

A HŐMÉRSÉKLETI SUGÁRZÁS

1. Történeti összefoglaló

A tizenkilencedik század végén a fizikát lezárt tudománynak tartották. A sikeres Newton-i mechanika és gravitációs elmélet alapján a Naprendszer bolygóinak mozgása pontosan leírható volt. Az elektromos és mágneses jelenségek egyesítése a *Maxwell egyenletekben* egyben azt is igazolta, hogy a fény elektromágneses hullám. Kísérleti úton *Hertz* mutatta meg az elektromágneses hullám létezését és a fényhez hasonló tulajdonságait. A termodinamika hatalmasat fejlődött, igazolást nyert a mechanikai energia és a hőenergia ekvivalenciája, végleges kimondásra került az *energia megmaradásának törvénye*. A fizika és kémia hatalmas fejlődése minden korábbinál nagyobb műszaki fejlődést indított el. 1867-ben *Nicolaus August Otto* a Párizsi Világkiállításon mutatta be a világítógáz hajtású motorját, ezzel megindul a „robbanó motorok” bámulatos fejlődése. *Tesla* váltóáramú hálózata átütő sikert arat a villamos energia átvitelben, a háromfázisú áram bevezetésével a transzformátorok és váltóáramú villanymotorok rohamosan terjednek. *Marconi* a Hertz hullámok segítségével 1901-ben rádiókapcsolatot teremtett az Atlanti óceánon át.

A tudomány és technika látványos sikerei ellenére még bőven maradtak olyan kérdések, többek között a fizikában is, melyek megoldása váratott magára. Az egyik ilyen probléma volt az *éter létezésének*, mint a fény feltételezett hordozójának kimutatása. A *Michelson-Morley*-féle optikai kísérletek próbálták meghatározni a Föld abszolút sebességét az éterben, de a kimutatás nem sikerült. A gordiuszi csomót Albert Einstein speciális relativitáselmélete oldotta meg 1905-ben (ma sem mindenki számára elfogadhatóan). A fizika másik nagy kérdése a *hőmérsékleti sugárzás* értelmezése volt a már akkoriban általánosan ismert és elfogadott elektromágneses elmélet alapján. A kor fizikusainak többsége azonban meg volt győződve arról, hogy ezek a kérdések idővel egyszerűen és könnyen meg fognak oldódni. A huszadik század elején azonban rádöbbsent a fizikus társadalom, hogy az apró hiányosságoknak számító problémák megoldása nem kapcsolható össze a korábbi ismeretekkel. A klasszikus fizika ezzel lezárult a századfordulón, és a huszadik század beköszönte minden korábbinál gyorsabb és főleg meglepőbb felfedezéseket, felismeréseket hozott. A modern fizika kezdetét éppen az a hőmérsékleti sugárzás értelmezése jelentette, mely korábban sok gondot okozott a fizikusoknak.

