

## Capítulo 2: Fótons

### Introdução

De acordo com as teorias modernas versando sobre a origem e a evolução do Universo, ele teria se iniciado sob a forma de uma sopa, a sopa cósmica, contendo cerca de 60 partículas elementares. É bom lembrar que as partículas elementares são os constituintes últimos da matéria. São objetos indivisíveis (seriam os átomos no sentido dos atomistas gregos) e que participam da composição de todas as coisas. Na figura 1 apresentamos os constituintes últimos da matéria, da radiação e de tudo que se conhece no Universo.

A tabela das partículas elementares é organizada em três seções principais. A primeira seção, com fundo marrom, mostra os quarks e seus antipartículas: Up (u), Antiup (ū), Down (d), Antidown (d̄), Charm (c), Anticharm (c̄), Strange (s), Antistrange (s̄), Top (t), Antitop (t̄), Bottom (b) e Antibottom (b̄). A segunda seção, com fundo azul, mostra as partículas Z, W, W+, Glúons e o Fóton. A terceira seção, com fundo verde, mostra os léptons e seus neutrinos: Elétron (e), Póstron (ē), Neutrino do elétron (ν<sub>e</sub>), Antineutrino do elétron (ν̄<sub>e</sub>), Múon positivo (μ<sup>+</sup>), Múon negativo (μ<sup>-</sup>), Neutrino do múon (ν<sub>μ</sub>), Antineutrino do múon (ν̄<sub>μ</sub>), Tau positivo (τ<sup>+</sup>), Tau negativo (τ<sup>-</sup>), Neutrino do tau (ν<sub>τ</sub>) e Antineutrino do tau (ν̄<sub>τ</sub>).

Fig. 8.15. Tabela das Partículas Elementares.

Assim, a tabela 1 indica que, como previra Einstein, o fóton existe e é um dos tijolinhos básicos a partir dos quais todas as coisas são feitas. Em particular, toda radiação eletromagnética é composta por fótons.

Alguns fótons existem desde a origem do universo. Ou seja, fótons estavam entre os constituintes da sopa cósmica a qual deu origem ao Universo. Eles se constituem hoje naquilo que denominamos **radiação cósmica de fundo**. Assim, sabemos hoje não só que os fótons existem mas que sabemos também que eles estão em todos os recantos do Universo. E em todas as suas regiões com praticamente a mesma abundância. Eles são muito numerosos no Universo. Excedem em muito as demais partículas como prótons e elétrons. Por exemplo, em relação ao número de prótons podemos escrever:

$$\frac{n_\gamma}{n_p} \cong 10^9$$

Onde  $n_\gamma$  é o número médio de fótons num determinado elemento de volume, enquanto que  $n_p$  é o número médio de prótons (bárions para ser mais preciso) considerando-se o mesmo elemento de volume.

Assim, considerando-se apenas os fótons primordiais, remanescentes da sopa cósmica primeva, para cada próton no universo existe pelo menos 1 bilhão de fótons no mesmo. Assim, quando falamos dos fótons estamos falando não de um ou dois, mas de bilhões e bilhões.

Se os fótons são tão numerosos, por que não sentimos os seus efeitos? Podemos analisar tanto os fótons fósseis existentes no Universo, como os fótons que compõem a luz que vem do Sol, por exemplo.

No caso da radiação cósmica de fundo, eles passam despercebidos por conta do fato de que a temperatura associada a essa radiação é de cerca de  $2,7^{\circ} K$ . Ou seja, a intensidade máxima da radiação ocorre para uma frequência de aproximadamente 160 GHz sendo portanto mais baixa do que aquelas associada à luz (situa-se na região das micro-ondas). Portanto, não temos como ver a radiação cósmica de fundo.

De qualquer forma, o fato é que o nosso organismo não tem como identificar fótons isolados. Isso por que temos melhor sensibilidade para percebermos efeitos associados à presença de um grande número de fótons. Por exemplo, só podemos ver se tivermos luz à nossa disposição. Mas a luz é composta por um número muito elevado de Fótons. Além disso, temos sensibilidade para perceber só aqueles com energia compreendida entre dois valores do espectro (associados ao violeta e ao vermelho). O fato é que o nosso organismo é bastante insensível aos efeitos decorrentes da incidência de um número pequeno de fótons desde que eles tenham energias dentro do espectro visível. Por exemplo, para que tenhamos a percepção das cores dos objetos, necessário se faz a incidência de algumas centenas de fótons na retina dos nossos olhos.

Fótons com energia muito alta (ou radiação com frequência alta) provocam danos aos seres humanos. Esse é o caso dos raios- $\gamma$  (ou radiação  $\gamma$ ), e dependendo da dose, dos raios-x.

## ATRIBUTO DOS FÓTONS

O fóton é uma partícula que é, em muitos aspectos, muito diferente das demais. Para entendermos isso vamos analisar alguns de seus atributos.

