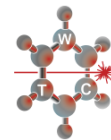




Wojskowa
Akademia
Techniczna

Wydział
Nowych Technologii i Chemii



Promieniowanie podczerwone, czyli światło niewidzialne dla oka

mjr dr hab. inż. Małgorzata Kopytko

Instytut Fizyki Technicznej

Zakład Fizyki Ciała Stałego

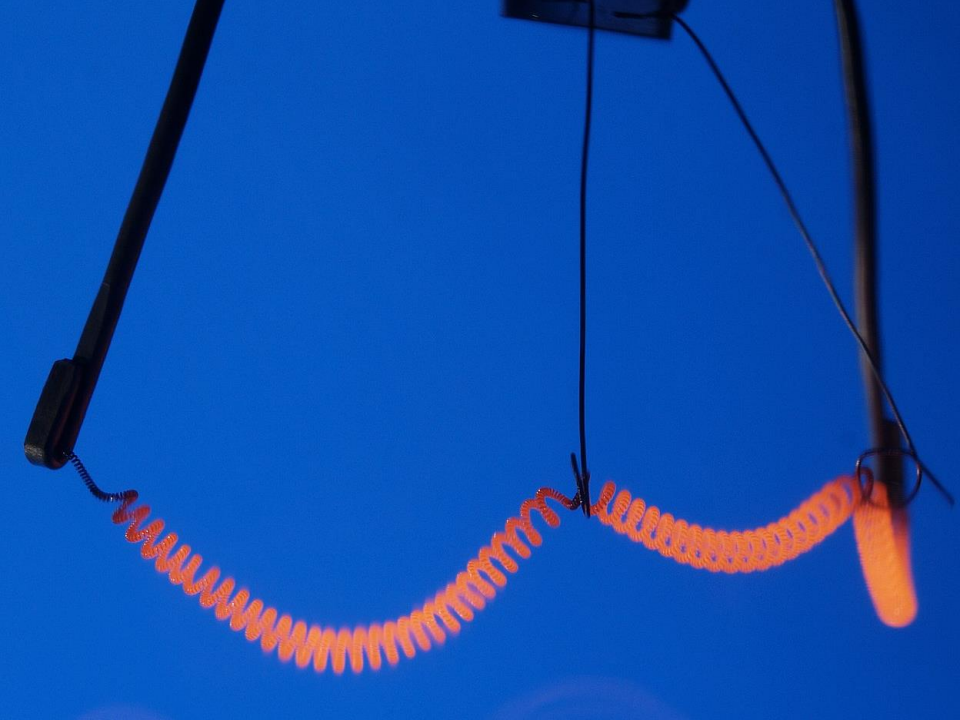
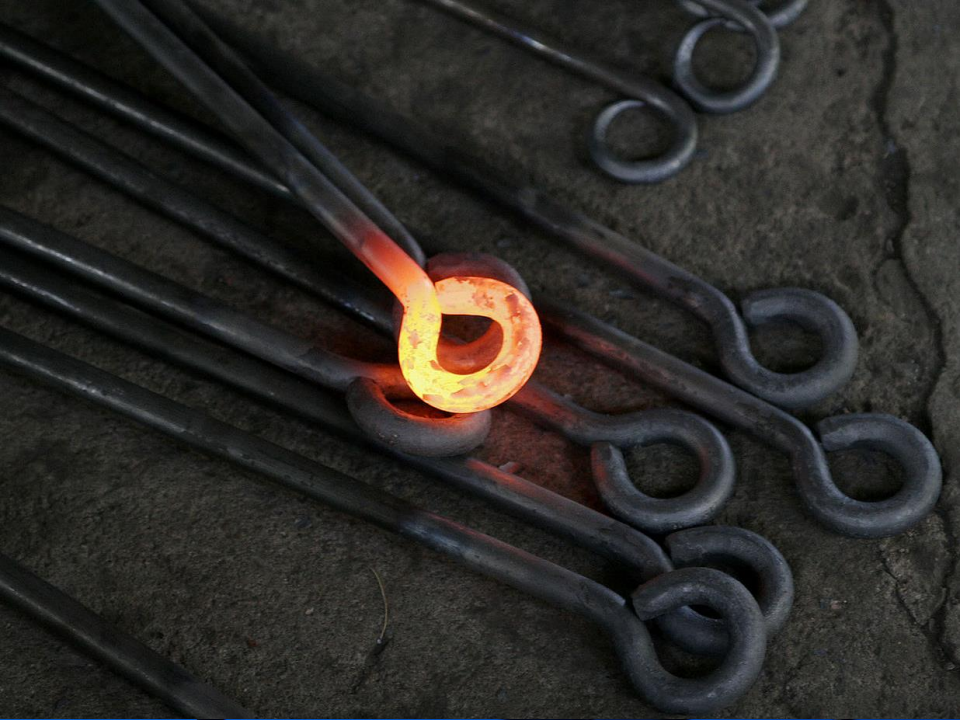


Promieniowanie cieplne

Wszystkie ciała, których temperatura jest wyższa od zera bezwzględnego ($-273,15^{\circ}\text{C} = 0\text{ K}$) wysyłają promieniowanie elektromagnetyczne (promieniowanie cieplne).



W 1859 roku niemiecki fizyk Gustav Kirchhoff sformułował prawo promieniowania, które prowadzi do wniosku, że zdolność ciała do emisji promieniowania o dowolnej długości fali (częstotliwości) zależy wyłącznie od temperatury tego ciała.



1893: Prawo Wiena

Ze wzrostem temperatury widmo promieniowania ciała przesuwa się w stronę fal krótszych, zgodnie ze wzorem:

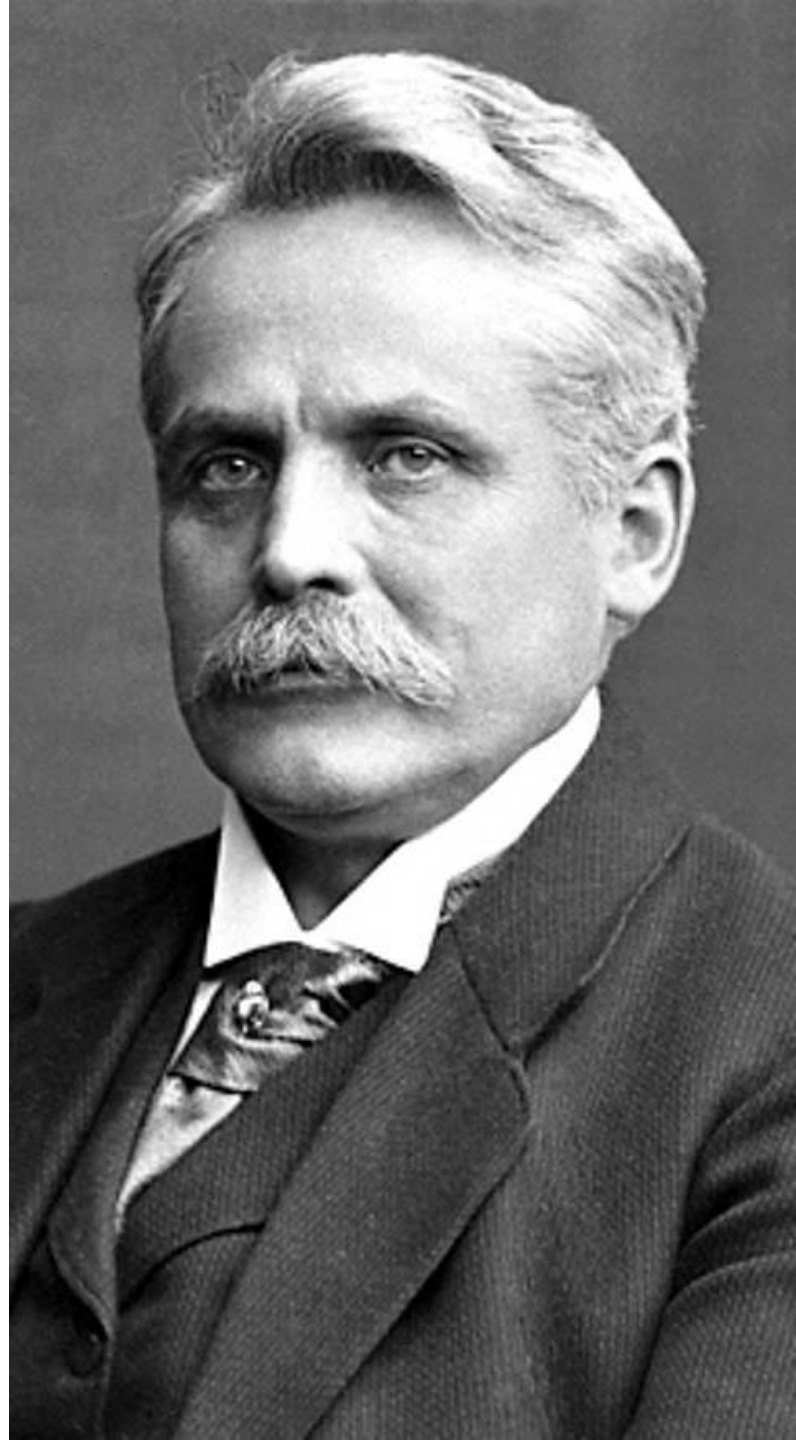
$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

gdzie:

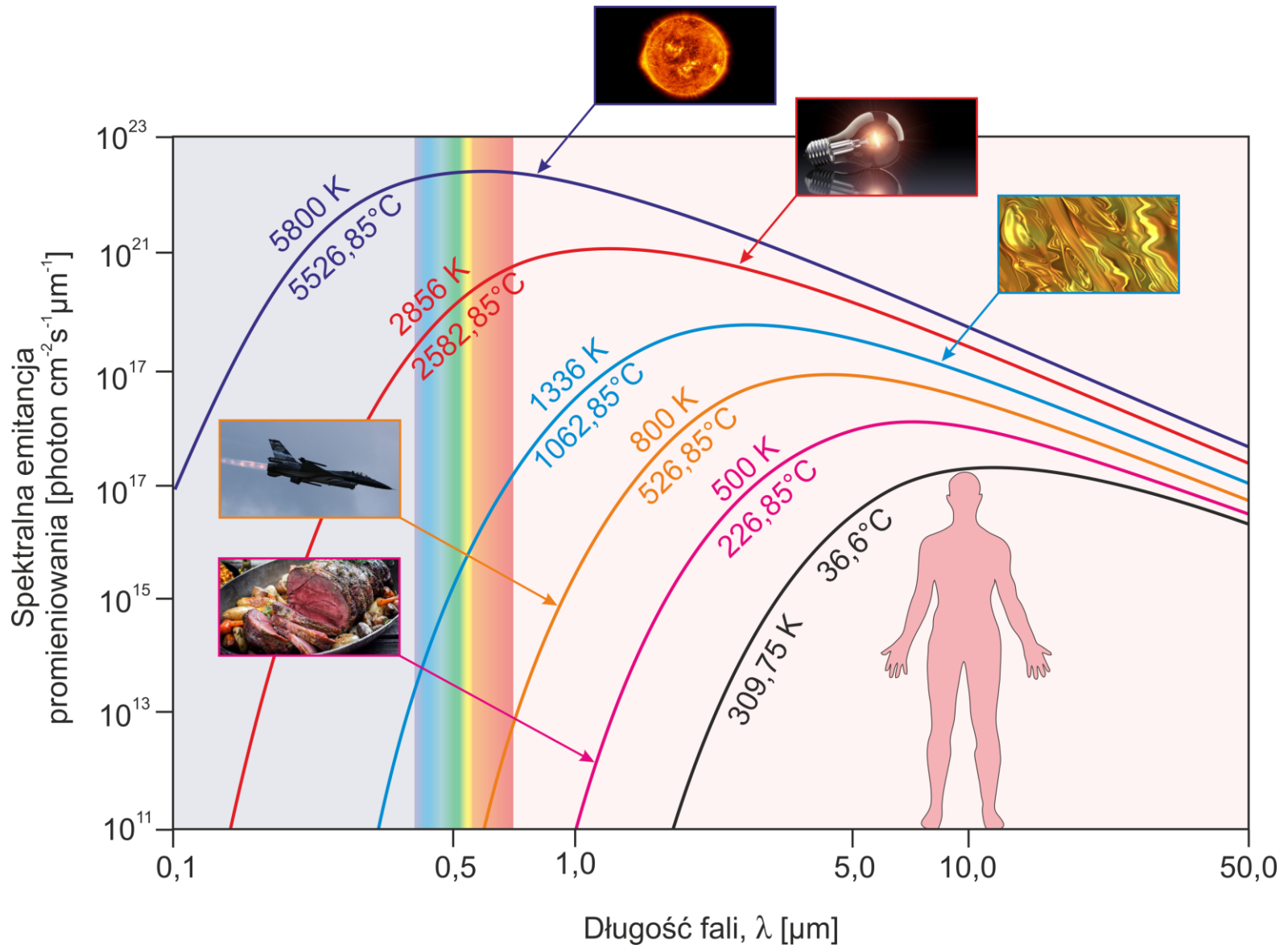
- λ_{max} – długość fali o maksymalnej mocy promieniowania mierzona w metrach,
- T – temperatura ciała doskonale czarnego mierzona w kelwinach,
- b – stała Wiena.

