ESCOLA BÁSICA E SECUNDÁRIA DA CALHETA

Física e Química A – 11.º Ano

Resumo F2.3

Domínio 2: Ondas e eletromagnetismo / 2.3: Ondas e eletromagnetismo

- **2.3.1. Espetro eletromagnético**
- **2.3.2. Reflexão, transmissão e absorção da radiação**
- **2.3.3. Reflexão**
- **2.3.4. Refração da luz**
- **2.3.5. A reflexão total**
- **2.3.6. Difração**

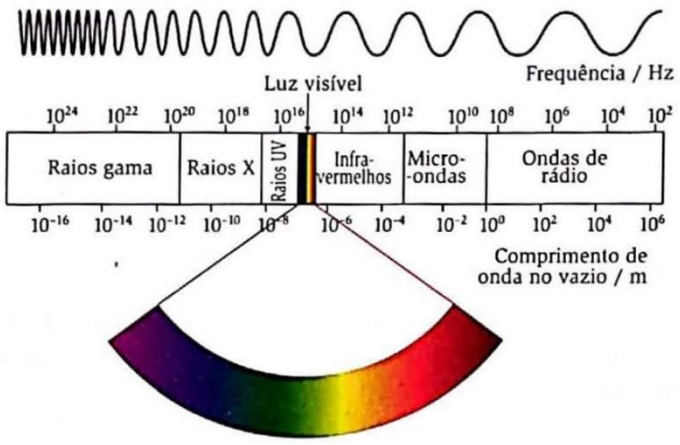
I ESPETRO ELETROMAGNÉTICO

Depois de conhecida a relação entre campos magnéticos e campos elétricos, surgiu a noção de que estes campos se propagavam na forma de ondas eletromagnéticas. Foi **Maxwell** (1831-1879) que, no final do século XIX, propôs a teoria do eletromagnetismo para descrever todos os fenómenos eletromagnéticos.

Onda eletromagnética – resulta da oscilação de uma carga elétrica que origina, no espaço à sua volta, um campo elétrico e um campo magnético variáveis. Estes campos variáveis propagam-se à velocidade máxima de $3{,}0 \times 10^{8}\ m\ s^{-1}$ e a frequência de oscilação da onda eletromagnética é igual à frequência de oscilação da carga elétrica.

Uma onda eletromagnética é uma onda transversal, pois a oscilação do campo elétrico e a oscilação do campo magnético são perpendiculares entre si, sendo também perpendiculares à direção de propagação da onda.

Espetro eletromagnético – conjunto de todas as ondas eletromagnéticas (radiações visíveis e não visíveis) ordenadas por ordem crescente ou decrescente de frequência de oscilação.



Heinrich Hertz (1857-1894) realizou a experiência que permitiu não só comprovar a teoria de Maxwell, mas também iniciar uma nova era para a comunicação a longas distâncias. Hertz conseguiu emitir e receber ondas eletromagnéticas de baixa frequência e elevado comprimento de onda (ondas rádio) através de uma montagem que consistia em:

- um circuito constituído por duas esferas separadas e ligadas a um gerador de elevada tensão (dispositivo emissor);
- um anel metálico aberto com esferas muito próximas nas extremidades (dispositivo recetor).



Experiência de Hertz.

Ao ligar o gerador ocorria uma faísca entre as duas esferas do emissor e, quase em simultâneo, ocorria uma faísca entre as esferas do anel metálico.

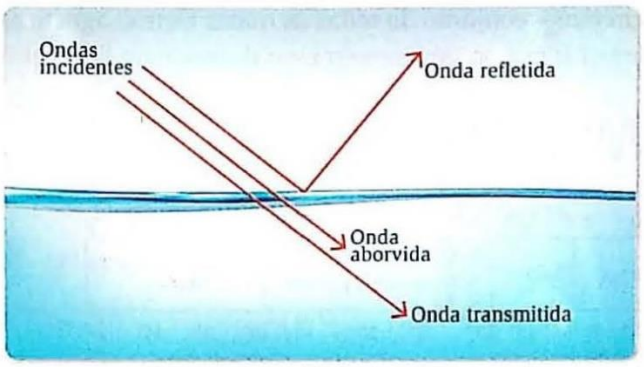
Hertz explicou que o campo eletromagnético produzido pela oscilação das cargas elétricas (faísca) se propagava através de ondas eletromagnéticas até ao anel metálico onde era criada corrente elétrica com a mesma frequência por indução eletromagnética.

