

PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE

James Clerk Maxwell (ur. 13 czerwca 1831 w Edynburgu, zm. 5 listopada 1879 w Cambridge) – szkocki fizyk i matematyk. Autor wielu wybitnych prac z zakresu elektrodynamiki, kinetycznej teorii gazów, optyki i teorii barw.



PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE

Równania

Maxwella:

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Zmienne pole magnetyczne jest źródłem pola elektrycznego

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = I + \frac{d\Phi_D}{dt}$$

Zmienne pole elektryczne jest źródłem wirowego pola magnetycznego

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int_V \rho \cdot dV$$

Źródłem pola elektrycznego są ładunki elektryczne

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

Pole magnetyczne jest bezźródłowe

PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE

Jednym z najprostszych (jednowymiarowym) rozwiązań równań Maxwella jest para funkcji:

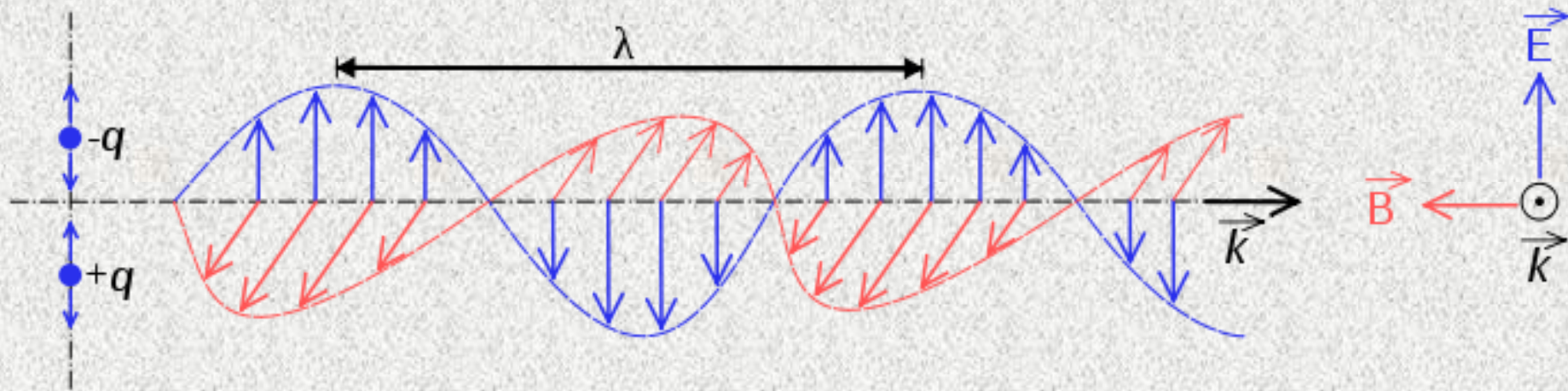
$$\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = E_0 \cdot \sin\left(2\pi \nu t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \mathbf{x}\right)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}, t) = H_0 \cdot \sin\left(2\pi \nu t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \mathbf{x}\right)$$

gdzie E_0 , H_0 - amplitudy fali, ν , λ - częstotliwość i długość fali.

PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE

Oznacza to, że ładunek poruszający się ruchem periodycznym z częstotliwością ν (np. drgający, krążący, etc.) wypromieniowuje część swojej energii pod postacią przestrzennego zaburzenia (oscylacji) elektromagnetycznego.



PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE

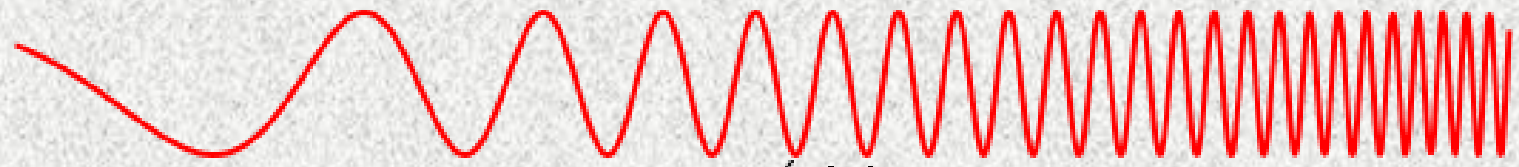
Zaburzenie to ma cechy falowe:

- częstotliwość wytworzonych drgań jest niezmienna (zasada Huygensa),
- prędkość rozchodzenia się zaburzenia zależy tylko od rodzaju ośrodka. Największą wartość powinna osiągać w próżni: $v = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = c$.

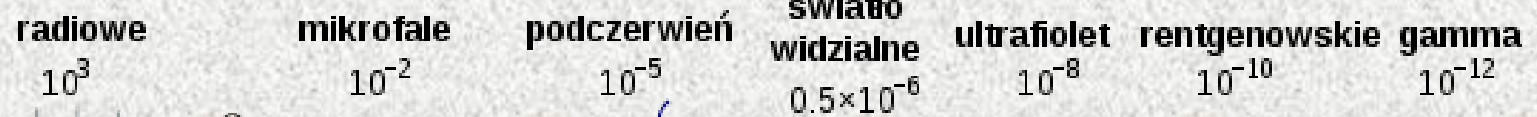
Dlatego też, owo hipotetyczne zaburzenie nazwano **falą elektromagnetyczną** (fala EM).

PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE

Przenika atmosferę ziemską?



Typ promieniowania
Długość fali (m)

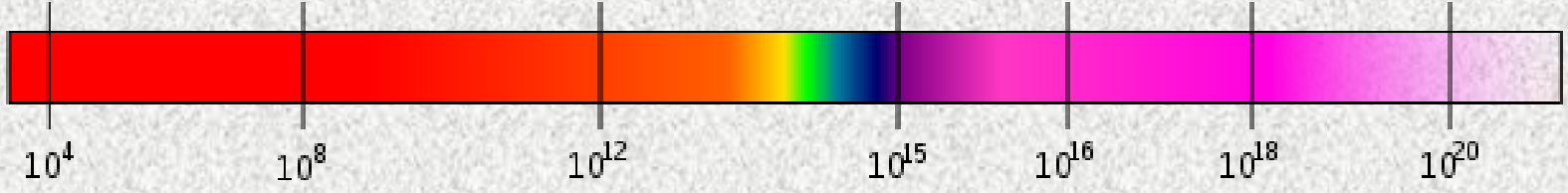


Ciało o skali zbliżonej do długości fali

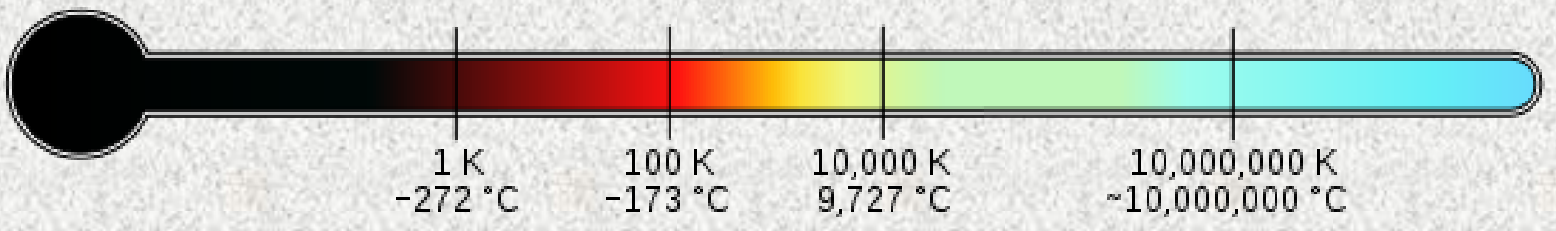


budynki człowiek motyl ostrze igły pierwotniaki molekuly atomy jądra atomowe

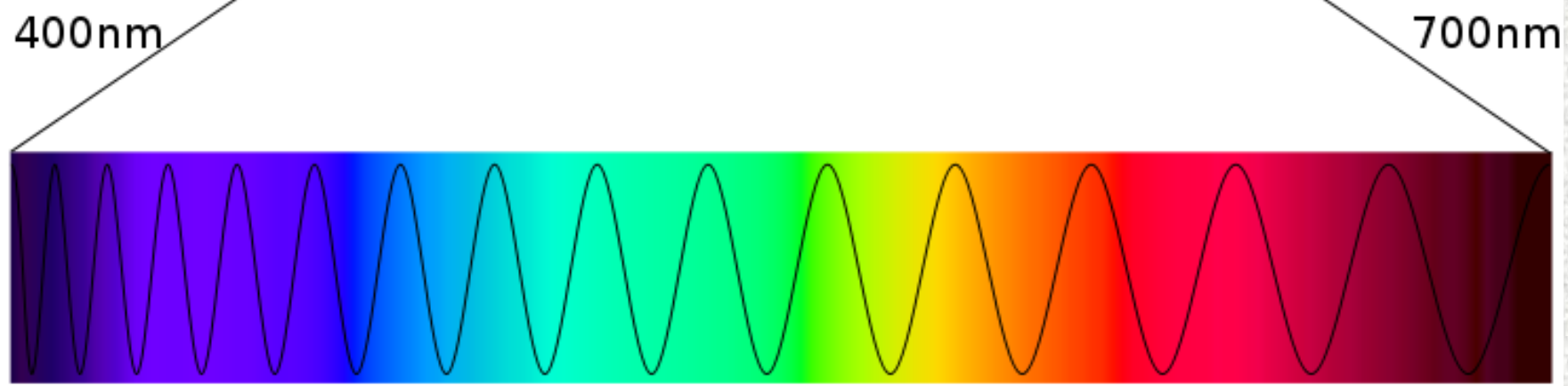
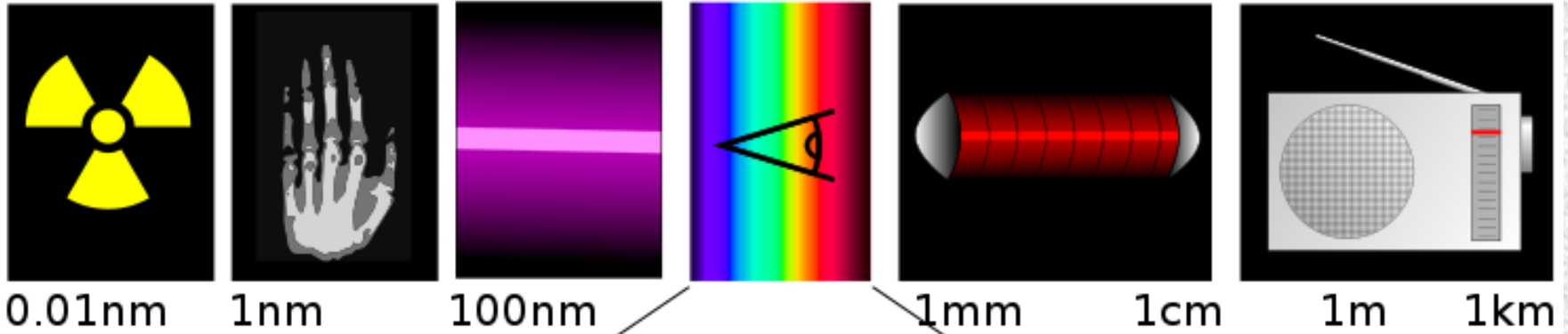
Częstotliwość (Hz)



Temperatura ciała, którego maksimum promieniowania jest w danej długości fali



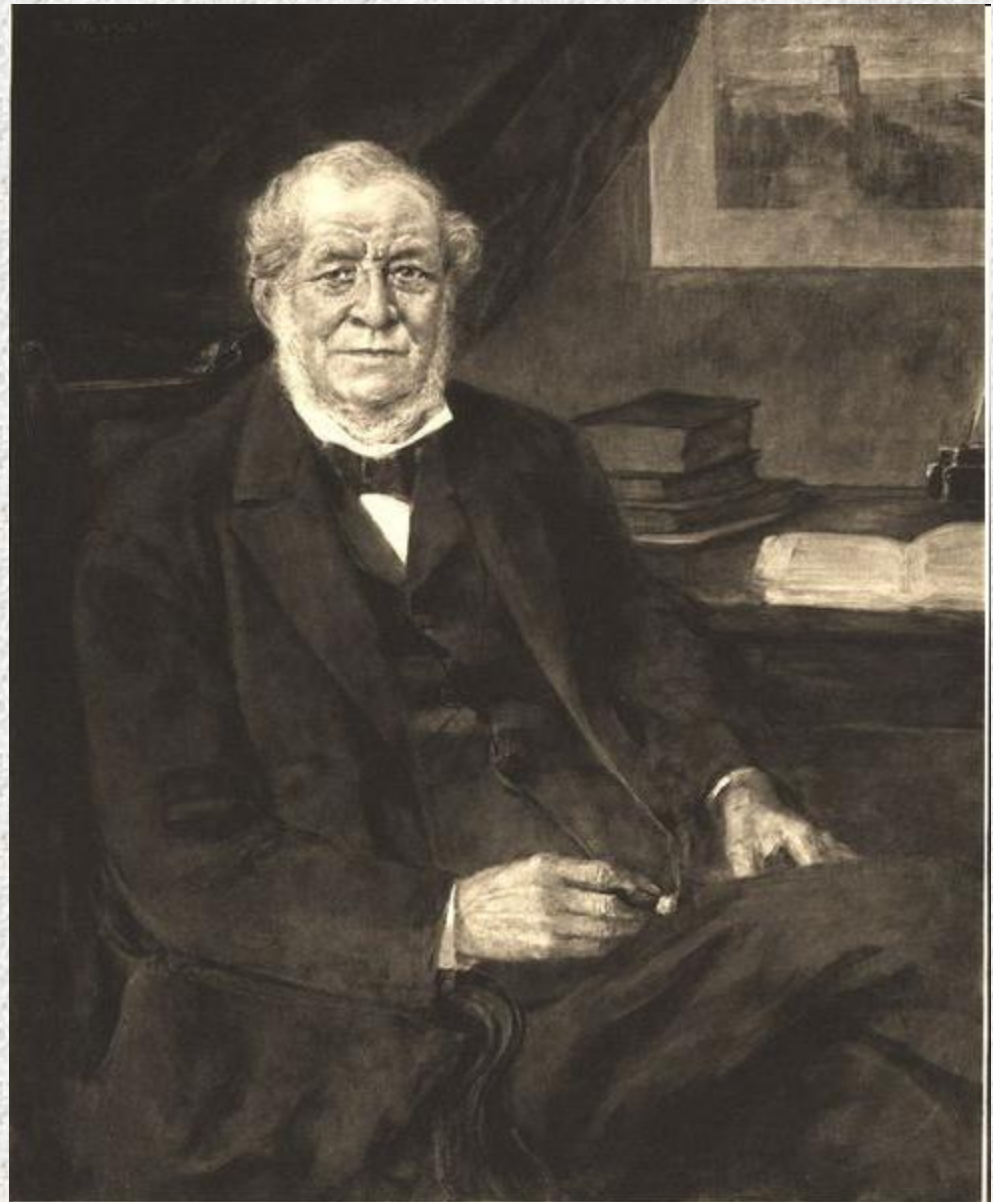
PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE



