


A hőmérsékleti sugárzással kezdődött...



Dr. Sükösd Csaba. c. egy. tanár
BME Nukleáris Technikai Intézet

2018.03.17 Országos Fizikatanári Ankét, Szeged 1

A 19. sz. végén a fizikai világkép két „tartománya”

| | |
|---|--|
| „Kemény” anyagok | Fény, hőszugárzás, hang stb. |
| Mechanika: (Newton törvények) Atomok: (Dalton, Boltzmann) Hőtan: (főtételek) Gázok kinetikus elmélete Elektron: (Thomson) | Geometriai és fizikai optika Elhajlás, interferencia (Huyghens, Fresnel...)  |
| Elektromos töltés: (Millikan) | Elektromágneses mezők: (Faraday, Maxwell, Hertz...) |
| Golyószerű viselkedés | Hullámszerű viselkedés |

2018.03.17 Országos Fizikatanári Ankét, Szeged 2

Kölcsönhatás a két „tartomány” között

Query 8: Do not all fix'd Bodies, when heated beyond a certain degree, emit light and shine; and is not this Emission perform'd by the vibrating motion of its parts?
Isaac Newton, Optics (1704)

8. Kérdés: Vajh nem minden szilárd anyag világít-e és sugároz-e, ha elegendően felmelegítettetik? És vajh ezek a kibocsátások nem a részeinek rezgőmozgásából erednek-e?
Isaac Newton, Optics (1704)

A kölcsönhatás a fény és a kemény anyag között sokféle!

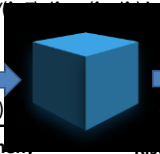
| | | | |
|---|---|---|---|
|  |  |  |  |
| átlátszó | tükröző (fémek) | színes | fekete |

2018.03.17 Országos Fizikatanári Ankét, Szeged 3

Kölcsönhatás a két „tartomány” között

A kölcsönhatás a fény és a kemény anyag között sokféle!

Kirchhoff vizsgálta részletesen (1860 környékén)
Legyen a T hőmérsékletű **környezetben** lévő sugárzás felületegységre jutó teljesítménye W az adott testre jellemző!
 $W(\lambda, T)$ egysége: $\frac{W}{m^2}$



$a(\lambda, T) \cdot W(\lambda, T)$ $e(\lambda, T) \cdot d\lambda$ az adott testre jellemző!

| | |
|--|---|
| Elnyelt teljesítmény | Sugárzott teljesítmény |
| <ul style="list-style-type: none"> T hőmérsékleten $(\lambda, d\lambda)$ intervallumban felületegységen | <ul style="list-style-type: none"> T hőmérsékleten $(\lambda, d\lambda)$ intervallumban felületegységről |
| $a(\lambda, T)$ egysége: szám (≤ 1) | $e(\lambda, T)$ egysége: $\frac{W}{m^2}$ |

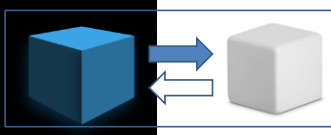
2018.03.17 Országos Fizikatanári Ankét, Szeged 4

Hőmérsékleti **egyensúlyban** amennyit elnyel a környezetből, annyit ki is kell sugározni minden hullámhossz-tartományban!

Ekkor az egyensúly feltétele: $W(\lambda, T) \cdot \underbrace{a(\lambda, T)}_{\text{elnyelt}} d\lambda = \underbrace{e(\lambda, T)}_{\text{kisugárzott}} d\lambda$

Ebből kapjuk: $W(\lambda, T) = \frac{e(\lambda, T)}{a(\lambda, T)}$

Helyezzünk különböző testeket **ugyanabba** a sugárzási térbe!



Kirchhoff-törvény:
 $W(\lambda, T) = \frac{e(\lambda, T)}{a(\lambda, T)}$
 anyagtól független!

Csak akkor lehet egyensúly, ha a **különböző testekre megegyezik az $\frac{e(\lambda, T)}{a(\lambda, T)}$ arány!** (Különbön az egyik felmelegedne, a másik lehülne, azaz hőmérséklet-különbség alakulna ki!) \longleftrightarrow II. főtétel!

Hogyan lehetne jól megmérni az anyagfüggetlen $W(\lambda, T)$ eloszlást?