### O fóton não tem massa

Suspeitamos hoje que essa seja a única partícula elementar sem massa e encontrada livre no Universo. Os glúons, partículas que também não têm massa. No entanto eles não podem ser encontrados livres viajando pelo espaço. Na linguagem científica dizemos que os glúons não têm liberdade. Vivem eternamente confinados.

Apesar de não terem massa os fótons têm energia. Isso porque se um fóton tem uma certa quantidade de movimento ( $p$ ). Sendo assim sua energia, de acordo com a Teoria da Relatividade de Einstein, é dada por:

$$E = h\nu = pc$$

onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e  $\nu$  é a frequência associada ao fóton.

Partículas sem massa, quando livres, se deslocam sempre com a velocidade da luz e têm sempre uma relação entre energia e momento dada pela expressão acima.

### O Fóton não tem carga elétrica

Partículas destituídas de carga elétrica são denominadas “partículas neutras”. O fóton é uma partícula neutra. Como consequência desse fato ele não se deixa influenciar, através de forças, por campos elétricos e magnéticos. Isto é, não é possível alterar a trajetória de um fóton aplicando a ele campos eletromagnéticos.

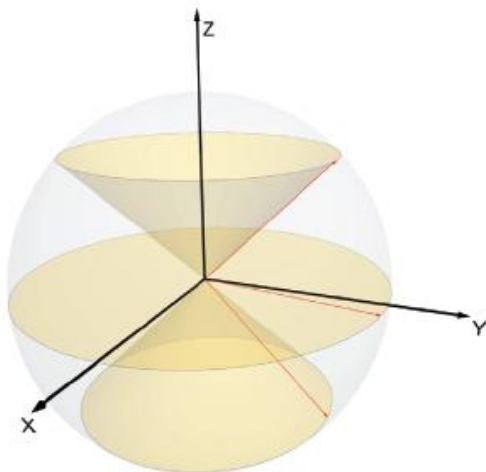
### O Fóton tem spin 1

O que é o spin de uma partícula? O spin é uma propriedade intrínseca da mesma. Assim como sua massa e sua carga. Dizemos que o spin é um número quântico das partículas.

Não se pode explicar a origem do spin das partículas. Sabemos apenas que as partículas fundamentais observadas se dividem em duas categorias: Férmions e Bósons. Os Férmions são partículas de spin semi-inteiro ( $1/2$ , por exemplo) enquanto que os Bósons têm spin inteiro. O fóton é um bóson.

Para se descrever o spin de uma partícula devemos ampliar o número de graus de liberdade do campo utilizado para descrevê-lo. Por isso dizemos que o spin é um grau de liberdade interno.

A principal consequência da existência do spin do fóton é que a luz da qual ele é o constituinte pode exibir uma propriedade conhecida como polarização da luz.



Todas as partículas dotadas de carga têm também outro atributo denominado spin. Partículas neutras, como os fótons, também são dotadas do mesmo atributo. A única partícula destituída desse atributo tem o nome de partícula Higgs. É uma exceção à regra.

Até o ponto que sabemos, é impossível explicar o que é o spin de uma partícula. Isso porque o spin é uma grandeza física sem um correspondente clássico. Como no caso das massas, não temos uma explicação para o spin das diversas partículas elementares. Sabemos apenas como determinar o spin de uma partícula. Mas, neste caso, não se trata de fazer comparações.

O spin de uma partícula é uma grandeza física fundamental. Isto é, o spin, como a carga e a massa, não deriva de outras grandezas físicas.

Com o intuito de entendermos o que é o spin, recorremos a uma imagem clássica. Consideremos um corpo rígido, como por exemplo, um pião. Quando em rotação um corpo rígido tem um determinado momento angular, uma grandeza física que depende da massa, da forma do corpo rígido, bem como da sua velocidade de rotação (velocidade angular).

O spin é uma propriedade das partículas elementares que em muito se assemelha ao momento angular. No entanto, essa analogia peca pela imprecisão, uma vez que uma partícula elementar não pode ser pensada como um corpo rígido, pois que ela não é composta por outras que giram.

O curioso a respeito dessa grandeza física é que ela é uma grandeza quantizada. Assim o quadrado do módulo desse vetor e a sua componente ao longo de um eixo z só podem assumir valores discretos dados por:

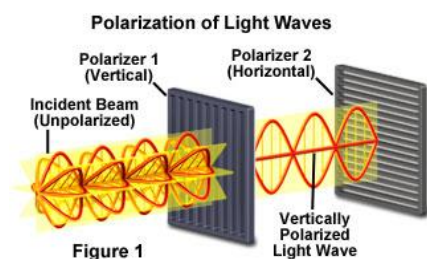
$$\vec{S}^2 = \hbar^2 s(s+1) \tag{2.12}$$

O número quântico s acima, é um número inteiro e é denominado de número quântico de spin. É uma constante fundamental da teoria quântica. A letra h representa uma constante fundamental da física denominada constante de Planck, em homenagem a seu proponente, o físico Max Planck.