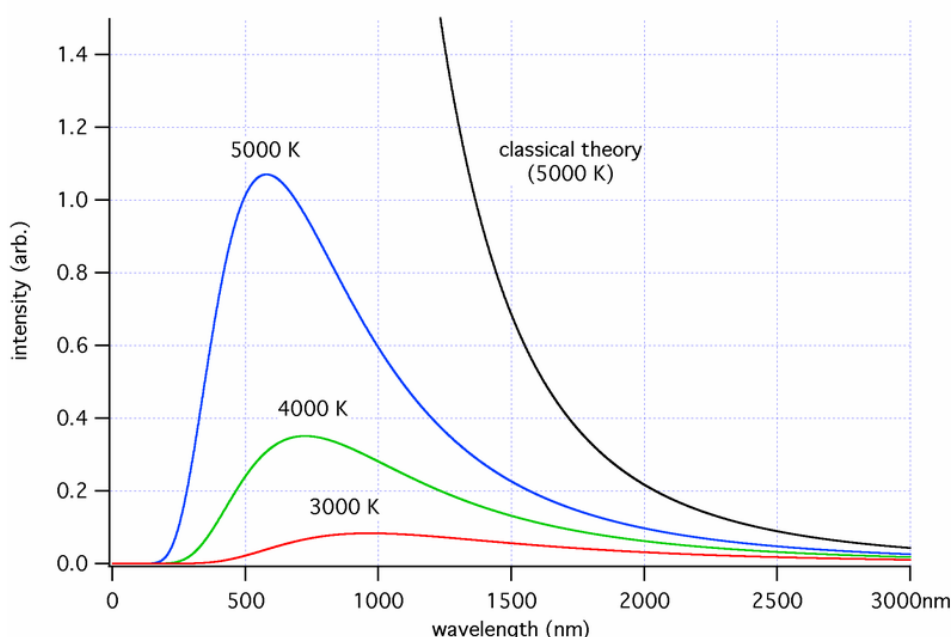
A modern fizika épülete két alapvető pillérre épül, a relativitáselméletre és a kvantummechanikára. Mindkét elmélet a huszadik század elején született és gyökeresen felforgatta a klasszikus fizikai világképet, mely a tizenkilencedik század végére kialakult és véglegesnek tűnt. Einstein relativitáselmélete a klasszikus fizika csúcspontjának és egyben a lezárásának tekinthető, míg *Max Planck* (1858-1947, Nobel-díj: 1918-ban) *kvantumhipotézise* (1900), mely a hőmérsékleti sugárzás megértéséből fakadt, egy teljesen új fizikai szemlélet kialakulásának kezdetét jelentette. Einstein és Planck elmélete a fizikában az évek során hatalmas sikerekre vezetett és ez a sikertörténet a mai napig tart. A könyv jelen fejezetében Planck kulcsfontosságú eredményét, a hőmérsékleti sugárzás elméletét vizsgáljuk meg egy teljesen új megvilágításban.

Ha egy test melegebb a környezeténél, akkor hőt, azaz elektromágneses sugárzást bocsát ki a környezetébe. Magasabb hőmérsékleten a testek nemcsak hőt, fényt is bocsátanak ki. Ezt a sugárzást nevezzük hőmérsékleti sugárzásnak, melyről egyértelműen bebizonyosodott, hogy elektromágneses sugárzás. *Kirchoff* 1860-ban megmutatta, hogy a hőmérsékleti sugárzás vizsgálatánál fontos szerepe van annak a testnek, amelyik minden ráeső sugárzást elnyel. Ezt a testet nevezik abszolút fekete testnek. Az abszolút fekete test természetesen nem feltétlenül fekete színű, ha például sokkal melegebb a környezeténél, akkor lehet akár izzó fehér, mint

például a Nap. Kirchoff megfigyelte, (különböző anyagokkal kísérletileg bizonyította), hogy bár az anyagoknak más és más a fényemisszió (e) és fényabszorpció (a) képessége, de a kettő hányadosa anyagtól független kizárólag csak a hőmérséklet és a kibocsátott vagy elnyelt sugárzás hullámhossz függvénye:

$$\frac{e_1}{a_1} = \frac{e_2}{a_2} = \frac{e_3}{a_3} \dots = \frac{E}{A} = E(\lambda, T); \quad (A=1). \quad (1.1)$$

Itt „ A ” az abszolút fekete test abszorpció képességét jelöli, melyet célszerűségből egységnyi-nek választhatjuk. Az abszolút fekete test emisszió képességét itt kivételesen „ E ”-vel jelöljük (E másutt az energia jele). A fekete test kísérletileg meghatározott emissziós görbéit a hullámhossz függvényében az 1. ábra mutatja.



1. ábra: Az abszolút fekete test emissziós görbéi a hullámhossz függvényében, különböző T abszolút hőmérsékleten.

Az 1. ábra egyszerű értelmezése céljából idézzünk emlénkünkbe például egy vascső hegesztését. Ha a csövet (közelítőleg fekete test) hegesztő pisztollyal melegítjük, a vascső sötét pirosan kezd világítani, ez a nagyobb fényhullámhosszhoz, és relatíve alacsony hőmérsékletéhez tartozik. A további melegítés hatására a vascső élénkpiros lesz, majd lassan sárgássá válik, ez a hőmérséklet növekedés következménye. Túlmelegítés esetén a vascső felülete kékes-fehéren izzik, és ilyenkor már gyorsan megolvadhat a cső anyaga. Az 1. ábra azt is mutatja, hogy az abszolút fekete test minden hőmérsékleten sugároz, a látható és nem-látható hullámhosszakon egyaránt, és a sugárzási spektrum folytonos. A sugárzási görbék alatti terület, mely arányos a kisugárzott energiával, a hőmérséklettel rohamosan növekszik. Már az 1880-as években a kísérleti és elméleti vizsgálatok megmutatták, hogy a fekete test egységnyi felülete által kisugárzott összteljesítmény (minden hullámhosszra összegezve, azaz a folytonos hullámhosszra integrálva) az abszolút hőmérséklet negyedik hatványával arányos:

$$P_{\text{sug}} = \sigma T^4. \quad (1.2)$$

Ez a híres *Stefan-Boltzmann* törvény, ahol a σ állandó értéke: $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

Wien „eltolódási törvénye” azt mondja ki, hogy a maximális erősségű sugárzás hullámhossza a fekete test spektrumában a hőmérséklet növekedésével fordítottan arányban csökken, ezt mutatja az 1. ábra is. *Wien*, aki *Helmholtz* tanítványa volt, intenzíven foglalkozott a fekete test sugárzás kísérleti eredményeivel, tisztán elméleti úton vezette le a következő összefüggést 1894-ben:

$$\lambda_{\max} T = b = \text{állandó} \left(= 2.898 \times 10^{-3} \text{ méter} \times K \right). \quad (1.3)$$

Ez a törvény mind a mai napig igaznak bizonyult és egyben az utolsó olyan törvény a hőmérsékleti sugárzásra, mely a klasszikus termodinamika és a klasszikus statisztikus fizika alapján le lehetett vezetni. A hőmérsékleti sugárzás fizikai jelentősége miatt az 1800-as évek végén sokan próbálták fizikailag értelmezni az $E(\lambda, T)$ kísérletileg meghatározott függvényt, a sikertelen próbálkozások közül kettőt szokás kiemelni. Egyrészt maga *Wien* is adott egy értelmezést, mely csak a kis hullámhosszakra adott magyarázatot. *Rayleigh* és *Jeans* közelítései csak nagy hullámhosszakon adtak helyes eredményt. A klasszikus fizikai magyarázatok azonban mindkét esetben végtelen nagy sugárzási energiákra vezettek, amik fizikailag elfogadhatatlannak.

A probléma megoldását *Planck* olyan irányban kereste, hogy hogyan lehetne elkerülni a végtelen nagy sugárzási teljesítményt. Hogyan lehetne illeszteni az elméleti görbéket a kísérletileg mért korlátos energiájú görbékre? *Planck* gondolatmenetében központi szerepet játszottak a fekete test oszcillátorai (atomok, molekulák, stb.), melyek a hőmérsékleti sugárzás, (elektromágneses sugárzás) forrásai. A számításai akkor vezettek helyes eredményre, ha feltételezte, hogy a fekete test oszcillátor energiák csak diszkrét értékeket vehetnek fel, azaz *kvantáltak*:

$$E_n = nhf \equiv n\hbar\omega; \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (1.4)$$

A képletben h a *Planck* állandó és a $\hbar = h/2\pi$ egy külön jelölése a *Planck* állandónak, csak egy konstans szorzóval különbözik az eredeti h -tól. A képletben f a fény frekvenciája, és $\omega = 2\pi f$, az ún. *körfrekvencia*. A *Planck* állandó 2π -vel osztott alakjának kiejtése: „h-vonás”. Fontos megjegyezni, hogy a *Planck* állandónak, illetve annak 2π -vel osztott változatának dimenziója egyaránt energia x idő, és ez egyben az impulzusmomentum (perdület, spin) dimenziója is.

Planck a (1.4) feltevéssel az ismert termodinamikai és *statisztikus fizikai* eredményeket kiegészítve, a hőmérsékleti sugárzás energiasűrűség eloszlására a következő eredményt kapta:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}, \quad (1.5)$$

amely jól illeszkedett a mérési görbékre. Az (1.4) posztulátum szerint az oszcillátor energiák egyenesen arányosak az oszcillátor frekvenciájával, és az energia értékek csak lépcsőzetesen, ugrásszerűen változhatnak. A klasszikus mechanikában az oszcillátorok energiája a frekvencia négyzetével arányos, tehát a frekvenciában lineáris oszcillátor energia is már kétkedésre adott okot. Ráadásul a lépcsőzetes változású (kvantált) energia teljes képtelenségnek tűnt, hiszen az egész klasszikus fizika végig a folytonos matematikára épült. *Planck* élete végéig kételkedett eredményének valós fizikai tartalmában, az energia kvantálását pusztán

matematikai segédeszköznek, és a h Planck állandót pusztán görbeillesztési paraméternek tekintette.