REFLEXÃO, TRANSMISSÃO E ABSORÇÃO

As ondas eletromagnéticas interagem com a matéria. Nesta interação, podem ocorrem três fenómenos: absorção, reflexão e transmissão.

Estes três fenómenos podem ocorrer isoladamente ou em simultâneo quando sobre uma superfície incide radiação (ondas eletromagnéticas) de diferentes frequências.

- **Absorção** – as ondas eletromagnéticas transferem energia para a matéria fazendo aumentar a sua energia interna;
- **Reflexão** – as ondas eletromagnéticas não conseguem transferir energia para a matéria e a superfície da matéria reenvia as ondas para o meio inicial de propagação sofrendo uma alteração na direção de propagação;
- **Transmissão** – as ondas eletromagnéticas conseguem propagar-se através da matéria sem lhe transferir energia.



Um corpo que transmite uma onda eletromagnética diz-se que é **transparente** à frequência dessa onda. Um corpo que não transmite uma onda eletromagnética diz-se que é **opaco** à frequência dessa onda.

As parcelas de radiação que são refletidas, absorvidas e transmitidas dependem da frequência da onda eletromagnética, da inclinação relativamente à superfície de separação dos dois meios e do material de que os meios são constituídos.

Todavia, nesta divisão da radiação, há sempre conservação da energia.

$$E_{\text{incidente}} = E_{\text{absorvida}} + E_{\text{refletida}} + E_{\text{transmitida}}$$

Um exemplo desta conservação e repartição da energia é o que acontece à radiação solar que atinge as camadas mais altas da atmosfera.

O Sol emite ondas eletromagnéticas de quase todo o espetro eletromagnético, mas apenas uma parte dessas ondas consegue atingir a superfície terrestre, uma vez que a atmosfera terrestre funciona como filtro de parte dessas ondas e a própria superfície terrestre reflete algumas delas também.

Designa-se por **albedo** de um planeta a fração ou percentagem de radiação solar refletida por esse planeta. O albedo terrestre é 30%, o que significa que apenas 70% da radiação solar que incide na Terra interage com a atmosfera terrestre e com a sua superfície.

2 REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

Para estudar a interação da luz com a matéria, considera-se que a luz é constituída por raios de luz que se propagam paralelamente num meio uniforme.

REFLEXÃO DA LUZ

O fenómeno da reflexão é descrito por duas leis: as **leis da reflexão**.

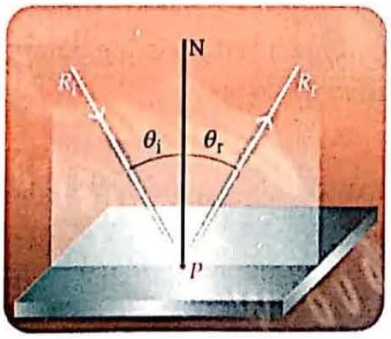
Leis da reflexão da luz

1.ª lei da reflexão

O raio incidente (R_i), a normal ao plano de incidência (N) e o raio refletido (R_r) estão no mesmo plano.

2.ª lei da reflexão

O ângulo de reflexão (θ_r) é igual ao ângulo de incidência (θ_i).



Reflexão de um feixe luminoso.

Quando ocorre a reflexão, a frequência da onda refletida é a mesma (depende da frequência da fonte emissora) e, como se propaga no mesmo meio, a sua velocidade de propagação mantém-se a mesma, bem como o comprimento de onda. Apenas a intensidade pode variar porque ocorre sempre alguma absorção na superfície de separação entre os dois meios.

É o fenómeno da reflexão da luz que permite que se vejam imagens em espelhos, a utilização de códigos de barras (as zonas brancas refletem mais do que as pretas, o que permite criar sequências de branco e preto que identificam o produto), o funcionamento dos radares para deteção de objetos (o radar envia um sinal eletromagnético que é refletido pelo objeto e reenviado para o radar, que determina a distância a que se encontra o objeto do radar) e muitas outras aplicações.

REFRAÇÃO DA LUZ

A onda eletromagnética, ao interagir com a matéria, pode ser transmitida, ou seja, pode entrar no novo meio material e continuar a propagar-se, mas algumas das suas propriedades sofrem alteração ao entrar num novo meio com características diferentes.

A **frequência da onda refratada** mantém-se, uma vez que apenas depende da frequência da fonte emissora mas, como se propaga num meio diferente, a sua velocidade de propagação altera-se, assim como o comprimento de onda.

