

3 O Sol

Como vimos no capítulo 2, o Sol possui um papel muito importante em nossas fontes de energia. O Sol movimenta a cadeia hidrológica que abastece os rios das hidrelétricas. O calor do Sol alimenta as usinas térmicas solares e movimenta os ventos das usinas eólicas. A luz do Sol fornece energia para os painéis fotovoltaicos. E ainda mais importante: é o Sol, por meio da fotossíntese, que dá origem a toda a biomassa (incluindo os combustíveis fósseis). Nesse capítulo, entenderemos melhor o que ocorre no Sol e os fenômenos relacionados.

3.1 – A natureza da luz e da radiação eletromagnética

Antes de discutirmos sobre o Sol e sua influência na Terra, é importante esclarecermos certos aspectos da luz e, de forma mais geral, da radiação eletromagnética. A natureza da luz é um assunto interessante e complexo. Einstein, em 1917, já famoso depois de ter publicado seus mais influentes trabalhos em relatividade e física quântica, disse “Pelo resto da minha vida, refletirei sobre o que é a luz”.

Um assunto muito rico para a história e filosofia da ciência é traçar a disputa entre a visão corpuscular (defendida por personalidades como Newton) e a visão ondulatória (defendida por Huygens, por exemplo). Atualmente, as duas visões coexistem no tratamento científico da luz. No modelo das reações nucleares no interior do Sol, por exemplo, tratamos a luz de forma corpuscular dentro contexto da física quântica e de partículas elementares, onde a partícula de luz é denominada fóton. Para tratar de fenômenos como a difração da luz, é mais conveniente tratar a luz como uma onda, tendo como base a teoria do eletromagnetismo fundamentada no conceito dos campos elétrico e magnético desenvolvido por Maxwell na segunda metade do séc. XIX.

No contexto atual, evita-se a discussão sobre a essência ondulatória ou corpuscular da luz. A resposta para a pergunta “a luz é uma onda ou uma partícula?” é normalmente do tipo “depende do fenômeno estudado a luz se manifesta como onda ou partícula”. Ou seja, a física moderna se esquivou da questão sobre a natureza da luz (daí o desafio que Einstein pôs a si mesmo), para se preocupar apenas com as manifestações dos fenômenos luminosos em situações específicas.

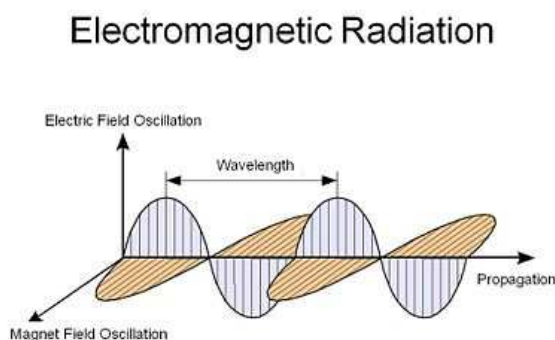


Fig. 3.1: Representação de uma onda eletromagnética com a indicação do comprimento de onda. Fonte: http://depts.washington.edu/cmditr/modules/lum/electromagnetic_radiation.html

Quando tratamos a luz como uma onda, costumamos dizer que ela é uma oscilação eletromagnética (Fig. 3.1), ou seja, a luz pode ser descrita como uma oscilação do campo elétrico associada a uma oscilação do campo magnético¹. Sabemos que a luz visível representa apenas uma pequena faixa das possíveis frequências de radiações eletromagnéticas (Fig. 3.2).

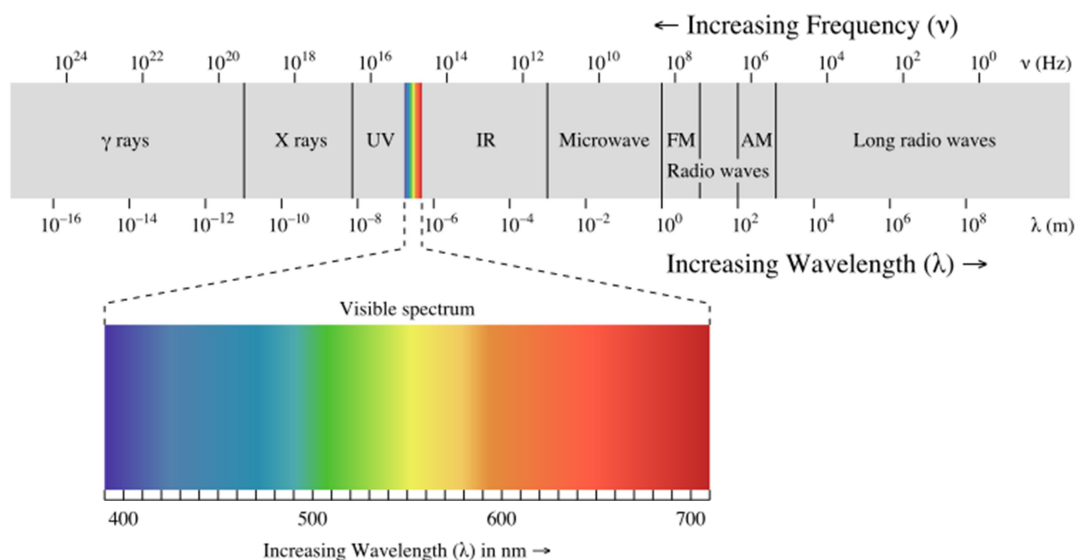


Fig. 3.2: Diagrama esquemático mostrando as diferentes faixas de radiação eletromagnética (raios gama, raios-X, ultravioleta, visível, infravermelho, micro-ondas, ondas de rádio) e as correspondentes frequências e comprimentos de onda. Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_radiation

Em fenômenos de natureza quântica, é mais conveniente tratarmos a luz como sendo constituída de partículas. Por exemplo, ao descrevermos o mecanismo de detecção da luz de uma máquina fotográfica digital, dizemos que fótons de luz arrancam elétrons de um elemento do dispositivo gerando o sinal elétrico detectado. Esse fenômeno, em que um fóton arranca um elétron de um material, é conhecido como “efeito fotoelétrico”. Esse efeito foi descrito de forma original por Einstein em 1905 onde ele assumiu a natureza corpuscular da luz. Foi esse o trabalho que rendeu o prêmio Nobel de física a Einstein, e não a relatividade, que é a sua teoria mais conhecida. Nessa concepção, a luz, e todas as formas de radiação eletromagnética, são constituídas de fótons. A diferença entre um feixe de raios-X, de luz visível, ou de infravermelho está na energia dos fótons constituintes. Existe uma relação direta entre a energia associada a um fóton e o comprimento da onda eletromagnética correspondente, fazendo a ponte de ligação entre as visões ondulatórias e corpusculares da luz. Os fótons com menor comprimento de onda (maior frequência) são os mais energéticos.

Como vimos, a luz visível representa apenas uma pequena faixa do espectro eletromagnético. Na Fig. 3.2 a faixa do visível aparece em destaque, onde os comprimentos de onda e frequências estão associados a uma cor. Existem razões bem fundamentadas para essa

¹ A expressão “campo eletromagnético” é um abuso de linguagem. Em eletromagnetismo existe apenas “campo elétrico” e “campo magnético”. Mais correto seria falar em “fenômenos eletromagnéticos”, pois as manifestações elétricas e magnéticas são naturalmente inter-relacionadas.

representação. Sendo assim, é comum afirmações do tipo “a radiação eletromagnética com comprimento de onda de 650 nm é vermelha”, ou até mesmo, “o fóton de $\lambda = 440$ nm é azul”. Estritamente falando, essas afirmações representam um abuso de linguagem. A percepção da cor é um assunto mais relacionado com a neurociência e fisiologia do que com a física. As afirmações acima podem ser facilmente desconstruídas. Seria mais prudente afirmar “para $\lambda = 440$ nm, a radiação eletromagnética é normalmente percebida pelo ser humano como azul”. Mesmo assim existem várias ressalvas. Primeiramente devido à questão filosófica em torno de um conceito denominado “qualia”, que nesse caso se resume à questão “quem garante que o meu azul é o mesmo que o seu azul?”. Essa questão ainda está em aberto. Mas se sabe que as pessoas percebem as cores de formas diferentes, sendo o daltonismo um caso extremo. Mas um argumento mais forte para a desconstrução de que a cor estaria associada a um comprimento de onda pode ser resumido na questão:

Qual é o comprimento de onda associado à cor rosa?

A resposta para esta questão ajuda a compreender melhor a relação entre luz e cor.

Os displays de TVs, tablets e smartphones geram todas as cores modulando apenas a intensidade relativa entre elementos internos dos pixels com 3 cores diferentes: vermelho, verde e azul. Por isso esse sistema de gerenciamento de cores é chamado de RGB (do inglês Red-Green-Blue). Não por acaso, o olho humano possui três tipos distintos de cones receptores (elementos biológicos responsáveis pela detecção da luz no olho) cada um tendo sensibilidade otimizada para cada uma dessas três cores (Fig. 3.3).