2018.03.17 Országos Fizikatanári Ankét, Szeged 5

Kirchhoff-törvény:
 $W(\lambda, T) = \frac{e(\lambda, T)}{a(\lambda, T)}$
 anyagtól független!

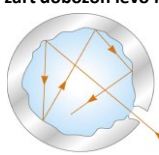
Tekintsünk olyan (hipotetikus) testet, amely **minden** ráeső sugárzást elnyel minden hőmérsékleten és minden hullámhosszon! Azaz, amelyre $a_{of}(\lambda, T) = 1$. Ez az „**abszolút fekete test**”.

Természetesen ez is sugároz, de erre a Kirchhoff-törvény alapján $e_{of}(\lambda, T) = W(\lambda, T)$. \rightarrow Az abszolút fekete test sugárzási spektruma az anyagfüggetlen „általános”, hőmérsékleti sugárzási spektrum!

Abszolút fekete test nincs (absztrakció). Jó közelítés azonban egy zárt dobozon lévő kis lyuk. („Hohlraumstrahlung” /Kirchhoff/)

Minden sugárzás ami bemegy, kölcsönhat a falal, és így kialakul a doboz hőmérsékletének megfelelő sugárzási tér. Ez lép ki a lyukon.

Milyen a belső fal? Tükröző? Fekete? Fémes? **Mindegy!** Ugyanannak kell kialakulni, különben \longleftrightarrow II. főtétel!



2018.03.17 Országos Fizikatanári Ankét, Szeged 6

A fekete test sugárzása

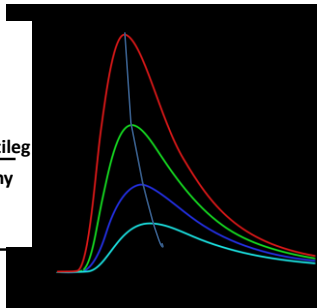
A mérések szerint a fekete test sugárzási terének hullámhossz szerinti eloszlása a következő:

Két fontos törvény:

- Stefan-Boltzmann törvény
 $P(T) = \int W(\lambda, T) d\lambda = \sigma \cdot T^4$
 - Stefan /1879/
 - Boltzmann /1884/ elméletileg
- Wien-féle eltolódási törvény
 $\frac{f_{max}}{T} = \text{konstans}$
 - Wien /1893/ elméletileg

Mindkét törvény elméleti magyarázatát **klasszikus alapokon** adták meg!

Klasszikus termodinamika és $E = p \cdot c$ (Maxwell) felhasználásával.



2018.03.17 Országos Fizikatanári Ankét, Szeged 7

Próbálkozások az elméleti magyarázatra:

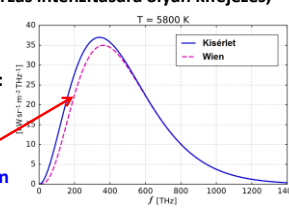
1) **Wilhelm Wien (1896):**
Ötlet: a dobozban állóhullámok alakulnak ki. A doboz méretét lassan növeljük \rightarrow a sugárzás lehül. Stefan-Boltzmann tv.
Eredmény: Az üregben lévő sugárzás intenzitására olyan kifejezés, amely teljesíti a két kísérleti törvényt: $\sim T^3 \cdot \left(\frac{f}{T}\right)^3 \cdot g\left(\frac{f}{T}\right)$

Frekvencia szerinti integrálaskor:
 $df = T \cdot d\left(\frac{f}{T}\right)$, így a Stefan-Boltzmann tv. is teljesül $\sim T^4$

$g\left(\frac{f}{T}\right) = e^{-\beta \frac{f}{T}}$ választással **egészen jónak tűnt.**

De! Csak „majdnem” jó! Pontosabb **infravörös** mérések (1900 okt.)

Megjegyzés: $e^{-\beta \frac{f}{T}} \sim e^{-\frac{E}{kT}}$ Boltzmann-faktor. De az **részecskékre** vonatkozik, nem **hullámokra!**



2018.03.17 Országos Fizikatanári Ankét, Szeged 8

2) Rayleigh-Jeans (Lord Rayleigh, James Jeans 1900)

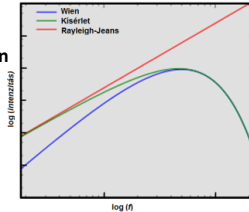
Ötlet: a dobozban **állóhullámok** alakulnak ki. Az **ekvipartíció** tétele alapján minden állóhullám kT energiát kap hőmérsékleti egyensúlyban (két polarizációs irány \rightarrow két szabadsági fok miatt).

