

Топлинно излъчване. Абсолютно черно тяло. Закони на Кирхоф, Стефан – Болцман и Вин. Формула на Планк

Топлинно излъчване. Абсолютно черно тяло. Закон на Кирхоф

Всички тела, нагрети до висока температура, излъчват видима светлина. Например при нагриване на парче желязо до температура 700°C то започва да излъчва червена светлина. С повишаване на температурата цветът на излъчването се променя. При 1000°C цветът става жълт, а при 1500°C – виолетово-бял. Очевидно с нарастване на температурата максимумът на излъчването се измества към по-малките дължини на вълните. При по-ниски температури телата също излъчват електромагнитни вълни, но те не се възприемат от човешкото око, тъй като са извън видимия диапазон ($400 < \lambda < 750 \text{ nm}$). Излъчването на електромагнитни вълни от телата, нагрети до някаква температура, по-висока от абсолютната нула, се нарича топлинно (температурно) излъчване. Опитът показва, че едновременно с излъчването телата също и поглъщат попадналите върху тях електромагнитни вълни. Ако температурата на едно тяло е по-висока от тази на околната среда, то главно излъчва, и обратно – ако температурата му е по-ниска – поглъща. Топлинното излъчване е най-разпространеното в природата. То е универсално явление и се дължи на топлинното движение на атомите и молекулите във веществата. Телата излъчват електромагнитни вълни вследствие преобразуване енергията на хаотичното топлинно движение на частиците им в енергия на излъчване (лъчиста енергия).

Като количествена характеристика на топлинното излъчване се въвежда физичната величина интегрална излъчвателна (емисионна) способност. Тя се определя числено от енергията на топлинното излъчване, която се излъчва от единица повърхност на дадено тяло, нагрят до някаква термодинамична температура T , за единица време. Означава се с E_T или W_e :

$$E_T \equiv W_e = \frac{E}{St}.$$

Мерната единица за излъчвателна способност е W/m^2 . В процеса на излъчване тялото непрекъснато губи част от енергията си, поради което температурата му се понижава. За да се поддържа процесът на излъчване при постоянна температура, тялото трябва и да поглъща енергия. Такъв процес на топлинно излъчване, при който източникът на електромагнитно лъчение се намира в състояние на термодинамично равновесие ($T = \text{const}$), се нарича равновесно топлинно излъчване. Всяко тяло при термодинамично равновесие излъчва толкова електромагнитна енергия, колкото и поглъща.

По-често, когато се говори за излъчвателна способност на дадено тяло, се има предвид т.нар. спектрална излъчвателна способност $E_{\lambda,T}$ – енергията, която се излъчва от единица повърхност на дадено тяло за единица време при температура T , за определена дължина на вълната λ (на практика за много малък интервал от дължини на вълните $d\lambda$):

$$E_{\lambda,T} = \frac{dW_e}{d\lambda}.$$

Както казахме, всички тела, освен да излъчват, притежават способност и да поглъщат попадналото върху тях електромагнитно лъчение. Това тяхно свойство се характеризира от друга физична величина, наречена спектрална поглъщателна (абсорбционна) способност. Тя се определя от отношението на погълнатата dW_a към падналата dW_t електромагнитна енергия за единица време върху единица повърхност от тялото при дадена температура T и определена дължина на вълната λ . Означава се с $A_{\lambda,T}$:

$$A_{\lambda,T} = \frac{dW_a}{dW_t}.$$

Очевидно е, че поглъщателната способност е безразмерна величина и показва каква част от падналото електромагнитно лъчение с определена дължина на вълната върху единична повърхност от дадено тяло се поглъща от него за единица време. Освен от температурата и дължината на вълната двете величини $E_{\lambda,T}$ и $A_{\lambda,T}$ зависят още от материала и вида на повърхността на тялото. По-нататък, когато говорим за поглъщателна и излъчвателна способност на тяло, ще имаме предвид спектралните излъчвателна и поглъщателна способност.

Първата количествена зависимост между поглъщателната и излъчвателната способност на дадено непрозрачно тяло е установена от немския физик Г. Кирхоф. Законът на Кирхоф гласи, че отношението между излъчвателната и поглъщателната способност на дадено тяло е равно на една универсална функция на дължината на вълната и температурата на тялото, която е еднаква за всички тела и не зависи от тяхното естество:

$$(1) \frac{E_{\lambda,T}}{A_{\lambda,T}} = f(\lambda, T)$$

От горното равенство следва, че колкото по-силно поглъща едно тяло даден вид лъчение с определена дължина на вълната λ , толкова по-силно ще излъчва то същия вид лъчение (при една и съща температура). Законът на Кирхоф е в съгласие с условието за температурно равновесие на телата. За да се поддържа температурата на едно тяло постоянна, то трябва да излъчва толкова енергия, колкото и поглъща. В противен случай неговата температура ще се повиши или понижи и равновесието му ще бъде нарушено. Най-подходящи за източници на топлинно излъчване са **телата, които изцяло поглъщат падналите върху тях електромагнитни вълни независимо от λ и T . Те се характеризират с поглъщателна способност $A_{\lambda,T}=1$ и се наричат абсолютно черни тела.** Следователно (1) тяхната излъчвателна способност е точно тази универсална функция $f(\lambda, T)$. Такова тяло също е физичен модел, както материална точка или идеален газ, тъй като такива тела в природата не съществуват, но има много обекти (напр. звездите), които се доближават до този модел. Всички тела, които могат да се приемат за абсолютно черни, поглъщат еднакъв спектър от дължини на вълните, зависещ само от температурата, но не и от състава и повърхността им. Абсолютно черните тела поглъщат електромагнитните вълни с всички възможни дължини, които попадат върху тях (и, в съответствие със закона на Кирхоф, също така излъчват в целия електромагнитен спектър).

