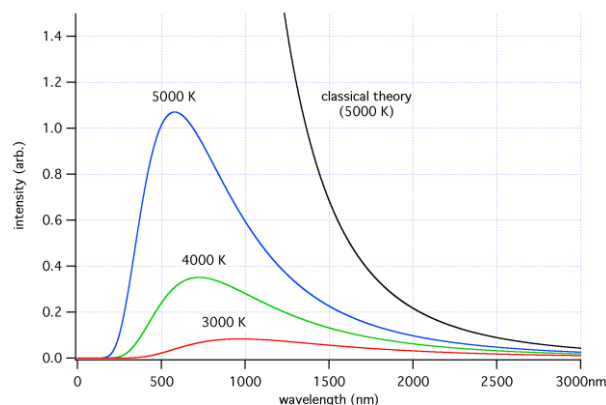


## A fekete test sugárzása

A tapasztalat azt mutatja, hogy a feketére festett testek a Nap sugárzás hatására jobban felmelegednek, mint pl. a fehér testek. Gondoljunk csak arra, hogy a weekend házakban az udvaron lévő, a zuhanyozáshoz használt vizeshordót tapasztalaton alapulva feketére szokták festeni, mert estére jobban felmelegedik benne a víz, mint a nem fekete hordóban. Persze a víz nem melegszik végtelen hőmérsékletig, mert többek között sugároz is a fekete test. Ennek a feketetest sugárzásának a vizsgálata vezetett a kvantummechanika kialakulásához. A sugárzásra vonatkozó klasszikus fizikai elképzelések ebben az esetben látványos kudarchoz vezettek. A vizsgálat annak a kérdésnek a tanulmányozására irányult, hogy egy üreges test (jó modellje az abszolút feketetestnek, amely minden ráeső sugárzást elnyel) belsejében kialakuló hőmérsékleti sugárzás energiája hogyan oszlik el a különböző frekvenciájú összetevők között. A kísérletek tanúsága szerint az energia frekvencia szerinti eloszlását az üreges test falának hőmérséklete szabja meg (ezért kapta a hőmérsékleti sugárzás nevet).



Hogy a kapott mérési eredményeket értelmezni tudjuk (szines vonalak), először vizsgáljuk meg, hogy milyen módon lehet az üregben kialakult sugárzásról információt szerezni. A vizsgálati módszer elvben igen egyszerű: az üreg falán egy kis lyukat alakítanak ki, ezen át kiengedik a sugárzás egy kis részét (annyit, hogy az egyensúlyi állapot kialakulását ez ne zavarja) és ennek tulajdonságait vizsgálják. Az üregen nyitott lyuk jellegzetessége, hogy a ráeső sugárzást teljesen elnyeli, hiszen a bejutott sugárzás a belső falon ide oda verődik, és igen kicsi a valószínűsége, hogy a lyukon újra kijut. Mivel a ráeső sugárzást teljesen elnyelő testet *abszolút fekete testnek* nevezik, és az üregből a lyukon át kijövő egyensúlyi sugárzás ezért a *fekete test sugárzása* elnevezést kapta. A gyakorlatban nem egy-egy adott  $\nu$  frekvenciájú összetevő energiáját mérik, hanem a mérési eljárás és a frekvencia által meghatározott  $\nu$  és

$v+dv$  közé eső frekvenciaintervallumban kisugárzott  $dE(v)$  energiát. A mérést különböző frekvenciákon elvégezve megkapható a mért függvény, amelynek jellegzetes menetét különböző hőmérsékleteken a fenti ábra mutatja. A fenti összefüggésből következik, hogy adott hőmérsékleten a teljes frekvenciaintervallumban kisugárzott energia a megfelelő eloszlási görbe alatti területtel egyenlő. A kísérleti eredmények további jellegzetessége az, hogy az energia-eloszlásnak minden hőmérsékleten maximuma van egy meghatározott frekvencián.