Numa linguagem mais simples podemos dizer que o momento angular de spin só pode estar contido em certos cones no espaço (vide figura). A projeção desse vetor no eixo z só pode assumir valores inteiros e múltiplos da constante de Planck. Ou seja:

$$S_z = \hbar m$$

Sendo uma partícula de massa zero, o fóton tem apenas dois valores de m. Ou seja,  $m = \pm 1$ .



**[M1] Comentário:** Professor, aqui você se refere à algumas das imagens abaixo (2.16, 2.17 e 2.18)?  
2.18

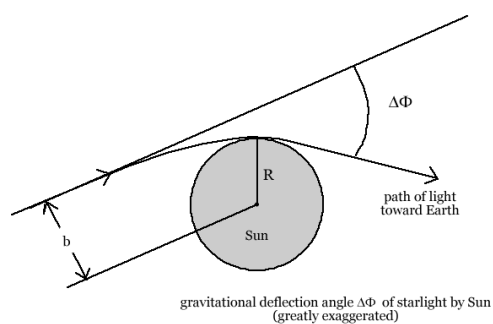
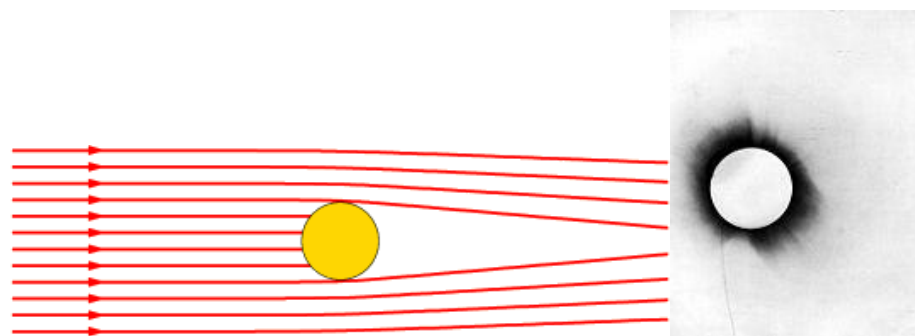
Figura da polarização da luz

## O FÓTON SE PROPAGA EM LINHA RETA?

Outra consequência do fato de que o fóton não tem massa é que ele não interage gravitacionalmente e, portanto, deveria passar próximo dos corpos massivos sem se desviar. Assim a luz proveniente das estrelas deveria passar perto do sol sem qualquer desvio. Isto é, em linha reta.

Quando o fóton viaja sem interação, quer seja eletromagneticamente ou gravitacionalmente, pode-se prever que o fóton não se desvia do seu caminho enquanto viaja. Ele deve, portanto, propagar-se em linha reta. Como a luz é composta por fótons, podemos agora afirmar que **a luz se propaga em linha reta**. Este é, na verdade, um dos princípios básicos da óptica geométrica.

A idéia de que o fóton, ou luz não sofre desvios ao passar próximo de outros objetos não é, rigorosamente, verdadeiro. Isso só vale como uma aproximação. Essa é uma outra descoberta que devemos a Einstein. Hoje sabemos que a luz ao passar próxima de um objeto que tem uma certa massa acaba se desviando um pouco. O desvio é uma previsão da Teoria da Relatividade Geral de Einstein. Para objetos no cotidiano ele é tão diminuto que não teríamos sequer como detectar um tal desvio.



## A velocidade do fóton é a velocidade limite

Essa propriedade é outra consequência da Teoria da Relatividade Especial de Einstein. O fato de a velocidade da luz ser a velocidade limite significa que não existe na natureza nenhum objeto cuja velocidade exceda a velocidade da luz.

Será isso verdade? Não temos razão para suspeitar da Teoria. Até hoje, não se detectou (ou se encontrou) uma partícula mais veloz do que o fóton. Admite-se, de acordo com Einstein, apenas um empate. O fóton viaja mais rápido do que qualquer outra partícula. Só outras partículas sem massa (como, se supunha até há algum tempo atrás, o neutrino) têm velocidades iguais, em módulo, à do fóton.

A velocidade de qualquer fóton (não importa sua energia) é aproximadamente (utiliza-se para a velocidade da luz o símbolo  $c$ )

$$c = 299,792,458 \text{ m/s} .$$

O fato dessa ser a maior velocidade no Universo, leva-nos à constatação de que essa é a velocidade máxima que temos à nossa disposição para enviar (ou receber) informações. Isso tem consequências muito profundas. Se você quiser enviar uma mensagem até a estrela mais próxima (Alfa de Centauro), o tempo mínimo para o envio da mensagem e o recebimento da resposta é de 8,6 anos. Para as estrelas mais longínquas seria de milhões ou bilhões de anos (nesse caso é melhor esquecer a mensagem). De qualquer forma, isso é apenas para lembrar que, ao receber a luz de uma estrela aqui na Terra hoje, essa luz foi produzida (na estrela) há muitos anos atrás. Hoje, provavelmente a estrela até mesmo já tenha se apagado e, com certeza, não está exatamente no ponto em que parece estar, pois durante o tempo da viagem a estrela se movimentou.