Eredmény:

Három dimenzióban a módusok sűrűsége arányos f^2 -el, így ha minden módusra ugyanannyi energia (kT) esik, akkor az energia-sűrűség is arányos lesz f^2 -el. Kis frekvenciáknál **jó**, de nagy frekvenciáknál rossz!

$$u(f, T) = \frac{8\pi f^2}{c^3} \cdot kT$$

energia sűrűség
módusok sűrűsége
módus átlag-energiája



Könnnyen belátható: végtelen számú (egyre kisebb λ -jú) állóhullám lehet az üregben! \rightarrow **Ultraibolya katasztrófa!**

2018.03.17

Országos Fizikatanári Ankét, Szeged

9

3) Max Planck (1901)

A „klasszikus” hőtán megszállottja volt (Kirchhoff tanítványa). Boltzmann statisztikus elméletét nem szerette, kételkedett az atomok létezésében is.

Planck elképzelése: A II. főtétel és Wien képlete (mivel sokáig jónak tűnt) segítségével megalkotható lesz az oszcillátorok és a fekete test klasszikus (fenomenologikus) termodinamikája.

II. Főtétel (entrópia maximuma...)

Ahhoz, hogy maximum legyen, $\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} < 0$ kell legyen (U az energia).

A Wien-eloszlásból levezette: $\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = -\frac{1}{\beta U} < 0$. **Nagyszerű!**

Csakhogyl Rubens és Kurlbaum mérései szerint (1900 október)

$U = kT$ **infravörös tartományban, Wien nem jó!** \rightarrow Rayleigh-Jeans

elméleti leírása... Erre viszont $\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = -\frac{k}{U^2} < 0$. (!?)

Planck „próbafüggvénye”: $\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = -\frac{k}{U(hf+U)}$. Minden frekvencián jó (alkalmasan választott h -val)

2018.03.17

Országos Fizikatanári Ankét, Szeged

10

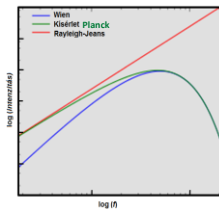
Planck levezette ebből a róla elnevezett sugárzási törvényt.

$$u(f, T) = \frac{8\pi f^2}{c^3} \cdot \frac{hf}{e^{hf/kT} - 1}$$

módusok sűrűsége
módus átlag-energiája

Eredmények:

- A Planck-törvény minden frekvencián jól illeszkedik
- Levezethető belőle a Wien-féle eltolódási törvény
- Levezethető belőle a Stefan-Boltzmann törvény
- Határesetekben visszaadja a Wien- és a Rayleigh-Jeans tv.-t



2018.03.17

Országos Fizikatanári Ankét, Szeged

11

Elméleti értelmezés

Planck: az oszcillátorok (atomok) energiája kvantált: $E = n \cdot hf$ és ezekre a Boltzmann-faktor

alkalmazható: $e^{-\frac{E}{kT}}$

Kvantummechanika (jóval később):

Egy dimenzióban: $E = hf \cdot (n + 1/2)$

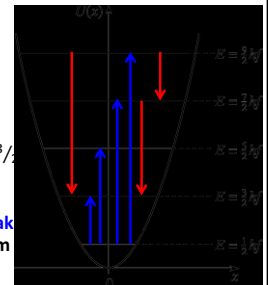
Három dimenzióban: $E = hf \cdot (n + 3/2)$

Persze az oszcillátorok gerjesztéseire nyilván: $\Delta E = n \cdot hf$

Néhány évig az **atomi oszcillátoroknak** tulajdonították a kvantáltságot. (Nem gondolták igazán fizikainak.)

Planck sokáig próbálta beilleszteni a klasszikus fizika kereteibe – sikertelenül.

Einstein (fotoeffektus, 1905): Az elektromágneses **sugárzás** energiája kvantált! **Foton** hipotézis!



