Ogniwa fotowoltaiczne I

Prof. dr hab. Ewa Popko
Katedra Fizyki Doświadczalnej
Wydział Podstawowych Problemów Techniki
Politechnika Wrocławska

Wy1	**Zasoby energetyczne. Jednostki radiometryczne, prawo Lamberta. Luminancja Słońca.**	**2**
Wy2	**Fotony. Prawa promieniowania CDC, spektrum promieniowania słonecznego.**	**2**
Wy3	**Oddziaływanie światła z materią. Właściwości optyczne izolatorów.**	**2**
Wy4	**Dyspersja i absorpcja światła w półprzewodniku.**	**2**
Wy5	**Odbicie i transmisja światła w półprzewodnikach i metalach.**	**2**
Wy6	**Elektrony i dziury w półprzewodnikach.**	**2**
Wy 7	**Procesy generacji i rekombinacji w półprzewodnikach.**	**2**
Wy 8	**Prąd unoszenia i dyfuzyjny. Złącze p-n w stanie równowagi termodynamicznej**	**2**
Wy9	**Ładunek przestrzenny w złączu p-n. Równanie Poissona i jego rozwiązanie.**	**2**
Wy10	**Efekt fotowoltaiczny. Podstawy działania fotoogniw.**	**2**
Wy11	**Podstawowe struktury półprzewodnikowych ogniw słonecznych: złącze p-n, p-i-n, kontakt Schottky metal-półprzewodnik, metal - izolator –półprzewodnik, heterozłącza.**	**2**
Wy12	**Technologie fotowoltaiczne. Teoretyczne ograniczenia konwersji energii w fotoogniwach**	**2**
Wy13	**Detektory fotonowe i termiczne promieniowania elektromagnetycznego.**	**2**
Wy14	**Standardy, kalibracja i testowanie modułów PV i fotoogniw.**	**2**
Wy15	**Test zaliczeniowy**	**2**
	Suma godzin	**30**

Zaliczenie

Ocena słownie	Ocena	Stopień opanowania wiedzy i umiejętności skala %
bardzo dobry	5,0	90-100%
dobry plus	4,5	80-89%
dobry	4,0	70-79%
dostateczny plus	3,5	60-69%
dostateczny	3,0	50-59%
niedostateczny	2,0	0-49%

1. **Obecność na wykładach – obowiązkowa, poza przypadkami losowymi.**
2. **Test na ostatnim wykładzie (28.01.2027).**
3. **Test poprawkowy po upływie ok. tygodnia od pierwszego terminu.**

LITERATURA PODSTAWOWA:

[1] Materiały do wykładu i laboratorium (wstępy teoretyczne oraz instrukcje robocze) , dostępne poprzez internet : https://popko.wppt.pwr.edu.pl
[2] E.Płaczek-Popko, „Fizyka odnawialnych źródeł energii" Skrypt DBC
[3] https://pveducation.org/
[4] K.Jager i in. „Solar Energy Fundamentals, Technology, and Systems" https://courses.edx.org/c4x/DelftX/ET.3034TU/asset/solar_energy_v1.1.pdf,
[5] J.Nelson „The Physics of Solar Cells" Imperial College Press 2003
[6] Z. M. Jarzębski, *Energia słoneczna: konwersja fotowoltaiczna,* PWN, Warszawa 1990.

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA:

[1] M.Fox „Optical Properties of Solids" Oxford University Press 2010
[2] D.A.Neamen „Semiconductor Physics and Devices", ed. McGraw-Hill, 2012

OPIEKUN PRZEDMIOTU (IMIĘ, NAZWISKO, ADRES E-MAIL)

Ewa Popko ewa.popko@pwr.edu.pl

Fotowoltaika

Globalnym liderem w sektorze farm PV pozostają Chiny. W czerwcu 2024 roku w regionie Xinjiang, na pustyni Gobi, podłączono do sieci największą na świecie farmę fotowoltaiczną o mocy 5 GW. Jej roczna produkcja energii elektrycznej to około 6,09 TWh – ilość wystarczająca do zasilenia całej Papui-Nowej Gwinei.
Drugą co do wielkości inwestycją jest Midong Solar Project, również w regionie Xinjiang. Instalacja składa się z ponad 4,26 miliona dwustronnych paneli fotowoltaicznych i generuje moc 3,5 GW. Jej koszt wyniósł około 2,13 miliarda dolarów.
Na trzecim miejscu plasuje się chińska farma Mengxi Lanhai Solar Plant o mocy 3 GW, zbudowana z 5,9 miliona paneli PV i zajmująca powierzchnię 70 km².
Poza Chinami warto wspomnieć o inwestycji w Zjednoczonych Emiratach Arabskich – 35 km od Abu Zabi działa farma złożona z 4 milionów bifacjalnych paneli, uruchomiona w 2023 roku. To jedna z największych instalacji OZE w regionie Bliskiego Wschodu.

Chiny
Indie
Emiraty Arabskie



Fotowoltaika w Polsce

Lista największych elektrowni fotowoltaicznych:

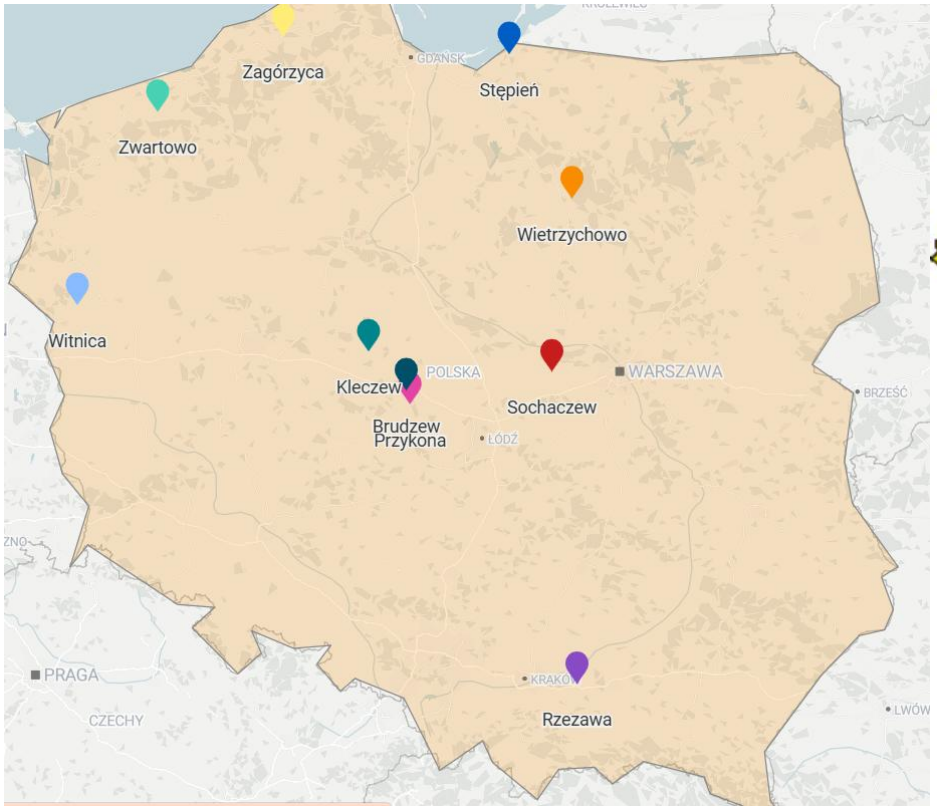
1.Kleczew – 250 MW (Orlen) +18.9MW wiatr
2.Zwartowo – 204 MW
3.Przykona – 200MW
4.Wietrzychowo – 74MW
5.Brudzew – 82.4 MW
6.Sochaczew – 80 MW

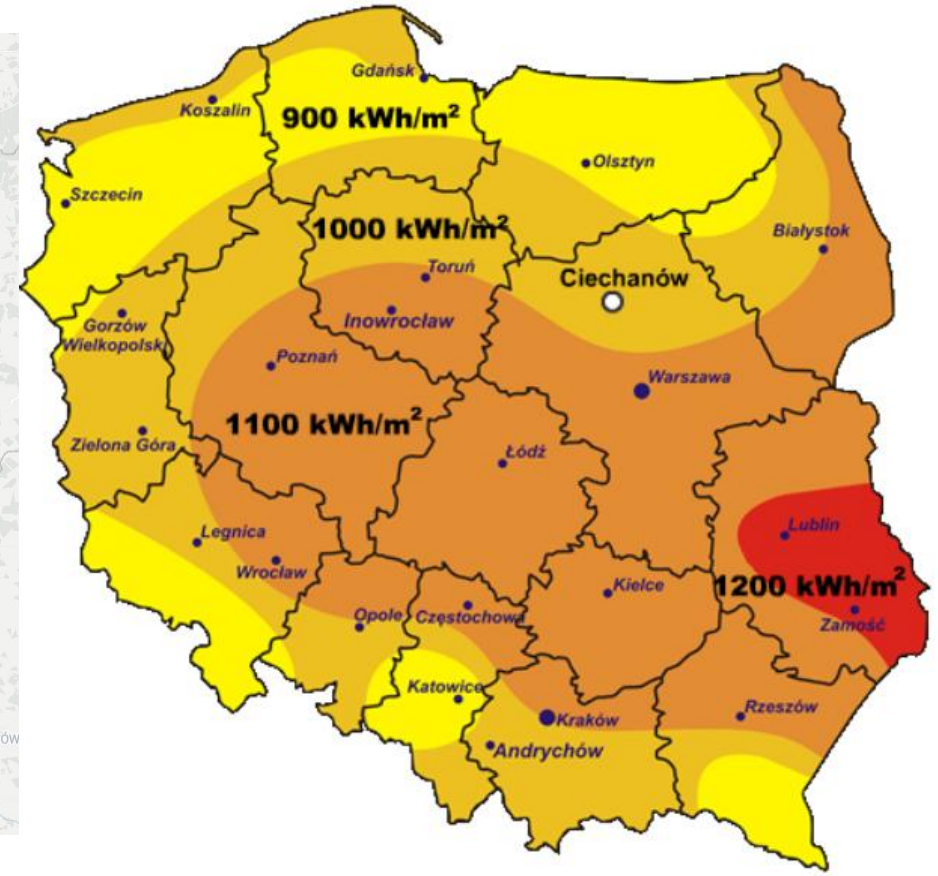
Nowa instalacja w Sidłowie będzie dysponowała mocą 722 MW, ale także będzie pierwszą w Polsce farmą fotowoltaiczną podłączoną bezpośrednio do sieci wysokiego napięcia 400 kV Polskich Sieci Elektroenergetycznych (PSE).

W sobotę, 5 września, odnawialne źródła energii odpowiadały za 70 procent generacji energii w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE). To dobowy rekord dla udziału OZE w krajowej produkcji energii - przekazały Polskie Sieci Elektroenergetyczne.



Farmy PV w Polsce

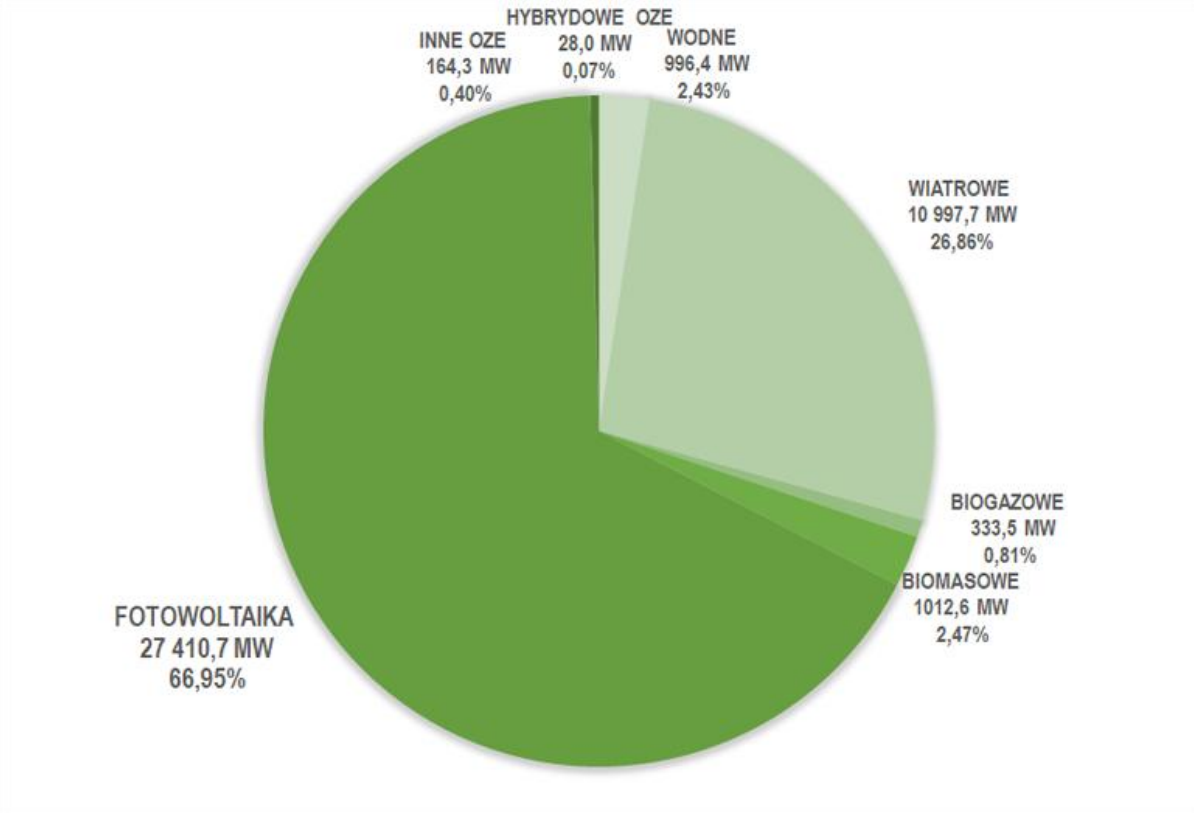




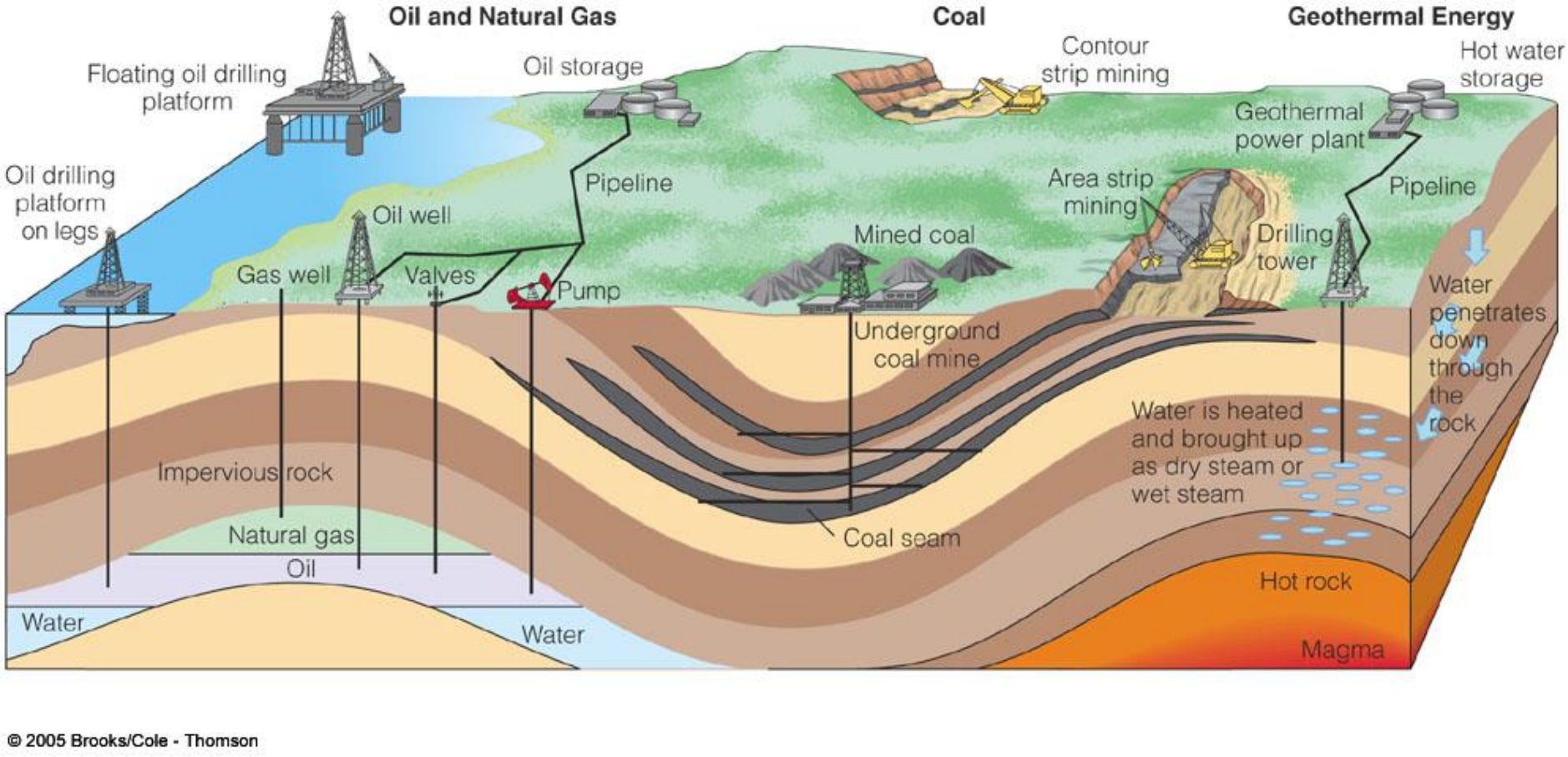
- 204 MW, Zwartowo, Respect Energy, Aurum Solar, Solarnet Investment
- 200 MW, gm. Przykona, EDPR
- 82,4 MW, gm. Brudzew, ZE PAK
- 80 MW, Sochaczew, BZK Holding
- 74 MW, Wietrzychowo, Better Energy
- 74 MW, Kleczew, Better Energy
- 64,6 MW, gm. Witnica, Alternus Energy Group
- 60 MW, Zagórzyca, Equinor
- 60 MW, Rzezawa, Sunly
- 58 MW, Stępień, Equinor

Energia OZE w Polsce

Stan mocy elektrycznej zainstalowanej dla wszystkich rodzajów źródeł (konwencjonalnych i odnawialnych) w czerwcu 2026 r. wyniósł 78,6 GW. Odnawialne źródła energii miały udział na poziomie 40.9 GW, czyli 52%całkowitej mocy. W sektorze OZE fotowoltaika zajmuje pierwsze miejsce z udziałem 66,95 %.



