

# **FIZYCZNE PODSTAWY KONWERSJI I MAGAZYNOWANIA ENERGII**

(H. Sodolski, projekt wykładu – 15. godz. VII semestr, specjalność Fizyka i technika konwersji energii)

- I. Energia i zasada zachowania energii
  - 1. Czym jest energia?
  - 2. Rodzaje energii i jej jakość
  - 3. Zasada zachowania energii i masy - energii
- II. Konwersja energii w przyrodzie
- III. Zjawiska konwersji energii w fizyce klasycznej
  - 1. Konwersja energii mechanicznej
  - 2. Konwersja ciepła
  - 3. Konwersja energii chemicznej
  - 4. Zjawiska konwersji energii elektrycznej
- IV. Kwantowe i jądrowe zjawiska konwersji energii
  - 1. Ogniwa słoneczne
  - 2. Generatory termoelektryczne
  - 3. Zjawisko Peltiera
  - 4. Generatory plazmowe
  - 5. Wybuchy jądrowe i kontrolowane reakcje jądrowe
- V. Fizyczne mechanizmy transportu energii
- VI. Magazynowanie energii
  - 1. Parametry charakteryzujące magazynowanie energii
  - 2. Magazynowanie energii cieplnej i słonecznej
  - 3. Akumulacja energii elektrycznej
  - 4. Magazynowanie energii chemicznej i jądrowej
  - 5. Kwantowe zjawiska magazynowania energii

# Definicja (?) energii

Energia jest wieczną rozkoszą.

William Blake (1757 – 1827), poeta

Chociaż nie potrafimy podać ogólnej definicji energii, zasada zachowania energii prosto wskazuje, że jest coś co pozostaje stałe ..... i co możemy nazwać energią.

Henry Poincare (1854 -1912), fizyk, matematyk

Jest ważne uprzytomnić sobie, że we współczesnej fizyce nie wiemy czym jest energia.

Richard Feynman (1918 – 1988), fizyk

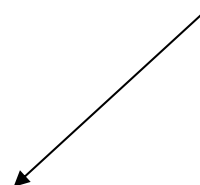
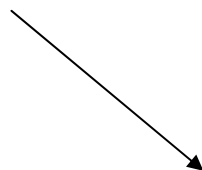
**Skalarna wielkość fizyczna ściśle spełniająca prawo zachowania , która pozwala mierzyć jedną (czyli taką samą) miarą różne postacie ruchu i oddziaływania.**

# Rodzaje energii

Różne procesy fiz.



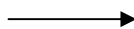
Różne rodzaje oddziaływań



Różne rodzaje (formy) energii

Przykład

ruch nukleonów  
+  
oddziaływania



energia wewnętrzna  
jądra atomowego

=

energia jądrowa

# Pomiar poszczególnych rodzajów energii (przykłady)

Energia kinetyczna ( $E_k$ )

$$\frac{mV^2}{2}$$

I

$$\frac{I\omega^2}{2}$$

$$mc^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

Energia potencjalna ( $E_p$ )

$$mgh$$

$$\frac{kx^2}{2}$$

$$\frac{q_1 q_2}{4 \pi \epsilon_o r}$$

Energia wewnętrzna (U)

$$\Delta B = (Zm_p + Nm_n - m_j)c^2 \quad [\text{energia wiązania nukleonów w jądrze atomu}]$$

$$\Delta U = nC_v \Delta T \quad [\text{zmiana e.w. gazu dosk. w przemianie izochor.}]$$

# Zasada zachowania energii

## I. Zasada zachowania energii mechanicznej

$$E_m = E_k + E_p = \textit{const}$$

## II. Ogólna zasada zachowania energii

$$\Delta E_k + \Delta E_p + \Delta U = 0$$

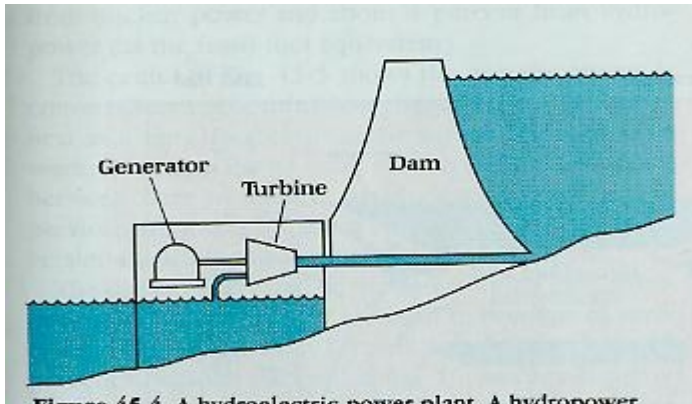
## III. Zasada zachowania energii w termodynamice

$$Q = \Delta U + W$$

## IV. Zasada zachowania energii w fizyce relatywistycznej

$$E = mc^2 + E_k = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

# Uwagi o jakości energii

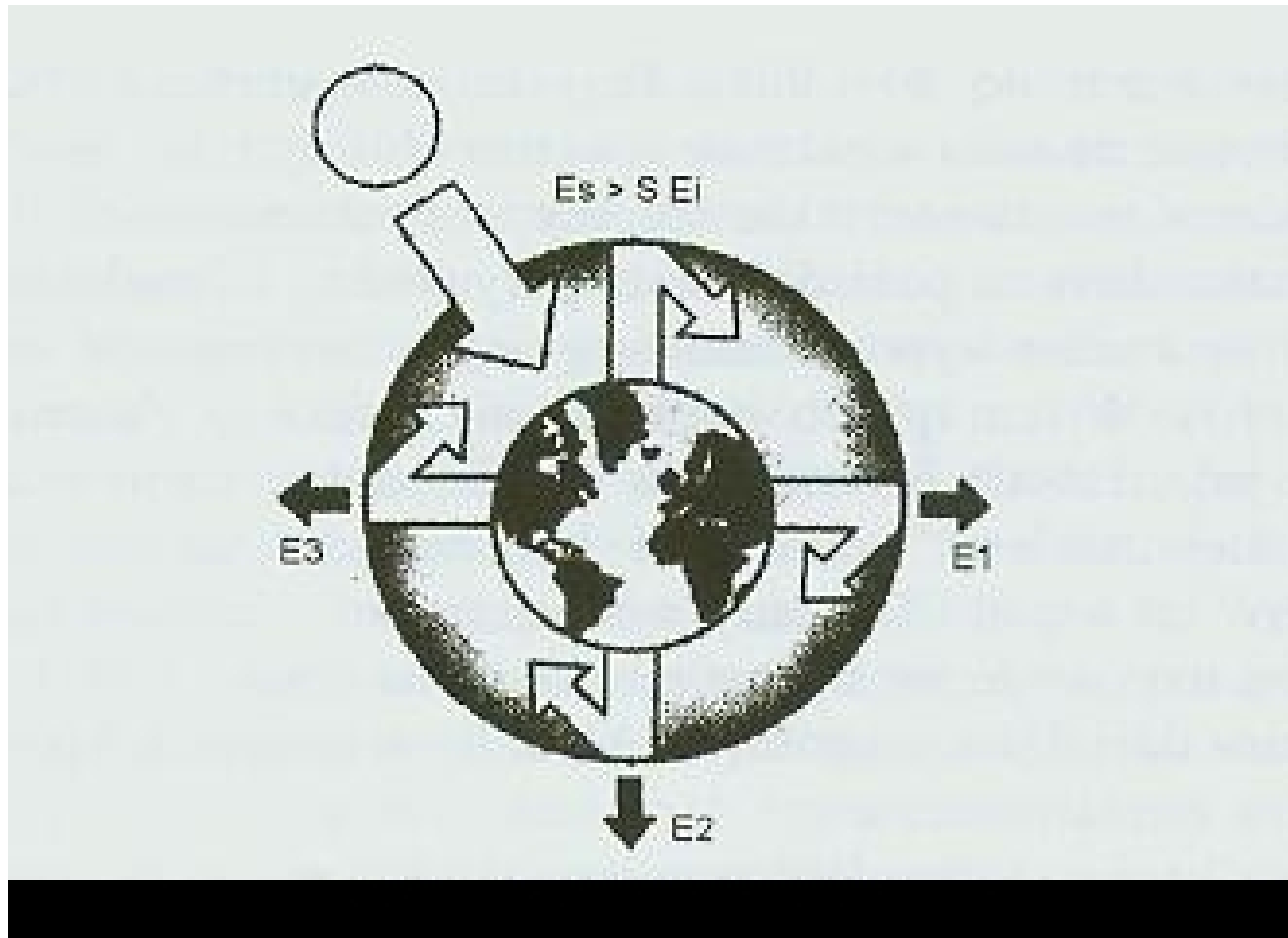


jakość 1J energii mech. > jakości 1J energii chem. paliw kopalnych

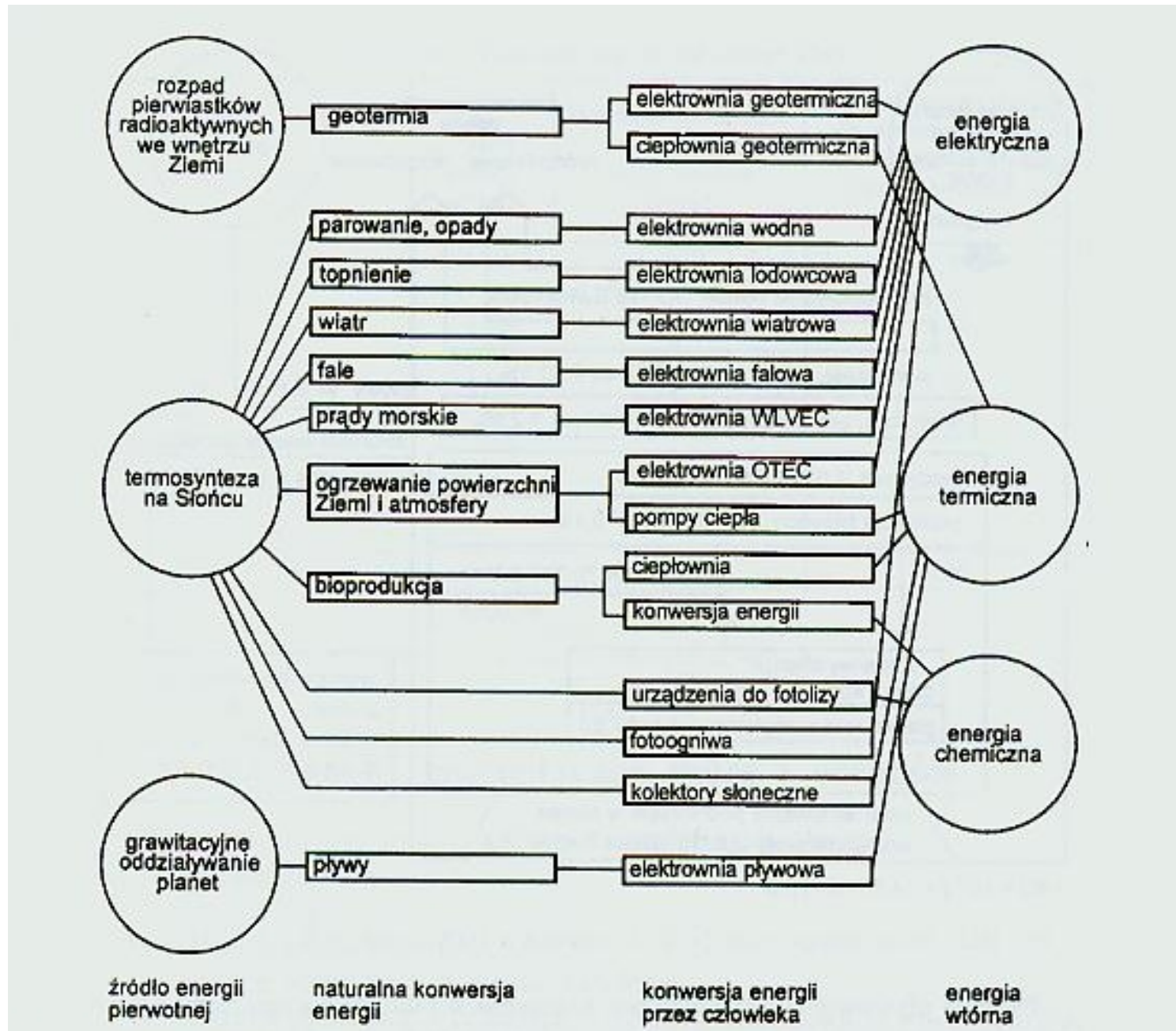
Porównanie mocy wyjściowej :

$$P(\text{hydro}) \times (\text{równoważnik p.k.}) = P(h) \times \frac{1}{\eta_{\text{śr.}}} \quad (\text{elektrowni prac. na p.k.})$$

# Bilans przepływu energii dla Ziemi (1)

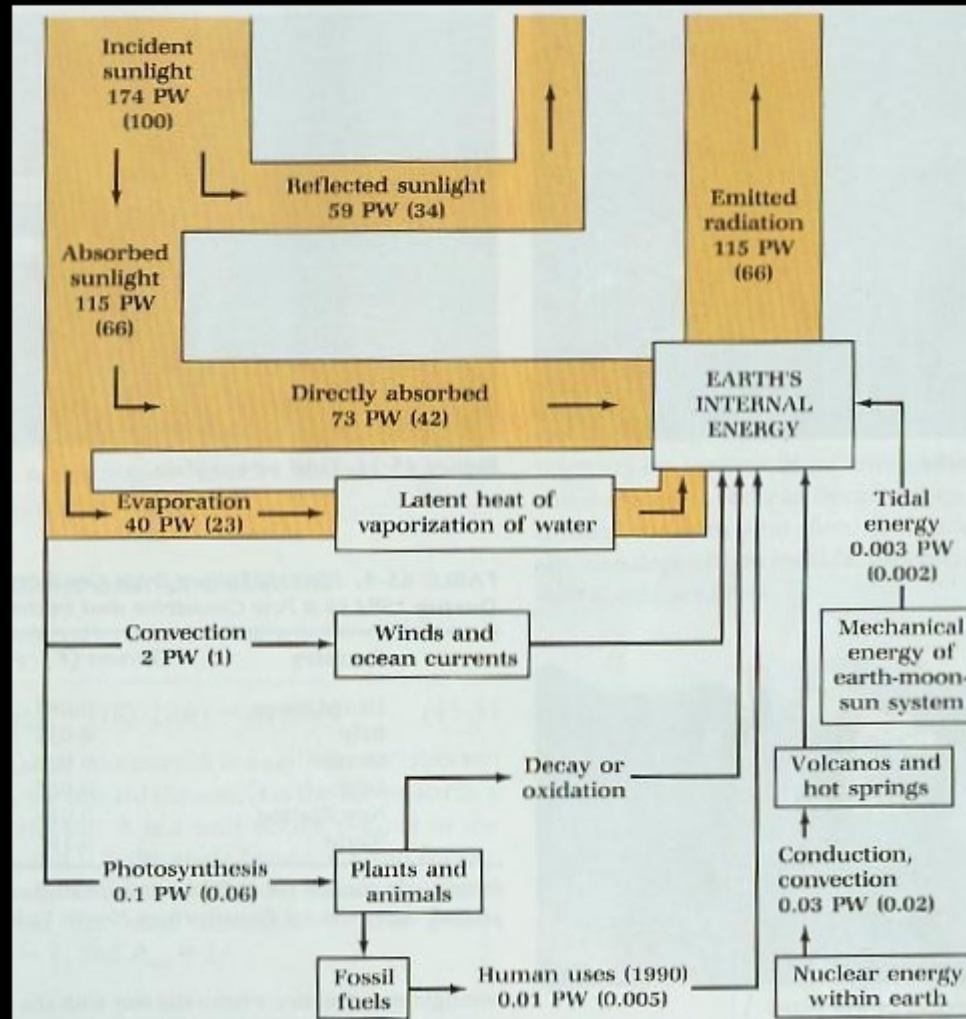


# Bilans przepływu energii dla Ziemi (2)





# Bilans przepływu energii dla Ziemi (3)



Uwaga:

użyta jednostka mocy

$$1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$$

# Źródła energii na Ziemi

| źródło                         | postać energii                | udział(%) | moc (PW) |
|--------------------------------|-------------------------------|-----------|----------|
| słońce                         | promieniowanie elektromagnet. | 99,978    | 174      |
| energia jądrowa wewnątrz Ziemi | ciepło                        | 0,02      | 0,03     |
| energia pływów morskich        | energia mechaniczna           | 0,002     | 0,003    |

$$1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$$

# Podział fizyczny docierającej do Ziemi energii słonecznej

| Proces fizyczny          | Udział (%)  | Skutki                                                |
|--------------------------|-------------|-------------------------------------------------------|
| absorpcja promieniowania | 42          | utrzymywanie średniej temp. Ziemi i atmosfery         |
| odbicie                  | 34          | energia utracona                                      |
| parowanie wody           | 23          | deszcze                                               |
| konwekcja                | $\approx 1$ | wiatry i prądy morskie                                |
| fotosynteza              | 0,06        | źródło życia roślin, zwierząt i ludzi, paliwa kopalne |

