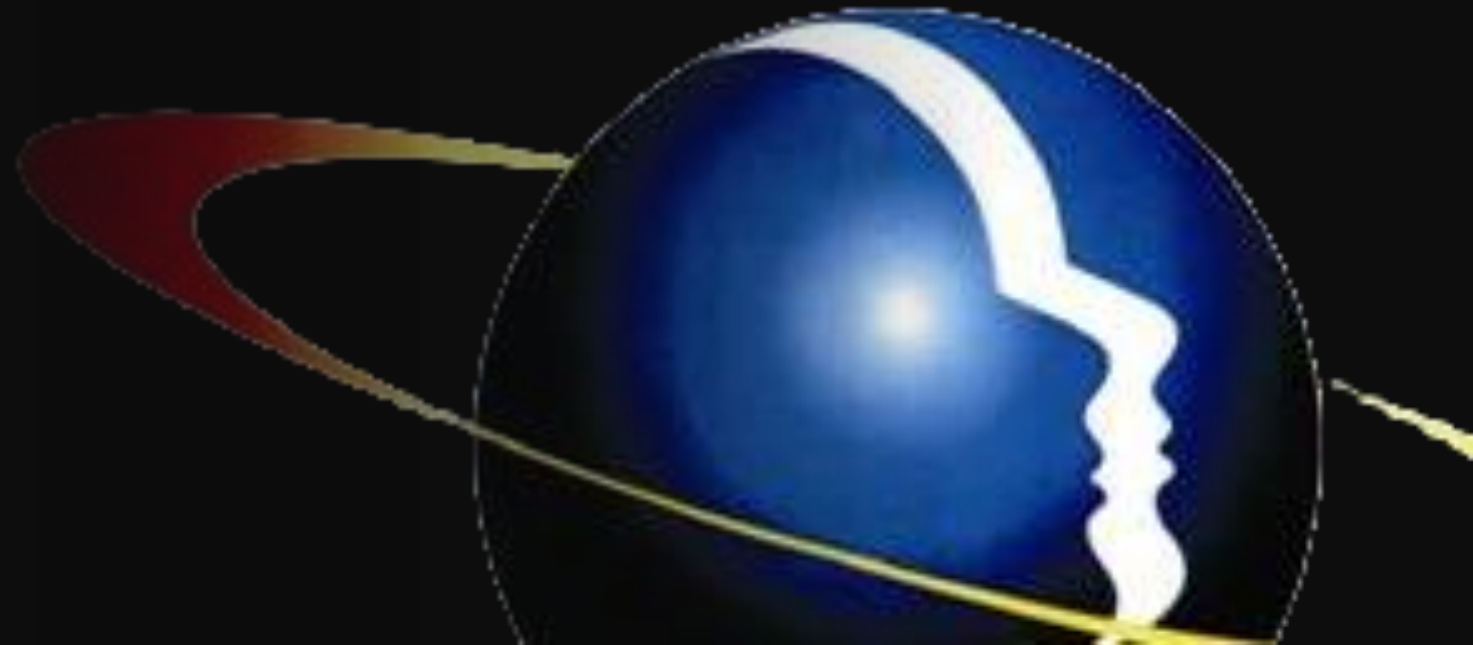


Curso de Extensão:  
Introdução à Astronomia – CEIA/2023

# Qual é a cor do Sol?

Messias Bicalho Cevolani  
DFis -UFES



# Sumário

---

- Histórico
- Espectroscopia
- Cor
- Visão humana
- Cor e temperatura
- Espectro do Sol
- Cor das estrelas
- Reações nucleares das estrelas

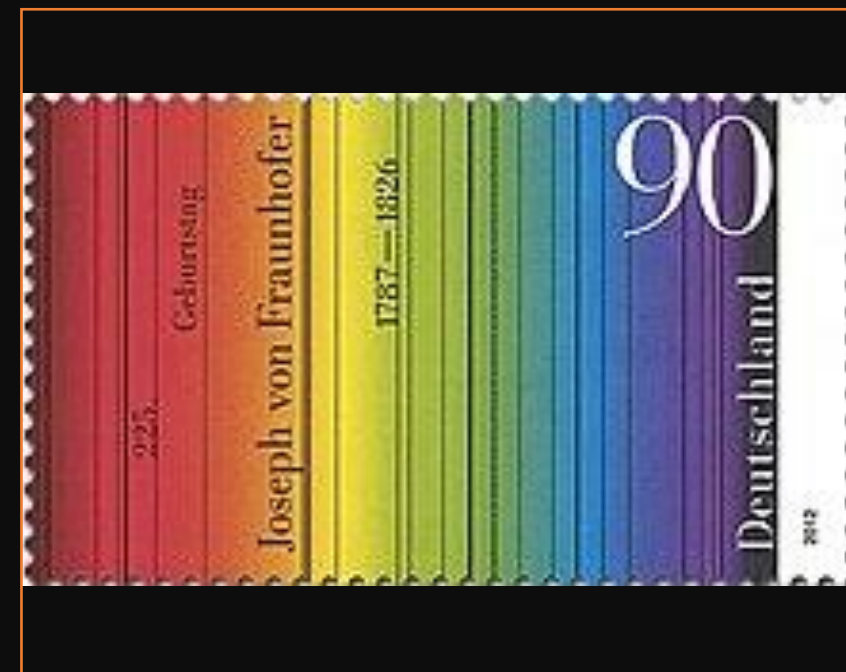
# Isaac Newton

- Telescópio refletor
- Prisma dispersivo – Spectrum (natureza fantasmagórica)
- *Of Colours* (1666) - No experimento 63 são citadas dez cores: violeta extremo, violeta intenso, índigo, azul, verde, a “fronteira entre verde e amarelo”, amarelo, laranja, vermelho e vermelho extremo
- *Opticks* (1704), são citadas sete cores: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul (ciano), índigo (azul escuro) e violeta
- Disco de Newton: Ao entrar em movimento, cada cor do disco de Newton se sobrepõe na nossa retina, dando a sensação de mistura.

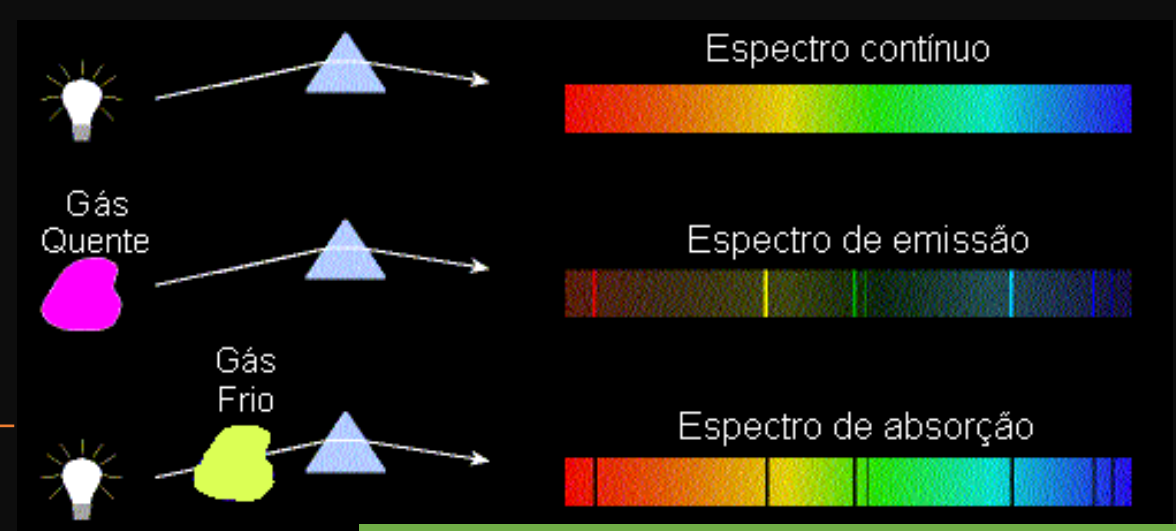


# Fraunhofer

- Em 1814 Fraunhofer inventou o [espectroscópio](#), e descobriu 574 linhas escuras no espectro solar. Mais tarde foi descoberto que elas eram linhas de absorção atômica, como explicado por [Gustav Kirchhoff](#) e [Robert Bunsen](#) em 1859. Essas linhas ainda são chamadas de *espectro de Fraunhofer* em sua homenagem.
- Ele também inventou a rede de difração e, ao fazê-lo, transformou a espectroscopia de uma arte qualitativa em uma ciência quantitativa ao demonstrar como alguém poderia medir o comprimento de onda da luz com precisão.
- Ele descobriu que os espectros de [Sirius](#) e outras estrelas de primeira magnitude diferiam entre si e do sol, fundando então a espectroscopia estelar.