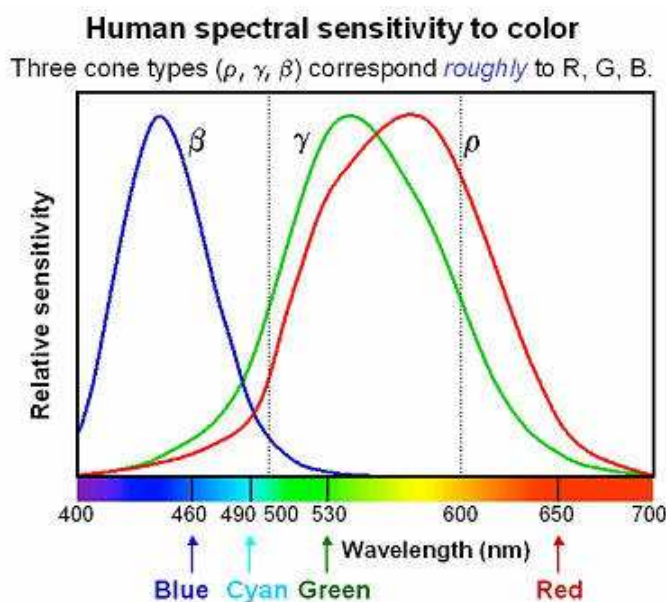


Fig. 3.3: Espectro de resposta sensível dos três cones receptores em função do comprimento de onda da luz incidente. Fonte: <https://www.quora.com/Why-are-only-VIBGYOR-visible-to-naked-human-eye>

A sequência de cores da luz visível pode ser esquematizada da seguinte forma:

Azul – Ciano – Verde – Amarelo – Vermelho

Em negrito estão apenas as cores disponíveis nos displays em sua forma primária.

As outras cores são obtidas da seguinte forma:

Amarelo – adicionando-se emissões de verde e vermelho. Note que o amarelo está entre o verde e o vermelho no espectro.

Ciano – adicionando-se emissões de azul e verde. Novamente, o ciano está entre o azul e o verde no espectro.

Branco – as três cores acesas juntas.

Preto – as três cores apagadas.

De fato, se fótons com comprimentos de onda de 530 nm e 650 nm chegarem na retina ao mesmo tempo, a percepção será a mesma se fótons de comprimento de onda 570 nm atingirem a retina. Ou seja, há duas formas de se enxergar amarelo, o que já desconstrói o conceito de que uma cor é associada a um comprimento de onda.

Que cor enxergaríamos se adicionarmos azul e vermelho? Seguindo a lógica da formação das cores amarelo e ciano, poderíamos concluir que enxergaríamos o verde, que está entre o azul e o vermelho no espectro. Mas a evolução é sábia. A retina tem os cones sensíveis ao verde e percebe que o fóton correspondente ao verde não está lá. Por isso, cognitivamente “inventamos” uma nova cor, que é o rosa, também conhecido como magenta. Ou seja, a cor rosa não aparece no espectro do arco-íris e não tem um comprimento de onda associado a ela. Esse é outro argumento que desconstrói a noção de que cor está associada a um comprimento de onda.

Esse processo de geração de cores é esquematizado na Fig. 3.4.

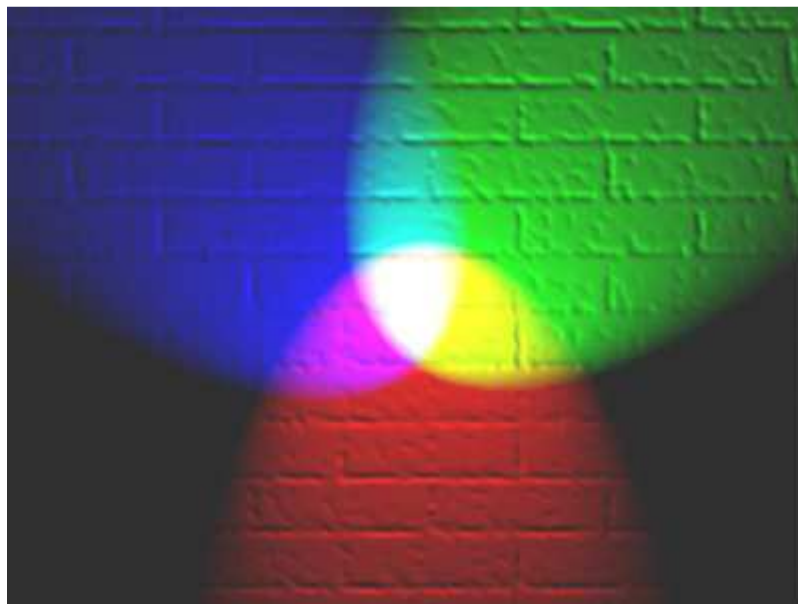


Fig. 3.4: representação do processo de geração de cores no modelo RGB.

Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/RGB_color_model

A explicação dada aqui é bastante esquematizada. Mas com esse princípio básico é possível gerar uma infinidade de cores e tonalidades. Softwares de imagem em geral dão as informações sobre as intensidades relativas de RGB para a obtenção de qualquer tonalidade.

O sistema RGB (presente nos displays e projetores) é aditivo, ou seja, trabalham com elementos que emitem luz e obtém cores por adição. Existe também o sistema de gerenciamento de cores voltado para impressão, que é subtrativo e trabalha com pigmentos. Não por acaso, esse sistema trabalha com as cores complementares, ou seja, com o ciano, amarelo, o magenta e o preto e é conhecido pela sigla CYMK (Cyan, Yellow, Magenta e Key).

Por fim, é interessante notar como existe uma correlação direta entre o sistema RGB de gerenciamento de cores e a sensibilidade dos cones receptores no olho humano. O grande poeta e cientista Johann Goethe já defendia que para entendermos a luz e a cor, devemos estudar profundamente o olho humano. E que se desejarmos compreender o som e a música, devemos estudar o ouvido humano. Ele tinha razão.

3.2 – A formação do Sistema Solar

O sistema solar possui uma idade de aproximadamente 4.6 bilhões de anos e se originou do colapso gravitacional de uma nuvem de gás. Desse colapso, formou-se o Sol, que detém 99,86% da massa total, os planetas e demais elementos do sistema. Como podemos perceber, o Sol é grande e massivo. O raio do Sol é 109 vezes o da Terra e sua massa é 330000 vezes maior. Isso garante que em seu interior haja grandes pressões e uma temperatura muito elevada, condições necessárias para que as reações nucleares aconteçam.

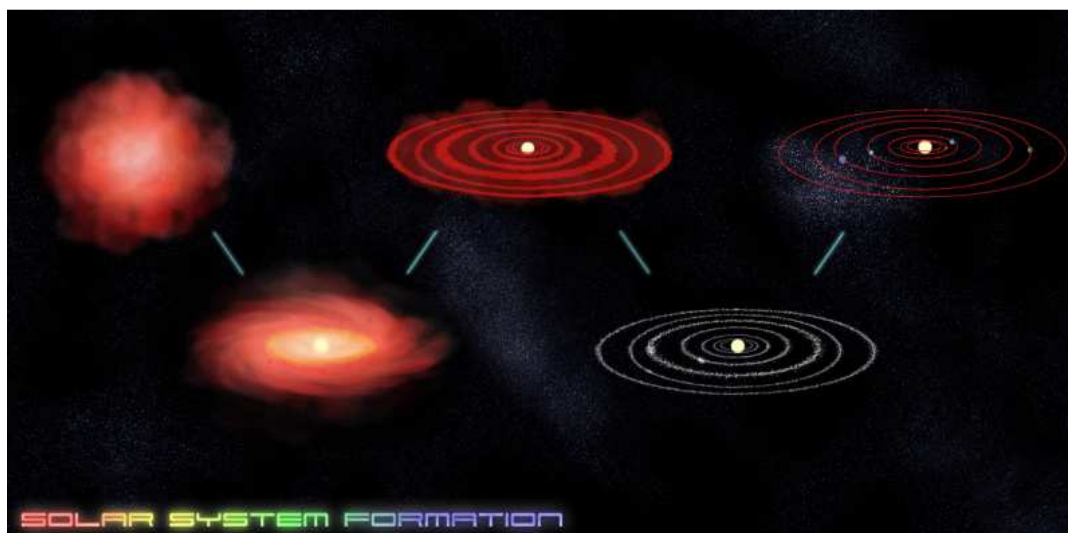


Fig. 3.5: Diagrama esquemático do Sistema Solar em formação.

Fonte: <http://astro.unl.edu/naap/esp/introduction.html>

O Sol é composto por hidrogênio (91%) e hélio (8,9%) com pequenas quantidades de metais. Essa composição é similar à composição do universo, quando consideramos apenas a matéria ordinária, isto é, se não considerarmos a matéria escura. O fato de o hidrogênio e hélio serem os elementos químicos mais simples, correspondendo aos dois primeiros

elementos da tabela periódica, ao mesmo tempo os mais abundantes, nos diz bastante sobre a origem e o destino do Universo.