# Obliczanie mocy promieniowania słonecznego na Ziemi

$I_{ss} = ?$  średnia moc prom. słonecznego na granicy atmosfery

↖ stała słoneczna

Zał.: śr.moc wypromieniowana  $P = 3,845 \cdot 10^{26} \text{ W}$ , źródło kuliste

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

natężenie w odległości  $r$  od Słońca, średnia odległość Z.-S.

wynosi

$$\bar{r} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$$

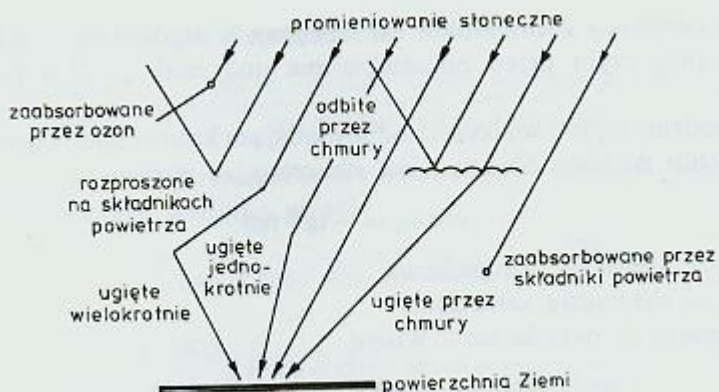
Zatem

$$I_{ss} = \frac{P}{4\pi (\bar{r})^2} = \frac{3,845 \cdot 10^{26}}{4\pi (1,496 \cdot 10^{11})^2} = 1,367 \text{ kW/m}^2$$

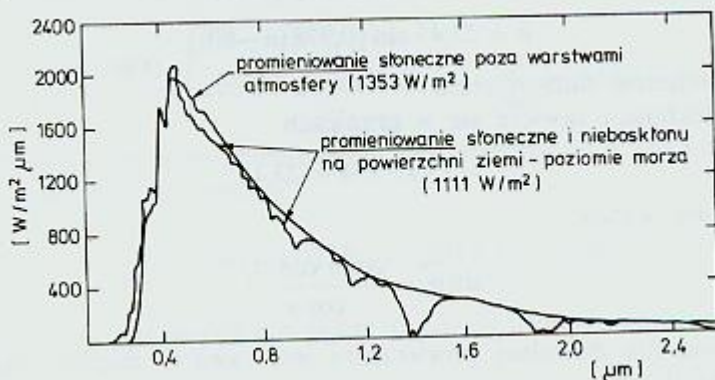
$$P_{pps} = I_{ss} (\pi R_z^2) = (1,367 \text{ kW/m}^2) [\pi (6,37 \cdot 10^6 \text{ m})^2] = 174 \cdot 10^{15} \text{ W} = 174 \text{ PW}$$

↖ moc promieniowania słonecznego padającego na górną warstwę atmosfery

# Oddziaływanie promieniowania słonecznego z atmosferą i widmo promieniowania



Rys. III.40. Oddziaływanie atmosfery na promieniowanie słoneczne [73]



$$\Delta I = I_{ss} - I_{pz} = (1353 - 1111) \frac{W}{m^2} = 242m \frac{W}{m^2}$$

# Uwagi o bilansie energii w układzie Ziemia-kosmos

## Warunek równowagi energetycznej

(moc pr. padającego-pr.odbite) = moc pr.emitowanego z powierzchni Ziemi

$$(P_{pps} - P_{po}) = P_{pe} = e \sigma A T^4 \quad \left( \begin{array}{l} \text{prawo} \\ \text{Stefana - Boltzmann} \end{array} \right)$$

$e$  = emisyjność ( $0 \leq e \leq 1$ )

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$  (stała St. - Boltz.)

$A$  = powierzchnia ciała emitującego promieniowanie

$T$  = temp. ciała

Obliczamy  $P_{pe}$

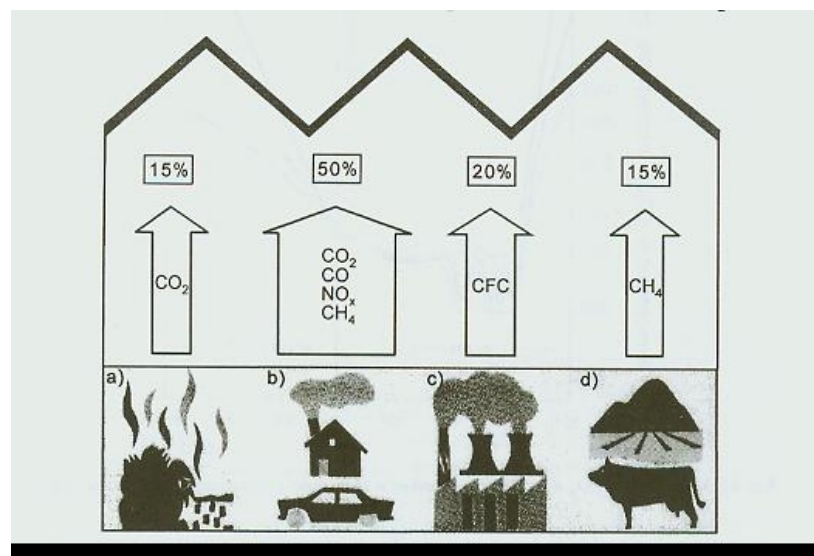
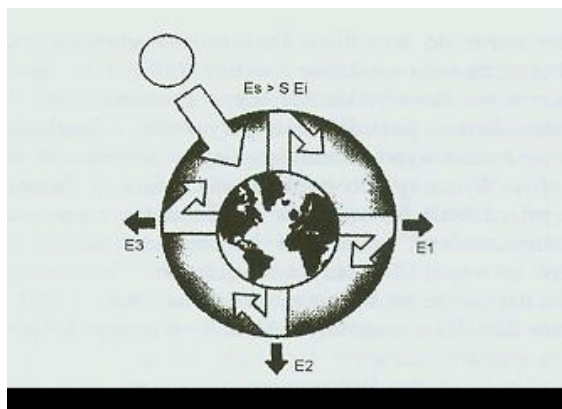
Zakł. :  $e = 0,5$  ;  $T = 300 \text{ K}$

$$r = R_Z = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$$

$$P_{pe} = 0,5 \times 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4 \times 4\pi \times (6,37 \times 10^6)^2 \times (300)^4 \text{ K}^4 \approx$$

$$\approx 120 \cdot 10^{15} \text{ W} = 120 \text{ PW}$$

# Niebezpieczeństwo zachwiania równowagi energetycznej





# Źródło energii słonecznej

## 1. Stan fizyczny Słońca

stan skupienia materii - gaz

masa -  $1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$  (około 330 000 mas Ziemi)

gęstość centrum - do  $10^5 \text{ kg/m}^3$

gęstość na krańcach fotosfery -  $(10^{-4} \div 10^{-6}) \text{ kg/m}^3$

promień -  $696\,000 \text{ km}$

efektywna temperatura fotosfery -  $5785^\circ \text{K}$

temperatura centrum -  $\approx 1,4 \times 10^7 \text{ K}$

ciśnienie w centrum -  $(3 \div 5) \times 10^9 \text{ atm}$

skład materii:

obecność ok. 70 pierwiastków (76% H, 23% He, 1% poz.)

średnia odległość od Ziemi -  $1,496 \times 10^8 \text{ km}$



# Źródło energii słonecznej (2)

# Źródło energii słonecznej (4)

4. Jaka jest średnia termiczna energia kinetyczna  $\langle K \rangle$  protonów w centrum Słońca ?

$$\langle K \rangle = \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} \times 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \times 1,4 \times 10^7 \text{ K} \approx 3 \cdot 10^{-16} \text{ J} \approx 2 \text{ KeV} = 2 \times 10^{-3} \text{ MeV}$$

Wniosek I: Średnia energia kinetyczna protonów jest około 300 razy mniejsza od wartości  $U_0$ .

5. Jak duża jest liczba protonów posiadających energię większą od  $U_0$  ?

$$\int_{U_0}^{\infty} \frac{f(E) dE}{N} = 2 \left( \frac{U_0}{\pi kT} \right)^{1/2} \cdot e^{-\frac{U_0}{kT}} \approx 10^{-216}$$

ułamki protonów o energii  $E > U_0$

# Źródło energii słonecznej (4)

4. Jaka jest średnia termiczna energia kinetyczna  $\langle K \rangle$  protonów w centrum Słońca ?

$$\langle K \rangle = \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} \times 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \times 1,4 \times 10^7 \text{ K} \approx 3 \cdot 10^{-16} \text{ J} \approx 2 \text{ KeV} = 2 \times 10^{-3} \text{ MeV}$$

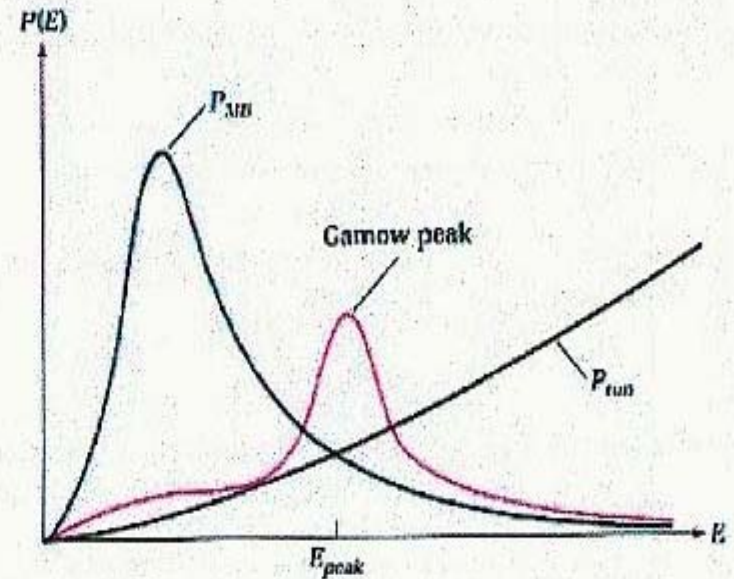
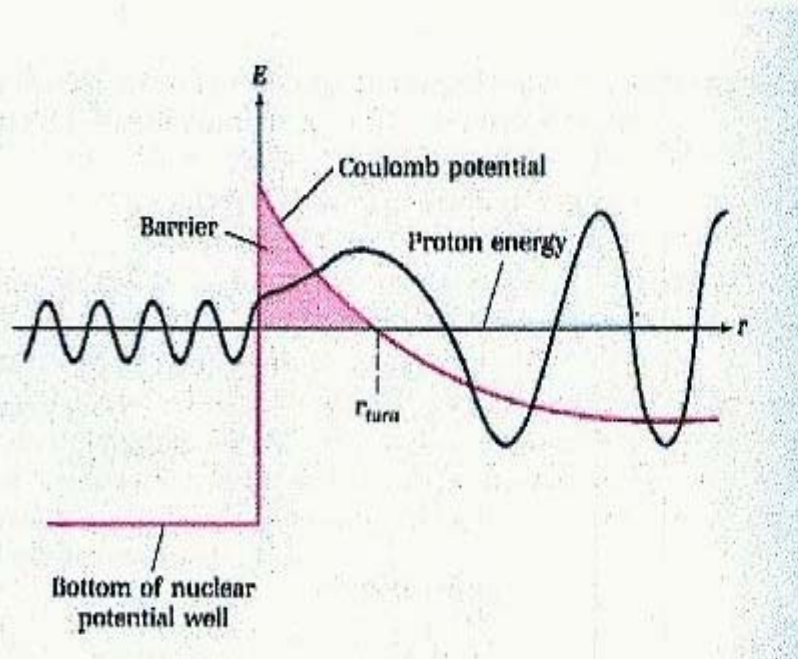
Wniosek I: Średnia energia kinetyczna protonów jest około 300 razy mniejsza od wartości  $U_0$ .

