



MODERN FİZİK

LABORATUVARI

DENEY FÖYÜ

$$E = h\nu$$

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

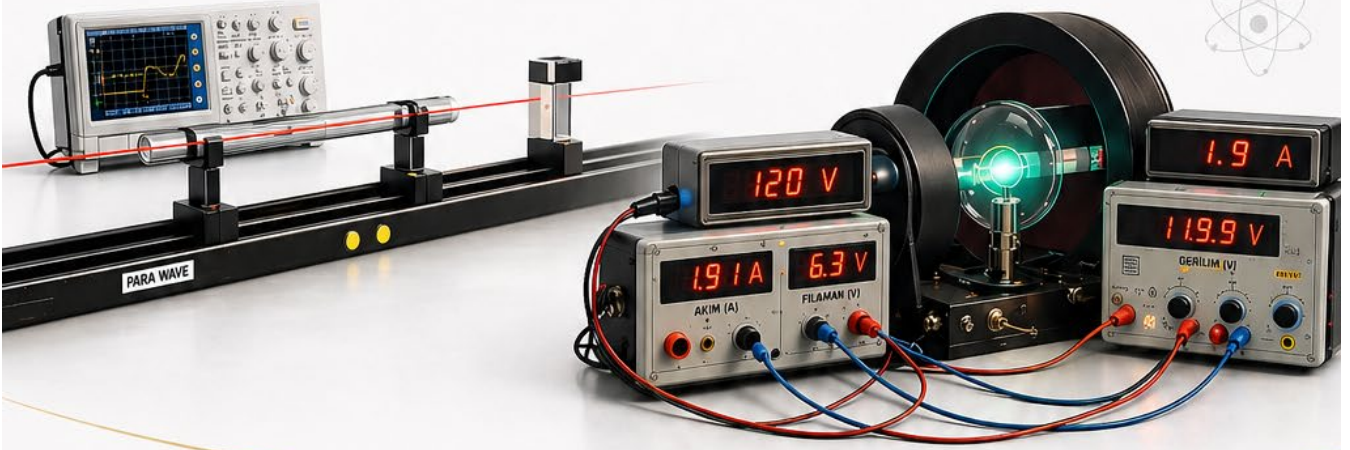
$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda}$$

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

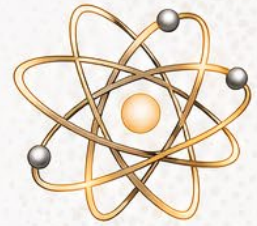
$$c = \lambda\nu$$

$$\Delta E = \frac{h^2}{8mL^2}$$

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$



DENEY I	Işık Hızının Belirlenmesi	1
DENEY II	Termal Radyasyon ve Yüzeyden Yayılan Isıl Enerjinin İncelenmesi	11
DENEY III	Siyah Cisim Işıması ve Stefan-Boltzmann Yasası	22
DENEY IV	Fotoelektrik Olay Yardımıyla Planck Sabitinin Bulunması	34
DENEY V	Elektron İçin Yük/Kütle (e/m) Oranının Ölçülmesi	41
DENEY VI	Atom Spektrumları	55
DENEY VII	Frank-Hertz Deneyi	63

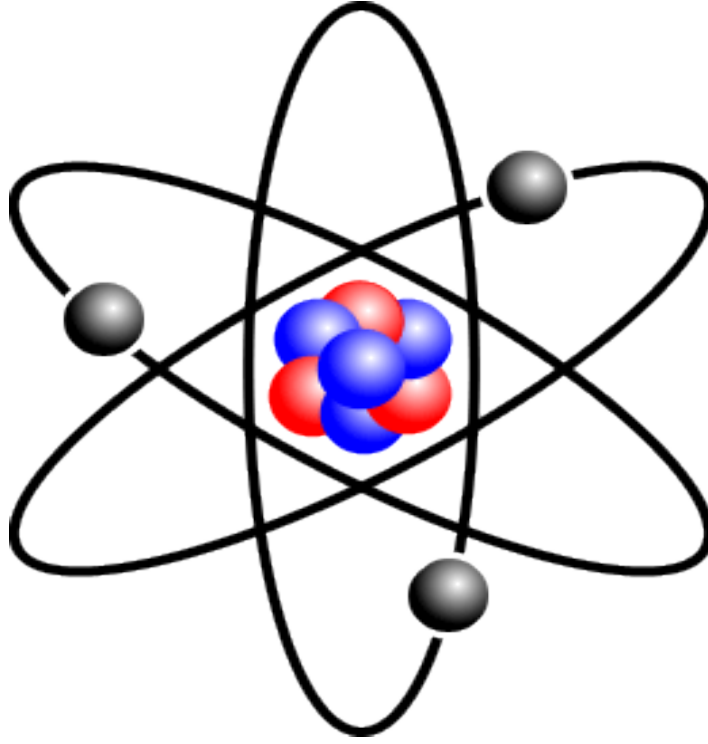




BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN-EDEBİYAT FAKÜLTESİ
FİZİK BÖLÜMÜ



MODERN FİZİK LABORATUAR



Hazırlayanlar

Prof. Dr. Hasan TUNER

Prof. Dr. Yasemin ACAR

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER.....	i
DENEY TAKİP ÇİZELGESİ.....	ii
MODERN FİZİK LABORATUVARI KULLANIM TAAHHÜTNAMESİ VE ÖĞRENCİ BEYANI.....	iii
MODERN FİZİK LABORATUVARI GENEL ESASLARI VE GÜVENLİK REHBERİ	v
DENEY I: IŞIK HIZININ BELİRLENMESİ	1
DENEY II: TERMAL RADYASYON VE YÜZEYDEN YAYILAN ISIL ENERJİNİN İNCELENMESİ	11
DENEY III: SİYAH CİSİM IŞIMASI VE STEFAN–BOLTZMANN YASASI.....	21
DENEY IV. FOTOELEKTRİK OLAY YARDIMIYLA PLACK SABİTİNİN BULUNMASI	33
DENEY V. ELEKTRON İÇİN YÜK/KÜTLE (e/m) ORANININ ÖLÇÜLMESİ.....	41
DENEY VI. ATOM SPEKTRUMLARI	55
DENEY VII. FRANK-HERTZ DENEYİ.....	63
EK-A: DENEY RAPORU ÖRNEĞİ	71

DENEY TAKİP ÇİZELGESİ

Öğrencinin Adı :.....

Öğrencinin Numarası :.....

Deney Adı	Tarih	Deney Onayı	Rapor Onayı
	 / / 20....		
	 / / 20....		
	 / / 20....		
	 / / 20....		
	 / / 20....		
	 / / 20....		
	 / / 20....		
	 / / 20....		
	 / / 20....		
	 / / 20....		

MODERN FİZİK LABORATUVARI KULLANIM TAAHHÜTNAMESİ VE ÖĞRENCİ BEYANI

1. GENEL SORUMLULUKLAR VE CİHAZ GÜVENLİĞİ

Modern Fizik Laboratuvarı bünyesinde bulunan tüm deney düzenekleri (e/m tüpleri, interferometreler, spektrometreler, yüksek gerilim güç kaynakları ve hassas optik bileşenler) yüksek maliyetli ve hassas teknolojik cihazlardır. Bu cihazların korunması ve sürdürülebilir kullanımı noktasında aşağıdaki hususlar öğrencinin sorumluluğundadır:

- **Yetkisiz Müdahale:** Laboratuvar sorumlusunun onayı ve tarif ettiği şekil dışındaki hiçbir düğme, ayar vidası veya bağlantı noktasına müdahale edilmeyecektir.
- **Hatalı Kullanım ve Arıza:** Deney föyünde belirtilen talimatlara aykırı işlem yapılması, sisteme kapasitesinin üzerinde voltaj uygulanması veya fiziksel zorlama neticesinde oluşacak arıza, kırılma ve bozulmalardan doğrudan deneyi yapan öğrenci/öğrenci grubu sorumludur.
- **Maddi Sorumluluk:** Kullanıcı hatasından kaynaklanan ve cihazın işlevselliğini yitirmesine neden olan hasarlarda, üniversitenin ilgili disiplin ve taşınır mal yönetmeliği hükümleri saklı kalmak kaydıyla, zararın tazmini veya cihazın onarım maliyeti hususunda öğrenci yasal muhataptır.
- **Kayıp ve Eksik Parça:** Deney masasında bulunan kablo, mercek, diyafram gibi taşınabilir parçaların kaybolması durumunda sorumluluk ilgili grup üyelerine aittir.

2. İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ (İSG) TAAHHÜDÜ

Laboratuvar ortamındaki potansiyel tehlikelere karşı (Yüksek gerilim, radyasyon, yüksek sıcaklık) kendimi ve çalışma arkadaşlarımı korumak adına:

- Güç kaynaklarını kontrolsüz bırakmayacağımı,
- Sıcak flamanlara ve optik yüzeylere el ile temas etmeyeceğimi,
- Acil durumlarda tahliye planına ve laboratuvar sorumlusunun komutlarına harfiyen uyacağımı,
- Laboratuvar içerisinde kişisel koruyucu donanım (önlük vb.) kurallarına riayet edeceğimi beyan ederim.

3. AKADEMİK DÜRÜSTLÜK VE ETİK

Deney sırasında elde edilen verilerin orijinalliğini bozmayacağımı, başkasına ait verileri kullanmayacağımı ve raporlarımı tamamen kendi emeğimle (el yazısıyla) hazırlayacağımı taahhüt ederim.

4. KABUL VE ONAY

Aşağıda imzası bulunan ben, Modern Fizik Laboratuvarı'nda uygulanacak olan tüm idari kuralları, güvenlik talimatlarını ve cihaz kullanım prosedürlerini okudum, anladım. Kurallara aykırı davranışlarım veya dikkatsizliğim sonucunda laboratuvar envanterine verebileceğim her türlü maddi zararın sorumluluğunu ve hakkımda açılacak idari/disiplin soruşturmalarının sonuçlarını peşinen kabul ediyorum.

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ

Adı Soyadı:

Öğrenci Numarası:

Tel: 0 (.....).....

Tarih: / / 20.....

İmza:

MODERN FİZİK LABORATUVARI GENEL ESASLARI VE GÜVENLİK REHBERİ

1. LABORATUVAR ÇALIŞMA KURALLARI

Laboratuvar ortamında akademik verimliliği ve güvenliği sağlamak adına aşağıdaki hususlara titizlikle uyulmalıdır:

- **Ön Hazırlık ve Denetim:** Öğrenciler deneye gelmeden önce ilgili deney föyünü okumalı ve teorik altyapıyı araştırmalıdır. Hazırlıksız olduğu tespit edilen öğrenciler, laboratuvar sorumlusu tarafından telafiye bırakılabilir. **2 deneyden fazla** telafisi olan öğrenci Devamsızlıktan **kalır**.
- **Devamlılık:** Laboratuvar derslerine **%80 devam zorunluluğu** bulunmaktadır. Devamsızlık durumunda telafi imkânı sunulmayacaktır.
- **Cihaz Kullanım Protokolü:** Laboratuvara girildiğinde cihazlara izinsiz dokunulmamalı veya kurcalanmamalıdır. Deney düzeneği kurulduktan sonra, enerji verilmeden önce mutlaka **sorumlu öğretim elemanına kontrol ettirilmelidir**.
- **Çalışma Etiği:** Deney grupları içinde yardımlaşma esas olmakla birlikte, her öğrenci ölçüm ve hesaplamaları kendileri tarafından **münferit (ayrı ayrı)** olarak yapacaktır. Raporlarında gerekli iş ve işlemleri yapmayan, kurallara göre hazırlanmamış raporlar ile aşırı benzerlik bulunan öğrencilerin raporları **İADE** edilecektir. Takip eden hafta raporların teslim edilmesi gerekir. Raporu eksik olan öğrenciler ilgili deneyi yapmamış sayılacaktır.
- **Ortam Düzeni:** Laboratuvarda ve deneyler sırasında yüksek sesle konuşulmamalı, diğer grupların konsantrasyonu bozulmamalıdır. Cep telefonları kapalı veya sessiz konumda tutulmalıdır. Deney verilerinin alınması için gerekli malzemeler dışındakiler deney masasında yer almamalıdır.
- **Sonlandırma:** Deney bitiminde kullanılan tüm aletler kapatılmalı, kablolar düzenlenmeli ve çalışma masası **kesinlikle temiz** ve kullanıma hazır bırakılmalıdır. Deney sonunda arızalanan veya çalışmayan herhangi bir alet olması durumunda derhal deney sorumlusu öğretim elemanına bilgi verilmelidir. Bilgi verilmeden bırakılan veya kurallar dışında kullanıma bağlı olarak gelişen arıza veya cihaz bozulmalarında gerekli tamir veya değiştirme masrafları ilgili grubun tamamından tahsil edilecektir.

2. İŞ SAĞLIĞI ve GÜVENLİĞİ (İSG) ile ACİL DURUM

Modern Fizik Laboratuvarı; yüksek gerilim, radyasyon kaynakları ve yüksek sıcaklıklar içeren bir ortamdır.

- **Elektriksel Riskler:** e/m, Franck-Hertz ve Fotoelektrik deneylerinde kullanılan yüksek voltajlı güç kaynaklarına müdahale ederken dikkatli olunmalı ve bağlantı şemalarına uyulmalıdır.
 - **Isıl ve Optik Riskler:** Termal Radyasyon, Siyah Cisim ve Franck-Hertz deneylerinde kullanılan flamanlara ve fırınlara temas edilmemeli; Atom Spektrumları ve Zeeman deneylerinde ışık kaynaklarına uzun süre çıplak gözle doğrudan bakılmamalıdır.
 - **Tahliye ve Acil Durum:** Herhangi bir kaza, yangın veya elektrik kaçağı durumunda panik yapılmadan **önce ana şalter kapatılmalı**, ardından laboratuvar sorumlusunun talimatları doğrultusunda en yakın acil çıkış kapısı kullanılarak tahliye gerçekleştirilmelidir.
-

3. DENEY RAPORUNUN HAZIRLANMASI

Raporlar akademik yazım diline uygun, okunaklı tercihen **el yazısı ile** hazırlanmalıdır (*Bilgisayar ortamında çizilen grafikler kabul edilebilir, ancak raporun tamamı bilgisayarda yazılmamalıdır*). Rapor hazırlanırken EK 1’de verilen düzen takip edilmelidir.

MODERN FİZİK

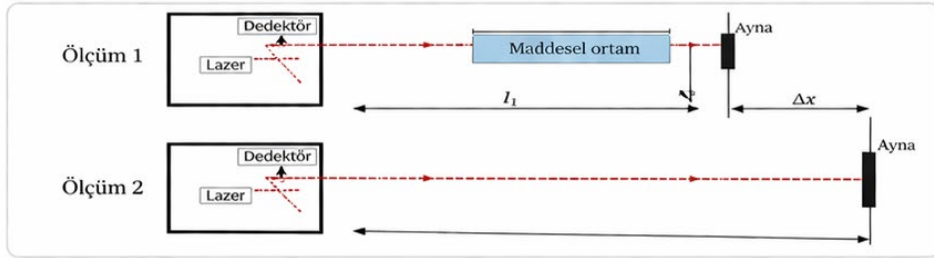
DENEY FÖYÜ

IŞIK HIZININ BELİRLENMESİ DENEYİ

MODÜLASYON VE FAZ KAYMASI YÖNTEMİ



DENEY DÜZENİĞİNİN ŞEMATİK GÖSTERİMİ



TARİHSEL ÖNCÜLER: IŞIK HIZINI ÖLÇME YÖNTEMLERİ

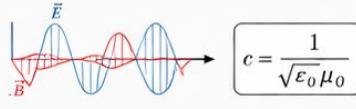
DİŞLİ ÇARK (STROBOSKOP) YÖNTEMİ



Hippolyte Fizeau
(1819–1896)

Dişli çark ve stroboskop yöntemiyle ışığın geçiş süresini ölçmüştür.

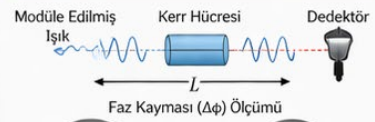
ELEKTROMANYETİK DALGALARLA HESAPLAMA



James Clerk Maxwell
(1831–1879)

Elektromanyetik dalgaların yayılma hızının, ortamın elektriksel geçirgenliği (ϵ_0) ve manyetik geçirgenliği (μ_0) ile belirlendiğini göstererek ışığın elektromanyetik bir dalga olduğunu ortaya koymuştur.

MODÜLASYON VE KERR HÜCRESİ YÖNTEMİ



Wilhelm Karolus
(1872–1945)



Friedrich Mittelstaedt
(1874–1950)

1928 yılında modülasyon ve Kerr hücresi kullanarak ilk kez ışık hızını ölçmüşlerdir.

DENEY I: IŞIK HIZININ BELİRLENMESİ

1. Deneyin Amacı:

Işık hızını (c) yüksek frekanslı (50 MHz) modülasyon yöntemiyle ölçmek. Faz farkı ($\Delta\phi$) ve zaman gecikmesi (Δt) kavramlarını osiloskop üzerinde gözlemlemek. Farklı ortamlarda (hava, su, cam/akrilik) ışık hızının değişimini incelemek ve bu ortamların kırma indisini belirlemek.

2. Kullanılan Araç ve Gereçler

- PHYWE Işık Hızı Ölçüm Cihazı (11226-88)
- Çift Kanallı Osiloskop (En az 20-60 MHz bant genişliği)
- Optik Ray ve Reflektör (Ayna)
- BNC Bağlantı Kabloları
- Cam ve Su ortamları

3. Teorik Bilgi

Işığın boşluktaki hızı yaklaşık 3×10^8 m/s'dir. Bu kadar yüksek bir hızı kısa mesafelerde ölçmek için lazer ışığı ν frekansında modüle edilmiş bir ışık demetinin gönderici (transmitter) ve alıcı (receiver) sinyalleri arasındaki faz farkı ve zaman gecikmesi ölçülerek belirlenir.

Işık kaynağından çıkan modüle edilmiş lazer ışığı belirli bir mesafeyi kat ettikten sonra bir ayna tarafından yansıtılıp fotodetektör tarafından algılanır. Işığın sonlu bir hızla yayılması nedeniyle, gönderilen ve alınan sinyaller arasında:

- bir zaman gecikmesi Δt
- buna karşılık gelen bir faz farkı $\Delta\phi$

oluşur. Bu gecikme, ışığın kat ettiği yol ile doğrudan ilişkilidir.

Işığın aldığı yol (Δd) aynaya gidip gelme mesafesi kadardır. Cetvelde Δx değeri okunursa ışık demetinin aynadan yansıyıp geri döndüğü toplam yol $\Delta d = 2 \Delta x$ olur. Bu yolun neden olduğu faz kayması ($\Delta\phi$) ile arasındaki ilişki şöyledir:

$$\Delta t = \frac{\Delta\phi}{2\pi\nu} \text{ şeklindedir.}$$

$$c = \frac{2\Delta x}{\Delta t} \quad (1)$$

$$c = \frac{4\pi\nu \Delta x}{\Delta\phi} \quad (2)$$

Burada $\Delta\phi$, **radyan** cinsinde faz kaymasıdır. Derece cinsinden verilen bir faz kayması radyana

$$\theta_{(rad)} = \frac{2\pi}{360} \theta_{(o)} \text{ ifadesiyle çevrilmelidir.}$$

Eğer faz kayması yerine direk ışığın Δd yolunu aldığı süre okunabilirse, ışığın hızı Denklem (1) kullanılarak kolaylıkla hesaplanabilir. Herhangi bir açıdaki faz kayması için ışığın havadaki hızı Denklem (2) yardımıyla bulunabilir.

Hava dışında maddesel bir ortamda ışık hızı 3×10^8 m/s değerinden daha düşüktür. Maddesel ortamın ışığı kırma indisi n olmak üzere, maddesel ortamda ışığın hızı;

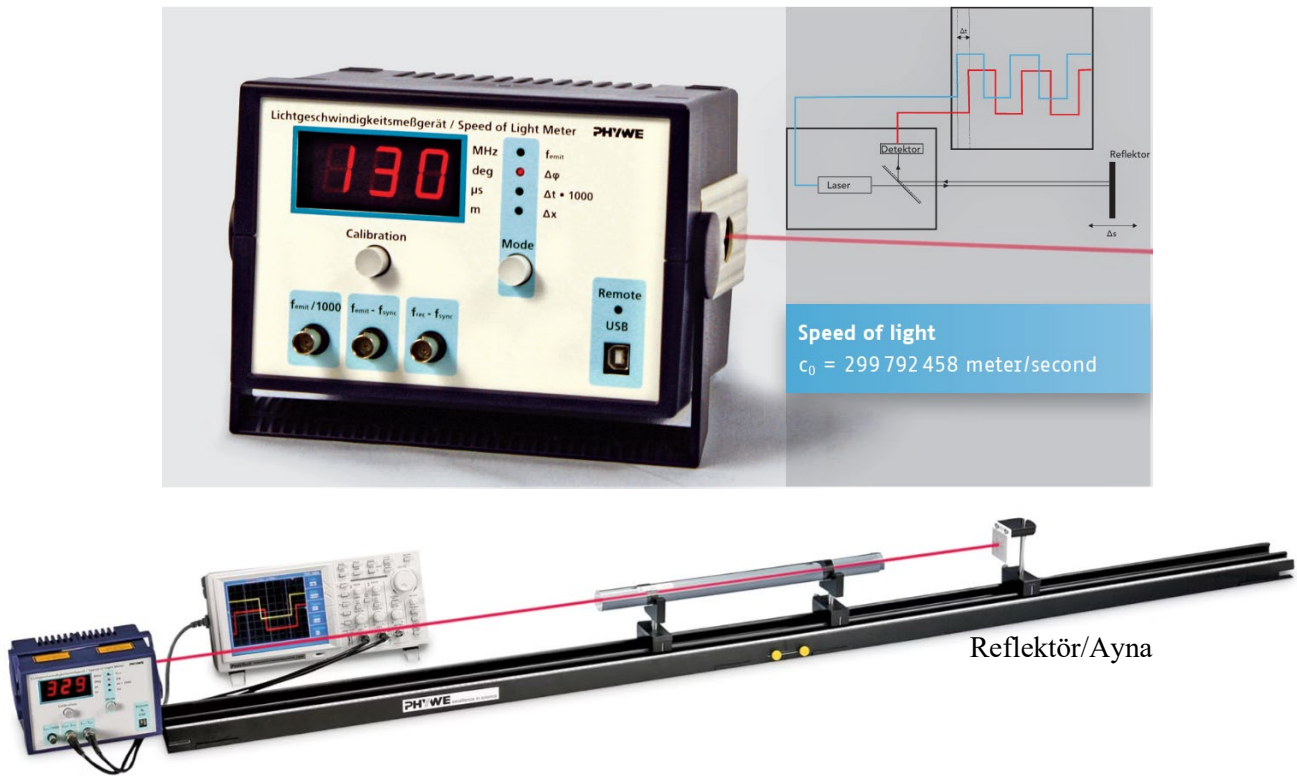
$$v = \frac{c}{n} \text{ olarak yazılır. Ya da ışığın kırma indisi,}$$

$n = \frac{c}{v}$ olarak yazılır. Buradan hava ve boşluk dışındaki diğer maddesel ortamların kırma indisinin her zaman $n_{\text{ortam}} > 1$ olacağı gerçeği ortaya çıkar.

4. Deneyin Yapılışı

Deney Kurulumu ve Hazırlık

1. Şekil 1’de verilen düzeneği kurun. Cihazı açın ve lazerin kararlı hale gelmesi için **2-3 dakika** bekleyin.



Şekil 1: a) Işık hızı ölçüm ve lazer cihazı ve b) deney düzeneğinin kurulmuş hali.

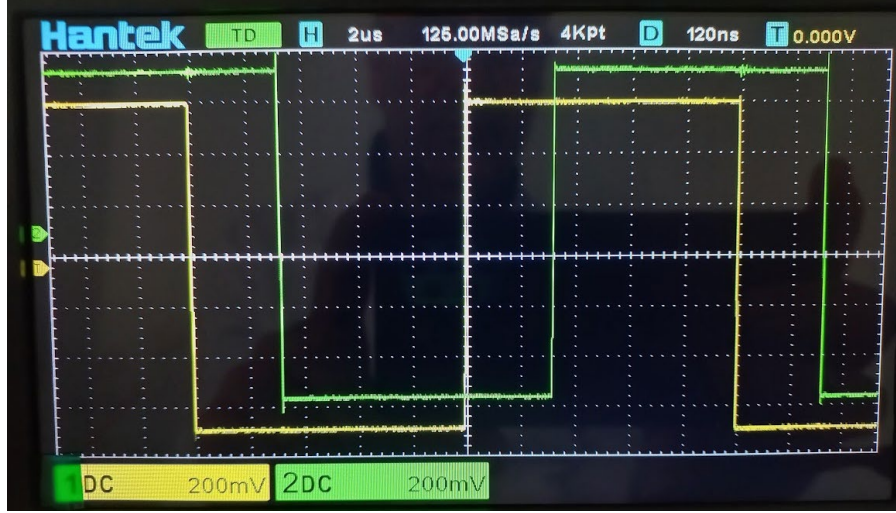
2. Reflektörü rayın üzerine yerleştirin. Lazer ışığının tam merkeze vurduğundan ve geri döndüğünden emin olun.
3. Önce $f_{\text{emit}}/1000$ çıkışını osiloskopun 1. kanalına bağlayın ve ışığın modülasyon frekansını osiloskoptan ölçün. Osiloskoptan ölçülen frekans 10^3 kat azaltılmıştır. Bu sebeple ölçtüğünüz değeri bu çarpan kadar arttırmalısınız

$$v = \dots \times 10^3$$

Daha sonra Kanal 1’e Cihaz üzerindeki $f_{\text{emit}}-f_{\text{sync}}$ (Referans) çıkışını. Kanal 2’ye Cihaz üzerindeki $f_{\text{rec}}-f_{\text{sync}}$ (Alınan) çıkışını bağlayın ve iki kare sinyalin ekranda aynı ölçekte görünmesini sağlayın ve her iki sinyali de net bir şekilde ekrana sabitleyin.

