

Ogniwa fotowoltaiczne I

Prof. dr hab. Ewa Popko
Katedra Technologii Kwantowych
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

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 (IMIE, NAZWISKO, ADRES E-MAIL)

Ewa Popko ewa.popko@pwr.edu.pl

Fotowoltaika

Druga największa elektrownia fotowoltaiczna na świecie rozpoczęła działalność. Jej wydajność plasuje się na poziomie 2,2 gigawata (GW).

Elektrownia fotowoltaiczna, która ruszyła w Qinghai, pozostaje nieco w tyle pod względem wydajności w generowaniu mocy za indyjskim parkiem solarnym Bhadla, zdolnym do generowania 2,7 GW.

Chiny

Indie

Emiraty Arabskie



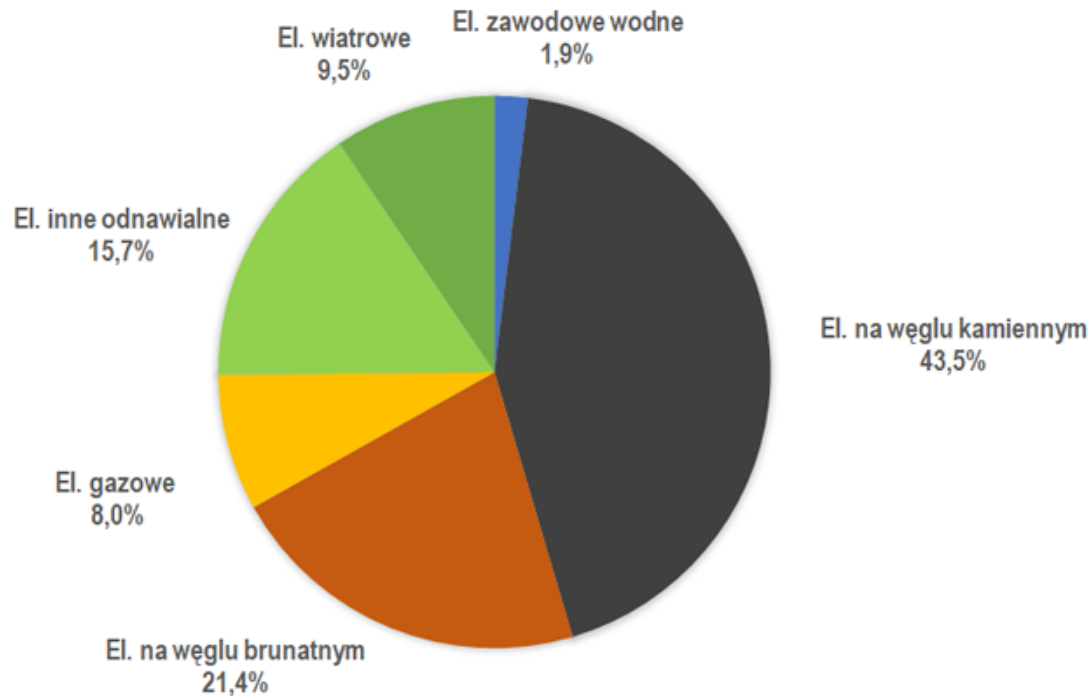
Fotowoltaika w Polsce

Największą farmą fotowoltaiczną w Polsce jest farma w Brudzewie, zbudowana w 180 dni na terenie po byłej kopalni odkrywkowej węgla brunatnego przez konsorcjum firm eSoleo i PAK Serwis. Składa się ona z 155 tys. modułów o łącznej mocy 70 MW, której przeznaczeniem jest posłużyć do produkcji zielonego wodoru. To jednak tylko początek tej inwestycji, ponieważ jest ona już teraz rozbudowywana, a ambitnym celem jest osiągnięcie przez nią aż 1000 MW mocy.



Rynek fotowoltaiczny w Polsce

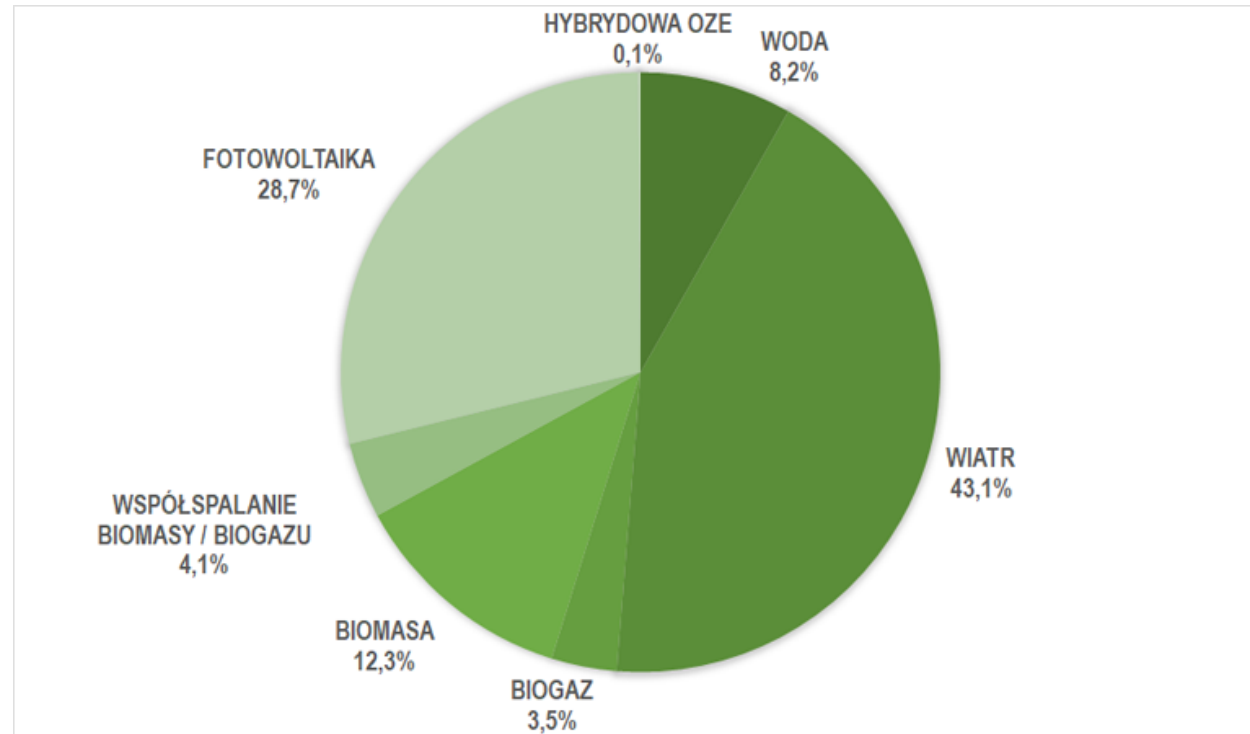
Lipiec 2023:
Zapotrzebowanie 12,4 TWh
Zużycie 13,13 TWh



Lipiec 2023

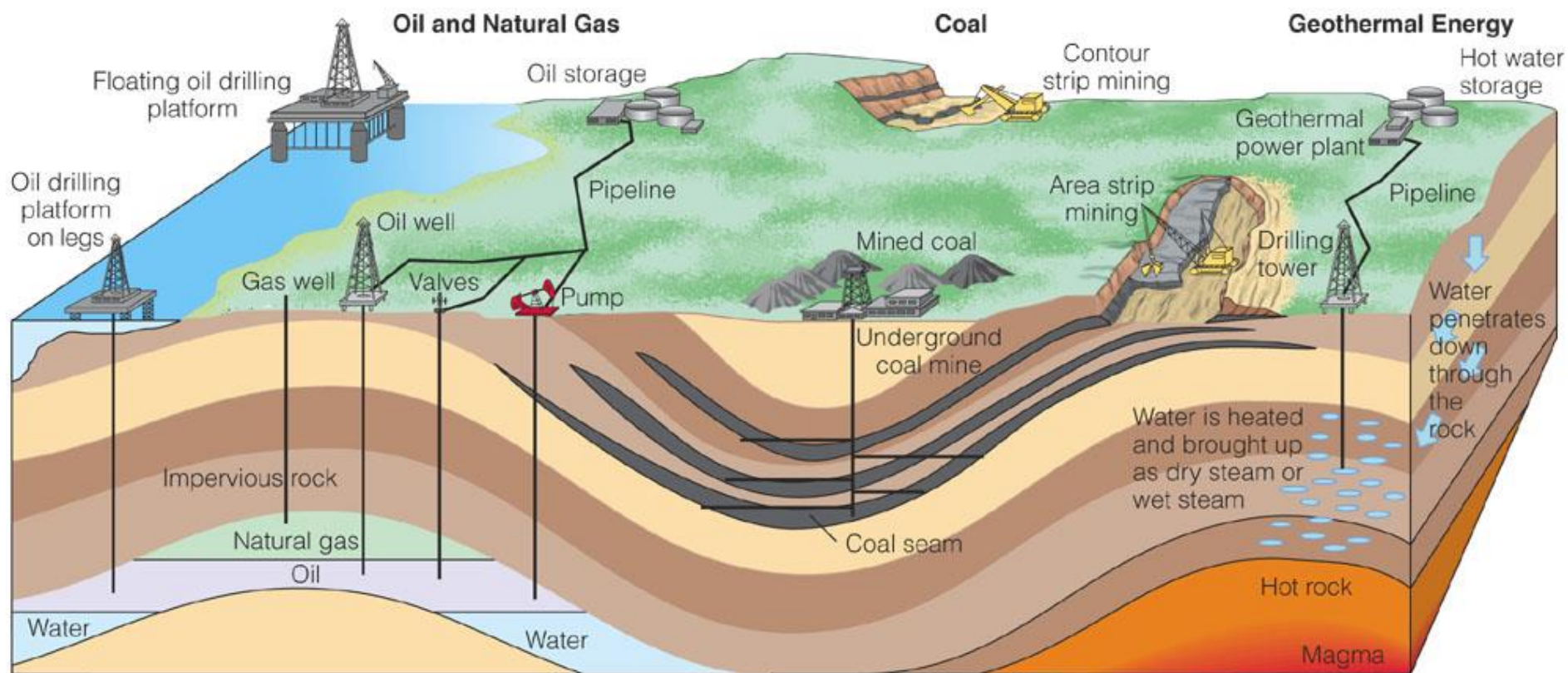
Energia OZE w Polsce

W kwietniu 2023 r. polskie elektrownie wyprodukowały 12,9 TWh energii elektrycznej, z tego 3,5 TWh pochodziło z instalacji odnawialnych źródeł energii.