5. Jak duża jest liczba protonów posiadających energię większą od  $U_0$  ?

$$\int_{U_0}^{\infty} \frac{f(E) dE}{N} = 2 \left( \frac{U_0}{\pi kT} \right)^{1/2} \cdot e^{-\frac{U_0}{kT}} \approx 10^{-216}$$

ułamek protonów o energii  $E > U_0$

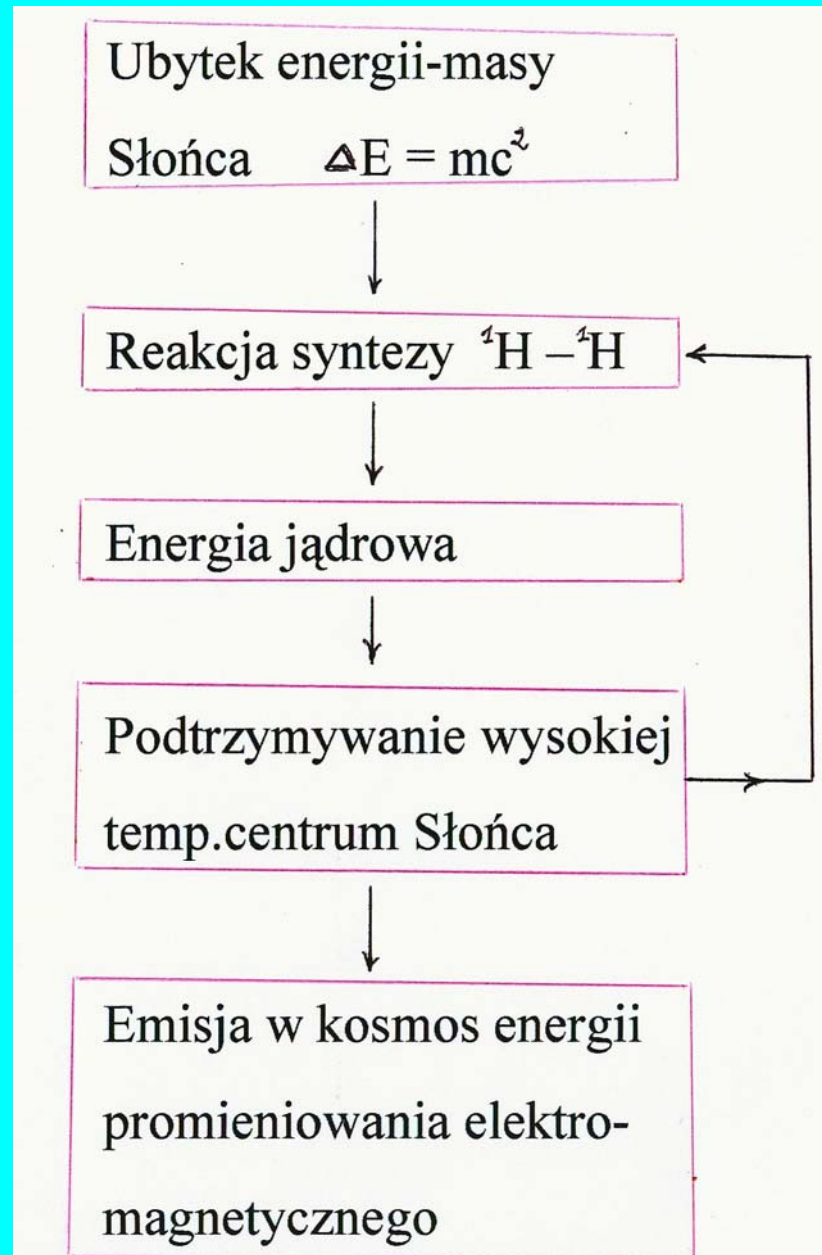
# Źródło energii słonecznej (5)



(prawdopodob., że proton posiada e.  $E$ )  $\times$  (prawdopodob. tunelowania przy e.  $E$ ) =  
 = ( prawdopodobieństwo zajścia reakcji syntezy H – H przy energii  $E$  )

$$P_{M-B} \times P_{tun.} \propto \exp \left[ - \left( \frac{E}{kT} + \frac{e^2}{\pi \epsilon_0 \hbar} \sqrt{\frac{2m_p}{E}} \right) \right]$$

# Konwersja energii w centrum Słońca





# Transport energii wewnątrz Słońca

Uwagi o transporcie energii z wnętrza Słońca do jego warstwy zewnętrz.

generacja fotonów w centrum      rozpraszanie i pochłanianie      ponowne  
wypromieniowanie (akty wielokrotne)

$$\text{JASNOŚĆ} \equiv L_s \approx \frac{\text{całkowita energia fotonów}}{\text{czas opuszczenia przez strumień energii powierzchni Słońca}} = \frac{E_s}{\tau}$$

$\tau \equiv$  uśredniony czas dyfuzji fotonów wew. Słońca

GĘSTOŚĆ ENERGII  $\equiv u(T)$

$$u(T) = \frac{4\sigma}{c} T^4 \left[ \frac{\text{W K}^4 \text{s}}{\text{m}^2 \text{K}^4 \text{m}} = \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \right] \longrightarrow E_s = \int_0^{R_s} u(T) 4\pi r^2 dr$$

Zakładamy, że temp. wew. Słońca  
zmienia się liniowo:  $T = T_{\text{centrum}} \left(1 - \frac{r}{R_s}\right)$

energia promieniowania (fotonów) zawarta  
w powłoce sferycznej o promieniu  $r$  i grub.  $dr$

Wówczas

$$E_s = \int_0^{R_s} \frac{4\sigma}{c} T_c^4 \left(1 - \frac{r}{R_s}\right)^4 4\pi r^2 dr = 1,54 \times 10^{39} \text{ J}$$

(przyjeto  $T_c = 45 \times 10^7 \text{ K}$ )

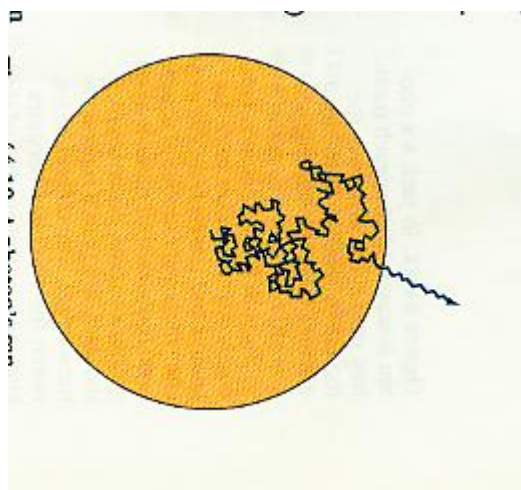
# Transport energii wewnątrz Słońca (c.d.)

Zatem

$$\tau \approx \frac{E_\gamma}{L_\odot} = \frac{1,54 \times 10^{39} \text{ J}}{4 \times 10^{26} \text{ J/s}} \approx 3,85 \times 10^{12} \text{ s} \approx 120\,000 \text{ lat}$$

Porównanie :

- (a) gdyby Słońce było całkowicie przezroczyste, to czas potrzebny na przebiecie przez foton drogi od centrum do powierzchni wynosiłby 2s
- (b) w rzeczywistości czas ten wynosi ponad  $10^5$  lat



# Uwagi o gwiazdach jako źródła energii w kosmosie (1)

## 1. Jak powstają gwiazdy ( np. takie jak Słońce ) ?

### FORMA

obłok materii międzygwiazdnej



grawitacyjne kurczenie się



powstanie protogwiazdy



powstanie gwiazdy



gwiazda w stanie równowagi

### ODDZIAŁYWANIE

grawitacyjne

grawitacja i wzrost ciś.wew.

wzrost temp. rdzenia

kosztem energii grawitacji

dalszy wzrost temp. i początek syntezy jądrowej

równowaga graw. i ciś.wew.



# Uwagi o gwiazdach ....(2)

## 2. Co dzieje się z energią podczas powstawania gwiazdy ?

Dlaczego podczas kurczenia się obłoku materii międzygwiazdnej rośnie temperatura wnętrza ?

$$E_k = \frac{3}{2} k T \longrightarrow T \uparrow \longrightarrow E_k \uparrow \quad (\text{dlaczego ?})$$

↑ energia kinetyczna cząstek pyłu gwiazdnego

## Teoria wirialna

**Założenie :** Cząstki pyłu gwiazdnego wirują wokół kurczącego się obłoku.

**Analogia :** Podobnie jak w atomie wodoru (wg . Bohra) siła kulombowska

$F_c \sim \frac{1}{r^2}$  jest odpowiedzialna za wirowanie elektronu wokół jądra , tak siła grawitacji  $F_{grav.} \sim \frac{1}{r^2}$  jest odpowiedzialna za wirowanie cz. pyłu gwiazdnego wokół kurczącego się obłoku.

# Uwagi o gwiazdach ....(3)

|                      | Atom wodoru                                                       | Wirująca cz.pyłu gw.                              |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| e. kinetyczna $E_K$  | $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{r}$  | $\Gamma m M \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{r}$  |
| e. potencjalna $E_P$ | $-\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r}$                   | $-\Gamma m M \cdot \frac{1}{r}$                   |
| e. całkowita $E_C$   | $-\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{r}$ | $-\Gamma m M \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{r}$ |

## Wnioski :

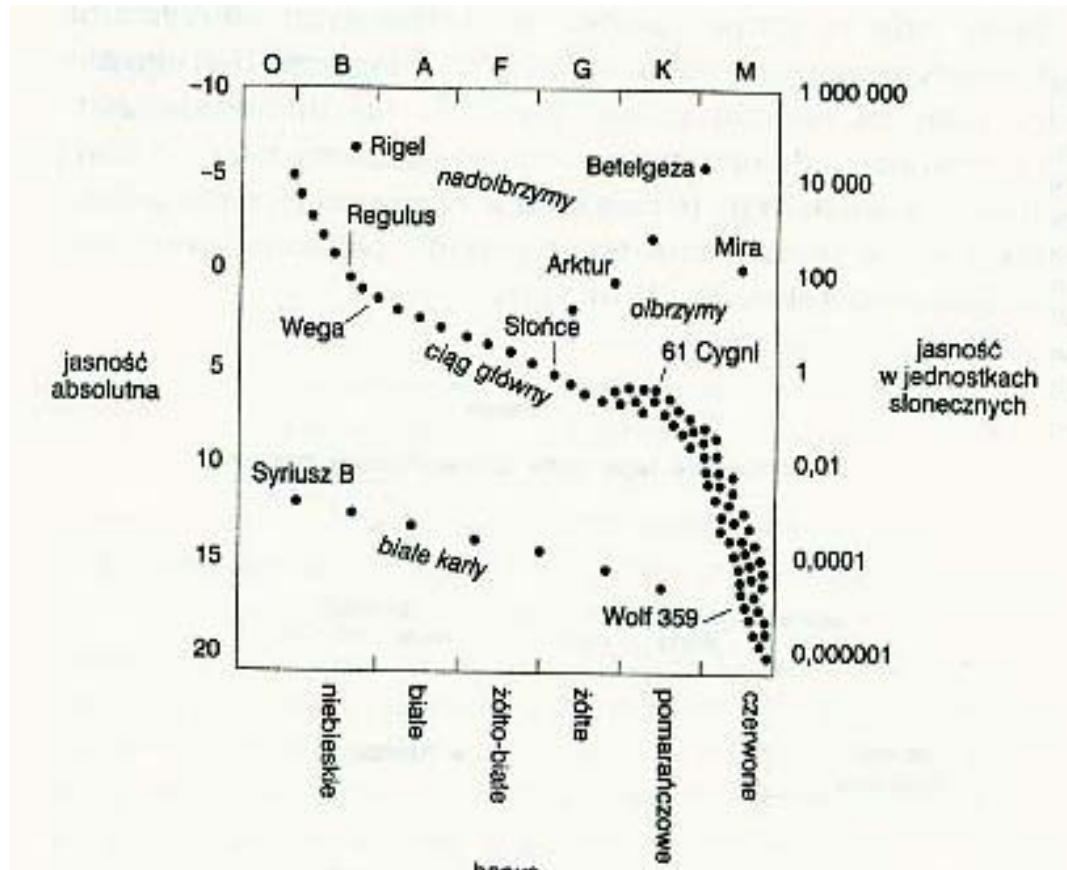
$$E_K = -\frac{1}{2} E_P \text{ oraz } E_C = -E_K = \frac{1}{2} E_P \longrightarrow \Delta E_C = \ominus \Delta E_K = \frac{1}{2} \Delta E_P$$

1. Gdy  $\Delta E_C \downarrow$  to  $\Delta E_K \uparrow$  oraz  $\Delta E_P \downarrow$
2. Jeżeli obłok się kurczy, energia  $E_P$  maleje. Połowa spadku wartości tej energii idzie na wzrost energii kinetycznej  $E_K$  (pozostała połowa zostaje wypromieniowana - zależność Maxwella-Botzmanna)
3. Ponieważ  $E_K(\text{obłoku}) = \frac{3}{2} N_K \langle T \rangle$  (gdzie N – całkowita liczba wirujących cząstek), w miarę kurczenia się obłoku rośnie jego temperatura

# Uwagi o gwiazdach...(4)

## 3. Ewolucja gwiazd ( na przykładzie Słońca )

### a) diagram Hertzsprunga – Russella ( H-R )



| Typ widmowy | Masa na ciągu głównym<br>(Słońce = 1) |
|-------------|---------------------------------------|
| O           | 16–100                                |
| B           | 2,5–16                                |
| A           | 1,6–2,5                               |
| F           | 1,1–1,6                               |
| G           | 0,9–1,1                               |
| K           | 0,6–0,9                               |
| M           | 0,08–0,6                              |

# Uwagi o gwiazdach....(5)

## b) jasność, barwa i czas życia gwiazd

**JASNOŚĆ**  $L \sim L_{\odot}^4 M^3$

**CZAS ŻYCIA**  $t_z \sim \frac{M}{L} \sim \frac{M}{L_{\odot}^4 M^3} = \frac{1}{L_{\odot}^4 M^2}$

**BARWA** gwiazdy określa temperaturę jej powierzchni

Wniosek :

Gwiazdy o dużej masie żyją krócej (szybsza synteza  $4\text{H} \rightarrow \text{He}$ )

## c) prawdopodobna ewolucja Słońca ( czas życia $\approx 10$ miliardów lat )

1. Zakończenie cyklu „spalania”  $4\text{H}$  w rdzeniu Słońca
2. Powstanie rdzenia helowego
3. Rozpoczęcie „spalania” wodoru w cienkiej otoczce wokół rdzenia
4. Początek rozszerzania się Słońca i wzrostu jego jasności. Gwiazda „schodzi” z ciągu głównego i staje się podolbrzymem

# Uwagi o gwiazdach....(6)

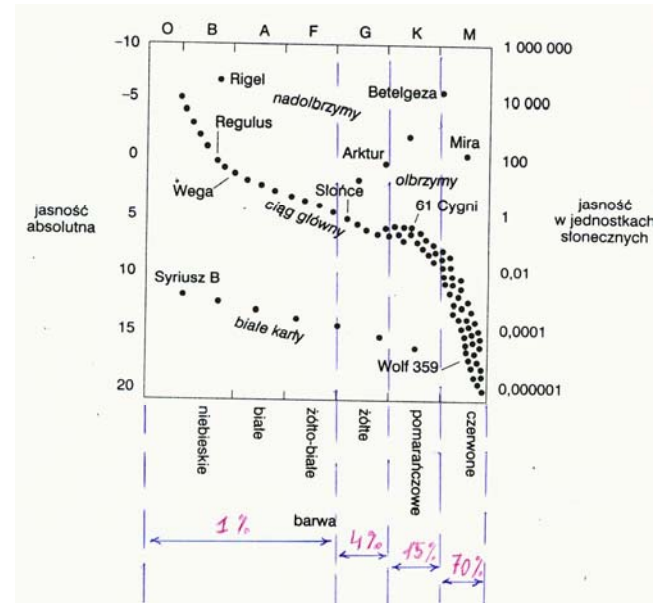
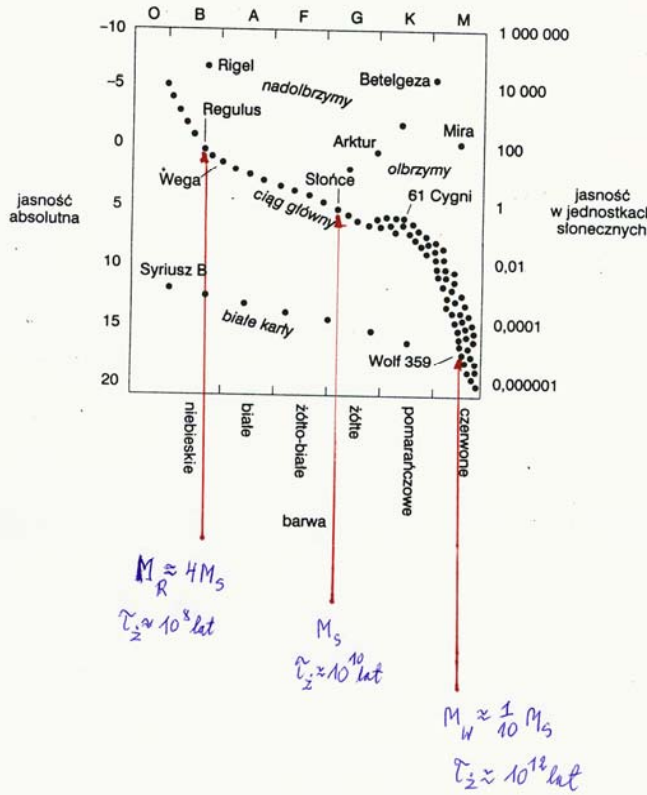
## c) prawdopodobna ewolucja Słońca (c.d.)