# Espectroscopia

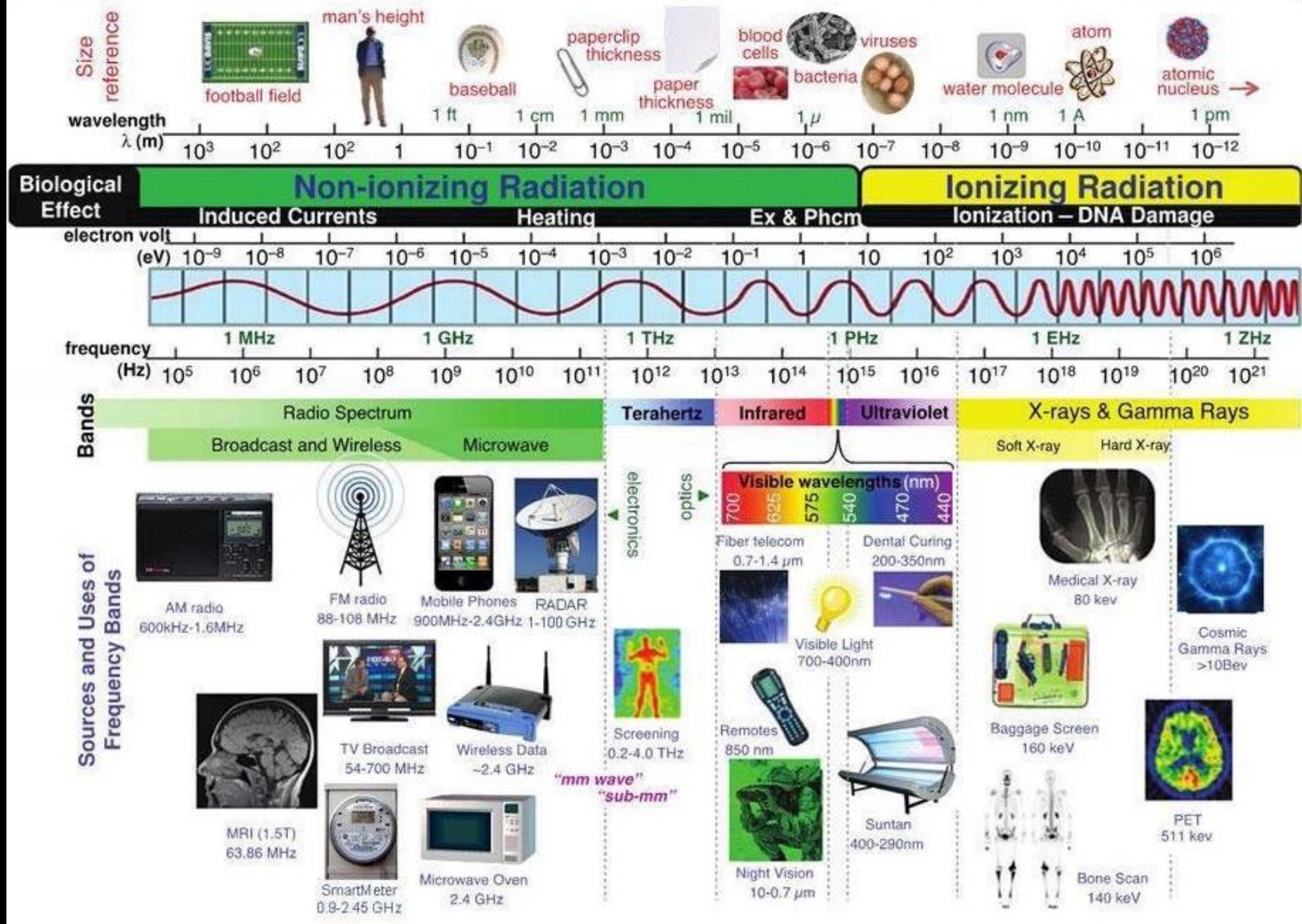


- Willian Huggins : análise espectral de estrelas mostrou que elas são feitas do mesmo material encontrado na Terra.
- Com uso de espectrógrafos, os astrônomos puderam determinar:
  - a distância das estrelas;
  - a formação de sistemas binários ou simples;
  - a temperatura aproximada da superfície;
  - aproximação ou afastamento da Terra (por deslocamento Doppler);
  - descobrir novos elementos (Hélio: análise espectro do Sol - Lockyer , 1868)

Linha	$\lambda(\text{Å})$	Elemento	Cor
A	7594	oxigênio	Vermelho
B	6867	oxigênio	
C	6563	hidrogênio, H $\alpha$	
D1	5896	sódio	Amarelo
D2	5890	sódio	
D3	5876	hélio	
E	5270	ferro e cálcio	
b1	5184	magnésio	
F	4861	hidrogênio, H $\beta$	Verde
G	4308	ferro (e cálcio)	Azul
H	3968	cálcio	
K	3934	cálcio	Violeta

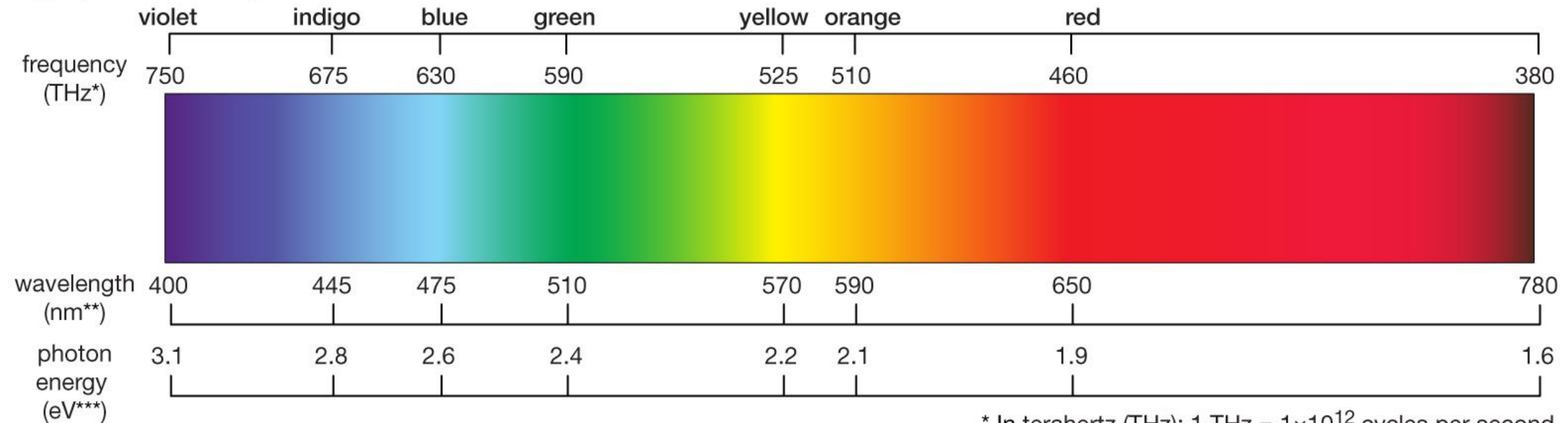
# Espectroscopia

## O espectro eletromagnético



# Espectro visível

## Light, the visible spectrum



\* In terahertz (THz); 1 THz =  $1 \times 10^{12}$  cycles per second.

\*\* In nanometres (nm); 1 nm =  $1 \times 10^{-9}$  metre.

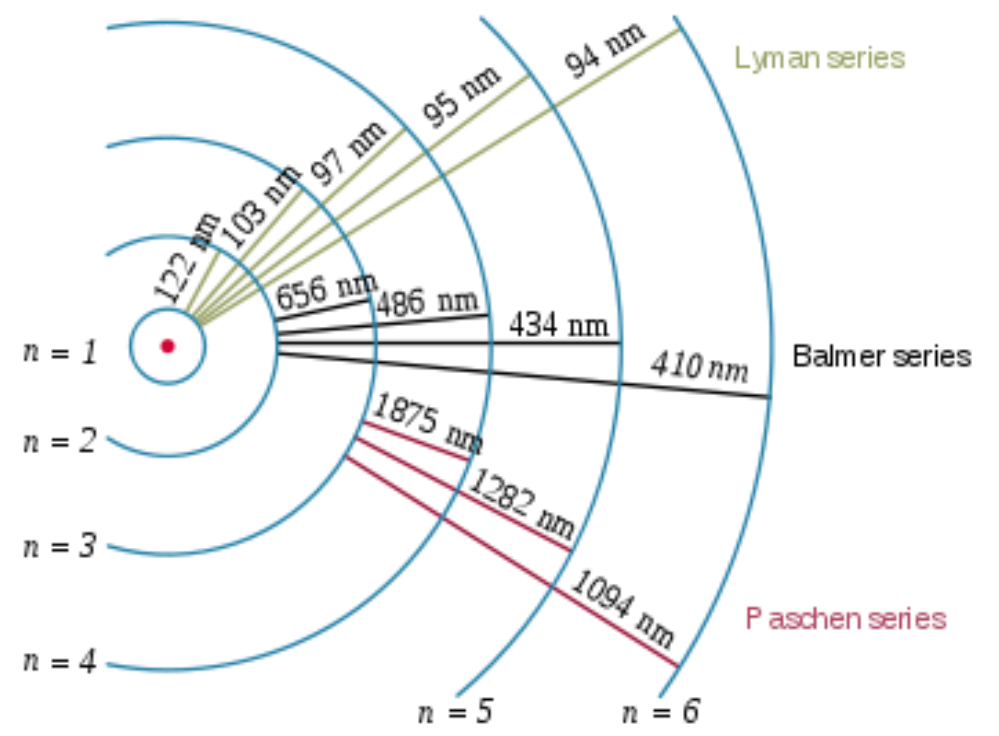
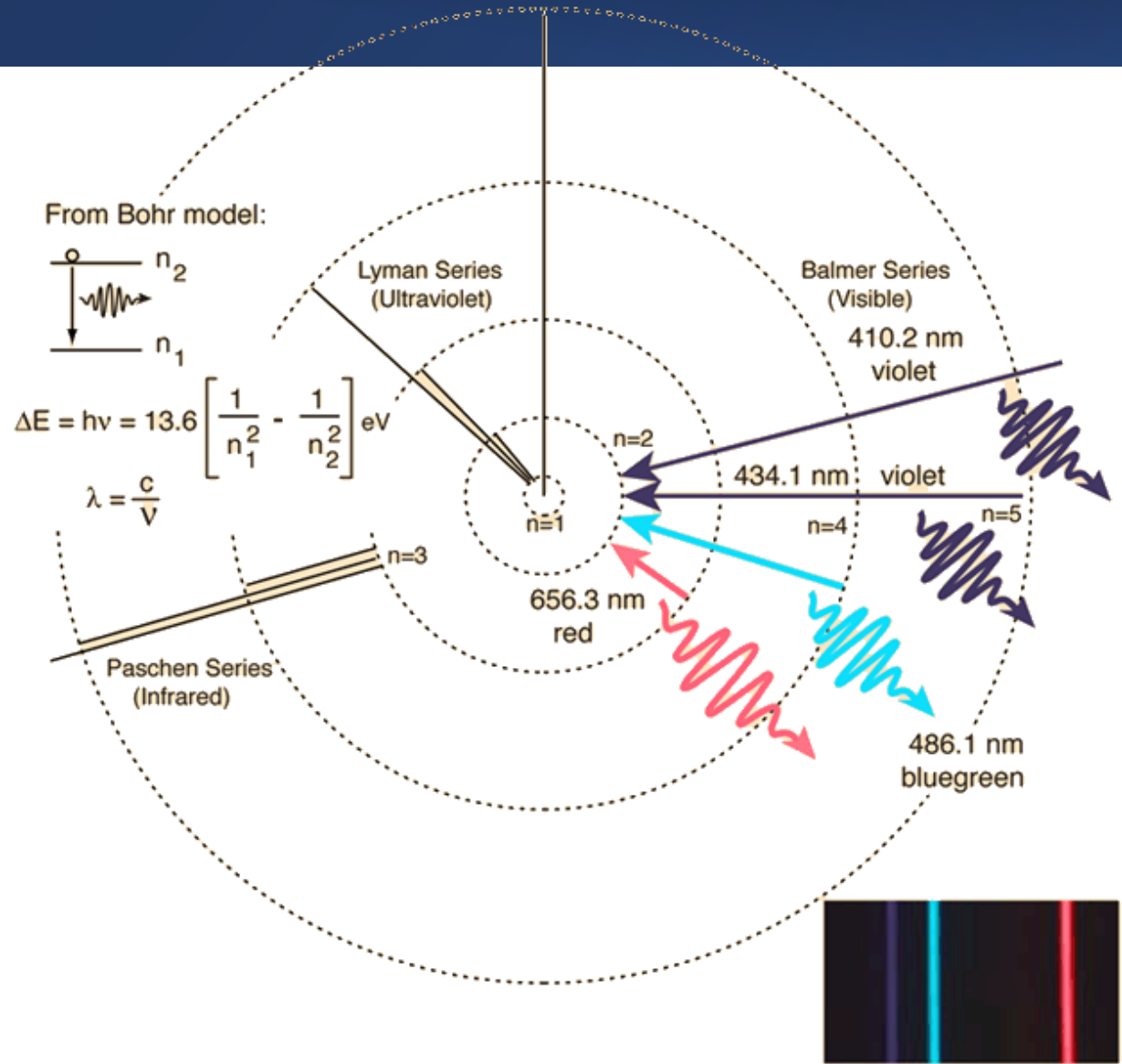
\*\*\* In electron volts (eV).

© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.

Fonte: <https://www.britannica.com/science/light>

- Uma luz monocromática tem um comprimento de onda específico e bem definido.

