

Część 3

Rozwój fizyki ciała stałego i optyki

Fizyka ciała stałego powstała jako oddzielna gałąź fizyki dopiero około 1940 r.

Wcześniej: krystalografia

badania sprężystości

badania przewodnictwa elektrycznego

badania przewodnictwa cieplnego

.....

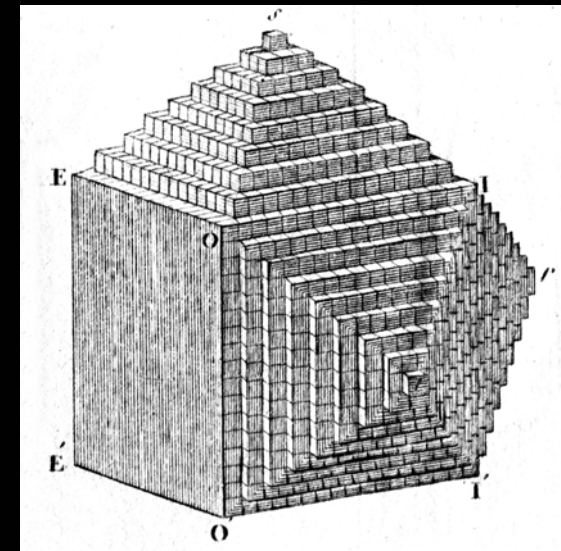
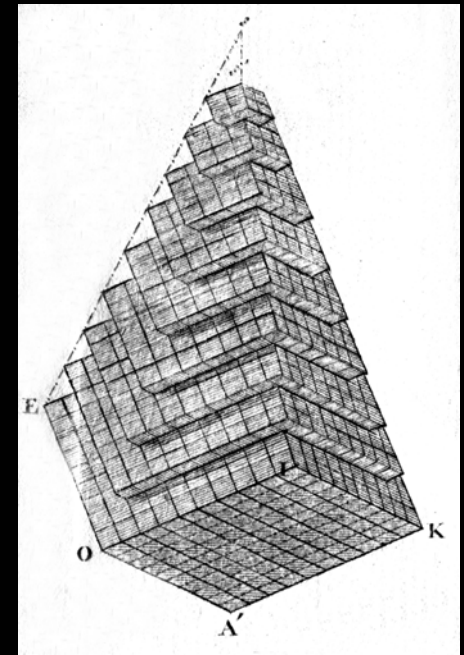
W celu interpretacji charakterystycznych cech trzech różnych ciał, np. miedzi, diamentu i soli kamiennej, trzeba było rozpoczynać od trzech bardzo różniących się obrazów ich wewnętrznej struktury

Początki krystalografii

René Just Haüy (1743-1822):
ogólne reguły budowy kryształów,
przypuszczenia na temat ich
części składowych

Dalsza analiza symetrii kryształów:
Franz Neumann (1798-1895),
Johann Hessel (1796-1872),
Auguste Bravais (1811-1863)

Bezpośrednie badania od 1912 r.
(Laue i in., dyfrakcja promieni X)



Haüy (1806)

Wiele oderwanych obserwacji

- 1821 Davy – opór elektryczny metali rośnie z T
- 1833 Faraday – opór siarczku srebra maleje z T
(podobnie kilka innych substancji)
- 1852 Hittorf – podobne pomiary; hipoteza przewodnictwa elektrolitycznego
- 1839 Becquerel (Antoine César) – efekt fotowoltaiczny
(oświetlenie elektrod daje napięcie w elektrolicie)
- 1873 Smith – fotoprzewodnictwo selenu
- 1874 Braun – prostujące właściwości selenu
- 1874 Schuster – prostujące właściwości tlenku miedzi
- 1874 Pickard – prostujące właściwości krzemu
- 1876 Adams & Day – fotonapięcie w selenie
- 1876 Fritts – fotonapięcie w selenie

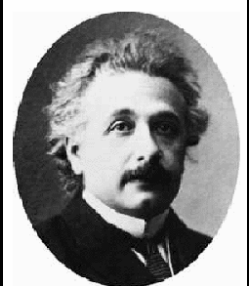
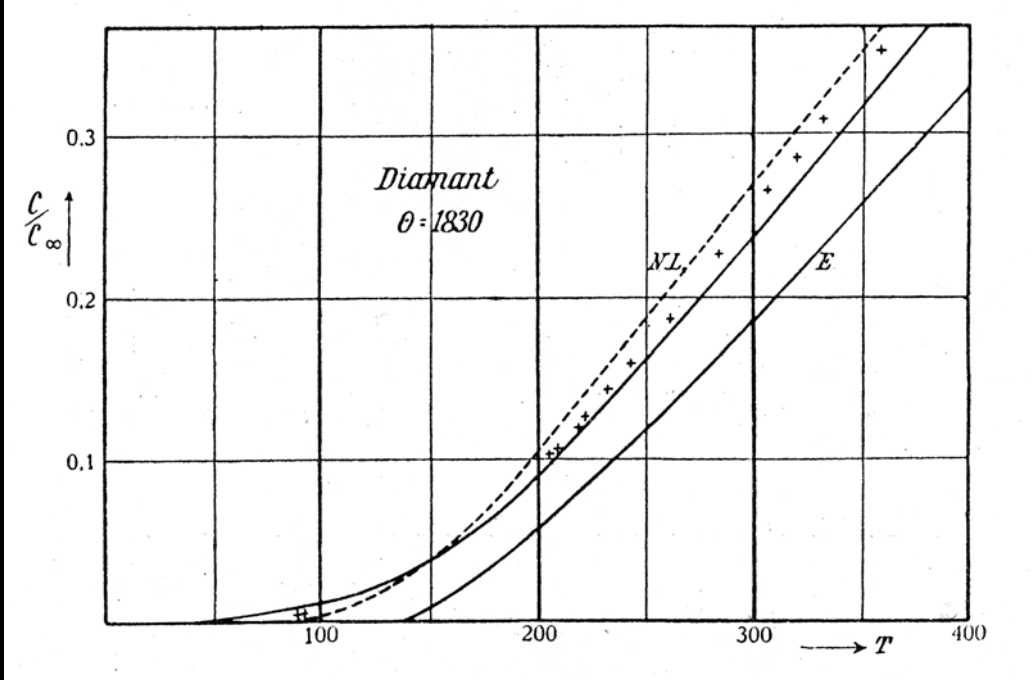
1898-1905

Paul Drude, Hendrik Lorentz - klasyczna teoria przewodnictwa elektrycznego metali (także Edouard Riecke, Owen Richardson, J. J. Thomson, Niels Bohr)

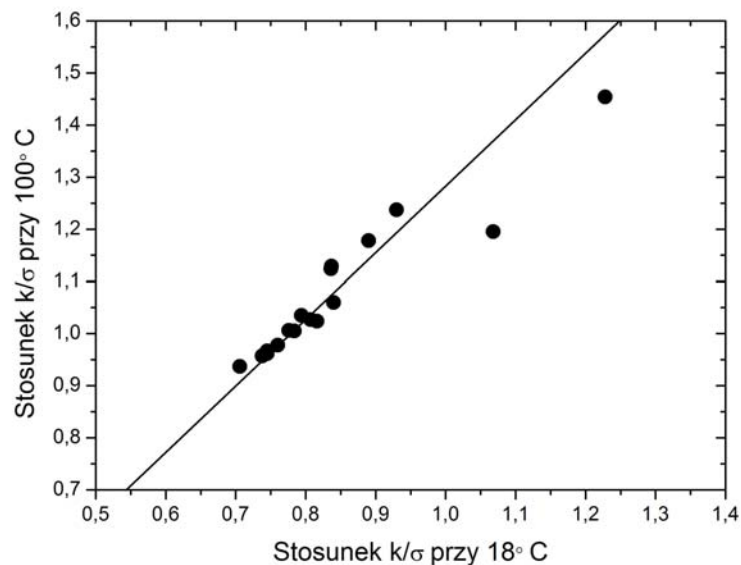
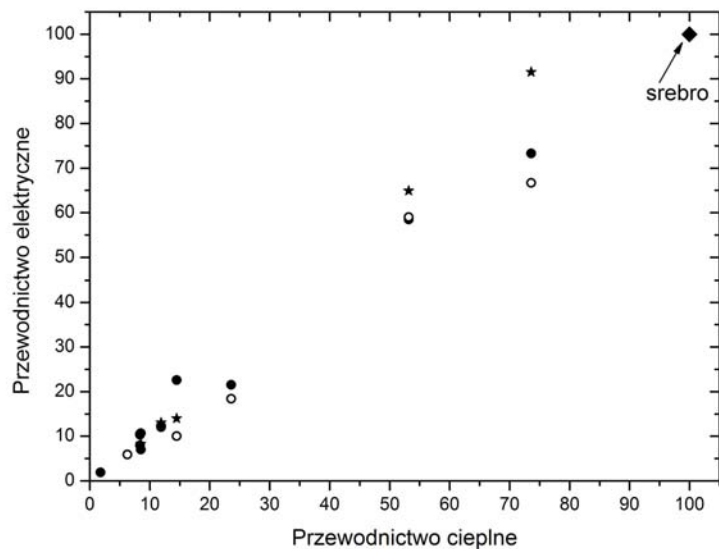


1907-1912

Albert Einstein, Peter Debye teoria ciepła właściwego ciał stałych



- prawo Wiedemanna-Franza (1853) - dla wielu metali stosunek współczynników przewodnictwa cieplnego σ i przewodnictwa elektrycznego k jest w przybliżeniu jednakowy
- Drude (1900) – z klasycznej teorii ($k/\sigma \sim T$)



1926-1927 Wolfgang Pauli, Arnold Sommerfeld
pierwsze zastosowanie statystyki
Fermiego-Diraca
do badania elektronów w metalach



1927-1928 Maximilian Strutt - pasma energii

1928-1930 Felix Bloch, Léon Brillouin
początek teorii pasmowej
(metoda fal płaskich)



1928-1930 Bloch, Rudolf Peierls - kwantowa teoria
przewodnictwa elektrycznego metali

