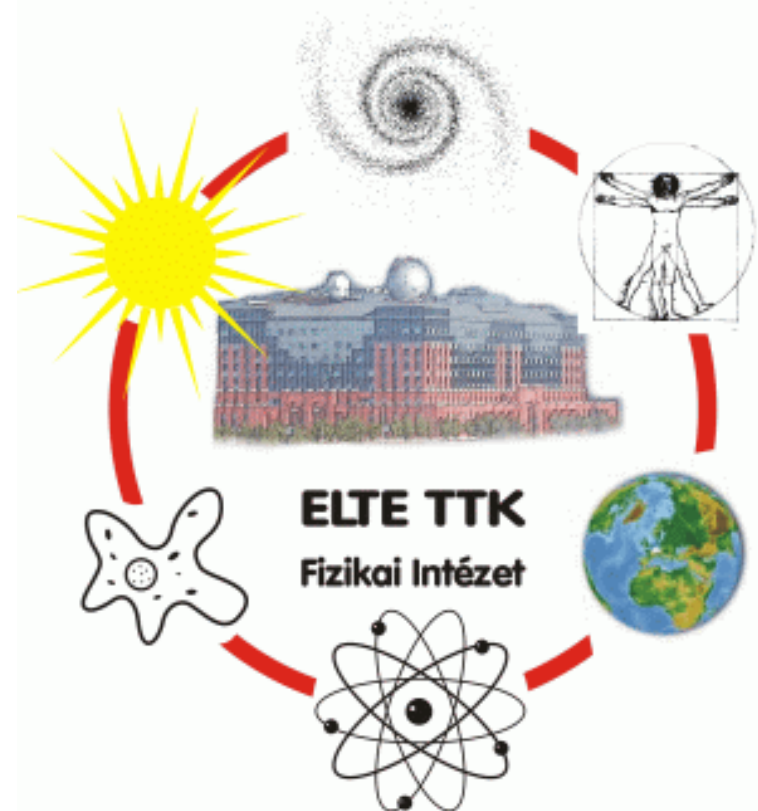
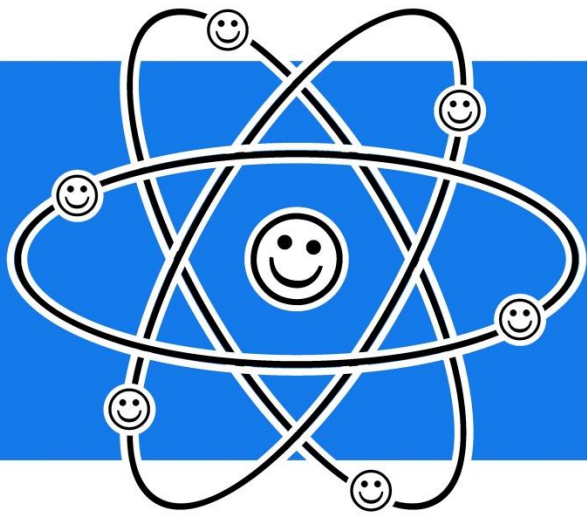


A fizika mindenké



**2015 – A FÉNY
NEMZETKÖZI ÉVE**



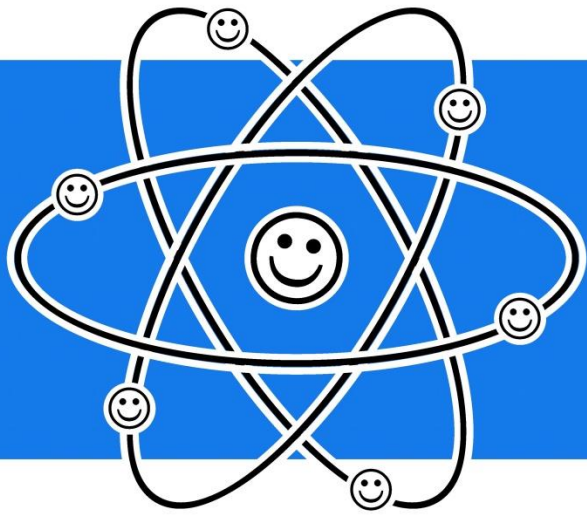


A fizika mindenké



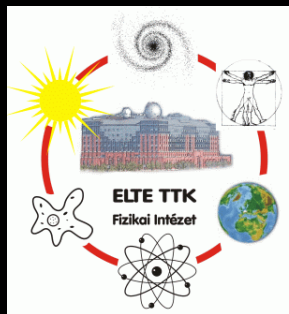
2015 – A FÉNY
NEMZETKÖZI ÉVE

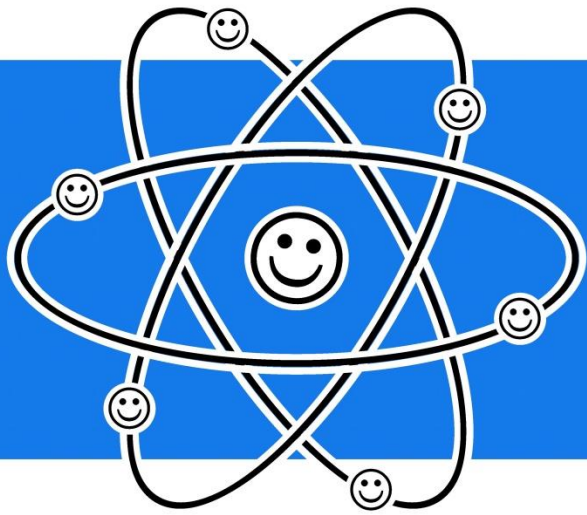




A fizika mindenké

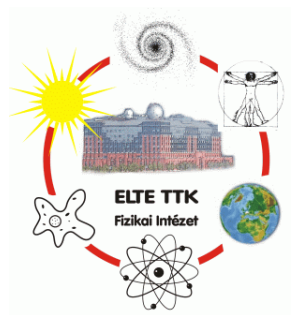
A fekete fény

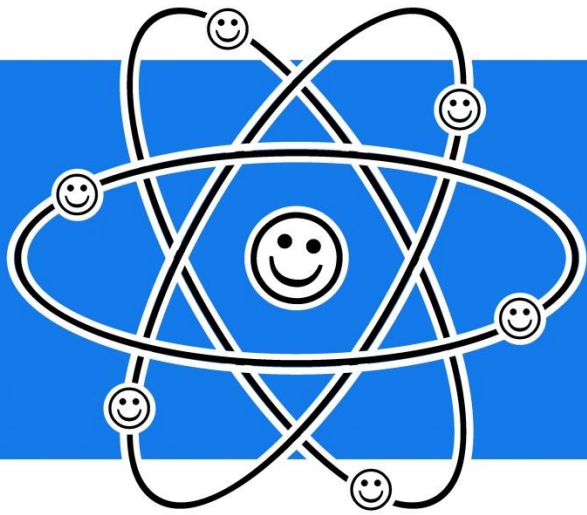




A fizika mindenké

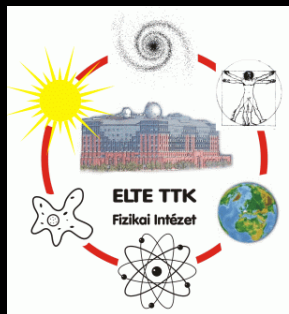
A fekete fény

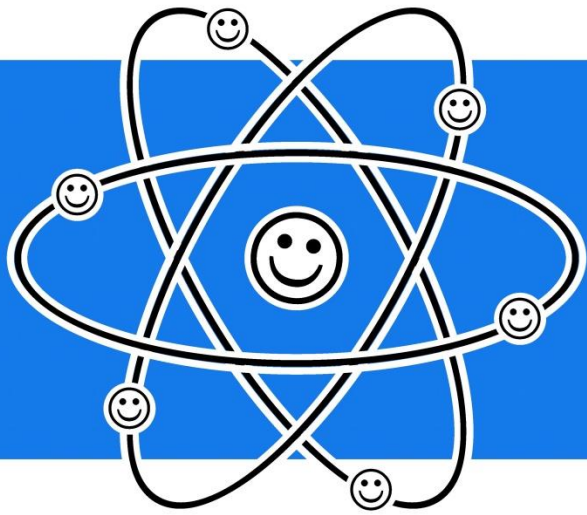




A fizika mindenké

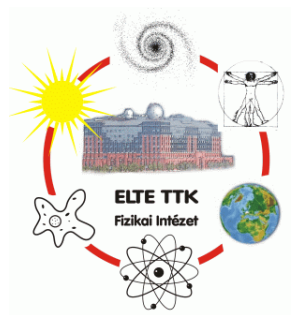
A fekete fény

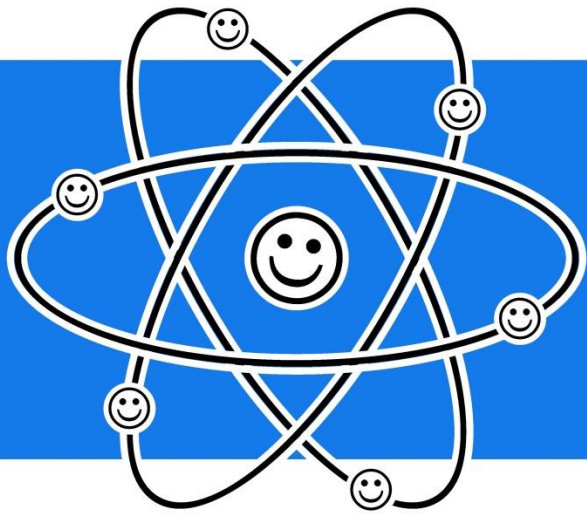




A fizika mindenké

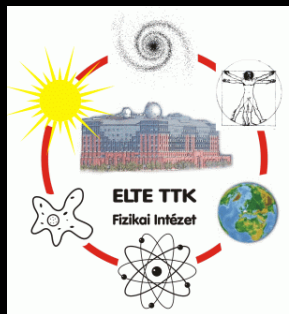
A fekete fény





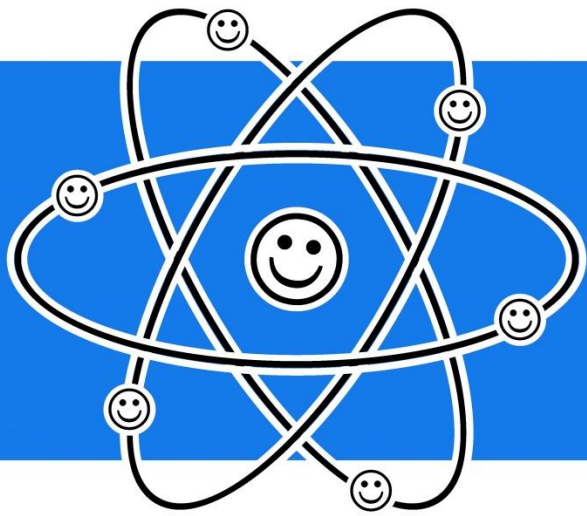
A fizika mindenkié

A fekete fény



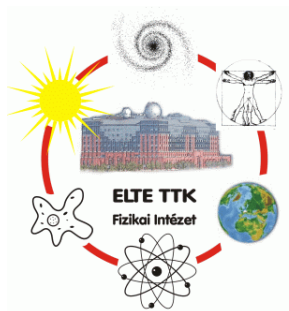
Dávid Gyula

2015. 09. 10.



A fizika mindenkié

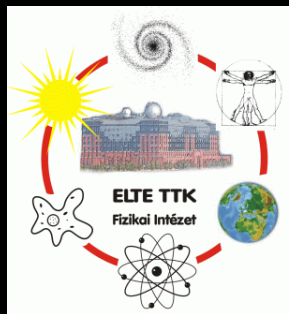
A fekete fény



Dávid Gyula

2015. 09. 10.

A fekete fény



Dávid Gyula

2015. 09. 10.

Mi az a "fekete fény"?

az atomos anyaggal termodinamikai
egyensúlyban levő elektromágneses sugárzás

más néven "feketetest-sugárzás", "hőmérsékleti sugárzás"

Alapjelenség: a felmelegített szilárd testek sugárzást bocsátanak ki.
Ha elég meleg a test, akkor ez a sugárzás látható fény
lesz (hidegebb testnél infravörös).

Bonyodalom: ez a sugárzás folytonos színekű.
A gázok színeke viszont vonalas jellegű.
A forró plazmáé szintén folytonos, sötét vonalakkal...

"Mikroszkópikus", az anyag elektromosan töltött részecskékből áll.
"végső" magyarázat: A gyorsuló töltések elektromágneses sugárzást
bocsátanak ki.

De most nem ezt a "magyarázatot" keressük, hanem a jelenség
"fenomenológiai leírását, makroszkópikus törvényeit.



Mi az a "fekete fény"?

az atomos anyaggal termodinamikai
egyensúlyban levő elektromágneses sugárzás

más néven "feketetest-sugárzás", "hőmérsékleti sugárzás"

Néhány tudománytörténeti állítás
az abszolút fekete test sugárzásáról,
a fekete fényről:

- a kvantumelmélet kiindulópontját a feketetest-sugárzás elméleti magyarázatának nehézségei jelentették
- a fekete lyukak feketetest-jellegű Hawking-sugárzást bocsátanak ki
- az Univerzumot egyenletesen kitölti egy $2,726 \pm 0.002$ K hőmérsékletnek megfelelő feketetest-jellegű sugárzás



Mi a fény?

A fény az anyag egyik fajtája

A fény az első NEM ATOMOKBÓL álló anyagfajta,
amivel az emberiség találkozott

Közönséges, „nehéz” anyag

kövek, kristályok,
fadarabok...

hely, méret, mozgás
sűrűség, keménység
súly
áthatolhatatlanság

gyorsulás
ütközés, törés, deformáció
kémiai átalakulások


fizikája a MECHANIKA

Egyéb (nem anyag???)

fény, hang, szél, szagok, hő
elektromosság, mágnesség,
szerelem...

hangmagasság, hangerő
világosság, szín, árnyalat
hőmérséklet, feszültség
áthatolhatóság

Tulajdonságok:

vízszugár  fényszugár

Kölcsönhatások:

hővezetés
visszaverődés, fénytörés
interferencia
fényelnyelés



Mi a fény?

A fény az anyag egyik fajtája

A fény az első NEM ATOMOKBÓL álló anyagfajta,
amivel az emberiség találkozott

Közönséges, „nehéz” anyag

kövek, kristályok,
fadarabok...

egy részük
visszavezethető
a mechanikára:

Egyéb (nem anyag???)

fény, hang ~~X~~, szél ~~X~~, szagok ~~X~~, hő
elektromosság, mágnesség,
szerelem...

Tulajdonságok:

hely, méret, mozgás
sűrűség, keménység
súly
áthatolhatatlanság

hangmagasság, hangerő
világosság, szín, árnyalat
hőmérséklet, feszültség
áthatolhatóság

vízszugár  fényszugár

Kölcsönhatások:

gyorsulás
ütközés, törés, deformáció
kémiai átalakulások

hővezetés
visszaverődés, fénytörés
interferencia
fényelnyelés

fizikája a **MECHANIKA**



Mi a fény?

A fény az anyag egyik fajtája

A fény az első NEM ATOMOKBÓL álló anyagfajta,
amivel az emberiség találkozott

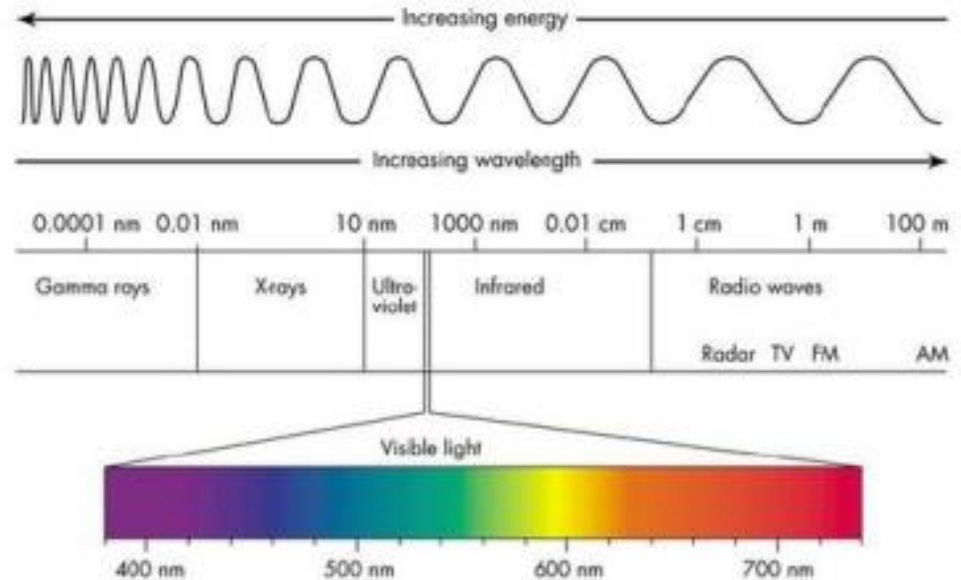
A fény elektromágneses hullám

Törvényeit a Maxwell-egyenletek
írják le:

And God Said
 $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$
 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
 $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
 $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$
and then there was light.

Ezek mások, mint a mechanika
ismert Newton-törvényei

Az elektromágneses spektrum



**A továbbiakban FÉNY = akármilyen
hullámhosszú elektromágneses hullám**



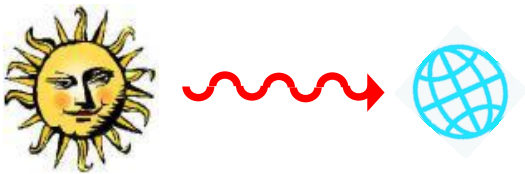
Mi a fény?

A fény az anyag egyik fajtája

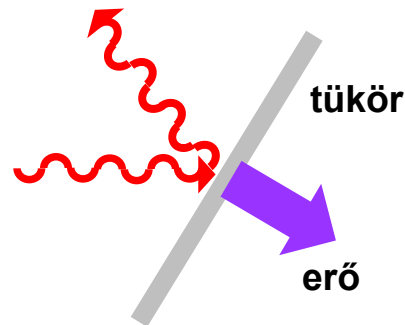
A fény az első NEM ATOMOKBÓL álló anyagfajta,
amivel az emberiség találkozott

A fény is anyag, mert:

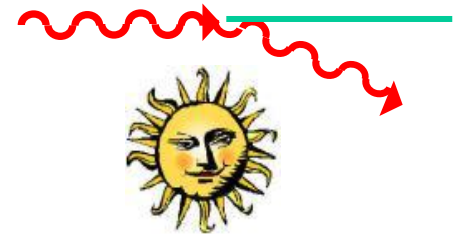
energiát hordoz



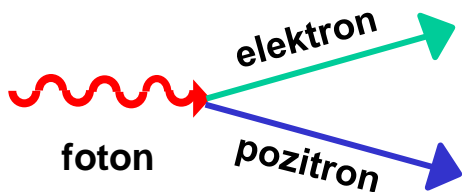
lendületet hordoz



hat rá a gravitáció



más anyaggá alakulhat



további, nem atomokból álló anyagfajták:

elektromos és mágneses mezők
az atomok alkatrészei (elektron, kvark)
már részecskék és mezők

Mi az, hogy "fekete" ?

mindenki tudja:

egy test vagy felület, ami nem **bocsát ki fényt**



Mi az, hogy "fekete" ?

mindenki rosszul tudja:

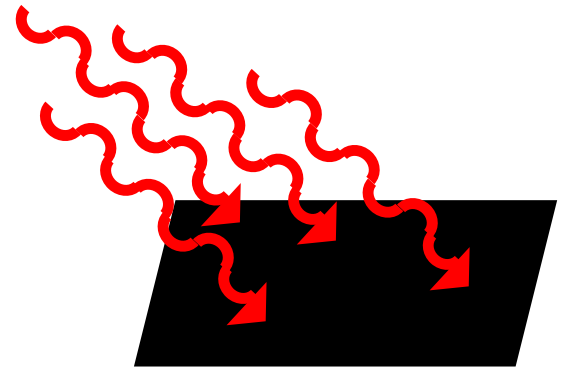
egy test vagy felület, ami nem bocsát ki fényt



Mi az, hogy "fekete" ?

mindenki rosszul tudja:

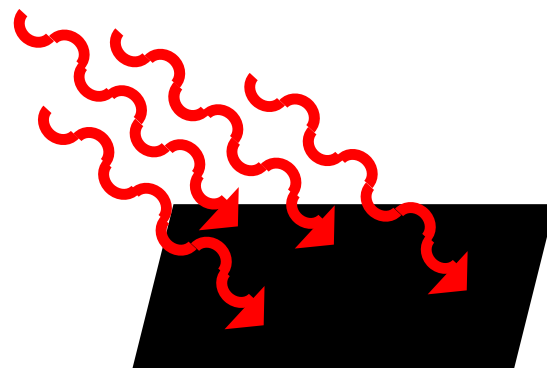
egy test vagy felület, ami nem bocsát ki fényt



végtelenül meleg lenne!

Mi az, hogy "fekete" ?

