

Komputerowe systemy pomiarowe

Dr Zbigniew Koziol - wykład
Mgr Mariusz Woźny – laboratorium

Wykład VII

Zdalne pomiary rozkładu temperatur.

CEL WYKŁADU:

Celem NIE jest wyjaśnienie, w jaki sposób obsługiwać przyrządy do zdalnego pomiaru temperatury.

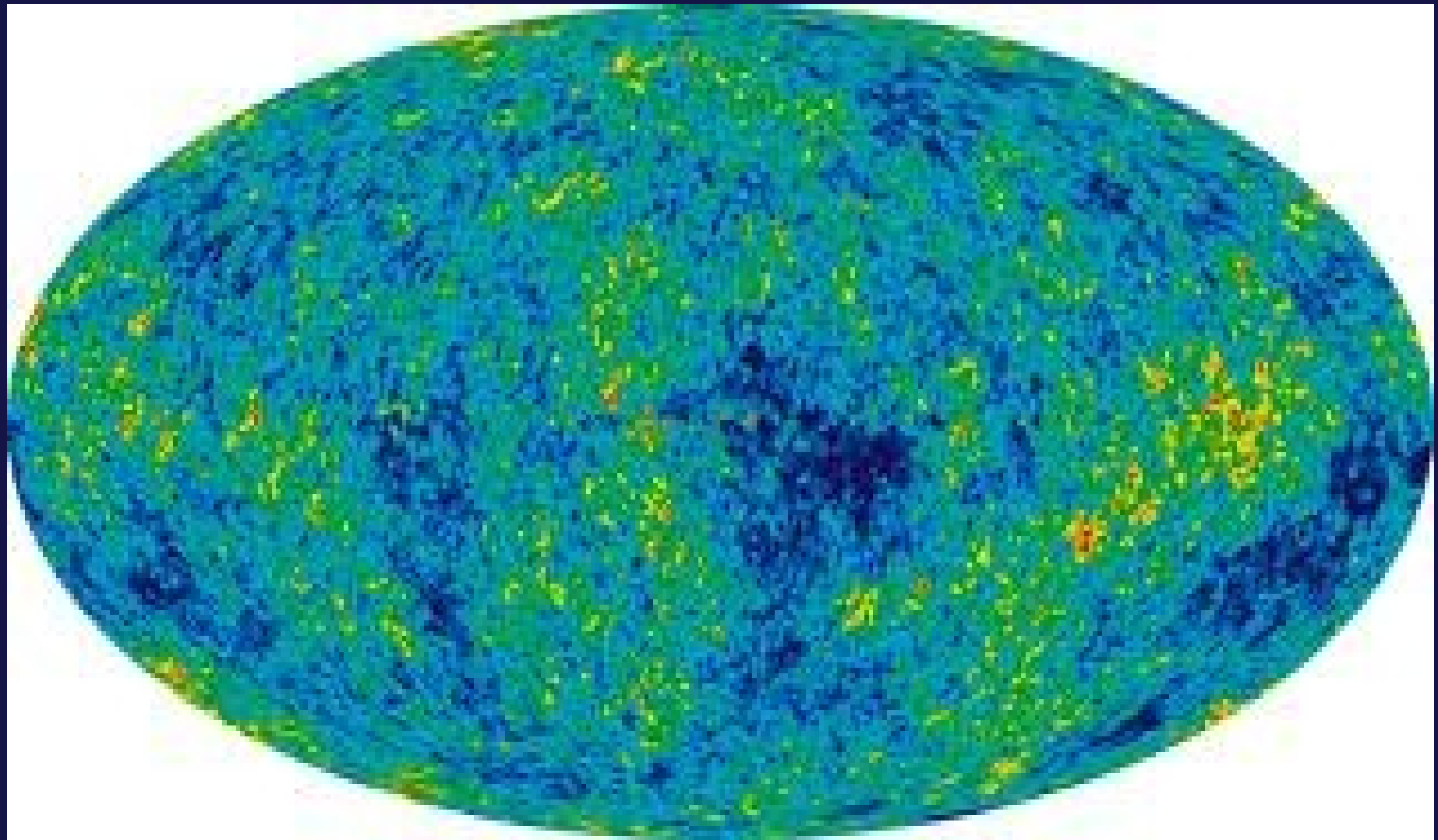
Celem jest wyjaśnienie zjawisk fizycznych związanych ze zdalnym pomiarem temperatury.

PLAN:

- Temperatura kosmosu, promieniowanie reliktove.
- Rozkład Plancka (1990 rok; Początek mechaniki kwantowej!).
Ciała doskonale czarne.
- Prawo Stefana-Boltzmanna. Temperatura Ziemi.
- Fotodetekcja. Mechanizm.
- Materiały używane do fotodetekcji: głównie półprzewodniki.
- Czynniki przy doborze materiałów:
 pasma pochłaniania / przepuszczania promieniowania.
- Przyrządy pomiarowe:
 - noktowizor
 - termowizor
- Przykłady obrazów
- Przykłady przyrządów
- Budowa przyrządów.
- Technika CCD
- Dodatkowa literatura

Temperatura kosmosu, promieniowanie reliktowe

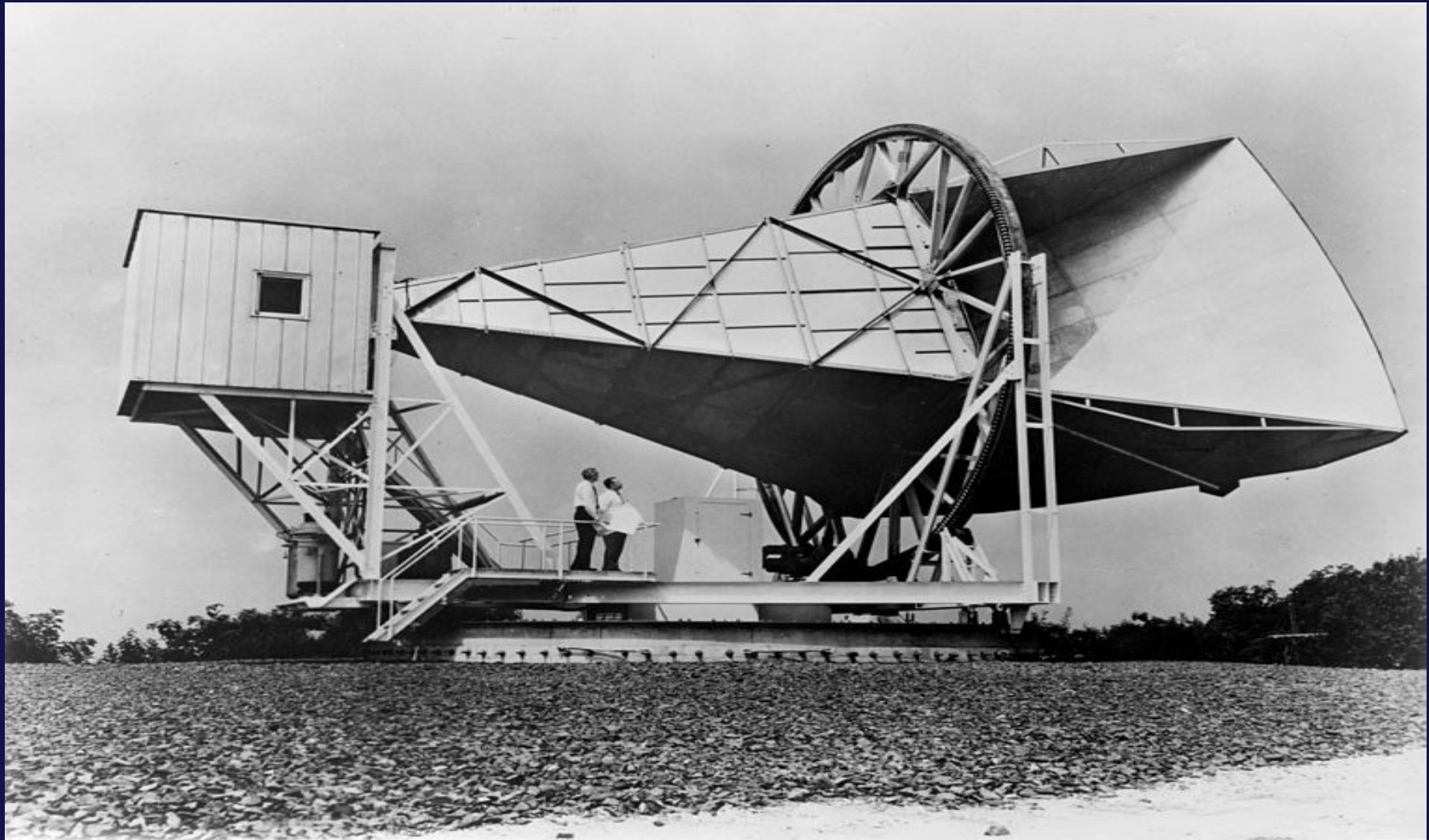
Promieniowanie reliktowe – rozkład temperatur we Wszechświecie



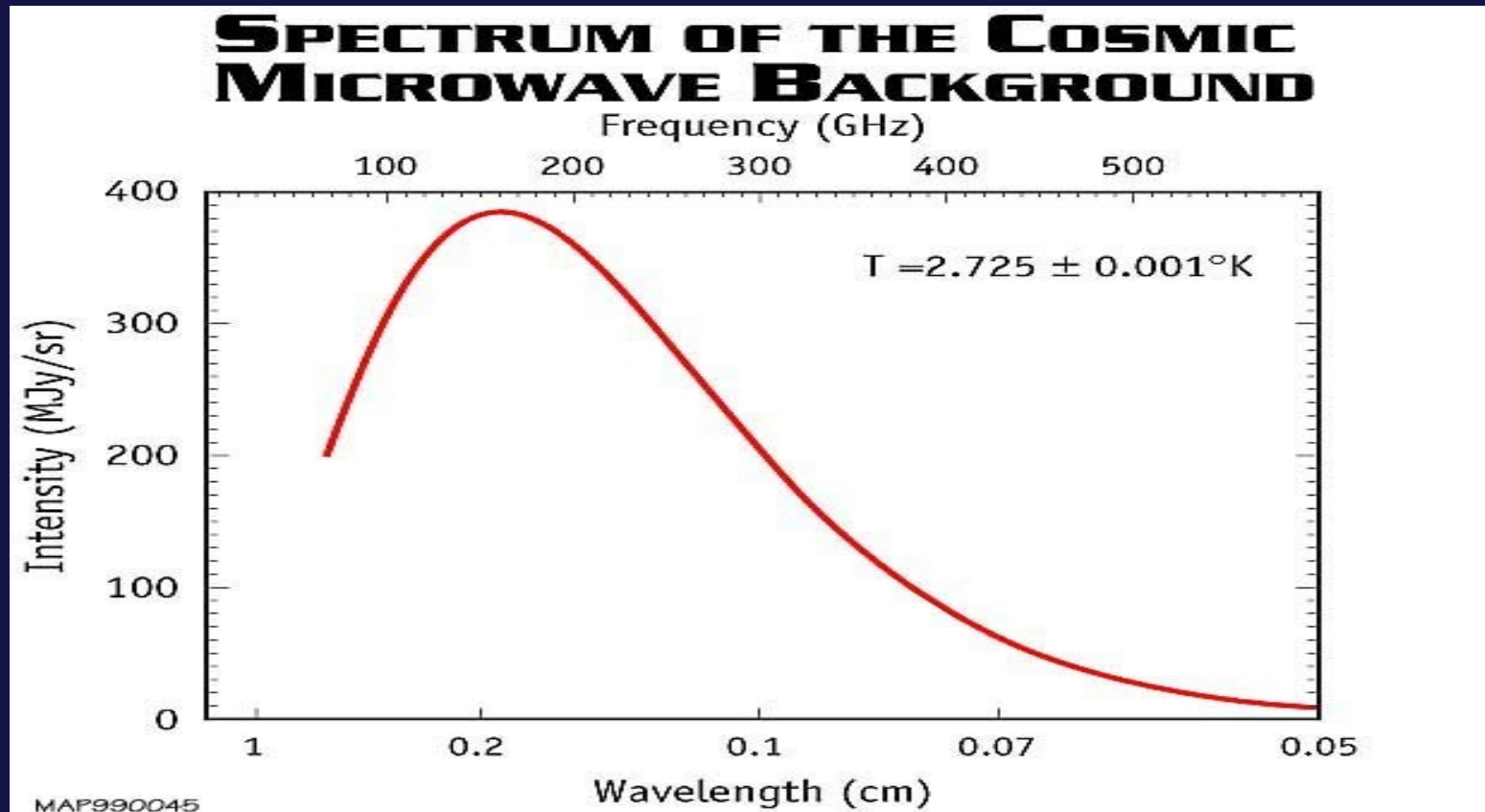
Mikrofalowe promieniowanie tła, promieniowanie reliktowe – rodzaj promieniowania o rozkładzie termicznym energii, czyli widmie ciała doskonale czarnego o temperaturze 2,7249–2,7252 K. Maksimum gęstości energii przypada na fale o długości 1,1 mm. Promieniowanie to jest pozostałością po wczesnych etapach ewolucji Wszechświata

Gamow's research students, Ralph Alpher and Robert Herman, moreover, argued in 1948 that, because the Big Bang effectively happened everywhere simultaneously, that energy should be equally spread as cosmic microwave background radiation (or CMB for short) throughout the universe.