5. Dalsze zwiększenie rozmiarów. Stopniowe ochłodzenie i wzrost jasności
6. Słońce wchodzi w fazę czerwonego olbrzyma
7. Po „spaleniu” wodoru następuje „zapłon” helu
8. Stopniowe wypełnianie rdzenia produktami „spalania” helu : tlenem i węglem
9. Początek „spalania” helu w otoczce rdzenia. Pierwsze eksplozje.
10. Eksplozje – rozproszenie otoczki helowej i wyrzucenie dużej ilości materii w przestrzeń
11. Obnażenie małego, niezwykle gorącego jądra węglowo-tlenowego.  
Silne promieniowanie niebieskie i ultrafioletowe
12. Świecenie odrzuconej na zewnątrz materii (mgławicy planetarnej)
13. Powolne stygnięcie. Biały karzeł. Stopniowa zmiana barwy ku czerwieni



# Różnorodność gwiazd (1)

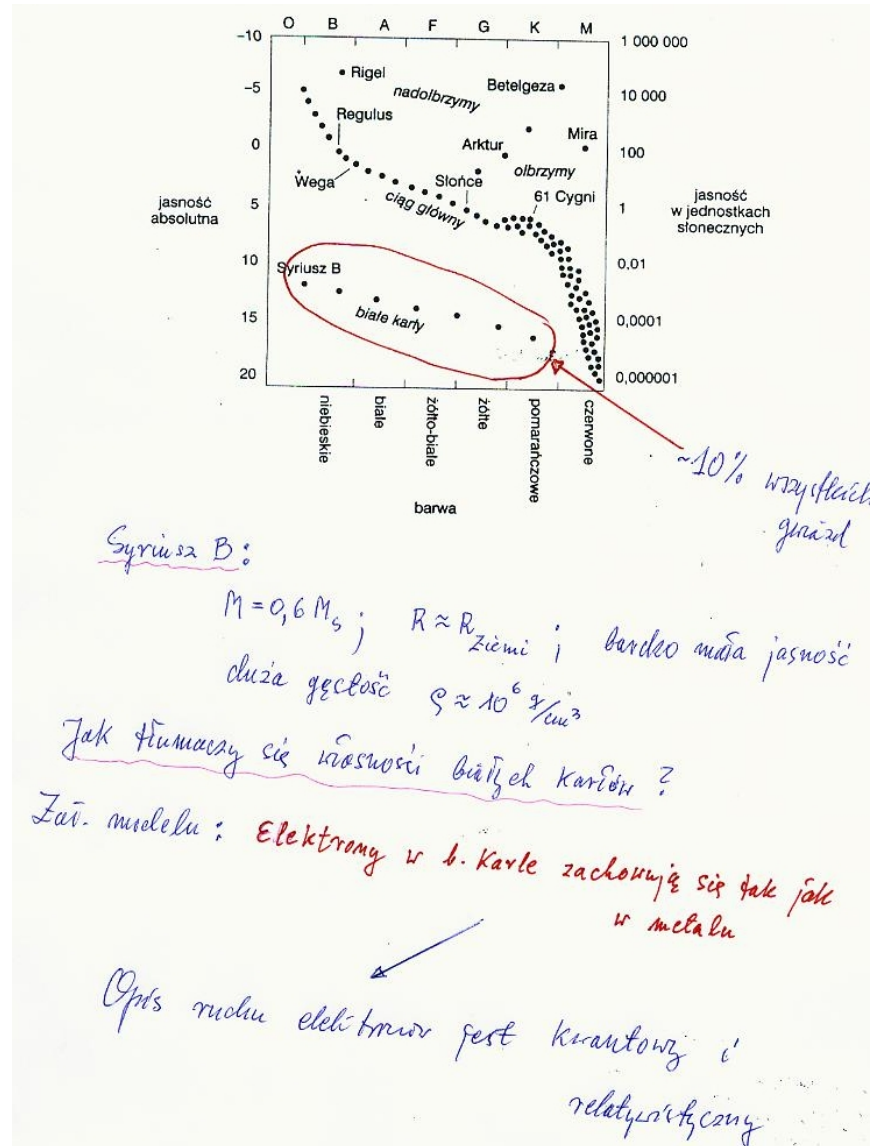
## a) Osobliwości gwiazd ciągu głównego



Zasady obowiązujące gwiazdy na ciągu głównym:  
Im większa masa gwiazdy tym:  
(1) jaśniejsza, (2) gorętsza, (3) bardziej wewnętrzna,  
(4) krócej żyje, (5) rzadziej występuje.

# Różnorodność gwiazd (2)

## a) Białe karły





# Różnorodność gwiazd (2a)

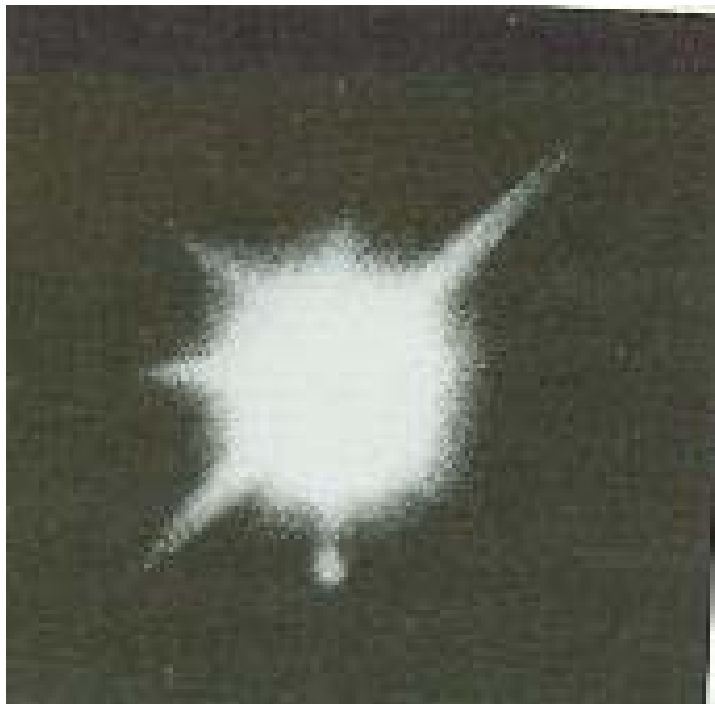
## i) Opis kwantowy (nierelatywistyczny) :

1. Elektrony są swobodne ( $T \approx 27000 \text{ K}$ )  $\rightarrow$  przy uzyskaniu dużej gęstości zaczyna odgrywać rolę zasada Heisenberg  $\rightarrow \Delta p_x \cdot \Delta x \approx \frac{\hbar}{2} \rightarrow \uparrow \Delta x$  oznacza  $\uparrow \Delta p_x$ , jednocześnie  $p_x \geq \Delta p_x \rightarrow \uparrow \Delta p_x \equiv \uparrow p_x \rightarrow E_{ke} = \frac{p_x^2}{2m} \uparrow$
2. wzrost  $E_{ke}$  przeciwdziała dalszemu zgniataniu elektronów (pochodzącemu od grawitacji)
3.  $E_{ke} = \int_0^{E_F} g(E) E dE = B \frac{M^{5/3}}{R^2}$  gdzie  $R \equiv$  promień białego karła
4.  $E_{całk.} = E_{ke} + E_{grav.} = \left( B \frac{M^{5/3}}{R^2} \right) - \left( D \frac{M^2}{R} \right)$
5. Z k-k  $\frac{\partial E_{całk.}}{\partial R} = 0 \rightarrow \frac{\partial E_{całk.}}{\partial R} = -2B \frac{M^{5/3}}{R^3} + D \frac{M^2}{R^2} = 0 \rightarrow R = 5750 \left( \frac{M_s}{M} \right)^{1/3} [\text{km}]$
6. Dla Syriusza B  $\rightarrow M = 1,05 M_s$  otrzymujemy  $R_{\text{Syriusza}} = 5660 \text{ km}$
7. Niezależny pomiar daje  $R_{\text{Syriusza}} = 6000 \text{ km}$

## ii) Relatywistyczny opis kwantowy :

$\rightarrow M_{\text{max}} \approx 1,4 M_s$   
maksymalna masa białego karła

# Różnorodność gwiazd (2b)



# Różnorodność gwiazd (3)

## c) Gwiazdy neutronowe i czarne dziury

Jako białe karły umierają gwiazdy o początkowej masie  $8M > M > 0,08M$

Jaki jest los gwiazd cięższych, o masach  $M > 8 M$  ?

Schemat prawdopodobnych zachowań :

1. „wypalenie” wodoru w centrum  $\rightarrow$  centrum wypełnione heliem  $\rightarrow$  początek grav. zapadania,
2. zapadanie gwiazdy  $\rightarrow$  wzrost temp. wew. (zgodnie z teorią wirialną),
3. przy temp. powyżej  $10^8 K$  „zapłon” helu (reakcje fuzji  $3^4He$  w  $^{12}C$ ),
4. po „wypaleniu” helu następują kolejno zapłony cięższych pierwiastków (aż do Si),
5. procesy kolejnych fuzji ulegają zakończeniu po utworzeniu jądra Fe (Fe ma największą energię wiązania na nukleon),
6. brak dalszych reakcji fuzji  $\rightarrow$  brak źródła podtrzymywania wpr. temp.  $\rightarrow$  brak źródła wysokiego ciśnienia przeciwdziałającego gravitacji  $\rightarrow$  szybkie kurczenie się jądra,
7. eksplozja  $\rightarrow$  powstanie gwiazdy supernowej (o jasności ok. miliarda Słońc),
8. jądro po wybuchu zapada się  $\rightarrow$  powstaje kula o gęstości większej niż gęstość białego karła  $\rightarrow$  gwiazda neutronowa lub czarna dziura.

# Różnorodność gwiazd (4)

## Gwiazdy neutronowe (c.d.)

Skąd biorą się neutrony w rdzeniu gwiazdy neutronowej ?

i) czy zostaje naruszony zakaz Pauliego ?

ii) czy możliwy jest rozpad protonu

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu \text{ (neutrino)} \rightarrow m_p < m_n + m_{e^+}$$

$$\text{(ale } n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \text{ (antyneutrino)} \rightarrow m_n > m_p + m_{e^-} \text{)}$$

iii) odwrotny rozpad  $\beta^-$

$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$$

Niektóre własności fizyczne gwiazd neutronowych

$$\rho \approx 10^{18} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{(gęstość jądra atomu } \approx 3 \cdot 10^{17} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})$$

pryśp. grawitacyjne

$$g_n \approx 10^{11} g_{ziemi}$$

# Różnorodność gwiazd (5)

## d) Pulsary





# Energia mechaniczna (1)

## 1. Podstawy fizyczne

e.k. ruchu postępowego  $\rightarrow E_{ktr.} = \frac{mv^2}{2}$   
e.k. ruchu obrotowego  $\rightarrow E_{kobr.} = \frac{I\omega^2}{2}$

energia mechaniczna = e. kinetyczna + e. potencjalna

e.p. grawitacji  $\rightarrow E_{pgr.} = mgy$  lub  $E_{pgr.} = -G \frac{M_2 m}{r}$   
e.p. sprężystości  $\rightarrow E_{pspr.} = \frac{1}{2} kx^2$  gdzie  $k > 0$

Dla sił zachowawczych (f. grawitacji oraz f. sprężystości):

$$F(y) = - \frac{dE_{pgr.}}{dy} \rightarrow \vec{F} = - \text{grad } E_{pgr.}$$

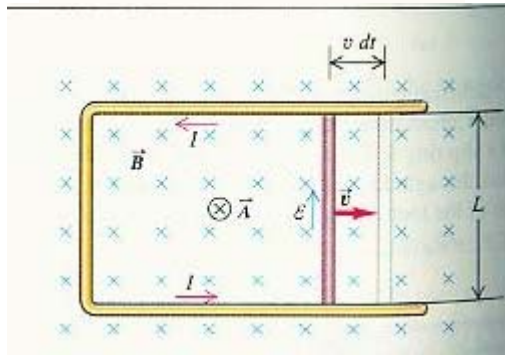
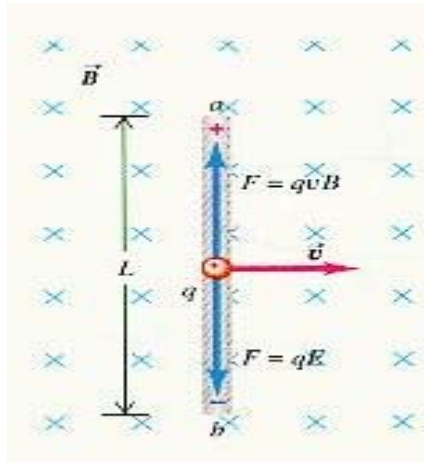
$$F(x) = - \frac{dE_{pspr.}}{dx} \rightarrow \vec{F} = - \text{grad } E_{pspr.}$$



# Energia mechaniczna (2)

## 2. Mechanizmy konwersji energii mechanicznej

### I. Konwersja energii mechanicznej na elektryczną (z wykorzystaniem zjawiska indukcji elektromagnetycznej)



$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} \rightarrow F = qvB$$

$$qE = qvB \rightarrow E = vB - \text{warunek równowagi}$$

$$V_{ab} = V_a - V_b = EL = -\mathcal{E} = vBL$$

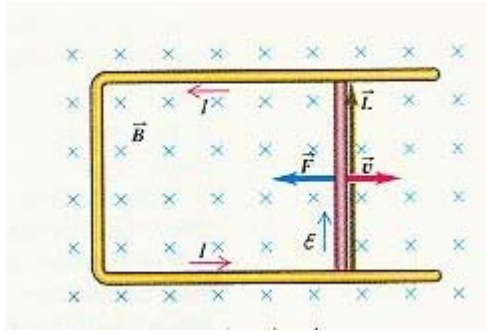
$$d\Phi_B = B dA = BLv dt$$

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt} = -BLv$$

prawo Faradaya

# Energia mechaniczna (3)

Konwersja .... (c.d.)



i) moc wydzielona w obwodzie

$$P_1 = I\mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}}{R} \mathcal{E} = \frac{B^2 L^2 v^2}{R}$$

ii) moc zużyta na jednostajny ruch przewodnika o długości  $L$

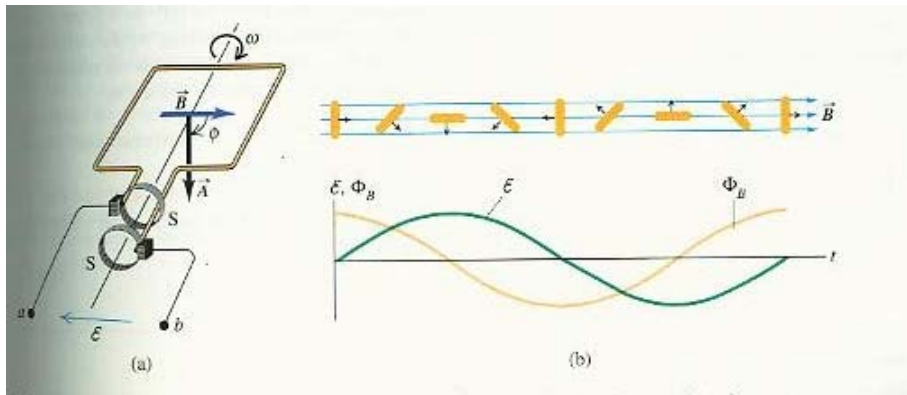
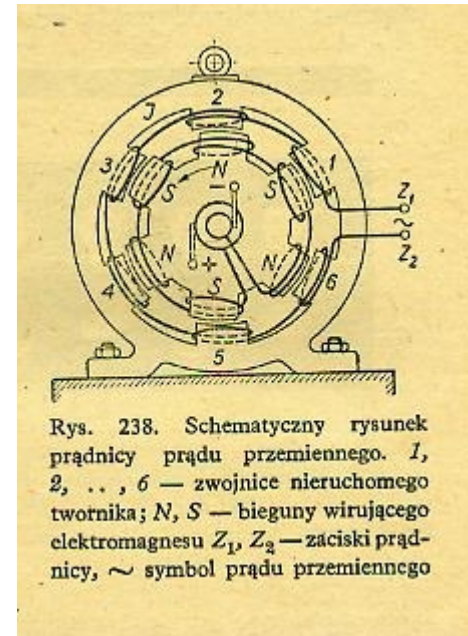
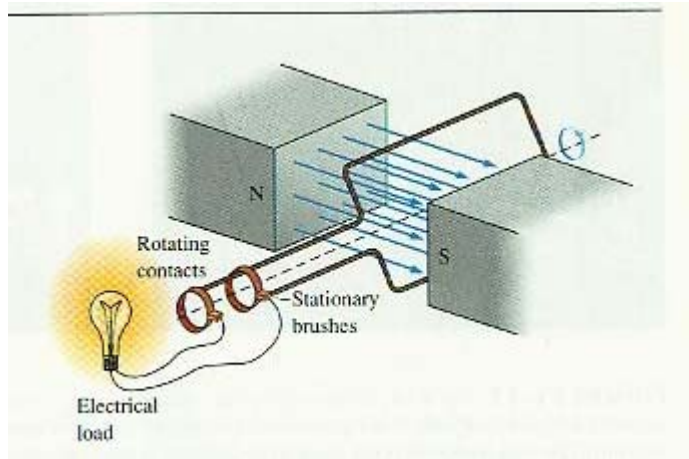
$$P_2 = -\vec{F}_{\text{magnet.}} \cdot \vec{v} = Fv = ILBv = \frac{\mathcal{E}}{R} BLv = \frac{B^2 L^2 v^2}{R}$$

Wniosek:

$P_1 = P_2 \rightarrow$  generator sam niczego nie wytwarza, jego rola ogranicza się do zamiany energii mechanicznej na energię elektryczną.