I. Kısım: Hava Ortamında Işık Hızının Ölçümü

Düzenegi kurduktan sonra cihazın kalibrasyonunun yapılması gerekir. Reflektörü (ayna) cihaza en yakın noktaya (başlangıç noktası) getirin. Cihaz üzerindeki "Calibration" düğmesine basarak dijital ekrandaki fazı "0" 'a eşitleyin. "Mode" düğmesine basarak $\Delta\phi$, Δt ve Δx değerlerinin "0" olduğundan emin olun. Osiloskopta iki kare dalgasının üst üste bindiğini gözlemleyin (Şekil 2).



Şekil 2: Osiloskop ekranında giden ve yansıyan ışık sinyallerinin ekrandaki görüntüsü (sarı: giden ışık, yeşil yansıyan ışık).

Deneyde hava ortamında ışık hızı iki farklı yöntemle ölçülecektir. Zaman gecikmesi ve faz kayması yöntemleri

Zaman Gecikmesi ve Faz Farkı Yöntemi ile Işık Hızının Bulunması

Cihaz Kullanarak Ölçme

Cihaz üzerindeki "Mode" düğmesine basarak sırasıyla Δt ve Δx değerleri doğrudan cihaz ekranından okunur. Okuduğunuz Δx değerlerini ray üzerindeki değer ile kıyaslayınız.

Osiloskop Kullanarak Ölçme

- Osiloskop zaman tabanı (Sec/Div) ve genlik (Volts/Div) ayarları, ekranda net ve kararlı bir kare dalga görülecek şekilde ayarlanır.
- CH1 ve CH2 için; Volts/Div ayarları ayrı ayrı optimize edilir ve sinyallerin genlikleri karşılaştırılabilir hale getirilir
- Sec/Div ayarı yapılırken şu iki noktaya dikkat edilmelidir:
 - En az bir periyot net görülecek şekilde seçilir
 - Faz farkını okuyabilecek çözünürlük sağlanır

İki sinyalin aynı frekansta olduğu ve üst üste bindirildiğinde benzer form gösterdiği kontrol edilir

- Bu durumda sistem kalibre edilmiş (referans durum) kabul edilir



Şekil 3: Kullanılan osiloskop ve kullanılacak ayar düğmeleri

Veri Toplama:

- Reflektörü ışık kaynağına mümkün olduğu kadar yaklaştırın ve “**Mode**” tuşunu kullanarak $\Delta\phi$, Δt ve Δx değerlerinin “**sıfır**” olduğunu kontrol edin. Değilse “**Calibration**” tuşuna basarak kalibre edin.
- Reflektör ray üzerinde farklı konumlara kaydırılır. Osiloskoptan birer kare faz farkı olacak konumları seçmeniz kolaylık sağlayacaktır. Her konum için, $\Delta\phi$, Δt ve Δx cihaz ekranından okunur. Bu değerler Osiloskop ekranında CH1 ve CH2 sinyalleri birlikte gözlenerek $\Delta\phi$, ve Δt değerleri cihazinkilerle karşılaştırılır. Yatay eksendeki fark ölçülür. **Sec/Div** ölçeği kullanılarak zaman kayması:

$$\Delta t = (\text{bölme sayısı}) \times (\text{Sec/Div})$$

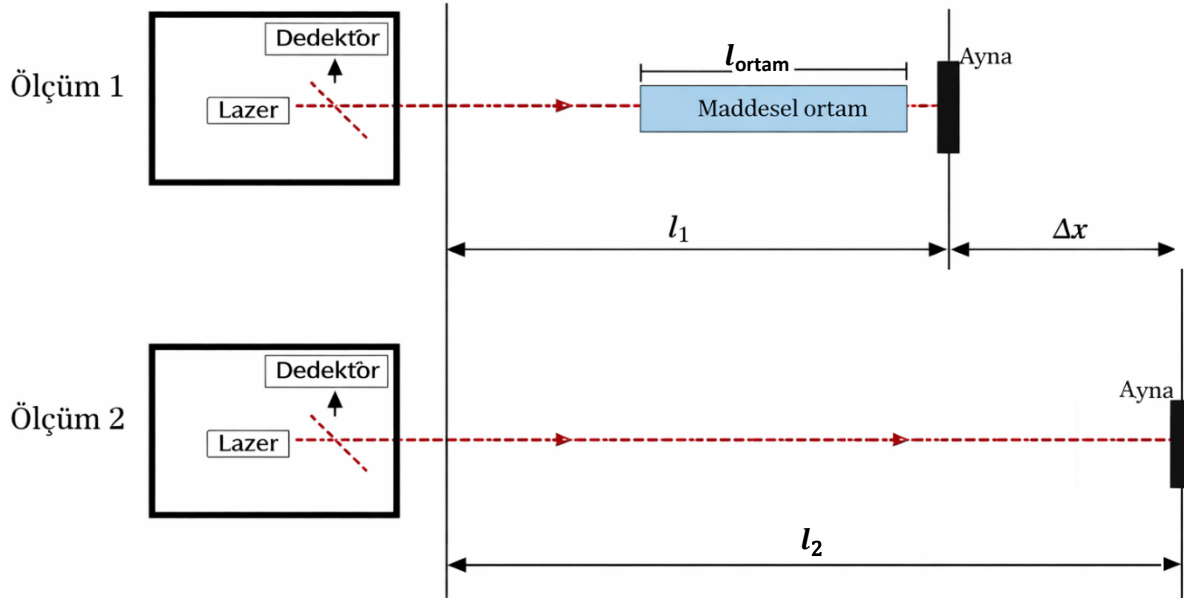
Tablo 1: Cihaz ve ray kullanarak Denklem (1) ve (2) uygulanarak havadaki ışık hızını belirleme

Δx (Cihaz)	$\Delta\phi$ (Cihaz)	Δt (Cihaz)	Δt (Osiloskop)	c (1)	c (2)
		C_{ort} = ...			

- $2\Delta x$ 'e karşılık Δt grafiği çizilip eğimden ışık hızı bulunur.
- Denklem (2)'de verilen ifadeden yararlanarak ışık hızını hesaplamak için Δx 'e karşılık $\Delta\phi$ grafiği çizilerek eğimden ışık hızı belirlenir.

II. Kısım: Maddesel Ortamında (Su ve Cam/Reçine) Işık Hızının Ölçümü

Işık, maddesel bir ortamdan geçtiğinde hızı azalır. Bu durumda aynı zaman gecikmesini sağlamak için aynanın daha ileri kaydırılması gerekir.



Şekil 4: Maddesel bir ortamda ışık hızının ölçüm prensibi

Şekil 4'de gösterilen şemada başlangıçta maddesel ortam varken ışığın detektöre geri gelmesi için geçen zaman,

$$\Delta t = 2 \times \left(\frac{l_1 - l_{\text{ortam}}}{c} + \frac{l_{\text{ortam}}}{v} \right) \quad (3)$$

Maddesel ortam kaldırıldığında aynı zaman kaymasını görmek için aynanın daha uzağa yerleştirilmesi gerekir. l_2 aynı Δt zaman kaymasını ölçtüğümüz uzaklık olsun. Yani $l_2 = l_1 + \Delta x$ dir. İkinci ölçümde

$$\Delta t = 2 \times \left(\frac{l_2}{c} \right) = 2 \times \left(\frac{l_1 + \Delta x}{c} \right) \text{ dir. Bu iki ifadeyi birbirine eşitlersek,}$$

$$\frac{l_1 - l_{\text{ortam}}}{c} + \frac{l_{\text{ortam}}}{v} = \frac{l_2}{c} \Rightarrow \frac{l_{\text{ortam}}}{v} = \frac{l_2 - (l_1 - l_{\text{ortam}})}{c}$$

$$v = c \cdot \frac{l_{\text{ortam}}}{l_2 - (l_1 - l_{\text{ortam}})} \quad (4)$$

Eğer $l_1 = l_{\text{ortam}}$ ise:

$$v = c \cdot \frac{l_1}{l_2} \quad (5)$$

olur.

Kırılma indisi; Işığın boşluktaki hızının ortamdaki hızına oranı olarak tanımlanır. O halde;

$$n = \frac{l_2 - (l_1 - l_{ortam})}{l_{ortam}}, \quad l_{ortam} = l_1 \quad \text{ise} \quad n = \frac{l_2}{l_1} \quad \text{olur.}$$

Deneyin Yapılışı

1. Su İçerisinde Işığın Hızının ve Suyun Kırma İndisinin Hesaplanması

- a. Silindirin boyunu cetvel yardımıyla ölçün. Mümkün olduğunca sadece su olan bölümü ölçmeye çalışın.

$$l_{ortam}(su) = \dots\dots\dots$$

- b. Şekil 4 Ölçüm 1'deki gibi su dolu silindiri ışık kaynağının önüne yerleştirin.
- c. Reflektörü silindirin ucuna degecek şekilde yerleştirin ve cihaz üzerinden $\Delta\varphi$ ve Δt değerlerini kaydedin. Silindiri kaldırın ve Δx değerini okuyun, okunan $\Delta x = l_1$ olacaktır (Burada $l_1 = l_{ortam}$ özel şartının sağlanıp sağlanmadığını tartışın).

$$\Delta x = l_1 = \dots\dots\dots$$

$$\Delta t = \dots\dots\dots$$

- d. Su dolu silindiri raydan kaldırdıktan sonra, cihaz üzerinde farklı $\Delta\varphi$ ve Δt değerleri görüldüğünü fark edeceksiniz. (Şekil 4. Ölçüm 2)
- e. Şimdi reflektörü su varken ölçtüğünüz $\Delta\varphi$ ve Δt değerlerinin aynısını ölçünceye kadar geriye doğru kaydırın. Cihazdan $\Delta x'$ değerini kaydediniz.

$$\Delta x' = l_2 = \dots\dots\dots$$

- f. Bu değerleri Denklem (4)'de yerine koyarak ışığın su içindeki hızını hesaplayın.
- g. Denklem (5)'den su için kırma indisini hesaplayın.

$$v_{su} = \dots\dots\dots$$

$$n_{su} = \dots\dots\dots$$

2. Cam İçerisinde Işığın Hızının ve Camın Kırma İndisinin Hesaplanması

- a. Şekil 4 Ölçüm 1'deki gibi cam silindiri ışık kaynağının önüne yerleştirin.
- b. Su için yaptığınız işlemleri cam için de tekrarlayın.

$$\Delta x = l_1 = \dots\dots\dots$$

$$\Delta t = \dots\dots\dots$$

$$\Delta x' = l_2 = \dots\dots\dots$$

- c. Denklem (4) ve (5) yardımıyla camdaki hızı ve camın kırma indisini hesaplayın.

$$v_{cam} = \dots\dots\dots$$

$$n_{cam} = \dots\dots\dots$$

3. Su ve Cam İçerisinde Işığın Hızının Alternatif bir Yöntemle Hesaplanması

- a. Ortam raya yerleştirildikten sonra Reflektör ortamın hemen sonuna yerleştirilir. (Işığın tekrar cihazın penceresine döndüğünü kontrol ediniz)
- b. Cihaz üzerindeki “**Calibration**” düğmesi yardımıyla reflektör bu konumdayken kalibrasyon yapıp Δt ve $\Delta \phi$ değerlerinin **sıfır** olması sağlanır.
- c. Bu durumdayken reflektörün konumu cetveldен okunup kaydedilir. Bu referans noktamız olacaktır.

$$x_0(su) = \dots\dots\dots$$

$$x_0(cam) = \dots\dots\dots$$

- d. Maddesel ortam kaldırılır. Bu arada cihazda zaman kayması ve faz değerlerinin bozulduğu görülecektir.
- e. Reflektör, tekrar Δt ve $\Delta \phi$ değerlerinin **sıfır** olduğu değerler gözleninceye kadar kaydırılır. Reflektörün yeni konumu kaydedilir.

$$x_1(su) = \dots\dots\dots$$

$$x_1(cam) = \dots\dots\dots$$

- f. Reflektörün toplam yer değiştirmesi hesaplanır.

$$\Delta x(su) = x_1(su) - x_0(su) = \dots\dots\dots$$

$$\Delta x(cam) = x_1(cam) - x_0(cam) = \dots\dots\dots$$

- g. Işığın fazladan gittiği yol $l = 2\Delta x$ kadardır. O halde ortamın kırma indisi;

$$n = 1 + \frac{2\Delta x}{l_{ortam}} \quad (6)$$

Denklemden hesaplanabilir. Kırma indisi kullanarak ışığın ortamdaki hızı da hesaplanabilir.

$$v_{su} = \dots\dots\dots$$

$$n_{su} = \dots\dots\dots$$

$$v_{cam} = \dots\dots\dots$$

$$n_{cam} = \dots\dots\dots$$

5. Analiz ve Sorular

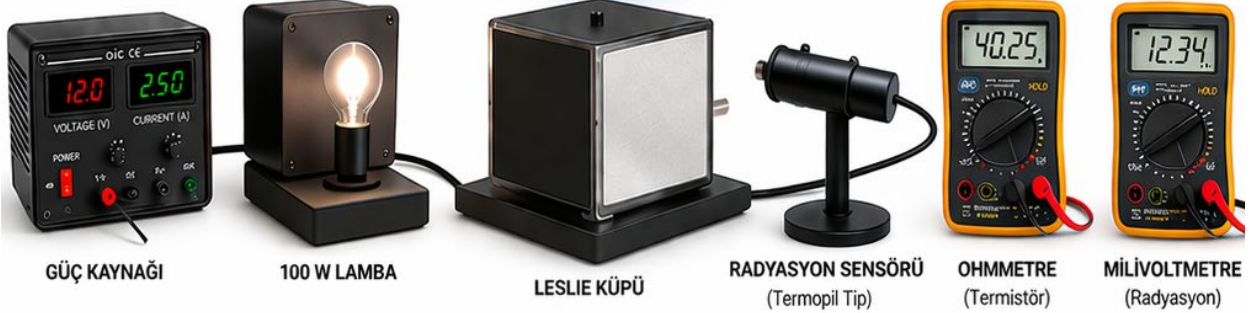
1. Zaman gecikmesi yöntemiyle elde edilen c değerini, literatürdeki ışık hızı ile karşılaştırınız. Yüzde hata hesaplayarak olası sapma kaynaklarını tartışınız.
2. Neden lazerin kendi dalga boyunu (650 nm) değil de 50 MHz'lik modülasyon sinyalini kullanıyoruz?
3. Aynayı tam 3 metre uzaklaştırsaydık (ray yetseydi) faz farkı kaç derece olurdu? Neden?
4. Farklı ortamlardaki ışığın hızını su için **4/3** cam için **1.56** kırma indisi değerlerini kullanarak hesaplayın. Bulduğunuz bu değerler ile deneyde bulduğunuz değerler ne kadar uyumlu?
5. $2\Delta x - \Delta t$ grafiğini çiziniz. Grafiğin doğrusal olup olmadığını inceleyiniz. Eğimden elde edilen hız ile doğrudan hesaplanan değerleri karşılaştırınız.
6. Osiloskop kullanarak ölçülen Δt değerleri ile cihazdan okunan değerleri karşılaştırınız. Bu iki yöntem arasındaki sistematik farkların nedenlerini tartışınız.
7. Faz kayması yönteminde kullanılan frekansın (ν) ölçüm doğruluğuna etkisini analiz ediniz. Frekans arttıkça faz hassasiyeti nasıl değişir?
8. Faz farkı ($\Delta\phi$) ile mesafe (Δx) arasındaki ilişkiyi grafiksel olarak inceleyiniz. Elde edilen doğrunun eğimi fiziksel olarak neyi temsil etmektedir?
9. Maddesel ortam deneyinde kullanılan $l_1 = l_{\text{ortam}}$ varsayımının ne kadar sağlandığını tartışınız. Bu koşul sağlanmazsa kırılma indisi hesabında nasıl bir hata oluşur?
10. Maddesel ortam varken yapılan ölçümde sistemi kalibre edip sıfırladıktan sonra, ortam kaldırıldığında reflektörün yeni konumunun belirlenmesi yöntemini analiz ediniz. Bu yöntemin avantaj ve dezavantajlarını tartışınız.
11. Deney düzeneğinde hizalama hatalarının (lazerin aynaya tam dik gitmemesi gibi) ölçümlere etkisini analiz ediniz. Bu tür hatalar hangi ölçüm yönteminde daha belirgin sonuç verir?

MODERN FİZİK

DENEY FÖYÜ

TERMAL RADYASYON VE YÜZEYDEN YAYILAN ISIL ENERJİNİN İNCELENMESİ

LESLIE KÜPÜ KULLANILARAK ISIL YAYMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ



DENEY DÜZENEGİNİN ŞEMATİK GÖSTERİMİ



BİLİMİN ÖNCÜLERİ VE KATKILARI

Max Planck	Josef Stefan	Ludwig Boltzmann	Lord Rayleigh	James Jeans	Gustav Kirchhoff
Enerji kuantumlarının varlığını ortaya koyarak modern fiziğin temelini attı.	Isı ışımasının sıcaklığın dördüncü kuvvetiyle orantılı olduğunu gösterdi.	Stefan yasasını istatistiksel fizikle temellendirerek mikroskobik bakış açısını kazandırdı.	Klasik elektromanyetik kuramla kara cisim ışımasını açıkladı ve "Rayleigh-Jeans yasası" nı geliştirdi.	Rayleigh-Jeans yasasını sistematik biçimde geliştirip astronomide uygulamalarını genişletti.	Kirchhoff yasalarını ortaya koyarak soğurma ve yayma arasındaki derin bağlantıyı kurdu.
					
(1858-1947)	(1835-1893)	(1844-1906)	(1842-1919)	(1877-1946)	(1824-1887)
Kara cisim ışımasının açıklanmasında kuantum kuramını geliştirdi.	Stefan-Boltzmann yasasının bir parçası olan Stefan yasasını buldu.	Entropi kavramını tanımladı ve termodinamiği istatistiksel fizikle birleştirdi.	Klasik fiziğin sınırlarını ortaya koyarak kuantum kuramına giden yolu açtı.	Yıldızların ışıması ve evrenin ısı dengesi üzerine önemli çalışmalar yaptı.	Kara cisim ışıması ve tayf analizinin teorik temelini oluşturdu.

DENEY II: TERMAL RADYASYON VE YÜZEYDEN YAYILAN ISIL ENERJİNİN İNCELENMESİ

1. Amaç

Bu deneyin temel amacı, termal radyasyonun temel özelliklerini ve cisimlerin ısı yayma (emisivite) mekanizmalarını incelemektir. Deney kapsamında, Leslie küpü kullanılarak farklı yüzey özelliklerine (mat siyah, beyaz, parlak metal vb.) sahip cisimlerin ısı enerjisi yayma ve emme kapasiteleri deneysel olarak karşılaştırılacaktır.

2. Gerekli Malzemeler: Leslie Kübü, 100 W'lık Lamba, Termal sensör, 2 adet multimetre, Güç kaynağı, Isı kalkanı levha

2.1. Radyasyon Sensörü (Radiation Sensor)

Radyasyon Sensörü (Şekil 1), üzerine gelen termal radyasyonun **bağıl şiddetlerini** ölçer. Algılayıcı eleman olan küçük boyutlu bir **termopil**, radyasyon şiddeti ile orantılı bir gerilim üretir.

Termopilin spektral yanıtı kızılötesi bölgede (0.5–40 μm aralığında) büyük ölçüde düzdür. Üretilen gerilimler mikrovolt mertebesinde yaklaşık 100 milivolta kadar değişir.

Yaylı klipsli bir kapak (shutter), Algılayıcı gözü açıp kapatır. Deneyler sırasında ölçüm yapılmadığında kapağın kapalı tutulması gerekir. Bu, termopilin referans bağlantı noktasındaki sıcaklık değişimlerini azaltarak sensör tepkisinde oluşabilecek kaymayı (drift) en aza indirir.

Sensörün ön kısmından dışarı uzanan iki çıkıntı termopili korurken sensörün radyasyon kaynağına göre tekrarlanabilir bir mesafede konumlandırılması için referans sağlar

NOT: Kapağı açıp kapatırken sensörün konumunu istemeden değiştirebilirsiniz. Bu nedenle sensör konumunun kritik olduğu deneylerde yalıtıcı köpük levha kullanılmalıdır. Ölçüm yapılmadığı zamanlarda bu ısı kalkanını sensörün önüne yerleştirin.



2.2. Termal Radyasyon Kübü (Leslie Kübü)

Radyasyon Kübü (Leslie Kübü), oda sıcaklığından yaklaşık **120 °C**'ye kadar ısıtılabilen dört farklı radyasyon yüzeyi vardır. Küp, **100 watt'lık bir ampul** ile ısıtılır. Güç kablosunu prize takın, anahtarı "ON" konumuna getirin, ardından gücü ayarlamak için düğmeyi saat yönünde çevirin.

Küpün sıcaklığını ölçmek için ohmmetrenizi **THERMISTOR** etiketli girişlere bağlayın. Termistör küpün bir köşesine yerleştirilmiştir. Bu termistör sıcaklığı hassas bir şekilde ölçmek için özel olarak seçilmiş bir yarı-iletkenidir. Bu sebeple normal dirençler gibi sıcaklıkla direnci artmaz. Direnci ölçün ve ardından aşağıdaki tabloyu (Tablo 1) kullanarak bu direnç değerini sıcaklığa çevirin. Bu tablonun kısaltılmış bir versiyonu küpün tabanında basılıdır.



Tablo 1: Termal Radyasyon Küpü için Direnç ve Sıcaklık İlişkisi

Ölçülen direnç	Sıcaklık (�C)	�l��len direnç	Sıcaklık (�C)	�l��len direnç	Sıcaklık (�C)	�l��len direnç	Sıcaklık (�C)	�l��len direnç	Sıcaklık (�C)	�l��len direnç	Sıcaklık (�C)
207,850	10	66,356	34	24,415	58	10,110	82	4,615.1	106	2,281.0	130
197,560	11	63,480	35	23,483	59	9,767.2	83	4,475.0	107	2,218.3	131
187,840	12	60,743	36	22,590	60	9,437.7	84	4,339.7	108	2,157.6	132
178,650	13	58,138	37	21,736	61	9,120.8	85	4,209.1	109	2,098.7	133
169,950	14	55,658	38	20,919	62	8,816.0	86	4,082.9	110	2,041.7	134
161,730	15	53,297	39	20,136	63	8,522.7	87	3,961.1	111	1,986.4	135
153,950	16	51,048	40	19,386	64	8,240.6	88	3,843.4	112	1,932.8	136
146,580	17	48,905	41	18,668	65	7,969.1	89	3,729.7	113	1,880.9	137
139,610	18	46,863	42	17,980	66	7,707.7	90	3,619.8	114	1,830.5	138
133,000	19	44,917	43	17,321	67	7,456.2	91	3,513.6	115	1,781.7	139
126,740	20	43,062	44	16,689	68	7,214.0	92	3,411.0	116	1,734.3	140
120,810	21	41,292	45	16,083	69	6,980.6	93	3,311.8	117	1,688.4	141
115,190	22	39,605	46	15,502	70	6,755.9	94	3,215.8	118	1,643.9	142
109,850	23	37,995	47	14,945	71	6,539.4	95	3,123.0	119	1,600.6	143
104,800	24	36,458	48	14,410	72	6,330.8	96	3,033.3	120	1,558.7	144
100,000	25	34,991	49	13,897	73	6,129.8	97	2,946.5	121	1,518.0	145
95,447	26	33,591	50	13,405	74	5,936.1	98	2,862.5	122	1,478.6	146
91,126	27	32,253	51	12,932	75	5,749.3	99	2,781.3	123	1,440.2	147
87,022	28	30,976	52	12,479	76	5,569.3	100	2,702.7	124	1,403.0	148
83,124	29	29,756	53	12,043	77	5,395.6	101	2,626.6	125	1,366.9	149
79,422	30	28,590	54	11,625	78	5,228.1	102	2,553.0	126	1,331.9	150
75,903	31	27,475	55	11,223	79	5,066.6	103	2,481.7	127		
72,560	32	26,409	56	10,837	80	4,910.7	104	2,412.6	128		

3. Teori

Siyah cisim ışıması, bir cismin sıcaklığına bağlı olarak yaydığı elektromanyetik radyasyonun sürekli bir dalga boyu spektrumu  eklinindedir. Bu spektrumun  ekli, **Planck yasası** ile tanımlanır. Buna göre, sıcaklığı T olan bir cismin frekansa bağlı ışıma şiddeti:

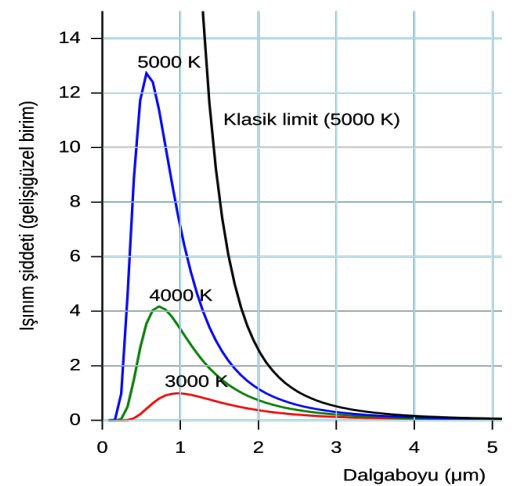
$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h}{c^3} \cdot \frac{\nu^3}{e^{kT} - 1}$$

 eklinde verilir.

