

# Monografia Sobre o Experimento de Espectroscopia Atômica e Molecular

GABRIEL MARTINS (197328), IAN BARBOZA (174822) E ANDERSON PITOLI (166188)

g197328@dac.unicamp.br, i147822@dac.unicamp.br e a166188@dac.unicamp.br

Grupo 2 (Vermelho)

Laboratório de Física Moderna - F 740 A - IFGW/UNICAMP

10 de agosto de 2020

## Resumo

Com esse experimento aprendemos como preparar, calibrar, e como usar um espectrômetro atômico. Feita a calibração, equipamento foi usado para adquirir o espectro atômico de diversas lâmpadas a fim de analisarmos suas características eletrônicas em função dos comprimentos de onda emitidos. Com a lâmpada de hidrogênio, analisamos as transições dos elétrons e descrevemos a série de Balmer para o H; com a lâmpada de Neônio vimos as muitas transições eletrônicas que ocorrem no espectro visível; e com as lâmpadas de Hélio,  $H_2O$  e  $CO_2$  comparamos seus espectros moleculares com os espectros atômicos de seus componentes. Em seguida verificamos como funcionam os LEDs e como cada um é montado para emitir apenas uma cor específica, e com isso, entendemos como funciona o sistema RGB de aparelhos eletrônicos. E por último, utilizamos o espectrômetro para estudar a radiação de corpos negros, por onde através de uma lâmpada que tratamos como corpo negro ideal e seus espectros coletados, conseguimos estimar a constante de dispersão de Wien como  $b = 3,095 \cdot 10^{-3} mK$ , e com ela pudemos estimar a temperatura do Sol como sendo  $T = 6068K$ .

## I. INTRODUÇÃO: ESTADO DA ARTE

A espectroscopia é de longe uma das ferramentas mais importantes que a ciência moderna possui, e alguns exemplos de onde ela está muito presente incluem as áreas de farmácia, biologia, química, astronomia, e física dos materiais. Como ela oferece uma maneira de se estudar átomos e moléculas, a espectroscopia é muito usada na identificação da composição de materiais, e através dela é possível identificar substâncias em concentrações baixíssimas em outros materiais, tendo aplicação na identificação, catalogação e composição de fármacos.

Resumo inadequado.  
Resumo do Procedimento Experimental  
e não do trabalho em si como um todo  
e as principais conclusões

Pontos  
Fortes: • Cobertura de todos os tópicos do sistema de cores / LEDs  
• Boa discussão  
• Bibliografia vasta, se realmente verificaram todas elas  
Fracos: • Resumo  
• Apresentação dos resultados  
• Má estimativa da de Wien e análise relacionada.  
• Análise dos dados marginal

Fazer conexão q os vídeos assistidos?

Outra aplicação importantíssima da espectroscopia na física moderna está na astronomia. Pelo estudo do espectro da radiação emitida por estrelas e galáxias distantes, percebeu-se que o universo está se expandindo aceleradamente, e também foi possível realizar experimentos que comprovam as teorias da relatividade restrita e geral.

Neste trabalho, serão apresentados e estudados alguns tópicos que a espectroscopia abrange, bem como suas aplicações e o impacto que ela causa na vida das pessoas e no estudo de física moderna.

## II. METODOLOGIA

O projeto consiste na realização e análise da espectroscopia em diversos objetos e situações: lâmpadas de hidrogênio, vapor d'água, gás carbônico, hélio, neônio, luzes de um monitor que utiliza-se do sistema RGB, luzes LED, radiação do corpo negro e o espectro solar. Para cada um desses tópicos existe uma subseção abaixo com a metodologia experimental utilizada na realização do experimento.

Devido à pandemia do coronavírus (COVID-19) e à suspensão das aulas presenciais, o grupo não pôde realizar o experimento aqui descrito, e os dados utilizados foram retirados da internet e devidamente referenciados, e também de dois relatórios de semestres passados, os quais podem ser encontrados nas referências [1] e [2].

### i. Materiais Usados

Para a realização do projeto, são necessários os seguintes materiais:

- Espectrômetro *Ocean Optics USB2000+*;
- Cabos de fibra ótica conectados à um computador equipado com o software do espectrômetro (*Ocean Optics SpectraSuite*);
- Lâmpadas de Mercúrio e Argônio para calibração da aparelhagem;
- Lâmpadas de Hidrogênio, vapor d'água, gás carbônico, Hélio e Neônio para a análise;
- Lâmpadas LED.

*e o monitor?*

### ii. Calibração do Espectrômetro

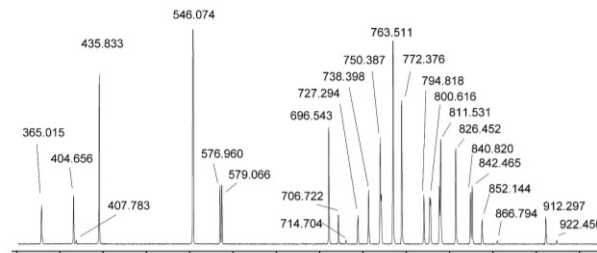
O primeiro passo é a calibração da aparelhagem usada no experimento, que deve ser montado de acordo com a figura 1:



**Figura 1:** Esquema da aparelhagem utilizada, sendo (1) a fonte de luz, (2) a amostra analisada, (3) o aparelho que separa o espectro luminoso e (4) o computador com o software para análise. [4]

A luz é emitida pela fonte (1), encaminhada através da fibra ótica até a amostra analisada (2), onde ocorre a interação da amostra com a luz, que é então encaminhada até (3) e tem seu espectro luminoso separado; por fim, os dados da interação são enviados ao computador (4).

A calibração é feita utilizando-se de lâmpadas de Mercúrio e Argônio, de acordo com o manual do espectrômetro [3]. A figura 2 representa as transições mais prováveis dos dois gases e é usada como padrão.



**Figura 2:** Linhas espectrais dos gases Hg e Ar [1]

Tabela-se quais pixels correspondem a cada comprimento de onda de acordo com a figura, e utiliza-se do método dos mínimos quadrados para resolver o seguinte polinômio de terceiro grau[4]:

$$\lambda_p = I + C_1 p + C_2 p^2 + C_3 p^3 \quad (1)$$

em que  $\lambda_p$  é o comprimento de onda do pixel  $p$ ,  $I$  é o comprimento de onda do pixel 0 e  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  são os 3 coeficientes do polinômio, medidos em  $(\text{pixel}/\text{nm})$ ,  $(\text{pixel}/\text{nm}^2)$  e  $(\text{pixel}/\text{nm}^3)$ , respectivamente. Existe, em cada medida, um erro de 0,5 nm no comprimento de onda, uma vez que este é o comprimento de onda de 1 pixel, resolução mínima do espectrômetro [3], o que é levado em consideração nos cálculos das próximas etapas.

### iii. Átomo de Hidrogênio

Na lâmpada de Hidrogênio, podemos calcular as transições eletrônicas através da equação de Rydberg, na qual calcularemos a constante de Rydberg com os dados obtidos:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (2)$$

Como os dados utilizados estão no espectro visível, tem-se que as transições fazem parte da série de Balmer ( $n_1 = 2$ ), e como as transições mais prováveis são as que possuem menos energia, pode-se assumir então que  $n_2 = 3$ ,  $n_2 = 4$  ou  $n_2 = 5$ .

### iv. Análise de Vapor d'água, Gás Carbônico, Hélio e Neônio

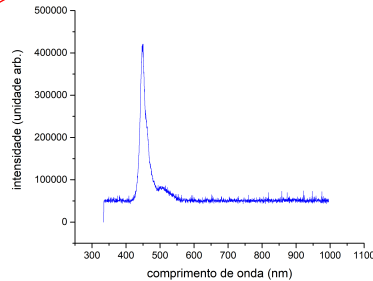
Para a análise das substâncias listadas acima, serão levados em consideração, além das transições eletrônicas, dois outros fatores que influenciam no espectro observado: o comportamento estrutural das moléculas e a hibridização dos orbitais  $s$  e  $p$  dos átomos.

