

1. A távérzékelés alapfogalmai és fizikai háttere

1.1. A távérzékelés meghatározása

A **távérzékelés** lényege adatgyűjtés a vizsgálatra kiválasztott természetes vagy mesterséges tárgyakról, területekről, felszínformákról (morfológiai elemekről, pl. hegyek, völgyek, hegységek, medencék stb.), földtani képződményekről (pl. vulkánok, árkok, redők stb.) olyan módon, hogy az adatgyűjtő eszköz nem kerül közvetlen fizikai kapcsolatba ezekkel, csupán az általuk *kibocsátott (emittált)* vagy *visszavert (reflektált)*, valamint az általuk *átbocsátott (transzmittált)* elektromágneses hullámokat vagy mechanikai rezgéshullámokat, illetve fizikai mezők (gravitációs, mágneses, elektromos) jellegét és változásait érzékeli. E jellegzetességek és azok változásai összefüggenek az észlelendő tárgy vagy jelenség bizonyos anyagjellemzőivel (pl. rezgéshullámok esetén a sűrűséggel, a halmazállapottal és az anyagszerkezettel), így lehatárolhatóak az adott paraméterben különböző tulajdonságú anyagokat tartalmazó térrészek, illetve meghatározható a határfelületek helyzete. A szűkebb értelemben vett, a Föld felszínére (szárazföldekre és tengerekre) irányuló távérzékeléses vizsgálatok repülő eszközökről, a levegőből vagy a világürből történnek (a tengerfenékre vonatkozóak pedig a vízfelszínről), de módszerüket tekintve a távérzékelés témakörébe tartoznak (akár a földfelszínről, akár repülő eszközről) a Föld belsejére, a földi légkörre, a világűrre és más égitestekre irányuló (geofizikai, meteorológiai és csillagászati) vizsgálatok is.

Az ilyen adatgyűjtés **előnye**, hogy

- a közvetlen észlelésekhez képest jóval nagyobb területről szolgáltat átfogó, az adatgyűjtés módszere tekintetében egynemű (homogén) információt, és így nemcsak az adatgyűjtés igen hatékony módja, hanem ráadásul nagyobb léptékű összefüggések (pl. térképi léptékű nagyszerkezeti formák) felismerésére teremt lehetőséget;
- a közvetlen észlelés számára hozzá nem férhető térrészekből is nyerhető információ (pl. Föld belseje, tengerfenék és magaslégkör, más égitestek felszíne);
- lehetőséget teremt a különböző tudományágak (meteorológia, geomorfológia, hidrológia, talajtan, geológia, biológia, archeológia) által vizsgált jelenségek együttes, kölcsönhatásaik közbeni megfigyelésére.

A távérzékeléses adatgyűjtés **hátránya**, hogy

- korlátozott az észlelés felbontása;
- a közvetlen anyagvizsgálatok nem mindegyike hajtható végre ilyen módon kellő pontossággal (pl. mechanikai paraméterek mérése, ásványok meghatározása);
- mivel a visszaverődés és a kibocsátás általában a vizsgált tárgy *felületéről* érkezik, csak a felszínről kapunk információt.

A felhasznált **hullámok és mezők forrásai alapján** kétféle távérzékelés különböztethető meg. **Passzív**nak nevezzük azon formáit, amikor természetes eredetű sugárzásokat (pl. napfény, napszél, radioaktív sugárzások) és mezőket (pl. a Föld gravitációs és mágneses mezeje) észlelünk, továbbá más (nem távérzékelési) célból keltett mesterséges sugárzásokat (pl. távközlési célú rádióadásokat) használunk fel. **Aktív** formák azok, amelyek esetében magunk generáljuk az információt hordozó sugárzást vagy mezőt (pl. radar, szonár [hangradar], lézer).

Az adatgyűjtés **módszere** többnyire *képalkotás*: az elektromágneses hullámok észlelése esetében lényegében a fotoeffektust kihasználó *fényképezés*, vagy – hosszabb hullámhosszok esetén – rezgőkörökkel való vétel (2. fejezet). Az egyéb sugárzások, az anyagi rezgéshullámok és a fizikai mezők paramétereinek mérésére szolgáló eszközök a *→geofizikából* ismertek (2.5. fejezet); ezek rendszerint nem képalkotók.

Az adatok rögzítés után mindig feldolgozásra, **kalibrációra** szorulnak. Igen fontos a térbeli és időbeli helyzetet rögzítő *georeferencia megadása*. Digitális adatrögzítés esetén minden adathoz hozzárendelhetők a megfelelő koordináták, de analóg eljárásoknál is biztosítandó ez a keret: a fényképeket pl. a vetítési eljárásból fakadó torzítás kiküszöbölése és az egymáshoz illesztés lehetősége érdekében valamely térképi vagy földrajzi koordináta-rendszerhez szokás igazítani, lehetőleg több átfedő, ugyanarról a területről eltérő látószögből készített felvételek segítségével (→*fotogrammetria*). Az adatok értelmezése érdekében általában szükséges közvetlen észlelésekkel társított *in situ [helyszíni] referenciaméréseket* is végezni, amelyek bizonyítják az összefüggést az adott anyag és a rá jellemző mért paraméterértékek között. Ilyenkor lehetőség szerint ugyanazt a mérési eljárást kell követni, amit a távérzékelés során.

A távérzékeléssel kapott adatok és képek **interpretációja** (értelmezése) a vizsgálati cél függvényében igen sokféle lehet. Eredménye leginkább a vizsgált tárgy (terület) felszínét ábrázoló *tematikus térképek* formájában jeleníthető meg. A tematikus térkép ábrázolhatja a mért paraméterek területi eloszlását izovonalak segítségével, vagy kategorizálhatja a területet a paraméterek, vagy azok értelmezése alapján meghatározott kategóriákba sorolt foltokat lehatárolva. Pl. a topográfiai térképen a tengerszintfeletti magasság megjeleníthető szintvonalakkal, vagy magassági kategóriákkal (0-400 m, 400-800 m, 800 m felett), vagy értelmezett kategóriákkal (alföld, dombvidék, középhegység, magashegység).

Egy távérzékelési rendszer alapvető elemei tehát a következők:

- *Energiaforrás*: külső (passzív) vagy saját (aktív)
- *A hullámterjedés közege*: világűr, légkör, víz, szilárd anyagok
- *Hullám-anyag kölcsönhatások*: visszaverés, megtörés, elnyelés, stb.
- *Érzékelő (vevőberendezés)*: kamera, szkennер, antenna, stb.
- *Adatfeldolgozó egységek*: rögzítés, tárolás, átalakítás
- *Értelmező egységek*: felhasználók vagy (számítástechnikai) rutinok

Néhány további definíció a távérzékelésre:

„A legszélesebb értelemben egy jelenség, vagy objektum információtartalmának mérése felvevő eszközzel, amely nincs fizikai vagy közvetlen kapcsolatban a tanulmányozandó objektummal, ill. jelenséggel.” (Távérzékelési kézikönyv)

“The measurement or acquisition of information of some property of an object or phenomenon, by a recording device that is not in physical or intimate contact with the object or phenomenon under study” (COLWELL 1997). [Adatok mérése vagy gyűjtése egy tárgy vagy jelenség valamely jellemzőjéről egy olyan mérőberendezés által, amely a vizsgált tárggyal vagy jelenséggel nincs fizikai vagy közvetlen kapcsolatban.]