Burada; $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ Planck sabiti,
 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ Boltzmann sabiti ve
 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ışık hızıdır.

Bu dağılımın maksimum yaptığı dalga boyu, **Wien kayma yasası** ile belirlenir:

$$\lambda_{\max} \approx \frac{2.898 \times 10^{-3}}{T} (\text{m} \cdot \text{K})$$



Bu ifade, maksimum ışıma dalga boyunun sıcaklık ile ters orantılı olduğunu gösterir:

$$\lambda_{\max} \propto \frac{1}{T}$$

Dolayısıyla sıcaklık arttıkça, maksimum ışıma daha kısa dalga boylarına kayar ve spektrum daha keskin hale gelir.

Bir cismin yaydığı toplam radyasyon gücü, spektrumun tüm frekansları üzerinden integrali alınarak elde edilir.

$$u(T) = \int_0^{\infty} u(\nu, T) d\nu$$
$$u(T) = \frac{8\pi h}{c^3} \int_0^{\infty} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu$$

Burada,

$$x = \frac{h\nu}{kT} \Rightarrow \nu = \frac{kT}{h} x$$
$$d\nu = \frac{kT}{h} dx$$

değişken dönüşümü yapılırsa

$$u(T) = \frac{8\pi h}{c^3} \left(\frac{kT}{h}\right)^4 \int_0^{\infty} \frac{x^3}{e^x - 1} dx$$

olur.

Burada,

$$\int_0^{\infty} \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \frac{\pi^4}{15}$$

Dolayısıyla:

$$u(T) = \frac{8\pi^5 k^4}{15c^3 h^3} T^4$$

Sonuç: enerji yoğunluğu T^4 ile orantılıdır.

Enerji yoğunluğundan ışıma gücüne geçiş yaparsak,

$$\frac{P}{A} = I \int \cos \theta d\Omega$$

İzotropik durumda, yani ısı ışımanın her yönde aynı olduğu durumda,

$$I = \text{sabit} \quad \text{ve} \quad d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$$

$$\frac{P}{A} = I \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta$$
$$= I(2\pi) \left[\frac{1}{2} \right] = \pi I$$

I ile u arasındaki ilişkiden,

$$u = \frac{4\pi}{c} I$$

$$I = \frac{c}{4\pi} u$$

$$\frac{P}{A} = \pi \cdot \frac{c}{4\pi} u = \frac{c}{4} u$$

$$\boxed{\frac{P}{A} = \frac{c}{4} u}$$

bulunur. Buradan:

$$P/A = \sigma T^4$$

Burada σ Stefan–Boltzmann sabiti olup:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \approx 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$$

Gerçek cisimler için **yayma katsayısı** ε eklenir:

$$P_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A T^4$$

Leslie kübü deneyinde, farklı yüzeylerin (parlak metal, boyalı yüzey, siyah kaplama) yayma katsayıları karşılaştırılır. Net yayılan güç:

$$P_{\text{net}} = \varepsilon \sigma A (T^4 - T_0^4)$$

Deneyde her bir yüzey ısıtıldığında yayılan güçleri ölçülür ve logaritmik olarak grafiğe dökülür:

$$\ln P \propto \ln \varepsilon + 4 \ln T$$

Böylece bu grafiğin eğimi **4** civarında olmalıdır ve farklı yüzeylerin emissivity (ısı yayma kabiliyeti) farkları gözlemlenebilir. Leslie kübü, bu katsayıların deneysel olarak belirlenmesini sağlayan klasik bir araçtır.

4. Deneyin Yapılışı

4.1. I. KISIM: Termal Radyasyon

Notlar

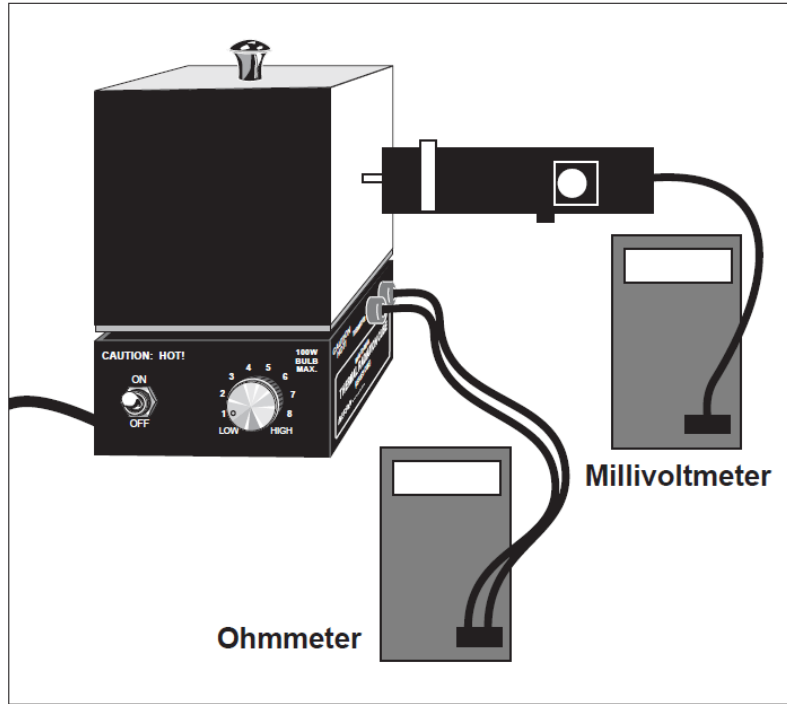
1. Radyasyon sensörü kullanılırken, ölçüm yapılmadığı zamanlarda sensör mutlaka sıcak cisimden korunmalıdır. Bu, termopilin ısınmasını önler; aksi halde referans sıcaklığı değişir ve ölçümler sapar.
2. Laboratuvar süresi kısıtlıysa, deney başlamadan önce küpün yaklaşık 20 dakika boyunca 5.0 ayarında önceden ısıtılması faydalıdır.

Farklı Yüzeylerden Yayılan Radyasyon

I. Bölüm

1. Ohmmetreyi ve milivoltmetreyi Şekil 1’de gösterildiği gibi bağlayın.
2. Termal radyasyon kübünü açın ve güç anahtarını “**HIGH**” konumuna getirin. Ohmmetreyi takip edin. Değer yaklaşık **40 kΩ** seviyesine düştüğünde güç ayarını **5.0** konumuna alın.
3. Küp termal dengeye ulaştığında (ohmmetre değeri sabit bir değer etrafında küçük dalgalanmalar gösterir), radyasyon sensörü ile küpün dört farklı yüzeyinden yayılan radyasyonu ölçün. Sensörü, uç kısmındaki çıkıntılar **küp yüzeyine temas edecek şekilde** yerleştirin. Bu, tüm ölçümler için mesafenin sabit olmasını sağlar.

Ölçümlerinizi ilgili Tablo 2'ye kaydedin. Ayrıca termistörün direncini ölçün ve Tablo 1'i veya küp üzerindeki tabloyu kullanarak sıcaklığı belirleyin.



Şekil 1: Farklı yüzeylerden yayılan radyasyon deneyi düzeneği

- Güç ayarını sırasıyla **6.5 → 8.0 → HIGH** değerlerine yükseltin. Her ayarda küpün dengeye ulaşmasını bekleyin ve **3.** adımdaki ölçümleri tekrarlayın. Sonuçları Tablo 2'ye kaydedin.

Tablo 2: Farklı yüzeylerdeki Termal (ısı) radyasyon verileri

Güç ayarı 5.0		Güç ayarı 6.5		Güç ayarı 8.0		Güç ayarı 10.0	
Direnç	Ω	Direnç	Ω	Direnç	Ω	Direnç	Ω
Sıcaklık	°C	Sıcaklık	°C	Sıcaklık	°C	Sıcaklık	°C
Yüzey	Sensörden Okunan (mV)	Yüzey	Sensörden Okunan (mV)	Yüzey	Sensörden Okunan (mV)	Yüzey	Sensörden Okunan (mV)
Siyah		Siyah		Siyah		Siyah	
Beyaz		Beyaz		Beyaz		Beyaz	
Parlak Al		Parlak Al		Parlak Al		Parlak Al	
Mat Al		Mat Al		Mat Al		Mat Al	

Sorular

- Radyasyon kübünün yüzeylerini, yayılan radyasyon miktarına göre sıralayın. Bu sıralama sıcaklıktan bağımsız mıdır?
- $\ln P \propto \ln T$ grafiğini çiziniz. Grafiğin eğimini ve y-ksenini kestiği noktayı belirleyiniz.

Bulduğunuz bu değerleri yorumlayınız.

3. Genel bir kural olarak, iyi soğurucular aynı zamanda iyi yayıcılarıdır. Ölçümünüz bu kural ile uyumlu mu? Açıklayınız.

II. Bölüm

Radyasyon sensörünü kullanarak ortamda bulunan farklı cisimlerin yaydığı radyasyonu inceleyin. Ayrı bir kağıda gözlemlerinizi özetleyen bir tablo oluşturun. Aşağıdaki soruları yanıtlayabilecek ölçümler yapın.

Termal Radyasyonun Soğurulması ve Geçirgenliği

1. Sensörü, radyasyon küpünün siyah yüzeyinden yaklaşık 5 cm uzağa yerleştirin ve ölçüm alın. Daha sonra sensör ile küp arasına bir pencere camı yerleştirin. Camın termal radyasyonu ne ölçüde engellediğini gözlemleyin.
2. Küpün kapağını çıkarın (veya Stefan-Boltzmann lambasını kullanın) ve ölçümü çıplak ampul ile tekrarlayın. Varsa farklı malzemeler için aynı işlemi uygulayın.

Sorular

1. Yaklaşık aynı sıcaklıktaki farklı cisimler farklı miktarda radyasyon yayar mı?
2. Ortamınızda termal radyasyonu iyi engelleyen malzemeler bulabiliyor musunuz? Engellemeyen malzemeler nelerdir? (Örneğin, kıyafetleriniz vücudunuzdan yayılan termal radyasyonu ne kadar engeller?)
3. Sonuçlarınız, pencerelerde gerçekleşen ısı kaybı hakkında ne göstermektedir?
4. Sonuçlarınız sera etkisi hakkında ne düşündürmektedir?



4.2. II. KISIM: Düşük Sıcaklıkta Stefan–Boltzmann Yasası

Bu deneyde, Stefan–Boltzmann ilişkisini düşük sıcaklıklarda, Termal Radyasyon Kübü kullanarak inceleyeceksiniz. Bu düşük sıcaklıklarda, ortam sıcaklığı **ihmal edilemez**.

Eğer Radyasyon Sensörü içindeki dedektör mutlak sıfır sıcaklıkta çalışıyor olsaydı, üzerine gelen radyasyonun şiddetiyle doğru orantılı bir gerilim üretirdi. Ancak dedektör mutlak sıfırdan değildir; dolayısıyla kendisi de termal radyasyon yayar.

Stefan–Boltzmann yasasına göre dedektörün yaydığı enerji hızı:

$$R_{det} = \sigma T_{det}^4$$

şeklindedir.

Sensör tarafından üretilen gerilim, dedektöre gelen radyasyon ile dedektörden yayılan radyasyon arasındaki farkla orantılıdır. Matematiksel olarak, sensör gerilimi şu büyüklükle orantılıdır:

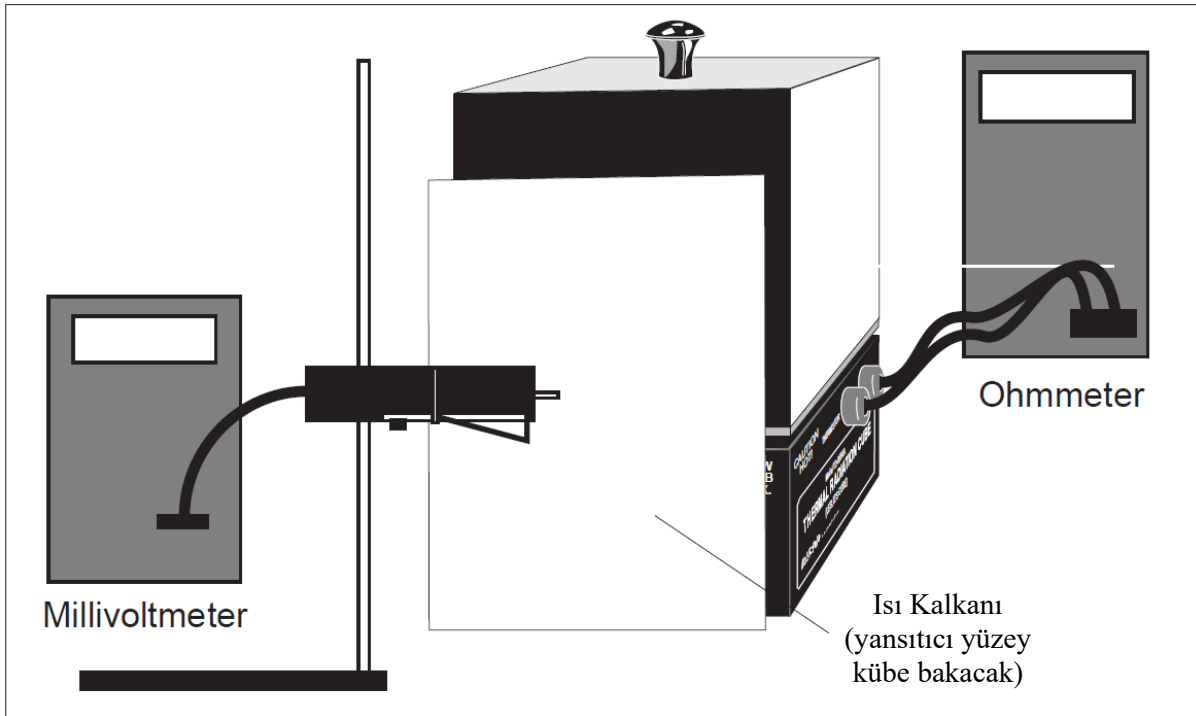
$$R_{net} = R_{rad} - R_{det} = \sigma(T^4 - T_{det}^4)$$

Ölçüm yapılmadığı zamanlarda Radyasyon Sensörünü, Radyasyon Kübünden dikkatlice

yalıtırsanız, T_{det} değeri oda sıcaklığına (T_{rm}) çok yakın olacaktır.

Deneyin Yapılışı

1. Düzeneği Şekil 2’de gösterildiği gibi kurun. Radyasyon Sensörü, kübün daha iyi radyasyon yayan yüzeylerinden birinin (siyah veya beyaz yüzey) merkezine doğrudan yönlendirilmelidir. Sensörün yüzeyi, küp yüzeyine bakmalı ve yaklaşık **3–4 cm** uzaklıkta bulunmalıdır.
2. Termal Radyasyon Kübü kapalıyken, oda sıcaklığındaki termistör direnci R_{rm} değerini ölçün ve aşağıdaki ilgili alana yazın.
3. Sensörü, yansıtıcı yüzeyi kübe bakacak şekilde yerleştirilen yansıtıcı ısı kalkanı ile küpten koruyun.
4. Radyasyon Kübünü açın ve güç anahtarını **10** konumuna ayarlayın.
5. Termistör direnci, sıcaklığın oda sıcaklığının yaklaşık **12 °C üzerine çıktığını** gösterdiğinde, sıcaklık değişimi yavaş olacak şekilde gücü azaltın. Ohmmetrede okunan R değerini ve milivoltmetrede okunan Rad değerini ölçüp kaydedin. Ölçümler, ısı kalkanı kısa süreliğine kaldırılarak ve mümkün olduğunca eş zamanlı alınmalıdır. Bu değerleri Tablo 3’e kaydedin.



Şekil 2: Düşük sıcaklıklarda Stefan Boltzman deney düzeneği

6. Isı kalkanını tekrar yerleştirin ve küpün gücünü tekrar **10’a** ayarlayın. Sıcaklık ilave olarak **12–15 °C** arttığında, **5. adımdaki** ölçümleri tekrarlayın. Bu işlemi, küpün maksimum sıcaklığına ulaşıncaya kadar yaklaşık **12–15 °C aralıklarla** sürdürün.
7. Termal Radyasyon Kübünün tabanındaki tabloyu kullanarak, ölçülen her bir dirence karşılık gelen sıcaklık T_c değerini belirleyin. Her T_c değeri için, Kelvin cinsinden karşılığı

olan T_k değeri bulun ($K = ^\circ C + 273$). Her iki değeri de Tablo 3'e yazın. Aynı şekilde oda sıcaklığı T_{rm} değerini de belirleyin.

8. Her bir T_k değeri için T_k^4 değerini hesaplayın ve tabloya kaydedin.
9. Her bir T_k değeri için $T_k^4 - T_{rm}^4$ değerini hesaplayın ve tabloya kaydedin.
10. $Rad - (T_k^4 - T_{rm}^4)$ grafiğini çizin.

ÖNEMLİ: Her ölçümü hızlı bir şekilde yapın; ısı kalkanını yalnızca ölçüm süresi kadar kaldırın. Tüm ölçümlerde sensörün küpe göre konumunun aynı kalmasına dikkat edin.

Oda Sıcaklığı $T_{rm} = \dots\dots\dots \Omega$

$T_{rm} = \dots\dots\dots K$

Tablo 3: Düşük sıcaklık Stefan-Boltzman deneyi veri tablosu

Veriler			Hesaplamalar		
R (Ω)	Rad (mV)	T_c ($^\circ C$)	T_k (K)	T_k^4 (K^4)	$T_k^4 - T_{rm}^4$ (K^4)

Sorular

- Grafiğiniz, düşük sıcaklıklarda Stefan–Boltzmann yasası hakkında ne göstermektedir?
- Grafiğiniz doğrusal mı? Varsa sapmaları tartışınız.

MODERN FİZİK

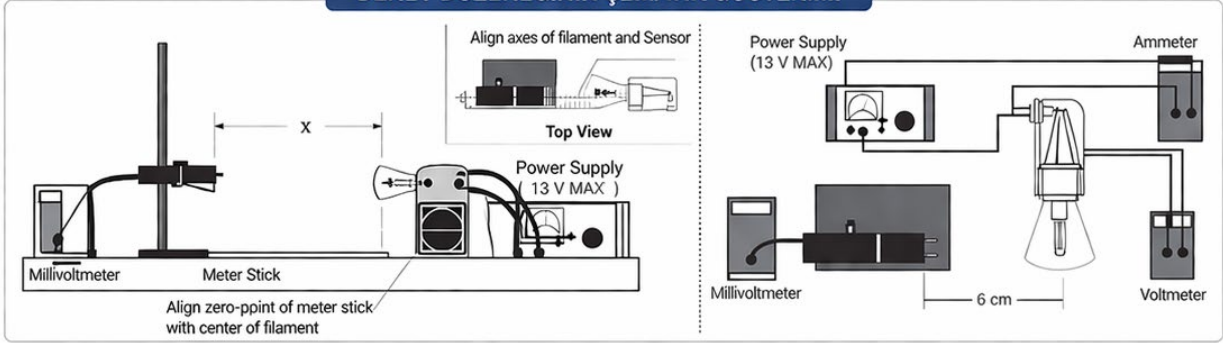
DENEY FÖYÜ

SİYAH CİSİM IŞIMASI VE STEFAN-BOLTZMANN YASASI

STEFAN-BOLTZMANN YASASI: BİR SICAKLIK T^4 BAĞIMLILIĞI



DENEY DÜZENEGİNİN ŞEMATİK GÖSTERİMİ



BİLİMİN ÖNCÜLERİ VE KATKILARI

MAX PLANCK

Enerjinin kesikli paketler (kuantlar) halinde yayıldığını öne sürerek kuantum kuramının kuruluşuna öncülük etti.



(1858–1947)

Kara cisim ısımasının açıklanması, modern fiziğin temellerini attı.

JOSEF STEFAN

Deneyisel çalışmalarla siyah cisimden yayılan toplam enerjinin sıcaklığın dördüncü kuvvetiyle orantılı olduğunu buldu.



(1835–1893)

Siyah cisim ısımasının sıcaklıkla değişimini keşfederek Stefan yasasını ortaya koydu.

LUDWIG BOLTZMANN

Stefan yasasını kuramsal olarak türetti ve yasanın mutlak şeklini (Stefan-Boltzmann yasası) elde etti.



(1844–1906)

İstatistiksel fizik ve entropi kavramlarıyla ısımanın mikroskobik kökenini açıkladı.

DENEY III: SİYAH CİSİM İŞIMASI VE STEFAN–BOLTZMANN YASASI

1. Amaç

Bu deneyde, yüksek sıcaklıktaki bir tungsten flamanın yaydığı termal radyasyon ölçülerek, ideal bir siyah cismin davranışını tanımlayan Stefan–Boltzmann yasasının gerçek bir sistem için ne ölçüde geçerli olduğu araştırılacaktır.

2. Gerekli Malzemeler: Termal sensör, Stefan-Boltzmann lambası, 3 adet multimetre, Güç kaynağı

2.1. Radyasyon Sensörü (Radiation Sensor)

Radyasyon Sensörü (Şekil 1), üzerine gelen termal radyasyonun **bağıl şiddetlerini** ölçer. Algılayıcı eleman olan küçük boyutlu bir **termopil**, radyasyon şiddeti ile orantılı bir gerilim üretir.

Termopilin spektral yanıtı kızılötesi bölgede (0.5–40 μm aralığında) büyük ölçüde düzdür. Üretilen gerilimler mikrovolt mertebesinde yaklaşık 100 milivolta kadar değişir.

Yaylı klipsli bir kapak (shutter), Algılayıcı gözü açılıp kapatır. Deneyler sırasında ölçüm yapılmadığında kapağın kapalı tutulması gerekir. Bu, termopilin referans bağlantı noktasındaki sıcaklık değişimlerini azaltarak sensör tepkisinde oluşabilecek kaymayı (drift) en aza indirir.

Sensörün ön kısmından dışarı uzanan iki çıkıntı termopili korurken sensörün radyasyon kaynağına göre tekrarlanabilir bir mesafede konumlandırılması için referans sağlar

NOT: Kapağı açıp kapatırken sensörün konumunu istemeden değiştirebilirsiniz. Bu nedenle sensör konumunun kritik olduğu deneylerde dikkatli olunuz. Tercihen ölçüm aralarında bir ısı kalkanı levha kullanmaktır. Ölçüm yapılmadığı zamanlarda bu ısı kalkanını sensörün önüne yerleştirin.



2.2. Stefan–Boltzmann Lambası

ÖNEMLİ: Lambaya uygulanan gerilim **ASLA 13 V'u geçmemelidir**. Daha yüksek gerilimler filamanın yanmasına neden olur.

Stefan–Boltzmann Lambası, yüksek sıcaklıkta bir termal radyasyon kaynağıdır. Lamba, Stefan–Boltzmann yasasının yüksek sıcaklıklarda incelenmesi için kullanılabilir.

Yüksek sıcaklık, analizi basitleştirir; çünkü ortam sıcaklığının dördüncü kuvveti, filamanın yüksek sıcaklığının dördüncü kuvvetine kıyasla ihmal edilebilir derecede küçüktür.

