

# KROÓ NORBERT

## A fény fizikája



*Kroó Norbert  
fizikus  
az MTA alelnöke*

A körülöttünk lévő élettelen világról való ismereteink igen jelentős hányadát fény, általánosabban fogalmazva elektromágneses sugárzás útján szerezzük. Az ősrobbanástól az atomok szerkezetéig ez sok mindenre igaz. Kiemelkedő fontosságú a látható fény (optika), hiszen az életfolyamatok és természetesen maga a látás ebben a tartományban zajlik, ugyanakkor ez az egész elektromágneses spektrumnak csak egy igen szűk tartománya. A képzőművészetektől a hírközlésen keresztül a tudományos kutatásokig sok területen van alapvető jelentősége a fénynek. De miniatürizálásra törekvő világunkban is előtérbe került a fény. Megszoktuk, hogy a fény hullámhossza határt szab az optikai rendszerek felbontóképességének, egy „újfajta fény” azonban megteremtette annak lehetőségét, hogy ezen a korláton átlépjünk. Olyan optikai elemeket és chipeket hozhatunk így létre, amelyek versenytársai lehetnek, sőt lekörözhetik a jelenleg használt elektronikus chipeket nagyobb elemsűrűségükkel, sebességükkel és egy sor más előnyös tulajdonságukkal. Ez a felfedezés olyan paradigmaváltás forrása lehet, mint az elektronsövekről a tranzistorokra való áttérés.

1934-ben született Budapesten. 1958-ban végzett az ELTE Természettudományi Karának fizikus szakán. 1964-ben a fizikai tudományok kandidátusa, 1968-ban akadémiai doktora lett. 1985-től az MTA levelező, 1990-től rendes tagja, majd 1999-től főtitkára.

Pályáját az MTA KFKI Szilárdtest-fizikai Kutatóintézetében kezdte, ahol hosszabb-rövidebb megszakításokkal négy évtizeden át dolgozott: 1981–1998 között mint igazgató. Közben kutatásokat végzett Svédországban, igazgatóhelyettese volt a dubnai Egyesült Atomkutató Intézetnek. Az ELTE és a BME címzetes egyetemi tanára, 2000-től az Európai Tudományos Alapítvány kormányzótanácsának tagja.

Főbb kutatási területei: a szilárdtestek fizikája, az optika és a neutronfizika. Kísérleti munkái során vizsgálta a szilárdtestek és folyadékok mikroszkopikus tulajdonságait neutronsugárzás, valamint fény, elsősorban lézerefény segítségével. Foglalkozott új típusú lézerek létrehozásával és alkalmazásával, különös tekintettel az orvosi, technológiai és mérés technikai felhasználásokra. Legutóbbi munkáiban egy új típusú extrém felbontású mikroszkóp kifejlesztésén, illetve felületfizikai alkalmazásán fáradozott. Több mint 40 bejegyzett szabadalma van.



## A fény mint hírvivő

### Elektromágneses sugárzás:

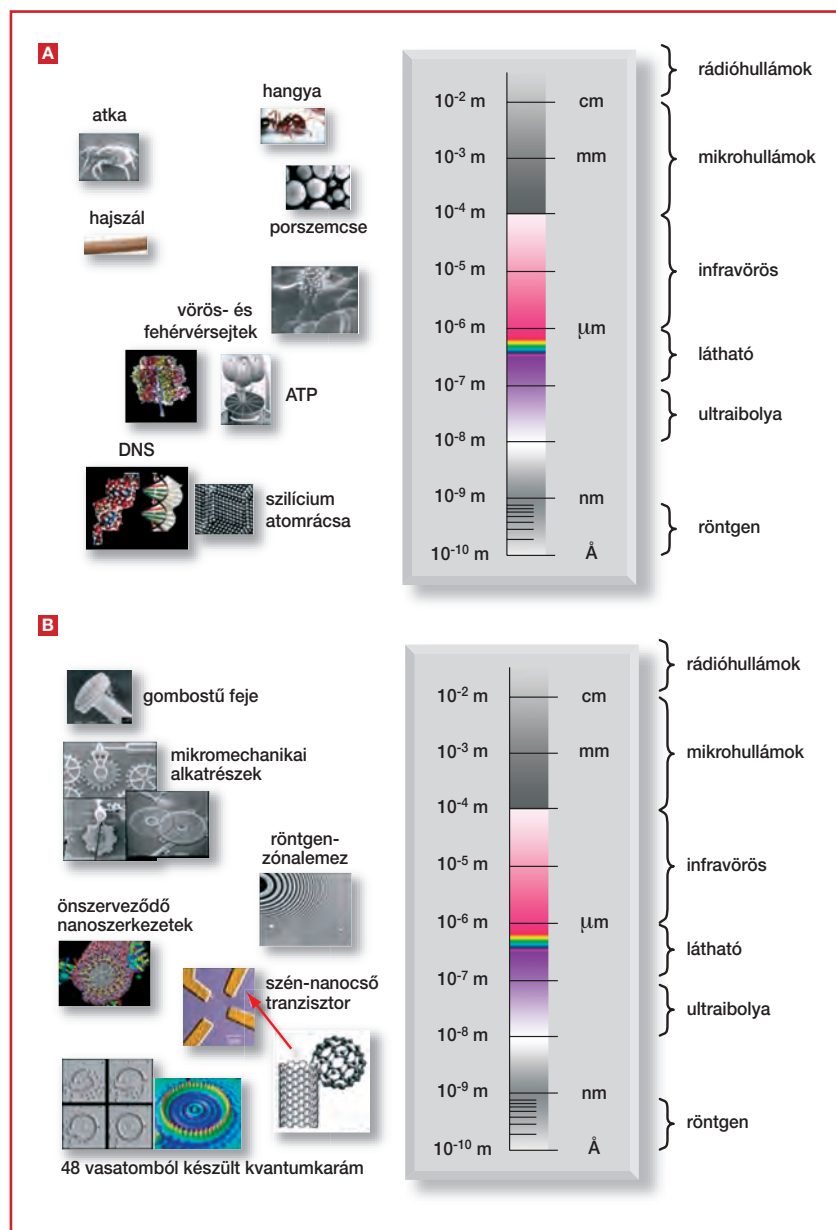
az elektromágneses sugárzás egymásra merőlegesen haladó oszcilláló elektromos és mágneses tér, mely a térben hullám formájában terjed energiát és impulzust szállítva. Részecskéi (kvantumai) a fotonok. A 380 nm és 780 nm közötti hullámhosszú elektromágneses sugárzás az emberi szem számára is látható.