# Espectro do Hidrogênio

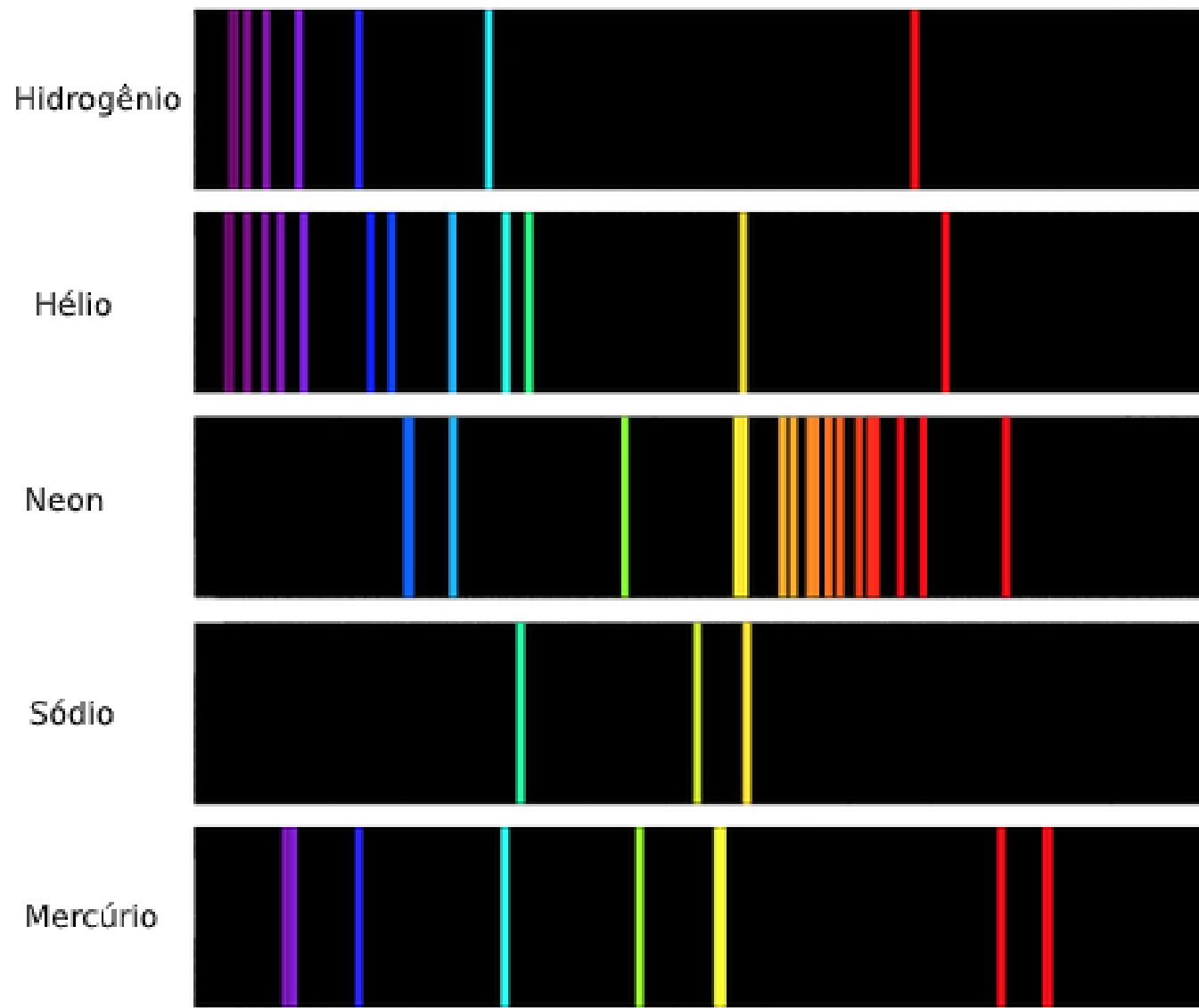
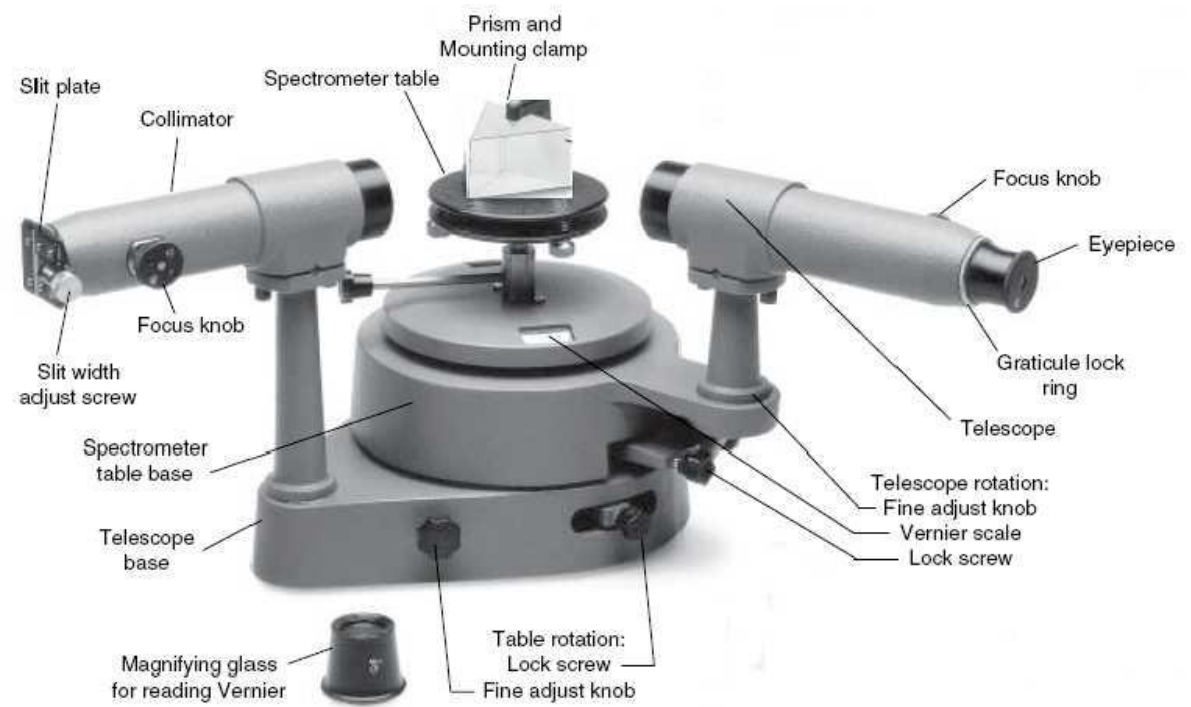




# Espectro dos elementos - espectroscopia

## Espectrômetro

$$c = \lambda \cdot \nu$$



# O que determina a COR dos Objetos?

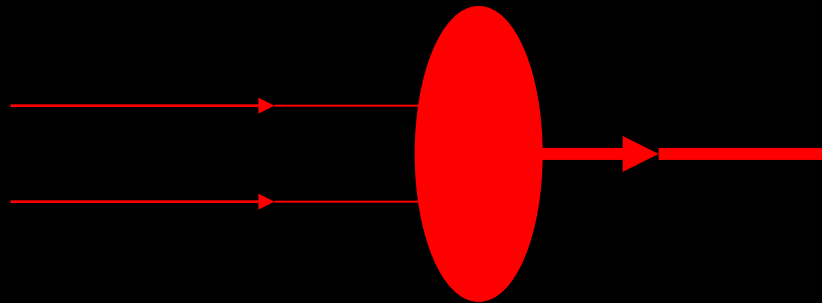
- Luz Branca Incide Sobre o Objeto
  - Átomos do Objeto Absorvem a Radiação
  - Ocorre Excitação de Elétrons e Modos Vibracionais
  - Elétrons excitados Decaem
  - Ocorre a Emissão de Luz: Apenas Alguns Comprimentos de Onda, que interpretamos como a cor
- E os Outros Comprimentos de Onda?
  - Absorvidos e Dissipados Dentro do Objeto

Cor

# COR Luz X COR pigmento

COR Luz: A luz é de uma determinada Cor

- Um filtro absorve Todos os Comprimentos de Onda Menos Um



COR Pigmento: A cor de um objeto opaco

- Apenas a Cor do Pigmento é Refletida. As demais São Absorvidas

# COR Pigmento (exemplo: Impressora)

As Primárias São: **Ciano**, **Magenta** e **Amarelo**

As Secundárias São: **Vermelho**, **Verde** e **Azul**

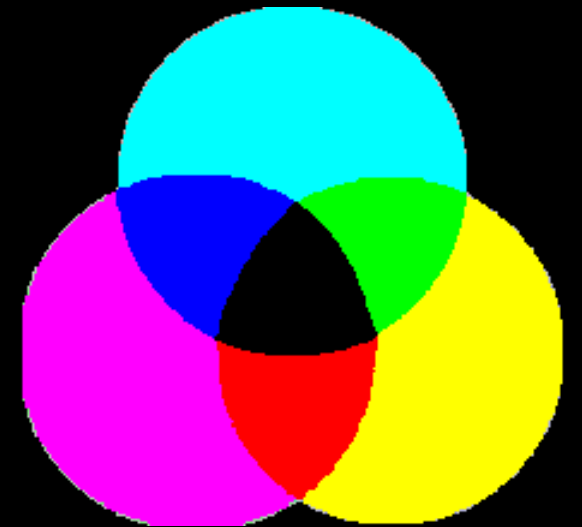
São Formadas Pela Subtração das Primárias:

**Vermelho** = **Magenta** – **Amarelo**

**Verde** = **Ciano** – **Amarelo**

**Azul** = **Magenta** – **Ciano**

A Subtração das Três = **Preto**



## COR Luz (exemplo: televisão)

As Primárias são: **Vermelho**, **Verde** e **Azul**

São Puras: Não se Formam Pela Combinação de Outras Cores

COR Luz: As Secundárias São: **Ciano**, **Magenta** e **Amarelo**

São Formadas Pela Adição das Primárias:

**Ciano** = **Verde** + **Azul**

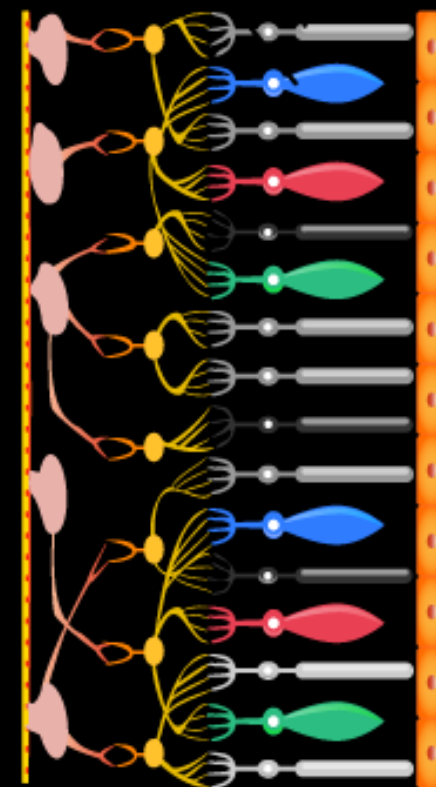
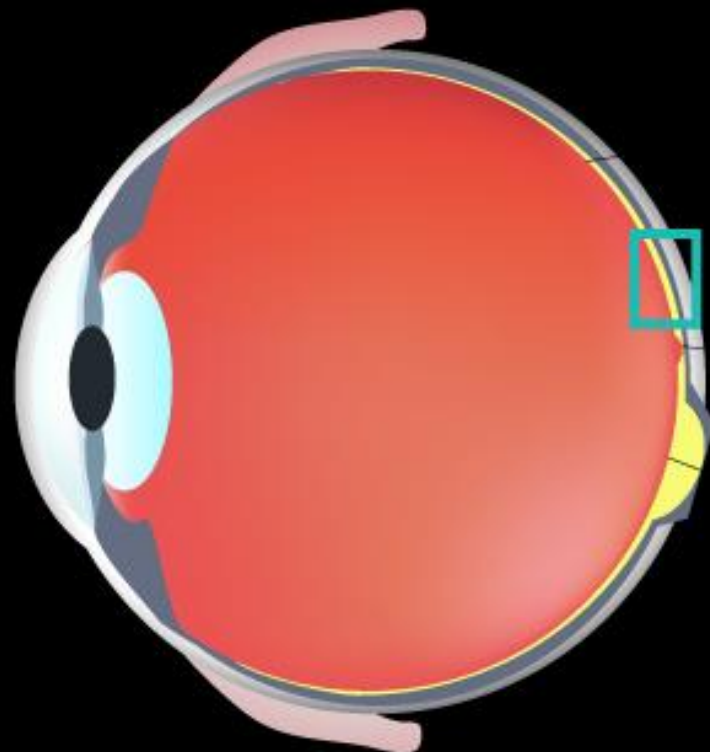
**Magenta** = **Vermelho** + **Azul**

**Amarelo** = **Vermelho** + **Verde**

A Soma das Três = Branco



# O Olho humano

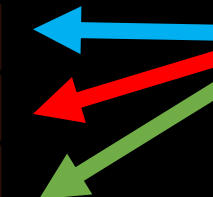


Bastonetes  
(intensidade de luz)

- Branco
- Preto
- “50 tons de cinza”

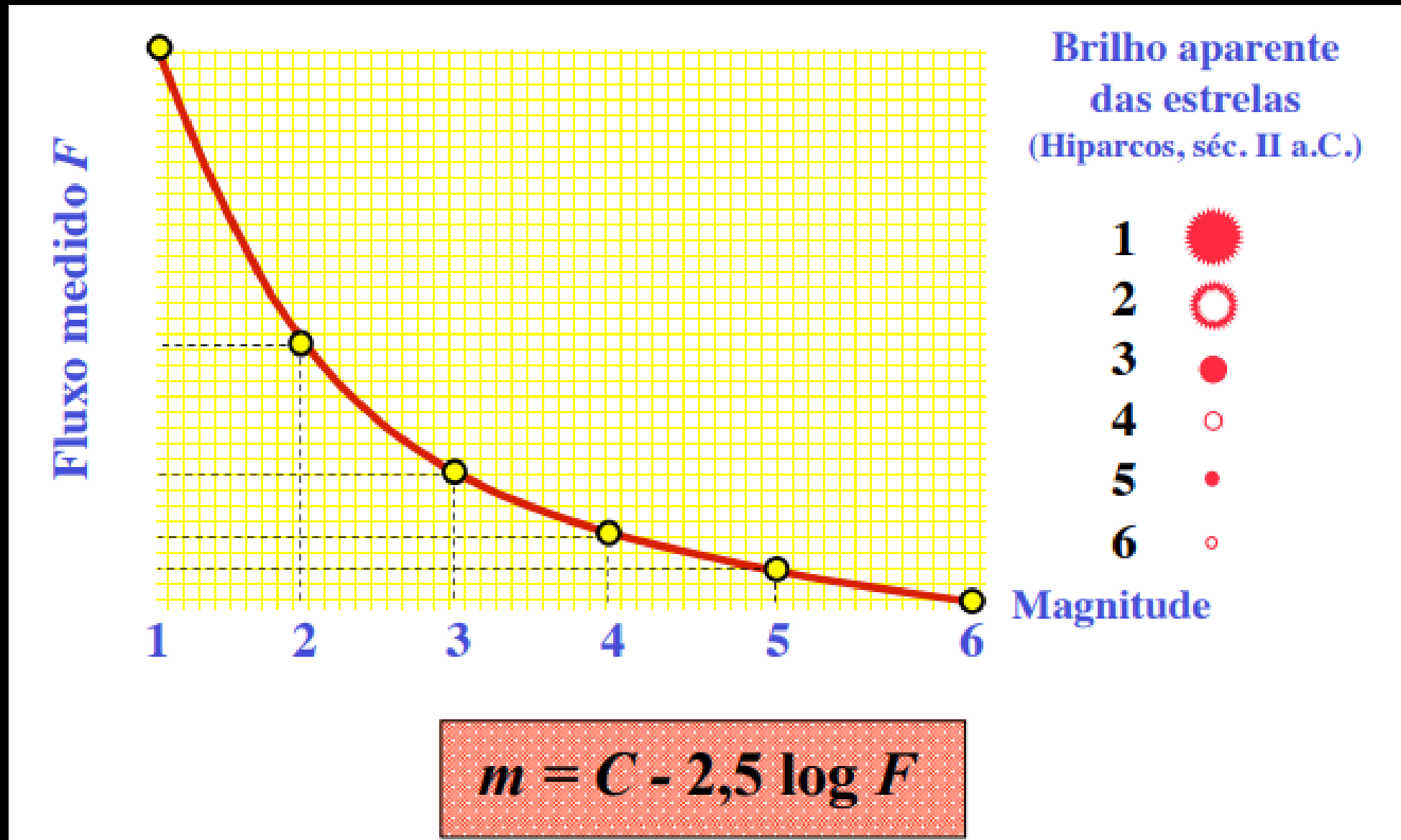


Cones  
(cores)



- A medida que a visão se acomoda ao escuro, como os bastonetes são mais sensíveis ao azul, fica mais difícil distinguir luzes vermelhas do que luzes azuis igualmente tênues.
  - Efeito Purkinje, (fisiologista experimental checo Jan Evangelista Purkinje / 1787-1869).

# O olho humano é um detetor logarítmico!



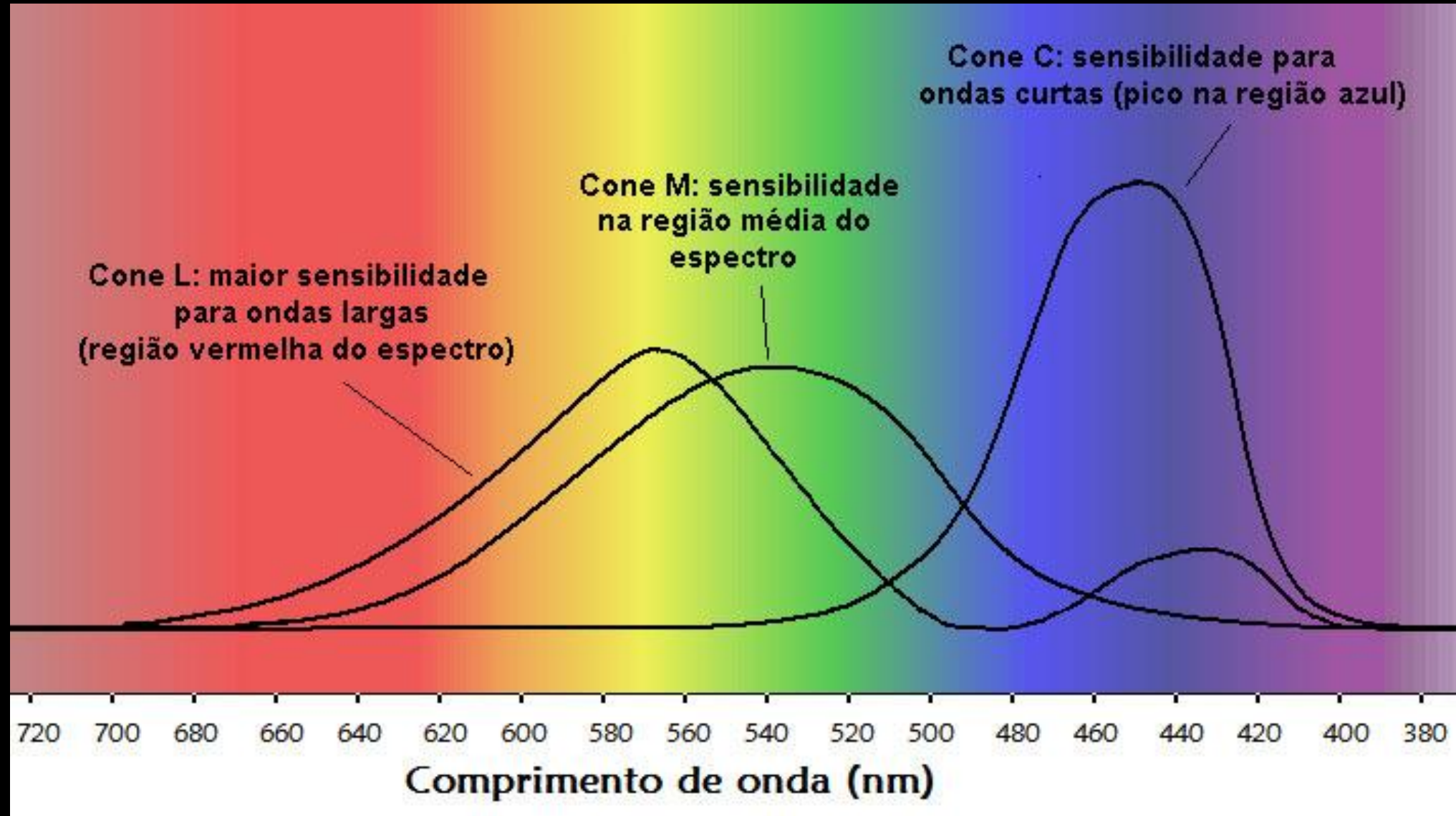
# Magnitude para observação

## *Magnitudes-limite típicas*

		Olho	Binoc.	15cm	25cm	40cm
Cidade	Média	3,2	6,0	10,5	12,0	13,0
	Melhor	4,0	7,2	11,3	13,2	14,3
Semi-Escuro	Média	4,8	8,0	12,0	13,5	14,5
	Melhor	5,5	9,9	12,9	14,3	15,4
Muito Escuro	Média	6,2	10,6	12,5	14,7	15,6
	Melhor	6,7	11,2	13,4	15,6	16,5