Numa molécula, as transições eletrônicas são influenciadas por outros fatores estruturais e comportamentais, como os espalhamentos, vibrações e rotações moleculares. Tais fatores envolvem trocas energéticas ao acontecer, o que se traduz no espectro como vários picos menores em determinadas regiões de comprimento de onda.

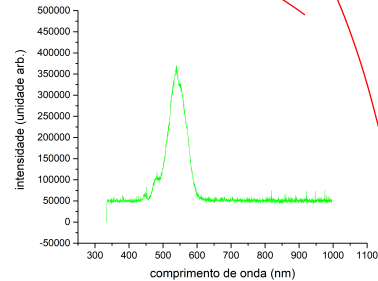
Há também a hibridização dos orbitais  $s$  e  $p$ . Esse processo ocorre quanto a diferença energética desses dois orbitais em um átomo é relativamente baixa, o que leva esses orbitais a se misturarem, criando orbitais moleculares híbridos, com novos formatos e energias próprias, também podendo ser percebido como picos menores no espectro.

## v. Sistema RGB

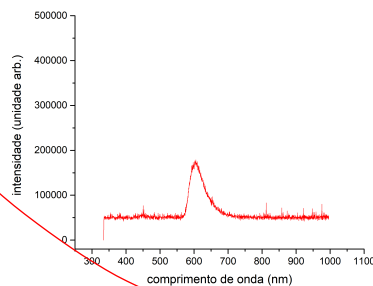
Utilizando o espectrômetro para capturar as cores vermelha, verde e azul de um monitor de computador obtemos os gráficos de:



(a) Espectro do monitor azul



(b) Espectro do monitor verde



(c) Espectro do monitor vermelho

*Combinar os dados  
em um único gráfico!*

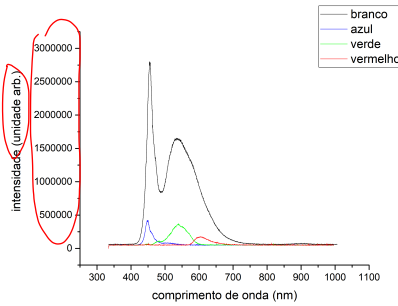
**Figura 3:** Espectros dos componentes RGB

Pesquisando sobre o funcionamento do sistema, teve-se conhecimento do procedimento de formação de imagens com o RGB (Red Green Blue), onde pontos de luzes de cada cor são concentrados em uma parte do monitor. Em posse dos gráficos obtidos desse experimento analisamos principalmente em qual frequência o espectrômetro registrou a maior intensidade relativa, nos mostrando o "pico" da cor relacionada. Posteriormente, é feita a medição de outras cores dispostas em outros LEDs, sendo essas laranja, roxo, verde claro e branco, e depois de coletar os dados, sobre-escrevemos os registros com os três espectros do RGB, e assim obtemos as imagens da figura 4.

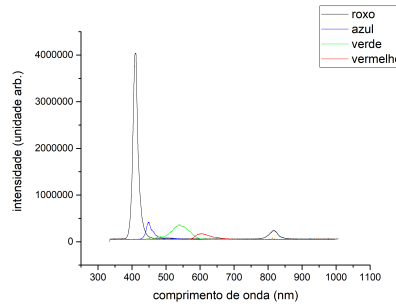
Os dados foram coletados ao monitorar cada cor no monitor do laboratório e utilizando-se o espectrômetro para a medição, também percebemos que em nenhuma situação as luzes eram monocromáticas, uma vez que o pico possui uma banda espectral não dispersível, ou seja, a forma se aproxima mais de uma gaussiana do que apenas uma linha como nas lâmpadas de Hélio, por exemplo.

## vi. LED (Light Emitting Diode)

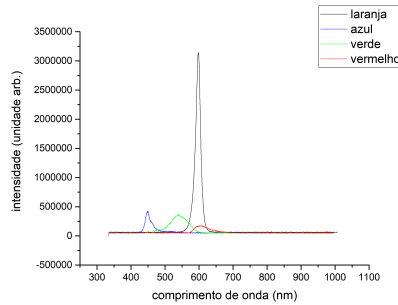
Com a mesma aparelhagem experimental, voltamos nossa atenção agora para os LEDs, diodos P-N que emitem luz ao serem polarizados positivamente. Agora, iremos analisar cada cor mais precisamente dado o seu valor nominal e o valor lido no pico de cada figura fornecida pelos dados do espectrômetro encontrado no laboratório. Com os valores nominais para os LEDs roxo, laranja, branco e verde claro, é possível ler na figura 4 onde os picos dessas cores se encontram, e comparar ambos os valores.



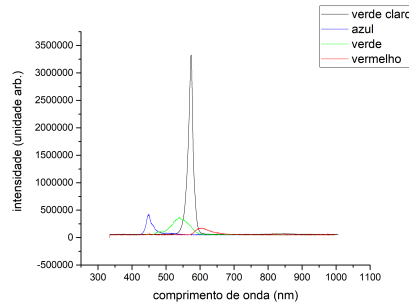
(a) Espectro do monitor na cor branca



(b) Espectro do monitor na cor roxa



(c) Espectro do monitor na cor laranja



(d) Espectro do monitor na cor Verde Claro

Figura 4: Espectroscopia de diversos LEDS de cores diferentes.

cor	valor lido	valor nominal
branco	450*	454.99
laranja	600	599.01
roxo	410	408.52
Verde claro	570	575.24

Tabela 1: Dados dos espectros dos LEDS

\* para o pico mais intenso do LED branco

e as incertezas? Unidades?

Título da tabela sempre acima dela!!

A principal fonte de erro é ao se assumir a exata posição do pico, devido a resolução da imagem e do programa ao retornar os gráficos com os dados embutidos.

## vii. Radiação do Corpo Negro

Em 1860, o físico alemão Gustav Kirchhoff introduziu a ideia de um corpo negro[7], que é a idealização de um corpo capaz de absorver toda a radiação eletromagnética incidente (independente de qual for a frequência e sem haver perda por reflexão). Um corpo negro ideal é capaz de irradiar energia na mesma taxa que absorve, e o espectro emitido pela radiação depende apenas da temperatura do corpo, como descrito pela Lei de Planck. No final do século XIX, Wilhelm Wien chega em uma relação que calcula a emissão de radiação de corpo negro para qualquer temperatura. Os espectros (para cada temperatura T) possuem um pico, e o valor do comprimento de onda associado à intensidade de emissão máxima,  $\lambda_{max}$ , pode ser obtido pela seguinte relação, denominada de Lei de Wien[8]:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (3)$$

Onde  $b$  é uma constante de proporcionalidade, também denominada de constante de dispersão de Wien. Um exemplo do espectro de corpo negro pode ser visualizado na figura (5).