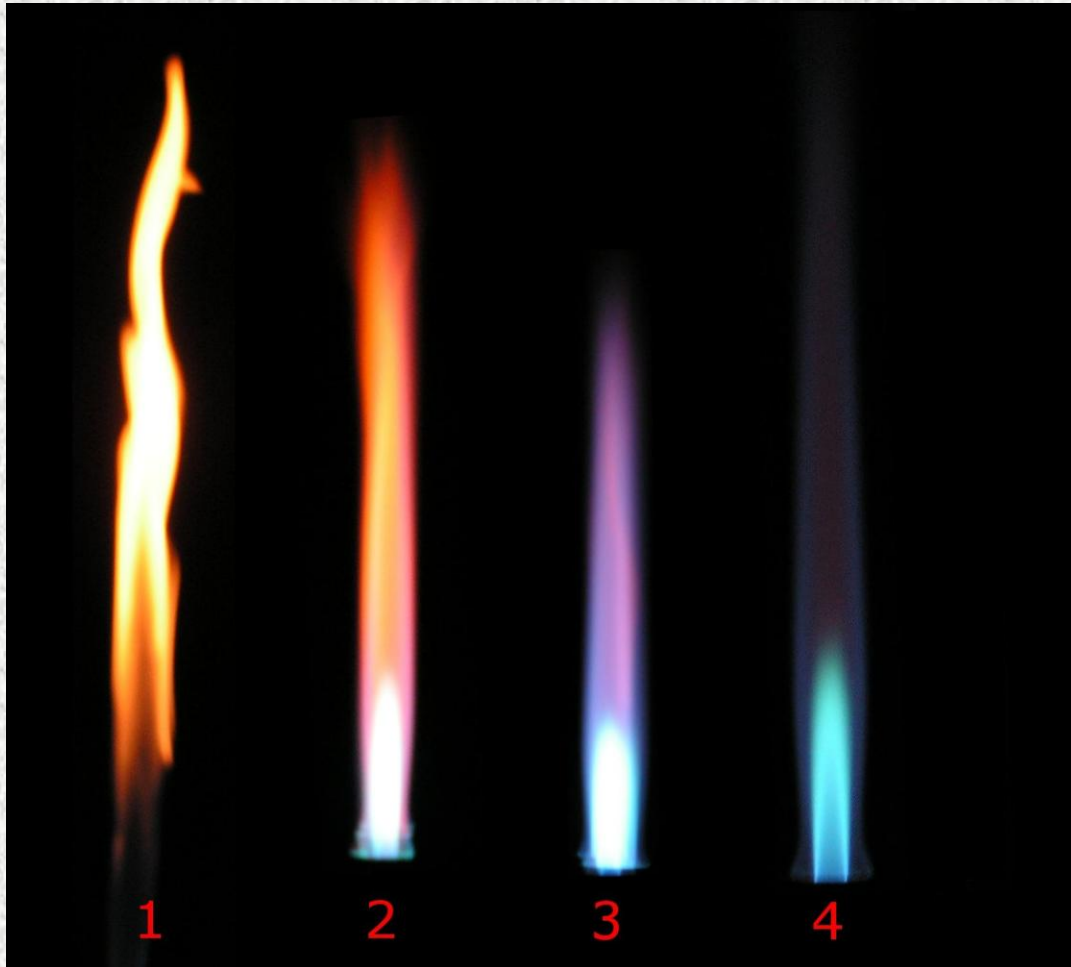
PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE

Robert Wilhelm

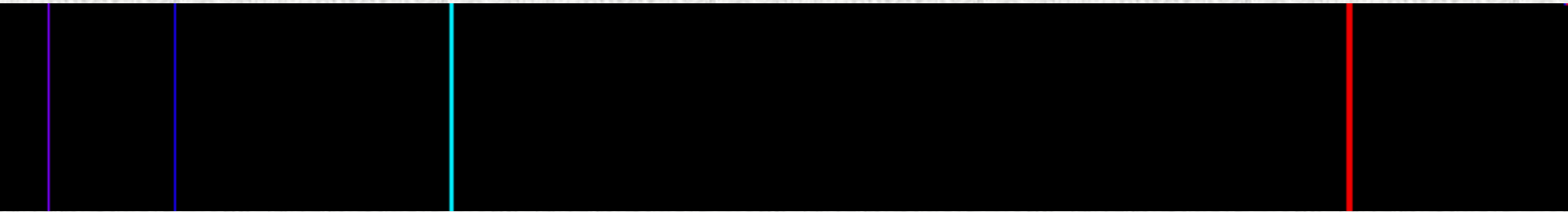
Bunsen (ur. 31 marca 1811 w Getyndze, zm. 16 sierpnia 1899 w Heidelbergu) – niemiecki fizyk i chemik, profesor we Wrocławiu i Heidelbergu.



PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE - stworzenie spektroskopii przez Kirchhoffa i Bunsena



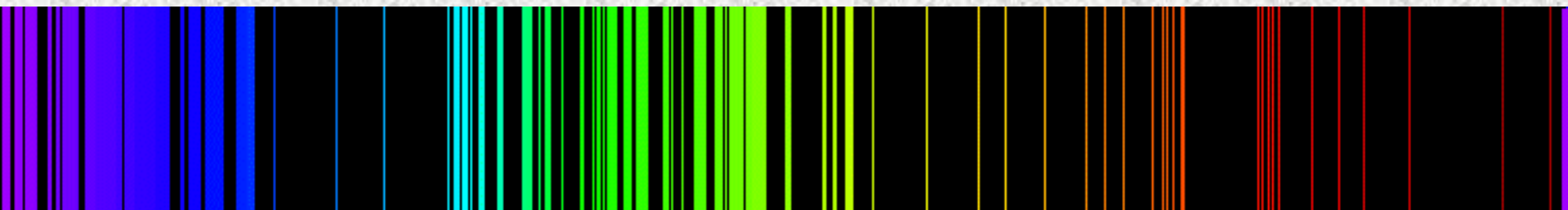
widmo emisyjne wodoru



widmo emisyjne azotu



widmo emisyjne żelaza



PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE

Sir Ernest Rutherford (ur. 30 sierpnia 1871 w Brightwater, zm. 19 października 1937 w Cambridge) – chemik i fizyk z Nowej Zelandii. Rutherford jako pierwszy potwierdził istnienie jądra atomowego.



PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE

Rutherford postuluje "planetarny" model budowy atomu: prawie cała masa atomu jest skupiona w dodatnim jądrze, elektrony o znikomo małej masie i ujemnym ładunku elektrycznym obiegają jądro po orbitach kołowych lub eliptycznych.

PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE

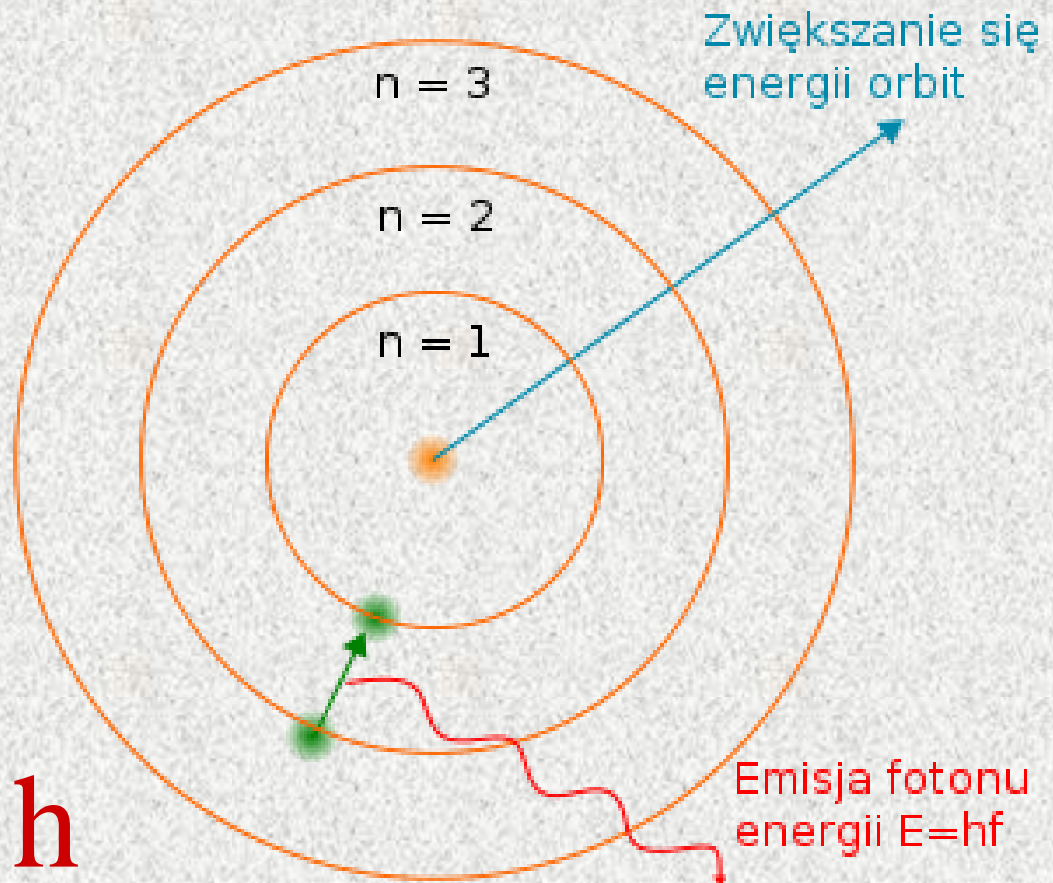
Niels Henrik David Bohr (ur. 7 października 1885 w Kopenhadze, zm. 18 listopada 1962 w Kopenhadze) fizyk duński, laureat Nagrody Nobla z dziedziny fizyki w roku 1922 za opracowanie teorii budowy (struktury) atomu.



PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE

Elektrony poruszają się tylko po orbitach, na których jest spełniony warunek:

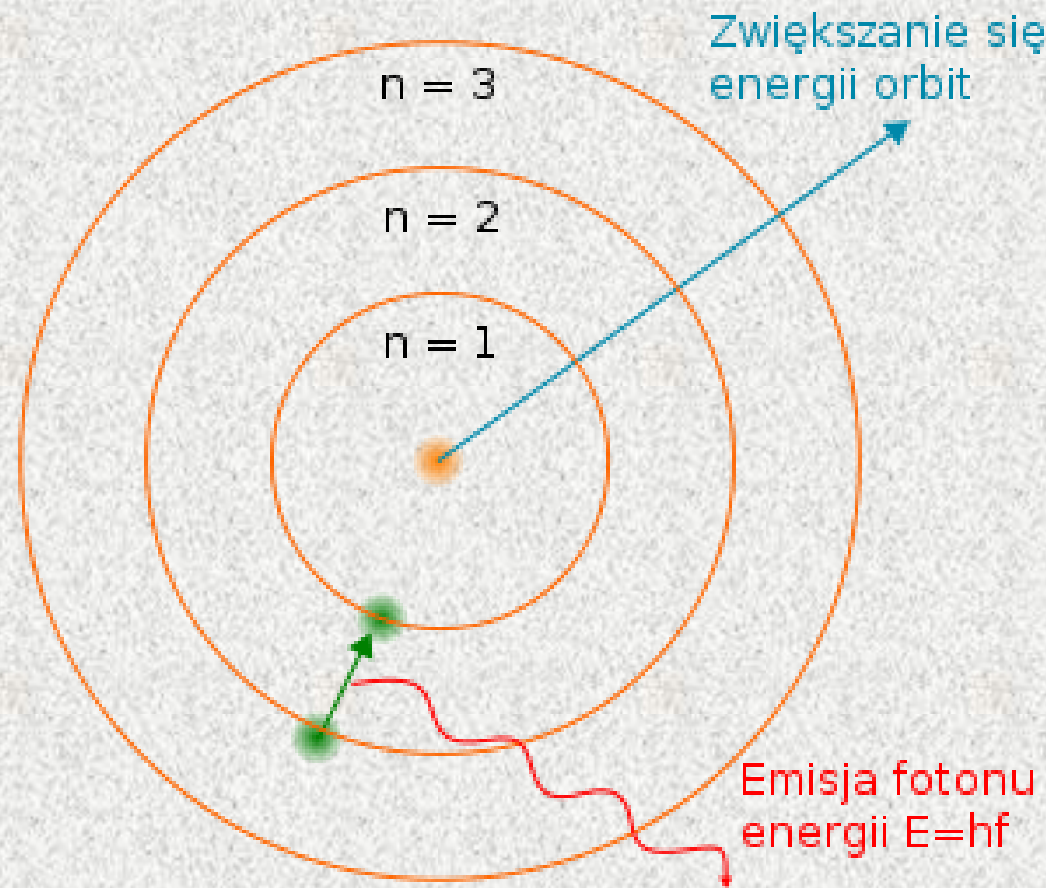
$$m \cdot v \cdot r = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$



PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE

Elektrony mogą
"przemieszczać" się między
orbitami dozwolonymi
(stacjonarnymi)
wyrównując bilans energii
emisją lub absorpcją
kwantu promieniowania:

$$h \cdot \nu_{i,j} = E_j - E_i$$



PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE - widmo promieniowania termicznego

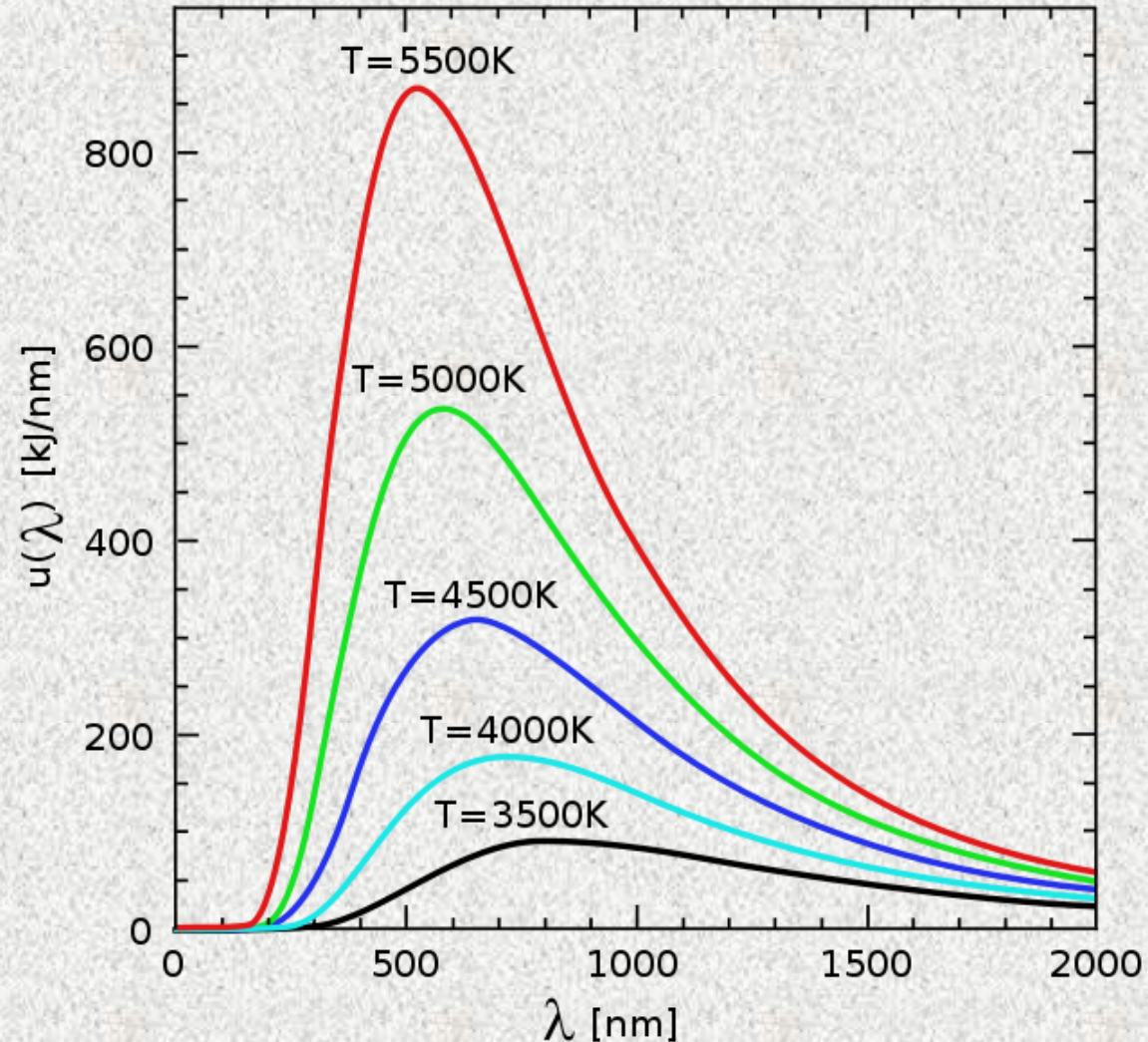
Prawo Stefana
- Boltzmann

$$\Phi = a \cdot \sigma \cdot T^4$$

Prawo Wiena

$$\lambda_{\max} \cdot T = b = \text{const.}$$

$$b = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$



PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE -

katastrofa w ultrafiolecie

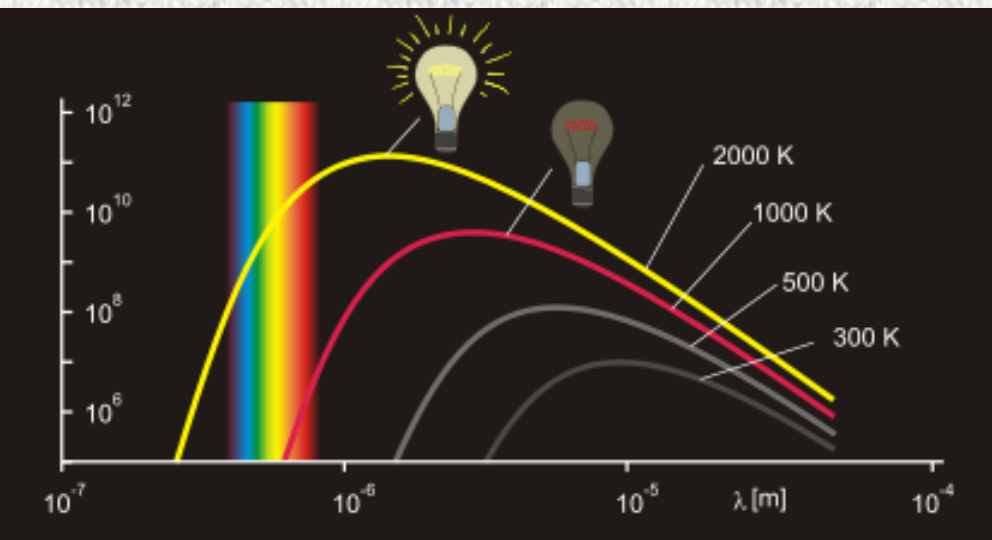
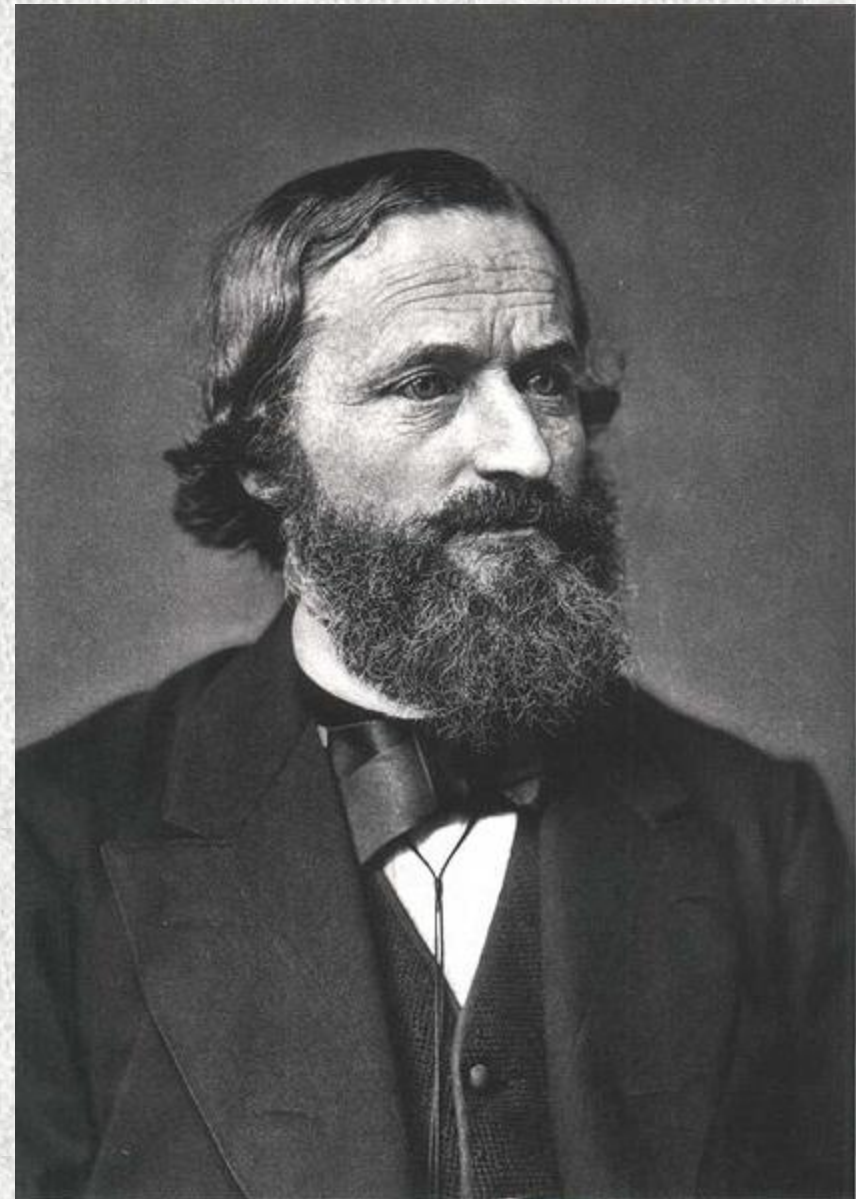
Gustav Robert Kirchhoff

(ur. 12 marca 1824 w

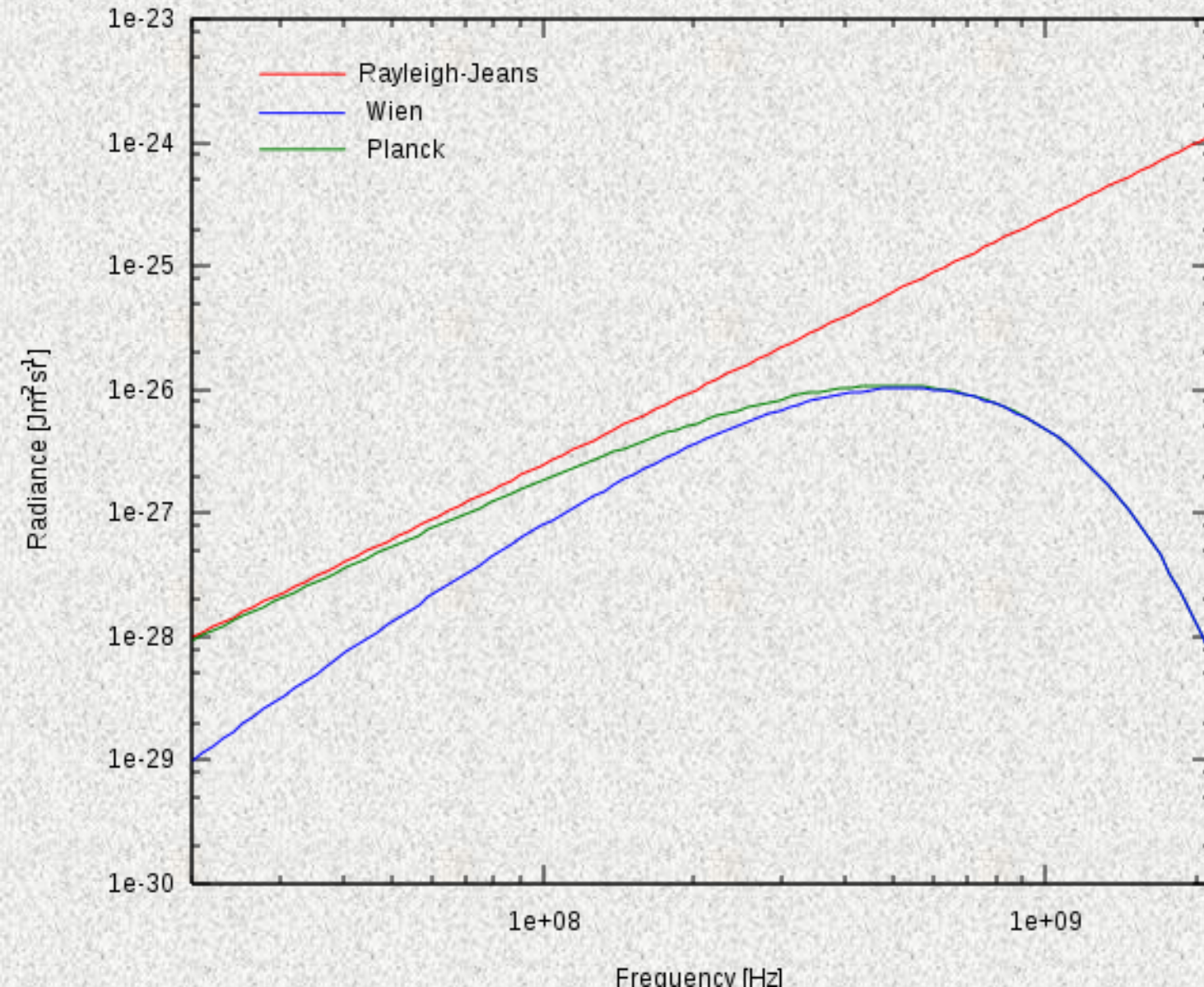
Królewcu, zm.

