

# LUZ

## Introdução

Os fenômenos associados à luz são aqueles com os quais os seres humanos têm uma relação mais íntima e constante ao longo de suas existências. Na medida em que ela desempenha um papel central, por meio da fotossíntese, no ciclo de vida do reino vegetal e conseqüentemente na absorção de  $CO_2$  da atmosfera terrestre, a luz tem muito a ver com a existência e manutenção da vida no nosso planeta. Luz é, também, uma fonte de energia renovável. Assim, pelo menos na forma que a conhecemos, vida no nosso planeta não seria possível sem ela.

A explicação para os fenômenos luminosos podem ser simples, ou podem requerer formalismos ou métodos matemáticos sofisticados. Alguns requerem apenas propriedades relativas à propagação da luz num meio homogêneo. Esse é o caso da formação de sombras e de penumbras bem como os fenômenos da reflexão e da refração da luz. Outros, como a difração, requerem que se evoque o Eletromagnetismo. Finalmente, outros, como a radiação emitida pelo Sol (radiação de corpo negro), requerem conhecimentos relativos à teoria quântica.

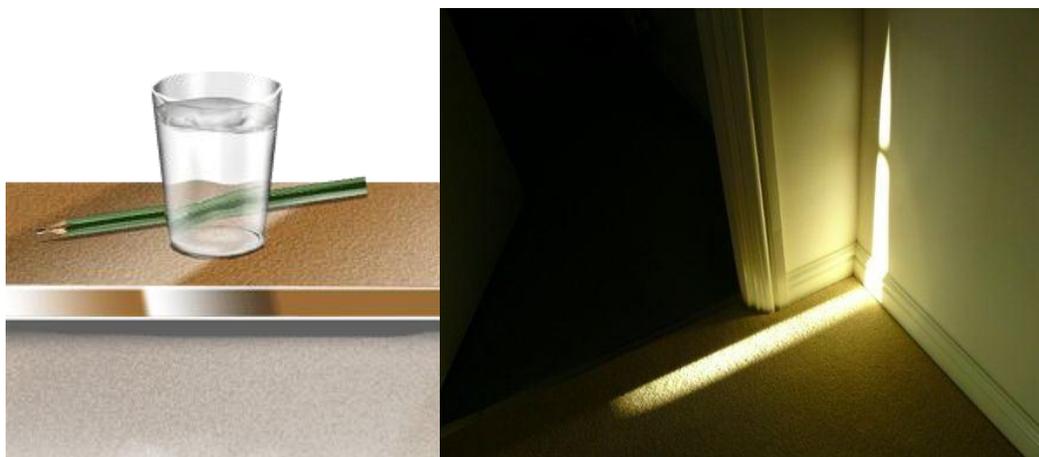


Fig 1 Fenômenos óticos requerendo explicações simples.

Alguns fenômenos naturais são de rara beleza e chegam a nos encantar dando-nos a impressão de terem uma natureza mística. Dentre eles destacamos a formação do arco-iris, a formação das Auroras Boreais e os relâmpagos.



*Fig 2 Fenômenos naturais requerendo explicações mais complexas*

*Fenômenos envolvendo a luz podem ser menos comuns e, às vezes, requerem aparatos especiais para serem observados. Dentre esses podemos citar a interferência e a difração da luz. Outros fenômenos são bem mais sutis, quer seja da sua observação ou da sua interpretação. Dentre eles destacamos o efeito fotoelétrico e o espalhamento Raman.*

*Credita-se o início da óptica à construção das primeiras lentes. E isso, cerca de 700 anos de Cristo. Foi mais uma contribuição dos mesopotâmios na antiguidade. No entanto, o primeiro estudo sistemático versando sobre o tema se deve a Euclides, o famoso geômetra, e que viveu cerca de 300 anos de Cristo. No seu livro Óptica, desenvolveu um estudo sistemático da geometria da visão. Fez uso de conceitos como raios (raios de visão). Euclides analisou ainda alguns fenômenos clássicos, e que pertencem ao domínio do que denominamos, hoje, de Óptica Geométrica. Chegou a esboçar um esquema para a Câmara Escura de orifício. Tornou-se uma obra clássica na antiguidade*

*Ainda hoje a óptica é uma área de intensas pesquisas tanto na área básica como na área tecnológica. Muitas são as aplicações dos lasers, por exemplo. Novos fenômenos são observados dia a dia envolvendo os minúsculos componentes da luz.*

*A óptica é a área da Física que estuda a Luz: sua natureza, suas propriedades suas aplicações e os fenômenos dela decorrentes. A óptica se propõe também a estudar a interação da luz com a matéria. Nesta introdução analisaremos apenas algumas questões especialmente aquelas relacionadas à natureza da luz, sua geração (as fontes de luz) e, finalmente, a questão da velocidade da luz.*

## **NATUREZA DA LUZ**

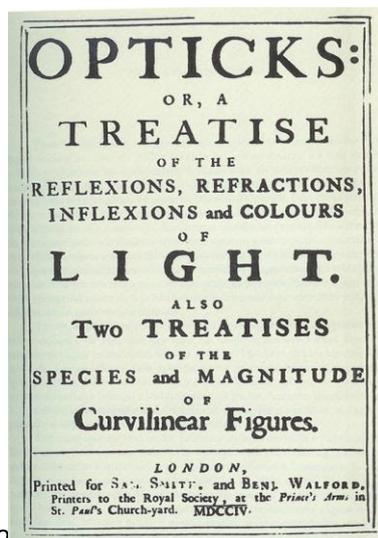
*Desde a antiguidade os filósofos e, depois do renascimento, os cientistas se dedicam a explicar os fenômenos envolvendo a luz. De grande importância nesse contexto é a questão da sua natureza. O debate envolveu grandes filósofos e cientistas. A questão central poderia ser resumida da seguinte forma:*

### **Teria a luz uma natureza ondulatória ou uma natureza corpuscular?**

*Entre os antigos gregos, a escola de Pitágoras preconizava a idéia de que todo objeto ao nosso alcance visual emitiria partículas. Já Aristóteles concluiu que os fenômenos associados á*

luz seriam melhor caracterizados como fenômenos que hoje em dia denominamos de ondulatórios.

Newton acreditava na natureza corpuscular da luz. Seu interesse pelo assunto foi tão grande que elaborou uma nova teoria voltada especialmente para explicar, dentre outros, o fenômeno das cores. Sua teoria está contida no livro "Óptica" publicada em 1704. Esse livro cujo título era "OPTICA: Um Tratado das reflexões, Refrações e Inflexões e Cores da Luz" é um livro clássico da literatura científica e foi reeditado recentemente pela Editora da USP.



Capa do Livro

Fig 3 capa da primeira edição do "Opticks"

Sua crença na natureza corpuscular da luz já aparece no seu primeiro postulado ao definir raio de luz:

Por raios de luz entendo as partes mínimas da luz e as que tanto são sucessivas nas mesmas linhas como simultâneas em várias linhas.