2018.03.17

Országos Fizikatanári Ankét, Szeged

12

Fotoeffektus

Klasszikus várakozás:
A kilépő elektronokat az elektromágneses hullám elektromos mezője gyorsítja, ➡ elektron energiája nő a fény intenzitásával. ($I \sim E^2$)

Kísérleti eredmény (Lénárd Fülöp):

- A kilépő elektronok **energiája független** az intenzitástól, csak a fény frekvenciájától függ.
- $E_{\text{elektron}} = hf - W_{\text{ki}}$ (Einstein)
- A kilépő elektronok **száma** arányos az intenzitással.

Az elektronok energiája az ellentérrel mérhető. Ha $eU > E_{\text{elektron}}$ az elektronok nem érik el a katódot, áram nincs.

2018.03.17 Országos Fizikatanári Ankét, Szeged 13

A foton hipotézis

A fotonok az elektromágneses sugárzás tér elemi energiakvantumai.

„részecske” (golyó) tulajdonságok $\left\{ \begin{array}{l} E = hf \\ p = h/\lambda \end{array} \right.$ „hullám” tulajdonságok Planck (1901) de Broglie (1924)

Planck-állandó

Itt inkább „hullám”

További megerősítés:
Compton: a foton részecskeként „ütkezik” egy elektronnal. (Compton-szórás, 1923)
Nemcsak a foton ilyen!
Louis de Broglie: anyaghullámok
Davisson-Germer: elektronok interferenciája (1927)

Hogyan lehet a kettőt összehozni (elképzelni)?

2018.03.17 Országos Fizikatanári Ankét, Szeged 14

J. J. Thomson (1903) és Einstein (1905) túsugarai

A fotonok kis „hullámcsomagok”, amelyek jól meghatározott irányokban lépnek ki a kibocsátó anyagból

- Érthető, hogy miért „adagos” az energia és a lendület.
- Érthető lesz, hogy mi az oka a **koherencia**-hossznak. Minden foton (szétbontás és újraegyesítés után) saját magával létre tud hozni interferenciát, hiszen a koherencia-hosszon belül **megőrződnek a fázisviszonyok**.
- Spontán** kibocsátás esetén a többi fotonnal a **fázisviszonyok véletlenszerűek** ➡ nincs interferencia (tartós erősítés/gyengítés).

(Megjegyzés: **Indukált** emisszió esetén (lézer) a fotonok nem egymástól függetlenül lépnek ki, hanem „fázisban”. Ilyenkor a különböző fotonok között is van interferencia!)

2018.03.17 Országos Fizikatanári Ankét, Szeged 15

Problémák a túsugarakkal

- Selényi-kísérlet (1911): **Nagyszögű** kibocsátás után újraegyesítés

Van interferencia, tehát a foton nem lehet „tűszerű”! $\Delta s = 2d \sin \theta$

Selényi Pál (1884-1954)

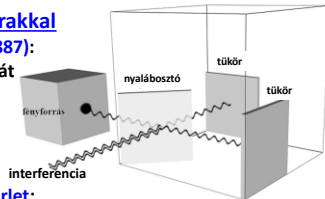
➡ A foton kibocsátása gömbhullámokban történik!

- Kossel-kísérlet (1935)
Lényegében a Selényi kísérlet, csak Röntgen-sugarakkal. (Nagy energiájú fotonok is gömbhullámokban indulnak!)

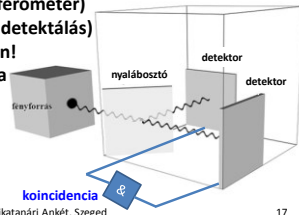
2018.03.17 Országos Fizikatanári Ankét, Szeged 16

Problémák a túsugarakkal

- **Michelson-kísérlet (1887):**
Van interferencia, tehát „elfeleződik” a foton!