A **intensidade da onda refratada** é sempre menor do que a intensidade da onda incidente, já que, em simultâneo com a refração, ocorrem também os fenómenos de reflexão e absorção. A fração de luz que é refratada depende de vário fatores: da frequência da onda incidente, do ângulo de incidência e das características dos dois meios materiais em causa.

Contudo, se as características do segundo meio são diferentes do primeiro, a onda eletromagnética sofre alterações na sua velocidade de propagação, o que se traduz num desvio na direção de propagação da onda. A este desvio dá-se o nome de **refração**.

Em termos de ondas eletromagnéticas, a propriedade que permite avaliar a facilidade com que a onda se propaga num meio é o **índice de refração (n)**.

Índice de refração de um meio – razão entre a velocidade de propagação da onda eletromagnética no vazio ($3{,}0 \times 10^8$ m s^{-1}) e a velocidade de propagação da onda eletromagnética, de determinada frequência, no meio em causa. É uma grandeza adimensional.

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

n – índice de refração de um meio, adimensional
c – velocidade no vazio, m s^{-1}
v – velocidade no meio em causa, m s^{-1}

O índice de refração do meio e a velocidade de propagação são grandezas inversamente proporcionais.

Maior índice de refração → **Menor velocidade de propagação da onda eletromagnética** → **Meio mais denso**

Índices de refração de alguns meios

Substância	Índice de refração	Substância	Índice de refração
Diamante	2,419	Cloreto de sódio	1,544
Quartzo	1,458	Água	1,333
Vidro crown	1,52	Glicerina	1,473
Vidro flint	1,66	Álcool etílico	1,361
Gelo	1,309	Tetracloreto de carbono	1,461
Poliestireno	1,49	Benzeno	1,501

Fonte: SERWAY e JEWETT (2014)

Não existe um valor único de índice de refração para um material, dado que esse valor depende também da frequência da onda eletromagnética. Ondas de diferentes frequências possuem velocidades diferentes, no mesmo meio material, e têm, consequentemente, diferentes índices de refração nesse meio.

É a esta diferença de velocidades que se deve a ocorrência do fenómeno a que chamamos **dispersão da luz** (arco-íris).

A luz branca resulta da sobreposição das ondas eletromagnéticas correspondentes à luz visível que se propagam à mesma velocidade no vazio e praticamente à mesma velocidade no ar. Quando estas ondas entram num meio material diferente (vidro ou gotas de água, por exemplo) o desvio que sofrem não é igual e conseguimos visualizar as ondas eletromagnéticas de diferentes frequências.

O desvio na direção de propagação da onda eletromagnética ao entrar no segundo meio está relacionado com a velocidade de propagação e com o índice de refração. Quanto maior a diferença de velocidade de propagação ou de índices de refração entre os dois meios, maior é o desvio sofrido pela onda.

É possível estabelecer uma relação entre os índices de refração dos meios onde se propaga a onda eletromagnética e o comprimento de onda da mesma, já que a única característica que não varia com a mudança de meio é a frequência.

$$\frac{n_1}{n_2}=\frac{\frac{c}{v_1}}{\frac{c}{v_2}}=\frac{v_2}{v_1}=\frac{\lambda_2 f}{\lambda_1 f}=\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \longrightarrow n_1\,\lambda_1 = n_2\,\lambda_2 \longrightarrow$$

O índice de refração é inversamente proporcional ao comprimento de onda.

Leis da refração da luz

1.ª lei da refração

O raio incidente (R_i), a normal ao plano de incidência (N) e o raio refletido (R_r) estão todos no **mesmo plano**.

2.ª lei da refração ou lei de Snell-Descartes

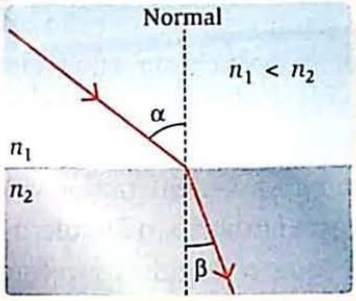
A razão entre o seno do ângulo de incidência (α_i) e o seno do ângulo de refração (α_r) é constante e igual à razão entre o índice de refração do segundo meio (n_2) e o índice de refração do primeiro meio de propagação (n_1).