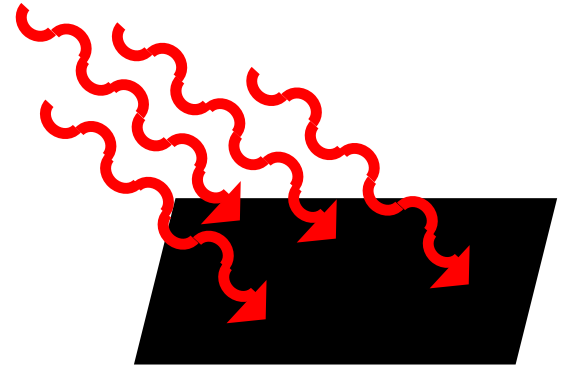
egy test vagy felület, ami nem ~~reflektál~~ fényt



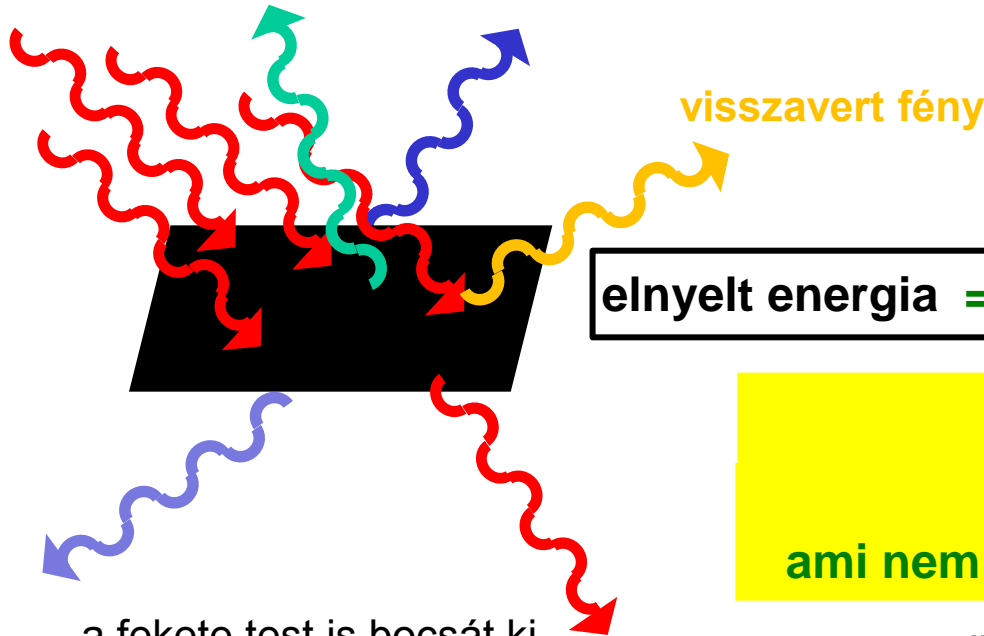
végtelenül meleg lenne!

Mi az, hogy "fekete" ?

egy test vagy felület, ami nem ~~elnyel~~ fényt



végtelenül meleg lenne!



$$\text{elnyelt energia} = \text{bejövő energia} - \text{visszavert energia}$$

abszolút fekete
egy test vagy felület,
ami nem **VER VISSZA** semmiféle fényt

(ilyen test nem létezik!)

egyensúlyban a test hőmérséklete állandó:

$$\text{kisugárzott energia} = \text{elnyelt energia}$$

a fekete test is bocsát ki
sugárzást,
általában minden irányban,
mindenféle hullámhosszon

$\text{elnyelt energia} = \text{bejöv}\ddot{o} \text{ energia} - \text{visszavert energia}$

abszolút fekete
egy test vagy felület,
ami nem **VER VISSZA** semmiféle fényt

$\text{elnyelt energia} = \text{bejöv}\ddot{o} \text{ energia}$

egyensúlyban a test hőmérséklete állandó:

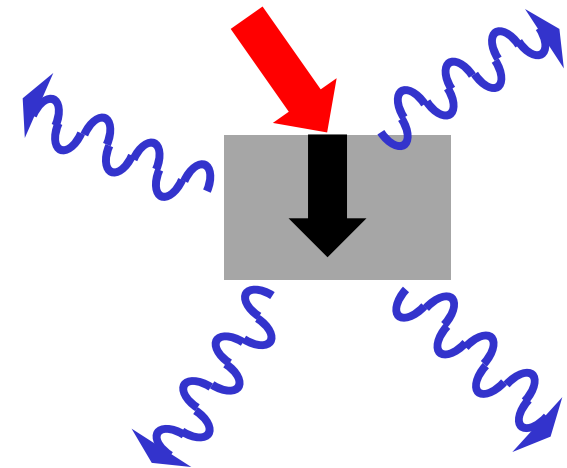
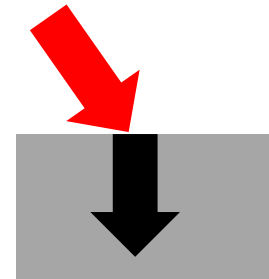
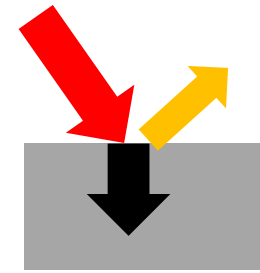
$\text{kisugárzott energia} = \text{elnyelt energia}$

tehát:

$\text{kisugárzott energia} = \text{bejöv}\ddot{o} \text{ energia}$

az abszolút fekete test egyensúlyba tud kerülni
saját sugárzásával:

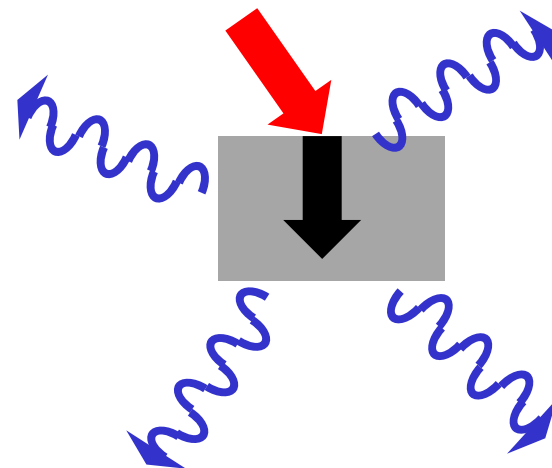
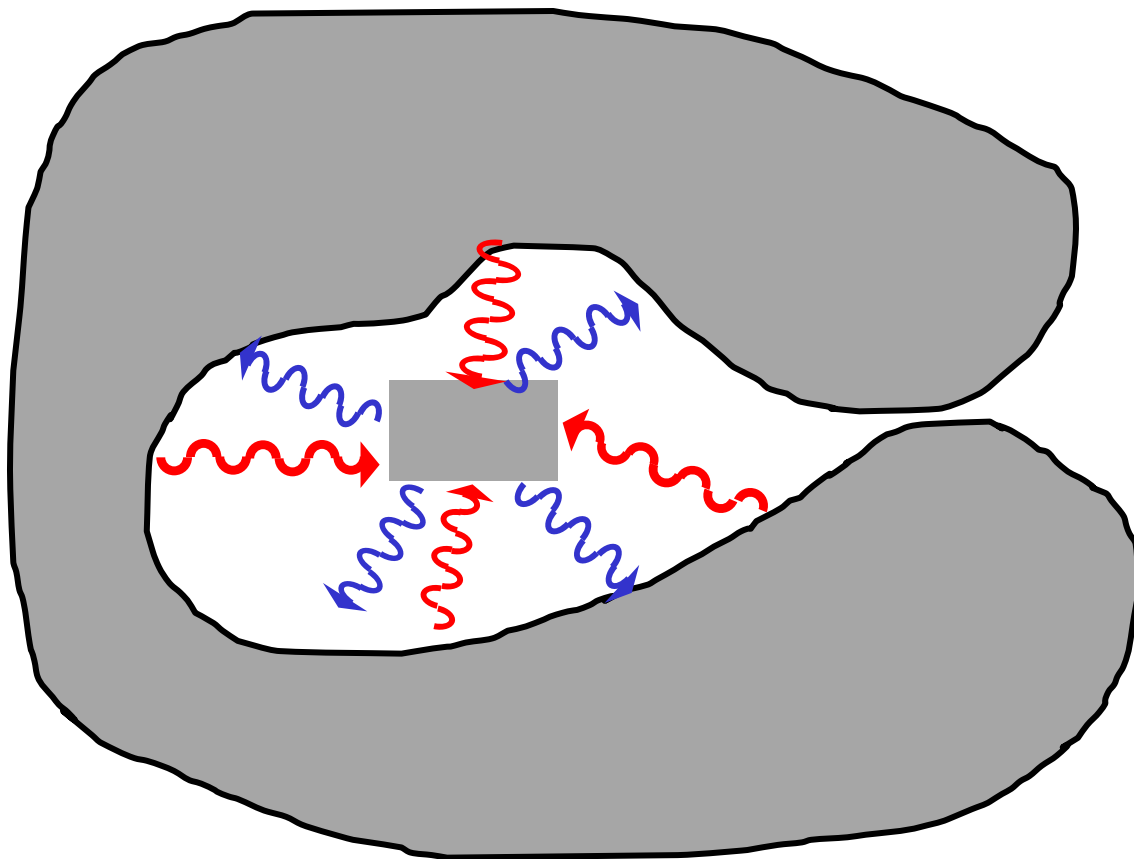
ez a nevezetes feketetest-sugárzás



kisugárzott energia = bejövő energia

az abszolút fekete test egyensúlyba tud kerülni saját sugárzásával

Ez hogyan lehetséges? A bejövő sugárzás **NEM** a test **SAJÁT** sugárzása!



TRÜKK:

tegyük a testet és a sugárzást egy nagyobb szilárd test **ÜREGÉBE!**

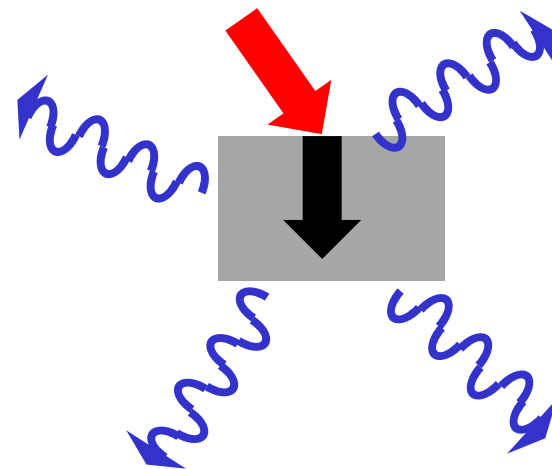
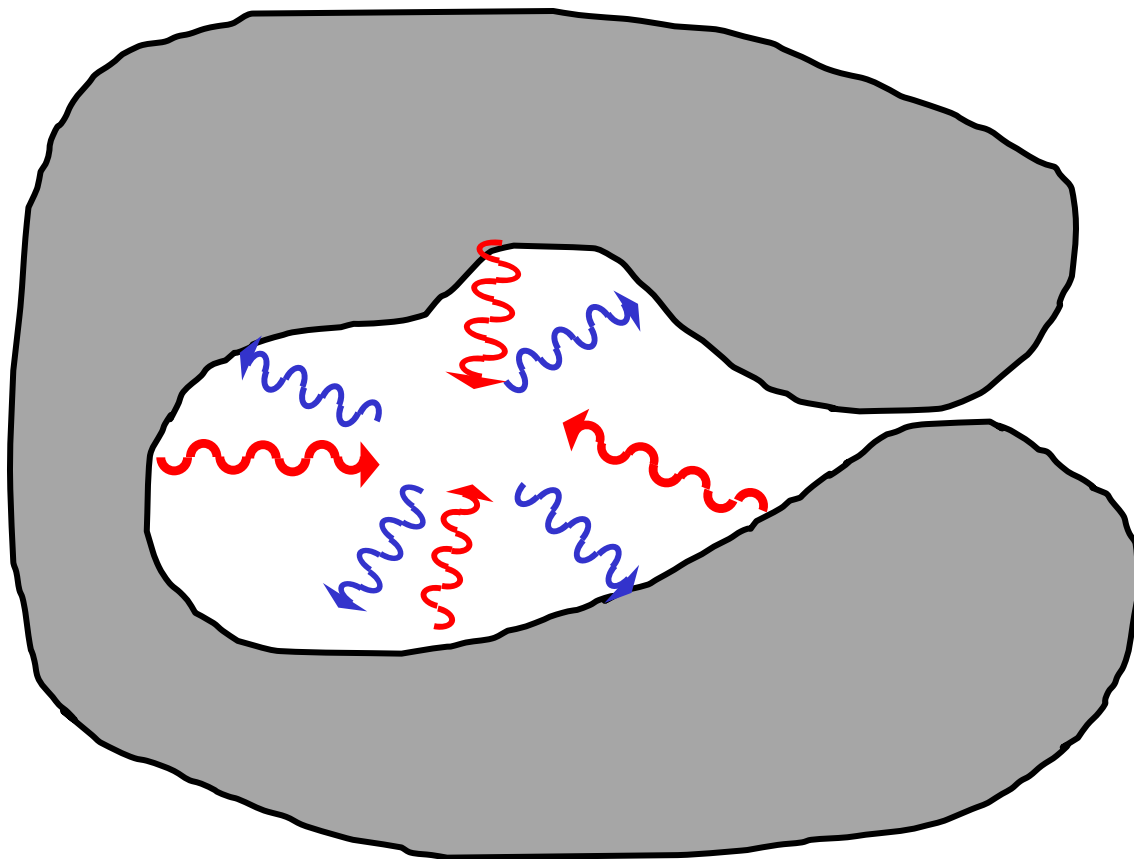
az üreg fala visszaveri – vagy visszasugározza – a sugárzást a kis testre

ekkor a bejövő sugárzás is lényegében a kis test **SAJÁT** sugárzása!

kisugárzott energia = bejövő energia

az abszolút fekete test egyensúlyba tud kerülni saját sugárzásával

Ez hogyan lehetséges? A bejövő sugárzás NEM a test SAJÁT sugárzása!



ÚJABB TRÜKK:

hagyjuk el az eredeti kis testet!!

a sugárzás az üreg falában nyelődik el, és onnan sugárzódik ki!

ekkor az üreg fala kerül egyensúlyba a SAJÁT sugárzásával!

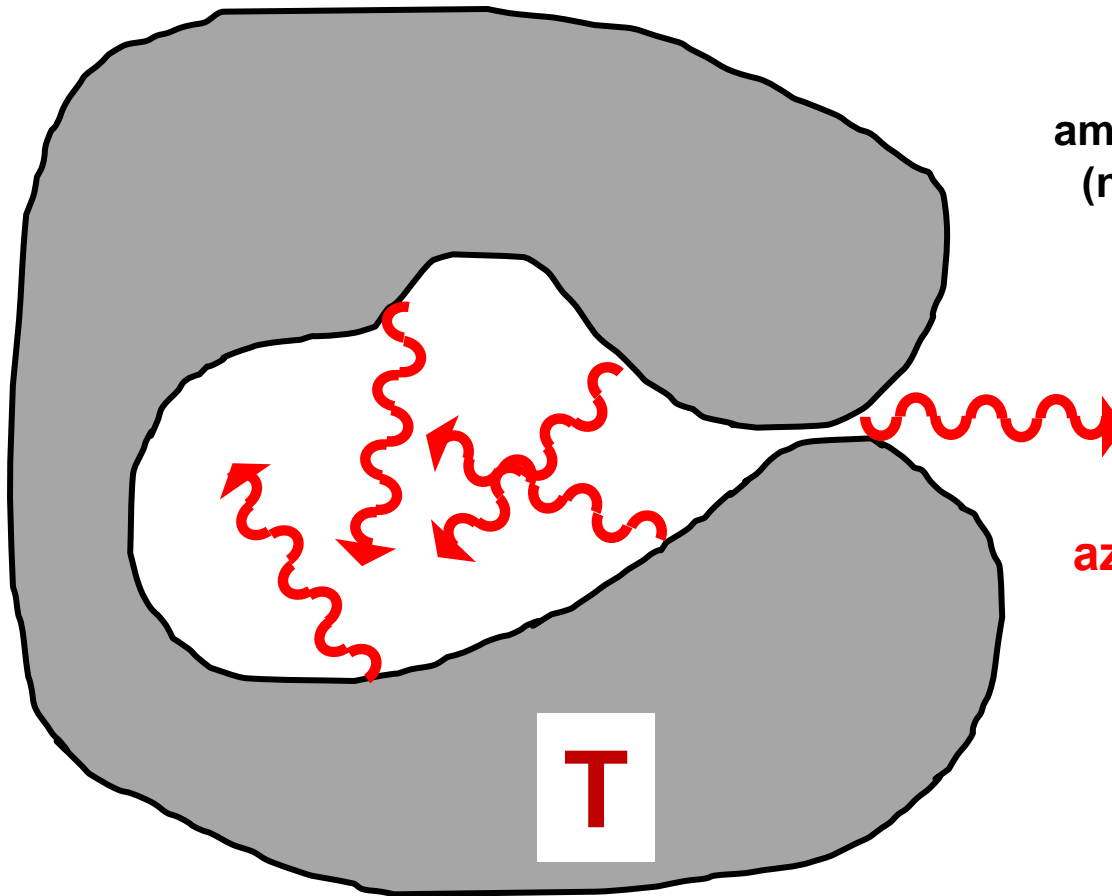
ezzel egyben megoldottuk az "abszolút feketeség" nehézségét is

abszolút fekete

egy test vagy felület,
ami nem **VER VISSZA** semmiféle fényt

ilyen test nem létezik!

de jól közelíti egy
lyukas üreg belseje



ami bemegy, bent marad
(nincs visszaverődés)

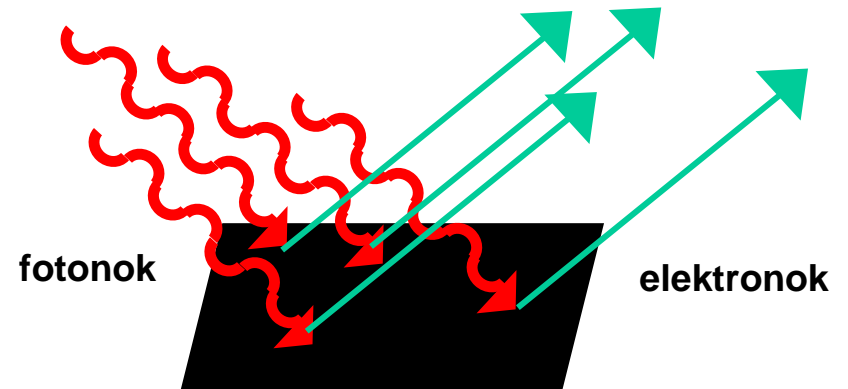
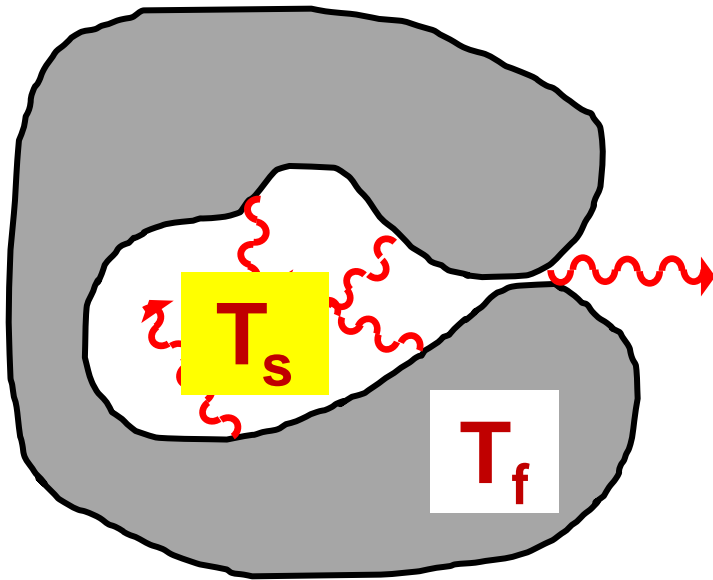
ami kiszivárog
a lyukon, olyan, mint az
ideális fekete test
sugárzása

az üregből kibocsátott sugárzás
megegyezik az ideális fekete
test sugárzásával,
független az üreg falának
anyagi minőségétől,
és csak az üreg falának
T hőmérsékletétől függ

A fény és az atomos anyag (szilárd testek) kölcshatása

egy fontos eset:

termodinamikai
egyensúly



pl: fényelektromos jelenség
(Einstein 1905, Nobel-díj 1921)

egyensúly az üreg falának atomjai
(ezek rezgése) és az üregben
levő sugárzás között

$$T_s = T_f$$

Mit is jelent tulajdonképpen az
EGYENSÚLY?