Outra consequência de que a luz, ou fótons, terem a máxima velocidade no Universo é que a nossa vista alcança apenas uma parte do Universo. Esse problema é conhecido como o problema do Horizonte. Com isso queremos dizer o seguinte: se o Universo existe há  $\tau$  anos, então não temos como obter informações sobre regiões do universo cuja raio  $h$  seja acima do valor dado por:

$$h = c\tau$$

Onde  $h$  é o tamanho do nosso horizonte.

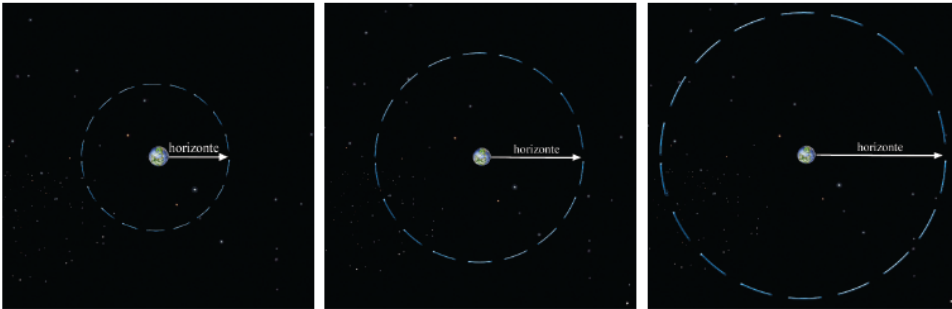
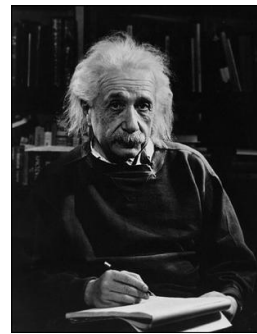


Fig. 12.13. Só temos informação sobre o que acontece numa região do espaço compreendida dentro de uma esfera de raio igual à distância do horizonte. Essa distância cresce a cada dia.

E se, por acaso, existirem partículas mais velozes do que o fóton? Bem, nesse caso, teríamos um meio mais eficiente de comunicação, é claro. E a teoria de Einstein teria que ser modificada. Tais partículas (conhecidas como *tachyons*) têm sido conjecturadas mas sua existência carece de amparo do ponto de vista experimental.



### A velocidade do fóton é absoluta

Estamos agora diante de outra coisa surpreendente a respeito dessas partículas.

Para entendermos isso, consideremos as partículas ordinárias, ou melhor, um grande número delas. Consideremos uma bola (sim, uma bola grande). Digamos que essa bola deslize num vagão de um trem a uma velocidade de 20 km por hora na mesma direção do deslocamento do trem que tem uma velocidade de 80 km.

Qual a velocidade da bola para quem está fora, parado, olhando o trem passar? A resposta é a adição de velocidades

$$V_{\text{fora}} = V_{\text{trem}} + V_{\text{bola}}$$

Temos, portanto, que a velocidade da bola fora do trem é de 100 km, pois devemos somar as duas velocidades.

Agora vamos fazer a mesma experiência com os fótons. Vamos substituir a bola pelos fótons. Qual é a velocidade dos fótons? Seria correto afirmar que

$$V_{\text{fora}} = V_{\text{trem}} + V_{\text{fóton}}?$$

A resposta é não. A velocidade dos fótons fora do trem é a mesma que dentro do trem:

$$v_{\text{fora}} = v_{\text{fóton}} !$$

Einstein sabe-se lá como, intuiu que para os fótons (na verdade ele se referia à luz) é diferente. Para ele a velocidade da luz é absoluta. Isto é, não depende do sistema de referência. Isto vale apenas para sistemas de referências ditos inerciais. Isto é, sistemas que se desloquem, uns em relação aos outros com com velocidade constante.



Fig. 12.14. A velocidade da bola será diferente para cada um dos dois observadores. Nesse caso a velocidade é relativa.

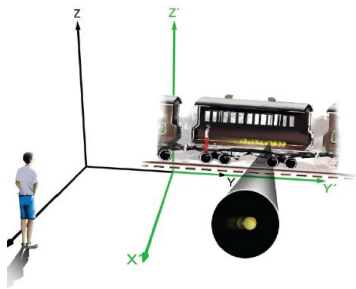


Fig. 12.16. A velocidade do fóton é igual, independentemente do observador. Sua velocidade é absoluta.