In 1965, Arno Penzias and Robert Wilson, two young employees of Bell Telephone Laboratories in New Jersey, discovered, although totally by accident, exactly that. The mysterious microwave static they picked up on their microwave antenna seemed to be coming equally from every direction in the sky, and eventually they realized that this microwave radiation (which has a temperature of about -270°C , marginally above absolute zero, and the coldest thing found in nature) must indeed be the “afterglow” of the Big Bang. Penzias and Wilson received the 1978 Nobel Prize in Physics for their discovery



Penzias i Wilson korzystali z tej anteny dla odkrycia promieniowania relikтового; New Jersey, lata 60-te.



Obecnie badania koncentrują się na poszukiwaniu niejednorodności promieniowania tła, z dokładnością rzędu 0.001 K, a więc niejednorodności temperatury, jego polaryzacji, widma. Mają takie wyniki świadczyć o możliwych niejednorodnościach na początku Wielkiego Wybuchu, jak też odzwierciedlać strukturę Wszechświata zaraz po wybuchu.

Rozkład Plancka. Ciała doskonale czarne.

Ciało doskonale czarne – pojęcie stosowane w fizyce dla określenia ciała pochłaniającego całkowicie padające na nie promieniowanie elektromagnetyczne, niezależnie od temperatury tego ciała, kąta padania i widma padającego promieniowania. Współczynnik pochłaniania dla takiego ciała jest równy jedności dla dowolnej długości fali.

Ciało doskonale czarne nie istnieje w rzeczywistości, ale dobrym jego modelem jest duża wnęka z niewielkim otworem, pokryta od wewnątrz czarną substancją (np. sadzą). Powierzchnia otworu zachowuje się niemal jak ciało doskonale czarne – promieniowanie wpadające do wnęki odbija się wielokrotnie od jej ścian i jest niemal całkowicie pochłaniane, natomiast parametry promieniowania wychodzącego z jej wnętrza zależą tylko od temperatury wewnątrz wnęki.

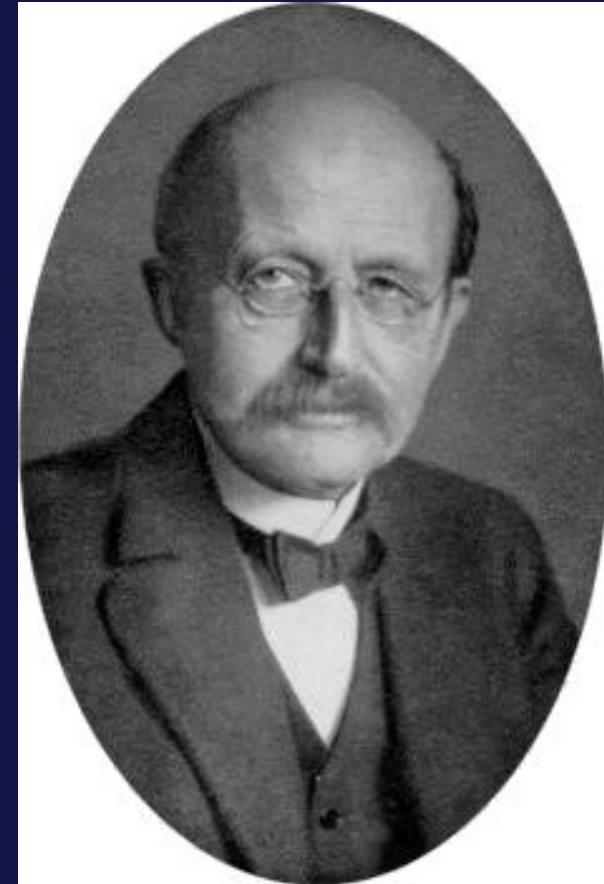
Świetnym przybliżeniem ciała doskonale czarnego jest... **Słońce**

Również promieniowanie słoneczne jest promieniowaniem ciała doskonale czarnego. Dzięki temu wyznaczono temperaturę świecącej powierzchni Słońca (fotosfery) na wartość ok. 5780K.

Na wykresie przedstawiającym widmo promieniowania słonecznego można dopatrzeć się, iż faktycznie odpowiada on promieniowaniu ciała doskonale czarnego, z naniesionymi nań prążkami absorpcyjnymi będącymi skutkiem absorpcji określonych długości fal przez pierwiastki występujące na Słońcu (przede wszystkim przez wodór i hel).

No więc co to jest ów rozkład promieniowania ciała doskonale czarnego?

- ▶ **Max Karl Ernst Ludwig Planck** (ur. 23 kwietnia 1858 w Kilonii, zm. 4 października 1947 w Getyndze) – niemiecki fizyk, autor prac z zakresu termodynamiki, promieniowania termicznego, energii, dyspersji, optyki, teorii względności, a przede wszystkim teorii kwantów.
- ▶ W roku 1900, pracując nad teorią promieniowania emitowanego przez ciało doskonale czarne, zmodyfikował prawo Wiena, wprowadzając do wzoru nową stałą fizyczną, nazwaną następnie jego nazwiskiem. Koncepcja, zgodnie z którą energia może być emitowana tylko w określonych porcjach, zwanych kwantami, dała początek mechanice kwantowej.



Rok 1990.

Przełom w rozumieniu fizyki: przejście od fizyki klasycznej do kwantowej.

W roku 1900 Max Planck zaproponował inny rozkład widma promieniowania ciała doskonale czarnego niż istniejące dotąd prawo Wiena (które nie mogło opisywać ściśle zjawiska, już zdawano sobie z tego sprawę).

Przyjął on zupełnie rewolucyjną jak na owe czasy hipotezę, że emitowane promieniowanie ma nieciągły rozkład, że emitowane jest pewnymi porcjami, czyli jest skwantowane. Procesy zachodzące we wnętrzu stanowiącej ciało doskonale czarne rozważał on jako drgania oscylatorów harmonicznyc, które emitują i absorbują promieniowanie. Energie tych oscylatorów, według założenia Plancka, nie mogą przyjmować jednak dowolnych wartości, ale tylko takie, dla których spełniony jest warunek

$$E = n \cdot h \cdot \nu$$

gdzie n jest liczbą naturalną, h jest stałą, która później została nazwana stałą Plancka; ν jest częstotliwością drgań oscylatora. Z zależności tej widać, że najmniejsze energie emitowanego przez taki oscylator promieniowania odpowiadają zmianie liczby n o jeden, czyli

$$\Delta E = h \cdot \nu$$

Dla wyznaczenia średniej energii oscylatorów Planck przyjął, że ich rozkład opisany jest znanym z termodynamiki tzw. rozkładem Boltzmanna. W oparciu o te założenia uzyskał wyrażenie na średnią energię oscylatora.

Prawo Plancka - prawo opisujące emisję promieniowania elektromagnetycznego przez ciało doskonale czarne będące w równowadze termodynamicznej znajdujące się w danej temperaturze.

14 grudnia 1900 Max Planck przedstawił uzasadnienie wzoru przedstawionego 19 października 1900 roku i będącego poprawioną wersją wzoru Wiena. Poprawka Plancka polegała na odjęciu od mianownika ułamka liczby 1. W uzasadnieniu Planck przyjął, że oscylatory wytwarzające promieniowanie cieplne mogą przyjmować tylko pewne wybrane stany energetyczne, a emitowane przez nie promieniowanie może być wysyłane tylko określonymi porcjami.

Zaproponowany rozkład został nazwany potem na jego cześć rozkładem Plancka:

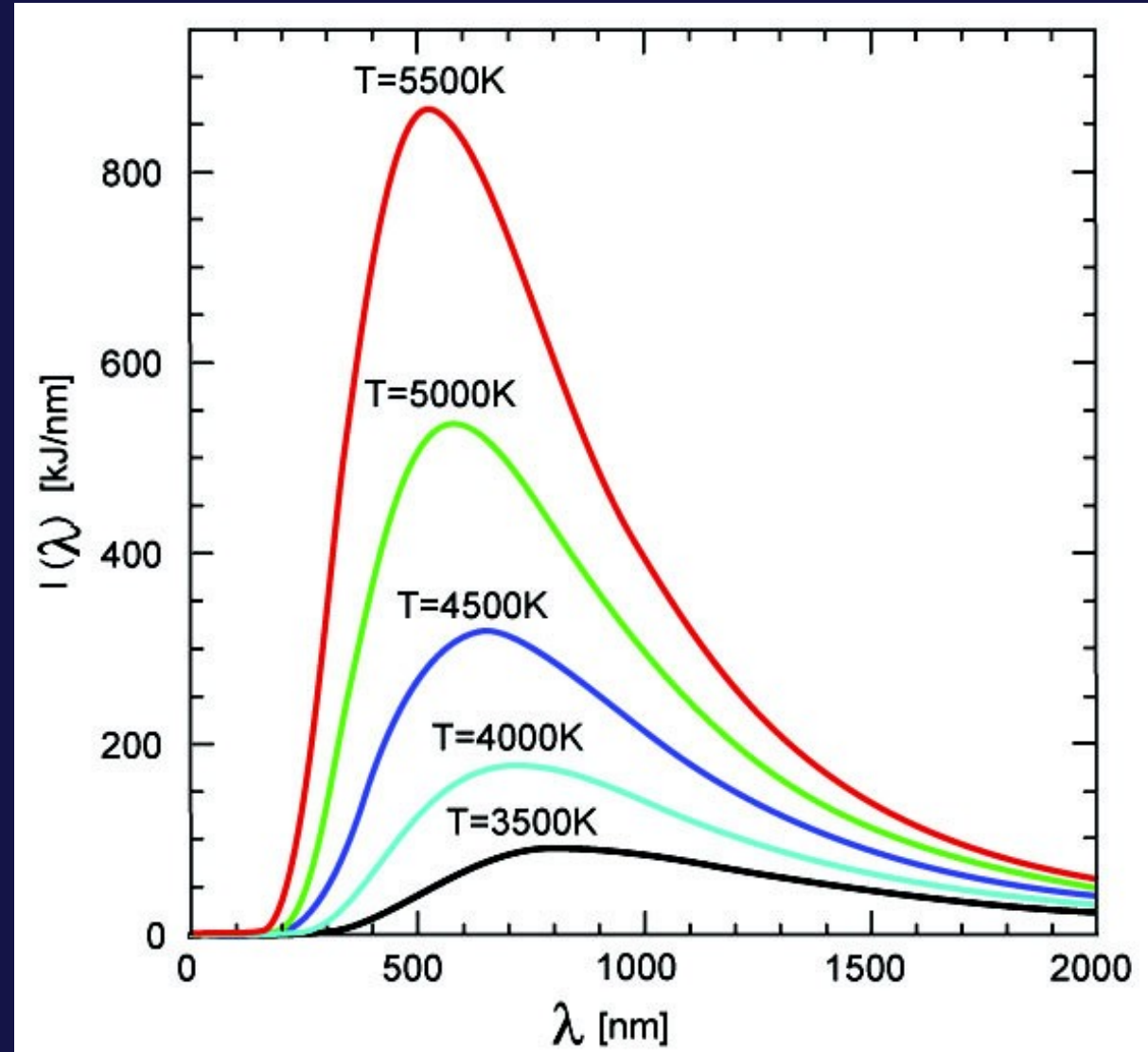
$$I(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1},$$

Wzór Plancka

gdzie:

- $I(\nu)$ - **radiacja spektralna częstotliwościowa** (tzn. radiacja na jednostkę częstotliwości) w kierunku prostopadłym do emitującej powierzchni (jednostka w SI: $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$),
- ν - **częstotliwość promieniowania**,
- h - **stała Plancka**,
- T - **temperatura** ciała doskonale czarnego,
- c - **prędkość światła w próżni**,
- k - **stała Boltzmanna**.