A továbbiakra tekintettel az energiasűrűség függvényt megadjuk a sugárzási frekvencia (és a körfrekvencia) függvényében is:

$$\varepsilon(f, T) = \frac{8\pi f^2}{c^3} \frac{hf}{e^{hf/kT} - 1}; \quad \varepsilon(\omega, T) = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \frac{\hbar\omega}{e^{\hbar\omega/kT} - 1}. \quad (1.6)$$

Mivel a fénysebesség vákuumbeli értéke gyakorlatilag azonos a levegőben, a hullámhosszat és a frekvenciát a $c=f\lambda$ képlet kapcsolja össze. Összehasonlítva a (1.5) és (1.6) képleteket, a $c=f\lambda$ képlet nem teljesül. Az eltérések az integráltranszformáció következményei, ugyanis a megadott energiasűrűség képletek hullámhossz, illetve frekvencia szerinti integráljai ugyanazt az eredményt, a Stefan-Boltzmann törvényt kell, hogy kiadják. A statisztikus fizika szempontjából fontos a *hőmérsékleti sugárzás oszcillátorainak átlagos energiája*, ez a (1.6) képletből a következő tényező:

$$\bar{\varepsilon}(\omega, T) = \frac{\hbar\omega}{e^{\hbar\omega/kT} - 1}. \quad (1.7)$$

2. A sugárzási törvény alternatív levezetései

Planck sugárzási törvényéhez alternatív fizikai modelleken keresztül is eljuthatunk, amely bizonyítja a sugárzási törvény különleges szerepét és univerzalitását. Maga Planck a sikeres levezetésében klasszikus termodinamikai fogalmakra, kiemelten az *entrópiára* támaszkodott. Debye 1910-ben az átlagos oszcillátor energia képletét Planck kvantált oszcillátor-energia posztulátumából közvetlenül vezette le. Debye a *Maxwell-Boltzman* eloszlásnak megfelelő *súlyozott átlagolással* számolta ki az átlagos oszcillátor energiát, ugyanis apró matematikai trükkel könnyen igazolható, hogy:

$$\bar{\varepsilon}(\omega, T) = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} n\hbar\omega e^{-n\hbar\omega/kT}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\hbar\omega/kT}} \equiv \frac{\hbar\omega}{e^{\hbar\omega/kT} - 1}. \quad (2.1)$$

A legtöbb tankönyv Debye levezetését tartalmazza, mivel ezzel elkerülhetők a hosszadalmas termodinamikai gondolatmenetek. 1916-ban Einstein még egy további alternatív fizikai kép alapján jutott el a sugárzási törvényhez. Einstein statisztikus módszert alkalmazott az atomok emissziós és abszorpciós folyamataira, kiegészítve ezeket az *spontán emisszió* fogalmával. Az alternatív fizikai modell kialakítása viszonylag könnyen ment, mivel a végeredmény már ismert volt. Fontos viszont, hogy ez az új fizikai kép igencsak termékenyítően hatott a későbbi *kvantummechanika* fejlődésére. Einstein példája mutatja, hogy egy-egy fizikai jelenség alternatív fizikai értelmezése további eredményekre vezethet.

A Planck sugárzási törvényét megismerve, magam is találtam egy egyszerű fizikai magyarázatot a fekete test sugárzási spektrumára, pontosabban az átlagos oszcillátor energia fizikai hátterére. A műszaki gyakorlatból jól ismert a *zajspektrum* fogalma. A mechanikus

forgógépek, de az elektronikus készülékek működése közben is fellépnek zajok, ezeket ma már pontos műszerekkel kiválóan lehet mérni. (A zajok az infrahang tartománytól, a hallható tartományon keresztül, az ultrahang tartományban is jelentkezhetnek.) Az elektronikus készülékekben fellépő zajok természetesen nem hallható zajok, hanem a villamos áram gyors rezgései. Az elektronikus zajok, megfelelő elektronikus eszközzel felerősítve, hangszóróval tehetőek hallhatóvá.