# Energia mechaniczna (4)

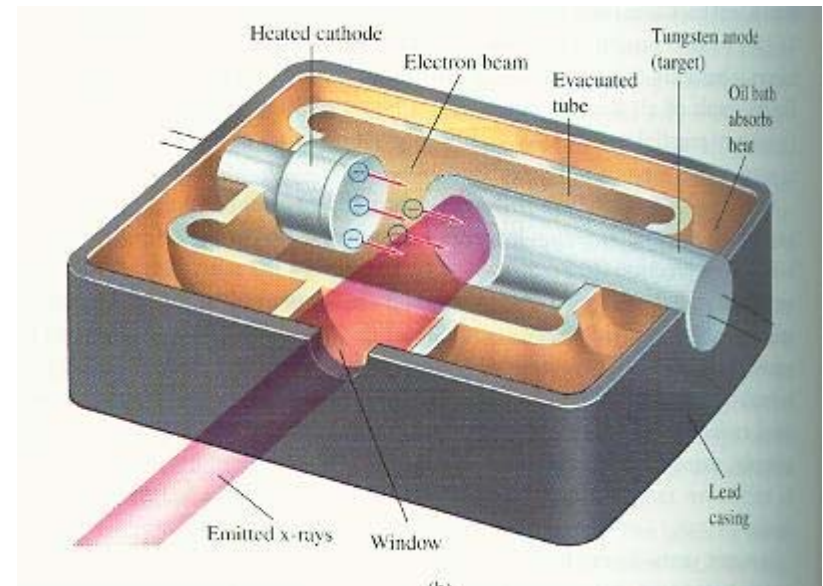
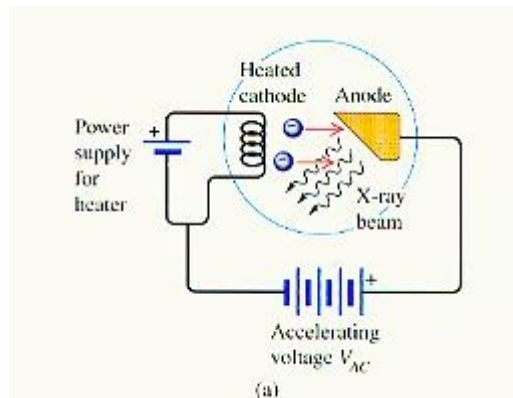
## 3. Model generatora



# Energia mechaniczna (5)

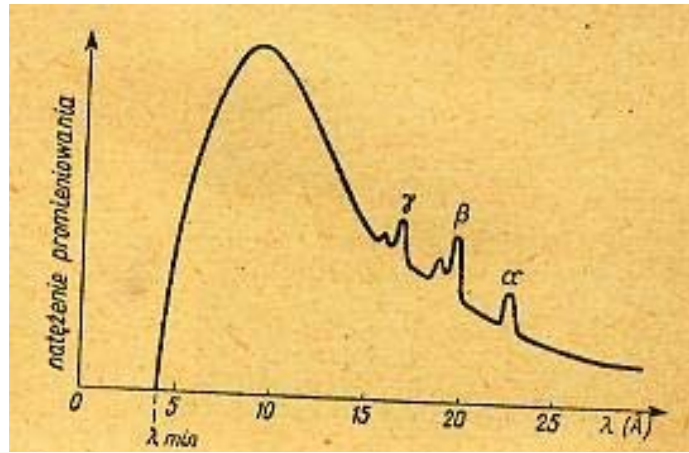
## II. Konwersja energii kinetycznej elektronu na energię fotonu

### 1. Powstawanie promieni X



# Energia mechaniczna (6)

## 2. Widmo promieniowania rentgenowskiego



Kwantowy charakter promieniowania :

$E_{\text{kin. el.}} = h \nu_{\text{max}} \rightarrow$  energia kinetyczna ~~kinetyczna~~ elektronu  
zamienia się na jeden kwant promienio-  
wania rentgenowskiego ( $h\nu$ )

$$E_K = eU = h \nu_{\text{max}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{min}}}$$

# Energia mechaniczna (7)

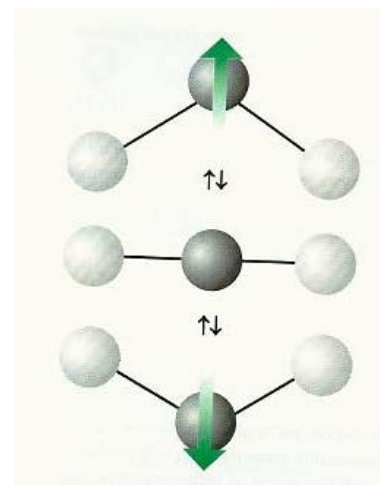
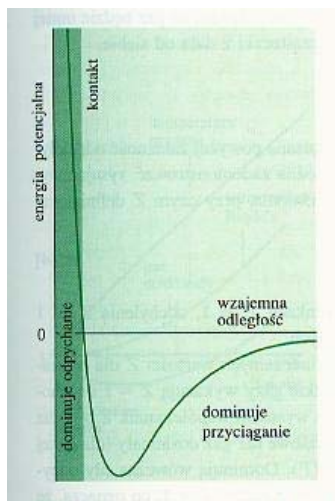
III. Konwersja energii mechanicznej na energię wewnętrzną (zjawisko tarcia)



# Konwersja energii chemicznej na ciepło – proces spalania (1)

## 1. Skąd bierze się energia chemiczna ?

### i) energia potencjalna drobiny ( e. wiązania chemicznego )



Przeciętne wartości energii wiązań (kcal/mol)<sup>a</sup>

TABLICA 2-1

| Wiązanie | Energia wiązania <sup>b</sup> | Wiązanie | Energia wiązania <sup>b</sup> | Wiązanie | Energia wiązania <sup>b</sup> |
|----------|-------------------------------|----------|-------------------------------|----------|-------------------------------|
| H—H      | 103,2                         | N—H      | 84 <sup>d</sup>               | C—Br     | 65 <sup>c</sup>               |
| C—C      | 80                            | O—H      | 109,4                         | C—I      | 57 <sup>c</sup>               |
| N—N      | 37                            | H—F      | 141                           | C—N      | 62 <sup>d</sup>               |
| O—O      | 34                            | H—Cl     | 102,1                         | C=N      | 121 <sup>d</sup>              |
| F—F      | 37                            | H—Br     | 86,7                          | C≡N      | 191 <sup>d</sup>              |
| Cl—Cl    | 57,1                          | H—I      | 70,6                          | C—O      | 81 <sup>d</sup>               |
| Br—Br    | 45,4                          | H—S      | 81 <sup>d</sup>               | C=O      | 178                           |
| I—I      | 35,6                          | C—F      | 102 <sup>d</sup>              | C=C      | 142 <sup>d</sup>              |
| C—H      | 98,2                          | C—Cl     | 78                            | C≡C      | 186 <sup>d</sup>              |

<sup>a</sup> Jeśli nie podano inaczej, podane wartości pochodzą z książki Fergusona L. N.: *Electron Structures of Organic Molecules*. Prentice-Hall, New York 1952, str. 28.

<sup>b</sup> Wartości energii wszystkich wiązań są ujemne.

<sup>c</sup> Dewar M.J.S.: *The Electronic Theory of Organic Chemistry*. Clarendon Press, Oxford, England 1949, str. 32.

<sup>d</sup> Gould E.S.: *Mechanism and Structure in Organic Chemistry*. Henry Holt & Co. New York 1959, str. 37.

# Konwersja energii chemicznej na ciepło (2)

## ii) energia reakcji chemicznej

Przykład: spalanie wodoru w atmosferze chloru



$$E_{\text{H}}(\text{H}_2) = -103,2 \text{ kcal/mol} ; E_{\text{H}}(\text{Cl}_2) = -57,1 \text{ kcal/mol} ; E_{\text{H}}(\text{HCl}) = -102,1 \text{ kcal/mol}$$

$$E_{\text{H}}(\text{prod.}) - E_{\text{H}}(\text{subst.}) = [(-204,2) - (-103,2 - 57,1)] \text{ kcal/mol} = -43,9 \text{ kcal/mol}$$

## 2. Definicja procesu spalania

Szybko zachodząca reakcja chemiczna, której towarzyszy wydzielenie ciepła: egzotermiczna reakcja łączenia się paliwa z utleniaczem.

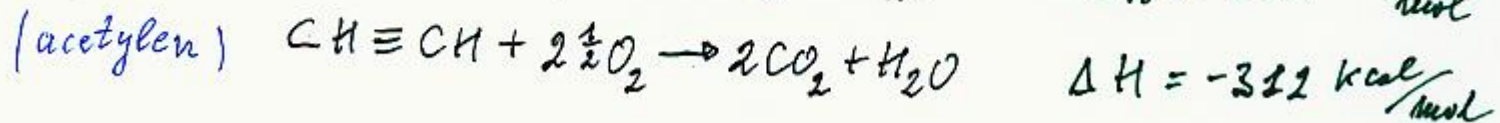
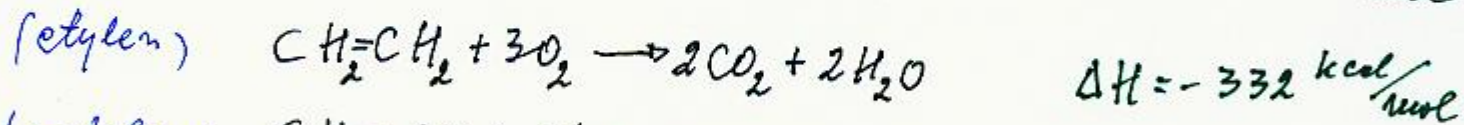
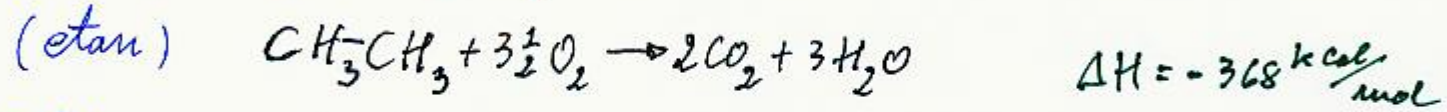
**Paliwa:** węgiel, wodór i ich związki (np. benzyna)

**Utleniacze:** tlen, chlor, fluor i ich związki

**Produkty spalania:** tlenki węgla, azotu, siarki

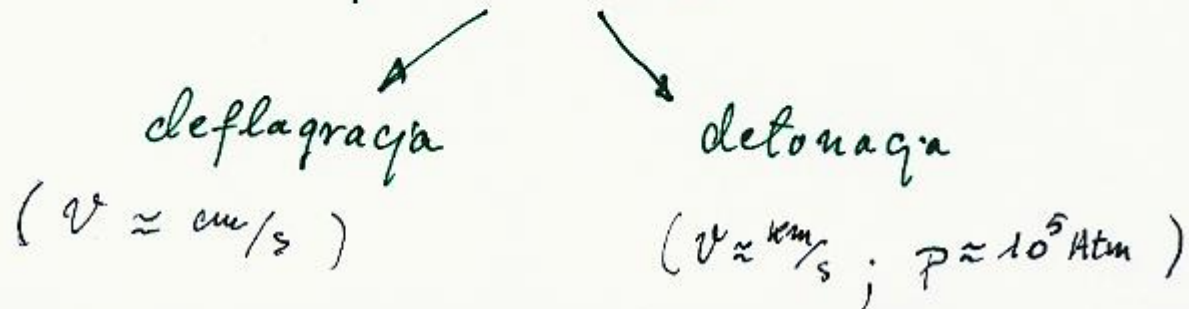
# Konwersja energii chemicznej na ciepło (3)

## 3. Przykłady reakcji spalania



## 4. Cechy charakterystyczne zjawiska spalania

i) zdolność do rozprzeczniczenia się



# Konwersja energii chemicznej na ciepło (4)

- (i) istnienie warunków kinetycznych (ciś., temp. początkowa, skład mieszaniny i.t.p.),
- (ii) konieczność aktywacji zapalnika

## 5. Termodynamika spalania

$$T_m = T_0 + \frac{Q_2}{C}$$

↑  
teoretycz. temp. spalania

← wartości operacyjne  
← średnie ciepło właściwe produktów spalania  $\langle T_0, T_m \rangle$

↑  
temp. początkowa

Przykłady wartości operacyjnych:

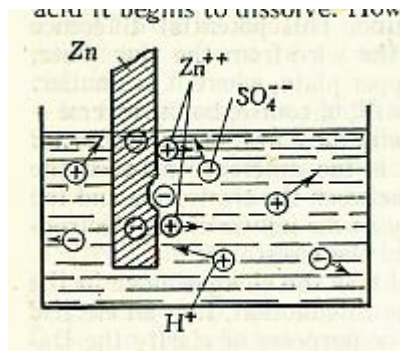
|                 |       |       |
|-----------------|-------|-------|
| gaz ziemny      | 35-63 | MJ/kg |
| ropa naftowa    | 40-46 | MJ/kg |
| węgiel kamienny | 14-34 | MJ/kg |

---

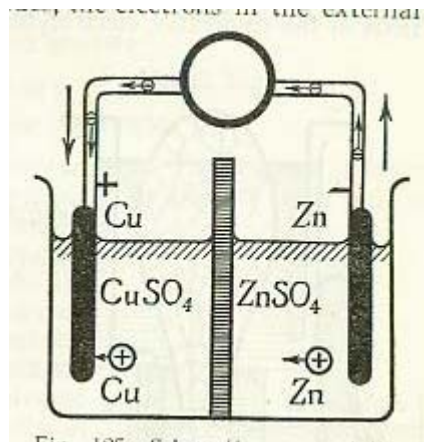
(paliwo jądrowe)  $\sim 9 \cdot 10^{13}$  J/kg