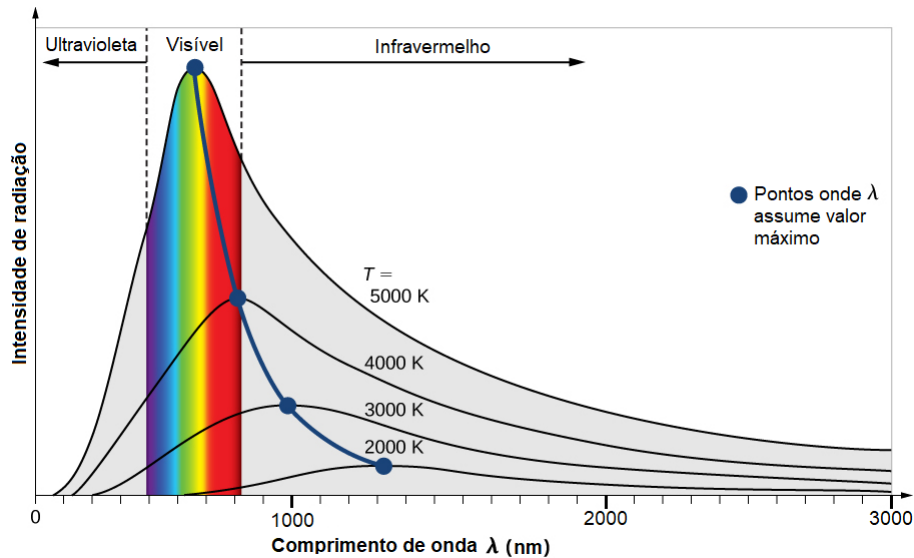


Figura 5: Espectro de um corpo negro ideal

Com essas relações, podemos encontrar o valor da constante  $b$  nas condições do nosso laboratório. Com uma lâmpada incandescente e multímetros, coletam-se dados sobre o espectro que a lâmpada emite para determinados pares tensões-correntes, para podermos aplicar a Lei de Stefan-Boltzmann ( $P = \sigma AT^4$ ). Já que uma lâmpada funciona como um resistor, temos que  $P = Ui$  o que nos dá a seguinte equação para a temperatura da lâmpada:

$$T = \sqrt[4]{\frac{Ui}{A\sigma}} \quad (4)$$

Onde  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  é a constante de Stefan-Boltzmann[9], e  $A$  é a área da superficial do filamento. Assumindo que o diâmetro de tal filamento seja próximo de 1mm, temos que  $A = 7,85 \times 10^{-7}$ .

Unindo a equação (4) com a Lei de Wien (3), chegamos na equação que será usada para evidenciar o valor de  $b$ :

$$b = \lambda_{max} * \sqrt[4]{\frac{Ui}{A\sigma}} \quad (5)$$

Assim, temos uma maneira de relacionar o  $\lambda_{max}$  de cada ajuste com o seu respectivo potencial e corrente. Para cada par tensão-corrente, obtemos uma linha no espectro plotado, e através dela podemos encontrar um valor para  $\lambda_{max}$  e aplicar na equação (5). Então calculamos a média entre os valores encontrados para adquirir um valor aproximado para a constante  $b$ .

### viii. Temperatura do Sol

Como o Sol emite radiação produzida em seu interior, podemos considerá-lo como um corpo negro, o que nos permite aplicar a Lei de Wien. Com ela, podemos estimar a temperatura da superfície solar através da coleta do espectro da radiação emitida. O procedimento porém é realizado de forma contrária ao de como foi na etapa anterior sobre radiação de corpo negro. Ou seja, inicia-se coletando o espectro, para então podermos chegar em um valor aproximado para a temperatura  $T$ . Através dos dados adquiridos, podemos assumir o valor de  $\lambda_{max}$  através da figura do espectro coletado, e já que

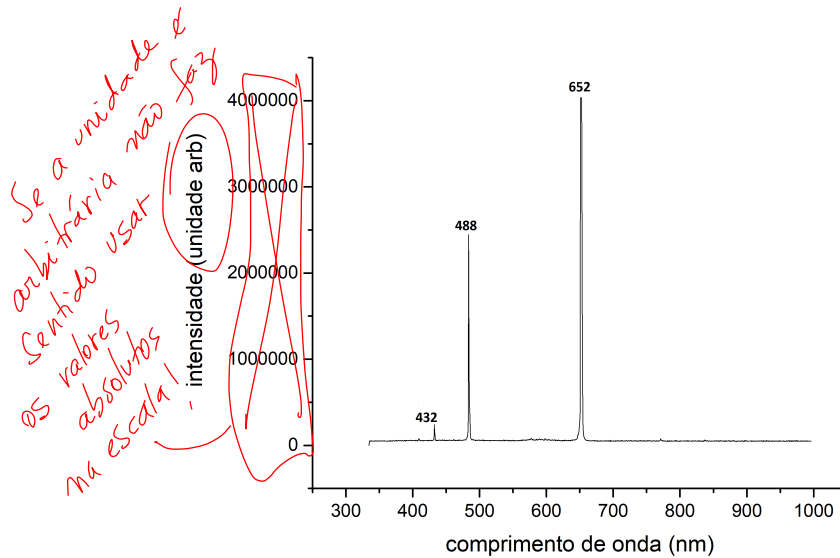
teremos o valor de  $b$  encontrado na etapa passada, podemos obter a temperatura da superfície solar da seguinte forma:

$$T_{Sup.Sol} = \frac{b}{\lambda_{max}} \quad (6)$$

### III. RESULTADOS, ANÁLISE DE DADOS E DISCUSSÕES

#### i. Hidrogênio

Com os dados recolhidos de uma lâmpada de Hidrogênio, foi obtido o espectro da figura 6.



**Figura 6:** Gráfico do espectro do Hidrogênio.

Como dito na seção iii da Metodologia, os picos correspondem às transições da série de Balmer para  $n_2 = 3$ ,  $n_2 = 4$  ou  $n_2 = 5$ . Com isso, é possível calcular a constante de Rydberg com a equação (2):

$$\frac{1}{652} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) \Rightarrow R = (1,104 \pm 0,001) \times 10^7 [m^{-1}] \quad (7)$$

$$\frac{1}{488} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2} \right) \Rightarrow R = (1,093 \pm 0,001) \times 10^7 [m^{-1}] \quad (8)$$

$$\frac{1}{432} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{5^2} \right) \Rightarrow R = (1,102 \pm 0,001) \times 10^7 [m^{-1}] \quad (9)$$

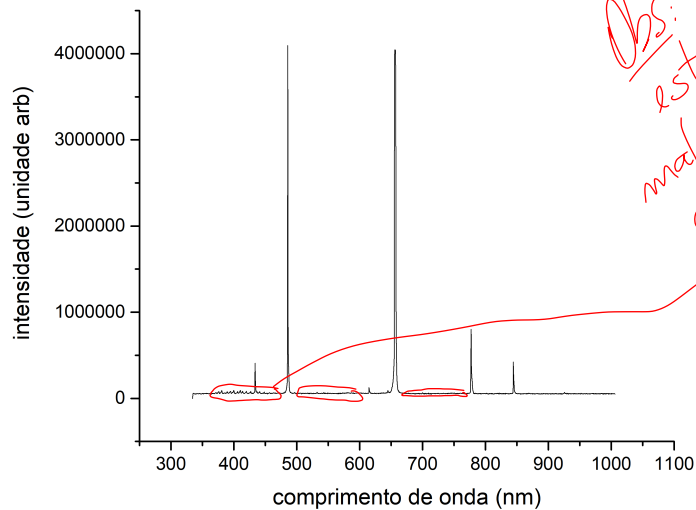
Pode-se ver que as constantes obtidas se aproximam do valor teórico da constante ( $R = 1,097 \times 10^7$ ) [13], porém com uma diferença, que pode ser explicada pela má calibração da aparelhagem. Também percebe-se que o gráfico é composto apenas por picos bem definidos, referentes às transições eletrônicas, visto que no Hidrogênio não ocorre a hibridização. Dessa forma, conclui-se que o modelo de átomo de Bohr é uma boa aproximação para a análise do hidrogênio. ✓  $\pm 0,5nm$  ou  $\pm 0,3nm$ ?

Para o cálculo da incerteza da constante, foi considerado o erro de  $0,5nm$  da resolução do espectrômetro, e utilizada a equação de propagação de incertezas (10), sendo  $\sigma_\lambda$  o erro da resolução:

$$\sigma_R = \frac{R\sigma_\lambda}{\lambda} \quad (10)$$

## ii. Água

Ao se comparar os espectros do vapor d'água e do hidrogênio, percebemos que estão presentes os 3 picos do hidrogênio no vapor d'água, sendo um deles mais intenso devido à presença de dois átomos de hidrogênio na molécula de água, também há outros dois picos provenientes do oxigênio presentes na molécula.