A mérhető zajspektrum mindig áll egy *alapfrekvenciából* és a *felharmonikusokból*. A felharmonikus frekvenciák az alapfrekvencia egész-számú többszörösei. *Fehérzaj* esetén a zajspektrumban elméletileg minden frekvencia folytonosan, egyenlő intenzitással előfordul, ez főleg az elektronikus készülékekre jellemző. Már régen igazolást nyert, hogy az elektronikus készülékekben fellépő zajok túlnyomó részben *termikus zajok*, azaz a készülékalkatrészek hőmérsékletének növekedésével ezek aránya növekszik. Az elektronikában gyakran előforduló, egyszerű *ohmikus ellenállásnak* például könnyen kimérhető a termikus zaja, amely spektrumát tekintve fehérzaj. Az ellenállás hőmérsékletének csökkentésével a mérhető fehérzaj is csökken. A *rádiócsillagászatban* alkalmazott rádióvevők érzékeny detektorait emiatt szokás hűteni, egészen az abszolút zéruspont közelébe. A műszaki gyakorlatban tehát fontos feladat a zajok csökkentése, mivel egyrészt a zajok rontják a mechanikus gépek hatásfokát, másrészt az alkatrészek fölösleges kopását, sérülését okozhatják. A nem-megengedett mértékű villamos eredetű zajok az elektronikus készülékekben különböző zavarokat, hibás működéseket okozhatnak. A zajok mérésére szerkesztett mai műszerek képesek *zajtjeljesítményt* is mérni. A mechanikai gépeknél, illetve elektronikus eszközöknél a zajok fölösleges energiát nyelnek el, mely energia nem hasznosul, általában termikus disszipációra (melegedésre) vezet. A fizikai képből természetesen az is következik, hogy a zajteljesítmény által okozott termikus disszipáció mértéke csak véges lehet, ezért a magasabb frekvenciájú zajok teljesítménye a frekvencia növekedésével szükségszerűen csökken. A zajspektrum teljes frekvenciatartományra vett integrálja tehát csak véges érték lehet, és éppen ez a legfontosabb követelmény a fekete test sugárzás teljesítményspektrumára is. A zajteljesítmény spektrum a gyakorlatban diszkrét frekvenciákból áll, ezért az integrált teljesítmény összeg alakban írható fel:

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} p(\omega_n) < \infty. \quad (2.2)$$

A legegyszerűbb, azaz a legkevesebb, egyetlen paramétert tartalmazó végtelen sorozat, amelynek összege véges, a *mértani sorozat*, ezért (2.2) lehet a következő:

$$\sum_{n=0}^{\infty} p(\omega_n) \equiv \sum_{n=0}^{\infty} p_0 (e^{-\beta\omega})^n = p_0 \sum_{n=0}^{\infty} q^n = P(\omega). \quad (2.3)$$

Itt p_0 , β , ω konstansok, a $q = \exp(-\beta\omega)$ paraméter egynél kisebb szám, ezért a végtelen mértani sorozat összegképletét alkalmazva:

$$P(\omega) = p_0 \sum_{n=0}^{\infty} q^n = p_0 / (1 - q). \quad (2.4)$$

A teljes P zajteljesítmény a zajforrások által időegység alatt disszipált energiák összege. Ebből következik, hogy a (2.4) eredmény összevethető a fekete test sugárzás átlagos oszcillátor

energiájával. A fekete test sugárzása úgy is értelmezhető, hogy a *fekete test zajspektrummal sugároz*. A fekete test oszcillátor sugárzási teljesítménye tehát megegyezik (2.4)-el, amely arányos a fekete test átlagos oszcillátor energiájával:

$$P(\omega) = p_0 / (1 - q) \equiv \frac{p_0 / q}{1/q - 1} \sim \frac{\hbar\omega}{e^{\hbar\omega/kT} - 1}. \quad (2.5)$$

Az arányosság teljesül, ha:

$$1/q \equiv e^{\beta\hbar\omega} = e^{\hbar\omega/kT}; \quad p_0 / q \sim \hbar\omega. \quad (2.6)$$

Eredményünket összefoglalva, a hőmérsékleti sugárzó fekete test az elektromágneses tér T hőmérsékletű „zajgenerátorának” tekinthető.