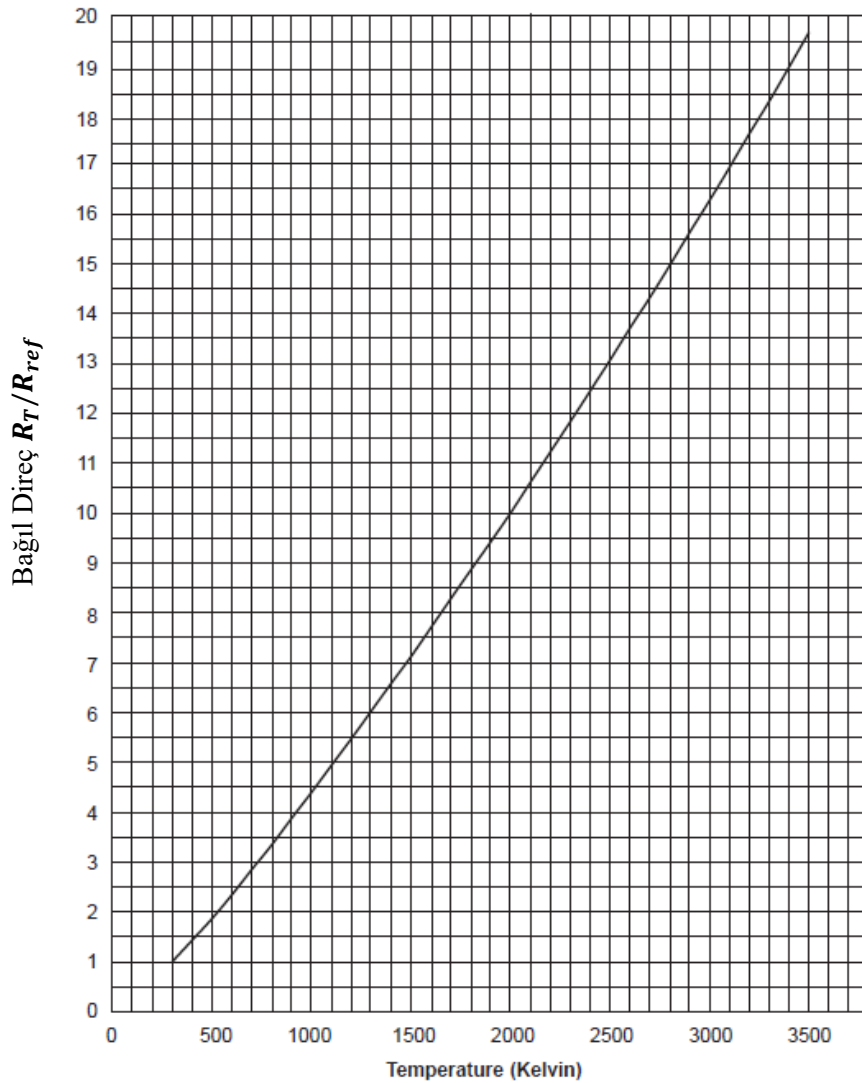


Uygun şekilde hizalandığında filaman, termal radyasyon için iyi bir **noktasal kaynak yaklaşımı** sağlar. Bu nedenle ters kare yasasının incelenmesine de uygundur.

Lambaya verilen güç ayarlanarak (maksimum 13 V, minimum 2 A, maksimum 3 A), filaman sıcaklığı yaklaşık **3000 °C**'ye kadar çıkarılabilir. Filaman sıcaklığı, lambaya uygulanan gerilim ve akımın dikkatli ölçümü ile belirlenir. Gerilimin akıma bölünmesiyle filaman direnci elde edilir:

Tablo 1: Tungsten İçin Sıcaklık ve Özdirenç

$\frac{R_T}{R_{ref}}$	Sıcaklık (K)	Özdirenç ($\mu\Omega\text{cm}$)	$\frac{R_T}{R_{ref}}$	Sıcaklık (K)	Özdirenç ($\mu\Omega\text{cm}$)	$\frac{R_T}{R_{ref}}$	Sıcaklık (K)	Özdirenç ($\mu\Omega\text{cm}$)	$\frac{R_T}{R_{ref}}$	Sıcaklık (K)	Özdirenç ($\mu\Omega\text{cm}$)
1.0	300	5.65	5.48	1200	30.98	10.63	2100	60.06	16.29	3000	92.04
1.43	400	8.06	6.03	1300	34.08	11.24	2200	63.48	16.95	3100	95.76
1.87	500	10.56	6.58	1400	37.19	11.84	2300	66.91	17.62	3200	99.54
2.34	600	13.23	7.14	1500	40.36	12.46	2400	70.39	18.28	3300	103.3
2.85	700	16.09	7.71	1600	43.55	13.08	2500	73.91	18.97	3400	107.2
3.36	800	19.00	8.28	1700	46.78	13.72	2600	77.49	19.66	3500	111.1
3.88	900	21.94	8.86	1800	50.05	14.34	2700	81.04	26.35	3600	115.0
4.41	1000	24.93	9.44	1900	53.35	14.99	2800	84.70			
4.95	1100	27.94	10.03	2000	56.67	15.63	2900	88.33			



Şekil 1: Tungsten için Sıcaklığa karşı Özdirenç değişim grafiği

Tungsten filamanın sıcaklığı aşağıdaki şekilde belirlenir:

1. Tungsten filamanın oda sıcaklığındaki direncini R_{ref} hassas şekilde ölçün (yaklaşık 300 K). (Bu ölçüm çok önemlidir; küçük bir hata, sıcaklık sonucunda büyük hataya yol açar.)
2. Filaman ısındığında, gerilim ve akımı ölçün ve $R_T = V/I$ ile direnci hesaplayın.
3. Bağlı R_T/R_{ref} direnci hesaplayın:
4. Bu bağlı direnç değerini kullanarak, bir önceki sayfadaki Tablo 1 veya Şekil 1'deki grafikten filaman sıcaklığını belirleyin.

3. Teori

Siyah cisim ışıması, bir cismin sıcaklığına bağlı olarak yaydığı elektromanyetik radyasyonun sürekli bir dalga boyu spektrumu şeklinde ortaya çıkar. Bu spektrumun şekli, **Planck yasası** ile tanımlanır. Buna göre, sıcaklığı T olan bir cismin frekansa bağlı ışıma şiddeti:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h}{c^3} \cdot \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

şeklinde verilir.

Burada; $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ Planck sabiti, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ Boltzmann sabiti ve $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ışık hızıdır.

Bu dağılımın maksimum yaptığı dalga boyu, **Wien kayma yasası** ile belirlenir:

$$\lambda_{\max} \approx \frac{3 \times 10^{-3}}{T} (m \cdot K)$$

Bu ifade, maksimum ışıma dalga boyunun sıcaklık ile ters orantılı olduğunu gösterir:

$$\lambda_{\max} \propto \frac{1}{T}$$

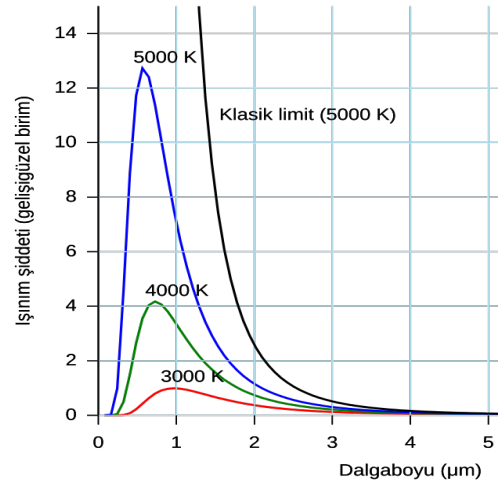
Dolayısıyla sıcaklık arttıkça, maksimum ışıma daha kısa dalga boylarına kayar ve spektrum daha keskin hale gelir.

Bir cismin yaydığı toplam radyasyon gücü, spektrumun tüm frekanslar üzerinden integrali alınarak elde edilir.

$$u(T) = \int_0^\infty u(\nu, T) d\nu$$
$$u(T) = \frac{8\pi h}{c^3} \int_0^\infty \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu$$

Burada,

$$x = \frac{h\nu}{kT} \Rightarrow \nu = \frac{kT}{h} x$$



$$dv = \frac{kT}{h} dx$$

değişken dönüşümü yapılırsa

$$u(T) = \frac{8\pi h}{c^3} \left(\frac{kT}{h}\right)^4 \int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx$$

olur.

Şu integral sabittir:

$$\int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \frac{\pi^4}{15}$$

Dolayısıyla:

$$u(T) = \frac{8\pi^5 k^4}{15c^3 h^3} T^4$$

Sonuç: enerji yoğunluğu T^4 ile orantılıdır.

Enerji yoğunluğundan Işıma gücüne geçiş yaparsak,

$$\frac{P}{A} = \int I \cos \theta d\Omega$$

İzotropik durumda, yani ısı ışımanın her yönde aynı olduğu durumda,

$$I = \text{sabit} \quad \text{ve} \quad d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$$

$$\begin{aligned} \frac{P}{A} &= I \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta \\ &= I(2\pi) \left[\frac{1}{2} \right] = \pi I \end{aligned}$$

I ile u arasındaki ilişkiden,

$$\begin{aligned} u &= \frac{4\pi}{c} I \\ I &= \frac{c}{4\pi} u \\ \frac{P}{A} &= \pi \cdot \frac{c}{4\pi} u = \frac{c}{4} u \\ \boxed{\frac{P}{A} = \frac{c}{4} u} \end{aligned}$$

bulunur.

İzotropik radyasyon alanında, enerji yoğunluğu u ile yüzeyden geçen enerji akısı arasında $P/A = (c/4)u$ bağıntısı vardır. Bu faktör, radyasyonun yalnızca yarım uzaydan gelmesi ve yüzeye dik hız bileşeninin açısal ortalamasından kaynaklanır.

$$P/A = \frac{c}{4} u(T)$$

Buradan:

$$\frac{P}{A} = \sigma T^4$$

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3}$$

Sonuçta (Stefan–Boltzmann yasası)

$$P = \sigma AT^4$$

Gerçek cisim için Stefan–Boltzmann yasası,

$$P_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma AT^4$$

elde edilir. Burada

ε : yayma katsayısı (emissivity),

A : yüzey alanı,

σ : Stefan–Boltzmann sabiti, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$

T : Kelvin cinsinden mutlak sıcaklıktır.

Gerçek sistemlerde, cisim yalnızca enerji yaymaz, aynı zamanda çevreden de enerji soğurur. Bu nedenle net yayılan güç:

$$P_{\text{net}} = \varepsilon \sigma A(T^4 - T_0^4)$$

şeklinde ifade edilir. Burada T_0 ortam sıcaklığıdır.

Bu deneyde kullanılan Stefan–Boltzmann Lambası çok yüksek sıcaklıklara (yaklaşık 1500–2000 K) ulaşabildiği için:

$$T^4 \gg T_0^4$$

olur ve ortam sıcaklığına bağlı terim ihmal edilebilir. Böylece:

$$P \propto T^4$$

bağıntısı elde edilir.

Deneyssel analizde bu ilişkiyi doğrulamak için her iki tarafın logaritması alınır:

$$\ln P \propto 4 \ln T$$

Bu durumda $\ln P$ ile $\ln T$ grafiğinin eğimi 4 olmalıdır.

Lambanın flamanından geçen akım ve uçları arasındaki gerilim ölçülerek flaman direnci:

$$R = \frac{V}{I}$$

şeklinde bulunur.

Tungsten flamanın direnci sıcaklığa bağlıdır. Mutlak direnç değeri flamanın geometrisine bağlı olsa da, **bağıl direnç değişimi** yalnızca sıcaklığa bağlıdır. Bu nedenle:

$$\frac{R_T}{R_{\text{ref}}}$$

oranı kullanılarak sıcaklık tayini yapılabilir. Burada R_{ref} , genellikle oda sıcaklığında (yaklaşık 300 K) ölçülen referans dirençtir.

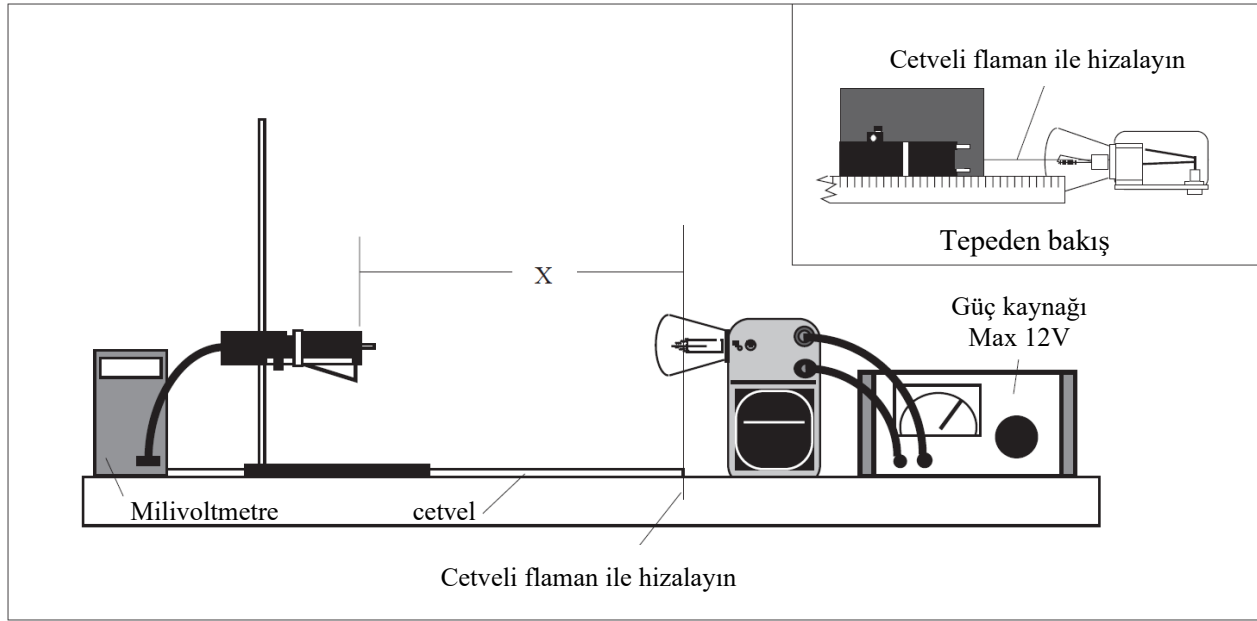
4. Deneyin Yapılışı

4.1. I. KISIM: Ters Kare Yasasının Doğrulanması

1. Deney düzeneğini Şekil 2’de gösterildiği gibi kurun.
 - a. Metre çubuğunu masaya sabitleyin.
 - b. Stefan-Boltzmann lambasını metre çubuğunun bir ucuna yerleştirin. Metre çubuğunun sıfır noktası, lambanın filamanının merkezine hizalanmalıdır.
 - c. Radyasyon sensörünün yüksekliğini, lambanın filamanı ile aynı seviyede olacak şekilde ayarlayın.
 - d. Sensörü metre boyunca hareket ettirdiğinizde, lambanın eksenini ile sensörün eksenini mümkün olduğunca çakışacak şekilde hizalama yapın.
 - e. Sensörü milivoltmetreye, lambayı ise güç kaynağına şekilde gösterildiği gibi bağlayın. Voltmetre ve ampermetre bağlamayı unutmayın.
2. Lamba **kapalıyken**, sensörü metre çubuğu boyunca hareket ettirin. Her **10 cm aralıkta** milivoltmetre değerini kaydedin. Ölçümleri bir sonraki sayfadaki Tablo 2’ye yazın.

Bu değerlerin ortalamasını alarak **ortam (ambient) radyasyon seviyesini** belirleyin.

Not: Lambayı açtığınızda elde edeceğiniz ölçümlerden bu ortalama değeri çıkarmanız gerekecektir; böylece yalnızca lambanın katkısını elde edersiniz.



Şekil 2: Sıcaklığın ters kare deneyinin kurulumu

3. Güç kaynağını açarak lambayı çalıştırın. Gerilimi yaklaşık **10 V** olacak şekilde ayarlayın.
4. Sensör ile lamba arasındaki mesafeyi Tablo 3’de verilen değerlere ayarlayın. Her mesafe için milivoltmetre değerini kaydedin.

ÖNEMLİ: Ölçümleri hızlı bir şekilde yapın. Ölçümler arasında; Sensörü lambadan uzaklaştırın **veya** Lamba ile sensör arasına yansıtıcı ısı kalkanı yerleştirin. Böylece sensörün sıcaklığı yaklaşık sabit kalır.

Tablo 2: Ortam radyasyon seviyesi

X (cm)	Ortam Radyasyonu (mV)
10	
20	
30	
40	
50	
60	
70	
80	
90	
100	
Ortalama Ortam Radyasyon =	

Tablo 3: Mesafeye bağı radyasyon seviyesi

X (cm)	Radyasyon (mV)	1/X ² (cm ⁻²)	Ortam radyasyonu (mV)
2.5			
3.0			
3.5			
4.0			
4.5			
5.0			
6.0			
7.0			
8.0			
9.0			
10.0			
12.0			
14.0			
16.0			
18.0			
20.0			
25.0			
30.0			
35.0			
40.0			
45.0			
50.0			
60.0			
70.0			
80.0			
90.0			
100.0			

Hesaplamalar

- Her bir X değeri için $1/X^2$ hesaplayın ve tabloya ekleyin.
- Tablo 3'deki her radyasyon ölçümünden **ortalama ortam radyasyon değerini çıkarın** ve sonucu tabloya yazın.

3. Ayrı bir kağıtta, **Radyasyon Seviyesi – Mesafe** grafiğini çiziniz. Radyasyon seviyesi bağımlı değişken (y eksen) olacaktır.
4. Eğer grafik doğrusal değilse, **Radyasyon Seviyesi – $1/X^2$** grafiğini çiziniz.

Sorular

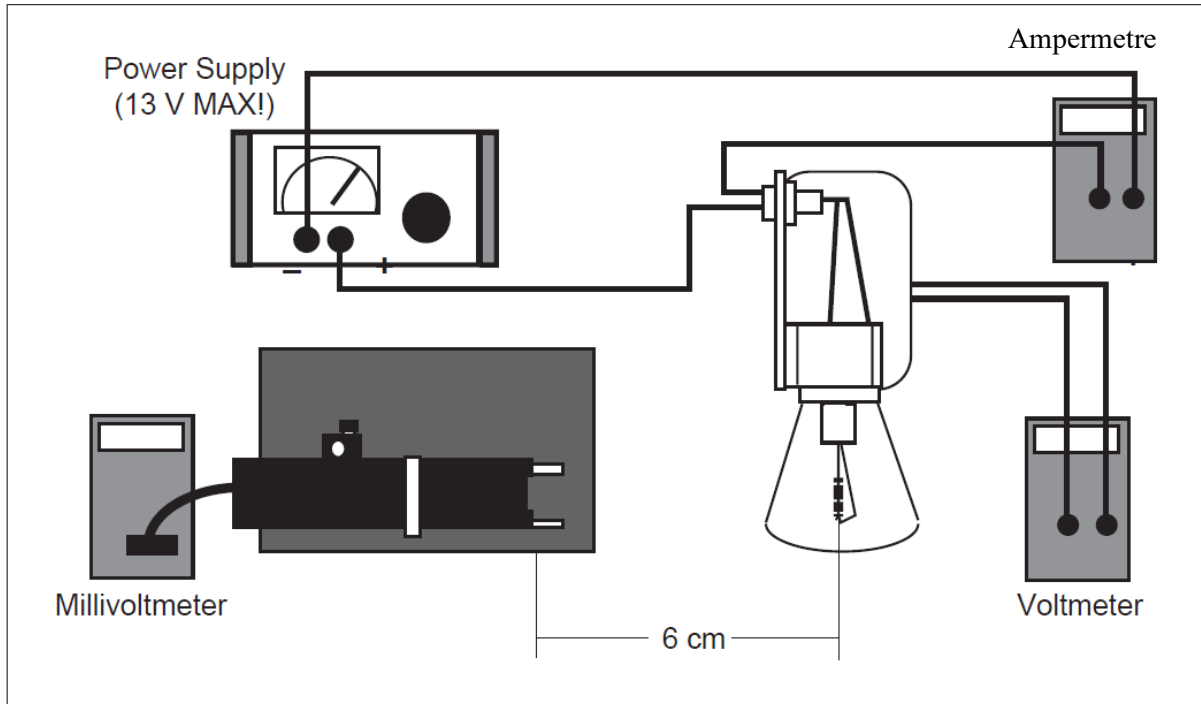
1. Hangi grafik daha doğrusaldır? Bu doğrusal ilişki tüm ölçüm aralığında geçerli midir?
2. Ters kare yasasına göre, bir noktasal kaynaktan yayılan enerji, mesafenin karesi ile ters orantılı olarak azalır. Verileriniz bu durumu destekliyor mu?
3. Stefan-Boltzmann lambası gerçek bir noktasal kaynak mıdır? Değilse, bu durum sonuçlarınızı nasıl etkiler? Verilerinizde bu etkiyi gözlemliyor musunuz?



4.2. II. KISIM: Yüksek Sıcaklıkta Stefan–Boltzmann Yasası

Deney Düzeneği

Şekil 3’de verilen deney düzeneğini kurunuz. Voltmetre doğrudan lambanın uçlarına bağlanmalıdır. Sensörün, filaman ile aynı yükseklikte olup olmadığı kontrol edilmelidir. Sensörün ön yüzü filamandan yaklaşık **6 cm** uzaklıkta olmalıdır. Sensörün görüş alanında lambadan başka yakın cisim bulunmamalıdır.



Şekil 3: Yüksek sıcaklıkta Stefan-Boltzman yasası deney düzeneği

ÖNEMLİ: Lambaya uygulanan gerilim **asla 13 V’u geçmemelidir**. Aksi halde filaman yanabilir.

1. Lambayı açmadan önce, Oda sıcaklığını T_{ref} (Kelvin cinsinden) ölçün ($K = ^\circ C + 273$)
Filamanın oda sıcaklığındaki direncini R_{ref} ölçün ve tabloya kaydedin.

2. Güç kaynağını açın.

- Gerilimi Tablo 4’de verilen değerlere ayarlayın.
- Her gerilim değeri için, Akımı I ölçün ve Sensör çıkışını (Rad) kaydedin.

ÖNEMLİ: Sensör ölçümleri hızlı yapılmalıdır. Ölçümler arasında sensör ile lamba arasına **yalıtkan köpük levhalar** yerleştirilmelidir (yansıtıcı yüzey lambaya bakacak şekilde).

$$\alpha = 4.5 \times 10^{-3} K^{-1}$$

$$T_{ref}(\text{Oda sıcaklığı}) = \dots\dots\dots K ($$

$$R_{ref}(T_{ref} \text{ sıcaklığındaki direnç}) = \dots\dots\dots \Omega$$

Tablo 4: Yüksek sıcaklık Stefan-Boltzman deneyi veri tablosu

Veriler			Hesaplamalar		
V (V)	I (mA)	Rad (mV)	R (Ω)	T (K)	T ⁴ (K ⁴)
1.00					
2.00					
3.00					
4.00					
5.00					
6.00					
7.00					
8.00					
9.00					
10.00					
11.00					
12.00					

Veri ve Hesaplamalar

1. Her gerilim için filaman direncini $R = V/I$ ifadesinden hesaplayınız.
2. Önceki bölümlerindeki yöntemi kullanarak her durumda filaman sıcaklığını T belirleyin.
3. Her sıcaklık için T^4 değerini hesaplayın.
4. $Rad - T^4$ grafiğini çizin.

(Alternatif olarak, $\ln(Rad)$ ile $\ln(T)$ grafiği çizilip eğim bulunabilir.)

Sorular

1. **Rad** ile **T** arasındaki ilişki nedir? Bu ilişki tüm ölçüm aralığında geçerli midir?
2. Stefan–Boltzmann yasası ideal **siyah cisimler** için tam olarak geçerlidir. Lamba filamanı gerçek bir kara cisim midir?
3. Filaman dışında ortamda bulunan diğer termal radyasyon kaynakları ölçümlerinizi nasıl etkileyebilir? Bu etkilerin sonuçlara katkısı ne yönde olur?

MODERN FİZİK

DENEY FÖYÜ

FOTOELEKTRİK OLAY VE PLANCK SABİTİNİN BELİRLENMESİ

AMAÇ: FOTOELEKTRİK OLAYI İNCELEYEREK PLANCK SABİTİNİ (h) BELİRLEMEK



GÜÇ KAYNAĞI
(Spektral Lamba Güç Kaynağı)

SPEKTRAL LAMBA

DİYAFRAM

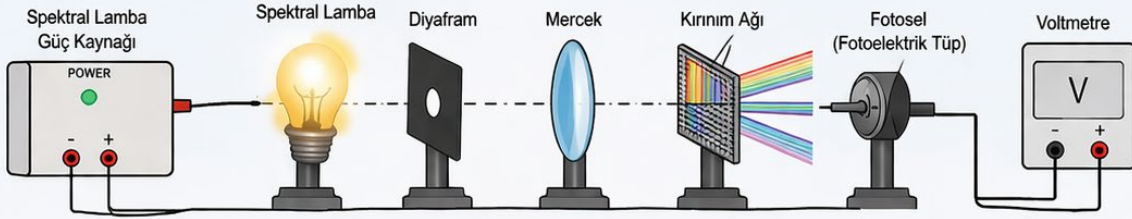
MERCEK

KIRINIM AĞI

FOTOSELL
(Fotoelektrik Tüp)

VOLT METRE

DENEY ŞEMASI



FOTOELEKTRİK DENKLEM

$$eV_0 = hf - \phi$$

e : Elektron yükü (1.602×10^{-19} C)

V_0 : Durdurma potansiyeli (V)

h : Planck sabiti (J·s)

f : Işığın frekansı (Hz)

ϕ : İş fonksiyonu (J)

BİLİMİN ÖNCÜLERİ VE KATKILARI

MAX PLANCK

Enerjinin kesikli paketler (kuantlar) halinde yayıldığını öne sürerek kuantum kuramının kuruluşuna öncülük etti.

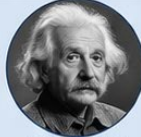


(1858–1947)

Kara cisim ışımasının açıklanması, modern fiziğin temellerini attı.

ALBERT EINSTEIN

Işığın tanecik (foton) gibi davrandığını öne sürerek fotoelektrik olayı açıkladı ve Planck'ın kuant fikrini genişletti.