04. 2023

Konwencjonalne źródła energii



© 2005 Brooks/Cole - Thomson

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

Konwencjonalne źródła energii - węgiel



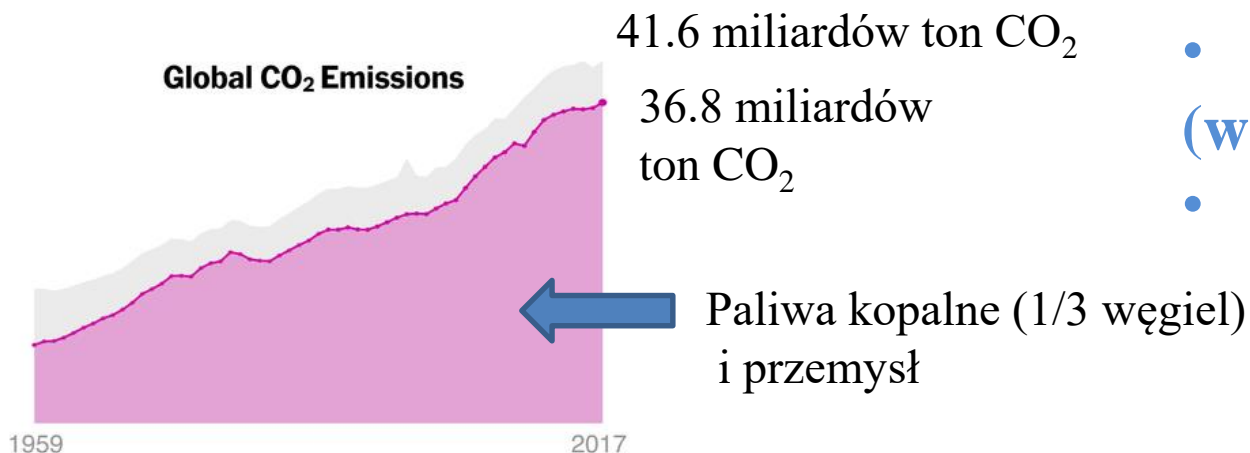
RWE Kolonia – elektrownia węglowa

Zalety

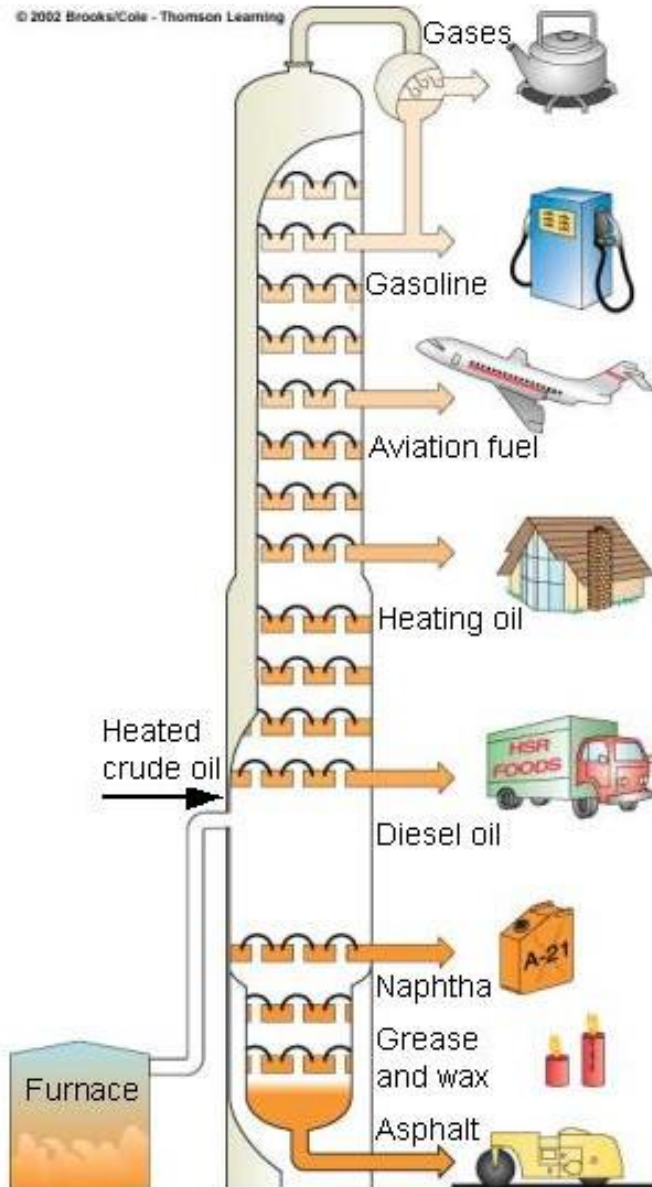
- **Opanowana technologia**
- **Niskie koszty (dotowana!)**
- **Wysoka wydajność**

Wady

- **Skazenie środowiska (woda, powietrze)!!!**
- **Emisja CO₂**



Ropa naftowa i gaz



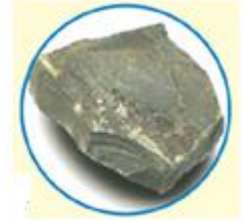
Zalety

- 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 CO₂**

Gaz

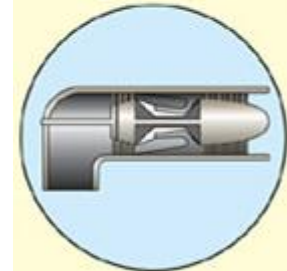
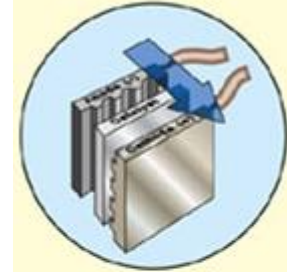
- W 50-90% - metan
- Najczystsze źródło kopalne
- Zasoby – ok. 200 lat

Zalety

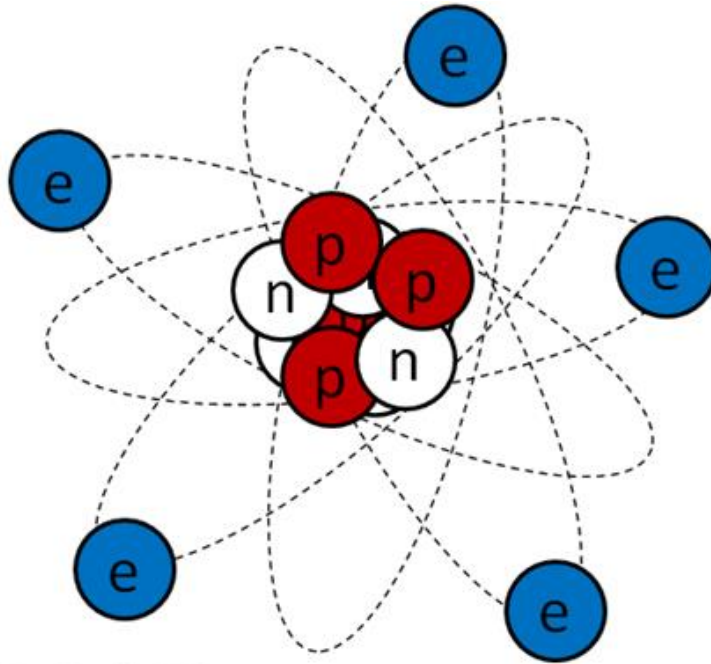
- Tani, wydajny, niska emisja CO₂, łatwy transport rurociągami

Wady

- Konieczna sieć rurociągów
- Metan, który się pali emituje CO₂ !
- Nieszczelności - wyciek metanu
- Niebezpieczny – grozi wybuchem



Energia jądrowa



Matt Strassler 2012

Atom

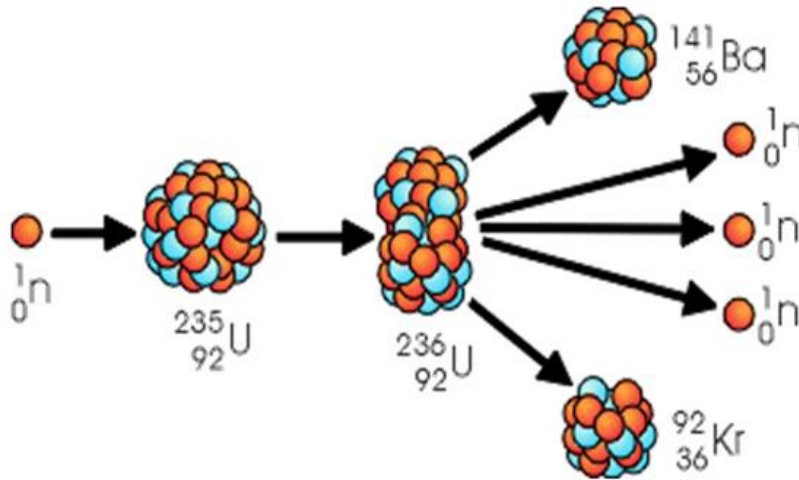
e - elektron

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 $\Delta m = 1\text{g}$:

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

Reaktor jądrowy – kontrolowana łańcuchowa reakcja jądrowa

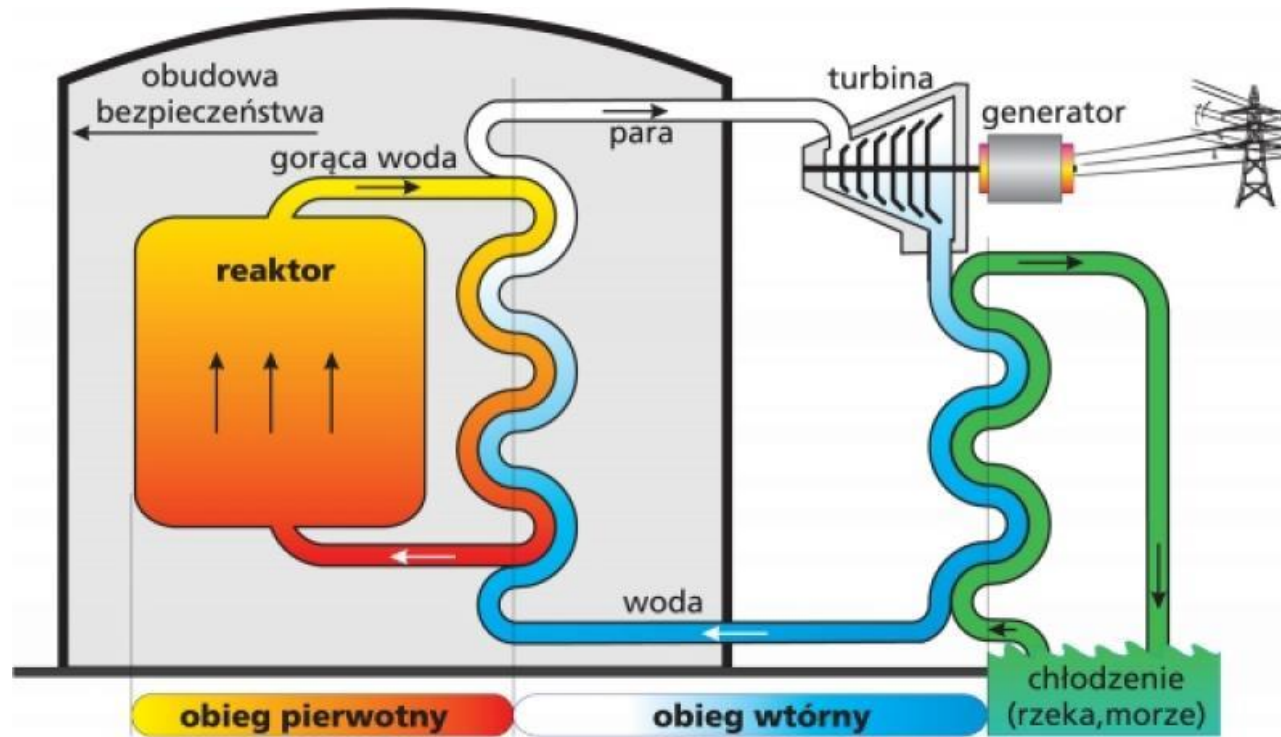
Zalety

- **B. wydajne źródło energii**
- **Emituje ok. 1/6 CO₂ emitowanego przez węgiel**

Wady

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

Elektrownia jądrowa

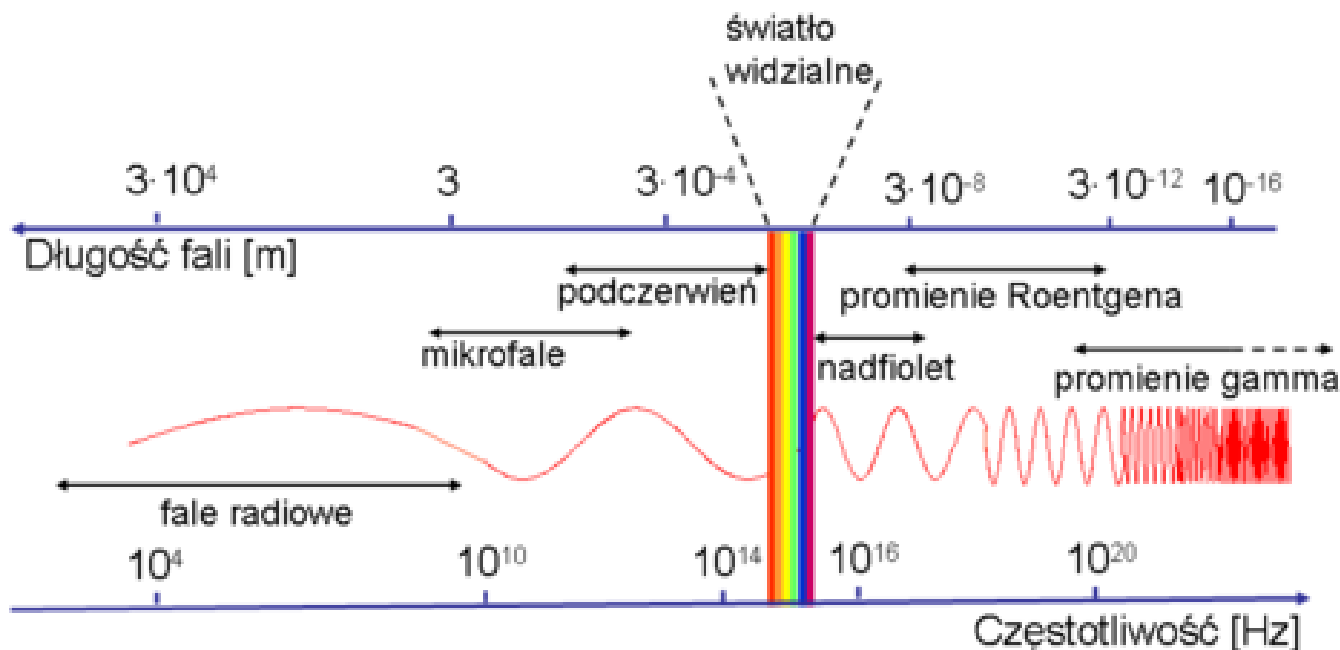


W obiegu pierwotnym produkowana jest gorąca, sprężona para.