## COLISÕES DE FÓTONS

Os fótons colidem e interagem de uma maneira análoga às demais partículas. É isso que, afinal, é isso que justifica classificarmos os fótons como partículas elementares. Compton foi o primeiro a constatar isso analisando a colisão de um fóton com um elétron

Compton verificou que quando um feixe de raios-x incidia sobre a matéria, o comprimento de onda dos raios-x emergentes era maior do que aqueles incidentes. Compton verificou que se tratarmos os raios-x como compostos de partículas, pode prever que a diferença dos comprimentos de onda seria dado, em função o ângulo, pela expressão.

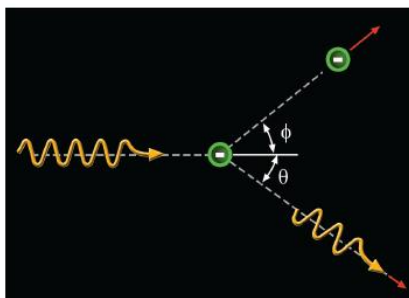
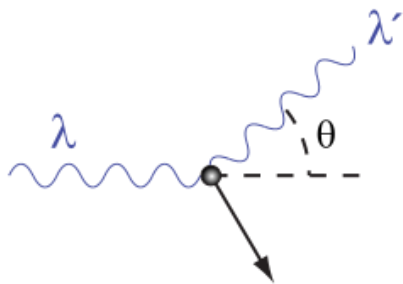


Fig. 12.18. A dependência da frequência da radiação espalhada com o ângulo reflete a natureza corpuscular da luz.



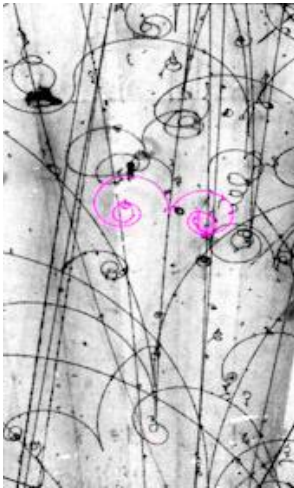
$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

E isso era o que se verifica experimentalmente. Compton ganhou o prêmio Nobel de Física, em 1927, por essa descoberta.

A colisão entre um fóton e outras partículas ocorre com muita frequência no nosso mundo físico. Para essas colisões valem as mesmas regras das colisões usuais, no sentido da conservação da energia e da quantidade do movimento.

Dependendo da energia do fóton e do sistema com o qual ele colide, podemos ter um número muito grande de possibilidades. Uma possibilidade é o fóton (ou os fótons) ser absorvido no processo de colisão. Nesse caso, sua energia e quantidade de movimento são integralmente transferidas para outra partícula. Eventualmente, essa partícula pode emitir (posteriormente) outro fóton. Esse posteriormente significa um intervalo de tempo muito curto. Nesse caso dizemos que houve uma colisão elástica.

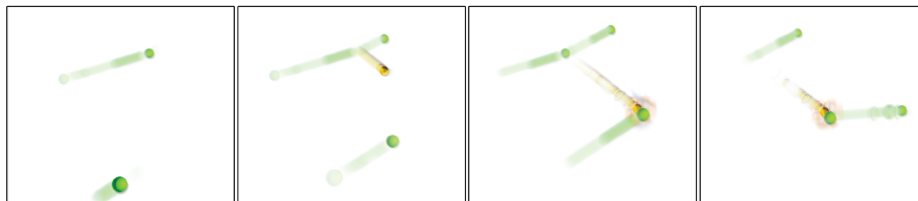
Se o fóton tiver uma energia muito alta, outra série de coisas pode acontecer. Por exemplo, se o fóton tiver uma energia maior do que duas vezes a energia de repouso do elétron ( ) o fóton pode desaparecer e produzir duas partículas (o elétron e a sua antipartícula, o pósitron). A esse processo damos o nome de produção de pares.



Finalmente, um fóton muito energético pode produzir um par de elétrons.

## OS FÓTONS E AS INTERAÇÕES ELETROMAGNETICAS

Apesar de sofrerem forças do tipo previsto pelo eletromagnetismo clássico, os fótons participam da interação eletromagnética (sendo os mediadores dessa interação). Na realidade, a interação eletromagnética ocorre como resultado da troca de fótons. Eis aí o que aprendemos nos últimos anos sobre as interações eletromagnéticas.



*Fig. 12.21. A interação eletromagnética ocorre mediante a troca de fótons entre as partículas dotadas de carga elétrica. É uma transformação em duas etapas.*

Imagine uma interação eletromagnética qualquer como, por exemplo, o afastamento de partículas portando cargas de sinais opostos. Ela ocorre, a interação entre as duas cargas, mediante a troca de fótons.