(1879–1955)

Fotoelektrik etki açıklamasıyla 1921 Nobel Fizik Ödülü'nü aldı.

ROBERT A. MILLIKAN

Yağ damlası deneyi ile elektron yükünü ölçerek Planck sabitinin belirlenmesine katkı sağlayan temel nicelikleri hassaslaştırdı.



(1868–1953)

Elektron yükünün ölçümü, kuantum fiziğinin nicel temellerini güçlendirdi.

DENEY IV. FOTOELEKTRİK OLAY YARDIMIYLA PLACK SABİTİNİN BULUNMASI

1. Deneyin Amacı:

Farklı frekanslardaki ışıklar için durdurma potansiyelini (V_0) ölçerek $V_0-\nu$ grafiğinden Planck sabitini belirlemek ve kullanılan fotoselin iş fonksiyonunu hesaplamak.

2. Teori

Fotoelektrik olay, yeterince yüksek frekanslı elektromanyetik ışınımın bir metal yüzeye düşmesi sonucu elektronların yüzeyden kopması olayıdır. Bu elektronlara **fotoelektron** denir.

Işığın klasik elektromanyetik dalga modeli, ışığın metal yüzeydeki elektronlara kuvvet uygulayarak onları koparabileceğini öngörür. Ancak deneysel sonuçlar şu temel bulguları ortaya koyar:

- Elektron kopması için ışığın frekansı belirli bir **eşik frekansın** üzerinde olmalıdır.
- Fotoelektronların maksimum kinetik enerjisi ışık şiddetine değil, **frekansa bağlıdır**.
- Işık şiddeti arttığında yayılan elektron sayısı (dolayısıyla akım) artar, ancak enerji değişmez.

Bu sonuçlar klasik teori ile açıklanamaz ve ışığın **kuantum doğasını** gerektirir.

Işığın kuantum modeline göre, ışık enerjisi **foton** adı verilen paketler halinde taşınır. Bir fotonun enerjisi:

$$E = h\nu$$

Burada:

- h : Planck sabiti
- ν : ışığın frekansı

Metal yüzeyden bir elektronun koparılması için gerekli minimum enerjiye **iş fonksiyonu** (W_0) denir. Eğer gelen foton enerjisi bu değerden büyükse, elektron yüzeyden kopar ve kalan enerji kinetik enerjiye dönüşür:

$$K_{max} = h\nu - W_0$$

Fotoelektronların maksimum kinetik enerjisi, deneysel olarak **durdurma potansiyeli** (V_0) kullanılarak ölçülür:

$$K_{max} = eV_0$$

Bu durumda enerji denklemi:

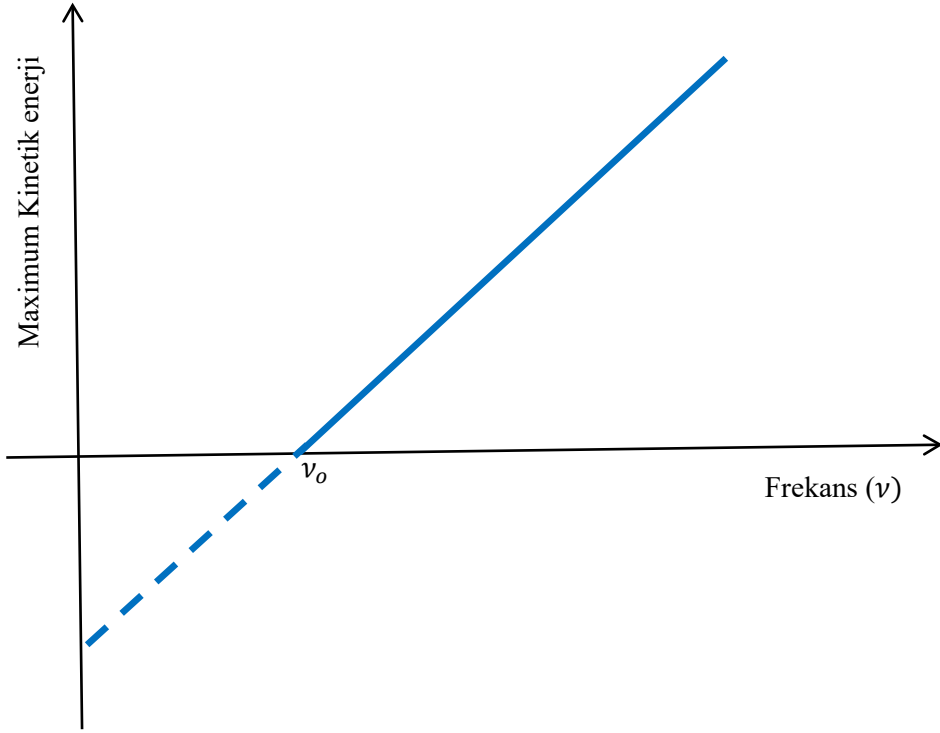
$$h\nu = eV_0 + W_0$$

Buradan elde edilen doğrusal ilişki:

$$V_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{W_0}{e}$$

Bu bağıntıya göre:

- V_0 ile ν arasında **doğrusal ilişki** vardır
- Doğrunun eğimi $\rightarrow h/e$
- y-eksenini kestiği nokta $\rightarrow -W_0/e$



Şekil 1: Frekansa karşılık kopan fotoelektronun maximum kinetik enerji değişim grafiği

Bir metal için **eşik frekans** (ν_0), elektron kopmasının başladığı minimum frekanstır:

$$\nu_0 = \frac{W_0}{h}$$

$\nu < \nu_0 \Rightarrow$ fotoelektrik olay gerçekleşmez.

Sabit frekansta yapılan ölçümlerde:

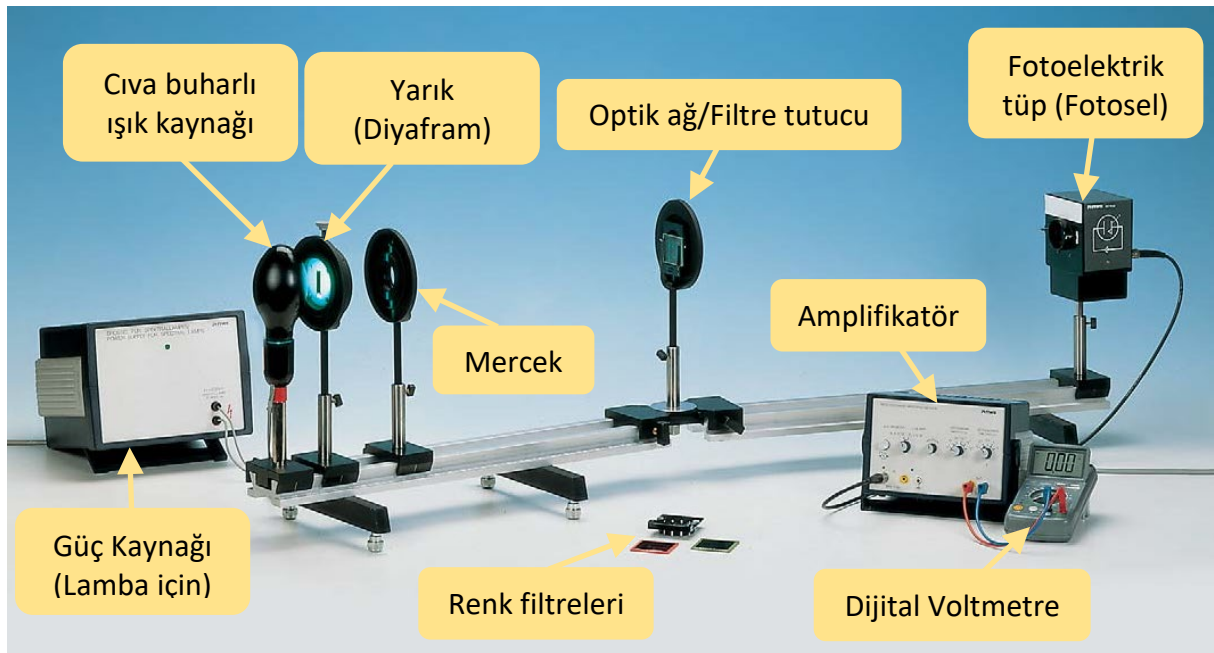
- Işık şiddeti arttıkça **fotoakım artar**
- Durdurma potansiyeli **değişmez**

Farklı metaller kullanıldığında:

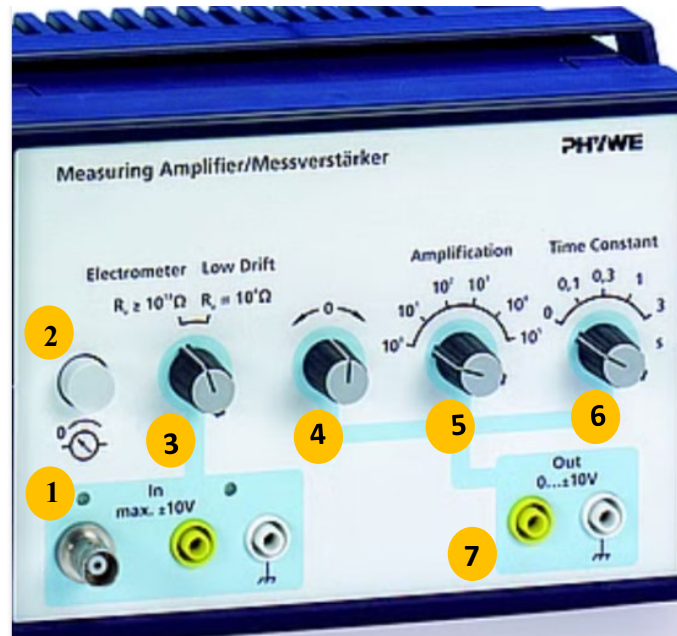
- İş fonksiyonu değişir
- Eşik frekans değişir
- Grafiklerin kesişim noktası değişir

3. Deney Düzenegi

Deney düzeneğinin Şekil 2’de verilmiştir. Bağlantıları yaptıktan sonra Deney sorumlusuna danışmadan güç kaynaklarını açmayınız.



Şekil 2: Fotoelektrik deney düzeneği ve kullanılan araç gereçler



Şekil 3: Ölçüm amplifikatörü ve her bir düğmenin işlevi. (1) Fotosel bağlantısı, (2) Yük boşaltma, (3) Giriş empedansı / çalışma modu seçici, (4) Ofset (sıfırlama) düğmesi, (5) Çıkış sinyali yükseltme düğmesi, (6) Zaman sabiti (filtreleme / ortalama alma süresi) ayarı ve (7) Çıkış sinyal soketleri.

4. Deneyin Yapılışı

4.1. Başlangıç Ayarları

1. Tüm elektrik bağlantılarını kontrol ediniz
2. Voltmetrenin doğru girişlere ve **Volt DC** ayarında olduğunu kontrol edin
3. Işık kaynağını açınız ve **kararlı hale gelmesi için ~2-3 dakika bekleyiniz**
4. Ortam ışığını mümkün olduğunca azaltınız

4.2. Optik Hizalama

1. Işık demetini fotoselin giriş penceresine yönlendiriniz
2. Seçilen renk dışında ışık gelmeyecek şekilde sistemi ayarlayınız
3. Maksimum sinyal için hizalamayı optimize ediniz

Diyafram açıklığı yaklaşık **1 mm** olmalıdır ve lambadan 5-10 cm uzağa yerleştirilmelidir.

Işık demeti fotosel girişini **tam doldurmalı ama taşmamalı**.

Merceğin amacı ışık demetini Fotosel'in üzerine odaklamaktır. Yani yarığın görüntüsünü fotoselin giriş açıklığı üzerine net olarak odaklayacak şekilde yerleştirilmelidir. Başlangıç olarak 20 cm konumuna yerleştirilebilir. Merceği ileri-geri oynatarak, Fotoselde maksimum gerilim elde edilen konumu bulun. Bu konum odak noktasıdır. Kritik nokta: "En parlak görünen" değil, en yüksek potansiyel fark veren konum doğru olandır. Yarık görüntüsünün fotosel girişinde yaklaşık 1 cm genişliğinde olması sağlanmalıdır. Bu değer, yeterli ışık şiddeti ve spektral çözünürlük arasında optimum denge sağlar.

Filtre Tutucu / Filtreler, Mercekten sonra, fotoselden önce ışık demetinin tam ortasında yer almalıdır. Optik ağ takıldıktan sonra Fotosel düzlemi üzerinde bir Işık Spektrumu oluşturulur. Fotosel üzerine istenilen ışık renginin düşmesi için Fotosel kolu hareket ettirilmelidir.

4.3. Cıva (Hg) Spektrumu Karakteristik Dalga Boyları

Deney düzeneğinde kullanılan yüksek basınçlı cıva lambasının, kırınım ağından sonrası gözlenen ve ölçümlerde kullanılan temel spektral çizgileri aşağıdadır.

Tablo 4.1: Cıva buharlı lambanın kırınım ağından sonra gözlenen spektruma ait bilgiler.

Renk	Dalga Boyu (λ)	Frekans (ν)
Mor/Mavi	405 – 436 nm	$688-741 \times 10^{12}$ Hz
Açık Mavi	492 nm	611×10^{12} Hz
Mavi	436 nm	688×10^{12} Hz
Yeşil	546 nm	549×10^{12} Hz
Sarı	578 nm	519×10^{12} Hz



Şekil 4. Cıva lambasının kırınım ağından geçtikten sonraki ışık spektrumu

Hg lambasının kırınım ağından sonraki spektrumunda yer alan bantlardan bazıları iki veya daha fazla dalgaboyunun karışımından oluşmaktadır. Bu sebeple “Açık Mavi” ve “Mavi/Mor” karışımı olan bantlar ile ölçüm yaparken dikkatli olunması gerekmektedir. Ölçümden beklenti merkeze doğru yaklaştıkça ölçülen potansiyel fark değerinin artması yönündedir. Eğer bazı bantlar (renk) ile ölçüm alınırken bu trende uygun veri alınamıyorsa bu tek bir dalgaboyundan (renkten) oluşmadığı anlamına gelir ki bu da Şekil 1’de verilen grafikte hatalı deneysel noktalar oluşmasına sebep olur.

4.4. Ölçüm Prosedürü

Her dalga boyu için aşağıdaki adımlar uygulanır:

- i. Ölçümden önce fotosel üzerine düşen ışığı keserek sistemin sıfır seviyesi kontrol edilir. Bunun için Voltmetrede “0” değerinin gözlenip gözlenmediği kontrol edilmeli. Gerekirse Ofset düğmesi (4 numaralı düğme) yardımıyla sıfırlama yapılmalıdır. Ayrıca ölçümlerden önce (2) numaralı düğmeye 3-4 saniye basılı tutarak önceki ölçümden birikmiş olan yükün boşaltılması gerekir. Eğer Voltmetrede “0” değeri gözlenmiyorsa bu **karanlık akım** ve **Amplifikatör akımlarından** kaynaklanan bir arka plan potansiyeli olmalıdır. Bu potansiyel değerini her ölçüm öncesi kontrol ediniz ve Tablo 4.2’ye V_{dark} olarak kaydediniz.
- ii. Giriş empedansı çalışma modu “**Electrometer ($10^{14} \Omega$)**” kademesine alınız, “**Amplificatoin**” ayarı orta ayar kısmına (10^3) getiriniz. Eğer voltmetreden okunan değer çok büyükse bu değeri daha düşük yapınız. Zaman sabiti “**Time Constant**” değerini **0.3** değerine getiriniz.
- iii. Seçilen tek renk ışığı, fotosel üzerine düşürmek için hareketli rayı uygun tarafa kaydırın ve voltmetrede oluşan gerilimi gözleyin. Gerilimin kararlı hale gelmesi için birkaç saniye bekleyin. Kararlı değer durdurma potansiyeli $V_{ölç}$ olarak Tablo 4.2’ye kaydediniz.
- iv. Aynı işlem farklı dalga boyları için tekrarlayın. İkinci dereceden kırınım kaynaklı UV fraksiyonlarının sarı ve yeşil spektral çizgiler için ölçülen değerleri yanlış etkilemesini önlemek için, takılabilir bir diyafram tutucu yardımıyla giriş diyaframının önüne renk filtreleri yerleştirin. Diğer renkler için renk filtrelerinin etkisi kontrol edilebilir. Sarı ve Yeşil renk filtreleri kullanılabilir. Ancak diğer renklerde ikincil UV etkisi çok daha zayıftır. Her bir renge karşılık gelen frekans değeri;

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$
 ifadesi yardımıyla hesaplanabilir. Yada Tablo 4.1’deki değerler kullanılabilir.
- v. Her ölçüm öncesinde sistem tekrar sıfırlanmalıdır. Bunun için fotosel kapağı kapatılmalı ve birkaç dakika beklenmelidir. Bu sırada Voltmetrede “0” değerinin gözlenmesi beklenir, ancak gözlenemiyorsa okunan değer V_{dark} olarak tabloya kaydedilir.

Tablo 4.2: Farklı renklerde Fotosel gerilimi verileri

Renk	Dalgaboyu λ (nm)	Frekans ν (10^{12} Hz)	V_{dark}	$V_{ölç}$	$V_0 = V_{ölç} - V_{dark}$

- vi. Ölçümler tamamlandıktan sonra, elde edilen V_0 değerleri ve karşılık gelen frekanslar kullanılarak $V_0 - \nu$ grafiği çizilir. Grafiğin eğimi h/e 'den yararlanarak h Planck sabiti hesaplanır. ($h = 6.62 \times 10^{-34}$ Js)
- vii. $V_0 - \nu$ grafiğinden yararlanarak doğrunun y-eksenini kestiği değeri belirleyin. Bu değerden yola çıkarak fotoselde kullanılan maddenin İş Fonksiyonu W_0 'ı hesaplayınız.

5. Değerlendirme soruları

1. Fotoelektrik olayda durdurma potansiyeli V_0 fiziksel olarak neyi ifade eder?
2. Neden V_0 ışık şiddetine değil, yalnızca frekansa bağlıdır?
3. Işığın şiddeti deneyinizde hangi büyüklüğü etkiler?
4. $V_0 - \nu$ grafiğinin eğimi ve y-eksenini kestiği nokta hangi fiziksel büyüklüklere karşılık gelir?
5. Voltmetrede hiç değer okunmaması durumunda olası iki nedeni yazınız.
6. Deneyde kullanılan metal değiştirildiğinde hangi büyüklük değişir, hangisi değişmez? Açıklayınız.

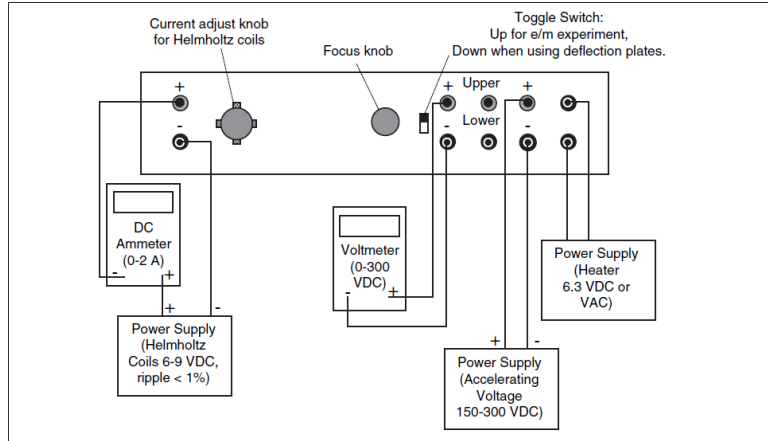
MODERN FİZİK

DENEY FÖYÜ

ELEKTRONUN YÜKÜNÜN KÜTLESİNE ORANININ ÖLÇÜLMESİ



DENEY DÜZENEGİNİN ŞEMATİK GÖSTERİMİ



TARİHSEL VE TEORİK ARKA PLAN

J. J. THOMSON (1897)



(1856–1940)

Katot ışınlarının (elektronların) manyetik alandaki sapmasınıyla e/m oranını ölçerek elektronu keşfetti.

KLASİK TEORİ

Elektron, manyetik alana dik v ile girer. Lorentz kuvveti merkezci kuvvete eşittir.

$$e v B = \frac{m v^2}{r} \Rightarrow \frac{e}{m} = \frac{v}{B r}$$
$$v = \sqrt{\frac{2 e V}{m}} \Rightarrow \frac{e}{m} = \frac{2 V}{B^2 r^2}$$

J. S. TOWNSEND (1901–1903)



(1868–1957)

Helmholtz bobinleri kullanan geliştirilmiş düzenele daha hassas ölçümler yaparak e/m değerini belirledi.

DENEY V: ELEKTRON İÇİN YÜK/KÜTLE (e/m) ORANININ ÖLÇÜLMESİ

1. Deneyin Amacı

Katot ışınlarının oluşumunu ve oluşum mekanizmasını incelemek. Katot ışınlarının negatif yüklü olduğunu göstermek. Elektriksel potansiyel fark altında hızlandırılan elektronların düzgün bir manyetik alan içindeki yörüngelerini inceleyerek elektronun yük/kütle oranı (e/m) değerini ölçmek.

2. Tarihçe

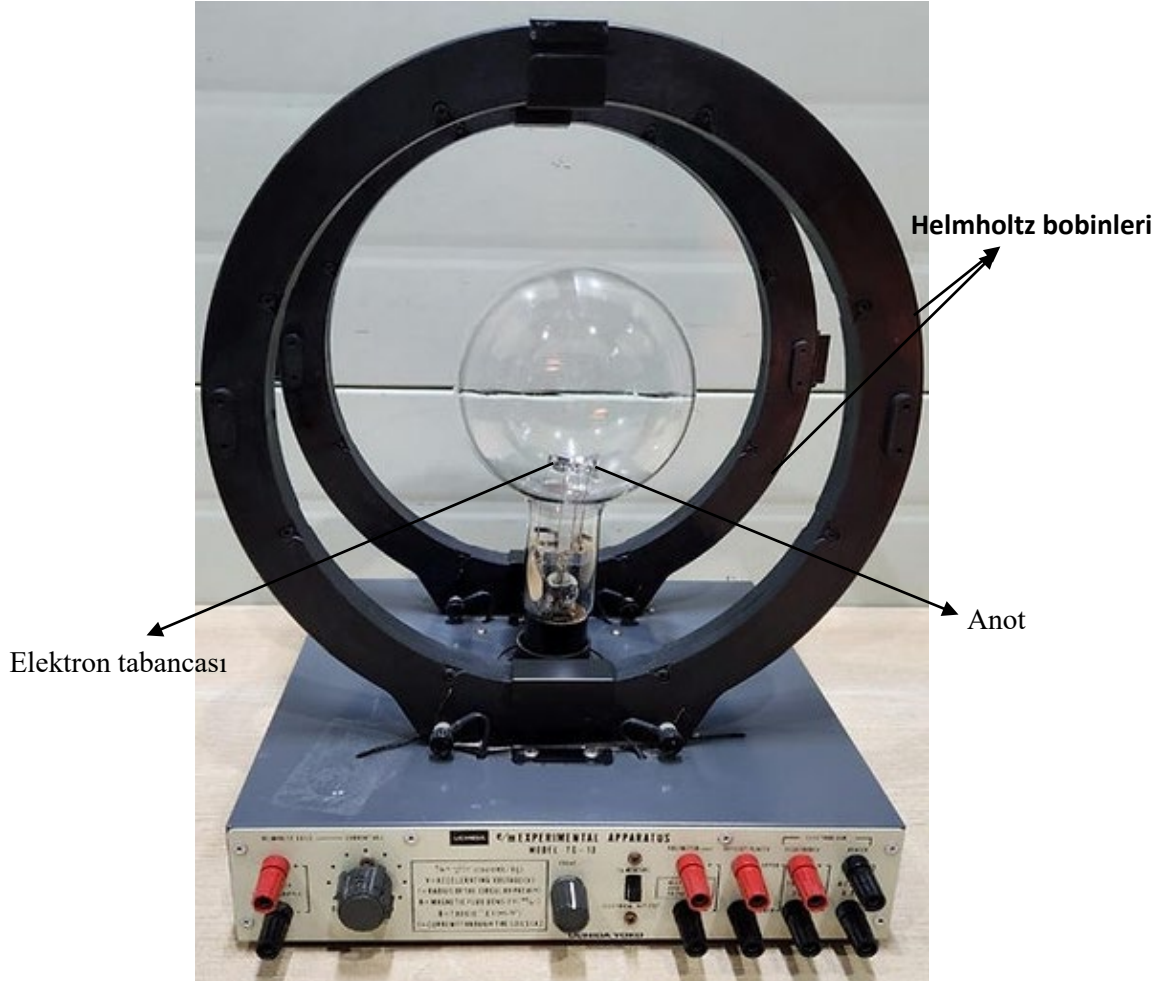
Katot ışınları, 19. yüzyılın ikinci yarısında düşük basınçlı gazlar içeren tüplerle yapılan deneyler sırasında keşfedilmiştir. Julius Plücker ve Johann Wilhelm Hittorf bu ışınların varlığını ilk gözlemleyen araştırmacılar arasında yer alırken, William Crookes geliştirdiği tüplerle katot ışınlarının daha belirgin biçimde incelenmesini sağlamıştır. Katot ışınları, katottan anoda doğru doğrusal olarak ilerleyen ve tüpün cam yüzeyinde floresans oluşturarak izleri gözlemlenebilen ışınlardır. Elektrik ve manyetik alanlar altında sapmaya uğramaları, bu ışınların yüklü parçacıklardan oluştuğunu göstermiştir. Özellikle elektrik alan altında pozitif plakaya doğru sapsmaları, katot ışınlarını oluşturan parçacıkların negatif yüklü olduğunu ortaya koymuştur.