3.3 – O Sol Como Um Reator Nuclear

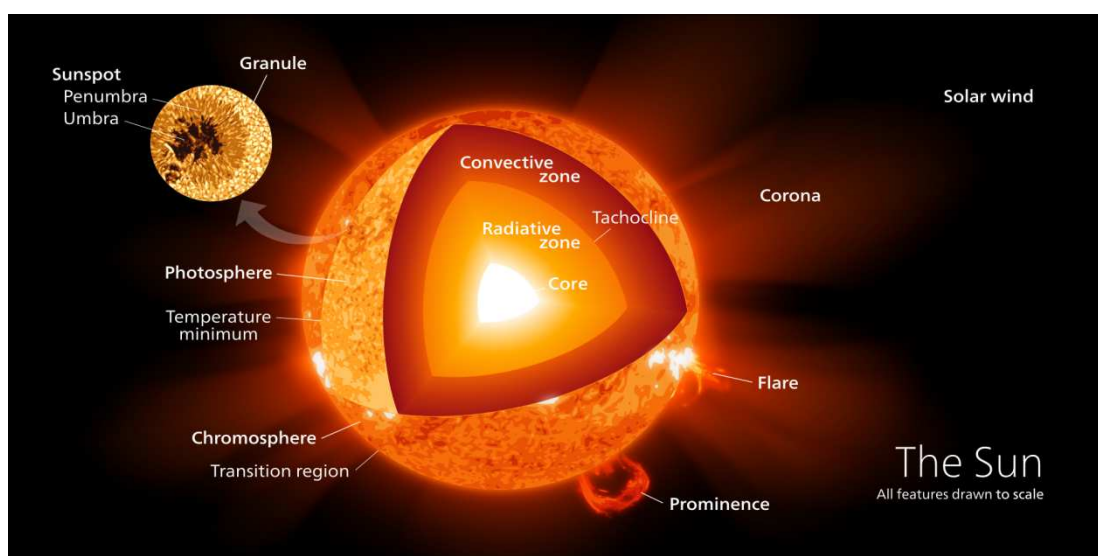
Até o momento, o Sol é o único reator nuclear de fusão funcional nas vizinhanças da Terra. Para entendermos melhor de onde vem a energia solar, temos que entender um pouco sobre reações nucleares.

Qual é a diferença entre uma reação química e uma reação nuclear? Uma das diferenças se refere à conservação de massa. Aprendemos no ensino médio que, em uma reação química, a soma das massas dos reagentes é igual à soma das massas dos produtos. Esse princípio básico da química já estava refletido na afirmação de Lavoisier “Na natureza, nada se perde, nada se cria, tudo se transforma” que mais tarde avançou em sofisticação com o desenvolvimento da estequiometria das reações químicas. A principal característica de uma reação nuclear, por sua vez, é a não conservação de massa, ou seja, parte da massa pode ser convertida em energia ou o inverso, onde energia é convertida em massa, cuja equivalência é descrita pela famosa equação de Einstein

$$E = mc^2 \quad (3.1)$$

Note que para se obter o equivalente energético da massa, deve-se multiplicá-la pelo quadrado da velocidade da luz, que é bem grande. Em outras palavras, uma pequena quantidade de massa se transforma em uma grande quantidade de energia. Para se ter uma ideia, a energia liberada na explosão da bomba de Nagasaki (21 kilotons de TNT) correspondeu a conversão de apenas 1g (isso mesmo, um grama) de matéria em energia².

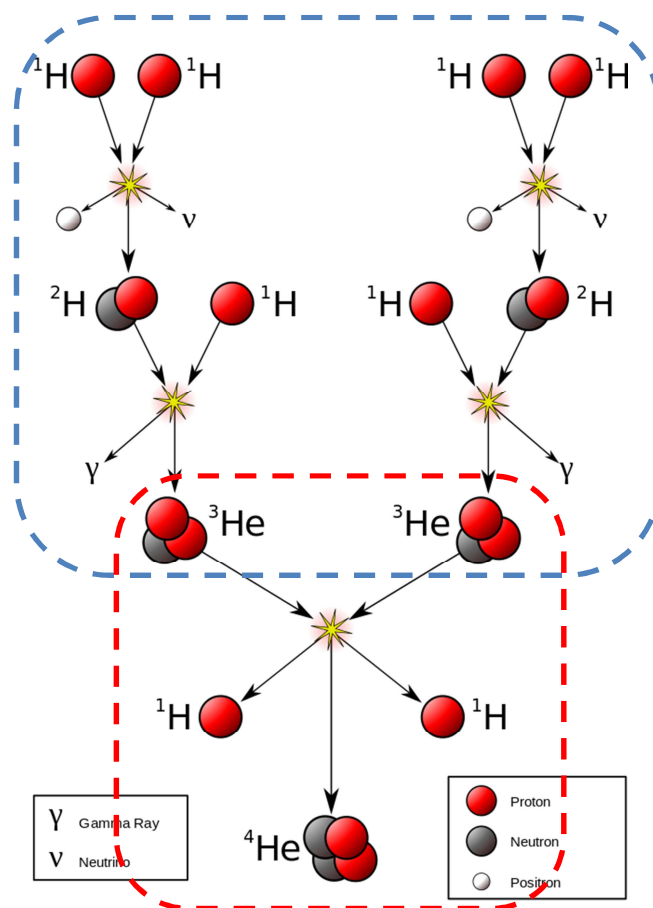
No Sol, por sua vez, cerca de quatro toneladas de matéria é convertida em energia a cada segundo. Isso ocorre por meio de uma reação de fusão chamada próton-próton. A Fig. 3.6 mostra esquematicamente a estrutura do Sol.



² Procure na internet vídeos sobre a operação crossroads (“operation crossroads”) de 1946, onde um teste com a mesma ogiva de Nagasaki (Fat Man) é feita no atol de Bikini.

Fig. 3.6: A estrutura do Sol. Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sun>

A reação próton-próton (Fig. 3.7) ocorre na parte central do Sol, onde a pressão é de 340 bilhões de atmosferas e a temperatura é de 15.7 milhões de graus Celsius. Nessas condições, a energia térmica é tão alta que desfaz as ligações interatômicas, ou seja, apesar de haver abundância de átomos de hidrogênio, não há moléculas de hidrogênio. Mais do que isso, a energia térmica desfaz as interações dentro do átomo, arrancando os elétrons de seus núcleos. Dizemos que a matéria constitutiva do Sol está na forma de plasma, ou ionizada. Assim, se desejamos descrever os processos que ocorrem no interior do Sol, os elementos envolvidos são os elétrons e os núcleos atômicos, que são predominantemente de hidrogênio (próton) e o hélio (partícula alfa, composta de dois prótons e dois nêutrons). Nesse contexto, pode-se dizer que na reação próton-próton, quatro prótons (núcleos de hidrogênio) se unem para formar uma partícula alfa (núcleo de hélio). Ou ainda mais simplificada e cometendo certo abuso de linguagem, pode-se dizer que “quatro hidrogênios formam um hélio”. Nessa última frase está implícito o significado do processo de nucleossíntese estelar, que representa vários processos que ocorrem nas estrelas dos mais variados tipos, onde elementos mais pesados são formados a partir de elementos mais leves. A nucleossíntese estelar explica a abundância de hélio no Universo, além da existência de outros elementos mais pesados, como o carbono, o oxigênio, nitrogênio, magnésio, ferro etc.

**Fig. 3.7:** Diagrama esquemático da reação nuclear próton-próton. Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_nucleosynthesis

A reação próton-próton ocorre em duas etapas principais, que podem ser descritas de forma simplificada pela sequência:

1. (Quadro tracejado azul) Dois pares de prótons se unem gerando dois núcleos de deutério (um próton e um nêutron). Para cada núcleo de deutério formado, um pósitron (o correspondente do elétron com carga positiva) e um neutrino são liberados, garantindo a conservação de energia e carga. O pósitron liberado é quase imediatamente aniquilado juntamente com um elétron liberando dois fótons de alta energia (raio gama). Cada núcleo de deutério formado reage com um próton formando um núcleo de hélio na forma de seu isótopo mais leve (^3He) mais um fóton de raio gamma.
2. (Quadro tracejado vermelho) A partir do ^3He existem 4 possíveis formas de se chegar ao ^4He . A forma mais comum, que ocorre 86% das vezes, é chamado de pp I, onde o ^4He é formado a partir de dois núcleos ^3He com a liberação de dois prótons. O pp I é o representado na Fig. 3.3. As reações pp II e pp III realizam a fusão de ^3He com ^4He preexistentes para formar ^7Be , que participa de outras reações para formar ^4He . Na reação pp IV, uma partícula de ^3He reage diretamente com um próton para formar o ^4He . Esta reação é extremamente rara, mas importante para entender a física dos neutrinos solares de altas energias.

É importante salientar que a descrição acima é simplificada. O processo como um todo é descrito pela física quântica e dividido em várias sub-etapas, cada uma delas com diferentes probabilidades de ocorrência e apresentando etapas alternativas correspondentes. Além disso, a reação próton-próton, apesar de ser a reação dominante no Sol, não é a única forma de converter hidrogênio em hélio. Nas estrelas maiores que o Sol, a reação mais comum é conhecida pela sigla CNO e envolve os elementos carbono, oxigênio e nitrogênio em um ciclo catalítico.

Como descrevemos no início do capítulo, o aspecto mais importante da reação próton-próton é que a massa do ^4He formado é 0,7% inferior à massa dos 4 prótons iniciais. Essa diferença é transformada em energia (fótons e neutrinos, estes últimos respondendo por apenas 2% da energia emitida pelo Sol). Os neutrinos, assim que são formados, levam apenas 2.3 segundos para viajar do núcleo do Sol até sua superfície, uma vez que praticamente não interagem com a matéria. Os fótons por sua vez, assim que são formados, sofrem inúmeras interações com as partículas e elementos que compõem o Sol, levando entre 10.000 e 170.000 anos para chegar até a superfície. De lá, levam apenas 8 minutos para percorrer a distância entre o Sol e a Terra. Para entendermos como estes fótons atuam, uma vez chegando à Terra, devemos entender melhor sobre radiação térmica.

3.4 – Radiação Térmica

Quando falamos sobre radiação térmica, é comum termos em mente os dispositivos de visão noturna ou a cor âmbar de objetos que estão muito quentes (Fig. 3.8). Nesse sentido podemos fazer várias perguntas interessantes. Uma barra de gelo irradia no infravermelho?