3. A foton fogalma

Planck sugárzási elmélete hamar megtermékenyítette a század eleji fizikát. Einstein ennek alapján magyarázni tudta a fényelektromos hatást, bevezetve a *foton* fogalmát. *Niels Bohr* (1885-1962) Planck elméletét követve zseniálisan megalkotta a hidrogén atom kvantummodelljét 1913-ban, ezzel megtette az első lépést a kvantummechanika felfedezéséhez. Einstein szerint egy fényciklus (a foton) energiája:

$$E = hf \equiv \hbar\omega. \quad (3.1)$$

Einstein lényegében ennek az elemi képletnek köszönhetően kapta a Nobel díjat 1921-ben, mivel ezzel az egyszerű képlettel meg tudta magyarázni a megvilágított fémből kirepülő elektronok mozgási energiáját (*fényelektromos effektus*). Az elektronok mozgási energiáját ugyanis nem a megvilágítás erőssége, hanem a fény színe, azaz frekvenciája határozza meg. A fény fotonokból áll, melyek energiáját a fenti képlet adja, Planck felismerése szerint. A fotonnak például nincs amplitúdója, ellentétben a fényhullámokkal. Ezek szerint a fény *kettős természetű*, az adott kölcsönhatás módjától függ, hogy hogyan viselkedik. Optikai kísérletekben könnyen kimutatható a fény hullámtulajdonsága (interferencia, fényelhajlás), viszont más kísérleteknél, mint a fent ismertetett fényelektromosság esetén kvantumosan viselkedik.

Ezzel eljutottunk a fizika súlyos, megoldhatatlannak látszó problémájához: a mikrovilág, úgymint az elektronok, atomok, molekulák és természetesen a foton nem képzelhető el szemléletes makroszkopikus modellben. Sokan próbálkoztak már az atom, mint térbeli objektum lerajzolásával, térbeli modellezésével. A vegyészek a kémia szempontjából többé-kevésbé sikeresen modellezik az atomot, talán mindenki emlékszik arra az iskolai demonstrációs eszközre, mely a különböző atomokat különböző színű golyókkal modellezi, és az atomok kötéseit összekötő pálcikákkal (vegyértékekkel) teszi szemléletessé. Sajnos a mikrovilág valósága nem ilyen egyszerű. Ha viccesek akarunk lenni, az atomot a biológusok valamilyen egysejtű lénynek, a méhek hatszögletűnek, a nyulak káposzta formájúnak képzelik. Az atomot egy speciális eszközzel úgymond, le lehet „fényképezni”, ez az ún. *téremissziós mikroszkóp*. Ennek részleteit itt nem ismertetjük, mivel számos tankönyvben, szakkönyvekben megtaláljuk. Fontos tudni azonban, hogy az ilyen „atommikroszkóp” az atomokból álló fémkristály rácsnak csak egy „interferenciaképét” adja, mely kaleidoszkópképhez hasonlatos, de egészen biztosan nem az atomok valós fényképe.

Miért nem lehet lefényképezni az atomot? Az ok végtelenül egyszerű, egy atom megvilágítás hatására fényfelvillanást, egy specifikus színű (meghatározott energiájú) fotont bo-

csát ki egy időpillanatban, egyetlen pontból. A fényképnek síkban elrendezett képpontokból kell állnia, ezt egyedül egyetlen atom nem tudja produkálni, csak azon atomok sokasága, melyekből egy makroszkopikus tárgy áll.

Ennek a rövid kitérőnek értelme csupán abban állt, hogy be kell látnunk, a mikrovilágot szemléletesen nem tudjuk elképzelni, egyetlen megismerési eszközünk csak a matematika marad. A matematikai modelleknek tükrözniük kell a kísérleti adatokat, a mérhető foton energiákat, az atom, vagy molekula színeképét (spektrumát), stb. Ma már a mikrovilág számtalan kísérleti adata rendelkezésünkre áll, a fizika alapvető feladata, hogy ezeket minél pontosabban értelmezni tudja.