# Konwersja energii chemicznej na energię elektryczną (1)

## 1. Powstawanie SEM między elektrolitem a metalem (elektrodą)



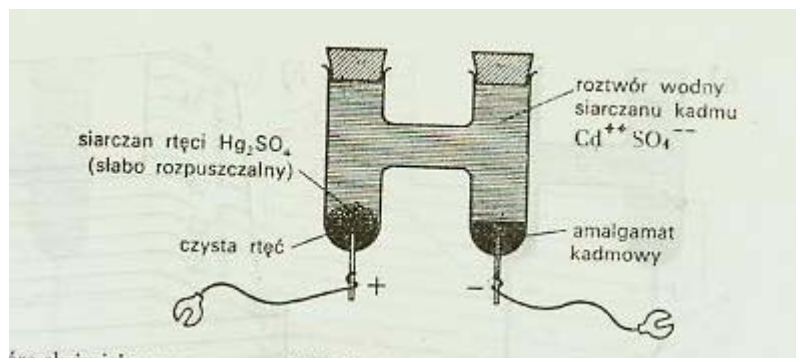
## 2. Schemat ogniwa



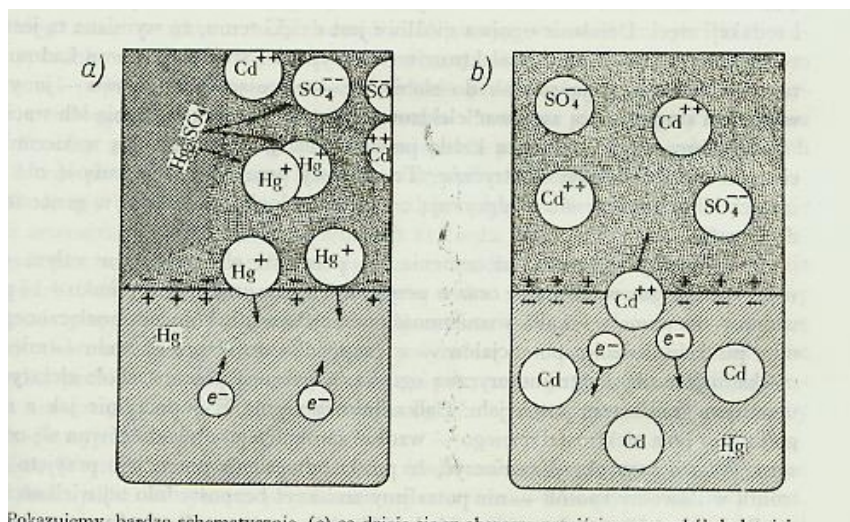


# Konwersja energii chemicznej na elektr. (2)

## 3. Ogniwo Westona



## 4. Reakcje w ogniwie Westona

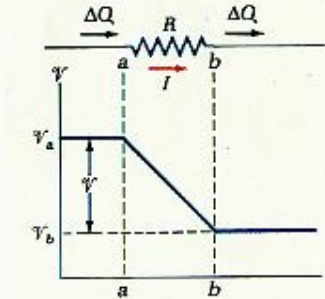




# Energia elektryczna (1)

## 1. Konwersja energii elektrycznej na ciepło

### A. Energia rozproszona w oporze elektrycznym (ciepło Joule'a – Lenza)



$$V = V_a - V_b \rightarrow \text{spadek potencjału na oporniku } R$$

$$\Delta U = V_b \Delta Q - V_a \Delta Q = -(V_a - V_b) \Delta Q = -V \Delta Q$$

↓ zmiana elektrycznej energii potencjalnej nośników ładunku

$$P_R = -\frac{\Delta U}{\Delta t} = -\frac{-V \Delta Q}{\Delta t} = V \frac{\Delta Q}{\Delta t} \rightarrow \text{moc wydzielona na oporniku}$$

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \rightarrow P_R = VI \quad \left[ \frac{\text{energia}}{\text{ładunek}} \cdot \frac{\text{ładunek}}{\text{czas}} = \frac{\text{energia}}{\text{czas}} \right]$$

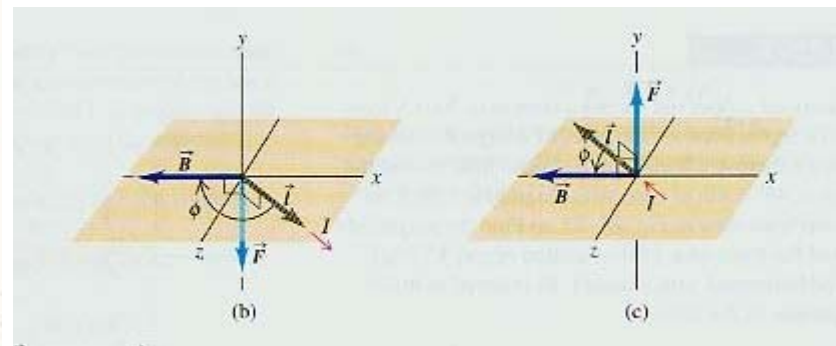
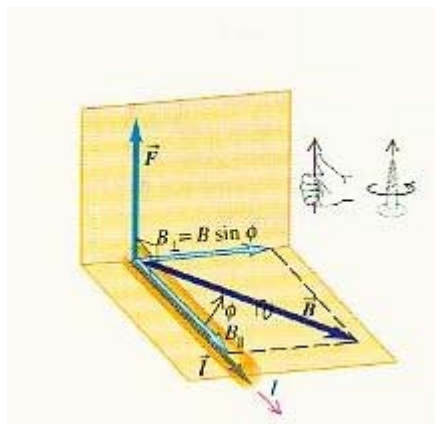
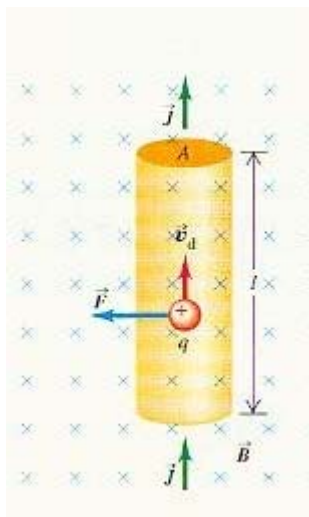
wykorzystując prawo Ohma  $\rightarrow P_R = I^2 R$  lub  $P_R = \frac{V^2}{R}$

ciepło J.-L.

Jaki jest molekularny mechanizm powstania ciepła J.-L.?

# Energia elektryczna (3)

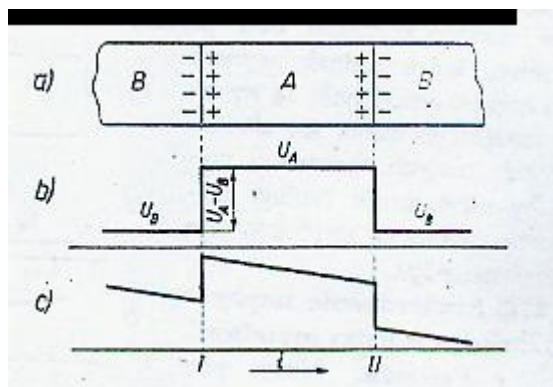
## 2. Konwersja energii elektrycznej na mechaniczną (silnik pr. stałego)



- (1)  $\vec{F} = q \vec{v}_d \times \vec{B} \rightarrow$  siła magnetycz. działająca na  $q$
- (2)  $F_L = N_c (q \vec{v}_d \times \vec{B}) \rightarrow$  wypadkowa siła działająca na element przewodnika prostoliniowego o dł.  $l$  i przekroju  $s$   
 $\uparrow$  całkowita  
 $\downarrow$  l. i przekrój
- (3)  $F_L = (n l s) q \vec{v}_d \times \vec{B} = (n q v_d s) \vec{l} \times \vec{B}$  /bo  $\vec{l} \parallel \vec{v}_d$ /
- (4)  $F_L = (j \cdot s) \vec{l} \times \vec{B} = I \vec{l} \times \vec{B} \rightarrow$  dla  $\vec{l} \perp \vec{B}$  mamy  $F_L = B I l$   
 gdy przew. nie jest prostoliniowy (i  $\vec{B} = \text{const}$ )  
 $d\vec{F}_L = I d\vec{l} \times \vec{B}$

# Energia elektryczna (2)

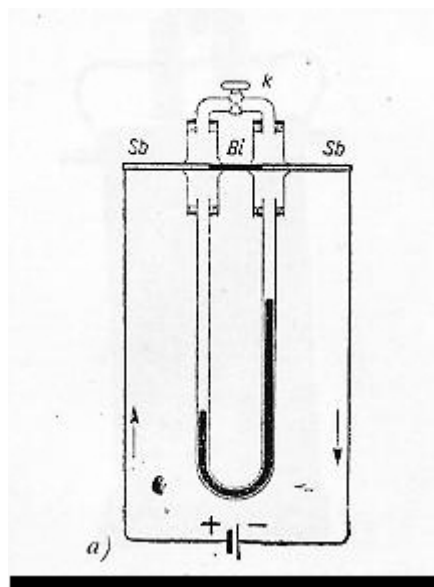
## B. Zjawisko Peltiera (termoelektryczne chłodzenie i grzanie)



$$Q_p = (\alpha_1 - \alpha_2) I T t$$

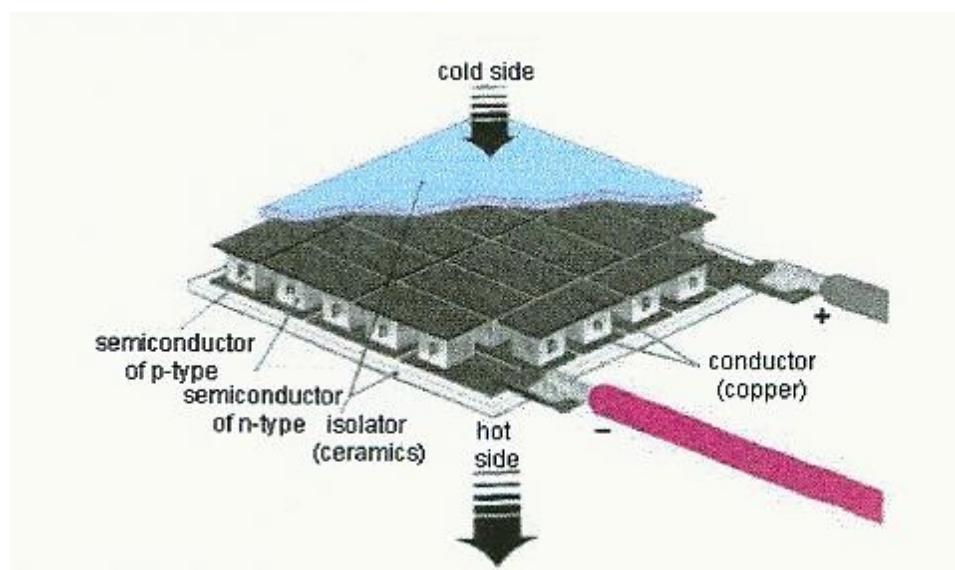
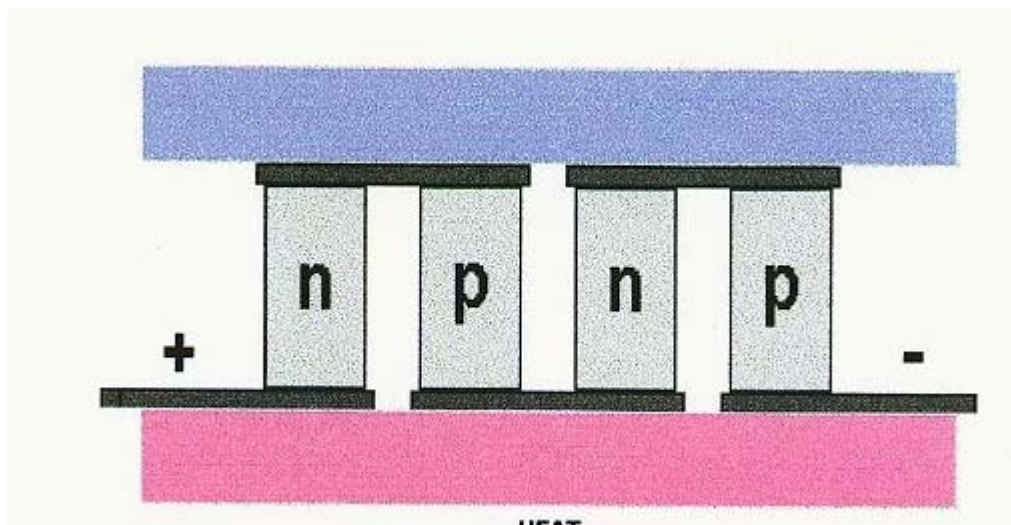
ciepło Peltiera wydzielane na złączu  
(niezależnie od ciepła Joule'a)

$(\alpha_1 - \alpha_2) \equiv$  różnica współczynników  
sił termoelektrycznych



| Nazwa metalu<br>lub stopu | ST<br>w $\mu\text{V/deg}$ | Nazwa metalu<br>lub stopu | ST<br>w $\mu\text{V/deg}$ |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| <b>Metale</b>             |                           | <b>Rtęć</b>               | - 4,4                     |
| Antymon                   | +43                       | Platyna                   | - 4,4                     |
| Żelazo                    | +15                       | Sód                       | - 6,5                     |
| Molibden                  | +7,6                      | Pallad                    | - 8,9                     |
| Kadm                      | +4,6                      | Potas                     | -13,8                     |
| Wolfram                   | +3,6                      | Nikiel                    | -20,8                     |
| Miedź                     | +3,2                      | Bismut                    | -68,0                     |
| Cynk                      | +3,1                      | <b>Stopy</b>              |                           |
| Złoto                     | +2,9                      |                           |                           |
| Srebro                    | +2,7                      |                           |                           |
| Ołów                      | 0,0                       |                           |                           |
| Cyna                      | -0,2                      |                           |                           |
| Magnez                    | -0,2                      |                           |                           |
| Glin                      | -0,4                      |                           |                           |
|                           |                           |                           |                           |
|                           |                           | Chromel                   | +24                       |
|                           |                           | Nichrom                   | +18                       |
|                           |                           | Platynorod                | + 2                       |
|                           |                           | Alumel                    | -17,3                     |
|                           |                           | Konstantan                | -38                       |
|                           |                           | Kopel                     | -38                       |