17 października 1887 w

Berlinie) – niemiecki fizyk.



PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE - katastrofa w ultrafiolecie



PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE - wyjaśnienie katastrofy UV czyli narodziny mechaniki kwantowej

**Max Karl Ernst Ludwig
Planck** (ur. 23 kwietnia 1858,
zm. 4 października 1947) -
niemiecki fizyk, autor prac z
zakresu termodynamiki,
promieniowania termicznego,
energii, dyspersji, optyki,
teorii względności, a przede
wszystkim teorii kwantów.



PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE - wyjaśnienie katastrofy UV czyli narodziny mechaniki kwantowej

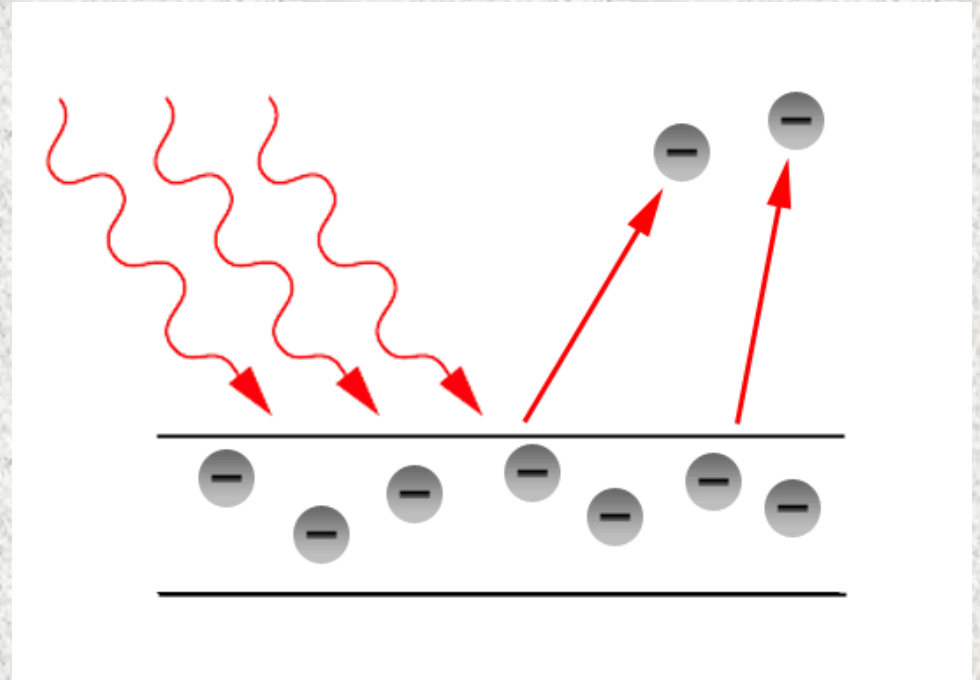
Ciało promieniujące składa się z oscylatorów kwantowych. Oscylator taki drgając z częstotliwością ν , **nie musi wypromieniowywać** fali EM.

Promieniowanie ma charakter jednorazowego zdarzenia: oscylator zmniejsza amplitudę drgań wypromieniowując "porcję" (łac. *quantum*) fali o energii:

$$E = h \cdot \nu \quad h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE - zjawisko fotoelektryczne - kolejny kryzys

Zjawisko to polega na wybijaniu elektronów z powierzchni metali przez padające promieniowanie. Dla każdego metalu istnieje charakterystyczna częstotliwość, powyżej której można obserwować to zjawisko. Metale uszeregowane od najniższej do najwyższej częstotliwości granicznej tworzą szereg fotoelektryczny metali.

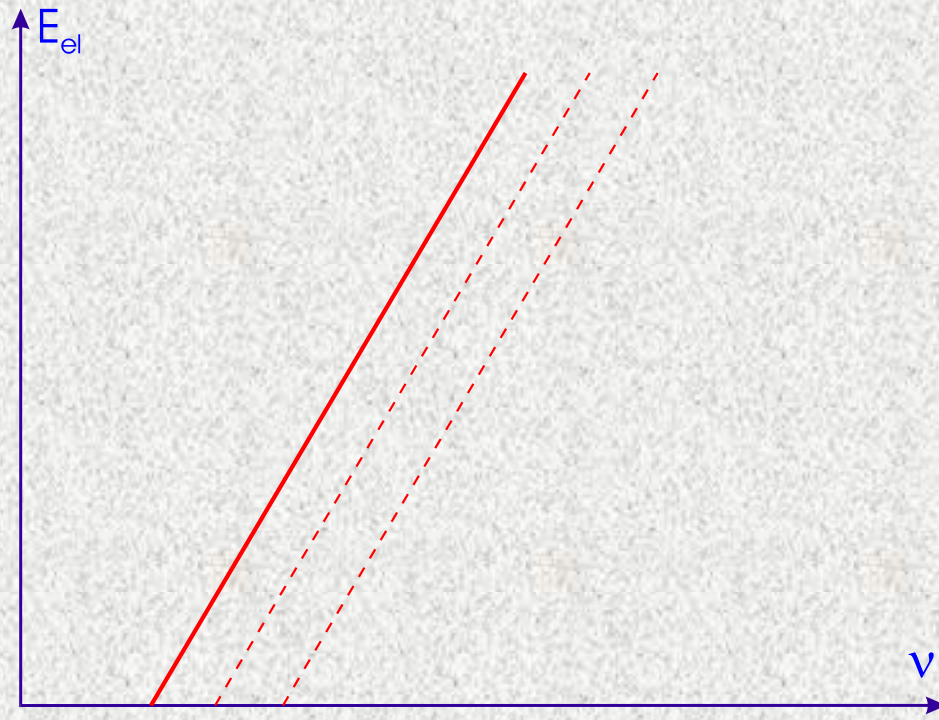


PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE -

zjawisko fotoelektryczne - kolejny kryzys

Ilość wybijanych z metalu elektronów zależy od natężenia promieniowania i nie wykazuje związku z jego częstotliwością.

Energia kinetyczna wybijanych elektronów zależy liniowo od częstotliwości promieniowania i nie wykazuje związku z jego natężeniem.



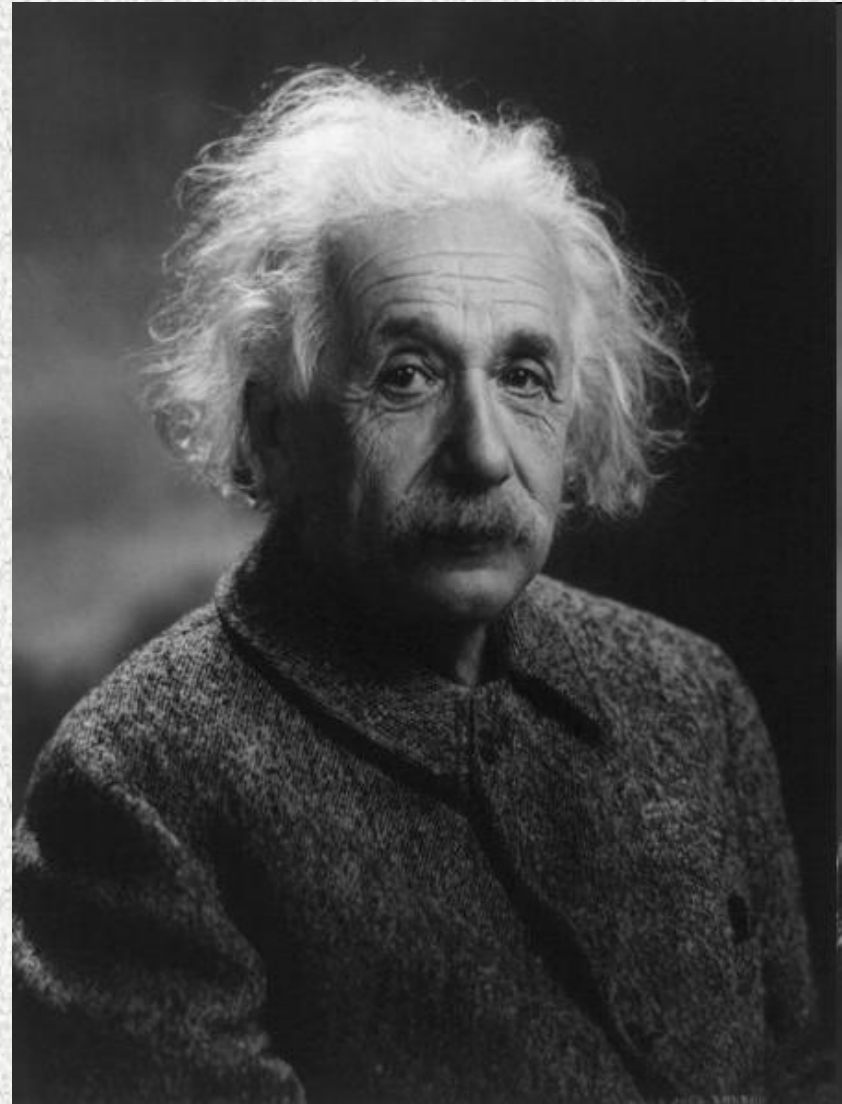
PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE - zjawisko fotoelektryczne - kolejny kryzys

Wyniki obserwacji zjawiska fotoelektrycznego są całkowicie sprzeczne z falową (Maxwellową) teorią promieniowania elektromagnetycznego!

Wyjaśnienie tej sprzeczności w pełni otwiera nowy rozdział fizyki - współczesną mechanikę kwantową.

NOWA TEORIA PROMIENIOWANIA ELEKTROMAGNETYCZNEGO - wyjaśnienie zjawiska fotoelektrycznego

Albert Einstein (ur. 14 marca 1879 r. w Ulm w Niemczech, zm. 18 kwietnia 1955 r. w Princeton w USA) – jeden z największych fizyków-teoretyków XX wieku, twórca ogólnej i szczególnej teorii względności, współtwórca korpuskularno-falowej teorii światła.



NOWA TEORIA PROMIENIOWANIA ELEKTROMAGNETYCZNEGO - wyjaśnienie zjawiska fotoelektrycznego

Promieniowanie EM (elektromagnetyczne) ma naturę dualną - tzn. w pewnych zjawiskach oddziałuje z materią w sposób typowy dla fal, w innych (m.in. fotoelektrycznym) w sposób typowy dla cząstek.

W zjawisku fotoelektrycznym promieniowanie EM ma cechy strumienia cząstek - fotonów, z których każdy ma energię:

$$E = h \cdot \nu$$

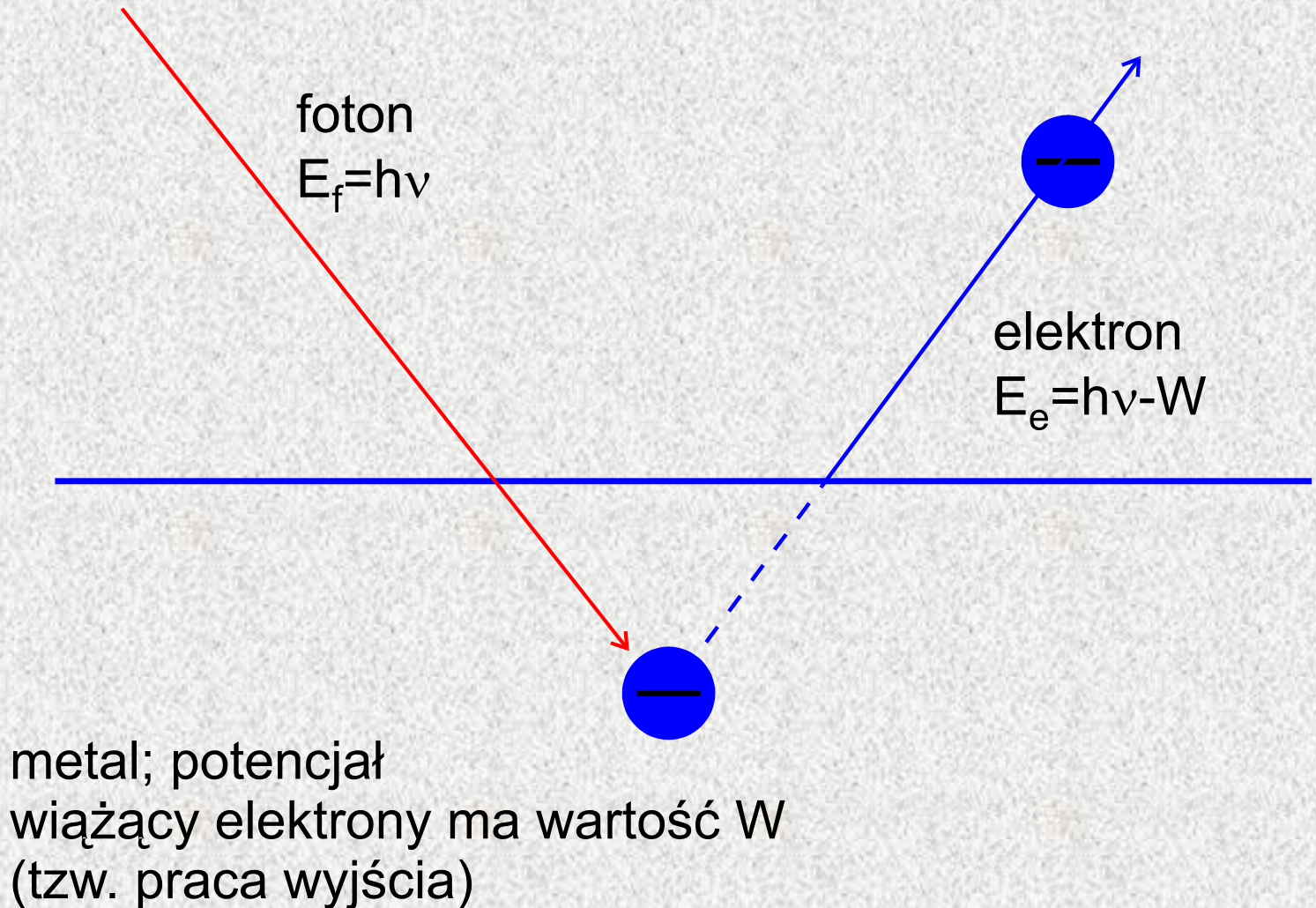
NOWA TEORIA PROMIENIOWANIA ELEKTROMAGNETYCZNEGO - wyjaśnienie zjawiska fotoelektrycznego

