

## Guia de estudos “Astrofísica Estelar para o Ensino Médio”

### Capítulo 2 – A natureza da luz

#### **2.1 Decodificando a linguagem das estrelas**

Quase toda a informação de que dispomos sobre o Universo nos chega sob uma mesma forma: a radiação eletromagnética, que abreviaremos doravante como REM (entre as poucas exceções estão os raios cósmicos, os neutrinos, algumas toneladas de fragmentos de meteoritos e um punhado de pedras lunares trazidas por astronautas)<sup>1</sup>. A luz visível é sem dúvida a forma de REM que nos é mais familiar no dia a dia. Mas ela está longe de ser a única; na verdade, é apenas uma pequena fração do todo, a que damos o nome de “espectro eletromagnético”. As ondas de rádio, as micro-ondas, a radiação ultravioleta e a infravermelha, os raios X e os raios gama são todos igualmente formas de REM. O Universo está permanentemente emitindo radiação eletromagnética sob todas essas formas, que chegam a nós como se fossem “mensagens” enviadas simultaneamente em diferentes idiomas.

Uma das razões para o impressionante desenvolvimento da Astrofísica moderna é que aprendemos a ler e a decifrar cada uma dessas “línguas”, e não (como antes) apenas aquelas mensagens que nos chegam sob a forma de luz visível. Para aprender a interpretar essa linguagem foram necessários alguns séculos e também um entrosamento perfeito entre a teoria e a observação, como veremos nos tópicos seguintes. A boa notícia, entretanto, é que hoje tanto a percepção como a compreensão de uma boa parte dessas “mensagens das estrelas” não são mais exclusivas dos grandes observatórios e pesquisadores teóricos.

Ao contrário, percebê-las é acessível a todos os que se dispuserem a observar as estrelas sistematicamente, com instrumentos modestos ou até mesmo a olho nu, registrando sempre aquilo que notaram. E para a compreensão da astrofísica envolvida, é suficiente a matemática do Ensino Médio. Pode parecer surpreendente, mas isso já é feito há décadas por milhares de pessoas em todo o mundo: para aprender os princípios da Astrofísica Estelar, um caminho ideal é a simples observação visual regular das estrelas variáveis. Esse será o objetivo e o fio condutor de todo este trabalho.

---

<sup>1</sup> A partir de 2015, todavia, abriu-se outra promissora fonte de informação sobre o Universo: as ondas gravitacionais. A primeira detecção de ondas gravitacionais foi feita em 14 de setembro de 2015 por uma colaboração entre os observatórios LIGO (nos Estados Unidos da América) e VIRGO (na Itália). As ondas gravitacionais se originavam de um par de buracos negros em fusão. Embora sua existência já houvesse sido prevista por Einstein em sua Teoria da Relatividade Geral (1915), essa foi a primeira *observação* de ondas gravitacionais na História. Já em 17 de agosto de 2017, observou-se pela primeira vez um evento (a fusão de duas estrelas de nêutrons) *simultaneamente através de ondas gravitacionais e de radiação eletromagnética*. Essas observações devem representar uma nova era para a Astrofísica.

## **2.2 A luz como radiação eletromagnética**

Desde o século XIX, já se sabia que as cargas elétricas e os ímãs possuem a propriedade de alterar as regiões em torno deles, criando o que se chama de campo de força. Reconhecemos esse fenômeno ao observar a ação de um ímã sobre objetos ferrosos (um *campo magnético*) ou quando notamos que nossos cabelos se eriçam ao aproximarmos deles uma barra de âmbar que tenha sido previamente atritada em um fragmento de camurça (um *campo elétrico*). Os cientistas da época já sabiam também que os campos elétricos e magnéticos estavam relacionados intimamente uns aos outros: que a passagem da corrente elétrica criava um campo magnético ao seu redor e que, da mesma forma, oscilações em um campo magnético criavam uma corrente elétrica em suas proximidades. O físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) foi o primeiro a estabelecer teoricamente essa conexão entre a eletricidade e o magnetismo, exprimindo-a através de quatro equações que hoje levam seu nome e consolidando todas as suas descobertas na sua monumental obra *Um tratado sobre a eletricidade e o magnetismo*, em 1873. Sobre Clerk Maxwell, Einstein diria posteriormente:

“A partir dele, a realidade física tem sido imaginada como campos contínuos (...). Esta mudança na concepção da realidade é a mais profunda e mais frutuosa que a Física experimentou desde Isaac Newton” (PAIS, 1995).

Maxwell já havia previsto em 1865 a existência da radiação eletromagnética, bem como a sua propagação em ondas à velocidade da luz, associando os dois fenômenos:

A concordância dos resultados parece demonstrar que a luz e o magnetismo são manifestações da mesma substância, e que a luz é uma perturbação eletromagnética propagada através do campo, de acordo com as leis do eletromagnetismo (CLERK MAXWELL, 1865, tradução nossa).

A existência da radiação eletromagnética segundo a teoria de Clerk Maxwell seria constatada experimentalmente, em 1888, por Heinrich Hertz (1857-1894). O rádio e a televisão hoje tão familiares a nós são apenas algumas das consequências dessa importante descoberta.