*Obs: este espectro foi mal obtido pois não detectaram a estrutura da molécula e precisão! Faltou ajustar o ganho do equipamento p/ tanto. Esta estrutura é evidente no espectro do sol.*

Figura 7: Espectro do vapor d'água ( $H_2O$ ).

Os picos estão bem definidos e espalhados, visto que na molécula de água não ocorre hibridização e os fatores comportamentais da molécula não se mostram expressivos. Pode-se concluir também que em uma molécula ocorre transições de átomos simples, mesmo os átomos estando ligados.

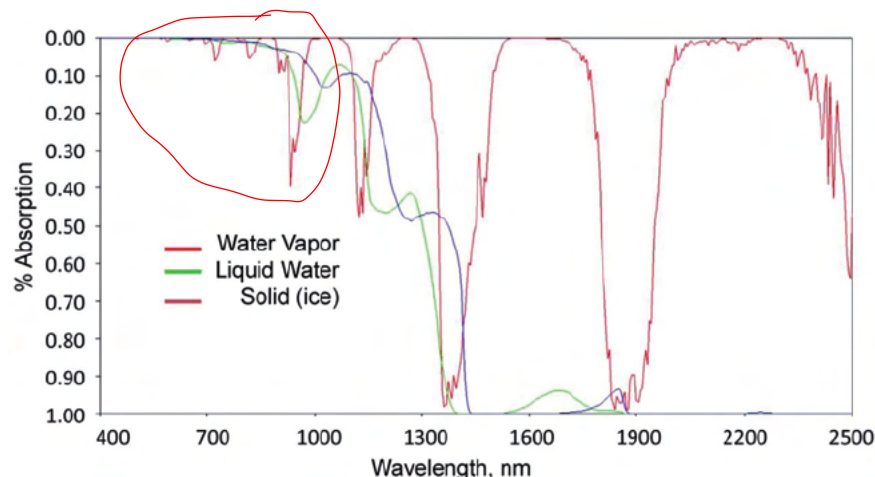


Figura 8: Espectro dos três estados físicos da água na região infravermelha [10].

A figura 7 foi feita utilizando um espectrômetro que abrangia somente o espectro visível, a figura 8 mostra o espectro de absorção da água nos seus 3 estados no espectro infravermelho, sendo possível observar que a água absorve muito mais radiação infravermelha do que visível. Isso explica o motivo



da coloração azul do céu, visto que a água, junto com outros gases presentes na atmosfera, como o gás carbônico, absorvem muito mais radiação próxima do vermelho, fazendo com que a luz azul possua mais intensidade.

O motivo da água líquida também possuir uma absorção muito mais intensa na região infravermelha é a quebra das ligações intermoleculares conhecidas como pontes de hidrogênio, que ocorrem entre as moléculas de água. Tal fato explica o elevado calor específico da água, uma vez que parte do calor na forma de infravermelho é utilizado para romper as ligações intermoleculares, e as moléculas em si necessitam de mais calor para que ocorra o aumento da temperatura do sistema.

*explicar isso!  
A cor do céu -  
tem a ver  
cf a refração  
da luz na  
gota do  
vapor d'água.*

### iii. Gás Carbônico

No espectro de gás carbônico pode-se ver os 2 picos do oxigênio presentes na figura 7, reforçando a afirmação de que ocorrem transições de átomos simples em moléculas. ✓

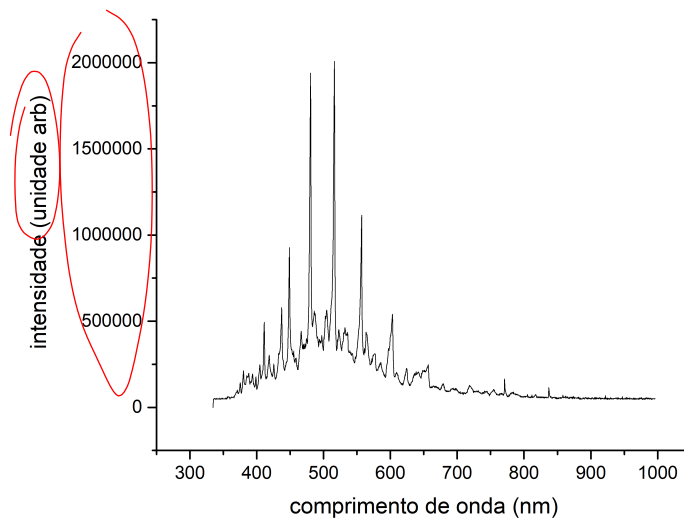


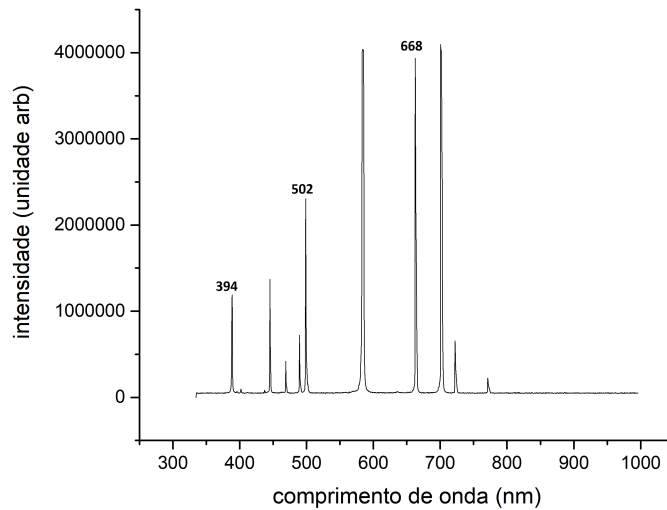
Figura 9: Espectro do gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ).

As energias dos orbitais  $2s$  e  $2p$  do átomo de carbono são  $E_{2sC} = -19,4 \text{ eV}$  e  $E_{2pC} = -10,7 \text{ eV}$  ( $\Delta E_C = 8,7 \text{ eV}$ ), enquanto no oxigênio  $E_{2sO} = -32,4 \text{ eV}$  e  $E_{2pO} = -15,9 \text{ eV}$  ( $\Delta E_O = 16,5 \text{ eV}$ ) [6]. Com isso, podemos ver que a diferença energética dos orbitais do carbono é baixa em relação ao oxigênio, portanto ocorre a formação de orbitais moleculares híbridos, que junto com outros fatores como espalhamentos, vibrações e rotações moleculares, formam a região com vários picos menores, sendo os picos maiores e mais destacados ocorridos devida às transições eletrônicas do átomo de carbono. ✓

Outra conclusão que pode ser feita a partir da análise da figura 9 é que como a absorção do gás carbônico está concentrada na região visível e infravermelha, este, em uma grande concentração proveniente do uso de combustíveis fósseis, se torna um dos principais agentes do aquecimento global. Este fenômeno se resume pela atmosfera absorvendo parte da radiação solar infravermelha que é refletida pela superfície terrestre, o que faz com que a temperatura do planeta suba de acordo com o aumento da concentração desse gás na atmosfera.

#### iv. Hélio

Na espectroscopia do hélio é possível ver picos bem definidos e espalhados, sem regiões de picos menores. Isso ocorre porque o hélio não possui orbital  $p$ , visto que seu número atômico é  $Z = 2$ , portando não ocorre a hibridização nesse elemento. Além disso, como o hélio não forma molécula consigo mesmo, não há fatores comportamentais que influenciem no seu espectro.