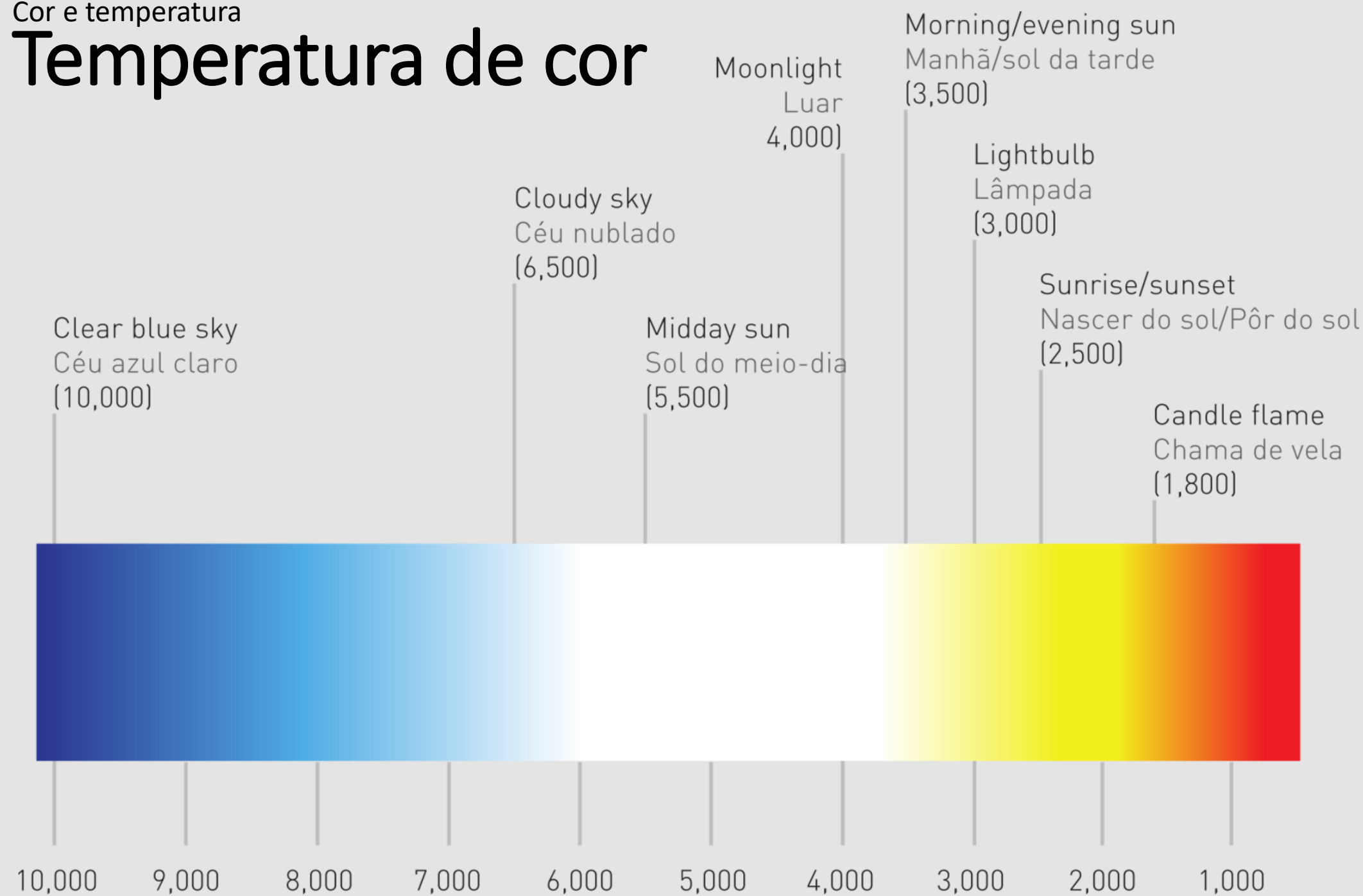


# Olho humano - Cores



Cor e temperatura

# Temperatura de cor



## Visão luminotécnica (arquitetônica)

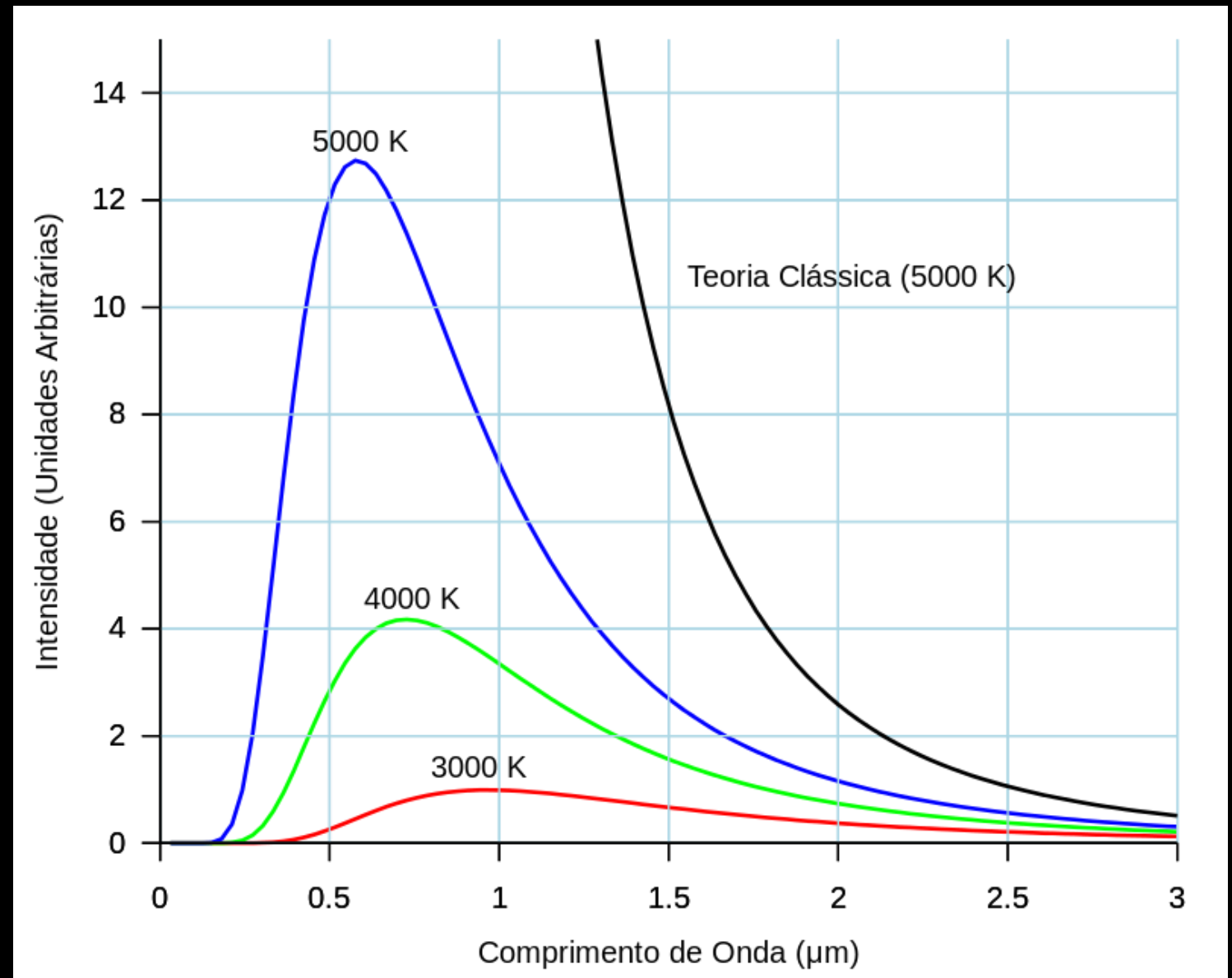


# Radiação de corpo negro

## Catástrofe do ultravioleta

Lei de Rayleigh-Jeans

$$\rho(\lambda) = \frac{8\pi kT}{\lambda^4}$$



# Radiação de corpo negro

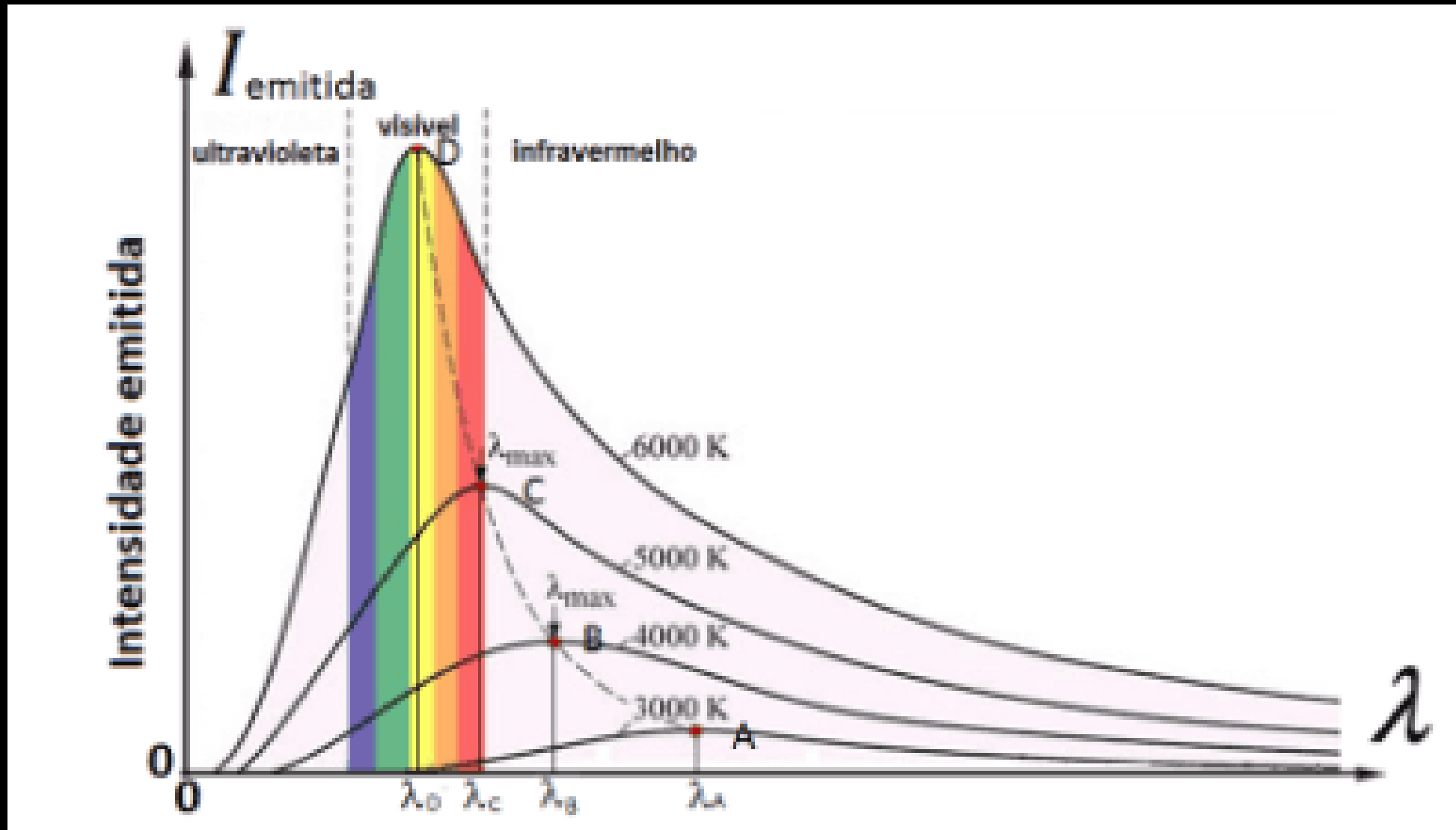
Lei de Planck

$$E_{\lambda}^* \equiv c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}$$

Energia

$$E = (n) h \cdot \nu$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$



# Como se mede a temperatura de uma estrela?

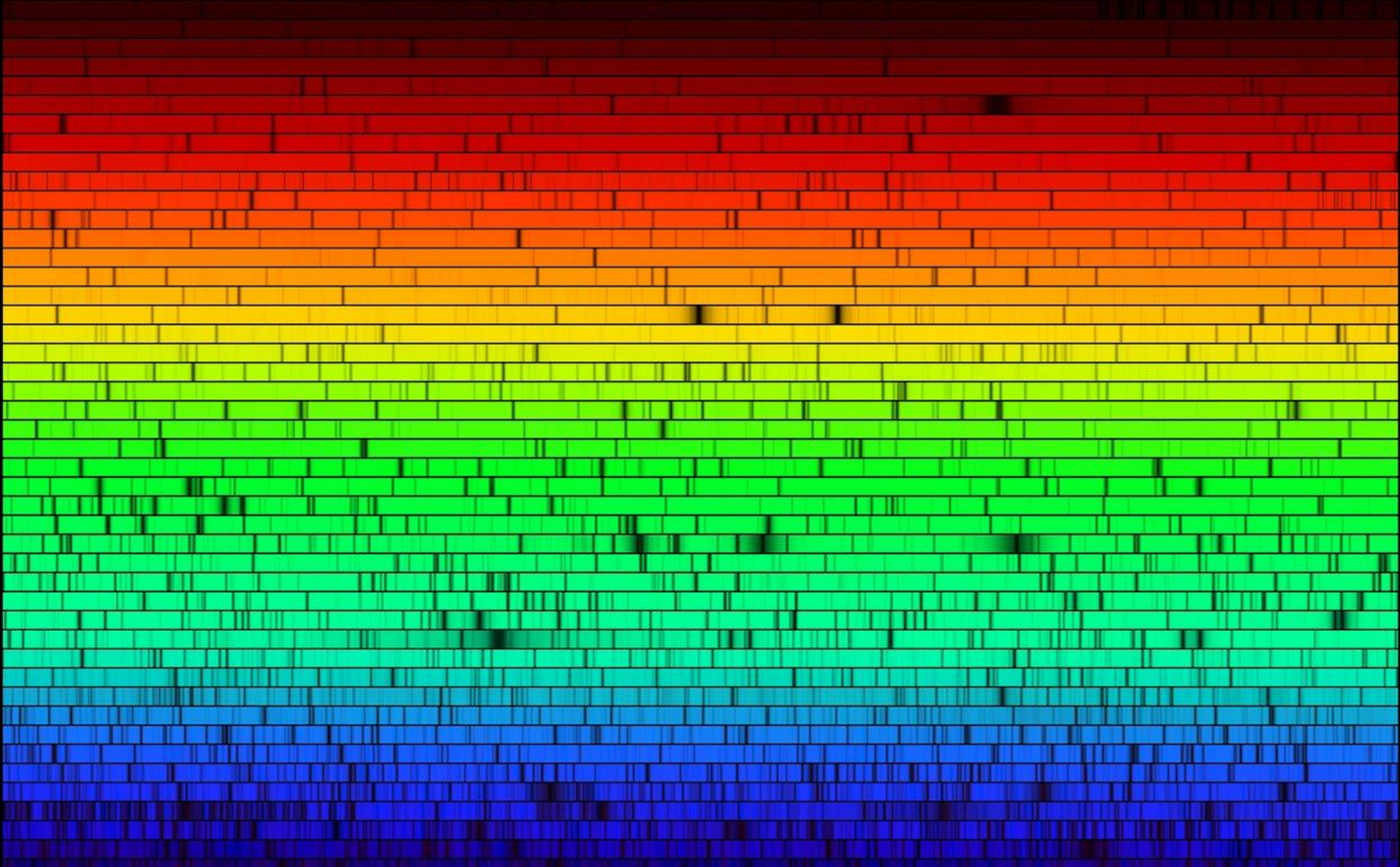
- Lei de Wien:  $\lambda_{\text{max}} = 2,9 \times 10^6 / T$  [nm]
  - mede-se o comprimento de onda que corresponde à emissão do contínuo máxima e
  - obtemos a temperatura (mais difícil...)
- Índice de cor:  $B - V = m_B - m_V = -2,5 \log (F_B / F_V)$ 
  - mede-se o índice de cor e obtemos a temperatura (mais fácil)
- Lembrando: esta é a temperatura na fotosfera da estrela.

# Estrelas - cores

<b>Exemplos Familiares</b>	<b>Índice (B-V)</b>	<b>Temperatura da Superfície (K)</b>	<b>Cor</b>