Konwencjonalne źródła energii



© 2005 Brooks/Cole - Thomson

Oil and natural gaz – ropa i gaz, coal – węgiel, geothermal energy – energia geotermalna

Impervious – nieprzepuszczalny, strip mining – kopalnie odkrywkowe, coal seam – złoża węgla

Konwencjonalne źródła energii - węgiel



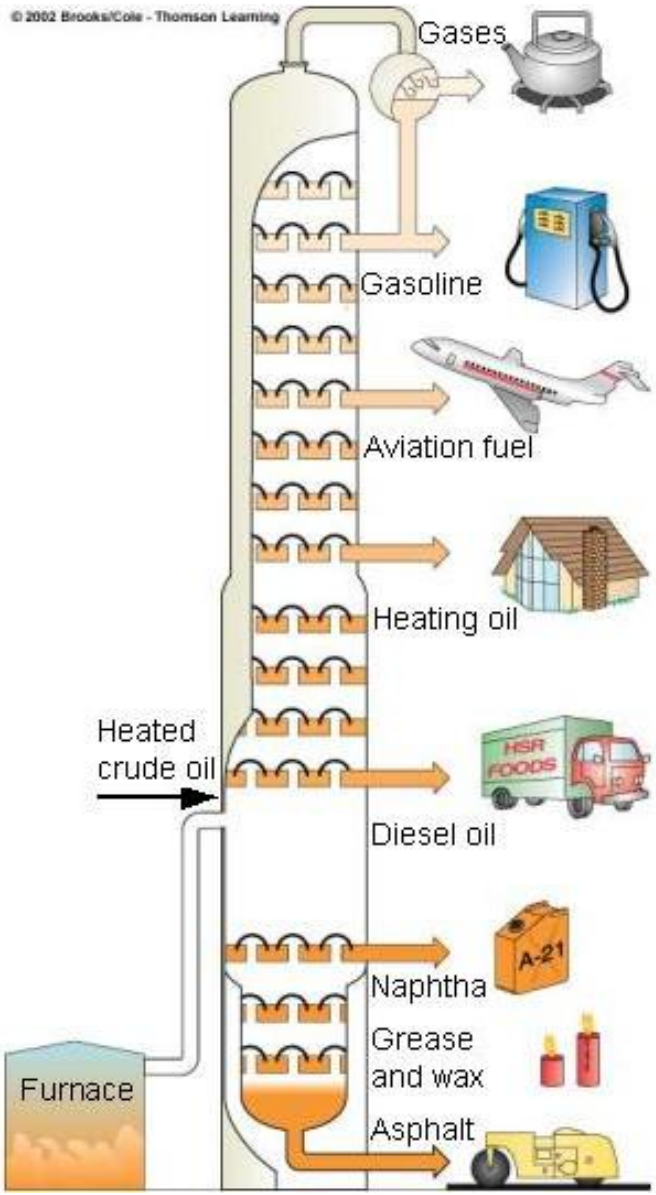
RWE Kolonia – elektrownia węglowa

Zalety

- **Opanowana technologia**
- **Niskie koszty (dotowana!)**
- **Wysoka wydajność**

Wady

- **Skażenie środowiska (woda, powietrze)!!!**
- **Emisja CO_2**



Ropa naftowa i gaz

Zalety

- **niski koszt**
- **wysoka wydajność**
- **wydajny system dystrybucji**

Wady

- **zasoby na 40-90 lat**
- **niskie ceny prowokują rozrzutność (?)**
- **skażenie powietrza i efekt cieplarniany**
- **skażenie wody**

Łupki naftowe i piaski bitumiczne



Łupki:

- **skały zawierające stałe związki węglowodorów**
- **zasoby – ok. 240 razy większe od zasobów ropy naftowej**

Piasek bitumiczny

- **oleista mieszanina gliny, piasku, wody i bituminu**
- **wydobywany przy pomocy dużych łopat elektrycznych, mieszany z gorącą wodą i parą aby wyekstrahować bitumin**
- **bitumin jest podgrzewany aby uzyskać syntetyczną ropę naftową**

- **łatwa dystrybucja, opanowana technologia**
- **łupki - wysoki koszt produkcji,**
- **konieczna duża ilość wody, skażenie środowiska, emisja CO_2**

Gaz

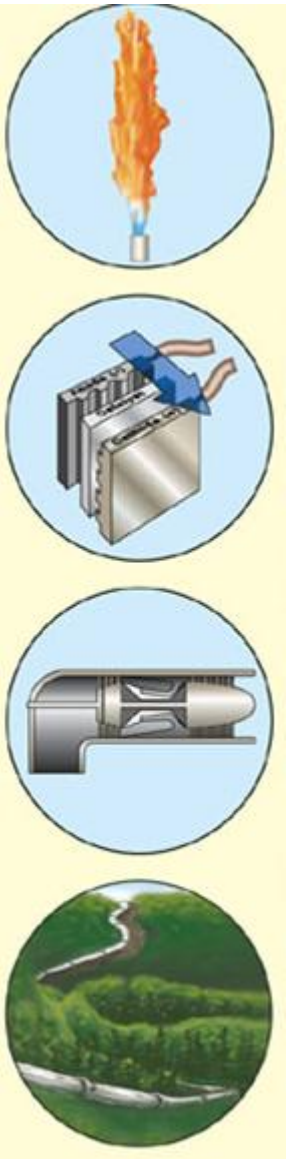
- **W 50-90% - metan**
- **Najczystsze źródło kopalne**
- **Zasoby – ok. 200 lat**

Zalety

- **Tani, wydajny, niska emisja CO_2 , łatwy transport rurociągami**

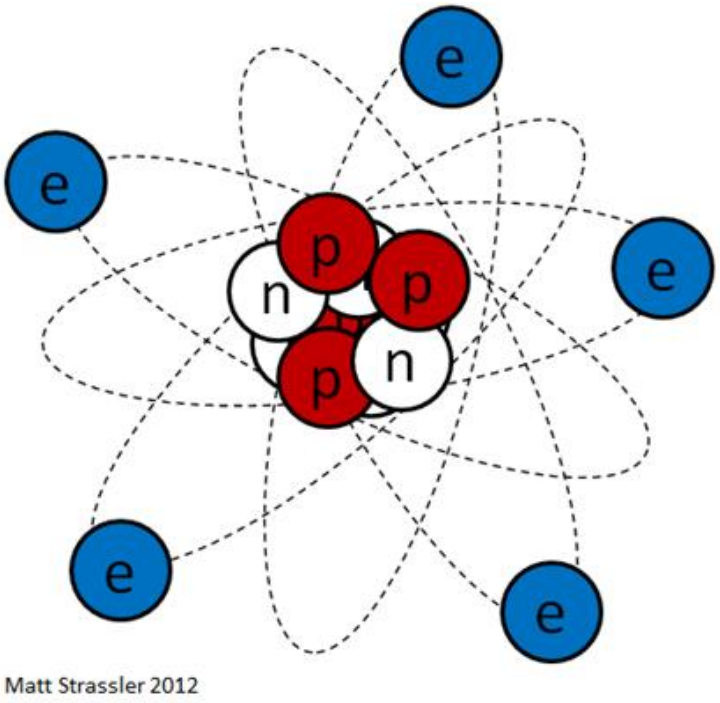
Wady

- **Konieczna sieć rurociągów**
- **Metan, który się pali emituje CO_2 !**
- **Nieszczelności - wyciek metanu**
- **Niebezpieczny – grozi wybuchem**



Energia jądrowa



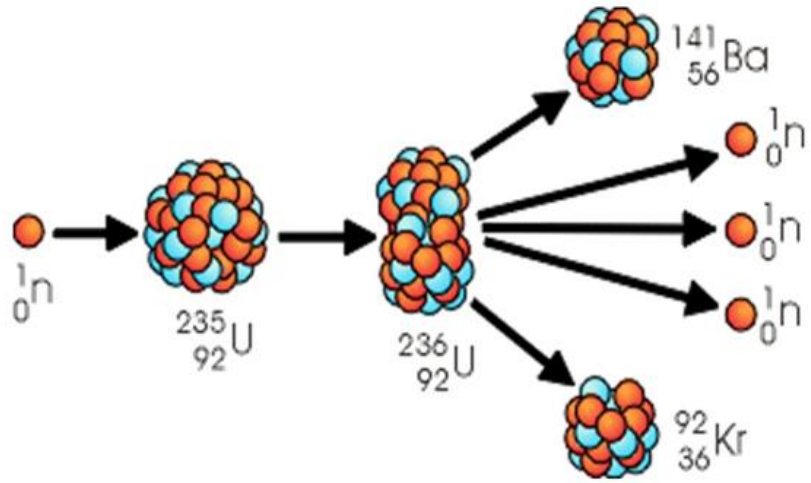


Atom

e - elektron
n - proton
p - neutron

W jądrze liczba protonów jest równa liczbie neutronów. W izotopach pierwiastków liczba neutronów jest większa od liczby protonów. Takie pierwiastki są promieniotwórcze.

Reakcja rozszczepienia jądra atomowego



$$E = \Delta mc^2$$

Defekt masy

Dla $\Delta m = 1g$:

$$\Delta mc^2 \cong 10^{-3} \cdot 9 \cdot \frac{10^{16} kgm^2}{s^2} = 9 \cdot 10^{13} J$$

Reaktor jądrowy – kontrolowana łańcuchowa reakcja jądrowa

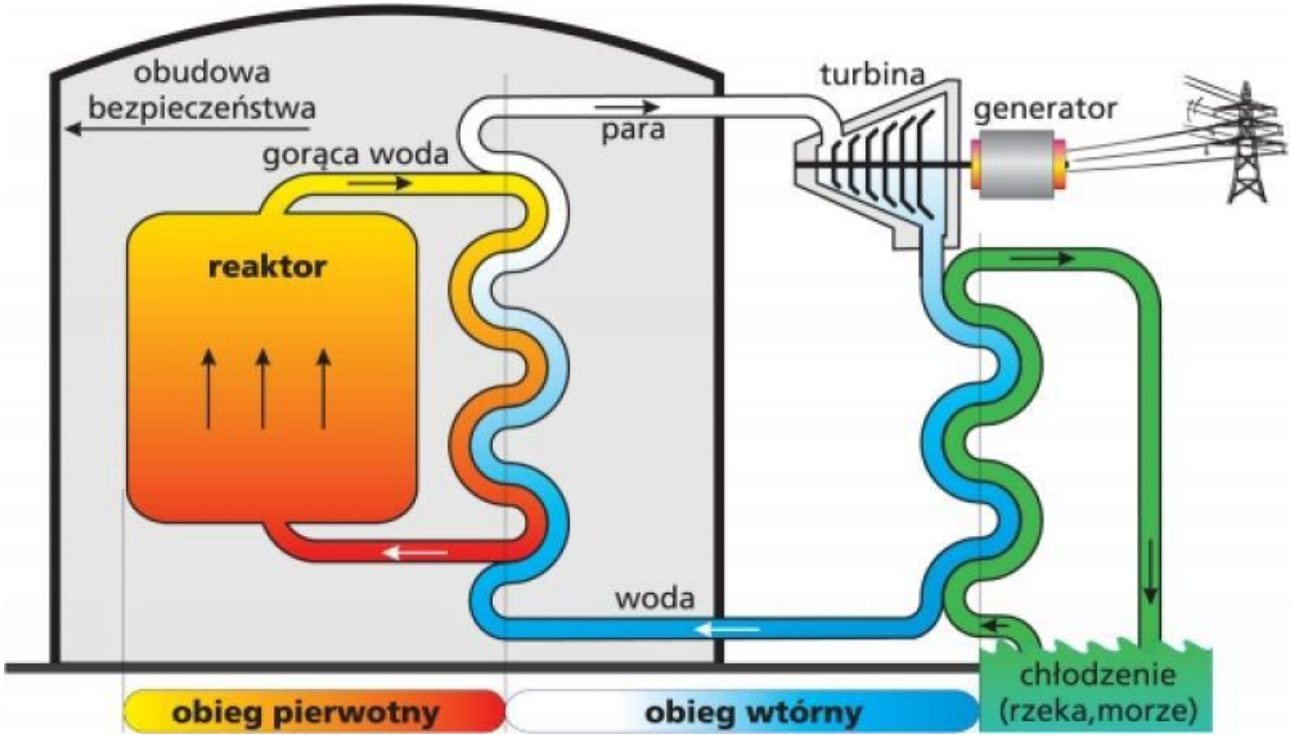
Zalety

- **B. wydajne źródło energii**
- **Emituje ok. 1/6 CO_2 emitowanego przez węgiel**

Wady

- **Złoża uranu wystarczą na ok. 50 lat**
- **Odpady radioaktywne muszą być przechowywane bezpiecznie przez 10,000-240,000 lat!**
- **Groźne - wypadki (ostatnią elektrownię jądrową w USA wybudowano w r. 1978), ataki terrorystyczne**
- **Badania wzbogacają wiedzę na temat broni jądrowej**

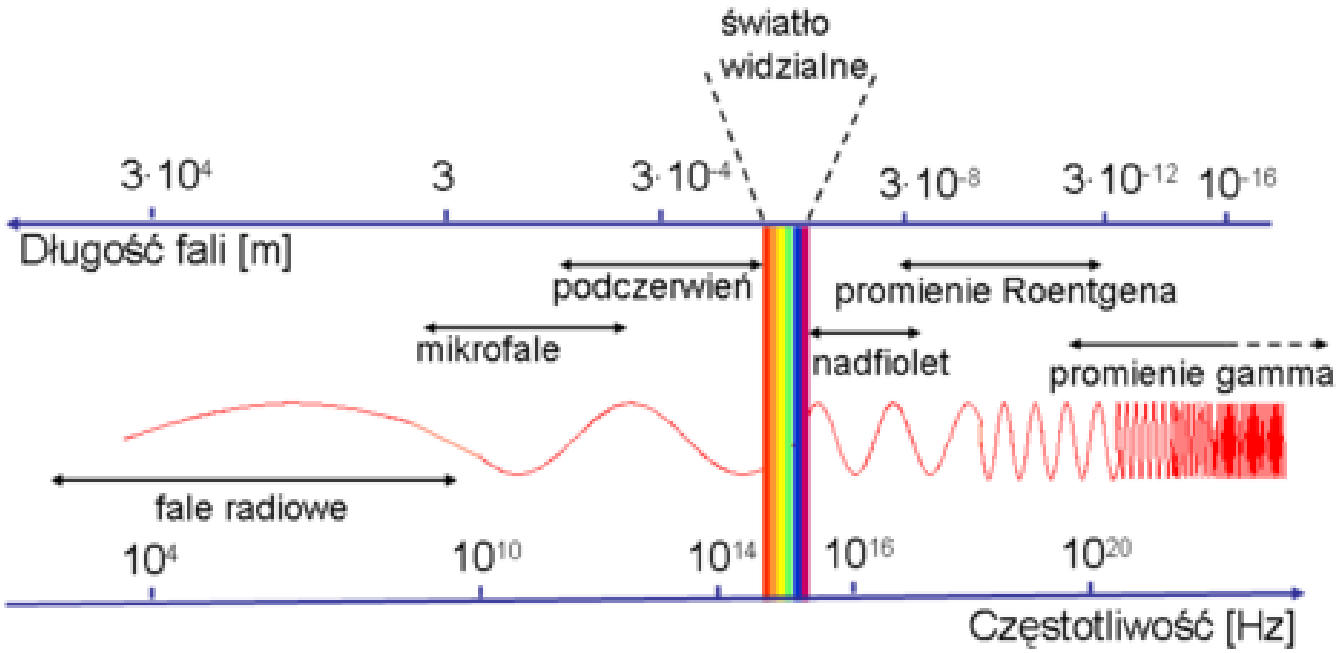
Elektrownia jądrowa



W obiegu pierwotnym produkowana jest gorąca, sprężona para.
W obiegu wtórnym – para rozpręża się i obraca turbinę, napędzając generator prądu.