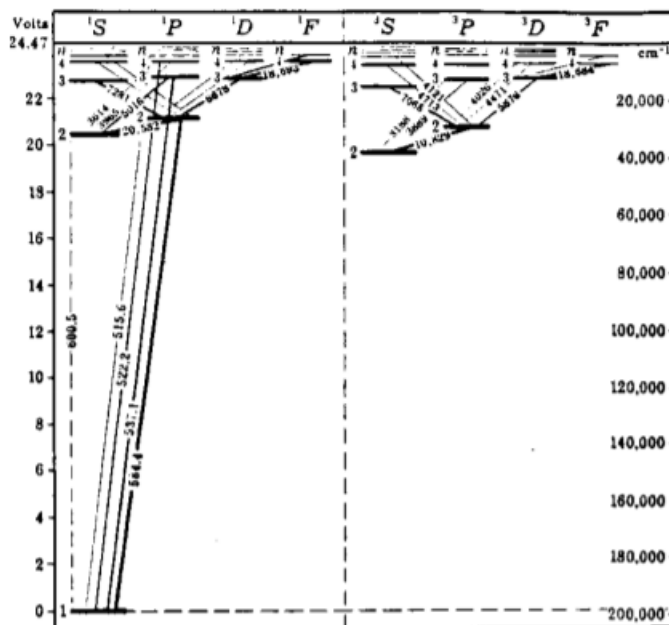


**Figura 10:** Espectro do gás Hélio (He).

Conclui-se portanto que os picos observados na figura 10 se referem somente às transições eletrônicas do átomo de Hélio.

Para o átomo de hidrogênio, concluímos que o modelo do átomo de Bohr é eficiente para a análise das transições eletrônicas, o que não ocorre aqui. O principal motivo para isso está no spin dos elétrons. Existem dois estados possíveis para os spins de elétrons de átomos multieletrônicos, o estado singleto e o estado tripleto, sendo que no primeiro existem dois elétrons no mesmo orbital com os spins antiparalelos, e no segundo dois elétrons com os spins paralelos em orbitais diferentes. Na figura 11, vemos um diagrama energético das transições eletrônicas do hélio, sendo que a parte esquerda se refere ao estado singleto e a parte direita ao estado tripleto. Note que as transições dos dois estados estão separadas devido à lei de conservação de momento angular, que devido aos diferentes spins não permite transições entre os dois estados.

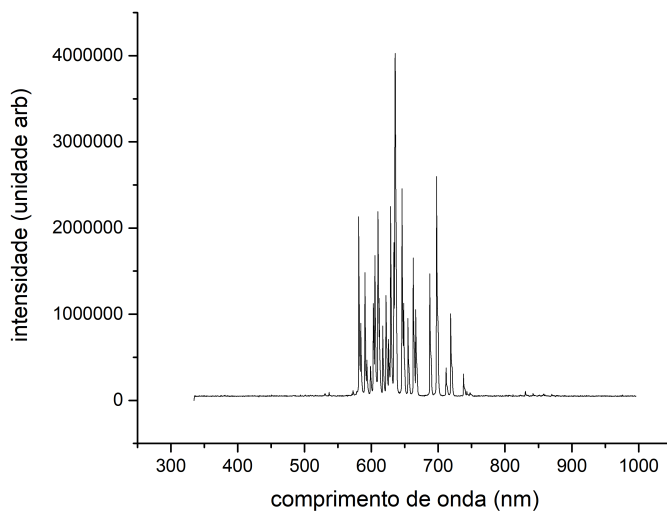
Na parte direita, nenhuma transição ocorre para  $n = 1$ , uma vez que se ambos os elétrons estiverem no estado fundamental, seus spins precisariam ser antiparalelos, e o átomo não estaria no estado tripleto. Apesar da má qualidade da figura 11, de acordo com a literatura no qual este tópico foi baseado [11], ao comparar os nossos dados da figura 10 com os da literatura vemos que os picos demarcados (394, 502 e 668 nm) referem-se às transições dos estados singletos, enquanto todos os outros picos visíveis se referem às transições do estado tripleto.



**Figura 11:** Diagrama das transições eletrônicas do átomo de hélio, mostrando os comprimentos de onda medidos em Armstrongs [12].

## v. Neônio

No caso do neônio, diferentemente do hélio, ocorre a hibridização, e é possível observar esse fenômeno nos picos menores entre os picos maiores, correspondentes às transições eletrônicas dos átomos.



**Figura 12:** Espectroscopia do gás Neônio (Ne).

Esse átomo também não forma moléculas consigo mesmo, pois também pertence à família dos gases

nobres, logo os fatores comportamentais não são observados aqui.

#### vi. Sistema RGB

Ao se estudar melhor monitores RGB entendeu-se que para a formação da imagem os computadores fazem uso de pontos de luz em três diferentes cores que, quando somadas em diferentes intensidades abrangem totalmente o espectro de cores do olho humano. O olho detecta as cores através dos cones, que são células fotos sensíveis capazes de diferenci<sup>as</sup> frequências de ondas para que assim nós sejamos capazes de enxergar diferentes tonalidades. os pontos de luz nos monitores levam nomes de Pixel e a cada evolução tecnologia se tornam menores e mais potentes, mas se mantendo o mesmo princípio de somatória de intensidades e comprimentos de ondas pra a formação das imagens. Apesar da sua capacidade de abranger a maioria das cores, outros métodos de coloração são empregados diariamente, tal como o CYMK (Cian Yellow Magenta black) onde este reproduz mais fielmente as cores quando estas são impressas e observadas fora de uma tela, dada a facilidade na mistura de mais cores para a impressão e o RGB para emissão de luzes, uma vez que os LED's em amarelo ciano e magenta são mais complexos de se produzir, e a dificuldade na reprodução da camada preta.

Para cada cor pode-se perceber que o pico está próximo da cor base predominante, como no roxo, que é derivado do azul o seu pico se encontra próximo do mesmo, ou no caso do ~~o~~ laranja, cor derivada do verde e vermelho, assim como o branco onde é a junção de todas as cores onde todos os picos do RGB são encontrados no seu espectrômetro no caso o verde vermelho e azul; Podemos reparar a semelhança entre os picos com os picos das cores do RGB, sendo assim todas as cores do nosso espectro visível pode ser constituída de somas das 3 principais em diferentes intensidades.

Uma vez detido o conhecimento sobre o funcionamento do monitor o grupo voltou o estudo para os LEDS maiores de cores diferentes, e ao se capturar seu espectro de luz fora se observado que em muitos casos a luz emitida por ele não era monocromática, ou seja, não era uma luz "pura" de um comprimento de onda apenas, e sim, uma somatória do sistema RGB novamente. Esse fato pode ser explicado pela otimização na confecção dos LEDs em RGB dada a sua ampla utilização na micro-eletrônica, saindo mais barato e mais eficaz do que na produção de novos diodos com espectros monocromáticos.

#### vii. Lâmpadas LED

Para que o diodo emita luz é necessário que uma corrente o atravesse no sentido permitido. A junção P-N nos diz respeito ao tipo de junção realizado dentro do semicondutor, ou seja, de uma dopagem P para uma dopagem N em um diodo de silício. Através da passagem da corrente sobre a junção de um diodo semi-condutor é possível se obter uma eletroluminescência do material. O efeito que permite a liberação de fótons é dado quando dentro da junção os elétrons, submetidos a uma diferença de potencial, são realocados indo de lacunas mais energéticas para menos energéticas dentro do material liberando a energia no processo, a diferença entre os materiais gera diferentes interações foto-elétricas liberando fótons com diferentes frequência, obtendo-se assim cores diferentes. Uma vez que a banda espectral de cada LED é restrita dada a característica de cada material constituinte do mesmo, para se obter toda~~s~~ as cores será necessária uma combinação de ondas de luz para se atingir um espectro desejado, o mesmo princípio utilizado em RGB, onde LED's de cores vermelha (R), verde (G) e azul(B) são combinados em diversas intensidades para se ter o espectro visível de cor inteiro

A análise dos dados e os valores nominais nos mostram a funcionalidade do espectrômetro onde todos os resultados retirados dos gráficos efetuados pelo grupo estavam de acordo com a teoria e o valor nominal. o LED branco apresentou 2 picos bem intensos dentro do seu espectro, mas como o seu valor

nominal fez referência a apenas um valor, voltamos a nossa atenção para o mais intenso em unidades relativas, além disso os maiores erros foram observados em espectros mais "claros", o que nos mostra que para tais cores a transferência de energia dos fótons pode ser prejudicada e misturada com a luz ambiente para a leitura do sensor, mas mesmo assim os valores ainda foram satisfatórios, uma vez que mesmo com o erro os valores nominais se encontram dentro da banda <sup>de</sup> comprimentos que compõe a base do pico.