*E assim ele justifica a idéia de "partes mínimas da luz"*

"Pois é evidente que a luz consiste em partes, tanto sucessivas como contemporâneas, porque no mesmo lugar podemos deter a que chega em dado momento e deixar passar a que chega imediatamente depois; e ao mesmo tempo podemos detê-la em qualquer lugar e deixá-la passar em qualquer outro. Pois a parte da luz que foi detida não pode ser a mesma que deixemos passar. Denomino raio de luz a menor luz ou a menor parte da luz que pode ser detida isoladamente, sem o restante da luz, ou propagada sozinha, ou fazer ou sofrer qualquer coisa sozinha, que o restante da luz não faz ou não sofre".

Newton se interessou pela óptica muito cedo. Publicou seu primeiro trabalho em óptica aos 29 anos. Preocupou-se com o fenômeno das cores. Esse fenômeno, melhor entendido a partir da decomposição da luz em diversas cores ao passar por um prisma, já fora detalhadamente descrito por ele aos 23 anos, em 1666. No seu livro "Óptica" Newton afirma, como exposto acima, que "é evidente que a luz consiste em partes" e se utiliza de termos como "corpos minúsculos" e "partículas de luz".

Muitos físicos, de valor excepcional, se opuseram à teoria de Newton. Dentre eles, Robert Hooke e Christiaan Huyghens. A idéia dominante era a de que a luz era a pressão ou o movimento de alguma perturbação que atravessa um determinado meio.

Huygens, que era contemporâneo de Newton elaborou uma teoria diferente. Em seu livro "Traité de La Lumière", publicado em 1690, ele defende a idéia de que a luz seria constituída por pulsos que se propagam num determinado meio. Essa é a idéia associada a uma onda. Assim, Huygens propunha que a luz tivesse um caráter ondulatório.

Num primeiro momento a teoria corpuscular da luz ganhou força (durante o século XVIII). Para isso, naturalmente, muito contribuiu a imagem de Newton como um dos grandes gênios da humanidade, reputação essa angariada com as suas leis do movimento e a teoria da gravitação.

No início do século XIX a situação se invertera. A partir daí teoria ondulatória da luz ganhou força. Isso ocorreu porque no início dos anos 1800 as experiências de fendas duplas, de Young e Fresnel, demonstravam claramente a natureza ondulatória da luz. Isto é, quando a luz depois de passar por duas fendas, exibia no anteparo, colocado á frente das fendas, um padrão de interferência típico de ondas. Ou seja, a superposição de ondas oriundas de cada uma das aberturas exibia máximos (interferência construtiva) e mínimos (interferência destrutiva) de intensidade.

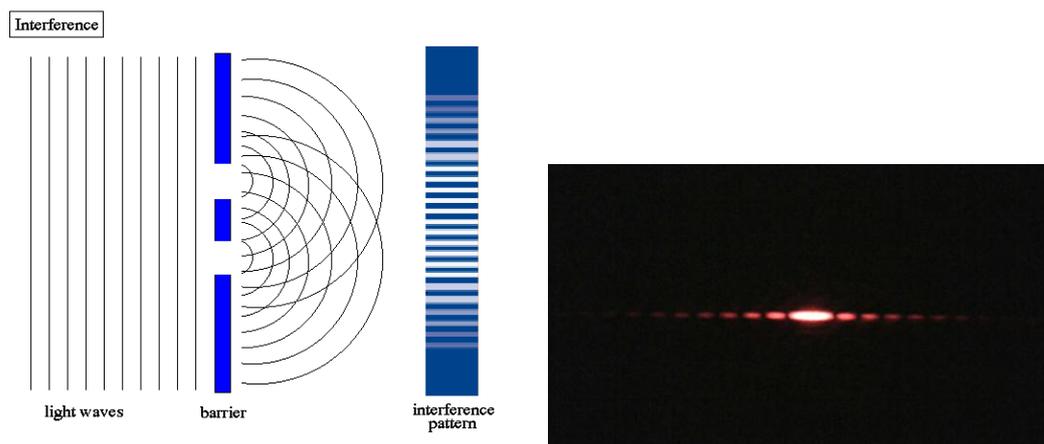


Fig 4 Interferência e difração: fenômenos tipicamente ondulatórios

A teoria de Newton sofreu um grande abalo com os trabalhos de Young e Fresnel a respeito do fenômeno da interferência da luz. A teoria de Newton não é compatível com esse fenômeno. Assim, a partir dos trabalhos de Young e Fresnel, a teoria de Newton caiu no esquecimento.

## ***A Teoria de Maxwell: Luz como ondas eletromagnéticas***

*A idéia da luz como ondas recebeu um impulso ainda maior com a formulação das leis do eletromagnetismo proposta por Maxwell. Isso ocorreu por volta do ano de 1870. De acordo com a teoria de Maxwell, campos elétricos e magnéticos podem se propagar como ondas. Nessa nova teoria, a luz seria apenas uma parte do espectro das ondas eletromagnéticas. A teoria de Maxwell era capaz de explicar todos os fenômenos ópticos até então conhecidos. Desde as leis da reflexão, da refração, até os fenômenos da difração e interferência da luz.*

*A teoria do eletromagnetismo prevê ainda que uma carga elétrica em movimento acelerado produz radiação eletromagnética. Ou seja, ela explica o mecanismo de produção das ondas eletromagnéticas.*

*As ondas eletromagnéticas previstas por Maxwell foram observadas, pela primeira vez, por Heinrich Hertz. Suas aplicações cresceram, a partir daí, numa velocidade vertiginosa. É a base para as telecomunicações nos dias de hoje.*

*As ondas harmônicas, isto é ondas cujo perfil pode ser descrito por uma função trigonométrica do tipo seno, têm frequência e comprimento de onda bem definidas. Em princípio, uma onda eletromagnética plana do tipo harmônica pode ter qualquer frequência. Ao conjunto de todas as frequências damos o nome de espectro eletromagnético.*

*É usual classificar as ondas eletromagnéticas harmônicas em classes. Isso é feito levando-se em conta a característica da onda denominada frequência ( $\nu$ ), ou, equivalentemente, seu comprimento de onda ( $\lambda$ ). Lembrando que no caso das ondas eletromagnéticas a relação entre ambas é:*

$$\nu\lambda = c$$

*Onde  $c$  é a velocidade da luz no meio, aqui considerado como sendo o vácuo.*

*A classificação em classes leva em conta certos intervalos da frequência. Adotaremos um agrupamento das ondas eletromagnéticas em sete grandes categorias, ou classes: Raios Gama, Raios-X, Radiação Ultravioleta, Luz, Radiação infravermelha, Micro ondas e Ondas de Rádio. Essa divisão está ilustrada na figura (figX-1). Nela, as ondas eletromagnéticas estão classificadas de acordo com o comprimento de ondas. O mesmo pode ser feito em relação à frequência.*

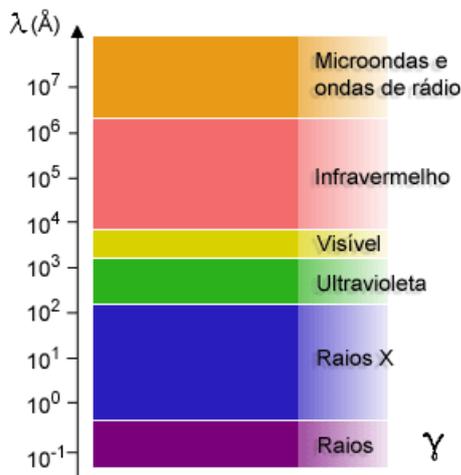


fig 6 As seis classes do espectro eletromagnético.