Fotonom można przypisać wielkości typowe dla opisu ruchu cząstek:

$$p_f = \frac{E}{c} = \frac{h \cdot \nu}{c} \quad \text{pęd fotonu}$$

$$m_f = \frac{E}{c^2} = \frac{h \cdot \nu}{c^2} \quad \text{masa fotonu
(relatywistyczna)}$$

NOWA TEORIA PROMIENIOWANIA ELEKTROMAGNETYCZNEGO - wyjaśnienie zjawiska fotoelektrycznego



Uogólnienie teorii Einsteina - hipoteza de Broglie - fundament fizyki współczesnej

Książę **Louis Victor Pierre
Raymond de Broglie** (ur.
15 sierpnia 1892 w Dieppe,
zm. 19 marca 1987 w Louveciennes
we Francji), francuski fizyk, laureat
Nagrody Nobla w 1929 za odkrycie
falowej natury elektronów.



Uogólnienie teorii Einsteina - hipoteza de Broglie - fundament fizyki współczesnej

Każde zjawisko promieniowania ma charakter dualny. Jeżeli badając pewne promieniowanie eksperymentator A zidentyfikował je jako strumień cząstek o pędzie p , to eksperymentator B wykonując **inny eksperyment** może to samo promieniowanie zarejestrować jako falę o długości λ . Między wynikami obserwacji eksperymentatorów A i B będzie zawsze zachodził związek:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v}$$

Zasada komplementarności (Niels Bohr)

Obraz promieniowania otrzymany w danym eksperymencie jest zawsze jednoznaczny. Jeżeli obserwacja promieniowania powoduje wykrycie cech falowych, to w tym samym eksperymencie nie można obserwować cech korpuskularnych (*i vice versa*).

Mechanika falowa (nowa mechanika kwantowa)

Mechanika falowa rozwiązuje wszystkie dotychczasowe problemy zjawisk atomowych. Obserwacje wskazują, że elektrony w atomie wodoru można zaobserwować tylko na ściśle określonych orbitach (?):

$$m \cdot v \cdot r = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$

Zmieńmy ten postulat na formę falową:

$$\frac{h}{\lambda} \cdot r = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$

Mechanika falowa (nowa mechanika kwantowa)

$$\frac{h}{\lambda} \cdot r = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$

Po prostym przekształceniu otrzymujemy bardzo logiczną zależność:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot \pi \cdot r$$

Elektron może być "wszędzie" - lecz szansa na jego zaobserwowanie pojawi się tylko w takiej odległości od jądra, dla której obwód orbity będzie całkowitą wielokrotnością długości jego fali.

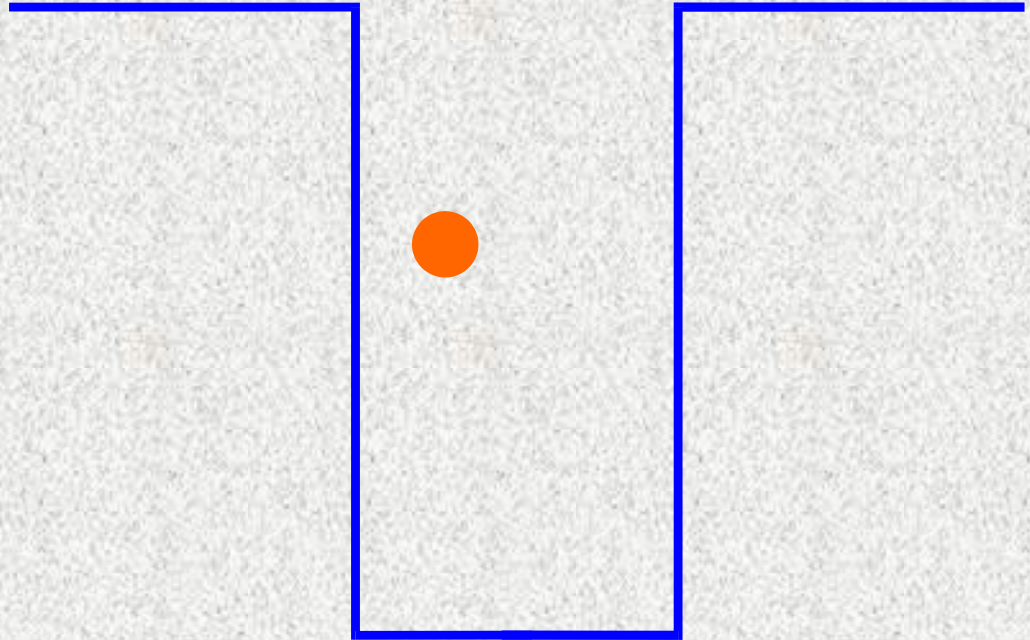
Rozwój mechaniki falowej

Erwin Schrödinger (ur. 12 sierpnia 1887 w Wiedniu (Erdberg), zm. 4 stycznia 1961 w Wiedniu) – austriacki fizyk teoretyk, jeden z twórców mechaniki kwantowej, laureat Nagrody Nobla z dziedziny fizyki w roku 1933 za prace nad matematycznym sformułowaniem mechaniki falowej.



Rozwój mechaniki falowej

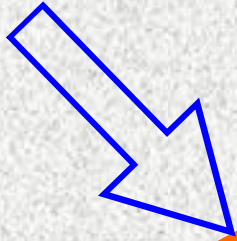
Schrodinger pokazuje, że obiekt zamknięty w "studni potencjału" ulega dyskretyzacji energetycznej - jego energia może przyjmować tylko ściśle określone wartości.



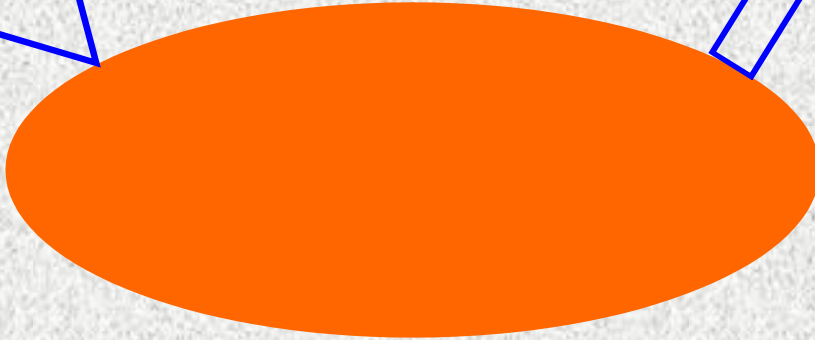
Wróćmy do promieniowania...

W znakomitej większości wypadków obserwujemy idealną równowagę między zjawiskami absorpcji i emisji promieniowania.

absorpcja



emisja



$$\frac{I_e}{I_a} = \text{const}$$

Wynika to z rozkładu Boltzmanna opisującego dla określonych elementów kwantowych względne obsadzenie stanu w zależności od jego energii:

$$\frac{N_i}{N_0} = \exp\left(\frac{-\Delta E_i}{k \cdot T}\right)$$

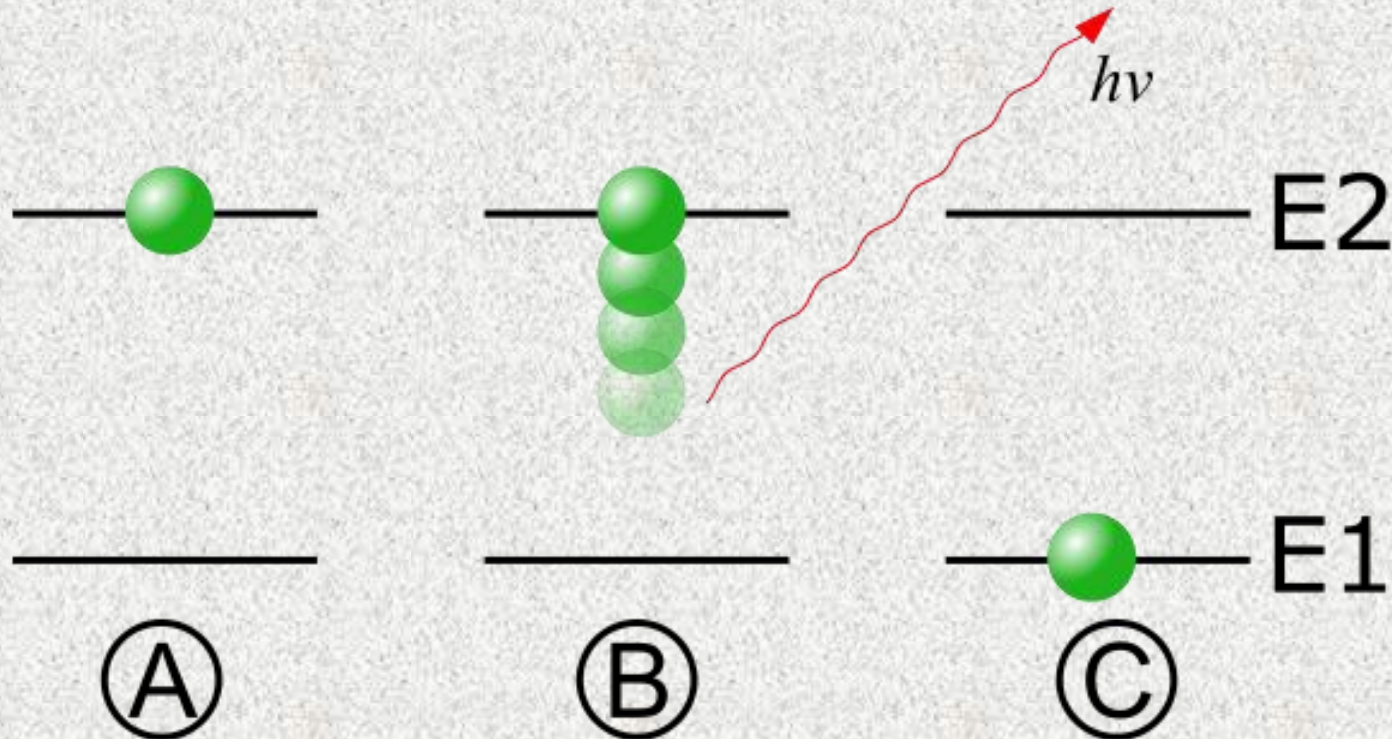
Jak łatwo można zauważyć, w każdej temperaturze:

$$N_i < N_0$$

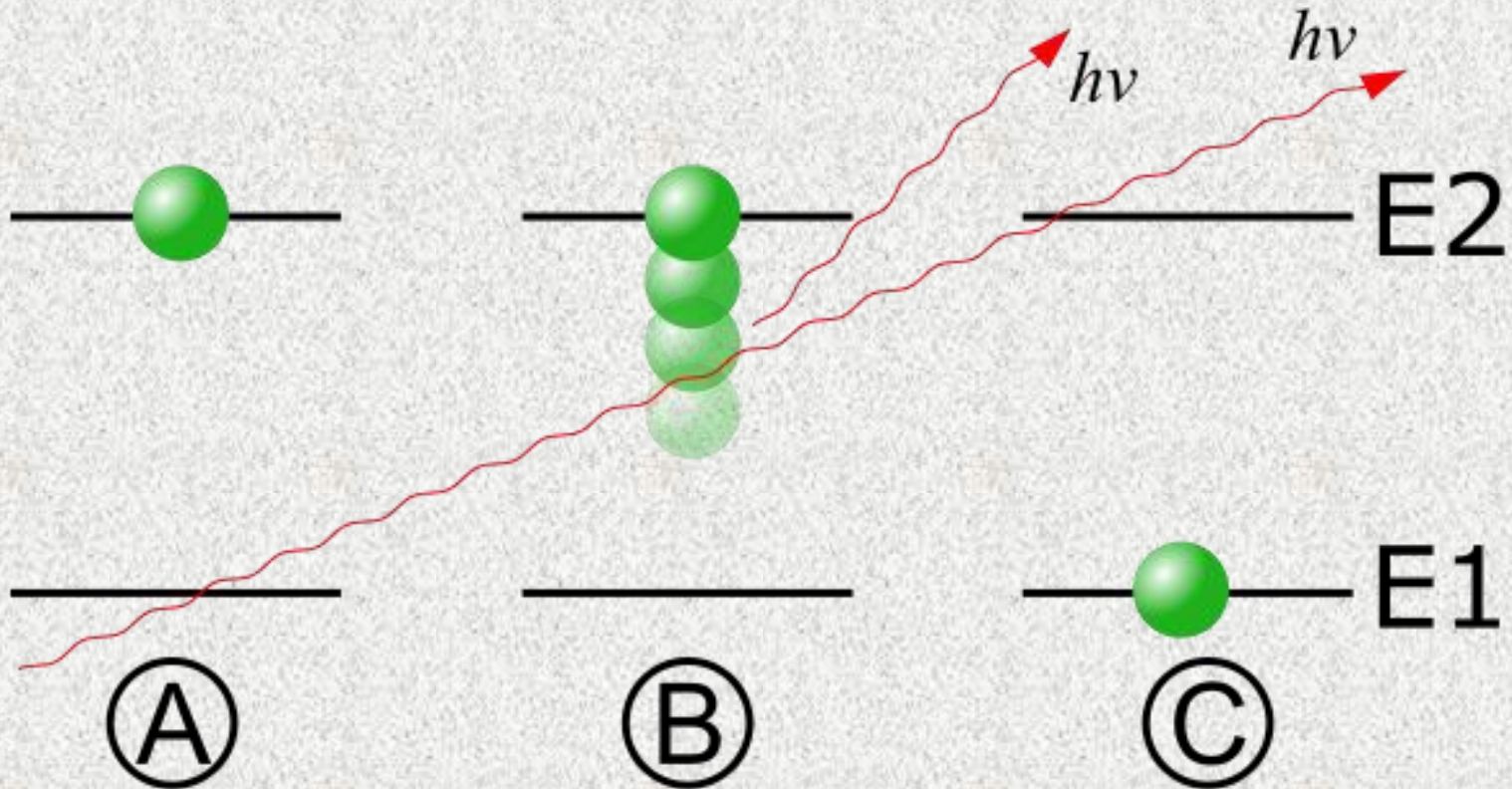
lub ogólniej...