J. J. Thomson, 1897 yılında bir katot ışın tüpünde bulunan yüklü temel parçacığın **yük/kütle oranını (e/m)** ilk kez ölçmüştür. Bir katot ışın tüpü temelde, içindeki hava büyük ölçüde boşaltılmış ve çok az miktarda arka plan gazı bulunan bir cam tüp içerisinde yer alan iki metal elektrottan oluşur. Katot ısıtıldığında (içinden akım geçirilerek) elektronlar yüzeyden koparak ayrılır ve pozitif potansiyelde tutulan anoda doğru hızlanır. Plakalar arasındaki gaz, elektronlarla esnek olmayan saçılmalar (inelastic scattering) yapar ve bu süreçte ışık yayar. Bu ışık, parçacıkların izlediği yolu görünür hâle getirir. Uygulanan bir manyetik alan içindeki hareketleri gözlemlenerek bu parçacıkların **yük/kütle oranı (e/m)** ölçülebilir. Thomson, farklı katot malzemeleri ve gazlar kullanarak ölçümlerini tekrarlamış ve her seferinde aynı e/m değerine ulaşmıştır. Bu sonuç, tüm atomlarda bulunan, negatif yüklü ve en hafif atomdan yaklaşık **2000 kat** daha küçük kütleyle sahip temel bir parçacığın varlığını göstermiştir. Thomson bu parçacıklara “corpuscle” adını vermiştir; ancak günümüzde bunları elektron olarak biliyoruz. Bu deneyde siz de temel olarak **Thomson’un deneyini tekrar edecek** ve elektronlar için **e/m** değerini ölçeceksiniz.

3. Teori

Şekil 1’de gösterilen düzenek, içinde küçük bir **elektron tabancası** bulunan bir cam tüp ile aynı eksene yerleştirilmiş Helmholtz bobinlerinden oluşur. Bu tabanca:

- Elektronların **termoiyonik emisyonla (ısıtma yoluyla)** salındığı bir **katot flamanı**
- Katoda göre **pozitif potansiyele ayarlanabilen bir anot** içerir.



Şekil 1: e/m deney düzeneği (e/m tüpü, Helmholtz bobin çifti ve bağlantı soketleri).

Katottan kopan elektronlar anoda doğru hızlanır ve büyük kısmı burada toplanır. Ancak anotta bulunan bir **yarık**, elektronların bir kısmının cam tüpün daha geniş hacmine geçmesine izin verir. Bu elektronların bazıları arka plan gazıyla **esnek olmayan çarpışmalar** yapar ve bu sırada yayılan ışık elektronların izlediği yolu görünür hale getirir.

Düzgün bir manyetik alan oluşturmak için **iki adet dairesel Helmholtz bobini** sarılmıştır ve tüp bobinlerin oluşturduğu hacmin merkezine yerleştirilmiştir. Tüp, elektron tabancasından çıkan demetin **Helmholtz bobinlerinin oluşturduğu manyetik alana dik yönde** hareket edecek şekilde konumlandırılmıştır. Bobinler arasında, homojen bir manyetik alan oluşturmak ve hesaplamada kolaylık sağlaması açısından bobinlerin yarıçapı kadar bir mesafe bırakılmıştır.

Katottan termoiyonik emisyonla salınan bir elektronun kazandığı kinetik enerjisi:

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV_H \quad (1)$$

Burada;

m: yüklü parçacığın kütlesi (9.11×10^{-31} kg)

e: elektronun yükü (-1.6×10^{-19} C)

V_H : hızlandırma gerilimi

v : elektronun hızıdır.

Helmholtz bobinlerinin oluşturduğu manyetik alan bu hıza **dik** yöndedir ve

$$\vec{F} = e\vec{v} \times \vec{B} \quad (2)$$

şeklinde ifade edilen bir manyetik kuvvet üretir. (Kuvvetin yönü bulunurken elektronun yükünün negatif olduğu dikkate alınmalıdır.)

Bu kuvvet hem **hıza hem de manyetik alana dik** olup **merkezcil kuvvet** görevi görür ve elektronun **dairesel bir yörünge** üzerinde hareket etmesine neden olur. Bu dairesel yörüngenin yarıçapı r , Newton'un ikinci yasası kullanılarak bulunabilir:

$$m \left(\frac{v^2}{r} \right) = evB \quad (3)$$

Buradan elektronun **yük/kütle oranı** deneysel büyüklükler cinsinden şu şekilde elde edilir:

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{rB} \quad (4)$$

Manyetik alan B değerini, Helmholtz bobinlerinin iki akım halkası için **Biot-Savart yasasını** kullanarak (bkz. Ek):

$$B = \frac{N\mu_0 a^2}{(a^2 + (a/2)^2)^{3/2}} I_{hc} \quad (5)$$

bulunur. Burada

N : her bobini oluşturan sarım sayısı (130 sarım)

I_{hc} : bobinlerden geçen akım (iki bobinde de aynıdır)

a : bobin yarıçapı (metre cinsinden) (15 cm)

μ_0 : manyetik geçirgenlik sabitidir ($4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}$)

Denklem (1)'den elektronun hızı

$$v = \sqrt{\frac{2eV_H}{m}}$$

olduğu görülür. Bu ifade Denklem (4) 'e yerine koyulduğunda:

$$\frac{e}{m} = \frac{2V_H}{r^2 B^2} \quad (6)$$

elde edilir.

Elektron için kabul edilen yük/kütle oranı değeri:

$$\frac{e}{m} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}}{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}} \cong 1.7563117 \times 10^{11} \text{ C/kg}$$

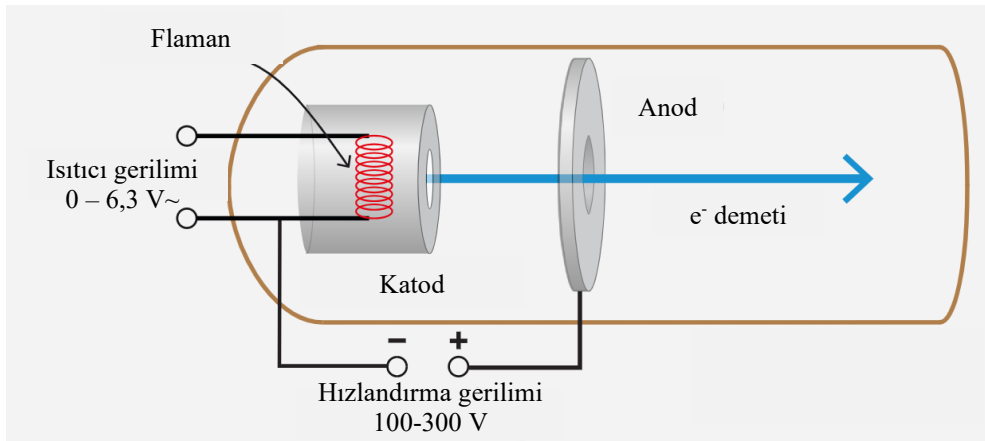
4. Deney Düzeneği ve Yapılacak İşlemler

Gerekli Ekipmanlar:

- Uchida Yoko TG-13 e/m düzeneği (Şekil 1)
- Yüksek Gerilim Güç Kaynağı (elektronları hızlandırma gerilimi)
- AC - DC güç kaynağı (Helmholtz bobinlerini beslemek ve filamen ısıtıcısı için)
- İki adet multimetre (Biri Helmholtz bobinlerinden geçen akımı, diğeri hızlandırıcı gerilimini ölçmek üzere kullanılacaktır)

e/m tüpü, 1×10^{-2} mm-Hg basınçta helyum gazı ile doldurulmuştur ve içinde bir **elektron tabancası** ile **hızlandırıcı plakaları** bulunur.

Elektron demeti tüp içinde **görünür bir iz bırakır**, çünkü elektronların bazıları helyum atomlarıyla çarpışır. Bu çarpışmalar sonucu helyum atomları **uyarılır** ve daha sonra **görünür ışık yayarlar**.



Şekil 2: Elektronların ısıtıcı flamandan koparak hızlandırma gerilimi altında hızlanmasını gösteren şematik gösterim

Elektron tabancası Şekil 2’de gösterilmiştir. **Isıtıcı** katodu ısıtır ve katot elektron yayar. Elektronlar katot ile anod arasına uygulanan **potansiyel farkı** ile hızlandırılır. Bu yapı elektron demetini odaklamaya ve hızlandırmaya yardımcı olur.

Denklem (5)’e deney düzeneğindeki büyüklükler yerine koyulursa Helmholtz bobinlerin oluşturduğu manyetik alan iyi bir yaklaşıklıkla:

$$B \cong (7.80 \times 10^{-4}) \cdot I_{hc}$$

Manyetik alan ifadesi Denklem (6)’da yerine yazılırsa:

$$\frac{e}{m} = \frac{1}{60.84 \times 10^{-8}} \frac{V_H}{(r \cdot I_{hc})^2} \quad (7)$$

Helmholtz bobininin arkasına **aynalı bir ölçek** yerleştirilmiştir. Bu ölçek elektron demeti ile

yansımasının hizalanması sayesinde, **paralaks hatası olmadan yarıçap ölçümü** yapılmasını sağlar.

Deney düzeneğinin üzerine kumaş bir örtü yerleştirilmiştir, böylece elektron demeti rahatlıkla gözlemlenebilir.

UYARI

Bu deneyde **yüksek gerilim** ile çalışılacaktır. Bu sebeple;

- Tüm bağlantıları **güç kapalıyken** yapınız.
- Bağlantıları değiştirmeden veya sökmeden önce **gücü kapatınız**.
- **Gevşek veya açık bağlantı olmadığından** emin olunuz.

5. Deney Düzeneğinin Kurulumu

Deney düzeneğinin bağlantı şeması **Şekil 3**'te gösterilmiştir.

Güç kaynakları için kabul edilebilir ayarlar

Elektron tabancası / filament ısıtıcısı: **6,3 V AC**

Elektrotlar: **150 – 300 V DC**

Helmholtz bobinleri: **6 – 9 V DC** (dalgalanma %1'den küçük olmalıdır)

DİKKAT

Devreyi kurduktan sonra hiçbir şekilde güç kaynaklarını açmayınız. Deney sorumlusunun gelmesini bekleyiniz. Deney sorumlusu kontrol edip onay verdikten sonra güç kaynaklarını açını

UYARI

Filament ısıtıcısı için gerilim **6.3 V AC** değerini asla geçmemelidir.

Daha yüksek değerler **filamenin yanmasına** neden olabilir.

Helmholtz bobinlerinden geçen akım **2 A'i** geçmemelidir.

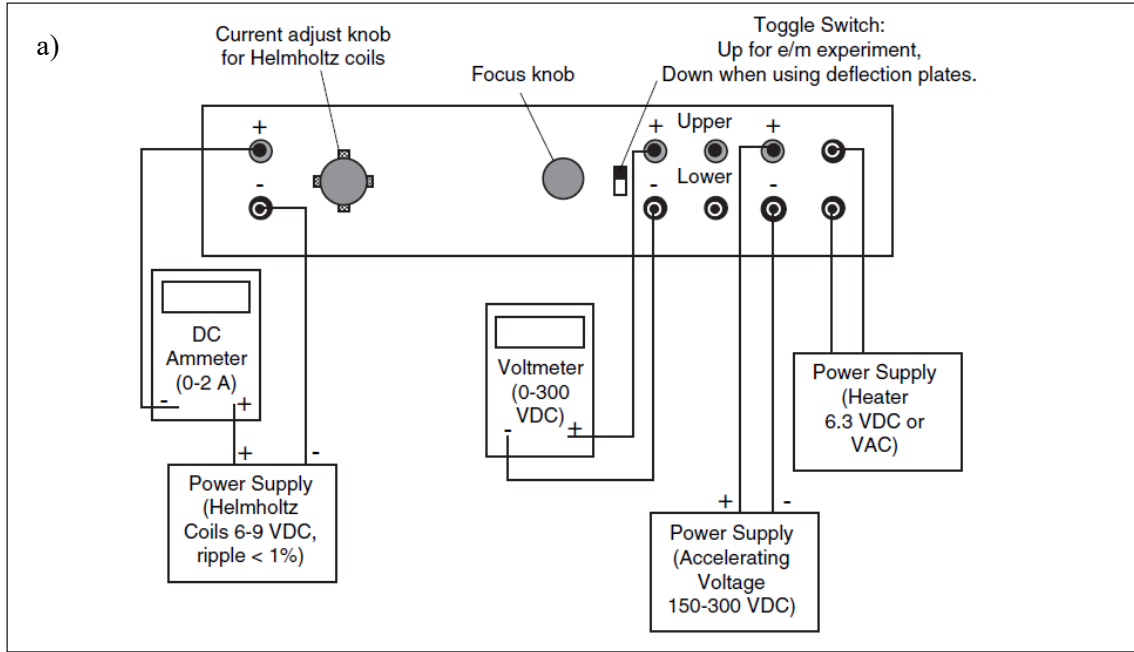
Kazara akımın aşırı yükselmesini önlemek için güç kaynağını **sabit akım modunda düşük bir ayarda** çalıştırınız.

6. Deneyin Yapılışı

1. Şekil 3'de verilen devreyi kurunuz. Katodun ısınması için **birkaç dakika bekleyiniz**. Isındığında elektron tabancasından çıkan **elektron demetini** göreceksiniz. Hızlandırıcı potansiyelini 150 V civarına getiriniz.
Demetin yörüngesi manyetik alan tarafından **eğrilecektir**.
2. Helmholtz bobinlerinin akım ayar düğmesini **yavaşça saat yönünde çeviriniz**. Ampermetreyi izleyiniz ve akımın **2 A'den küçük** olmasına dikkat ediniz.
3. Eğer demette **spiral bir hareket** görürseniz tüpü biraz döndürünüz.
Elektron demetinin Helmholtz bobinlerine **paralel** olduğundan emin olunuz.

Eğer paralel değilse tüpü paralel olacak şekilde döndürünüz.

Tüpü yuvasından çıkarmayınız. Tüpü döndürdüğünüzde **soket de birlikte dönecektir**.



Şekil 3: e/m deneyi için bağlantılar: a) Şematik gösterim, b) Gerçek bağlantılar.

Elektron Demeti Yarıçapının Ölçülmesi:

Elektron demetinin yarıçapını r ölçmek için aşağıdaki verileri kaydediniz:

- Hızlandırma gerilimi V_H
- Helmholtz bobinlerinden geçen akım I_{hc}

Elektron demetine tüpün içinden bakınız. Paralaks hatasını önlemek için başınızı hareket ettirerek **elektron demeti halkasının bir tarafını aynalı ölçek üzerindeki yansımasıyla hizalayınız**. Demetin yarıçapını gördüğünüz şekilde ölçünüz. Daha sonra ölçümü **halkanın diğer tarafı için** tekrar ediniz ve iki ölçümün **ortalamasını** alınız. Sonucunuzu kaydediniz. İnsan kaynaklı hataları azaltmak için **her öğrenci ölçümü tekrar etmeli**, ardından yarıçapın **ortalama değeri ve belirsizliği** hesaplanmalıdır.

- i) Yarıçap ölçümlerini sabit akım için **beş farklı** V_H değeri için tekrarlayınız. Tablo 1'e uyguladığınız akımı I_{hc} kaydediniz ve V_H değerlerine karşılık ölçtüğünüz r değerlerini kaydediniz (Her ölçüm deney yapan her bir öğrenci ayrı-ayrı ölçüp kaydedecektir)

Tablo 1: Sabit akım altında, hızlandırma gerilimi değişiminin yörünge yarıçapı üzerindeki değişimini gösteren veriler

I_{hc}	V_H	r_{ort}	e/m
..... A	150 V		
	175 V		
	200 V		
	225 V		
	250 V		
Ortalama $\langle e/m \rangle$			

- ii) Aynı işlemi sabit bir V_H değeri için manyetik alanın **5 farklı değeri** için tekrarlayınız. Yani akımı beş farklı değer için tekrarlayınız. Ölçümlerinizi Tablo 2'ye kaydediniz

Tablo 2: Sabit hızlandırma gerilimine karşılık uygulanan akımın değişiminin yörünge yarıçapı üzerindeki değişimini gösteren veriler

V_H	I_{hc}	r_{ort}	e/m
..... A	1.00 A		
	1.20 A		
	1.40 A		
	1.60 A		
	1.80 A		
Ortalama $\langle e/m \rangle$			

7. Hesaplamalar ve Analiz

- Her ölçüm için **Denklem (7)** kullanılarak e/m hesaplanmalıdır. **Not:** Hesaplamalarda **SI birim sistemi** kullanılmalıdır.
- Tablo 1'deki veriler için ayrı ayrı $\langle e/m \rangle$ hesaplanmalıdır. Daha sonra bu değerlerin ortalaması bulunarak, standart sapma σ hesaplanmalıdır.
Bu ortalamalar birbirleriyle **yeterince tutarlı mı?** Bu değerler birbirlerinden **2σ** içinde mi? Eğer öyleyse hepsi **birleştirilebilir**.

Aynı işlemler Tablo 2'deki veriler için de tekrarlanmalıdır.

3. Tüm e/m ölçümleri için genel ortalama, standart sapma σ hesaplanmalıdır.
4. Bu genel ortalama değerin **kabul edilen değerle karşılaştırması** yapılmalıdır.
Başka bir deyişle, bu değer kabul edilen değerden **kaç** σ uzaklıktadır?
5. Son olarak verileri şu şekilde grafiğe dökünüz:

$r^2 B^2 / 2 \rightarrow$ **x eksen**

$V_H \rightarrow$ **y eksen** olacak şekilde Tablo 1'deki verileri kullanarak bir grafik çiziniz. Denklem (6)'a göre bu grafik **doğrusal bir ilişki** vermelidir. (Aşağıdaki tabloyda verileri hesaplayarak grafiğinizde kullanabilirsiniz)

Bu grafiğin **eğimi**, $\langle e/m \rangle$ değerine karşılık gelir.

$r^2 B^2 / 2$	V_H	$\langle e/m \rangle$
		Eğim = ...

Ayrıca grafikte **kesim (intercept)** var mı? Yani y-eksenini sıfırdan farklı bir noktada mı kesiyor? Teorik olarak ne beklenir?

6. Hangi yöntem daha iyi bir $\langle e/m \rangle$ değeri verir? Ortalama alma yöntemi mi, doğrusal grafik yöntemi mi? Bunu tartışınız.

Ölçüm Doğruluğunu Artırma

1. Bu deneydeki en büyük hata kaynağı **elektronların hızıdır**. Bunun iki temel neden vardır:
 - Anottaki delik nedeniyle ivmelendirme alanı tam düzgün değildir; bu nedenle elektronların hızı **teorik değerden biraz daha küçük olur**.
 - Tüp içindeki helyum atomları ile çarpışmalar elektronların hızını **daha da azaltır**. e/m denklemi $1/r^2$ ile orantılı olduğu ve yarıçap r hız v ile orantılı olduğu için bu etkiler deneysel e/m değerini önemli ölçüde etkiler.
2. Elektron hızındaki bu kayıptan kaynaklanan hatayı azaltmak için **yarıçapı demetin dış kenarına göre ölçünüz**.
3. Çarpışmaların göreceli etkisini azaltmak için **ivme gerilimini mümkün olduğunca yüksek tutunuz**.

En iyi sonuçlar için **200 V üzeri** önerilir.

Ancak gerilim çok yüksek olursa t p kenarındaki camın eğriliği nedeniyle yarıçap ölçümü **bozulabilir**.

En iyi sonuçlar **5 cm'den küçük yarıçaplarda** elde edilmiřtir.

4. Deneysel e/m değerleriniz **teorik değerden daha büyük çıkacaktır**, çünkü iki ana hata kaynağı da yarıçapın **olması gerekenden daha küçük  l lmesine** neden olur.

EK: HELMHOLTZ BOBİNLERİNİN OLUŞTURDUĞU MANYETİK ALAN

Helmholtz bobinleri, yaklaşık olarak düzgün bir manyetik alan bölgesi üretmek için kullanılan bir düzendir. Adını Alman fizikçi **Hermann von Helmholtz**'tan alır.

Bir Helmholtz bobin çifti: aynı yarıçapa sahip, aynı yönde akım taşıyan, ortak bir eksen üzerinde, aralarındaki mesafe bobin yarıçapına eşit olacak şekilde yerleştirilmiş iki özdeş bobinden oluşur.

Manyetik alanın merkezdeki değeri **Biot–Savart yasası** kullanılarak hesaplanabilir:

Bir akım elemanının oluşturduğu manyetik alan:

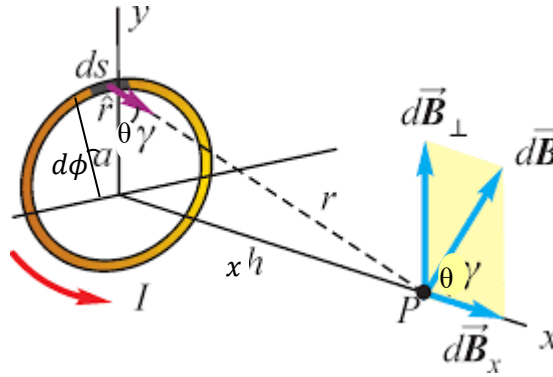
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{s} \times \hat{r}}{r^2}$$

Burada:

$d\vec{s}$: akım elemanı

$\hat{r}$: akım elemanından gözlem noktasına olan vektördür.

Akım taşıyan a yarıçaplı halkayı yz düzlemine yerleştirelim. Merkezinden x uzaklıktaki noktada manyetik alanı bulmak istiyoruz. Bu problemi çözmenin en pratik yolu silindirik koordinatları kullanmaktır.



O halde akım elemanı:

$$d\vec{s} = a d\phi \hat{\phi}$$

Konum vektörü:

$$\vec{r} = x\hat{x} - a\hat{\rho}$$
$$r = \sqrt{a^2 + x^2}$$

Simdi $d\vec{s} \times \hat{r}$ vektörel çarpını bulalım.

Halkanın her noktasından gelen **dikey bileşenler birbirini götürür**, Sadece **x-bileşeni kalır**. Bu yüzden sadece B_x hesaplanır.

Vektörel çarpımın büyüklüğü:

$$|d\vec{s} \times \hat{r}| = ds \sin \theta$$

Burada:

$$\sin \theta = \frac{a}{\sqrt{a^2 + x^2}}$$

ve

$$ds = a d\phi$$

Biot-Savart yasasında yerine koyalım

$$dB_x = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I(ad\phi)}{r^2} \cdot \sin \theta$$
$$dB_x = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Iad\phi}{(a^2 + x^2)} \cdot \frac{a}{(a^2 + x^2)^{1/2}}$$
$$dB_x = \frac{\mu_0 I a^2}{4\pi(a^2 + x^2)^{3/2}} d\phi$$

a ve x tüm halka boyunca sabit olduğundan integral dışına çıkar ve integrasyon

$$B_x = \int_0^{2\pi} dB_x$$
$$B_x = \frac{\mu_0 I a^2}{4\pi(a^2 + x^2)^{3/2}} \int_0^{2\pi} d\phi$$
$$\int_0^{2\pi} d\phi = 2\pi$$

Sonuç

$$B(x) = \frac{\mu_0 I a^2}{2(a^2 + x^2)^{3/2}}$$

Bu manyetik alan tek bir akım halkasının oluşturduğu manyetik alandır.

Burada

μ_0 : manyetik geçirgenlik sabiti

I : halkadan geçen akım

R : bobin yarıçapı

x : bobin çiftinin merkezinden olan uzaklıktır.

Helmholtz bobinleri için bu ifadeyi düzenleyelim. $I = I_{hc}$ ve $x = a/2$ yerine yazılıp **2** adet karşılıklı **N** sarımlı bobin olduğu dikkate alınırsa;

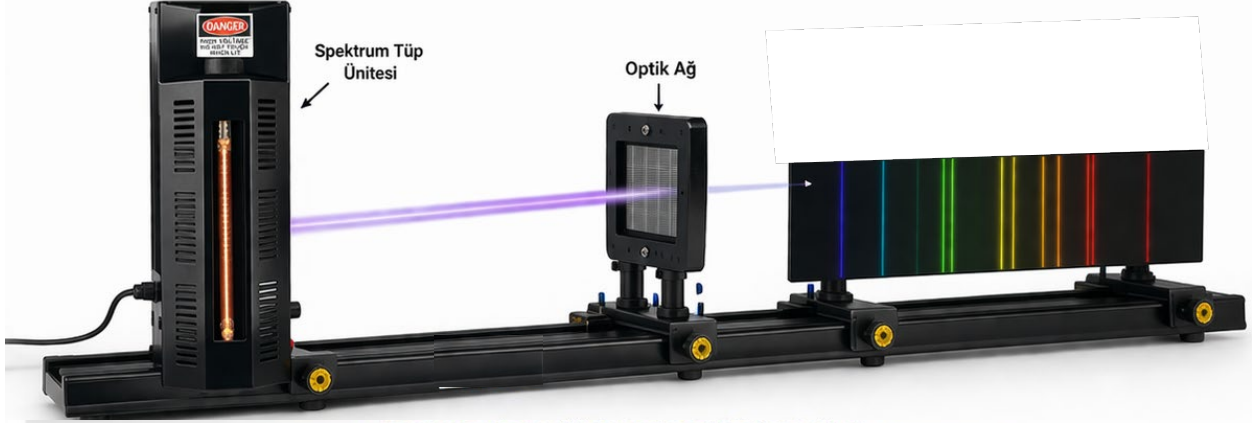
$$B = \frac{N\mu_0 I_{hc} a^2}{(a^2 + (a/2)^2)^{3/2}}$$

bulunur.

