

Radiação de Corpo Negro

(Blackbody Radiation)

Gabriel Tolardo Colombo¹, Giovanna Maria Oliveira Nogueira²,
Vitor Hugo Ferrari Ribeiro³

¹ Estudante do terceiro ano da graduação em licenciatura plena em Física pela Universidade Estadual de Maringá;

² Estudante do terceiro ano da graduação do bacharelado em Física pela Universidade Estadual de Maringá;

³ Estudante do terceiro ano da graduação do bacharelado e licenciatura em Física pela Universidade Estadual de Maringá.

Grupo de Laboratório de Física, Universidade Estadual de Maringá, Paraná, PR, Brasil
Laboratório de Física Moderna

Data de Entrega: 07/12/2021

1. Introdução

O estudo do Corpo Negro se refere a um conceito idealizado para um objeto que emite radiação térmica perfeitamente. A emissão e absorção de luz são processos inversos, ou seja, um emissor perfeito de luz também precisa ser um absorvedor perfeito de luz. Do ponto de vista térmico, a forma mais detalhada do espectro da radiação térmica emitida por um corpo quente depende, em certo sentido, da composição deste corpo. Há um tipo de corpo quente que emite espectros térmicos de caráter universal. O objeto seria perfeitamente negro.

Todos os objetos emitem radiação térmica, se suas temperaturas estiverem acima do Zero Absoluto, mas nenhum objeto é realmente um perfeito emissor. Na verdade eles são melhores em emitir ou absorver alguns comprimentos de onda luminosa do que outros. Essas eficiências irregulares tornam difícil o estudo da interação da luz, calor e matéria usando objetos normais. A partir do início do século XX, os cientistas Lord Rayleigh, Wilhelm Wein, e Max Planck estudaram a radiação de Corpos Negros. Planck foi capaz de estudar situação de equilíbrio, utilizando Eletromagnetismo (emissão de dipolo) e Termodinâmica.

O trabalho de Planck sobre radiação de corpos negros é um dos estudos da física que levou até a fundação da ciência da Mecânica Quântica.

2. Fundamentação Teórica

Quando um fecho de luz branca incide sobre um objeto opaco qualquer, sabe-se que uma certa parte dessa luz será absorvida pelo corpo e a outra parte será refletida. Dependendo de quais comprimentos de onda o corpo absorve, a luz que será refletida determina a cor percebida do objeto. Sendo assim, pode-se definir um corpo negro como sendo um objeto que absorve todos os comprimentos de onda incidentes da luz visível e não reflete nenhuma cor de luz que nossos receptores conseguem identificar, parecendo preto para nós observadores, logo, um objeto que absorve toda a radiação incidente é chamado de corpo negro.

Radiação térmica – Se essa energia radiante for absorvida por um objeto, ela não pode simplesmente desaparecer, a energia radiante absorvida torna-se perceptível no aumento da temperatura do objeto (aumento da energia interna). A temperatura dos objetos irradiados não aumenta permanentemente, em algum momento, o equilíbrio térmico será

estabelecido, logo, objetos que absorvem energia radiante devem, portanto, de alguma forma, também liberar energia novamente.

Essa radiação emitida por um corpo em equilíbrio térmico também é chamada de radiação térmica. Nas lâmpadas incandescentes, essa radiação térmica é tecnicamente usada para emitir luz visível. Na verdade, a maior parte da radiação térmica, neste caso, é emitida na faixa de comprimento de onda do infravermelho. Nesta faixa de comprimento de onda, não podemos ver a radiação, mas ainda podemos percebê-la. Percebemos a radiação infravermelha através de nossa pele na forma de calor.

A geração da radiação térmica pode ser explicada pela oscilação dos átomos. Em princípio, todo movimento acelerado de partículas carregadas leva à geração de ondas eletromagnéticas, ou seja, radiação. Quanto mais alta a temperatura, mais forte e mais rápido as partículas vibram e mais radiação é emitida (maior intensidade). Somente no zero absoluto não há movimentos atômicos e o corpo não emite nenhuma radiação térmica.