Todos os objetos, quando aquecidos apresentam a cor âmbar? Para respondermos a essas perguntas, devemos compreender certos aspectos da radiação térmica.



Fig. 3.8: (Dir.) Imagem térmica de uma locomotiva a vapor. O dispositivo que gerou a imagem é semelhante a uma máquina fotográfica, mas otimizada para detecção de fótons na faixa do infravermelho. (Esq.) Foto de uma barra metálica incandescente.

Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermography> e https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_transfer

Pode-se fazer um experimento simples com uma lâmpada incandescente dimerizável para se compreender dois dos principais aspectos da radiação térmica. A Fig. 3.9 apresenta a lâmpada em três níveis distintos de potência. Em potência baixa (a), vemos que a luminosidade da lâmpada é quase nula, e o filamento possui uma coloração avermelhada. Na potência média, a luminosidade aumenta ligeiramente e a coloração se torna alaranjada. Já em (c), observamos um drástico aumento na luminosidade, e a luz emitida passa a ser esbranquiçada. Daí podemos depreender duas leis básicas da radiação térmica. A lei de Stefan-Boltzmann que se refere à potência emitida (luminosidade) e a lei de Wien, que se refere à cor da radiação emitida.

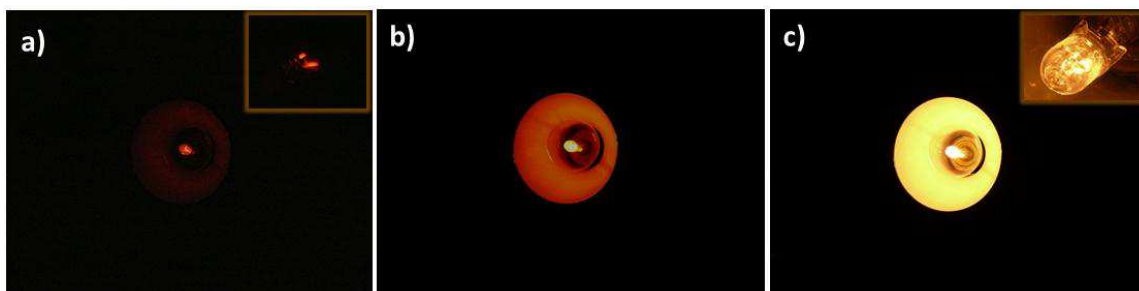


Fig. 3.9: Experimento com uma lâmpada incandescente dimerizável onde podemos observar a potência irradiada bem como a coloração característica em três potências diferentes: a) baixa, b) média e c) total (60W). No canto superior direito das imagens a e c incluímos imagem com o detalhe do filamento de tungstênio. Nesse caso foi utilizada uma lâmpada halógena, que é um tipo de lâmpada incandescente.

Vamos acompanhar a evolução da luminosidade (potência irradiada, ou seja, energia por unidade de tempo) da lâmpada ao longo das três situações. Na situação da imagem 3.9a, há baixa potência dissipada no filamento, e sua temperatura ainda é relativamente baixa, girando em torno de 1000 °C. Vemos que a luminosidade do filamento é desprezível. Já na situação da imagem 3.9b, podemos perceber certa luminosidade. Já na imagem 3.9c, quando a potência dissipada é a potência nominal da lâmpada (nesse caso 60W), a temperatura está em torno dos 3000°C e podemos perceber um grande aumento da luminosidade. Isso ilustra a lei

de Stefan-Boltzmann que relaciona a energia irradiada por um corpo de acordo com sua temperatura de acordo com a expressão:

$$E_T = \sigma T^4 \quad (3.2)$$

onde E_T representa a potência térmica irradiada (coloquialmente por vezes nos referimos por energia irradiada), σ é uma constante de proporcionalidade e T é a temperatura. Note que a potência irradiada aumenta com a quarta potência da temperatura. Isso explica o abrupto ganho de luminosidade entre uma situação e outra ao longo da sequência. Porém existe uma sutileza nessa fórmula, pois a temperatura deve ser expressa na unidade Kelvin para ser válida. Como sabemos, na natureza existe uma temperatura nula absoluta que é definida como 0 K e que corresponde a $-273,15^\circ\text{C}$, e a natureza térmica dos corpos começa a funcionar a partir de lá. Isso ficará mais claro mais adiante no livro, quando estudaremos a termodinâmica mais detalhadamente. Mas em todo o caso, quando estamos falando de milhares de graus Celsius, a conversão para Kelvin não faz muita diferença. Além disso, nossa análise foi feita visualmente, e como sabemos, o olho humano detecta apenas uma pequena faixa do espectro eletromagnético, por isso, perdemos parte do que está ocorrendo. Porém com um aparato experimental dedicado a esse tipo de medida, podemos obter um quadro mais completo do processo. Um aparato desse tipo é conhecido como espectrômetro. A Fig. 3.10 mostra esquematicamente o procedimento adotado em uma medida de espectrometria, onde o conceito é enfatizado e os detalhes técnicos são suprimidos.

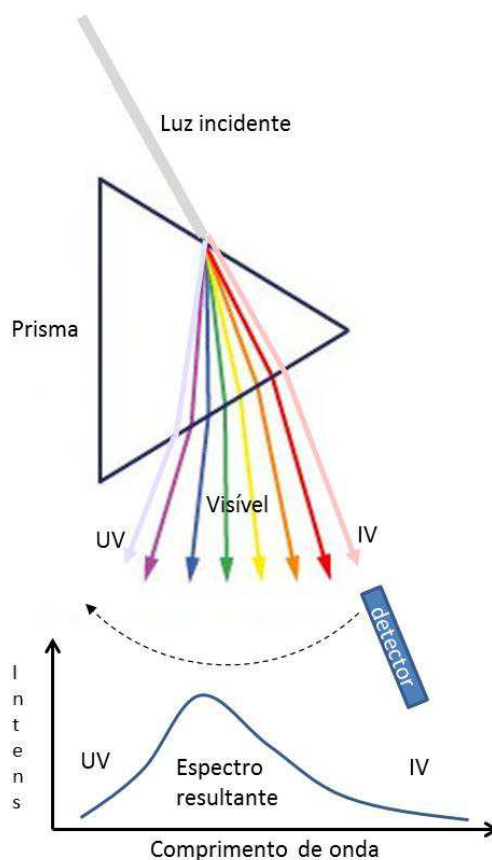


Fig. 3.10: Diagrama ilustrando o processo de espectrometria. Os termos UV e IV se referem a ultravioleta e infravermelho respectivamente. O gráfico na parte inferior representa o resultado da medida.

A luz a ser analisada é separada em função do comprimento de onda dos fótons constituintes. Isso pode ser feito por meio de um prisma em um processo difração imortalizado por Newton quando procurou demonstrar que a luz branca é composta por todas as cores do arco-íris, mas pode ser feito também com outras técnicas, como uma grade de difração. Após a luz ser difratada, um detector é utilizado para medir a intensidade luminosa para cada comprimento de onda. O resultado da análise é um gráfico esquematizado na parte inferior da Fig. 3.10, que correlaciona a intensidade emitida com o comprimento de onda.

Se pudéssemos refazer o experimento ilustrado na Fig. 3.9 usando um espectrômetro no lugar de uma análise visual, o resultado seria parecido com o ilustrado na Fig. 3.11.

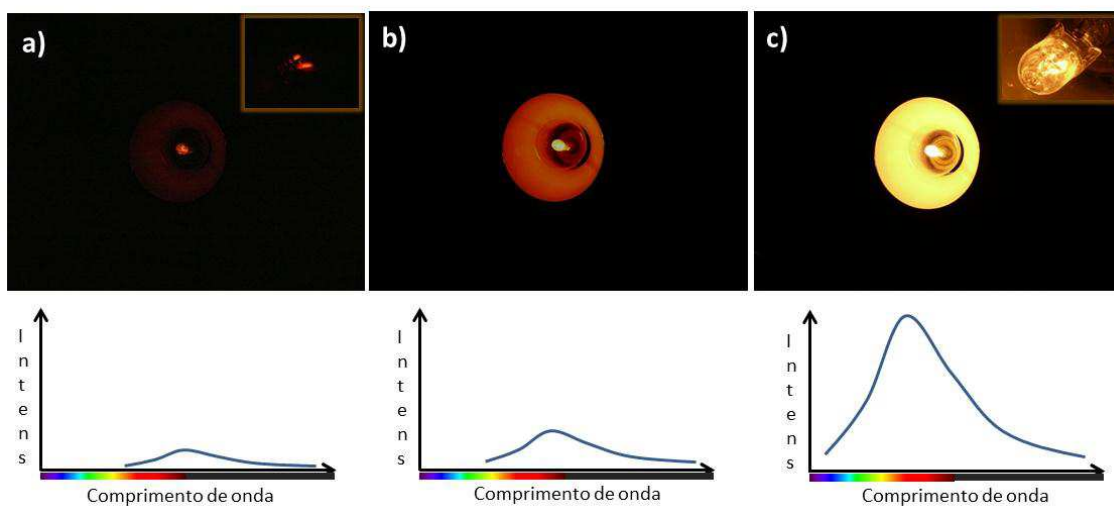


Fig. 3.11: Sequência de imagens da lâmpada dimerizável (Fig. 3.9) acompanhado com uma curva esquematizada do espectro resultante em cada caso.