### Gamma-sugárzás:

a radioaktív sugárzás egy formája. A gamma-sugárzás mint elektromágneses sugárzás a látható fényhez hasonló jelenség. A különbség csupán abban áll, hogy fotonjainak energiája akár milliószorosa is lehet a látható fényrészecskéének. A gamma-sugárzás töltéssel nem rendelkezik, ezért áthatoló képessége igen nagy, roncsoló képessége azonban kisebb a többi sugárzásénál. Külső sugárforrásként azonban mégis a gamma-források a legveszélyesebbek, mivel leárnýékolásukhoz vastag ólom- vagy betonréteg szükséges.

„Tudományos haladásaink eddig csak zavart idéztek elő, így szólnak sokan. Igaz, de a világozágnak, mellyel a teremtés megkezdett, nem az volt-e első eredménye, hogy a létező kaósz feltűnt, és vajon azért a kaósz a világozágnak tulajdonítjuk-e?” – írta Eötvös József a 19. században, abban az időszakban, amikor James Maxwell az **elektromágneses sugárzás** tulajdonságait leíró és azóta is pontosnak tartott egyenleteit felírta.

Elektromágneses sugárzás töltött részecskéik gyorsulásakor keletkezik, és hullámhossztartománya a  **$\gamma$ -sugaraktól** a rádióhullámokig széles tartományt fed le. Minden szegmense a világról szerzett ismereteink jelentős részének eszköze. De tágra értve a technológiák, vagyis az emberi beavat-



*Az elektromágneses sugárzások hullámhossztartománya, természetes (A) és mesterséges (B) struktúrák*

kozással előállított struktúrák mérettartománya is ugyanezt a széles tartományt fedi le.

Ennek a széles tartománynak egy igen szűk szegmense a látható fény, amelynek különös jelentősége van számunkra, mivel szemünk érzékenysége erre a területre korlátozódik, és a biológiai folyamatok energia-, illetve hullámhossztartománya ( $E = hc/\lambda$ , ahol  $h$  a Planck-állandó,  $c$  a fénysebesség, ami vákuumban 300 000 km/sec) is a látható és ennek közeli szomszédságába eső területre esik.

A fény tehát életünk fontos része. Hajtja a növények fejlődését, amelytől minden élet függ, lehetővé teszi napi tevékenységeink garmadáját, és mindezt természetesnek tartjuk. De kevesen realizálják, hogy az optikai sugárzás jelentős hatással van az ipari tevékenységre, az orvoslásra, a környezetre, a hírközlésre vagy akár a védelmi erőfeszítésekre is.

A vizuális művészetek megszépítik életünket, és egyúttal egy másik dimenzióban bővítik ismereteinket, de a fényhatással járó természeti jelenségek is lenyűgözik a figyelmes szemlélőt. Külön kiemelném az úgynevezett „fénykutya” jelenséget, amelynek során a lenyugvó nap sugarai a felhőkben keletkező jégkristályokon szóródnak, ami több „melléknep” megjelenését eredményezi. De akár a víz alatti színes világ megfigyelése is gyönyörrel tölthet el bennünket.

De haladjunk visszafelé az időben mintegy 13,7 milliárd évet, és köveszük a világegyetem fejlődését napjainkig.

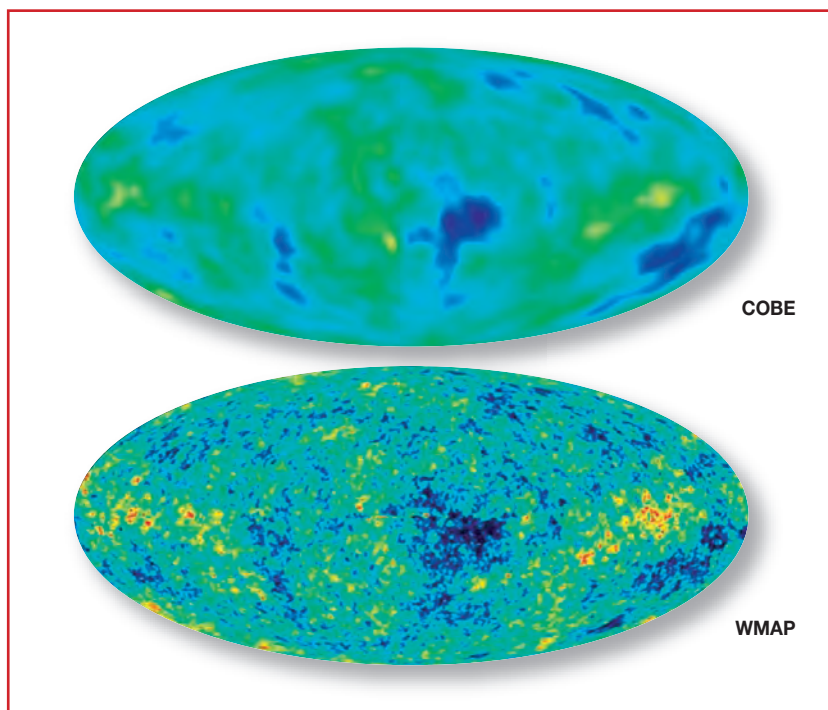
Amit erről a folyamatról tudunk, annak zömét is fény útján gyűjtöttük össze. Az ősrobbanás után mintegy háromszézer évvel átlátszóvá lett a világ, az elektromágnes sugárzás áthatolt az útjában lévő anyagon, és tágulva hűlni kezdett – ugyanúgy, mint a szóдавíz előállítására patronba préselt  $\text{CO}_2$  gáz –, és mára mintegy 3 °K-ra hűlt. Két műhold (a COBE és a WMAP) is mérte en-

#### Kozmikus háttérsugárzás:

az a milliméteres és centiméteres hullámhossztartományban észlelhető rádiósugárzás, mely a világegyetem minden irányából egyenlő intenzitással érkezik. Ez a sugárzás pontosan egy 3 °K-os fekete test sugárzásának felel meg. A ma elfogadott elmélet szerint a sugárzás négy-százézer évvel az Ősrobbanás után keletkezhetett, amikor az univerzum hőmérséklete 3000 °K-ra csökkent, a mostani állapot a világegyetem folyamatos tágulása miatt alakult ki.