Os planos de oscilação dos campos elétricos e magnéticos são perpendiculares entre si, e a onda eletromagnética se propaga numa direção perpendicular aos dois campos, como mostra a Figura 2.1. É dessa forma que a luz visível (bem como todos os outros tipos de radiação eletromagnética) se propaga e transporta sua energia no espaço.

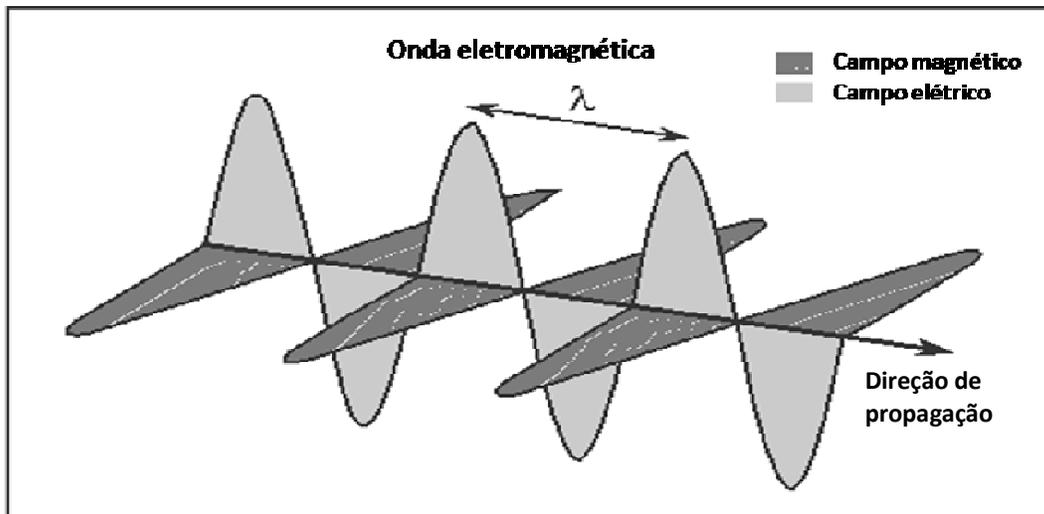


Figura 2.1 – Representação da propagação de uma onda eletromagnética. (Adaptado de STROBEL, 2013.)

### 2.3 Propriedades gerais das ondas eletromagnéticas

Todas as formas de radiação eletromagnética (por exemplo, a luz visível, as ondas de rádio, as micro-ondas ou os raios X), possuem algumas propriedades comuns:

1. As ondas eletromagnéticas podem viajar no espaço vazio (vácuo) - ao contrário das ondas sonoras, por exemplo, que necessitam de um meio físico para se propagarem.
2. Todas as formas de REM viajam no espaço vazio em linha reta, à mesma velocidade  $c = 299.800 \text{ km/s}$  (a velocidade da luz – que não é exclusiva da luz visível, mas sim de todos os tipos de radiação eletromagnética). Em meios densos como o ar ou a água, a velocidade será menor, e o seu valor dependerá das características de cada meio.
3. Define-se *comprimento de onda* (indicado pela letra grega  $\lambda$ , ou lambda) como a distância entre duas cristas de onda consecutivas, ou entre dois vales consecutivos (ver Figura 2.1). As unidades de medida mais comuns para  $\lambda$  são o angstrom (abreviado por Å), <sup>2</sup> que vale  $10^{-8} \text{ cm}$ , ou  $10^{-10} \text{ m}$ ; e também o nanômetro (nm), que vale  $10^{-9} \text{ m}$ . Observe-se que  $1 \text{ nm} = 10 \text{ Å}$ . Cada tipo de radiação eletromagnética possui comprimento de onda característico (ver Tabela 2.1): por exemplo, a luz visível apresenta comprimentos de onda que vão desde cerca de 4000 Å (cor violeta) até cerca de 7000 Å (cor vermelha).
4. Define-se para as ondas eletromagnéticas uma *frequência* ( $f$ ), que pode ser entendida como o número de ciclos por unidade de tempo. A frequência é geralmente medida em hertz (abreviado por Hz)<sup>3</sup>, que significa um ciclo por segundo.

<sup>2</sup> Em homenagem ao físico sueco Anders Jonas Ångstrom (1814-1874).

<sup>3</sup> Em homenagem ao físico alemão Heinrich Hertz (1857-1894).

5. O comprimento de onda e a frequência são inversamente proporcionais entre si, ou seja: quanto maior a frequência, menor o comprimento de onda, e vice-versa. O produto do comprimento de onda pela frequência nos dá a velocidade da onda (que, no caso da REM, é a velocidade da luz). Podemos exprimir matematicamente essa relação através da equação:

$$c = \lambda f \quad (2.1)$$

(em que o termo  $c$  representa a velocidade da luz).

## 2.4 O espectro eletromagnético

Já vimos que, além da luz visível, existem muitos outros tipos de REM que possuem a mesma natureza e as mesmas propriedades gerais da luz. Mas então o que diferencia cada um desses tipos dos outros? Para responder, basta lembrar que cada diferente tipo de radiação eletromagnética possui um comprimento de onda que lhe é característico e único. Teoricamente, não existe um limite inferior (nem superior) para o comprimento de onda de uma REM. As radiações mais curtas que detectamos, por exemplo, possuem comprimento de onda de dimensões subatômicas. Podemos dizer, assim, que o parâmetro que caracteriza e classifica qualquer tipo de radiação eletromagnética é o seu *comprimento de onda*. Alternativamente (e tendo em mente a equação (2.1)) poderíamos também usar a *frequência* da REM para caracterizá-la.