Egyensúly

feltétele: energiacsere
a különböző részrendszerek között

egy test és a sugárzása közti
energiacsere egyszerű mechanikai modellje

kezdeti
állapot

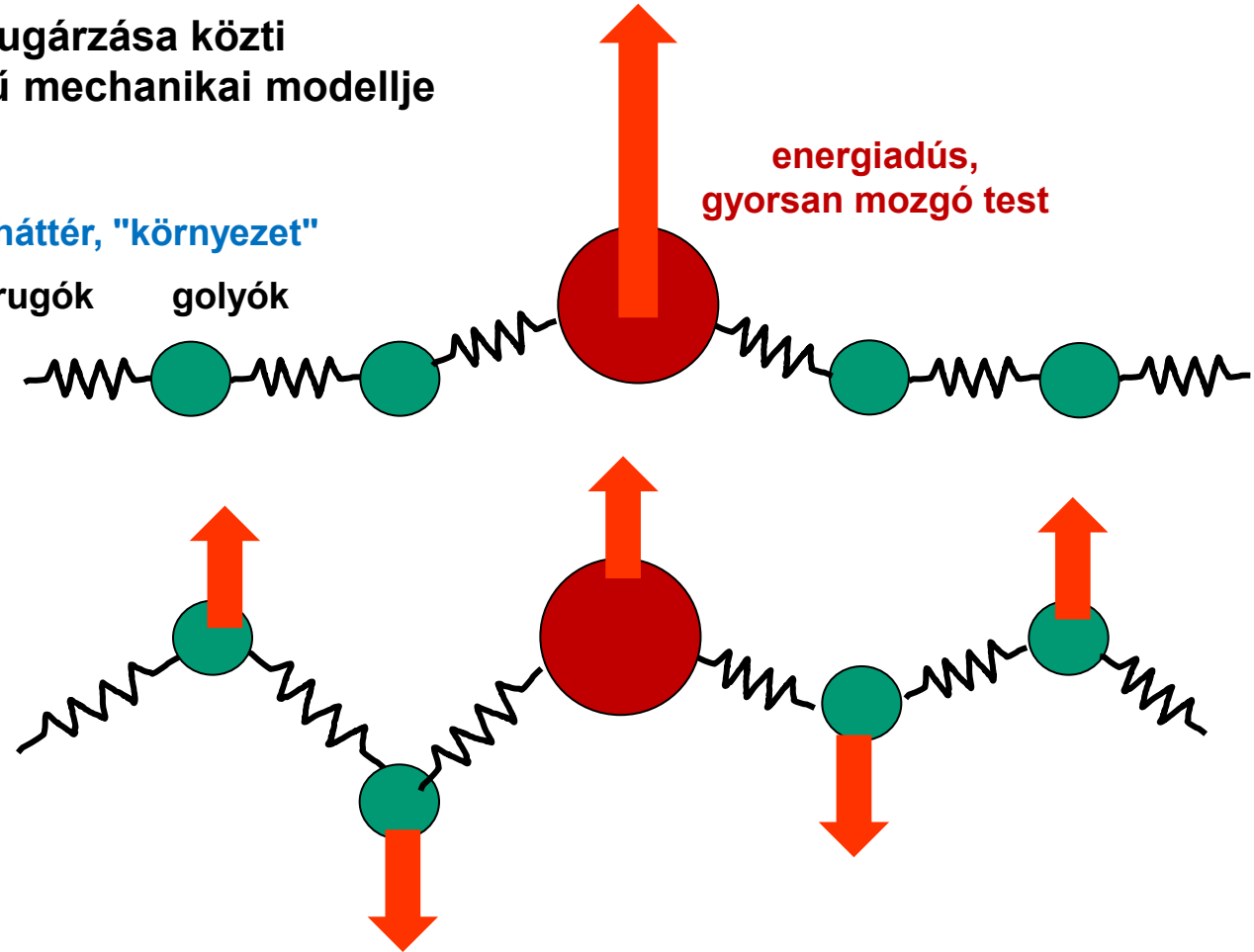
háttér, "környezet"

rugók

golyók

energiadús,
gyorsan mozgó test

későbbi
állapot



az energia egyenletesen oszlik el a különböző
szabadsági fokok, mozgási lehetőségek között



Egyensúly

feltétele: energiacsere
a különböző részrendszerek között

egy test és a sugárzása közti
energiacsere egyszerű hidrodinamikai modellje

kezdeti
állapot

nyugvó háttér, "környezet"

energiadús,
gyorsan mozgó test

későbbi
állapot

az energia széteszik, a környezet átveszi a nagy részét



Egyensúly

feltétele: energiacsere
a különböző részrendszerek között

egy test és a sugárzása közti
energiacsere egyszerű hidrodinamikai modellje

kezdeti
állapot

nyugvó háttér, "környezet"

energiadús,
gyorsan mozgó test

korlátozott
tartományban

későbbi
állapot

az energia egyenletesen oszlik el a különböző
szabadsági fokok, mozgási lehetőségek között

a víznek sokkal több szabadsági foka van, ezért az
energia nagy része a víz hullámozgásában jelenik meg

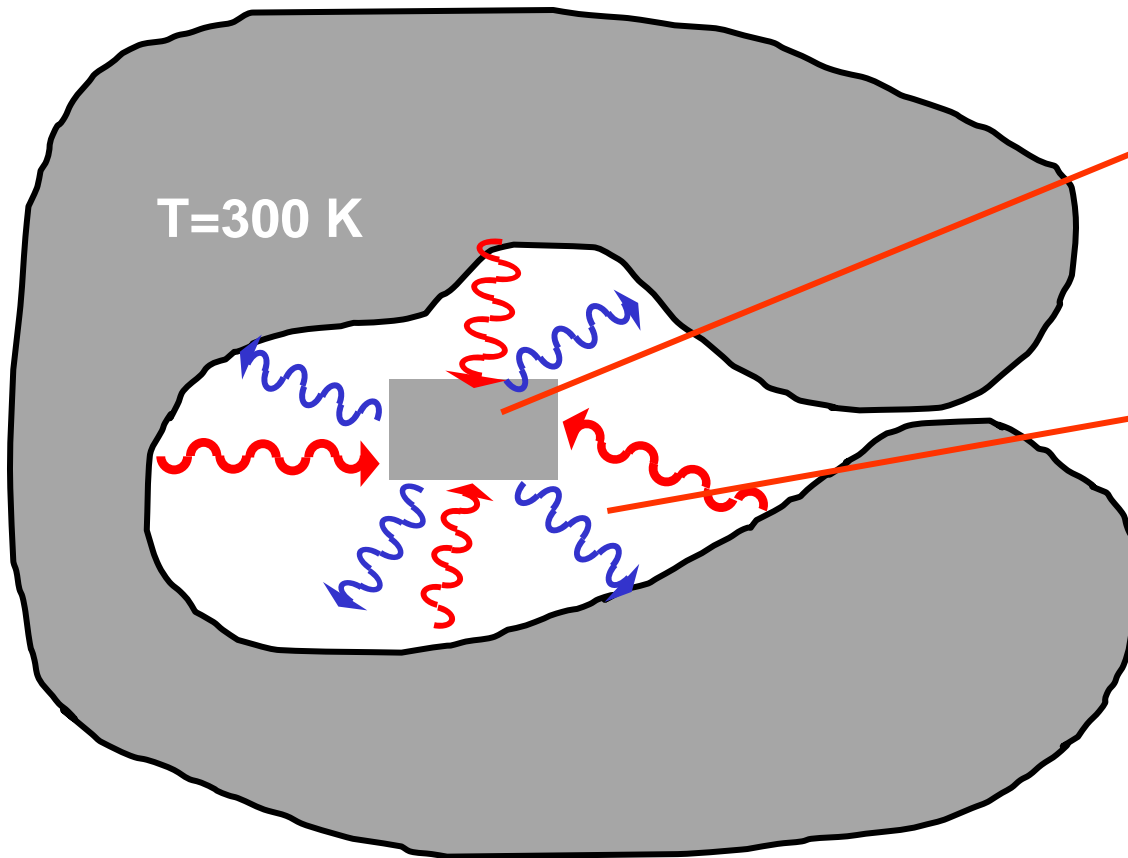


Egyensúly

feltétele: energiacsere
a különböző részrendszerek között

Ezzel szemben:

egy test és a sugárzása közti
TÉNYLEGES ENERGIAVISZONYOK
(mérések az 1880-as években)



a vas atomjai
hőmozgásának
energiasűrűsége:
 10^8 J/m^3

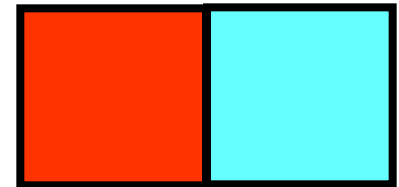
a feketetest-sugárzás
energiasűrűsége:
 10^{-6} J/m^3

az energia nagy része
a szilárd testben van,
alig jut valami a sugárzásra!

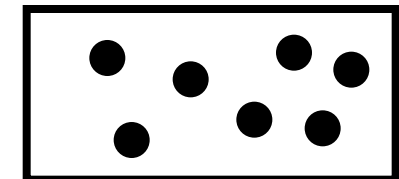
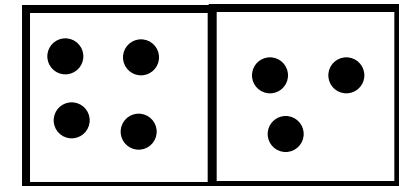
ez volt az első nyoma annak,
hogy a modellek hibásak,
félrevezetőek!

Termodinamika

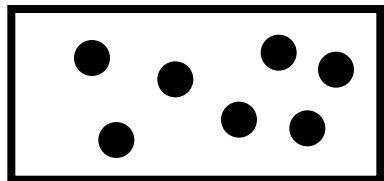
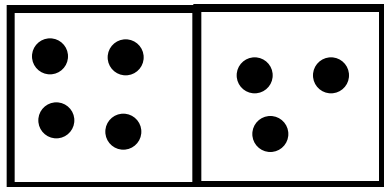
- Jean, hány fok van idebent?
- Húsz, uram.
- És odakint?
- Négy, uram.
- Jean, nyissa ki az ajtót, és engedje be azt a négyet is!



- Jean, hány **vendég** van idebent?
- Húsz, uram.
- És odakint?
- Négy, uram.
- Jean, nyissa ki az ajtót, és engedje be azt a négyet is!



Két részrendszer egyesítése, új egyensúlyi állapot



Van, ami összeadódik:

térfogat
részecskeszám
tömeg
energia
elektromos töltés
stb

**extenzív
mennyiségek**

Van, ami kiegyenlítődik:

nyomás
koncentráció
sűrűség
hőmérséklet
elektromos potenciál
stb

**intenzív
mennyiségek**

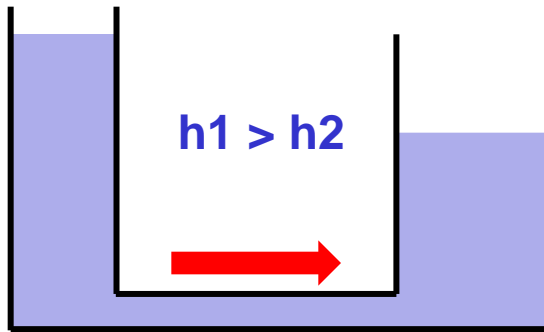
Egyensúlyi állapotban az intenzív mennyiségek mindenütt egyformák, nincsenek különbségek

Ha nincs egyensúly, makroszkópikus folyamatok indulnak meg az intenzív mennyiségek kiegyenlítődése irányában

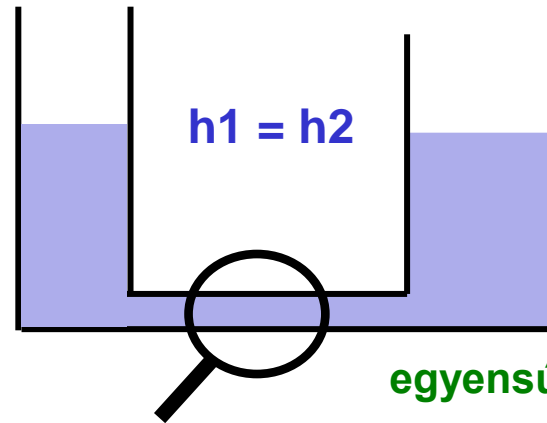


a termodinamikai egyensúly modellje:

közlekedő edények



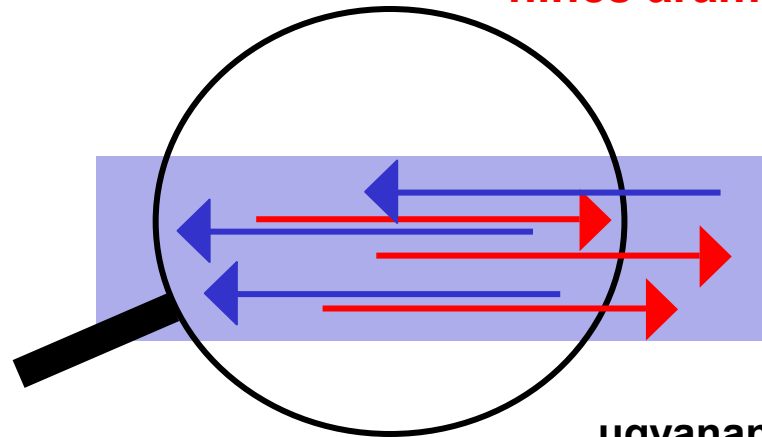
nincs egyensúly:
áramlás
makroszkópikus
kiegyenlítődési folyamat



egyensúly van:
nincs áramlás

az egyensúly nem
sztatikus, hanem
dinamikus:

egymást kiegyenlítő
mikrofolyamatok

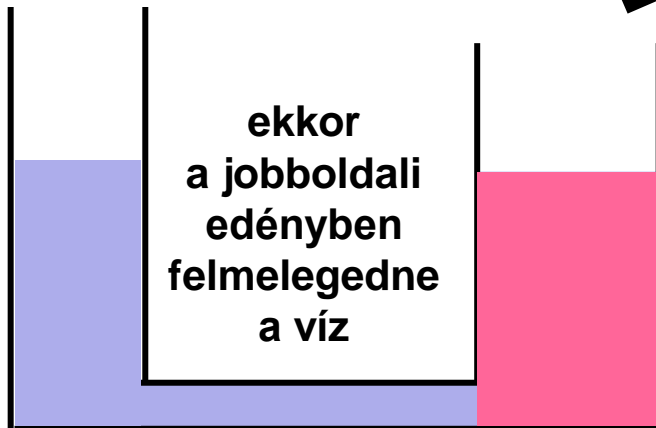


ugyanannyi részecske
megy jobbra, mint balra

dinamikus egyensúly:

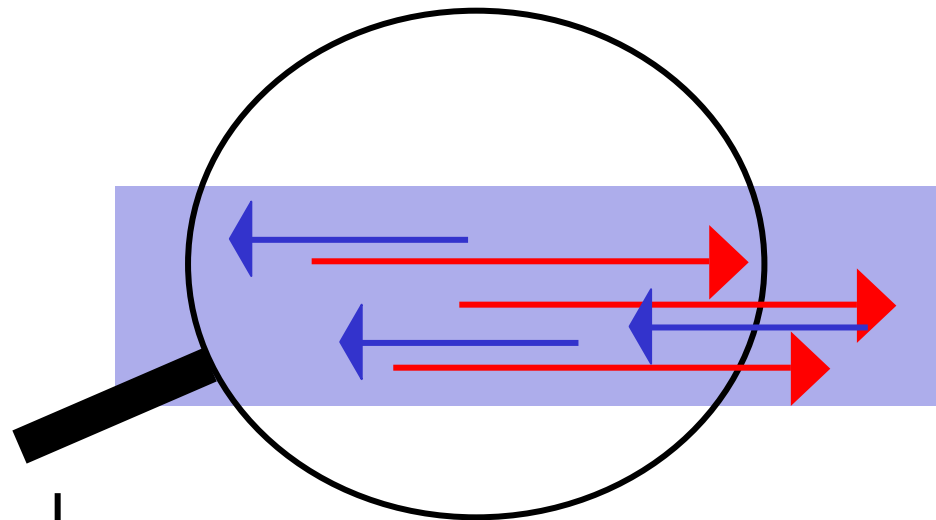
ugyanannyi részecske
megy jobbra, mint balra

lehetséges-e, hogy
jobbra csak a gyorsabb
részecskék mennek,
balra csak a lassabbak?



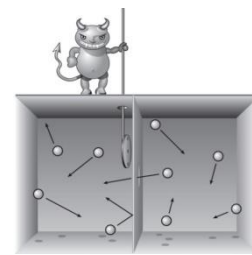
a termodinamika megtiltja az ilyen
folyamatokat!

Minden részfolyamatnak külön-külön
dinamikus egyensúlyba kell jutnia:



egyetlen (langyos) hőtartályból
kettő (egy hideg és egy meleg lenne
közéjük hőerőgép kapcsolható

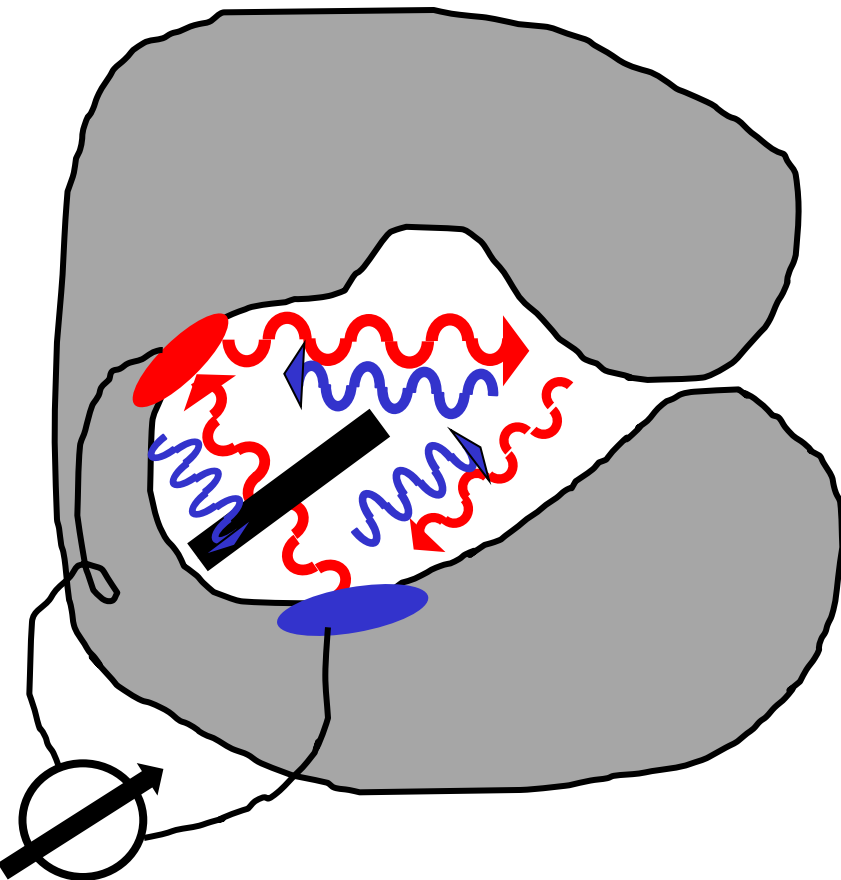
MÁSODFAJÚ ÖRÖKMOZGÓ !!!



Maxwell
démona



ez a
RÉSZLETES EGYENSÚLY
elve



a termodinamika
(a legáltalánosabb érvényű
fizikai tudományág)
ezt megtiltja:

a szilárd anyagú üreg és a sugárzás
egyensúlya

ha nincs részletes egyensúly:
az egyik irányba több energia áramlik

egy ügyes színszűrővel meg lehetne fogni

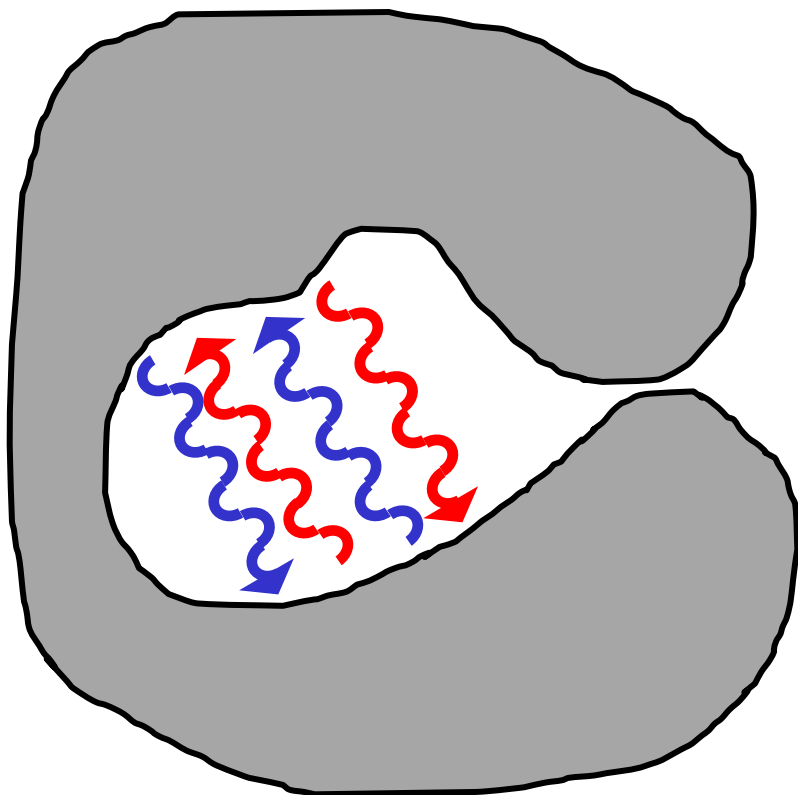
felborul az egyensúly

az üregben hőmérsékletkülönbség lép fel
kiegyenlítődési folyamatok indulnak meg

erre hőerőgép kapcsolható

ismét egy másodfajú örökmozgó!

az üregbeli sugárzásra is
fenn kell állnia
a részletes egyensúly elvének!



részletes egyensúly:

minden felületdarab-párra,
minden irányra,
minden frekvenciára
igaz, hogy

mindkét irányban
pontosan
ugyanannyi energia
áramlik

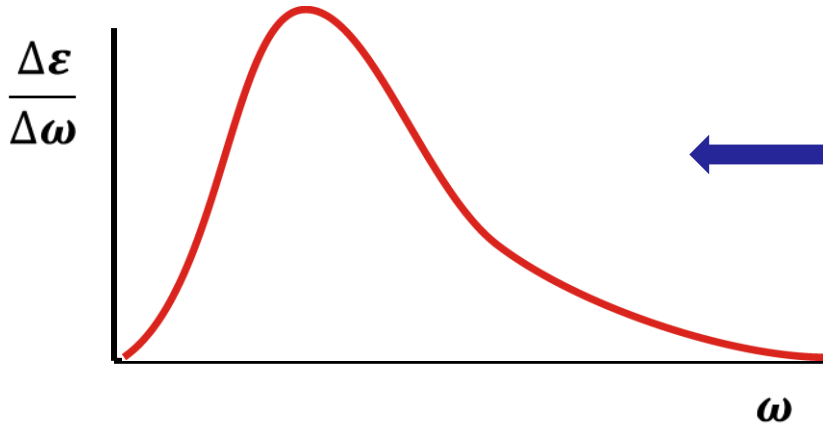
ebből a XIX. század okos
fizikusai levezették a sugárzási
energia frekvencia szerinti
eloszlásának képletét:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \omega} = K \omega^3 f\left(\frac{\omega}{T}\right)$$

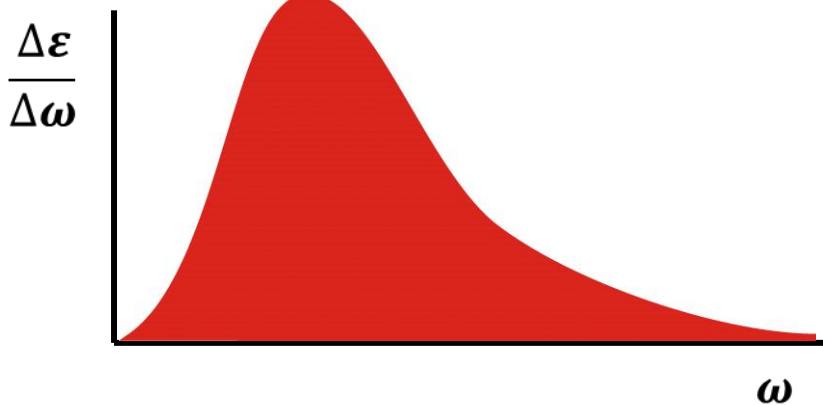
az **f** függvényt nem tudták kitalálni,
azt meg kellett mérni

a sugárzási energia frekvencia szerinti eloszlásának képlete

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \omega} = K \omega^3 f\left(\frac{\omega}{T}\right)$$



a mérési eredmény megfelel a képletnek, de nincs elméleti magyarázat



a görbe alatti terület:
a sugárzás teljes energiasűrűsége

$$\varepsilon = a T^4$$

Ez a Stefan–Boltzmann-törvény



a sugárzási energia frekvencia szerinti eloszlásának képlete

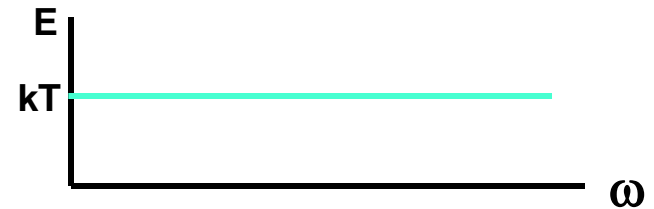
$$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \omega} = K \omega^3 f\left(\frac{\omega}{T}\right)$$

ennyit tud a termodinamika!