Rozkład widmowy promieniowania ciała doskonale czarnego dla różnych temperatur

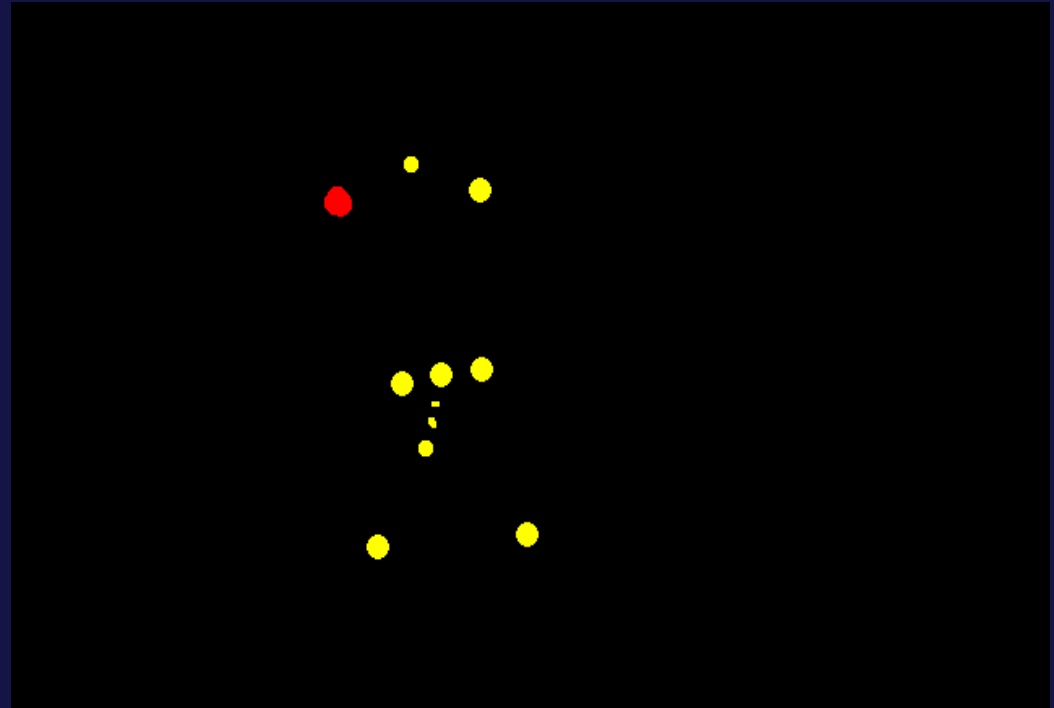




Świecenie rozgrzanego pręta. Gołym okiem zauważyć jesteśmy w stanie czerwoną poświatę w ciemności gdy temperatura materiału wynosi powyżej około 300-400 stopni Celsjusza. Dla wielu materiałów w użyciu powszechnym jest to również temperatura ich zapłonu w normalnych warunkach atmosferycznych.

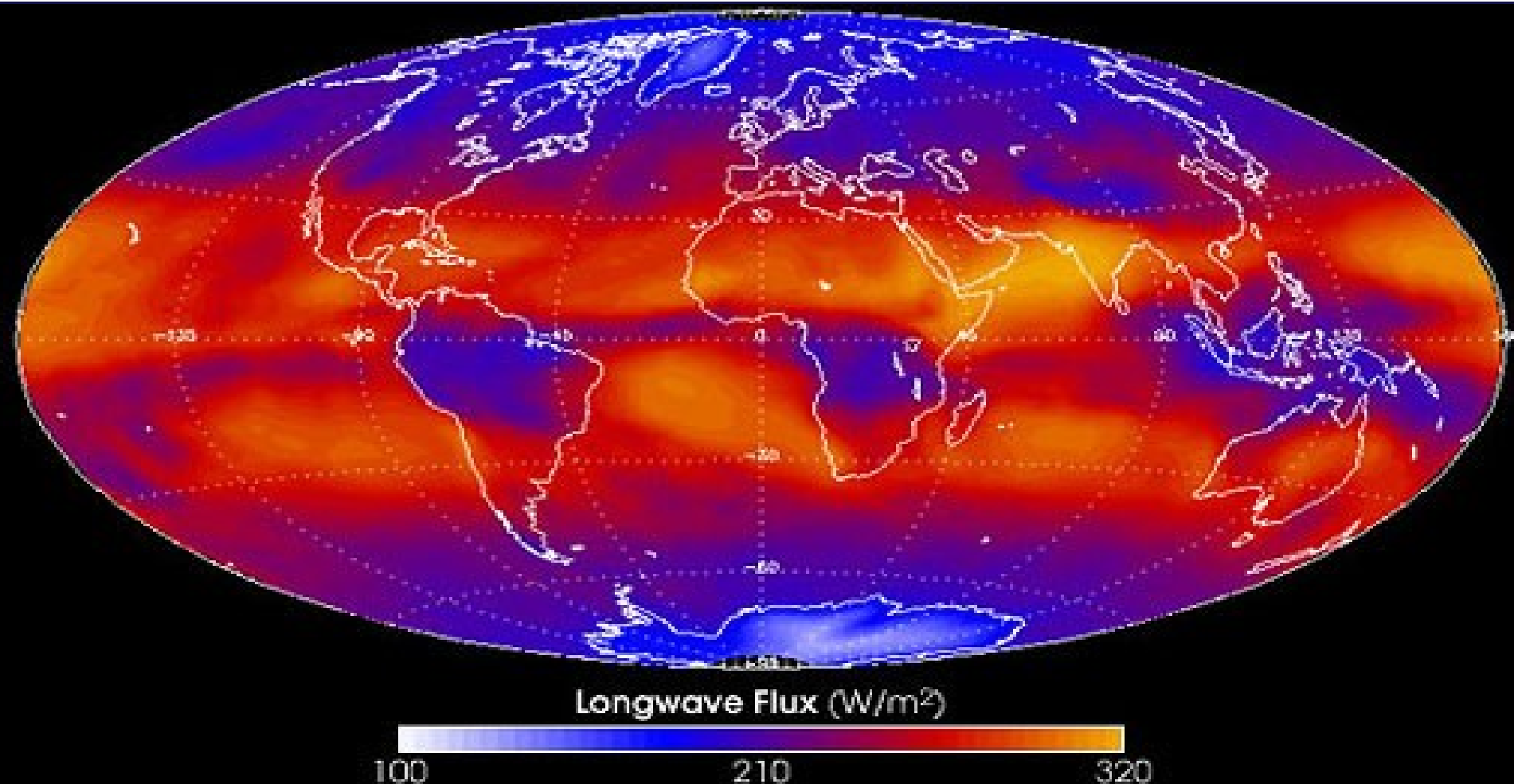
Jeszcze jeden przykład. Gwiazdozbiór Oriona (obecnie, w styczniu, pięknie widoczny na południowej stronie wieczornego nieba). Gwiazda Betelgeuse wyraźnie ma kolor bardziej czerwony od pozostałych. Dlaczego? Bo jest chłodniejsza.

Betelgeuse is classified as a red supergiant and is one of the largest and most luminous observable stars. If Betelgeuse were at the center of the Solar System, its surface would extend past the asteroid belt, possibly to the orbit of Jupiter and beyond, wholly engulfing Mercury, Venus, Earth and Mars. Estimates of its mass are poorly constrained, but range from 5 to 30 times that of the Sun.



Prawo Stefana-Boltzmannna.

Temperatura Ziemi.



Gęstość powierzchniowa strumienia ciepła emitowanego przez powierzchnię Ziemi. Obraz został skonstruowany na podstawie danych zebranych w ciągu okresu miesięcznego, w marcu 2000.

Temperature relation between a planet and its star [\[edit\]](#)

The black-body law may be used to estimate the temperature of a planet orbiting the Sun.

The temperature of a planet depends on several factors:

- Incident radiation from its star
- Emitted radiation of the planet, e.g., [Earth's infrared glow](#)
- The [albedo](#) effect causing a fraction of light to be reflected by the planet
- The [greenhouse effect](#) for planets with an atmosphere
- Energy generated internally by a planet itself due to [radioactive decay](#), [tidal heating](#), and [adiabatic contraction due by cooling](#).

The analysis only considers the Sun's heat for a planet in a Solar System.

The [Stefan-Boltzmann law](#) gives the total [power](#) (energy/second) the Sun is emitting:

$$P_{S \text{ emt}} = 4\pi R_S^2 \sigma T_S^4 \quad (1)$$

where

σ is the [Stefan-Boltzmann constant](#),

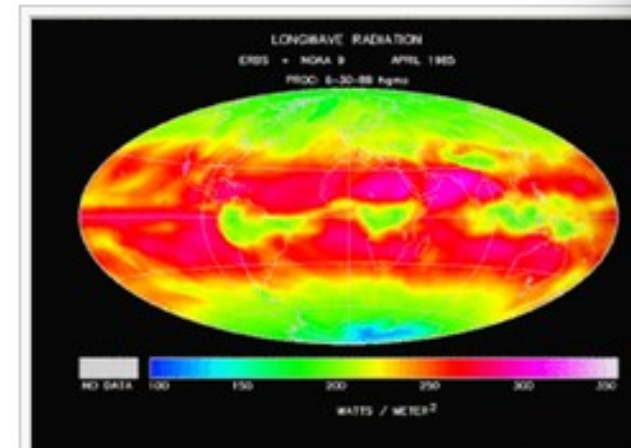
T_S is the effective temperature of the Sun, and

R_S is the radius of the Sun.

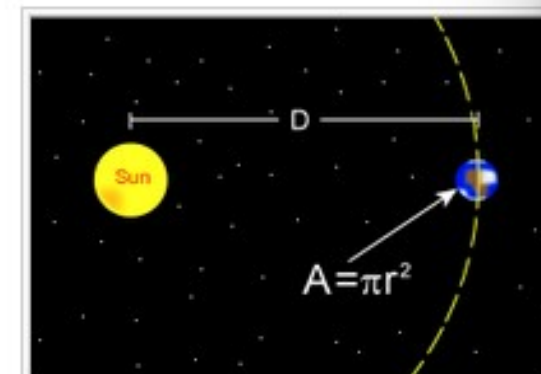
The Sun emits that power equally in all directions. Because of this, the planet is hit with only a tiny fraction of it. The power from the Sun that strikes the planet (at the top of the atmosphere) is:

$$P_{SE} = P_{S \text{ emt}} \left(\frac{\pi R_E^2}{4\pi D^2} \right) \quad (2)$$

where



Earth's longwave thermal [radiation](#) intensity, σ from clouds, atmosphere and ground



The Earth only has an absorbing area equal to a two dimensional disk, rather than the surface of a sphere.

R_E is the radius of the planet and

D is the [astronomical unit](#), the distance between the [Sun](#) and the planet.

Because of its high temperature, the Sun emits to a large extent in the ultraviolet and visible (UV-Vis) frequency range. In this frequency range, the planet reflects a fraction α of this energy where α is the [albedo](#) or reflectance of the planet in the UV-Vis range. In other words, the planet absorbs a fraction $1 - \alpha$ of the Sun's light, and reflects the rest. The power absorbed by the planet and its atmosphere is then:

$$P_{\text{abs}} = (1 - \alpha) P_{\text{SE}} \quad (3)$$

Even though the planet only absorbs as a circular area πR_E^2 , it emits equally in all directions as a sphere. If the planet were a perfect black body, it would emit according to the [Stefan-Boltzmann law](#)

$$P_{\text{emtbb}} = 4\pi R_E^2 \sigma T_E^4 \quad (4)$$

where T_E is the temperature of the planet. This temperature, calculated for the case of the planet acting as a black body by setting $P_{\text{abs}} = P_{\text{emtbb}}$, is known as the [effective temperature](#). The actual temperature of the planet will likely be different, depending on its surface and atmospheric properties. Ignoring the atmosphere and greenhouse effect, the planet, since it is at a much lower temperature than the Sun, emits mostly in the infrared (IR) portion of the spectrum. In this frequency range, it emits $\bar{\epsilon}$ of the radiation that a black body would emit where $\bar{\epsilon}$ is the average emissivity in the IR range. The power emitted by the planet is then:

$$P_{\text{emt}} = \bar{\epsilon} P_{\text{emtbb}} \quad (5)$$

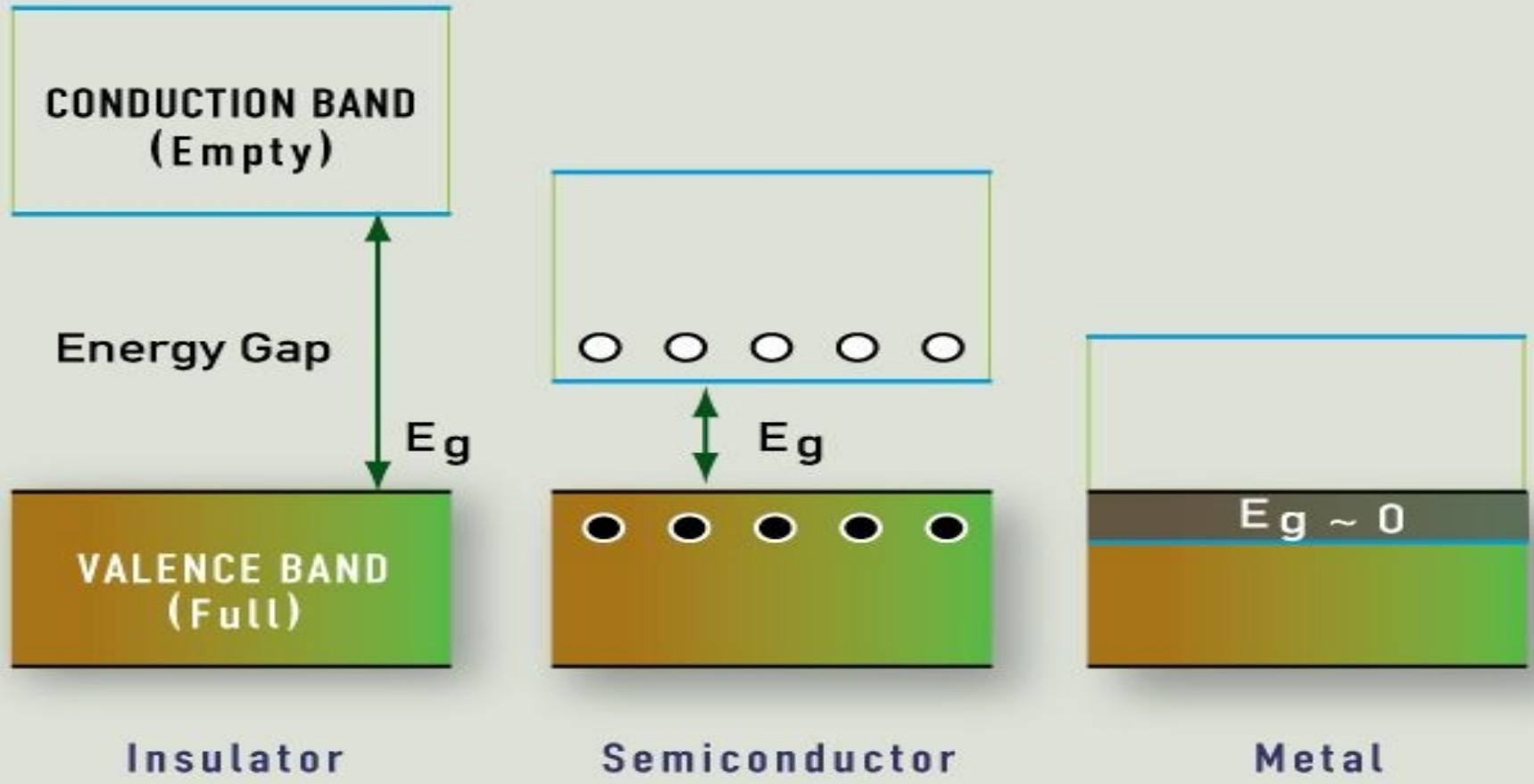
For a body in [radiative exchange equilibrium](#) with its surroundings, the rate at which it emits radiant energy is equal to the rate at which it absorbs it:^{[41][42]}

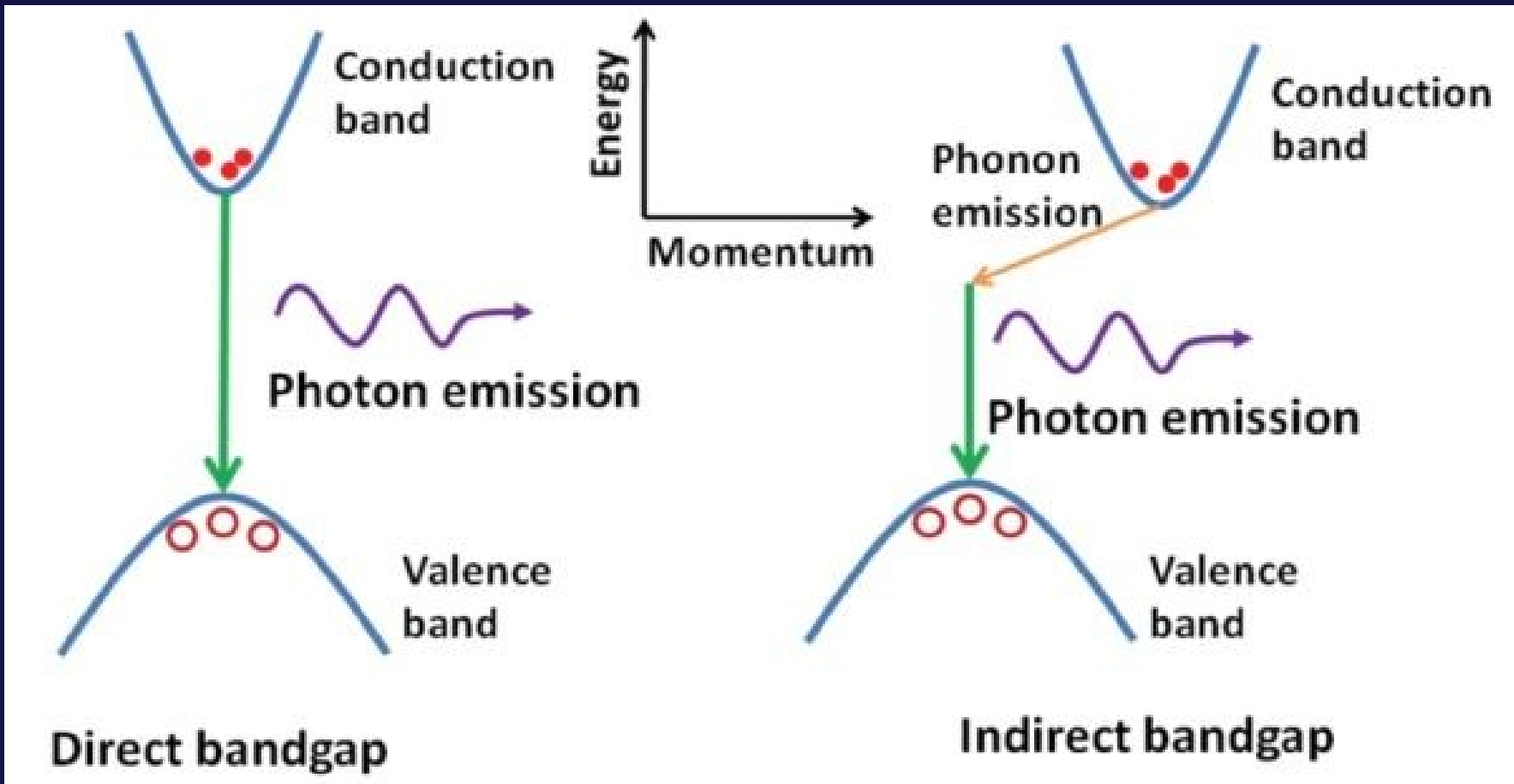
$$P_{\text{abs}} = P_{\text{emt}} \quad (6)$$

Substituting the expressions for solar and planet power in equations 1-6 and simplifying yields the estimated temperature of the planet, ignoring greenhouse effect, T_p :

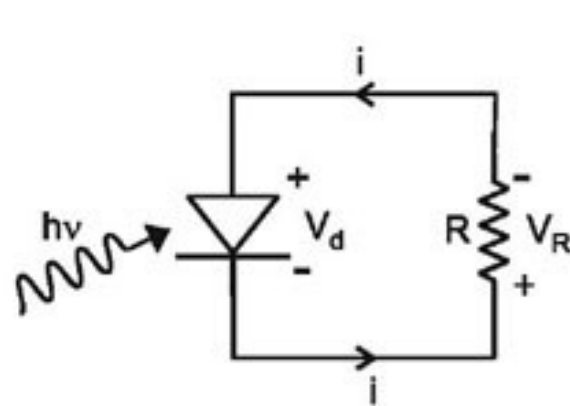
$$T_p = T_s \sqrt{\frac{R_s \sqrt{\frac{1-\alpha}{\bar{\epsilon}}}}{2D}}$$

Fotodetekcja. Mechanizm.

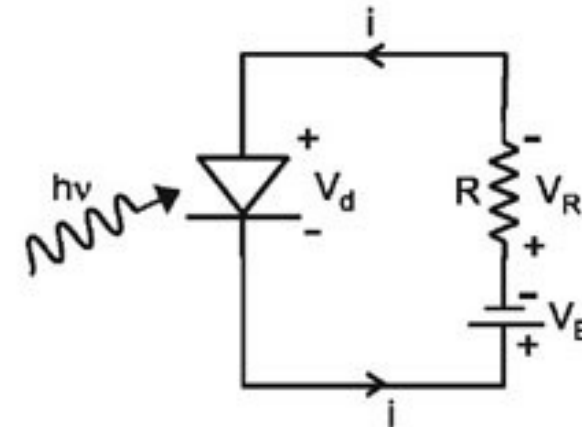




$$i_{\lambda} = \frac{P_{in}}{h\nu} e\eta_{abs} \quad (\text{photocurrent}) \quad (14-2)$$

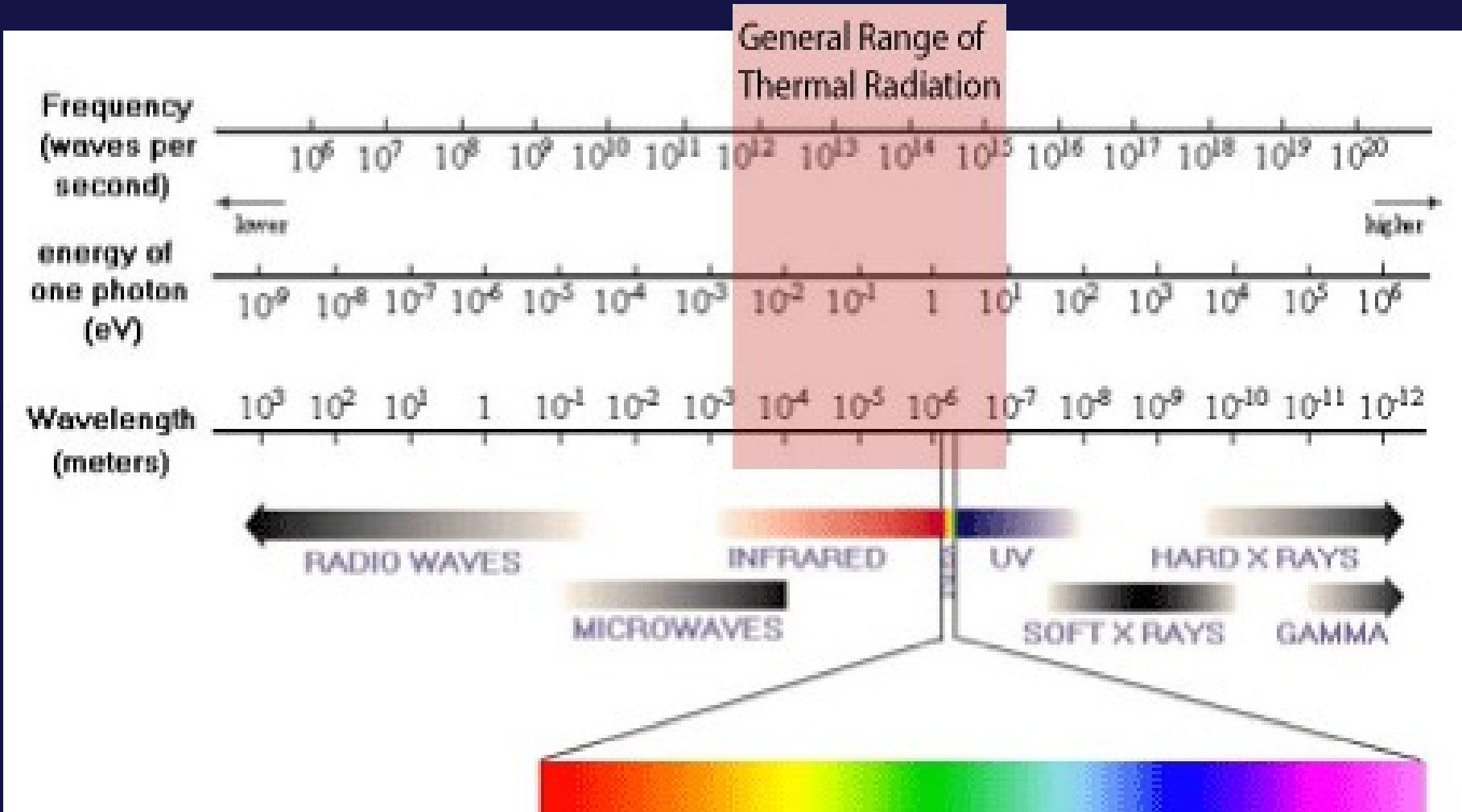


(a)