Em outras palavras, a diferença entre, por exemplo, a luz visível e as ondas de rádio reside unicamente nos seus diferentes comprimentos de onda (ou frequências): podemos dizer que as ondas de rádio possuem comprimentos de onda muito *maiores* que a luz visível. Ou, alternativamente, que as ondas de rádio possuem frequências muito *menores* que a luz visível. Nesse particular, expressões informais como “luz infravermelha” ou “luz ultravioleta” não estão, em si, incorretas: nada as distingue da luz visível, com exceção do fato de que seus comprimentos de onda são distintos.

Ao conjunto de todos os tipos de radiações eletromagnéticas, classificadas por seu comprimento de onda, chamamos *espectro eletromagnético*. A Tabela 2.1 abaixo indica o espectro eletromagnético completo, dividido em suas principais regiões, segundo o seu comprimento de onda. Note-se pela Tabela 2.1 como é reduzido o intervalo de comprimentos de onda correspondentes à luz visível: entre 4000 e 7000 angstroms apenas! A título de comparação, note-se a faixa das micro-ondas, por exemplo, que possui comprimentos de onda entre 1.000.000 e 1.000.000.000 de angstroms. Ou ainda as ondas de rádio (que, aliás, nessa nossa classificação resumida, incluem subtipos como as ondas AM e FM, ondas de televisão VHF, UHF, de telefones celulares etc.). Por sinal, para o caso de ondas de rádio, tornou-se mais usual mencionar a frequência em hertz do que o comprimento de onda. O que é equivalente, sempre pela equação (2.1).

| Região espectral | Comprimento de onda (angstroms) | Comprimento de onda (centímetros)     | Frequência (hertz)                        |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---|
| Rádio            | $> 10^9$                        | $> 10$                                | $< 3 \times 10^9$                         |
| Micro-ondas      | $10^9 - 10^6$                   | $10 - 0,01$                           | $3 \times 10^9 - 3 \times 10^{12}$        |
| Infravermelho    | $10^6 - 7000$                   | $0,01 - 7 \times 10^{-5}$             | $3 \times 10^{12} - 4,3 \times 10^{14}$   |
| Luz visível      | $7000 - 4000$                   | $7 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-5}$ | $4,3 \times 10^{14} - 7,5 \times 10^{14}$ |
| Ultravioleta     | $4000 - 10$                     | $4 \times 10^{-5} - 10^{-7}$          | $7,5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$   |
| Raios X          | $10 - 0,1$                      | $10^{-7} - 10^{-9}$                   | $3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$     |
| Raios gama       | $< 0,1$                         | $< 10^{-9}$                           | $> 3 \times 10^{19}$                      |

Tabela 2.1 – Comprimentos de onda e frequências de regiões selecionadas do espectro eletromagnético. (Fonte: IF-UFRGS, 2010.)

O espectro eletromagnético completo pode ser também visualizado através de um esquema gráfico como o apresentado na Figura 2.2, abaixo. À esquerda, encontram-se as regiões de menor comprimento de onda, maior frequência e maior energia. À direita, as regiões de comprimentos de onda mais longos, menor frequência e menor energia. Note-se a pequena amplitude da faixa de luz visível.

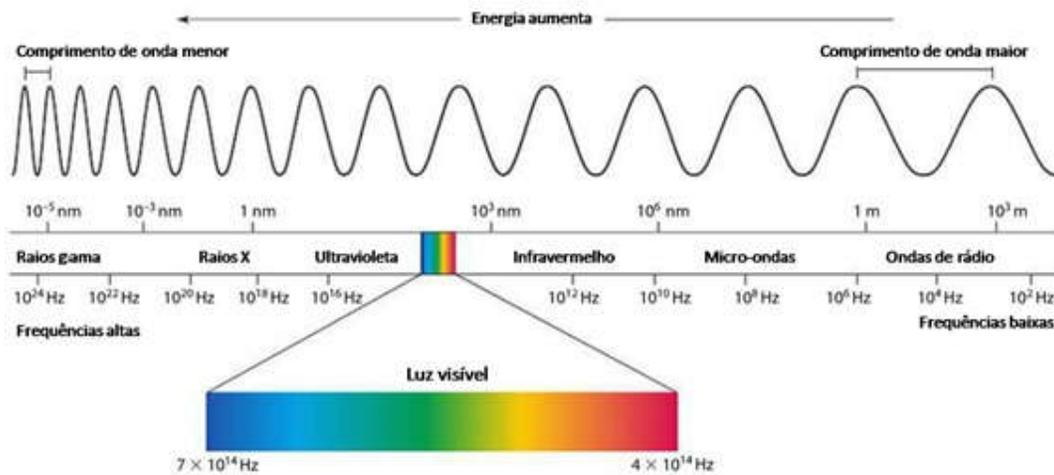


Figura 2.2 – Faixas principais do espectro eletromagnético. (Fonte: NASA.)