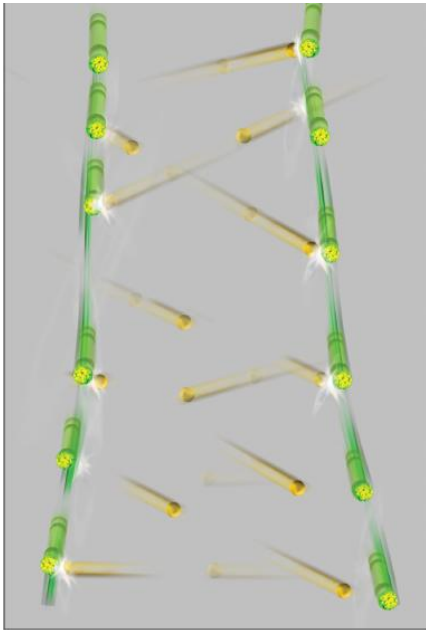
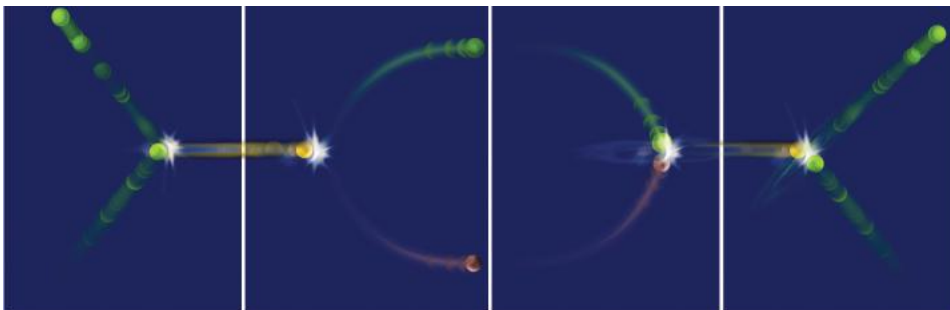
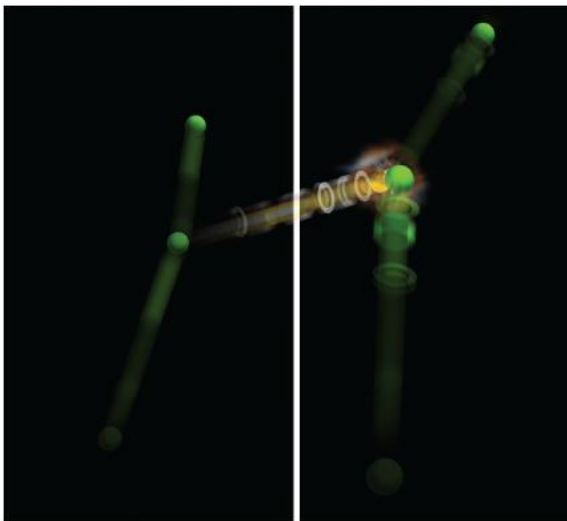


Fig Forças elétricas resultam da intensa troca de fótons entre duas partículas dotadas de carga elétrica.

São quatro as interações eletromagnéticas básicas do eletromagnetismo.



Consideremos a interação mais simples possível, aquela ocorrendo entre dois elétrons . Estamos agora falando do espalhamento Compton no qual o elétron inicial encontra-se inicialmente em movimento. Na primeira etapa uma partícula (um dos prótons), portanto uma carga positiva, produz um fóton (começou o processo de interação). Ao produzir esse fóton a partícula muda de direção (uma vez que o fóton carrega uma parte da quantidade de movimento do próton). Na segunda etapa, o outro próton absorve esse fóton, com o impacto ele também muda de direção. O resultado é aquele da figura abaixo. Hoje em dia imaginamos todas as interações fundamentais como resultante da troca de partículas elementares. Isto faz com que haja sempre um agente (no caso do eletromagnetismo, o fóton) mediador da interação. Os agentes mediadores são sempre partículas elementares. Assim, as partículas que interagem entre si nunca se tocam. A ação se dá à distância. Às partículas que fazem essa intermediação damos o nome de bósons intermediários. O fóton é o bóson intermediário das interações eletromagnéticas.



*Fig. 4.12. Espalhamento elástico de partículas em duas etapas. Emissão de um fóton seguida da absorção desse fóton por outra partícula. O resultado é uma interação entre elas.*

## **PARTICULAS E CAMPOS: O CAMPO ELETROMAGNÉTICO**

Um dos conceitos mais importantes na física, e essencial no eletromagnetismo, bem como na descrição das partículas elementares, é o conceito de campo. A idéia básica por trás desse conceito é a de que a interação entre as partículas se dá através

do campo produzido pelas demais partículas. Mais precisamente a força entre duas partículas resulta de um atributo da partícula (sua carga, massa, etc.) o qual é sensível ao campo produzido pela outra. Trata-se antes de tudo de uma forma de visualizar a interação,

A uma dada partícula associamos um campo.. Assim, a forma moderna de descrever as interações entre as partículas é por meio da associação:

$$\boxed{\text{CAMPO} \Leftrightarrow \text{PARTÍCULA}}$$

Para cada partícula está associado um tipo de campo. Às vezes um campo descreve mais de uma partícula. Como incorporar a idéia de quantificação das partículas? A idéia é a de quantizar o campo. Nessa descrição as partículas são os quanta do campo.