az ismeretlen f függvényt meg kell mérni, vagy más úton ki kell számolni

számoljunk a klasszikus mechanika alapján:

ekvipartíció tétel:

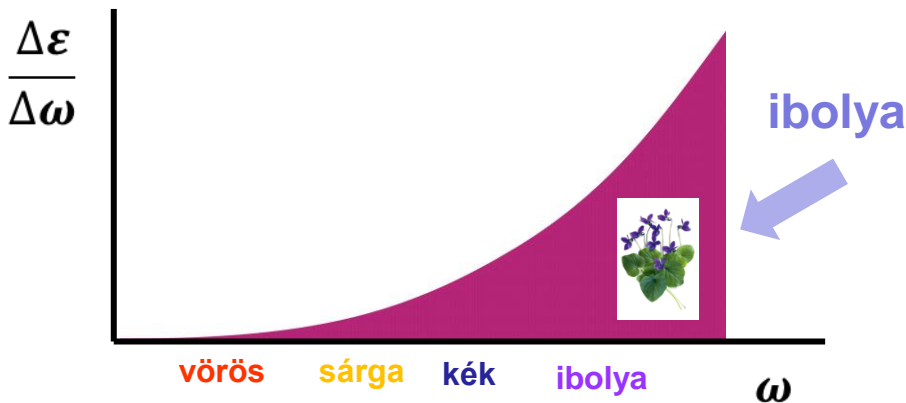


minden szabadsági fokra kT energia jut:

Rayleigh–Jeans-képlet:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \omega} = K \omega^2 T$$

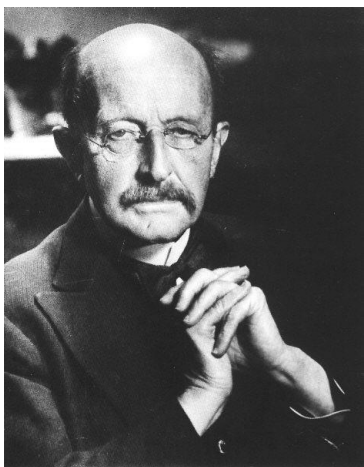
a görbe alatti terület, azaz az üreg teljes energiája **VÉGTELEN!**



Ibolyántúli katasztrófa

avagy
A KLASSZIKUS FIZIKA CSŐDJE

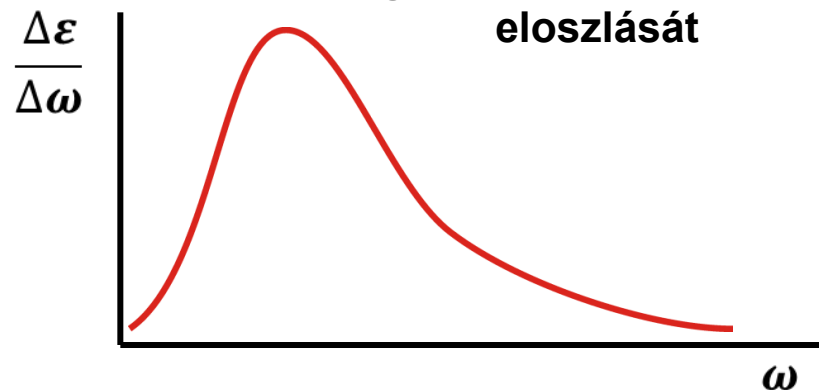




Max Planck (1858–1947)

Új idők:

1900 novemberében német fizikusok pontosan MEGMÉRIK a sugárzás frekvencia szerinti eloszlását

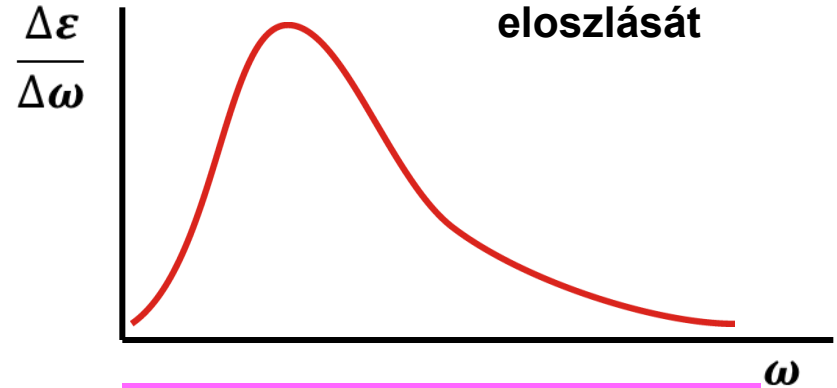




Max Planck (1858–1947)
sikeresen függvényt illeszt
a görbéhez:

Új idők:

1900 novemberében német
fizikusok pontosan MEGMÉRIK
a sugárzás frekvencia szerinti
eloszlását



$$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \omega} = K \frac{\omega^3}{e^{\frac{h\omega}{kT}} - 1}$$

ez a képlet jól leírja a kísérleteket
de a klasszikus fizika alapján nem
lehet megérteni

Planck ezért 1900. decemberében
bevezeti a **kvantumhipotézist**

a klasszikus fizika recsegve
összedől, és
a fekete fény
sugarával megvilágítva
megkezdődik
a modern fizika és a XX. század

Planck ezért 1900. decemberében bevezeti a **kvantumhipotézist**

az üregsugárzás energiája nem folytonosan, hanem

$$E = \hbar \omega$$

energiájú **kvantumokban** adódik át az üreg falának

ezeket az energia-adagokat Einstein 1905-ben **fotonoknak** nevezi el

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \omega} = K \frac{\omega^3}{\frac{h\omega}{e kT} - 1}$$

Planck ezzel a feltevéssel le tudta vezetni a fenti képletet, és "megmagyarázta" a mérési eredményt

A kvantumhipotézist viszont nem lehetett megérteni a klasszikus fizika alapján, sőt egyenesen ellentmondott annak.

ebből a hipotézisből nőtt ki a **KVANTUMELMÉLET**, a 20. század fizikája

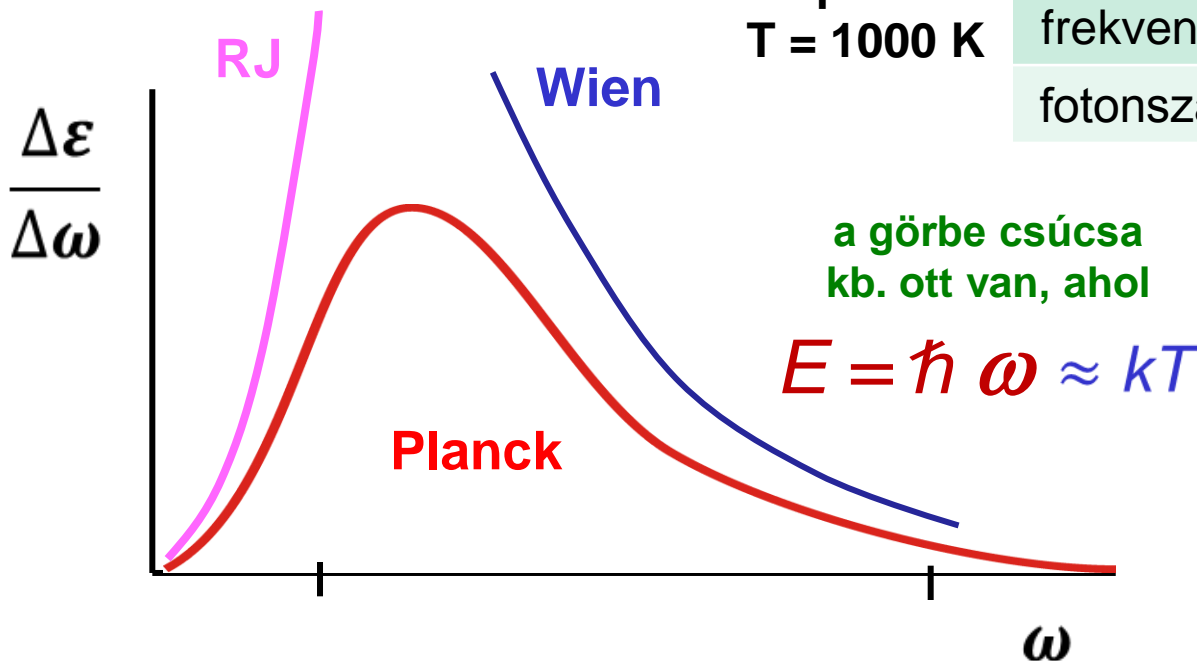
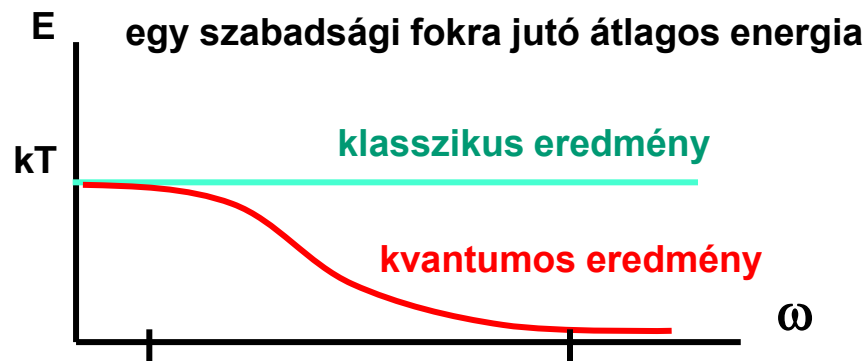


De hogyan tudja megmagyarázni a kvantumhipotézis az üregsugárzás furcsaságait?

nem igaz a klasszikus ekvipartíció:

$$E = \hbar \omega$$

nagy frekvenciájú, azaz nagy energiájú fotonból kevés van



pl.:
T = 1000 K

tartomány	látható	radar
frekvencia	10^{15} Hz	10^{10} Hz
fotonszám	10^{-22}	2000

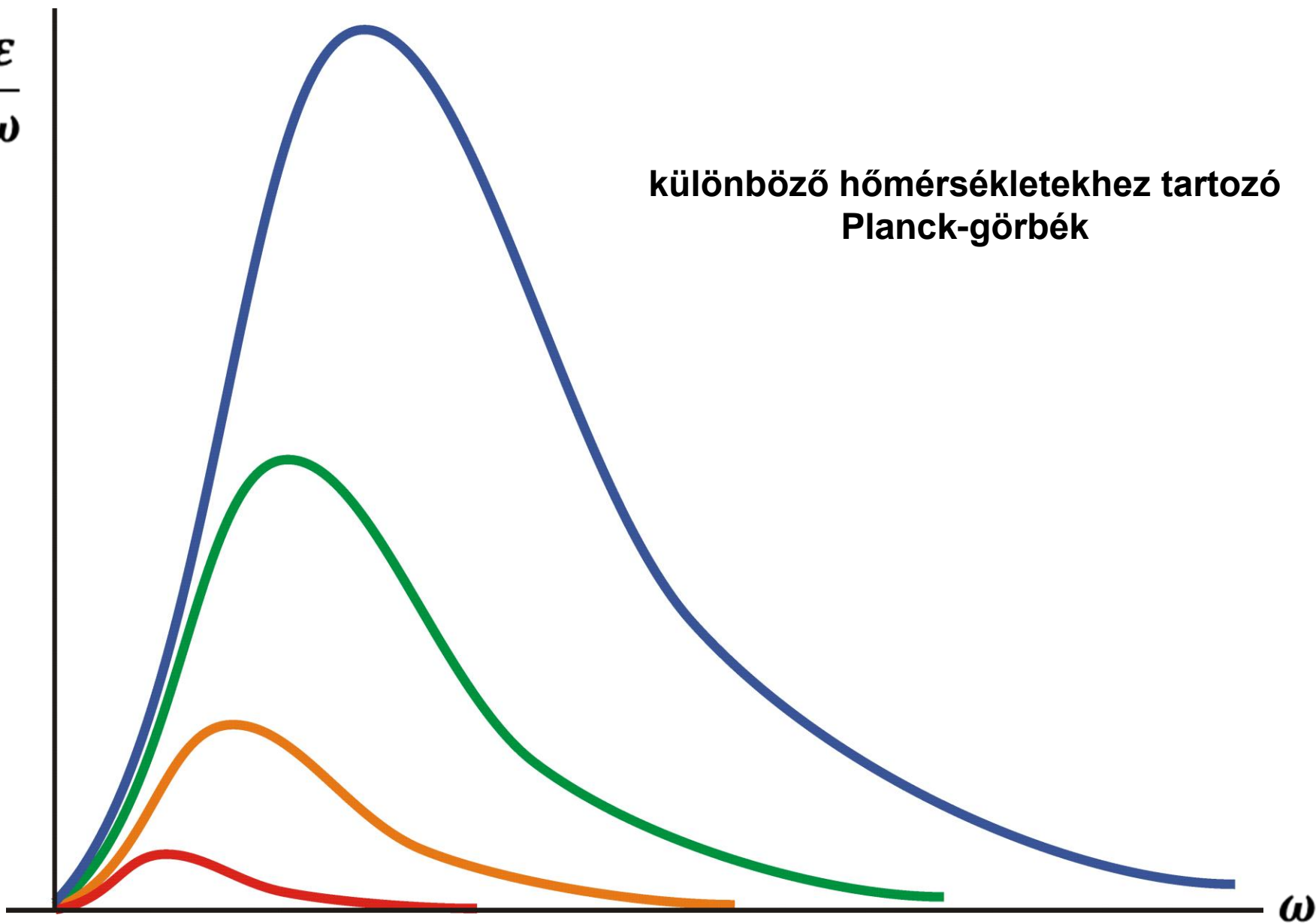
magasabb hőmérsékleten nagyobb frekvencián, azaz rövidebb hullámhossznál maximális a sugárzás

ez a Wien-törvény

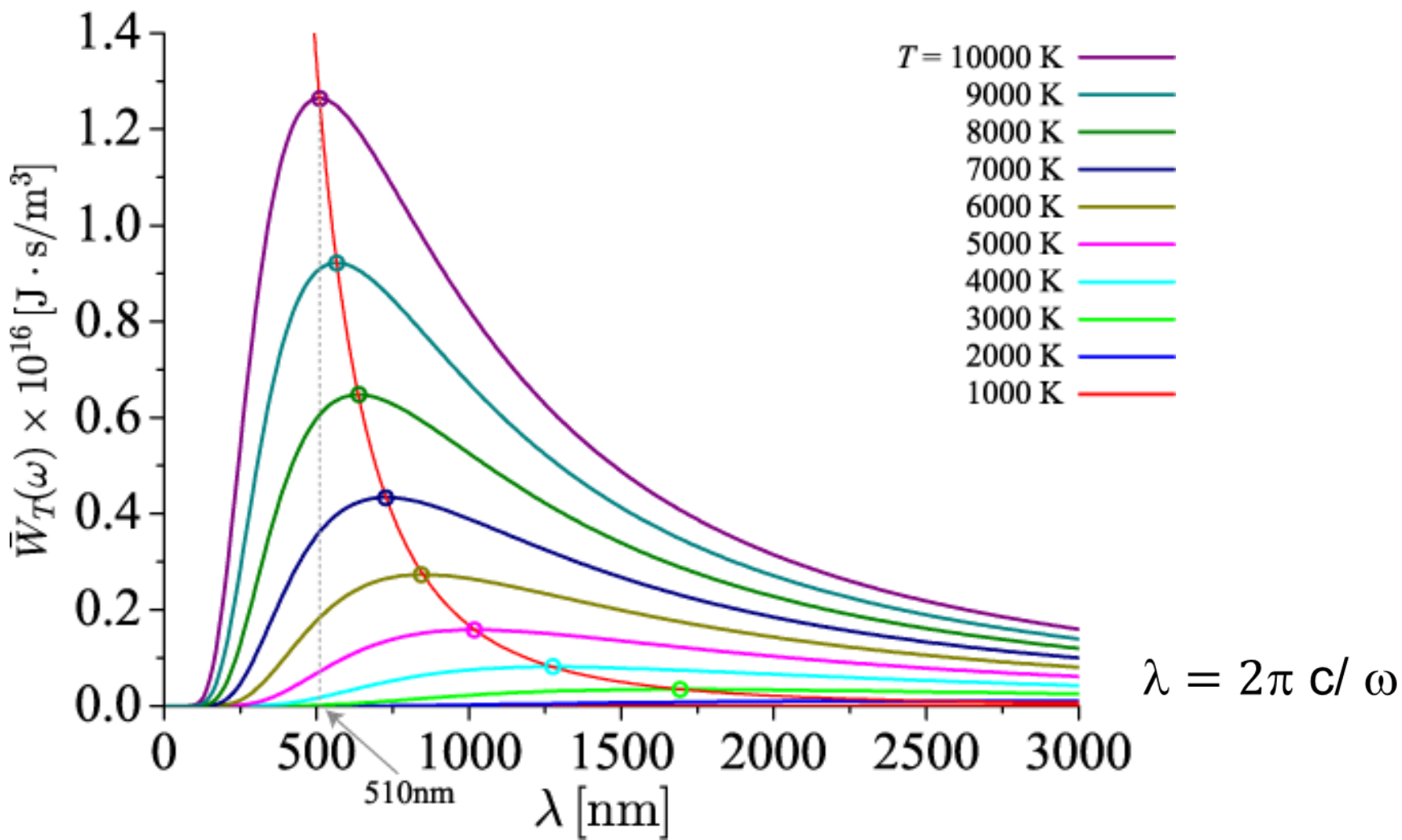


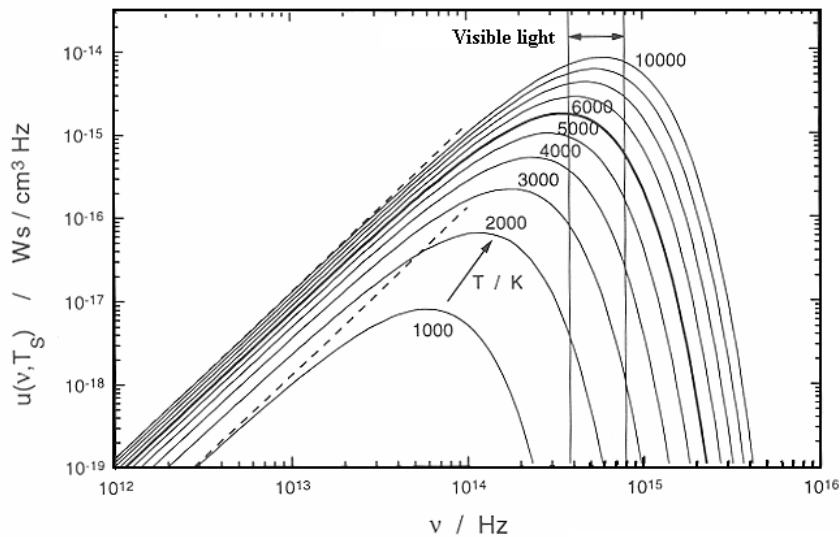
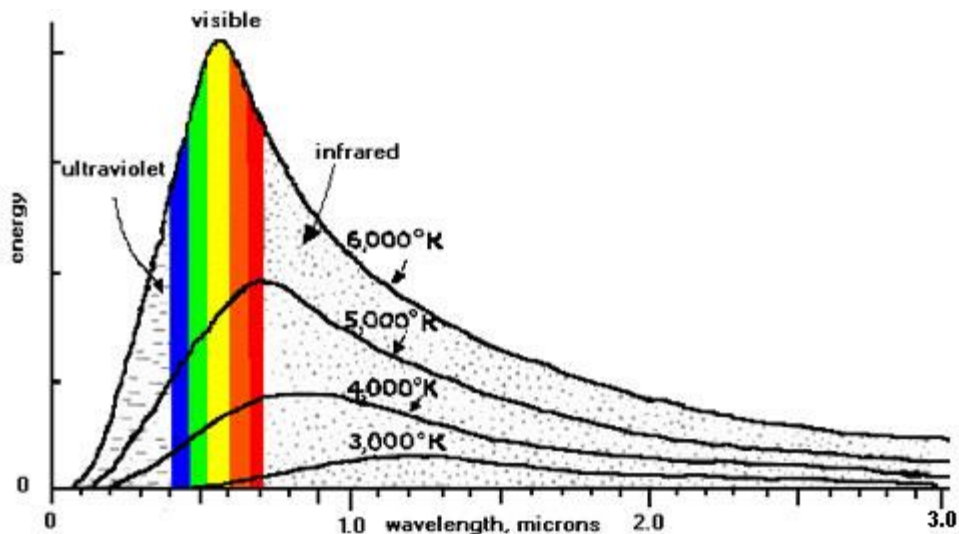
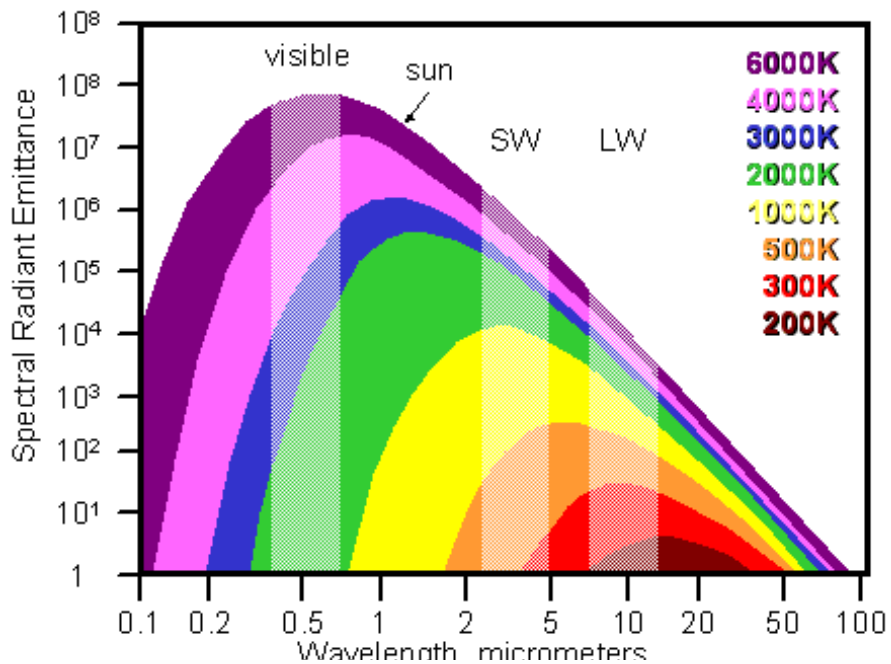
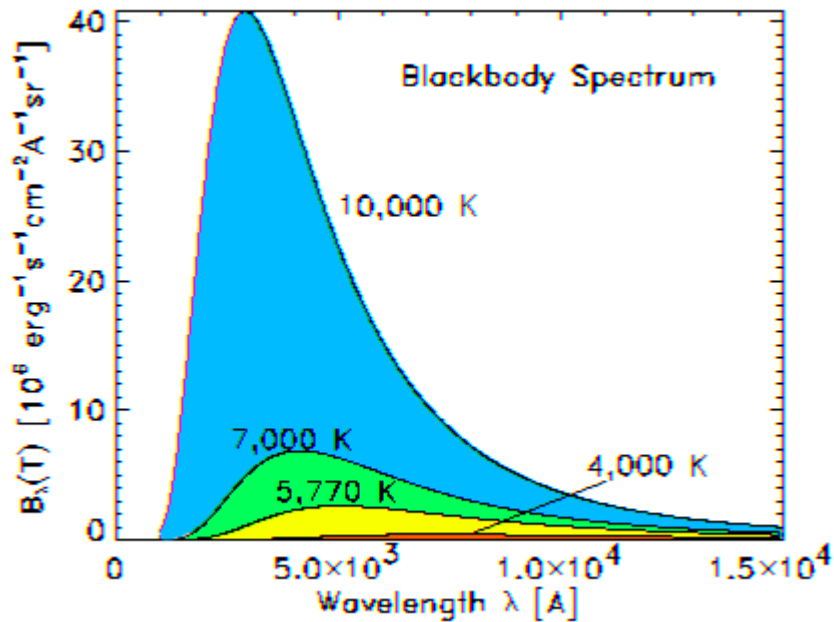
$$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \omega}$$

