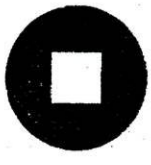
No fundo, para resolver a questão, o que interessa num grau mais elevado da teoria, não é propriamente medir a velocidade da luz na água, nem se preocupar com os meios para o conseguir. Basta constatar qual o sentido do desvio que se produz quando se opera unicamente com ar e verificar como se modifica interpondo-se uma coluna de

água com algum comprimento para produzir um efeito sensível. Convém dispor no dispositivo duas linhas de experiência: uma só com ar e outra para o ar e água, observando, assim, simultaneamente os dois desvios correspondentes. A comparação torna-se então bastante fácil, sendo inútil proceder a alguma medida.



Evita-se agora complicar o traço geométrico da experiência reduzindo, como anteriormente, o feixe de luz ao seu raio central. É bem entendido que o seu ponto de partida, marcado em a, está sempre na mira (figura 5) formada por uma abertura quadrada, atravessada no seu meio por um fio vertical e a imagem vista com a ocular oferece o aspecto representado na figura 6.

Fig. 6



À direita e à esquerda do feixe e sobre a trajectória da imagem móvel, colocar-se-ão dois espelhos côncavos M e M', onde as superfícies pertencem à mesma esfera com o seu centro em c. Cada um deles limita uma distância, numa linha de experiência que se estende da sua superfície à do espelho rotatório.

O raio móvel encontra na sua reflexão a cada volta duas direcções diferentes, quando incide em M e quando incide em M'. Como consequência, o número de aparições da imagem α é duplo; ou seja, esta imagem é, na realidade, produzida pela sobreposição das impressões de duas imagens, uma devido à passagem da luz segundo a linha cM e outra devido à passagem da luz segundo a linha cM'. Desde que os comprimentos CM e CM' se mantenham iguais, os meios, atravessados de uma parte a outra, manter-se-ão idênticos. A aceleração do movimento de rotação produz sobre as duas imagens um mesmo desvio, não os torna distintos um do outro. Mas a interposição

de um meio refringente ao longo das direcções cM ou cM', altera a simetria perfeita do sistema e deve modificar a velocidade da luz numa das duas vias, produzindo o desdobramento $\alpha'\alpha''$ da imagem α.

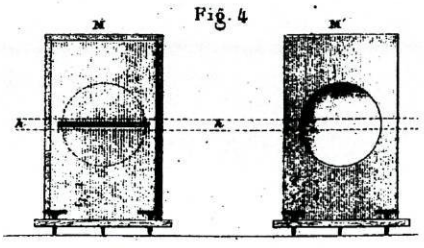
É, de facto, o que acontece se colocarmos depois do espelho M' o recipiente T repleto de água e composto, por vidros paralelos nas suas extremidades. Contudo para assegurar o sucesso da experiência e obter um resultado mais visível e mais rigoroso, é necessário tomar ainda algumas precauções.

A interposição de tubo de água traz na marcha dos raios um problema adicional que é fácil se verificar considerando que a face de entrada T age sobre o feixe, convergindo-o, de maneira a aproximar da normal todos os raios e produz um alongamento do foco. Se, na ausência do tubo, a imagem móvel incide exactamente sobre a superfície reflectora M', colocado o tubo, observamos que a imagem sofre uma perturbação na ocular, pois ela forma-se depois do espelho côncavo.

Para estabelecer um grau de convergência necessário à nitidez da imagem em M', coloca-se antes do tubo uma lente simples L', com uma grande distância focal, de fácil determinação por experiência ou por cálculo. Depois disto, a imagem de regresso apresenta a mesma nitidez, quer venha por um caminho ou por outro, não variando mais do que na cor e na intensidade. É branca e viva, quando a luz caminha pelo ar e verde e sombria por interposição da coluna de água. E, se não recorrermos a um artifício particular, esta diferença de brilho não permite ver o desdobramento que deve ocorrer com o desvio.

Chamemos *imagem no ar* à sobreposição das impressões produzidas pelas reaparições rápidas da imagem formada depois do percurso completo da luz no ar. E chamemos *imagem na água* à sobreposição das impressões da luz dirigida na outra via. A seguir mostra-se como torná-las distintas umas das outras em todas as fases da experiência.