Em particular, no que diz respeito à região da luz visível: se nos lembrarmos das primeiras experiências de Isaac Newton sobre a decomposição da luz solar (que vimos no primeiro capítulo), notaremos que cada uma das cores do espectro nada mais é do que um comprimento de onda dentro da faixa da luz visível. E ainda que a luz branca é simplesmente a mistura de todas essas cores. Na Tabela 2.2, relacionamos os comprimentos de onda e as frequências correspondentes a cada cor da região da luz visível (popularmente chamadas de “cores do arco-iris”).

| Cor      | Comprimento de onda (Å) | Frequência ( x 10 <sup>14</sup> Hz) |
|----------|-------------------------|-------------------------------------|
| Violeta  | 4000 - 4600             | 7,5 - 6,5                           |
| Índigo   | 4600 - 4750             | 6,5 - 6,3                           |
| Azul     | 4750 - 4900             | 6,3 - 6,1                           |
| Verde    | 4900 - 5650             | 6,1 - 5,3                           |
| Amarelo  | 5650 - 5750             | 5,3 - 5,2                           |
| Laranja  | 5750 - 6000             | 5,2 - 5,0                           |
| Vermelho | 6000 - 7000             | 5,0 - 4,3                           |

*Tabela 2.2 – Comprimentos de onda e frequências de cores correspondentes à faixa da luz visível. (Adaptado de STROBEL, 2013.)*

Até as primeiras décadas do século XX, todas as observações astronômicas haviam sido efetuadas exclusivamente na faixa da luz visível. Mesmo o advento da fotografia astronômica em meados no século XIX não havia mudado essa situação; também ela se utilizava daquela mesma pequena faixa do espectro eletromagnético. Seria apenas em 1931 que um jovem físico e engenheiro norte-americano chamado Karl Jansky (1905-1950) identificaria pela primeira vez emissões em rádio provenientes do céu, conseguindo no ano seguinte localizar a sua origem: a constelação do Sagitário, que contém a região central da Via Láctea. Os trabalhos pioneiros de Jansky logo seriam retomados e ampliados pelas mãos de seu conterrâneo Grote Reber (1911-2002), também engenheiro e astrônomo amador. Em 1937, Reber construiu sozinho o instrumento que hoje é considerado o primeiro radiotelescópio, dotado de uma antena parabólica de 9 metros de diâmetro. Com ele, e durante quase dez anos, Reber se tornou o único radioastrônomo em atividade em todo o mundo. Trabalhando entre meia-noite e seis horas da manhã para reduzir ao mínimo certas interferências como os motores de partida de automóveis (CAPOZZOLI, 2005), Grote Reber seria o primeiro a mapear o céu em radiofrequências (160 e 480 MHz), demonstrando que as emissões mais intensas provinham do centro da Via Láctea, como previsto por Jansky, e conseguindo descobrir outras radiofontes significativas nas constelações de Cygnus,

Cassiopeia e Canis Major – regiões que foram identificadas por ele como correspondentes aos braços espirais da nossa Galáxia (REBER, 1944).

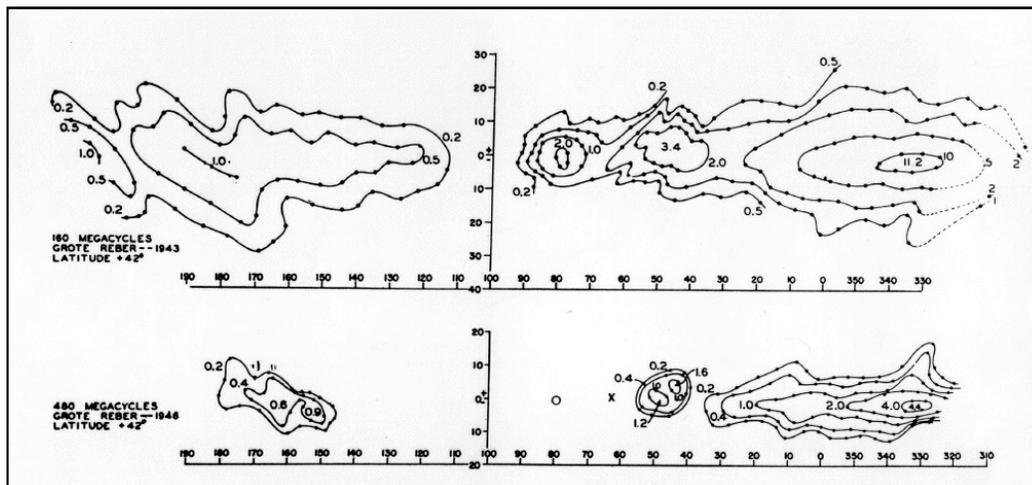


Figura 2.3 – Mapas da emissão em rádio da Via Láctea em 160 e 480 MHz, obtidos por Grote Reber em 1943 e 1946. Os diagramas estão plotados em coordenadas galácticas: nas abscissas, a longitude e, nas ordenadas, a latitude. O equador galáctico está na horizontal e a direção do centro galáctico, em longitude zero. (Fonte: National Radio Astronomy Observatory – NRAO, 2009.)