A Planck állandó a legtöbb esetben az emittált, vagy abszorbeált foton energiájának kifejezésében fordul elő. A foton az elektromágneses hullám kvantuma, zérus nyugalmi tömegű, ezért a részecske kifejezés talán túl erős. A foton mégis részecskének számít abban az értelemben, hogy van saját impulzusmomentuma (ezt *spinnek* nevezzük, mely a részecskék meghatározó tulajdonsága, a foton spinje egységnyi). Kísérletileg lehet a fotonok akár egyenkénti detektálása is, de ennek részleteibe itt nem megyünk bele. A modern fizika érdeklődésének súlypontja az anyag és a fotonok kölcsönhatása. Ebben kulcsszerepet játszik a foton, mint az elektromágneses tér energia és impulzus hordozója.

A fotont jellemző fizikai adatok összefoglalva a következők:

A foton energiája:	$E = \hbar \omega$
A foton impulzusa:	$p = E / c = \hbar \omega / c$
A foton spinje:	$S = \hbar$
A foton hullámhossza:	$\lambda = c / f \equiv c / 2\pi\omega$

Van még egy fontos tulajdonsága a fotonnak, éspedig a *polarizációs állapota*. Már régen ismert volt a klasszikus elektrodinamikából, hogy az elektromágneses hullám *transzverzális* hullám. Az elektromágneses hullámokban, így a fényhullámokban is az elektromos és mágneses erőkterek váltakozva, egymásra merőlegesen, és a terjedés irányára is merőlegesen oszcillálnak. Egy közönséges fényforrás (egy közönséges izzólámpa fénye, de maga a napfény is) olyan elektromágneses hullámokból áll, amelyben a térerősségek iránya tetszőleges a terjedés irányára merőleges síkban. Ezt nevezzük polarizálatlan fénynek. Polarizátor segítségével kiszűrhetők azok a fényhullámok (fotonok), melyekben a térerősségek azonos irányokban oszcillálnak. Ennek az elvnek alapján működnek a polarizációs napszemüvegek, melyek két, egymásra merőleges polarizátort tartalmaznak egymással fedésben. A külső polarizátor által átengedett polarizált fényt a belső polarizátor csak abban az esetben engedi át, ha a két polarizátor szűrési iránya megegyezik. Amennyiben az egyik polarizátort lassan elfordítjuk a másikhoz képest, a napszemüveg egyre kevesebb fényt enged át. Ezzel érhető el a napszemüveg fényerő szabályozása. Mesterséges elektromágneses hullámokat állítanak elő a különböző rádió-, és televíziós adók, rövidebb hullámhosszakon ezeknél is megvalósítható polarizált hullámkibocsátás. Hogy a közeli adók ne zavarják egymást, szokásos vízszintes, illetve függőleges polarizációjú adással sugározni, és a vevőantennát ezért kell vízszintes, illetve függőleges síkba állítani. Hasonló megoldásokat alkalmaznak a sok csatornán, egy időben párhuzamosan sugárzó műholdas TV-adók is, az egyes csatornák megbízható szétválasztására.

Az energiakvantálás területén az 1925-26-os évek jelentették a nagy áttörést, *Heisenberg*, *Schrödinger*, *Pauli*, *Dirac* és mások munkásságának köszönhetően, akik megalkották a mechanika mikrovilágra érvényes változatát, a kvantummechanikát. A kvantummechanika kissé módosította Planck által megadott (1.4) oszcillátor-energia képletet:

$$E_n = (n + 1/2)\hbar\omega; \quad E_0 = \hbar\omega/2; \quad (n = 0, 1, 2, \dots). \quad (3.2)$$

A képletben E_0 az oszcillátor ún. *zérusponti energiáját* jelöli, melyet az oszcillátor nem tud kisugározni. Ez azt fejezi ki, hogy az atomi oszcillátoroknak még a legalacsonyabb hőmérsékleten, az abszolút zérusponton is marad „kinetikus” energiájuk, tehát az anyag mozgása abszolút nulla hőmérsékleten sem szűnik meg. A kvantummechanika azt is megmutatta, hogy a *kvantált harmonikus oszcillátor* (KHO) által emittált, vagy abszorbeált energia minden esetben kizárólag csak $\hbar\omega$ értékű lehet:

$$\Delta E = E_n - E_m = \pm\hbar\omega; \quad (n = 1, 2, 3\dots; m = n \mp 1). \quad (3.3)$$