- Mesmo que, por definição, um corpo negro absorva toda a radiação incidente, ele ainda emite radiação. Não é radiação refletida, mas radiação que o corpo emite "de dentro" devido à oscilação dos átomos.
- Se um objeto não for muito aquecido, a radiação térmica emitida estará na faixa do comprimento de onda do infravermelho. Essa radiação infravermelha é invisível ao olho humano, e é por isso que um corpo negro realmente parece preto!
- A radiação térmica emitida, no entanto, muda sua faixa de comprimento de onda com a temperatura. Em temperaturas suficientemente altas, o espectro de comprimento de onda emitido muda para a faixa visível e até além (isto é, na faixa ultravioleta).
- Com a radiação de corpo negro, o espectro de comprimento de onda emitido de diferentes materiais pode ser examinado em diferentes temperaturas e em diferentes materiais.

A avaliação do experimento ocorre com um diagrama no qual a chamada intensidade espectral é traçada sobre o comprimento de onda. Em termos simplificados, esse diagrama indica qual comprimento de onda é irradiado com qual intensidade (potência radiante por unidade de área). Em 1893, Wilhem Wien já havia demonstrado, usando as leis da termodinâmica, que da mesma forma que a potência total irradiada R , e a distribuição espectral da radiação emitida por um corpo negro depende apenas da sua temperatura absoluta T , e que o comprimento de onda para o qual a radiação emitida é máxima (λ_m) varia inversamente com a temperatura:

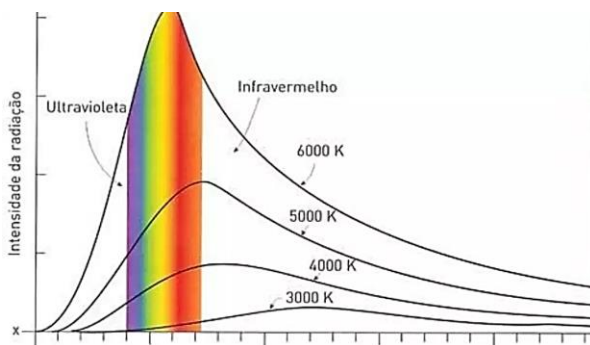


Figura 1 – Região do espectro de emissão de luz visível de um corpo negro

$$\lambda_m \propto \frac{1}{T} \quad (1)$$

$$\lambda_m T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ mK} \quad (2)$$

Este resultado é conhecido como lei de deslocamento de Wien.

Em 1879, Josef Stefan e Ludwig Boltzman descobriram uma relação empírica entre a potência por unidade de área irradiada por um corpo negro ideal e a temperatura:

$$R = \sigma T^4 \quad (3)$$

Onde R é a potência irradiada por unidade de área, T a temperatura absoluta e $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ uma constante denominada constante de Stefan.

Classicamente, as ondas eletromagnéticas no interior de uma cavidade são produzidas por cargas elétricas nas paredes, que vibram como osciladores harmônicos simples [1].

Lembrando que a radiação emitida por um oscilador harmônico simples tem a mesma frequência do próprio oscilador, é natural considerar que o cálculo da distribuição espectral $R(\lambda)$ de um corpo negro, envolverá a determinação da densidade de energia (u) das ondas eletromagnéticas no interior da cavidade.

De acordo com a Lei de Rayleigh-Jeans, a distribuição espectral ($u(\lambda)$) da densidade de energia é dada por:

$$u(\lambda) = \frac{8 \pi k T}{\lambda^4} \quad (4)$$

Em que k é a constante de Boltzmann.

Para grandes comprimentos de onda $R(\lambda)$, calculado a partir da equação (4), está de acordo com os resultados experimentais; mas para pequenos comprimentos de onda, porém, $R(\lambda)$ cresce sem limites, tendendo a infinito quando $\lambda \rightarrow 0$, divergindo completamente dos resultados conforme mostra a figura 2.

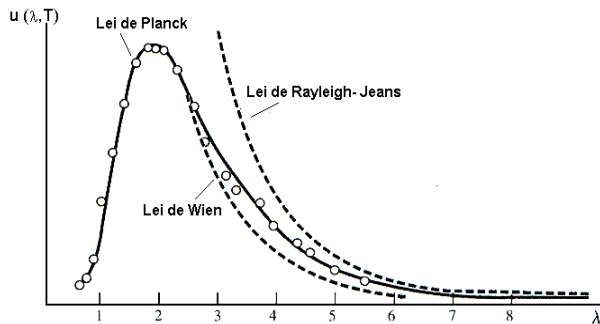


Figura 2 – Região do espectro de emissão onde as leis de Wien e Rayleigh-Jeans concordam com a lei de Planck.