Com o término da Segunda Guerra Mundial, houve uma rápida mudança no cenário: uma nova geração de físicos, engenheiros e astrônomos passou a se dedicar às pesquisas em radioastronomia. Muitos deles haviam adquirido experiência na tecnologia do radar, amplamente usado para fins militares durante a guerra. Investimentos em radiotelescópios foram feitos no Reino Unido, Austrália e Estados Unidos. As primeiras pesquisas coordenadas entre astrônomos ópticos e radioastrônomos se iniciavam. Após milhares de anos recebendo as mensagens provenientes das estrelas apenas sob a forma de luz visível, a Astronomia aprendia enfim a sua segunda “linguagem” para entender o Universo – agora sob a forma de ondas de rádio.

Para entender como foi possível aprendermos outras “linguagens” além da luz visível e do rádio – ou seja, como foi possível observarmos nas demais faixas do espectro eletromagnético (por exemplo, nas regiões do ultravioleta ou dos raios X) é necessário compreender o papel da atmosfera terrestre. Já sabemos, é claro, que a luz visível, além de parte do infravermelho e das ondas de rádio, consegue atravessar nossa atmosfera e chegar ao solo. Dizemos que a atmosfera é *transparente* a essas radiações. Por outro lado, a atmosfera bloqueia a passagem dos perigosos raios gama, raios X e ultravioleta provenientes do espaço, impedindo-os de atingir a superfície terrestre. Dizemos que a atmosfera é *opaca* a essas radiações. A Figura 2.4 demonstra as “janelas” de observação possíveis na superfície terrestre (luz visível, rádio e parte do infravermelho – este a altitudes acima de cerca de 2500 m), enquanto os outros

comprimentos de onda (em particular as faixas dos raios X, raios gama, ultravioleta e as ondas de rádio mais longas) são quase totalmente absorvidos pela atmosfera.

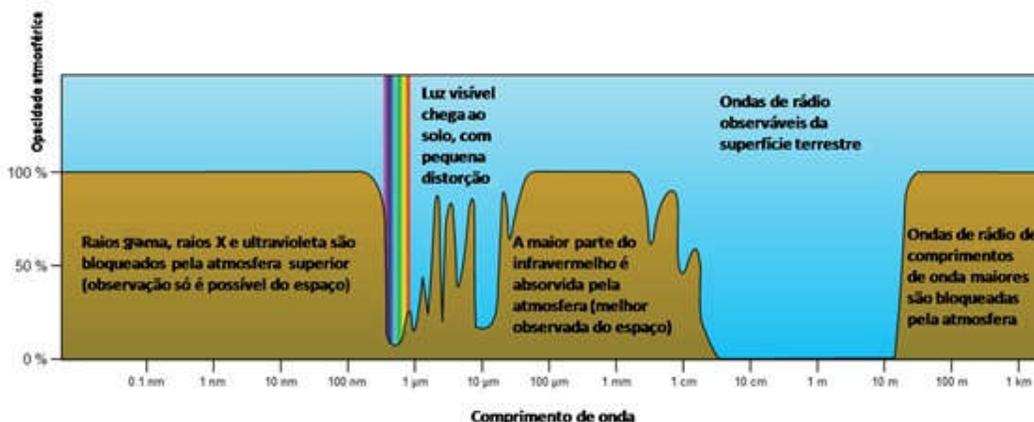


Figura 2.4 – Opacidade da atmosfera da Terra em função do comprimento de onda da radiação eletromagnética. Note-se que a atmosfera é totalmente opaca às radiações de maior frequência (raios gama, raios X e ultravioleta), transparente no visível, em parte do infravermelho e em ondas de rádio, e é novamente opaca na faixa das ondas de rádio mais longas. (Fonte: NASA.)

Por esses motivos, fica evidente que a única forma de observar nos comprimentos de onda e que a atmosfera é opaca é colocar nossos telescópios e instrumentos *fora da atmosfera terrestre*. Isso se tornou possível a partir da década de 1950, em que foram lançados ao espaço os primeiros satélites artificiais. Desde então e até inícios de 2017, mais de uma centena desses satélites (ou *telescópios espaciais*, como passaram a ser chamados) foram colocados em órbita por diversas agências espaciais – norte-americana (NASA), europeia (ESA), japonesa, russa e de vários outros países<sup>4</sup>. Longe da influência da atmosfera terrestre, eles podem recolher dados precisos em todas as regiões do espectro eletromagnético: raios gama, raios X, ultravioleta, visível, infravermelho, micro-ondas e rádio. Além disso, mesmo os instrumentos que trabalham em regiões em que a atmosfera é transparente (caso, por exemplo, do telescópio espacial Hubble) se tornam muito mais produtivos longe da turbulência atmosférica, que, via de regra, causa certa degradação na qualidade das imagens obtidas em terra, sem falar dos efeitos da poluição luminosa cada vez mais prejudicial à observação.