От закона на Кирхоф следва още, че ако едно тяло не поглъща електромагнитни вълни с определена дължина λ при дадена температура ($A_{\lambda,T}=0$), то няма и да ги излъчва ($E_{\lambda,T}=0$). Законът на Кирхоф позволява при известна за дадено тяло поглъщателна способност $A_{\lambda,T}$ да се изрази неговата излъчвателна способност чрез тази на абсолютно черното тяло $f(\lambda, T)$. Ето защо се оказало много важно да се намери тази универсална функция.

Закони на Стефан – Болцман и Вин. Формула на Планк

Решаването на тази задача се оказало не толкова лесно и било проведено на няколко етапа. Първоначално на основата на експерименти, направени от австрийския физик Й. Стефан, е определена интегралната излъчвателната способност E_T на абсолютно черно тяло като функция от температурата му. По-късно от австрийския физик Л. Болцман е изведен теоретично израз, известен във физиката като закон на Стефан–Болцман:

$$(2) E_T = \sigma T^4,$$

т.е. **интегралната излъчвателна способност на абсолютно черно тяло е пропорционална на четвъртата степен на термодинамичната (абсолютната) температура на тялото**, където величината $\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$ се нарича константа на Стефан–Болцман. Законът на Стефан–Болцман показва извънредно бързо нарастване на излъчвателната способност на телата с температурата.

Следващият етап в определянето на универсалната функция бил извършен от немския физик В. Вин, който установил, че **дължината на вълната, съответстваща на максималната излъчвателна способност на абсолютно черно тяло е обратно пропорционална на термодинамичната (абсолютната) му температура:**

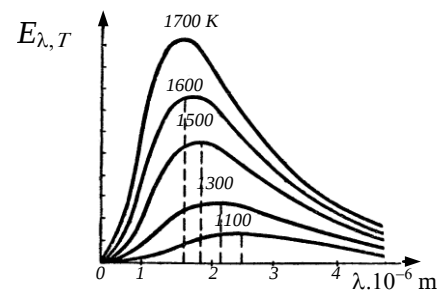
$$(3) \lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

където b е постоянна величина, наречена константа на Вин; $b=2.9 \times 10^{-3} \text{ m.K}$. Законът на Вин обяснява защо при понижаване температурата на нагретите тела в спектъра на излъчването им се появяват дългите вълни. Например при топене цветът на металите е почти бял, а при изстиването им преминава постепенно в червен.

На фиг. 1 са показани кривите на спектралната излъчвателна способност на абсолютно черно тяло при няколко различни температури. Те са илюстрация на законите на Стефан–Болцман (2) и Вин (3). Законът на Стефан–Болцман ни дава интегралната излъчвателна способност т.е. това е площта под

кривата на $E_{\lambda,T}$ ($E_T = \int_0^{\infty} E_{\lambda,T} d\lambda$) – вижда се, че с повишаване на температурата тази площ расте бързо. От

тях също се вижда, че при повишаване на температурата максимумът на излъчването се отмества към по-малките дължини на вълните. От гледна точка на класическата физика видът на тези криви не може



фиг. 1

да бъде обяснен (наляво от максимума, както и самото съществуване на максимум на излъчването при определена дължина на вълната). Абсолютно черното тяло представлява идеалният излъчвател и се състои от огромен брой атоми, всеки от които излъчва електромагнитни вълни. Тъй като атомите излъчват вълни с различна дължина, сумарното електромагнитно излъчване от цялото тяло е с всевъзможни дължини на вълните. С това може да се обясни непрекъснатият спектър на електромагнитното излъчване, но не и неговото отместване с нарастване на температурата, както и формата на кривите при малки дължини на вълните. За тяхното обяснение М. Планк предложил формула, известна като формула на Планк, определяща функционалната зависимост на излъчвателната способност от λ и T :

$$(4) E_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)},$$

където c е скоростта на светлината, h – константата на Планк, λ – дължината на вълната на излъчването, k – константата на Болцман, а T – термодинамичната температура на излъчващото абсолютно черно тяло. Възникналите трудности в теорията на топлинното излъчване на абсолютно черното тяло били свързани с едно от основните положения в класическата физика, според което енергията на всяко тяло (или система) може да се изменя непрекъснато и да заема всякакви стойности. За да обясни формула (4), Планк през 1900 г. изказва хипотезата, че излъчването на електромагнитно лъчение от атомите и молекулите на абсолютно черното тяло става не непрекъснато, а на определени порции, наречени кванти. Всеки излъчващ атом или молекула може да съществува в енергетични състояния, чиято енергия е кратна на енергията на един квант:

$$E_n = nhf,$$

където n е цяло число ($n=1, 2, 3, \dots$), а f – честотата на вълната на лъчението. Енергията на всеки отделен квант е правопропорционална на честотата и обратнопропорционална на дължината на вълната:

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda}$$

От формулата на Планк (4) като частни случаи се получават законите на Стефан–Болцман (2) и Вин (3). По-нататъшното развитие на хипотезата на Планк довежда до създаването на квантовата теория за светлината.