Dlaczego boimy się emisji CO_2 ?

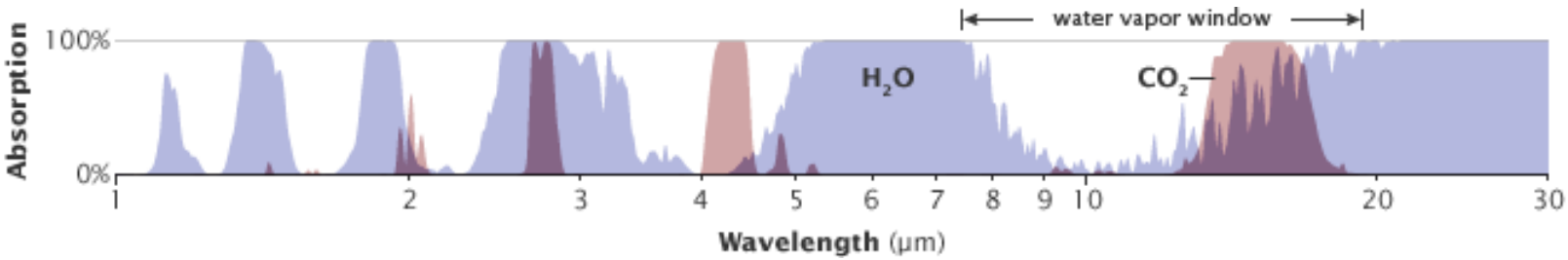
Widmo promieniowania elektromagnetycznego



Światło widzialne – długość fali $0.38\mu m < \lambda < 0.76\mu m$

Dlaczego boimy się emisji CO_2 ?

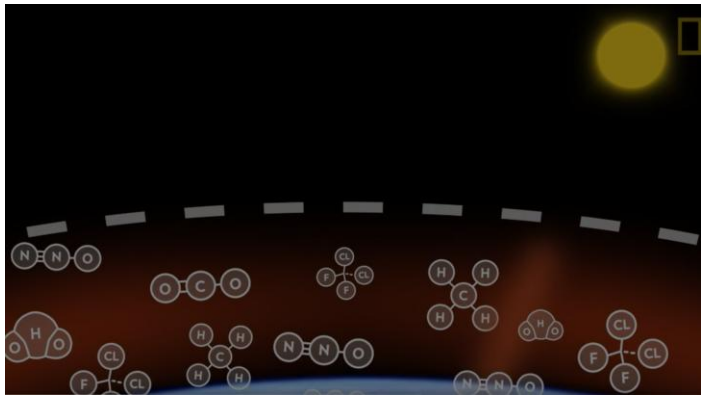
Powierzchnia Ziemi emituje 17% promieniowania słonecznego docierającego do jej powierzchni, w postaci promieniowania podczerwonego. Jednakże poza atmosferę wydostaje się jedynie 12% tego promieniowania. Pozostałe 5 do 6 %, jest absorbowane przez cząsteczki gazów „cieplarnianych". Są to: para wodna, dwutlenek węgla, metan, ozon

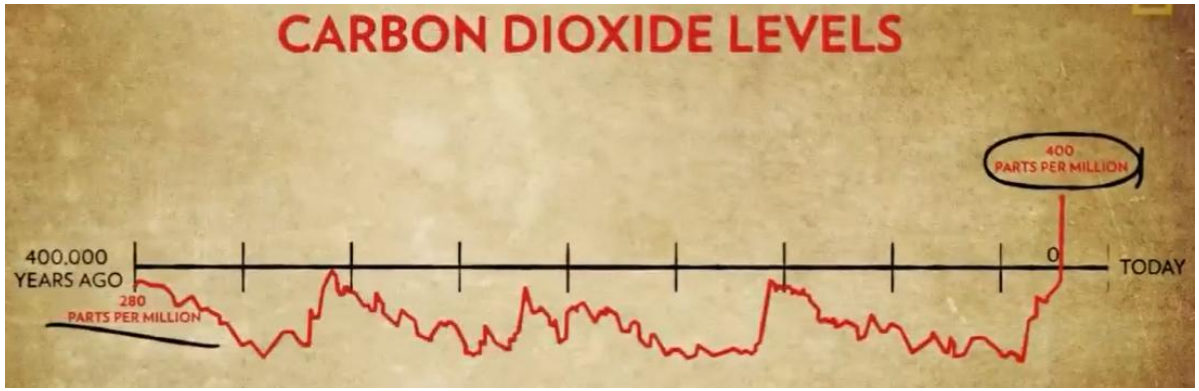


CO_2 absorbuje energię w zakresie fal dłuższych (12–15μm) częściowo zamykając okno przez które ciepło wypromieniowane przez powierzchnię Ziemi mogło by opuścić Ziemię. (NASA, Robert Rohde) – efekt cieplarniany

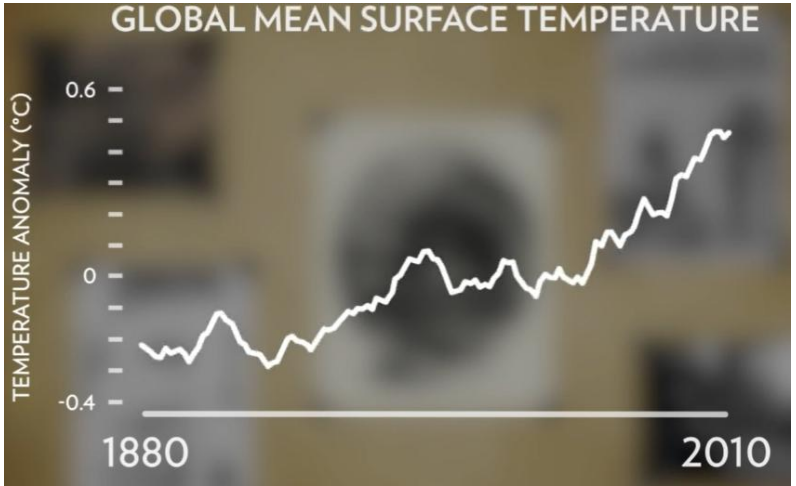
Konsekwencje globalnego ocieplenia

- **oceany**
- **pogoda**
- **żywność**
- **zdrowie**



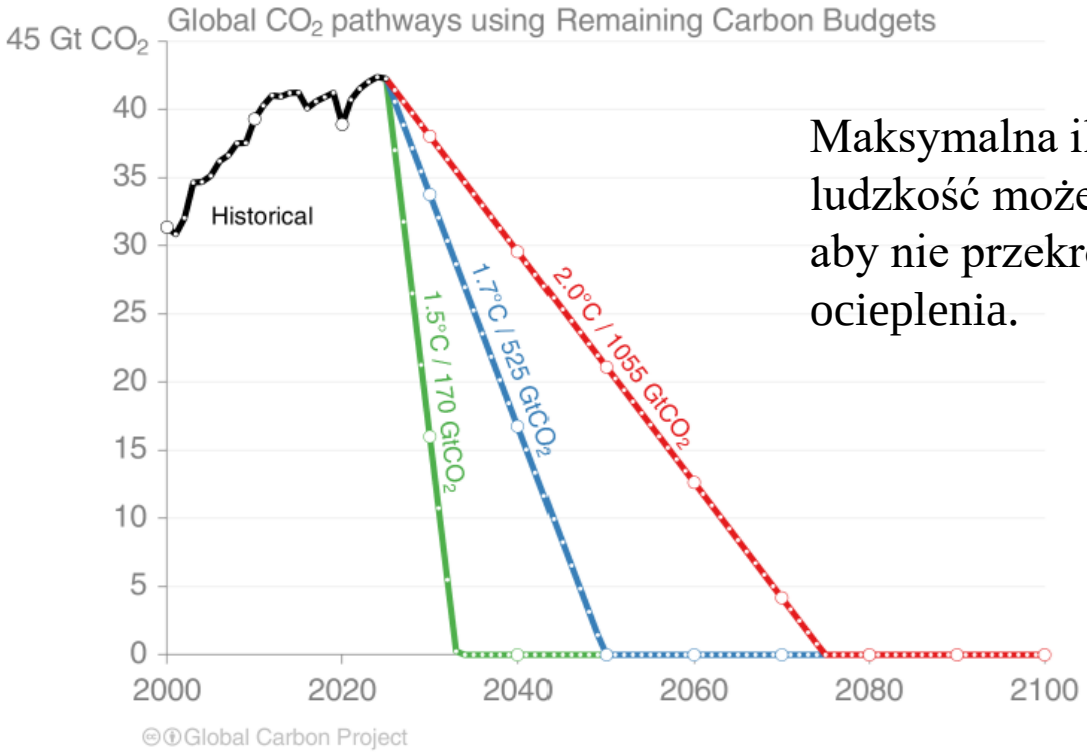


Wycinka lasów skutkuje uwalnianiem do atmosfery CO_2, który jest w nich zmagazynowany; mniejsze zasoby roślinności – mniejsze wchłanianie CO_2.



Global carbon budget

Global CO_2 emissions must reach zero to limit global warming.
All-else-equal, the later the net zero year, the higher the warming level.

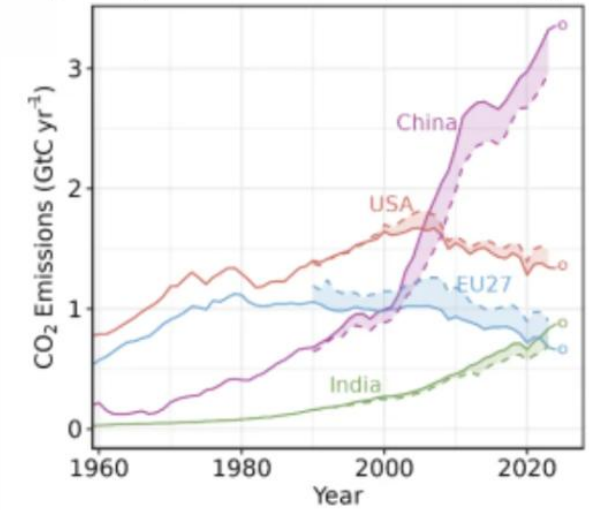


Maksymalna ilość CO_2, jaką ludzkość może jeszcze wyemitować, aby nie przekroczyć 1,5°C lub 2°C ocieplenia.

Source: Friedlingstein et al 2025; Global Carbon Project 2025

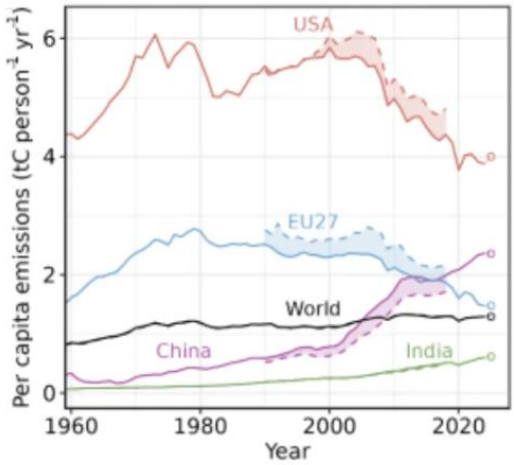
Global carbon budget

Fossil CO2 emissions for territorial (solid lines) and consumption (dashed lines) emissions for the top three country emitters (USA, China, India) and for the European Union (EU27)



Source: Global Carbon Budget 2025

Fossil CO2 emissions for per-capita emissions the world and for the large emitters



Source: Global Carbon Budget 2025

Global Carbon Budget Office [University of Exeter's Global Systems Institute](#) with the support of more than 100 people from 70 organizations in 18 countries.

$$\mathbf{1}\ \mathrm{tC} = \mathbf{3.664}\ \mathrm{tCO_2}$$

Konsekwencje globalnego ocieplenia



Guardian graphic. Source: Forster et al, Earth System Science Data, 2025

M.in.:

- **Na skutek topnienia lodowców, poziom mórz do końca 21 wieku podniesie się o kilkadziesiąt cm.**
- **Huragany, burze, powodzie i susza (w U.S. spodziewane są mega-susze).**
- **Brak świeżej wody – lodowce bilansują ok. ¾ światowych zasobów świeżej wody.**
- **Rozprzestrzenianie się chorób (malaria, Ziko).**
- **Zmiana ekosystemów.**
- **Wzrost temperatury oceanów – woda w oceanie ma odczyn alkaliczny, wzrost temp. prowadzi do wzrostu odczynu kwasowego - wymieranie gatunków.**

Alternatywa - odnawialne źródła energii (OZE)



Energia słoneczna

- Fotowoltaika
- Solary



Wiatr

- Na wybrzeżu (on-shore)
- W wodzie (off-shore)



Biomasa

- Płody rolne (1^{-sza} Generacja)
- Surowiec celulozowy (2^{-ga} Generacja)
- Nowe surowce, takie jak glony (3^{-cia} Generacja)



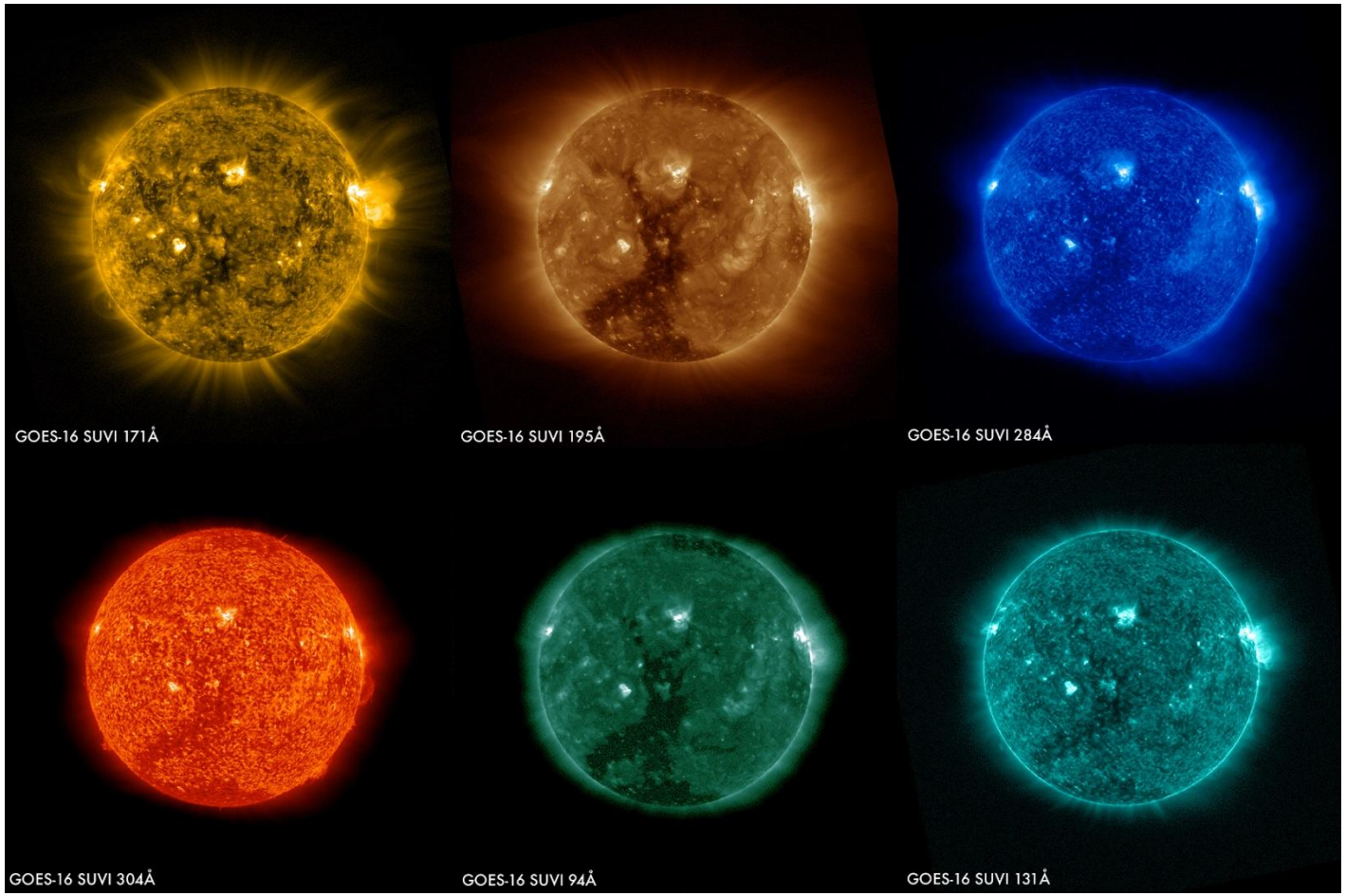
Hydroelektrownie



Wodór

Dlaczego energia słoneczna?