$$\frac{\operatorname{sen}\alpha_i}{\operatorname{sen}\alpha_r}=\frac{n_2}{n_1} \text{ ou } n_1 \operatorname{sen}\alpha_i = n_2 \operatorname{sen}\alpha_r$$

De acordo com as leis da refração da luz, quando uma onda eletromagnética passa de um meio 1 para um meio 2, podem dar-se duas situações:

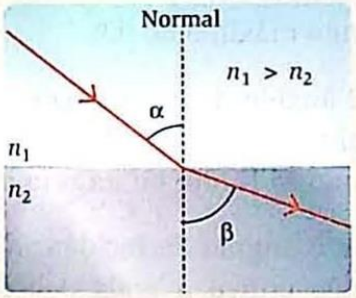
Refração de um feixe quando $n_1 < n_2$

Aproxima-se da normal ($\alpha > \beta$) se o índice de refração do meio 1 é menor do que o índice de refração do meio 2 ($n_1 < n_2$), ou seja, se a onda eletromagnética passa de um meio onde se propaga com maior velocidade para um meio onde tem menor velocidade.



Refração de um feixe quando $n_1 > n_2$

Afasta-se da normal ($\alpha < \beta$) se o índice do meio 1 é maior do que o índice de refração do meio 2 ($n_1 > n_2$), ou seja, se a onda eletromagnética passa de um meio onde se propaga com menor velocidade para um meio onde tem maior velocidade.

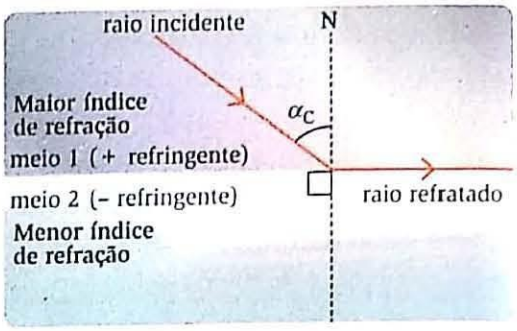


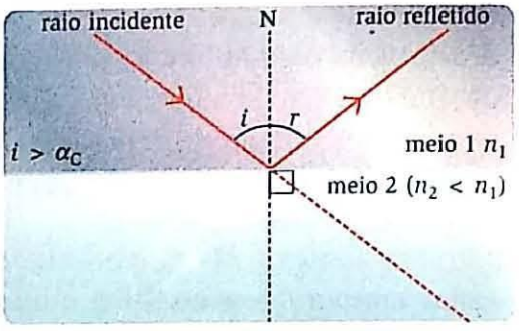
3 REFLEXÃO TOTAL DA LUZ

O fenómeno da reflexão total da luz pode ocorrer quando uma onda eletromagnética incide na superfície de separação de um meio onde se propaga a menor velocidade (maior n) para outro onde tem maior velocidade (menor n). Nesta situação, o ângulo de incidência é menor do que o ângulo de refração, pelo que, se se aumentar o ângulo de incidência, o ângulo de refração será sucessivamente maior até um limite máximo de 90°.

O ângulo de incidência que origina uma refração com um ângulo de 90° é denominado de **ângulo limite** ou **ângulo crítico** (α_C).

Se o ângulo de incidência for superior ao ângulo crítico a onda deixa de ser refratada e sofre apenas reflexão – **reflexão total**.





Como determinar um ângulo limite?

Por aplicação direta da Lei de Snell-Descartes para a refração, é possível determinar o valor do ângulo de incidência que provoca uma refração com um ângulo de 90° e a partir do qual passa a ocorrer reflexão total da luz.

Pela Lei de Snell-Descartes:

$n_1 \operatorname{sen}\alpha_1 = n_2 \operatorname{sen}\alpha_2$, sendo $\alpha_i = \alpha_C$ e $\alpha_2 = 90°$, então:

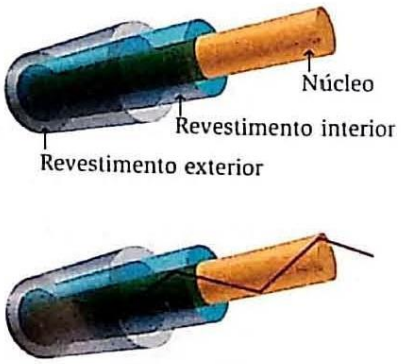
$$n_1 \operatorname{sen}\alpha_C = n_2 \operatorname{sen}(90°) \Leftrightarrow \operatorname{sen}\alpha_C = \frac{n_2}{n_1} \Leftrightarrow \alpha_C = \operatorname{sen}^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Para que ocorra o fenómeno da reflexão total é necessário que:

- $n_{\text{núcleo}} > n_{\text{revestimento}}$;
- o ângulo de incidência na superfície que separa o núcleo do revestimento seja superior ao ângulo limite.