#### Trifid-köd:

a Trifid-köd a Földtől 5400 fényévnnyire, a Sagittarius csillagképben található óriási por- és gázfelhő, melyben aktív csillagkeletkezési folyamatok zajlanak. A Trifid-köd azért is különleges objektum, mert van egy mindössze háromszézer éves nagy tömegű központi csillaga, aminek a sugárzása és csillagszele alakította ki a köd most megfigyelhető üreges formáját. A csillagszél azonban a lökéshullámokhoz hasonlóan lokális sűrűsödéseket is létrehozott a környező por- és gázfelhőkben, amelyekbe aztán a megnövekedett gravitáció miatt további anyag kezdett el behullani, míg ki nem alakultak az első csillagkezdemények. Idővel ezek a csillagembriók elegendő anyagot gyűjtöttek össze ahhoz, hogy a magjukban beinduljanak a nukleáris folyamatok.



A világegyetem háttérsugárzása



nek a sugárzásnak a hőmérséklet-eloszlását és annak inhomogenitását, és e megfigyelések, vagyis a sugárzás inhomogenitása alapján megérthetjük az „anyagcsomósodások”, vagyis a csillagok és a galaxisok létrejöttét.

De a világegyetem távoli részeiből jövő fény vizsgálata a csillagok fejlődésének nyomon követését is lehetővé teszi. A Hubble űrteleszkóp egyik korai felvételsorozata, amely a teremtés három oszlopa nevet viseli, betekintést enged ebbe a csodába.

Még szebben látható ez a **Trifid-köd**ről készült felvételen az alábbi képen, amelyen jól kivehető, hogyan szívják fel a csillagok gravitációs vonzásuk útján a csillagközi tér anyagát.

Trifid-köd



#### Szupernóva:

a Napnál jóval nagyobb tömegű csillagokat életük végén a hatalmas gravitáció hirtelen összeroppantja, mintegy felrobbantja. Ekkor az égitest rövid ideig fényesebben világít, mint egymilliárd Nap, sőt akár saját galaxisának a fényességét is túlragyoghatja. A robbanás után egy néhány tucat kilométeres csillagroncs marad vissza, melynek tömege azonban még mindig jóval nagyobb, mint a Napé. A mi Tejútrendszerünkben legutoljára 1054-ben történt szupernóva-robbanás, az égen ma is megfigyelhető a csillag által szétszórta anyag. A csillagászok Rák-ködnek nevezték el ezt a szupernóva-maradványt.

#### Polarizáció:

az a sík, amelyben a fény elektromos tere változik. Ha ez állandó, polarizált fényről beszélünk.

A csillagfejlődés későbbi fázisa például egy **szupernóva**-robbanás formájában is nyomon követhető.

De jöjjünk közelebb térben (és időben). Gondolom, mindnyájan csodálkozással és kíváncsian figyeltük azokat a gyönyörű képeket, amelyeket néhány hónapja közvetítettek a Marson sikeresen tevékenykedő robotjárművek kamerái.

A fény azonban sokkal több számunkra, mint a körülöttünk lévő világ megismerésének eszköze. Fosszilis energiaforrásaink tulajdonképpen az évmilliók folyamán tárolt napfény energiáját szabadítják fel. De a földi élet ma is a napfény kihasználására épül. Ennek egyik tipikus megnyilvánulása a növényi életfolyamatok alapja, a fotoszintézis, de mi, emberek is nap mint nap találkozunk a napsugarak hasznos (és káros) hatásaival.

## Mi is valójában a fény?

Samuel Johnson szerint mindnyájan tudjuk, hogy mi a fény, de nehezen tudjuk megmondani.

Úgy gondolom – és ezt a Mindentudás Egyeteme számos korábbi elő-

adása is alátámasztotta –, hogy a legegyszerűbb választ a feltett kérdésre a fény tulajdonságainak leírásával adhatjuk meg.

A geometriai optika a fényt sugarak formájában írja le, amelyek visszaverődnek felületekről, elhajlanak, ha más tulajdonságú (törésmutatójú) anyagba lépnek. E jelenségek alapján tükrök és lencsék hozhatók létre, és ezeknek az elemeknek a felhasználásával kamerákat, teleszkópokat vagy mikroszkópokat építhetünk.

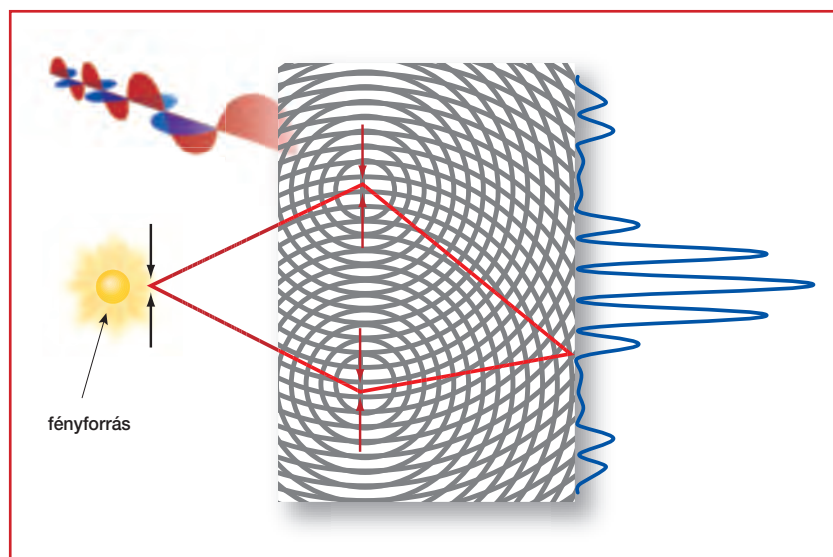
A fizikai optika a fényt hullámként fogja fel, amelyet hullámhossza, rezgési síkja, vagyis **polarizációja**, terjedési sebessége (amely közegfüggő) és intenzitása jellemezhet. A hullámok egymással interferálhatnak, mint azt az alábbi ábrán is láthatjuk: azonos hullámhosszú fény két résen áthaladva fényes és sötét csíkokból álló **interferenciaképet** eredményez.