Acquiring information about an object without contacting it physically. Methods include aerial photography, radar, and satellite imaging. [Információ gyűjtése egy objektumról anélkül, hogy fizikai kapcsolatba kerülnénk vele. A módszer lehet légifényképezés, radar és műholdas képalkotás.] (thoreau.dnr.state.mn.us/mis/gis/tools/arcview/Training/WebHelp/Glossary/Glossary3.htm)

A távérzékelés témakörében igen sok információ érhető el a világhálón. A távérzékelés neve néhány nyelven az internetes források kereséséhez: remote sensing (angol), Fernerkundung (német), télédétection (francia), teledetección (spanyol), дистанционное зондирование (disztacionnoje zondirovanyije, orosz).

1.2. Az elektromágneses sugárzás jellemzői

A távérzékelés legfontosabb módszerei az elektromágneses sugárzások észlelésén alapulnak. A továbbiakban áttekintjük az ezekre vonatkozó fontosabb fizikai modelleket és törvényeket.

A világunkat felépítő anyag olyan elemi részecskékből áll, amelyek elektromos töltéssel rendelkeznek; ez kétféle lehet, + és –. Ez a tulajdonságuk akkor mutatkozik meg, ha egymással kölcsönhatásba kerülnek: az ellentétes töltésűek vonzzák, az azonos töltésűek taszítják egymást. A kölcsönhatás (a mechanikában megszokottal szemben) nem a testek közvetlen érintkezésével jön létre, hanem a töltéssel rendelkező részecske (illetve a különböző töltésű részecskéket nem egyenlő számban tartalmazó test) körüli elektromos mezőn (erőtér) keresztül, amelynek az erőssége a töltéssel egyenesen, a részecskétől (testtől) való távolság négyzetével pedig fordítottan arányos¹. A mező adott pontjabeli erőhatást matematikailag vektorokkal írjuk le, az erőhatás irányának egész mezőbeli eloszlását pedig (Faraday nyomán) erővonalakkal szemléltethetjük.

Ha a töltött részecskék nem állnak, hanem mozognak (elektromos áram), akkor ezek körül mágneses mező kialakulása is észlelhető lesz; és viszont, egy mozgó mágneses mező az erővonalait metsző vezetőben elektromos áramot indít meg. A jelenséget indukciónak nevezzük, összefüggéseit az $\rightarrow$ elektrodinamika alapegyenletei² írják le. Adott testben az elektromos, illetve a mágneses mező folyamatos változása rezgés (oszcilláció) formájában képzelhető el. A hatás tovaterjedése fénysebességgel (vákuumban $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s), az oszcilláció periódusainak megfelelő hullámokban történik; ezeket nevezzük elektromágneses hullámoknak³. E hullámok nem valamely közeg részecskéi rezgőmozgásának átadódásával, hanem ténylegesen mozgó, kimérhető tömeggel és mozgási energiával rendelkező elemi részecske módjára terjednek; ezt az elektromágneses sugárzás kettős (hullám- és részecske-) természeteként tartjuk számon⁴. Van olyan kísérleti elrendezés, ahol a sugárzás a térben terjedő hullámként, és olyan is, amelyben egyszerre csak egy adott helyen megjelenő részecskeként viselkedik. Az is kimutatható, hogy ezek a hullámok lineárisan polarizált transzverzális hullámok, vagyis a rezgés kitérése (azaz a változó térerősség-vektorok iránya) a terjedés irányára merőleges (1. ábra). A mágneses (H) és az elektromos (E) térerősség-vektorok ezen felül egymásra is merőlegesek, és nem feltétlenül együttesen oszcillálnak; a két hullám közötti eltolódást *fázisnak* nevezzük, amit forgásszögben szokás megadni. A hullámok legfontosabb paraméterei a **hullámhossz** (egy teljes hullám hosszúsága, jele λ [lambda], mértékegysége m és többszörösei), illetve a **rezgésszám (frekvencia)**, egy másodperc alatt végzett rezgések száma, jele ν [nű], mértékegysége $\text{Hz} = 1/\text{s}$)⁵. A kettő közötti kapcsolat fordított arányosság; szorzatuk a hullám terjedési sebességét, vagyis a fénysebességet adja: $c = \lambda \nu$.

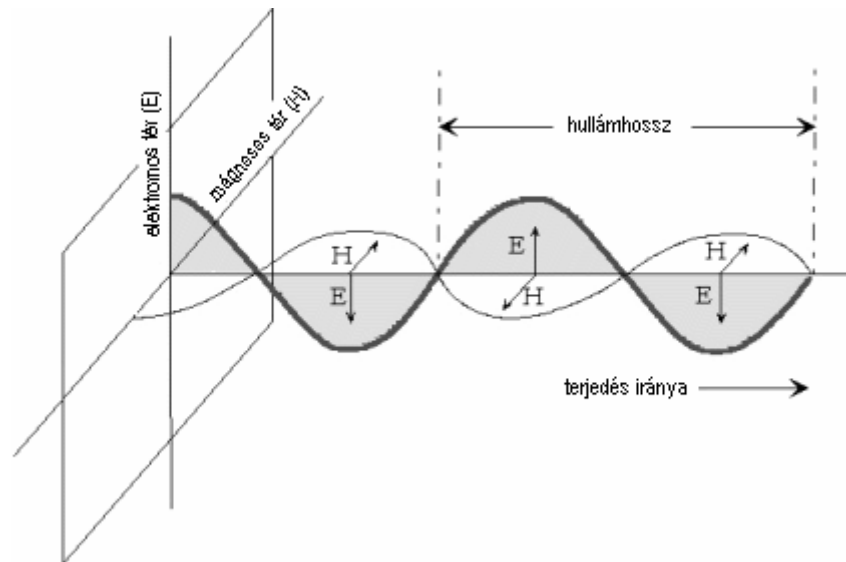
¹ Coulomb-törvény: $F = (1/4\pi\epsilon_0) \times q_1 q_2 / r^2$, ahol F az adott irányban ható erő, q_1 és q_2 a kölcsönhatásban részt vevő testek elektromos töltése, r a testek távolsága, ϵ_0 pedig a légüres tér permittivitása (dielektromos állandó).

² Maxwell-egyenletek.

³ A fény olyan elektromágneses hullám, amit szemünkkel érzékelni tudunk, vagyis látunk. Hullámhosszát színként, intenzitását tónusként látjuk.

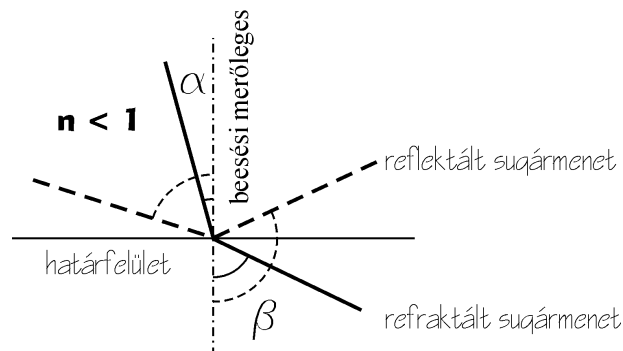
⁴ A jelenleg ismert tényeken alapuló fizikai modell szerint az elemi részecskékből megtestesülő „anyag” és az elektromágneses hullámokban terjedő sugárzó „energia” ugyanannak a dolognak kétféle megjelenési formája, amelyek között a tömeg-energia ekvivalencia-egyenlet teremt kapcsolatot: $E = mc^2$, ahol E az energia, m a tömeg, c pedig a vákuumbeli fénysebesség.