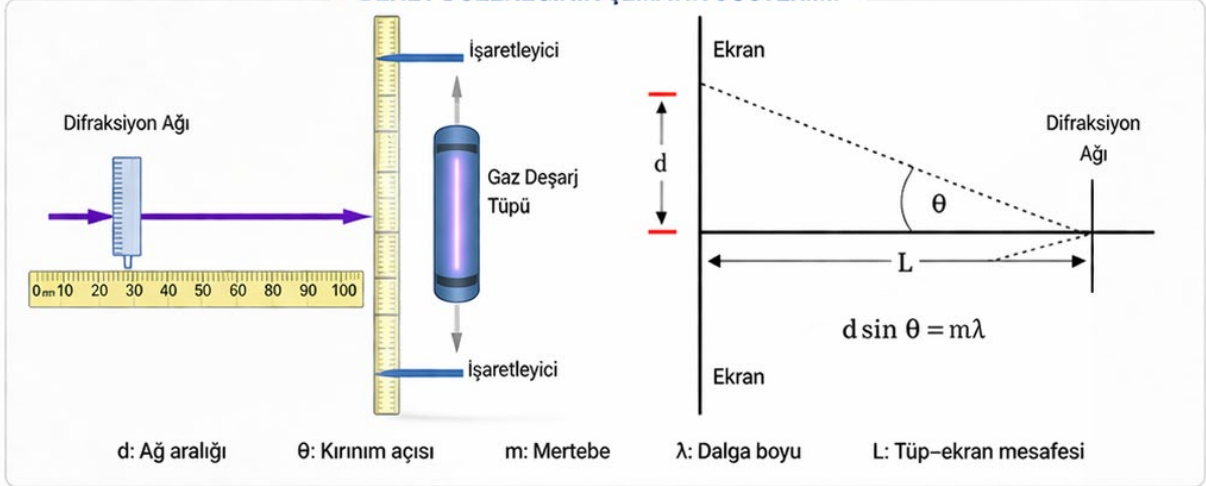
MODERN FİZİK

DENEY FÖYÜ

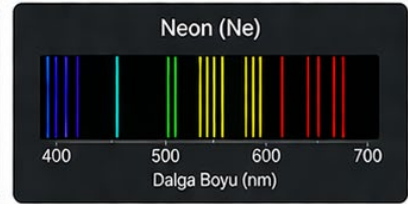
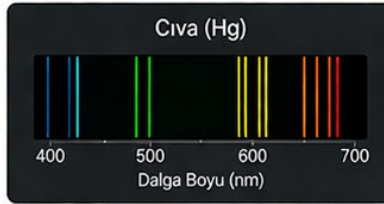
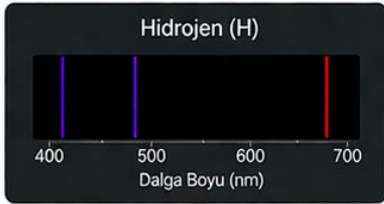
ATOM SPEKTRUMLARI DENEYİ



DENEY DÜZENEGİNİN ŞEMATİK GÖSTERİMİ



GÖZLENEN SPEKTRUMLAR



BİLİM ÖNCÜLERİ



Johann Balmer
(1825–1898)

Görünür hidrojen spektrumu için Balmer serisini tanımladı.



Theodore Lyman
(1874–1954)

Ultraviyole hidrojen spektral serisini keşfetti (n=1 geçişleri).



Friedrich Paschen
(1865–1947)

Kızılötesi spektral çizgileri belirtti (n=3 geçişleri).



Niels Bohr
(1885–1962)

Atom modelini geliştirerek spektral çizgilerin kuantalanmış enerji düzeylerinden kaynaklandığını açıkladı.

DENEY VI: ATOM SPEKTRUMLARI

1. Deneyin Amacı:

Atomların yaydığı ışığın **sürekli değil, belirli dalga boylarından oluşan çizgi spektrumları** şeklinde olduğunu gözlemlemek ve bu spektrumlar aracılığıyla atomların enerji seviyelerinin kesikli yapısını incelemek. Kırınım yolu ile çeşitli atomların optik spektrum çizgilerine karşılık gelen dalga boylarını ve Rydberg sabitini hesaplamak.

2. Kullanılan Araç ve Gereçler:

- Gaz deşarj tüpleri (Hidrojen, Helyum, Argon, Neon vb. lambası)
- Yüksek gerilim kaynağı
- Kırınım ağı (difraksiyon ızgarası)
- Ölçüm skalası

3. Teorik Bilgi:

Atomların yayımladıkları ve soğurdıkları ışınımın yardımıyla yapıları hakkında bilgi sahibi olmak mümkündür. Atomların yapılarını anlamak üzere yapılmış olan çalışmalar sonucunda birçok teori ve model ortaya çıkmıştır. Bunlardan biri J. J. Thomson (1856- 1940)'ın "Thomson Atom Modeli"dir. Bu modele göre Thomson atomu pozitif yüklü küre içinde dağılmış elektronlar şeklinde tasarlamıştır. Bu elektronların küre içindeki yerleşimlerinin ise atomu yüksüz yapacak şekilde olması gerektiğini düşünmüştür.

Thomson'dan sonra E. Rutherford (1871-1937) "Rutherford Atom Modeli"ni ortaya atmıştır. Bu modele göre Rutherford pozitif yüklerin küre içinde değil de çekirdek adı verilen küre merkezinde dolandığını deneylerle kanıtlamıştır. Bu deneylerin sonuçlarına uygun olarak atomu ve elektronları güneş sistemine benzetmiş, güneş yerine pozitif yüklü çekirdek, gezegenler yerine ise elektronları tasarlamıştır. Bu modeli geçersiz kılan nokta ise elektronların çekirdek çevresinde sürekli dönmesinin gerekmesidir. Dönüş hareketi merkezci kuvvet ile gerçekleşir. Yani ivmeli harekettir. Elektromanyetik teoriye göre, ivmeli hareket yapan yükler dışarıya ışık verecektir. Bu yüzden dışarı ışık veren elektronun enerjisi azalacak ve çekirdeğe düşecektir. Böyle bir durum ise söz konusu değildir.

Her iki modelden daha sonra Bohr (1825-1962)'un geliştirmiş olduğu "**Bohr Atom Modeli**" ise bugün halen **H atomu** için geçerliliğini korumaktadır. Bohr, hidrojen atomunun enerji düzeylerini açıklamak amacıyla iki temel postulat ileri sürmüştür:

1. Elektron, yalnızca belirli ve kesikli enerji düzeylerinde bulunabilir. En düşük enerji düzeyi **taban hali** (ground state) olarak tanımlanırken, daha yüksek enerjili düzeyler **uyarılmış haller** (excited states) olarak ifade edilir.
2. Elektron, bir kararlı durumdan diğerine geçiş yaptığında, iki enerji düzeyi arasındaki farka eşit enerjide elektromanyetik ışınım **yayar (emisyon)** ya da **soğurur (absorpsiyon)**. Bu süreçte enerji değişimi,

$$\Delta E = E_{ilk} - E_{son} \quad (1)$$

bağıntısı ile verilir.

Bir atom, dışarıdan enerji aldığı anda (**absorbsiyon**) elektronları daha düşük enerji düzeylerinden daha yüksek enerji düzeylerine çıkar. Bu durum atomu kararsız hale getirir. Kararsız olan elektronlar tekrar daha düşük enerji düzeylerine dönerken (**emisyon**) iki enerji seviyesi arasındaki fark kadar enerjini ışınım olarak yayar. Yayılan veya soğurulan bu enerjinin değeri,

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

şeklinde ifade edilir. Bu ilişki Max Planck tarafından ortaya konmuştur. Burada:

h : Planck sabiti ($h=6,6256 \times 10^{-34}$ Js)

ν : frekans

λ : dalga boyu

Buna göre:

- Absorbsiyon sırasında atom, belirli dalga boylarına sahip enerjiyi alarak üst enerji seviyesine çıkar.
- Emisyon sırasında ise elektron alt seviyeye inerken belirli dalga boylarında ışık yayar.
- Bu belirli dalga boyları atomun kendine özgü spektrumunu oluşturur.

Sonuç olarak, atom spektrumları; elektronların enerji seviyeleri arasında geçiş yaparken belirli enerjileri (ve dolayısıyla belirli dalga boylarını) soğurması veya yayması sonucu oluşur. Her element kendine özgü bir spektrum üretir. Bu spektrum:

- Belirli dalga boylarında parlak çizgilerden oluşur
- Atomun enerji seviyelerinin bir "parmak izi" gibidir

Bu durum doğrudan enerji kuantizasyonu ile açıklanır.

3.1 Hidrojen Spektrumu

Bohr atom modeline göre H atomunun herhangi bir kararlı halinin enerjisi,

$$E_n = - \frac{m e^4}{8 \varepsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} \quad (3)$$

$n = 1, 2, 3, \dots$ (Baş kuantum sayısı)

$e = 1,602 \times 10^{-19}$ C (Elektronun yükü)

$m = 9,1091 \times 10^{-31}$ kg (Elektronun kütlesi)

$\varepsilon_0 = 8,8542 \times 10^{-12}$ F/m (veya C^2/Nm^2) (Boşluğun elektriksel geçirgenliği)

$h = 6,6256 \times 10^{-34}$ Js (Planck sabiti)

Hidrojen atomunun en düşük enerji düzeyi $n=1$ taban durumudur ve taban durum enerjisi:

$$E_1 = - \frac{m e^4}{8 \varepsilon_0^2 h^2} = -13.6 \text{ eV} \quad (4)$$

n_i durumundan, n_s durumuna geçiş için ışımının frekansı ($n_i > n_s$):

$$\nu = \frac{E_{ilk} - E_{son}}{h} \quad (5)$$

$$\nu = \frac{1}{h} \cdot \left(- \frac{m e^4}{8 \varepsilon_0^2 h^2} \right) \cdot \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_s^2} \right) \quad (6)$$

$$\nu = \left(\frac{m e^4}{8 \varepsilon_0^2 h^3} \right) \cdot \left(\frac{1}{n_s^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (7)$$

Eğer $\nu = \frac{c}{\lambda}$ yazılırsa ve Denklem (7) yeniden düzenlenirse:

$$\frac{1}{\lambda} = \left(\frac{m e^4}{8 \varepsilon_0^2 c h^3} \right) \cdot \left(\frac{1}{n_s^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (8)$$

elde edilir, burada;

$$R = \left(\frac{m e^4}{8 \varepsilon_0^2 c h^3} \right) \quad (9)$$

$R = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ (Rydberg Sabiti) olarak yazılırsa Denklem (8) şöyle ifade edilir.

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_s^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (10)$$

Şekil 1, Hidrojen atomunun enerji düzeylerini ve spektral serilerini gösterir. Lyman serisi morötesi bölgede, Balmer görünür bölgede, Paschen, Bracket ve Pfund serileri kızılötesi bölgededir. Hidrojen atomunun ilk beş serisi için matematiksel bağlantılar:

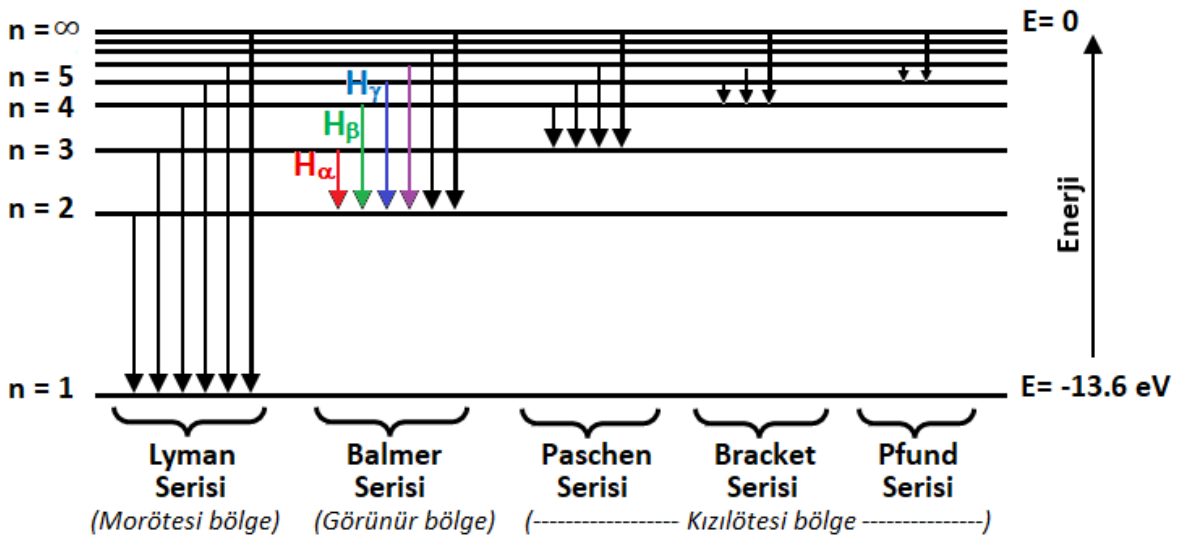
$$\text{Lyman Serisi} \rightarrow n_s = 1, n_i = 2, 3, 4, \dots \quad \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (11)$$

$$\text{Balmer Serisi} \rightarrow n_s = 2, n_i = 3, 4, 5, \dots \quad \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (12)$$

$$\text{Paschen Serisi} \rightarrow n_s = 3, n_i = 4, 5, 6, \dots \quad \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (13)$$

$$\text{Bracket Serisi} \rightarrow n_s = 4, n_i = 5, 6, 7, \dots \quad \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (14)$$

$$\text{Pfund Serisi} \rightarrow n_s = 5, n_i = 6, 7, 8, \dots \quad \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (15)$$



Şekil 1. Hidrojen atomunun spektral serileri.

3.2 Kırınım Ağı:

Kırınım ağı (difraksiyon ağı) kırınım şartı, ışığın ağ üzerindeki periyodik yarıklardan geçerek girişim yapması sonucu oluşan aydınlık saçakların (maksimumların) konumunu belirler. Bu şart, girişim yapan ışınlar arasındaki yol farkının, dalga boyunun tam katlarına eşit olması esasına dayanır. Kırınım ağı üzerinde aydınlık (parlak) saçakların oluşma şartı (kırınım formülü):

$$n\lambda = d \sin \theta \quad (16)$$

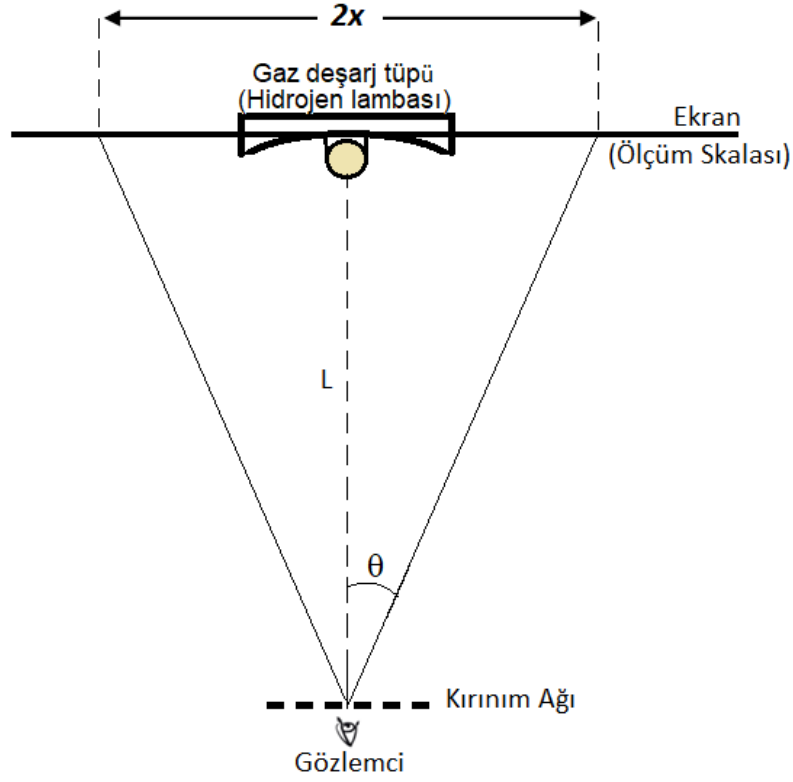
d : Kırınım ağı çizgileri arasındaki mesafe (ağ sabiti veya yarık aralığı). Eğer kırınım ağında mm'de N çizgi varsa, $d = 1/N$ olur.

θ : Kırınım açısı (merkezi aydınlık saçığa göre sapma açısı)

n : Kırınım mertebesi (0, 1, 2, ... gibi tam sayılar). $n = 0$ merkezi maksimumu, $n = 1$ birinci mertebe aydınlık saçığı gösterir.

λ : Kullanılan ışığın dalga boyu.

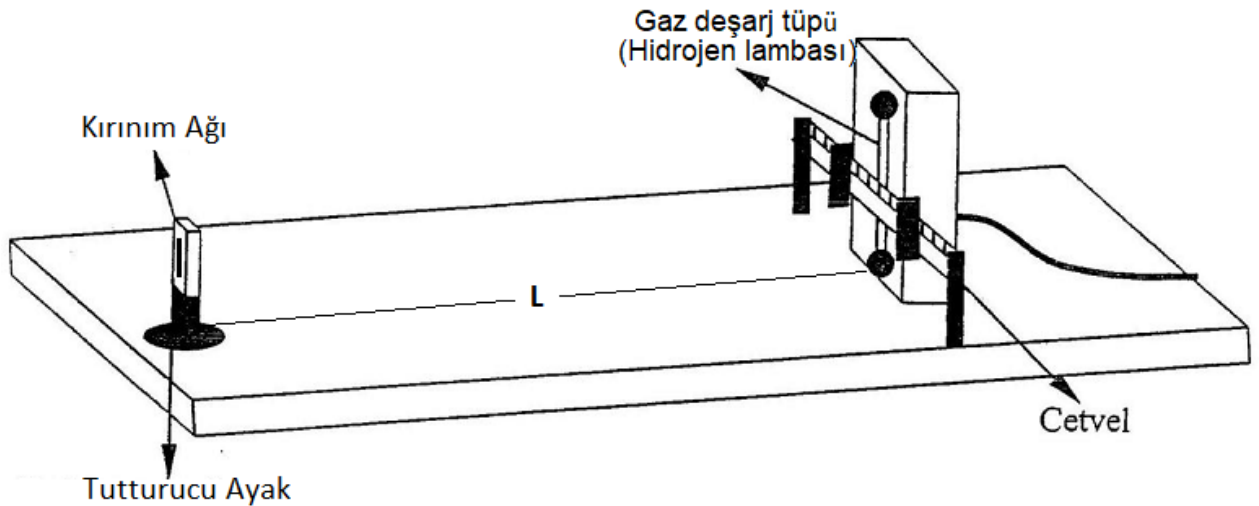
$$\sin \theta = \frac{x}{\sqrt{x^2 + L^2}} \quad (17)$$



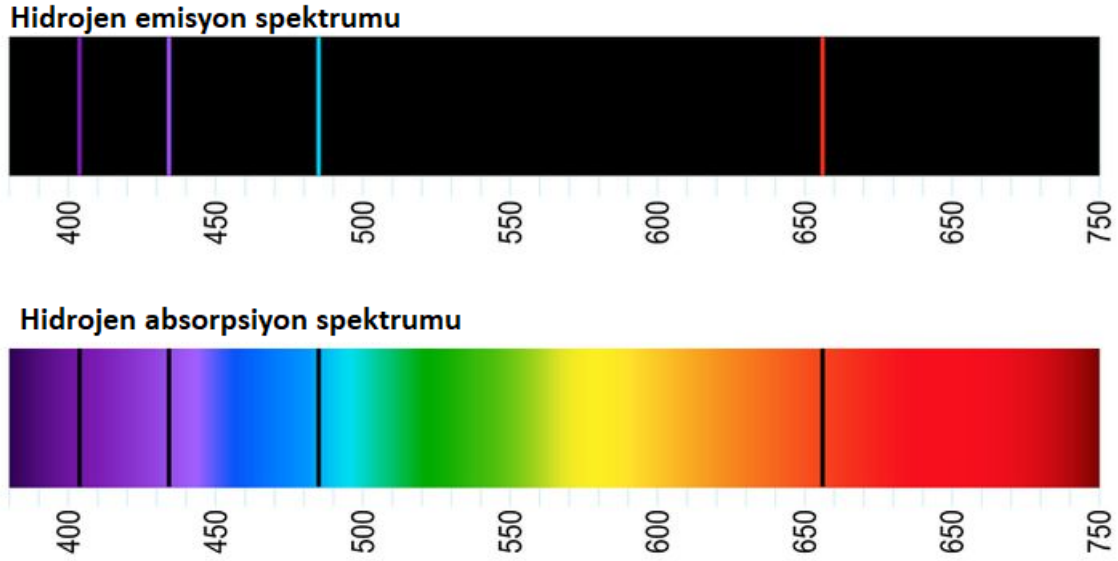
Şekil 2. Kırınımın geometrisi.

4. Deneyin Yapılışı:

1. Lambanın hemen önüne, üzerinde işaret sürgüleri olan 100-150 cm'lik bir cetvel yerleştirilir.
2. Lambanın tam karşısına gelecek şekilde bir optik ağı (kırınım ağı) tutturucu ayak ile masaya yerleştirilir. (Lamba ile optik ağı arasındaki mesafe yaklaşık $L = 1 - 1.5$ m olarak ayarlanır. Ölçüm boyunca L mesafesinin sabit tutulmasına özen gösterilir.)
3. Lambaya yüksek gerilim uygulanarak içindeki gaz atomları uyarılır ve ışık yayar.
4. Kırınım ağından bakılarak, oluşan spektrum çizgileri Şekil 4'deki emisyon spektruma benzer şekilde gözlenir. (Spektral çizgiler sadece karanlık ortamda net bir şekilde izlenebilir.)



Şekil 3. Deney düzeneği



Şekil 4. Hidrojenin emisyon ve absorpsiyon spektrumları.

- Kaynaktan birinci spektrum çizgisine kadar olan uzaklık (x) cetveldeki sürgüler yardımıyla belirlenir. Hidrojen atomu spektrumunda Kırmızı, Mavi-Yeşil ve Mor renkler için belirlenen x ve L değerleri ile Denklem (16) kullanılarak dalga boyları hesaplanır. Elde edilen deneysel veriler Tablo 1'e kaydedilir. Bu değerler H atomu için Tablo 2'de verilen teorik değerlerle karşılaştırılarak % hata hesaplamaları yapılır.
- Her bir geçişe (renge) karşı gelen dalga boyu bulunduğundan sonra Rydberg sabiti hesaplanarak Tablo 1 doldurulur. Rydberg sabiti için ortalama bir değer bulunur ve teorik değeri ile karşılaştırılır.

Tablo 1. Hidrojenin Emisyon Spektrumuna Ait Çizgilerin Dalga Boylarının Ölçülmesi

Renk	x (m)	L (m)	$\sin \theta$	$\lambda_{deneysel}$ (nm)	% Hata	$R_{deneysel}$	
						$R_d (ort.):$	% Hata:

Tablo 2. Hidrojen Balmer Serisi (Teorik Dalga Boyları)

Geçiş	Renk	Dalga boyu (nm)
$H_{\alpha}: n_{ilk} = 3 \rightarrow n_{son} = 2$	Kırmızı	656.3
$H_{\beta}: n_{ilk} = 4 \rightarrow n_{son} = 2$	Mavi-yeşil	486.1
$H_{\gamma}: n_{ilk} = 5 \rightarrow n_{son} = 2$	Mor	434.0
$H_{\delta}: n_{ilk} = 6 \rightarrow n_{son} = 2$	Mor	410.2

5. Hata Kaynakları

- Dalga boyu ölçüm hassasiyeti
 - Ortam ışığının etkisi
 - Gaz tüpünün saflığı
 - Prizma/kırınım ağı hataları
-

6. Sonuç ve yorumlar

Atom spektrumları deneyi şu sonuçları ortaya koyar:

- Atomlar yalnızca belirli enerjilerde ışık yayar.
- Enerji seviyeleri kesiklidir.
- Her element kendine özgü spektruma sahiptir.

Bu sonuçlar:

- Kuantum Teorisi'nin temelini oluşturur
 - Atom yapısının anlaşılmasında kritik rol oynar
-

7. Sorular

- Her element için neden farklı çizgi spektrumları elde edilir?
- Hidrojen için yapılan deneyde Balmer serisine ait çizgiler gözlenir, bunun nedeni nedir?