### viii. Corpo Negro

Através dos dados adquiridos através da referência [2], podemos montar a tabela 2.

U (V)	i (A)	$\lambda_{max}$ (nm)	b (mK)
59,3	0,49	658,4	$3,328 * 10^{-3}$
56,0	0,47	661,4	$3,262 * 10^{-3}$
50,7	0,45	660,4	$3,142 * 10^{-3}$
46,5	0,43	674,1	$3,103 * 10^{-3}$
43,4	0,41	681,4	$3,047 * 10^{-3}$
40,1	0,39	701,5	$3,037 * 10^{-3}$
36,1	0,37	714,7	$2,975 * 10^{-3}$
30,6	0,34	732,5	$2,862 * 10^{-3}$

*as incertezas?  
Como obtiveram o  $\lambda_{max}$ ?*

**Tabela 2:** Dados obtidos para cada configuração da lâmpada incandescente e seus respectivos valores da constante b calculados.

Na tabela 2, podemos verificar o fato de que o pico da curva de Planck "se move" para a esquerda quanto maior a temperatura. Isso está de acordo com a Lei de Wein, que nos mostra que o valor de  $\lambda_{max}$  é inversamente proporcional à temperatura do corpo. Fazendo a média dos valores de b, obtemos  $b = 3,095 * 10^{-3} mK$ , que é um pouco acima do esperado pela literatura ( $b = 2.898 * 10^{-3} mK$ ) [9]. Não estamos trabalhando com incertezas pois nossos cálculos envolvem valores assumidos. Um dos motivos de haver essa diferença se deve o fato de não conseguirmos medir a área do filamento da lâmpada sem danificá-la, usando assim o valor previamente assumido na metodologia. Também pode haver influência de dilatação do próprio filamento da lâmpada que não foi considerado, já que estamos trabalhando com temperaturas altas. Essa etapa do experimento nos ajuda a entender melhor os conceitos de radiação de corpos negros, e como isso pode ser utilizado para obtermos fatores, como a temperatura de um corpo, que está emitindo a mesma quantidade de radiação de forma constante. Especialmente porque corpos que emitem radiação e mantêm a temperatura estável podem ser tratados como corpos negros ideais. Essa aproximação pode ser colocada em prática analisando algum corpo que cumpre esses requisitos, como o Sol por exemplo. Com isso, concluímos a importância que a espectroscopia possui na área de astronomia e identificação de astros.

*por quê?  
faz sentido  
isso?*

### ix. Temperatura do sol

Através do espectro adquirido ao expor o espectrômetro à luz do Sol [1], podemos observar o gráfico 13 e inferir uma aproximação do valor do comprimento de onda responsável pela maior emissão de radiação ( $\lambda_{max}$ ) na temperatura do corpo analisado em questão, para podermos prosseguir com o cálculo e chegar em sua temperatura.

Pelo espectro, podemos ver que a curva se comporta como descrita pela Lei de Planck. Assumiremos que o pico dela possui um comprimento de onda emitido equivalente a  $\lambda = 510 nm$ . Sendo assim,

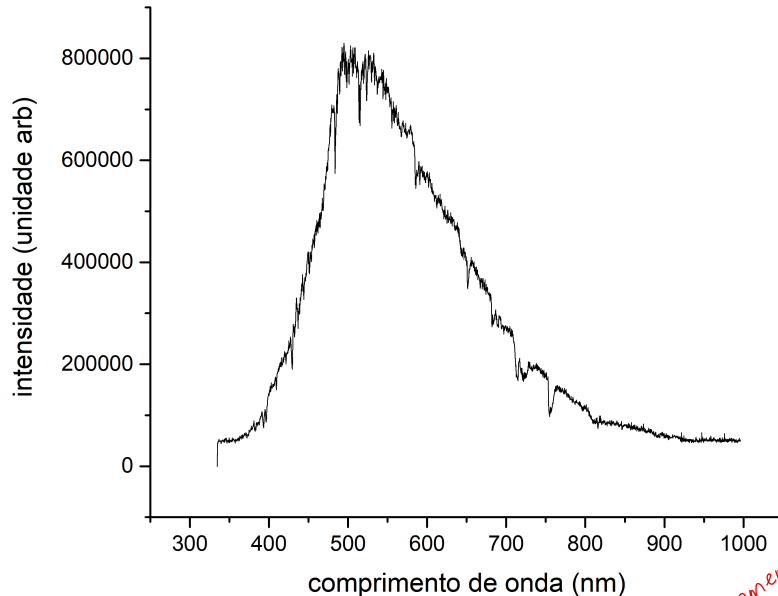


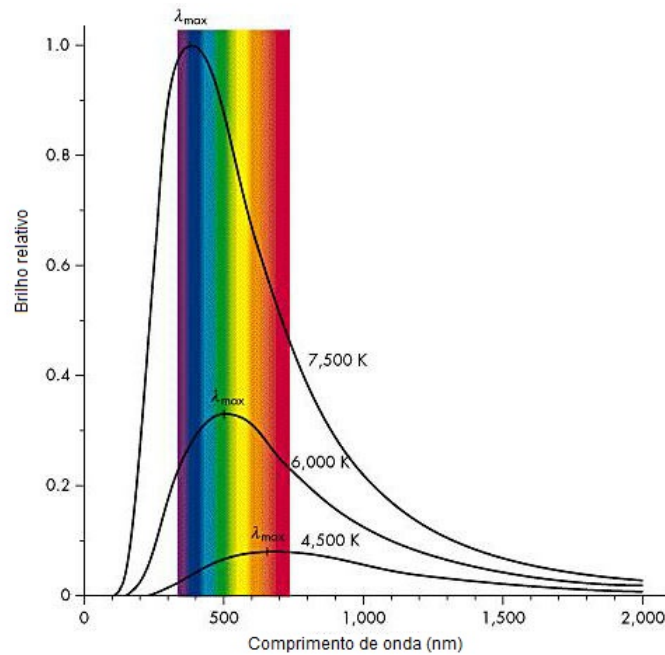
Figura 13: Espectro da luz do Sol.

através da equação (6), chegamos no valor de que  $T_{Sup.Sol} = 6068K$ . Um valor acima do esperado. Pela literatura, sabemos que a temperatura da superfície do Sol equivale a  $T_{Sup.Sol} = 5778K$  [14]. Essa discrepância de valor se deve a fatos como o valor de  $b$  encontrado na etapa anterior estar acima do esperado, o espectrômetro não estar no vácuo ao estar fazendo a coleta de dados sob a luz do Sol (já que a radiação se espalha ao chegar na atmosfera), e também não podemos desconsiderar que a latitude e a poluição do ar possam interferir nos resultados também. *em qual momento do dia? foi mal estimado!*

A ideia desse experimento é muito interessante, e podemos tirar algo de curioso dela. Pelo experimento, vemos que a superfície do Sol possui uma temperatura próxima de 6000K. Pesquisando mais a respeito de outras estrelas, vemos que existem estrelas mais frias, como a Betelgeuse, que faz parte da constelação de Órion e possui uma temperatura superficial próxima de 3500K, e que também existem estrelas bem mais quentes que o Sol, como a supergigante Rigel, que é a estrela mais luminosa da constelação de Orion, e possui uma temperatura aproximada de 15000K[15]. O mais legal é que é fácil identificar essas estrelas no céu devido ao fato delas brilharem bastante e em cores diferentes. A Rigel possui uma cor bem azulada, enquanto a Betelgeuse que é mais fria possui uma cor bem avermelhada. Analisando o conceito estudado nesse experimento, podemos entender por quê.