W obiegu wtórnym – para rozpręża się i obraca turbinę, napędzając generator prądu.

Dlaczego boimy się emisji CO₂ ?

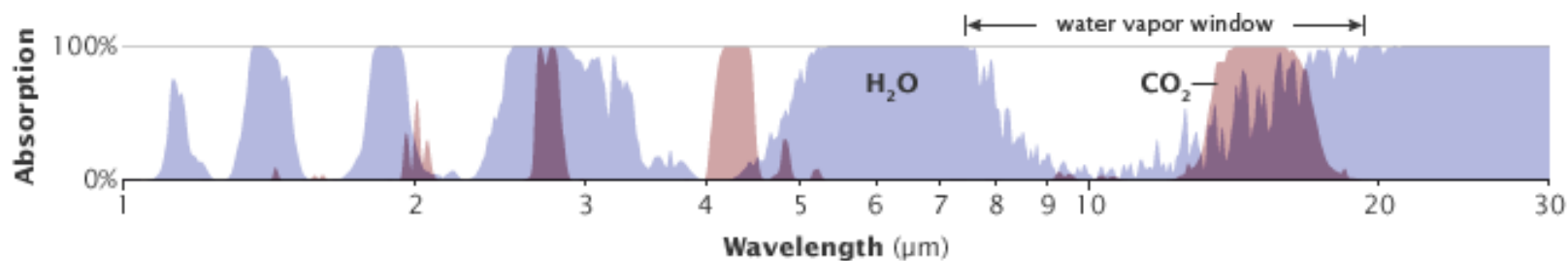
Widmo promieniowania elektromagnetycznego



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

Dlaczego boimy się emisji CO₂ ?

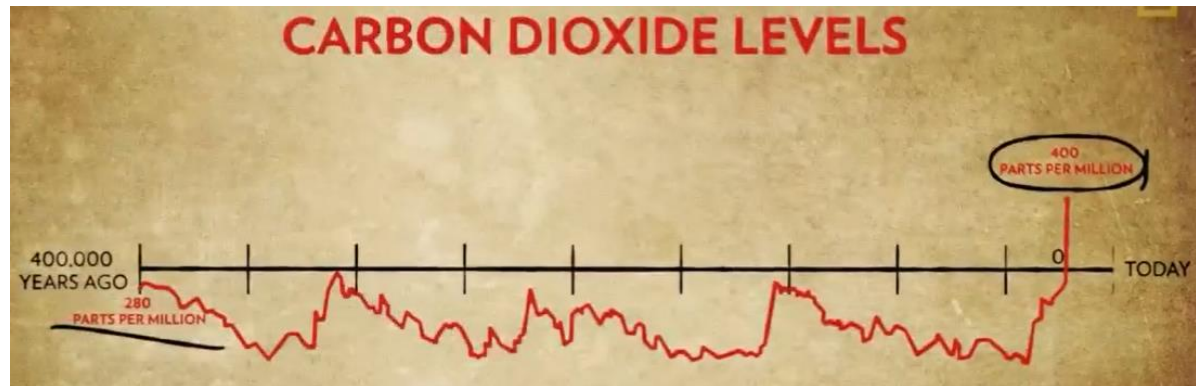
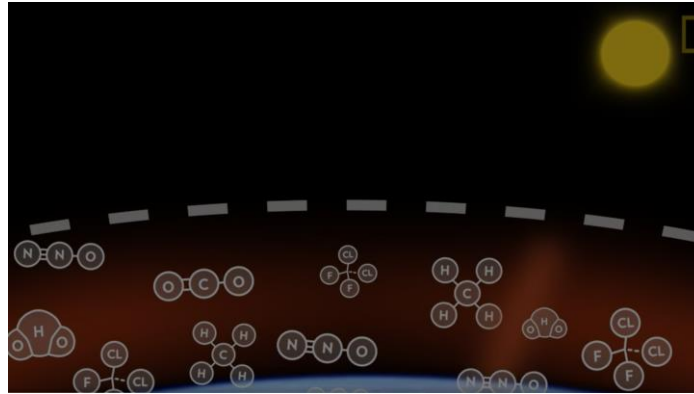
Powierzchnia Ziemi emituje 17% promieniowania słonecznego, docierającego do jej powierzchni w postaci promieniowania podczerwonego. Jednakże poza atmosferę wydostaje się jedynie 12% tego promieniowania. Pozostałe 5 do 6 %, jest absorbowane przez cząsteczki gazów „cieplarnianych”. Są to: para wodna, dwutlenek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



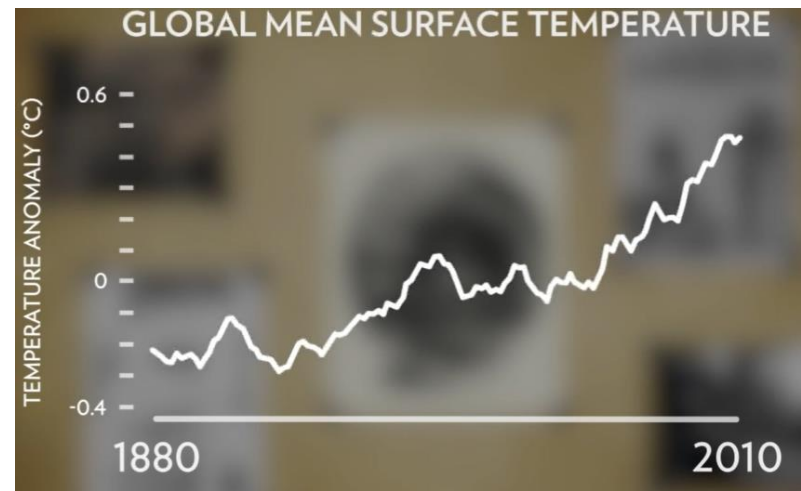
CO₂ absorbuje energię w zakresie fal dłuższych (12–15μm) częściowo zamykając okno przez które ciepło wypromieniowane przez powierzchnię Ziemi mogło by opuścić Ziemię. (NASA, Robert Rohde) – efekt cieplarniany

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 .



Konsekwencje globalnego ocieplenia

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. $\frac{3}{4}$ 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)



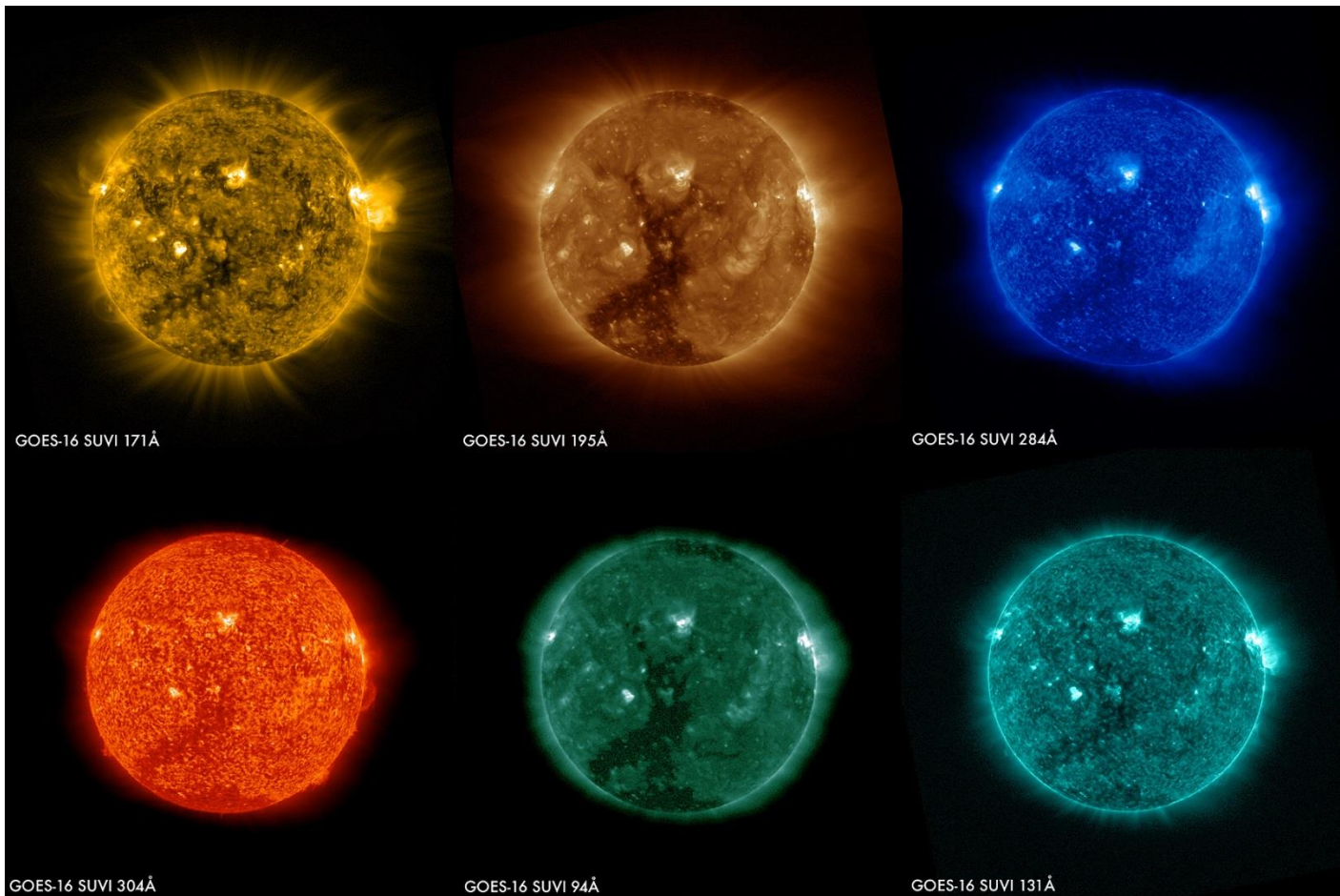
Hydroelektrownie



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 $3.2 \cdot 10^{27} kWh/rok$

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

Ludność – 8 miliardów

Moc przypadająca na osobę: $22000 kW/osobę$

Zużycie przypadające na osobę: $2.3 kW/osobę$

Energia słoneczna

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

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

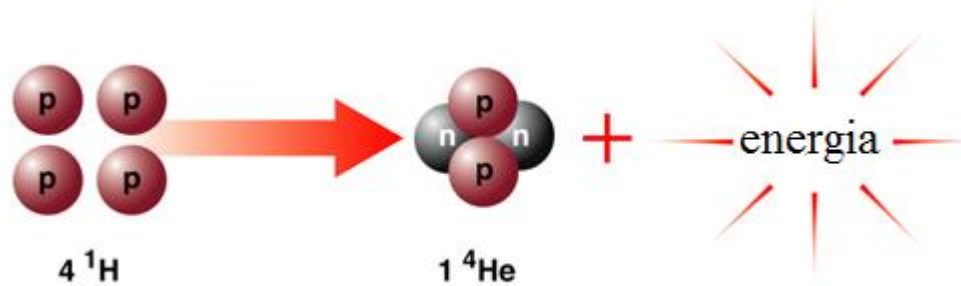
$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