Wilhelm Wien
(1864-1928)

1911 – Nagroda Nobla w dziedzinie fizyki
„Za swoje odkrycia dotyczące praw rządzących promieniowaniem cieplnym”



Promieniowanie cieplne ciał





1859: Prawo Kirchoffa

Ciało zdolne do pochłaniania całego promieniowania o dowolnej długości fali jest równie zdolne do emisji promieniowania:

$$a(T, \lambda) = \varepsilon(T, \lambda)$$

Zgodnie z zasadą zachowania energii:

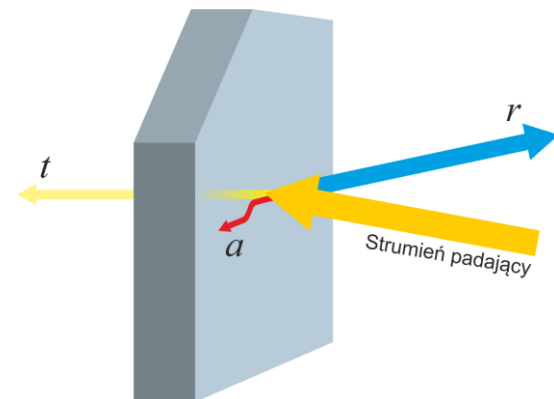
$$a + r + t = 1$$

gdzie:

a – absorpcja,

r – odbicie,

t – transmisja.



Gustaw Kirchhoff
(1824-1887)

Twórca prawa promieniowania cieplnego oraz praw dotyczących obwodów elektrycznych



W świetle widzialnym plastikowa torba jest nieprzezroczysta i nie widać dłoni mężczyzny. Z drugiej strony jego okulary są przezroczyste i widzimy oczy mężczyzny.



Światło podczerwone przechodzi przez czarną plastikową torbę i możemy zobaczyć dłonie mężczyzny. Jego okulary są tutaj całkowicie nieprzezroczyste.



1900: Hipoteza kwantów

Promieniowanie elektromagnetyczne występuje w postaci kwantów fali świetlnej (fotonów) o energii:

$$E = h\nu \quad \text{lub} \quad E = \frac{hc}{\lambda}$$

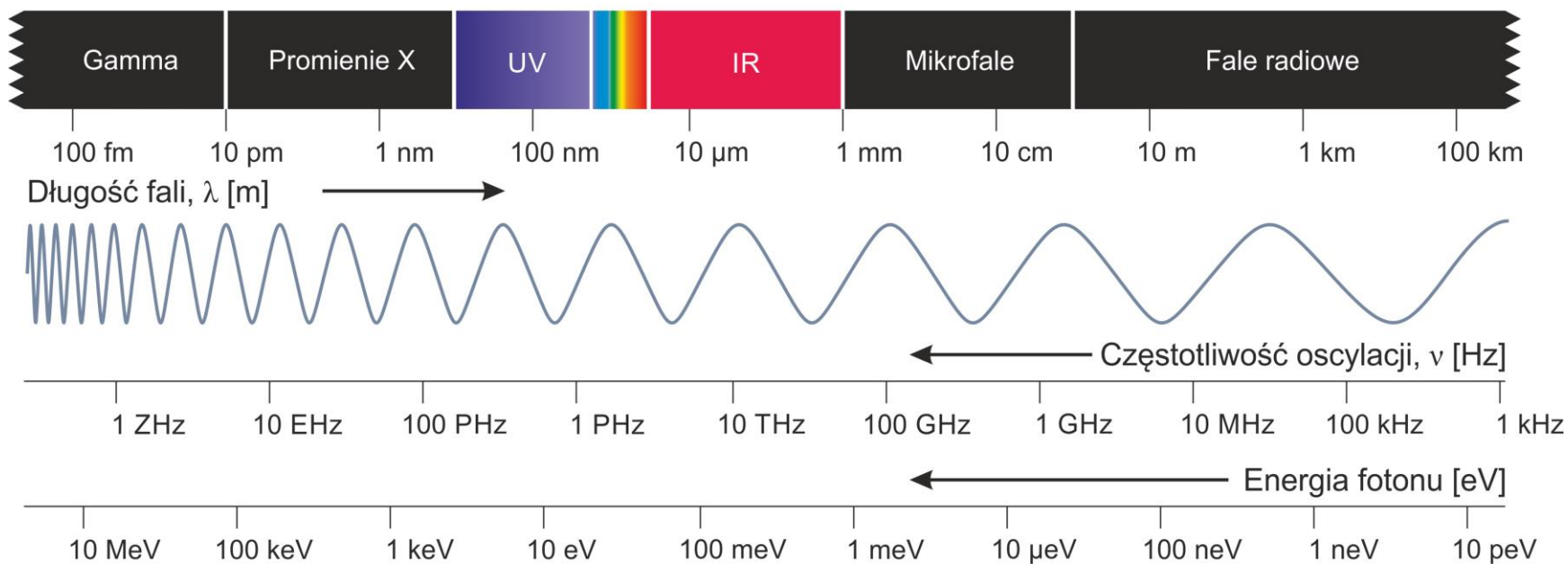
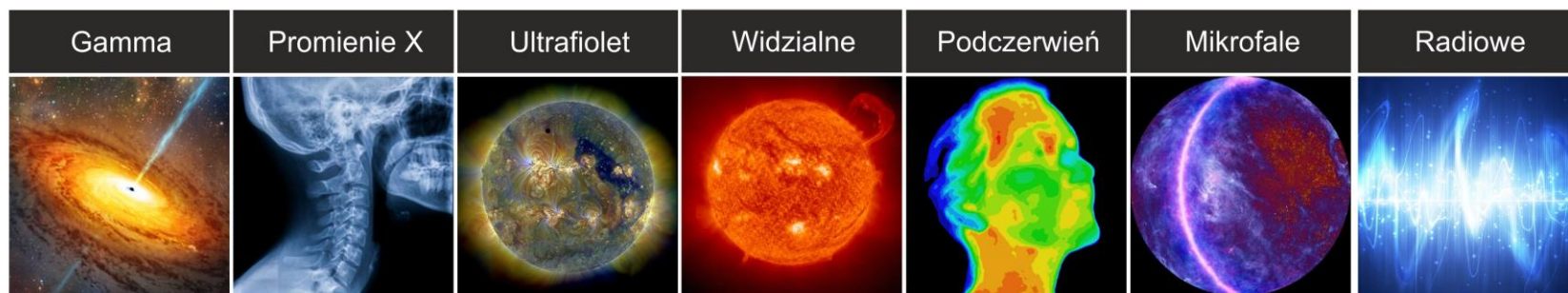
gdzie:

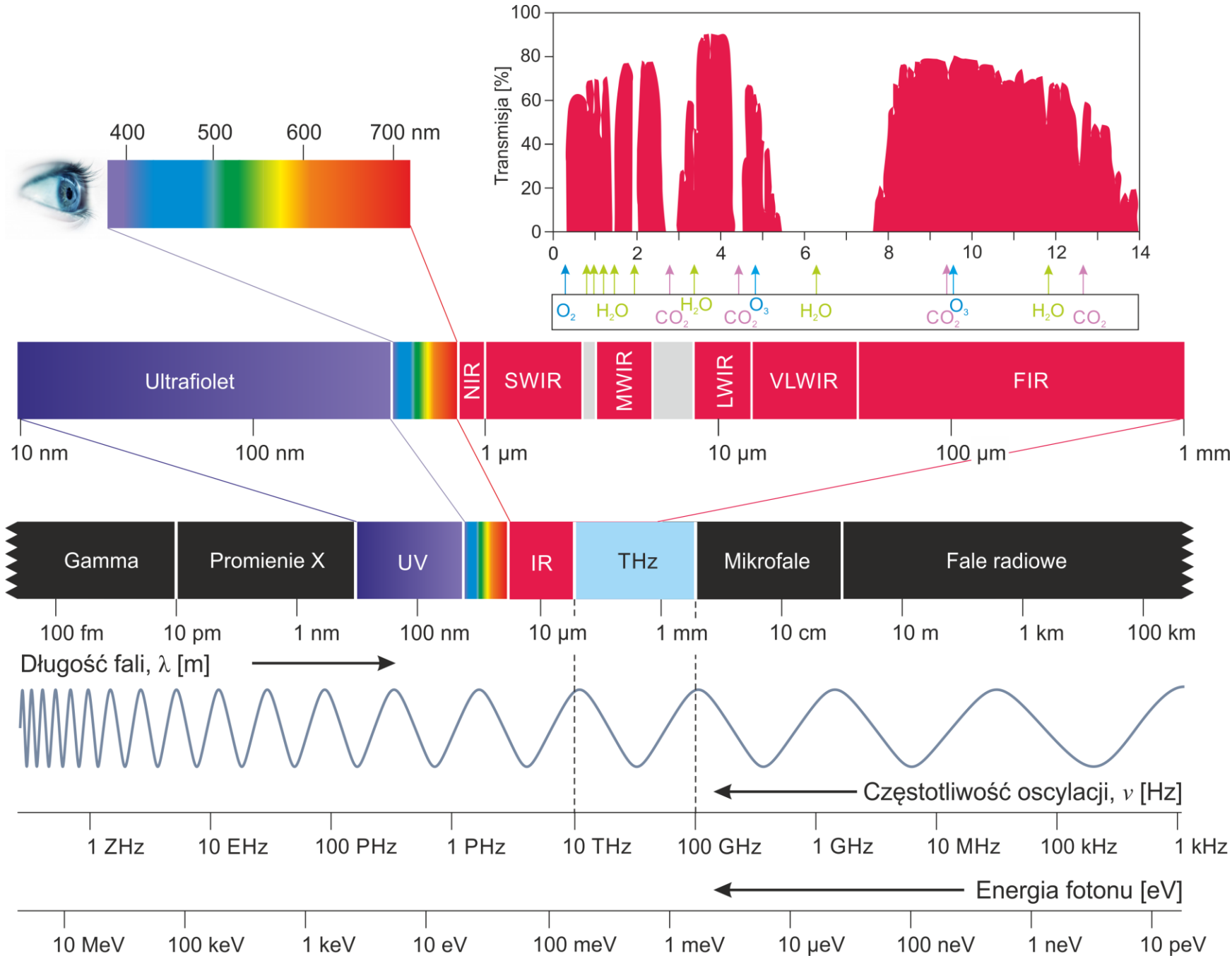
ν – częstość,
 λ – długość fali,
 c – prędkość światła,
 h – stała Plancka.