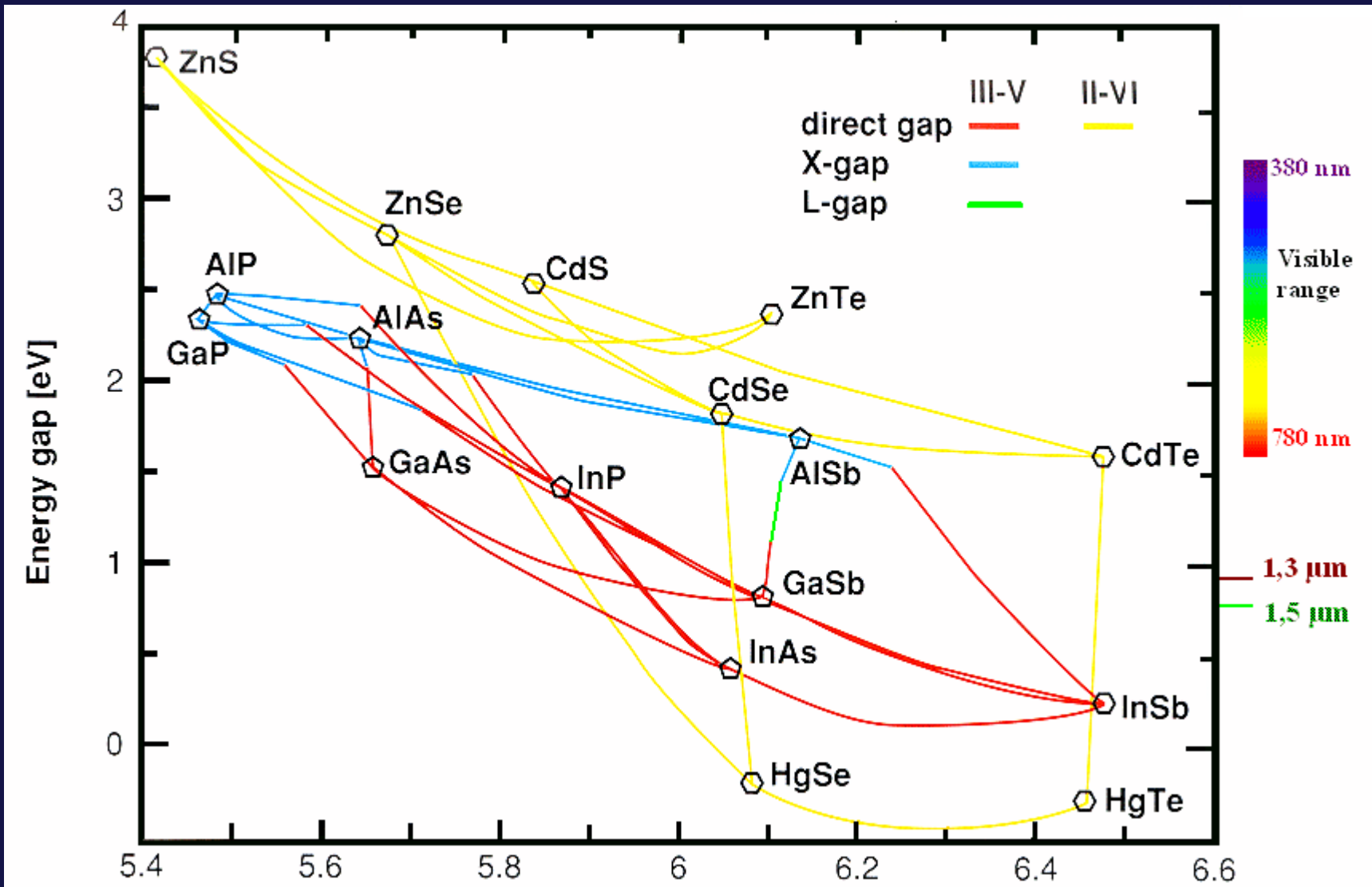
(b)

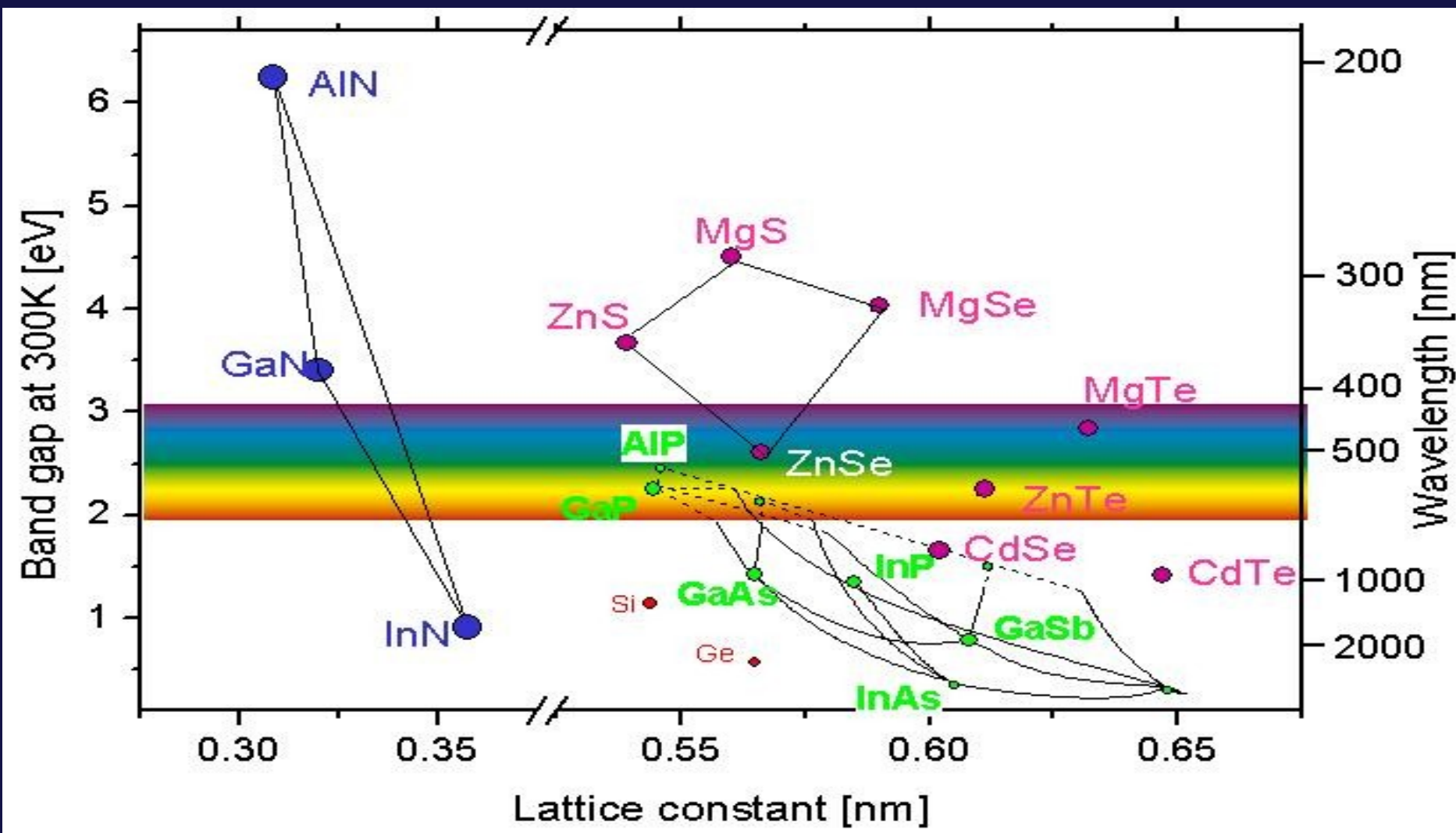
Materiały: głównie półprzewodniki.



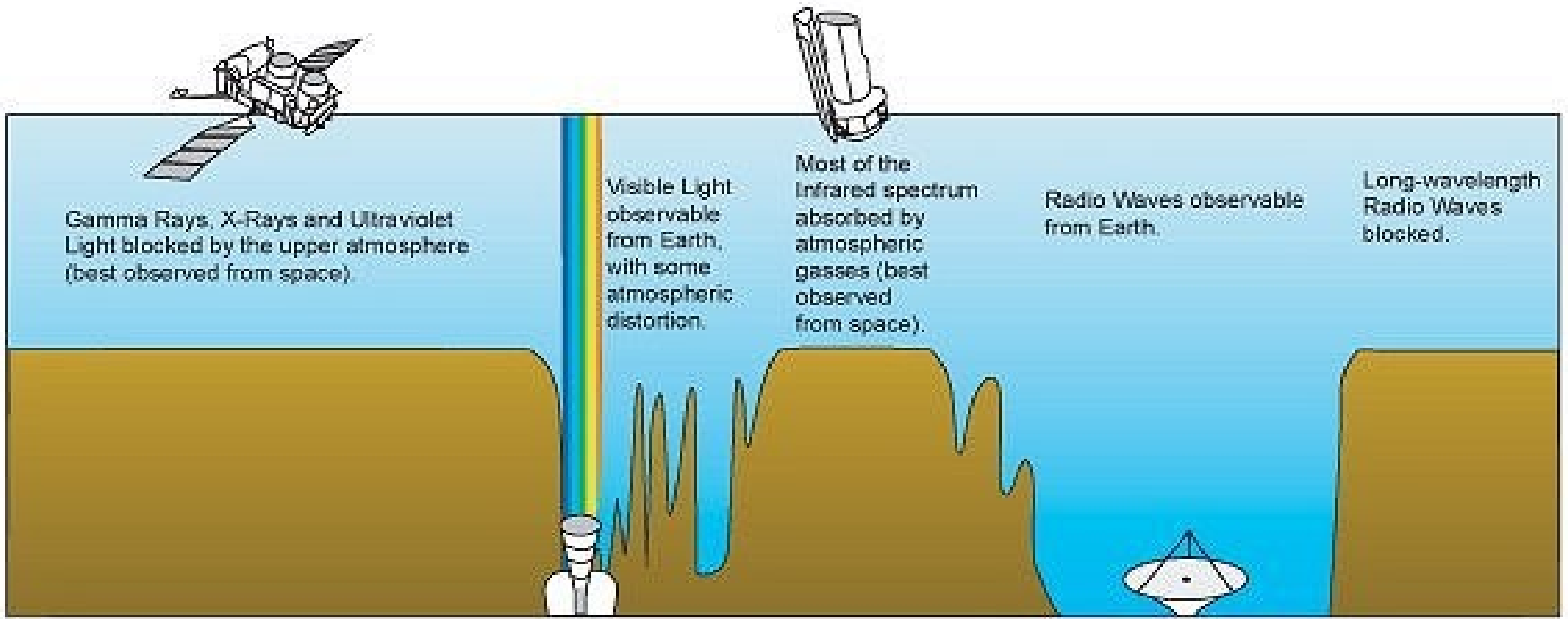
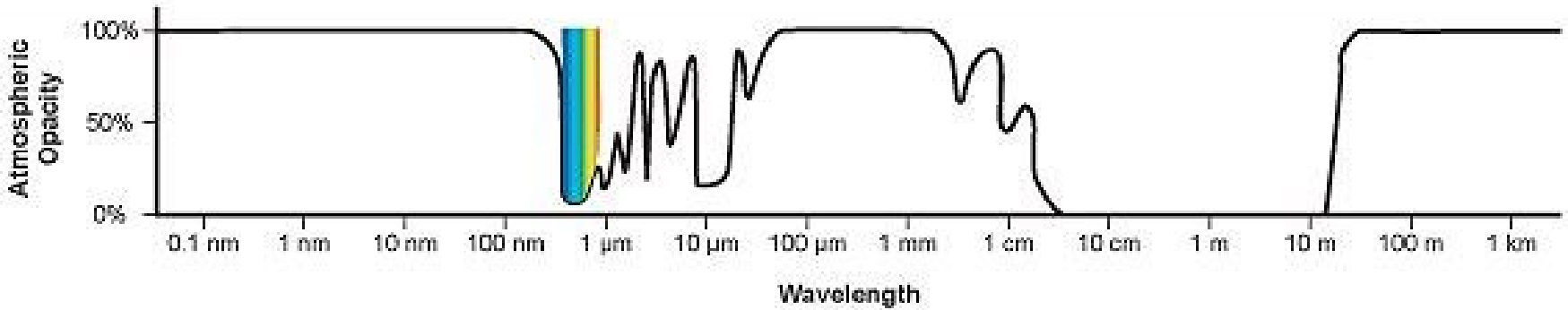
Zależność między energią a długością fali dla promieniowania elektromagnetycznego