Konwersja energii słonecznej z 1% obszaru Ziemi, z 10% wydajnością wystarczy na zaspokojenie zapotrzebowania energetycznego w ilości dwukrotnie większej niż konsumowane obecnie!



Energia słoneczna

Moc promieniowania słonecznego $3.8 \cdot 10^{23} kW$

Energia emitowana w ciągu roku $3.3 \cdot 10^{27} kWh/rok$

Moc promieniowania słonecznego, które dociera do Ziemi $1.7 \cdot 10^{14} kW$

Ludność – 8 miliardów

Moc przypadająca na osobę: $22000\ kW/osob$ę

Zużycie przypadające na osobę: $2.3\ kW/osob$ę

Energia słoneczna

toe – energia wydzielana podczas spalania jednej tony ropy naftowej (ang. ton of oil equivalent)

$$1\ kWh = 3.6 \cdot 10^{6}\ J$$

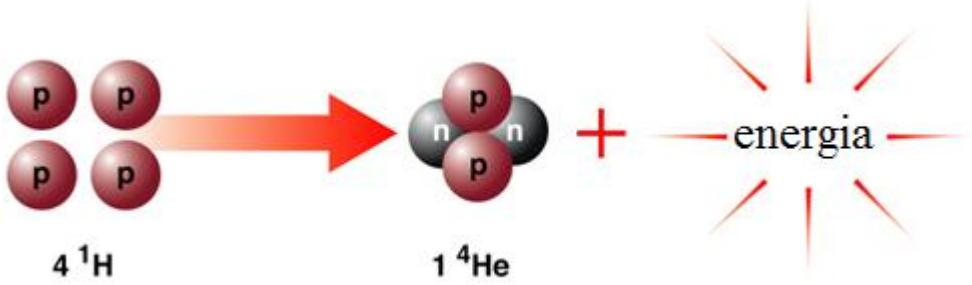
$$1\ eV = 1.6 \cdot 10^{-19}\ J$$

$$1\ toe \approx 4.2 \cdot 10^{10}\ J$$

$$1\ cal = 4.2\ J$$

Synteza termojądrowa na Słońcu

Cykl p-p

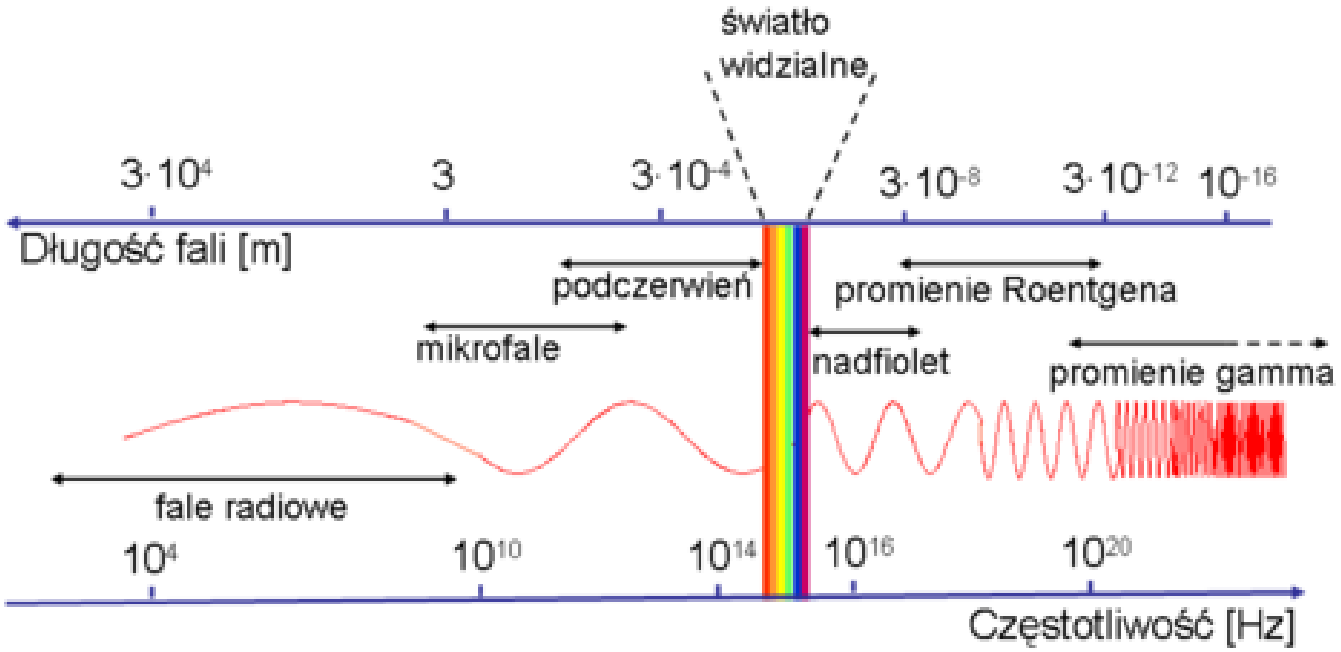


- **Synteza 1 kg wodoru jest równoważna ilości 7.1 grama masy zamienionej na energię:**

$$E = \Delta mc^2 = 0.0071kg \cdot (3 \cdot \frac{10^8 m}{s^2})^2 = 6.4 \cdot 10^{14} J$$

- **W każdej sekundzie 675 milionów ton H jest zamieniane na 653 milionów ton He z równoczesną zamianą około 22 milionów ton materii na energię.**

Widmo promieniowania elektromagnetycznego

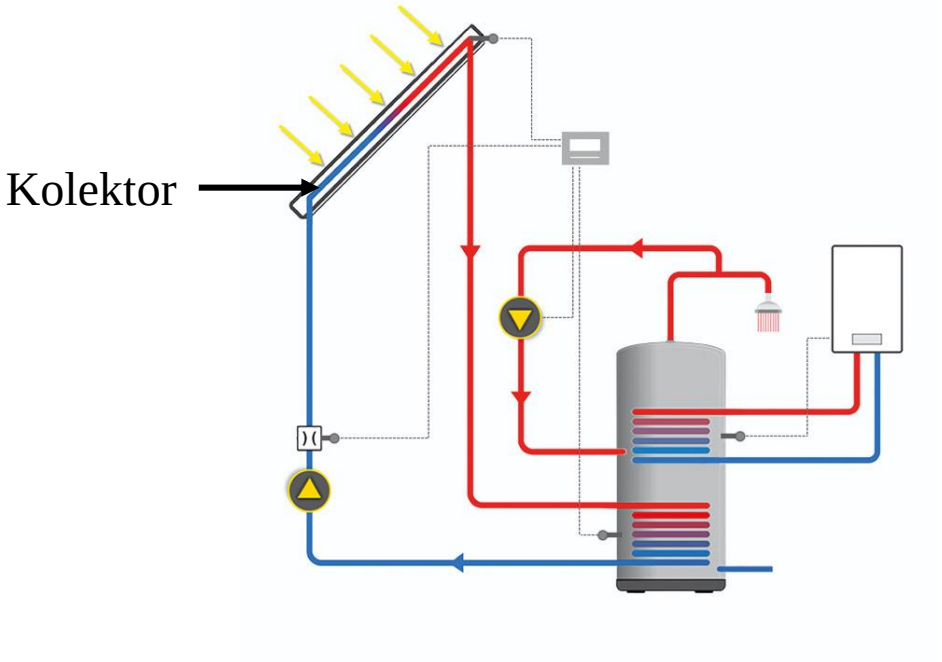


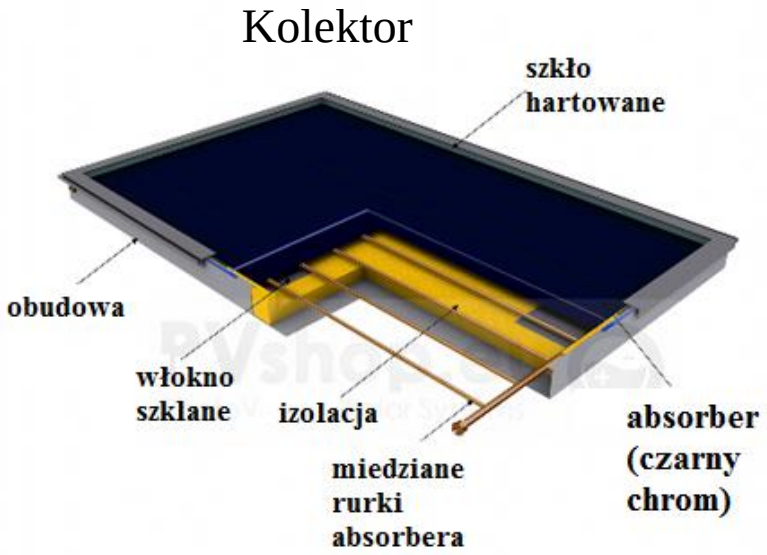
Światło widzialne – długość fali $0.38\mu m < \lambda < 0.76\mu m$

W instalacjach solarnych wykorzystywany jest zakres fal podczerwonych.

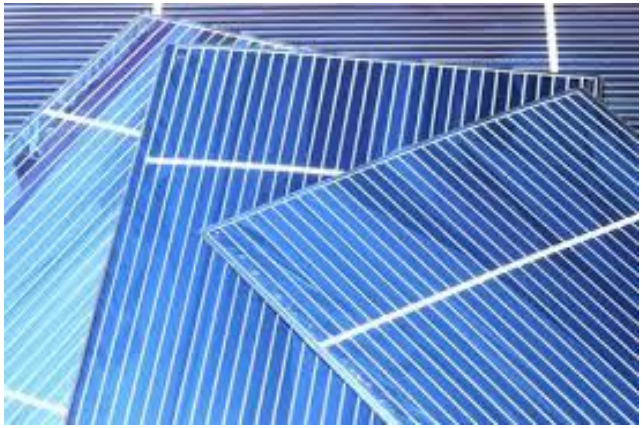
W fotowoltaice – najlepiej, gdyby można było wykorzystać cały zakres widmowy światła emitowanego przez Słońce.

Instalacje solarne





- **Przy pomocy krążącego w orurowaniu nośnika ciepła, najczęściej niezamarzającego, nieszkodliwego roztworu glikolu, energia jest przekazywana do podgrzewacza.**
- **W podgrzewaczu ciepło oddawane jest poprzez wymiennik do wody użytkowej.**
- **Schłodzony czynnik grzewczy powraca orurowaniem do kolektora słonecznego i tam zostaje ponownie podgrzany – cykl zostaje zamknięty.**



Fotowoltaika



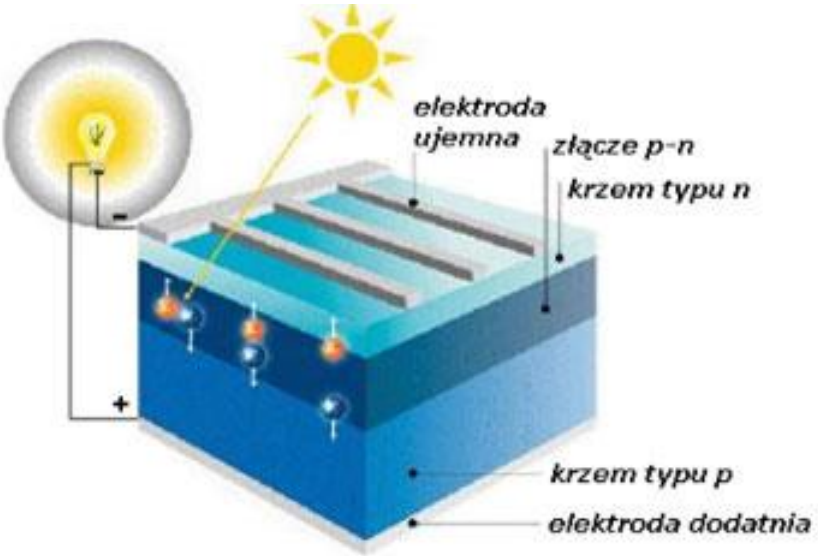
Jest to metoda wytwarzania energii elektrycznej poprzez konwersję promieniowania słonecznego bezpośrednio na prąd elektryczny. Konwersja odbywa się w półprzewodnikach, w których zachodzi efekt fotowoltaiczny.

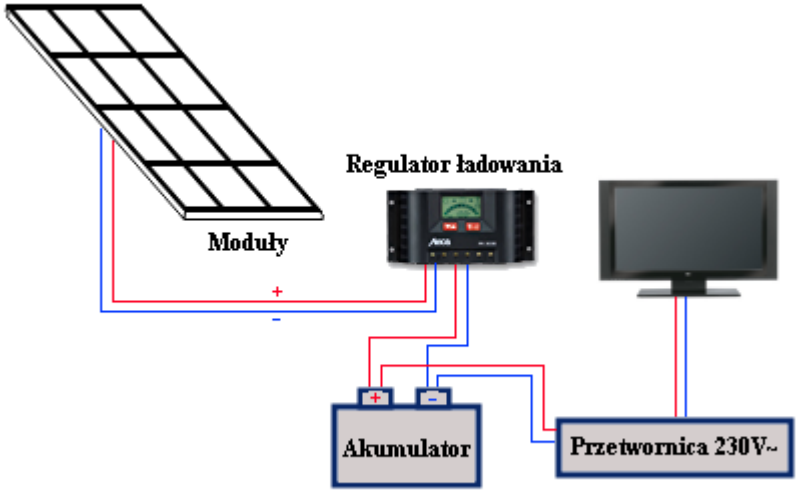
Podstawowym elementem fotowoltaicznym jest ogniwo, z którego wykonuje się panele (zestaw wielu ogniw) i matryce paneli.