Max Planck
(1858-1947)

1918 – Nagroda Nobla w dziedzinie fizyki
„W uznaniu jego zasług, które oddał w rozwoju fizyki przez odkrycie kwantów energii”

Widmo promieniowania elektromagnetycznego





1800: Odkrycie podczerwieni

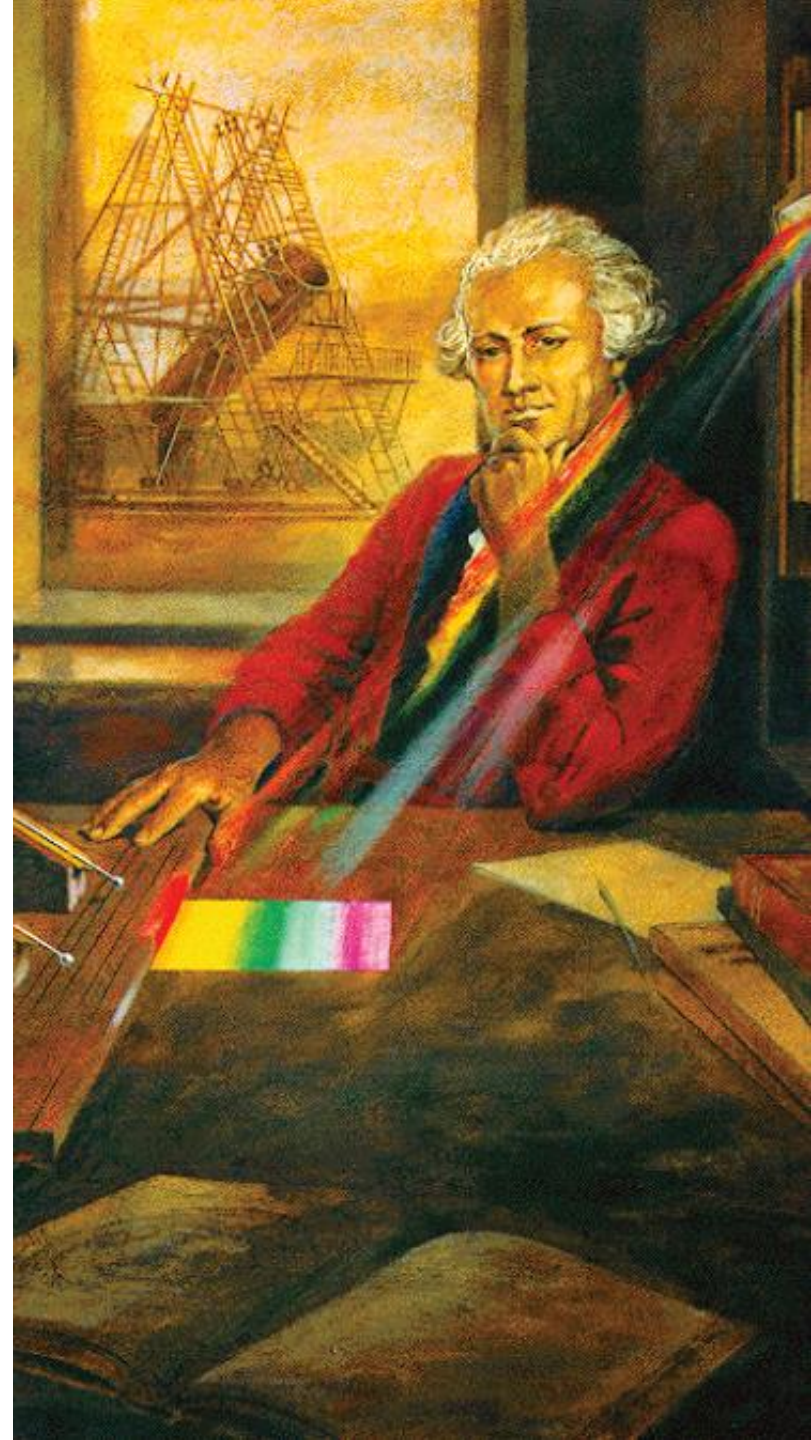
XIV. *Experiments on the Refrangibility of the invisible Rays of the Sun.* By William Herschel, LL. D. F. R. S.

Read April 24, 1800.

IN that section of my former paper which treats of radiant heat, it was hinted, though from imperfect experiments, that the range of its refrangibility is probably more extensive than that of the prismatic colours ...

William Herschel
(1739-1822)

1818 – odkrycie planety Uran
11 lutego 1800 – odkrycie promieniowania podczerwonego

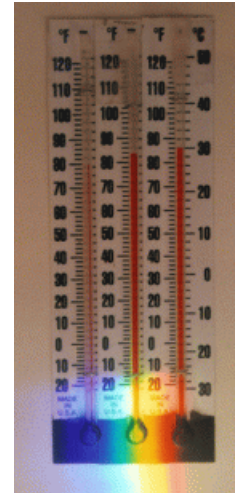
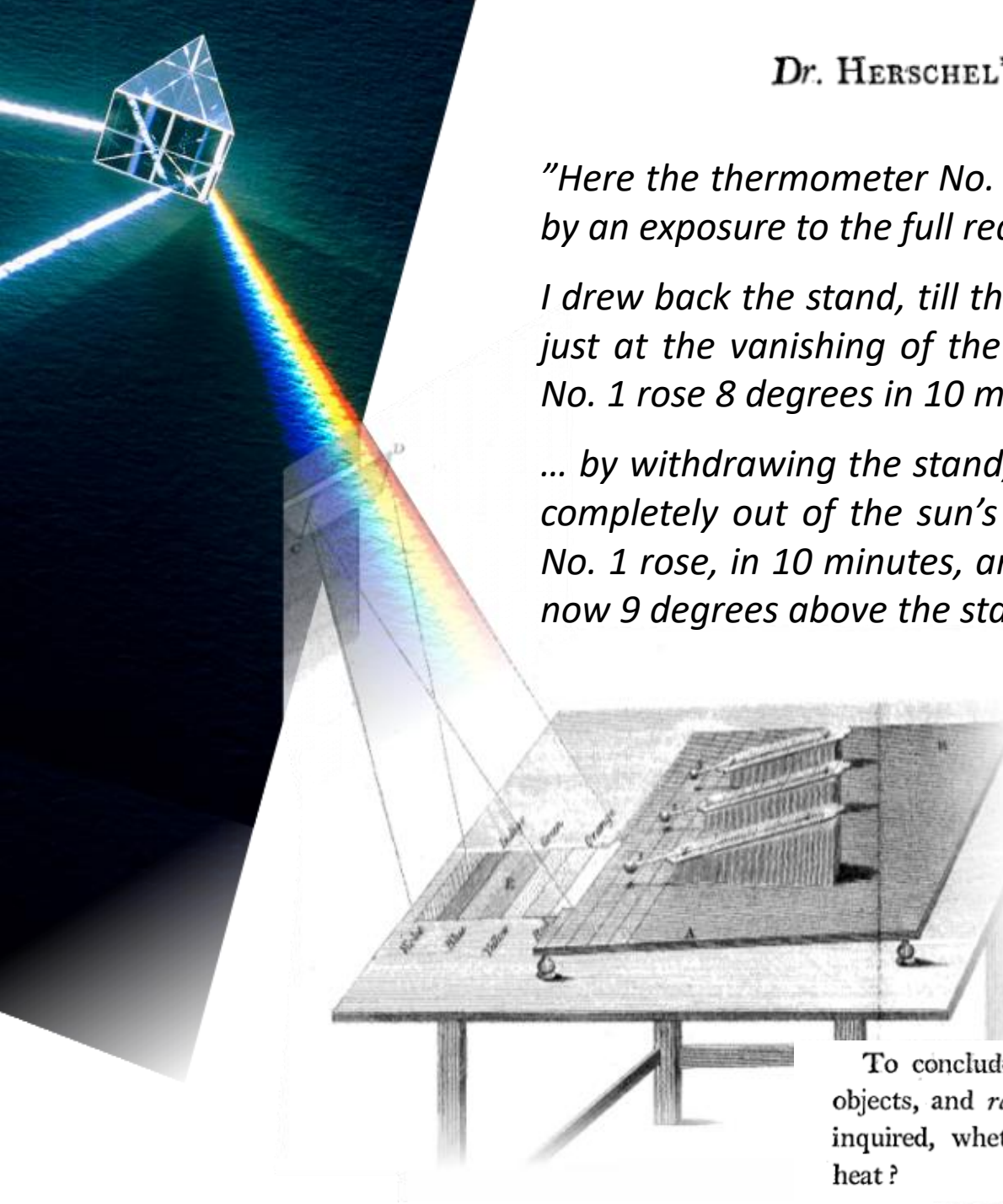


Dr. HERSCHEL's *Experiments, &c.*

"Here the thermometer No. 1 rose 7 degrees in 10 minutes , by an exposure to the full red coloured rays.

I drew back the stand, till the centre of the ball of No. 1 was just at the vanishing of the red colour, ... the thermometer No. 1 rose 8 degrees in 10 minutes.

... by withdrawing the stand, till the whole ball of No. 1 was completely out of the sun's visible rays, ...the thermometer No. 1 rose, in 10 minutes, another degree higher ... and was now 9 degrees above the standard."

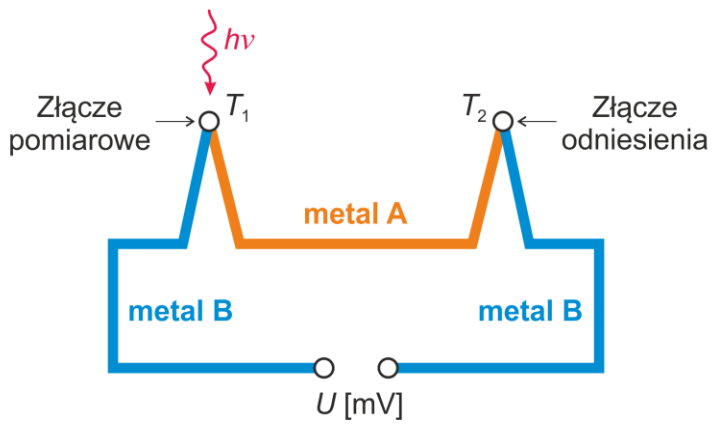


To conclude, if we call *light*, those rays which illuminate objects, and *radiant heat*, those which heat bodies, it may be inquired, whether light be essentially different from radiant heat?

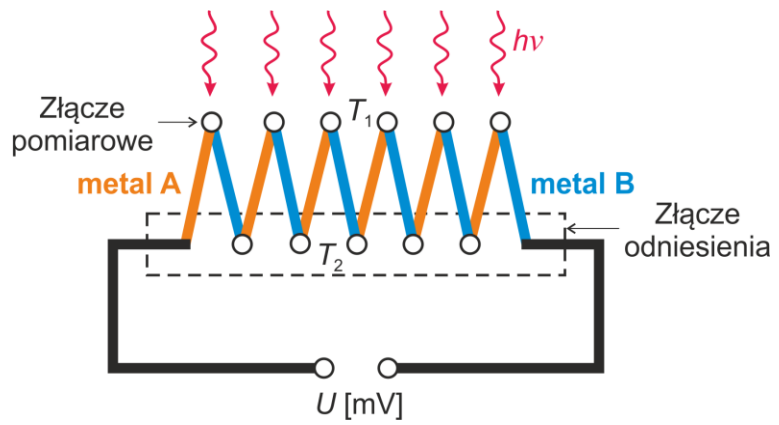


Leopoldo Nobili
(1784-1835)

1829: Wynalezienie termopary



1831: Zbudowanie pierwszego termostosu

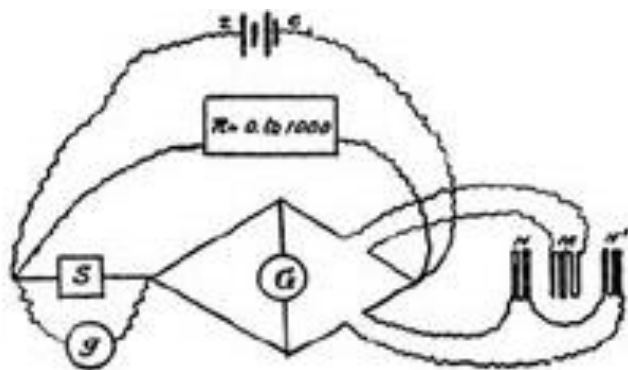


Macedonio Melloni
(1798-1854)

Urządzenia pozwalały wykryć ciepło emitowane przez ciało człowieka z odległości 3 metrów.