Em algumas dessas classes podemos instituir subdivisões. Por exemplo, as ondas de rádio comportam 8 subdivisões.

É importante ressaltar que os intervalos de frequência associados à divisão dos espectro eletromagnético, não devem ser tomados com muita rigidez. Por exemplo, a sensibilidade das pessoas em relação à faixa do espectro eletromagnético associado à luz difere de indivíduo para indivíduo. Em alguns casos, como as faixas associadas aos raios-x e os raios gama, existe uma superposição das faixas dos espectros.

Para cada comprimento de onda (ou frequência) corresponde luz de uma determinada cor. As cores que podemos enxergar são as do arco-íris que são distribuídas em sete faixas: vermelha, laranja, amarela, verde, ciano (anil), azul e violeta.

### Bandas do espectro visível

Região	$\lambda$ (nm = $10^{-9}$ m)	f (THz)
Vermelha	700 a 620	430 a 484
Laranja	620 a 590	484 a 508
Amarela	590 a 560	508 a 536
Verde	560 a 500	536 a 600
Ciano (anil)	500 a 480	600 a 625
Azul	480 a 440	625 a 682
Violeta	440 a 400	682 a 750

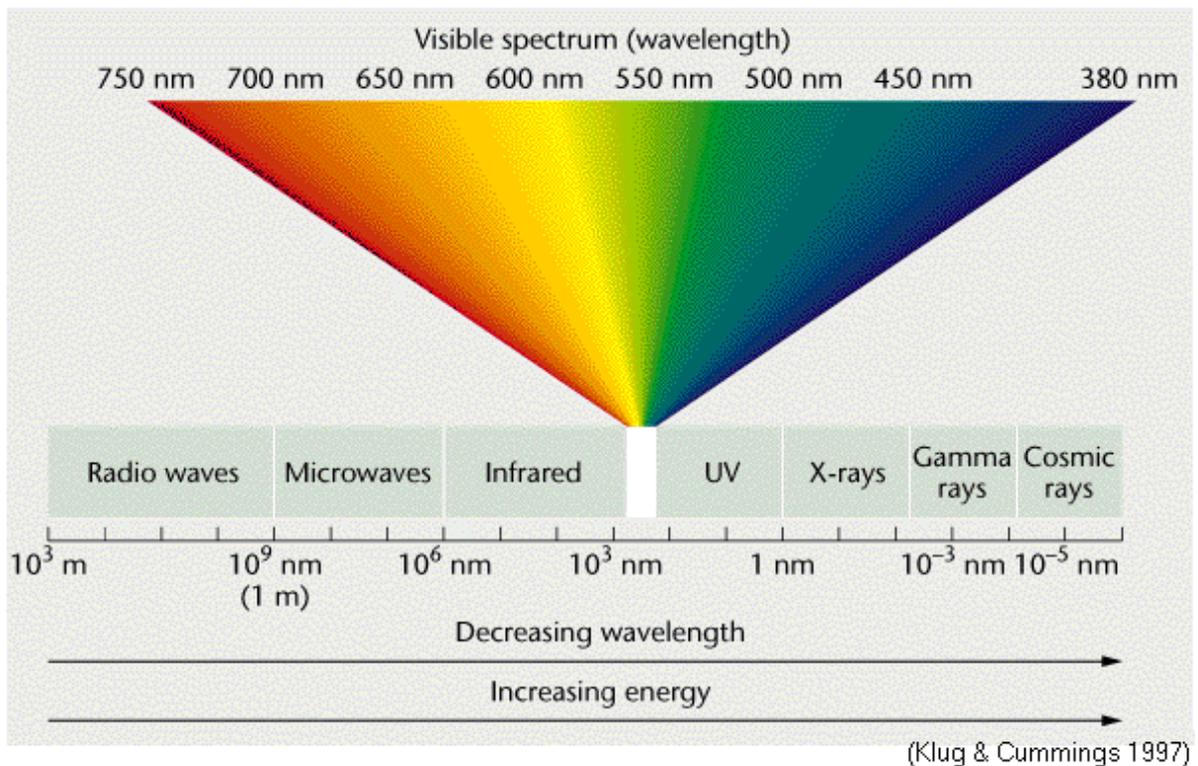


Fig 7 O espectro visível e suas várias cores

### A TEORIA CORPUSCULAR É RETOMADA

A teoria ondulatória parecia ter se consolidado como a única teoria aceita para explicar os fenômenos associados à luz, quando Einstein, em 1905, deu outra reviravolta na teoria. Einstein sugeriu que para se explicar o fenômeno conhecido como efeito fotoelétrico (no qual elétrons são arrancados de uma superfície metálica pela mera incidência de luz) devemos recorrer à teoria corpuscular da luz. Esses corpúsculos são conhecidos hoje como fótons.

Podemos associar uma energia às ondas eletromagnéticas. Tal energia é, basicamente a energia dos fótons que compõem a radiação. Quando utilizamos essa terceira classificação, definimos a energia da radiação eletromagnética como o produto

$$E = h\nu$$

Onde  $h$  é a constante de Planck. A tabela (000) apresenta as classes e subclasses do espectro eletromagnético de acordo com a o comprimento de onda, da frequência e da energia da mesma .

O efeito fotoelétrico pode ser resumido assim:

Podemos arrancar elétrons de uma placa se fizermos incidir luz sobre ela. Essa é a origem do nome "fotoelétrico". Sabemos que, para arrancar um elétron, devemos despende uma quantidade de energia, pois os elétrons estão presos (ligados) à placa.

Se a luz não fosse constituída por corpúsculos, haveria a necessidade de um intervalo de tempo entre a luz incidir e o elétron sair. Isso porque se acreditava na necessidade de o elétron acumular energia vinda da radiação luminosa. Ademais, qualquer onda eletromagnética serviria (radiação de qualquer comprimento de onda). Algumas ondas seriam apenas mais eficientes do que outras. Isto é, arrancariam os elétrons dispendendo tempo menor do que outras.