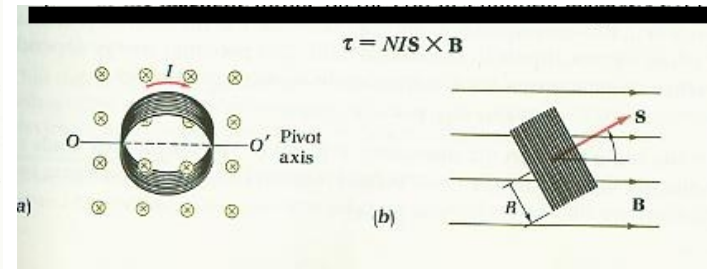
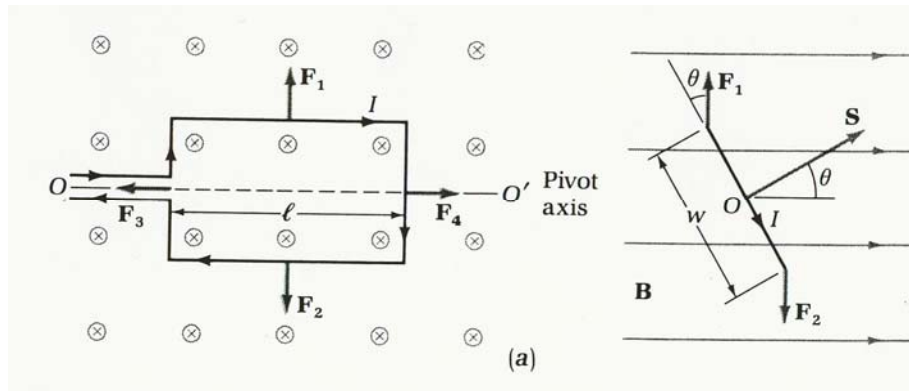
# Energia elektryczna (2a)





# Energia elektryczna (4)

## Moment sił magnetycznych



Obł. moment sił magnetycznych (2)

$$\tau_1 = \frac{1}{2} w \cdot \sin \theta = \frac{1}{2} w B I l \sin \theta$$

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = w B I l \sin \theta = I S B \sin \theta$$

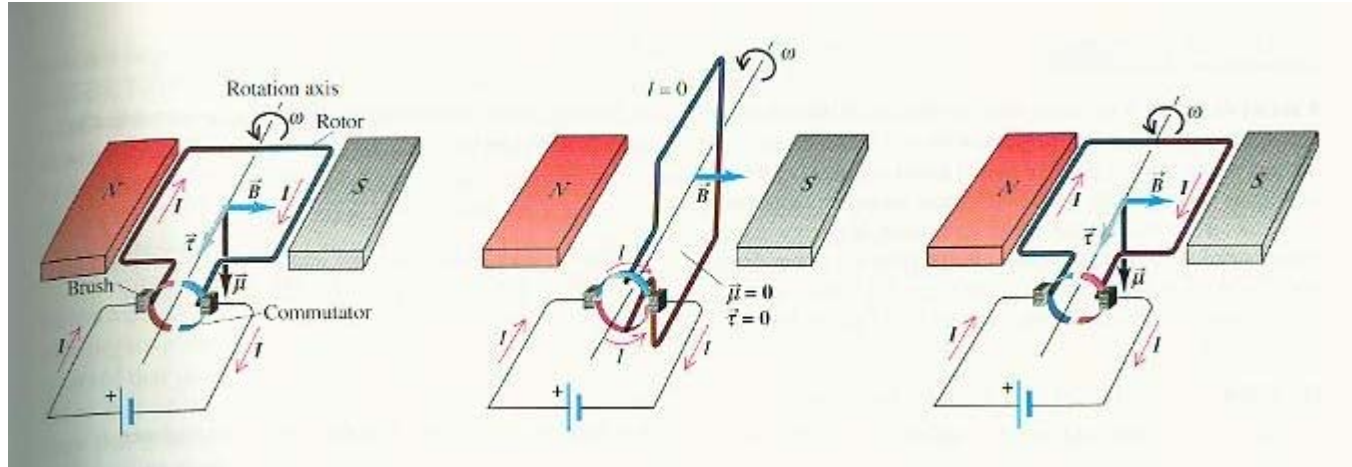
$$\vec{\tau} = I \vec{S} \times \vec{B}$$

Dla ramki utworzonej z  $N$  zwojów przewodzących szeregowo

$$\vec{\tau}_N = N I \vec{S} \times \vec{B}$$

# Energia elektryczna (5)

## Konwersja energii w silniku elektrycznym



Energia elektr.  
dostarczona do  
światła

praca wykonana przez  
moment sił magn. +  
dysypacja energii  
na ciepło

energii kinet.  
ruchu obrotowego  
wirnika

Zasada zachowania energii

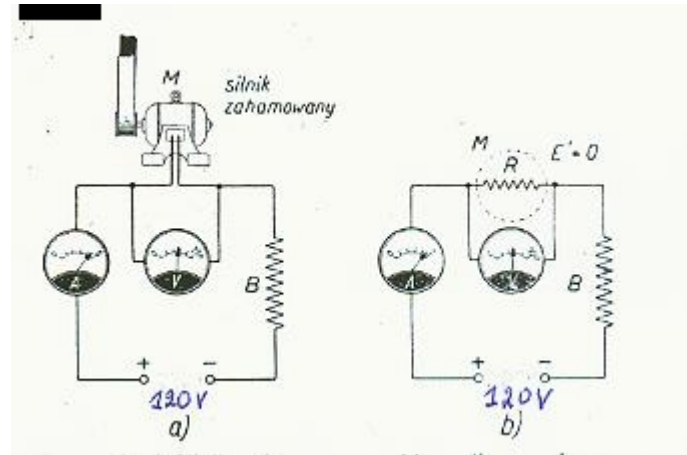
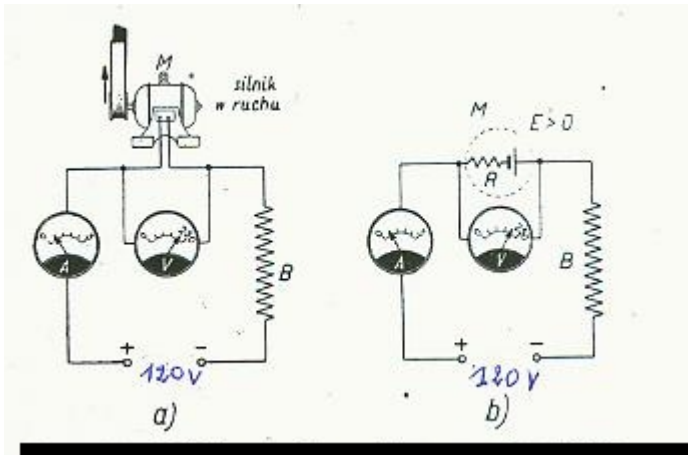
$U_i = Ri^2 + M'$  — moc spożytkowana w silniku w formie  
— moc dostarczona — moc wydzielona w silniku — praca mechaniczna  
— siłki — w postaci ciepła

$$U = \frac{M'}{i} = Ri \rightarrow U - E' = Ri$$

siła przeciwelektromotoryczna



# Energia elektryczna (6)



## Przykład obliczeniowy

Dane wyjściowe:

$R_M = 2 \Omega$  (opór wew. silnika)  
 $V = 120 \text{ V}$  (napięcie zasilania, d.c.)

$R_B = 10 \Omega$  (opór zabezpieczający)  
 $I_{d} = 4 \text{ A}$  (prąd obciążenia silnika)

Siła przeciwelektromotoryczna

Moc dostarczona

Moc rozproszona

Użyteczna moc mechaniczna

Sprawność

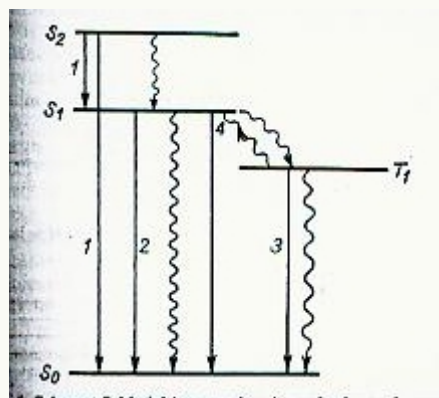
Max. prąd przeciążenia

Max. moc przeciążenia

|                               | $R_B = 0$ | $R_B = 10 \Omega$ |
|-------------------------------|-----------|-------------------|
| Siła przeciwelektromotoryczna | 112 V     | 72 V              |
| Moc dostarczona               | 480 W     | 480 W             |
| Moc rozproszona               | 32 W      | 192 W             |
| Użyteczna moc mechaniczna     | 448 W     | 288 W             |
| Sprawność                     | 93 %      | 60 %              |
| Max. prąd przeciążenia        | 60 A      | 10 A              |
| Max. moc przeciążenia         | 7200 W    | 1200 W            |