A **kvantummechanika** megszületése a fényről alkotott ismereteinket is alaposan átalakította. A hullámtulajdonság mellett (sőt azzal együtt) megjelent a részecskeszerű viselkedés (és természetesen ennek magyarázata). Ennek legdemonstratívabb példája a **fényelektromos jelenség**, melynek magyarázatáért (1905) Albert Einstein Nobel-díjat kapott.

Az alapmegfigyelés a következő: fény hatására a fémekből elektronok léphetnek ki, de ez függ a fény hullámhosszától. Csak egy jól meghatározott hullámhossz alatt (frekvencia felett) lép fel a jelenség, és a kilépő elektronok sebessége (mozgási energiája) a fény rezgésszámától és nem intenzitásától függ.

Ez csak a fény részecsketulajdonsága alapján érthető meg. A foton mint részecske jelenik meg egy másik példában is. A kétréses interferenciakísérletet, melyet az alábbi ábra szemléltet, elvégezték csökkenő fényintenzitás mellett egészen addig a szélsőségig, amikor egy időben csak egy foton lehetett jelen a mérőberendezésben, és az interferenciacsíkok megjelenése ebben az esetben sem maradt el.

Ez azt bizonyítja, hogy a foton önmagával is képes interferálni, vagyis egyszerre bizonyos valószínűséggel mindkét résen haladhat át. Ez a megfigyelés a kvantummechanika eszközeivel jól leírható és magyarázható.



### Interferencia:

hullámok találkozásakor fellépő jelenség. Ha egy pontban kettő vagy több hullám találkozik, akkor ebben a pontban a hullámok összeadódnak. Ha két azonos frekvenciával rezgő hullámforrás által kibocsátott hullámok adódnak össze, akkor a két hullám egy pontban erősítheti vagy gyengítheti egymást. Ebben az esetben időben állandó hullámkép alakul ki, ezt a jelenséget nevezzük interferenciának.

### Kvantummechanika:

az elemi részecskék fizikájának elmélete. A kvantummechanika néhány alapelvől származtatott matematikai apparátusa kísérletileg ellenőrizhető jósálatokkal szolgál olyan jelenségekre, amelyekre a klasszikus mechanika és a klasszikus elektrodinamika nem képes. Ilyenek a kvantálás, a hullám-részecske kettősség, a határozatlansági elv és a kvantumcsatolás.

### Fényelektromos jelenség:

fény hatására szilárd anyagok (fémek, félvezetők) felületéből elektronok léphetnek ki, ha az egyes foton energiája elég nagy az elektronok kiszakítására. Számos, a gyakorlati életből is ismert eszköz (például napelem) ezt a jelenséget használja ki.

*Kétsugaras interferenciakísérlet*



Az előadás ezen első részében még egy témára kívánok kitérni azzal a céllal, hogy valamiféle összefoglaló ernyőt borítsak a fölé a sok előadás fölé, mely valahogyan a fényhez kapcsolódott a Mindentudás Egyetemén. Ez a téma a fény előállítása. Tudjuk, hogy a világegyetemből (elsősorban a Napból) hozzánk érkező fény termonukleáris „kályhákból” származik. Mindennapi életünk azonban nagyszámú mesterséges fényforrást is kihasznál. A különböző világító forrásoktól a nagy teljesítményű **lézerek**ig sok minden került elő a Mindentudás Egyeteme előadásában is. Nem kívánok ezekre újra kitérni, csak felsorolok néhány példát a  $0,1 \text{ W/cm}^2$ -től a világrekord  $10^{21} \text{ W/cm}^2$  teljesítménysűrűségig, nem említve a  $0,1 \text{ W/cm}^2$  alatti, egészen az egyes fotonokig terjedő tartományt.

Fényforrások  
teljesítménysűrűsége

### Lézer:

az angol LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – fényerősítés kényszerített fénykibocsátás útján) betűszóból származik, s egy eszközcsalád működési elvét jelenti. Tapasztalataink szerint a fénynyalábok valamilyen közegen keresztülhaladva általában gyengülnek. 1917-ben azonban Einstein elméleti megfontolások alapján megjósolta, hogy létezik egy jelenség, a kényszerített emisszió, amely lehetővé teszi fénynyalábok erősítését is. Az ennek során keletkező erősödő fény tökéletesen rendezett (úgynevezett koherens) nyaláb, amelynek széttartása rendkívül kicsi – például egy megfelelő optikával a Földtől 380 ezer kilométerre lévő Holdra juttatott lézernyaláb átmérője mindössze 50 méter lesz. Másik kedvező tulajdonsága, hogy a lézer energiája egy megfelelő lencsével nagyon kis foltra (körülbelül egy tízmilliomod  $\text{mm}^2$ -re) fókuszálható le.

napsugárzás a földfelszínen	$0,1 \text{ W/cm}^2$
izzólámpa felülete	$1 \text{ W/cm}^2$
lézermutató a retinára fókuszálva	$100 \text{ W/cm}^2$
a Nap felületén	$10^4 \text{ W/cm}^2$
a legintenzívebb folyamatos lézer (fókuszálva)	$10^9 \text{ W/cm}^2$
egy szupernóva felületén	$10^{10} \text{ W/cm}^2$
impulzuslézerek (1970-es évek)	$10^{12} \text{ W/cm}^2$
(1980-as évek)	$10^{15} \text{ W/cm}^2$
(1990-es évek)	$10^{19} \text{ W/cm}^2$
világrekord	$10^{21} \text{ W/cm}^2$

Ezek a különböző elveken nyugvó és különböző tulajdonságokkal is rendelkező fényforrások a tudományos kutatás, az orvosi diagnosztika és terápia, a precíziós mérés technika, az ipari technológiák, az információs és kommunikációs technológiák, a hadászat, vagyis – mint már említettem – az emberi tevékenység minden területén megtalálhatók.

## Az elektronikus chipek versenytársa

Az előadás további része a jövőről szól, s egy olyan példát mutat be, mely szorosabban kötődik szakterületemhez, és amely igen kedves a szívemnek.

