

**ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE FAKULTA RIADENIA
A INFORMATIKY**

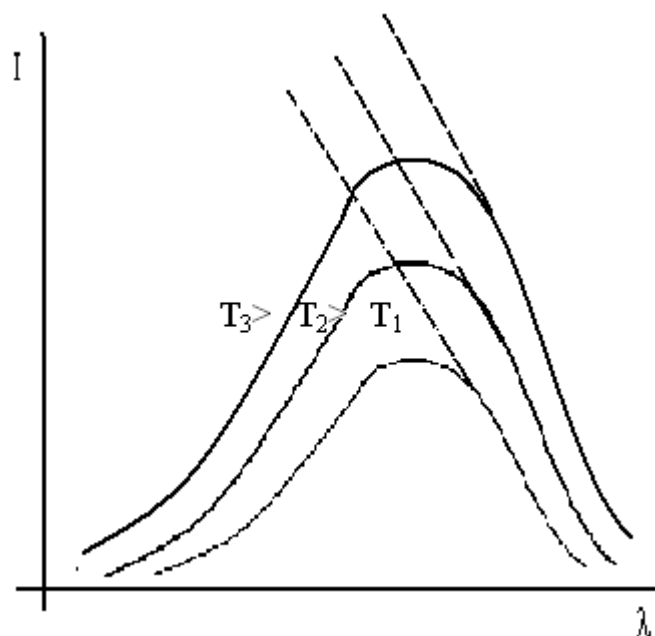
SEMSTRÁLNAPRÁCA Z FYZIKY

ŽIARENIE ABSOLÚTNE ČIERNEHO TELESA

Eduard Mroč
5zp012

Fotóny sprevádzajú náš vesmír od prvých zlomkovsekundy po veľkom tresku. Iróniou je, že človek na to prišiel až na prelome 19. a 20 storočia. Pomohlo mu k tomu tzv. **absolútne čierne teleso**. Fyzici takto nazývajú telesá, ktoré všetko na ne dopadajúce žiarenie absorbujú a samy pritom generujú žiarenie, ktoré vysielajú do okolia. Takéto žiarenie sa nazýva žiarenie absolútne čierneho telesa a pri skúmaní jeho skladby sa zrodil nový pojem, ktorý neskôr dostal názov **fotón**.

Absorbovaním energie sa zvyšuje teplota telesa, jeho atómy a molekuly (ako mikrofyzikálne oscilátory) zvyšujú svoju strednú energiu (kT), čiže začnú intenzívnejšie kmitať. Keď nájdeme hustotu energie takýchto harmonických oscilátorov a vynásobíme ju rýchlosťou šírenia elektromagnetických vln (c), dostaneme intenzitu vyžarovania (I). Keď sa takýto postup skutočne použil, získali sa krivky závislosti intenzity vyžarovania od vlnovej dĺžky znázornené na obrázku čiarkovane. Meranie však dávalo celkom odlišné závislosti. Sú znázornené súvislými čiarami. Z porovnania vyplýva, že v teórii sa kdesi urobila principiálna chyba. Objavil ju roku 1900 M. Planck a možno povedať, nechtiac. Za svoj objav sa fyzikom takmer ospravedlňoval a napokon už takmer celkom osamotený mu ani neveril. Ten objav bol totiž natoľko podivný a neuveriteľný, že spôsobil vo fyzike takmer revolúciu.



Planckov objav mal zo začiatku povahu celkom formálnej matematickej úpravy. Miesto strednej energie (kT) pre jednotlivé oscilátory si súlad teórie s meraním si jednoznačne vyžadoval podstatne zložitejšie vyjadrenie.

$$E_s = \frac{hf}{e^{hf/kT} - 1} \quad (1)$$

kde h bola určitá konštanta. Dnes sa na počesť M. Plancka nazýva **Planckova konštanta**, má hodnotu $h=6,6 \cdot 10^{-34}$ J.s a spolu s rýchlosťou svetla vo vákuu (c) a gravitačnou konštantou (γ) tvoria tri fundamentálne konštanty nášho sveta. Pri pokuse o objasnenie pôvodu vzťahu (1), dôležitú úlohu zohral poznatok, že tento vzorec veľmi pripomína vzťah pre súčet nekonečného geometrického radu známy z matematiky. Pripomeňme si, že geometrický rad je postupnosť členov, z ktorých každý nasledujúci sa získa z predchádzajúceho vynásobením nejakou konštantou. Jednotlivé členy predstavujú diskkrétne hodnoty. Podľa toho sa stredná energia harmonických oscilátorov musí počítať tak, že spočítajú len určité diskkrétne hodnoty ich

energií, a nie všetky spojite sa meniace hodnoty. Vzorec vyžadoval, aby sa tieto diskkrétne hodnoty energií harmonických oscilátorov dali vyjadriť vzťahom

$$E_n = nhf, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

Tento záver bol z hľadiska klasickej fyziky absolútne nepochopiteľný, a preto mu Planck do svojej smrti odmietol uveriť. Život však ukázal, že inej alternatívy nebolo. Bolo nutné sa s tým zmieriť a hľadať hlbšie vysvetlenie záhadnej kvantovanosti energie v oblasti mikrofyzikálneho pohybu.