⁵ Hz: Hertz, az elektromágneses hullámokat kísérletileg elsőként kimutató német fizikus emlékére.



1. ábra: Az elektromágneses hullám

Ha a sugárzás valamilyen anyag felületére érkezik, több dolog történhet vele. Lehet, hogy rezgésszámát, azaz energiáját megtartva továbbhalad az anyag belsejében, de terjedési iránya megváltozik, vagyis **törést szenved (refraktálódik)**; lehet, hogy a felületről (szintén energiáját megtartva) **viisszaverődik (reflektálódik)**; végül lehet, hogy az energiáját az anyagnak részben vagy teljes egészében átadva **szóródik** vagy **elnyelődik (abszorbeálódik)**.



2. ábra: Sugártörés és visszaverődés

A reflexió és a refrakció olyan makrofizikai jelenségek, ahol a hullámok irányváltozása determinisztikus módon leírható, szemben a csak statisztikusan kezelhető szóródással. A megtörés és a visszaverődés szöge azzal függ össze, hogy milyen sebességgel terjednek az adott anyagban a hullámok, ez pedig az anyag elektromágneses paraméterein és a sugárzás hullámhosszán múlik: $c_1 = c/\sqrt{\epsilon_r \mu_r}$, ahol c a terjedési sebesség vákuumban, c_1 a terjedési sebesség a közegben, ϵ_r [epszilon] a *relatív dielektromos állandó (permittivitás)*, μ_r [mű] pedig a *relatív mágneses permeabilitás*⁶. A Snellius-Descartes töréstörvény szerint a sugár és a beesési merőleges közötti *beesési szög* (α) és a *törési szög* (β) szinuszának hányadosa állandó; ezt a hányadost a két közeg egymásra vonatkozó relatív **törésmutatójának** ($n = \sin\alpha/\sin\beta$) nevezzük (az *abszolút törésmutató* a vákuum és a közeg törésmutatója). Ez a hányados egyszersmind az

⁶ ϵ_r és μ_r maguk is a hullámhossz, valamint további tényezők, pl. az anyag hőmérsékletének, sűrűségének stb. függvényei. Egy gyorsan változó hőmérsékletű és sűrűségű gáz törésmutatója azzal együtt gyorsan változik: ezért látjuk pl. a felszálló meleg levegőben remegni a mögötte lévő dolgokat, szeles éjszakán pislogni a csillagokat stb.

elektromágneses hullámok két közegbeli terjedési sebességeinek az aránya is. Az összefüggésből látható, hogy ha $n > 1$, akkor $\beta < \alpha$ (a sugár a beesési merőlegeshez törik), és $\sin\beta \leq 1/n$ (mivel $\sin\alpha \leq 1$); a törésszög tehát nem lehet nagyobb egy $\arcsin 1/n$ határértéknél. Ha $n < 1$, akkor $\alpha < \beta$, és ez csak $\sin\alpha \leq n$ esetén vezet sugártöréshez. Ha a beesési szög $\arcsin n$ határ-szögénél nagyobb, akkor következik be a *visszaverődés*. Ha a törésmutató igen kicsi, akkor az anyag gyakorlatilag nem engedi át az elektromágneses hullámokat: részben visszaveri, részben pedig elnyeli azokat.

A *szóródás* és az *abszorpció*, illetve ennek ellentéte: a sugárzás **kibocsátása (emisszió)** az anyag elemi szerkezetével függ össze. Az atomok az elfogadott, szemléletes Bohr-modell szerint a magjukban koncentrálódó, pozitív töltésű protonokból és semleges neutronokból, valamint a mag körüli pályán keringő, negatív töltésű elektronokból állnak. Az atomok tömegének döntő részét a mag hordozza. Az elektronok azonban csak meghatározott pályákat foglalhatnak el az elektronhéjakon (ezt fejezik ki a fő- és mellékkvantumszámok). Minden pályához tartoznak energiaszintek; az elektronok a lehető legalacsonyabb energiaszintű pályák elfoglalására törekcsenek. Ha egy atommal energiát közlünk, és azt elnyeli, akkor az egy elektron magasabb energiaszintű pályára lépésével jár: az atom *gerjesztett* állapotba kerül. A gerjesztő hatás megszűntével az elektron visszatér a lehető legalacsonyabb energiaszintre, és eközben elektromágneses sugárzást bocsát ki. A sugárzás energiatartalma pontosan megfelel az átlépett energiaszintek különbségének: az elektromágneses sugárzás tehát *kvantált*. Ezeket a részecskének is tekinthető energiacsomagokat nevezzük *fotonoknak*. Egy foton energiatartalma $E = h\nu$, ahol h a Planck-állandó ($6,626 \times 10^{-34}$ Js), ν pedig a rezgésszám (frekvencia, Hz). Ez annyit jelent, hogy az energiatartalom a rezgésszámmal egyenes, a hullámhosszal pedig fordított arányban áll ($h\nu = hc/\lambda$). Ha egy foton egy atommal ütközik, átadhatja teljes energiáját egy elektronnak, ha az éppen a kívánt kvantumnak megfelelő (*fotoelektromos hatás*), de csupán egy részét is, azután megváltozott hullámhosszal és irányban továbbhaladva (*Compton-szóródás*), sőt az atommaggal is kölcsönhatásba léphet (*párokeltés*: elektron-pozitron párrá alakulás). A lehetőségek megvalósulása energiaszint-függő: párokeltésre csak $0,01 \text{ \AA} = 10^{-12} \text{ m} = 0,001 \text{ nm}$ hullámhossz alatt kerülhet sor (γ -sugárzás, kozmikus sugárzás, lásd 1.3. alfejezet), a távérzékelésre használt tartományban, így a képalkotó módszerekben is a fotoelektromos kölcsönhatás dominál.

Kötéseket tartalmazó (molekuláris vagy kristályos szerkezetű anyagoknál) további elnyelődési, illetve kibocsátási energiaszintek tartoznak a különböző sajátrezgés-frekvenciákhoz, a kötési elektronokhoz, valamint a kötések felszakadásához vagy létrejöttéhez. Ezek általában alacsonyabbak, az infravörös tartományba esnek, bár a rezgések megjelenő felharmonikusai kis hullámhosszúak is lehetnek ($\rightarrow$ 2.1.4 fejezet).

A sugárzó energia mennyisége mindazonáltal nemcsak az egyes fotonok energiatartalmától, hanem a fotonok számától is függ. A **sugárerősséget** ($\sim$ **intenzitást**, jele: I , mértékegysége W/sr^7) az adott irányban egységnyi keresztmetszeten egységnyi idő alatt áthaladó fotonok energiatartalmának összegével jellemezhetjük. Ha a sugárzást hullámként írjuk le (az elektrodinamikai egyenletekkel), akkor az intenzitást az E térerősségvektor kitérésének (amplitúdójának) nagyságával hozhatjuk összefüggésbe.