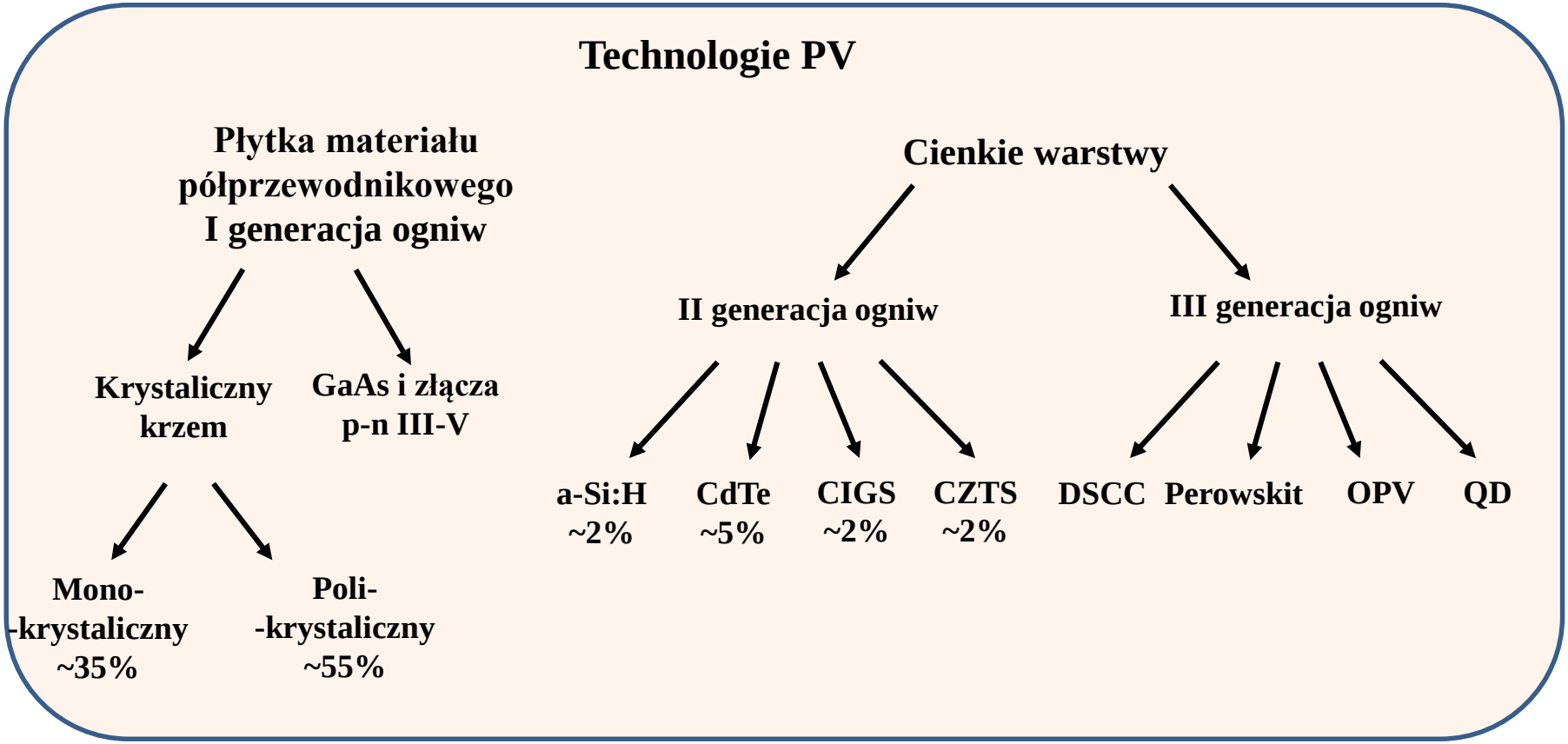
Ogniwo fotowoltaiczne





- Urządzenie, które zamienia energię słoneczną w energię elektryczną.
- Nie wymaga zasilania – nie konsumuje paliwa
- Nie degraduje środowiska
- Posiada wysoki wskaźnik mocy do wagi

Technologie PV



IV generacja ogniw: hybrid inorganic cells

Carbon nanotubes (CNT) based solar cells (2-D Material Based Solar Cell)

Graphene based solar cell

Tabela rekordowych wydajności (lab)
08.2026

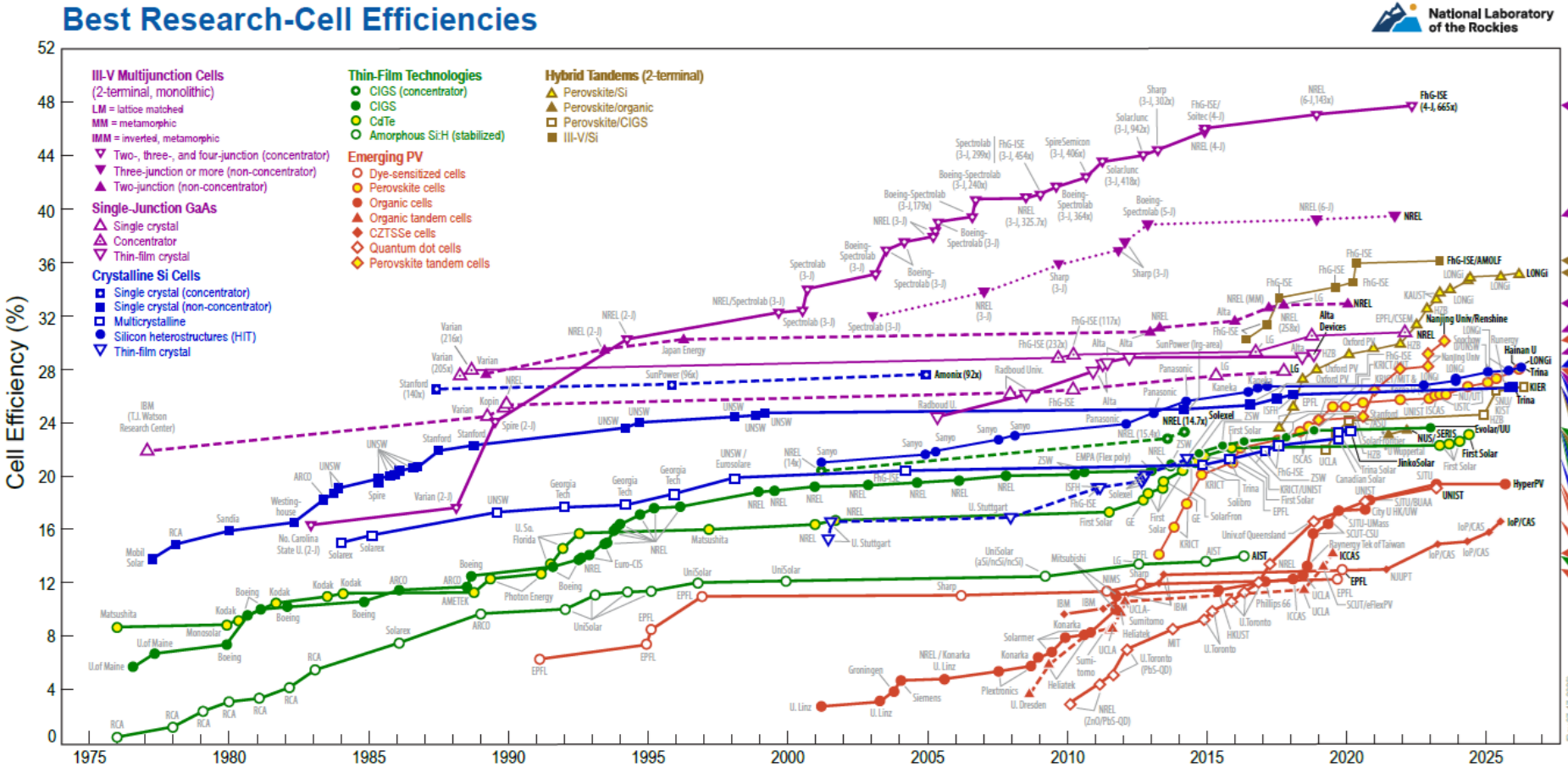


Tabela rekordowych wydajności (lab)
08.2026

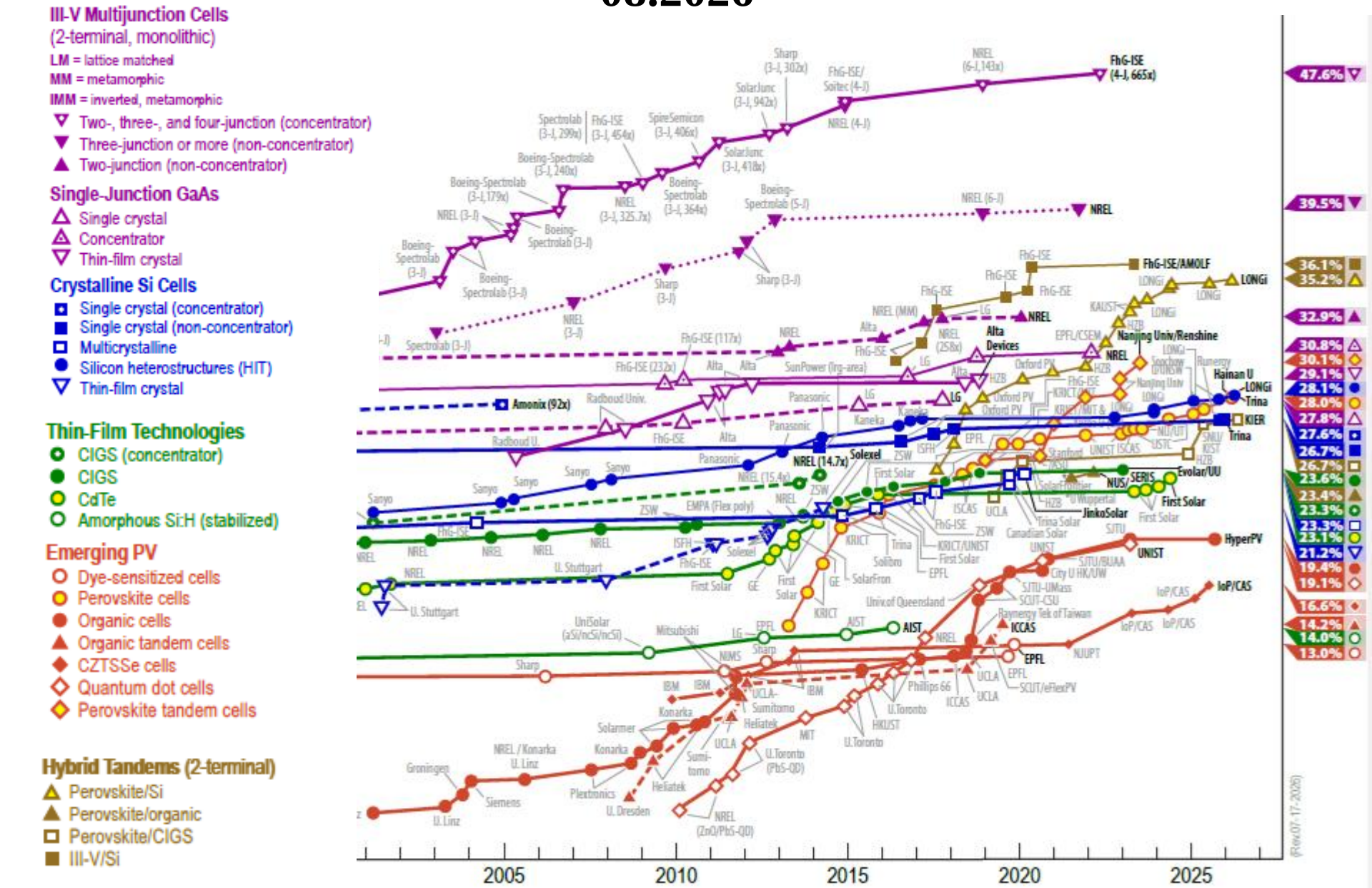
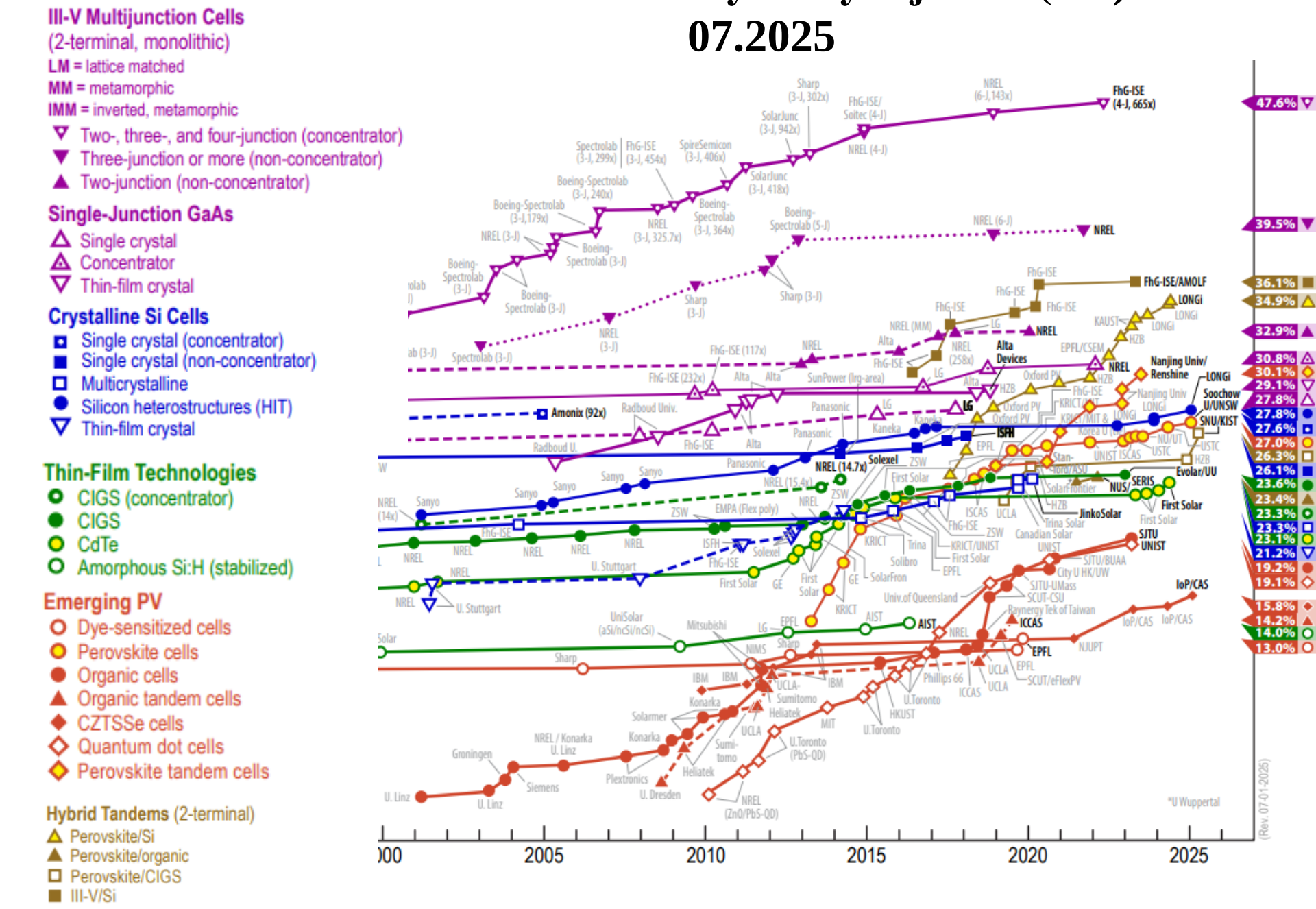
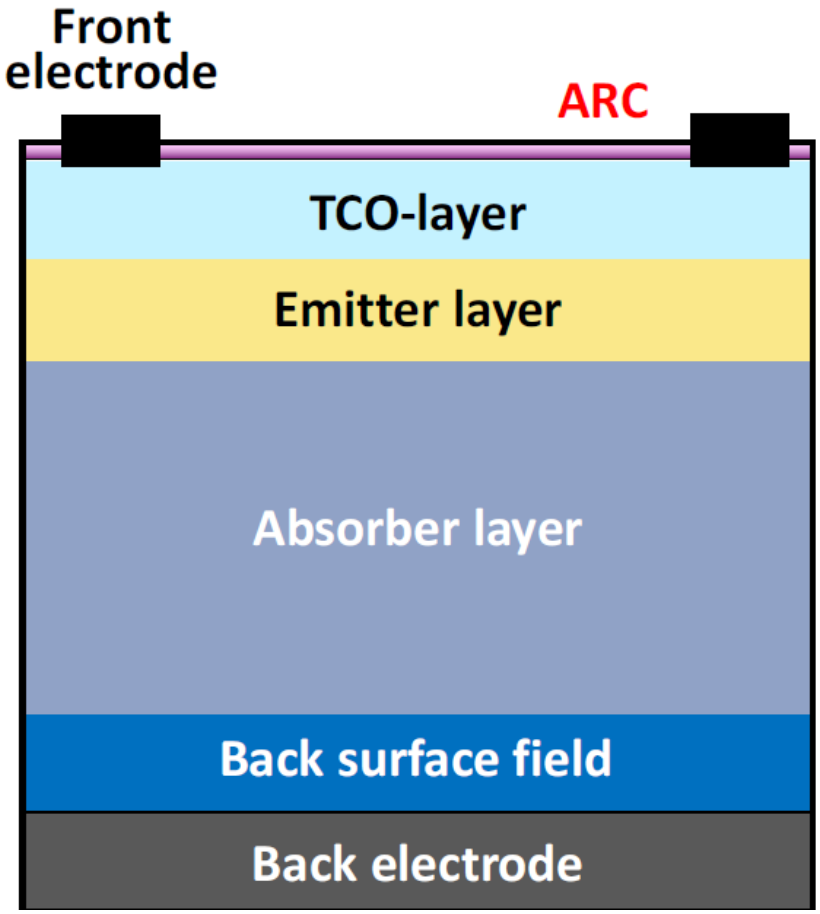


Tabela rekordowych wydajności (lab) 07.2025



Budowa ogniwa



Absorber – generacja par elektron-dziura

Emiter – selekcja nośników mniejszościowych (dla absorbera typu p – emiter typu n – przepuszcza tylko elektrony do elektrody przedniej)

TCO – przewodzący i transparentny tlenek – umożliwia transport nośników między elektrodami

Back Surface field – selekcja nośników większościowych (dla absorbera typu p – przepuszcza tylko dziury do elektrody tylnej).