A miniaturizáció területére kalauzolom önöket. Sok területen sikerül megvalósítani azt a szándékot, hogy a fényt az információs és kommunikációs technológiák szolgálatába állítsuk. Gondoljanak csak a fényvezető optikai szálakon továbbított információra, a litográfiára vagy a félvezető lézerek-

re. Nem sikerült azonban megkerülni azt az alapvető törvényt, hogy az alkalmazott fény hullámhosszánál jóval kisebb méretek optikai módszerekkel történő felbontása lehetetlen.

Most megkísérlem meggyőzni önöket arról, hogy ez mégis lehetséges. Ehhez a manapság oly divatos nanotechnológia birodalmába kell belépünk. A nanotechnológia arra törekszik, hogy az atomok és a molekulák méretével vetélkedő alkatrészekből állítson elő eszközöket. Természetesen ez csak fokozatosan, lépésenként érhető el. A mikrométeres mérettartomány gépei azonban már bevonultak a gyakorlatba.

De ha már a mechanikus eszközöknél tartunk, szeretném megemlíteni: további méretcsökkentéssel sikerült demonstrálni, hogy a mechanikus rezgő rendszerek memória célú felhasználása is lehetséges, sőt már a fénnel hajtott mikrogépek alkalmazása is gyakorlati lehetőség.

A továbbiakban egy új fejleményről kívánok beszélni, amely rövid időn belül olyan paradigmaváltást eredményezhet, mint a szállításban a hajóról a repülőre, vagy az elektronikában az elektronsőről a **tranzisztorra** való áttérés.

Emlékeztetni szeretnék arra, hogy a félvezető anyagokból azért lehetett tranzisztorokat, diódákat, fényemittáló diódákat és lézereket létrehozni, mert van bennük egy olyan anyagfüggő energiasáv, amelyben nem tartózkodhatnak elektronok, ezért tiltott sávnak nevezzük.

Ebben a tiltott sávban szennyezésekkel olyan energianívókat hozhatunk létre, amelyek ugyancsak szükségesek a legismertebb félvezető elemek, a tranzisztorok működéséhez. A tranzisztor legegyszerűbb formájában két különböző, a félvezető anyagnál több (donor  $\equiv$  n-típusú), illetve kevesebb (akceptor  $\equiv$  p-típusú) elektronnal rendelkező atomokkal szennyezett réteg kombinációjából áll p-n-p vagy n-p-n formában, és a rajta keresztül folyó áramot külső feszültség segítségével szabályozni lehet.

Felmerül a kérdés: nem lehetne-e fénytranzisztort, vagy más, az elektronikában használatos elem optikai megfelelőjét létrehozni? Ehhez az elektronikus analógia alapján olyan szerkezetet kellene megalkotni, amelyben van olyan energiasáv, amelybe eső energiájú fotonok nem terjedhetnek. Ilyen szerkezetet mind két, mind három dimenzióban sikerült felépíteni.

Természetesen a létrehozott rács egyes elemei közötti távolságnak ehhez az alkalmazott fény hullámhosszának nagyságrendjébe kell esnie. Látható fény esetében ez azt jelenti, hogy mintegy  $0,5 \mu$  körüli értéknél kisebb méretű elemeket nem lehet létrehozni, de ezek sokkal nagyobbak, mint a jelenlegi elektronikus elemek méretei. Egyébként az ilyen szerkezeteket, mivel a természetben nem léteznek, metaszerkezeteknek nevezzük, de még találabb a **fotonikus kristály** elnevezés. Rácshibákkal egyébként itt is lehet a tiltott sávban szennyezési nívókat létrehozni. Az, hogy ilyen struktúrák a természetben nem léteznek, nem egészen igaz, mivel például a lepkék színes szárnyai is ilyen szerkezetűek, vagyis a természetben is megvalósult a fotonikus kristályok analogonja.

A fotonikus kristályokkal azonban még nem teremtettük meg a miniatürizálás feltételeit a fény hullámhosszához igazodó, már említett felbon-

#### Tranzisztor:

a tranzisztor szilárdtest-félvezető, amelyet elektronikus áramkörökben használnak erősítési és kapcsolási célokra. A tranzisztor három, egymást felváltva követő, különböző vezetési tartományú, egymáson elhelyezkedő rétegből áll. Minden réteg ki van vezetve egy lábra. A két szélső réteget kollektor-nak (C) és emitternek (E) nevezik, a középső réteget bázis-nak (B) hívják. A bázis jóval vékonyabb, mint a másik két réteg. A tranzisztor működése a p-n átmeneti réteg hatásán alapul. Ha a bázison keresztül nem folyik áram, akkor a tranzisztor kollektora és az emittere között sem folyik áram. Amennyiben a bázison áram folyik át, akkor az áram mértékével arányosan folyik áram a kollektor és az emitter között. Mivel a bázisáram jóval kisebb, mint a kollektor–emitter áram, a tranzisztor erősítőként üzemel. Az áramerősítés mértéke akár több százszoros is lehet. Három félvezető réteg két egymással szembe fordított p-n átmenetet alkot. Az NPN-tranzisztor esetén két N-típusú tartomány között egy vékony P-típusú réteg van, PNP-tranzisztor esetén pedig két P-típusú réteg közé kerül egy vékony N-típusú tartomány.