Duas surpresas ocorreram. A primeira é a de que só radiação com uma frequência acima de um certo valor podia arrancar elétrons. E a segunda é a de que, para essa radiação, não havia a necessidade de se esperar nada. Einstein então, em 1905, interpretou, corretamente, que o efeito fotoelétrico com essas características só poderia ser explicado se a luz fosse composta por partículas (denominadas por ele de quanta de luz), denominadas hoje de fótons. Os fótons observados deram razão a Einstein. Desde então as evidências têm-se acumulado em favor da teoria corpuscular da luz, que é a teoria vigente.

A confirmação inequívoca de que a luz exibe a natureza corpuscular veio com a descoberta, em 1923, do efeito Compton (em homenagem ao seu descobridor, Arthur Compton). Nesse efeito, o fóton exibe um comportamento típico de bola de bilhar. Isto é, a colisão entre o fóton e um elétron obedece às regras de colisão entre partículas.

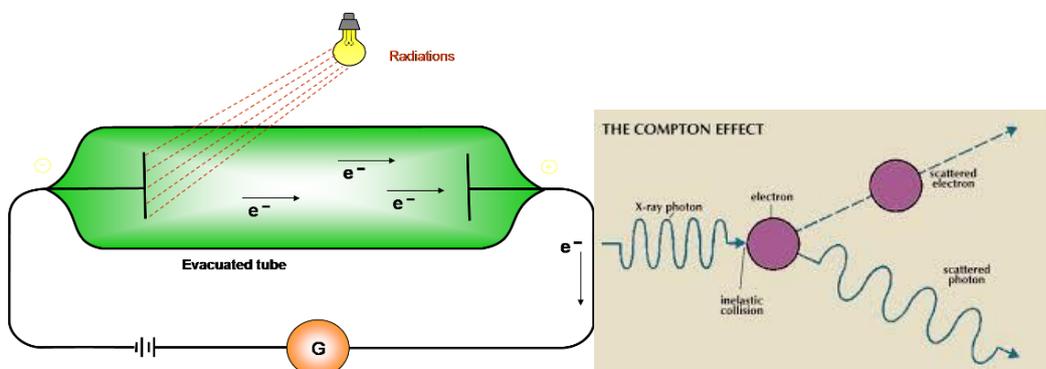


Fig 8 Dois efeitos que revolucionaram nosso entendimento sobre a luz.

## **ONDAS OU PARTÍCULAS?**

*Afinal, a luz tem uma natureza ondulatória, ou uma natureza corpuscular?*

*Na realidade, a luz exhibe as duas naturezas. Denomina-se a isso de natureza dualística. Por isso entendemos que ela pode, em função do aparato utilizado na observação, exhibir uma ou outra característica. Os fótons em alguns fenômenos exibem mais claramente a natureza ondulatória (como na interferência de Young) e em outros se torna mais evidente a natureza de partícula (como no efeito fotoelétrico).*

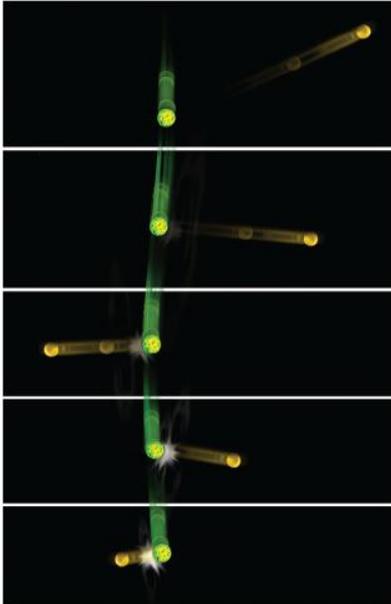
*Os fótons são afinal, como todas as partículas. Os elétrons, por exemplo, exibem a mesma natureza dualística: onda e partícula. Hoje, com o dualismo onda-matéria podemos conciliar a idéia de Newton com os resultados de Young e de Fresnel. Apesar dessas características serem excludentes, elas são de fato complementares.*

*A teoria que leva em conta a natureza dualística da radiação é a teoria denominada eletrodinâmica quântica.*

## **Produção de ondas eletromagnéticas**

*No nível clássico, ondas eletromagnéticas são produzidas quando do movimento de cargas elétricas, desde que tais movimentos sejam acelerados.*

*Por outro lado, a melhor concepção a respeito da produção de ondas eletromagnéticas vem da teoria quântica. Nesta teoria, fótons são emitidos quando uma partícula dotada de carga elétrica em movimento interage com outras dotadas do mesmo atributo. A cada interação (caracterizada pela alteração da quantidade de movimento) a partícula emite um fóton. Muitas interações levam à produção de uma profusão de fótons (vide figura 9). Os fótons compõem a radiação eletromagnética.*



*Fig. 4.15. Emissão de radiação por elétrons em movimento. A radiação captada numa antena de rádio resultou de muitos elétrons e muitas etapas.*

Fig 9

Uma antena de rádio ou TV tem a função de produzir ondas eletromagnéticas. Nela, elétrons se movimentam num movimento oscilatório, um movimento de vai e vem, ao longo da antena. Mediante tais movimentos de elétrons geramos a partir de uma antena condutora, as ondas de radio, TV e aquelas captadas pelos nossos celulares.

## **EMISSÃO ESPONTANEA**

Átomos e núcleos emitem radiação eletromagnética. Só átomos emitem luz. Ou seja, emitem radiação eletromagnética na região do visível. O espectro de emissão de átomos é um espectro discreto. Ou seja, aparece como riscos de determinadas cores. O átomo exibe um conjunto de níveis de energia. O espectro do átomo de Hidrogênio visível é apresentado na figura 10.

A transição de um nível de energia para outro é acompanhada da emissão de um fóton. Uma emissão definida como espontânea.

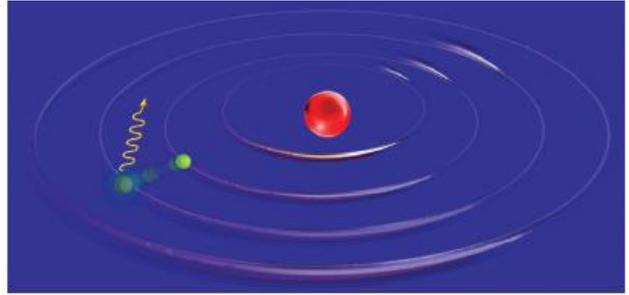
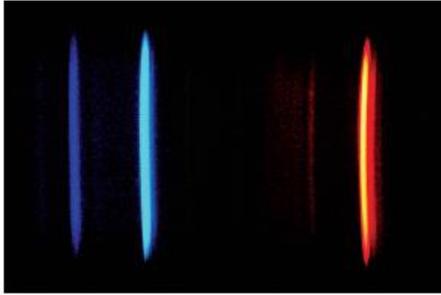


Fig. 19.8. O espectro do átomo de hidrogênio resulta das transições, entre níveis discretos, efetuadas pelo elétron. Ao fazer a transição existe a emissão de fótons que constituem a radiação eletromagnética.

