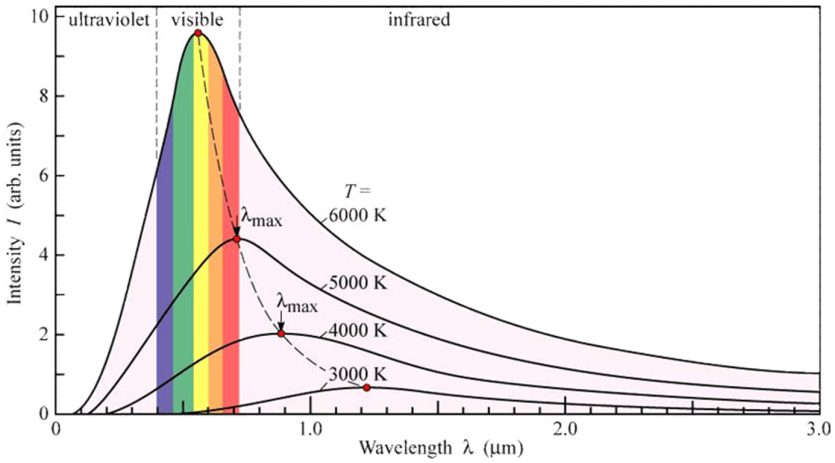
تابش جسم سیاه

تابشی که از یک جسم به واسطه دمای آن گسیل می‌شود را تابش گرمایی می‌نامند. کلیه اجسام چنین تابشی را به محیط اطراف خود گسیل و یا از آن جذب می‌کنند. در حالت تعادل گرمایی میزان جذب و تابش با هم برابر است. معمولاً طیف تابشی اجسام، طیفی پیوسته است که بستگی به دما، نوع و شکل ماده دارد ولی تشعشع از یک حفره که اصطلاحاً *جسم سیاه* نامیده می‌شود، مستقل از نوع و شکل ماده بوده و فقط بستگی به دما دارد. در این آزمایش بستگی شدت تابش جسم سیاه به دما و فاصله جسم تا آشکارساز بررسی می‌شود.

مدل و نظریه

طیف تابش جسم سیاه به وسیله کمیت $R(T,\lambda)$، مشخص می‌شود. شکل ۱ تابع توزیع تابش جسم سیاه در درجه حرارت‌های مختلف را نشان می‌دهد. $R(T,\lambda)d\lambda$ برابر با انرژی تابشی در واحد زمان از واحد سطح در دمای T است که طول موج تابش در بازه λ تا $\lambda + d\lambda$ هست. انتگرال $R(T)$ روی همه طول موجها برابر با توان تابشی از واحد سطح جسم سیاه در دمای T است.

$$R(T) = \int_0^{+\infty} R(T,\lambda)d\lambda \qquad (۱)$$



شکل ۱: توزیع تابش جسم سیاه در دماهای مختلف. (http://nasaphysics.cet.edu/blackbody-radiation.html)

مطابق شکل ۱ با افزایش دما، $R(T)$ افزایش می‌یابد. رابطه تجربی بین توان تابشی از واحد سطح جسم سیاه با دمای آن قانون استفان-بولتزمن نامیده می‌شود.

$$R(T) = \sigma T^4 \qquad (۲)$$

T دما بر حسب کلوین و σ ثابت بولتزمن، برابر است با $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{\mathrm{W}}{m^2 - K^4}$. همچنین با افزایش دما ماکزیمم طیف به طول موجهای کوتاهتر (بسامدهای بیشتر) جابجا می‌شود. این جابجایی از رابطه تجربی زیر، قانون جابجایی وین، پیروی می‌کند.