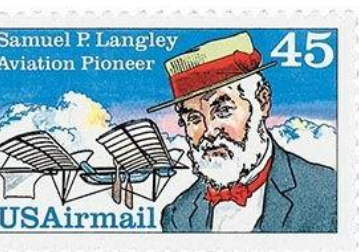
1878: Wynalezienie bolometru

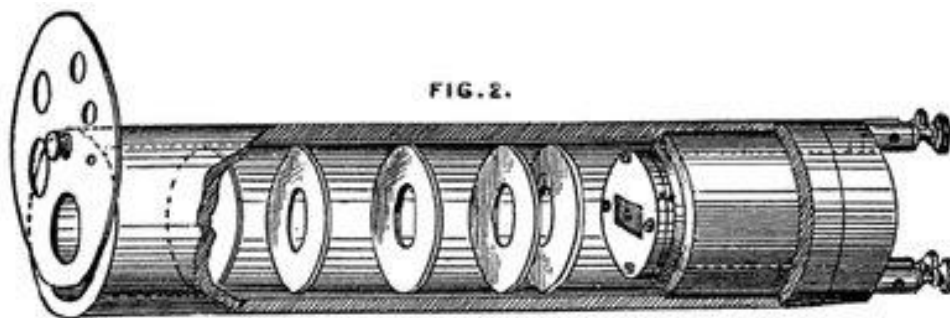
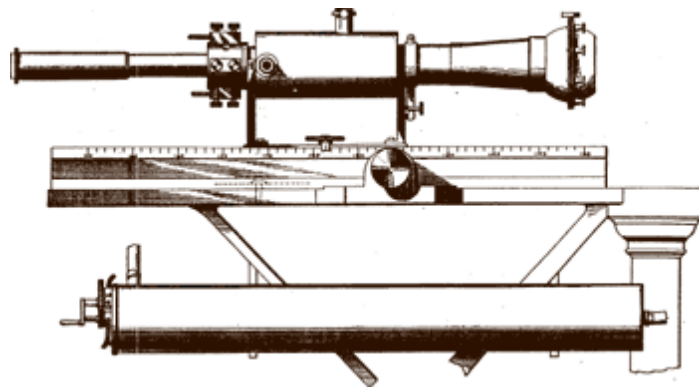
Bolometr Langley'a mierzył zmianę rezystancji paska platynowego, włączonego w jedno ramię mostka Wheatstone'a, po wystawieniu na działanie promieniowania podczerwonego.



Samuel Pierpont Langley
(1834-1906)

1878 – wynalezienie bolometru
Astronom,
konstruktor maszyn latających

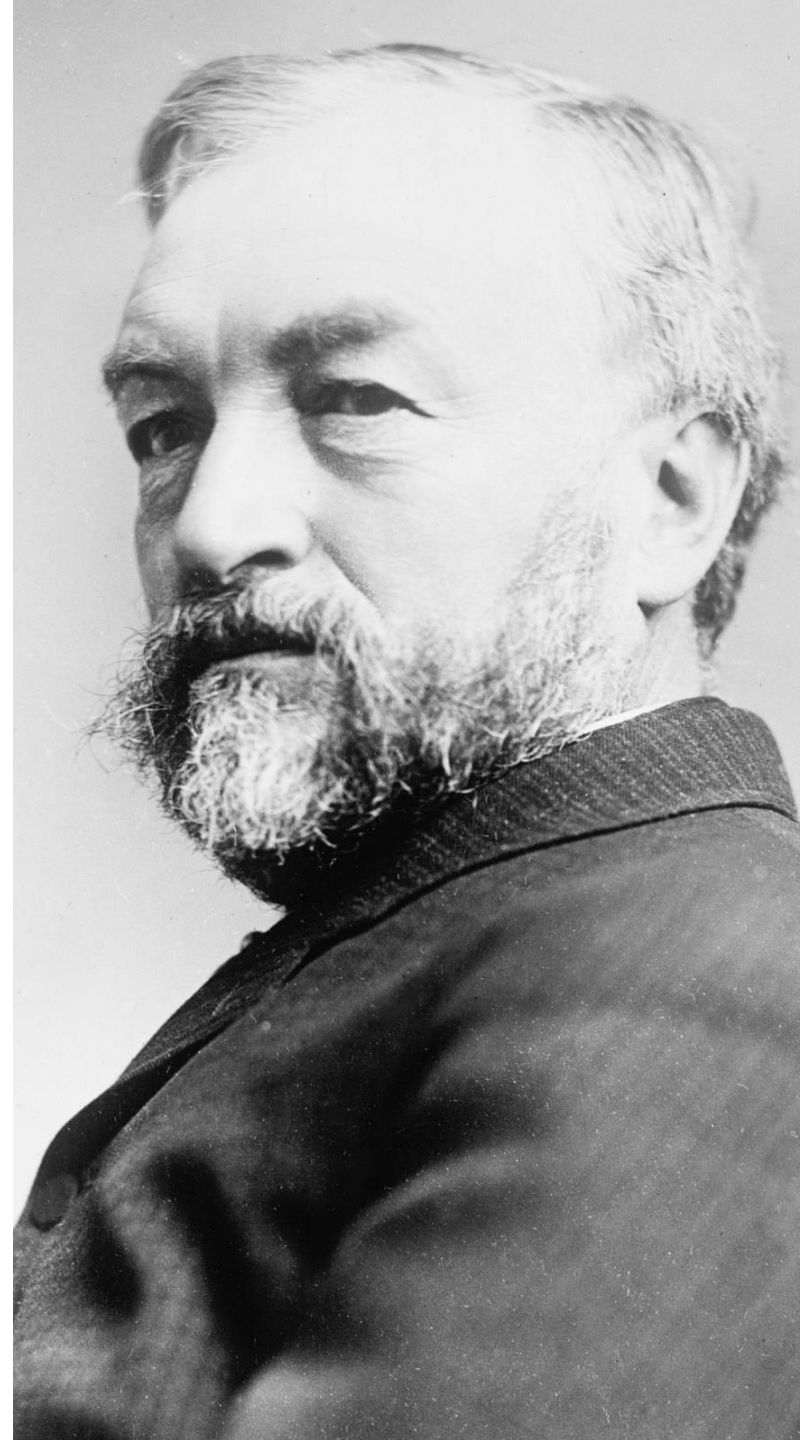
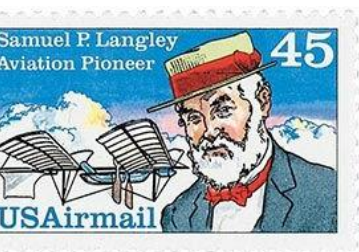




Udoskonalony bolometr Langley'a wykrywał ciepło krowy z odległości 400 metrów.

Samuel Pierpont Langley (1834-1906)

1878 – wynalezienie bolometru
Astronom,
konstruktor maszyn latających

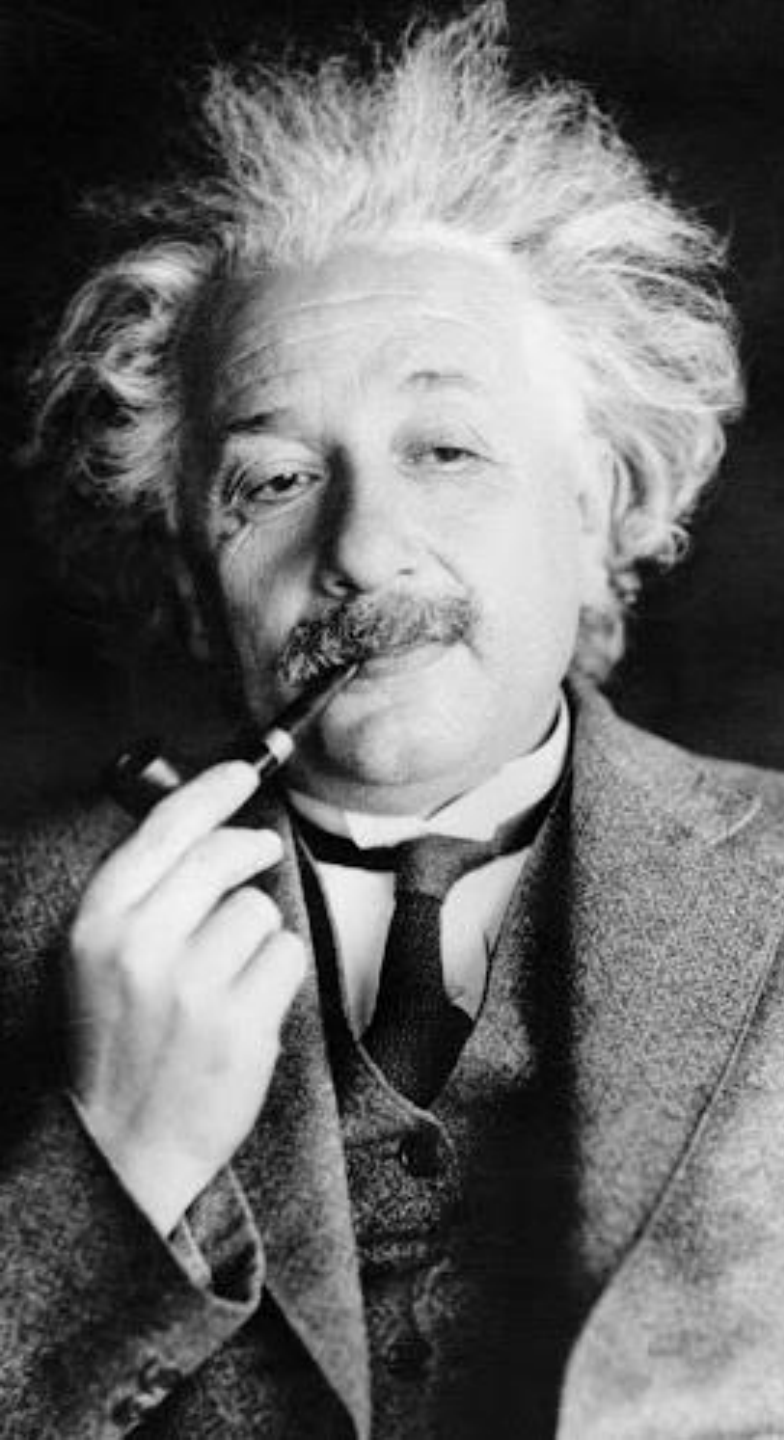


The background of the slide is a night-vision image of a soldier in a ghillie suit. The soldier is wearing a full-body suit made of grass and twigs, blending into the dark, grassy environment. They are holding a rifle and looking through binoculars. The entire image has a green tint, characteristic of night-vision technology.

Widzenie w nocy

Noktowizja, polega na wzmacnianiu natężenia światła od bardzo niskich wartości do takich, które umożliwiają obserwację otoczenia w nocy lub przy znikomym oświetleniu.

Głównym elementem umożliwiającym działanie noktowizora jest detektor fotoemisyjny (wzmacniacz obrazu).