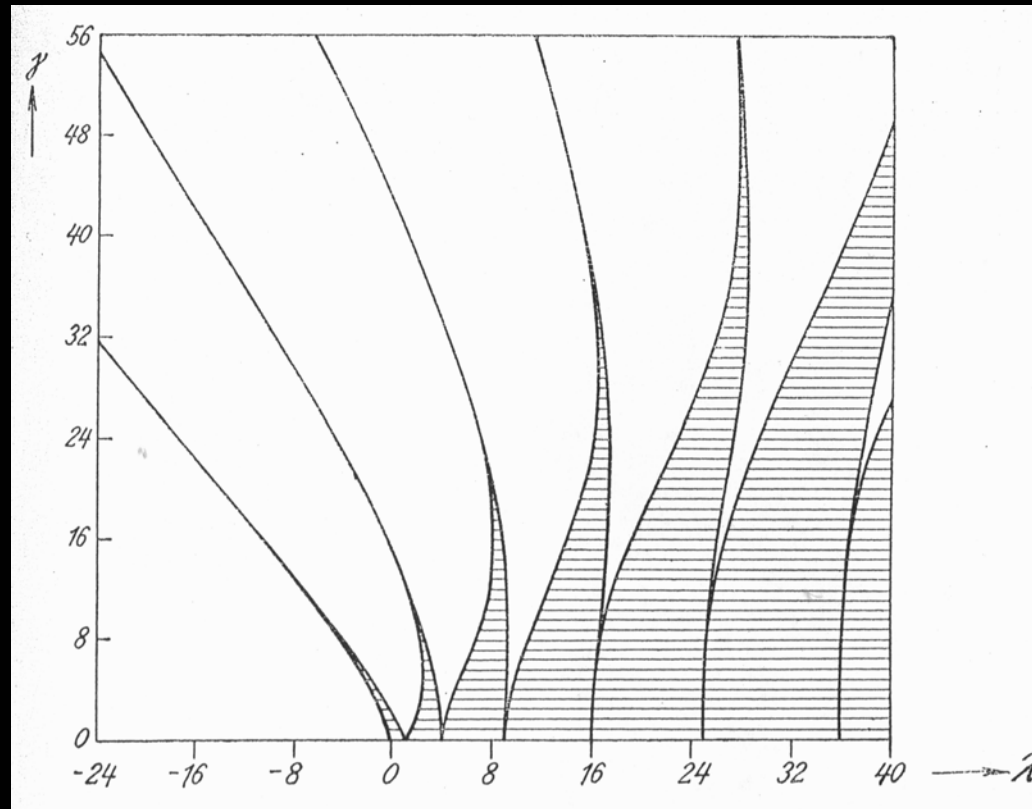


1928 Peierls, Yakov Frenkel - przewodnictwo
dziurowe



1931 Alan Wilson - klasyfikacja metali,
dielektryków i półprzewodników według
ich struktury pasmowej





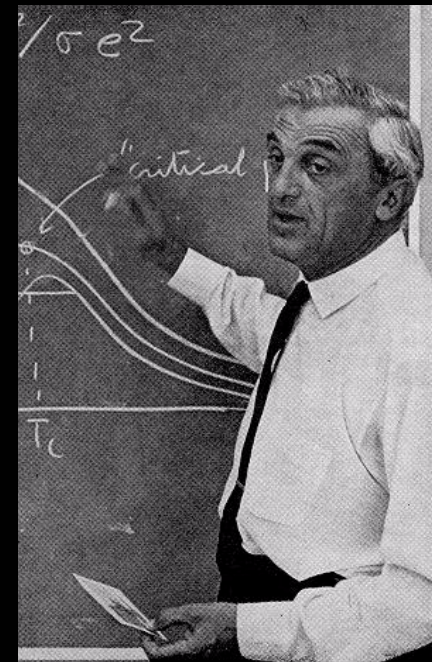
Maximilian Strutt: równanie różniczkowe Mathieu może opisać ruch cząstki poruszającej się w kierunku, wzdłuż którego energia potencjalna zmienia się sinusoidalnie (pierwsza próba rozwiązania równania Schrödingera dla potencjału periodycznego)

Dozwolone rozwiązania równania Mathieu zajmują pewne skończone obszary w płaszczyźnie energia cząstki-amplituda potencjału

[*Zur Wellenmechanik des Atomgitters*, Ann. Phys. **86**, 319 (1928)]

„Od początku byłem przekonany, że rozwiązanie, jeśli istnieje, może być znalezione tylko w falowej naturze elektronu... To, że istotną rolę może odgrywać periodyczność kryształu, przyszło mi na myśl, gdy przypomniałem sobie doświadczenie pokazywane na wykładzie z fizyki elementarnej, kiedy to w wielu jednakowych, zawieszonych na pręcie w równych odstępach wahadłach sprzężonych ruch jednego z nich „wędrował” wzdłuż pręta od jednego wahadła do drugiego. Na początku stycznia [1928], mając tak ogólną ideę w głowie, powróciłem pewnego wieczoru do mojego wynajętego pokoju, wziąłem papier i ołówek i zacząłem rozważać najłatwiejszy przypadek pojedynczego elektronu w jednowymiarowym potencjale. Stosując prostą analizę Fouriera znalazłem ku wielkiemu zadowoleniu, że rozwiązania równania Schrödingera różniły się od fali de Broglie’a cząstki swobodnej tylko przez modulację okresem potencjału. Uogólnienie na trzy wymiary było oczywiste...”

Bloch (1980)



Felix Bloch
(1905 - 1983)

Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern.

Von Felix Bloch in Leipzig.

Mit 2 Abbildungen. (Eingegangen am 10. August 1928.)

Die Bewegung eines Elektrons im Gitter wird untersucht, indem wir uns dieses durch ein zunächst streng dreifach periodisches Kraftfeld schematisieren. Unter Hinzunahme der Fermischen Statistik auf die Elektronen gestattet unser Modell Aussagen über den von ihnen herrührenden Anteil der spezifischen Wärme des Kristalls. Ferner wird gezeigt, daß die Berücksichtigung der thermischen Gitterschwingungen Größenordnung und Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von Metallen in qualitativer Übereinstimmung mit der Erfahrung ergibt.

Einleitung. Die Elektronentheorie der Metalle hat seit einiger Zeit Fortschritte zu verzeichnen, die in der Anwendung quantentheoretischer Prinzipien auf das Elektronengas begründet sind. Zunächst hat Pauli* unter der Annahme, daß die Metallelektronen sich völlig frei im Gitter bewegen können und der Fermischen** Statistik gehorchen, den temperaturunabhängigen Paramagnetismus der Alkalien zu erklären vermocht. Die elektrischen und thermischen Eigenschaften des Elektronengases sind dann von Sommerfeld, Houston und Eckart*** näher untersucht worden. Die Tatsache freier Leitungselektronen wird von ihnen als gegeben betrachtet und ihre Wechselwirkung mit dem Gitter nur durch eine zunächst phänomenologisch eingeführte, dann von Houston**** strenger begründete freie Weglänge mitberücksichtigt. Schließlich hat Heisenberg† gezeigt, daß im anderen Grenzfall, wo zunächst die Elektronen an die Ionen im Gitter gebunden gedacht und erst in nächster Näherung die Austauschvorgänge unter ihnen berücksichtigt werden, das für den Ferromagnetismus entscheidende intermolekulare Feld seine Erklärung findet.

Hier soll ein Zwischenstandpunkt zwischen den beiden oben erwähnten Behandlungsweisen eingenommen werden, insofern, als der Austausch der Elektronen unberücksichtigt bleibt, sie dagegen nicht einfach

* W. Pauli, ZS. f. Phys. 41, 81, 1927.

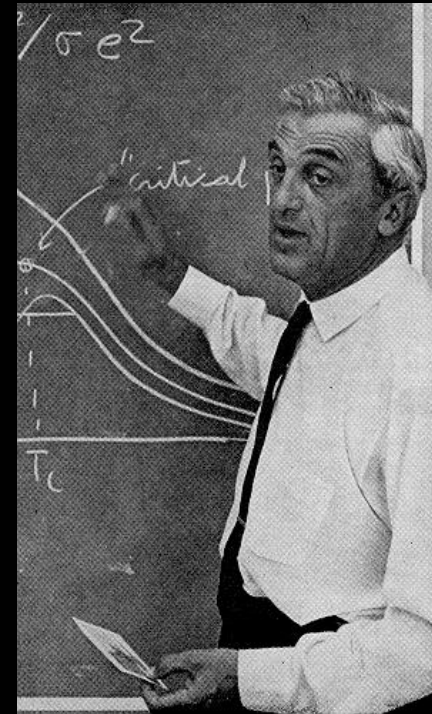
** E. Fermi, ebenda 36, 902, 1926.

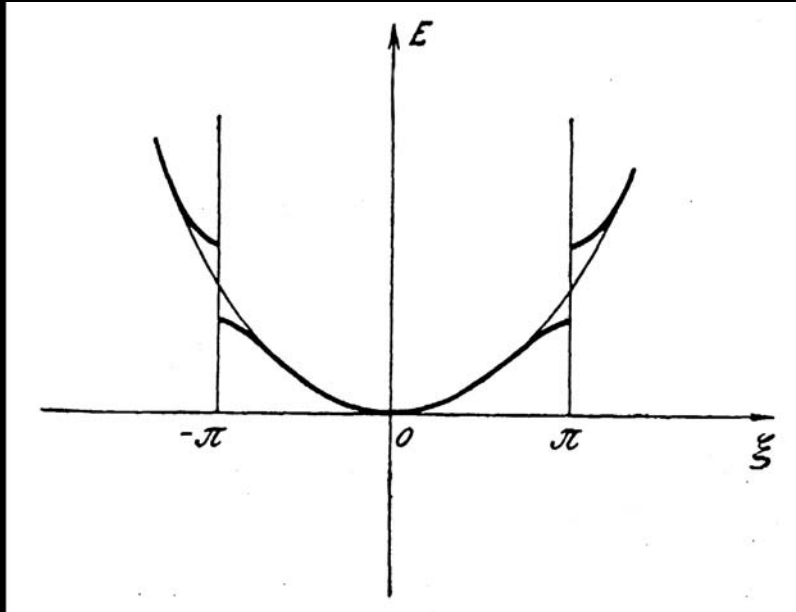
*** A. Sommerfeld, W. V. Houston, C. Eckart, ebenda 47, 1, 1928.

**** W. V. Houston, ebenda 48, 449, 1928.

† W. Heisenberg, ebenda 49, 619, 1928.

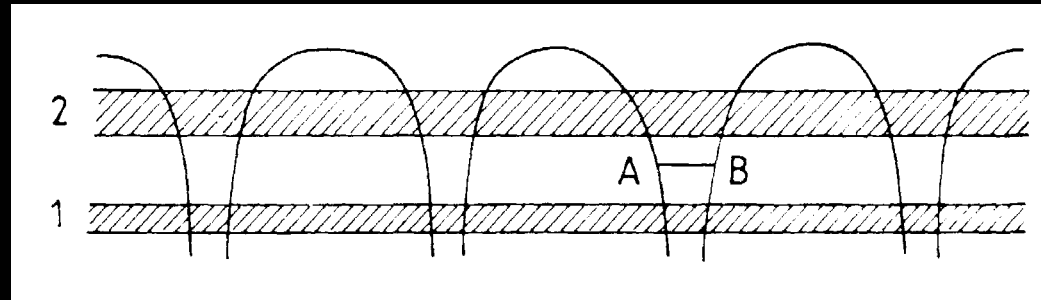
Przełomowa praca Blocha *Zeit.f. Physik* 52, 555 (1928)