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

$$1 \text{ cal} = 4.2 \text{ J}$$

Synteza termojądrowa na Słońcu

Cykl p-p

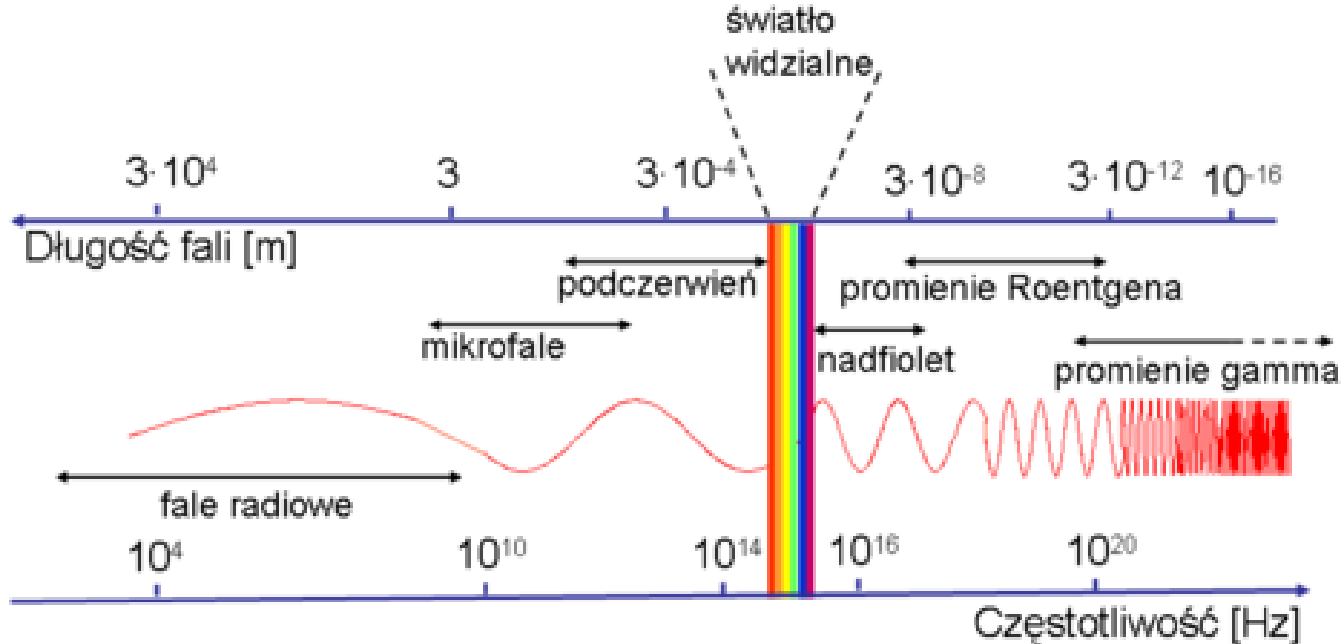


- Synteza 1 kg wodoru jest równoważna ilości 7.1 grama masy zamienionej na energię:

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

- 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

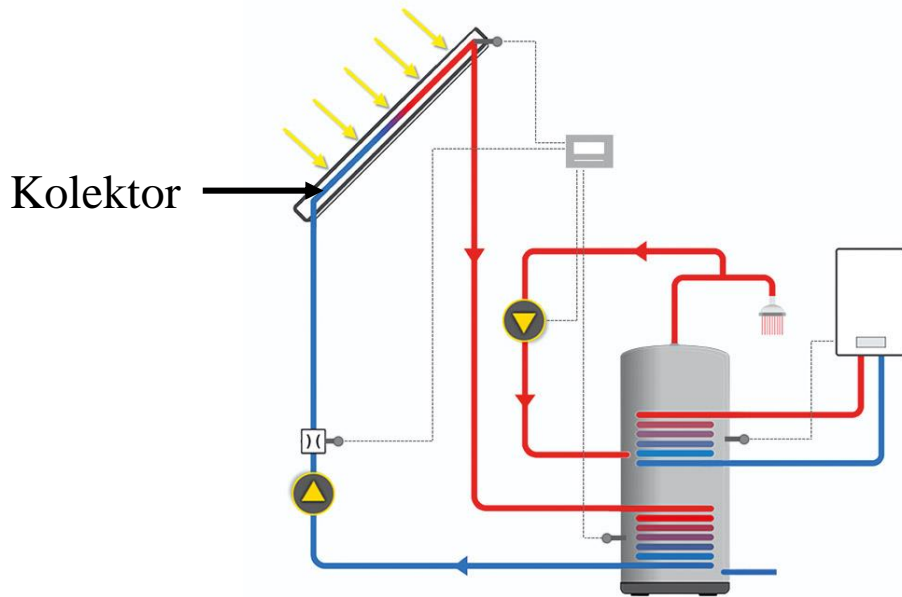


Światło widzialne – długość fali $0.38\mu\text{m} < \lambda < 0.76\mu\text{m}$

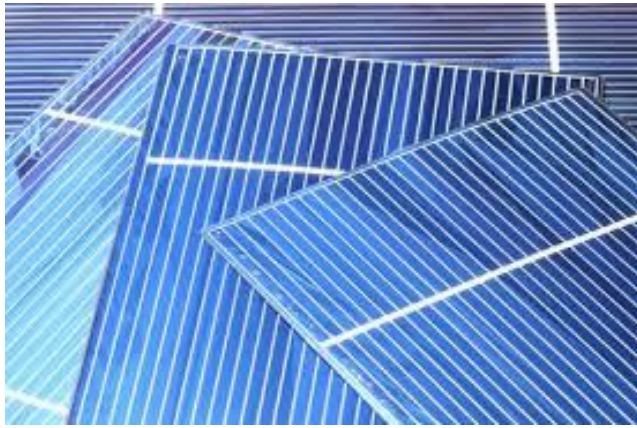
W instalacjach solarnych wykorzystywany jest zakres fal podczerwonych.

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

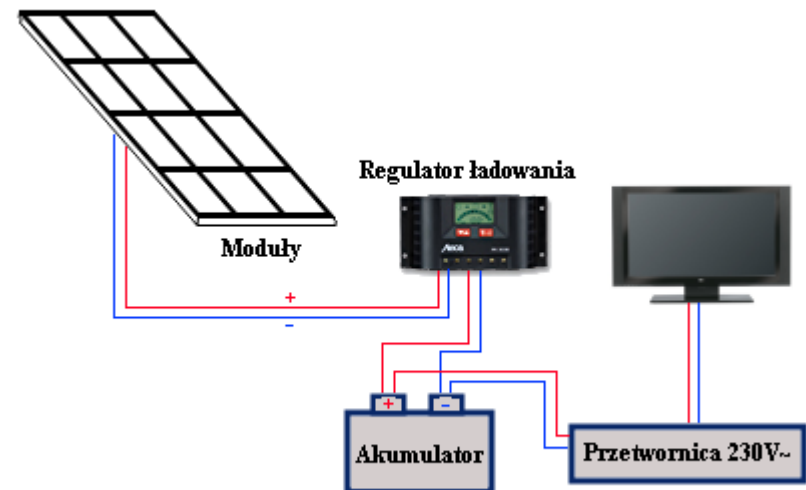
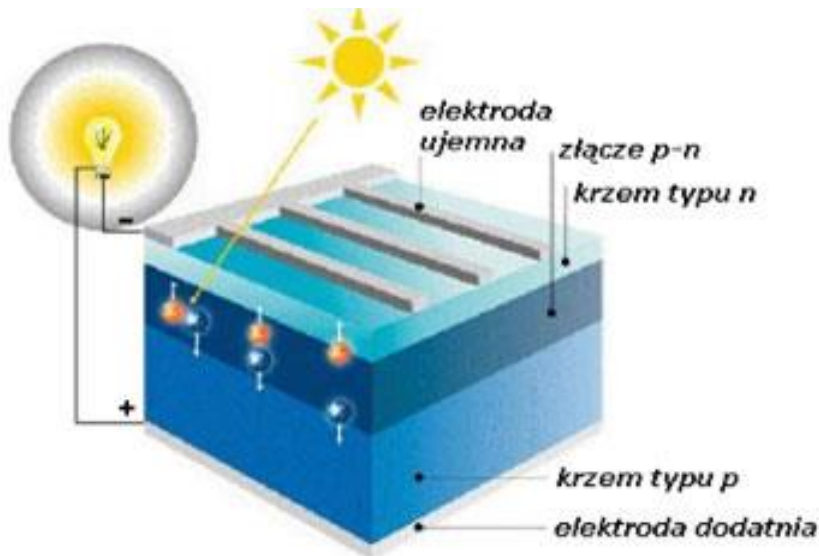


Jest to metoda wytwarzania energii elektrycznej poprzez konwersję promieniowania słonecznego bezpośrednio na prąd elektryczny. Konwersja odbywa się w półprzewodnikach, w których zachodzi efekt fotowoltaiczny.

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



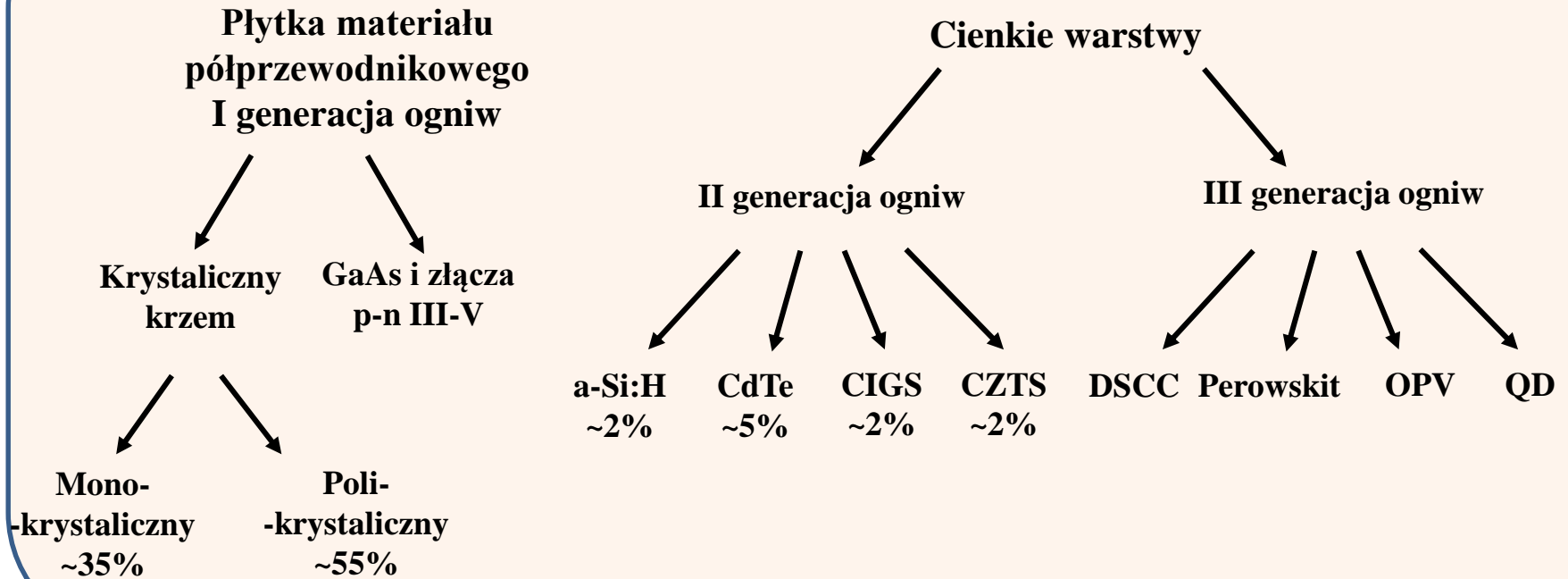
Ogniwo fotowoltaiczne



- 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

Technologie PV



Technologie PV – krystaliczny Si

						VIIIA	
1 H		IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	2 He 4.003
		5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.183
		13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.064	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
IB	IIB						
29 Cu 63.54	30 Zn 65.37	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.909	36 Kr 83.80
47 Ag 107.870	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.30
79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.19	83 Bi 208.980	84 Po (210)	85 At (210)	86 Rn (222)