Representando os três espectros gerados em um mesmo sistema de eixos, teríamos algo como ilustrado na Fig. 3.12. A intensidade luminosa é proporcional à área sob a curva em cada caso.

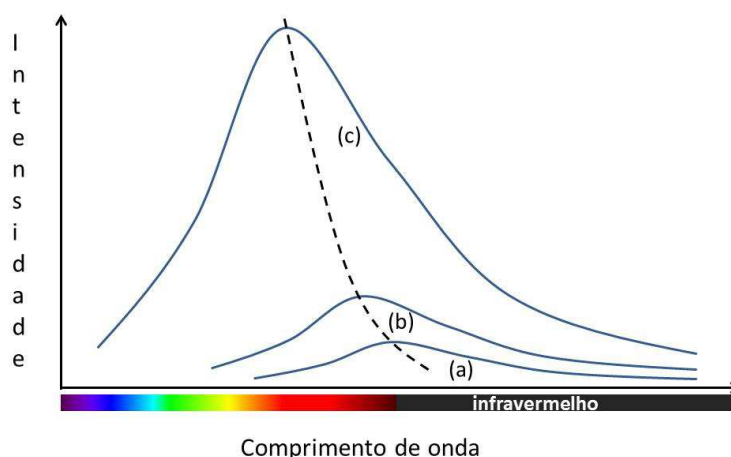


Fig. 3.12: Representação do comportamento geral dos espectros de irradiação do filamento de tungstênio nas situações (a), (b) e (c) da Fig. 3.11 colocadas em um mesmo sistema de coordenadas. A linha pontilhada representa o comportamento descrito pela lei de Wien.

Nessa análise mais criteriosa, podemos perceber as principais características da radiação térmica. Conforme se aumenta a temperatura, a energia irradiada aumenta em todos os comprimentos de onda, e a intensidade total (área sob a curva) aumenta drasticamente como descrito pela lei de Stefan-Boltzmann.

A lei de Wien, por sua vez, descreve o comportamento do ponto de maior intensidade do espectro de radiação térmica. Segundo essa lei, quanto maior a temperatura do corpo, mais o pico de maior intensidade se desloca na direção de menores comprimentos de onda. Essa tendência é destacada pela linha pontilhada na Fig. 3.12 e é analiticamente descrita pela expressão:

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{b}{T} \quad (3.2)$$

Onde $b = 0,028976 \text{ m.K}$. A essa altura, o leitor já deve ter percebido que o princípio de funcionamento da lâmpada incandescente é aquecer um material até a uma temperatura em que ele passa a irradiar na faixa do visível. O filamento de tungstênio é usado pois é um metal, permitindo que seja aquecido pela passagem de corrente elétrica e suporta altas temperaturas mantendo-se no estado sólido.

Outro fato interessante que podemos destacar da radiação térmica é que o espectro resultante dos corpos aquecidos possui um aspecto característico. Um modelo consistente para explicar estes espectros representou um desafio para os cientistas do início do Sec. XX, cuja solução culminou no nascimento da física quântica. No Cap. 1 destacamos como a hipótese do neutrino foi criada de forma a adequar o modelo de radiação beta de acordo com a conservação de energia. Algo parecido ocorreu com o problema dos espectros de radiação térmica no início do séc. XX. Até o final do Séc. XIX, o principal modelo, conhecido como Rayleigh-Jeans, previa que os corpos irradiariam uma quantidade infinita de energia, e com maior intensidade na parte mais energética do espectro (Fig. 3.13). O modelo era evidentemente inadequado, ainda mais frente às medidas de espectrometria, já disponíveis na época.

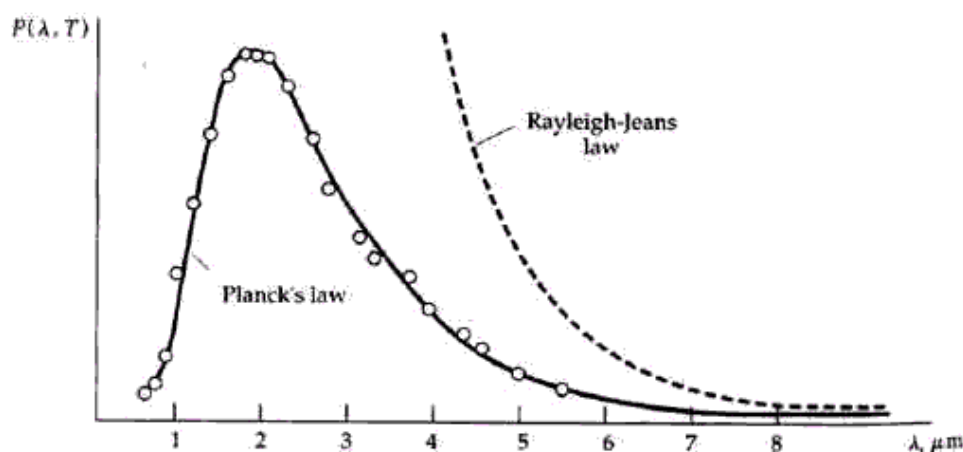


Fig. 3.13: Curvas calculadas para o espectro de radiação térmica dos corpos em diferentes modelos. A curva tracejada representa a teoria clássica conhecida como Rayleigh-Jeans e mostra como o comportamento diverge para pequenos comprimentos de onda (mais tarde chamada de “catástrofe do ultravioleta”). A curva contínua representa o modelo de Planck e mostra sua adequação aos dados experimentais (pontos).

Fonte: http://faculty.virginia.edu/consciousness/new_page_6.htm

Bem na virada do século, em 1900, Max Planck publicou um artigo com um modelo para explicar a radiação térmica. Nesse artigo ele elaborou uma hipótese que ia de encontro com um paradigma bastante estabelecido na ciência no qual se acreditava que a energia é uma variável contínua. Postulando que a energia é quantizada, Planck conseguiu propor um modelo que se mostrou bastante adequado para explicar os espectros de radiação térmica (Fig. 3.13). Este artigo marcou o início da física quântica. Na sequência, outros trabalhos vieram a corroborar a hipótese quântica, como o modelo de Einstein para o efeito fotoelétrico (1905) e o modelo de Bohr para o átomo (1913).

Podemos usar o conhecimento a respeito da radiação térmica para compreender muitos fatos de nosso cotidiano. Por exemplo, alguém pode perguntar: por que a lâmpada fluorescente é mais econômica que a lâmpada incandescente ou halógena? A Fig. 3.14 apresenta os gráficos obtidos com espectrometria dos três tipos de lâmpadas. Note que uma lâmpada é concebida para gerar radiação eletromagnética (ou fótons) na faixa do visível (luz). Na Fig. 3.14, podemos observar que o formato dos espectros é muito similar ao descrito pelo modelo de radiação térmica (curva contínua da Fig. 3.13). Olhemos para a curva referente a lâmpada incandescente (curva rosa). Veja como boa parte da energia é dissipada na região do infravermelho ($\lambda = 700 \text{ nm}$ ou maior). Sabemos, da Fig. 3.3, que a sensibilidade do olho humano responde bem somente no intervalo entre $\lambda = 400 \text{ nm}$ e 650 nm . Ou seja, a maior parte da energia irradiada pela lâmpada incandescente corresponde a uma radiação invisível ao olho humano. Em outras palavras, a lâmpada incandescente possui uma eficiência muito baixa em transformar a energia elétrica em luz visível, dissipando a maior parte na forma de calor (radiação infravermelha). Nesse sentido, alguém poderia argumentar: seguindo a lógica da radiação térmica, mais especificamente a Lei de Wien, basta aumentar a temperatura do filamento para que o espectro de emissão passe a ser predominantemente na faixa do visível. Bem, essa é a solução tecnológica parcialmente atingida pela lâmpada halógena. Note que a curva de emissão (em verde) possui o máximo deslocado para a região do visível. Se simplesmente aumentássemos a temperatura do filamento na lâmpada incandescente comum, teríamos problemas com a evaporação do tungstênio do filamento e deposição desse material nas paredes internas da lâmpada. Na lâmpada halógena, que também é um tipo de lâmpada incandescente, existe a combinação do filamento de tungstênio e um gás halógeno gerando o ciclo halógeno, que redeposita o tungstênio evaporado de volta no filamento, aumentando sua vida útil, garantindo a transparência das paredes da lâmpada e permitindo um design mais compacto.

O que ocorre com a lâmpada fluorescente? Note que o espectro correspondente (em azul) é distinto dos demais e não se adequa ao modelo de radiação térmica. Isso porque a lâmpada fluorescente não usa uma tecnologia térmica para gerar luz. Os detalhes do funcionamento da lâmpada fluorescente fogem do escopo desse livro, pois o modelo que descreve o processo é essencialmente quântico. Mas focando a análise no espectro correspondente, vemos que o processo gera quase 100% dos fótons na região do visível sendo mais eficiente.