Consideremos as interações eletromagnéticas. Sabemos que, objetos dotados de carga elétrica se atraem ou se repelem, devido às forças eletromagnéticas. De onde surge a interação eletromagnética? Ela surge da troca, entre os objetos, dessas diminutas partículas conhecidas como fótons.

A presença de um grande número de fótons numa certa região do espaço muda as propriedades do mesmo. Dizemos que existe um campo eletromagnético naquela região. Se temos muitos fótons dizemos que temos ali um campo eletromagnético clássico. O campo agora passa a descrever uma propriedade do espaço no qual temos uma quantidade de fótons .

$$\boxed{\text{CAMPO ELETROMAGNÉTICO CLÁSSICO} \Leftrightarrow \text{MUITOS FÓTONS}}$$

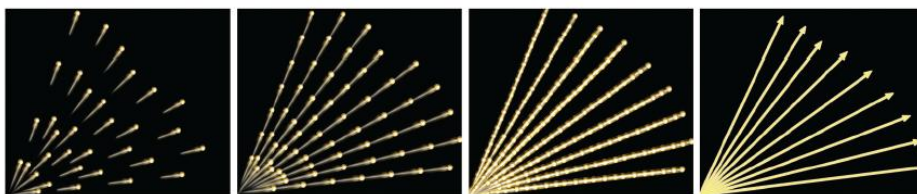


Fig. 12.23. Quando o número de fótons tende ao infinito, descrevemos as propriedades do sistema utilizando o campo clássico.

#### ALTERAR FIGURA

O campo tem, portanto, um sentido duplo na física das partículas elementares. De um lado ele é um ente quântico, útil para descrever uma partícula (que é um quantum do campo) e de outro lado, ele é um ente clássico. Nesse último caso ele serve para descrever a alteração das propriedades do espaço quando nele se aglomeram um grande número de partículas.

## Carga Elétrica, Potencial, energia potencial e forças.

Ao campo produzido por cargas elétrica em repouso damos o nome de potencial escalar (representado por  $V(x,y,z)$ ). Quando cargas elétricas estão em movimento elas produzem, além do campo escalar, um campo vetorial (representado por  $\vec{A}(x,y,z)$ ) ao qual damos o nome de potencial vetor.

Esses dois campos são denominados potenciais. Os Campos eletromagnéticos fundamentais são portanto, esses dois:

$$A_{\mu}(x,y,z) \equiv (V(x,y,z), \vec{A}(x,y,z))$$

A presença de uma partícula carregada, de carga Q. numa região do espaço contendo muitos fótons sofrerá a ação desses fótons. Sabemos que ela experimentará a ação de uma força. Utilizamos essa força como uma medida da intensidade do campo. Assim, medimos o campo, medindo a força que os fótons naquela região exercem sobre as partículas colocadas nessa região.

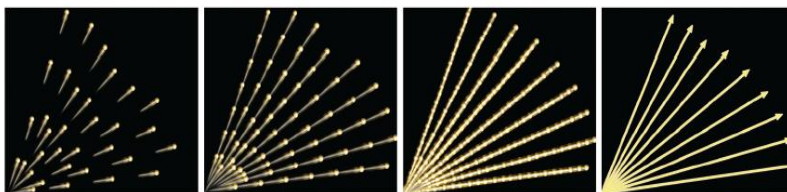


Fig. 12.23. Quando o número de fótons tende ao infinito, descrevemos as propriedades do sistema utilizando o campo clássico.

Visão da força em termos de interações com os fótons gerados pela outra partícula.

[Alterar figura](#)

A força experimentada pela partícula é conhecida como força de Lorentz. Sua expressão é:

$$\vec{F} = Q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Onde os campos  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  são campos derivados dos potenciais. Ou seja:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad \vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$$

## Radiação Eletromagnética e Calor

Um sistema macroscópico, ou seja, uma grande quantidade de matéria (um sistema contando um número muito grande de átomos e moléculas) pode absorver fótons provenientes de uma fonte externa a ele. Pode no entanto, em função das circunstâncias, emitir fótons que serão absorvidos (no todo ou em parte) por outro sistema que com ele interage.

Definimos **calor absorvido** pelo sistema como sendo igual à energia da radiação absorvida (a soma das energias dos fótons absorvidos). Definimos, por outro lado, **calor cedido** por um sistema físico como sendo igual à soma das energias dos fótons emitidos. Um sistema pode, dependendo das circunstâncias, tanto absorver quanto ceder calor. Ou seja, ganhar ou perder energia sob a forma de radiação.