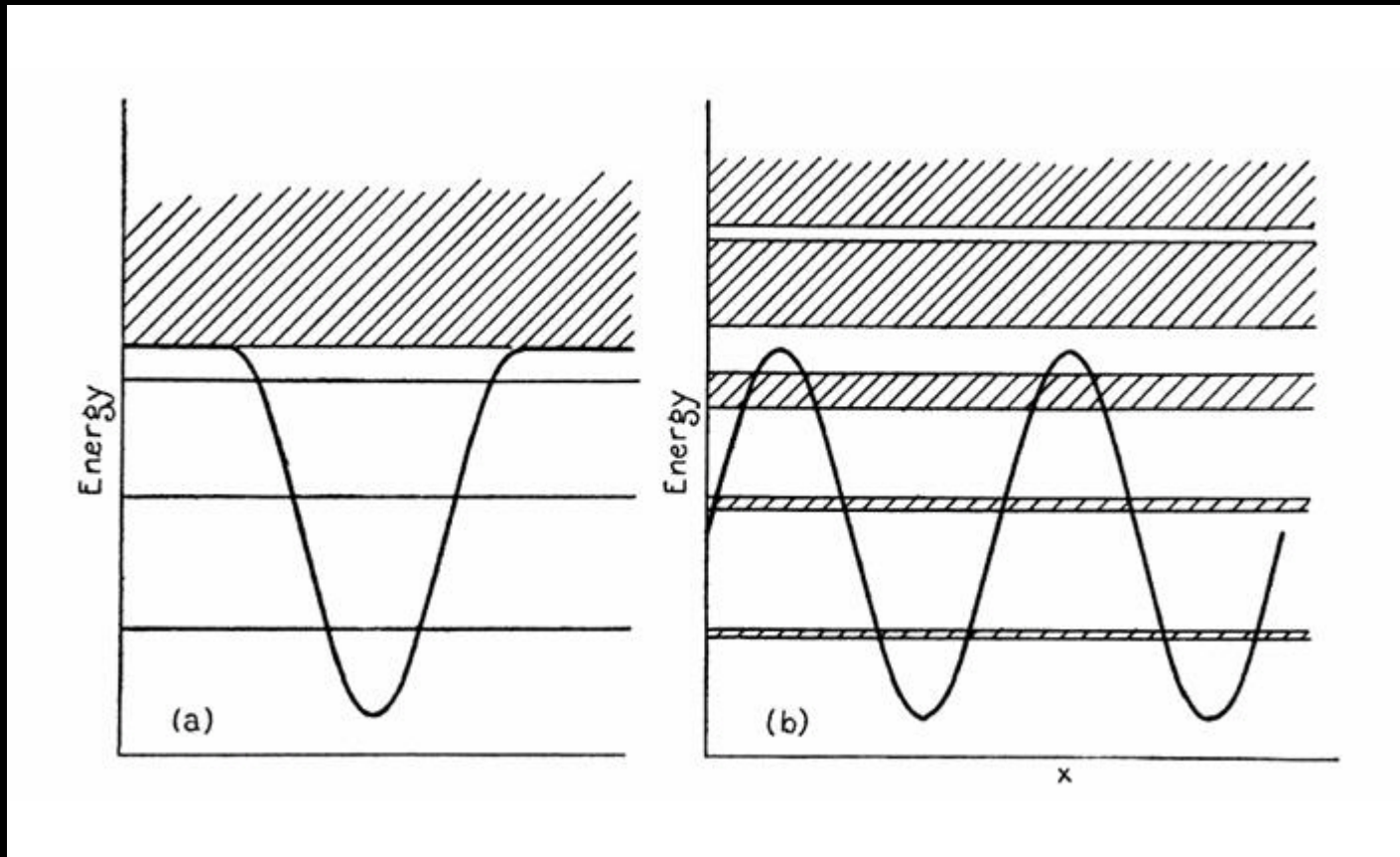




Pierwszy wykres zależności energii elektronu od liczby falowej k dla ruchu w słabym potencjale periodycznym; na osi poziomej iloczyn $\xi = ka$, gdzie a jest stałą sieci [Peierls, *Ann. Phys.* 4, 121 (1930)]

Pierwszy rysunek pasm energii dla półprzewodnika samoistnego [Alan Wilson, *The Theory of Electronic Semiconductors*, *Proc. Roy. Soc.* 133, 458, 134, 277 (1931)]





Zależność energii potencjalnej elektronu od odległości od jądra dla pojedynczego atomu (po lewej) i **nieskończonego** kryształu. poziome linie - poziomy energii zakresowane obszary – pasma dozwolonej energii [Philip M. Morse, *Phys. Rev.* **35**, 1310 (1930)]

„Periodyczne zmiany potencjału wewnątrz kryształu tworzą pasma energii wzbronionej w kryształach nawet dla elektronów o energii większej od maksymalnej energii potencjalnej, co jest wynikiem dość zadziwiającym.

Jednak oznacza to tylko, iż kiedy elektrony na zewnątrz kryształu mają energie takie, że składowe ich liczby falowej są całkowitymi wielokrotnościami odwrotności stałej sieci, to są one silnie odbijane wstecz od powierzchni kryształu.”

Philip M. Morse, *Phys. Rev.* **35**, 1310 (1930]

Pierwsze obliczenia dla substancji rzeczywistych

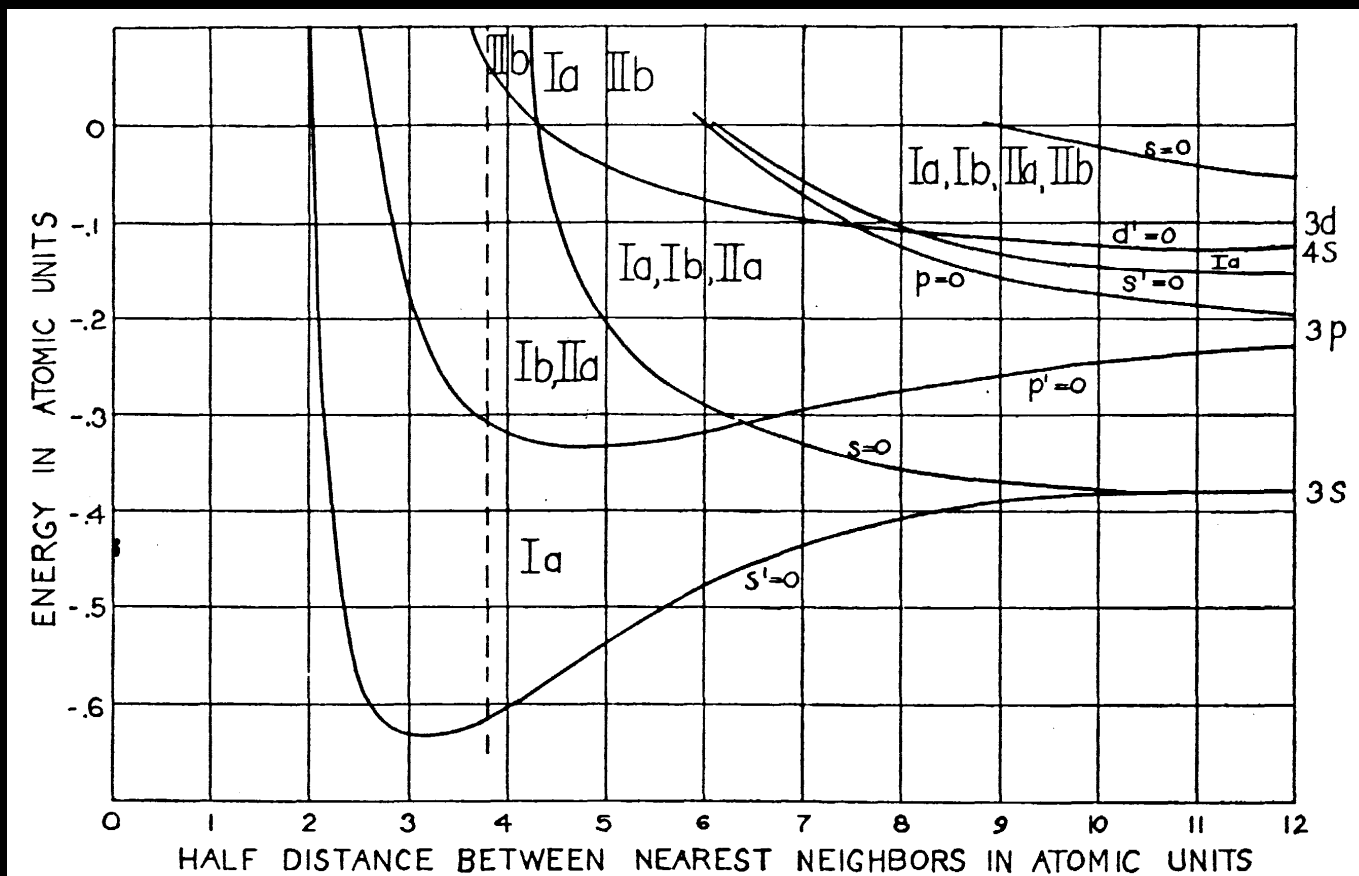
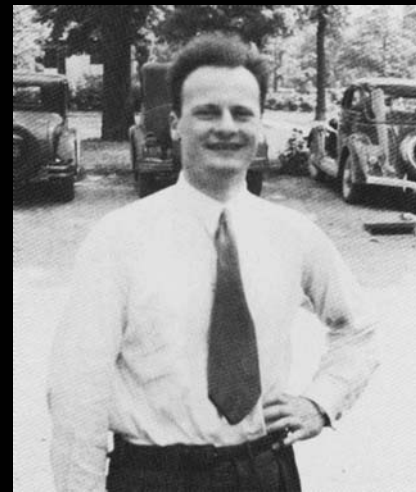
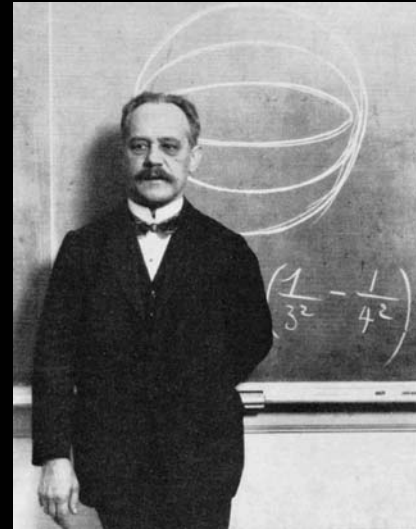


FIG. 1. Energy bands for sodium. Symbols Ia–IIb represent type of state allowed in each band.

Pasma energetyczne dla sodu (J. Slater, *Phys. Rev.* 45, 794 (1934))

A. Sommerfeld, H. Bethe –
Elektronentheorie der Metalle,
Handbuch der Physik
24, 333-622 (1933)
Na tym właśnie artykule
przeładowym wykształciła się
nowa generacja
„fizyków ciała stałego”



- 1908 – Johann Königsberger - opór elektryczny krzemu, cyrkonu, tytanu i innych substancji zmniejsza się ze wzrostem temperatury do pewnego minimum, a potem rośnie
- 1911 – Königsberger i J. Weiss nazwa *Halbleiter* – półprzewodnik
- 1913 – Kurt Bädeker (1877-1914) - badania warstw metali napyłanych na szkło i wystawianych na działanie tlenu, par jodu, siarki, selenu i arsenu; przewodnictwo warstwy jodku miedzi można zmieniać w szerokim zakresie przez wystawienie jej na działanie par jodu. Podobne wyniki dla siarczku srebra
- 1930 – Bernhard Gudden artykuł przeglądowy; opinia, że żadna chemicznie czysta substancja nie może być półprzewodnikiem. Obserwowane przewodnictwo elektryczne musi być zawsze spowodowane przez zanieczyszczenia

„Dane doświadczalne dotyczące półprzewodników nie są łatwe do interpretacji. Po pierwsze, istnieją dwa główne typy półprzewodników. Pierwszy typ to przewodniki jonowe, w których ciężkie jony poruszają się w kryształach w procesie podobnym do elektrolizy. Drugi typ to przewodniki czysto elektronowe. Jest jeszcze typ trzeci, w którym prąd jest przenoszony częściowo przez jony, a częściowo przez elektrony. Teoria tutaj przedstawiana odnosi się tylko do przewodników elektronowych. Ponadto, rozważaliśmy tu kryształy atomowe, więc nie należy oczekiwać, że teoria będzie się stosować do kryształów molekularnych. Największą trudność dla interpretacji stanowi obecnie brak ogólnej zgody co do tego, które substancje można zaliczyć do metali, a które do półmetali... Gudden skłonny jest uznać, że żadna czysta substancja nigdy nie jest półprzewodnikiem.