$$N_j < N_i \text{ gdy } E_j > E_i$$

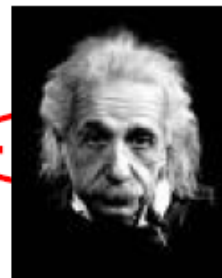
W 1918 roku Albert Einstein zauważył, że dla przyjmowanych powszechnie modeli emisji promieniowania jako zjawiska spontanicznego, stan równowagi między absorpcją a emisją nie powinien w ogóle wystąpić.



Zjawisko równowagi wymaga założenia jeszcze innego mechanizmu emisji promieniowania - Einstein nazywa go emisją wymuszoną:

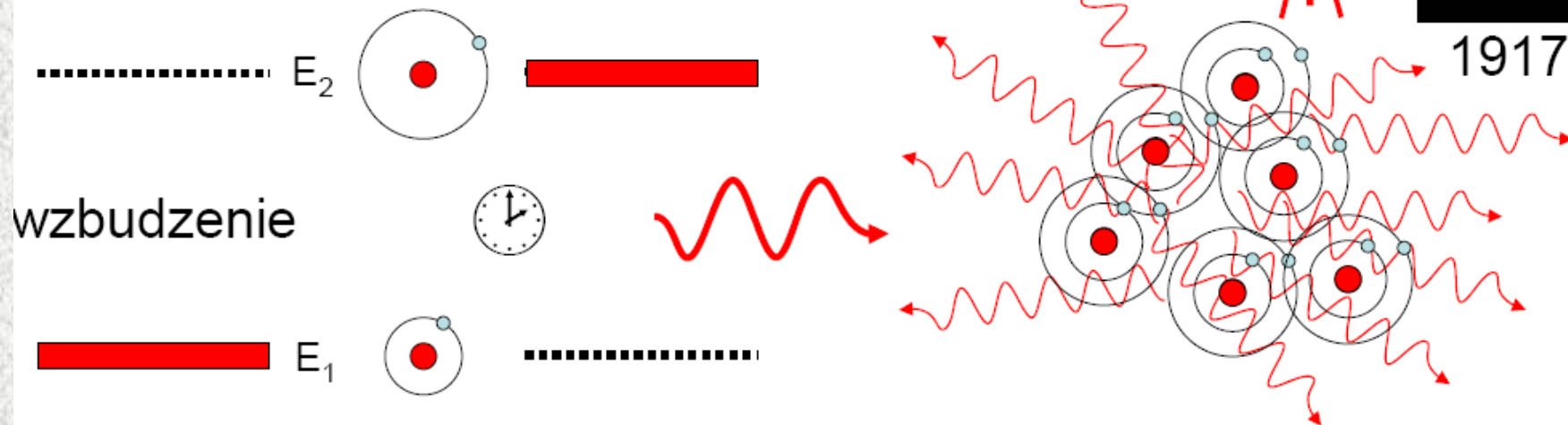


Emisja spontaniczna vs. **wymuszona**

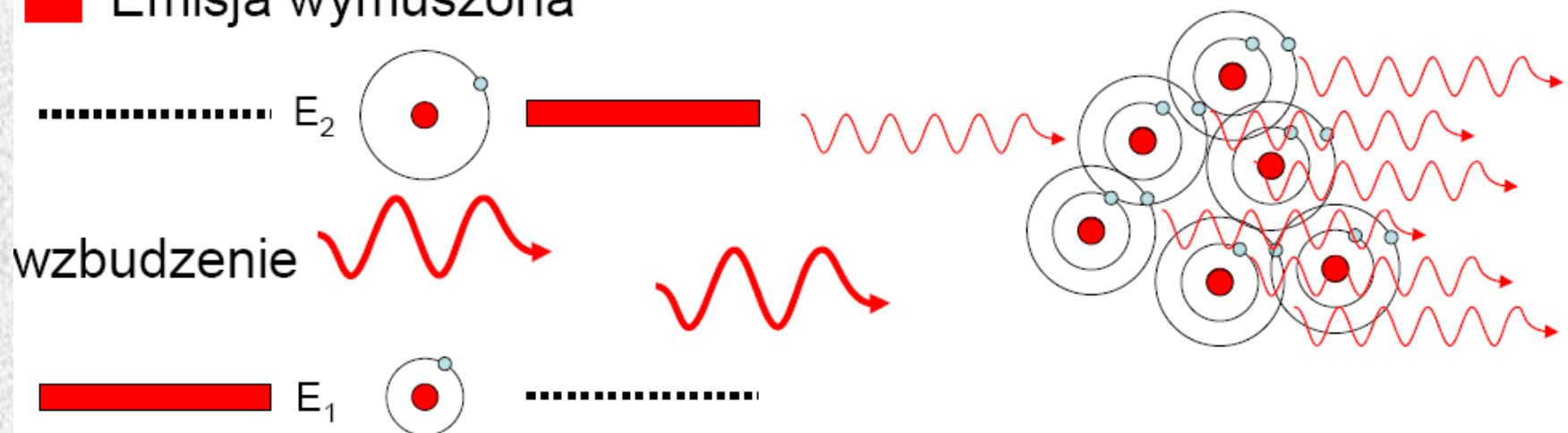


1917

■ Emisja spontaniczna



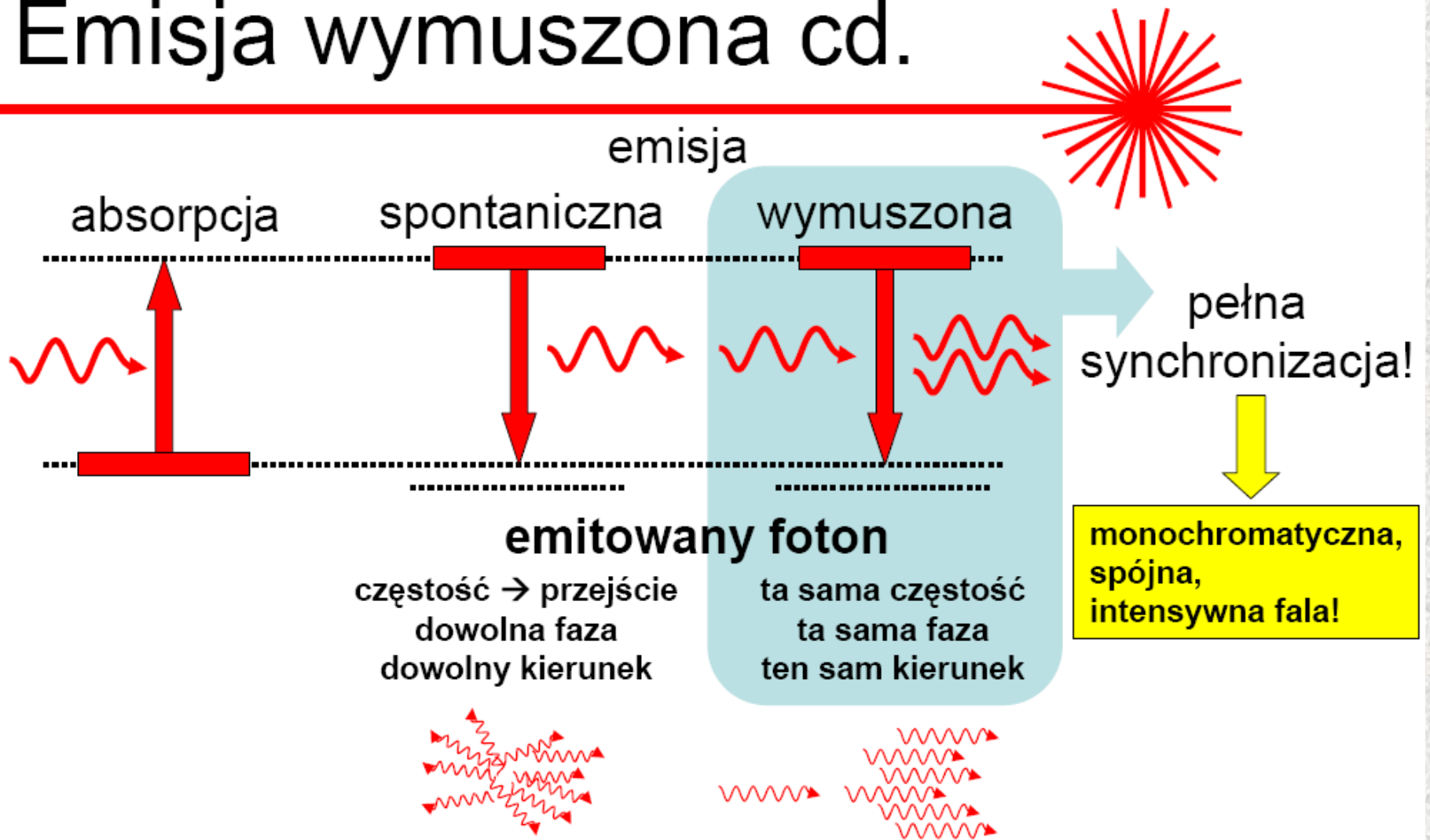
■ Emisja wymuszona



W w warunkach układu elementów kwantowych (atomów, cząsteczek, etc.) podlegających rozkładowi Boltzmanna prawdopodobieństwo aktu emisji wymuszonej jest wielokrotnie mniejsze od zjawiska emisji spontanicznej.

Promieniowanie emitowane przez układ charakteryzuje się brakiem koherentności oraz izotropią przestrzenną.

Emisja wymuszona cd.



Warunkiem dominacji zjawiska emisji wymuszonej jest uzyskanie w układzie kwantowym stanu inwersji obsadzeń.

Inwersja obsadzeń, to stan układu, w którym pewien poziom energetyczny jest obsadzony licznej niż stan o energii podstawowej (mniejszej).

Doprowadzenie układu do stanu inwersji obsadzeń nazywamy pompowaniem optycznym.

Z układu, w którym doprowadzono do stanu inwersji obsadzeń można otrzymać emisję promieniowania EM na drodze emisji wymuszonej - otrzymamy wówczas niezwykle silny strumień promieniowania (impulsowy lub ciągły) koherentnego w formie praktycznie idealnie równoległej wiązki.

Czyli, będzie to:

wzmocnienie światła uzyskane wymuszoną emisją promieniowania...

lub, w języku angielskim...