1st generation
c-Si

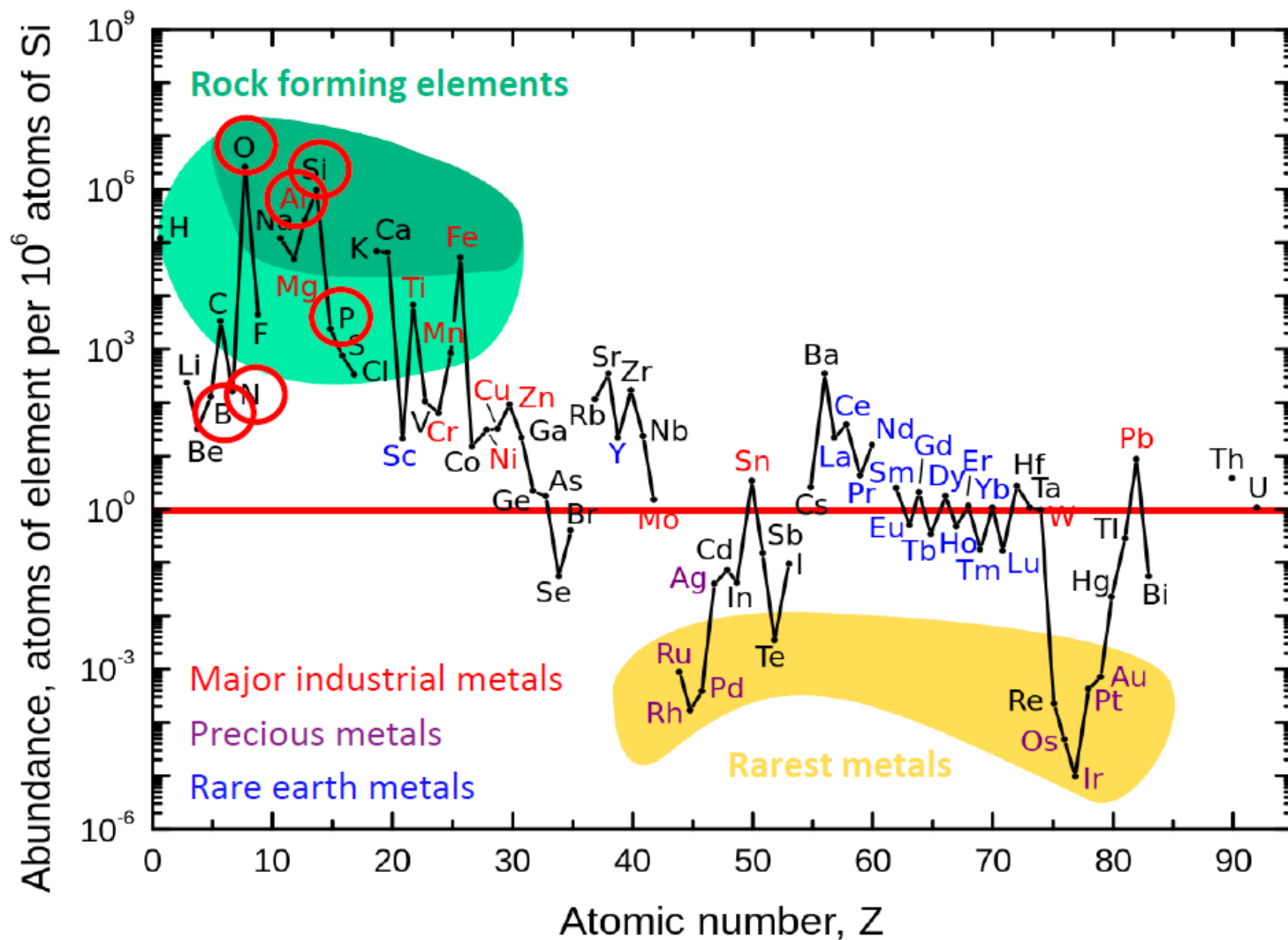


Conductors

Semi-conductors

Insulators

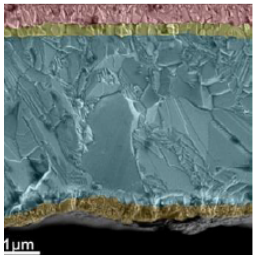
Występowanie pierwiastków w skorupie ziemskiej



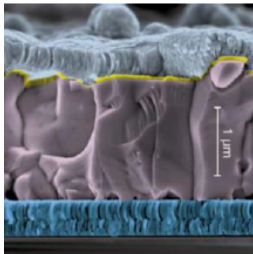
c-Si:
Si, O, Al, N, B, P

Technologie PV – cienkie warstwy

PV technologies



II-VI
CdTe



I-III-VI
CIGS

						VIIIA		
	1					2		
	H		IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	He
				6	7	8	9	10
			B	C	N	O	F	Ne
			10.811	12.011	14.007	15.999	18.998	20.183
			13	14	15	16	17	18
	IB	IIB	Al	Si	P	S	Cl	Ar
			26.982	28.086	30.974	32.064	35.453	39.948
	29	30	31	32	33	34	35	36
	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
	63.54	65.37	69.72	72.59	74.922	78.96	79.909	83.80
	47	48	49	50	51	52	53	54
	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
	107.870	112.40	114.82	118.69	121.75	127.60	126.904	131.30
	97	80	81	82	83	84	85	86
	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
	196.967	200.59	204.37	207.19	208.980	(210)	(210)	(222)

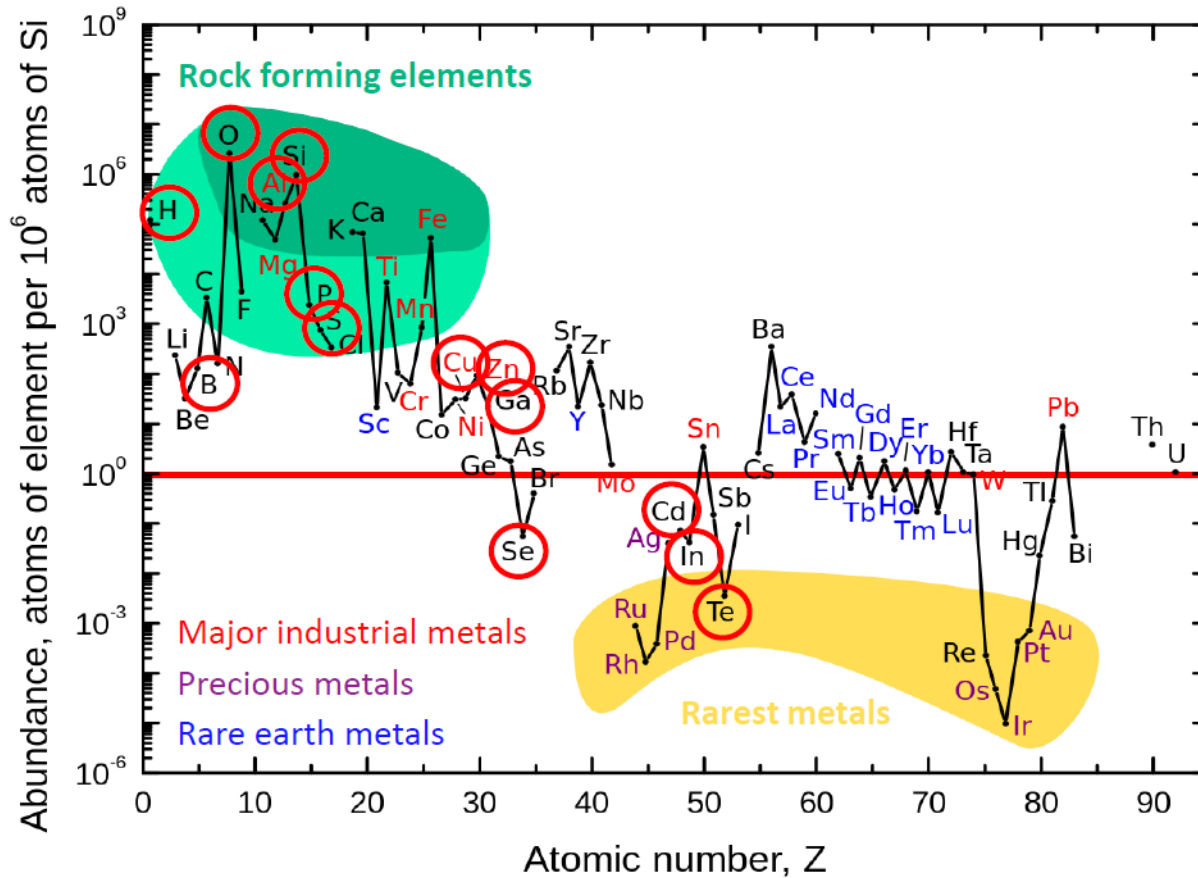
1st generation
c-Si



TF Si



Występowanie pierwiastków w skorupie ziemskiej



c-Si:

Si, O, Al, N, B, P

Thin film technologies

TF Si:

H, Si, O, Al, B, P, Zn

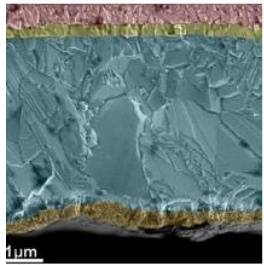
II-VI CdTe:

Cd, Te, S, O, Al, Zn

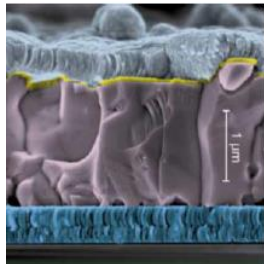
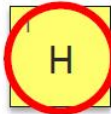
I-III-VI CIGS:

Cu, In, Se, Ga, Cd, S, O, Al, Zn

Technologie PV – związki III-V i ogniwa organiczne



II-VI
CdTe



I-III-VI
CIGS



III-V
GaAs

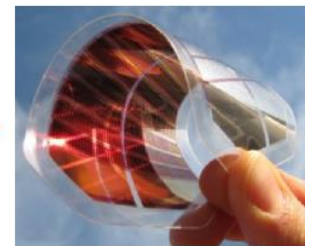
						VIIIA	
						2 He 4.003	
		IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	
	5	B 10.811	C 12.011	N 14.007	O 15.999	F 18.998	10 Ne 20.183
		13	14	15	16	17	18
		Al 26.982	Si 28.086	P 30.974	S 32.064	Cl 35.453	Ar 39.948
	IB	IIB					
29	30	31	32	33	34	35	36
Cu 63.54	Zn 65.37	Ga 69.72	Ge 72.59	As 74.922	Se 78.96	Br 79.909	Kr 83.80
47	48	49	50	51	52	53	54
Ag 107.870	Cd 112.40	In 114.82	Sn 118.69	Sb 121.75	Te 127.60	I 126.904	Xe 131.30
97	80	81	82	83	84	85	86
Au 196.967	Hg 200.59	Tl 204.37	Pb 207.19	Bi 208.980	Po (210)	At (210)	Rn (222)
			22	78	44		
			Ti 47.867	Pt 195.08	Ru 101.07		