Em 1900, Planck encontrou uma expressão para $u(\lambda)$, que por sua vez, conduzia a um $R(\lambda)$ fielmente coerente aos resultados experimentais para todos os comprimentos de onda e todas as temperaturas.

$$u(\lambda) = \frac{8 \pi h c \lambda^{-5}}{e^{h c / \lambda k T} - 1} \quad (5)$$

Para tal finalidade Planck supôs a energia das cargas oscilantes, e, portanto da radiação emitida, era uma quantizada. O elemento mais importante da equação (5) é o argumento da exponencial, $h c / \lambda$, que, modernamente, é escrito na forma $h f$ [2].

Neste experimento, a distribuição espectral da radiação emitida a partir do interior de uma câmara escura contendo um filamento de tungstênio aquecido será determinada. Numa primeira aproximação, este sistema quando aquecido comporta-se como um corpo negro.

A radiação eletromagnética proveniente do filamento será dispersa após travessar um prisma (60° de abertura). O espectro eletromagnético resultante será detectado por um sensor de luz altamente sensível posicionado no braço móvel de um espectrômetro.

Os comprimentos de onda do espectro eletromagnético serão determinados a partir da equação de Cauchy (6) que correlaciona o índice de refração luz com o ângulo de espalhamento θ .

$$\lambda(\theta) = \sqrt{\frac{13900}{\left(\frac{2}{\sqrt{3}} \sin \theta + \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{3}{4} - 1.689}} \quad (6)$$

As temperaturas do filamento serão determinadas a partir tensão (V) e da corrente elétrica (i) aplicada ao filamento através da equação (7).

$$T(V, i) = 300K + \frac{\frac{V}{0,84 i} - 1}{4,5 \times 10^{-3} K^{-1}} \quad (7)$$

3. Montagem Experimental

3.1. Materiais Utilizados

- Interface;
- Lâmpada;
- Amperímetro;
- Voltímetro;
- Computador.

3.2. Procedimento Experimental

Para começar a montagem desse experimento liga-se o sensor de movimento rotatório, conectando-o nas portas 1 e 2 da interface, na sequência conecta-se o outro cabo no sensor de infravermelho. Depois, alimenta-se o filamento, e então, conecta-o ao

amperímetro, que por sua vez deve ser ligado em série com a fonte e a lâmpada.

Para monitorar a tensão sobre a lâmpada, liga-se o voltímetro em paralelo aos seus terminais, e por fim, o circuito ao computador, além de configura-lo para ler os dados da interface e, a partir deles, fazer a calibração do sistema.

Calibração do Sensor Rotatório

Primeiramente, deve-se retirar a lente de foco, o sensor de infravermelho, a catraca de fendas e, na sequência, remover o prisma e, por último, o braço rotatório.

Configura-se o programa e seleciona-se um elemento em radiano para os dois eixos. Feito isso inicia-se a gravação dos dados e deve-se fazer um giro completo do disco no sentido anti-horário. Enquanto o sistema está sendo girado por uma força imprimida sobre ele através da mão humana, as tabelas vão registrando os valores.

Mantendo a lâmpada ligada, monta-se o sistema mais uma vez para começar as medidas. A montagem do sensor rotatório é feita na ordem inversa da desmontagem. Inicia-se acoplando o braço, na sequência acopla-se o prisma, depois coloca-se a lente de focalização, o disco de fendas, o suporte do filtro de infravermelho e o sensor de infravermelho e por fim acopla-se o pino de fixação.

Configurando inicialmente as medidas, movimenta-se o braço para a posição inicial e inicia-se a gravação de uma nova série de dados, para isso, deve-se interromper o sinal e parar o movimento rotatório. Durante a coleta, movimenta-se o braço vagarosamente para que o sensor faça a leitura dos dados, e ao final, volta-se o braço para a posição inicial, em seguida realiza-se o experimento novamente para uma nova diferença de potencial. Repetindo esses passos, constrói-se os gráficos mostrados na figura 3, que representam os resultados obtidos experimentalmente [3].