Fig10

Um átomo pode emitir luz ao fazer transições entre níveis de energia os quais são característicos de cada átomo. Si o átomo estiver num estado excitado, de energia  $E_j$  e sofrer uma transição para um estado com energia  $E_k$  essa diferença de energia será convertida em energia, a energia de um fóton. Sendo o fóton caracterizado por uma energia  $h\nu$ , então a frequência do fóton será dada por

$$h\nu = E_j - E_k$$

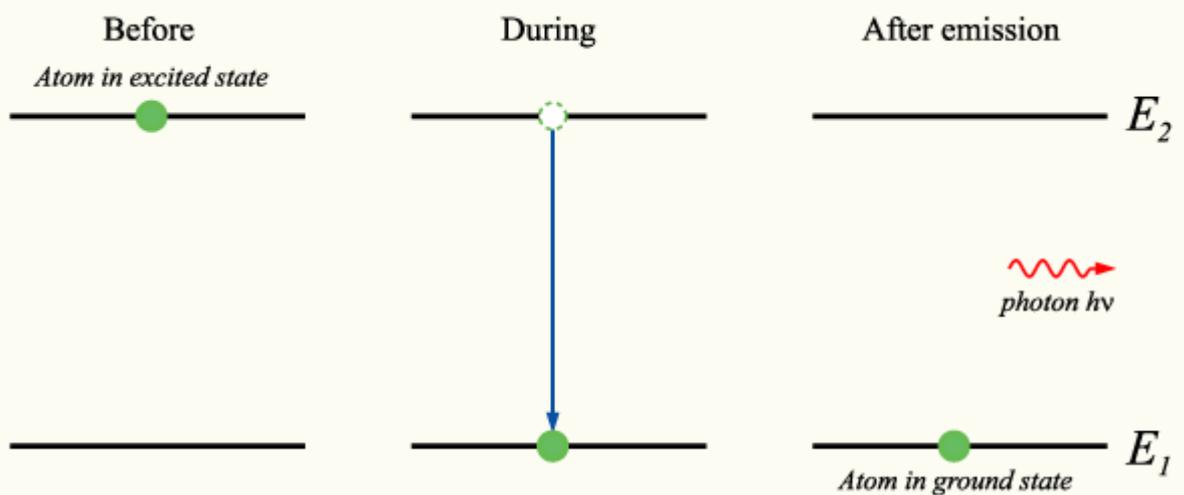


fig 11 esquema da emissão espontânea.

Nem todos os átomos pertencentes a um determinado nível de energia emitem fótons simultaneamente. A cada instante de tempo o número de fótons num determinado nível de

energia decresce exponencialmente. E esse decréscimo depende de que tipo de transição estivermos considerando. Assim, se  $N$  for o número de átomos num determinado estado excitado (nível 2) então, para a ocorrência de emissão espontânea associada à transição para um segundo nível (o nível 1), o número de átomos no estado excitado decrescerá exponencialmente, isto é:

$$N(t) = N(0)e^{-\frac{t}{\tau_{21}}}$$

Onde  $N(t)$  é o número de átomos no instante de tempo  $t$  e  $N(0)$  é o número de átomos no instante inicial (definido arbitrariamente). A constante  $\tau_{12}$  é a vida média de uma particular transição. A transição do nível 2 para o nível 1. A vida média dá uma idéia do tempo médio de permanência de um elétron num determinado nível.

Para que os átomos emitam luz existe a necessidade de excitá-los. Isto é, precisamos fazer com que os elétrons populem os níveis de energia mais altos. A Tendência dos átomos é a de procurarem níveis de energia mais estáveis. Isso se dá de uma forma espontânea com os elétrons fazendo transições para níveis de energia mais baixas. No processo de transição entre diferentes níveis os átomos emitem luz.

## FONTES DE LUZ

A luz provém de corpos os mais variados em tamanho e forma, os quais designamos, genericamente, **fontes de luz**. Alguns desses corpos geram luz (às vezes dizemos que têm luz própria), e por isso são denominados fontes primárias de luz. Aqueles que apenas retransmitem a luz que recebem são denominados fontes secundárias de luz.

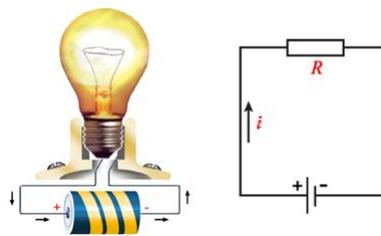


Fig 12 O sol (assim como uma lâmpada) é uma fonte primária. Planetas como Vênus, Marte, e Júpiter, são fontes secundárias, assim como como a Lua.

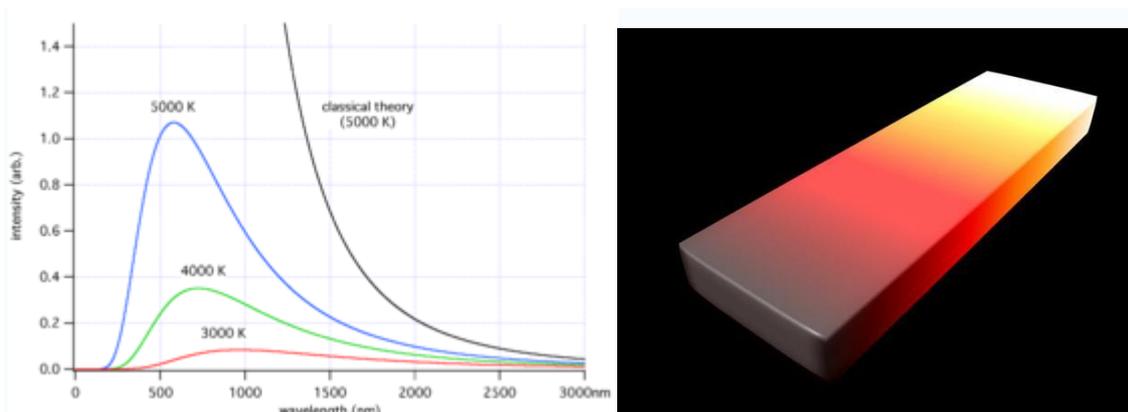
## FONTES TÉRMICAS

Qualquer porção de matéria aquecida a uma determinada temperatura emite radiação eletromagnética. Trataremos a emissão como aquela proveniente de um corpo negro (um corpo que absorve toda radiação que incide sobre ele) quando aquecido. Por isso tal radiação é conhecida como radiação de corpo negro. O espectro da radiação emitida por um corpo depende da sua temperatura. Em particular, o pico da intensidade da radiação (quando ela é máxima) ocorre para um comprimento de onda que depende linearmente do inverso da temperatura. O corpo humano, por exemplo, mantido a  $37^{\circ} K$  emite radiação. O pico do espectro de corpos frios, como o corpo humano, se situa numa frequência típica da região do infravermelho. Não vemos, assim, a radiação emitida. À medida que a temperatura de um corpo frio vai aumentando, o pico vai se deslocando na direção daquela correspondente à radiação visível. Por isso um metal aquecido começa avermelhado e, à medida que o aquecemos, vai se tornando esbranquiçado.