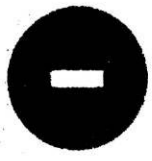
Fig. 4



Façamos rodar o espelho à razão de trinta voltas por segundo, a fim de obter, colocando o olho na ocular, uma impressão contínua. Se cobrirmos o espelho M', não veremos a imagem no ar; se, pelo contrário, colocarmos o obstáculo no espelho M não

veremos a imagem na água, mas para uma e outra serem inteiramente visíveis (Fig 6) é preciso que o espelho côncavo seja o espelho M' (fig 4), se mantenha descoberto em toda a altura do traço h da imagem móvel à sua superfície. Reduzindo a altura da imagem anterior, colocamos como em M (fig 4), em frente do espelho côncavo, um écran aberto por uma fenda onde a altura é menor do que a traçada em h; a imagem reduz-se necessariamente e apresenta o aspecto como se verifica na figura 7.

Fig. 7



Cobrimos o espelho M com o écran em fenda, livrando-nos do espelho M', fazendo o espelho rodar a altas velocidades para confundir as impressões, mas sem ocorrer um desvio sensível. É evidente que a imagem recebida será formada pela sobreposição da imagem na água, conservado toda a sua altura, a sua intensidade e a sua cor própria e a imagem no ar, mais viva e mais baixa, ambas atravessadas pelo mesmo traço vertical e rectilíneo: α será uma imagem resultante que está representada na figura 8.

Fig. 8



Para completar o dispositivo, basta colocar no foco da ocular um vidro plano marcado por um traço vertical, que para uma rotação lenta ou mesmo nula do espelho rotatório, se confunde com a linha mediana, imagem do fio da mira. Agora o espelho pode rodar a toda a velocidade e à medida que a sua velocidade aumenta, podemos ver a imagem em toda a sua totalidade deslocar-se, como na figura 9; o traço fixo que surge na ocular serve como ponto de referência para se obterem os valores absolutos e relativos dos dois desvios.

Fig. 9



Por fim, o desvio da imagem é sempre menor que as porções visíveis da imagem

verde, que a excede em altura e cá em baixo. Se, por exemplo, adoptamos para a experiência os seguintes valores:

$r = 3m$; $n = 500rot/s$

$l = 4m$; $P = 3m$

$l' = 1,18m$; $Q = 1m$,

obtém-se para a imagem branca um desvio de 0,375 mm e para a imagem verde um desvio de 0,469 mm, uma diferença evidente de mais para escapar à observação.

Mas a imagem branca, é a imagem no ar e o seu desvio indica-nos a medida da duração do trajecto da luz entre os dois espelhos; a imagem verde, é a imagem na água e o seu desvio relaciona-nos com a medida do tempo correspondente a uma mesma distância. Nós chegamos a uma conclusão definitiva e inconcebível com a teoria da emissão:

A luz move-se mais rapidamente no ar do que na água."

4. A experiência de Young e Forbes.

Se a distância angular dos espaços e dentes for α e β respectivamente, e se a intensidade da imagem com a roda em repouso for I_0, a intensidade quando roda lentamente será

$$I = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} I_0,$$

que é a razão entre a quantidade de luz, que é permitida passar por segundo, quando a roda gira lentamente com a quantidade de luz quando a roda está em repouso. Mas se roda gira num ângulo ε enquanto a luz percorre o percurso entre as duas estações, o espaço disponível para a transmissão da luz que retorna será reduzido de um ângulo α para α-ε, e a intensidade da imagem será

$$I = \frac{\alpha - \varepsilon}{\alpha + \beta} I_0,$$

onde $\varepsilon = \omega T = 2\pi n T$, quando a roda faz n voltas por segundo.

Se o número de dentes for m obtemos m(α+β)=2π, e ε=mnT(α+β), de modo que se k = α/α+β, obtemos:

$$I = (k - mnT) I_0.$$

Se a intensidade for representada pelas coordenadas e a velocidade pelas abcissas, temos: $y = (k - mTx) I_0$,

se $\alpha < \beta$ ou $K < 1/2$, a primeira extinção ocorre a uma velocidade ε=α, ou $OM = k/mT = kv/2mD$.