1905: Efekt fotoelektryczny

Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne – polega na emisji elektronów z powierzchni metalu jeżeli padają na niego fotony o wystarczająco dużej energii:

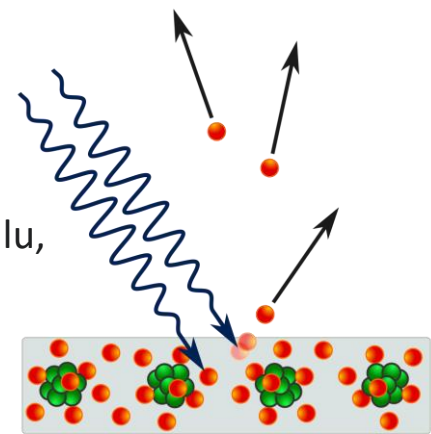
$$h\nu = W + E_k$$

gdzie:

$h\nu$ – energia fotonu,

W – praca wyjścia elektronu z metalu,

E_k – energia kinetyczna elektronu.



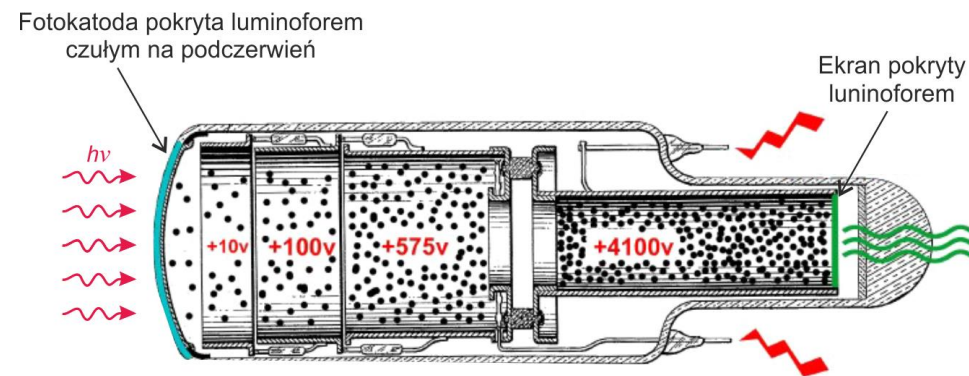
Albert Einstein
(1879-1955)

1921 – Nagroda Nobla w dziedzinie fizyki

„Za jego zasługi dla fizyki teoretycznej, a szczególnie za odkrycie praw rządzących efektem fotoelektrycznym”

Wzmacniacze obrazu

- 1934: Gilles Holst (Holandia) pracując dla firmy Philips konstruuje pierwszy wzmacniacz obrazu (tuba wzmacniająca) umożliwiający oglądanie światła podczerwonego w czasie rzeczywistym – układ optyczny składał się z jednej soczewki, w związku z czym widziano obraz nieodwrócony.
- 1936: V.K. Zworykin i G.A. Morton (USA, RCA research laboratory) tworzą pierwszy odwracający wzmacniacz obrazu.
- 1942: W RCA research laboratory (USA) powstaje lampa próżniowa typ 1P25, która w połączeniu z optyką stanowiła podstawę budowy alianckich teleskopów (Snooperscopes & Sniperscopes).



Celownik Sniperscope M2 (USA)

Celownik Sniperscope M2 zamocowany na karabinie Winchester T3. Opracowany w 1943 roku aby pokonać japońską taktykę infiltracji. Chociaż faktycznie użyto mniej niż 500 sztuk celownika Sniperscope M2, stanowiło to około 30% wszystkich japońskich ofiar, które poniosły śmierć z broni ręcznej w pierwszym tygodniu kampanii na Okinawie.



Celownik ZG 1229 Vampir (Niemcy)

Celownik ZG 1229 Vampir mocowany na karabinie szturmowym StG 44, po raz pierwszy użyty przez Wehrmacht w ostatnim roku wojny. Waga celownika to ok. 2,3 kg, pozostałego wyposażenia (w tym m.in. baterii do lampy przenoszonej w drewnianym pojemniku, transformatora przenoszonego w zmodyfikowanej puszcze po masce przeciwgazowej) to ok. 13 kg.

Wyprodukowano 310 sztuk celowników karabinowych serii 0.



Noktowizory pasywne



1965-70: AN/PVS-1 Night Vision Sight
“Starlight Scope” (gen. 1)



2000-obecnie: AN/PVS-14 Monocular Night
Vision Device (gen. 3)



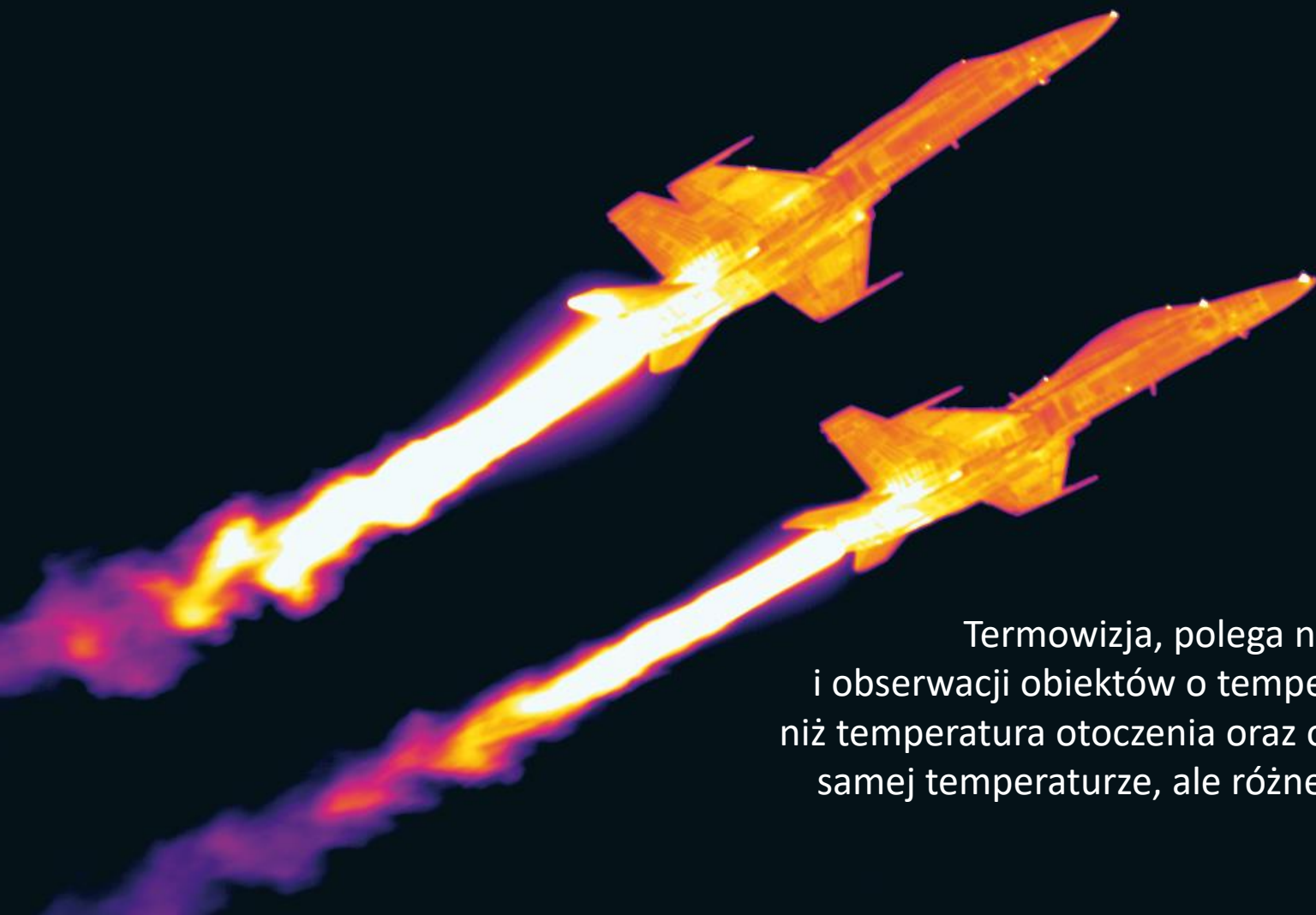
1970-80: AN/PVS-3A Night Vision Sight
“Miniscope- Starlight Scope” (gen. 2)



2008-obecnie: AN/PSQ-20 Enhanced Night
Vision Goggle (gen. 3)

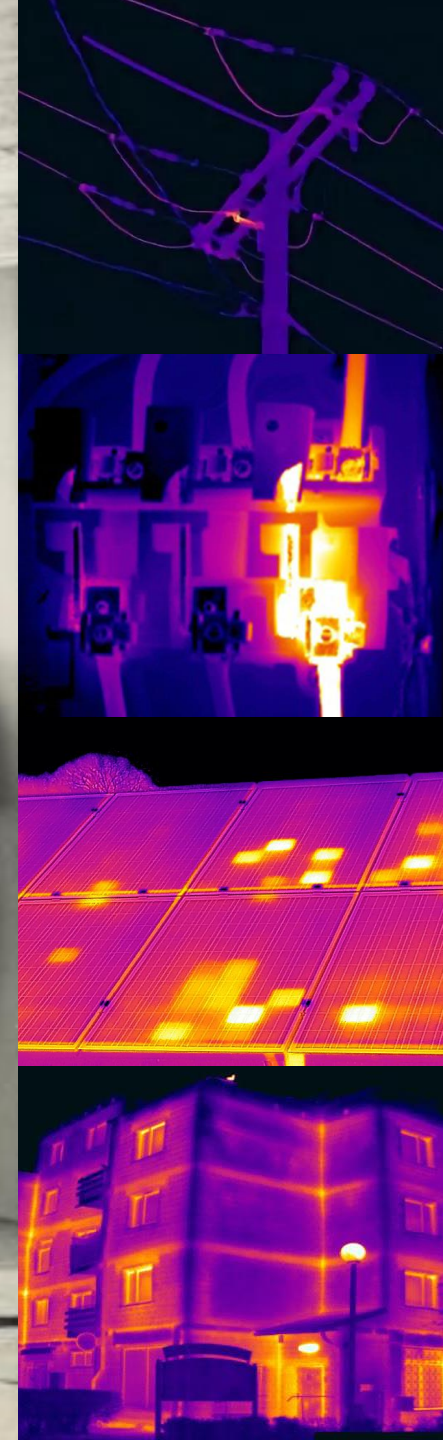


Obrazowanie w podczerwieni



Termowizja, polega na wykrywaniu i obserwacji obiektów o temperaturze innej, niż temperatura otoczenia oraz obiektów o tej samej temperaturze, ale różnej emisyjności.

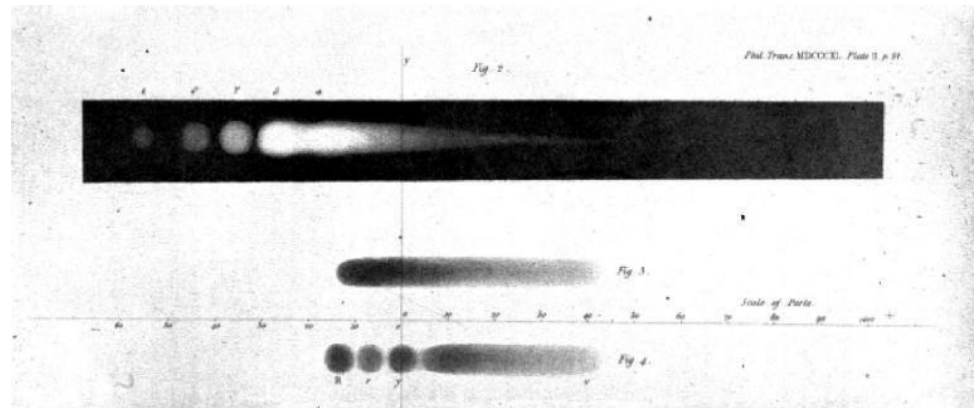
Diagnostyka termowizyjna





1840: Pierwszy termogram

John Herschel, syn odkrywcy podczerwieni, uzyskał pierwszy zapis obrazu cieplnego na papierze poprzez odparowanie mieszaniny węgla i alkoholu przy użyciu skupionego światła słonecznego. Obraz nazwał „termogramem”.