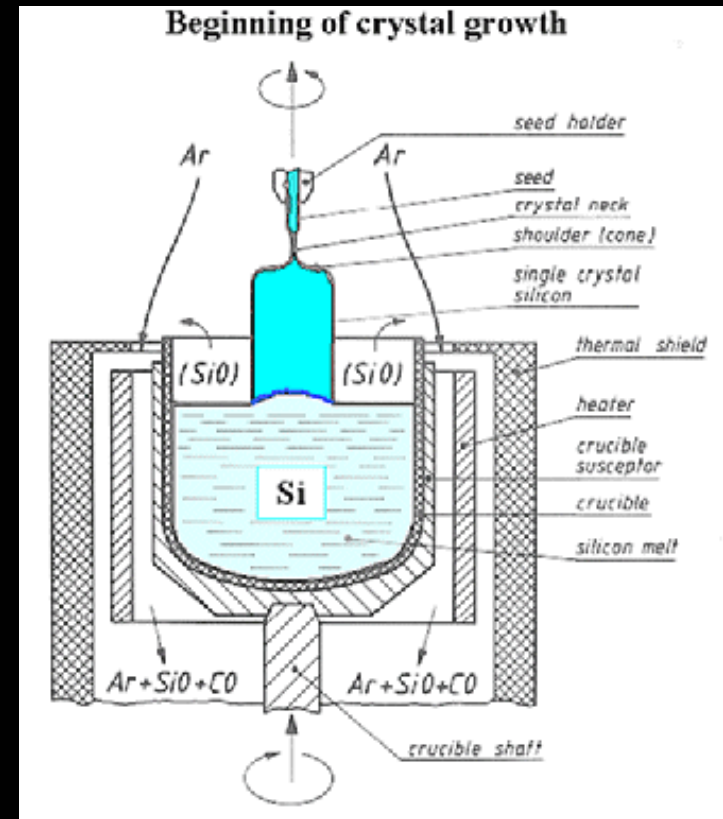
Z drugiej strony Gudden skłonny jest uznać, że żadna czysta substancja nigdy nie jest półprzewodnikiem. Ten pogląd znajduje potwierdzenie w nadprzewodnictwie tytanu oraz w znalezieniu dodatniego współczynnika temperaturowego dla krzemu. Niedawne pomiary, które wykonał Meissner, nie potwierdziły metalicznej natury krzemu, chociaż niemal na pewno jest to wynikiem obecności tlenu w jego jedynym kryształ. Z punktu widzenia doświadczenia, istnienie lub nieistnienie półprzewodników pozostaje nadal sprawą otwartą i ani pomiary ciepła właściwego, ani pomiary podatności nie są dość dokładne, aby dostarczyć dodatkowych dowodów. Nie ma teoretycznego powodu, dla którego półprzewodniki miałyby nie istnieć, a zasadnicza różnica między półprzewodnikami i izolatorami polega na tym, że dla tych pierwszych wartość Θ_u jest tak mała, iż substancja wykazuje mierzalne przewodnictwo w zwykłych temperaturach, podczas gdy dla tych drugich Θ_u jest niezmiernie małe. Z punktu widzenia doświadczenia jedyne substancje, które wykazują niewątpliwe właściwości półprzewodnikowe, są bardzo zanieczyszczone, więc jest możliwe, iż nie mają samoistnego przewodnictwa...”

A. H. Wilson, *Theory of Electronic Semi-Conductors*, Proc. Roy. Soc. A133, 458 (1931).

Otrzymywanie dużych i czystych kryształów



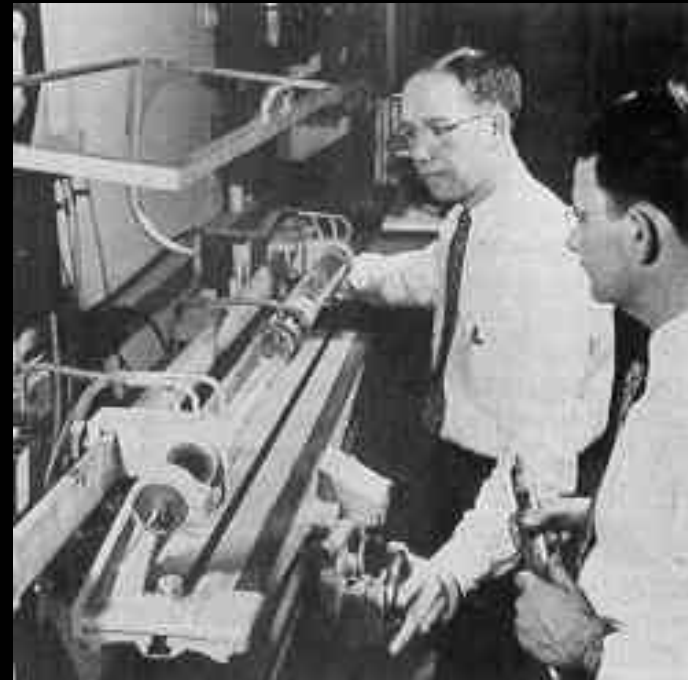
Najbardziej popularną metodę otrzymywania dużych monokryształów podał w 1916 r. Jan Czochralski (1885-1953)



Otrzymywanie dużych i czystych kryształów

1950-1951 - William Pfann
(Bell Labs)

- metoda oczyszczania
strefowego



„mniej niż szczypta soli w 35 wagonach cukru”

Niektórzy wybitni fizycy, np. Pauli, wyrażali się o fizyce ciała stałego z lekceważeniem, jako o „brudnej fizyce”, co nie przeszkadzało najwybitniejszym uczonym, włącznie z Paulim, pracować w tej dziedzinie.

„Historia fizyki półprzewodników nie jest historią wielkich heroicznych wysiłków teoretycznych, lecz starannej, inteligentnej pracy. Nie błyski geniuszu przynoszące wyniosłe budowle, ale wielka pomysłowość i niekończąca się zmienność nadziei i desperacji. Nie szerokie uogólnienia, lecz rozważna ocena granicy między wytrwałością i zawziętością. Tak więc historia fizyki ciała stałego, a szczególnie półprzewodników, jest nie tyle historią wielkich badaczy i ich wspaniałych dokonań, co historią nie opiewanych bohaterów tysięcy pomysłowych idei i zręcznych eksperymentów - postępu wytrwałego krocionoga, a nie lśniącego rumaka, a więc refleksją na temat epoki organizacji, a nie indywidualności.”

Ernest Braun, *Selected topics from the history of semiconductor physics and its applications* (1992)

1911 Nadprzewodnictwo - Kamerlingh-Onnes



1938 Nadciekłość helu II - Kapitza



1948 Bardeen, Brattain, Shockley
- tranzystor



1957 Bardeen, Cooper, Schrieffer - teoria
nadprzewodnictwa



1958 Zjawisko Mössbauera



1962 Zjawisko Josephsona



1980 Kwantowe zjawisko Halla (von Klitzing, Dorda, Pepper)



1986 Nadprzewodnictwo
przy wysokich T (Bednorz, Müller)

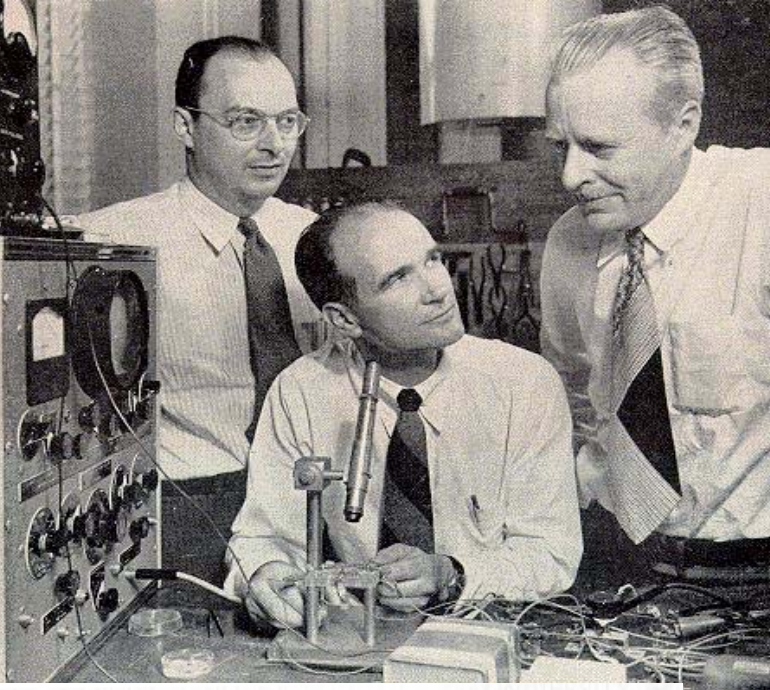


Odkrywcy tranzystora

John Bardeen

William Shockley

Walter Brattain



LABORATORY NOTEBOOK of Nobel laureate Walter H. Brattain records the events of 23 Dec. 1947, when the transistor was discovered at Bell Telephone Laboratories. The notebook continues: "This circuit was actually spoken over and by switching the device in and out a distinct gain in speech level could be heard and seen on the scope presentation with no noticeable change in quality."

DATE Dec 24 1947
CASE No. 39129-7

We obtained the following A. C. values at 1000 cycles

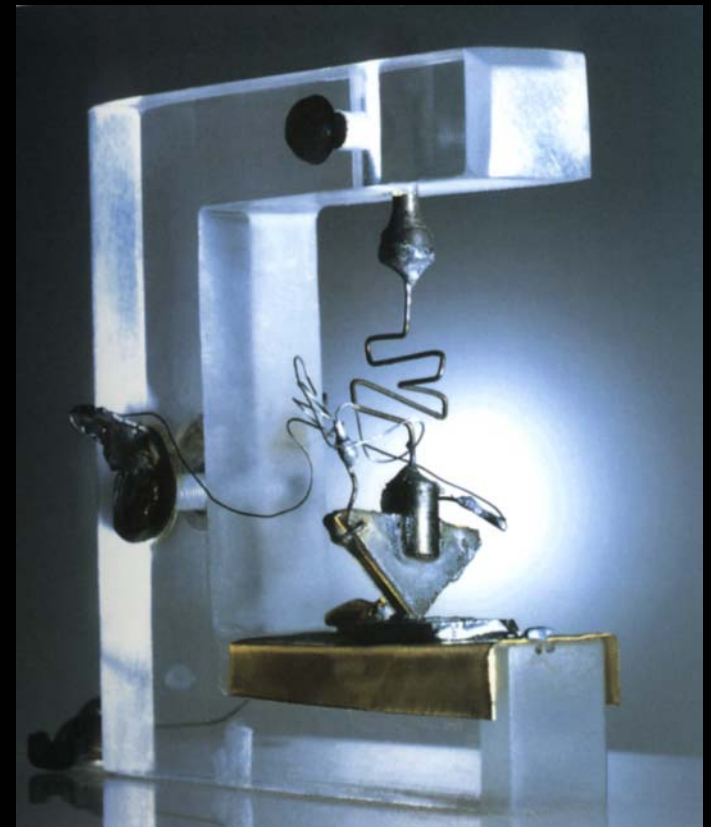
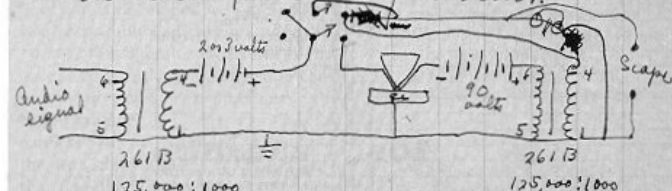
$$E_g = .015 \text{ R.M.S. volts} \quad E_p = 1.5 \text{ R.M.S. volts}$$

$$P_g = \frac{6.4 \times 10^{-7} \text{ watts}}{5.4 \times 10^{-7} \text{ watts}} \quad P_p = 2.25 \times 10^{-5}$$

Voltage gain 100 Power gain 40

Current loss $\frac{1}{2.5}$

This unit was then connected in the following circuit



Pierwszy tranzystor (ostrzowy)

W 1959 r. Jack St. Clair Kilby (ur. 1923) zbudował pierwszy obwód scalony. Cztery miesiące po zgłoszeniu przez Kilby'ego patentu na to urządzenie Robert Noyce (1927-1990) patent na niemal identyczne urządzenie, ale wytwarzane w innym procesie.

Obwody scalone o coraz większym stopniu miniaturyzacji umożliwiły produkcję komputerów osobistych i innych przyrządów stanowiących dziś nieodzowny element życia.