4. Resultados

4.1. Resultados Obtidos

Embora o objetivo seja descobrir o comprimento de onda e a temperatura do corpo negro, não se pode medir essas grandezas diretamente. Para isso, obtém-se experimentalmente valores dos ângulos com que a plataforma gira e a respectiva intensidade luminosa captada pelo sensor, para cada valor de diferença de potencial aplicada ao filamento. Os resultados obtidos, expostos na tabela 1, estão representados nos conjuntos de gráficos a seguir.

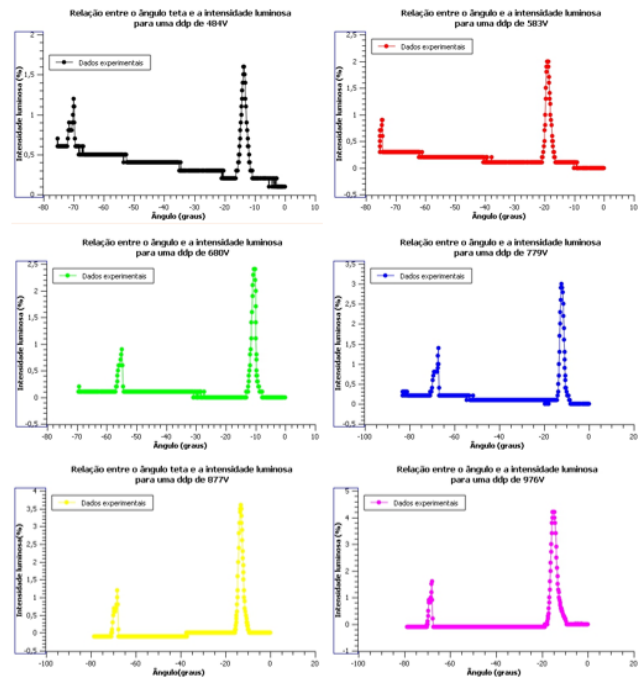


Figura 3 – Medição da intensidade luminosa em função da variação angular.

Além disso, observou-se no multímetro as medidas de diferença de potencial ao qual o filamento estava sujeito, e a respectiva corrente elétrica que o atravessava. Esses dados encontram-se na tabela 1.

D.D.P (V)	Corrente (A)
4,84	0,42
5,83	0,48
6,8	0,53
7,79	0,58
8,77	0,62
9,76	0,66

Tabela 1– Valores da diferença de potencial e corrente obtidos pelo multímetro

4.2. Análise dos Resultados

A partir dos dados utilizados na confecção dos gráficos, quando aplicados na equação de Cauchy, que relaciona o índice de refração da luz com o ângulo de espalhamento, resulta nos comprimentos de onda emitidos pelo corpo negro (que neste experimento, foi aproximado por um filamento de lâmpada). Assim, substituindo os ângulos na equação (6), obtém-se os comprimentos de onda associados a emissão da radiação pelo corpo negro. Além disso, com os dados da tabela 1, aplicados na equação 7, pode-se construir a tabela 2.

D.D.P (V)	Corrente (A)	Temperatura
4,84	0,42	3126
5,83	0,48	3290
6,8	0,53	3472
7,79	0,58	3630
8,77	0,62	3819
9,76	0,66	3989

Tabela 2 – Valores da diferença de potencial e corrente obtidos pelo multímetro

E por fim, pode-se representar a distribuição espectral da intensidade luminosa emitida pelo corpo negro em função do seu comprimento de onda, conforme mostrado no figura 4.

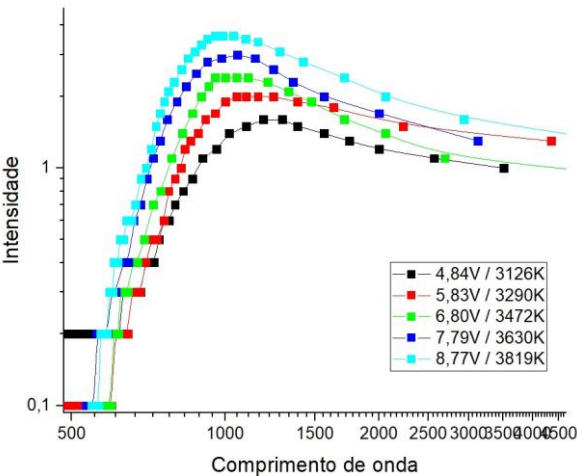


Figura 4 – Distribuição espectral da emissão da radiação do corpo negro

Os valores da intensidade luminosa e da diferença de potencial obtidos para uma ddp de 9,76 volts não foram plotadas na figura 4. Elas apresentaram um padrão completamente desigual se comparado aos outros.