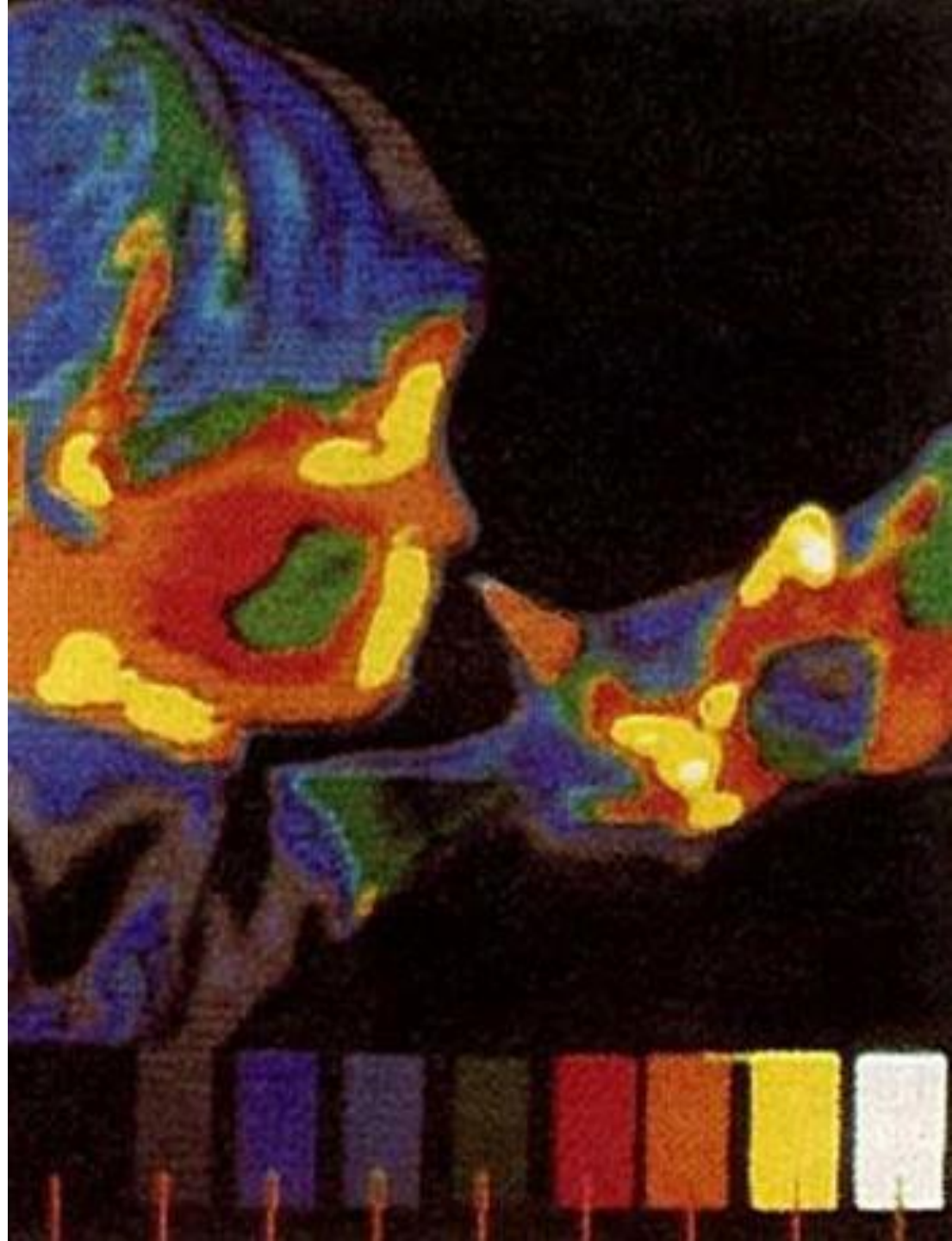


John Herschel
(1792-1871)

Astronom, chemik i fizyk, pionier fotografii
1840 – wykonanie pierwszego obrazu cieplnego „termogramu” na papierze

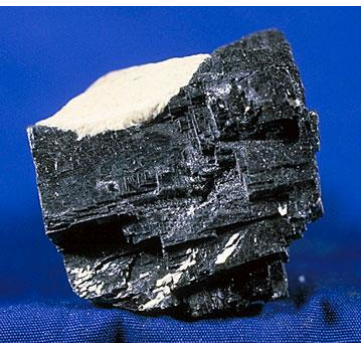
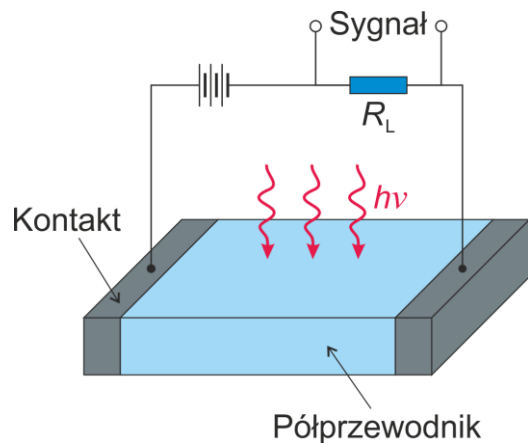
1967: Pierwszy termogram kolorowy

Pierwszy elektroniczny
termogram kolorowy został
wykonany przy użyciu 9 naświetleń
przez różne filtry barwne
(AGA Thermovision, Szwecja).



Fotoprzewodnictwo

Zmiana przewodnictwa elektrycznego materiału pod wpływem promieniowania świetlnego (odkryte w selenie przez Smitha w 1873 roku, a później przez Bosego w siarczku ołowiu).



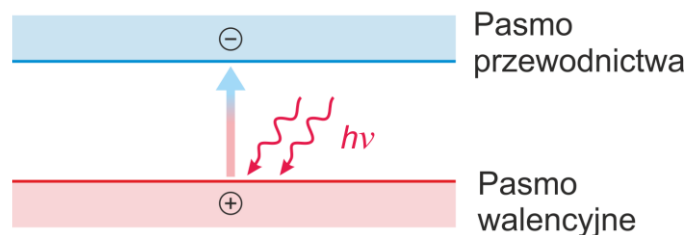
Galena, ruda ołowiu bogata w siarczek ołowiu (PbS)

$$h\nu \geq E_g$$

gdzie:

$h\nu$ – energia fotonu,

E_g – przerwa energetyczna.



Willoughby Smith
(1828-1891)

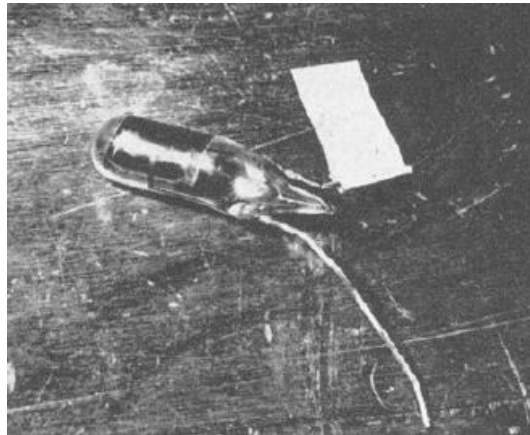
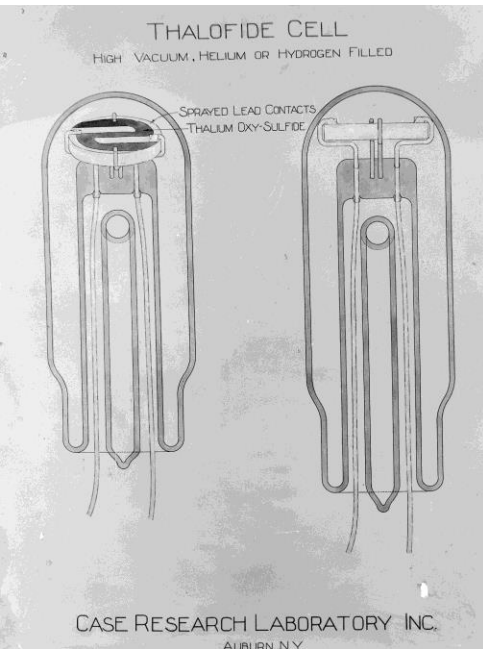


Jagadish Chandra Bose
(1858-1937)

Detektory fotonowe

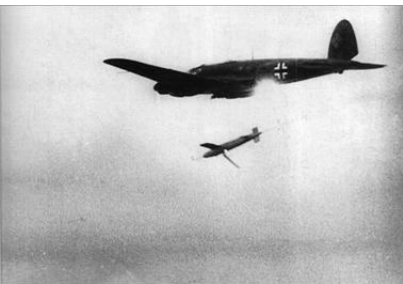
1917:

Pierwszy detektor fotonowy – światłoczuła lampa próżniowa na bazie mieszaniny siarki oraz talu (Theodore Willard Case, USA).



1945:

Zminiaturyzowana lampa próżniowa z PbS (Robert Joseph Cashman, USA).



1933–1945:

Systemy oparte na fotodetektorach z PbS, m.in. bomba Blohm & Voss BV 143 (Edgar Walter Kutzscher, Niemcy).

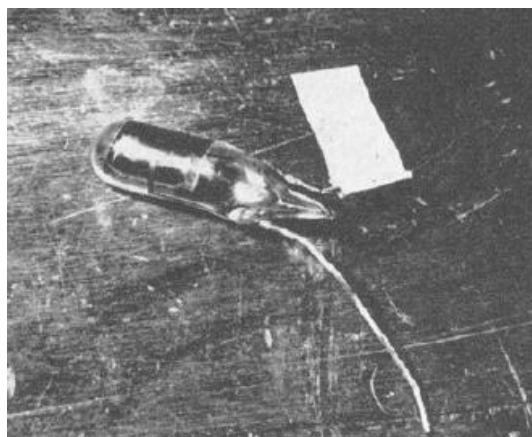
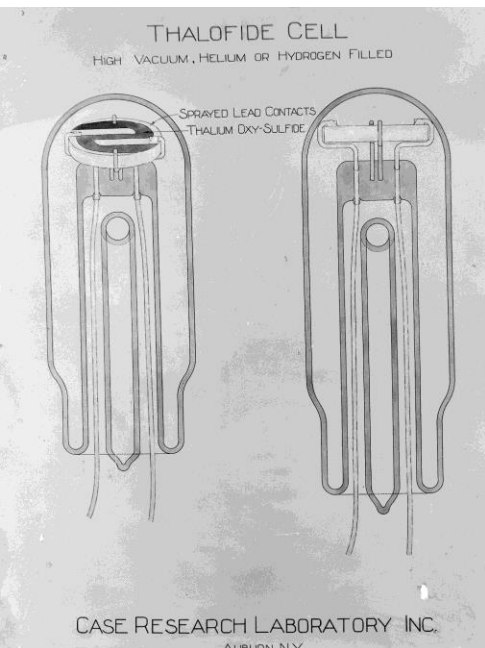


Współczesne detektory fotonowe z HgCdTe (VIGO System, Polska)

Detektory fotonowe

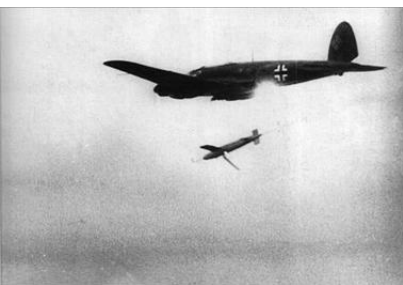
1917:

Pierwszy detektor fotonowy – światłoczuła lampa próżniowa na bazie mieszaniny siarki oraz talu (Theodore Willard Case, USA).