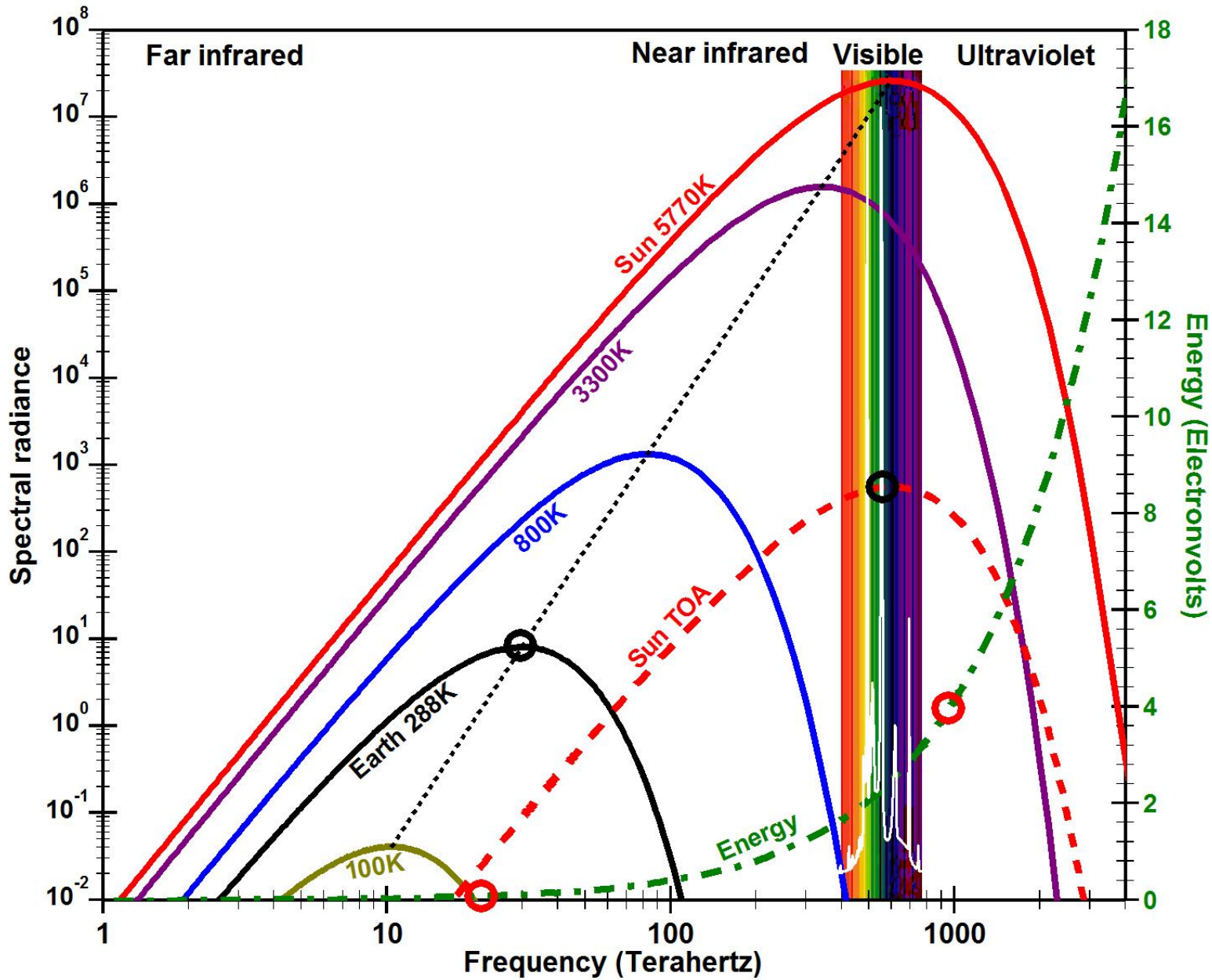
különböző hőmérsékletekhez tartozó
Planck-görbék



a Planck-görbe a hullámhossz függvényében ábrázolva



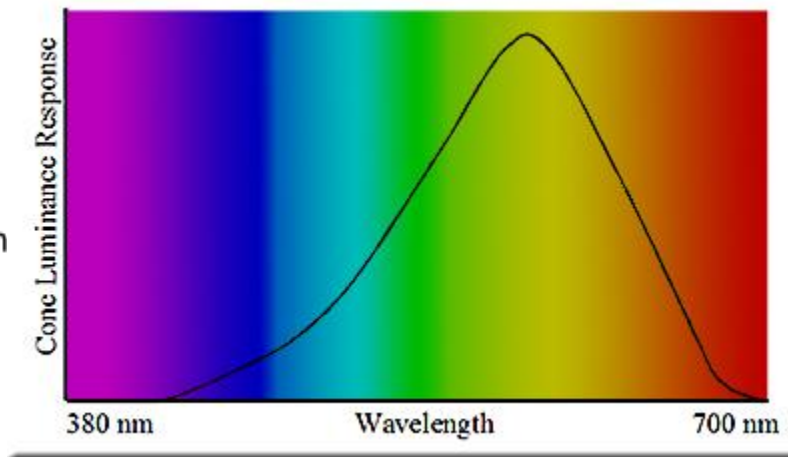
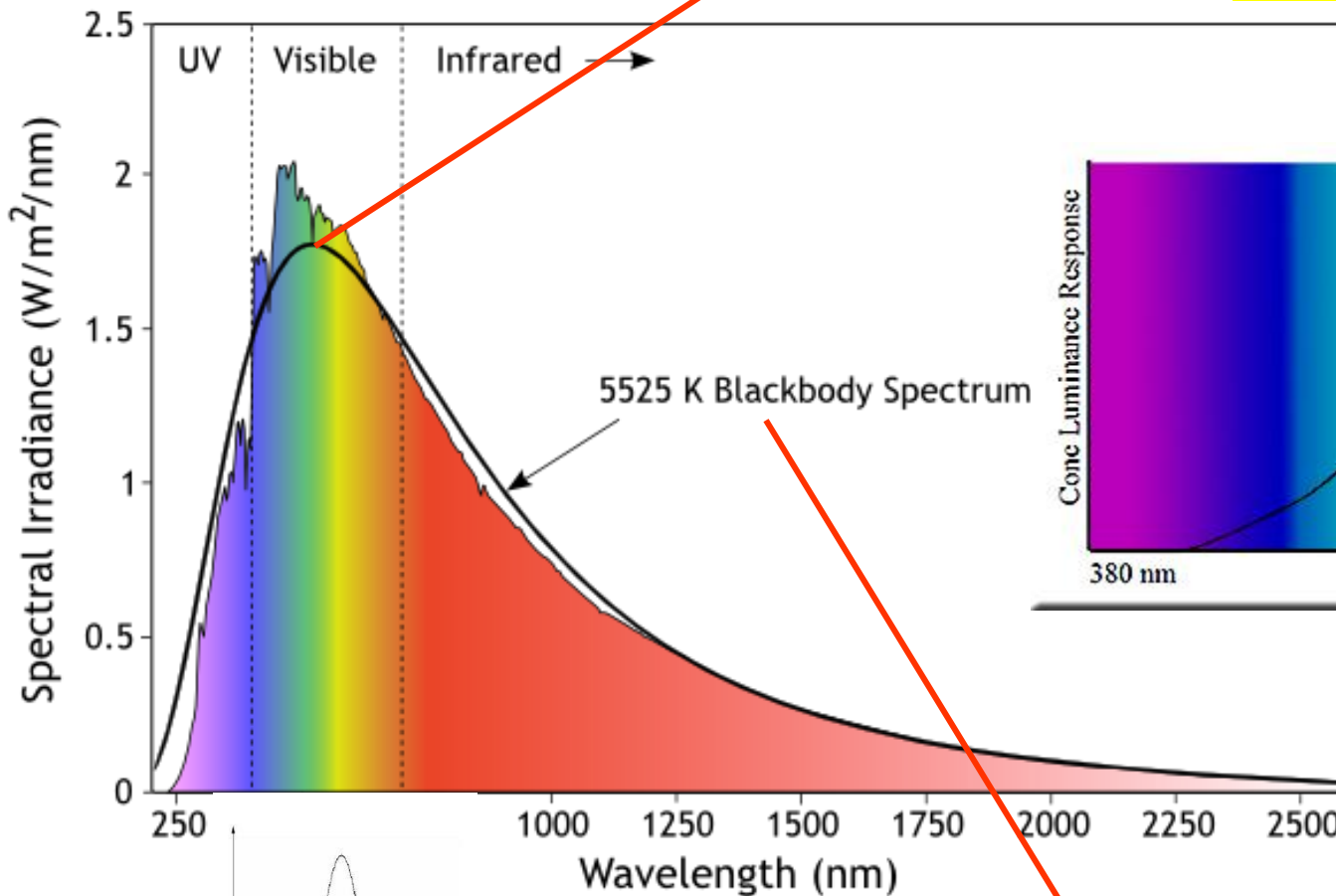




a Nap sugárzása

540 nm (zöld)

miért sárga a Nap?