Kilby



Pierwszy obwód Kilby'ego



Noyce

Niektóre daty z wczesnej historii badań magnetyzmu

1895 P. Curie - prawo Curie dla paramagnetyków,
temperatura Curie



1905 Langevin - klasyczna teoria paramagnetyzmu
i diamagnetyzmu



1907 Weiss - hipoteza pola molekularnego



1907 Cotton i Mouton - podwójne załamanie w polu magnetycznym

1911 Bohr - dowód błędności klasycznej teorii diamagnetyzmu

1911 Weiss - hipoteza magnetonu (Weissa)
- zarzucona dopiero około 1930 r.

1915 Zjawisko Barnetta, zjawisko Einsteina - DeHaasa

1919 Zjawisko Barkhausena

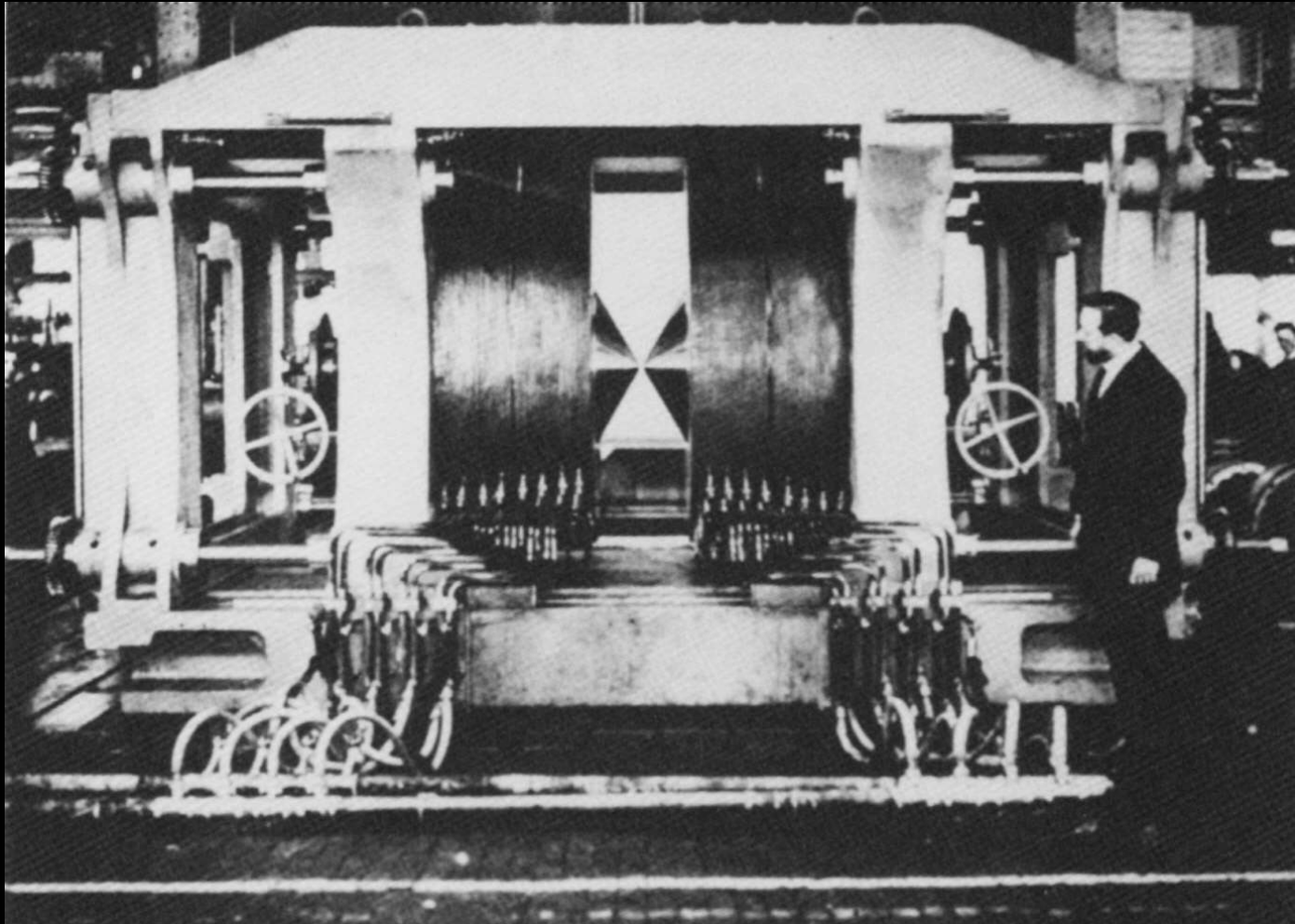


Niektóre daty z wczesnej historii badań magnetyzmu cd.

- 1925 Ising - model ferromagnetyka
- 1926 Debye, Giauque - adiabatyczne rozmagnesowanie paramagnetyka
- 1927 Pauli - paramagnetyzm gazu elektronowego (paramagnetyzm Pauliego)
- 1927 Van Vleck - kwantowa teoria paramagnetyzmu
- 1928 Heisenberg, Frenkel - pierwsze kwantowe teorie ferromagnetyzmu
- 1930 Landau - kwantowa teoria diamagnetyzmu metali (diamagnetyzm Landaua)
- 1932 Néel - antyferromagnetyzm, ferrimagnetyzm

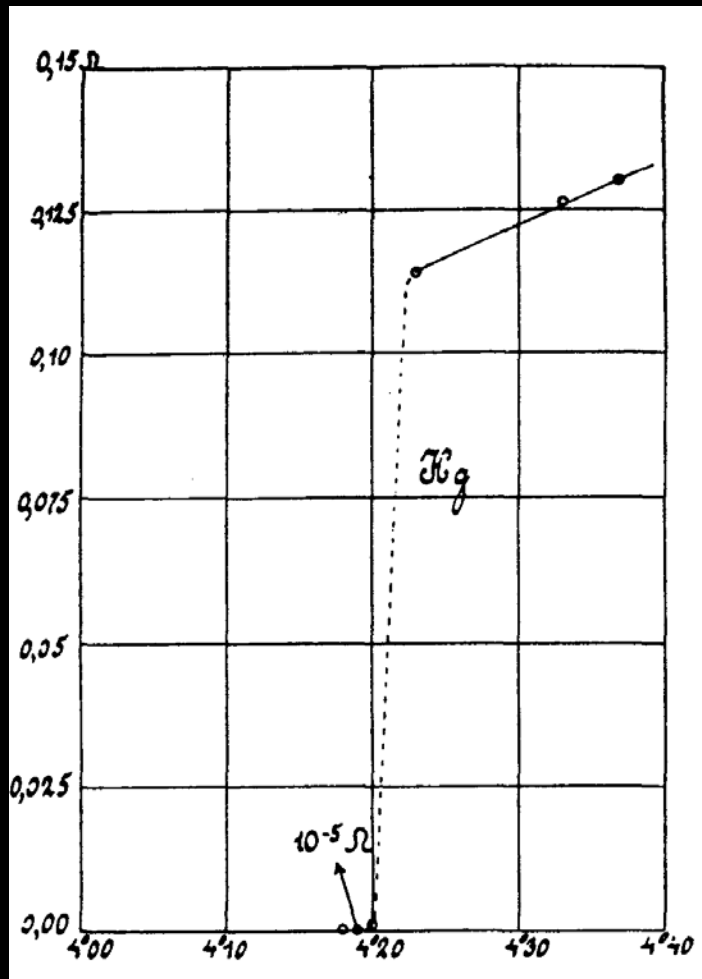


Początki „wielkiej nauki”

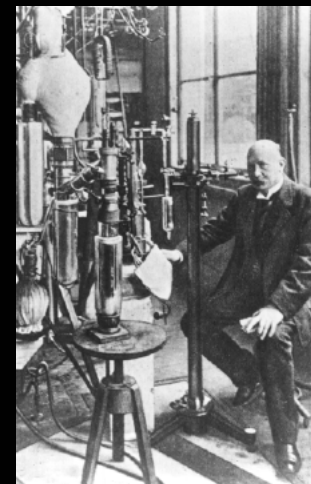


Wielki magnes Aimé Cottona (lata 1920-te)

Odkrycie nadprzewodnictwa (1911)



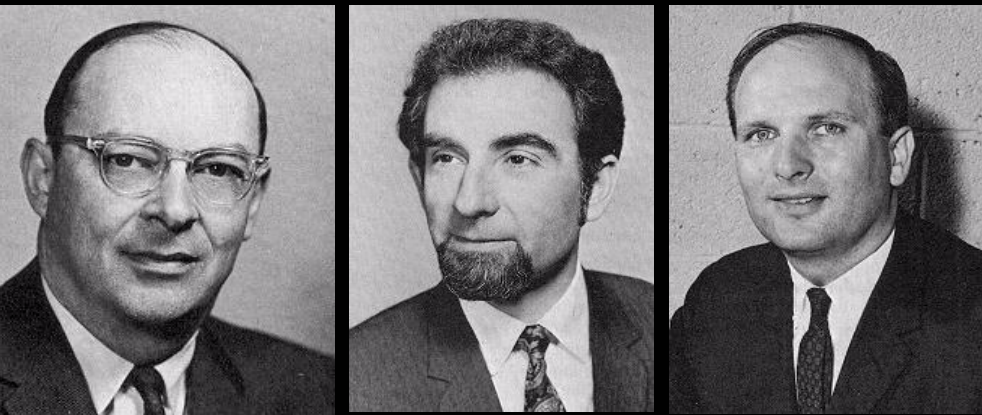
**Heike
Kamerlingh-Onnes
(1853 - 1926)**



Liczne próby (Bethe, Bloch, Bohr, Born, Brillouin, Casimir, Feynman, Frenkel, Heisenberg, Landau, Pauli) opracowania teorii nadprzewodnictwa kończyły się niepowodzeniem.

„Byłem tak zniechęcony moim negatywnym wynikiem, że nie widziałem żadnej dalszej drogi postępu i przez pewien czas miałem tylko wątpliwą satysfakcję, kiedy obserwowałem jak inni, niczego nie podejrzewając, wpadają w tę samą pułapkę. To było powodem mego żartobliwego stwierdzenia, że wszystkie teorie nadprzewodnictwa można obalić, cytowanego później w bardziej radykalnej postaci jako „twierdzenie Blocha”: *nadprzewodnictwo jest niemożliwe.*”

Felix Bloch (1980)



John
Bardeen

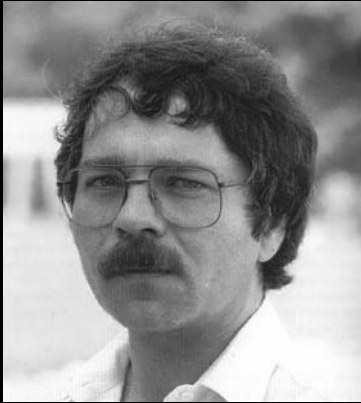
Leon
Cooper

John
Schrieffer

Wreszcie, w 1957 roku, nastąpił przełom, kiedy pojawiła się nowa idea „par Coopera”.

„Teoria BCS” została zaakceptowana jako prawdziwa.