1st generation
c-Si

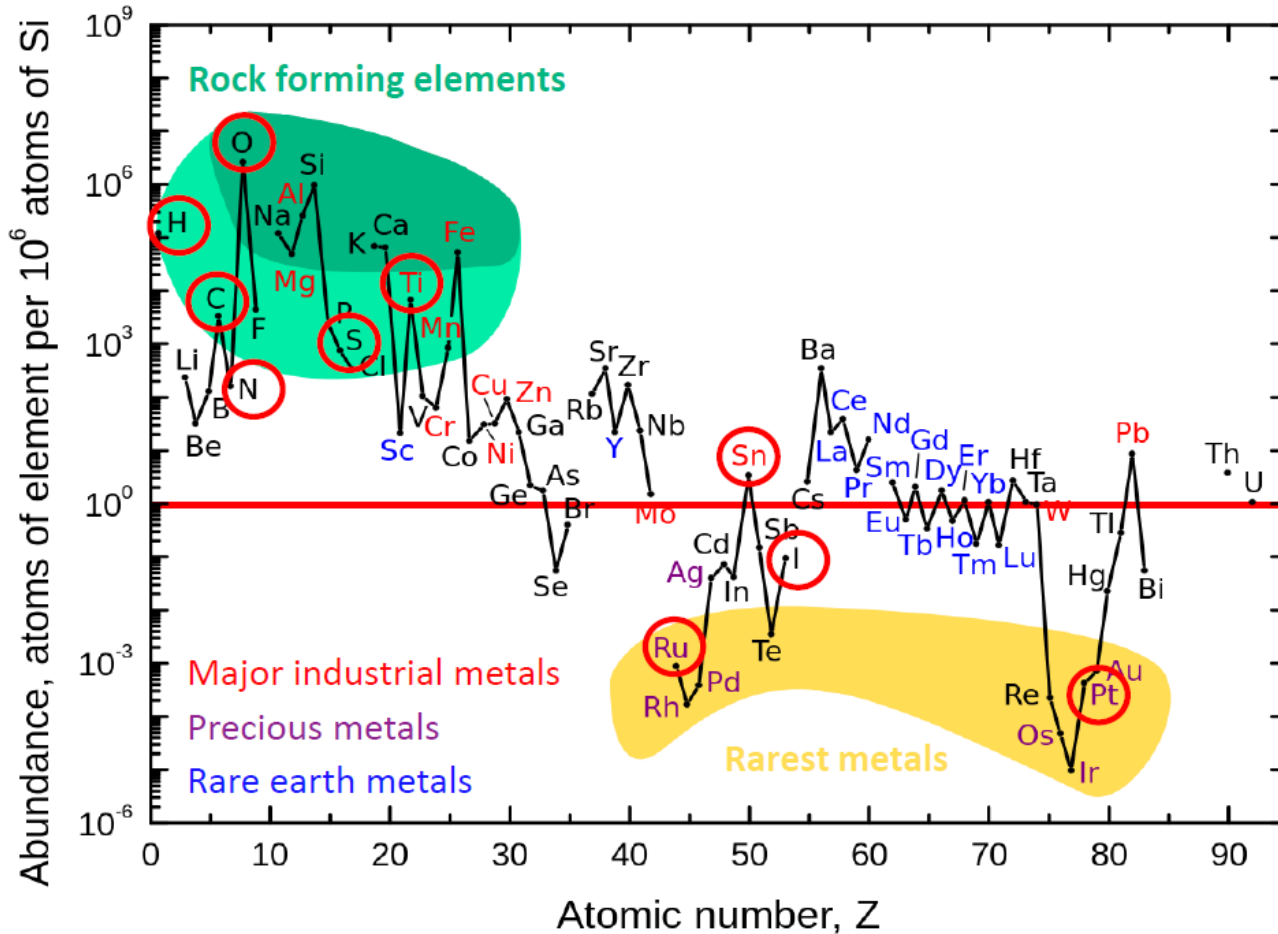


TF Si

Organics



Występowanie pierwiastków w skorupie ziemskiej



c-Si:

Si, O, Al, N, B, P

Thin film technologies

TF Si

H, Si, O, Al, B, P, Zn

II-VI CdTe:

Cd, Te, S, O, Al, Zn

I-III-VI CIGS:

Cu, In, Se, Ga, Cd, S, O, Al, Zn

III-V GaAs:

Ga, As, Al, In, P, Ge

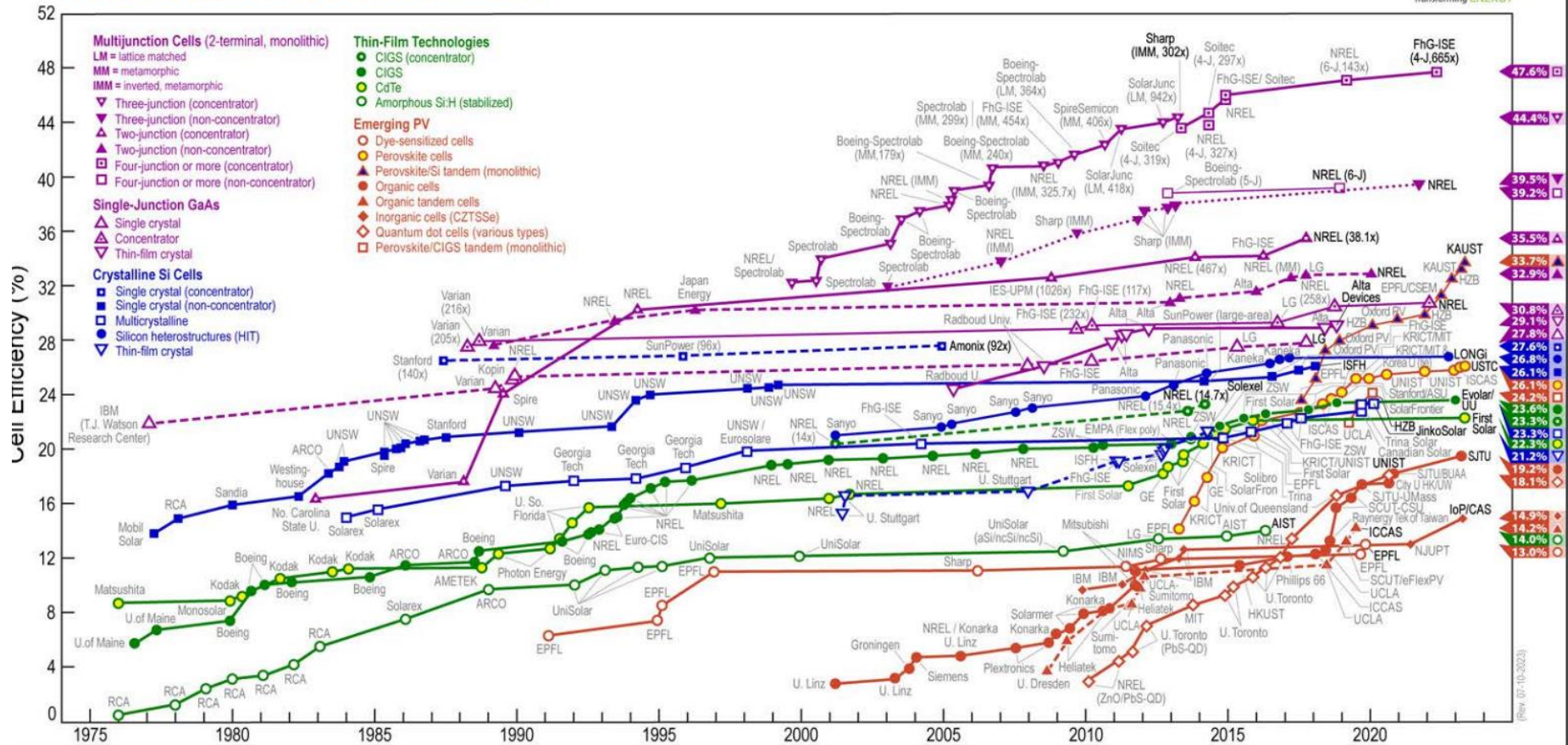
Organics:

Ti, O, Sn, Pt, C, H, N, S, Ru, I

Tabela rekordowych wydajności (lab)

National Renewable Energy Laboratory of the US

Best Research-Cell Efficiencies



Multijunction Cells (2-terminal, monolithic)

LM = lattice matched

MM = metamorphic

IMM = inverted, metamorphic

- ▼ Three-junction (concentrator)
- ▼ Three-junction (non-concentrator)
- ▲ Two-junction (concentrator)
- ▲ Two-junction (non-concentrator)
- ◻ Four-junction or more (concentrator)
- ◻ Four-junction or more (non-concentrator)

Single-Junction GaAs

- ▲ Single crystal
- ▲ Concentrator
- ▼ Thin-film crystal

Crystalline Si Cells

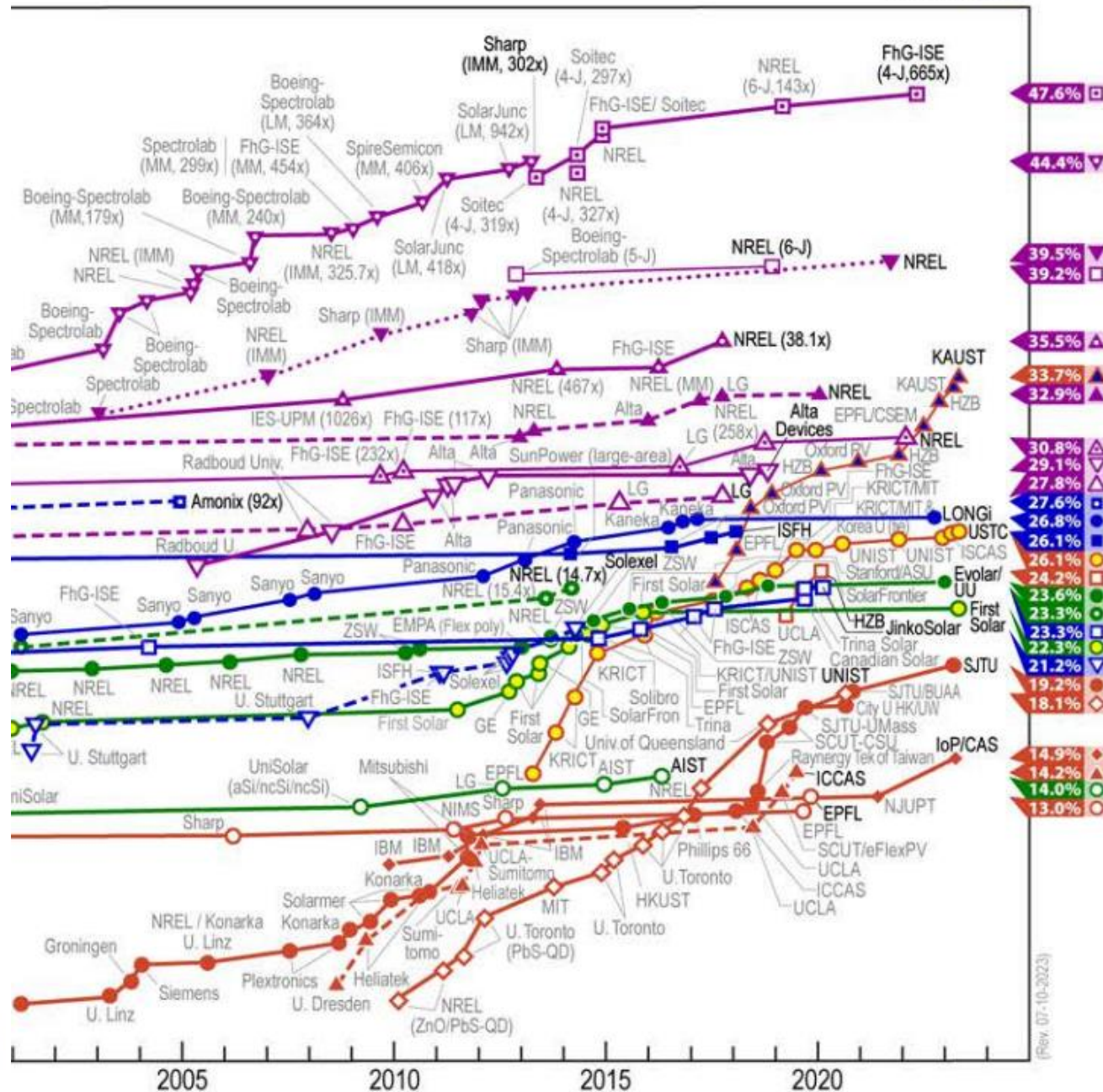
- ◻ Single crystal (concentrator)
- Single crystal (non-concentrator)
- ◻ Multicrystalline
- Silicon heterostructures (HIT)
- ▼ Thin-film crystal