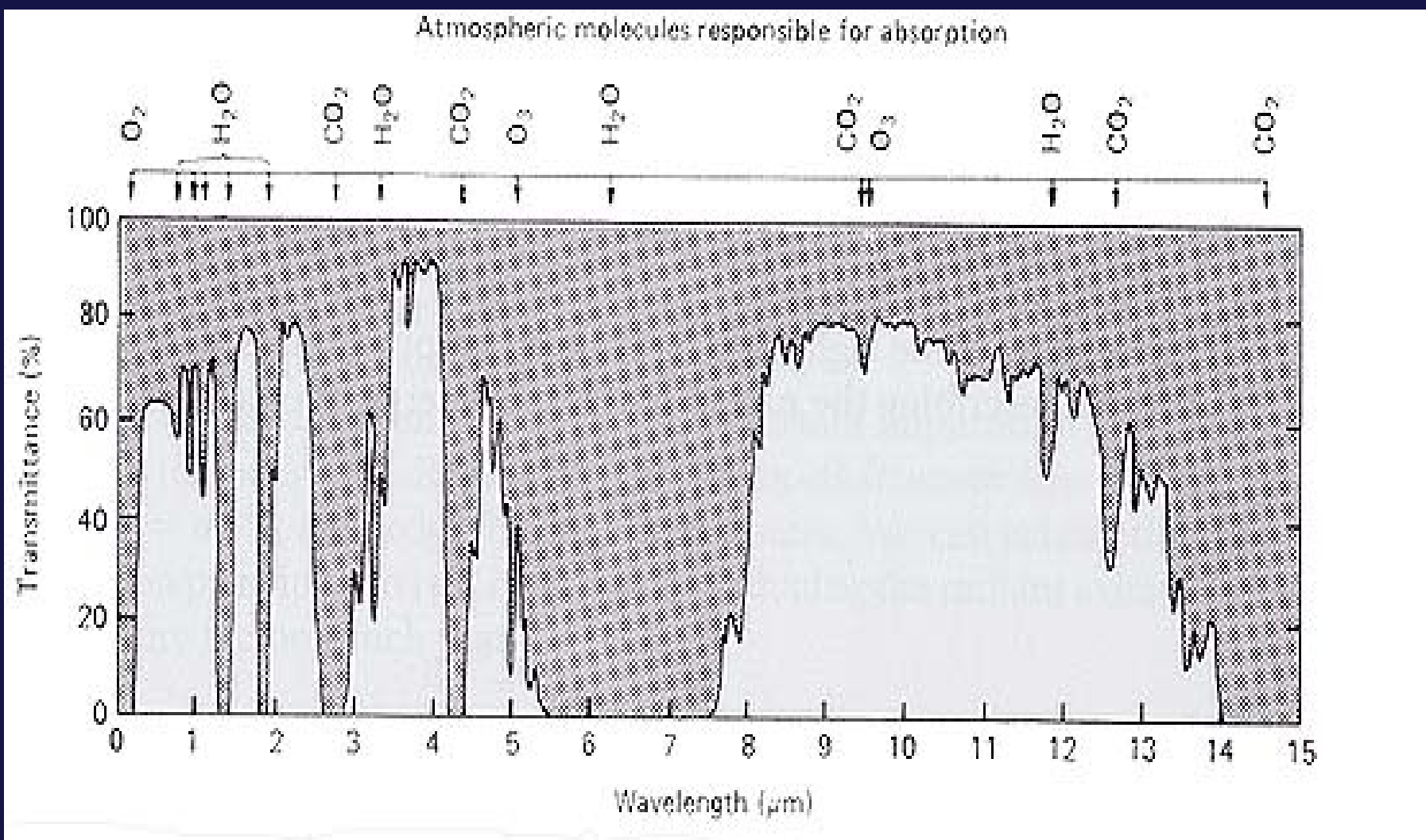


**Czynnik przy doborze materiałów:
pasma pochłaniania / przepuszczania promieniowania.**



Okna przepuszczalności atmosfery ziemskiej





Okna przepuszczalności atmosfery ziemskiej

Przyrządy pomiarowe

Noktowizor – do oglądania obrazu w podczerwieni, podobnie jak lornetką.

Termowizor – do oglądania / rejestracji obrazu w kamerze podczerwieni.

Fizyczne zasady działania w obu przypadkach mogą być takie same.

Noktowizor

Noktowizor to urządzenie umożliwiające widzenie w ciemności. Jest ono wykorzystywane przez wojsko lub oddziały paramilitarne, a także przez myśliwych do obserwacji otoczenia w nocy lub przy znikomym oświetleniu (np. w jaskiniach oraz ciemnych pomieszczeniach). Dzięki noktowizorom żołnierze są w stanie dostrzec swoich przeciwników bez używania dodatkowych źródeł światła.

Noktowizor został wynaleziony przez J.L. Bairda w 1926 r. Do dalszego jego rozwoju przyczyniły się prace V.K. Zworykina w 1933, który zbudował wówczas pierwszy elektrooptyczny przetwornik obrazu. Zastosowanie noktowizora do nocnego transportu i obserwacji terenu notuje się od 1941, zaś do celowania podczas walki, od 1945 (w obu przypadkach w armii niemieckiej).

Pulsar Edge GS 1x20 to wielozadaniowe gogle noktowizyjne. Dzięki swej konstrukcji, poprzez połączenie z maską na głowę, umożliwiają obuczne widzenie i uwolnienie obu rąk, przez co spektrum potencjalnych zastosowań jest najszersze ze wszystkich typów urządzeń noktowizyjnych: <http://noktowizja.com> 2 490,00 zł.



Termowizor

Termowizor – optoelektroniczne urządzenie obrazowe analizujące tzw. temperaturowe promieniowanie podczerwieni. Występuje w wersjach obserwacyjnych oraz pomiarowych.

Na Zachodzie urządzenia te występują głównie pod nazwami będącymi odpowiednikami nazw: kamera termiczna, termograficzna lub kamera podczerwieni, zwłaszcza gdy z kontekstu wynika, że jej zakres czułości widmowej obejmuje pasma 3-5 lub 8-13 mikrometrów. Pasma te pokrywają się z obszarami wysokiej przepuszczalności atmosfery dla promieniowania podczerwonego. Termogram parowozu wykonany kamerą wysokiej rozdzielczości

O atrakcyjności zobrazowań bądź badań metodą termowizyjną decyduje wszechobecność promieniowania temperaturowego, zbyteczność stosowania jakichkolwiek zewnętrznych źródeł oświetlenia, znacznie mniejszy wpływ mgieł, dymów oraz klasycznych dla promieniowania widzialnego oddziaływań maskujących. Zdolność aparatury do tworzenia, w czasie rzeczywistym, zobrazowań mikrozmiarów w rozkładach temperatury stwarza unikatowe możliwości obserwacji, wykrywania oraz diagnozowania stanu badanych obiektów. Operator kamery decyduje o sposobie różnicowania tych rozkładów w obrazie wyjściowym (zobrazowania czarno-białe, biało-czarne lub kolorowe z różnym doborem skal)

Thermography which is colloquially called thermovision is based on detection and recording of infrared radiation emitted by objects with temperature higher than absolute zero and transformation of this radiation into visible light. The obtained thermal image is the representation of temperature field existing on the surface of investigated object. This is possible since bodies radiate power depending on their radiation properties.

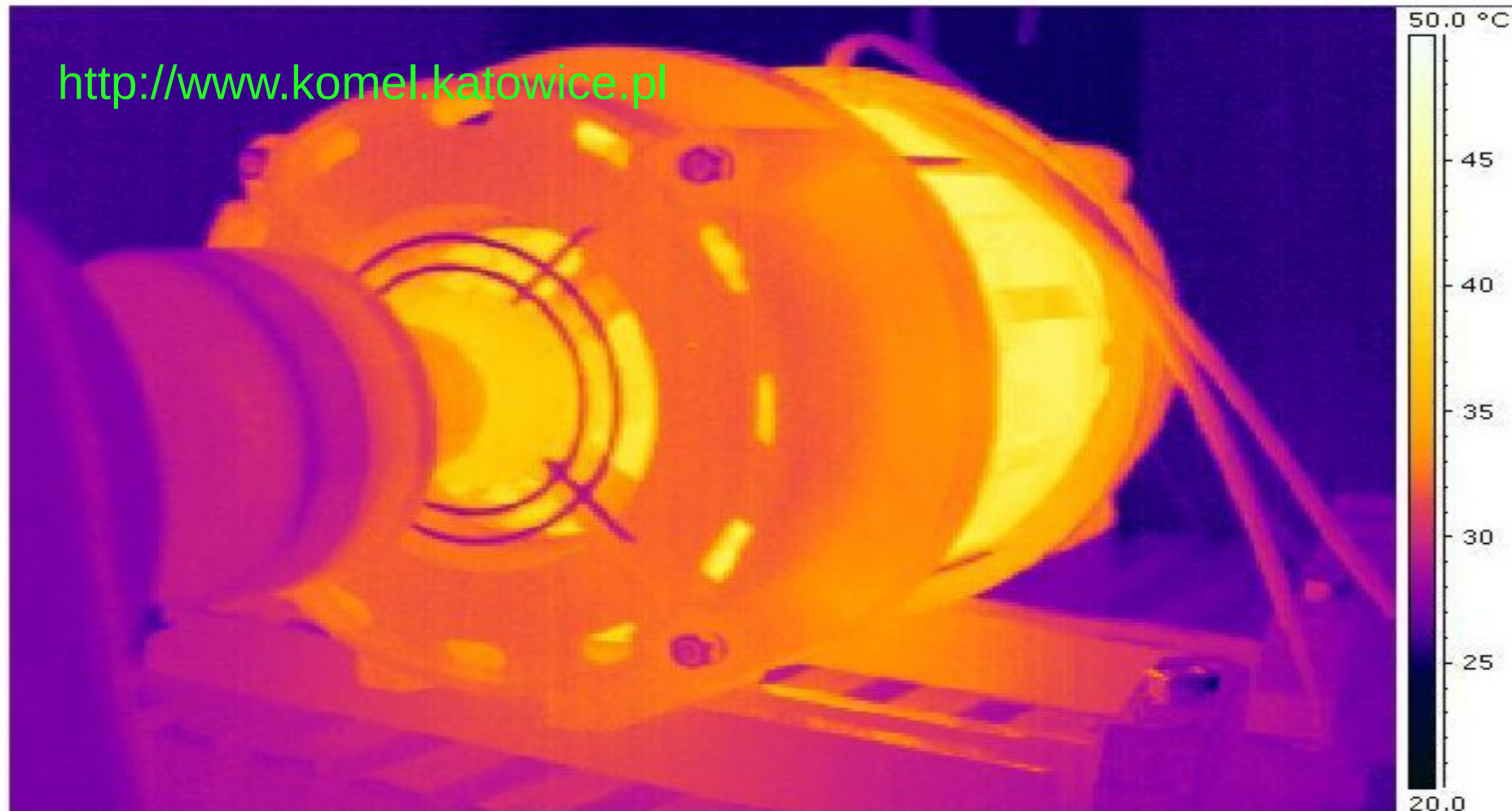
These tests may be run with the help of thermovision cameras. The modern thermovision makes it possible to record digitally temperature distribution of the tested object. The temperature map constructed in this way is then interpreted graphically, each temperature is represented by different colour and the thermal image of the object is seen in the viewfinder. Since the recorded data is in practice synonymous with temperature map, then depending on colour scale adopted and its relationship with temperature scale, the measured object may be imaged differently. The thermovision system is a sort of extra-special thermometer, making it possible to measure temperature remotely and in many places at the same time. Thermographic diagnostics is an effective and non-invasive diagnostic method based on thermovision measurements; image of temperature field of the tested object is obtained with the help of thermovision camera; simultaneously, remote measurement of temperature is also achieved, with the resolution depending on type of transducer used in the camera

Przykłady obrazów



Termiczny obraz elektrowni

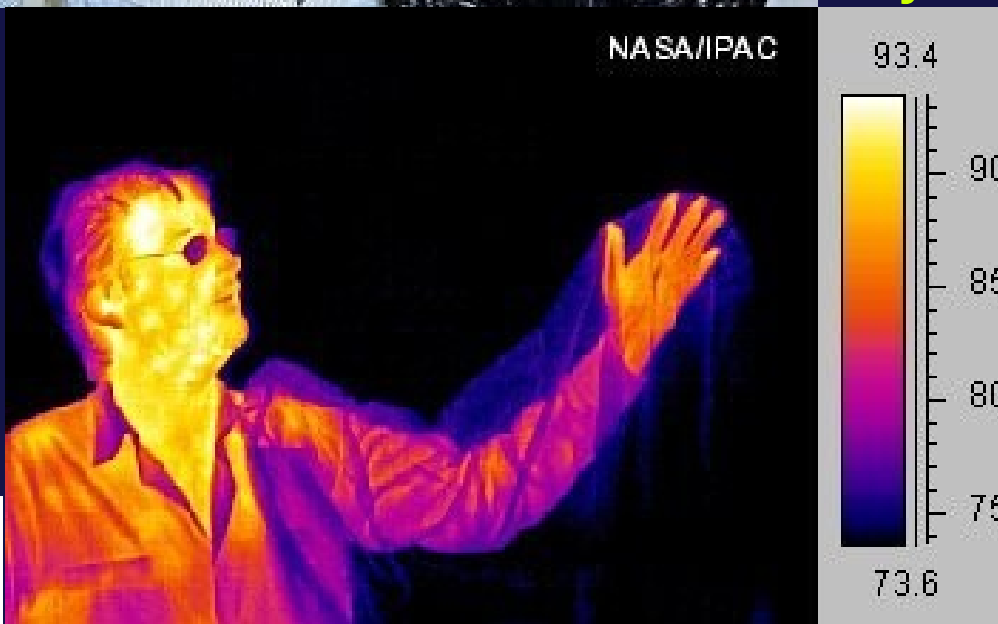
<http://www.komel.katowice.pl>



Silnik elektryczny w kamerze termowizyjnej



Much of a person's energy is radiated away in the form of infrared light. Some materials are transparent in the infrared, but opaque to visible light, as is the plastic bag in this infrared image (bottom). Other materials are transparent to visible light, but opaque or reflective in the infrared, noticeable by darkness of the man's glasses.