Az elektronok el is vonhatóak az atomból, vagy hozzá is adhatóak; ezt *ionizációnak* nevezzük. Ez szintén energiaelnyeléssel, illetve (a visszaalakuláskor) -kibocsátással jár, de nem kvantált módon. Az energia átvihető sugárzáson kívül elektromos mezőn keresztül, elektromos árammal is. Az ionizált anyag elektromos paraméterei mások, tehát hullámvezető képessége megváltozik a semleges atomokból vagy molekulákból álló anyagéhoz képest.

⁷ **Szteradián**, a térszög mértékegysége; ahogy 1 radián a sugárral azonos ívhossznak megfelelő síkszöget jelent a teljes körből, úgy 1 szteradián a sugár négyzetének megfelelő felületdarabhoz tartozó térszöget a teljes gömbből.

1.3. Az elektromágneses spektrum

Az elektromágneses sugárzást kibocsátó testek általában nem csak egyetlen hullámhosszon adnak le energiát; sugárzásuk összetett, *polikromatikus* [sokszínű]. A törésmutató hullámhossztól való függése, vagyis a **diszperzió** jelensége lehetővé teszi számunkra, hogy a többféle rezgésszámú hullámot tartalmazó sugárnyalábot egy refraktáló felület segítségével összetevőire bontsuk: **színképet (spektrumot)** állítsunk elő.

Az elnyelhető, illetve kibocsátható kvantumok nagysága az atomok szerkezetétől függ, tehát a kémiai elemekre vagy vegyületekre jellemző tulajdonság. Egy elem jelenléte kimutatható egy anyagban⁸, ha az áteső vagy visszavert sugárzás folytonos színképében a kérdéses energiaszinteknél elnyelődés mutatkozik (*abszorpciós színkép*), vagy a kibocsátott sugárzás színképében nagyobb intenzitás észlelhető a kérdéses szinteken (*emissziós színkép*). Ezek a szintek a színképben sötét, illetve fényes vonalak formájában jelentkeznek. A $\rightarrow$ *spektroszkópia* ezeket a vonalakat használja fel a kémiai összetétel meghatározására.

A „vonal” kifejezés egy változó szélességű intervallumot takar. Az elméleti energiaszintek a megfigyelt energiaszintek várható értékét jelentik, amelyek körül a Heisenberg-féle *energia-idő bizonytalansági elv* miatt mindig van valamekkora szórás. A szórás terjedelmét különböző hatások befolyásolhatják, pl. a gázatomok/molekulák termális mozgása miatti Doppler-eltolódások, a nyomás növekedésével megszorodó ütközések vagy egy elektromos mező jelenléte. A rezgésekkel összefüggő abszorpciók vagy emissziók szórása nagyobb – színképvonalak helyett inkább sávokról beszélhetünk, bár továbbra is a középértékeket szokás megadni. Az ilyen tartományok már nem az elemi összetételre, hanem egyes atomcsoportokra (pl. komplex ionok), illetve vegyületekre és a kristályszerkezetre lesznek jellemzőek.

Megfelelő energiaszintű gerjesztéssel elvileg elérhető, hogy egy anyag kizárólag egy bizonyos hullámhosszon sugározzon. Az így kapott *monokromatikus* [egyszínű] sugárzás színképe egyetlen fényes vonalból áll. Gyakorlatilag legfeljebb az ezt megközelítő keskenysávú sugárzás keltése érhető el. A technológia angol neve **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation** [fényerősítés sugárzás gerjesztett kibocsátásával], betűszóval rövidítve „laser”, magyarosan leírva *lézer*⁹. A gerjesztés lehet elektromágneses tér vagy sugárzás (pl. villanófény) is a fotoelektromos kölcsönhatást kihasználva.

A gyakorlatban minden test elnyeli a rá eső elektromágneses sugárzás legalább egy részét, és ki is bocsát ilyen sugárzást, amely a szóródási jelenségek miatt nem diszkrét vonalakban, hanem széles színképsávban fog eloszlani, de nem egyenletesen. Az, hogy a sugárzás intenzitásának maximuma milyen hullámhossznál lesz tapasztalható, a test hőmérsékletének a függvénye; az ezt leíró összefüggést Wien-féle eltolódási törvényként¹⁰ ismerjük, és alkalmazhatjuk a vizsgált test hőmérsékletének a meghatározására: $\lambda_{\max} = b/T$, ahol $\lambda_{\max}$ a maximális intenzitáshoz tartozó hullámhossz, b a Wien-féle eltolódási állandó (2.897×10^{-3} mK), T pedig az abszolút hőmérséklet. A napsugárzás intenzitáscsúcsa pl. 500 nm hullámhossz körül van, tehát forrásterületének hőmérséklete 5800 K körüli. Ideális esetben egy test valamennyi rá eső sugárzást elnyeli (*feketetest*), és azok energiáját – változtatlan hőmérsékletet tartva – ki is sugározza. A feketetest-sugárzás erősségének frekvenciafüggő eloszlását leíró törvény Plancktól származik:

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

I: a sugárerősség, ν : frekvencia, T : abszolút hőmérséklet, h : Planck-állandó ($6,626 \times 10^{-34}$ Js), c : fénysebesség, k : Boltzmann-állandó (1.380×10^{-23} J/K)

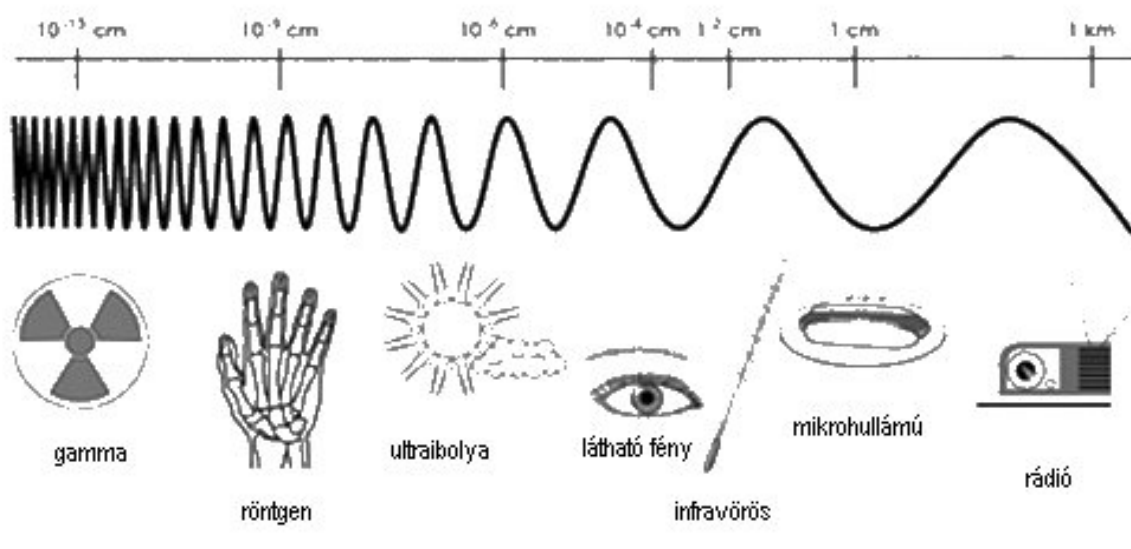
⁸ Precízebben fogalmazva, egy plazmaállapotba hozott, vagyis atomjaira bontott anyagban, ahol kémiai kötések nem változtatják meg az atom szerkezetét.