Vzorec (2) ponúka pomerne jednoduchú interpretáciu. Ak sú možné len energie vyjadrené v násobkoch (hf), potom toto množstvo má úlohu akéhosi elementárneho balíčka elektromagnetickej energie. Jeho prijatím alebo emisiou sa energie harmonických oscilátorov skutočne mení po „schodíkoch“, ktoré pripúšťa vzťah (2). Fyzici, aj keď boli nútení túto interpretáciu akceptovať, nebrali to tragicky, pretože sa domnievali, že po opustení svojho zdroja sa jednotlivé „balíčky“ energie zlejú do spojitého prúdu, v ktorom po diskkrétosti nezostane ani stopa. Ukázalo sa však, že v tom sa principiálne mýlili. Nikto nie menší ako sám A. Einstein, nezvratne dokázal, že diskkrétosť v distribúcii energie elektromagnetického žiarenia zostáva zachovaná aj pri transporte. Nezostáva teda iné, len toto elementárne kvantum energie nejako pomenovať a považovať ho za elementárnu časticu nášho sveta. Tak sa „narodil“ **fotón**.

Teraz si uvedieme tvar Planckovo zákona, ktorý dokonale opisuje krivky na obrázku 1. Napíšeme ho pre hustotu energie harmonických oscilátorov a ako premennú zvolíme f .

Planckov zákon žiarenia absolútne čierneho telesa

Na frekvenčný interval δf pripadá hustota energie harmonických oscilátorov vyjadrená vzťahom:

$$\delta E = 6,1 \cdot 10^{-58} \frac{f^{-3}}{e^{hf/kT} - 1} \delta f \quad (3)$$

Z tohto vzorca ľahko dostaneme vzťah pre počet fotónov v objemovej jednotke pripadajúci na frekvenčný interval δf . Stačí vzťah (3) vydeliť energiou jedného fotónu (hf). Dostaneme výsledok:

$$\delta N \approx 10^{-24} \frac{f^2}{e^{hf/kT} - 1} \delta f \quad (4)$$

Zaujímavá je aj otázka, koľko celkovej energie emituje absolútne čierne teleso s teplotou T okolia. Intenzitu vyžarovania dostaneme jednoducho vynásobením hustoty energie rýchlosťou jej prenosu (v našom prípade c). Potom už len treba spočítať príspevky vyjadrené vzťahom (3) pre celý frekvenčný interval t.j. od 0 do ∞ . Keď sa to urobilo klasickým prístupom, získala sa nezmyselne nekonečne veľká hodnota. (Ľahko sa možno o tom presvedčiť pohľadom na čiarkovane krivky na obr. 1). Použitím vzorca (3) však táto suma poskytuje konečný, jednoduchý a s meraním dokonale súhlasiaci výsledok. Nazýva sa **Stefanov-Boltzmannov zákon**. Znie takto:

Celková intenzita vyžarovania absolútne čierneho telesa je určená vzťahom:

$$I = \sigma T^4 \quad (5)$$

kde $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ je Stefanova-Boltzmannova konštanta.

Pomocou tohto zákona môžeme pomerne jednoducho zistiť teplotu zdrojov, napr. Slnka. Vychádza okolo 6 000 K.

Pri skúmaní podmienok vzniku galaxií a hviezd ako aj ich vývoja budeme potrebovať ďalšiu charakteristiku žiarenia, a to jeho tlak. Predstavme si kvôli jednoduchosti kocku so stranou d naplnenú fotónmi s energiou $E = hf$. Každý z nich je aj nosičom hybnosti. Ak použijeme vzťahy pre hybnosť $p = mv$ a energiu $E = mc^2$ dostaneme pre ňu jednoduchý vzorec:

$$p = mc = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} \quad (6)$$

Ďalej môžeme predpokladať, že asi šestina všetkých fotónov smeruje k jednej strane kocky. Pri náraze na stenu s odraze od nej platí zákon o impulze a hybnosti v tvare:

$$F \delta t = \frac{hf}{c} - \left(-\frac{hf}{c} \right) = 2 \frac{hf}{c} \quad (7)$$

kde F je sila, ktorou fotón pôsobí na stenu. Za jednotku času prídu k stene všetky fotóny nachádzajú sa v objeme so základňou d^2 a výškou rovnajúcou sa rýchlosti ich pohybu (c). Takých je $(1/6)d^2nc$, kde n je ich koncentrácia. Za čas δt -krát viac a vyvinie na stenu impulz sily $F \delta t$ vyjadrený vzťahom

$$F \delta t = \frac{1}{6} d^2 n c \frac{2hf}{c} \delta t \quad (8)$$

Z neho pre tlak $p_z = F/d^2$ vyplýva vzorec

$$p_z = \frac{1}{3} n h f = \frac{1}{3} w_z \quad (9)$$

kde w_z je hustota žiarivej energie. Tu veľmi názorne vidíme, že hustota energie naozaj určuje tlak, čo sme tvrdili už na začiatku knihy. Tlak žiarenia určený vzorcom (7) bol v ére taký veľký že zabránil zhlukovaniu častíc a vnútri častíc a vnútri Slnka je taký veľký, že zabraňuje kolapsu slnečnej matérie následkom pôsobenia gravitačných síl.

Použitá literatúra: Evolúcia vesmíru a prírodne vedy (Július Krempaský), Wikipédia, Školský lexikón