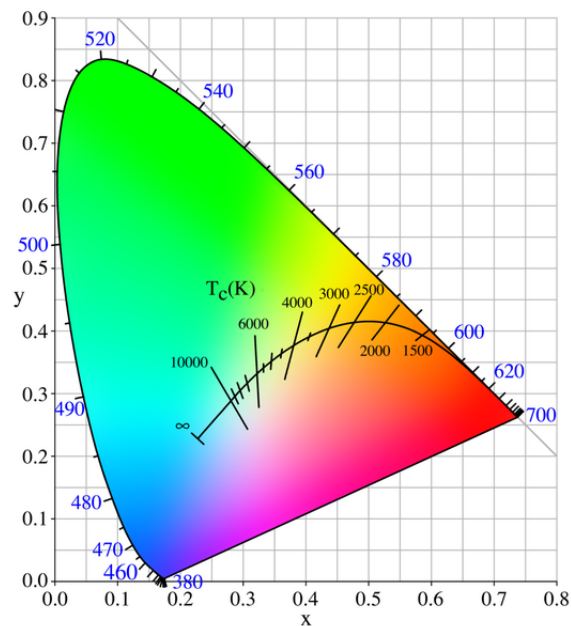
Analisando a figura (14), relembramos o fato de que quanto mais quente for o corpo, menor é o comprimento de onda da radiação emitida (ou seja, maior a frequência), e mais próxima do azul a luz emitida será (já que a ultravioleta está fora do nosso espectro visível). O mesmo pode ser tido de corpos mais frios com picos próximos ao vermelho.

O Sol, por outro lado, possui o pico de sua emissão de radiação de corpo negro próximo do verde (que também é o próximo do pico de sensitividade do olho humano[16]). Isso faz com que ele emita todas as cores do espectro visível, o que faz a luz dele ser branca em nossa perspectiva. Se quiséssemos uma estrela verde, precisaríamos que ela tivesse um pico de emissão de radiação no verde (próximo dos  $\lambda_{max} = 500nm$ ), mas que abruptamente decaísse conforme a variação dos comprimentos de onda



**Figura 14:** Picos da radiação emitida por corpos negros em diferentes temperaturas em função dos comprimentos de onda emitidos[18].

próximos do pico. E pelo que estudamos a respeito de corpo negro, vemos que isso não é possível. Logo, as estrelas que seriam verdes ou amarelas acabam sendo brancas, e se forem mais quentes se tornam azul, e se forem mais frias se tornam avermelhadas[17]. A imagem (15) é uma boa forma de visualizar a relação da temperatura de um corpo negro com a luz emitida por ele de acordo com o pico de emissão de sua radiação.

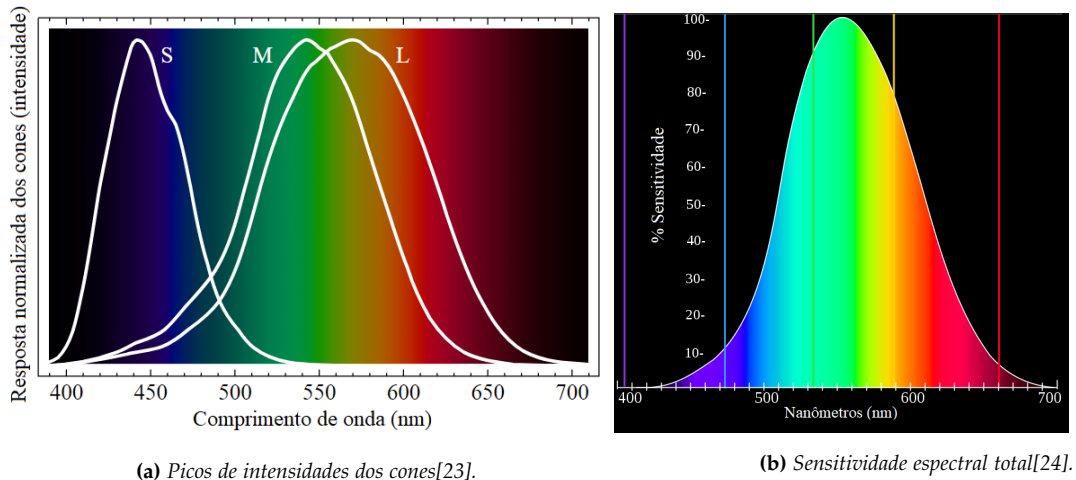


**Figura 15:** Cor predominante emitida por um corpo negro de acordo com sua temperatura [19].

### ix.1 O Olho Humano e a Luz Solar

Para podermos enxergar, precisamos que nosso olho consiga captar as ondas eletromagnéticas emitidas e refletidas pelos objetos e mandar esses sinais para o cérebro para podermos então ver o mundo. Como dependemos da nossa visão e estamos adaptados a viver com a luz do Sol, é esperado que o pico de absorção de ondas eletromagnéticas dos nossos olhos seja próximo daquele emitido pelo Sol. E de fato é o que acontece. Nosso pico de sensibilidade ocular é próximo do verde, assim como o do Sol[20].

Nossos olhos são formados por três tipos de células receptoras diferentes presentes dentro da nossa retina, denominadas de cones, o que nos fazemos seres tricromáticos. Cada um desses cones possui um pico de percepção diferente. É através da intensidade absorvida em cada um deles ao mesmo tempo que conseguimos enxergar uma quantidade aproximada de 10 milhões de cores diferentes[21]. Essas três cores principais que nosso cérebro utiliza para formar todas as outras cores são vermelho, verde, e azul. Algo fácil de assumir considerando os tópicos já abordados nesse mesmo experimento (afinal, essas cores formam o sistema RGB). Os picos de percepção de intensidades podem ser visualizados na figura (16a). Ao juntarmos as respostas de todos os cones, nosso espectro de absorção pode ser descrito como na figura (16b). Obviamente, frequências mais altas se tornam ultra violetas e mais baixas se tornam infravermelhas, pois não estão contidas no nosso espectro visível já que não conseguimos captá-las. Nosso espectro visível fica entre 400nm e 700 nm[20]. Alguns animais, porém, como os insetos, possuem o pico de absorção entre 300 nm e 400 nm[22], o que significa que eles enxergam raios ultra violetas!



**Figura 16:** Espectros de absorção de cores do olho humano.

Como nosso pico de sensibilidade de absorção se aproxima do pico de emissão do Sol, ou seja, do verde, podemos fazer um pequeno experimento utilizando uma ilusão de ótica. A figura (17) é montada por três faixas de cores: vermelha, verde, e azul. Estas cores possuem o brilho máximo próximas da base inferior da imagem, e conforme elas se aproximam do topo elas perdem o brilho, até chegar na cor preta. A ideia é analisar as reações quando vemos ela pela primeira vez.

Quando batemos o olho na figura, imediatamente focamos o verde e vemos a faixa se "estender" para cima, e quando ficamos observando a mesma imagem por mais alguns segundos, temos a impressão de que o gradiente do verde demora mais para ocorrer, dando a impressão de que a cor verde demora mais para ficar escura. E isso é exatamente como esperado, pois é nessa cor que está o pico de nossa



recepção ocular. Isso significa que em condições normais (sem um estímulo mal processo pelos olhos para o cérebro, responsáveis pelo daltonismo[25]), conseguimos identificar melhor o verde, assim como identificar mais variações diferentes dessa cor. Podemos ver esse fato através de uma simples ilusão de ótica como essa.