⁹ A lézer kidolgozását megelőzően a mikrohullámok tartományában már sikerült ilyen hatást előidézni; annak a rövidített neve „maser” volt, ennek analógiájára született a „laser” szó.

¹⁰ Azért *eltolódási* törvény, mert melegítés vagy hűtés hatására a kisugárzott energia maximuma eltolódik a λ vagy ν függvényében („a színkép mentén”) ábrázolt intenzitásgörbén.

A feketetest-sugárzás energiája az abszolút hőmérséklet negyedik hatványával arányos¹¹: $E = \sigma T^4$, ahol az arányossági tényező $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$. Az összefüggés az elnyelődésre is vonatkozik, tehát a feketetest hőmérséklete a rá eső és az általa kibocsátott sugárzás energiataralmához képest negyedik hatványon változik. A valós testek esetében a környezetből érkező sugárzás egy része áteresztődik vagy visszaverődik; a legnagyobb mértékű elnyelődés a Wien-törvény szerint meghatározott λ_{max} körül mutatkozik. A valós testek és az azonos hőmérsékletű feketetest által kisugárzott energia arányát *emisszivitás*nak nevezzük; ennek értéke 0 és 1 között változhat, és bizonyos anyagok esetében frekvenciafüggő lehet. Egy test emisszivitásának ismeretében a sugárzott energiamennyiségből kiszámítható a test hőmérséklete.

Az elektromágneses spektrumot részben gyakorlati szempontok szerint, részben hagyományosan¹² különböző tartományokra szokás felosztani. Ezek a tartományok a következők:



3. ábra: Az elektromágneses sugárzás tartományai

Legfontosabb az emberek számára ezek közül a látható fény tartománya, amely kb. $0,4 \mu\text{m}$ (kék) $< \lambda < 0,7 \mu\text{m}$ (vörös) hullámhosszak közé esik. Nem véletlen, hogy szemünk éppen erre a tartományra vált érzékennyé¹³: a Nap által kisugárzott összes energia mintegy 40%-a ebbe a szűk sávba tartozik, az intenzitáscsúcs is itt helyezkedik el, a földi légkör áteresztőképessége pedig ebben a sávban jó. A kék (ibolya) színű hullámoknál rövidebb hullámhosszú, vagyis magasabb energiaszintű sugárzásokat összefoglaló néven *ibolyán túli* (**ultraviola**) sugárzásnak szokták nevezni (a napsugárzás összenergiájának kb. 10%-a). Kiemelhető ezen belül az orvosi diagnosztikában használt röntgensugárzás ($0,01 \text{ nm} < \lambda < 10 \text{ nm}$), továbbá a radioaktív folyamatok során keletkező, azok kimutatására alkalmas γ -sugárzás¹⁴ ($\lambda < 10^{-11} \text{ m}$).

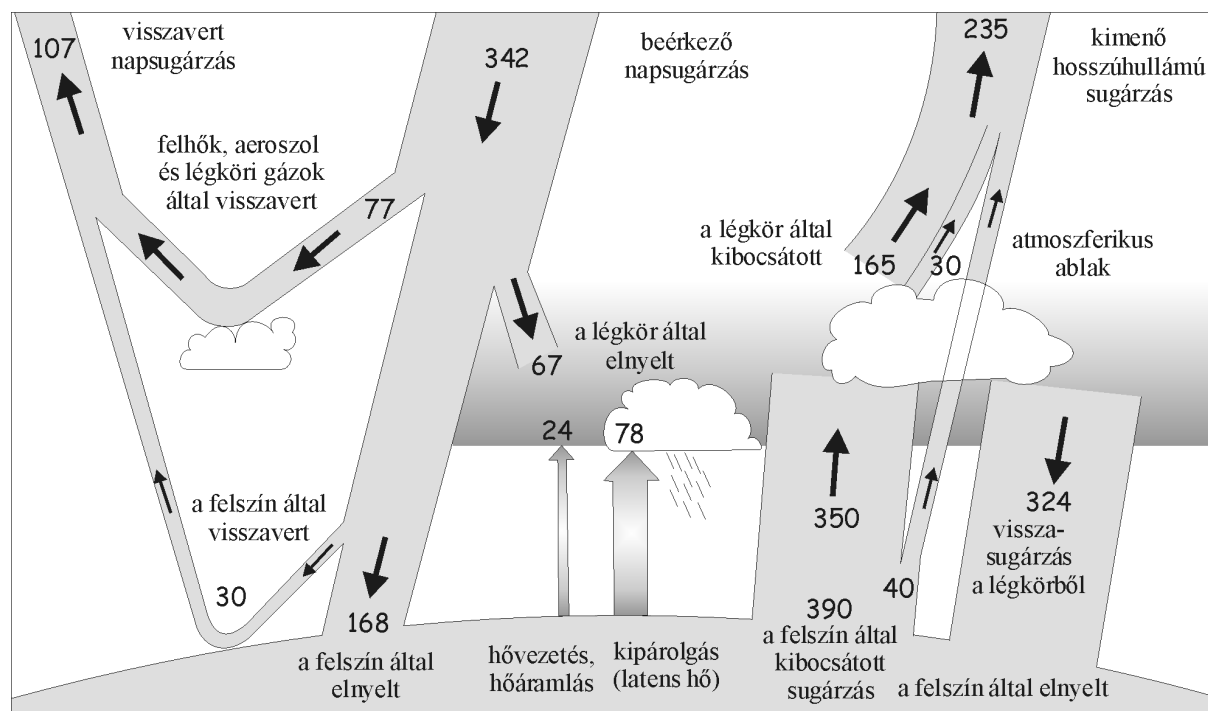
¹¹ Stephan-Boltzmann-törvény

¹² E sugárzások jelentős részét egymástól függetlenül, különböző kísérletekben mutatták ki, és csak később ismerték fel közös, elektromágneses természetüket.

¹³ Ez többé-kevésbé a többi élőlényre is igaz, de a látott spektrum határai mások lehetnek. Közismert pl. egyes virágok ultraibolya tartományban reflektáló mintázata az ezt a sávot is látó beporzó rovarok számára, az éjjeli vadászó állatok között pedig a hőinfra tartományt érzékelők vannak, mint pl. a csörgőkígyó.

¹⁴ Az α - és β -sugárzások részecskeáramokat jelölnek: az α -részecske egy héliumatommagnak, míg a β -részecske egy elektronnak felel meg.