Light

Amplification by

Stimulated

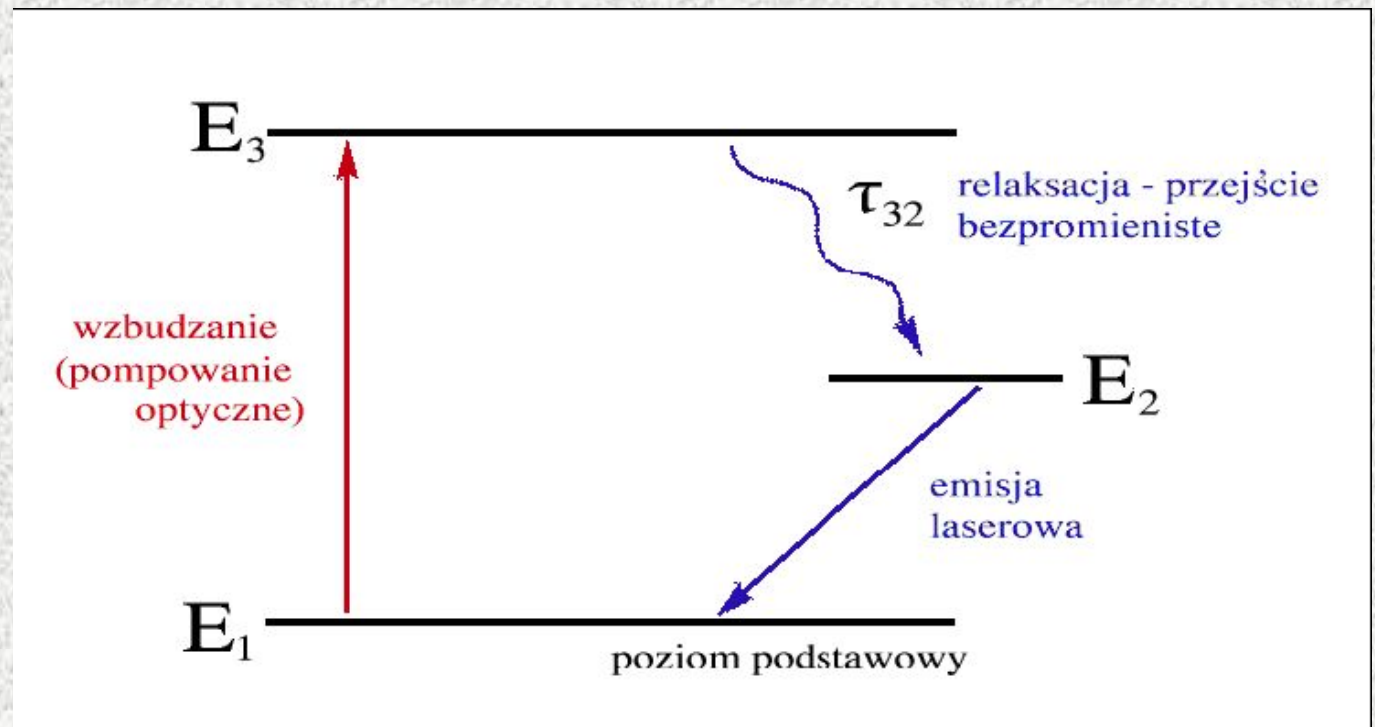
Emission of

Radiation

LASER

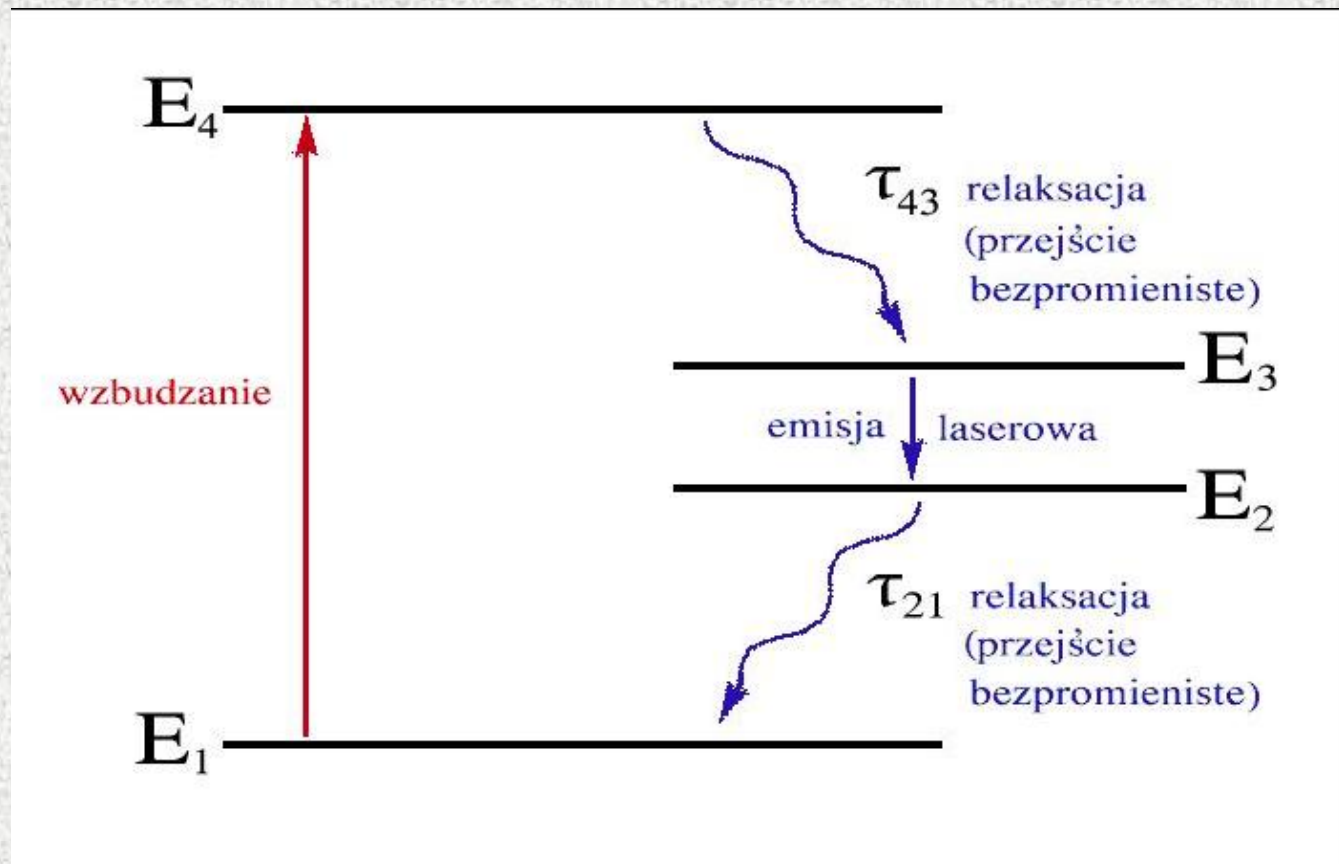
LASER

W celu uzyskania inwersji obsadzeń wykorzystuje się różne efekty - bardzo często istnienie tzw. poziomów zabronionych - tj. poziomów energetycznych o praktycznie zerowym prawdopodobieństwie emisji spontanicznej.



LASER

Pompowanie optyczne - uzyskanie inwersji obsadzeń.



LASER

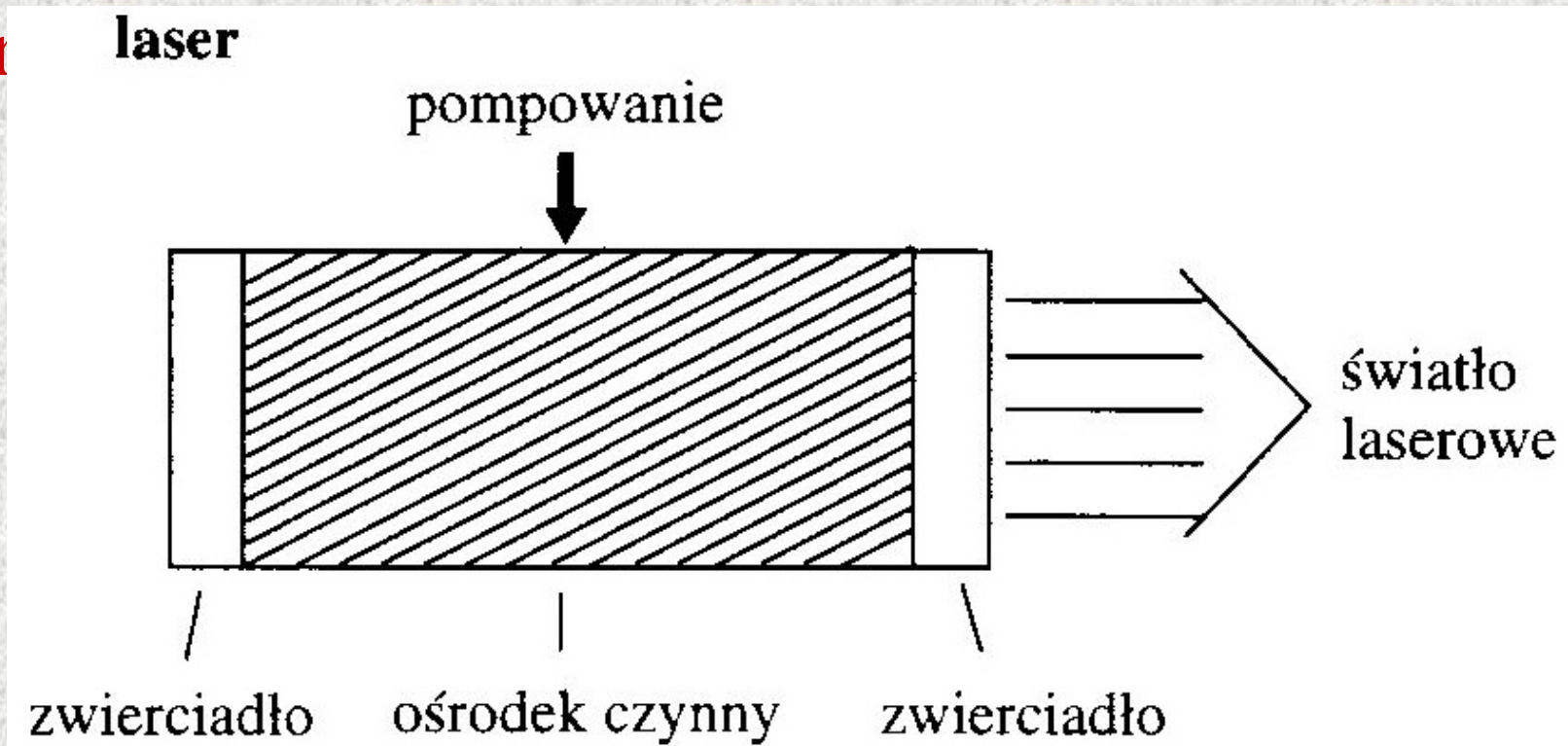
Przykładowe sposoby pompowania optycznego:

- pompowanie poprzez błysk lampy błyskowej (flesza),
- pompowanie przez błysk innego lasera,
- pompowanie przez przepływ prądu (wyładowanie) w gazie,
- pompowanie reakcją chemiczną,
- pompowanie poprzez zderzenia atomów.

LASER

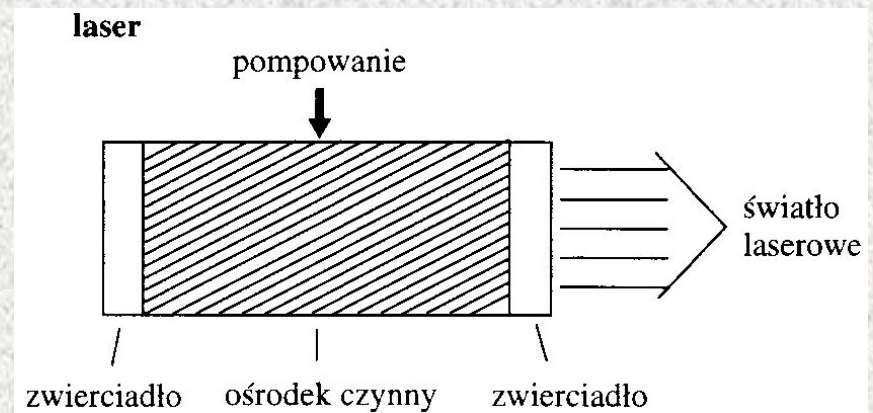
Ośrodek czynny z inwersją obsadzeń jest już gotowy do wzmacniania światła. Żeby jednak uzyskać ten efekt musimy zapewnić mu pracę w warunkach rezonansowych z dodatnim współczynnikiem

sp1



LASER

Rezonator optyczny



Układ optyczny pełni rolę sprzężenia zwrotnego dla wybranych częstotliwości, dzięki czemu laser generuje spójne światło.

Tylko te fotony, dla których układ optyczny jest rezonatorem, wielokrotnie przebiegają przez ośrodek czynny wywołując emisję kolejnych fotonów spójnych z nimi. Pozostałe fotony zanikają w ośrodku czynnym lub układzie optycznym. Dzięki temu laser emituje niemalże równoległą wiązkę światła o dużej spójności.

Zwierciadło całkowicie odbijające

Powstawanie akcji laserowej

Zwierciadło półprzepuszczalne

1

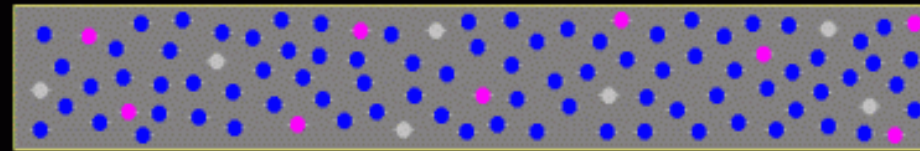


ośrodek czynny lasera w stanie podstawowym

pompowanie energii

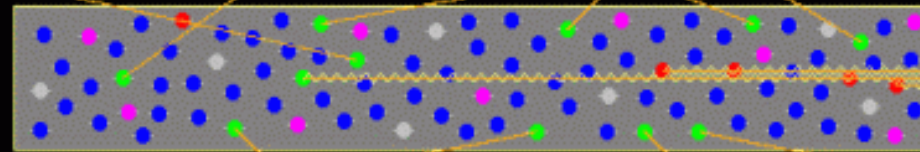


2



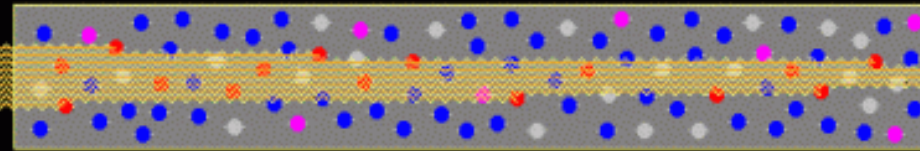
inwersja obsadzeń - przejście do stanu wzbudzonego

3



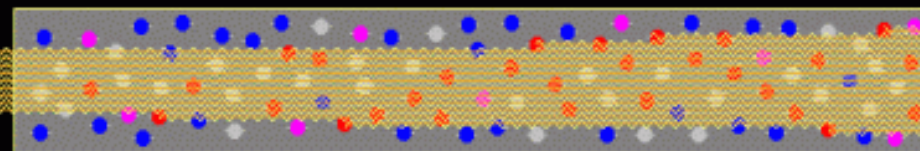
emisja spontaniczna i początek emisji wymuszonej