# Konwersja energii elektrycznej na światło (na przykładzie zjawiska luminescencji)

## I. Istota zjawiska luminescencji



~~~~~ przejścia bezpromienne  
——— przejścia promienne

### a) czasy życia

fluorescencja

$$\tau \approx 10^{-9} \div 10^{-7} \text{ s}$$

fosforescencja

$$\tau \approx 10^{-3} \div 10 \text{ s}$$

### b) sposoby wzbudzenia

termoluminescencja, chemiluminescencja,  
fotoluminescencja, radioluminescencja,  
elektroluminescencja

# Luminescencja (c.d.)

## II. Materiały lumineszujące (luminofory)

### 1. luminofory nieorganiczne

i. siarczki ( $ZnS$ ,  $CdS$ ,  $CaS$ , ...)

ii. wolframiy ( $CaWO_4$ ,  $MgWO_4$ ...)

iii. krzemiany ( $ZnSiO_3$ ,  $BeSiO_3$ ...)

} + aktywatory

### Zastosowanie

#### a) fotoluminofory (np. lampy luminescencyjne)

Mechanizm konwersji:

wyładowanie elektryczne w parach rtęci (świecenie par rtęci w nadfiolecie)  $\rightarrow$  wzbudzenie luminoforu ( $ZnS+Ca$ )  
 $\rightarrow$  luminescencja (promieniowanie widzialne)

#### b) katodoluminofory

Mechanizm konwersji:

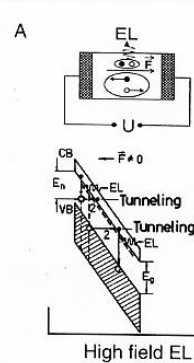
energia kinet. elektronów  $\rightarrow$  wzbudzenie luminoforu ( $ZnS-Ag$ ,  $ZnS$ ,  $CdS-Ag$ )  $\rightarrow$  luminescencja (światło widzialne)

# Elektroluminescencja (1)

## III. Elektroluminescencja (świejące diody)

### 1. Typy elektroluminescencji (EL)

a) EL wysoko-połowa



Konwersja :

wysokie pole elektr.  $\rightarrow$   
efekt Zenera  $\rightarrow$  jonizacja akceptora  $\rightarrow$  rekombinacja  
(elektron - dziura)  $\rightsquigarrow$  luminescencja

b) EL zdenieniowa

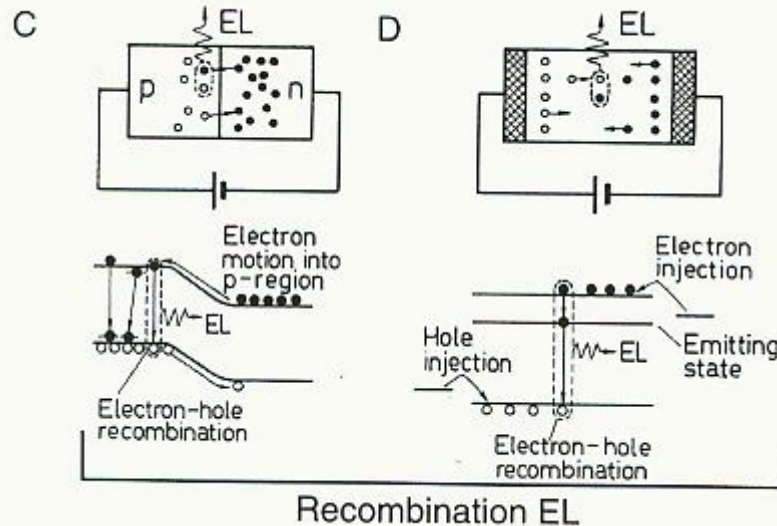
Konwersja :

wysokie pole elektr.  $\rightarrow$  rozprzelenie nośnika ład. do energii  
(2-3) eV na średniej drodze swobodnej  $\rightarrow$  wzbudzenie  
lub jonizacja molekuly  $\rightarrow$  luminescencja

(wymagania:  $v_{dnp} \approx 10^8 \text{ cm/s}$ ,  $E \approx 10^6 \text{ V/cm}$ ,  $\mu \approx 100 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$ )

# Elektroluminescencja (2)

c) EL rekombinacyjna



Konwersja :

pole elektryczne  $\rightarrow$  rekombinacja dziur i elektronów  
na złączu p-n (luminifer)  $\rightarrow$  luminescencja

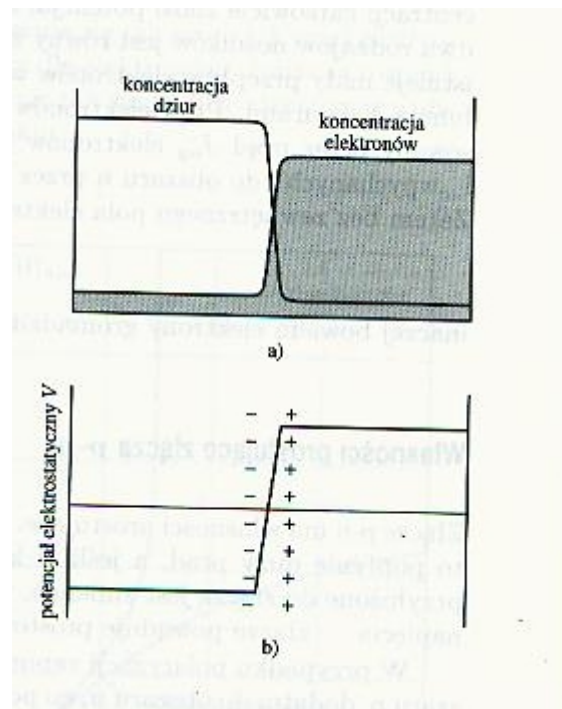
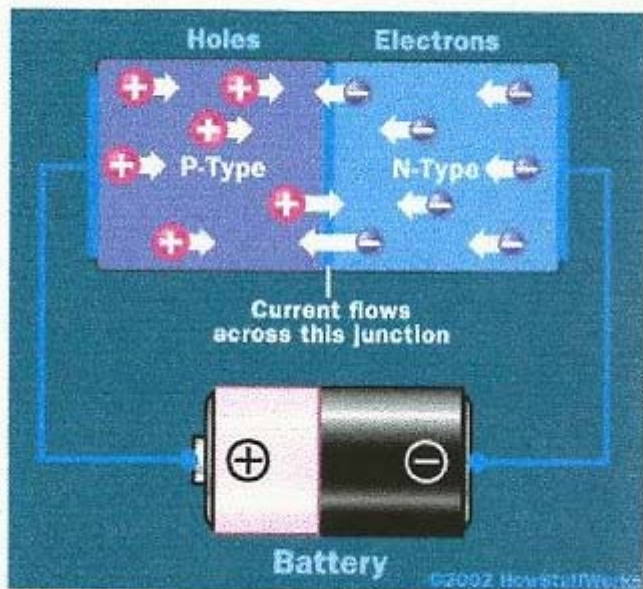
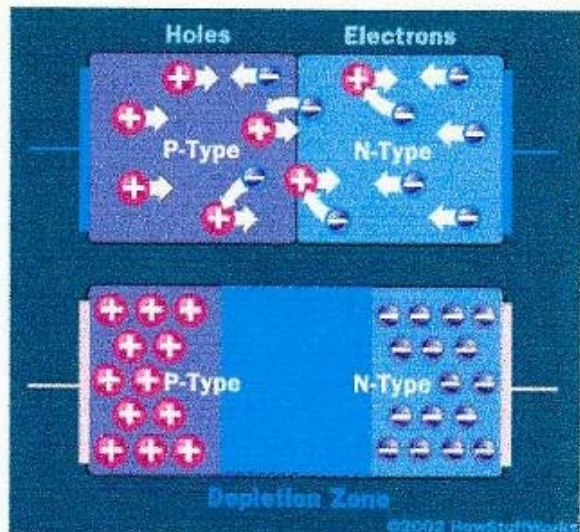
*lub*

pole elektryczne  $\rightarrow$  iniekcja dziur i elektronów  $\rightarrow$   
druż nośników  $\rightarrow$  rekombinacja w objętości  $\rightarrow$  luminescencja



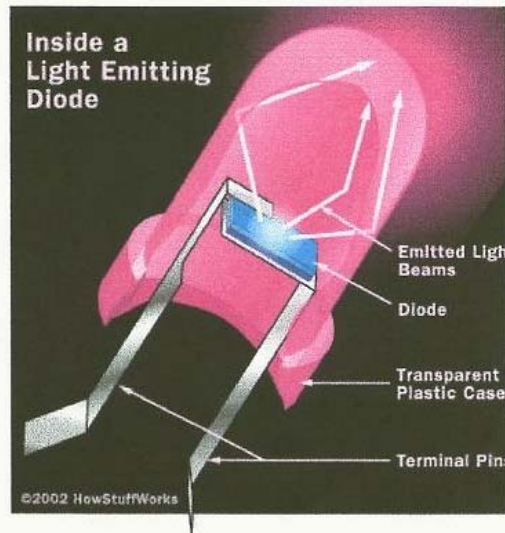
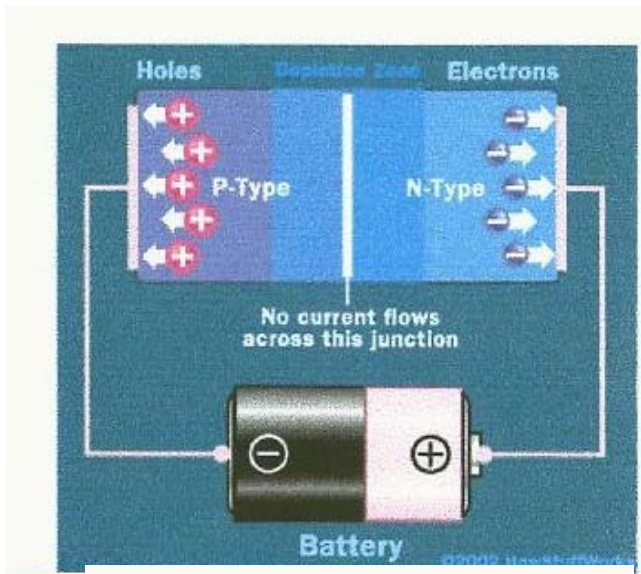
# Diody elektroluminescencyjne (1)

## Nieorganiczne diody luminescencyjne (LED)



# Diody EL (2)

LED (c.d.)



Typowy materiał półprzewodnikowy:

- 1) GaAs → arsenek galu
- 2) domieszki: pierwiastki (III) i (V) gr. układu okresowego

Wykrycie energetyczne:

GaAs do 40% (fiolet podczerwieni)

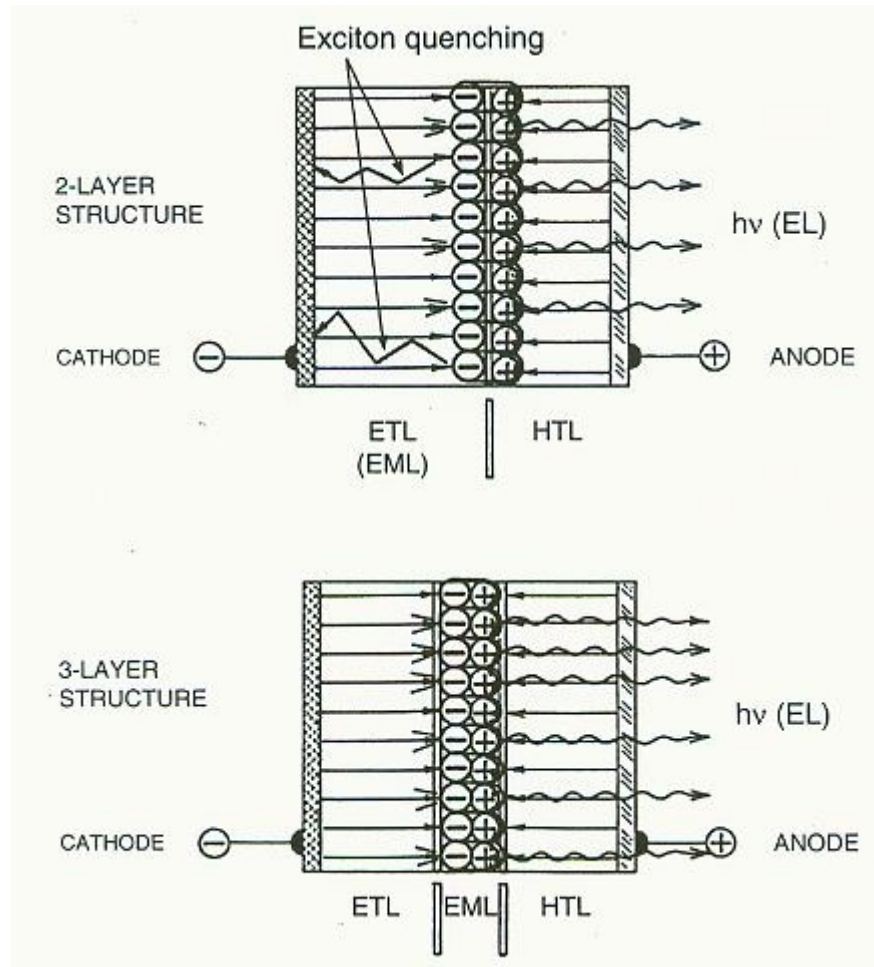
GaP do 10% (czerwień)

Położenie maksimum widma luminescencji:

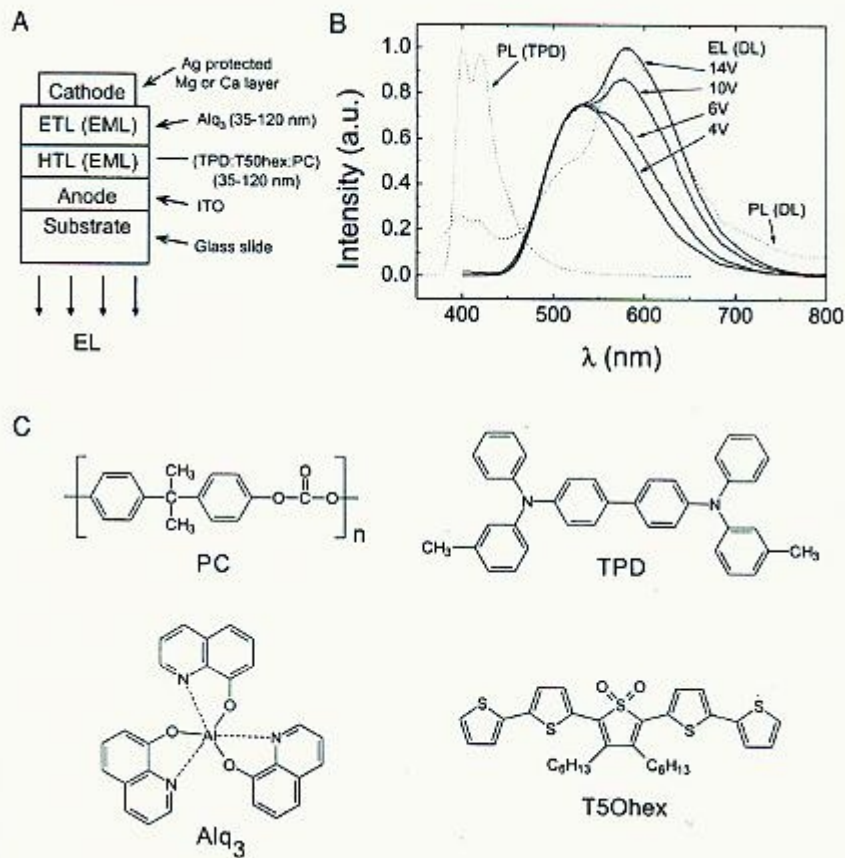
zależy od rodzaju materiału emitera i szerokości pasm energetycznych  
mieszanych pasmami (VB) i (CB)

# Organiczne diody elektroluminescencyjne (OLED)

## Diody dwu i trójwarstwowe

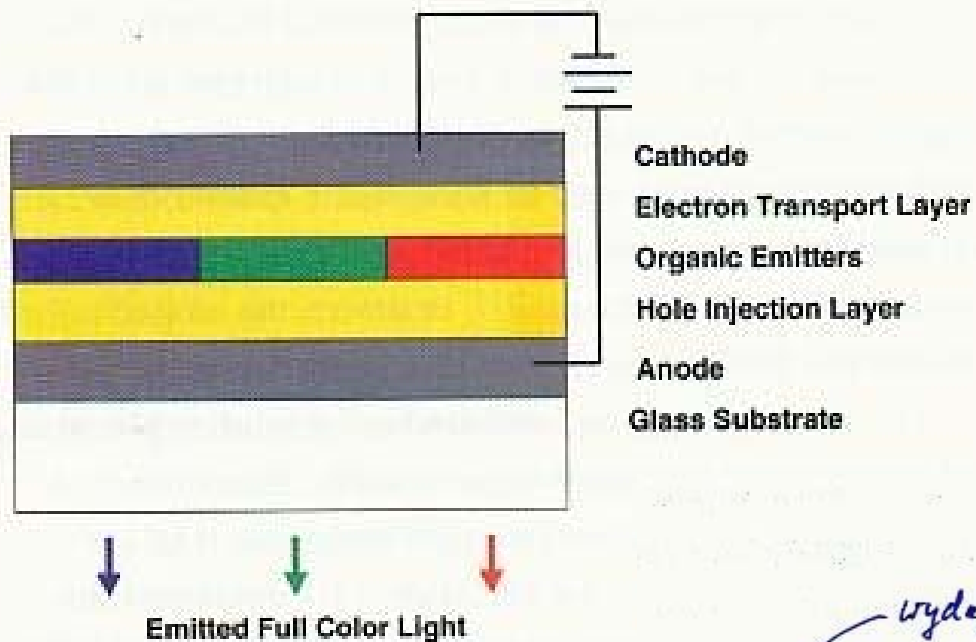


# OLED (2)





# OLED (3)



wydajność energetyczna

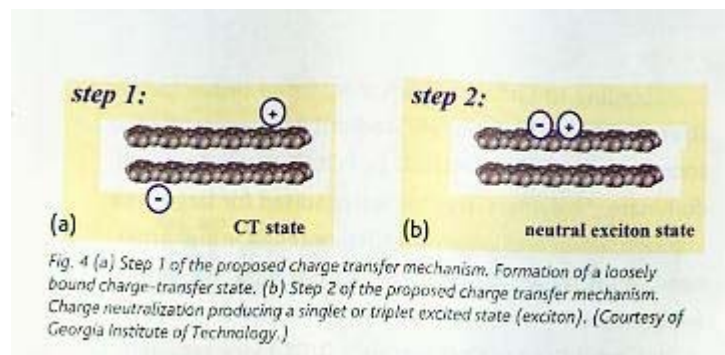
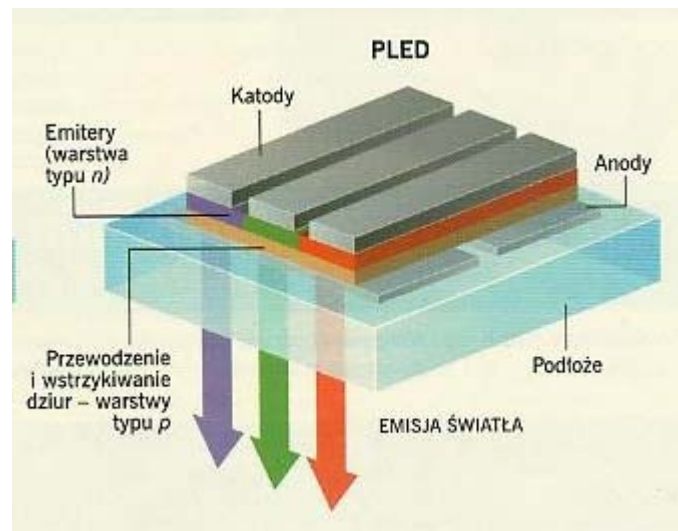
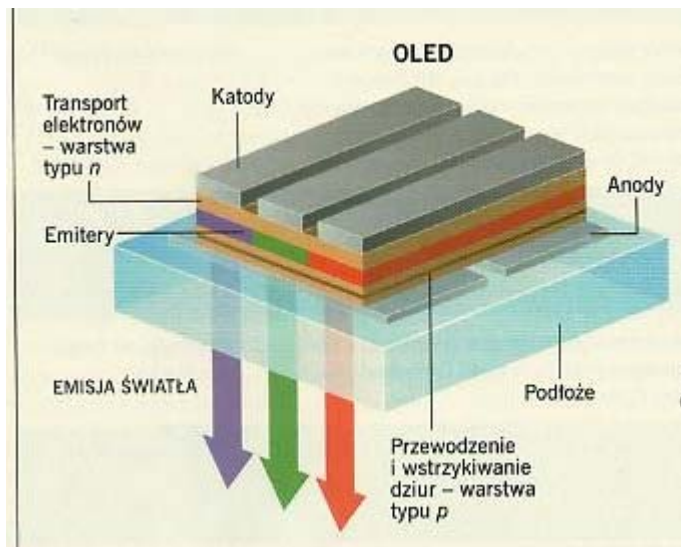
$$\eta = \frac{\text{strumień energii światła}}{\text{dostarczona moc elektr.}} = \frac{E_{EL}}{U \cdot I}$$

wydajność kwantowa

$$\varphi_{EL} = \frac{eU}{h\nu} \cdot \eta$$



# OLED i PLED



# Przykłady zastosowań

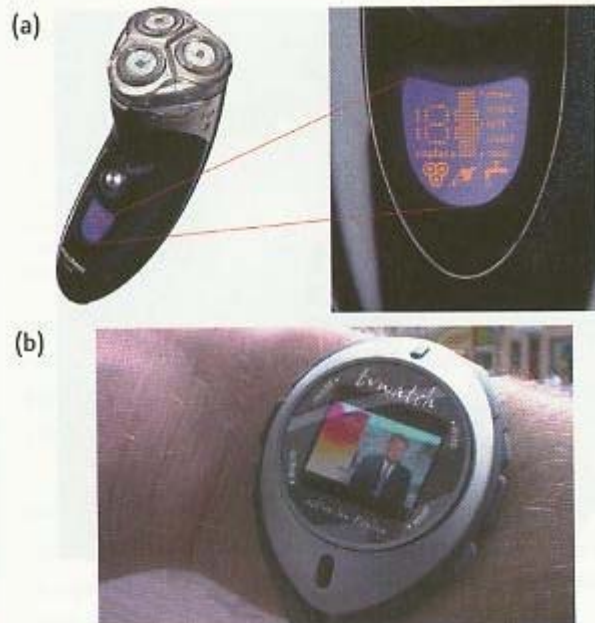


Fig. 1 (a) Norelco electric razor fitted with an OLED, which provides information on its operational status. (Courtesy of Philips.) (b) OLED watch face. (Courtesy of CDT.)



Fig. 3 Polymer OLED. (Courtesy of Philips.)



**PIERWSZY NA RYNKU** wyświetlacz OLED z aktywną macierzą o przekątnej 2.2 cala zastosowano w cyfrowym aparacie fotograficznym Kodak EasyShare LS633.

## Zastosowania (c.d.)