Dependendo de cada objeto ou fenômeno a ser observado, as emissões neste ou naquele comprimento de onda serão mais ou menos importantes. Observações no infravermelho, por exemplo, são essenciais para a Astrofísica moderna, para detectar objetos tais como as protoestrelas (estrelas em seu processo de formação). Do outro lado, os fenômenos de alta energia apresentam emissões mais fortes nas regiões de frequência mais alta, que não podem ser percebidas da superfície terrestre. Talvez o mais importante é que as informações obtidas em cada uma dessas frequências (os “idiomas” que mencionamos no início deste capítulo) se complementam entre si,

<sup>4</sup> Uma relação atualizada desses telescópios espaciais, listados de acordo com a faixa de frequência em que operam, pode ser encontrada em: <[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_space\\_telescopes](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_space_telescopes)>. Acesso em: 7 de abril de 2017.

tornando muito mais rico o volume de conhecimentos de que dispomos para interpretar as “mensagens” que nos são trazidas pela radiação eletromagnética. Esse é um dos principais motivos para o desenvolvimento exponencial que a Astrofísica tem tido nas últimas décadas. Alguns exemplos de objetos que podem ser estudados em cada região do espectro eletromagnético podem ser vistos na Tabela 2.3.

| Comprimento de onda    | Objeto característico                                 |
|------------------------|---|
| Raios gama             | Objetos compactos em colisão, <i>gamma ray bursts</i> |
| Raios X                | Estrelas de nêutrons                                  |
| Ultravioleta           | Estrelas quentes, quasares                            |
| Visível                | Estrelas  |
| Infravermelho          | Estrelas gigantes vermelhas, núcleos de galáxias      |
| Infravermelho distante | Protoestrelas, poeira, planetas                       |
| Milímetro              | Poeira fria, nuvens moleculares                       |
| Rádio (cm)             | Hidrogênio neutro, pulsares                           |

*Tabela 2.3 – Alguns objetos astronômicos que podem ser estudados com maior eficiência em diferentes regiões do espectro eletromagnético. (Fonte: IF-UFRGS, 2010.)*

## 2.5 A natureza quântica da luz

No ano de 1900, o físico alemão Max Planck (1858-1947) sugeriu pela primeira vez que os átomos poderiam emitir ou absorver energia não de uma forma contínua, mas em pequeníssimos “pacotes” de energia a que ele denominou “quanta”. Em um trabalho hoje considerado seminal para a Física, apresentado em 14 de dezembro de 1900 na Deutsche Physikalische Gesellschaft (Sociedade Alemã de Física), Planck afirmava: “(...) a energia é formada por um número completamente determinado de partes iguais e finitas, e para essa finalidade, uso a constante da natureza  $h = 6,55 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$  (...)”<sup>5</sup>. A Física Quântica começava a nascer (KRAGH, 2000).

<sup>5</sup> Esse era o valor originalmente calculado por Max Planck para a constante  $h$  (que hoje é denominada “constante de Planck”). O valor admitido modernamente para  $h$  é de  $6,626 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$ .

O amplo significado da hipótese da quantização da energia térmica, feita por Planck, só seria totalmente compreendido e ampliado cinco anos depois, quando o jovem Albert Einstein, estudando o fenômeno chamado “efeito fotoelétrico” (a emissão de elétrons de um material, geralmente metálico, quando ele é submetido à radiação eletromagnética), demonstrou que a existência dos “quanta” de energia não era devida aos átomos, mas, ao contrário, era uma propriedade da própria energia. E Einstein foi mais longe que Planck: ele compreendera que a luz poderia ser também encarada como sendo formada de “quanta” (partículas) de energia. Curiosamente, de certa forma, pode-se imaginar que Einstein havia revitalizado a antiga teoria de Sir Isaac Newton, de que a luz seria composta por “partículas”<sup>6</sup>. Claro que não da mesma maneira como Newton a imaginara (diminutos corpúsculos), mas agora consistindo dos minúsculos “quanta” de energia de Einstein, que receberam o nome particular de *fótons*.

Assim, um fóton pode ser visualizado como uma partícula de radiação eletromagnética. Isto significa que a luz possui não somente natureza ondulatória, mas também natureza de partícula. Ou, em outras palavras, que a luz pode se comportar tanto como uma onda quanto como partícula.

Ao contrário do que poderíamos supor nos dias de hoje, os fótons de Einstein encontraram razoável resistência entre os cientistas da época. Na verdade, a dualidade onda-partícula – um dos alicerces da Física Quântica contemporânea – só seria reconhecida e demonstrada cerca de vinte anos depois, com os trabalhos de Arthur Compton (1892-1962) no ano de 1923 e de Louis de Broglie (1892-1987) no ano de 1924 (FISHBANE et al., 1996). Porém, já em 1909, Einstein talvez já antecipasse os passos que viriam a seguir: “Em minha opinião, a próxima fase no desenvolvimento da física teórica nos trará uma teoria da luz que possa ser interpretada como uma espécie de fusão entre a teoria ondulatória e a de partícula (...). A estrutura das ondas e a estrutura quântica não devem ser consideradas mutuamente incompatíveis” (PAIS, 1997).

As propriedades ondulatórias da luz se relacionam com suas propriedades de partícula por uma equação surpreendentemente simples (por vezes referida como “relação de Planck-Einstein”), que nos diz como a energia de cada fóton se relaciona com a frequência (ou comprimento de onda) da radiação eletromagnética correspondente:

$$E = h f \quad (2.2)$$

Lembrando a equação (2.1), pode-se escrever também a equação (2.2) de outra forma:

$$E = h c / \lambda$$

Ambas as formas são equivalentes. O termo “h” representa a constante universal conhecida como “constante de Planck”. Seu valor é de  $6,626 \times 10^{-27}$  erg·s (no sistema

---

<sup>6</sup> Ver a respeito o Capítulo 1 deste trabalho.