$$\lambda_{\max}.T = 2.898 \times 10^{-3}\mathrm{m\text{-}K} \qquad (۳)$$

مطالعه تابش جسم سیاه اهمیت زیادی در فیزیک دارد. در فیزیک کلاسیک انرژی تابشی در واحد حجم در بازه λ و $\lambda + d\lambda$ از رابطه ریلی-جینز به دست می‌آید:

$$\rho(T,\lambda)d\lambda = \frac{8\pi}{\lambda^4} kT d\lambda \qquad (۴)$$

که k ثابت بولتزمن است این رابطه با نتایج تجربی سازگار نیست. برای رفع این اشکال، پلانک فرض کرد که انرژی فقط می‌تواند مقادیر گسسته و معینی را اختیار کند، یعنی $E = 0, \Delta E, 2\Delta E, \ldots$ که $\Delta E = h\nu$ و h ثابت پلانک است.

با استفاده از فرض بالا رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\rho(T,\lambda)d\lambda = \frac{8\pi}{\lambda^4} \frac{hc}{\lambda\left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1\right)} d\lambda \qquad (۵)$$

که c سرعت نور است و این رابطه با نتایج تجربی سازگار است. با استفاده از رابطه بالا چگالی انرژی برای همه طول‌موجها به دست می‌آید:

$$U(T) = \int_0^{+\infty} \rho(T,\lambda)d\lambda \qquad (۶)$$

همچنین رابطه بین چگالی انرژی برای همه طول‌موجها و توان تابشی از واحد سطح برابر است با:

$$U(T) = \frac{4}{c} R(T) \qquad (۷)$$

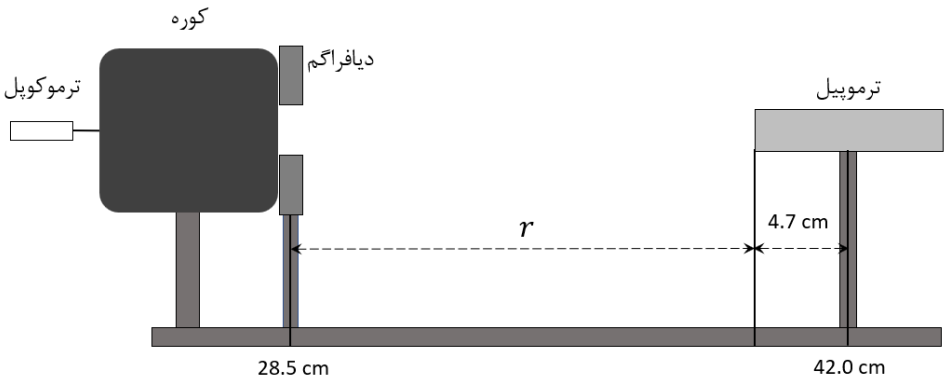
وسایل آزمایش

کوره الکتریکی، ترانسفورماتور، دیافراگم، ترمومتر، ترموپیل

کوره الکتریکی، دیافراگم و ترموپیل مطابق شکل۲ روی ریل مدرج قرار می‌گیرند.

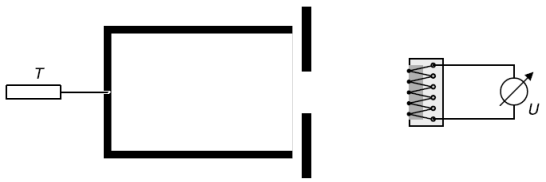
کوره الکتریکی: برای تولید تابش جسم سیاه از کوره الکتریکی که حاوی استوانه گرافیتی است استفاده می‌شود. دمای کوره به وسیله ترمومتر (ترموکوپل نوع K نیکل-کرم) اندازه‌گیری می‌شود و با یک

ترانسفورماتور می‌توان دمای آن را تغییر داد. قسمتی از تشعشعات دهانه کوره پس از عبور از دیافراگم وارد ترموپیل می‌شود.