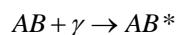
Em qualquer dos casos, sua energia interna se altera. Ela aumenta no caso da absorção de fótons pelo sistema. Ela se reduz se houver a emissão de fótons.

## Reações Químicas Induzidas pela absorção de fótons

Como toda interação eletromagnética é mediada por fótons, todas as reações químicas são tais a absorverem fótons, ou produzirem fótons.

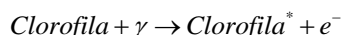
Na área conhecida como fotoquímica estuda-se o papel da absorção de fótons nas reações químicas. Iniciemos a análise pelo estudo da absorção de um fóton por uma molécula composta por elementos A e B, a substância  $AB$ .

A absorção de um fóton leva a um estado excitado  $AB^*$ . Escrevemos assim:



São quatro os possíveis destinos do estado excitado  $AB^*$ .

Um exemplo de absorção de fótons, e essencial para a vida, é



A clorofila é apenas um elemento no arranjo de molécula que, em última análise, faz uso da energia dos elétrons assim produzidos, via absorção de fótons, para criar a energia celular necessária para a síntese de ATP.

1-No primeiro destino, o sistema faz uma transição para um estado excitado  $AB^\#$ . O fóton absorvido é utilizado para prover um rearranjo interno da molécula.

2-No segundo, o estado excitado decai emitindo um fóton. Trata-se do decaimento radioativo. A molécula retorna ao estado original

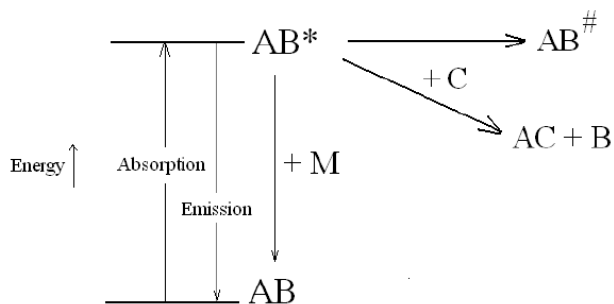


Figure 2. The possible fates of an excited state AB\*.

3- No terceiro a molécula excitada perde sua energia como resultado da colisão com outras moléculas. Ao final, a molécula retorna ao seu estado inicial.

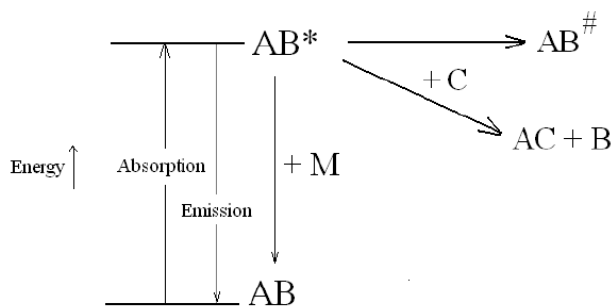
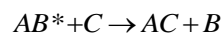
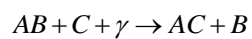


Figure 2. The possible fates of an excited state AB\*.

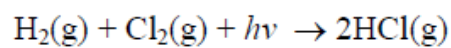
4-Finalmente, a molécula excitada pode reagir com uma terceira molécula, a molécula C, de acordo com a seguinte reação química:



Cujo resultado, pode ser escrito assim:



Por exemplo, a reação de gases de hidrogênio com o cloro pode ser iniciada por meio do uso de luz na região do violeta:





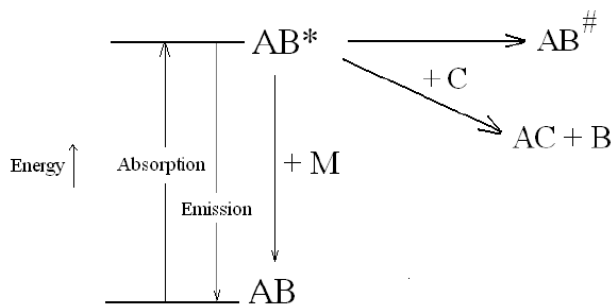


Figure 2. The possible fates of an excited state  $AB^*$ .

### Refazer essa figura

Uma reação típica, na qual fótons são liberados em profusão, são as reações de combustão. A grande maioria

### Reações Químicas podem produzir fótons

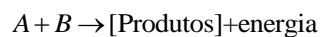
Nas reações exotermicas, o resultado final da reação leva à produção de fótons. Uma coleção de fótons gera calor. Tais reações podem ser escritas, no nível mais fundamental possível, sob a forma:



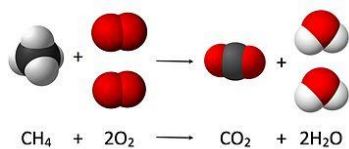
Usualmente, escrevemos, quando tais reação resultam na produção de luz:



Ou, mais comumente:



As reações de combustão são aquelas que geram um grande número de fótons na região do visível. Ou seja, geram luz.



Combustão do gás metano