MODERN FİZİK

DENEY FÖYÜ

FRANK-HERTZ DENEYİ

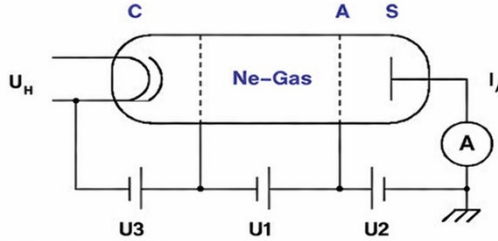
AMAÇ: ELEKTRONLARIN ENERJİ DÜZEYLERİNİN KUANTLAŞTIĞINI GÖSTERMEK



DENEY ŞEMASI

AÇIKLAMA

Elektronlar, hızlandırma gerilimi (U_1) ile enerji kazanır. Neon atomlarıyla esnek olmayan çarpışmalar sonucu belirli miktarlarda enerji kaybederler. Toplayıcı akım (I_A) ölçülerek atomun uyarılma enerjileri belirlenir.



DENEYDE ÖLÇÜLEN BÜYÜKLÜKLER

- Hızlandırma gerilimi (U_1)
- Anot akımı (I_A)

BEKLENEN GRAFİK

$I_A - U_1$ grafiğinde periyodik tepcikler elde edilir.

U_1 : Hızlandırma Gerilimi

U_2 : Toplayıcı Gerilim

U_3 : Katot Isıtma Gerilimi

I_A : Anot Akımı

FRANK-HERTZ KURALI

Elektronlar, atomlarla çarpışarak ancak belirli enerji miktarlarını kaybeder. Bu enerji, atomun uyarılma enerjisine eşittir.

$$eU = nE_u$$

e : Elektron yükü ($1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$)

U : Hızlandırma gerilimi

n : Tepenin mertebesi (1, 2, 3, ...)

E_u : Atomun uyarılma enerjisi

BİLİMİN ÖNCÜLERİ VE KATKILARI

JAMES FRANK (1882–1964)



1914

1874 yılında Gustav Hertz ile birlikte bu deneyi gerçekleştirerek elektronların atomlarla esnek olmayan çarpışmalarda belirli enerji miktarlarını sağduğunu gösterdi. 1925 Nobel Fizik Ödülü'nü kazandı.

GUSTAV HERTZ (1887–1975)



James Frank ile birlikte deneyi yaparak atomların kuantalanmış enerji düzeylerine sahip olduğunu deneysel olarak doğruladı. 1925 Nobel Fizik Ödülü'nü kazandı.

NIELS BOHR (1885–1962)



Atom modelinde kuantalanmış enerji düzeylerini öne sürdü. Frank-Hertz deneyi, Bohr'un kuramının deneysel olarak desteklenmesine katkı sağladı. 1922 Nobel Fizik Ödülü'nü kazandı.

DENEY VII: FRANK-HERTZ DENEYİ

1. Deneyin Amacı:

Franck Hertz deney tüpündeki civa atomunun uyarılma enerjisinin belirlenmesi ve Bohr atom modelindeki kesikli (kuantumlanmış) enerji seviyelerinin deneysel olarak doğrulanması.

2. Kullanılan Araç ve Gereçler:

- Franck Hertz Tüpü (içinde düşük basınçlı civa buharı bulunan, katot (elektron kaynağı), ızgara ve toplayıcı elektrottan oluşan, elektronların kontrollü biçimde hızlandırılarak atomlarla çarpıştırıldığı bir vakum tüpüdür)
- Güç kaynağı
- Bilgisayar (ölçüm cihazlarının bağlı olduğu ve deneyi çalıştırmak için gerekli programın bulunduğu bilgisayar)

3. Teorik Bilgi:

Küçük parçacık sistemlerinde gözlenen birçok önemli fiziksel olgu, klasik mekanik yaklaşımıyla açıklanamamıştır. Bu yetersizlik, kuantum mekaniğinin ortaya çıkmasına ve zamanla kabul görmesine zemin hazırlamıştır. Atomun enerji düzeylerini klasik yaklaşımla açıklamaya yönelik pek çok çalışma başarısızlıkla sonuçlanmıştır. Bu başarısızlıkların temel nedeni, klasik fiziğin enerjiyi sürekli bir büyüklük olarak kabul etmesidir. 1900'lü yılların başında Max Planck, enerjinin kesikli (kuantumlanmış) yapıda olduğunu ileri süren bir görüş ortaya koymuştur. Başlangıçta bu fikir bilim dünyasında tereddütle karşılanmış olsa da, kısa sürede önem kazanmıştır. Bunun en önemli nedeni, o döneme kadar çözülemeyen bazı temel fizik problemlerinin bu yeni yaklaşım sayesinde başarılı bir şekilde açıklanabilmesidir. Bu problemlerden biri olan Siyah Cisim Işınması, Planck'ın kuramı ile tatmin edici biçimde açıklanmıştır. Ayrıca, Planck'ın kuantum fikrinden yararlanan Albert Einstein, 1905 yılında Fotoelektrik Olayı açıklayarak kuantum teorisinin bilimsel temellerini daha da güçlendirmiştir.

Klasik fizik, atomların enerjiyi sürekli alabileceğini öngörüyordu, ancak gözlemlenen spektrum çizgileri bunu desteklemiyordu. 1913'te Niels Bohr, atomların **belirli enerji seviyelerine** sahip olduğunu ve elektronların sadece bu seviyeler arasında geçiş yapabileceğini önermiştir. 1914 yılında ise James Franck ve Gustav Hertz tarafından civa atomu üzerinde gerçekleştirilen **Franck-Hertz Deneyi**, Bohr'un teorisini ve kuantum mekaniğinin temel varsayımlarından biri olan atomların kesikli enerji seviyelerine sahip olduğunu deneysel olarak doğrulamıştır.

Bohr'un kuantum teorisine göre, bir atomun enerji seviyeleri E_n ile gösterilir ve burada n ana kuantum sayısını ifade eder ($n = 1, 2, 3, \dots$), yani enerji seviyeleri $E_1, E_2, E_3, \dots$ şeklinde **kuantumlanmıştır (kesiklidir)**. Atom, elektronlarının mümkün olan en düşük enerjili seviyede bulunduğu durumda, yani **temel durumda (taban durumu)** en karardır ve bu durum atomun **temel enerji seviyesi** olarak adlandırılır. Bu temel duruma göre enerjisi daha yüksek olan seviyeler ise **uyarılmış durumlar** olarak tanımlanır. Bohr'un postülasına göre, çekirdeğin etrafında kararlı enerji seviyelerinde bulunan elektronlar, bir üst enerji seviyesine geçebilmek için enerji almak

zorundadır; yani **uyarılmalıdır**. Atom uyarılmış (kararsız) bir durumda uzun süre kalamaz ve elektronlar genellikle çok kısa bir süre (yaklaşık 10^{-8} s) sonra tekrar temel (kararlı) enerji seviyelerine dönerler. Atom bu geri dönüş farkına eşit büyüklükte enerjiye sahip bir foton (elektromanyetik dalga paketi) salar. Bu fotonun enerjisi:

$$E_f = E_i - E_s = h\nu$$

E_i : Uyarılmış seviye enerjisi

E_s : Temel seviye enerjisi

E_f : Salınan fotonun enerjisi

ν : salınan fotonun frekansı

h : Planck sabiti

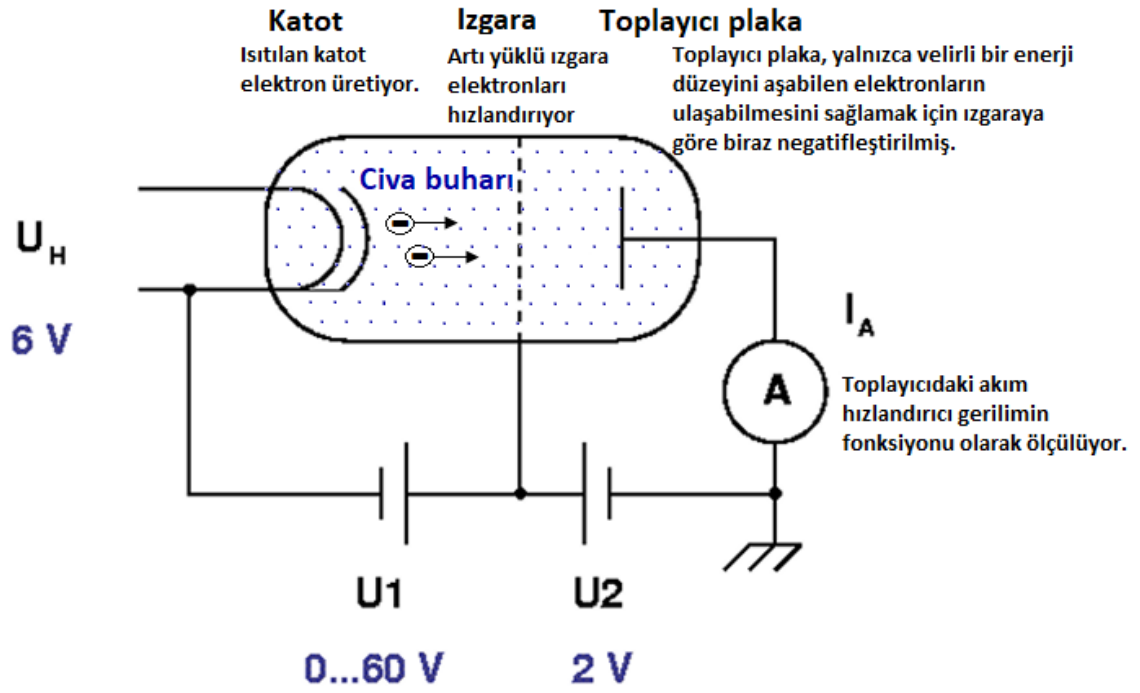
Bir atomun enerji seviyeleri iki şekilde tespit edilebilir:

- a) Uyarılan elektronların eski kararlı seviyelerine geri dönerken yaydıkları enerji ölçülerek,
- b) Elektronları kararlı seviyeden bir üst enerji seviyesine çıkarmak için gereken enerji ölçülerek.

Franck–Hertz deneyi, yukarıda belirtilen yöntemlerden **ikincisinin** mantığıyla çalışan ve atomu oluşturan elektronların enerji seviyelerini belirlemeyi sağlayan deneylerden biridir. Bir atomu uyarmak, yani temel enerji durumundaki bir elektronunu bir üst enerji seviyesine geçirmek için verilen enerjiyi çarpışma ile uyarılma ve foton absorpsiyonu ile uyarılma olmak üzere iki farklı yolla sağlamak mümkündür. Franck-Hertz deneyinde civa atomunun enerji seviyelerinin uyarılması, hızlandırılan elektronların civa gazı buharındaki atomlarla çarpıştırılması ile gerçekleştirilmektedir. J. Franck ve G. Hertz, Şekil 1'dekine benzer bir tüp kullanarak farklı element buharlarını elektronlarla bombardıman ettikleri deneylerde, atomların ancak belirli enerji değerlerine sahip elektronlarla etkileşime girdiklerinde uyarıldığını gözlemlemişlerdir; bu durum, atomların enerji seviyelerinin sürekli değil, kesikli yapıda olduğuna dair ilk doğrudan kanıtı ortaya koymuştur.

Franck-Hertz deney düzeneğinde (Şekil 1) elektronlar bir katottan kopararak ivmelendirici bir gerilim (U_1) ile hızlandırılır. Bu hızlandırıcı gerilim altında bir elektronun potansiyel enerjisi, elektronun yükü ile uygulanan gerilimin (U_1) büyüklükleri çarpımına eşittir. Serbest elektronların kazandığı potansiyel enerji:

$$E_p = eV$$



Şekil 1. Franck-Hertz tüpünün şematik gösterimi.

Katottan anoda doğru hareket eden elektronlar, sahip oldukları potansiyel enerjiyi kinetik enerjiye dönüştürürler, herhangi bir enerji kaybı olmadığı sürece anoda ulaştıklarında sahip oldukları kinetik enerji:

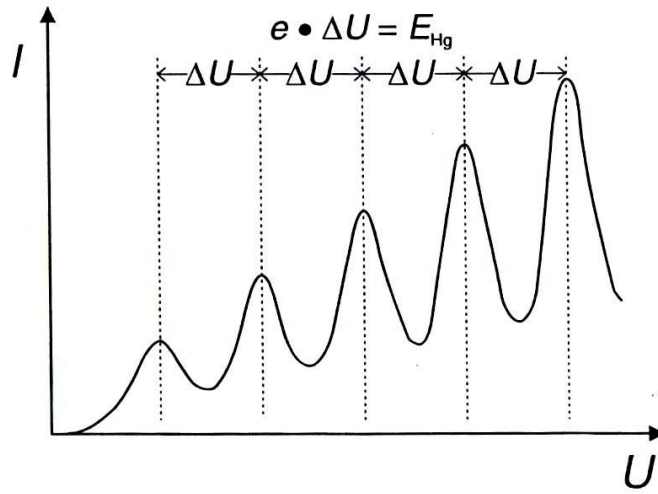
$$E_k = eV = \frac{1}{2}mv^2$$

olacaktır. Tüp içerisindeki atomlarla çarpışmaya zorlanan elektronlardan, kafes ile toplayıcı plaka arasında uygulanan ek bir potansiyel (U_2 ; durdurucu gerilim) sayesinde, yalnızca belirli bir minimum enerjiye sahip olanlar toplayıcıya ulaşabilir ve bu da ölçülen akımı (I_A) oluşturur.

İvmelendirici gerilim arttıkça elektronların kinetik enerjisi artar; bu nedenle başlangıçta daha fazla elektron toplayıcıya ulaşır ve akımın artması beklenir. Ancak deneysel sonuçlar beklenilen gibi olmaz ve elektron enerjisi belirli kritik değerlere ulaştığında, akımın aniden düştüğü gözlenir. Bunun nedeni, elektronların atomlarla yaptıkları çarpışmaların doğasında yatar. Franck-Hertz deneyinde hızlandırılan elektronların gaz atomlarıyla çarpışmaları iki şekilde gerçekleşir:

- **Elastik (esnek) çarpışma:** Düşük enerjilerde gerçekleşen çarpışmalar **elastik (esnek)** çarpışmalardır; bu durumda elektronlar yalnızca yön değiştirir, ancak enerjilerini neredeyse hiç kaybetmezler. Bunun sebebi, atomların elektronlara göre çok daha büyük kütleye sahip olmasıdır.
- **İnelastik (esnek olmayan) çarpışma:** Elektron enerjisi belirli bir kritik değere ulaştığında ise durum değişir. Bu enerji, atomun bir elektronunu temel enerji düzeyinden daha yüksek bir enerji düzeyine çıkarmak için gereken **uyarılma enerjisine** eşittir. Bu noktada elektron ile atom arasında **inelastik (esnek olmayan)** bir çarpışma gerçekleşir. Elektron, kinetik enerjisinin önemli bir kısmını (hatta tamamını) atoma aktarır ve atomu uyarır. Enerjisini

kaybeden elektron yeterli hızda ilerleyemediği için toplayıcıya ulaşamaz ve sonuç olarak ölçülen akımda ani bir düşüş meydana gelir.



Şekil 2. Franck-Hertz deneyinde elde edilen akım-gerilim (I_A - U_1) grafiği.

İvmelendirici gerilim artırılmaya devam edildiğinde elektronlar tekrar yeterli enerji kazanır ve akım yeniden yükselir. Ancak enerji bir sonraki uyarılma seviyesine karşılık gelen değere ulaştığında aynı süreç tekrar eder: elektronlar yine atomları uyarır, enerjilerini kaybeder ve akım yeniden düşer. Bu durum, artan gerilimle birlikte akımda periyodik düşüşler şeklinde gözlenir. I_A akımı ile U_1 gerilimi arasındaki ilişki Şekil 2’de gösterilen grafikteki gibidir. Grafikteki minimum noktalar, elektronların civa atomlarıyla inelastik çarpıştığı gerilim değerlerine karşılık gelir ve ardışık minimumlar arasındaki fark, $\Delta U \approx 4.9 \text{ V}$, civa atomunun ilk uyarılma enerjisinin bir ölçüsüdür. Uyarılan atom, aldığı enerjiyi bir foton yayarak serbest bırakır; bu fotonun dalga boyu;

$$\lambda = \frac{hc}{E} \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} E = 4.9 \text{ eV} \\ h = 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV} \\ c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s} \end{array} \right\} \longrightarrow \lambda \approx 253 \text{ nm}$$

olarak hesaplanır ve bu değer UV bölgesine karşılık gelmektedir. Bu sebeple gözümüzle göremeyiz.

Sonuç olarak Franck–Hertz deneyi, atomların enerjiyi sürekli değil, yalnızca belirli değerlerde alıp verebildiğini açıkça ortaya koyar. Gözlenen bu akım düşüşleri, atomların belirli enerji seviyelerine sahip olduğunun ve elektronların bu seviyeler arasında geçiş yaparken belirli miktarlarda enerji alışverişinde bulunduğu doğrudan kanıtıdır. Bu yönüyle deney, modern atom fiziğinin ve kuantum mekaniğinin temel taşlarından biri olarak kabul edilir.

4. Deneyin Yapılışı

1. Deney seti Şekil 3’de görüldüğü gibi kurulur. Franck-Hertz Hg tüpü ile kontrol paneli arasındaki bağlantı yapıldıktan sonra kontrol paneli üzerindeki düğme kullanarak fırın açılır.



Şekil 3. Franck-Hertz Deney Düzeneği

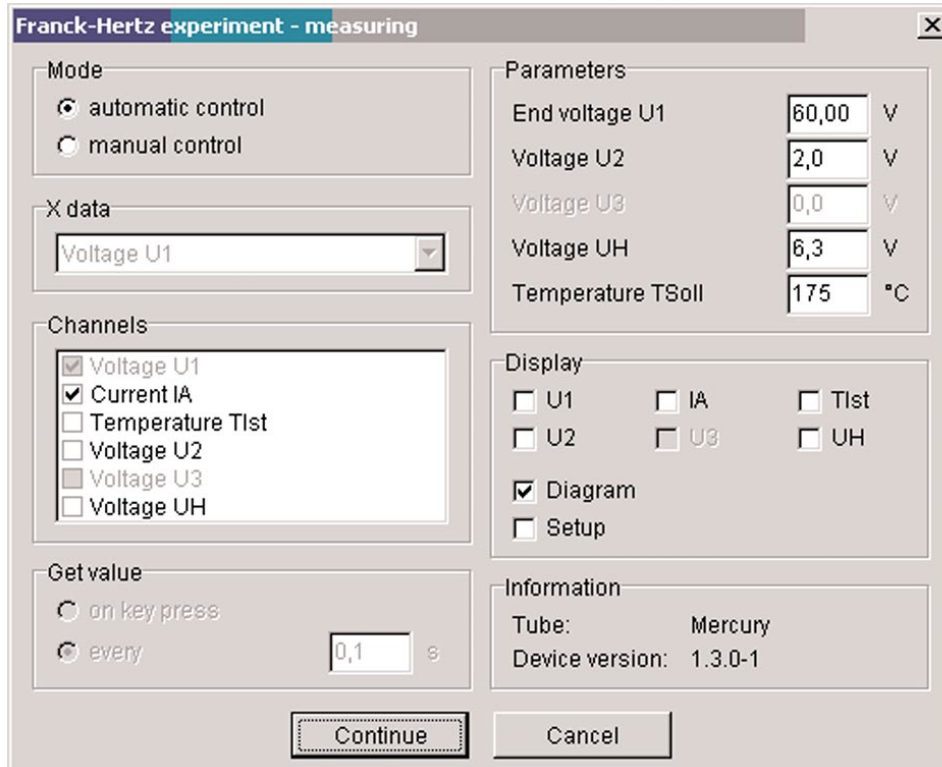
2. Tüm deney sisteme bağlı olan bilgisayar üzerinden kontrol edilmektedir. Bunun için öncelikli olarak kontrol paneli PC moduna getirilir.
3. Bilgisayardan “*Franck-Hertz Experiment*” programı çalıştırılır. “*Measurement*” (Ölçüm) sekmesinden açılan ekranda Şekil 4’teki gibi değerler girilir.

$U_1 = 60 \text{ V}$ (Hızlandırıcı gerilim)

$U_2 = 2 \text{ V}$ (Durdurucu gerilim)

$U_H = 6.3 \text{ V}$

$T = 175 \text{ C}^\circ$ (Sıcaklık)



Şekil 4. Frank-Hertz Experiment programı arayüzü.

4. "Continue" (Devam) seçilir ve sıcaklık 175 C°'ye ulaştığında ölçüm başlar.
5. Ölçüm tamamlandığında bilgisayardan I_A - U_1 eğrisi elde edilir (Şekil 2'deki gibi).
6. I_A - U_1 grafiğini kullanarak, I_A akımının U_1 artarken minimum değerler alacağını göreceksiniz. Elde edilen I_A - U_1 grafiğinde, akımın minimum (veya maksimum) olduğu noktalara karşılık gelen gerilim değerleri belirlenir. Ardışık minimumlar (veya maksimumlar) arasındaki gerilim farkı ΔU hesaplanır. Bu fark, atomun uyarılma potansiyeline karşılık gelir.
(**Not:** Teorik olarak minimumlar ve maksimumlar arasındaki farklar yaklaşık olarak eşittir. Ancak pratikte maksimum noktalar daha belirgin olduğundan, ölçümlerde maksimumlar arasındaki farkın alınması tercih edilir. Ayrıca, ilk maksimum ve minimum noktalar, temas potansiyeli ve başlangıç enerji dağılımı nedeniyle kaymış olduğundan değerlendirmeye alınmaz.)
7. Ardışık noktalar arasındaki ortalama ΔU değeri ile uyarılma enerjisi

$$E = e \cdot \Delta U$$

bağıntısıyla hesaplanır. Bu enerji kullanılarak yayılan fotonun dalga boyu ise

$$E = \frac{hc}{\lambda} \longrightarrow \lambda = \frac{hc}{E}$$

bağıntısından belirlenir.

Uyarılar!!

- U_H voltajını yukarda verilen değerden ($U_H=6.3$ V) çok fazla yükseltmeyiniz. Franck-Hertz Hg tüpüne zarar verebilirsiniz.
 - İyi bir deney sonucu elde etmek için fırın sıcaklığını 160-180 C° arasında tutunuz.
-

SORULAR

1. Frank-Hertz tüpü deneyinde neler olduğunu açıklayınız.
2. Uyarılma enerjisi nedir?
3. Klasik ve kuantum fiziğinin enerji ile ilgili kuramları arasındaki fark nedir?
4. Eğer Frank-Hertz tüpünü ısıtmamış olsaydık I-V grafiği nasıl olurdu? Açıklayınız
5. Elde ettiğiniz grafikte tepeler arası mesafelerin neden birbirine eşit olduğunu açıklayınız.
6. Deneyde civa yerine başka bir element kullanılsaydı, deney sonucunda ne gibi değişiklikler beklerdiniz.

EK-A: DENEY RAPORU ÖRNEĞİ

KAPAK SAYFASI

DENEY NO :.....

DENEYİN ADI :.....

DENEY TARİHİ :.....

ÖĞRENCİNİN

ADI SOYADI :.....

NUMARASI :.....

1. DENEYİN AMACI:

Bu başlık altına kısa, sade ve net bir biçimde deneyin amacı yazılır.

2. DENEYİN ANLAM VE ÖNEMİ:

Bu bölümde deneyin anlam ve önemi üzerinde durulur, Fizikteki kullanım amaçlarından, faydalarından ve diğer gerekli temel bilgilerden bahsedilir. Bu bölüme yazılanlar konunun temelini teşkil etmeli, fazla, gereksiz ve tekrar bilgilerden kaçınılmalı, sade ve net bir şekilde yazılmalıdır. Bu bölüme deney hakkında bilinmesi gereken temel bilgiler de yazılabilir.

3. KULLANILAN ARAÇ VE GEREÇLER

Deneyde kullanılan aletlerin isimleri yazılır.

Deney düzeneği şeması çizilir.

4. DENEYİN YAPILIŞI:

Bu bölümde deneyin yapılışı anlatılır. Yapılan her bir deneyin bir standart yapılış şekli ile genel bir anlatım ve yazım şekli vardır. Bunlar deney esnasında deney sorumluları tarafından öğrenciye anlatılmaktadır. Gerekirse literatürden araştırma yapılabilir. Deney esnasında anlatılan genel deney yapılışı bu bölüme yazılır.

5. HESAPLAMALAR:

Bu bölüme gerekirse deney esnasında yapılan, yapılmasına ihtiyaç duyulan hesaplamalar ve grafikler verilerek açıklamalarda bulunulur. Grafiklerden elde edilecek veriler aktarılır. Ayrıca deney sonundaki sorular cevaplanmalıdır.

6. DEĞERLENDİRME VE YORUM:

Bu bölüm öğrencinin yapmış olduğu deneyi anlama ve özümsemesini ölçtüğü için oldukça önemlidir. Deney sonucunda elde edilen verilerin değerlendirilmesi de bu bölümde yapılır. Öğrenci yapılan deneyi ve çıkan sonuçları kendi gözüyle değerlendirir. Sebep-sonuç açıklamasında bulunur. Deney yapılırken kafalarda oluşan soruların cevapları aranır ve yazılır.