A fenti ábrán bemutatott kísérleti eredményeket természetesen megpróbálták a klasszikus fizika törvényei alapján megmagyarázni. A klasszikus elképzelés szerint a sugárzás elnyelése és kibocsátása töltéssel rendelkező atomi rezgő rendszerek, ún. *atomi oszcillátorok* rezgéseivel hozható kapcsolatba. Egy adott oszcillátor a rendszer sajátságainak megfelelő frekvenciákon rezeghet, adott frekvencián pedig energiája csak a rezgés amplitúdójától függ. Ez azt jelenti, hogy a klasszikus oszcillátor energiája tetszőleges értékeket vehet fel, és a gerjesztő hatástól függően folytonosan változhat.

A klasszikus gondolatmenet szerint az üreg falát alkotó atomok és molekulák egymással kölcsönhatásban állnak, és mivel a hőmozgás miatt állandó mozgásban vannak, az őket alkotó töltött részecskék is állandó rezgőmozgást végeznek. Eközben természetesen, a gyorsulások miatt sugároznak. Az ilyen módon létrejött elektromágneses sugárzás intenzitását alapvetően a test hőmérséklete szabja meg. Az üreg belsejében a fal egyik része által kibocsátott sugárzást a fal más részei elnyelik, és ha az üreg hőmérséklete állandó, akkor az üregben kialakul egy dinamikus egyensúly: a fal által adott idő alatt kisugárzott energia megegyezik az általa ugyanezen idő alatt elnyelt energiával. Az így kialakult egyensúlyi elektromágneses sugárzás sajátságait megpróbálták a klasszikus fizika módszereivel a Maxwell egyenletek segítségével meghatározni. A kapott eredmények azonban a tapasztalati görbével nem egyeztek. A kis frekvenciák tartományában a kísérletekkel jól egyező összefüggést kapott J.W.S. Rayleigh és J.H. Jeans, de összefüggésük szerint növekvő frekvenciákhoz azaz csökkenő hullámhosszhoz egyre nagyobb és nagyobb energia tartozik. A függvény a hullámhossz  $-4$ -ik hatványával változik ( $\sim \lambda^{-4}$ ). A problémát végül M. Planck oldotta meg, lényegében úgy, hogy megkereste annak matematikai feltételét, hogy a Rayleigh-Jeans törvény a frekvenciával ne divergáljon. Az ehhez szükséges feltevések azonban igen meglepőek voltak, amelyeket a klasszikus fizika sugárzásról alkotott képével nem lehetett összeegyeztetni.

A kísérletekkel egyező formula levezetésénél Plancknak fel kellett tételeznie, hogy az atomi oszcillátorok energiája nem változhat folytonosan, hanem csak meghatározott diszkrét  $\epsilon$  értékekkel, és egy adott

frekvenciájú oszcillátor energiájának ez a diszkrét megváltozása a frekvenciával arányos

$$\varepsilon = h\nu,$$

ahol  $h$  a kísérleti eredményekkel való összehasonlításból meghatározandó konstans. Ebből az is következik, hogy az üregben jelenlévő sugárzás energiája is csak a fenti összefüggésnek megfelelő  $h\nu$  adagokban, *kvantumokban* változhat. A klasszikus fizika törvényeinek ellentmondó fenti feltevésekkel Planck az

$$\varepsilon(\nu) = \frac{D\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

összefüggést kapta, ami a  $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$  Js érték választásával a kísérleti eredményekkel igen jól egyezik (itt  $D$  egy konstans,  $T$  az abszolút hőmérséklet,  $k$  a Boltzmann-állandó). Az összefüggést *Planck-féle sugárzási törvénynek*, a benne szereplő, és a modern fizikában alapvető szerepet játszó  $h$  számot pedig *Planck-állandónak* nevezik.

A meghatározott energiaadagok léte látszólag ellentmond annak a tapasztalatnak, hogy a sugárzási energia folytonosan változik. Az ellentmondás megoldása az, hogy a  $h\nu$  érték a vizsgált esetekben olyan kicsi, hogy a használt mérőeszközökkel ilyen energia-eltérések nem mutathatók ki.