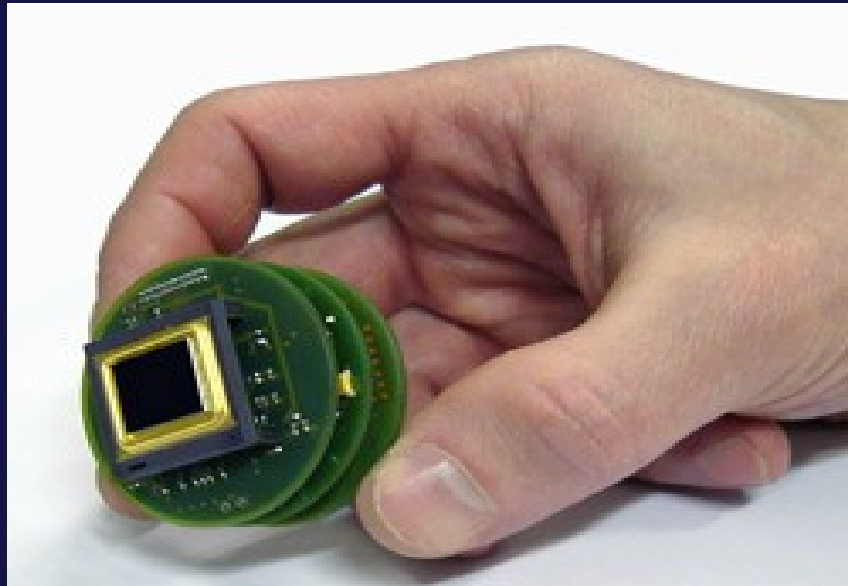
Przykłady przyrządów



Termowizor pomiarowy



<http://www.silar.ru>

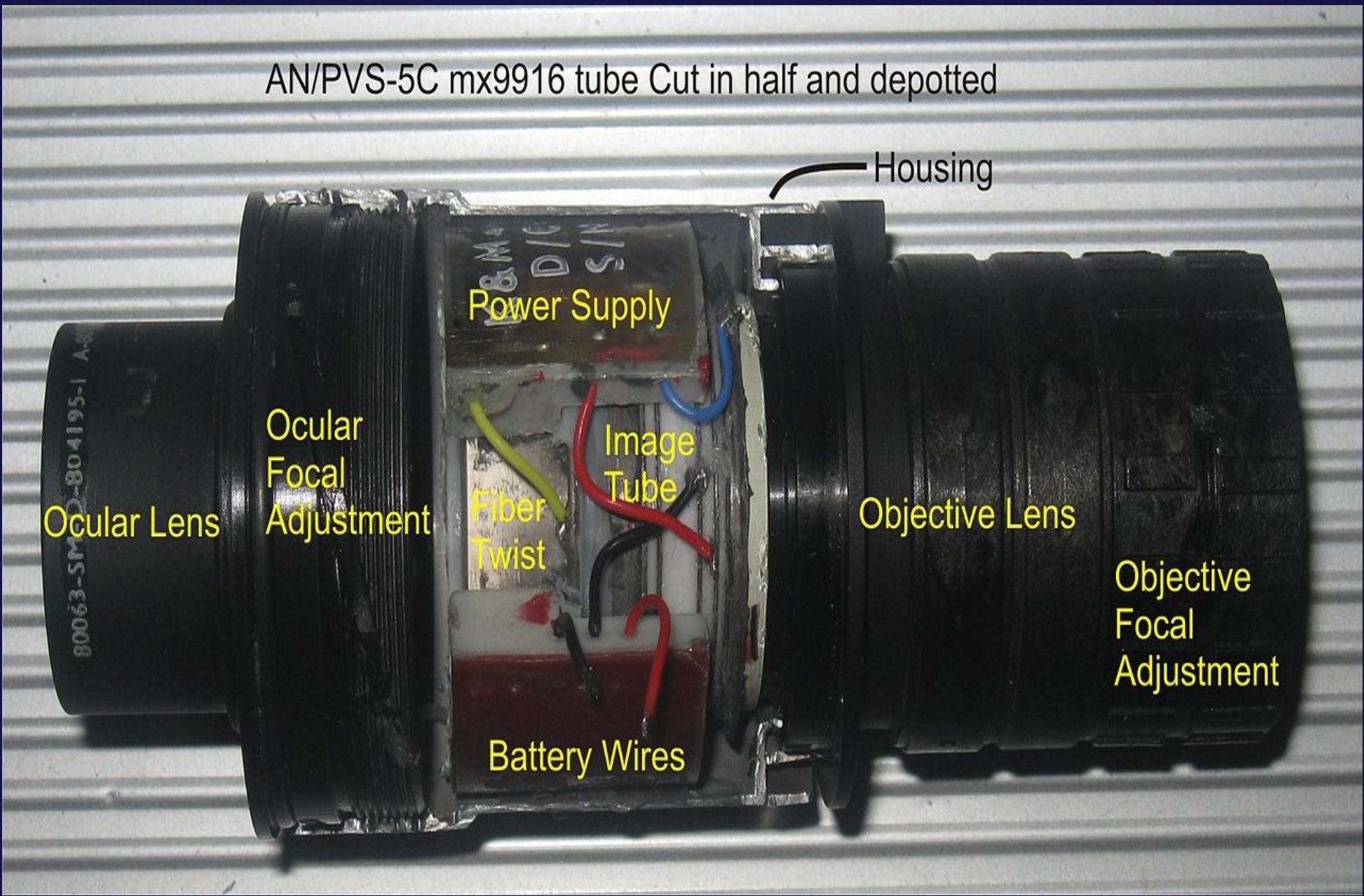


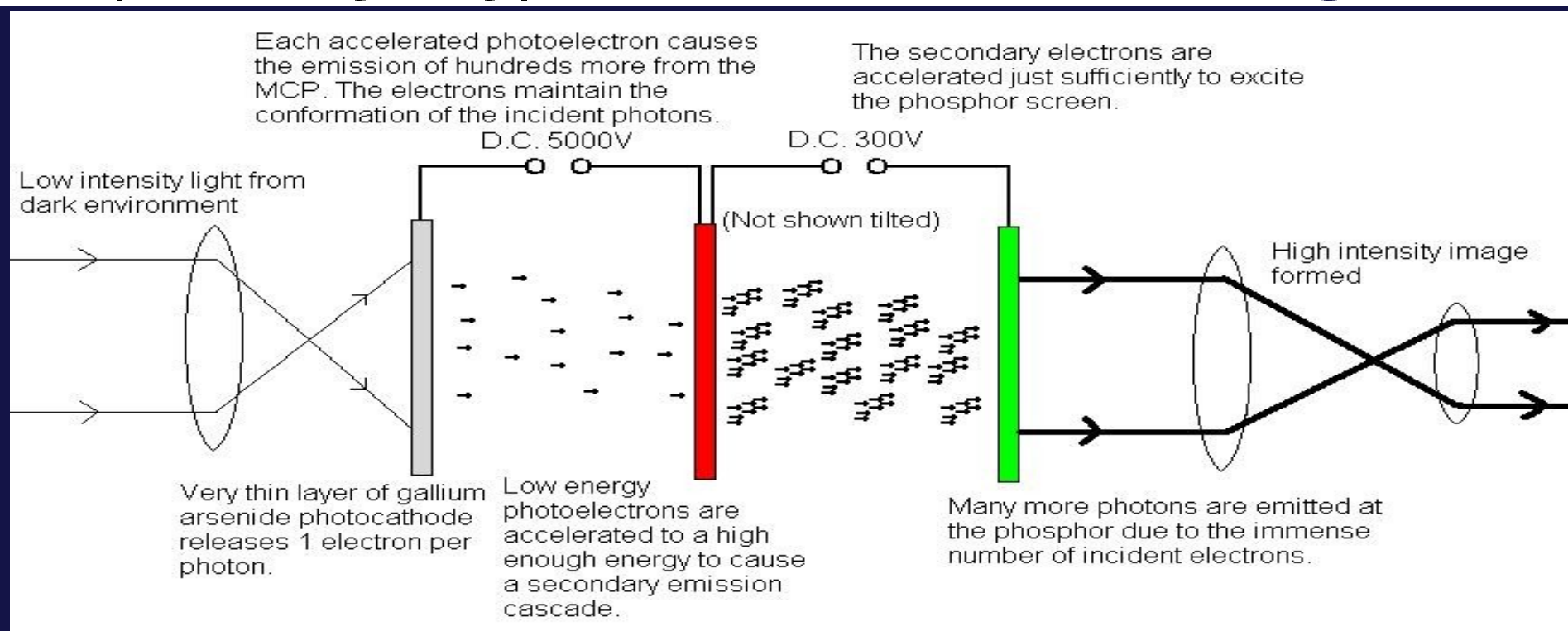
Imaging device	uncooled microbolometer based on α -Si	
Spectral range, μm	8...14	
Image format, pixels	384×288	640×480
Pixel pitch, μm	25×25	
Image size, mm	9.6×7.2	16.0×12.0
NETD @ 30°C, F/1, mK	< 60 @ f = 50 Hz	< 100 @ f = 25 Hz
Frame rates, Hz	50 / 55 / 71	17,5 / 19 / 25
Digital output, bits	14	
Built-in image processing	Spatial filtering: - contrasting, - smoothing, - median filtering	
	Temporal filtering: - digital integration, - recursive filtering, - filtering "25 Hz"	
	Defects correction	
Interface to computer	- serial LVDS via PCI adapter, cable length up to 15 m - serial LVDS via USB2.0 converter	
Analog TV output	monochrome CCIR	<i>optionally</i>
OLED microdisplay (<i>optionally</i>)	- type EMA100100 - resolution 640×480 - frame rate 30 Hz	
TV-monitor image displaying functions	- image inversion (negative/positive) - 2 \times zoom - brightness/contrast adjustment - cross hair and menu displaying - ABC	
Power supply, V	+3.0...+5.5	
Warm-up time, sec	< 5	
Power consumption, W	< 1.2 (without OLED microdisplay) < 1.5 (with OLED microdisplay)	
Overall dimensions (w/o lens), mm	Ø50×50	Ø50×56
Operating temperature range, °C	-40...+60	

<http://www.silar.ru>

Typowe parametry techniczne termowizorów produkowanych w firmie Silar.

Budowa przyrządów





Zasada działania wzmacniacza obrazu (fotopowielacz / photomultiplier) stosowanego zwykle w noktowizorach. Fotopowielacze często stosowane są w laboratoriach, ale wtedy zwykle mają inną konstrukcję.