Elektrody – łączą ogniwo z zewnętrznym obwodem elektrycznym.

ARC – warstwa antyrefleksyjna

Optymalne parametry

Optyczne

1. **Półprzewodnik z prostą przerwą wzbronioną (1-1,5eV)**
2. **Duży współczynnik absorpcji ($> 10^4 cm^{-1}$)**
3. **Charakterystyka widmowa czułości dopasowana do charakterystyki widmowej Słońca**

Elektryczne

1. **Optymalna koncentracja nośników $10^{15} - 10^{16}\ cm^{-3}$**
2. **Duże ruchliwości nośników (długi czas życia i duże współczynniki dyfuzji)**

Strukturalne

1. **Duże rozmiary ziaren ($> 1\mu m$) i łagodne granice ziaren**
2. **Czystość fazowa**
3. **Brak defektów ok. połowy przerwy wzbronionej**

Ekonomiczne/ środowiskowe

1. **Dostępność i niski koszt pozyskania materiałów**
2. **Nietoksyczność materiałów**

Niezawodne

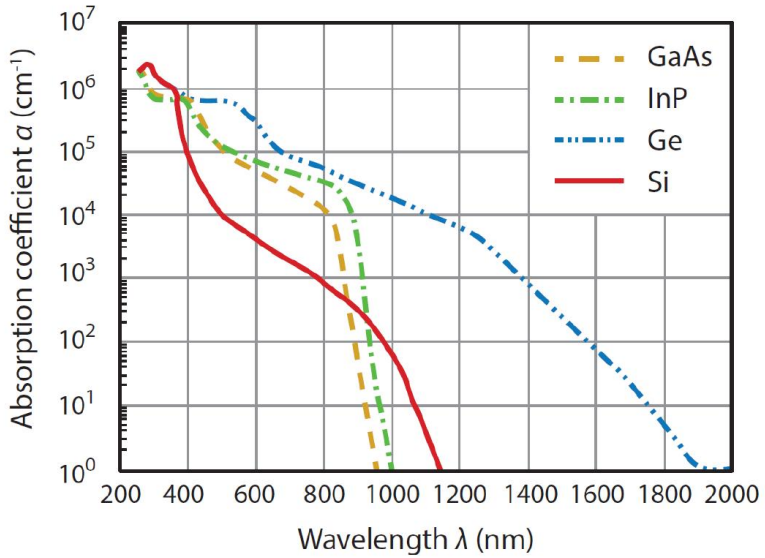
1. **Stabilne w czasie**

Współczynnik absorpcji

Ilość światła, która zostanie zaabsorbowana

$$I^{abs} = I_0[1 - exp(-\alpha d)].$$

Aby ilość światła zaabsorbowanego I^{abs} była jak największa, współczynnik absorpcji powinien być jak największy i absorber możliwie gruby. Np. dla ogniwa krzemowego aby zostało zaabsorbowane 90% padającego promieniowania słonecznego, grubość absorbera musi być równa ok. $200\mu m$.



$$\alpha_{Si}(400nm) = 9 \cdot 10^4\, cm^{-1}$$

$$\alpha_{Si}(700nm) = 2 \cdot 10^3\, cm^{-1}$$

$$I_x = I_0 e^{-\alpha x} \longrightarrow \ln\left(\frac{I_x}{I_0}\right) = -\alpha x$$

$$\ln(0.1) = -9 \cdot 10^4\, x \qquad x = 0.26\,\mu m$$

$$\ln(0.1) = -2 \cdot 10^3\, x \qquad x = 11.5\,\mu m$$

Preferowany półprzewodnik z prostą przerwą wzbronioną. $ln10 = 2{,}3$

1.Energia promienista - emitowana lub padająca na powierzchnię	[J]	1.Ilość światła	[lm s]
2. Moc promienista (strumień) - energia promieniowana emitowana lub padająca na powierzchnię w jednostce czasu	[W]	2. Strumień świetlny	[lm]
3. Natężenie promieniowania źródła światła (światłość) -strumień promieniowania emitowany ze źródła do jednostkowego kąta bryłowego	[W/sr]	3. Światłość	[cd] = [lm/sr]
4. Emitancja promieniowania (całkowita zdolność emisyjna) – Strumień promieniowania emitowany przez jednostkę powierzchni źródła	[W/m^2]	4. Emitancja świetlna	[lm/m^2]
5. Luminancja promieniowania (jaskrawość) - strumień promieniowania emitowany przez jednostkę powierzchni źródła do jednostkowego kąta bryłowego	[W/m^2sr]	5. Luminancja	[nt] = [cd/m^2]
6. Natężenie napromieniowania - strumień promieniowania padającego na jednostkę powierzchni	[W/m^2]	6. Natężenie oświetlenia	[lux] [lm/m^2]
7. Gęstość energii promieniowania	[J/m^3]		

Gęstość widmowa

<u>Gęstość widmowa</u> jest zdefiniowana jako ilość strumienia, energii, luminancji etc., zawarta w jednostkowym przedziale częstości dν = 1Hz (lub długości fali dλ) wokół częstości ν.

Np. całkowita zdolność emisyjna M i odpowiadająca jej gęstość widmowa M_n wiążą się ze sobą następująco:

$$M = \int_0^\infty M_\nu \, d\nu$$

$$\boldsymbol{M_\nu = \frac{\partial M}{\partial \nu}}$$

Fotony

Liczba fotonów o energii hc/λ emitowanych przez źródło o mocy P_λ [W/m] w jednostce czasu (ang. *spectral photon flow*):

$$\Psi_{ph,\lambda} = \frac{P_\lambda}{\frac{hc}{\lambda}} \qquad [s^{-1}nm^{-1}]$$

Całkowita liczba fotonów emitowanych przez źródło o mocy *P* w jednostce czasu

$$\Psi_{ph} = \int_0^\infty \Psi_{ph,\lambda} d\lambda \quad [s^{-1}]$$

Spektralny strumień fotonów (ang. *spectral photon flux*)

$$\Phi_{ph,\lambda} = \frac{\partial^2 \Psi_{ph,\lambda}}{\partial A} \quad [s^{-1}\, nm^{-1} m^{-2}]$$

Całkowity strumień fotonów (ang. *photon flux*)

$$\Phi_{ph} = \int_0^\infty \Phi_{ph,\lambda} d\lambda \quad [s^{-1}m^{-2}]$$

Natężenie napromieniowania i emitancja

- **Natężenie napromieniowania (ang. *irradiance*) całkowite i spektralne: moc promieniowania <u>padającego</u> na jednostkę powierzchni**

$$I_e = \frac{\partial^2 P}{\partial A} \quad [\frac{W}{m^2}] \qquad I_{e,\lambda} = \frac{\partial I_e}{\partial \lambda} \quad [\frac{W}{m^2 \cdot m}] \qquad \mathrm{I}_e = \int_0^\infty \mathrm{I}_{e,\lambda} d\lambda \quad [\frac{W}{m^2}]$$

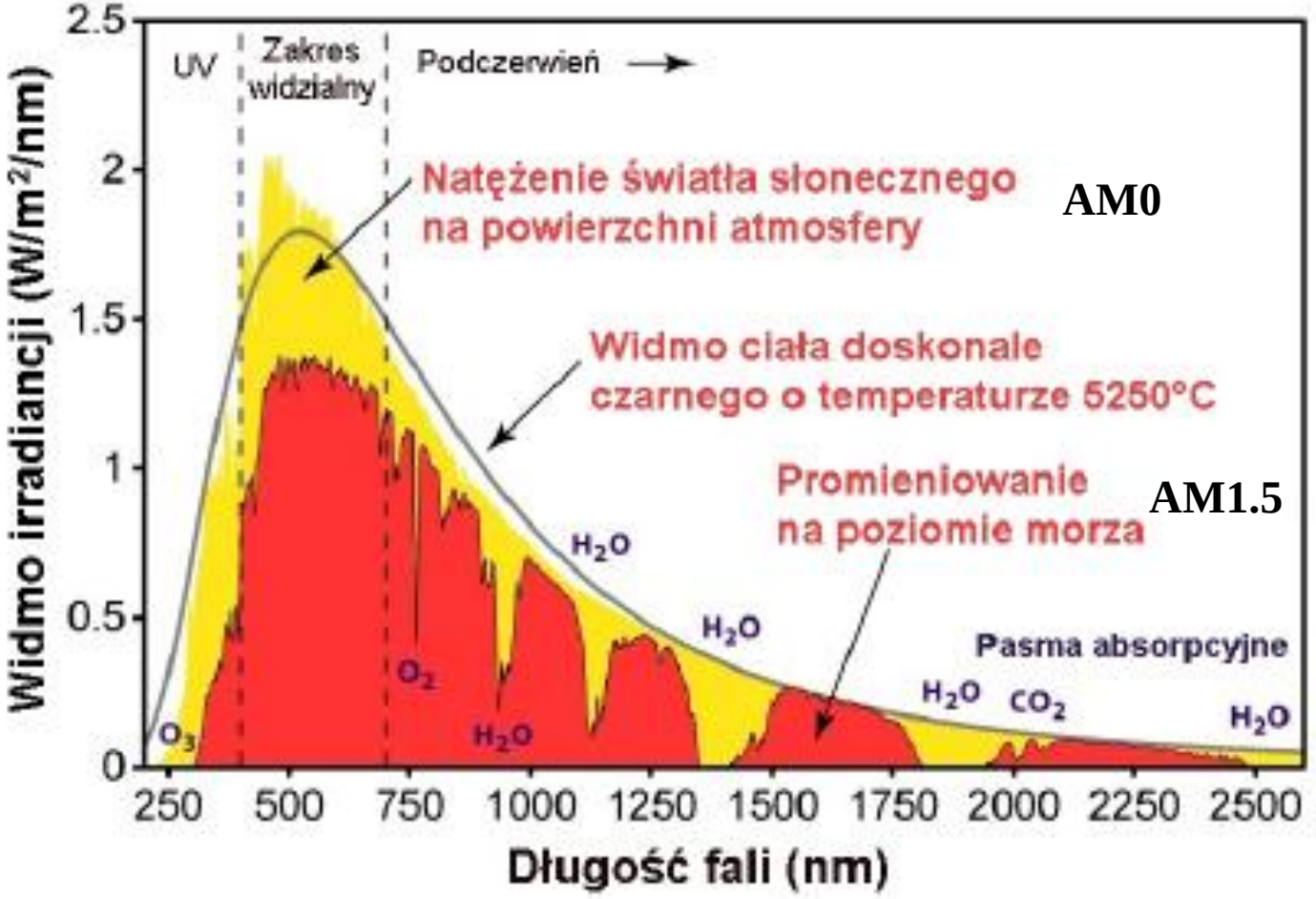
Ponieważ $\Psi_{ph,\lambda} = \frac{P_\lambda}{\frac{hc}{\lambda}}$ **, to**

$$I_{e,\lambda} = \frac{\partial^2 P_\lambda}{\partial A} = \frac{\partial^2 \Psi_{ph,\lambda}}{\partial A} \frac{hc}{\lambda} = \boxed{\Phi_{ph,\lambda} \cdot \frac{hc}{\lambda} = I_{e,\lambda}}$$

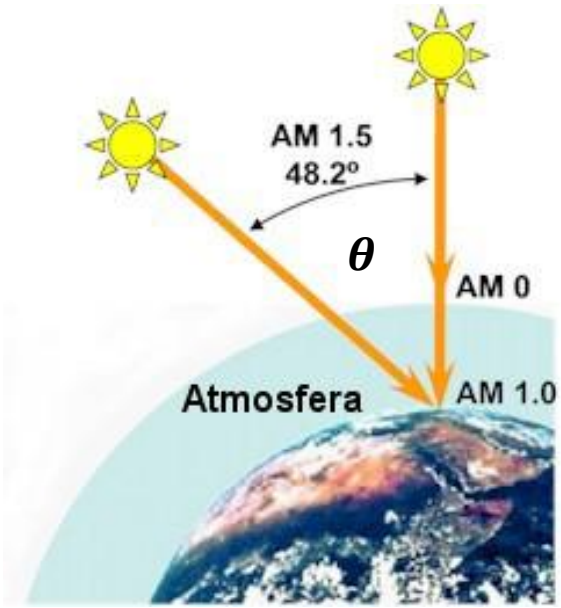
- **Emitancja promieniowania (ang. *radiant emittance*): moc promieniowania <u>emitowanego</u> przez jednostkę powierzchni**

$$\mathrm{M}_e = \frac{\partial^2 P}{\partial A} \quad [\frac{W}{m^2}]$$

Widmo Słońca



Atmosfera – air mass



Air Mass - droga, jaką promień światła słonecznego pokonuje przy przejściu przez atmosferę, znormalizowana do najkrótszej możliwej drogi, tzn. gdy promień światła pada prostopadle do powierzchni Ziemi.

Air Mass uwzględnia spadek mocy promieniowania wynikający z absorpcji przez powietrze i zanieczyszczenia.

AMx – air mass

$$x = \frac{1}{cos\theta}$$

$$AM1 \qquad \frac{1}{cos0°} = 1$$

$$AM1,5 \qquad \frac{1}{cos48,2°} = 1,5$$

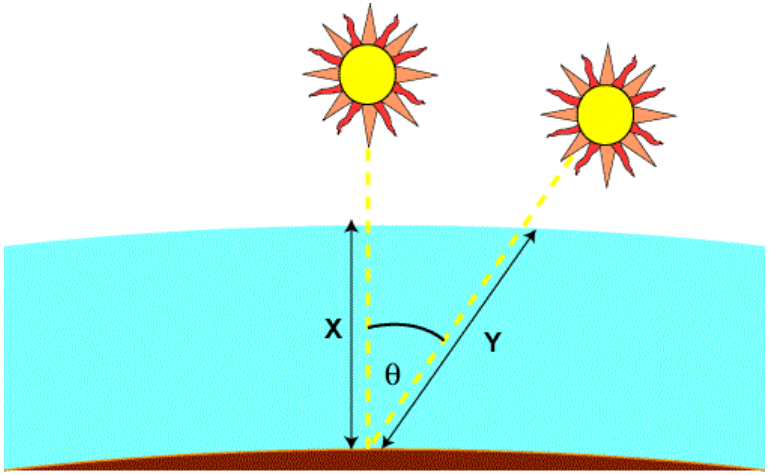
AM#

AM0 – poza atmosferą

AM1 - światło pada prostopadle

Air Mass

$$\# = \frac{1}{\cos\theta}$$

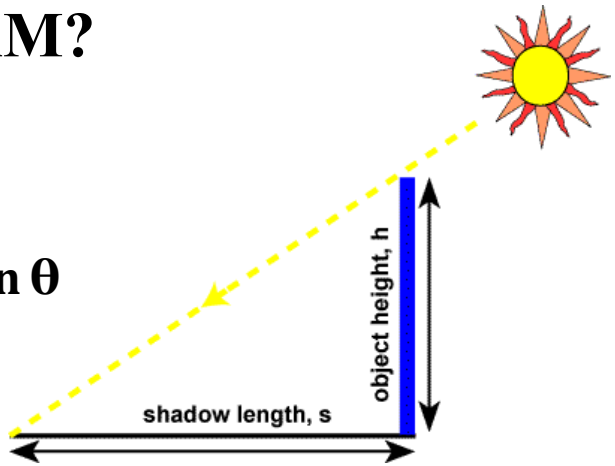


θ – kąt pomiędzy kierunkiem pod którym widoczne jest Słońce (w zenicie) i prostopadłą do powierzchni Ziemi

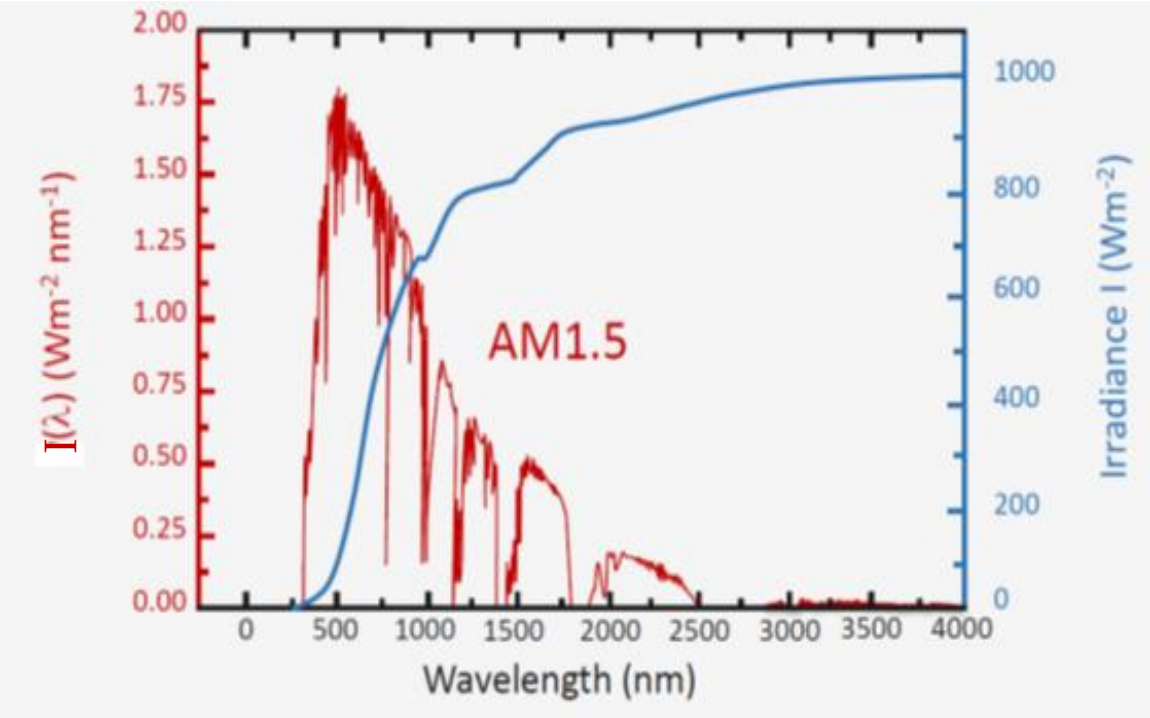
Jak łatwo obliczyć AM?