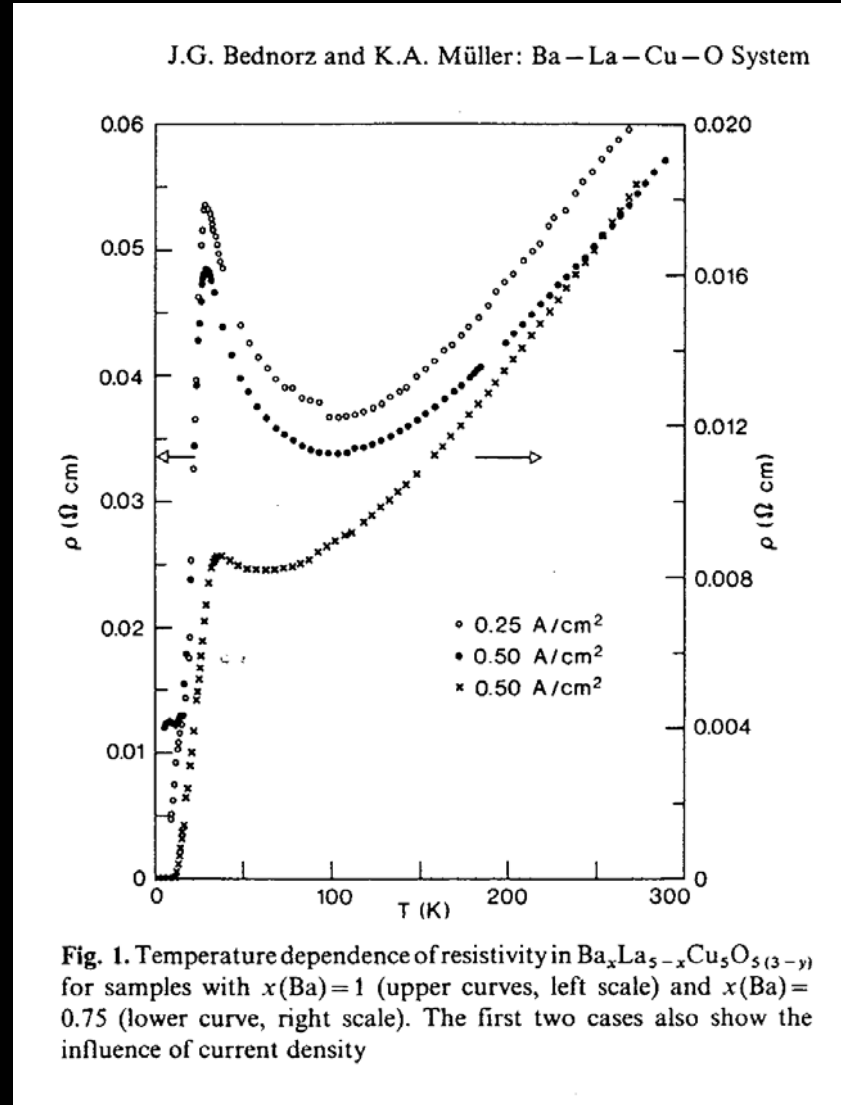
Odkrycie nadprzewodnictwa przy wysokich temperaturach



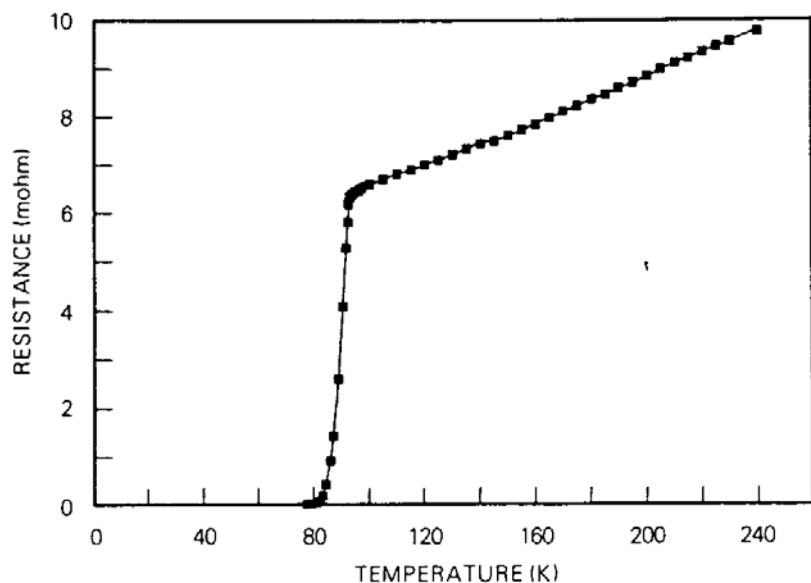
J. Georg Bednorz



K. Alex Müller



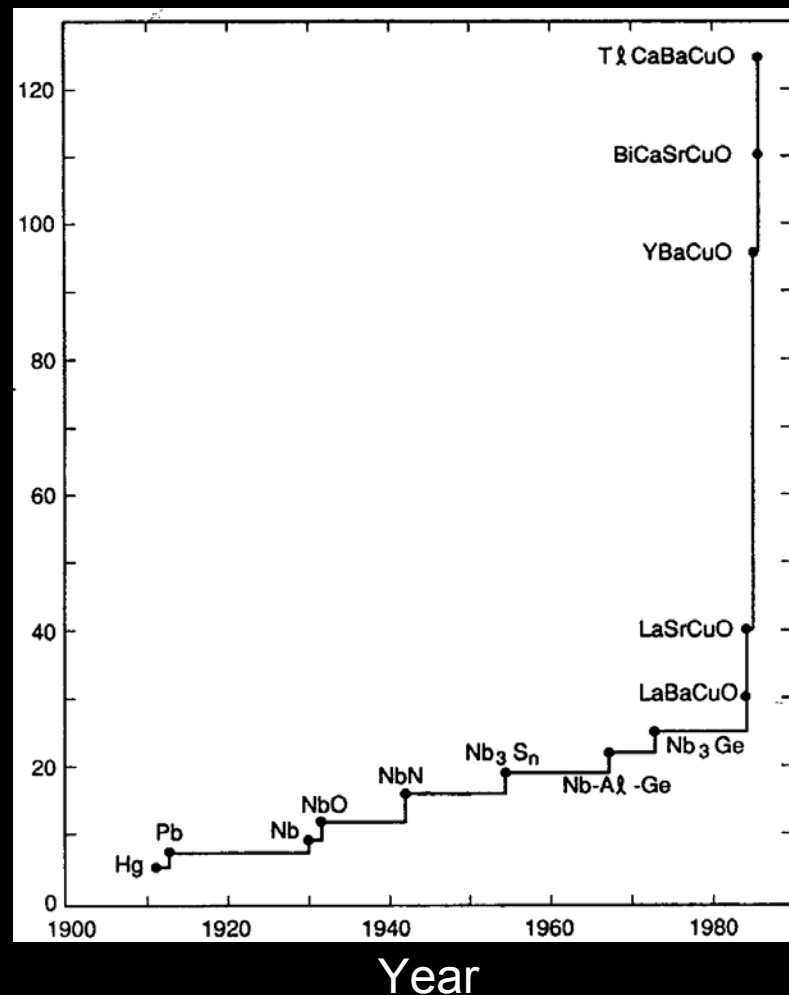
Nadprzewodnictwo przy wysokich temperaturach



Pierwsza obserwacja nadprzewodnictwa
(w YBa₂Cu₃O₇) przy temperaturach
powyżej temperatury
ciekłego azotu

M. K. Wu et al., *Phys. Rev.*58,908 (1987)

T_c



[rekord (2005) wynosi 138 K dla związku (Hg_{0.8}Tl_{0.2})Ba₂Ca₂Cu₃O_{8.33}]

Struktury niskowymiarowe

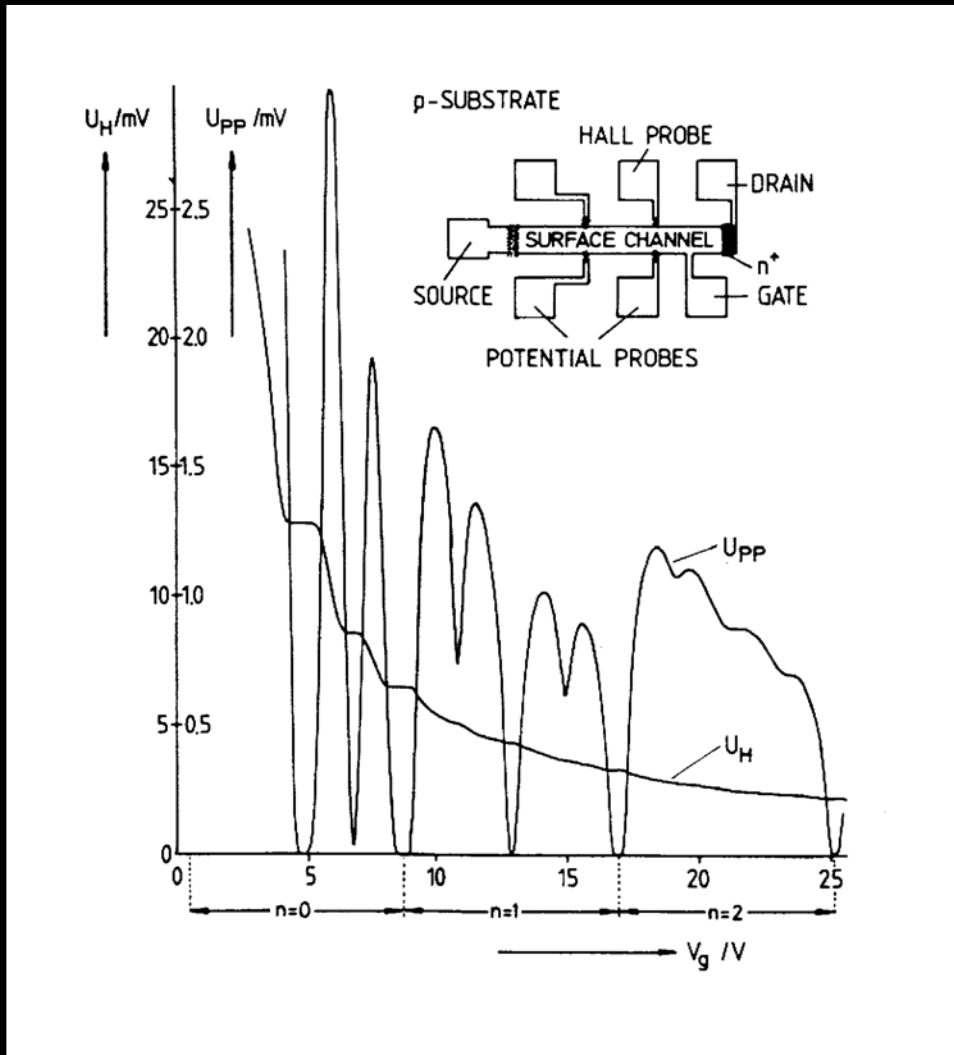
- planarne - wiele warstw półprzewodnikowych, elektrony mogą się poruszać swobodnie w dwóch wymiarach
- liniowe (druty kwantowe) – ruch elektronów w jednym wymiarze, wzdłuż drutu kwantowego
- zerowymiarowe (kropki kwantowe) - elektrony są uwięzione i nie mają możliwości poruszania się.