A vörös fénynél hosszabb hullámok összefoglaló neve *vörösön inneni (infravörös)*, a napsugárzás összenergiájának kb. 50%-a). Ezen belül *közeli infra* a látható fényhez legközelebbi tartomány ($0,7 \mu\text{m} < \lambda < 5 \mu\text{m}$), *közepes infra* a következő ($5 \mu\text{m} < \lambda < 25-40 \mu\text{m}$), majd *távoli infra* a $25-40 \mu\text{m} < \lambda < 200-350 \mu\text{m}$ közé eső tartomány. A közepes infrát *hőinfrának* is szokták nevezni, mivel a földfelszín objektumainak a spektrális sugárzás-intenzitási maximuma ebbe a tartományba esik; az emberi testé pl. kb. $9,3 \mu\text{m}$. Ezek fölött, mm-cm nagyságrendben következnek az aktív távérzékelési eljárásokban alkalmazott *mikrohullámok*, az e fölötti nagyságrendek pedig *rádióhullámok*ként ismertek, és leginkább a távközlésre használják fel ezeket, távérzékelésre kevésbé, csak néhány geofizikai alkalmazásban.



4. ábra: A földi légkör energiamérlege (a számok a be- és kisugárzott teljesítményt, azaz az egységnyi területre egységnyi idő alatt jutó sugárzás energiáját jelzik W/m^2 -ben)

1.4. Sugárterjedés a légkörben

Ha a távérzékelés a levegőből vagy a világúrból a földfelszín észlelésére irányuló vizsgálat, akkor a felhasznált elektromágneses hullámok a levegőben terjednek. A természetes eredetűek közül a legtöbb sugárzó energia a Naptól érkezik, de a világűr más sugárforrásaiból is kapunk energiát, és – főleg az infravörös tartományban – a Föld objektumai, sőt maga a légkör is lehet a kibocsátó. Ismerni kell tehát az atmoszféra hatását az észlelésre, vagyis ismerni kell a levegő hullámvezetési tulajdonságait. A légkör sűrűsége és összetétele, így ennek megfelelően a hullámvezetési képessége a magassággal változik.

A légkör alsó határa viszonylag élesen megvonható a szárazföldre és tengerek felszínén. Felső határa már jóval bizonytalanabb. A nappali félgömb felett ez a határ egy lökéshullámfront. Az elektromágneses sugárzáson kívül a Naptól részecskeáram is érkezik: ez a *napszél*. Mivel a napszél töltött részecskékből áll, hat rá a Föld mágneses tere: az áramlás a *magnetoszféra* határát (a magnetopauzát, kb. 60-70000 km magasságban) megközelítve lefékeződik és elterelődik az erővonalak mentén a pólusok felé, így a mintegy 1000 km vastag front jóval magasabban van, mint ahol mágneses mező nélkül lenne: kb. 90000 km magasságban. Az e szint alatti részecskéket már a légkör részének tekinthetjük. A napszél behatolási mélysége ennél azonban jóval nagyobb; a naptevékenység és a földi mágneses mező változó erősségétől függ, ezért ingadozó. A mágneses pólusoknál a napszél elérhet olyan mélyebb, sűrűbb (néhány 100 km magasságban lévő) légrétegeket, ahol a látható fény tartományába eső emittált sugárzást is gerjeszthet, ez a *sarki fény*. Az éjszakai félgömb felett a lökéshullámfront hiányzik, ott felső határ igazából nem is vonható.

A légkör legkülső részén, az *exoszférában* a kozmoszból (főleg a napszéllel) érkezett részecskék játszanak uralkodó szerepet, amelyek csak ideiglenesen tartoznak a Földhöz: a nappali égbolton a hozzáadás, az éjszakai a leszakadás a jellemző folyamat. Kémiai összetétel szerint ezek többnyire könnyű elemek, javarészt hidrogén és hélium, ionizált formában. 500 km alatt kezdi átvenni a főszerepet a felszín közeléből megszokott oxigén és nitrogén. Mindazonáltal 60-70 km magasságig jellemzően ionizált állapotban és nem molekuláris formában vannak ezek a gázok (*ionoszféra*), és hőmérsékletük kb. 85 km-től felfelé haladva egyre nő¹⁵ (*termoszféra*), ami a napszél és az ultraibolya tartományba eső nap- és kozmikus sugárzás szóródásából és elnyeléséből származó energiának köszönhető. Az ionoszférában – a kis anyagsűrűségnek köszönhetően – szabad elektronok is jelen lehetnek, ami jelentős a rádióhullámok tartományabeli vezetőképesség szempontjából. Ezek az ionizált rétegek visszaverik a $\lambda > 10$ m-es rádióhullámokat; ez teszi lehetővé a rövidhullámú adók vételét a világ távoli részein is. Az ionizáció szintjének ingadozása (pl. napszakosan és év-



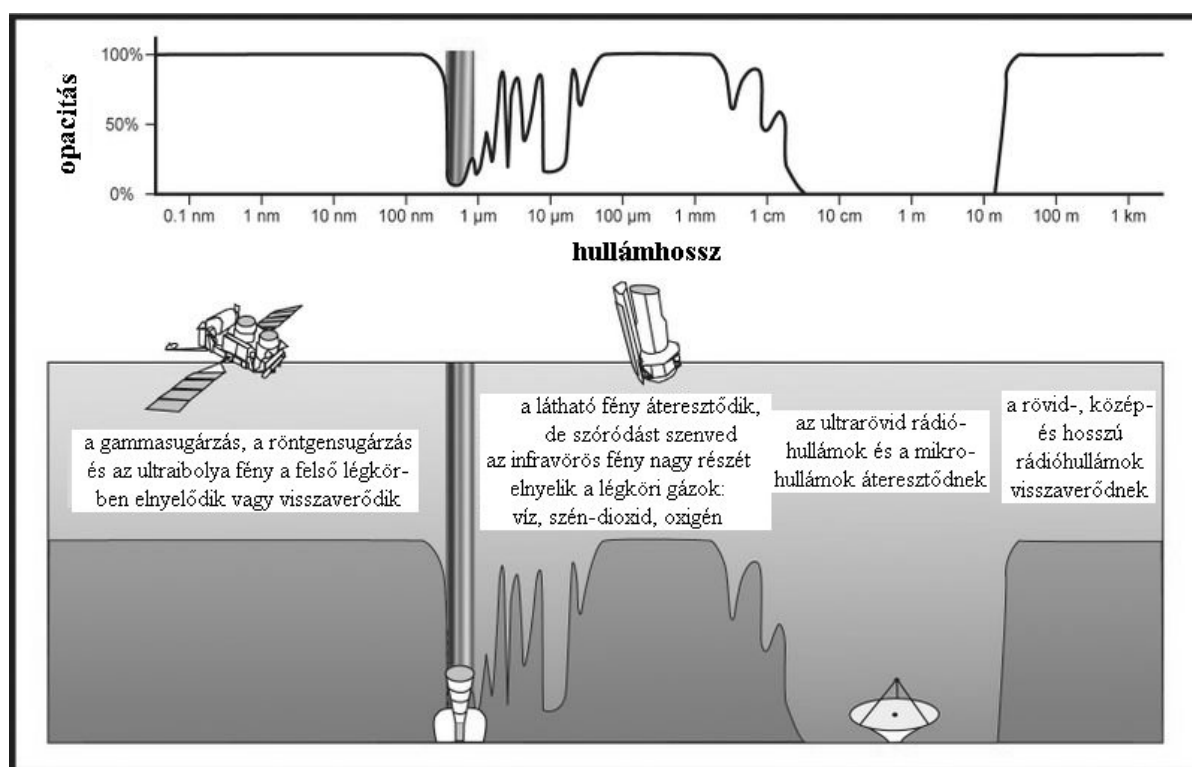
5. ábra: A Föld légköre

¹⁵ A hőmérséklet többeszer K-t is elérhet. Ennek ellenére nem lenne melegünk ebben a zónában; az anyagsűrűség olyan kicsi, hogy a hővezetéssel és hőáramlással történő energiaátadás jelentéktelen a hősugárzáshoz képest, így egy közönséges folyadékos hőmérő jóval a 0°C alatti értéket mutatna. Ez a sugárzás, amely maga sem jelentős intenzitású, a közeli és a közepes infra tartományba esik.

szakosan a megvilágítás intenzitásváltozása miatt) a visszaverődés intenzitásában is ingadozást okoz, amit *fading* [féding] néven szokás emlegetni a vett rádiójelek „elhalványodása” alapján. Az ultrarövid¹⁶ ($\lambda < 10$ m) hullámokat és a mikrohullámokat ellenben már átengedik, így azok alkalmasak pl. a műholdakkal való kapcsolattartásra.