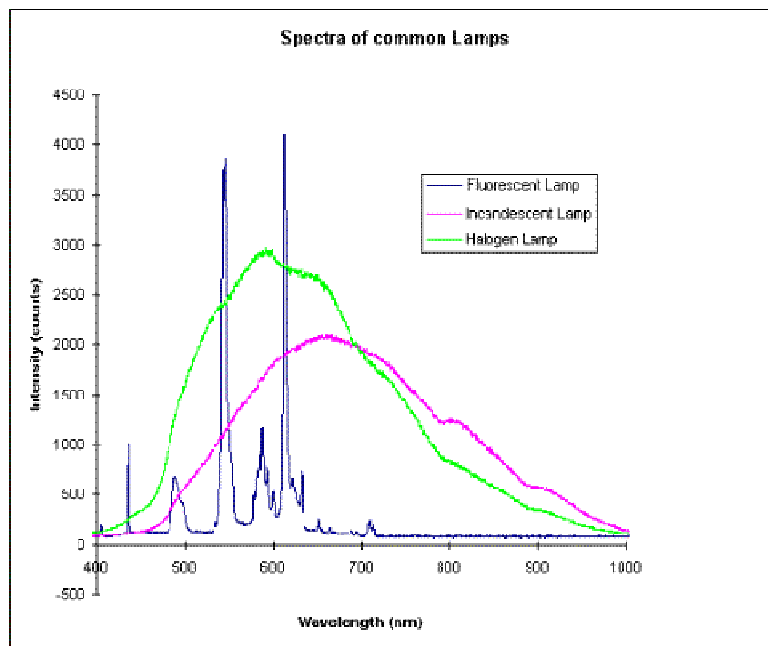


Fig. 3.14: Curvas de espectrometria de três lâmpadas representando as tecnologias: incandescente (em rosa), halógena (em verde) e fluorescente (em azul).

http://www1.union.edu/newmanj/Physics100/Light%20Production/producing_light.htm

Mas agora voltemos ao assunto principal do nosso capítulo, o Sol. Se analisássemos a radiação que vem do Sol em um espectrômetro, o resultado seria como o da Fig. 3.15.

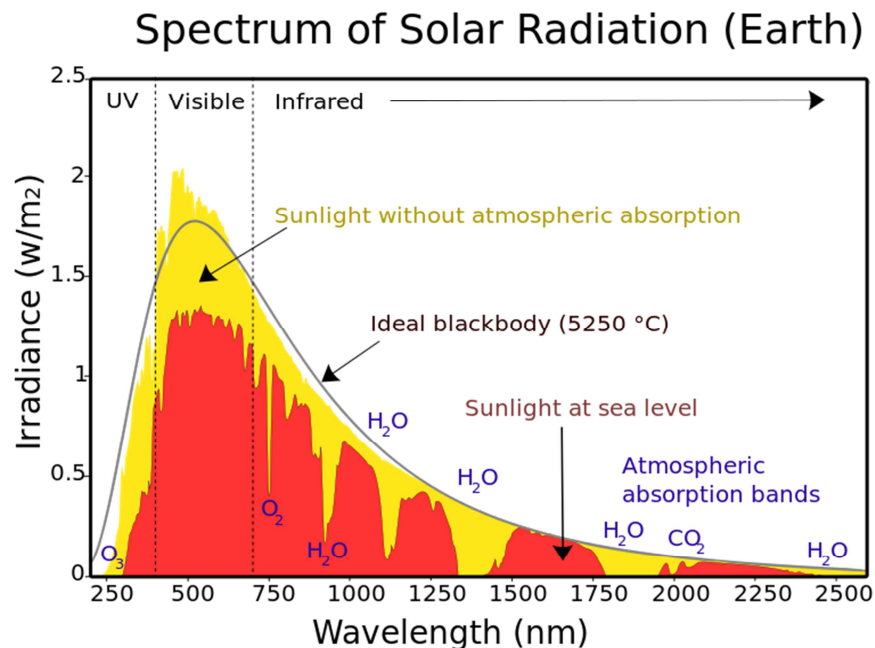


Fig. 3.15: Espectro de radiação térmica do Sol. A curva em amarelo representa o resultado sem a absorção da atmosfera (em um satélite no espaço). A curva em vermelho representa o espectro obtido ao nível do mar. A curva em preto representa o espectro de radiação térmica de um corpo a 5250 °C calculado a partir do modelo de Planck. Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sunlight>

A curva em amarelo representa o resultado de um espectrômetro localizado acima de nossa atmosfera (em um satélite no espaço). A curva em vermelho representa o espectro obtido ao nível do mar. Podemos perceber que parte da radiação solar é absorvida pela atmosfera, e o gráfico indica os elementos químicos de nossa atmosfera responsáveis por cada faixa de absorção. A curva em preto representa o espectro de radiação térmica de um corpo a 5250 °C calculado a partir do modelo de Planck. É com essa informação que sabemos a temperatura na superfície do Sol (ninguém foi lá e colocou o termômetro). Note a impressionante adequação do espectro calculado de acordo com o modelo de radiação térmica e o espectro solar. Note também como a máxima intensidade de irradiação se encontra bem localizada na faixa do visível. É natural concebermos que a evolução adaptou a visão humana para detectar a faixa de radiação mais abundante vinda do Sol.

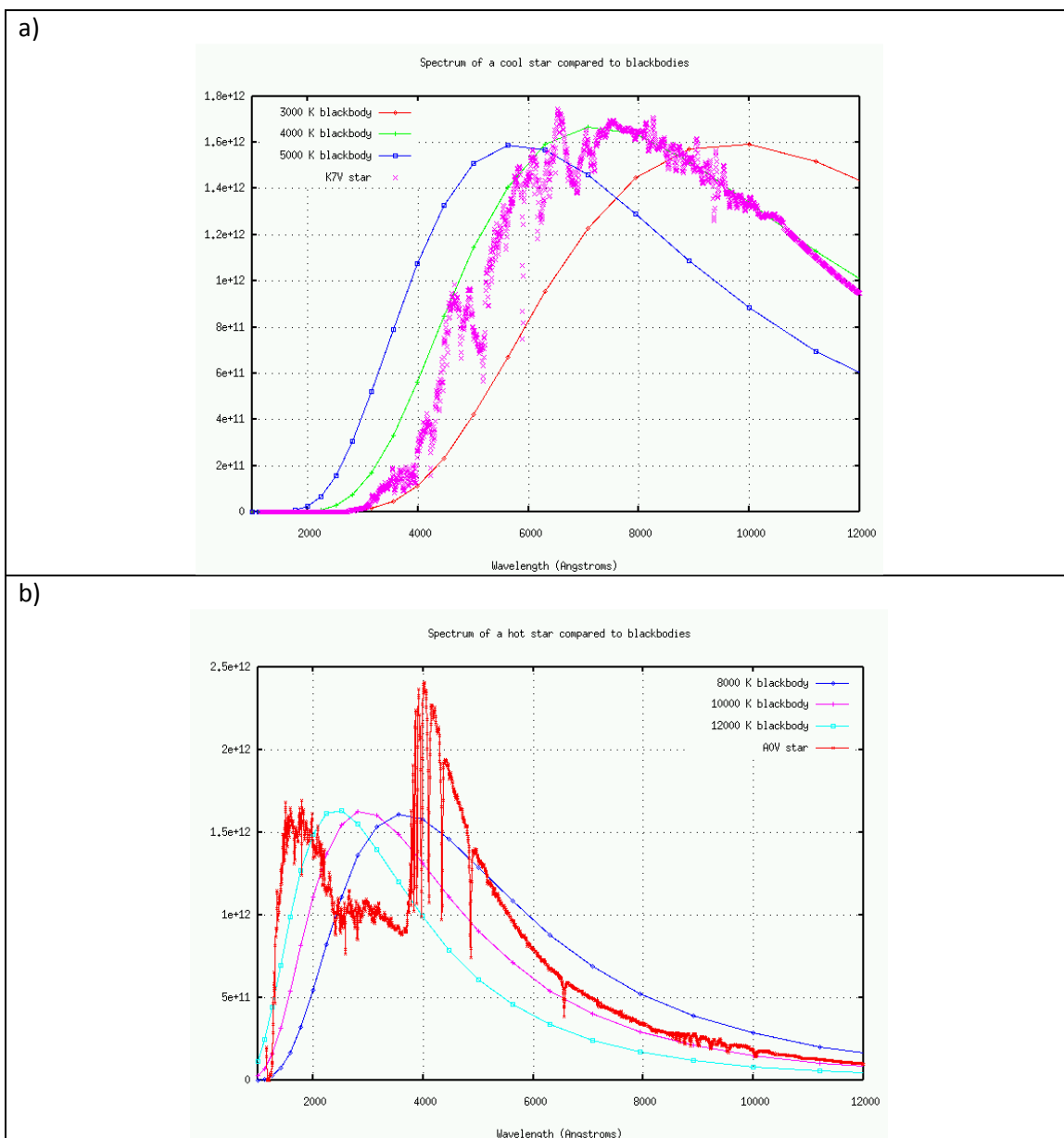


Fig. 3.16: Espectros de radiação térmica de duas estrelas distintas. A estrela representada em (a) apresenta uma temperatura em torno de 4000 K (3700 °C) e uma coloração avermelhada. Já a estrela representada em (b) apresenta uma coloração azulada e uma temperatura superficial em torno de 10000 K.
 Fonte: <http://spiff.rit.edu/classes/phys440/lectures/filters/filters.html>

Sendo o Sol uma estrela, podemos nos perguntar se o espectro de outras estrelas também se adequam ao modelo de radiação térmica. De fato, a resposta a essa questão é bem simples uma vez que a espectrometria das estrelas é uma medida bastante comum e é com esse tipo de medida que se sabe a temperatura da superfície dessas estrelas. É por isso que se diz que é possível se ter uma ideia da temperatura da estrela vendo a coloração delas. A Fig. 3.16 mostra o espectro de outras estrelas. A estrela representada em 3.16a apresenta uma temperatura em torno de 4000 K (3700 °C) e uma coloração avermelhada. Já a estrela representada em 3.16b apresenta uma coloração azulada e uma temperatura superficial em torno de 10000 K. No caso do espectro da estrela mais quente, em 3.16b, vemos que o formato da curva difere bastante do modelo da radiação térmica. Isso porque os fótons mais energéticos tendem a sofrer processos de absorção no hidrogênio presente nas partes mais externas da estrela.