Além disso, vale ressaltar que o gráfico mostra que quanto maior é a temperatura do filamento da lâmpada mais próximo da região do espectro visível da luz se encontra o comprimento de onda de máxima radiação, logo, quanto maior for a temperatura do corpo negro mais o espectro da radiação estará deslocado para a região de luz visível como mostrado por Josef Stefan e Ludwig Boltzmann em seus resultados empíricos. Essa relação pode ser mostrada matematicamente como sendo:

λm T = 2,898 × 10-3 mK (2)

Utilizando-se das temperaturas obtidas pela equação (7) e expostas na tabela 2, juntamente com os lambdas máximos obtidos, pode-se calcular a Constante de Deslocamento de Wien. E fazendo uso da equação de desvio percentual [4], pode-se construir a tabela 3.

T λmax	Valor experimental (m × 10-3)	Desvio percentual Δ (%)
T484 λmax 484	4,077	36
T583 λmax 583	3,946	32
T680 λmax 680	3,712	24
T779 λmax 779	3,977	33
T877 λmax 877	3,93	31
T976 λmax 976	2,974	0,2

Tabela 3 – Valores obtidos da constante de Wien e seu desvio percentual para cada valor de T e λmax em uma dada diferença de potencial

5. Conclusão

Numa análise mais rigorosa, percebe se que alguns fatores não podem ser desprezados na conclusão final da análise dos dados. Alguns desses fatores são a qualidade do vídeo, o erro humano na imprecisão da medição dos dados e principalmente o fato das

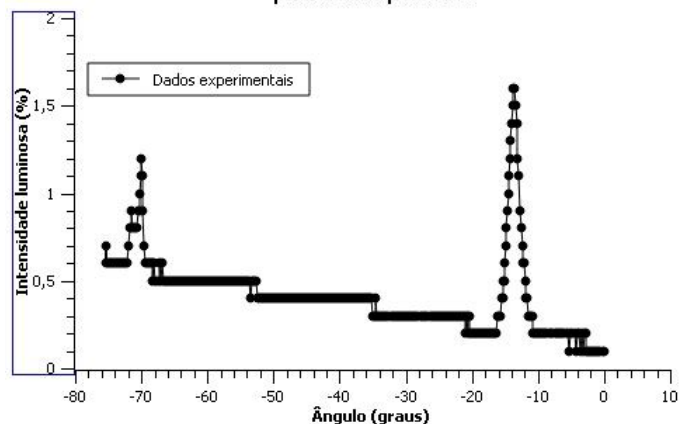
medidas serem extremamente minuciosas de modo, qualquer flutuação cause drásticas alterações nos resultados. Inúmeros são os fatores que podem atuar como interferências no experimento, mesmo fazendo o máximo para evitá-los.

Todavia, os dados obtidos neste experimento não extraviaram as tolerâncias admitidas. A constante de Wien se aproximou muito do valor teórico considerado pela comunidade científica, razão pela qual o desvio percentual foi extremamente baixo mediante as medições que foram realizadas nas condições experimentais.