- **„Foton felezés” kísérlet:**
(Módosított Michelson interferométer)
Nincs koinkidencia (egyidejű detektálás) tehát **nem feleződik el** a foton!
(a foton vagy az egyik irányba megy, vagy a másikba)



2018.03.17

Országos Fizikatanári Ankét, Szeged

17

Az Andromeda galaxis 2,5 millió fényév távolságban van



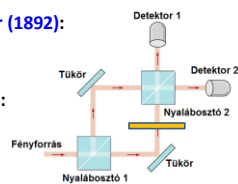
2018.03.17

Országos Fizikatanári Ankét, Szeged

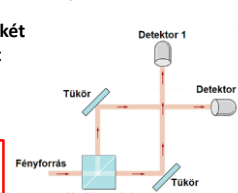
18

- **Mach, Zehndner interferométer (1892):**

Működése: ha a két fényút útkülönbsége megváltozik, a detektorokon változik az intenzitás: **interferencia** (pl. egyik erősítés, másikon gyengítés) \Rightarrow a **fotonok elfeleződnek!**



A „Nyalábosztó 2” kivétele után a két detektor 50-50% intenzitást mutat útkülönbségtől függetlenül! \Rightarrow A **fotonok nem feleződnek el!** (?)



A Nyalábosztó 1 elérésekor már „előre” tudják a fotonok, hogy el kell-e feleződni??

2018.03.17

Országos Fizikatanári Ankét, Szeged

19

Egy modern mérés (2017)

Francesco Vedovato, Paolo Villoresi (Univ of Padova), 2017. október 25. Science Advances

Lényegében egy speciális Mach, Zehndner interferométer lézer impulzusokkal. Az első nyalábosztón való áthaladás **után** fellőtték a szétvált nyalábokat egy 1500 km-re keringő műhold tükreire, ahonnan visszaverődtek az interferométerbe.

A kutatók **az után** döntötték el, hogy akarják-e interferáltatni a pulzusokat, hogy azok már visszaverődtek a műholdról, és „úton voltak” vissza-felé.



Tehát a fotonoknak kb. 3000 km-el korábban (!) kellett volna „tudniuk” hogy a kutatók hogyan fognak dönteni (feleződjenek-e, vagy sem)!!?

2018.03.17

Országos Fizikatanári Ankét, Szeged

20

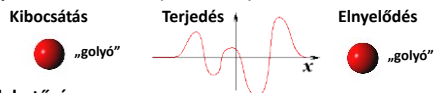
Mit mondhatunk a diákoknak?

1. lehetőség:

Marx György hasonlata: „pénzküldés Budapestről Szegedre”
Nincs értelme „pályáról” beszélni /merre megy?/

2. lehetőség:

Modellek. A különböző modellek nem **ellentmondanak** egymásnak, hanem egymást **kiegészítik**. „*Contraria non contradictionaria sed complementaria sunt*” (Niels Bohr)



3. lehetőség:

Mi a „**megértés**”? A végtelen világ tükröződése tudatunkban, 3D-s fogalmaink segítségével. „Kétdimenziós emberkék” példája.

Bár a tudatunkba nem „fér be” képszerűen, de a matematika le tudja írni! **Hallgass, és számolj!** (R.P. Feynman)

2018.03.17

Országos Fizikatanári Ankét, Szeged

21

There is nothing new to be discovered in physics now. All that remains is more and more precise measurement (Lord Kelvin 1900)

A fizikában nem maradt semmi új felfedezni való. A továbbiakban csak a méréseket pontosíthatjuk egyre jobban. (Lord Kelvin 1900)

Köszönöm a megtisztelő figyelmet!

„Pontosították...”

És egy egészen különleges, csodálatos, új világ nyílt meg előttünk.

2018.03.17

Országos Fizikatanári Ankét, Szeged

22

Források:

Hőmérsékleti sugárzás: John Crepeau: Brief History of the T^4 radiation law

<http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1630360>,

valamint: http://galileo.phys.virginia.edu/classes/252/black_body_radiation.pdf

Rayleigh-Jeans: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/rayj.html>

Planck: <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz0102/nagy.html> (Prof. Nagy Károly cikke) valamint:

http://www.chemie.unibas.ch/~tulej/Spectroscopy_related_aspects/Lecture7_Spec_Rel_Asp.pdf

Foton: <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz5304/karolyhazi5304.html> (Prof. Károlyházi Frigyes cikke)

Tűsugárzás és Selényi Pál: <http://docplayer.hu/10459415-Tusugarzas-es-nagyszogu-interferencia-i-selenyi-pal-100-eves-kiserletenek-idoszerusege-varro-sandor-mta-szilardtestfizikai-es-optikai-kutatointezet.html>

Vedovato-Villoresi kísérlet (2017): <http://www.sciencemag.org/news/2017/10/quantum-experiment-space-confirms-reality-what-you-make-it-0>