Spica ( $\alpha$ Vir)	-0.31	35 000	Azul
Regulus ( $\alpha$ Leo)	-0.17	15 000	Azul - Branca
Sirius ( $\alpha$ CMa), Vega ( $\alpha$ Lyr)	0.00	10 000	Branca
Altair ( $\alpha$ Boo)	0.16	8 100	Amarela - Branca
Procyon ( $\alpha$ CMi)	0.30	7 600	Amarela
Sol	0.70	5 500	Amarela
Estrela de Kapteyn	1.41	3 800	Laranja
Estrela de Barnard	1.61	3 000	Vermelha

Espectro do Sol

# Espectro da luz solar



Fonte: [https://supernova.eso.org/exhibition/images/0303\\_C\\_sun\\_spectrum/](https://supernova.eso.org/exhibition/images/0303_C_sun_spectrum/)

## Lei de Wien

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

$$b = 2,8977685 \times 10^{-3} \text{ m.K}$$

$$\lambda_{\max} = \frac{0,0028976}{T}$$

Cor	Frequência	Comprimento de onda
violeta	668–789 THz	380–450 nm
azul	631–668 THz	450–475 nm
ciano	606–630 THz	476–495 nm
verde	526–606 THz	495–570 nm
amarelo	508–526 THz	570–590 nm
laranja	484–508 THz	590–620 nm
vermelho	400–484 THz	620–750 nm

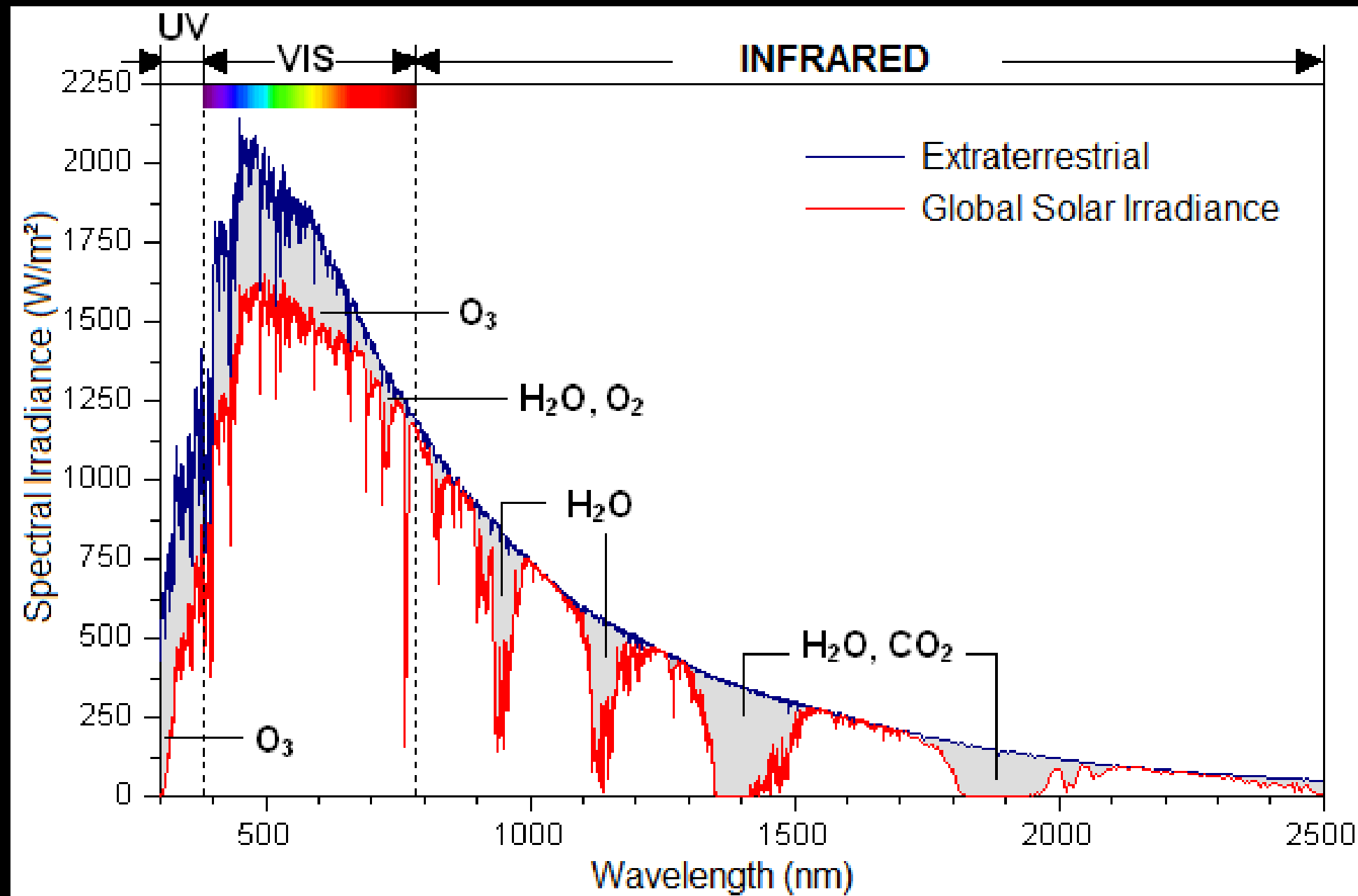
Por exemplo, a temperatura da fotosfera solar é de 5 780 K, logo a maior intensidade acontece quando o comprimento de onda é ~ 500 nm

Verde\*!