شکل ۲: ترموپیل، دیافراگم و کوره الکتریکی

ترموپیل: ترموپیل تابش گرمایی ساطع شده از جسم را به ولتاژ الکتریکی تبدیل می‌کند. فضای داخل ترموپیل مخروطی شکل هست و جنس آن فلز شفاف است که نور مادون قرمز را بهتر هدایت کند. در انتهای فضای مخروطی شکل، حسگر حرارتی که از ترموکوپل‌های متصل به هم تشکیل شده قرار دارد (شکل۳).



شکل ۳: ترموپیل، دیافراگم و کوره الکتریکی

حساسیت ترموپیل آزمایشگاه در محدوده طول موج ۱۵ μm -۱۵۰ nm برابر با ۲۸/۸ $\frac{\mu V}{W/m^2}$ است. ولتاژ الکتریکی حاصل از ترموپیل به وسیله میکروولتمتر اندازه‌گیری می‌شود. برای آشنایی بیشتر با میکروولتمتر و نحوه صفر کردن آن، به بخش وسایل آزمایش اثر هال مراجعه کنید. شدت انرژی تابشی دریافت شده به وسیله ترموپیل آزمایشگاه برابر است با $I = \frac{V\,(\mu V)}{28.8}$.

انرژی گسیل شده در واحد زمان از واحد سطح جسم سیاه در دمای T، R_T، از رابطه زیر به دست می‌آید:

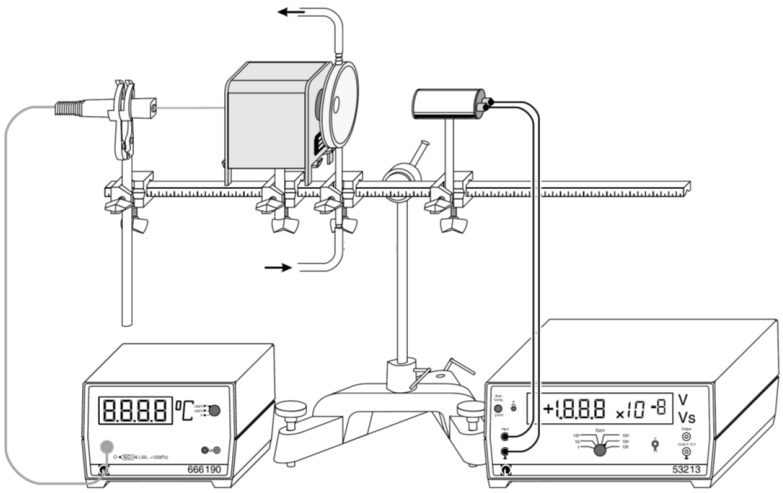
$$R(T) = \sigma(T^4 - T_0^4) = \pi r^2 \times \frac{1}{\pi(d/2)^2} \times I \qquad (۷)$$

که T دمای کوره، T_0 دمای اتاق، r فاصله میان دهانه کوره و دهانه ترموپیل است (فاصله میان پایه نگهدارنده ترموپیل و دهانه ترموپیل ۴/۷ سانتی‌متر است)، d قطر دیافراگم و I شدت انرژی تابشی دریافت شده به وسیله ترموپیل است.

روش آزمایش

نحوه اتصال وسایل آزمایش مطابق شکل ۴ است. ابتدا ترمومتر را روشن کرده و آن را در محدوده بیشتر از $200\ ^\circ\mathrm{C}$ قرار دهید. قبل از شروع آزمایش و روشن کردن ترانسفورماتور، دمای محیط را یادداشت کنید. پایه نگهدارنده دیافراگم را در مکان $x_1 = 28.5\mathrm{cm}$ قرار دهید. ترموپیل را در $x_2 = 42\mathrm{cm}$ قرار دهید (دقت کنید که دهانه ترموپیل روبروی دیافراگم باشد و پایه آن در این مکان قرار گیرد). سپس جریان آب را برقرار کنید. ترانسفورماتور را روشن کرده و روی 170 ولت قرار دهید. هرگز برای افزایش سریع‌تر دما ترانسفورماتور را در بالاتر از این مقدار قرار ندهید. میکرو ولتمتر را صفر کنید و در محدوده مناسب برای مثال 10^{-4} ولت قرار دهید و در صورت نیاز محدوده را عوض کنید.