No contexto exposto aqui, podemos dizer que o Sol é uma gigantesca esfera com massa em torno de 2×10^{30} kg (dois seguido de trinta zeros) composto principalmente por hidrogênio e hélio. Em seu núcleo, reações nucleares de fusão geram $3,846 \times 10^{26}$ W (384,6 yotta Watts) de energia, que chegam à Terra principalmente na forma de radiação eletromagnética (fótons). O espectro de emissão eletromagnética do Sol possui boa concordância com o modelo de radiação térmica.

Obviamente apenas uma pequena parte da energia produzida pelo Sol chega à Terra onde ela responsável por vários processos importantes. Porém se analisarmos em uma escala local, o aproveitamento da energia solar depende de vários fatores, tais como, a latitude, a estação do ano, período do dia, condições climáticas etc. A Fig. 3.17 ilustra a influência da latitude na atuação da energia solar sob a Terra. Nas latitudes menores, ou seja, nas regiões próximas ao equador, a incidência da radiação solar é mais direta. No verão, quando o Sol está no zênite (a pino – situação A), a potência da radiação solar é em torno de 1120 W/m^2 (Watts por metro quadrado). Isso ao nível do mar, já contando com a absorção da atmosfera. Acima da atmosfera, essa potência é de aproximadamente 1366 W/m^2 . Já para latitudes maiores (situação B) a incidência é mais indireta e essa potência cai. Isso explica a tendência geral em que as temperaturas caem com o aumento da latitude.



Fig. 3.17: Influência da latitude sobre a incidência da radiação solar na Terra.

A potência irradiada pelo Sol também não é constante. A Fig. 3.18 mostra que existe uma pequena oscilação dessa potência, com um ciclo de aproximadamente 11 anos. Há uma boa correlação entre o ciclo da potência irradiada com o índice de aparecimento de manchas e

erupções solares, indicando que a variação da irradiação está relacionada com processos internos do Sol.

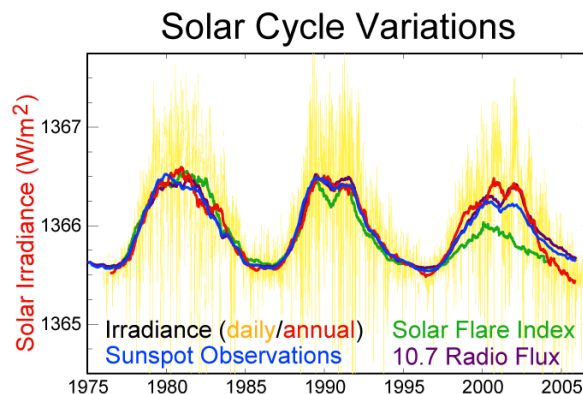


Fig. 3.18: Ciclo de variação da potência irradiada pelo Sol, e sua correlação com outros parâmetros importantes, como o número de manchas e erupções solares e fluxo de ondas de rádio.

Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cycle

Outro fenômeno importante relacionado com a irradiação solar sobre a Terra se refere ao efeito estufa. A Fig. 3.19 mostra esquematicamente como, de toda a irradiação solar, uma parte é refletida para o espaço pela atmosfera e outra parte é refletida pela superfície da Terra.

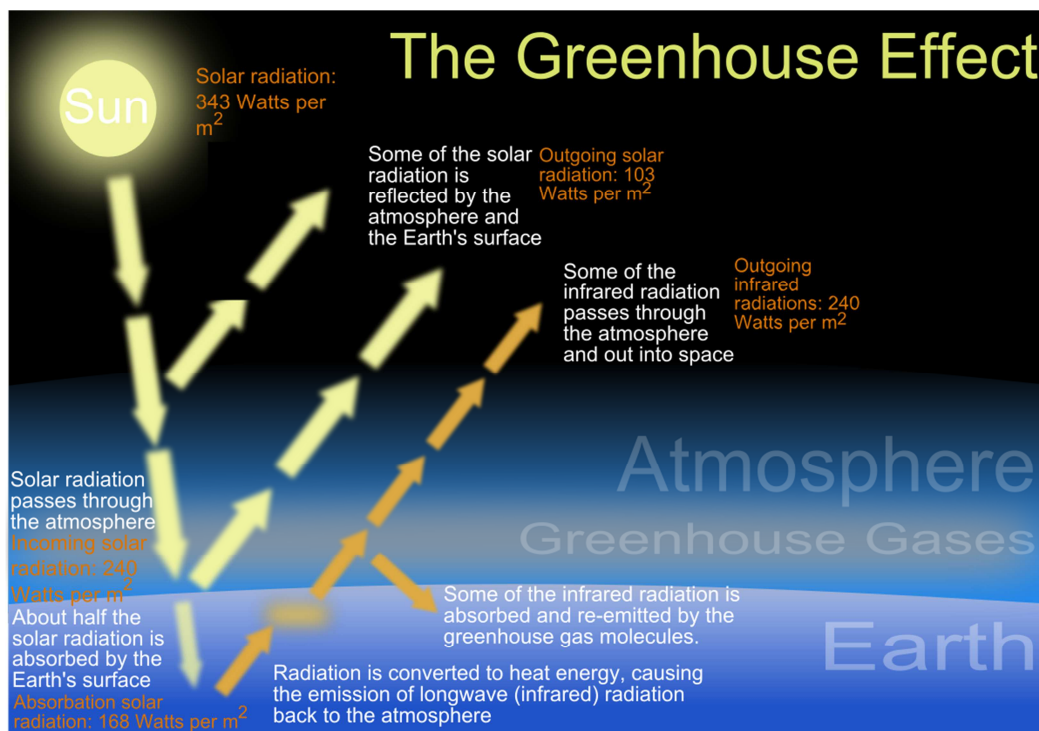


Fig. 3.19: Diagrama esquemático mostrando como a radiação solar é interage com a Terra.

Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse_effect

Por volta da metade da radiação solar que atinge a Terra é absorvida pela superfície. Essa absorção, juntamente com outros processos internos da Terra relacionados à energia

geotérmica, ajuda a manter a amena temperatura da superfície da Terra que conhecemos. Apesar das diferenças locais, podemos dizer que a temperatura média da Terra é de 16°C (289K) e, como sabemos, qualquer corpo com temperatura diferente de 0K irradia termicamente. Nessa temperatura a Terra irradia na faixa do infravermelho (pico de irradiação no comprimento de onda $\lambda = 10000$ nm), e parte dessa radiação fica retida na atmosfera gerando o efeito estufa. De forma geral, o efeito estufa é benéfico e necessário para o equilíbrio da biosfera. A grande discussão atual em torno do efeito estufa se refere ao aumento do efeito estufa, o que pode ser desastroso, não para a natureza, que já passou por mudanças mais drásticas, mas para a humanidade.

De fato, podemos também analisar a radiação emitida pela Terra dentro do modelo de radiação térmica. A Fig. 3.20 compara os espectros de radiação térmica do Sol e da Terra.

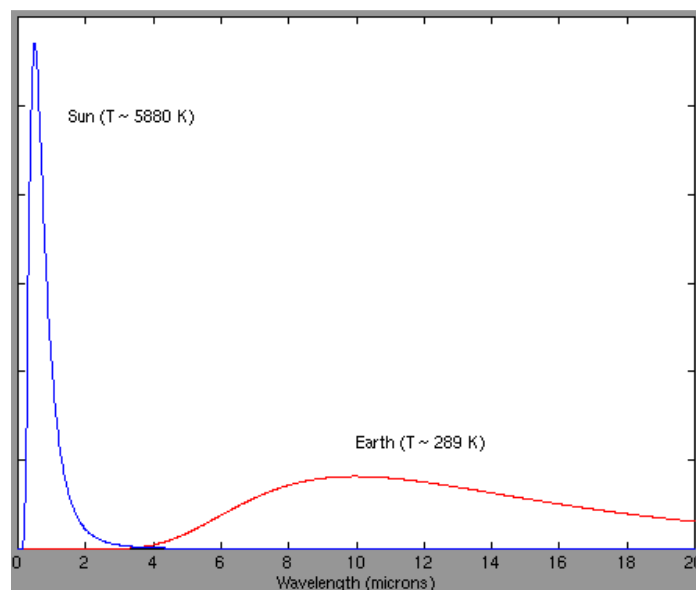


Fig. 3.20: Comparação entre os espectros de radiação térmica do Sol e da Terra. Para efeitos de comparação, a intensidade do espectro da Terra foi multiplicada por 500 000.

Fonte: http://marine.rutgers.edu/cool/education/class/josh/black_body.html

Em primeira aproximação, podemos dizer que a temperatura média da Terra se manteve constante ao longo dos milênios. Para a análise que queremos fazer aqui, as variações entre as eras glaciais é desprezível. Essa constância na temperatura indica que há um equilíbrio entre a energia que a Terra recebe do Sol e a energia que ela irradia de volta ao espaço. Se assim não fosse, por exemplo, se a energia recebida pelo Sol fosse maior do que a irradiada ao espaço, haveria um aumento gradual da temperatura da Terra.