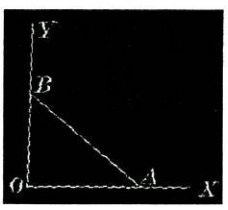


Figura 1: Experiência de Young

A intensidade manter-se-á nula até $\varepsilon = \beta$, que ocorre a velocidade

$$ON = \frac{(1-k)v}{2mD}.$$

A intensidade aumenta novamente até um novo máximo kI_0 em B_1, correspondendo a uma velocidade $\varepsilon = \alpha + \beta$, ou $N = v/2mD$.

O significado aritmético das velocidades OM e On, correspondente à primeira extinção e à primeira aparição, é igual à velocidade a que deve ocorrer o primeiro eclipse, se os dentes e os espaços são iguais e o comprimento angular é $1/2(\alpha+\beta)$.

A velocidade, correspondente a A_1, a primeira extinção central, é

$$\frac{1}{2}(OM+ON) = {}^{v}/_{4mD} = N_1 .$$

A velocidade correspondente a B_1, o primeiro máximo de intensidade, é $2N_1$; uma segunda central extinção, A_2, é $3N_1$ e em geral o máximo de intensidade ocorre a múltiplos de N_1, sendo a extinção central a múltiplos ímpares.

Como $mT = 2mD/v = 1/2N_1$, a expressão para a intensidade a qualquer velocidade x antes do primeiro eclipse é

$$I = \left(k - \frac{x}{2N_1}\right) I_0 ,$$

e como a intensidade deve ser a mesma quando a velocidade aumenta de x para $n=2pN_1 \pm x$, segue-se que entre o p e p+1 eclipses obtemos $(\pm x = 2pnN_1 - n)$

$$I = \left(k \pm \frac{2pN_1 - n}{2N_1}\right) I_0 = \left\{k \pm \left(p - \frac{n}{2N_1}\right)\right\} I_0 ,$$

a parte positiva é aplicado no caso da velocidade diminuir e a parte negativa quando aumenta. Entre p e p+1 eclipses, quando a intensidade aumenta ($n<2pN_1$),

$$I = I_0\left(k - p + \frac{n}{2N_1}\right)$$

e quando a intensidade diminui ($n > 2pN_1$), $I = I_0\left(k + p - \frac{n}{2N_1}\right)$.

Bibliografia

PRESTON, T., *Theory of Light*, MACMILLAN AND CO., LIMITED ST. MARTIN S STREET, LONDON 1928.

FROOME, K.D. e Essen, L., *The velocity of Light and Radio Waves,* Academic Press, London, 1969.

ABRAHAM, H., GAUTIER, H., Le CHATELIER H. , LEMOINE, J.,*Mesure de la vitesse de la lumière Mèmoires de Lèon Foucault,* Libraire Armand Colin, Paris, 1913.

FRENCH, A., P., *Relatividad Especial*, Editorial Reverté, S.A., Barcelona.

TOBIN, WILLIAM, *Toothed Wheels and Rotating Mirrors: Parasian Astronomy and Mid-nineteenth Century Experimental Measurements of the Speed of Light*, Vistas in Astronomy, Vol. 36,1993.

HECHT, EUGENE, *Óptica*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1991.

GIBERT, ARMANDO, *Origens históricas da Física Moderna*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

TATON, RENÉ, *Roemer et la Vitesse de la Lumière*, Vrin Paris.

PAIS, ABRAHAM, *Subtil é o Senhor - Vida e Pensamento de Albert Einstein*, Ciência Aberta, Gradiva.

GAMOV, GEORGE, *The Great Phisicists From Galileo To Einstein*, Dover Publications, New York.

GERTHSEN, C., KNESER, VOGEL, H., *Física*, Fundação Calouste Gulbenkian.

STEWART, A., *The discovery of stellar aberration*, Scientific American, 210 (3), 100 (1964).

BERRY, M.,V., *Principles of Cosmology and Gravitation.*