A hosszú- és részben már a középhullámok terjedése az előbb említettekkel szemben döntően nem a levegőben, hanem a földfelszínen (helyesebben a litoszféra és a hidroszféra felső néhányszor 1-10 m-es tartományában – minél nagyobb a hullámhossz, annál nagyobb behatolási mélységgel), felületi hullámok formájában történik. Így elvileg – a Föld görbületét követve – az adó helyétől nagy távolságig foghatóak lennének, viszont erős a csillapodásuk. Ennek mértéke a vezető közeg elektromos vezetőképességétől függ; ez felhasználhatóvá teszi a hullámokat → *geofizikai* elektromos észlelési módszerek számára.

Az 50 és 90 km magasság közötti régió a *mezoszféra*, amely a repülőgépek maximális és az űreszközök minimális repülési magassága¹⁷ közé esik; az anyagsűrűség az űreszközök számára ugyanis már túl nagy – a Föld légkörébe érkező meteorok zöme ebben a rétegben izzik fel és válik gázzá –, a repülőgépek számára viszont még túl kicsiny. Ezt a réteget ezért viszonylag keveset tanulmányozták a többihez képest. Hőmérséklete alacsony, mert abszorpciója jelentéktelen. Leglátványosabb objektumai a horizont alól kapott napfényt visszaverő *éjjeli világító felhők*, amelyek főként vízgézből állnak.



6. ábra: A légkör opacitása, azaz átlátszatlansága a teljes spektrumban

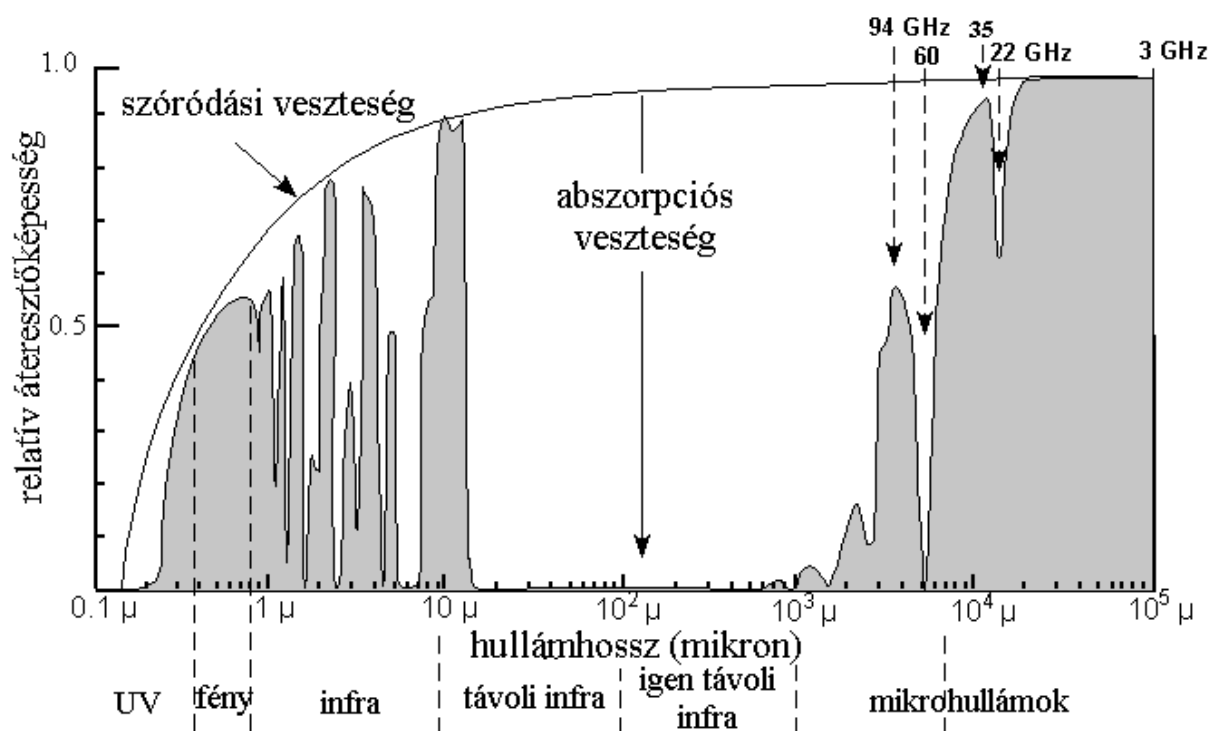
A 10 és 50 km közötti *sztratoszféra* olyan zóna, ahol az ultraibolya tartományba eső sugárzó energia elnyelése jelentős, így benne a hőmérséklet felfelé növekszik. A fő elnyelő részecske itt a molekuláris oxigén. Stabílan a két oxigénatomból álló molekula tud fennmaradni, de rövid hullámhosszú sugárzás ($\lambda < 240$ nm, aminek az ide eljutó intenzitása az ionoszféra elnyelő hatása révén már kicsi) elnyelése folytán kötése felszakadhat, így szabad oxigénatomok keletkeznek; együtt létezik tehát az ionoszférára jellemző atomi és a mélyebb légrétegek-

¹⁶ A távközlésre használt URH rádióhullámokat gyakran FM (frekvencia-modulált) jellegükönél fogva különítik el a többi AM (amplitúdó-modulált) sávától.

¹⁷ Az elméleti határ, az ún. *Kármán-vonal* (Kármán Tódor fizikusról elnevezve) kb. 100 km magasan van.

re jellemző molekuláris oxigén. A szabad O-atomok egy része O_2 -molekulákba ütközve O_3 , vagyis ózonmolekulákat képez, amelyek – bár nem stabilak – kellő ideig fennmaradhatnak ahhoz, hogy kifejtsék elnyelő hatásukat (átlagos élettartamuk 20 perc). Ezek viszont sokkal gyengébb kötésük révén abban az alacsonyabb energiaszintű ultraibolya tartományban ($\lambda < 325$ nm, csúcs $\lambda = 225$ nm-nél – UV-B, UV-C tartományok¹⁸) lesznek igen hatékony elnyelők, amit a felsőbb légrétegek még akadálytalanul átengedtek. Koncentrációjuk 19-23 km között a legnagyobb, de fel 30 km-ig jelentős (2-8 ppm). Ez az elnyelődés azért különösen érdekes számunkra, mert bizonyos szerves molekulák (pl. DNS) kötési energiái is abba a tartományba esnek, amit ez az energiaszint roncsolni lenne képes.