Ważne wyniki: kwantowe zjawisko Halla (1980)

ułamkowe kwantowe zjawisko Halla (1982)

Wielkie znaczenie nanofizyki dla technologii XXI wieku

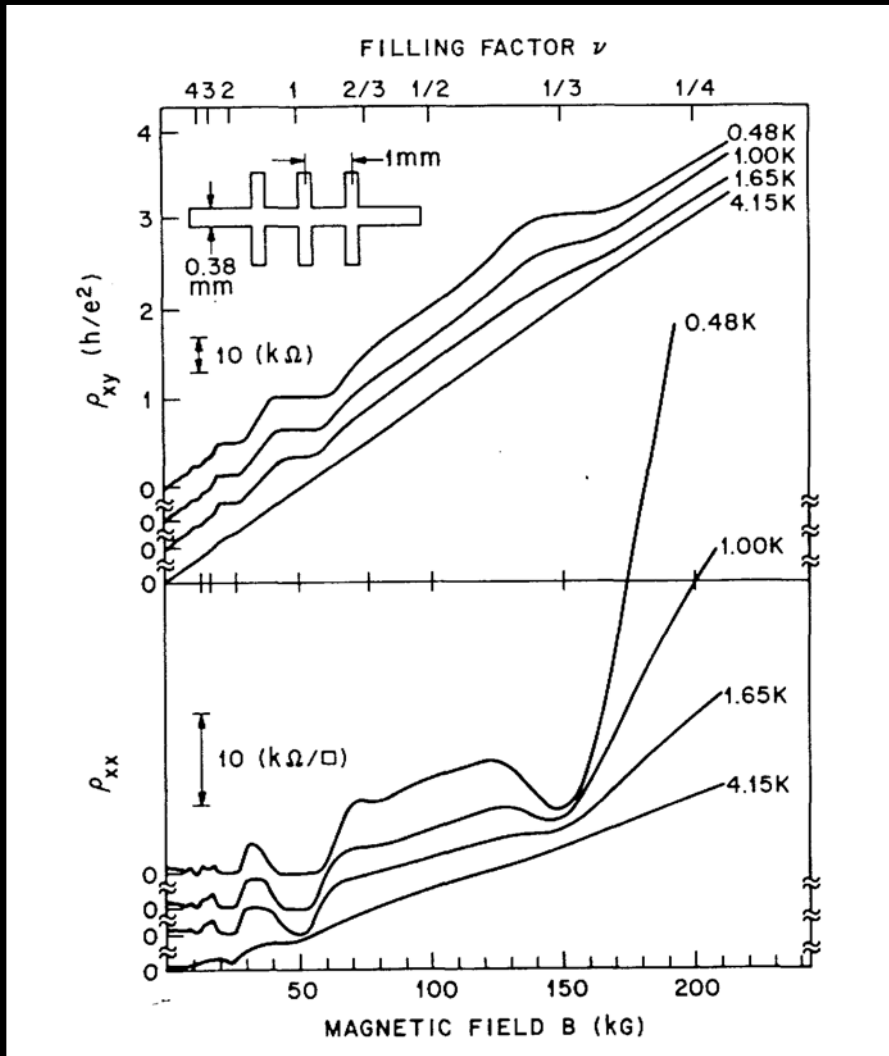
Kwantowe zjawisko Halla



Klaus von Klitzing

K. v. Klitzing, G. Dorda, M. Pepper, *Phys. Rev. Letters* 45, 494 (1980)

Ułamkowe kwantowe zjawisko Halla



Daniel Tsui

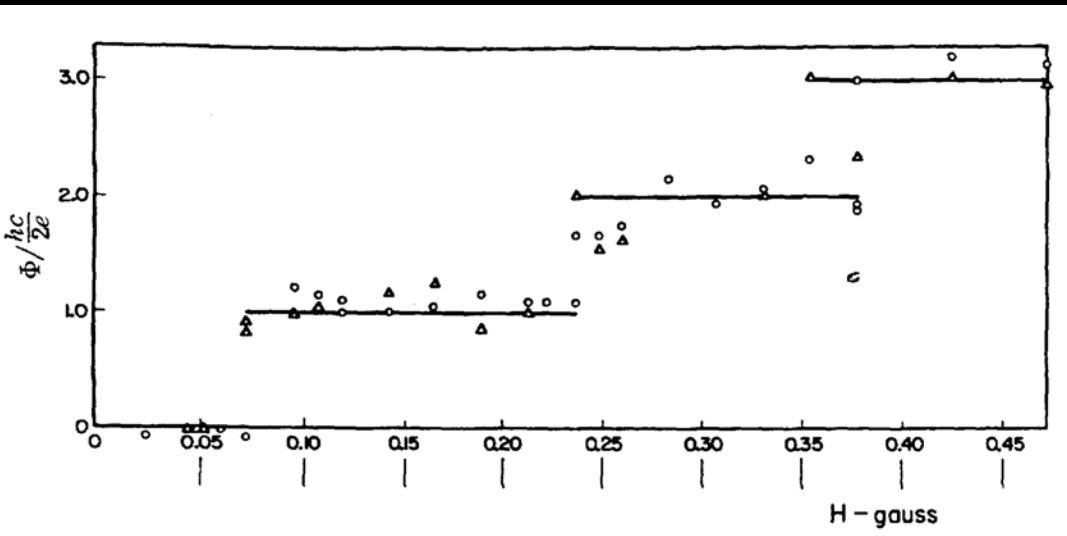


Horst Stormer

D. C. Tsui, H. L. Stormer, A. C. Gossard, *Phys. Rev. Letters* 48, 1559 (1982)

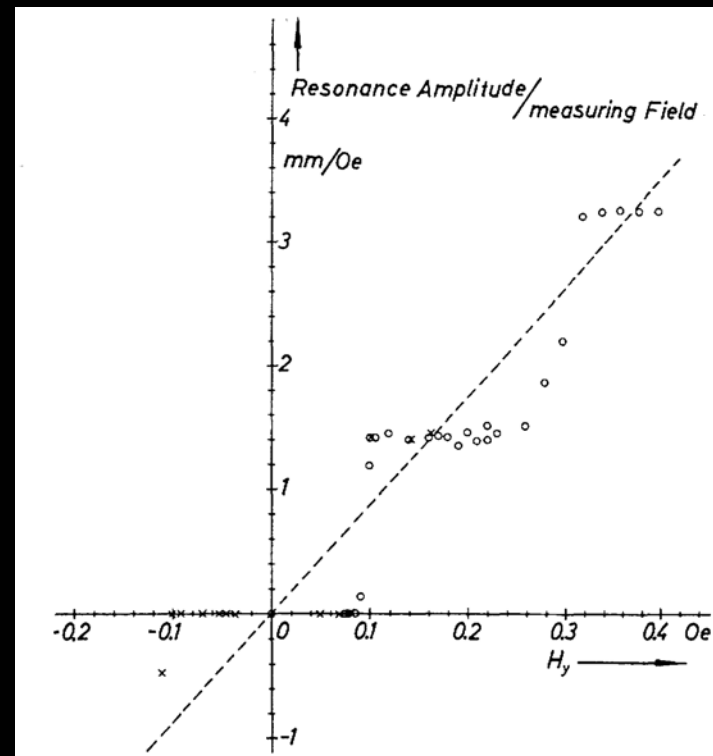
Mechanika kwantowa w skali makro

Kwantowanie strumienia magnetycznego w nadprzewodzącym walcu



R. Doll, M. Näbauer,
Phys. Rev. Lett. 7, 51 (1961)

B. S. Deaver, W. M. Fairbank,
Phys. Rev. Lett. 7, 43 (1961)



Mechanika kwantowa w skali makro

Zależność prądu Josephsona od pola magnetycznego

J. M. Rowell, *Phys. Rev. Lett.* 11, 200 (1963)

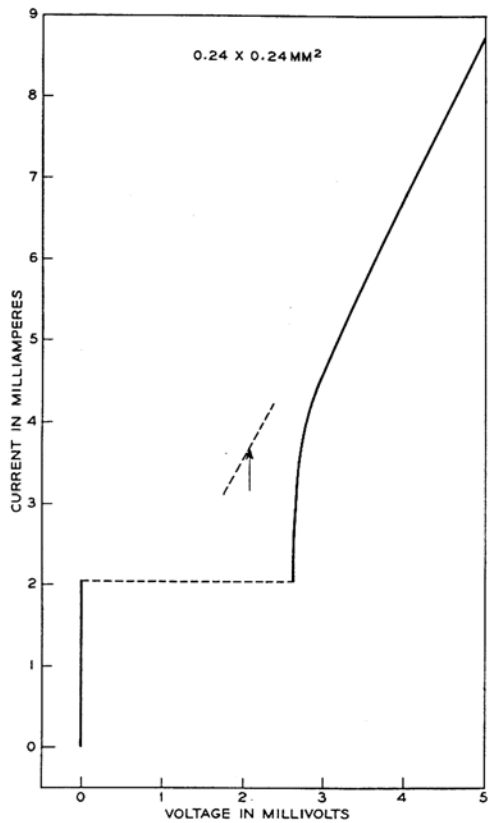
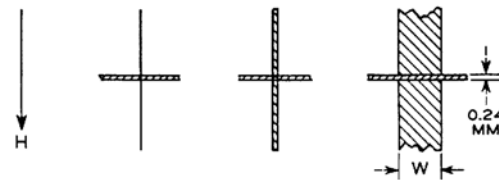
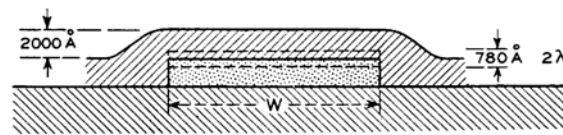


FIG. 1. Current-voltage characteristic for a Pb-I-Pb junction at 1.3°K. The arrow marks the predicted maximum magnitude of the Josephson current.



WIDTH W	0.04 MM	0.24 MM	2.40 MM
FIELD PERIOD	6.5 GAUSS	1.1 GAUSS	0.4 GAUSS
FLUX	2.0×10^{-7} G · CM ²	2.1×10^{-7} G · CM ²	7.5×10^{-7} G · CM ²
I AT $\frac{\pi}{2}\Delta$	0.5 MA	3.7 MA	38 MA
I_0	0.17 MA	2.0 MA	4.5 MA

FIG. 2. Comparison of the dimensions of three junctions and the magnitude and field dependence of the Josephson current.

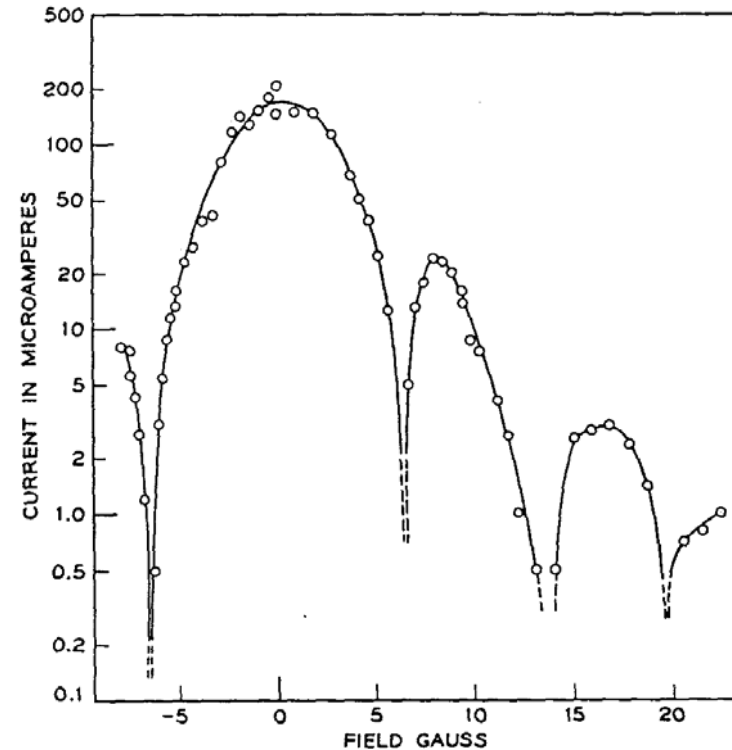


FIG. 3. The field dependence of the Josephson current in a Pb-I-Pb junction at 1.3°K.

Mechanika kwantowa w skali makro

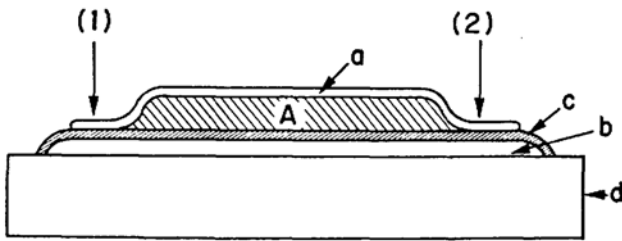


FIG. 1. Cross section of a Josephson junction pair vacuum-deposited on a quartz substrate (*d*). A thin oxide layer (*c*) separates thin ($\sim 1000\text{\AA}$) tin films (*a*) and (*b*). The junctions (1) and (2) are connected in parallel by superconducting thin film links forming an enclosed area (*A*) between junctions. Current flow is measured between films (*a*) and (*b*).