Pode-se determinar a temperatura de um objeto detectando-se a radiação de corpo negro que ele emite (Termômetros infravermelhos).

O Sol, cuja temperatura na superfície é de cerca de  $6000^{\circ} K$  emite radiação cujo pico está na região do visível. Essa radiação é aquilo que percebemos como a luz proveniente do Sol. A luz que observamos como chamas e que resulta do processo de queima de objetos sólidos, é outro exemplo de radiação que tem um comportamento bem descrito pela radiação de corpo negro. Numa lâmpada elétrica o filamento de tungstênio é aquecido a altíssimas temperaturas pela passagem de uma corrente elétrica e emite radiação. Nesse último caso, apenas 10% da energia emitida está compreendida no espectro visível. O restante cai na região do infravermelho.

Assim, objetos aquecidos a temperaturas suficientemente altas se transformam em fontes primárias de luz.



**Fig 13 Radiação de corpo negro** À medida em que a temperatura aumenta, o intensidade máxima se desloca na direção de comprimentos de onda cada vez menores.

A explicação para a dependência da intensidade da radiação como função do comprimento de onda, não faz uso do mecanismo da produção da radiação. Tudo que a teoria requer é a idéia de que o “corpo negro” contém quantidades de energia que aparecem quantizadas. Ou seja, cujas energias são dadas como múltiplos de uma energia elementar (o quantum da energia):

$$E_n = n(h\nu)$$

Como se vê, o quantum da energia da radiação é a energia de um fóton.

Em resumo, a teoria de Planck analisa as propriedades termodinâmicas de fótons submetidos a um banho térmico.

## FONTES NÃO TÉRMICAS

Nem todas as fontes primárias de luz estão a altas temperaturas. Por exemplo, uma lâmpada de néon não é tão quente quanto uma lâmpada que contém, em seu interior, um filamento incandescente (as lâmpadas comuns).

A razão pela qual podemos ter fontes não térmicas é que átomos emitem luz. Eles emitem luz apenas em algumas frequências ditas características. Na figura 10 apresentamos o espectro de emissão do hidrogênio na região da luz visível. São as linhas de emissão do hidrogênio.

Para o entendimento das fontes não térmicas devemos fazer uso do processo de produção de radiação num átomo. Ou seja, devemos recorrer à emissão espontânea.

Por exemplo, a emissão espontânea é o mecanismo responsável pela produção de luz por parte de algumas lâmpadas. Nessas lâmpadas ocorre a passagem de uma corrente elétrica através de um recipiente contendo gás (lâmpadas de Mercúrio e de néon, por exemplo). A passagem da corrente é responsável pela excitação dos átomos do gás fazendo com que um número apreciável deles tenham elétrons ocupando os níveis de energia mais altos. Podem também ser ionizados. Ao retornarem aos estados antes da excitação os átomos emitem fótons. Esses fótons compõem a luz.

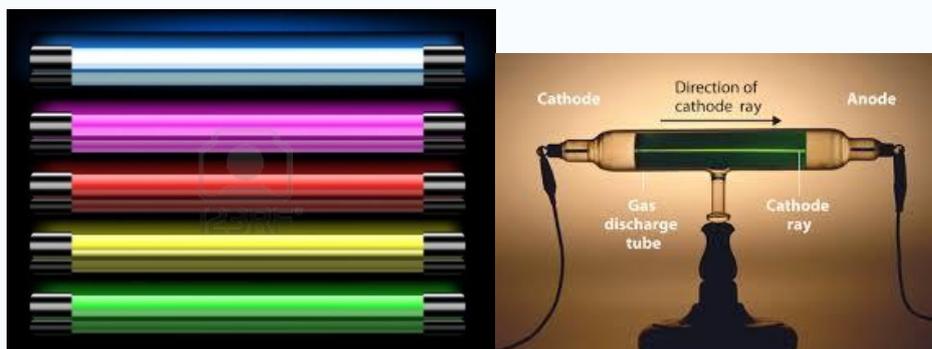


Fig 14 Lâmpadas de neon: luz emitida por átomos constituindo gases.

O processo de emissão de luz por átomos tanto pode ser espontâneo (como nas lâmpadas de néon) quanto estimulado (como no caso da luz laser). No caso de emissão estimulada, a matéria é perturbada de tal maneira a que o fóton não seja absorvido e que, além

disso, do processo físico resulte um segundo fóton igual em tudo ao primeiro. É uma espécie de amplificação óptica. A emissão espontânea é a base dos lasers e masers.

Muitos outros processos físicos podem ser responsáveis pela produção de luz. Por exemplo, partículas aceleradas emitem radiação eletromagnética. Em particular, se são acelerados em um acelerador circular. A produção de radiação eletromagnéticas mantendo os elétrons em órbita circular é de grande interesse na pesquisa científica. Tal radiação é conhecida como radiação sincrotrônica.

Certos produtos químicos, quando colocados em contato para reagir, podem produzir luz visível por um processo conhecido como quimioluminescência. A base desse processo, pode ser resumida assim : Se dois reagentes A e B participam de uma reação, pode ocorrer como resultado o surgimento de um estado excitado o qual decai levando a um produto final da reação, acompanhado da produção de luz. Não ocorre, necessariamente, produção de calor no processo. Essa é a fonte de luz de alguns bastões coloridos utilizados pela polícia, à noite, para sinalização.

Seres vivos também produzem luz. O exemplo mais notório é aquele dos vagalumes. Vagalumes são capazes de produzir uma luz fria com um comprimento de onda entre 520 e 680 nanômetros. Este processo é conhecido como bioluminescência.