Thin-Film Technologies

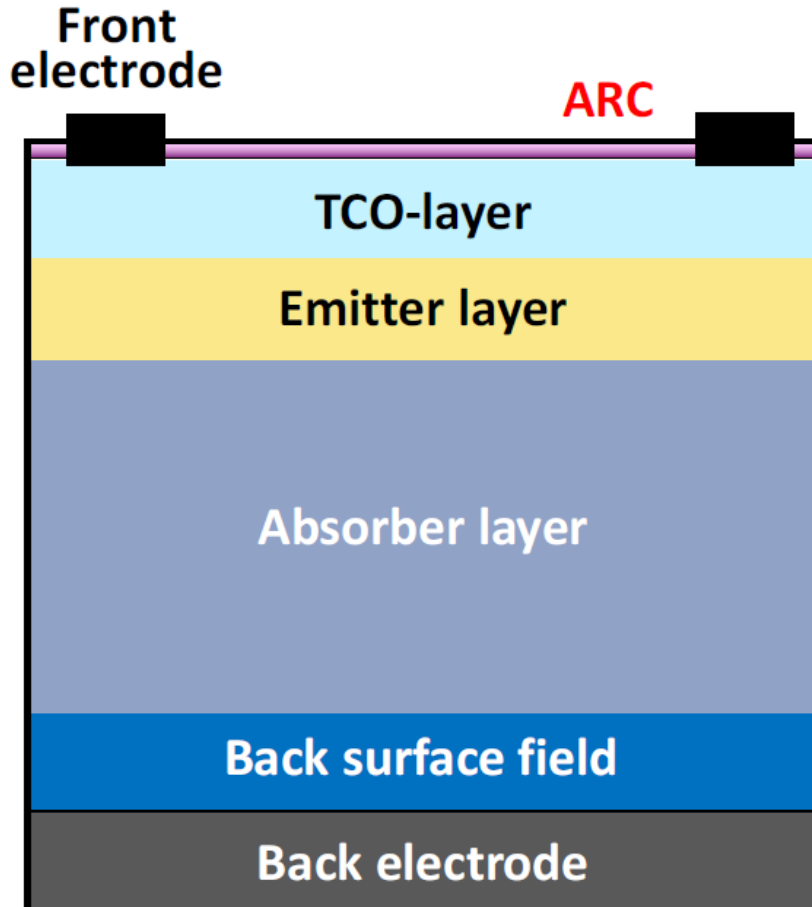
- CIGS (concentrator)
- CIGS
- CdTe
- Amorphous Si:H (stabilized)

Emerging PV

- Dye-sensitized cells
- Perovskite cells
- ▲ Perovskite/Si tandem (monolithic)
- Organic cells
- ▲ Organic tandem cells
- ◆ Inorganic cells (CZTSSe)
- ◇ Quantum dot cells (various types)
- ◻ Perovskite/CIGS tandem (monolithic)



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

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 ² sr]	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

Gęstość widmowa jest zdefiniowana jako ilość strumienia, energii, luminancji etc., zawarta w jednostkowym przedziale częstości $d\nu = 1\text{Hz}$ (lub długości fali $d\lambda$) wokół częstości ν .

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

$$M = \int_0^{\infty} M_\nu d\nu$$

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

Fotony

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

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

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 padającego na jednostkę powierzchni

$$I_e = \frac{\partial^2 P}{\partial A} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad I_{e,\lambda} = \frac{\partial I_e}{\partial \lambda} \left[\frac{W}{m^2 \cdot m} \right] \quad I_e = \int_0^\infty I_{e,\lambda} d\lambda \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

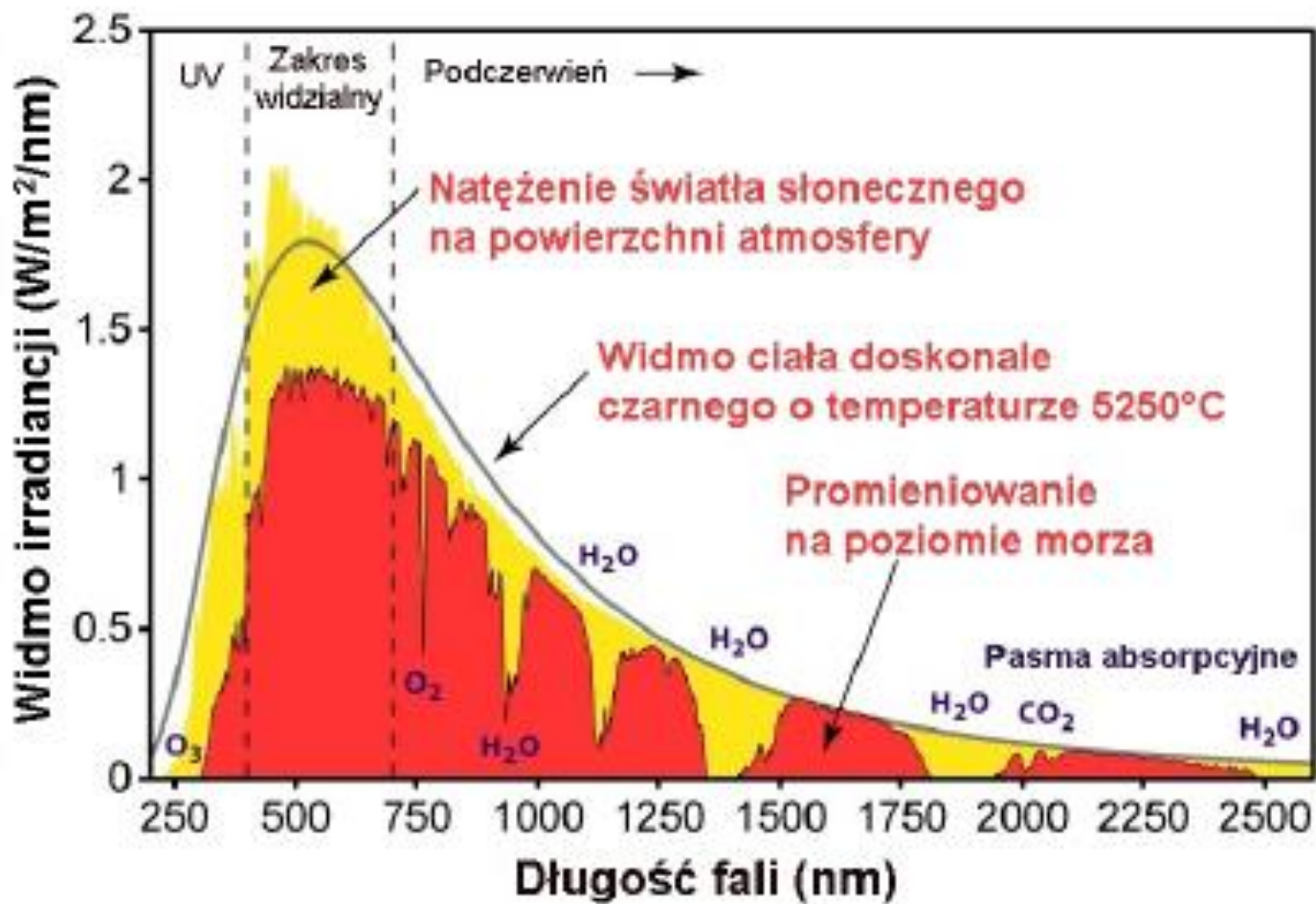
Ponieważ $\Psi_{ph,\lambda} = \frac{P_\lambda}{\frac{hc}{\lambda}}$, to

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

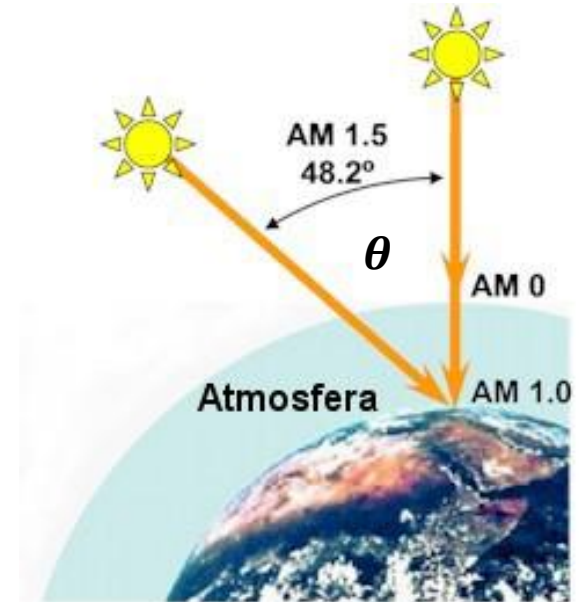
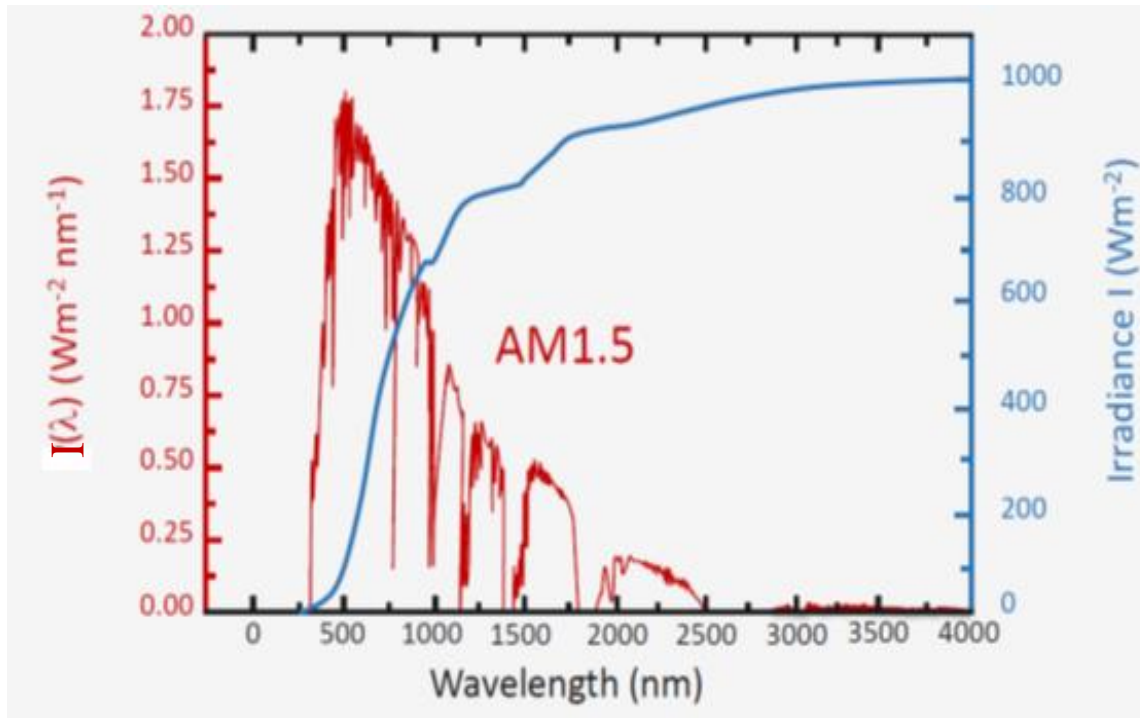
- Emitancja promieniowania (ang. *radiant emittance*): moc promieniowania emitowanego przez jednostkę powierzchni

$$M_e = \frac{\partial^2 P}{\partial A} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Widmo Słońca



Natężenie napromieniowania dla AM1.5



AMx – air mass

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

Całkowite natężenie napromieniowania (irradiance):

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

AM1 $\frac{1}{\cos 0^\circ} = 1$

AM1,5 $\frac{1}{\cos 48,2^\circ} = 1,5$

Jak zamienić widmo $I(\lambda)$ na $\Phi(\lambda)$?