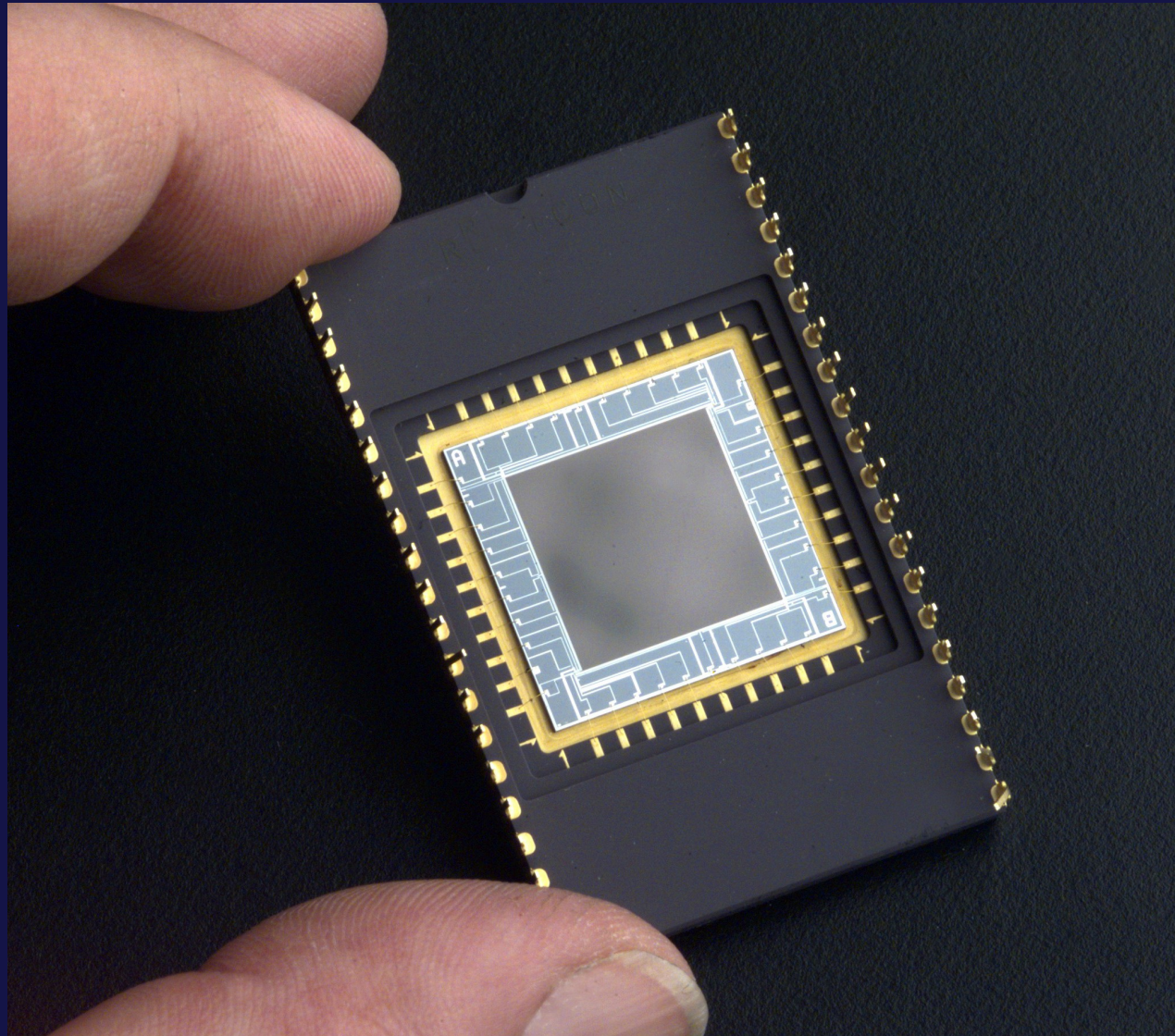
Taka konstrukcja nie pozwala na rozróżnianie prawdziwych barw obserwowanych obiektów, wszystkie mają na ekranie jednakowy (zwykle zielony) kolor, a szczegóły mogą być rozróżniane tylko na podstawie ich jasności. Wzmacniacze obrazu są bardzo czułe, skierowanie niezastłoniętego obiektywu w stronę nawet tak stosunkowo słabych źródeł światła, jak księżyc lub świecący w kierunku obiektywu odległy reflektor może spowodować trwałe uszkodzenie wzmacniacza obrazu. We współczesnych noktowizorach stosuje się automatyczne układy odłączające napięcia przyspieszające przy skierowaniu noktowizora na zbyt silne źródło światła.

CCD

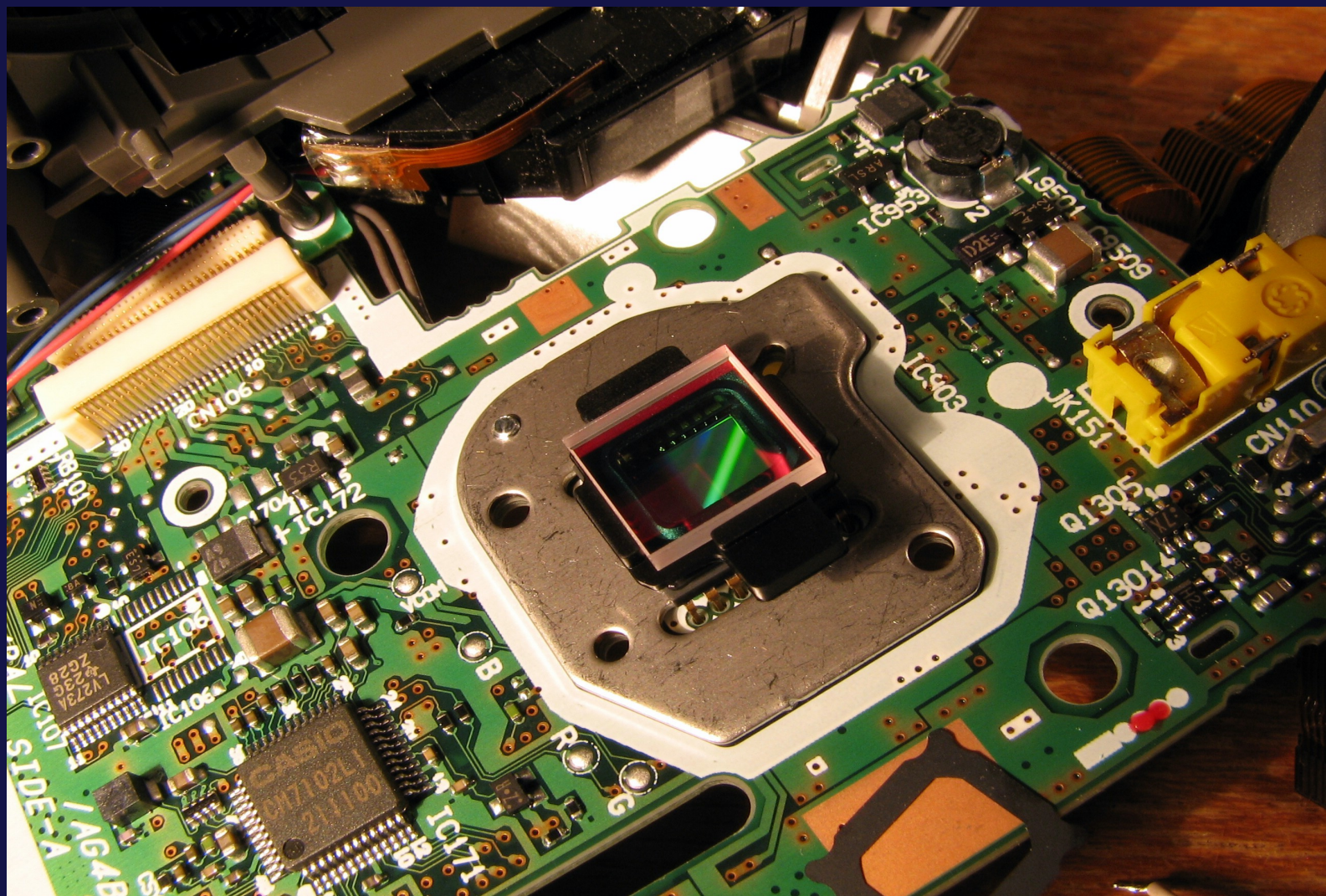
Obecnie coraz powszechniej stosowana jest technika CCD do rejestracji obrazu.

Matryca CCD (ang. Charge Coupled Device) – układ wielu elementów światłoczułych, z których każdy rejestruje, a następnie pozwala odczytać sygnał elektryczny proporcjonalny do ilości padającego na niego światła. W cyfrowych aparatach fotograficznych najczęściej stosowane są filtry barwne, dające możliwość rejestracji natężenia określonej szerokości spektrum światła w danym punkcie matrycy.

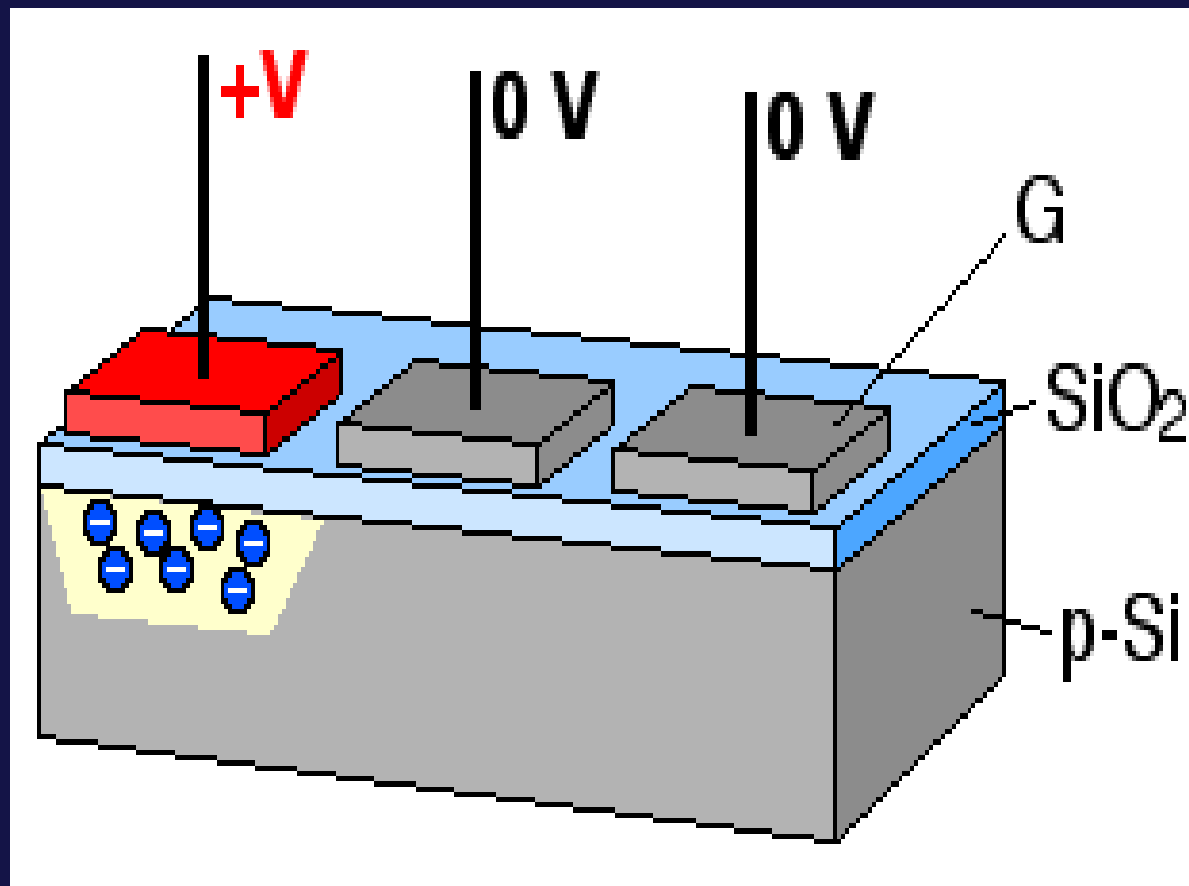
Konstrukcja matrycy została przeprowadzona głównie na użytek naukowy, zaś jej pierwsze zastosowania obejmowały astronomię, gdzie do dziś pozostaje podstawowym narzędziem badawczym, wypierając w zasadzie klisze fotograficzne. Obecnie masowo wykorzystuje się matryce CCD o coraz wyższej rozdzielczości w aparatach cyfrowych, gdzie otrzymane dane po przetworzeniu przez jednostkę centralną aparatu mogą zostać zapisane w postaci plików graficznych. W aparatach fotograficznych stosowane są matryce o rozdzielczościach rzędu od kilku do kilkunastu megapikseli, do ponad 30 megapikseli w pełnoformatowych aparatach profesjonalnych i nawet 80 megapikseli w cyfrowych aparatach średnioformatowych.



Matryca CCD używana do detekcji obrazów.



Sensor CCD zamontowany w kamerze cyfrowej



Zasada działania CCD

Dodatkowa literatura (linki do stron www)

- Black body radiation (po angielsku)
- Prawo Stefana-Boltzmannna
- Promieniowanie cieplne
- Mikrofalowe promieniowanie tła
- Max Planck
- Mechanika kwantowa
- Noktowizor
- Termowizor
- Przetwornik obrazu / wzmacniacz światła / fotopowielacz
- Image intensifier
- Charge Coupled Device / CCD