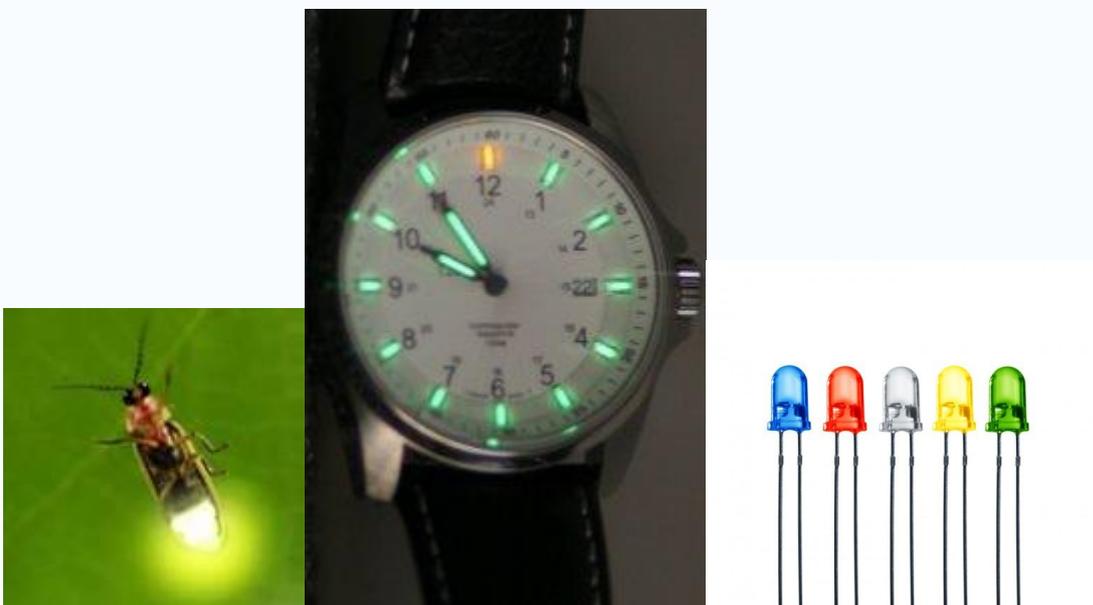


Fig 15 Bioluminescência e fosforescência e as lâmpadas LED. Diferentes mecanismos para a geração de luz.

Algumas substâncias se tornam fontes de luz quando sobre elas incide radiação eletromagnética com frequências superiores àquelas correspondentes à região do visível. Nesse caso ocorre que a substância absorve um fóton emitindo, posteriormente, outro fóton de

uma frequência menor do que a do fóton absorvido. Tal processo é conhecido como *Fluorescência* (e a luz é denominada de luz fluorescente).

Outras substâncias são capazes de emitir luz quando há incidência de radiação de energia mais alta (*fosforescência*) ou partículas, como elétrons, incidindo sobre elas (*Catodoluminescência*). Esse é o princípio de funcionamento de um tubo de televisão. Nesse caso, um feixe de elétrons incide sobre um material luminescente conhecido como *fósforo*.

As lâmpadas de LED (*Diodo Emissor de Luz*) têm se tornado muito populares. Trata-se de diodo semicondutor (*junção P-N*) que quando energizado emite luz. Ou seja, emite radiação eletromagnética na região do visível.

A relação aqui apresentada não esgota todos os processos físicos de produção de luz. De fato, existem outros mecanismos para a produção de luz e que não serão tratados aqui.

## A VELOCIDADE DA LUZ

A luz ao incidir sobre um determinado meio tende a se propagar através dele. A velocidade com que a luz se propaga depende do meio material. Assim é que na água a luz se propaga a uma velocidade menor do que no ar.

A velocidade máxima de propagação da luz ocorre num meio do qual extraímos toda a matéria. Tal meio é o que denominamos de *vácuo*. Por exemplo, podemos considerar o meio entre a Terra e o Sol, ou entre a Terra e as estrelas como sendo o *vácuo*.

A relação entre a velocidade da luz num determinado meio e a velocidade da luz no *vácuo* é dada por:

$$V = nC$$

Onde *c* é a velocidade da luz no *vácuo* e *n* é o *índice de refração* do meio. Após a teoria de Maxwell, podemos relacionar *n* com a propriedades eletromagnéticas do meio.

Qual é o valor da velocidade da luz? Muitos, como Descartes e Kepler acreditavam que a velocidade da luz seria infinita. A suspeita de que a luz teria uma velocidade finita começou com Galileu. Em 1638 Galileu propôs uma experiência para tirar essa dúvida. Sugeriu que se poderia medir a velocidade da luz descobrindo uma lanterna e observando-se o atraso com que a luz chegasse a alguém muito distante da mesma. Para lanternas distantes de 2 quilômetros não foi possível decidir sobre a velocidade da luz através de experiências levadas a efeito em 1667. Isso porque não foi possível observar qualquer atraso da luz utilizando os meios disponíveis àquela época.

Ole Römer (1644-1710) foi o primeiro a verificar que a velocidade da luz é finita e sugeriu uma forma de determinar a velocidade da luz através da medida do intervalo entre eclipses da "lua" Io de Júpiter. Io, se move praticamente no mesmo plano que o planeta Júpiter se move em torno do Sol. Assim o interesse de Romer era determinar o intervalo de tempo entre a entrada de Io na região de sombra de Júpiter e a o instante em que ele saia dessa região de sombra.

Romer observou, usando um telescópio, que quando a terra está mais próxima de Júpiter, o intervalo de tempo, necessário para a lua de Júpiter passar por trás do mesmo era de 42,5 horas. Observou no entanto que esse intervalo de tempo aumentava à medida que a terra se afastava de Júpiter. Isso foi corretamente interpretado por ele como sendo devido ao tempo extra necessário para a luz cobrir uma distância extra, distância essa associada ao afastamento dos planetas. Com base nessas observações Romer conclui que a velocidade da luz seria de  $2,310^8 \text{ m/s}$ .

Hoje sabemos que a velocidade da luz ( $c$ ) no vácuo é:

$$c = 299.792.458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

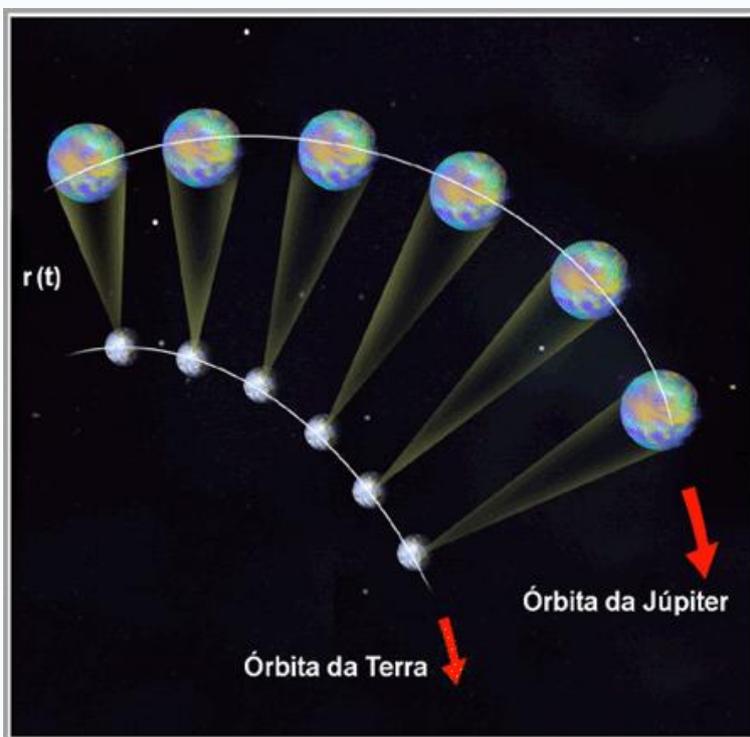


Fig 16 O método experimental utilizado por Romer.