CGS), ou  $6,626 \times 10^{-34}$  joule·s (no sistema MKS), ou ainda  $4,136 \times 10^{-15}$  eV·s (a unidade eV é denominada elétron-volt)<sup>7</sup>.

Finalizando, cabe ressaltarmos algumas implicações imediatas da relação de Planck-Einstein:

- Quanto maior for a frequência de uma radiação eletromagnética, maior será a energia do fóton correspondente. Um fóton de luz visível (vermelho) de frequência  $5 \times 10^{14}$  Hz, por exemplo, será 100 vezes mais energético que um fóton infravermelho de frequência  $5 \times 10^{12}$  Hz.
- Quanto menor for o comprimento de onda de uma radiação, maior a energia dos fótons correspondentes. Assim, um fóton de raios X com comprimento de onda de 1 angstrom, por exemplo, terá 5.000 vezes mais energia que um fóton de luz visível de comprimento de onda de 5.000 angstroms.
- O fato de um fóton ser mais *energético* não quer dizer que a *intensidade da luz* seja maior. As duas expressões não são sinônimas! A intensidade se relaciona ao número de ondas (ou de fótons) que chega a um detector simultaneamente. Cada um desses fótons pode ser mais (ou menos) energético. Os fótons de uma pequena fonte de raios X, por exemplo, são muito mais energéticos que o maior dos transmissores de rádio.
- Nas representações do espectro eletromagnético (Tabela 2.1 ou Figura 2.2), os fótons de maior energia são os dos raios gama, seguidos pelos dos raios X, luz ultravioleta, luz visível, luz infravermelha, micro-ondas e finalmente pelos das ondas de rádio, que são os menos energéticos entre todos.

## 2.6 Atividades sugeridas (para professores)

De início, recomendaríamos os exercícios abaixo para fixação dos conceitos vistos nos itens 2.3 a 2.5. Os dados, datas e valores neles mencionados são reais.

- Calcular o comprimento das ondas da sua rádio FM preferida.
- Digamos que a sua altura seja de 1,70 m. Qual a frequência de uma radiação eletromagnética cujo comprimento de onda fosse equivalente à sua altura? Em que região do espectro eletromagnético ela se encontraria?
- Calcule os comprimentos de onda para as radiações eletromagnéticas das frequências abaixo. Em seguida, coloque-as em ordem crescente de energia.
  - 100 MHz (típica de uma rádio FM)
  - 1000 kHz (típica de uma rádio AM)
  - 10 GHz (típica dos grandes radiotelescópios)

---

<sup>7</sup> Por definição, um elétron-volt é a quantidade de energia cinética ganha por um único elétron quando acelerado, no vácuo, por uma diferença de potencial de um volt.

- Entre os anos de 1990 e 2003, a NASA lançou quatro grandes telescópios espaciais, dentro de um projeto que se tornou conhecido como “Great Observatories”. Esses telescópios eram: o *Hubble* (lançado em 1990), o *Compton* (em 1991), o *Chandra* (em 1999) e o *Spitzer* (em 2003). Todos eles (com exceção do *Compton*) ainda se encontravam em operação no início de 2017. Cada telescópio era dotado de vários instrumentos (detectores), cada um deles concentrado em determinada faixa do espectro eletromagnético, para obter análises mais precisas em cada tipo de radiação. Eram eles:
  - O *Hubble* – o mais antigo e conhecido entre eles – possui cinco detectores (WFC3, NICMOS, STIS, ACS e WFPC), que permitem cobrir uma faixa espectral total que vai desde 1100 até 11.000 angstroms.
  - O *Compton* possuía quatro detectores (BATSE, OSSE, COMPTEL, EGRET), que permitiam a cobertura de uma região espectral de energias desde 30 keV até 30 GeV.
  - O *Chandra* possui quatro detectores (ACIS, HRC, HETGS e LETGS), cuja cobertura espectral abrange os comprimentos de onda desde 0,5 nm até 70 nm.
  - Finalmente, o mais recente deles, o *Spitzer*, possui três detectores (IRAC, IRS, MIPS), que lhe permitem uma cobertura da região entre 3 e 180 micrômetros.

Determine, para cada um desses quatro telescópios espaciais da NASA, a faixa total de cobertura espectral em angstroms. A seguir, e usando a tabela do espectro eletromagnético (Tabela 2.1), identifique em que regiões espectrais cada telescópio trabalha. São dados para este problema:

$$c = \text{velocidade da luz} = 300.000 \text{ km/s}$$

$$h = \text{constante de Planck} = 4,136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

A seguir, encontram-se algumas questões para discussão em classe. Para algumas delas, será necessário acessar o website da NASA para a visualização de imagens em diversos comprimentos de onda. Os links respectivos são dados em cada questão:

- Questão 1: Por que razões é possível perceber a luz visível com nossos olhos e não podemos ver os raios X ou as ondas de rádio?