## Fotonikus kristályok

**Fotonikus kristály:**

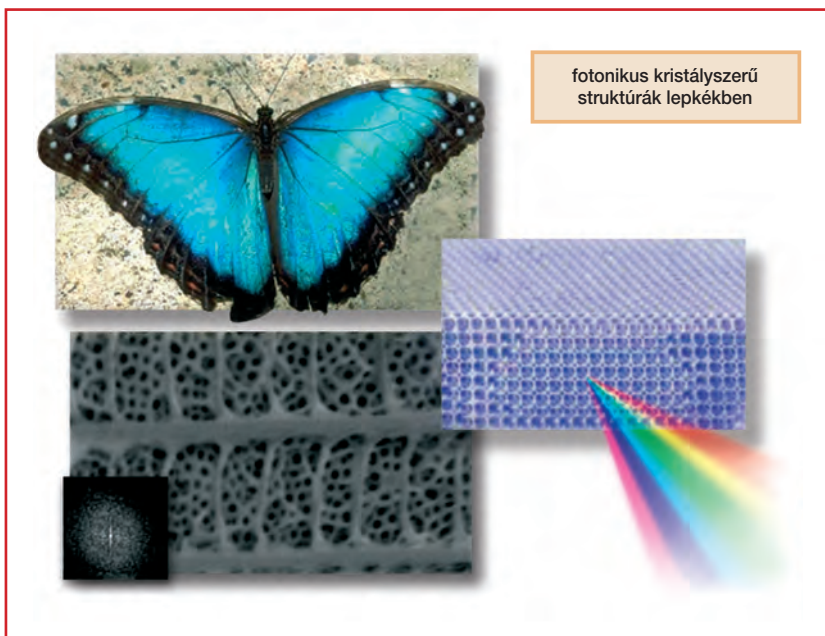
a fotonikus kristályok olyan anyagok, melyek bizonyos hullámhosszúságú fényvel szemben hasonlóan viselkednek, mint a félvezetők a tiltott sávjukba eső energiájú elektronokkal szemben. A fotonikus kristály tiltott sávjába eső energiájú foton nem képes terjedni a szerkezetben, tökéletesen visszaverődik róla. Régóta ismert, hogy egyes kék és zöld színű lepkék – különösen azok, amelyek szárnya fémesen csillog (az egyik legszélesebb körben ismert példát a Dél-Amerikában élő Morpho fajták adják) – nem pigmentációnak, hanem fizikai hatásoknak köszönhetik színüket. Azt azonban csak az utóbbi években ismerték fel, hogy ezeknek a lepkéknek a pikkelyein található fotonikus kristály, jellemzően 100 nm méretű, három dimenzióban periodikus, kitinből felépülő finomszerkezet felelős a színért.

**Diffrakciós limit:**

az optikában ismert törvény, mely szerint az alkalmazott fény hullámhosszánál lényegesen közelebb lévő pontok nem bonthatók fel semmilyen optikai eszközzel.

**Közeli tér:**

egy tárgyról visszaverődő fénynek van egy a tárgytól nagyobb távolságra is megfigyelhető komponense, de van egy felülethez tapadó, attól távolodva csökkenő térerejű komponense. Ez utóbbit nevezzük az optikában közeli térnek.



tókéesség-határ miatt, melyet az optikában **diffrakciós limit**nek nevezünk.

Felmerül a kérdés, hogy lehet-e ezen a problémán segíteni. A válasz: igen, de ehhez egy „újfajta fényt” kell segítségül hívni. Ehhez – legalábbis egy időre – el kell felejtenuünk mindazt, amit az optikáról tanultunk, vagyis amit az eddigiekben tárgyaltunk.

## Felületi plazmonok

Ha egy tárgyat megvilágítunk, azt a róla visszaverődő fény segítségével figyelhetjük meg szemünkkel, mikroszkópon vagy távcsövön keresztül, mégpedig a tárgytól távolabb. Ezért a visszaverődő fény ezen terét távoli térnek nevezzük.

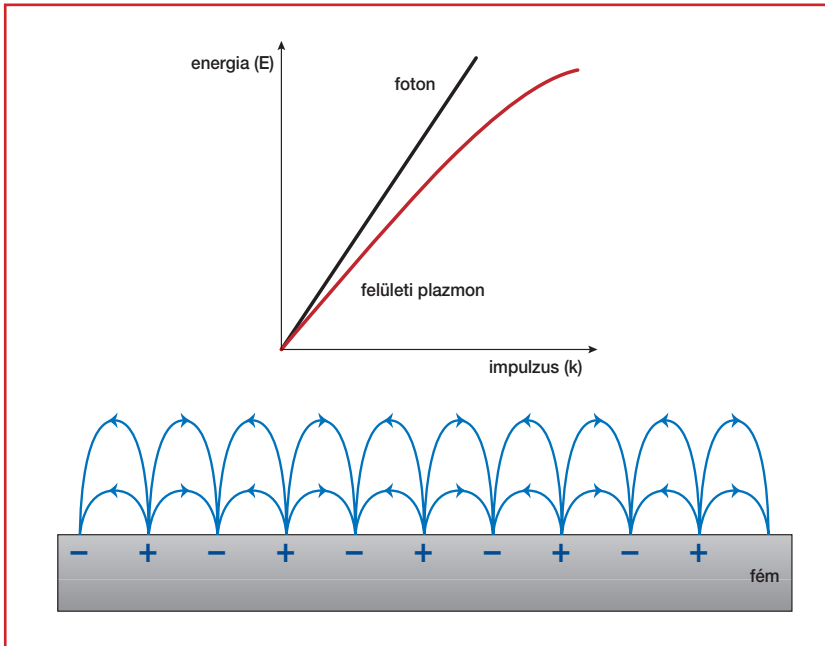
Ebben a térben a fényhullámok elektromos és mágneses tere (elektromágneses tér!) azonos nagyságú és kölcsönösen függ egymástól. De van ennek a fénynek egy másik komponense is, amely a „felülethez ragad”, és amelyben a mágneses komponens gyenge az elektromoshoz képest. Ezt **közeli tér**nek nevezzük. Erre a térre nem érvényes a diffrakciós limit, és az ilyen fényben interferencia sem lép fel. Van tehát remény arra, hogy ilyen fényvel a hullámhossznál (sokkal) kisebb mérettartományban működő struktúrákat tudunk alkotni.

Különösen ígéretes az a speciális eset, amikor a közeli teret egy fém felületén hozzuk létre. Az optika számára a fémek – kivéve a tükröket – nem voltak vonzó anyagok nagy abszorpciójuk miatt. Az úgynevezett felületi plazmonok azonban új lehetőségeket nyitottak.

Mik is ezek a **felületi plazmonok**? Fény segítségével – egy kis ügyeskedéssel – a fém felületén lévő úgynevezett vezetési elektronokat hullámszerűen



mozgásra kényszeríthetjük, melyben sűrűsödések és ritkulások váltják egymást. Ezek hullámhossza azonban rövidebb a gerjesztő fény levegőben megfigyelt hullámhosszánál. A plazmonok energiája és hullámhossza (impulzusa) közötti kapcsolatot diszperziós összefüggésnek nevezzük. A felületi plazmonok hatékony gerjesztése akkor valósul meg, ha a két hullámhossz vagy annak reciproka, az impulzus ( $k = 2\pi/\lambda$ ) egyezik (impulzusmegmaradási törvény).