O fenómeno de reflexão total está na base do funcionamento de vários instrumentos de diagnóstico médico, de iluminação, de comunicação, etc.

A **fibra ótica** é uma das aplicações mais importantes deste fenómeno ótico. Ao olhar para uma fibra ótica, vê-se um cabo cilíndrico, normalmente plastificado. No seu interior, a fibra ótica é constituída por um tubo cilíndrico que pode ter a espessura de um fio de cabelo. É neste tubo, feito de um material transparente (normalmente vidro ou plástico) para diminuir a atenuação da luz, que a luz se propaga, sofrendo múltiplas reflexões nas paredes que o separam do material envolvente.



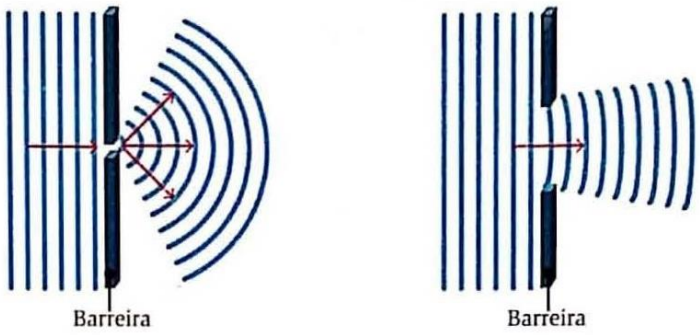
Representação de uma fibra ótica.

4 DIFRAÇÃO DE ONDAS

A **difração** é um fenómeno ondulatório que resulta da capacidade das ondas para contornar obstáculos ou atravessar aberturas, expandindo a sua propagação em várias direções.

É devido à difração das ondas sonoras que é possível ouvir um som produzido noutra divisão de uma casa, já que a onda sonora, após atravessar a porta da divisão, propaga-se em várias direções, sofre difração e chega ao recetor.

Contudo, para que ocorra difração apreciável, o obstáculo ou abertura tem de ter uma dimensão aproximadamente da ordem de grandeza do comprimento de onda. Quando a dimensão da fenda aumenta significativamente, a difração da onda é menos acentuada. Neste fenómeno, o comprimento de onda não se altera após o obstáculo ou a fenda, uma vez que o meio de propagação é o mesmo.



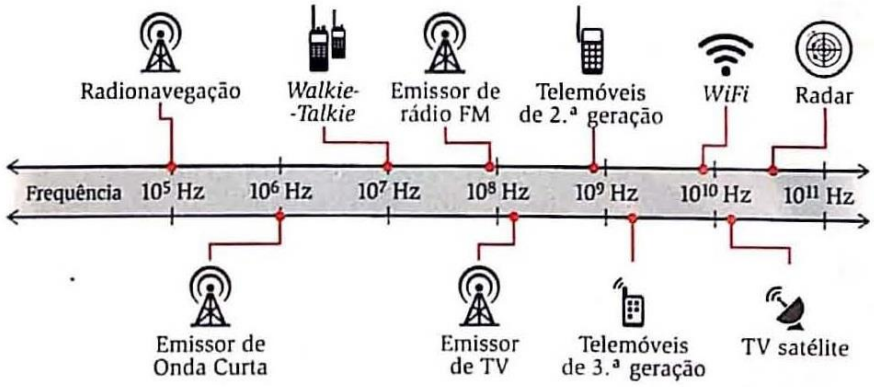
Propagação de ondas através de fendas com diferentes dimensões.

ONDAS ELETROMAGNÉTICAS UTILIZADAS NA COMUNICAÇÃO

Na comunicação a longas distâncias são utilizadas ondas eletromagnéticas para armazenar e transmitir a informação entre o emissor e o recetor.

O tipo de onda eletromagnética a usar na comunicação tem de ter em conta os fenómenos ondulatórios a que essas ondas podem estar sujeitas durante a sua propagação.

As **bandas de radiofrequência** correspondem à radiação que é utilizada para comunicação e compreendem as **ondas rádio e parte das micro-ondas** (3 kHz a 300 kHz) – radiação de elevado comprimento de onda do espetro eletromagnético.