# Espectro da luz solar

- **UV** ~ 9%
- **Visível** ~ 42%
- **IR** ~ 49%



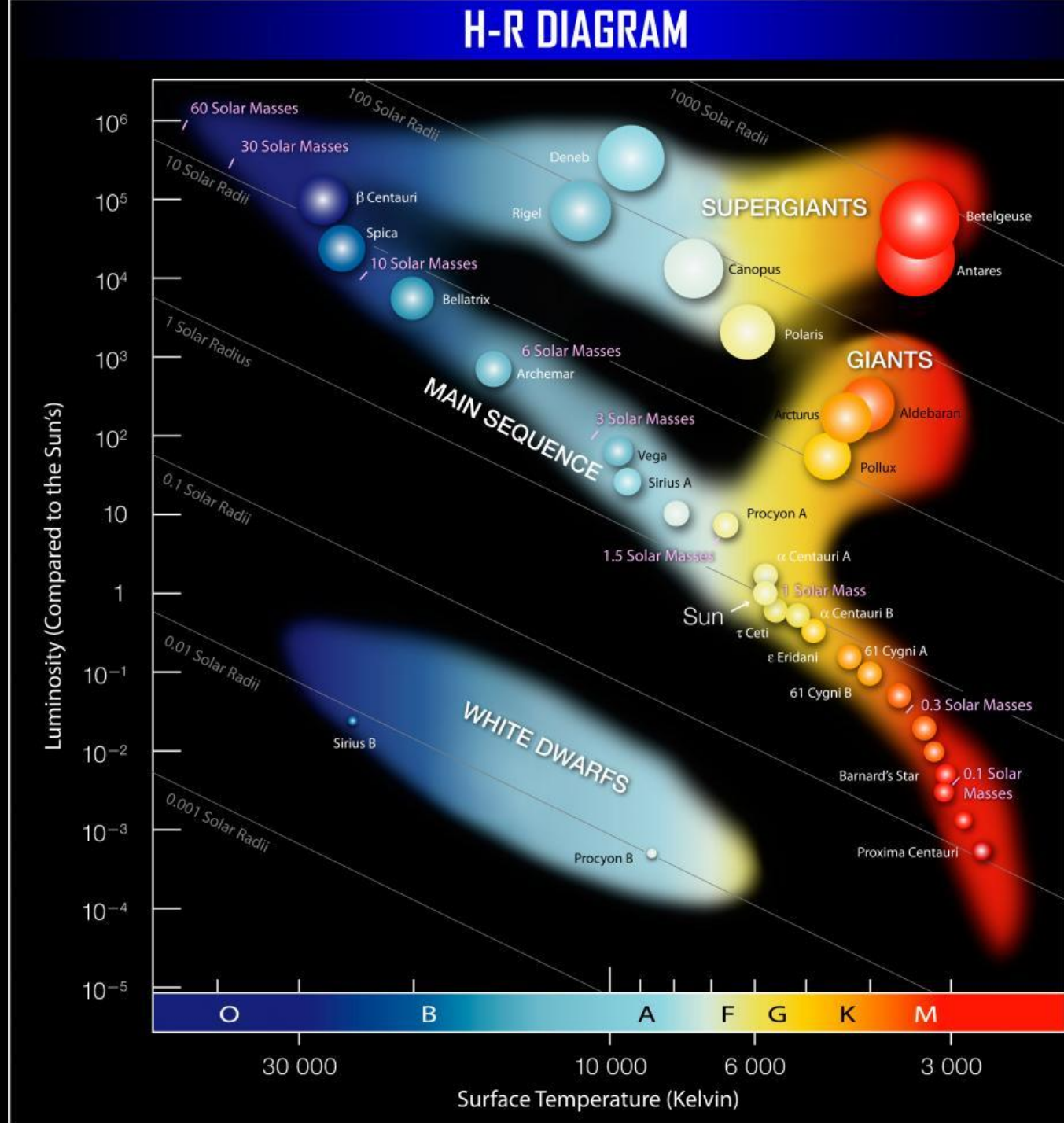
# Então, quais elementos são detectados?

O Sol é constituído por hidrogênio 74%, 24% de hélio e uma fração de elementos mais pesados.

Designação	Elemento	Comprimento de onda (nm)	Designação	Elemento	Comprimento de onda (nm)
y	O <sub>2</sub>	898,765	c	Fe	495,761
Z	O <sub>2</sub>	822,696	F	Hβ	486,134
A	O <sub>2</sub>	759,370	d	Fe	466,814
B	O <sub>2</sub>	686,719	e	Fe	438,355
C	Hα	656,281	G'	Hγ	434,047
a	O <sub>2</sub>	627,661	G	Fe	430,790
D <sub>1</sub>	Na	589,592	G	Ca	430,774
D <sub>2</sub>	Na	588,995	h	Hδ	410,175
D <sub>3</sub> ou d	He	587,5618	H	Ca <sup>+</sup>	396,847
e	Hg	546,073	K	Ca <sup>+</sup>	393,368
E <sub>2</sub>	Fe	527,039	L	Fe	382,044
b <sub>1</sub>	Mg	518,362	N	Fe	358,121
b <sub>2</sub>	Mg	517,270	P	Ti <sup>+</sup>	336,112
b <sub>3</sub>	Fe	516,891	T	Fe	302,108
b <sub>4</sub>	Fe	516,891	t	Ni	299,444
b <sub>4</sub>	Mg	516,733			

# Evolução estelar

- O tempo de vida da estrela na sequência principal (SP) é geralmente 90% do tempo total de sua vida.
- A temperatura e a cor de uma estrela durante a SP é determinada por sua massa. Estrelas de alta massa são muito quentes de modo que elas são azuladas, enquanto que as de baixa massa são frias e avermelhadas.



# Classificação espectral das estrelas

Classe	Temperatura	Cor convencional	Cor aparente	Massa (massas solares)	Raio (raio solar)	Luminosidade	Linhas de hidrogénio	% das estrelas da sequência principal
O	30,000–60,000 K	azul	azul	64 M	16 R	1,400,000 L	Fraco	~0.00003%
B	10,000–30,000 K	azul a azul-branco	azul-branco	18 M	7 R	20,000 L	Médio	0.13%
A	7,500–10,000 K	branco	branco	3.1 M	2.1 R,	40 L	Forte	0.6%
F	6,000–7,500 K	amarelo-branco	branco	1.7 M	1.4 R	6 L	Médio	3%
G	5,000–6,000 K	amarelo	amarelo-branco	1.1 M	1.1 R	1.2	Fraco	7.6%
K	3,500–5,000 K	laranja	amarelo-laranja	0.8 M	0.9 R	0.4 L	Muito fraco	12.1%
M	2,000–3,500 K	vermelho	laranja-vermelho	0.4 M	0.5 R	0.04 L	Muito fraco	76.45%

## Estrelas - magnitudes

<b>Nome da estrela</b>	<b>Magnitude aparente</b>	<b>Magnitude absoluta</b>	<b>Distância da Terra (em anos-luz)</b>
Sol	-26,72	+4,8	0,000016
Sírius	-1,46	+1,4	8,6
Canopus	-0,72	-2,5	74
Rigel Kentaurus	-0,27	+4,4	4,3
Arcturus	-0,04	+0,2	34
Vega	0,03	+0,6	25
Capella	+0,08	+0,4	41
Rigel	+0,12	-8,1	900
Betelgeuse	+0,7	-7,2	1.500
Altair	+0,77	+2,3	16
Proxima Centauri*	+11,05	+15,5	4,3

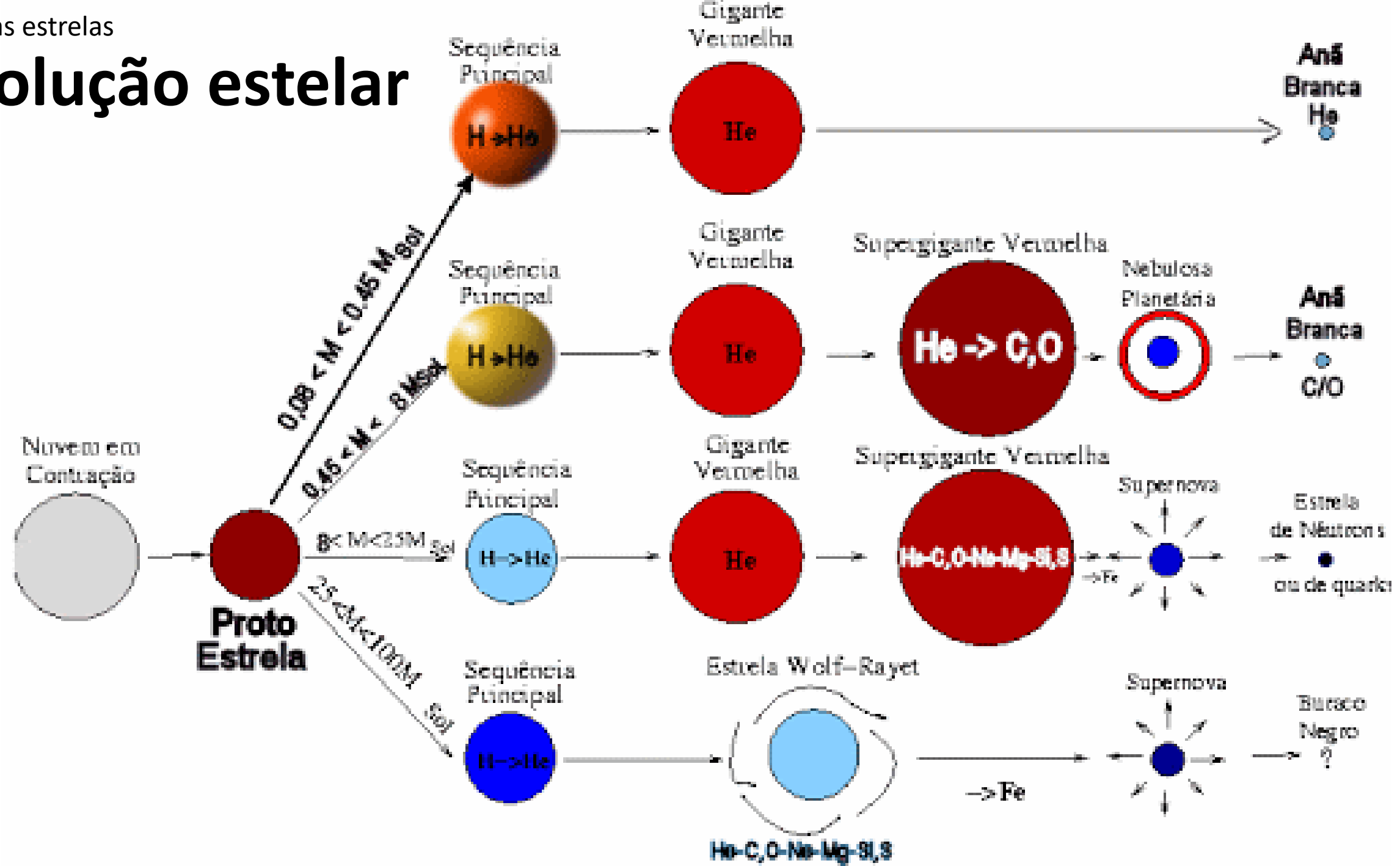
\*Estrela variável.

Fonte: Observatório Nacional.