#### Közelítér-mikroszkópia:

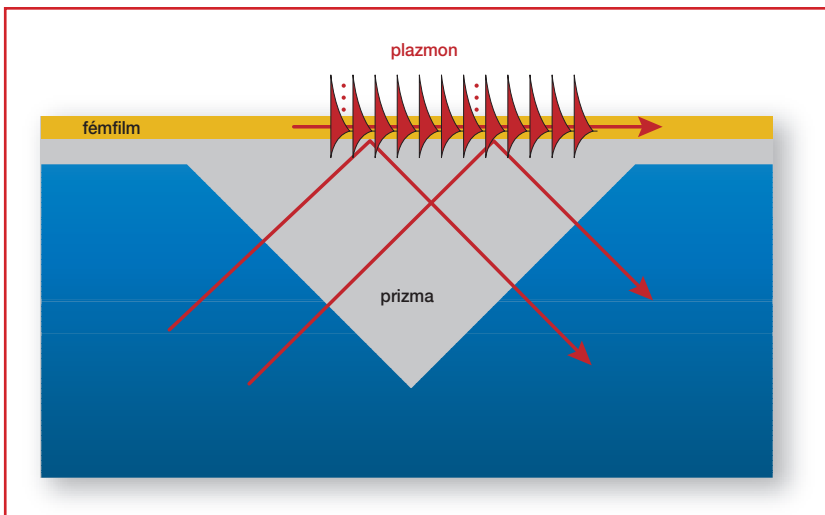
tárgyak felületének a közeli tér letapogatásával kapott képe.

#### Felületi plazmonok:

például fény által egy fém felületén gerjesztett elektronsűrűség-hullámok, melyek a fém felületén közeli teret produkálnak. Ez a felület mentén haladó új típusú fényként fogható fel, amelyre nem érvényes a diffrakciós limit.

*Felületi plazmonok (SPO) elektromos tere és diszperziós összefüggése*

Az üvegekben a fény hullámhossza lényegesen rövidebb, mint a levegőben. Az impulzus tehát lényegesen nagyobb. Megfelelően választott szög alatt beeső fény impulzusának a felületen lévő vetülete megegyezhet a fotonéval azonos energiájú felületi plazmon impulzusával. Ennek a feltételnek a legegyszerűbben úgy tehetünk eleget, hogy üvegprizmára párolunk – igen vékony, áttetsző – fémréteget, és azt a prizma oldaláról világítjuk meg.



*Felületi plazmonok gerjesztése prizmán keresztül*



A beeső fény a prizma–levegő felületről visszaverődik (az optikában ezt teljes visszaverődésnek hívjuk), de a felület levegő felőli oldalán, ahhoz hozzátapadva és attól távolodva exponenciálisan csökkenő térerősséggel megjelenik az óhajtott közeli tér.

Mivel ebben a közeli térben nem érvényes a gerjesztő fény hullámhossza által megszabott felbontóképesség-korlát, segítségével akár a fémbe lévő szomszédos atomok távolságával összemérhető felbontóképességű mikroszkóp építhető.

Egy igen hegyes fémtű hatol be a lézerfényvel, például üvegprizmán keresztül, a vékony fémréteg levegővel határos oldalán gerjesztett felületi plazmonok közeli terébe, amikor is a tű és a fémfelület között a térrel arányos áram folyhat. A tűt a felület felett úgy mozgatjuk, hogy a tőle való távolsága állandó legyen, egy úgynevezett piezoelektromos kerámiára adott feszültség változtatásával. A feszültségváltozás a felület topográfiáját adja vissza, az ugyanekkor mért áram pedig a felületi plazmonok terét, illetve a plazmontér kikapcsolása után az általa a felületen okozott felmelegedést adja meg.

Ilyen típusú mikroszkópokkal atomi léptékű technológiák (nanotechnológia) is megvalósíthatók, például atomokat tologathatunk egy felületen, és tetszőleges rajzolatokat alakíthatunk ki.

Az impulzusmegmaradási törvény teljesülését a foton felületi plazmonrendszerre egy másik lehetséges módon is elérhetjük, amikor a hiányzó G impulzust egy optikai rács teremti meg. Szemléletesen azt is mondhatjuk, hogy a rács hullámos felülete miatt a fény effektív hullámhossza kisebb, tehát impulzusa nagyobb.

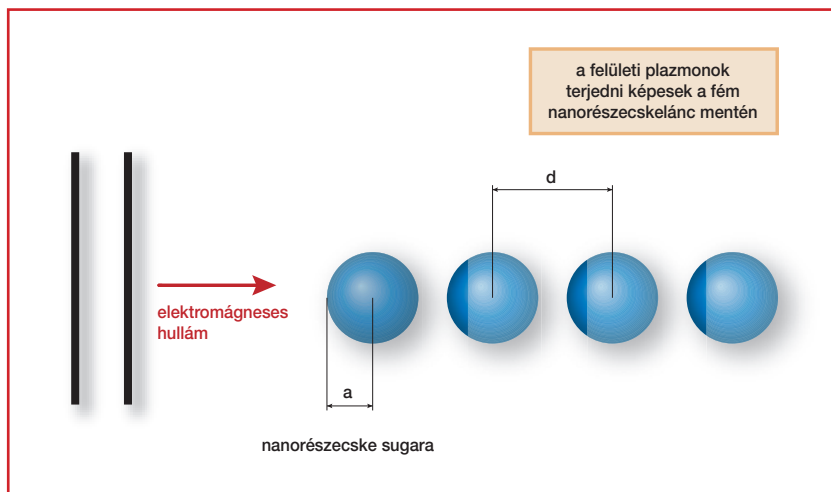
Térjünk most vissza a felületi plazmonok diszperziós összefüggéséhez, és vizsgáljuk azt az esetet, amikor a fény fotonjai és a felületi plazmonok közti csatolást egy optikai rács segítségével valósítottuk meg. Található olyan rácsparaméter, amelynél két (szimmetrikus és aszimmetrikus) módus valósul meg ugyanazon hullámhosszal, de eltérő energiával, vagyis kialakul egy tiltott energiasáv, amelyben fény nem terjedhet, ugyanúgy mint a fotonikus kristály esetében – most azonban a hullámhossz által determinált méretkorlátozás nélkül. A rácsparaméter ekkor egyezik a felületi plazmonhullámhosszal.