- **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.**

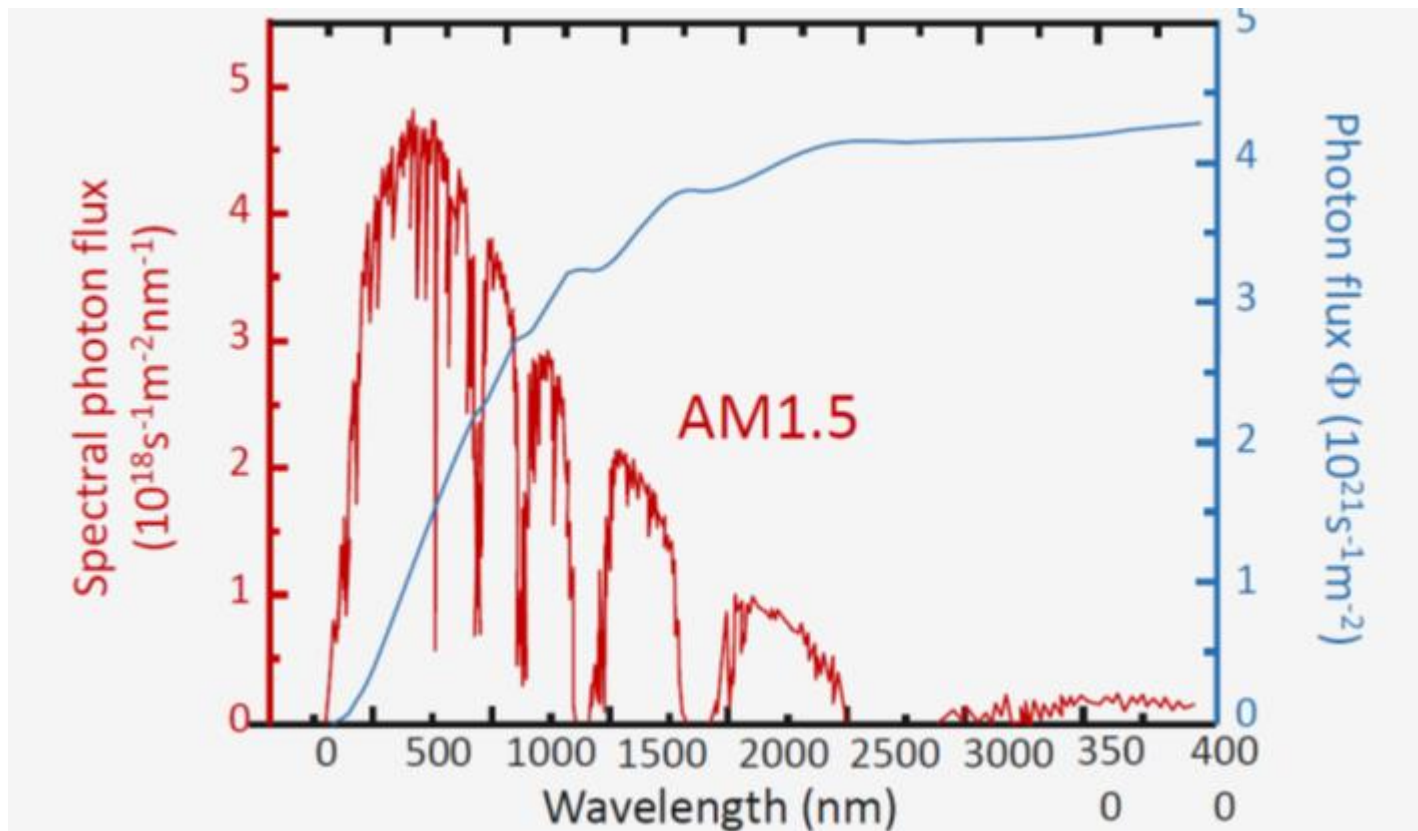
Widmowy i całkowity strumień fotonów dla AM1.5

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

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

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

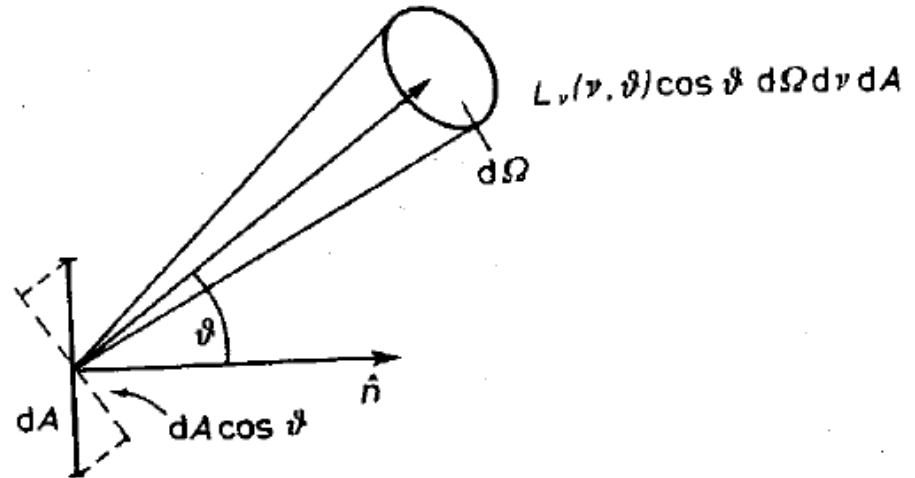
widmo $\Phi(\lambda)$ i Φ



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 \hat{n} do powierzchni źródła.

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

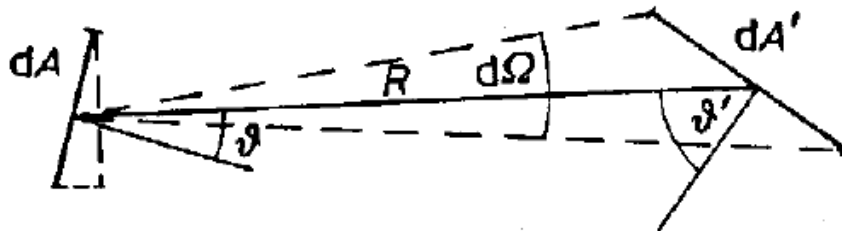


Powierzchnia źródła widziana pod kątem ϑ jest równa $dA \cos \vartheta$. Moc promieniowania dP emitowana przez to źródło do jednostkowego kąta bryłowego $d\Omega$:

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

Prawo Lamberta cd.

Rozważmy element powierzchni detektora dA' , znajdujący się w odległości R od elementu powierzchni źródła dA ,



Element dA' jest widziany ze źródła w kącie bryłowym $d\Omega$. Zatem dla $R^2 \gg dA$, dA' moc promieniowania padającego na element dA' jest równa:

$$dP = L(\vartheta) \cos \vartheta d\Omega dA = L(\vartheta) \cos \vartheta dA' dA \cos \vartheta' / R^2$$

- Dla źródeł izotropowych, dla których luminancja nie zależy od kąta, moc promieniowania emitowanego do jednostkowego kąta bryłowego jest proporcjonalna do cosinusa kąta pomiędzy kierunkiem obserwacji a normalną do powierzchni emitującej.
- Jest również proporcjonalna do cosinusa kąta między kierunkiem obserwacji a normalną do powierzchni detektora.

Prawo Lamberta

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

Moc promieniowania emitowanego przez źródło otrzymuje się po scałkowaniu tego równania po całej powierzchni źródła A , po wszystkich częstotliwościach światła ν oraz po pełnym kącie bryłowym:

$$P = \oint_A \int_0^\infty \int_\Omega L_\nu(\vartheta, \nu) \cos \vartheta d\Omega d\nu dA$$

$$P_\nu = \oint_A \int_\Omega L_\nu(\vartheta, \nu) \cos \vartheta d\Omega dA$$

$$P_\nu = \frac{\partial P}{\partial \nu} \left[\frac{W}{\text{Hz}} = W \cdot s \right]$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

$$P_\nu = \frac{\partial P}{\partial \nu} = \frac{\partial P}{\partial \lambda} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial \nu} = P_\lambda \left(-\frac{c}{\nu^2} \right)$$

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

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

$$x = AU - R_Z$$

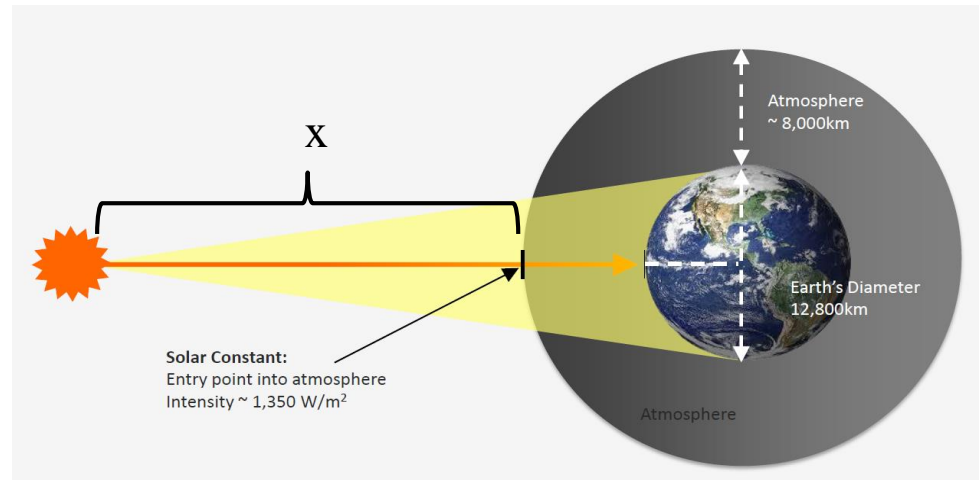
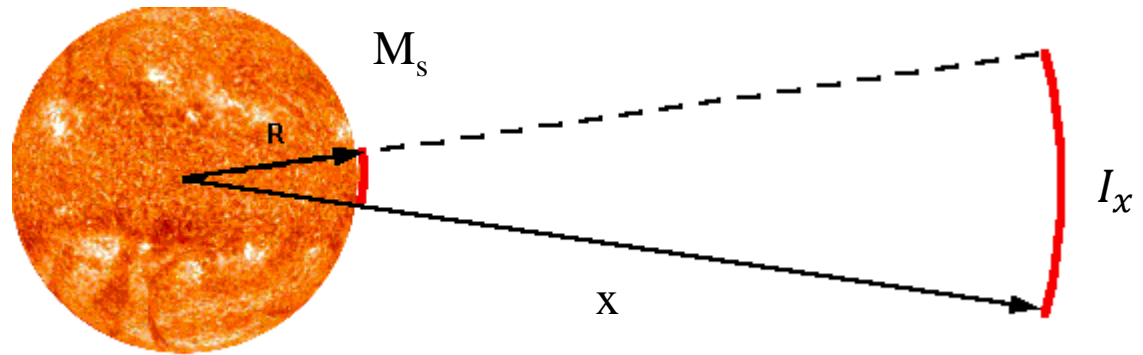
Natężenie napromieniowania
poza atmosferą

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

$$R_S = 696000km,$$

$$AU = 149600000km,$$

$$R_Z = 6370km$$



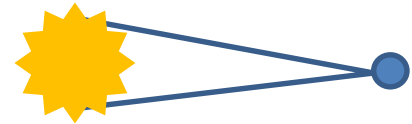
Przykład I. Luminancja Słońca

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.

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

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



$$dP = L d\Omega dA$$

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

Przykład II. Luminancja lasera He-Ne

Załóżmy, że moc wyjściowa 1mW jest emitowana przez 1 mm² powierzchni zwierciadła w kącie płaskim 4', co odpowiada kątowi bryłowemu 10⁻⁶sr. Maksymalna luminancja w kierunku rozchodzenia się wiązki laserowej jest więc równa:

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

Porównując luminancję Słońca i lasera:

$$\frac{L_{He-Ne}}{L_s} = \frac{10^9}{2 \cdot 10^7} = 50$$

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

$$L_v = 10^9 / 10^6 = 10^3 W / (m^2 sr Hz)$$

Promieniowanie Słońca jest skupione w szerokości 10¹⁵Hz, co daje:

$$L_{vs} = 2 \cdot 10^7 / 10^{15} = 2 \cdot 10^{-8} W / (m^2 sr Hz) \quad \text{stąd}$$

$$\frac{L_v}{L_{vs}} = 5 \cdot 10^{10}$$

Zadania

1. a) Oblicz temperaturę powierzchni Słońca. Załóż, że promień Słońca $R_S = 6,96 \cdot 10^8 m$, odległość Ziemia-Słońce wynosi ok. $1,5 \cdot 10^{11} m$, a natężenie napromieniowania Ziemi wynosi $1350 \frac{W}{m^2}$. $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

b) Oblicz moc promieniowania emitowanego przez Słońce

c) Oblicz moc promieniowania, które dociera do Ziemi. $R_Z = 6,37 \cdot 10^6 m$

a) 5775K; b) $3,8 \cdot 10^{26} W$; c) $1,72 \cdot 10^{17} W$.

2. Źródło monochromatyczne emituje światło o długości fali 500nm. Oblicz strumień fotonów (w jednostkach SI), jeśli $4 \cdot 10^{18}$ fotonów w czasie 1s pada na powierzchnię $20cm^2$.

$2 \cdot 10^{21} s^{-1} m^{-2}$

3. Źródło światła emituje światło w zakresie długości fal od 310nm do 620nm. Natężenie emitowanego promieniowania jest niezależne od długości fali i wynosi

$3 \frac{W}{m^2 nm}$.

a) Ile wynosi całkowite natężenie promieniowania źródła światła? $930 W/m^2$

b) Ile wynosi całkowity strumień fotonów emitowany przez to źródło? $2,18 \cdot 10^{21} s^{-1} m^{-2}$

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**

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