4



narastanie emisji wymuszonej

5



pełna emisja wymuszona - generowane światło spójne

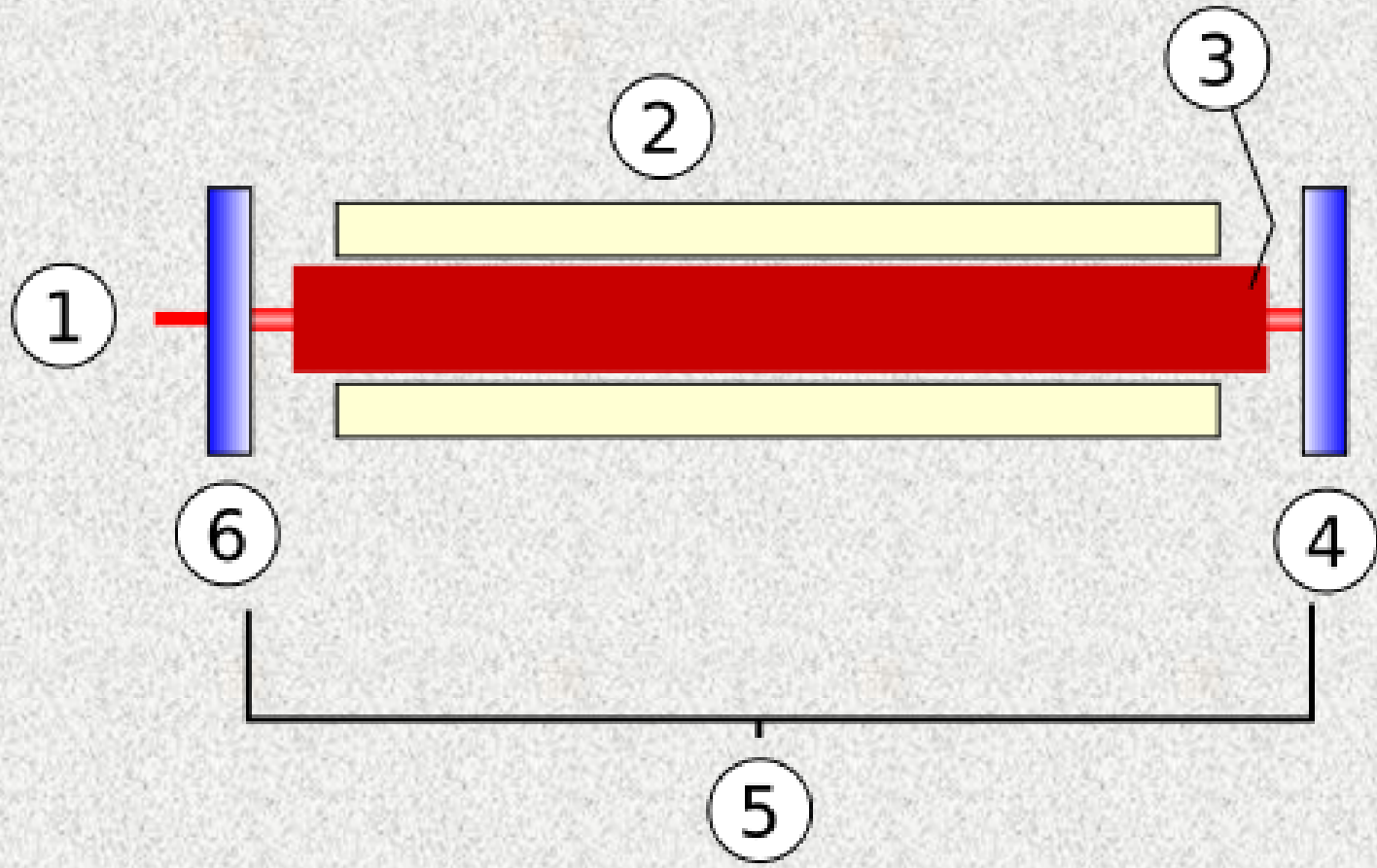
Legenda

- poziom podstawowy
- wyższe poziomy energetyczne (wzbudzone)
- emisja spontaniczna
- emisja wymuszona

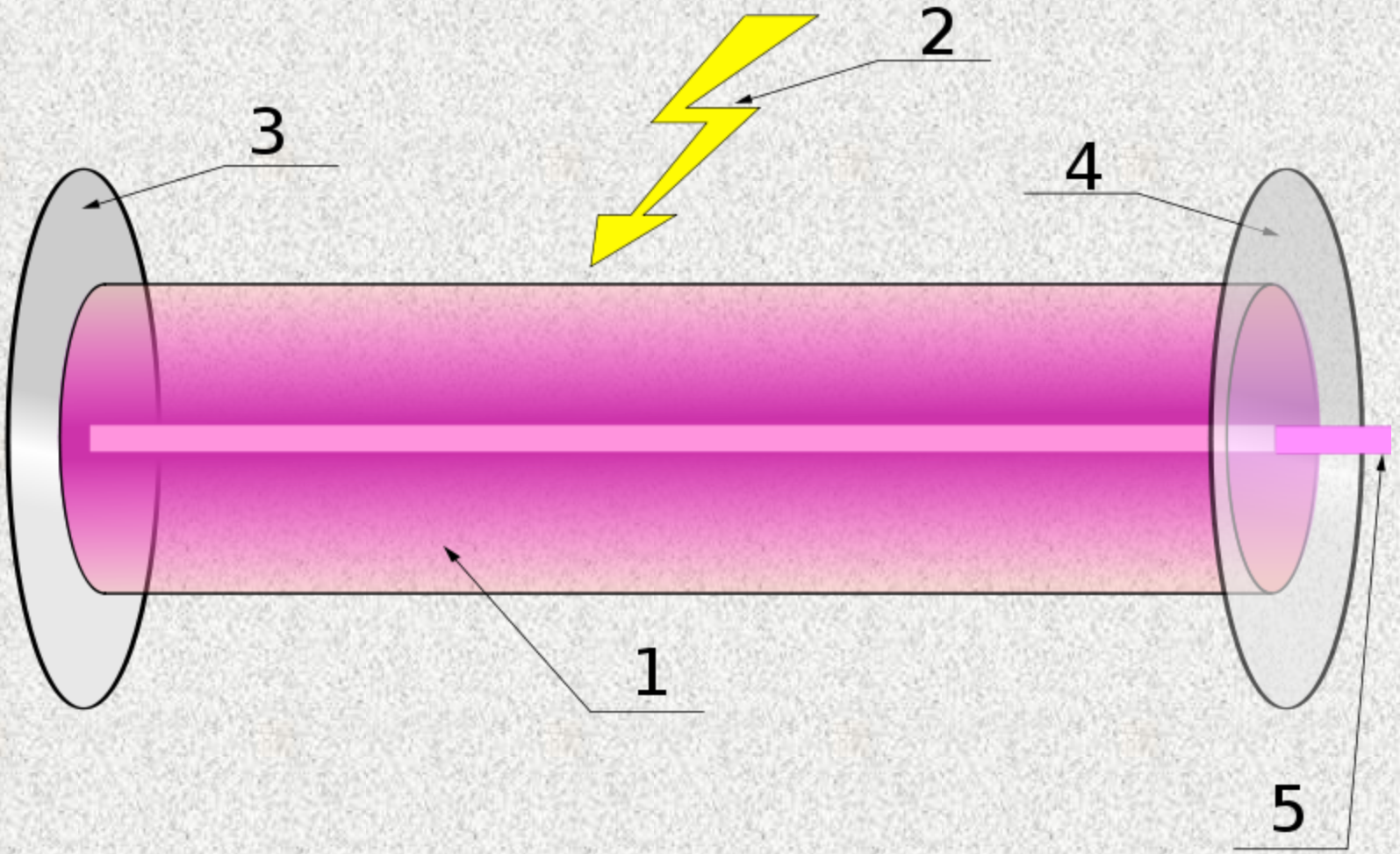
znak ● oznacza atomy, jony lub cząsteczki w zależności od ośrodka czynnego

wiązka laserowa

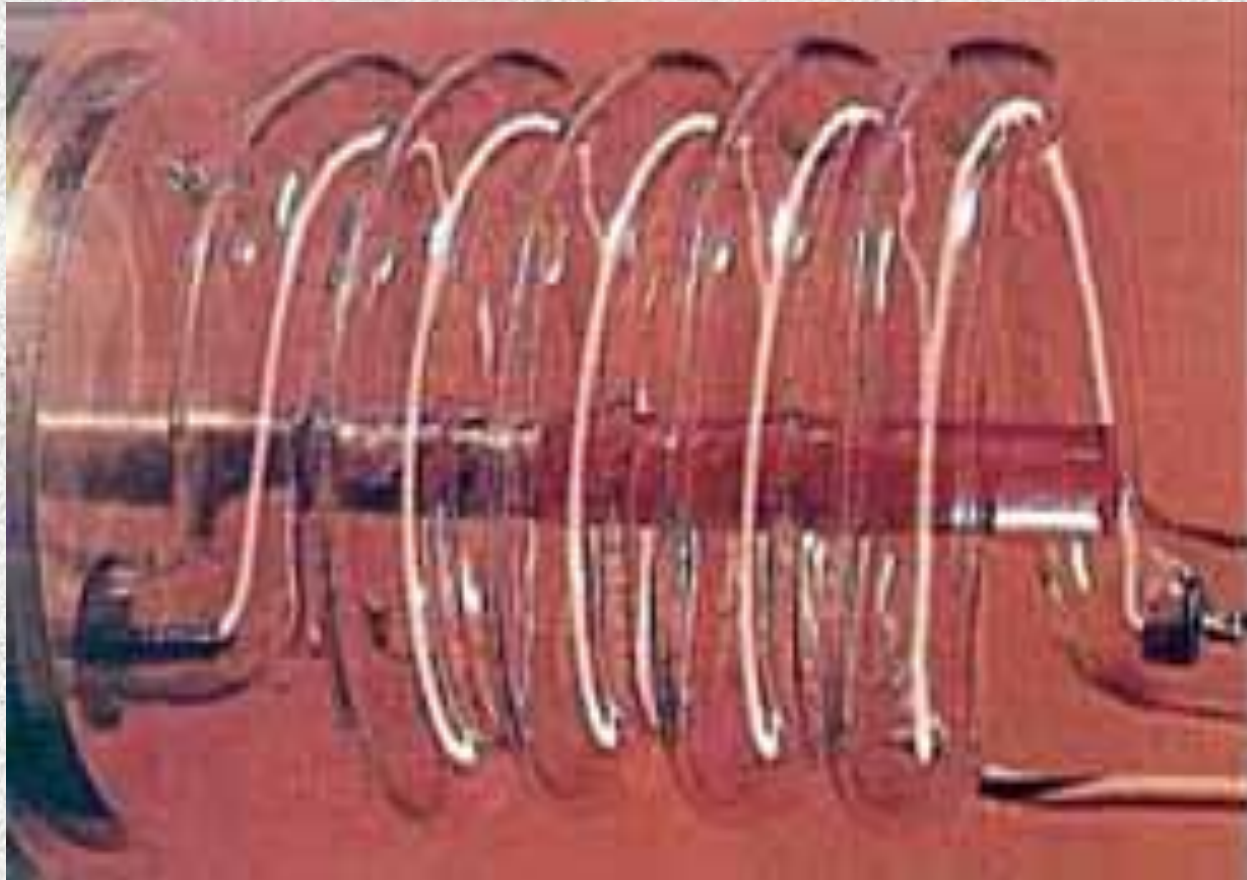
Laser rubinowy



Laser rubinowy



Laser rubinowy



LASER - cechy promieniowania

Równoległość wiązki: $\delta\Theta \approx \frac{d}{\lambda}$

d - średnica wiązki wyjściowej, λ - długość fali

Monochromatyczność

Szerokość widmowa promieniowania laserowego nie jest możliwa do zmierzenia metodami spektroskopowymi! Mimo, iż większość laserów ma szerokość widmową od 1 MHz do 1 GHz (dla światła widzialnego to mniej niż jedna dwumilionowa częstotliwości lasera) konstruowane są lasery o szerokości widmowej mniejszej niż 1 Hz!

LASER - cechy promieniowania

Gęstość energii i luminancja:

Równoległą wiązkę światła laserowego można bez problemu ogniskować otrzymując niezwykle wielkie gęstości mocy w ognisku - do TW/m^2 (T - "tera" czyli 10^{12}). Ponieważ energia fotonów jest skupiona w niewielkim przedziale widmowym, to nawet przy niewielkiej mocy lasera jego jaskrawość jest bardzo duża.

LASER - cechy promieniowania

Ultrakrótkie czasy impulsów:

Stosując modulację wiązek laserowych można uzyskać ultrakrótkie czasy impulsów promieniowania, poniżej jednej pikosekundy! Typowy krótki impuls laserowy o czasie trwania 0.1 ps odpowiada impulsowi świetlnemu o długości przestrzennej $\Delta x = 0.03 \text{ mm}$! Jest to więc, w zasadzie, emisja cienkiej warstwy światła.

LASERY - podział z uwagi na cech ośrodka czynnego:

Lasery gazowe atomowe (atomowe, jonowe, atomowe na parach metali). Dotychczas nie udało się uzyskać akcji laserowej jedynie dla kilku z 91 występujących w przyrodzie pierwiastków!

Lasery gazowe cząsteczkowe (molekularne)

Lasery na ciele stałym

Lasery barwnikowe (lasery cieczowe)

Lasery półprzewodnikowe

Lasery półprzewodnikowe