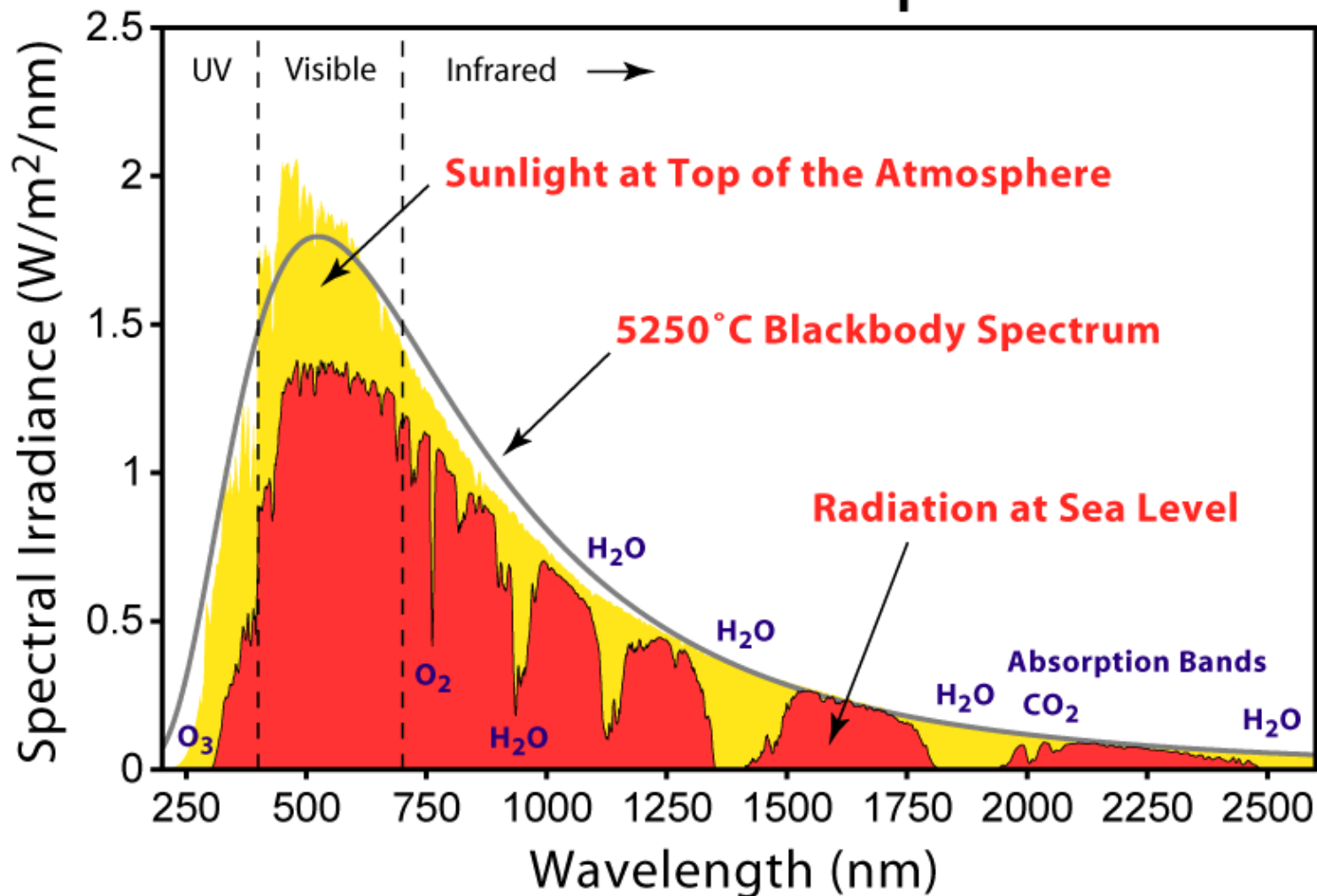


az emberi szem
érzékenységi
görbéje

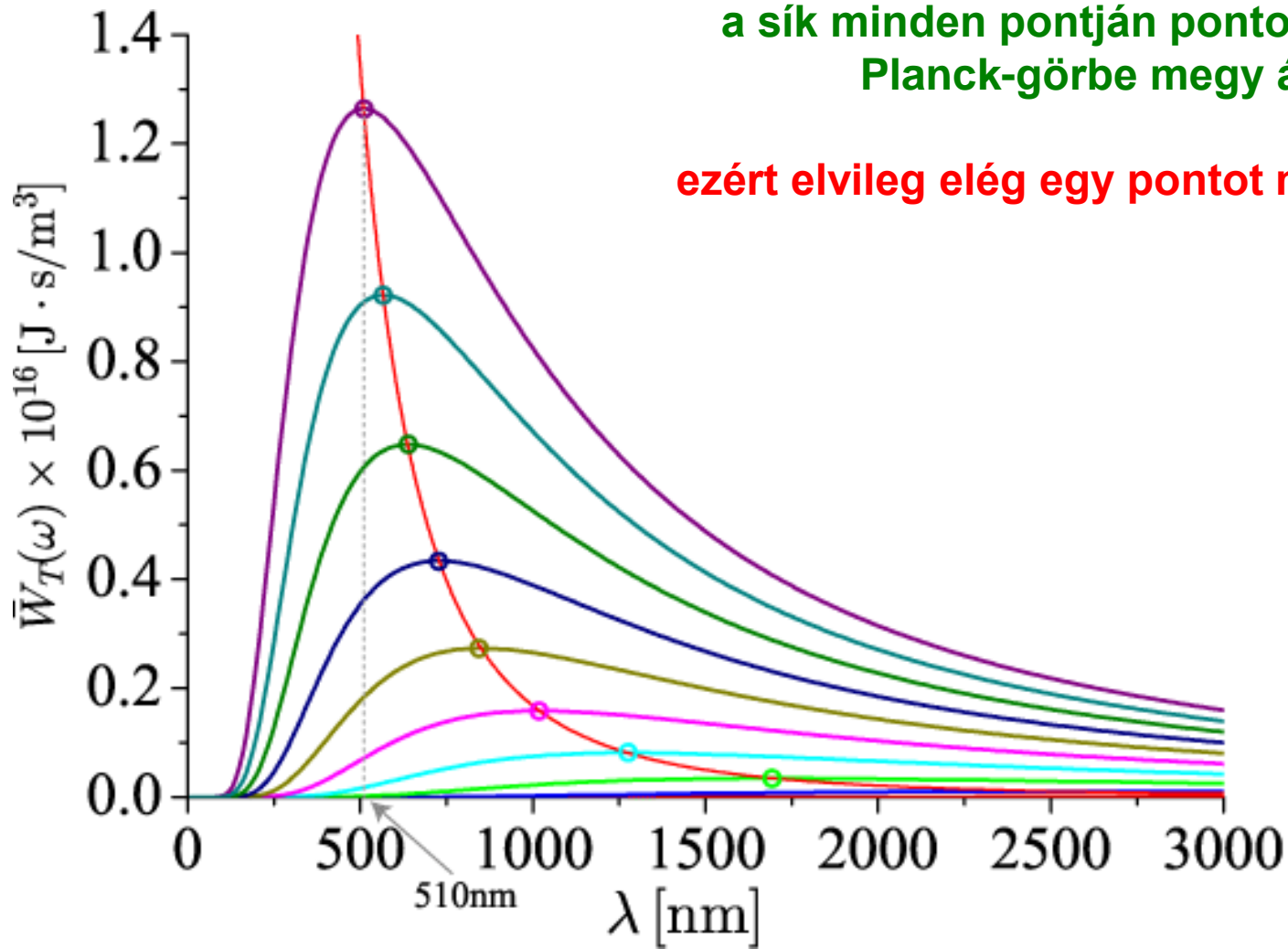
a Napfelszín (fotoszféra)
hőmérséklete



Solar Radiation Spectrum



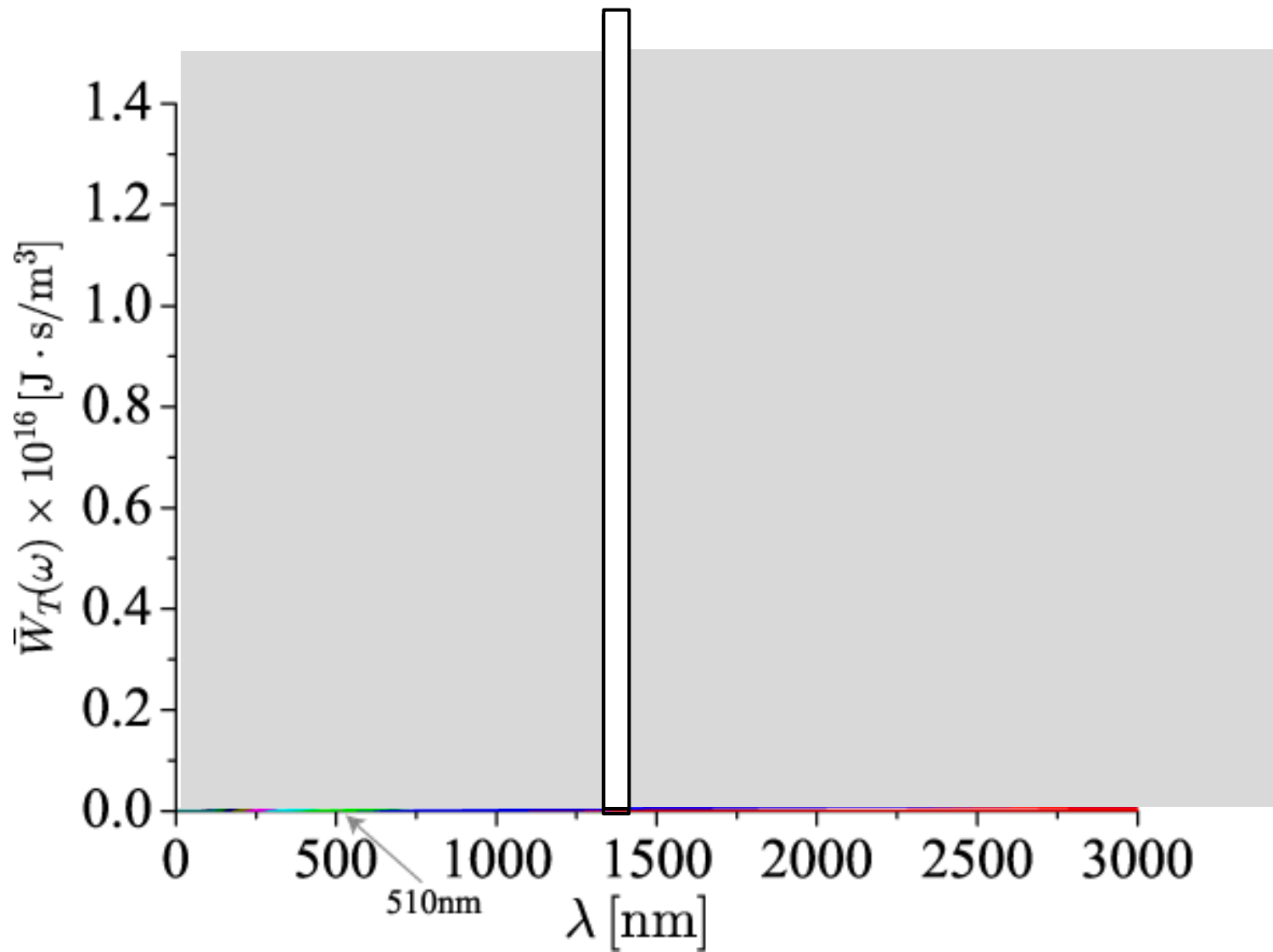
vizsgálódás a légköri ablakon át



a sík minden pontján pontosan egy
Planck-görbe megy át

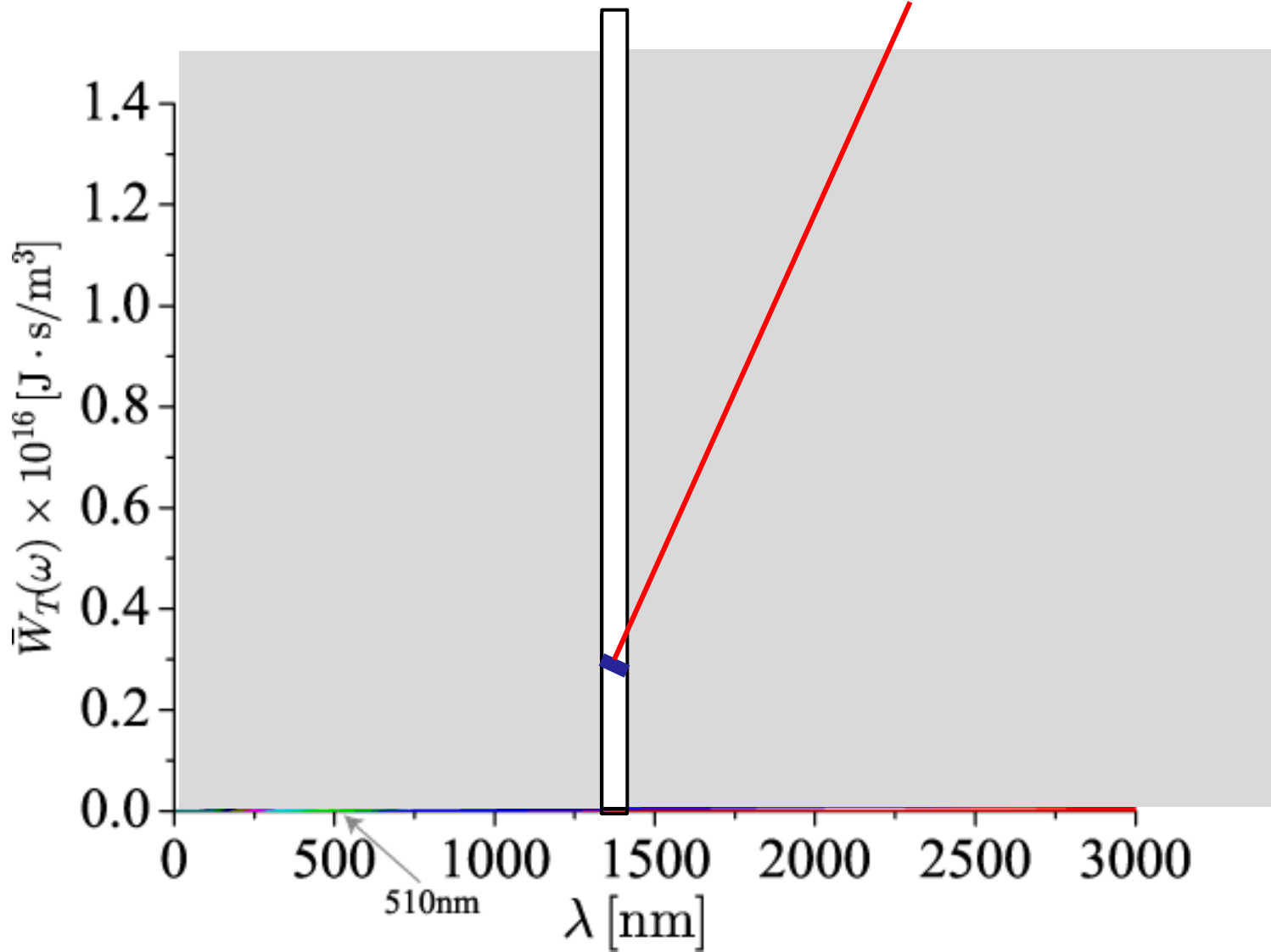
ezért elvileg elég egy pontot megmérni!

vizsgálódás a légköri ablakon át



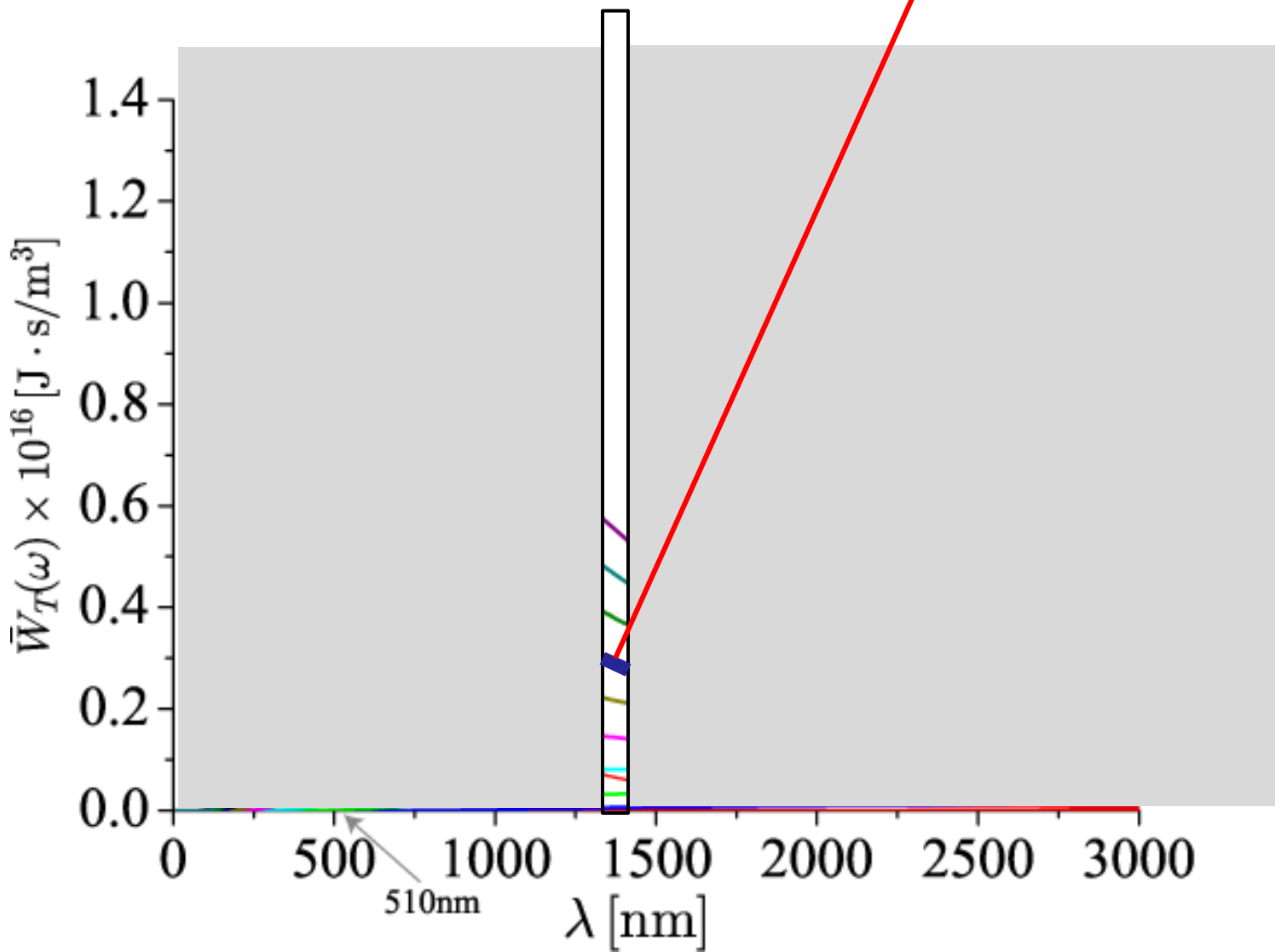
vizsgálódás a légköri ablakon át

MÉRÉS



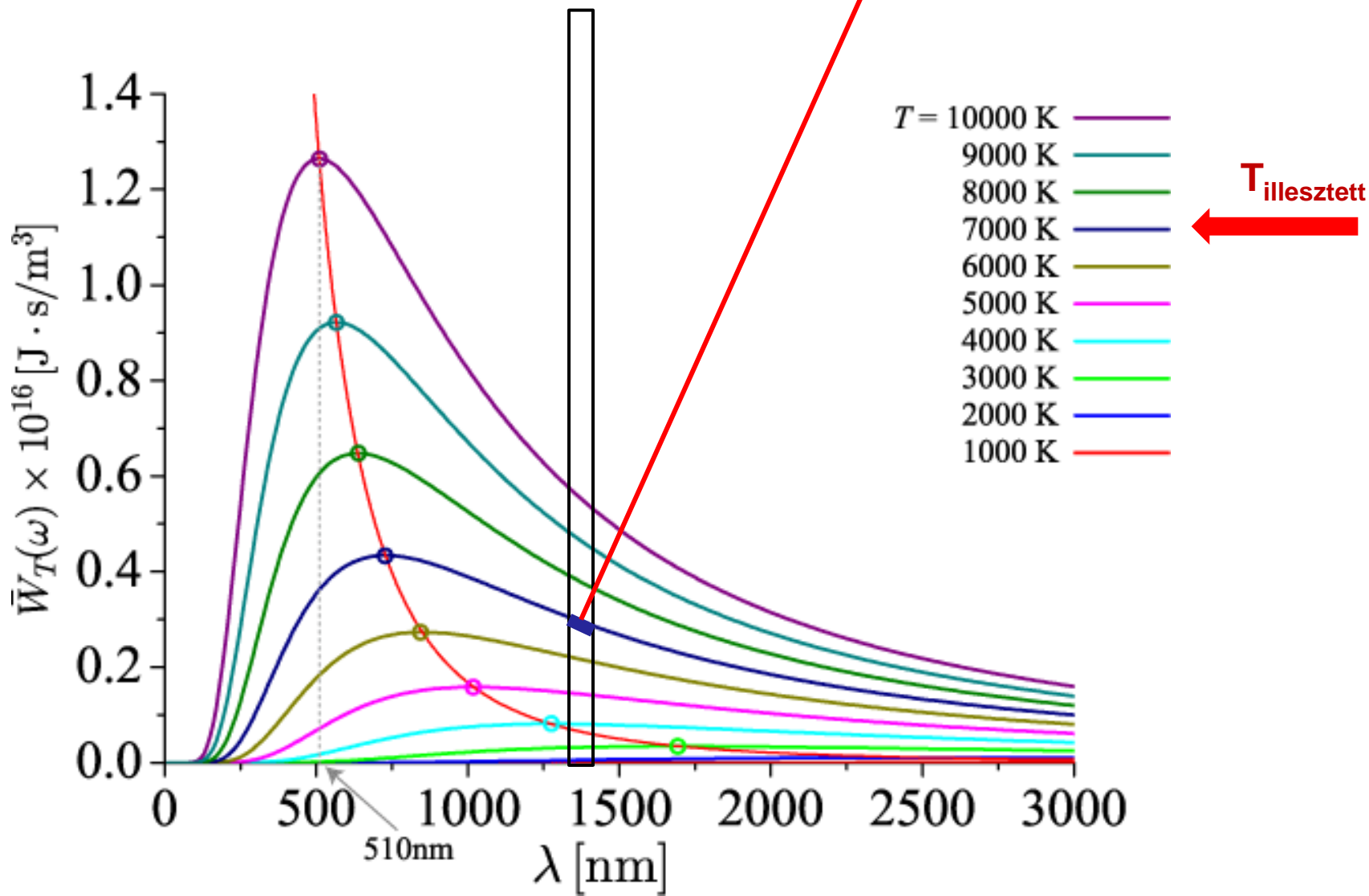
vizsgálódás a légköri ablakon át

MÉRÉS



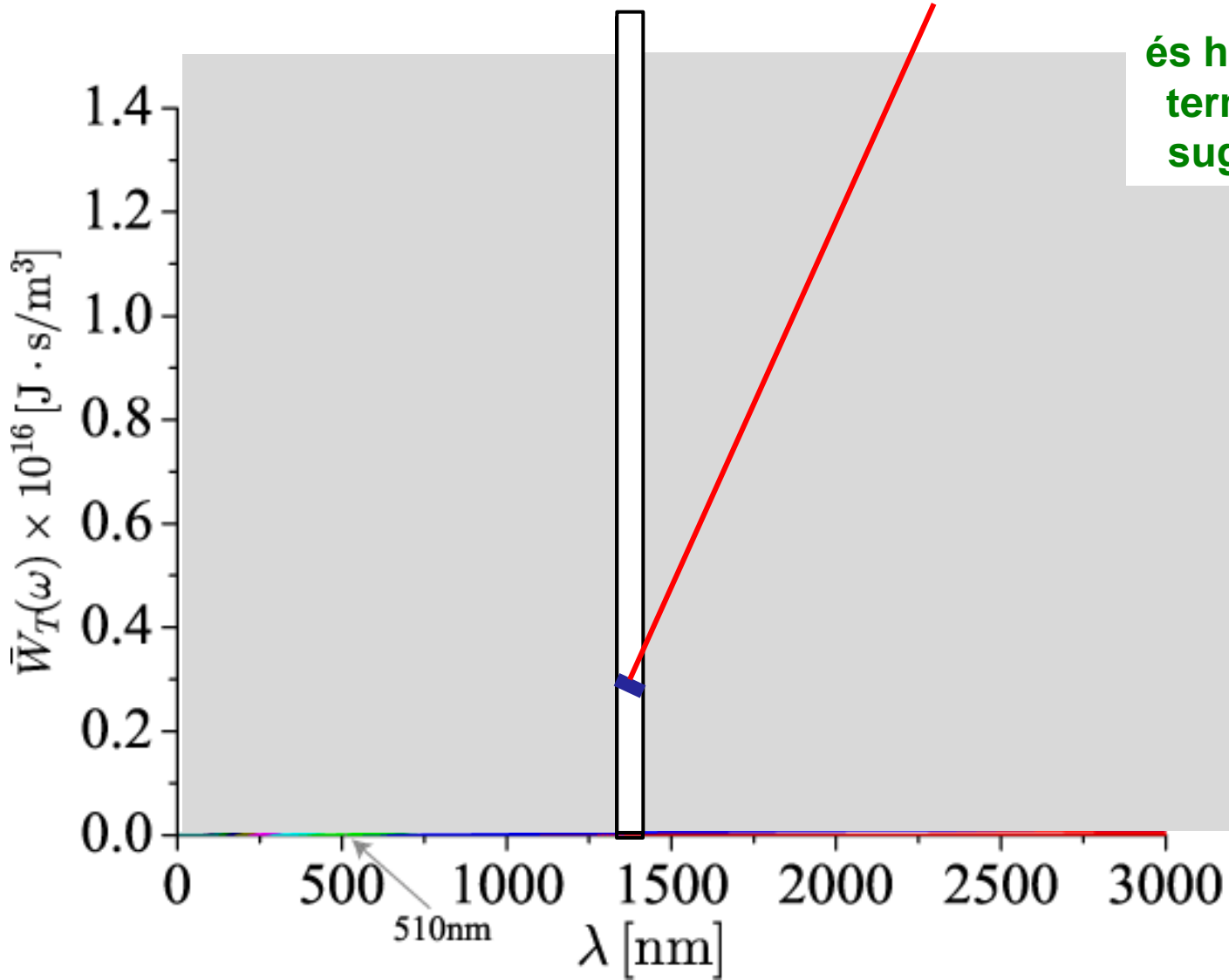
vizsgálódás a légköri ablakon át

MÉRÉS



vizsgálódás a légköri ablakon át

MÉRÉS

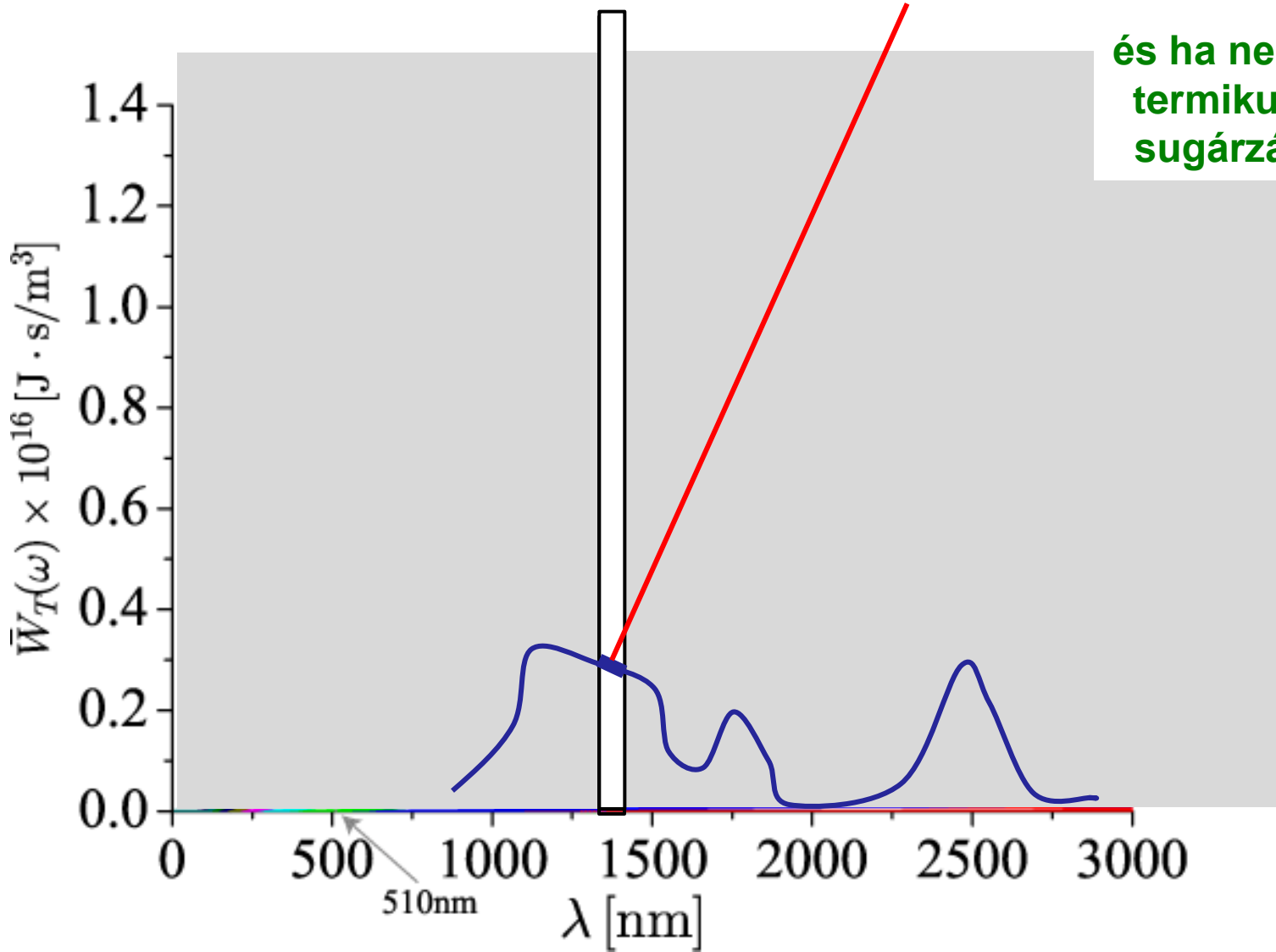


és ha nem is
termikus a
sugárzás?



vizsgálódás a légköri ablakon át

MÉRÉS

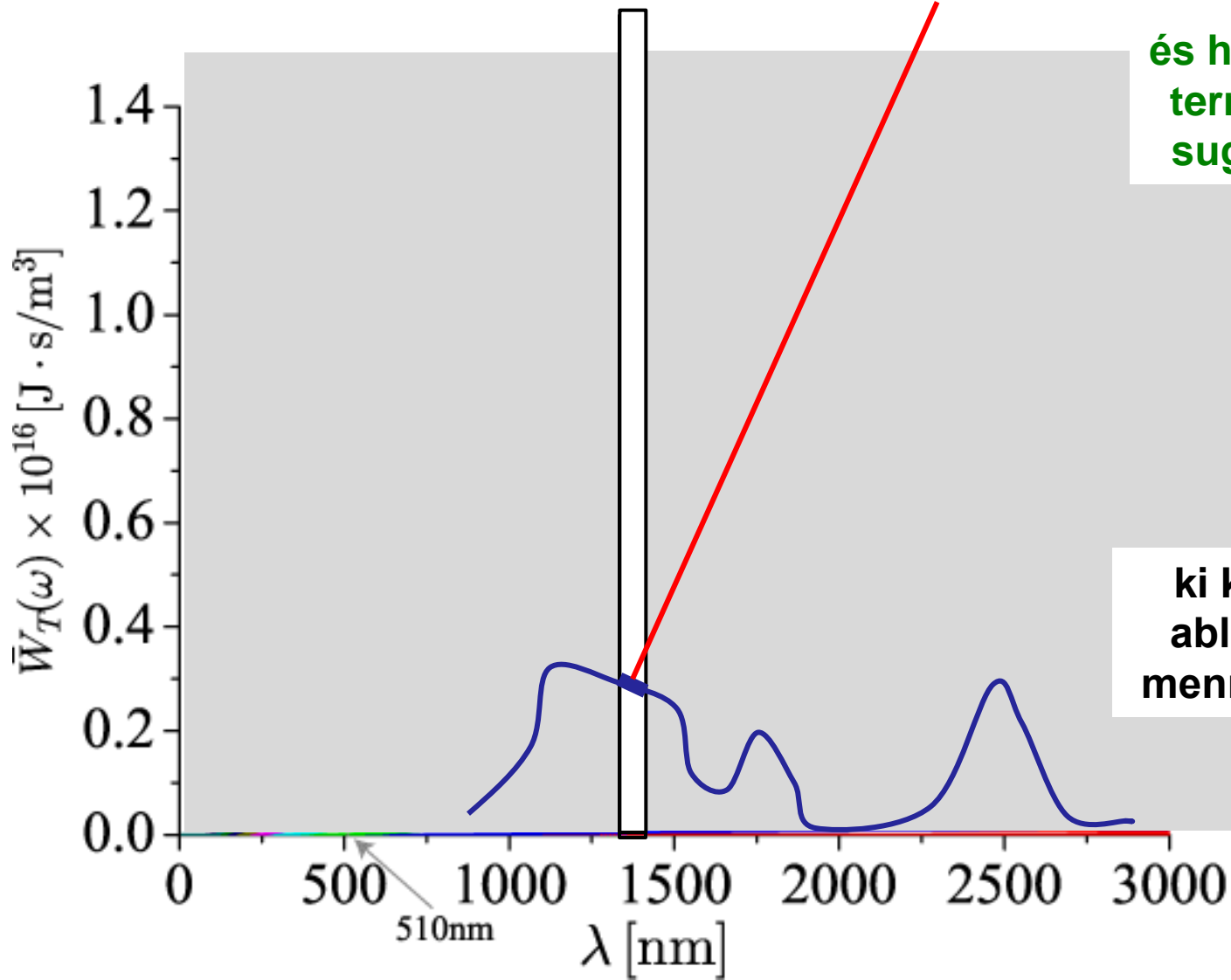


és ha nem is termikus a sugárzás?



vizsgálódás a légköri ablakon át

MÉRÉS



és ha nem is termikus a sugárzás?

ki kell nyitni az ablakot, túl kell menni a légkörön!