Ennek az új típusú fénynek a segítségével tehát megvalósíthatók a félvezetők esetén megismert eszközök (tranzisztor) optikai analogonjai, akár nanométeres struktúrák formájában is. Mivel azonban a fény gyorsabb az elektronok mozgásánál, ezeknek az eszközöknek a sebessége is nagyobb lesz elektronikus megfelelőiknél.

A felületi plazmonok egy nanoméretű fémgömb felületén is gerjeszthetők, és ilyen gömböcskéket sorba rakva azok – hullámvezetőt alkotva – egymásnak adhatják át a gerjesztést. Csökkenő méretű nanogömbök megfelelő távolságra helyezésevel lencsék is létrehozhatók, amelyek a plazmonfényt akár egy nanométeres tartományra lefókuszálhatják. A fémgömbök helyett fémfóliába „égetett” lyukak is megfelelnek.

Ha ilyen (azonos méretű) lyukakból síkrácsot hozunk létre, akkor akár azt is el tudjuk érni, hogy a plazmonfényt (ha megfelelő hullámhosszúságú) merőlegesen eltérüljön.

Néhány éve Thomas Ebbesen norvég fizikus egy érdekes megfigyelést



Nanorészecskelánc

tett. Vékony aranyfóliába  $\sim 200$  nanométeres lyukakat fúrt egymástól  $200$  nanométeres távolságra, és mintegy egymillió ilyen lyukból négyzetrácsot hozott létre. A klasszikus optika szabályai szerint ezen nem szabadna fénynek átlépnie, mégis látta a lemez mögötti tárgyakat.

Pontos méréseket végezve kiderült, hogy több fény jutott át a fólia túlsó oldalára, mint a lyukak összterületére eső fény. Néhány évvel később sikerült is ezt a megfigyelést megmagyarázni azzal, hogy a fény felületi plazmonok közvetítésével lépett a másik oldalra. Ugyanúgy vékony (akár néhány nanométeres) fényzálon terjedhetnek a felületi plazmonok, ami akár arra is lehetőséget ad, hogy az elektronikus chipek elemeit összekötő huzalok is felületi plazmonkapcsolatot teremtsenek az elektronikus chip egyes áramköri elemei között.

Az elmondottak alapján gondolatban felépíthetünk olyan optikai chipeket, amelyekben az elektronikus chipeknél az elektronok mozgása által megvalósuló folyamatokat a felületi plazmonok mozgása váltja fel. A tranzistor helyett „fénytranzistor” az alapelem. Az összekötő vezetékek felületi plazmonhullám-vezetőként működnek. A fényvezető szálon – melynek átmérője mikrométer nagyságrendű – érkező és a feldolgozandó információt hordozó fényt felületi plazmonokká alakítva plazmonlencsék segítségével fókuszálhatjuk le a nanométeres tartományba.

Tehát elvileg a különböző elemek összerakásával többek között tetszőleges információs és kommunikációs technológiai feladatokat ellátó optikai chipeket lehet összeállítani, melyek véleményem szerint tíz–húsz éven belül elektronikus megfelelőik versenytársai lehetnek.

## Atomok, fény és informatika

Végezetül arról, hogy a fény atomi szinten is munkára fogható. Az egyes atomok fénykibocsátásra kényszeríthetők, ami meg is figyelhető. És mivel – mint láttuk – az atomok a közelítér-mikroszkópok tűjével tologathatók, például atomi (esetleg molekuláris) számológépet is lehet építeni.



*A fény. Aba Novák Vilmos  
festménye, 1925*

De tetszőleges számú atom (ion) is sorba állítható alkalmas csapdában, igen alacsony hőmérsékleten.

Ha ezeket az atomokat kvantummechanikailag összekapcsoljuk, egy kvantumszámítógép alapeszközét teremtettük meg. Néhány atommal ez már sikerült is, de a rendszer még „törékeny”, pedig ha ezt több atommal meg tudnánk valósítani, a jelenlegi „klasszikus” számítógépeknél sokkal hatékonyabb kvantumszámítógépeket építhetnénk.

Mint már említettem, a fény sebessége vákuumban  $\sim 300\,000$  km/sec. Sűrűbb anyagban ennél lassabb, de még mindig igen nagy, a törésmutató (az anyag optikai sűrűségét kifejező arányszám, vákuumban 1, üvegekben 1,5 körüli) négyzetgyökével csökken. Két megfelelő színű lézer egyidejű alkalmazásával elérhető, hogy például egy gáz törésmutatója igen nagy, akár végtelen nagy legyen, és ekkor a fény sebessége a gyalogos tempójára csökkenthető, akár megállítható. Ezen jelenség igen ígéretes gyakorlati alkalmazási lehetőségeket sejtet, melyek felvázolása azonban túlmutat az előadás keretein.

Összefoglalva elmondhatjuk, hogy a fény életünk meghatározója, talán a legfontosabb információs forrásunk. Egy újfajta fény a nanotechnológiában – mostanáig a fényt kizáró területen – kecsegtet forradalmian új lehetőségekkel, amelyek a tiltott sáv koncepciójának az elektronikához hasonló alkalmazásán és a felületi plazmonok felhasználásán alapulnak. A fény sebessége tetszőlegesen csökkenthető, ami újabb alkalmazásokhoz vezethet, és reményünk van arra, hogy a kvantummechanika elvein működő számítógépet építhetünk, ahol a fénynek is szerepe lehet.

## Ajánlott irodalom

*Csillag László – Kroó Norbert: A lézerek titkai.* Bp.: Kozmosz könyvek, 1987.

*Scully, Marlan O. – Zubairy, M. Suhail: Quantum Optics.* Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

*Vogel, Werner – Welsch, Dirk-Gunmar – Wallentowicz, Sascha: Quantum Optics An Introduction.* Weinheim: Wiley-VCH, 2001.

*Walther, Thomas – Walther, Herbert: Was ist licht? Von der klassischen Optik zur Quantenoptik.* München: Verlag C. H. Beck, 2004.