Alguns exemplos de fontes de radiofrequências.

Dentro da gama das radiofrequências não ocorre praticamente absorção das ondas, o que é vantajoso pois a onda sofre pouca atenuação (perda de amplitude).

- As ondas de **frequência mais elevada** (micro-ondas) praticamente não sofrem difração, pelo que se propagam em **linha reta**. Para que o sinal chegue ao recetor é necessário que o emissor e o recetor se encontrem alinhados e que entre eles não haja obstáculos. Este tipo de ondas é utilizado para a comunicação via satélite porque as ondas **não são absorvidas ou refletidas na atmosfera** e conseguem **armazenar uma quantidade de dados elevada**. Os **telemóveis** e o **sistema GPS** utilizam esta gama de frequências para transmitir dados e efetuar a comunicação porque precisam de transmitir um elevado número de dados e utilizam antenas de menores dimensões.

- As ondas de **frequências mais baixas** (ondas rádio), por apresentarem maior comprimento de onda, **sofrem difração**, por isso, o emissor e o recetor não precisam de se encontrar alinhados e podem existir obstáculos entre eles. Ondas deste tipo, quando enviadas em direção à atmosfera, acabam por ser **refletidas na ionosfera** e regressar para a superfície terrestre, o que permite a sua utilização para **comunicações a longas distâncias**.

5 EFEITO DOPPLER

O efeito Doppler é um fenómeno relacionado com a perceção que o recetor de uma onda tem da frequência com que esta é emitida.

Este fenómeno, que ocorre tanto com ondas sonoras como com ondas eletromagnéticas, só se verifica quando o emissor se encontra em movimento em relação ao recetor.

- Se o emissor estiver parado em relação ao recetor, este perceciona uma única frequência da onda emitida.

- Se o emissor estiver em movimento em relação ao recetor, há alteração na frequência da onda detetada pelo recetor.
  - Quando o emissor se **aproxima** do recetor, o recetor perceciona um **aumento** da frequência da onda.
  - Quando o emissor se **afasta** do recetor, o recetor perceciona uma **diminuição** da frequência da onda.

EXEMPLOS

Onda sonora

A sirene de um carro policial, quando este se desloca e se aproxima de uma pessoa, parece produzir um som cada vez mais agudo (maior frequência) à medida que se aproxima. Já durante o afastamento (do carro), a sirene parece produzir um som sucessivamente mais grave (menor frequência).

Luz

Os radares de controlo de velocidade emitem micro-ondas com uma frequência fixa na direção dos veículos. Essa onda é refletida no veículo e reenviada para o radar que deteta o sinal. Se a frequência recebida é sempre a mesma, o veículo está parado. Se a frequência recebida é diferente da original, o veículo está em movimento. A análise de um conjunto de ondas recebidas pelo radar permite aferir sobre a velocidade a que se desloca o veículo.

6 AS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS E O UNIVERSO

O estudo do Universo e da sua evolução tem como principal fonte de dados as ondas eletromagnéticas.

A teoria do big-bang é a teoria atualmente aceite pela comunidade científica para a origem do Universo, e duas das evidências/provas que a sustentam têm como base as ondas eletromagnéticas.

Segundo a teoria do big-bang, o Universo terá sido, na sua origem, uma massa extremamente quente e densa, concentrada num ponto, que terá explodido. Após essa explosão, ter-se-á iniciado um processo de expansão da matéria, com o consequente arrefecimento.

Foi através do estudo da luz emitida por galáxias distantes, recebida pela Terra, que se concluiu que o Universo está em expansão. Verificou-se que, ao longo do tempo, a frequência da luz recebida de uma galáxia diminuía, ou seja, a luz recebida tinha comprimentos de onda sucessivamente maiores. Aplicando os conhecimentos sobre o efeito de Doppler, esta diminuição da frequência sugere que as galáxias se estão a afastar entre si, como consequência da expansão do Universo.

Outra evidência é conhecida como radiação cósmica de fundo. Segundo a teoria do big-bang, a radiação micro-ondas detetada em todas as direções do Universo é um vestígio da radiação emitida aquando da formação dos primeiros átomos de hidrogénio e de hélio. Apesar de, no momento em que a radiação foi libertada, a sua energia e frequência serem muito elevadas, a justificação para que agora seja detetada com menor energia e frequência é o facto de o Universo ter expandido e arrefecido.