Uma linha de discussão que poderia ser explorada nesta questão é vista abaixo. Ela parece razoável? Por que motivos?

*A resposta está em milhões de anos de evolução da espécie humana – e no fato de que nosso Sol é uma estrela amarela. Nossos olhos não passam de*

*detectores extremamente sofisticados – assim como um radiotelescópio ou um fotômetro. E, assim como ocorreu com a maioria das espécies biológicas, eles evoluíram ao longo das eras para captar o máximo de radiação que vem do Sol. Este, por sua vez, emite radiações eletromagnéticas em uma grande faixa de comprimentos de onda – mas, como todas as estrelas amarelas, o máximo de sua emissão corresponde exatamente à faixa da luz visível. A fisiologia de nossos olhos, portanto, simplesmente se adaptou à nossa estrela.*

- Questão 2: No website <<http://www.chromoscope.net/>> pode ser encontrada uma série de imagens de nossa Galáxia (a Via Láctea) vista em diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético, desde os raios gama até as ondas de rádio. Discuta as semelhanças e diferenças de cada imagem em relação à luz visível. Caso haja necessidade, recomenda-se consultar as seguintes páginas do website da NASA, que permitem identificar as características de cada uma dessas regiões:
  - <<https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/milkyway2.html>>
  - <[https://mwmw.gsfc.nasa.gov/mmw\\_images.html#maps](https://mwmw.gsfc.nasa.gov/mmw_images.html#maps)>
- Questão 3: No ano de 1054 d.C, astrônomos chineses registraram o aparecimento de uma “estrela nova” na constelação do Touro. Eles a descreveram como o astro mais brilhante do céu noturno, com exceção da Lua; durante alguns meses, seu brilho foi tão intenso que ela podia ser observada mesmo ao longo do dia. Hoje sabemos que se tratava de uma explosão de uma supernova, do tipo que chamamos Tipo II: o fim da vida de uma estrela gigantesca, com massa pelo menos oito vezes maior que a massa do Sol.

No século XVIII, o astrônomo francês Charles Messier notou uma pequena mancha nebulosa na região em que os chineses haviam avistado a supernova; ele a catalogou como o primeiro objeto da sua lista de objetos difusos, registrando-a como M1. Posteriormente, esse objeto ganhou o nome popular de “Nebulosa do Caranguejo”, em virtude de sua semelhança com esse crustáceo. Em 1949, verificou-se que M1 era uma intensa radiofonte, e, nos anos 1960, que era também uma das mais fortes fontes de raios X e de raios gama no céu; além disso, em 1968, descobriu-se que existia um pulsar (estrela de nêutrons em rápida rotação) no interior da Nebulosa do Caranguejo. Ele era um remanescente da explosão da supernova em 1054, e emitia pulsos regulares a cada 33 milissegundos. Por tudo isso, a Nebulosa do Caranguejo é um dos mais interessantes objetos de todo o céu, emitindo radiação eletromagnética em todos os comprimentos de onda, desde ondas de rádio até os raios gama.

Em <<https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/multiwavelength2.html>> pode-se acessar um site da NASA no qual são encontradas imagens da

Nebulosa do Caranguejo (M1) feitas no espaço por uma série de telescópios espaciais (e também em terra), operando em diferentes frequências: rádio, infravermelho, luz visível, ultravioleta e raios X. Em algumas delas, o pulsar pode ser percebido. Examine as imagens e procure identificar em cada caso a região de M1 da qual a radiação provém.

### **Referências bibliográficas para o Capítulo 2**

CAPOZZOLI, U. *No reino dos astrônomos cegos – uma história da Radioastronomia*. Rio de Janeiro: Record, 2005.

CLERK MAXWELL, J. A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philosophical Transactions, Royal Society of London*, 155, p. 499, 1865. Disponível em: <<http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/155/459>>. Acesso em: 30 de março de 2017.

FISHBANE, P.; GASIOROWICZ, S; THORNTON, S. *Physics for scientists and engineers*. New Jersey: Prentice Hall, 2<sup>nd</sup> ed., p. 1117-30, 1996.

IF-UFRGS. Observatório Educativo Itinerante: o espectro eletromagnético. 2010. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/oei/>>. Acesso em: 3 de abril de 2017.

KRAGH, H. Max Planck: the reluctant revolutionary. *Physics World*, v. 13, n. 12, p. 31-5, 2000. Disponível em: <<http://physicsworld.com/>>. Acesso em: 9 de abril de 2017.

NATIONAL RADIO ASTRONOMY OBSERVATORY. Finding aid to the papers of Grote Reber. 2009. Disponível em: <<http://www.nrao.edu/archives/Reber/reber.shtml>> Acesso em: 6 de abril de 2017.

PAIS, A. *Einstein viveu aqui*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, p. 46, 1997.

PAIS, A. *“Sutil é o Senhor...”: A ciência e a vida de Albert Einstein*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, p. 379, 1995.

REBER, G. Cosmic static. *Astrophysical Journal*, v. 100, p. 279-87, 1944.

STROBEL, N. Astronomy notes. Disponível em: <<http://www.astronomynotes.com/>>. 2013. Acesso em: 31 de março de 2017.

%%%%%%%%%