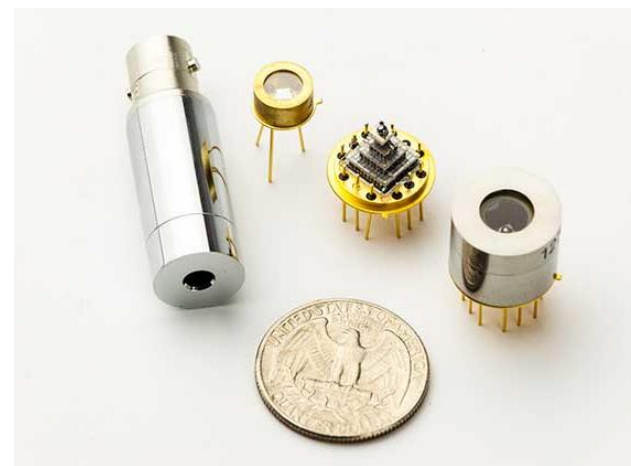


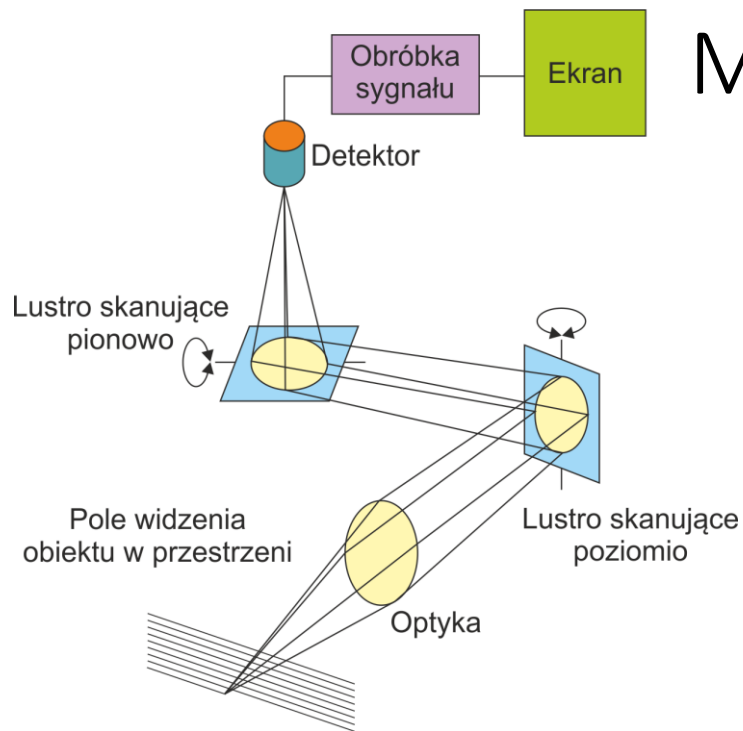
1945:

Zminiaturyzowana lampa próżniowa z PbS (Robert Joseph Cashman, USA).



Współczesne detektory fotonowe z HgCdTe
(VIGO System, Polska)





Matryce „pierwszej” generacji

1947: Wojsko amerykańskie i firma Texas Instruments tworzą pierwszy skaner podczerwieni – możliwość wykonania liniowego obrazu, którego wytworzenie trwało jedną godzinę.

1954: Pierwszy system skanujący w dwóch osiach – wytworzenie obrazu trwało 45 minut.

1958: Szwedzka firma AGA Thermovision tworzy pierwszą kamerę dla wojska.

1965: AGA Thermovision tworzy pierwszą komercyjną kamerę podczerwieni (model 661).

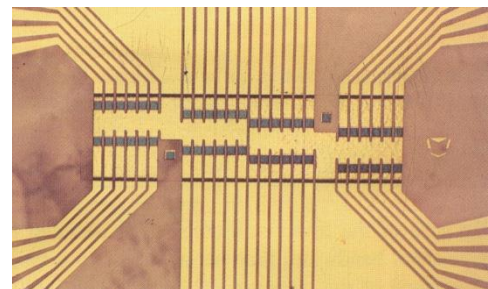
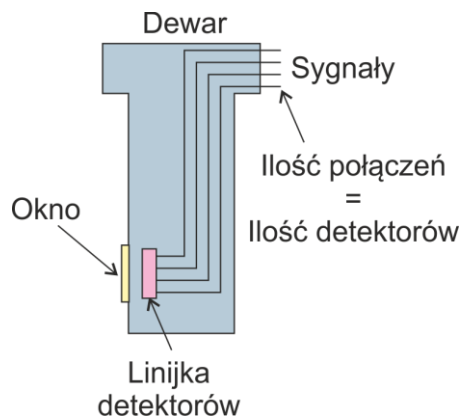
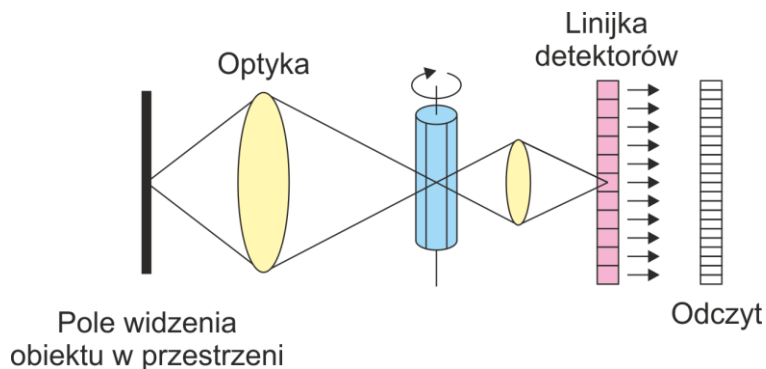
Element detekcyjny: fotorezystor InSb (LN2)

Szybkość skanowania: 16 obrazów na sekundę

Waga: całość ok. 75 kg (kamera – 25 kg, oscyloskop – 20 kg, trójnóg – 15 kg, klisze Polaroid – 6 kg, ciekły azot – 10 l)



1973: Matryca CCD



1973: Willard Boyle i George Smith z Bell Telephone Laboratories tworzą pierwszą matrycę CCD (Charge-Coupled Device) złożoną z 100×100 pikseli.

2009 – Nagroda Nobla w dziedzinie fizyki
„Za opracowanie półprzewodnikowego obwodu
obrazującego – sensora CCD”



Matryce „patrzące”

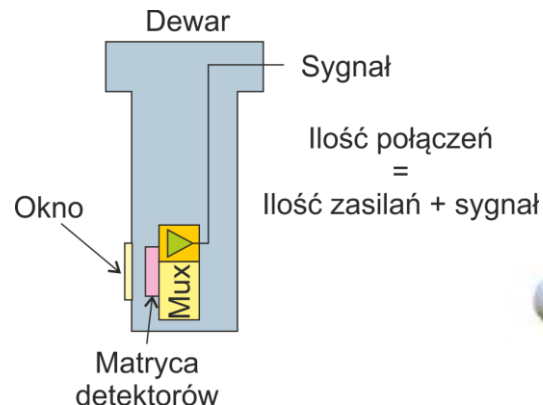
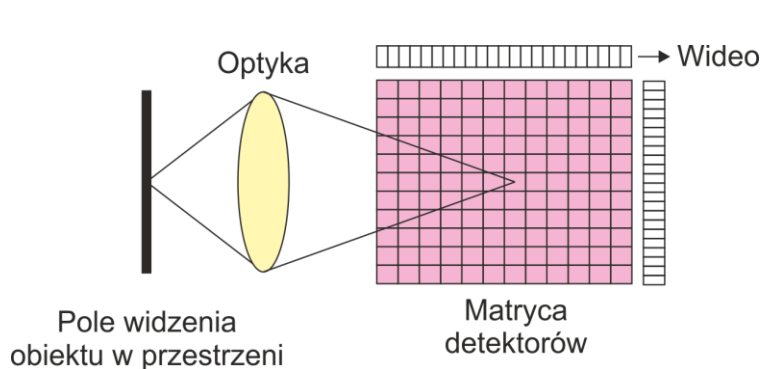
1975: Pierwsze wspólne moduły matryc IR i matryc CCD.

PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 63, NO. 1, JANUARY 1975

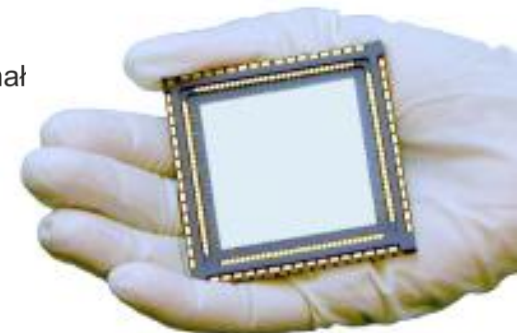
Application of Charge-Coupled Devices to Infrared Detection and Imaging

ANDREW J. STECKL, MEMBER, IEEE, RICHARD D. NELSON, MEMBER, IEEE, BARRY T. FRENCH,
RICHARD A. GUDMUNDSEN, SENIOR MEMBER, IEEE, AND DANIEL SCHECHTER

Lata 80-te: Początek rozwoju dwuwymiarowych (2D) matryc z HgCdTe (opartych na złączach p-n) sprzężonych z odczytami sygnałów analogowych w płaszczyźnie ogniskowej – „druga generacja” matryc IR.



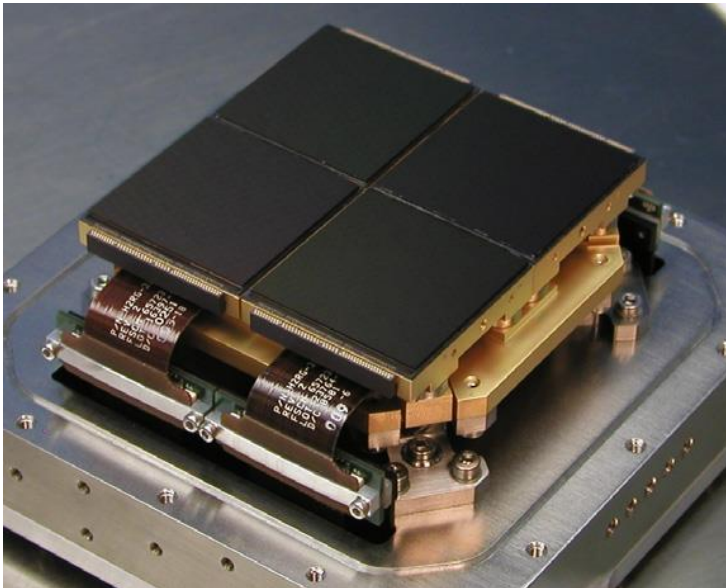
„Druga” generacja
– matryce „patrzące”



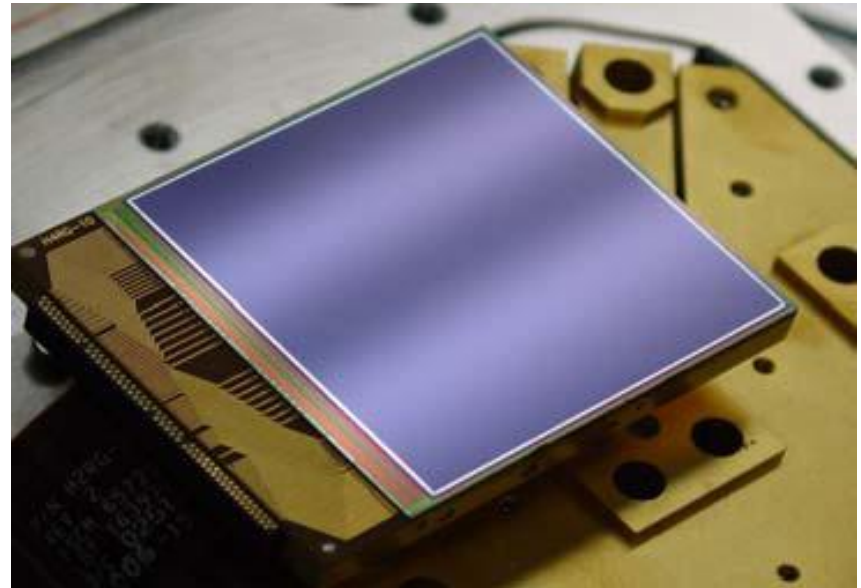
Matryce wielkoformatowe

XXI wiek: Rozwój matryc 2D o liczbie pikseli dochodzącej do setek tysięcy dzięki integracji hybrydowej (lutowanie indium-bumps) z krzemowym odczytem CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor).