Por outro lado, vemos na Fig. 3.20, que os fótons que a Terra recebe do Sol são distintos dos que ela reflete de volta ao espaço. Recebemos do Sol, fótons de alta energia, boa parte deles na faixa do visível, e a Terra emite fótons de baixa energia, na faixa do infravermelho. Nesse contexto, pode se dizer que, para cada fóton que chega do Sol, a Terra emite ao espaço 20 outros fótons. Coloquialmente falando, é como se a Terra se alimentasse de uma energia de alta qualidade e jogasse de volta ao espaço uma energia de baixa qualidade. Numa forma mais técnica, dizemos que há um desequilíbrio entrópico, lembrando que entropia é um conceito

que veremos mais detalhadamente adiante, mas aqui o leitor já tem a oportunidade de ter um contato contextualizado com o termo. Assim, muitos físicos defendem a ideia de que a Terra não se alimenta da energia do Sol, mas se alimenta da alta qualidade da energia do Sol. Logo, podemos dizer que na interação entre as radiações térmicas do Sol e a Terra, há um equilíbrio energético, mas há um desequilíbrio entrópico.

Por fim, o leitor mais experiente, e que buscou outras fontes de consulta, pode questionar o fato de nunca termos usado o termo “radiação do corpo negro” uma vez que esse termo é mais comum do que “radiação térmica”. Os autores desse livro consideram que o termo “corpo negro” representa um termo pedagogicamente desastroso para os estudantes que estão pela primeira vez em contato com os conceitos de radiação térmica. Porém o termo tem suas justificativas.

A radiação provida de um corpo pode ser originada de vários processos físicos, tais como a reflexão, absorção e transmissão de luz ou radiação incidente, bem como outros processos térmicos. Isso explica porque uma folha de árvore é verde e o vidro transparente, por exemplo. Mas a observação de objetos como o carvão em brasa e os metais em forjas indica que existe algo inerente à radiação térmica. Isso fez com que cientistas como Gustav Kirchhoff e Max Planck idealizassem um corpo ideal que manifestaria apenas os processos térmicos. Esse corpo teria que absorver toda a radiação incidente, não deixando que nada fosse refletido ou transmitido. Sabemos que um pigmento preto, idealmente, tem como característica absorver fótons em todos os comprimentos de onda do visível. Isso fez com que Gustav Kirchhoff imaginasse um corpo coberto por um pigmento preto feito a partir de fuligem (lampblack), que idealmente absorveria toda a radiação incidente. Daí a relação entre a área de estudo da radiação térmica e um “corpo negro”. Mas essa associação era imperfeita, pois todo pigmento absorve parte da radiação e reflete outras.

Outra forma de se conceber um corpo ideal para o estudo da radiação térmica seria um objeto que absorvesse a radiação refletida por ele mesmo, até que essa radiação atingisse o equilíbrio térmico com o corpo. A melhor forma de se fazer isso é imaginar um corpo oco, ou uma cavidade, com um pequeno orifício por onde entraria a radiação incidente (Fig. 3.21). Uma vez no interior do corpo, essa radiação interagiria com as paredes do corpo por meio de reflexão e absorção até atingir equilíbrio térmico com este.

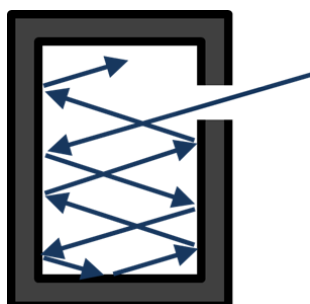


Fig. 3.21: Idealização de um corpo negro como sendo uma cavidade com um pequeno orifício através do qual a radiação incidente penetra e interage com o corpo.

Essa idealização até faz sentido. Porém, vimos como a teoria da radiação térmica é útil para compreendermos a radiação solar e de uma lâmpada incandescente, por exemplo, e reduzir estes objetos físicos à idealização da Fig. 3.21 é um exercício bastante desafiador. Por isso, iniciar o tratamento da radiação térmica explicando o conceito de corpo negro ao estudante pode ser pedagogicamente desastroso.

3.5 - Escalas de energia

Anteriormente, dissemos que a diferença entre um fóton de luz visível e um fóton na faixa do infravermelho se refere a sua energia. No entanto a conexão entre a escala atômica e a escala humana nem sempre é fácil de apreender.

No sistema internacional, usamos o Joule (J) como medida de energia, e ele é definido normalmente em relação ao conceito de trabalho. Se considerarmos o trabalho como a ação de uma força em um deslocamento, o Joule pode ser definido como a ação de um Newton (N) de força ao longo de 1 metro (m). Imagine que você está segurando uma (pequena) maçã de 100g em sua mão. Um Newton corresponde a aproximadamente a força do peso da maçã em sua mão. Deixe a maçã cair e ela terá aproximadamente 1 J de energia depois de 1 metro de queda. Seria exatamente 1 J se a aceleração da gravidade fosse exatamente $g = 10 \text{ m/s}^2$, porém o valor de g está mais próximo de 9.8 m/s^2 . Ou seja, se uma mesa tiver 1 m de altura, 1 J corresponde a energia que uma maçã pequena adquire ao cair da mesa até o chão.

Quando deslocamos a nossa análise para a escala atômica, é interessante que os padrões de medida sejam adaptados. Temos que buscar outra “mesa” e outra “maçã”. No exemplo anterior, a mesa representa uma diferença de potencial gravitacional e a maçã, um corpo típico. Quando vamos para escala atômica, usamos a diferença de potencial elétrico que é medida em Volts (V) e usamos como corpo de prova o elétron (que possui carga e sente uma força elétrica na presença de campo elétrico). Denominamos de elétron-volt (eV) a energia que um elétron adquire ao “cair” uma diferença de potencial de 1 Volt. A tabela 3.1 procura fazer uma correlação entre as energias dos fótons e sua conexão com elementos de nosso cotidiano.

Tab. 3.1: Energia correspondente a certos fótons, processos da natureza e máquinas humanas.

Elemento ou processo	Energia
Fóton no infravermelho com $\lambda = 10000 \text{ nm}$ – o representante mais comum na radiação térmica da Terra.	0,124 eV
Fótons na faixa do visível ($400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$) – representantes mais comuns na emissão do Sol	1,6 a 3,4 eV
Energia necessária para arrancar o elétron do átomo de hidrogênio (ionização do H)	13,6 eV
Fóton na faixa do Raio-X (depende do tipo de raio-X)	100 a 100 000 eV
Um pernilongo voando ³	1 Tev (um teraelétron-volt ou 1 000 000 000 000 eV)
As colisões geradas no LHC (Large Hadron Collider) – o centro de pesquisa que detectou o Bóson de Higgs	13 TeV

³ <http://news.berkeley.edu/2015/06/03/high-hopes-as-large-hadron-collider-pumps-protons-to-ever-higher-energy/>

Da Tab. 3.1 podemos perceber que a Europa investiu 7.5 bilhões de euros para construir um equipamento para realizar colisões com energia equivalente a 13 pernilongos voando. Novamente, há que se levar em conta a qualidade da energia envolvida. Uma bola de boliche lançada e uma bala de revólver possuem energias similares. Porém há muito mais tecnologia envolvida na construção do revólver e sabemos dos efeitos que uma bala pode realizar. Tecnicamente é bastante desafiador colocar a energia equivalente a um pernilongo voando em um próton.

3.6 – Energia Nuclear na Terra

(... em construção)

Questionário

1 - Qual é a correlação entre cor e comprimento de onda da radiação eletromagnética? Qual é o comprimento de onda referente à luz rosa? Justifique.

2 - Como funciona o sistema de cores baseado em pigmentos CYMK? Por que o preto está lá?

3 - Qual era a composição da nuvem de gás que originou o sistema solar? É exatamente a mesma composição do Sol?

4 - Quais são as diferenças entre as reações nucleares e as reações químicas? Quais dessas reações são mais energéticas?

5 - Qual é a relação entre a radiação térmica e a física quântica? Que hipótese inovadora foi aventada nesse contexto?

6 - Como a coloração apresentada por um corpo segundo a radiação térmica difere da coloração que percebemos dos objetos quando os vemos no nosso dia a dia? Explique.

7 - Do ponto de vista da radiação térmica, todos os corpos a uma mesma temperatura (por exemplo 3000 °C) apresentam a mesma cor. Pesquise e discuta sobre essa afirmação.

8 - Expressar a temperatura do interior do Sol em Celsius ou Kelvin faz diferença? Discuta.

9 - Muita gente entende o Sol como uma “bola de fogo”. Essa afirmação é correta? Discuta.

10 – Na Fig. 3.18 consta a informação de que a irradiação solar na Terra corresponde a 1366 W/m^2 enquanto que na Fig. 3.19 há a informação de que a irradiação solar na Terra é de 343 W/m^2 . Como conciliar essas duas informações?

11 - Porque as lâmpadas fluorescentes são mais eficientes do que as incandescentes?

12 – Defina o que é um corpo negro dentro do contexto de radiação térmica.

13 – Um filamento de tungstênio é aquecido a $T = 2000 \text{ K}$. Qual é a sua cor? Depois foi aquecido a $T = 3000 \text{ K}$. Estime o aumento da potencia irradiada pelo filamento. O que aconteceu com sua cor?

14 – A Tsar Bomba foi o maior artefato nuclear construído pelo homem a ser detonado, e liberou cerca de 210 Petajoules de energia ($210 \times 10^{15} \text{ J}$). Qual é a quantidade de massa, em Kg que foi transformada em energia? Resposta $\sim 2,3 \text{ Kg}$.