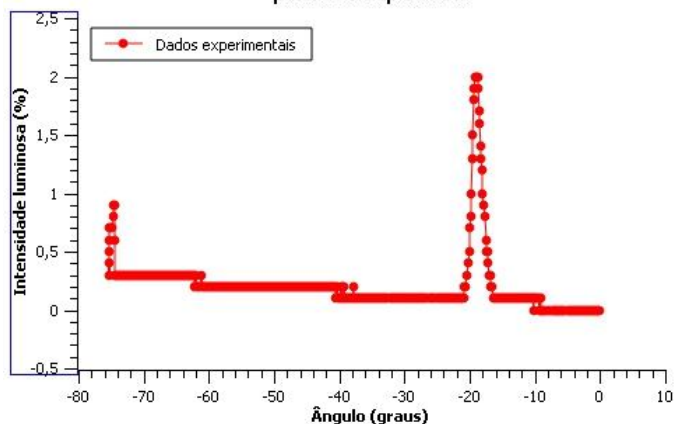
6. Referências Bibliográficas

- [1] TIPLER, Paul A.; LLEWELLYN, Ralph A.. **Física Moderna**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2019. 487p.
- [2] NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Ótica, Relatividade e Física Quântica**: curso de física básica. 2. ed. São Paulo: Bluncher, 2017. 359 p.
- [3] INSTRUCTION Manual and Experiment Guide for the PASCO scientific Model OS-8542: **Black Body Light Source – Spectrophotometer**. Roseville, Ca: Pasco, 1987. 23 p.
- [4] VUOLO, José Henrique. **Fundamento da Teoria dos Erros**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1996.

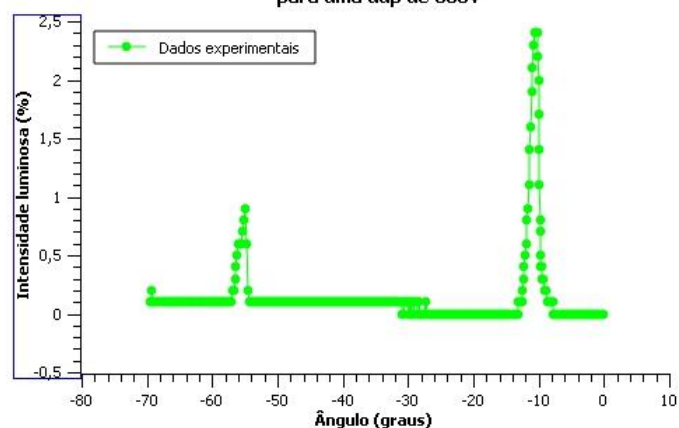
Relação entre o ângulo teta e a intensidade luminosa para uma ddp de 484V



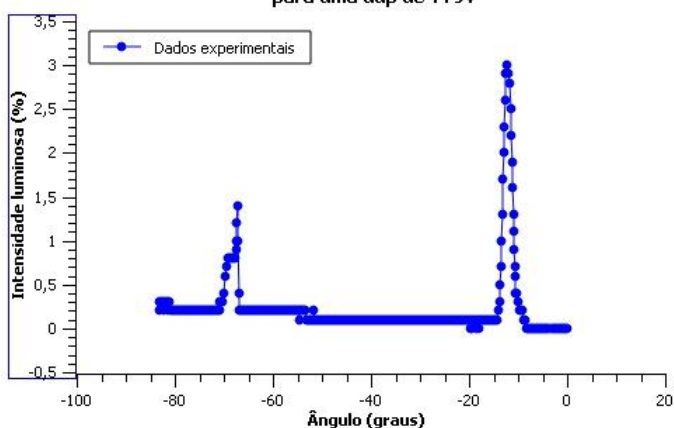
Relação entre o ângulo e a intensidade luminosa para uma ddp de 583V



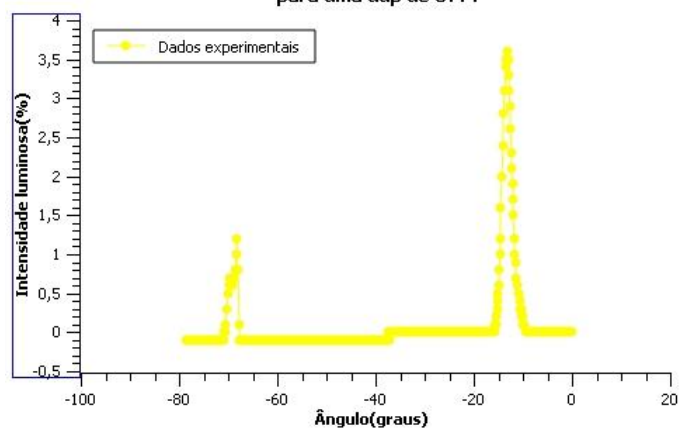
Relação entre o ângulo e a intensidade luminosa para uma ddp de 680V



Relação entre o ângulo e a intensidade luminosa para uma ddp de 779V



Relação entre o ângulo teta e a intensidade luminosa para uma ddp de 877V



Relação entre o ângulo e a intensidade luminosa para uma ddp de 976V