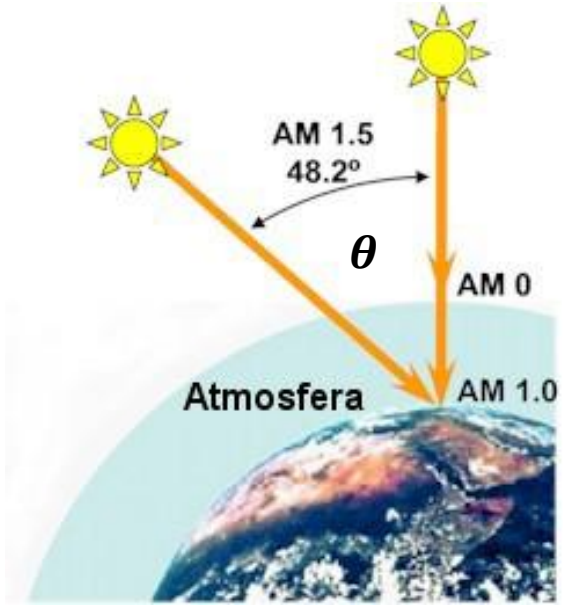
$$\# = \sqrt{1 + \left(\frac{s}{h}\right)^2}$$

$$\frac{s}{h} = \tan\theta$$



Natężenie napromieniowania dla AM1.5





AMx – air mass

$$x = \frac{1}{cos\theta}$$

Całkowite natężenie napromieniowania (irradiance):

$$I = \int I_{ph}(\lambda)\, d\lambda = \int \boldsymbol{\Phi_{ph,\lambda}} \cdot \frac{hc}{\lambda}\, d\lambda$$

$$AM1 \qquad \frac{1}{cos0^\circ} = 1$$

$$AM1,5 \qquad \frac{1}{cos48,2^\circ} = 1,5$$

Jak zamienić widmo I(λ) na Φ(λ)?

- **Dzielimy widmowe natężenie napromieniowania przez odpowiadającą mu energię fotonu. Otrzymujemy rozkład widmowy strumienia fotonów.**

$$\Phi_{ph,\lambda} = \frac{I_{e,\lambda}}{\frac{hc}{\lambda}}$$

- **Całkujemy (sumujemy) po wszystkich długościach fali i otrzymujemy całkowity strumień fotonów.**

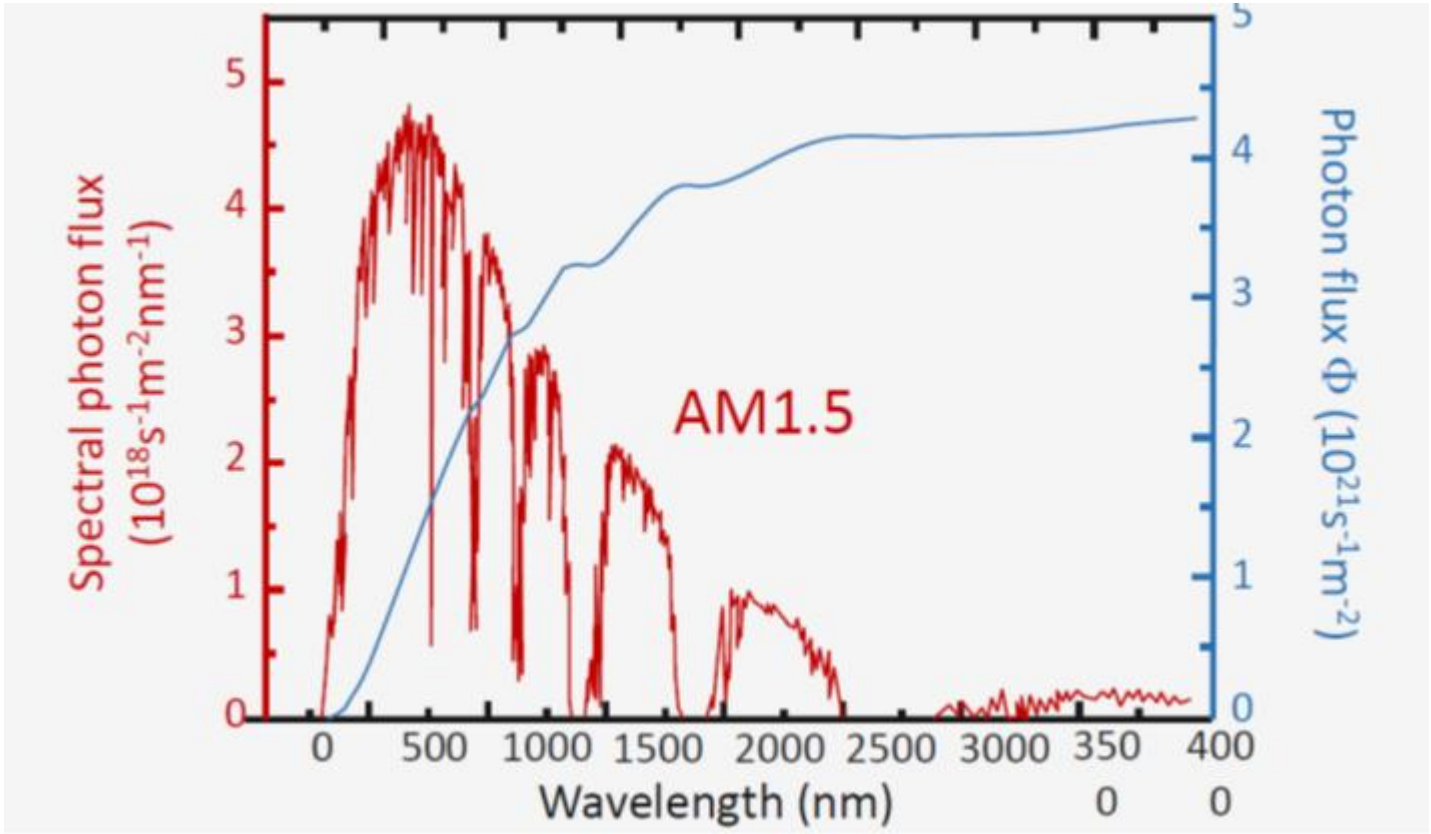
Widmowy i całkowity strumień fotonów dla AM1.5

$$\Phi_{ph}(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{\frac{hc}{\lambda}}$$

Spektralny strumień fotonów = liczba fotonów na jednostkę powierzchni /1 sek $[m^{-2}s^{-1}nm^{-1}]$

Spektralne natężenie promieniowania $[Wm^{-2}nm^{-1}]$

widmo Φ(λ) i Φ

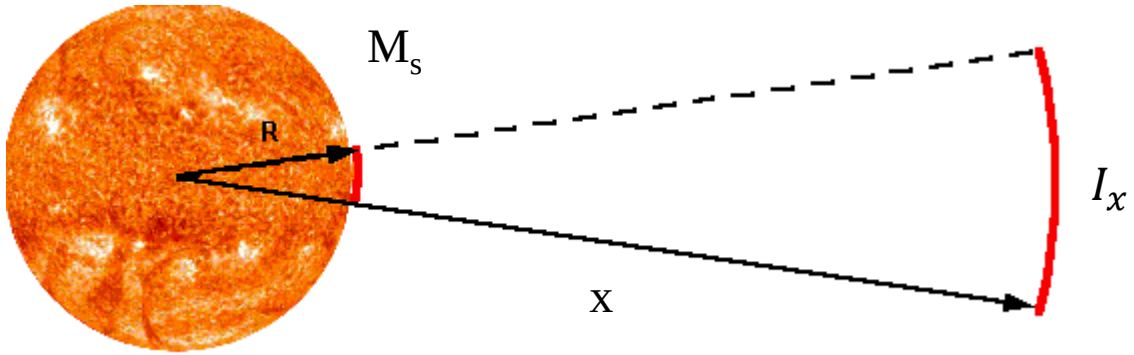


Stała słoneczna

Emitancja Słońca

$$M_S = \sigma T^4$$

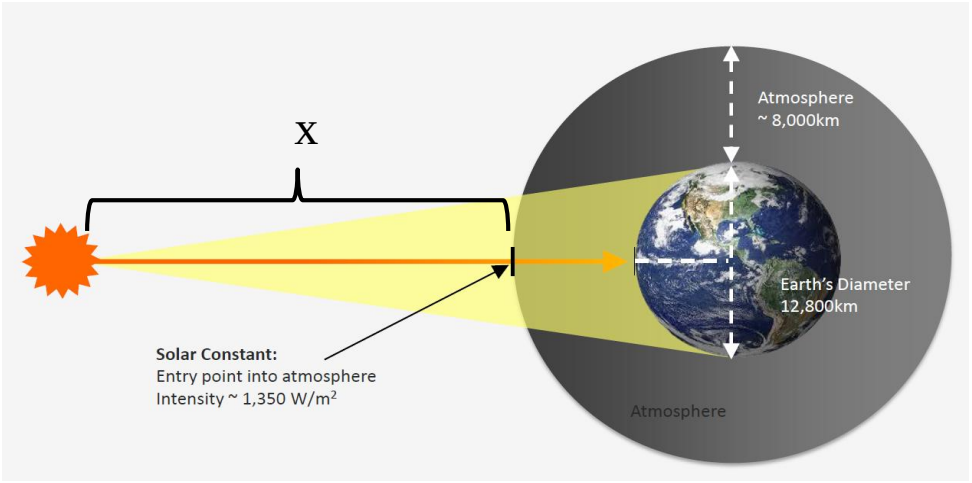
$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$



Natężenie napromieniowania w odległości x od Słońca

$$I_x = \frac{P_S}{4\pi x^2} = \frac{M_S 4\pi R_S^2}{4\pi x^2}$$

$$x = AU - R_z$$



Natężenie napromieniowania poza atmosferą

$$I_Z = \frac{M_S R_S^2}{x^2} = 1350 \frac{W}{m^2}$$

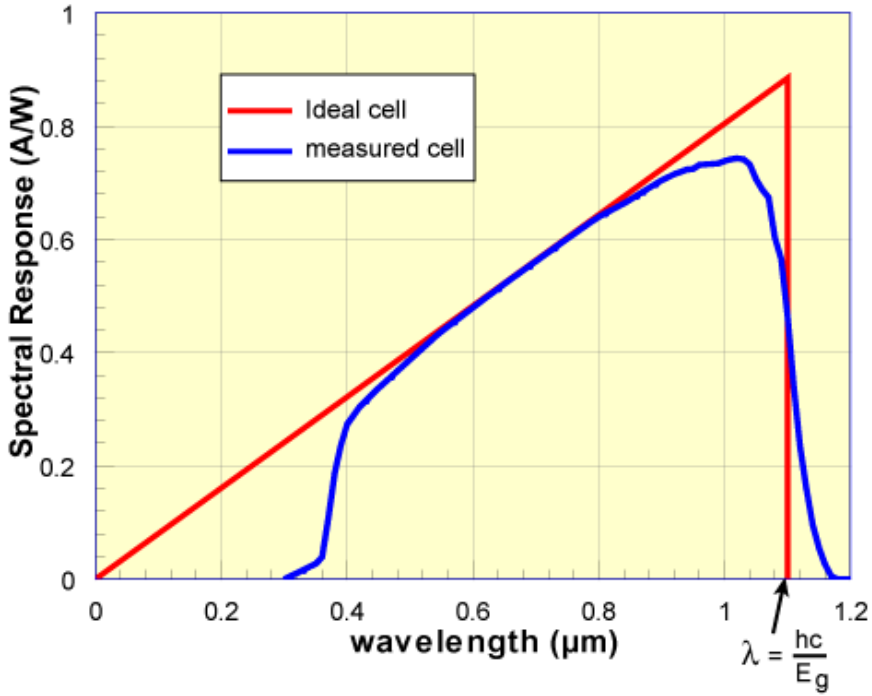
$$R_S = 696000km, \qquad AU = 149600000km, \qquad R_Z = 6370km$$

Czułość widmowa

$I_f(\lambda)$ - **natężenie fotoprądu**

$$S_R(\lambda) = \frac{I_f(\lambda)}{P_\lambda \Delta\lambda} \quad [\frac{A}{W}]$$

$$S_R(\lambda) = \frac{I_f(\lambda)}{P_\lambda \Delta\lambda} = \frac{I_f(\lambda)}{\Psi_{ph,\lambda} hc \Delta\lambda} \cdot \lambda \quad [\frac{A}{W}]$$



gdzie $\Psi_{ph,\lambda} = \frac{P_\lambda}{\frac{hc}{\lambda}}$ $[s^{-1}m^{-1}]$

to liczba fotonów o energii hc/λ emitowanych przez źródło o mocy P_λ [W/m] w jednostce czasu (ang. *spectral photon flow*)

Zewnętrzna wydajność kwantowa

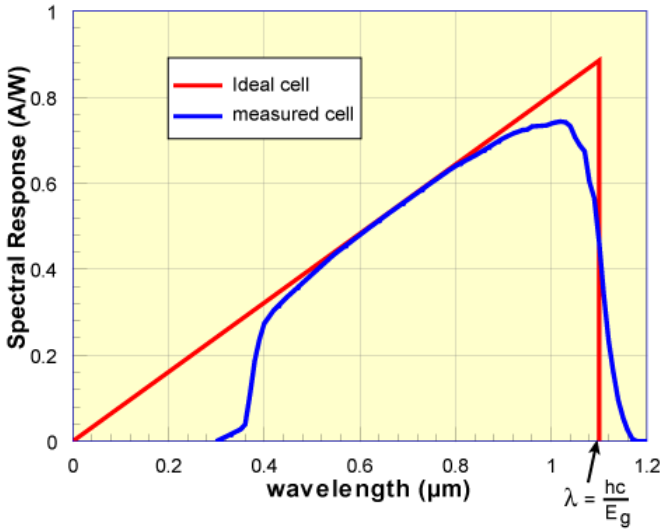
Zewnętrzna wydajność kwantowa - stosunek liczby elektronów do liczby fotonów

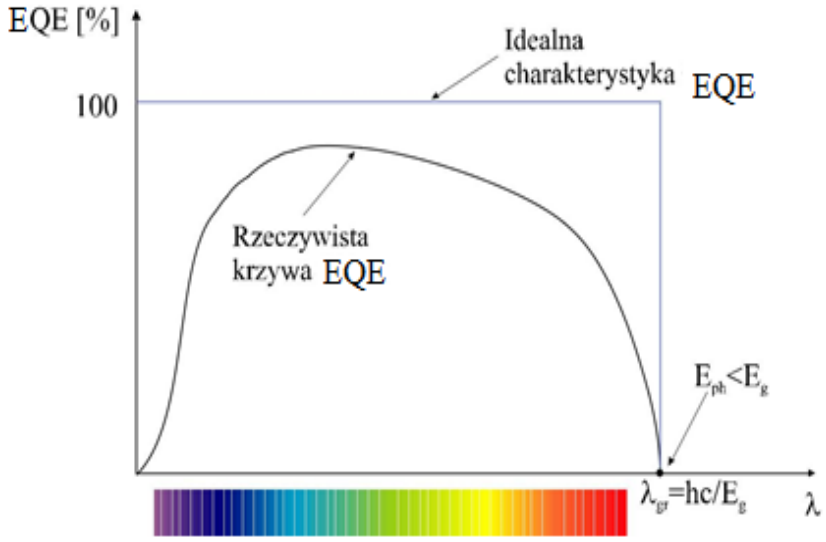
$$EQE(\lambda) = \frac{I_f(\lambda)}{q\Psi_{ph,\lambda}\Delta\lambda}$$