- ✓ حتماً پیش از اندازه‌گیری صفر میکروولتمتر را تنظیم کنید.
- ✓ پس از صفر کردن میکرو ولتمتر، در صورت عدم تغییر محدوده، تا پایان آزمایش به دگمه آفست دست نزنید.
- ✓ حتماً در پوش ترموپیل را بردارید و پس از اتمام آزمایش در جای خود قرار دهید.



شکل ۴: طرز اتصال وسایل آزمایش

تابش جسم سیاه در دماهای مختلف

برای دماهای درج شده در جدول ۱ ولتاژ ترموپیل را اندازه‌گیری کنید. شدت تابش دریافت شده به وسیله ترموپیل را محاسبه کرده و جدول ۱ را کامل کنید.

بررسی بستگی شدت تابش جسم سیاه به فاصله جسم تا آشکارساز

برای دمای ثابت، با تغییر فاصله ترموپیل نسبت به دیافراگم ولتاژ ترموپیل را اندازه‌گیری کنید. شدت تابش دریافت شده به وسیله ترموپیل را محاسبه کرده و جدول۲ را کامل کنید.

جدول ۱: میزان تشعشع جسم سیاه با افزایش دمای کوره

دمای اتاق: $T_o =$ ، فاصله دهانه کوره تا دهانه ترموپیل: $r = 8.8$ cm، قطر دیافراگم: $d = 2$ cm					
دمای کوره ℃	دمای کوره K	ولتاژ ترموپیل μV	شدت دریافت شده، I W/m^2	توان چهارم دما K^4	شدت تابشی، $R(T)$ W/m^2
200					
210					
220					
230					
240					
250					
260					
270					
280					
290					
300					
310					
320					
330					
340					

جدول ۲: مقادیر I را برای فواصل مختلف

دمای کوره $T =$			محل دیافراگم:	$x_1 =$
محل ترموپیل، x_2 cm	$r = x_2 - x_1 + 4.7$ cm	r^{-2} m^{-2}	ولتاژ ترموپیل μV	شدت دریافت شده، I W/m^2
42				
45				
48				
51				
54				
57				
60				
63				
66				
69				

پرسش‌ها

سه پرسش اول را در آزمایشگاه پاسخ دهید.

۱- توضیح دهید که چگونه میکروولتمتر را صفر کرده‌اید. در مورد دقت اندازه‌گیری این دستگاه توضیح دهید.

۲- چرا از جریان آب برای خنک کردن دهانه کوره استفاده شد؟

۳- با استفاده از جدول۱، منحنی نمایش تغییرات $R(T)$ بر حسب T^4 را رسم کرده و ثابت استفان بولتزمن را به دست آورید و با مقدار زیر مقایسه کنید (محاسبه خطای نسبی).

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\text{-}K^4}}$$

۴- دقت شیب خط را برای خط رسم شده در سوال ۳ به دست آورید و بازه تغییرات σ را گزارش دهید. (یعنی $\sigma \pm \Delta\sigma$)

۵- رابطه ۶ و ۷ را به دست آورید.

۶- منحنی نمایش تغییرات I بر حسب r^{-2} را رسم کرده و ثابت استفان بولتزمن را به دست آورید.

۷- توضیح دهید چرا منحنی سوال ۶ از مبدا نمی‌گذرد.

۸- λ_{max} برای بدن انسان چقدر است؟ اگر λ_{max} برای خورشید ۵۱۰۰ آنگستروم و ستاره شمالی ۳۵۰۰ آنگستروم باشد، دمای هر کدام چقدر است؟

۹- چگونه می‌توان تصویر برداری حرارتی انجام داد؟