Matryce Teledyne do zastosowań astronomicznych
(Program HAWAII – HgCdTe Astronomy Wide Area Infrared Imager).



Mozaika matryc H2RG 2048 × 2048 pikseli (rozstaw pikseli 18 μm)



Matryca H2RG 4096 × 4096 pikseli (rozstaw pikseli 10 μm)

Podczerwień w astronomii

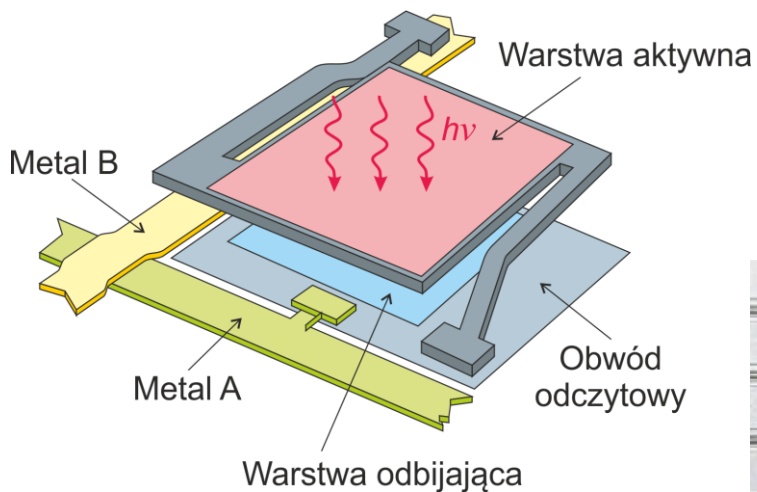
Zdjęcie mgławicy Orła (M16) uzyskane przez Teleskop Hubble'a w świetle widzialnym i bliskiej podczerwieni (NASA). Obraz w podczerwieni przechodzi przez większość gazów i ukazuje gwiazdy w środku mgławicy.



1978: początek rozwoju mikrobolometrów

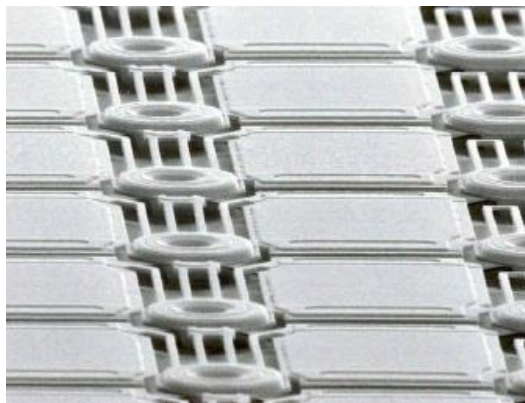
1978: Raytheon patentuje ferroelektryczny detektor podczerwieni z tytanianu baru i strontu (BST – barium strontium titanate).

Lata 80-te: Rząd federalny USA dofinansowuje rozwój tanich niechłodzonych detektorów podczerwieni – program LOCUSP (Low-cost Uncooled Sensor Program).
Honeywell i Raytheon rozwijają własne wersje mikrobolometrów.

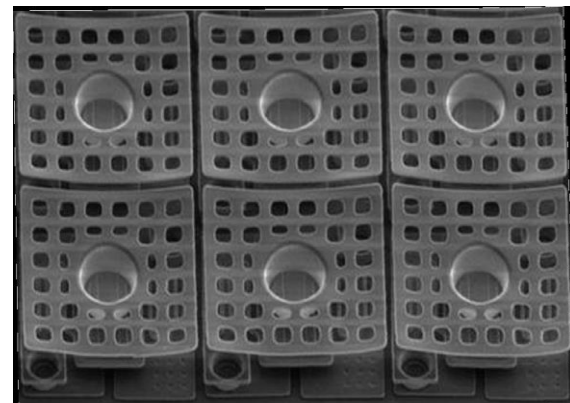


Struktura mostkowa mikrobolometru firmy Honeywell.

1994: Honeywell patentuje mikrobolometr z tlenku wanadu (VO_x – vanadium oxide).



Matryca bolometrów VO_x (BAE)



Matryca bolometrów VO_x „umbrella” (DRS)

1978: Powstanie FLIR Systems

Firma FLIR Systems powstaje jako pionier w opracowywaniu wysokowydajnych systemów obrazowania w podczerwieni dla szerokiej gamy zastosowań rządowych, przemysłowych, oraz komercyjnych.

Obecnie FLIR Systems obejmuje pięć głównych firm działających w technologii IR:

- szwedzką firmę AGEMA InfraredSystems (dawniej AGA Infrared Systems),
- trzy amerykańskie firmy: Indigo Systems, FSI oraz Inframetrics,
- francuską firmę Cedip.



1995: Agema Thermo Vision 550
(320 × 240)



2001: ThermaCam E2
(160 × 120)



2015: FLIR T1020 HD
(1024 × 768)



2017: FLIR E75 (640 × 480)



2014: FLIR ONE
(160 × 120)



Detektory podczerwieni w Polsce



Lata 60-te: Powołanie Katedry Fizyki Ciała Stałego (obecnie Zakład Fizyki Ciała Stałego); rozpoczęcie badań nad tellurkiem kadmowo-rtęciowym (HgCdTe) jako nowym półprzewodnikowym roztworem stałym do konstrukcji detektorów podczerwieni.

1987: Rozpoczęcie działalności firmy innowacyjnej VIGO, której głównym celem była komercjalizacja osiągnięć naukowych zespołu ZFCS w zakresie konstrukcji długofalowych detektorów podczerwieni z HgCdTe pracujących w temperaturze zbliżonej do temperatury pokojowej.

1997: prof. Antoni Rogalski zostaje laureatem Nagrody Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej w dziedzinie nauk technicznych za prace nad detektorami promieniowania podczerwonego

z wykorzystaniem potrójnych związków półprzewodnikowych (PbSnTe , HgZnTe , InAsSb).



prof. Antoni Rogalski w Zamku Królewskim odbiera Nagrodę FNP



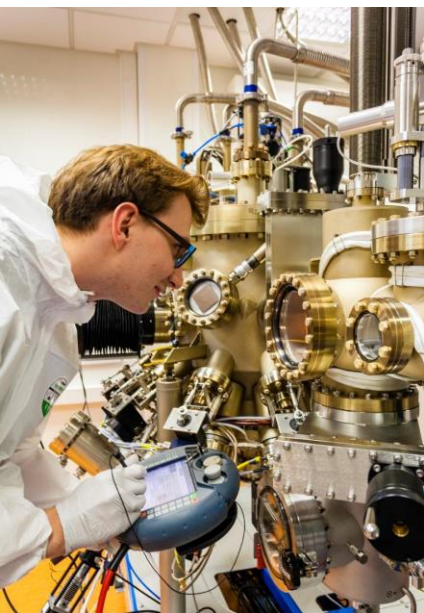
Założyciele VIGO:
dr Wiesław Galus
dr Mirosław Grudzień
prof. Józef Piotrowski



Współpraca WAT-VIGO



2003: Utworzenie wspólnego laboratorium epitaksji HgCdTe ze związków metaloorganicznych (Metal Organic Chemical Vapor Deposition – MOCVD).



MOCVD AIXTRON AIX-200
A^{II}B^{VI} HgCdTe



2015: Uruchomienie laboratorium do wytwarzania warstw półprzewodnikowych z grupy AIII-BV (InAs, InSb, InAsSb, T2SI InAs/InAsSb) techniką epitaksji z wiązek molekularnych (Molecular Beam Epitaxy – MBE).

MBE RIBER Compact 21 DZ
A^{III}B^V InAsSb oraz supersieci T2SLs InAs/GaSb, InAs/InAsSb

2017: Nagroda I stopnia w V konkursie Ministra Obrony Narodowej na najlepszą pracę naukową i wdrożenie z obszaru obronności, praca nt. „Detektory HOT o krótkiej stałej czasowej” (zespół WAT-VIGO w składzie: prof. Antoni Rogalski, prof. Józef Piotrowski, dr hab. inż. Piotr Martyniuk, dr inż. Waldemar Gawron).



VIGO System



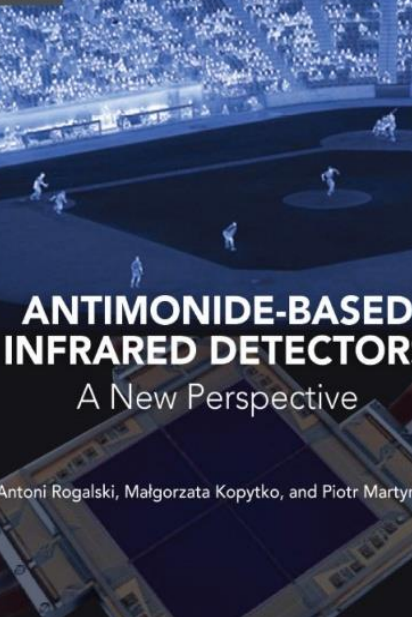
Światowy lider w produkcji niechłodzonych, fotonowych detektorów podczerwieni, wykorzystywanych m.in. w następujących obszarach:

- **kolejnictwo** (wykrywanie stanów awaryjnych taboru kolejowego podczas jazdy),
- **energetyka** (weryfikacja stanu infrastruktury przesyłowej energii elektrycznej),
- **technika wojskowa** (systemy obserwacyjno-celownicze na bezzałogowych obiektach latających; amunicja inteligentna i samonaprowadzająca),
- **medycyna** (wykrywanie na wczesnym etapie markerów chorób nowotworowych, zmian onkologicznych w tkankach miękkich lub zaburzeń w systemie krążenia krwi).

2012: Detektory VIGO na pokładzie Curiosity
w ramach misji Science Laboratory (NASA)



2016: Detektory VIGO użyte w misji
ExoMars (ESA, ROSKOSMOS)

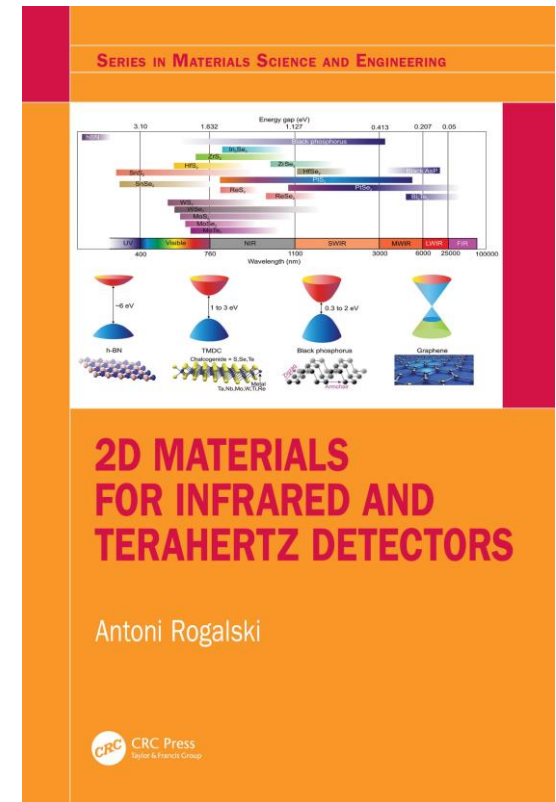


SPIE.

ANTIMONIDE-BASED INFRARED DETECTORS

A New Perspective

Antoni Rogalski, Malgorzata Kopytko, and Piotr Martyniuk



Dziękuję za
uwagę!