$I_f(\lambda)$ **- natężenie fotoprądu** $\quad I_f(\lambda) = EQE(\lambda) q\Psi_{ph,\lambda}\Delta\lambda$

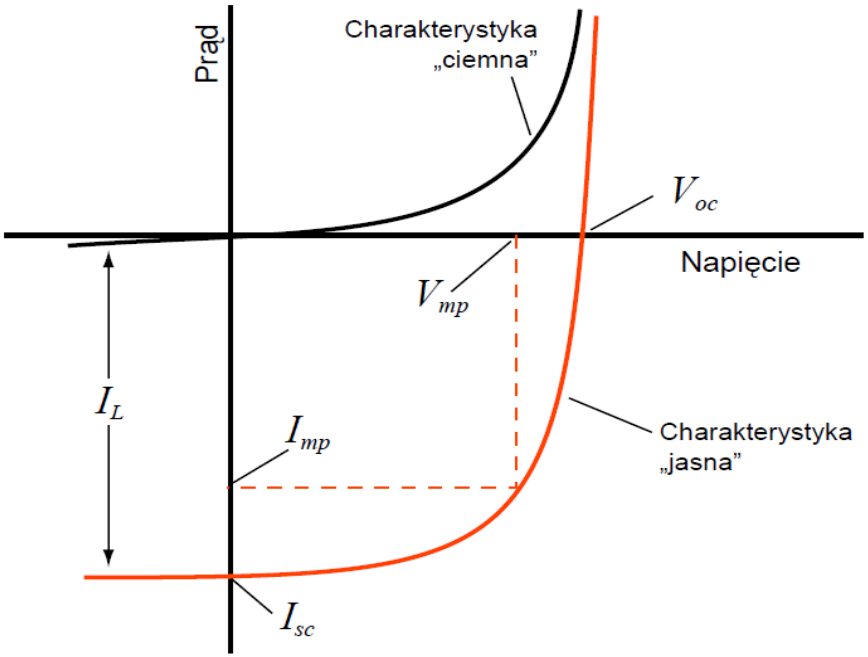
Ponieważ $\quad S_R(\lambda) = \frac{I_f(\lambda)}{\Psi_{ph,\lambda} hc\Delta\lambda} \cdot \lambda$ ⟹

$$EQE(\lambda) = \frac{I_f(\lambda)}{q\Psi_{ph,\lambda}\Delta\lambda} = \frac{S_R(\lambda)hc}{q\lambda} \quad [\%]$$





Sprawność ogniwa



Współczynnik wypełnienia

$$\mathbf{FF = \frac{j_{mp} \cdot V_{mp}}{j_{sc} \cdot V_{OC}}}$$

W przypadku idealnej diody

$$\boldsymbol{FF = \frac{v_{OC} - \ln(v_{OC} + 0.72)}{v_{OC} + 1}} \quad *$$

gdzie $\boldsymbol{v_{OC} = V_{OC} \frac{q}{kT}}$

(równanie * jest słuszne, gdy $v_{OC} > 10$)

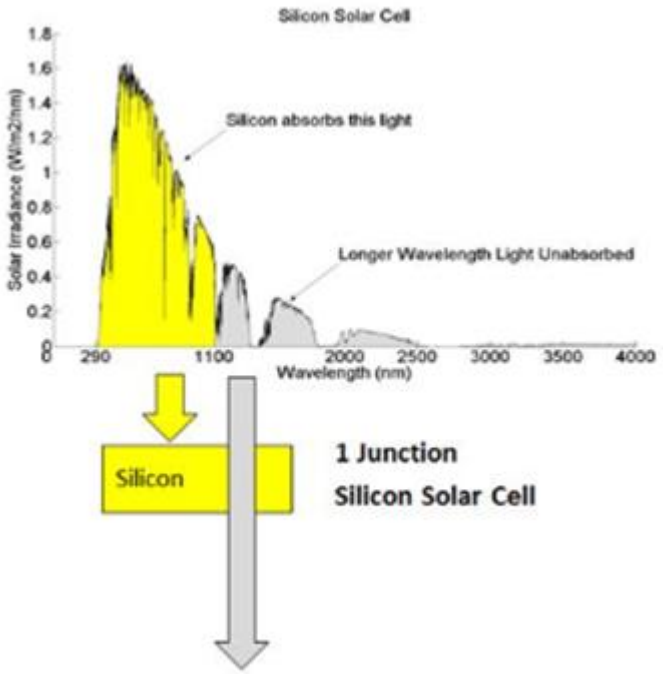
Sprawność

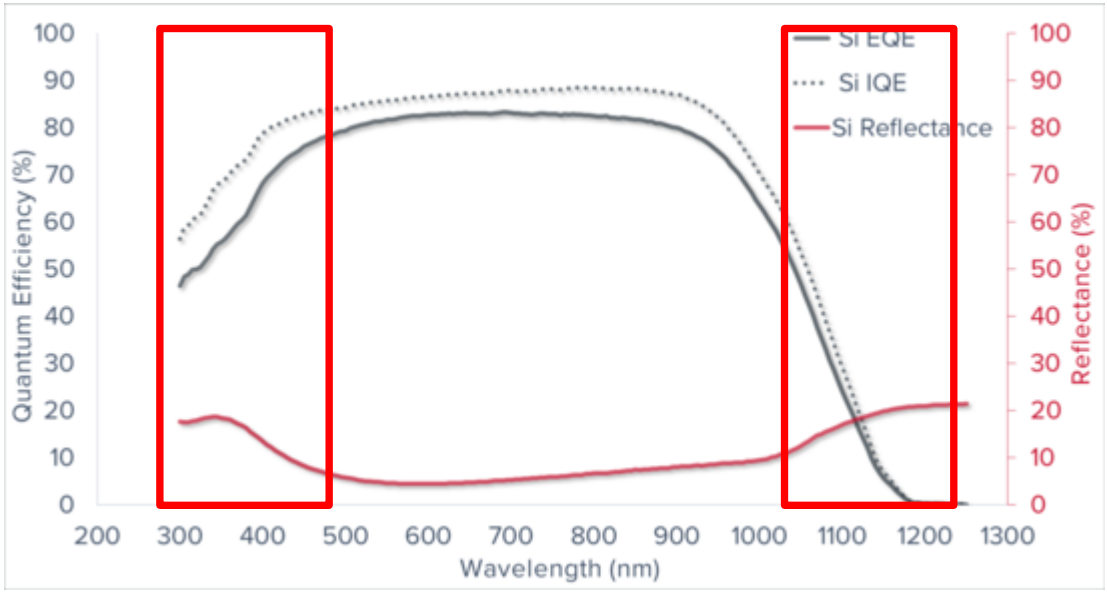
$$\boldsymbol{\eta = \frac{P_{max}}{I} = \frac{j_{mp} \cdot V_{mp}}{I} = \frac{FF \cdot j_{sc} \cdot V_{OC}}{I}}$$

I – natężenie promieniowania padającego na ogniwo ($AM1.5, 1000 W/m^2$)

Straty EQE

Fale krótkie – fotony są absorbowane zanim dotrą do warstwy absorbera.
Fale długie – głębokość penetracji jest większa od grubości absorbera i fotony opuszczają absorber zanim zostaną zaabsorbowane.





$$IQE = \frac{EQE}{1 - R}$$

EQE - przykład

Figure 1: Schematical view of a p-i-n cell

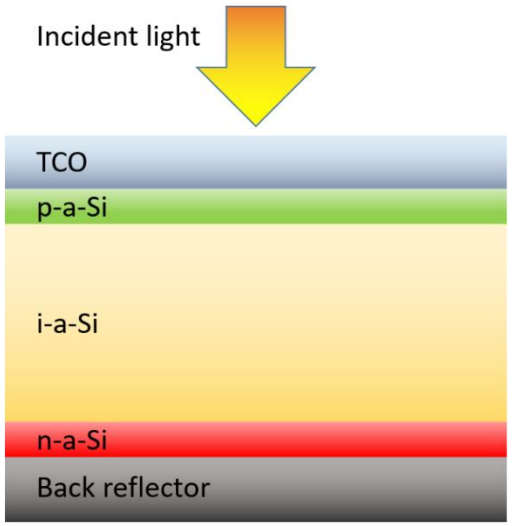
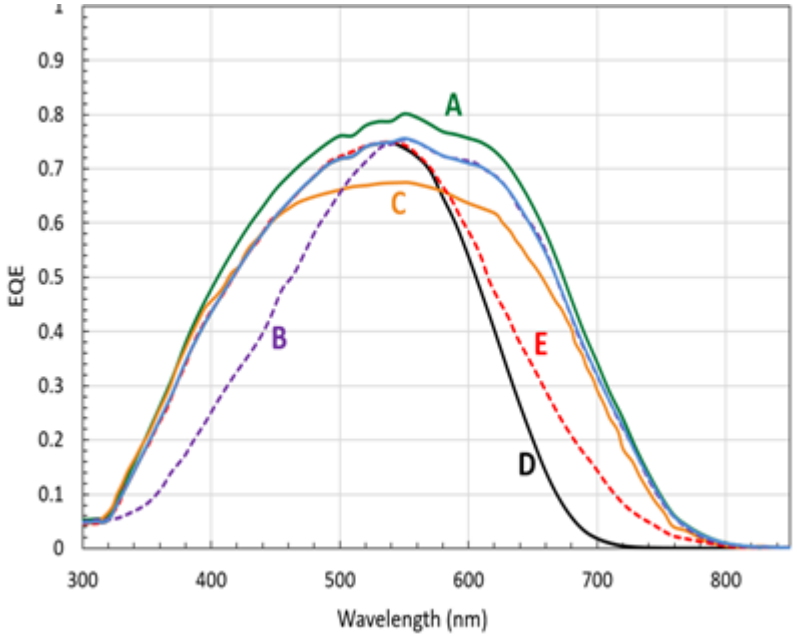


Figure 2: EQE curves of various p-i-n cells under varying condition



Niebieski wykres – wyjściowa EQE dla tej diody.
A – EQE zmierzona przy polaryzacji zaporowej
B – grubość obszaru p jest większa
C – degradacja właściwości elektrycznych absorbera
D – absorber zastąpiono materiałem o szerszej przerwie wzbronionej
E – grubość warstwy n jest większa

Test 1

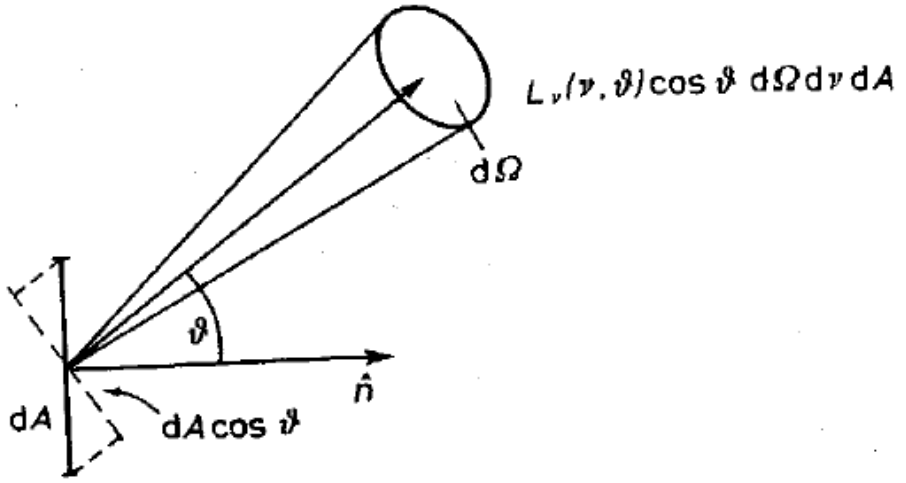
Ogniwo A jest wykonane na bazie półprzewodnika o Eg=1eV, ogniwo B – na bazie półprzewodnika o Eg=1.7eV. Załóż, że jedyne straty to straty optyczne. Które stwierdzenie jest prawdziwe?

a) Straty związane z brakiem absorpcji są większe w ogniwie A niż w ogniwie B.
b) Straty związane z wydzielaniem ciepła są większe w ogniwie A niż w ogniwie B.
c) Rekombinacja promienista jest bardziej prawdopodobna w ogniwie B.

Prawo Lamberta

Rozpatrzmy jednostkowy element powierzchni dA źródła promieniowania o gęstości widmowej luminancji $L_\nu(\vartheta,\nu)$. Wartość L_ν zależy od kąta między kierunkiem obserwacji a normalną n do powierzchni źródła.

$$L_\nu(\vartheta,\nu) = \frac{\partial L}{\partial \nu} \quad [\frac{W}{m^2 sr Hz}]$$



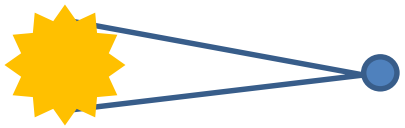
Powierzchnia źródła widziana pod kątem ϑ jest równa $dA\cos\vartheta$. Moc promieniowania dP emitowana przez to źródło do jednostkowego kąta bryłowego $d\Omega$:

$$dP = L_\nu(\vartheta,\nu)\cos\vartheta d\Omega d\nu dA$$

Przykład I. Luminancja Słońca

Przy padaniu normalnym, bez odbicia i absorpcji w atmosferze, do $1m^2$ powierzchni Ziemi dociera promieniowanie o natężeniu $I_z = 1.35kW/m^2$ (stała słoneczna).
Ze względu na symetrię możemy traktować dA' jako źródło a dA jako odbiornik.

$$R_S = 696000km \quad AU = 149600000km \quad R_Z = 6370km$$



$$\Omega_S = \pi\left(\frac{R_S}{AU - R_Z}\right)^2 \approx 68.5\mu sr$$

$$dP = L\, d\Omega dA$$

$$L_s = \frac{dP}{dA d\Omega} = \frac{I_z}{\Omega_S} = \frac{1.35 \cdot 10^3 W}{68.5 \cdot 10^{-6} m^2 sr} = 2 \cdot 10^7 W/(m^2 sr)$$

Przykłady

- **Oko reaguje na luminancję 10^{-4} W/(m^2sr)**
- **Ból oka i możliwość jego uszkodzenia – 10^6W/(m^2sr).**
- **Niebo w noc bezksiężycową - 10^{-4} W/(m^2sr).**
- **Kartka papieru przy oświetleniu ok. 30 lx - 10 W/(m^2sr).**
- **Włókno żarówki – 10^6 W/(m^2sr).**

Przykład II. Luminancja lasera He-Ne

Załóżmy, że moc wyjściowa 1mW jest emitowana przez 1 mm^2 powierzchni zwierciadła w kącie płaskim 4', co odpowiada kątowi bryłowemu 10^{-6}sr. Maksymalna luminancja w kierunku rozchodzenia się wiązki laserowej jest więc równa:

$$L_{He-Ne} = \frac{10^{-3}}{10^{-6}10^{-6}}\frac{W}{m^2 sr} = 10^9 \frac{W}{m^2 sr} \qquad \Omega = \pi(sin2')^2 = 10^{-6}\text{sr}$$

Porównując luminancję Słońca i lasera: $\dfrac{L_{He-Ne}}{L_s} = \dfrac{10^9}{2 \cdot 10^7} = 50$

Promieniowanie jednomodowego lasera He-Ne jest skupione w szerokości widmowej ok. 1MHz, więc:

$$L_\nu = 10^9/10^6 = 10^3\ W/(m^2 sr Hz)$$

Promieniowanie Słońca jest skupione w szerokości 10^{15}Hz, co daje:

$L_{\nu s} = 2 \cdot 10^7/10^{15} = 2 \cdot 10^{-8} W/(m^2 sr Hz)$ **stąd** $\dfrac{L_\nu}{L_{\nu s}} = 5 \cdot 10^{10}$

Źródło lambertowskie

Dla źródła izotropowego, zwanego lambertowskim, luminancja nie zależy od kąta.

- **Dla takiego źródła, o powierzchni emitującej dA, moc promieniowania padającego prostopadle ($\cos\vartheta=1$) na detektor rozciągły, widoczny ze źródła pod kątem aperturowym u wyraża się wzorem**:

$$P = \pi L \sin^2 u dA$$

- **Między emitancją (całkowitą zdolnością emisyjną) M źródła spełniającego prawo Lamberta a jego luminancją L, zachodzi relacja:**

$$M = \pi L$$

- **Związek między gęstością energii ρ i emitancją M źródła Lamberta**

$$M = \frac{\rho c}{4}$$