Miután csaknem a teljes ultraibolya spektrum elnyelődik a magaslégkörben, a rádióhullámok tartománya pedig (az ultrarövidet kivéve) visszaverődik, a látható fény, az infravörös és a mikrohullámú tartomány marad a távérzékelés számára használható. A 10 km alatti *troposzférában* azonban ezt is korlátozzák további elnyelő és reflektáló hatások (7. ábra). Mi több, itt az anyagsűrűség már elég nagy ahhoz, hogy jelentős szóródás is bekövetkezzen.



7. ábra: A légkör áteresztőképessége a hullámhossz függvényében, logaritmus skálával

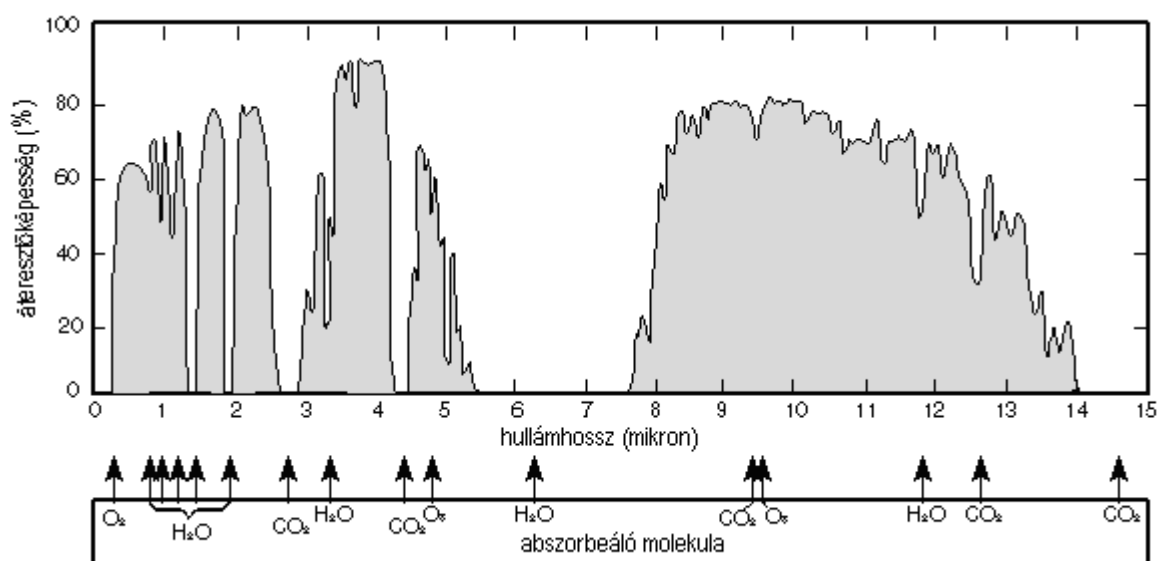
A **légköri szóródás** jellege függ az azt előidéző részecske méretétől és a hullámhossztól. Ha a hullámhossz nagyobb, mint a részecske átmérője¹⁹, akkor a szóródás erőssége a hullámhossz negyedik hatványával fordítottan arányos, vagyis a rövidebb hullámok felé igen erősen nő, a hosszabb hullámok felé viszont elhanyagolhatóan kicsi – ez az oka, hogy a mikro- és rádióhullámokat még a felhős légkör is jól átereszti, a látható fényt ellenben nem. A szóródás egyaránt erős a sugárterjedés eredeti irányába (előreszórás) és visszafelé (visszaszórás), oldalirányba valamelyest gyengébb. Ez a helyzet akkor, amikor a légkör gázmolekulái okoznak szórást; a fehér napfény rövidebb hullámhosszú részének erős szóródása teszi kékké az eget (ezt *égfénynek* hívják) és sárgává a Napot. Ha a részecske mérete a hullámhosszal

¹⁸ UV-A: 320–400 nm, UV-B: 280–320 nm, UV-C: 190–280 nm

¹⁹ Rayleigh-szórás, illetve ha energiaszint-változás is történik: Ramann-szórás; hullámhossz-függése miatt szelektív szórásnak is szokás nevezni.

összemérhető vagy nagyobb²⁰, akkor a szórás már kevésbé lesz hullámhosszfüggő, viszont elsősorban előreszórás történik – minél nagyobb a részecske, annál inkább így van. Így láthatunk a fényforrások körül fényudvarokat (*halókat*). Ilyen szóródást a lebegő *aeroszok*: pára, por, füst, stb. okoznak, és már csak az 5 km alatti zónában jellemző. A felhők fehér ragyogása is e szóródás eredménye. Mivel a fényforrás általában a Nap, ez a hatás a Földre irányuló távérzékelési vizsgálatoknál kevésbé jelentős. Végül a hullámhosszat nagyságrendekkel felülmúló átmérőjű részecskék szóró hatását *nem-szelektív szóródásként* szokták említeni, minthogy gyakorlatilag nincs hullámhossz-függés; ezt észlelhetjük a ködben. A szóródás rontja a távérzékeléssel kapott képek minőségét; hatásainak ellensúlyozására *atmoszferikus korrekció* szükséges (lásd 3.1 fejezet).

A látható és közeli infravörös tartománybeli **légköri elnyelődésért** felelős összetevők közül legjelentősebb a vízpára (H_2O), ezt követi a széndioxid (CO_2), majd az oxigén (O_2 és O_3), a nitrogénoxidok (NO_x), a szénmonoxid (CO) és a metán (CH_4); az egyéb anyagok hatása elhanyagolható. Az abszorpció mértéke hullámhosszfüggő; bizonyos elnyelési sávok környezetében erős. A spektrum elnyelési sávokon kívüli részét **atmoszferikus transzmissziós ablakoknak** szokás nevezni (7. ábra). A távérzékelés eszközei elsősorban ezekben az ablakokban dolgoznak. Különösen a közeli és a közepes infra tartományokban követik egymást sűrűn a transzmissziós ablakok és az elnyelődési sávok (8. ábra); az ábráról leolvashatóak a különböző molekulák jellemző elnyelési sávjainak hullámhosszai, a vízpára pl. az 1,4 μm és 1,9 μm hullámhosszú sugárzásokat teljes mértékben elnyeli, további sávokat pedig részlegesen nyel el (atmoszferikus vízabszorpció).



8. ábra: A légkör áteresztőképessége a hullámhossz függvényében, az infra tartományra optimalizált lineáris skálával

Végül, de nem utolsósorban azt se felejtjük el, hogy a különböző hullámvezető képességű légrétegek határán az átengedett sugarak is (hullámhosszuktól függő szögű) törést szenvedtek, amit a kép koordináta-rendszerének meghatározásakor figyelembe kell venni.

²⁰ Mie-szórás. Igazából az elektrodinamikai alapegyenletekre Gustav Mie által kidolgozott megoldások magukban foglalják a kisebb átmérőjű részecskék esetét, vagyis Rayleigh függvényét is.