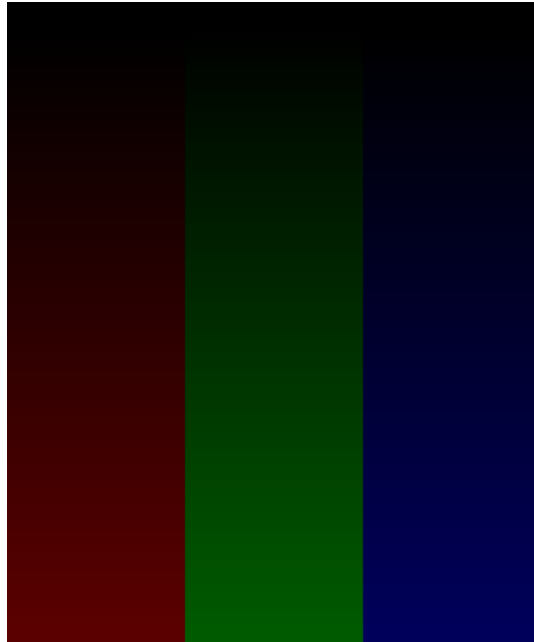


Figura 17: Gradiente das cores RGB.

#### IV. CONCLUSÕES OU CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nessa série de experimentos o grupo obteve uma mera noção da importância da espectroscopia na execução da ciência atual, com apenas um espectrômetro foi capaz de se abranger o estudo eletrônico das moléculas, diodos emissores de luz e uma pequena parte da astronomia, tudo isso devido de materiais ditos, simples. Para a análise das lâmpadas o grupo conseguiu analisar claramente as transições eletrônicas e a interação com os componentes da nossa camada de ozônio. A constante de Rydberg foi calculada com uma precisão considerável como o esperado mostrando a boa calibração do equipamento e, posteriormente pode-se observar a relação entre os espectros dos átomos e moléculas que os compõe através dos gráficos. Para o sistema de cores em RGB o grupo pode entender a sua funcionalidade em monitores e eletrônica, e não para impressões, além disso conseguiu perceber a semelhança com o olho humano dada a somatória de frequências para se discernir cores que são nada mais do que comprimentos de ondas diferentes. O grupo também pode ir a fundo no estudo dos diodos emissores de luz, e por quê mesmo para eles as cores não são cores puras, e pôde aplicar a espectroscopia para poder entender como as fábricas atingem as cores com os LEDs. Por fim a aplicação mais intangível fora a do estudo dos corpos negros, uma área bem intrigante da física moderna para bacharelados, além disso a espectroscopia mostrou como com uma simples aparelhagem podemos medir a temperatura do sol com uma precisão incrível, mais uma aplicação direta dum estudo tão simples.

Todos os objetivos do grupo foram alcançados e bem sucedidos, com a ajuda de dados coletados por estudantes de Física no IFGW de semestres anteriores.

*e a quantização do espectro atômico/molecular?*

## REFERÊNCIAS

- [1] Gabriel, Nicolas; Pinho, Pedro; "Relatório do experimento de espectroscopia atômica e molecular", 2019. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP.
- [2] Rodrigues, Caique C; Neme, Maíra D.; "Espectroscopia atômica e molecular", 2017. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. [https://sites.ifi.unicamp.br/urbano/files/2017/08/Relato%CC%81rio-2-Espectroscopia\\_pdf-notes\\_201710011602.pdf](https://sites.ifi.unicamp.br/urbano/files/2017/08/Relato%CC%81rio-2-Espectroscopia_pdf-notes_201710011602.pdf) (Acesso em 08 de agosto de 2020).
- [3] Ocean Optics, "USB2000+ Fiber Optic Spectrometer Installation and Operation Manual". Document: 270-00000-000-02-201603. <https://www.oceaninsight.com/globalassets/catalog-blocks-and-images/manuals-instruction-old-logo/spectrometer/usb2000-operating-instructions1.pdf> (Acesso em 08 de agosto de 2020).
- [4] SpectraSuite Spectrometer Operating Software, "Installation and Operation Manual". Document Number 000-20000-300-02-0607.
- [5] "Espectroscopia Atômica e Molecular". Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. <https://sites.ifi.unicamp.br/lfmoderna/conteudos/espectroscopia-atomica-e-molecular-2> (Acesso em 08 de agosto de 2020).
- [6] Jean and Volatron, "An Introduction to Molecular Orbitals", 1993. ISBN 0-19-506918-8. p.192.
- [7] Siegel, Robert; Howell, John R. "Thermal Radiation Heat Transfer", 2002, Volume 1 (4th ed.). Taylor & Francis. p. 7.
- [8] Kragh, H. "Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century", 2002. Princeton University Press. p. 58.
- [9] "Stefan-Boltzmann constant". The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty. <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?sigma> (Acesso em 08 de agosto de 2020).
- [10] Ustin, Susan L.; Riaño, David; Hunt, E. Raymond; "Estimating canopy water content from spectroscopy", 2012. University of California, p.12. [https://www.researchgate.net/publication/262967946\\_Estimating\\_canopy\\_water\\_content\\_from\\_spectroscopy](https://www.researchgate.net/publication/262967946_Estimating_canopy_water_content_from_spectroscopy) (Acesso em 08 de agosto de 2020).
- [11] C. Lo Presto, Michael; "A Closer Look at the Spectrum of Helium". The Physics Teacher; Vol. 36, March 1998, p.173.
- [12] Gerhard Herzberg; "Atomic Spectra and Atomic Structure". 1944, Dover, New York; p.65.
- [13] "Rydberg constant". The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty. <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?ryd> (Acesso em 08 de agosto de 2020).
- [14] Kenneth R. Lang, "Astrophysical formulae", Volume 1 (3rd ed.), 2006. Birkhäuser. p. 23. ISBN 978-3-540-29692-8.
- [15] Prof. Barbara Ryden class notes. Ohio State University. "How Hot is a Star?". [http://www.astronomy.ohio-state.edu/~ryden/ast162\\_2/notes8.html](http://www.astronomy.ohio-state.edu/~ryden/ast162_2/notes8.html) (Acesso em 08 de agosto de 2020).

- [16] Feynman, R; Leighton, R; Sands, M. "The Feynman Lectures on Physics", 1963, volume 1, p. 35. ✓
- [17] Tyson, Neil D.; "Why There Are No Green Stars". [https://www.youtube.com/watch?v=YIJJ2\\_ncJQ](https://www.youtube.com/watch?v=YIJJ2_ncJQ) (Acesso em 08 de agosto de 2020). ✓
- [18] "The Electromagnetic Spectrum". <https://slideplayer.com/slide/14961804/> (Acesso em 08 de agosto de 2020). ✓
- [19] Planckian Locus [.png file]. <https://en.wikipedia.org/wiki/File:PlanckianLocus.png> (Acesso em 08 de agosto de 2020). ✓
- [20] "Human Color Perception". <https://www.cambridgeincolour.com/pt-br/tutoriais/color-perception.htm> (Acesso em 08 de agosto de 2020). ✓
- [21] Judd, Deane B.; Wyszecki, Günter. "Color in Business, Science and Industry", 1975; Wiley Series in Pure and Applied Optics (3ª ed.). New York: Wiley-Interscience. p. 388. ✓
- [22] Cruz, Marianne S.; Lindner, Rebecca, "Insect Vision: Ultraviolet, Color, and LED Light". University of Georgia Department of Entomology. [https://www.discoverlife.org/moth/OTHER/InsectVision\\_UVColorandLEDLight.pdf](https://www.discoverlife.org/moth/OTHER/InsectVision_UVColorandLEDLight.pdf) (Acesso em 08 de agosto de 2020). ✓
- [23] Cone fundamentals with srgb spectrum [.svg file] <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Cone-fundamentals-with-srgb-spectrum.svg> (Acesso em 08 de agosto de 2020). ✓
- [24] Eye sensitivity [.svg file]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eyesensitivity.svg> (Acesso em 08 de agosto de 2020). ✓
- [25] "Facts About Color Blindness", National Eye Institute (NEI). [https://web.archive.org/web/20160728003639/https://nei.nih.gov/health/color\\_blindness/facts\\_about](https://web.archive.org/web/20160728003639/https://nei.nih.gov/health/color_blindness/facts_about) (Acesso em 08 de agosto de 2020). ✓