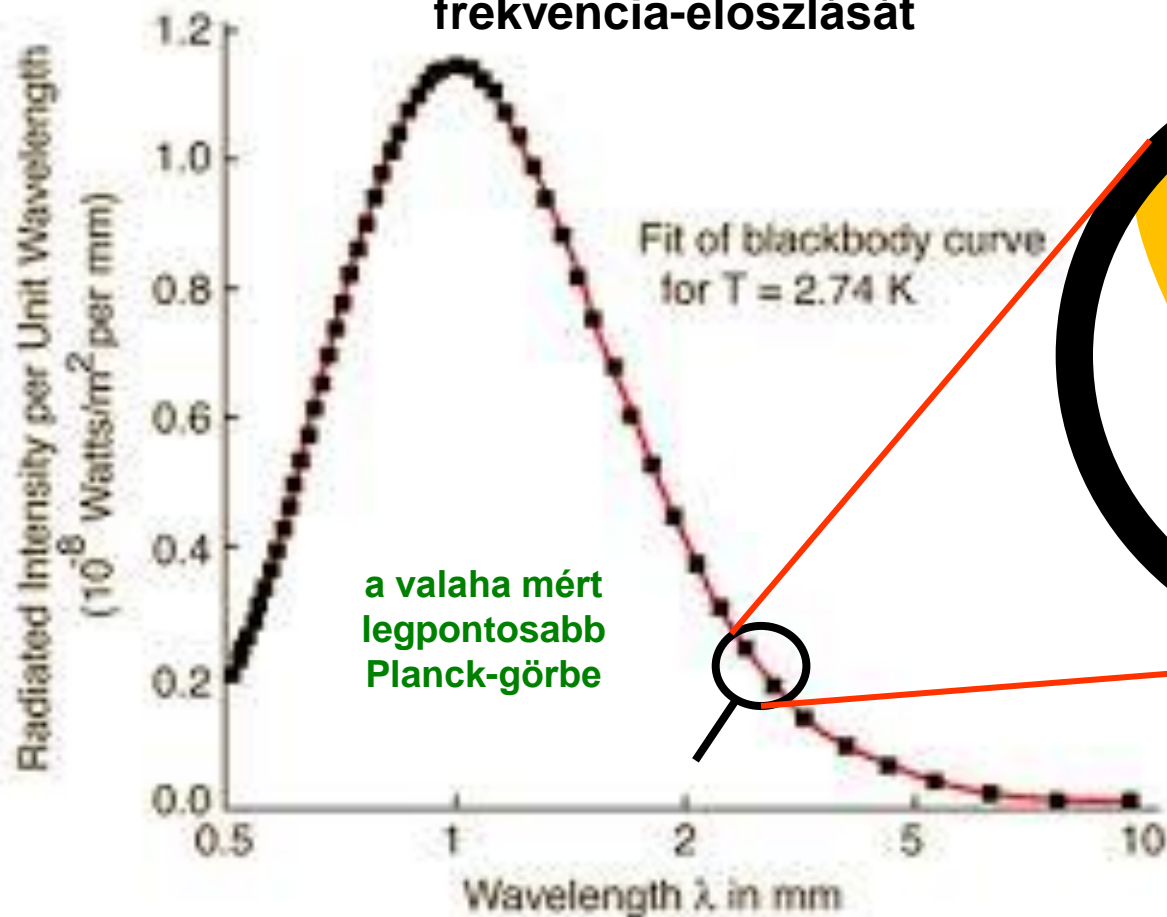


A kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás (CMBR)

korábban a légkör elnyelése miatt csak egy kis szakaszt ismertünk
felfedezők: Penzias és Wilson 1964, 73,5 mm Nobel-díj 1978

a COBE műhold 1990-ben megmérte
a kozmikus háttérsugárzás
frekvencia-eloszlását

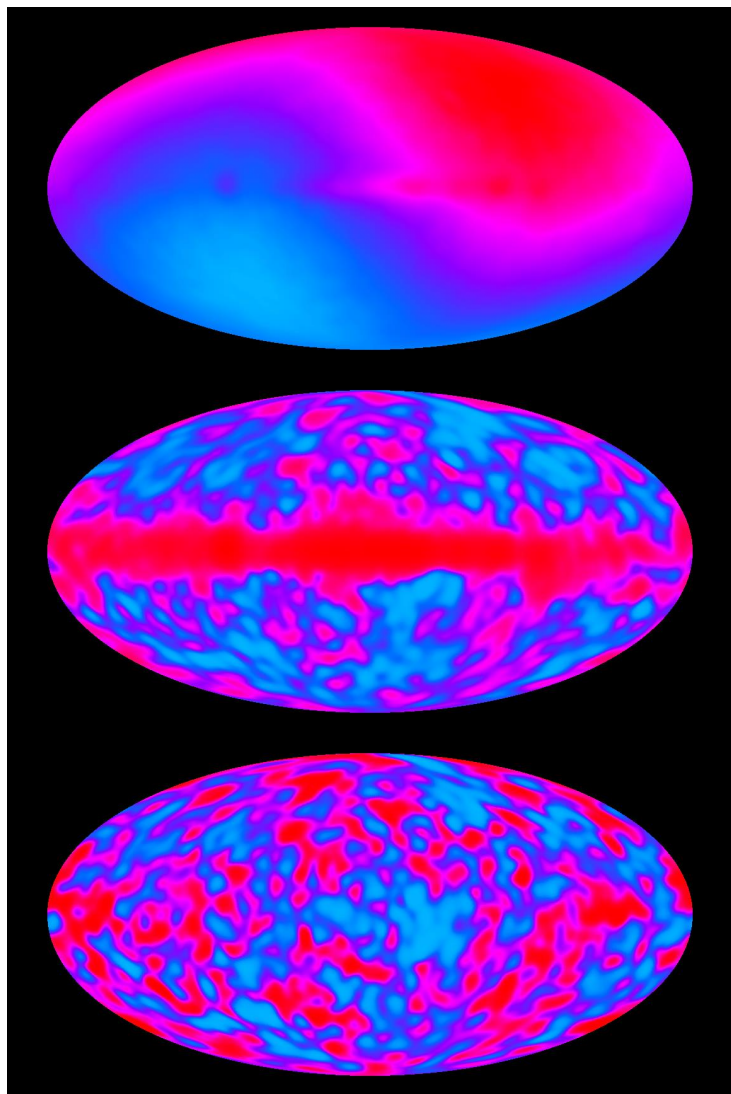
2006. évi fizikai Nobel-díj:
George Smoot és John Mather



mérési pontok és
mérési hibák
a vonalvastagságon
belül!



A kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás (CMBR)



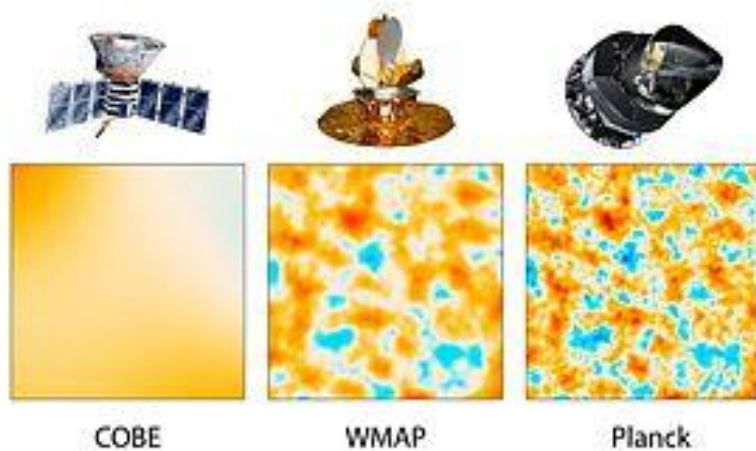
nagyon pontosan Planck-eloszlású

$$T = 2,72548 \pm 0,00057 \text{ K}$$

$$10^{-14} \text{ J/m}^3 \quad 450 \text{ foton/cm}^3$$

max intenzitás kb 1 mm hullámhossznál

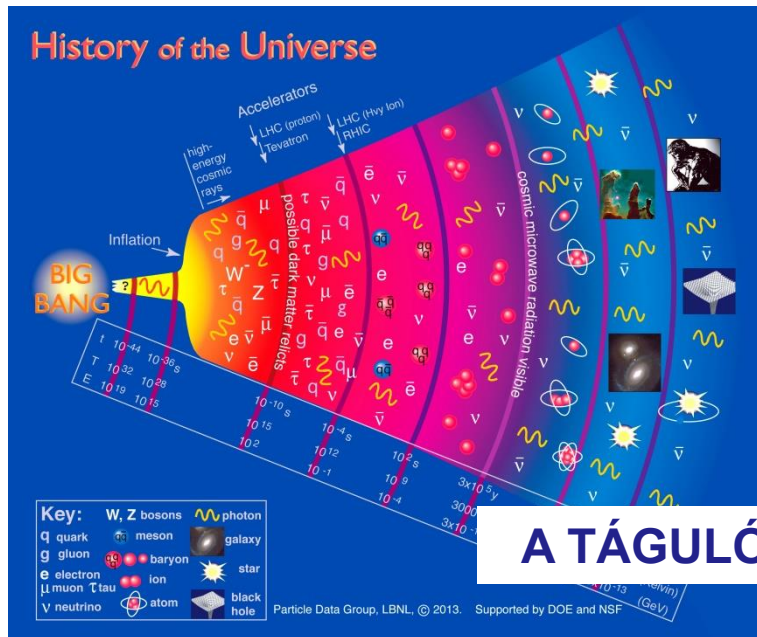
a hőmérséklet-paraméter
térbeli eloszlása az éggömbön
(ezred százalékos ingadozás)



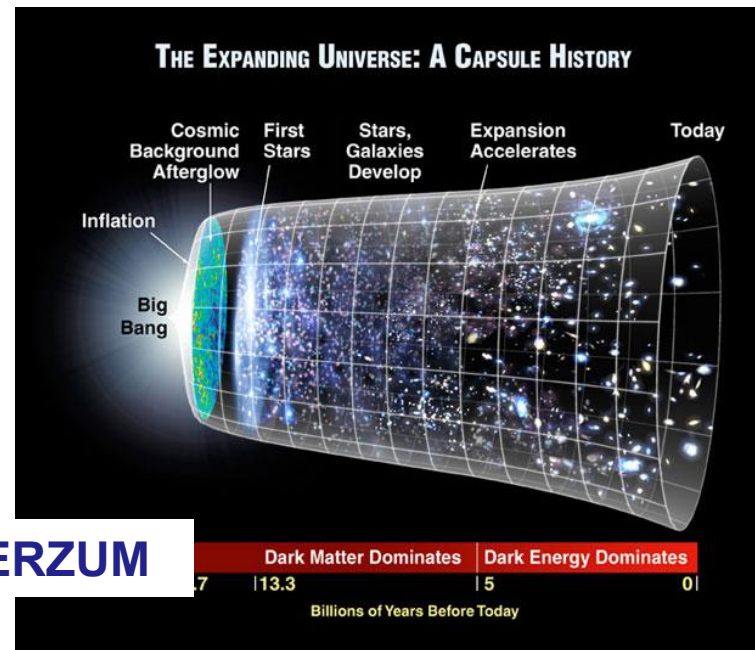
három műhold egyre finomabb
térbeli felbontású mérései (1990–2010)

No de hol van az a 2,7 K hőmérsékletű szilárd test, amivel a kozmikus háttérsugárzás egyensúlyban van?

MA az Univerzumban sehol nem találunk ilyet!



A TÁGULÓ UNIVERZUM

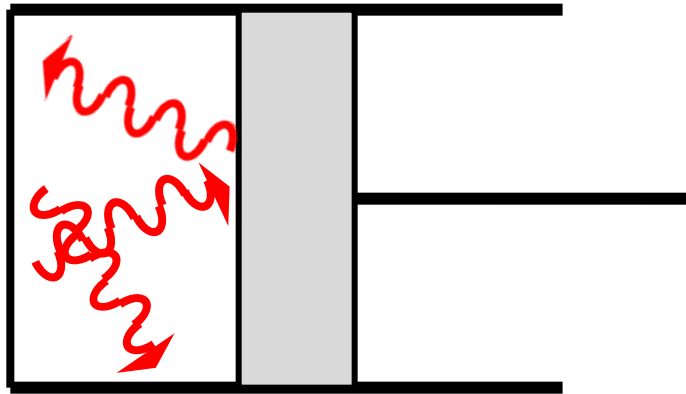


a mai háttérsugárzás 13,8 milliárd évvel ezelőtt volt egyensúlyban egy kb 3000 K hőmérsékletű anyaggal

azóta csak tágul és hűl magában...

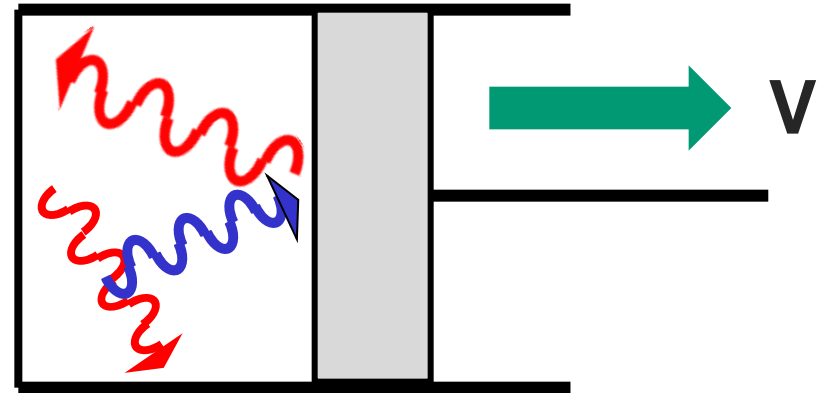


adiabatikus (hőcsere nélküli) tágulás



h_1

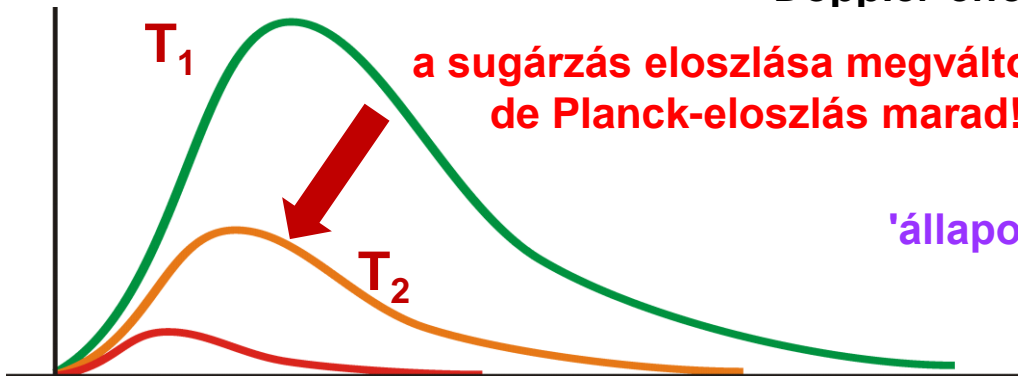
Planck-eloszlású sugárzás
tükröző falú dugattyús hengerben



h_2

a dugattyú lassú mozgásakor
a visszaverődő fény
Doppler-effektust szenved

a hullámhossz
arányos az üreg
 h méretével



a sugárzás eloszlása megváltozik,
de Planck-eloszlás marad!

'állapotegyenlet':

$$T_1 h_1 = T_2 h_2$$

adiabatikus (hőcsere nélküli) tágulás

'állapotegyenlet':

$$T_1 h_1 = T_2 h_2$$

$$T \sim \frac{1}{h}$$

egy foton energiája:

$$e \sim \omega \sim \frac{1}{\lambda} \sim \frac{1}{h} \sim T$$

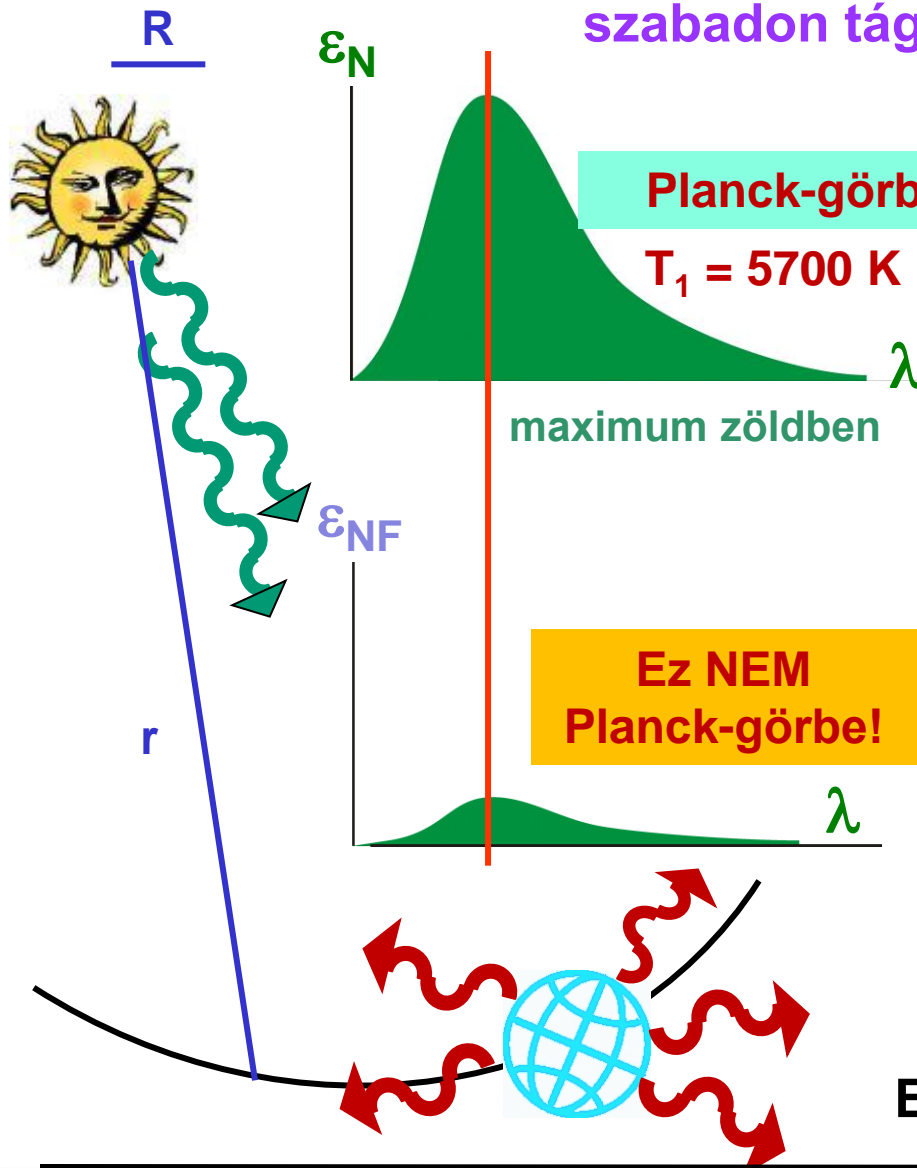
a sugárzás energiasűrűsége
(Stefan-Boltzmann-törvény)::

$$\varepsilon \sim \frac{E}{V} \sim T^4$$

hány foton van a hengerben?

$$N \sim \frac{E}{e} \sim \frac{VT^4}{T} \sim VT^3 \sim h^3 T^3 \sim (hT)^3 \sim \text{const}$$

Az adiabatikusan táguló sugárzásban a fotonszám állandó:
mintha a fotonok közönséges gázrészecskék lennének...



szabodon táguló sugárzás

Planck-görbe!

$T_1 = 5700 \text{ K}$

maximum zöldben

Ez NEM Planck-görbe!

A Földre érkező, "kitágult", felhígult napsugárzás NEM TERMIKUS, nincs hőmérséklete!

a Föld (vagy akár egy porszem!) "termalizálja" a sugárzást

Ez már megint Planck-görbe!