## **A VELOCIDADE DA LUZ E A TEORIA DA RELATIVIDADE**

*A velocidade da luz tem um papel central no desenvolvimento da teoria da relatividade de Einstein. Seu comportamento é assaz surpreendente. Tem a mesma velocidade independentemente do estado de movimento do observador. Ao que se saiba esse é um caso único. E isso se torna verdade se, de fato, o fóton for a única partícula acessível (do ponto de vista experimental) dotada de massa zero.*

*Para entendermos seu papel na formulação da teoria da relatividade especial, imaginemos dois sistemas de referência (podemos imaginar dois sistemas de referência como sendo duas naves espaciais). Consideremos agora esses referenciais (as duas naves espaciais) em movimento relativo. Um determinado fenômeno pode ser investigado através de medidas realizadas pelos observadores localizados em cada um dos referenciais.*

*O resultado das medidas levadas a efeito em referenciais diferentes (em cada uma das naves) permite-nos classificar as grandezas físicas em duas grandes categorias. As grandezas absolutas são aquelas para as quais as medidas levam sempre ao mesmo resultado (ao mesmo valor), independentemente dos referenciais. As grandezas relativas são aquelas, como o nome indica, que dependem do sistema de referência. O tempo, por exemplo, é absoluto? Isto é, intervalos de tempo dependem do referencial escolhido? Astronautas em naves diferentes registram intervalos de tempo iguais para um mesmo evento? Até o trabalho de Einstein o tempo era tido como absoluto, conforme propusera Newton.*

*A questão central da teoria da relatividade pode ser concentrada em três indagações: Que grandezas físicas têm um caráter absoluto? Como se relacionam as diversas grandezas físicas relativas (as coordenadas e o tempo de ocorrência de um evento, por exemplo) medidas em cada um dos sistemas de referências? Como se escrevem as equações nos diversos referenciais? Einstein procurou dar respostas a estas questões a partir do que teria, na sua concepção, um caráter absoluto. Sugeriu que a velocidade da luz e a forma das equações teriam um caráter absoluto. Sua teoria tem como base para sua formulação esses dois pressupostos (ou postulados).*

*Na teoria da relatividade restrita, o objetivo de Einstein era o de descrever os fenômenos analisados a partir de sistemas de referência, que se movem com velocidade constante e em linha reta, um em relação ao outro. O fato de a velocidade destes ser constante, e o movimento retilíneo, fazia com que a sua teoria da relatividade fosse mais restrita (donde o nome). Dez anos depois Einstein elaborou uma teoria mais geral (sua Teoria Geral da Relatividade).*

*No primeiro postulado, sobre a constância da velocidade da luz, Einstein revela sua genialidade. Pois se tratava de algo completamente inusitado e pouco intuitivo. Como se sabe hoje, em matéria de velocidade, isto se aplica apenas à velocidade da luz. Conferiu à velocidade da luz, e não ao tempo, um caráter absoluto.*

*O fato é que a teoria da relatividade de Einstein leva à ideia de que a velocidade da luz é a velocidade máxima de um objeto. Fato esse que ainda não foi desmentido pelas muitas experiências.*

## INTERAÇÃO DA LUZ COM A MATÉRIA

Muitos são os fenômenos decorrentes da interação da luz com a matéria. A refração e a reflexão são exemplos simples de tais fenômenos. A fluorescência e a emissão por átomos, ambos já descritos, se constituem em outros exemplos. A seguir enumeraremos outros deles.

A interação da luz com a matéria, especialmente com átomos e moléculas,

### Absorção

É o fenômeno mediante o qual parte da luz ou, um caso mais raro, toda ela é absorvida pela matéria.

Plantas e animais absorvem a luz de alguns comprimentos de onda da luz branca, que é, a rigor, uma combinação, uma somatória, de ondas eletromagnéticas das mais diversas frequências. Ao fazê-lo, o objeto iluminado apresenta-se colorido.

### Dispersão

É um fenômeno cuja descoberta remonta aos tempos de Newton. Em última análise, a decomposição da luz branca em seus componentes de várias cores resulta do fato de que o índice de refração depende da frequência da luz (ou do seu comprimento de onda). Assim, ao incidir na superfície de um prisma cada cor sofrerá, de acordo com a lei da refração, um desvio diferente. Haverá portanto uma separação das cores.

### Espalhamento

A luz pode ser espalhada ao incidir na matéria. O exemplo mais corriqueiro de tal fenômeno é a cor azulada do céu ou o avermelhado do por do Sol. Sem o espalhamento da luz proveniente do Sol veríamos um céu escuro com uma região muito iluminada na direção do Sol.

Existem dois tipos de espalhamento de luz: O espalhamento Thomson e espalhamento Rayleigh. No primeiro caso a luz branca é difundida (espalhada pela matéria) como luz branca. O segundo tipo de espalhamento é aquele que dá a cor azul do céu.

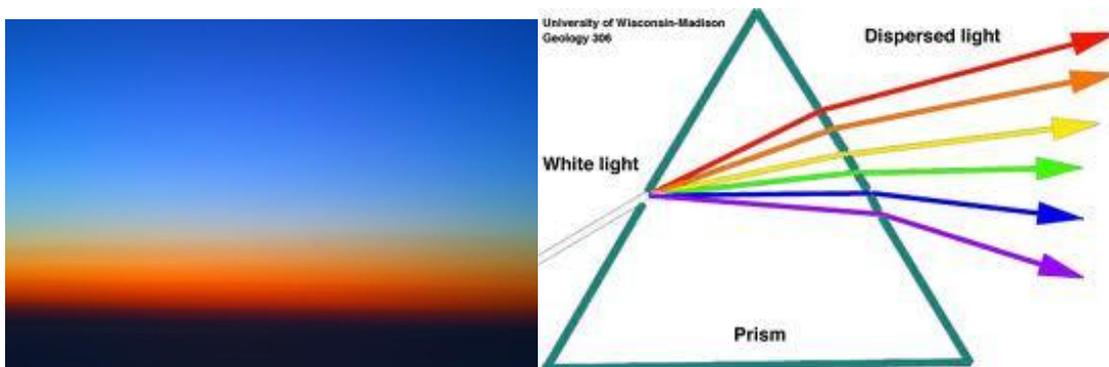


Fig espalhamento e dispersão da luz.