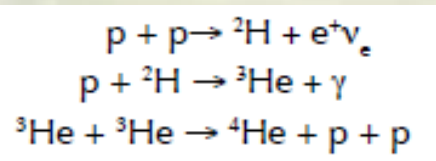
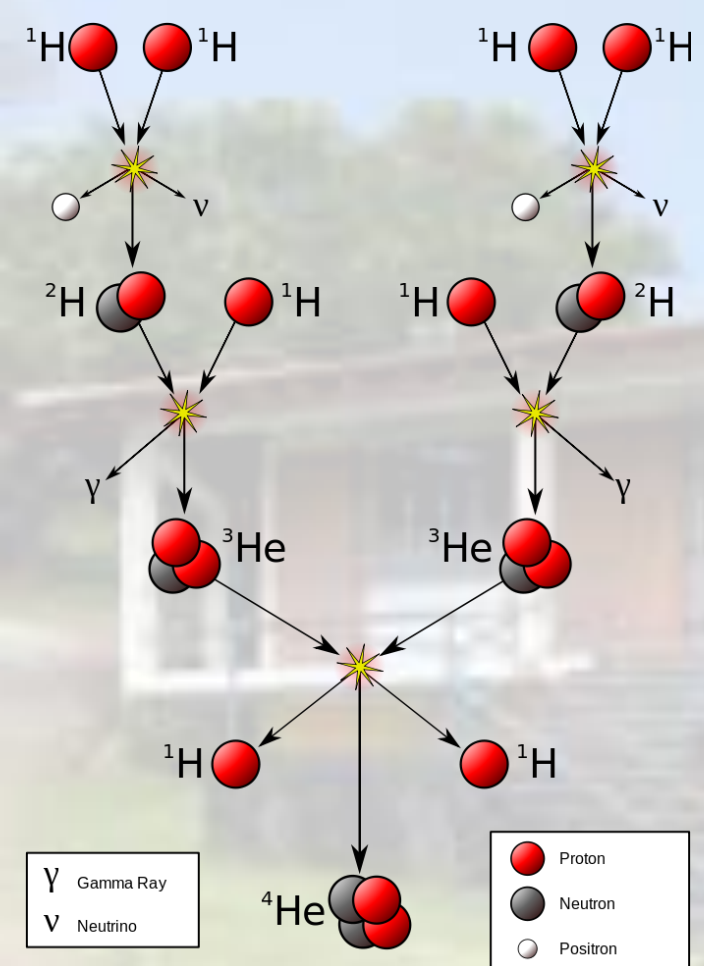
# Evolução estelar – Depois da SP

- Depois que o hidrogênio é esgotado, a estrela contrai e começa a fusão do hélio em seu núcleo. Isso pode ocorrer rapidamente ou gradualmente dependendo da massa da estrela. Nessa fase a estrela sofre uma expansão grande do seu raio que fica maior do que na fase da SP. Durante a expansão a estrela sofre um esfriamento considerável.
- Uma estrela de baixa massa, de cor amarela ou laranja na SP, evolui para uma gigante vermelha durante esse período de expansão. Ela é vermelha porque é fria, e é uma gigante porque possui um raio muito grande. De maneira similar, uma estrela branca ou azul na fase da SP evolui para uma estrela supergigante amarela ou laranja.

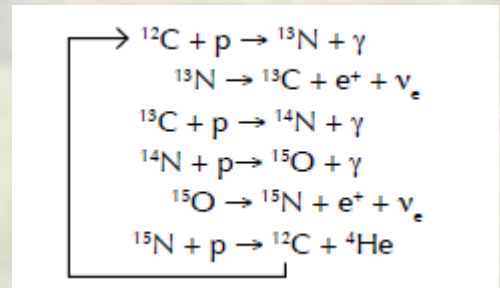
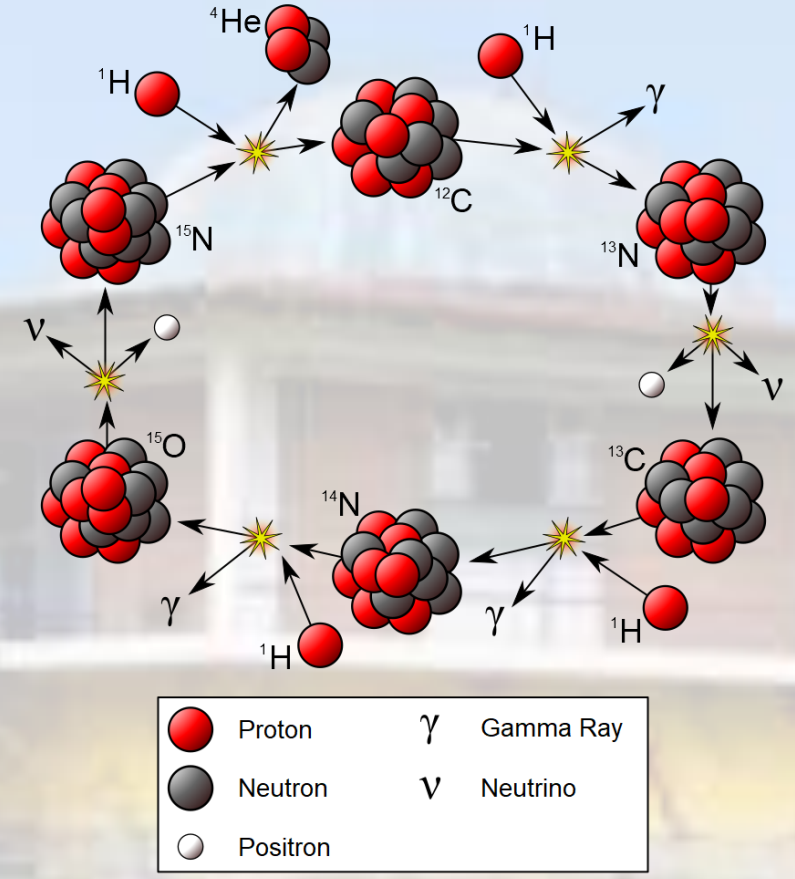
# Evolução estelar



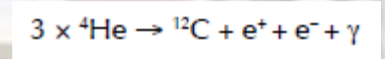
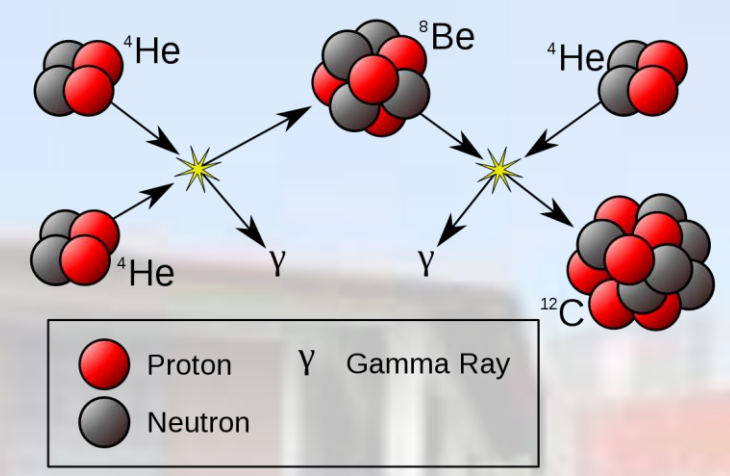
# Evolução estelar e formação de elementos leves



“Ciclo próton-próton”



“Ciclo CNO”



“Ciclo triplo-alfa”

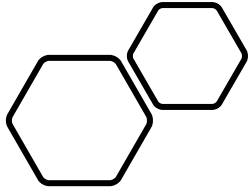


# Elementos pesados

- Captura de nêutrons
  - Não é mais fusão
  - Não é uma reação exotérmica
- Núcleos Ferromagnéticos
- Mesmo processo até  $^{209}\text{Bi}$
- Alta densidade de nêutrons nos primeiros 15 min da supernova
- Nucleossíntese explosiva

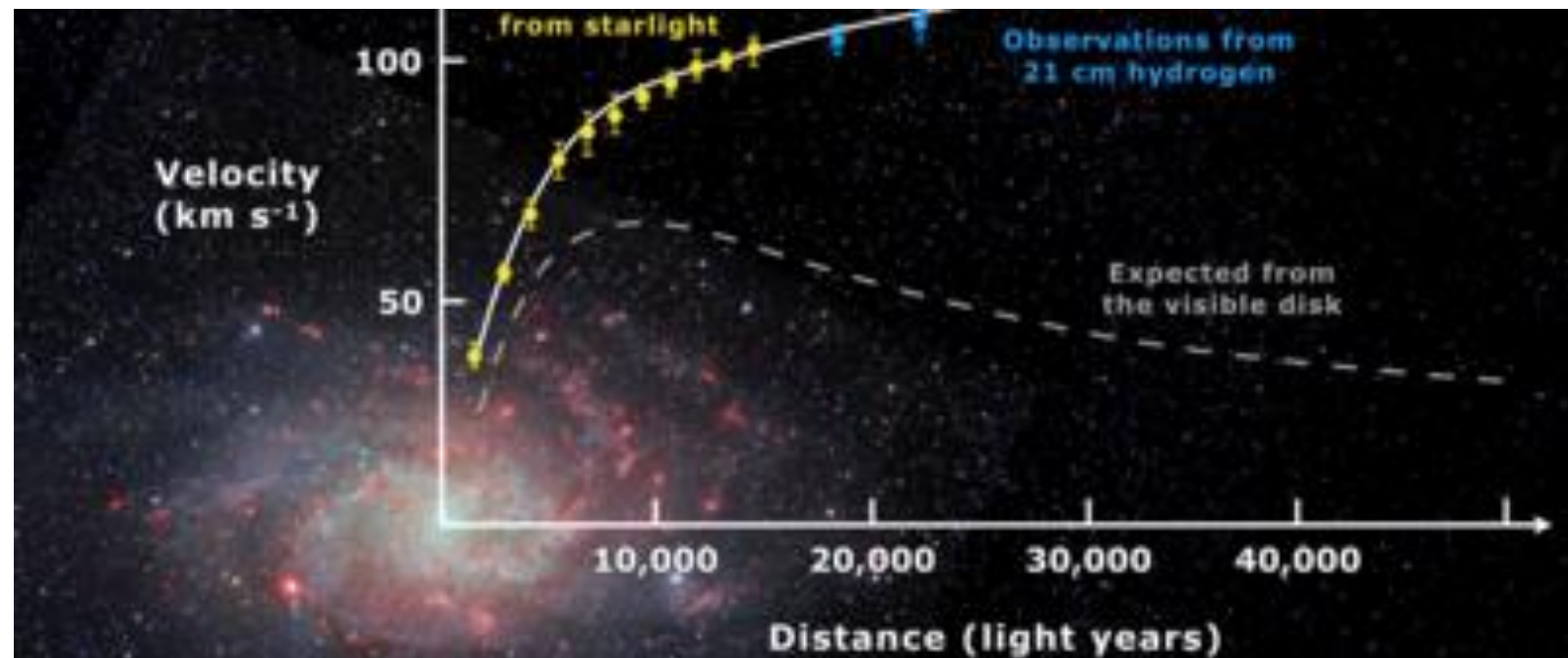


## Reações nucleares das estrelas



## Lembrando... Composição do Universo

- Matéria Bariônica – 5%
- Matéria Escura – 27%
- Energia Escura – 68%





# Conclusão

## Então, qual é a cor do Sol?

- O Sol é amarelo? Visto da Terra na maior parte do dia;
  - A classificação anã amarela é apenas uma nomenclatura\*
- O Sol é laranja? Visto da Terra durante o nascer e o ocaso;
- O Sol é verde “azulado”? É a linha espectral mais intensa;
- Infravermelho? É a maior percentual do seu espectro.
- Então o Sol é branco?
  - Sim! Apesar de branco não necessariamente ser uma cor, ou seja, não é uma luz de comprimento de onda específico, representa para nós humanos o somatório de vários comprimentos de onda. Na verdade nos adaptamos ao longo dos anos de evolução para interpretar essa luz como a cor do Sol.