$T_1 = 300 \text{ K}$

maximum infravörösben

$$E_{ki} = E_{be}$$

$$\epsilon_{NF} = \epsilon_N \frac{R^2}{r^2}$$

"geometriai" tágulás



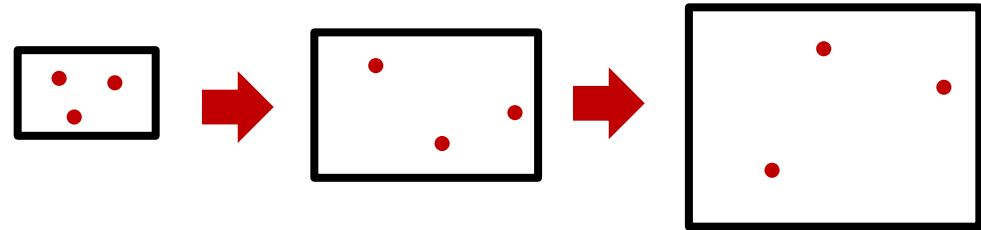
az Univerzum tágulása

Itt nincs fal, nincs tükör –
azt gondolhatjuk, hogy a jelenség
a Nap sugárzásának
szabad tágulásához hasonlít.

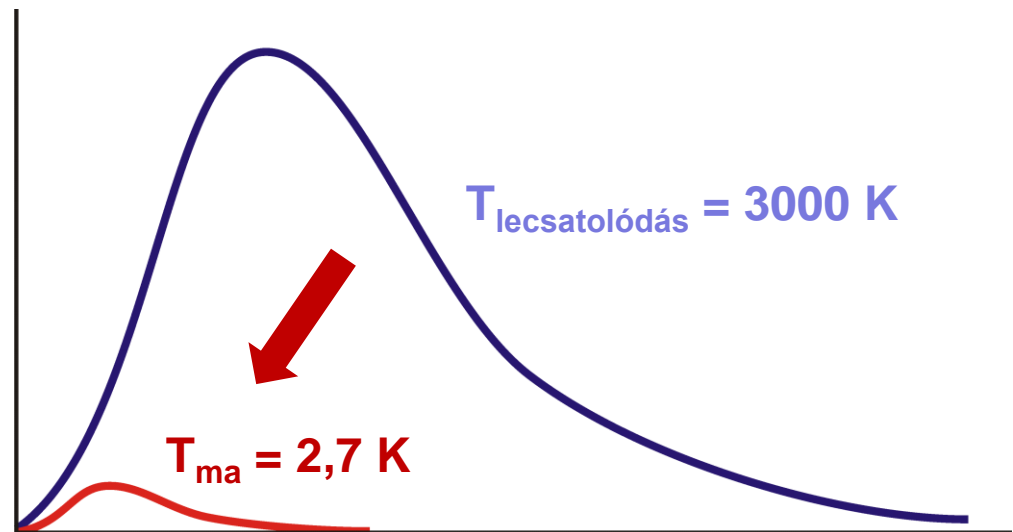
Ezzel szemben
az általános relativitáselméletből
levezethető, hogy pontosan azok a
képletek érvényesek,
mint a dugattyús kísérletnél!

azaz a tágulás során a
fotonszám megmarad

az egyes fotonok
hullámhossza pedig az
Univerzum méretével
arányosan nő



Ma nincs 2,7 K hőmérsékletű szilárd
anyag az Univerzumban, amivel a
sugárzás egyensúlyban lenne.
De az Univerzummal együtt táguló
sugárzás önmagában is
egyensúlyban marad!



No de MI VOLT
az a 13 milliárd évvel ezelőtti,
3000–10000 K hőmérsékletű
szilárd test, amivel a kozmikus
háttérsugárzás egyensúlyban volt?

Ilyen test sem
létezett!

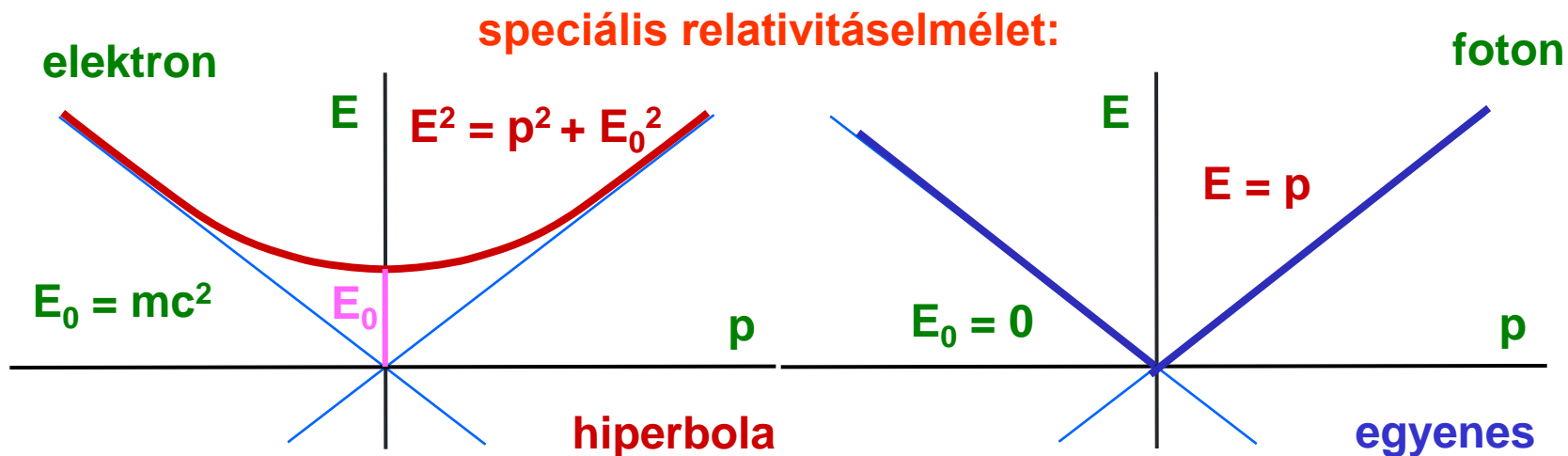
Hát akkor mi játszotta a fal
vagy a szilárd
koromszemcse szerepét?

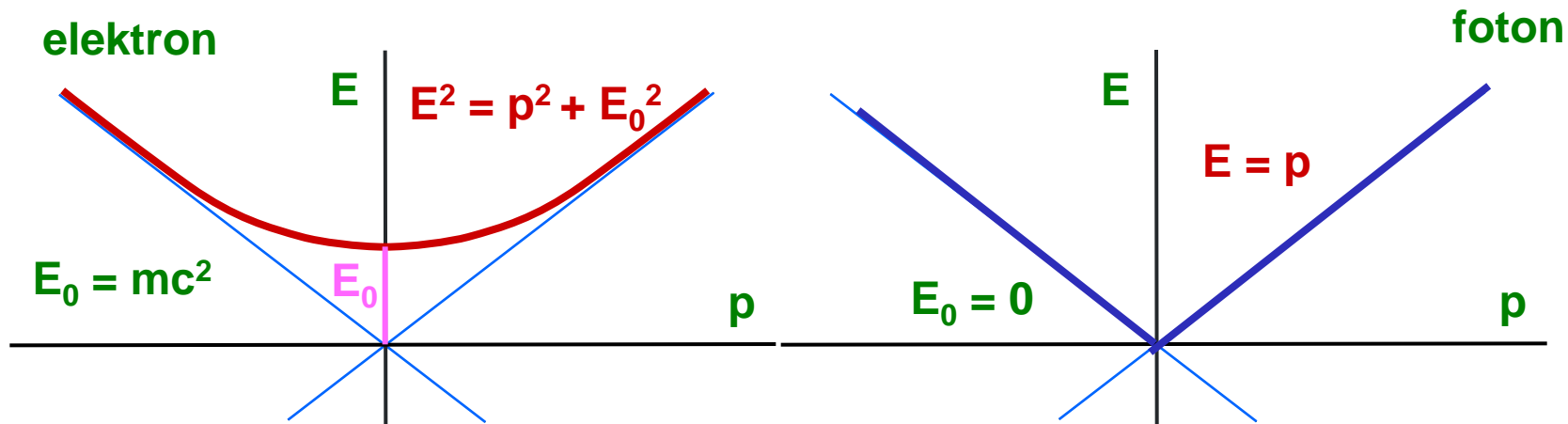
MENTŐKÉRDÉS:

Miért éppen fotonokból áll a hőszugárzás?
Miért nem pl. elektronokból vagy müonokból?

VÁLASZ: fotont könnyű csinálni,
mert nulla a tömege!

Részletek:
dgy:
A tömeg eredete és a Higgs-mező
Atomcsill, 2012. 09. 13.





elektronra: $2 mc^2 = 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$

$E = kT$

$1 \text{ eV} \sim 10000 \text{ K}$

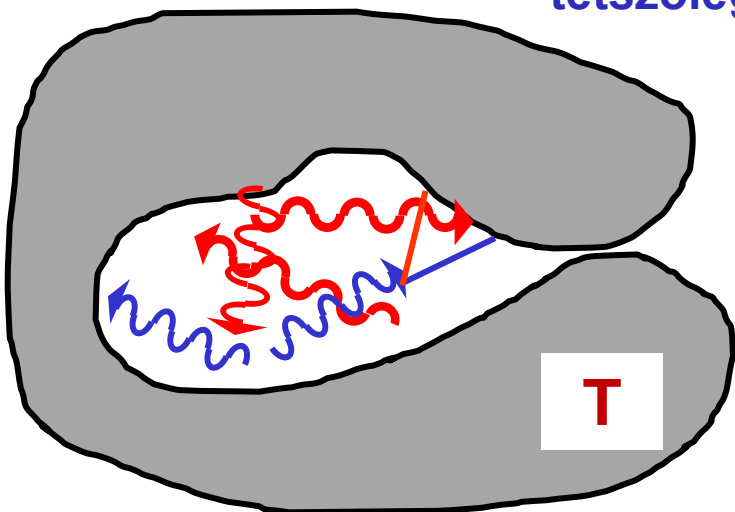
tehát egy elektron–pozitron pár keltéséhez 10^{10} K hőmérséklet kell

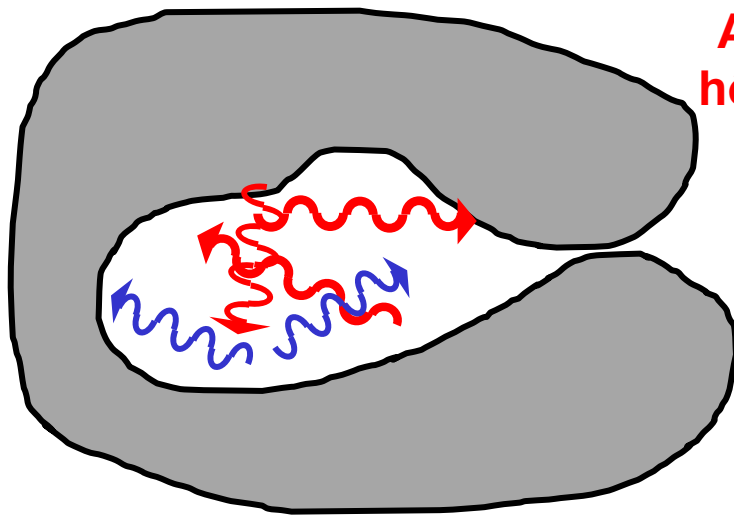
ezzel szemben a foton ingyen van, nincs küszöbenergiája,
tetszőlegesen kis hőmérsékleten keletkezhet

így közönséges hőmérsékleten
a hősugárzás csak fotonokból áll

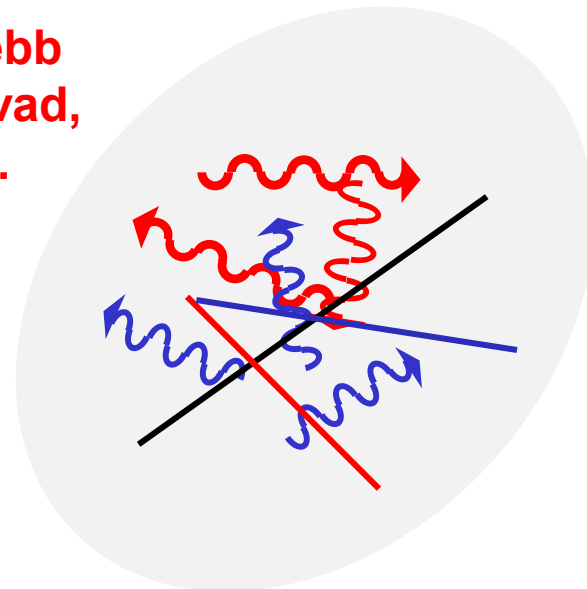
de ha a fal hőmérséklete eléri a tízmilliárd fokat,
a hősugárzásban a fotonok mellett megjelennek
az elektron–pozitron párok is!

**HOPPÁ! A fal már jóval kisebb
hőmérsékleten elolvad, majd elpárolog...**





A fal már jóval kisebb
hőmérsékleten elolvad,
majd elpárolog...



szilárd test és a vele
egyensúlyban levő fotongáz

plazma: egyensúlyban levő töltött
részecskék és fotonok gáza

Nagy hőmérsékleten megszűnik a fal és a sugárzás kettőssége:
egyensúlyban levő homogén massa alakul ki.
Még nagyobb hőmérsékleten a sugárzás már nemcsak energiát ad
át az anyagnak, hanem más részecskékké alakul:
az anyag azonossá válik a saját hősugárzásával!

Ilyen egyensúlyi plazma (az "Ősi Tűzgömb")
töltötte ki az Univerzumot a Nagy Bumm utáni
első 360 000 évben

Ilyen egyensúlyi plazma ("az Ősi Tűzgömb")
töltötte ki az Univerzumot a Nagy Bumm utáni
első 360 000 évben

Az Univerzum tágulása során a plazma
hőmérséklete fokozatosan csökkent.

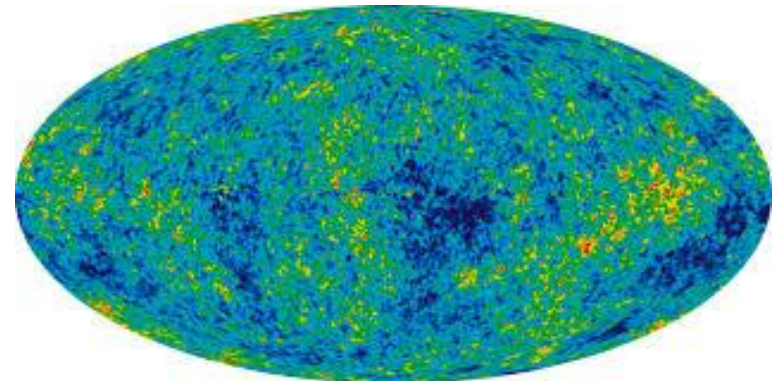
360 000 év után elég hideg lett, és létrejöttek az atomok.
Az atomos gáz átlátszó! Nem nyeli el a fényt...

Megszűnt az atomos anyag és a sugárzás kölcsönhatása. Ez a "lecsatolódás".

A sugárzás a 3. mechanizmus szerint tágult és hűlt, önmagával egyensúlyban.

Ma 2,7 K hőmérsékletű Planck-görbét követ,
de nincs egyensúlyban semmivel.
Ő az Univerzumot betöltő FEKETE FÉNY.

De a hőmérséklet-különbségek finom mintázatában
megőrizte a plazma élete utolsó pillanatában,
közvetlenül öngyilkossága előtt készített utolsó
SELFIE-jét...



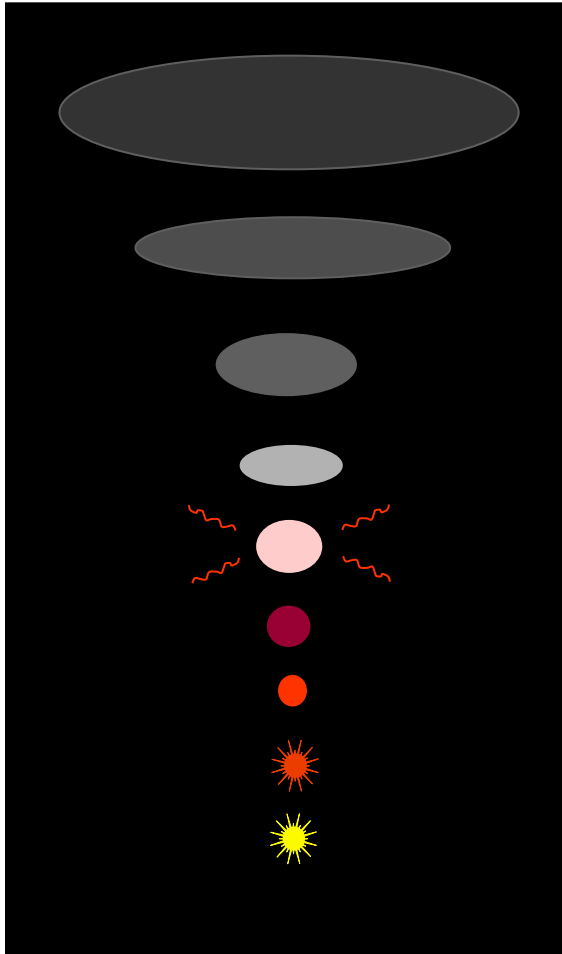
No és a fekete lyukak feketetest-sugárzása?



majd legközelebb...

+ 1 vad ötlet...

A csillagok keletkezése



hideg, ritka
gázfelhő



langyos,
sűrűbb
gázfelhő

közben
hősugárzás
távozik el



forró, sűrű
csillag,
körülötte a
hideg
világűr

Részletek:

dgy:

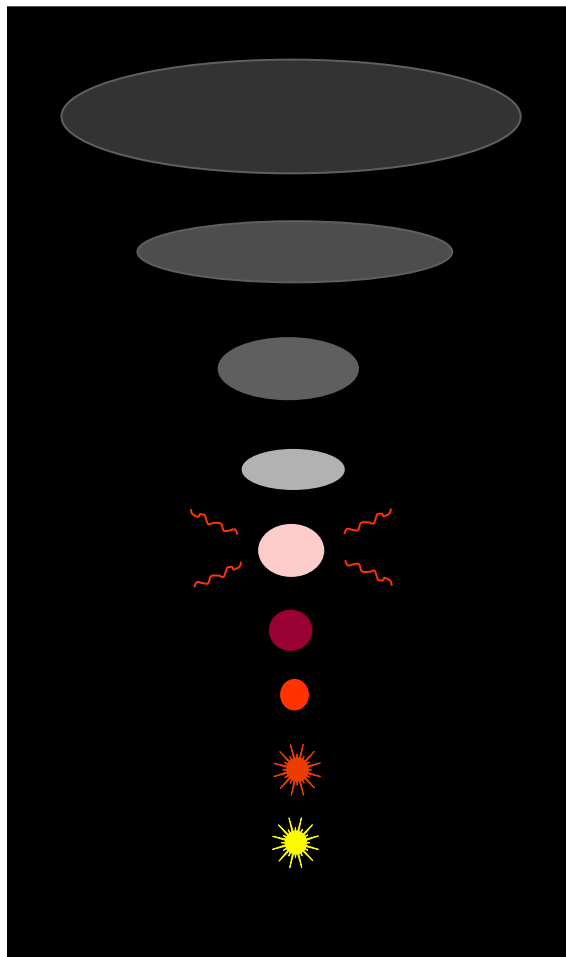
A lehűléstől forrósodó téglá,
avagy
a csillagok termodinamikája 1.

Atomcsill, 2012. 01. 12.



+ 1 vad ötlet...

A csillagok keletkezése



hideg, ritka
gázfelhő



langyos,
sűrűbb
gázfelhő

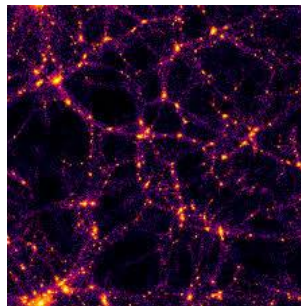
közben
hősugárzás
távozik el



forró, sűrű
csillag,
körülötte a
hideg
világűr

sötét anyag

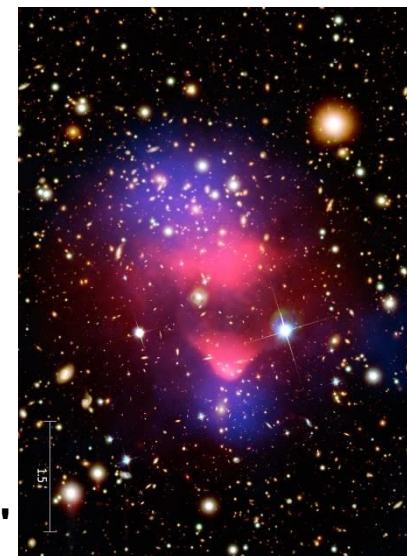
kb hétszer annyi van
belőle az Univerzumban,
mint az atomos anyagból



szimulált
eloszlás

mért
eloszlás

galaxishalmaz és
sötétanyag-"légköre"



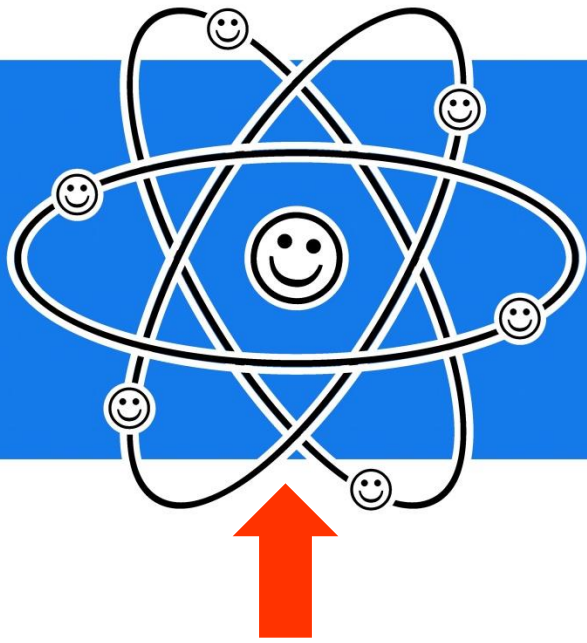
Nem ismerjük a sötét anyag részecskéit
és azok kölcsönhatásait.

De ha egy sötétanyag-felhő összesűrűsödött,
ki kellett bocsátania felesleges energiáját
a legkisebb, legkönnyebb
"sötétanyag-fotonok" formájában!

ez lehet az igazi
"FEKETE FÉNY" !



Köszönöm a figyelmet!



A fizika mindenké

BONUSKÉRDÉS

Az ábrán az élethez nélkülözhetetlen

^{12}C

atom látható

Kérdés:

Hány elemi fermionból (kvarkból és elektronból) áll a ^{12}C atom?