Zaobserwowanie interferencji kwantowej
R. C. Jaklevic, J. Lambe, A. H. Silver,
J. E. Mercereau,
Phys. Rev. Lett. **12**, 159 (1964)

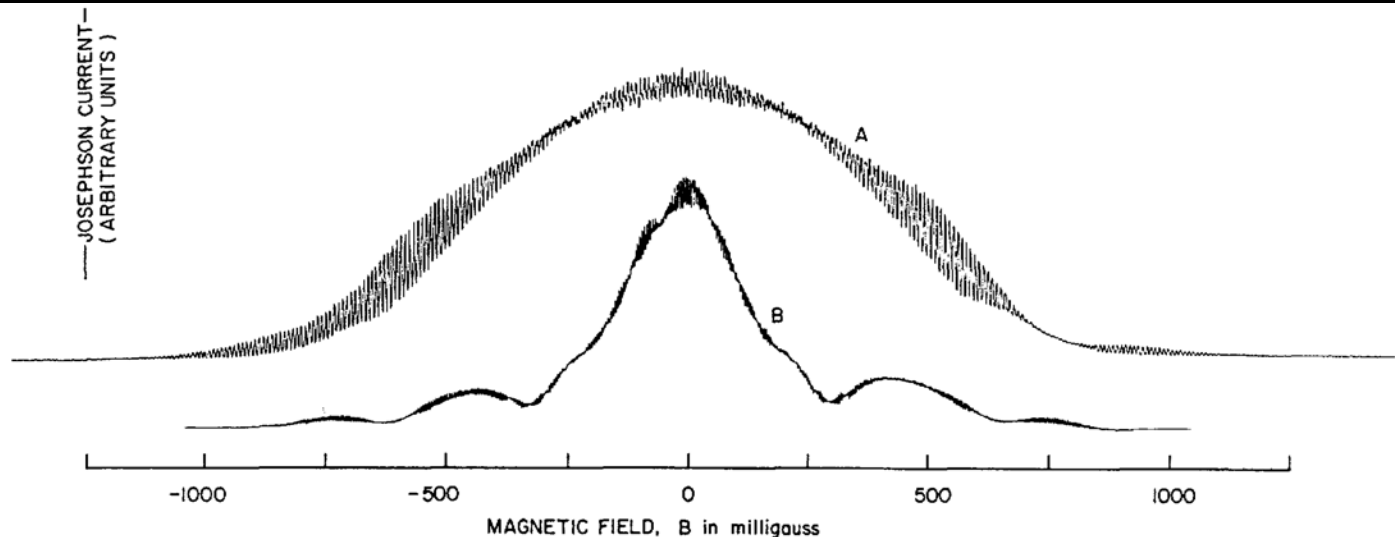


FIG. 2. Josephson current vs magnetic field for two junctions in parallel showing interference effects. Magnetic field applied normal to the area between junctions. Curve (A) shows interference maxima spaced at $\Delta B = 8.7 \times 10^{-3} \text{ G}$, curve (B) spacing $\Delta B = 4.8 \times 10^{-3} \text{ G}$. Maximum Josephson current indicated here is approximately 10^{-3} A .

Niektóre daty z historii optyki współczesnej

1948 Zasada holografii - Dennis Gabor



(Mieczysław Wolfke odkrył i zaproponował zasadę odwzorowania dwustopniowego już w 1920 r. [*Phys. Zeit.* **21**, 495 (1920)])

1950 Metoda pompowania optycznego - Alfred Kastler



1954 Pierwszy maser (amoniakalny) - Charles Townes, James Gordon, Herbert Zeiger



1955 Maser trójpoziomowy - Nikolai Basow, Alexander Prochorow

1958 Zasada lasera - Charles Townes, Arthur Schawlow



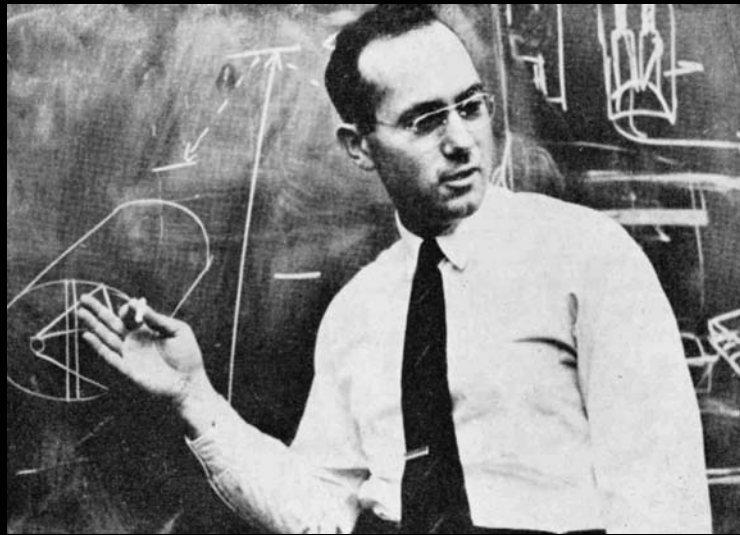
1960 Pierwszy laser (rubinowy) - Theodore Maiman



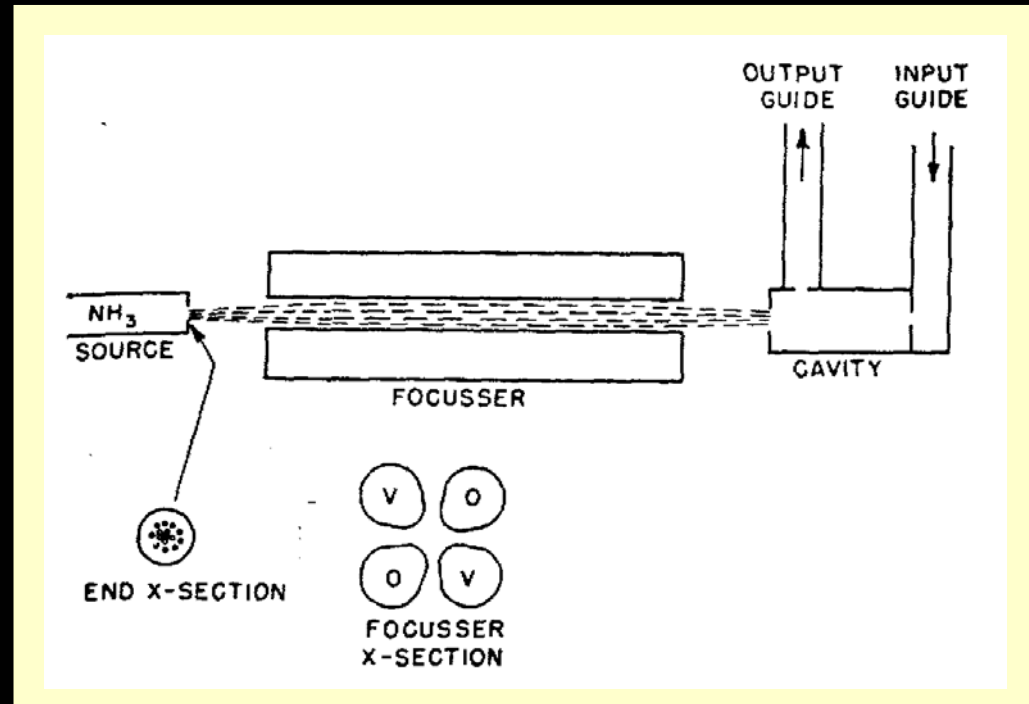
1962 Realizacja holografii optycznej przy użyciu lasera
- Emmett Leith, Juris Upatnieks

Pierwszy maser

(**M**icrowave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation)



Charles Townes



Schemat aparatury pierwszego masera

J. P. Gordon, H. J. Zeiger, C. H. Townes, *Phys. Rev.* 95, 282 (1954)

„Pewnego dnia... przyszli do mego pokoju Rabi i Kusch, poprzedni i aktualny dziekan wydziału, obydwaj - laureaci Nobla za prace nad wiązkami atomowymi i molekularnymi i ludzie, których opinie miały wielką wagę...

„Posłuchaj, powinieneś przerwać badania [nad maserem], które teraz prowadzisz. Nic z tego nie wyjdzie. Przecież wiesz, że te badania nie mogą się powieść. My wiemy, że nie mogą się powieść. Marnujesz pieniądze. Przerwij zaraz!”

...Llewelyn H. Thomas, wybitny teoretyk z Uniwersytetu Columbia powiedział mi, że z fundamentalnych praw fizyki wynika wprost, iż maser nie może dawać tak czystej częstości. Był tak pewien siebie, że właściwie odmówił słuchania moich wyjaśnień. Po uruchomieniu masera po prostu przestał się do mnie odzywać. Pewien młodszy fizyk z wydziału, nawet po udanej demonstracji pracy przyrządu, założył się ze mną o butelkę szkockiej, że nie działa on tak, jak mówimy (potem zapłacił za przegrany zakład)..”

Charles Townes - How the laser happened



„Wkrótce po zbudowaniu drugiego masera i wykazaniu, że istotnie jego częstość była zdumiewająco czysta, odwiedziłem Danię i spotkałem Nielsa Bohra. Kiedy szliśmy ulicą, spytał oczywiście czym się zajmuję. Opisałem maser i jego działanie. „Ależ to niemożliwe” - wykrzyknął. Zapewniłem go, że jest to możliwe. Podobnie, podczas koktajlu w Princeton, węgierski matematyk John von Neumann zapytał nad czym pracuję. Kiedy opowiedziałem mu o maserze i jego czystej częstości, oświadczył: „To nie może być prawdą”. Zapewniłem go, że to zostało już udowodnione.”

Charles Townes - How the laser happened

Pierwszy laser

Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation



Pierwszy laser Maimana



Theodore Maiman

T. Maiman, *Nature* 187, 493 (1960)

Lasery od największego do najmniejszego



Laser SHIVA
(1977)

Laser NOVA (1984)
 $15 \cdot 10^{12} \text{ W}$ w $3 \cdot 10^{-9} \text{ s}$

Livermore Lawrence
National Laboratory

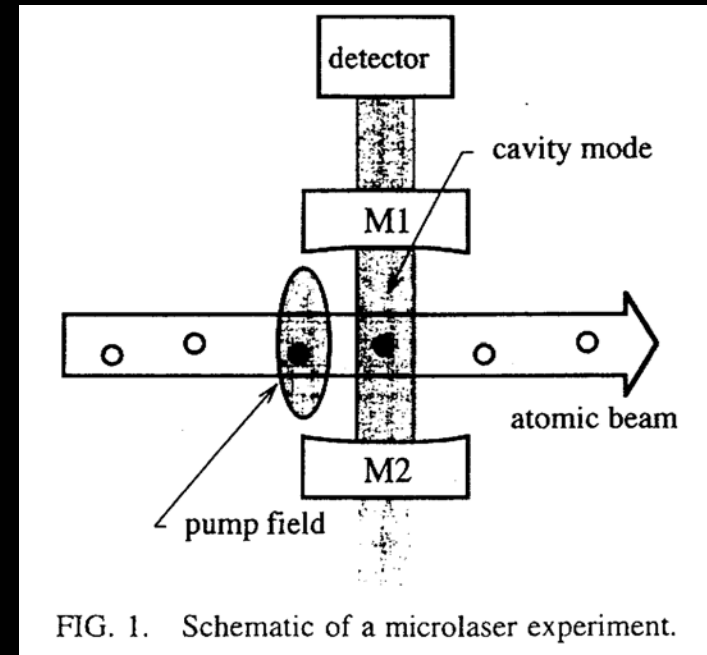


FIG. 1. Schematic of a microlaser experiment.

„Microlaser: A laser with one atom in an optical resonator”,
Kyungwong An, James J. Child,
Ramachandra R. Dasari, Michael S. Feld,
Phys. Rev. Lett. **73**, 3375 (1994)

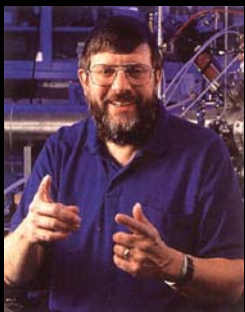
Nagroda Nobla z fizyki (1997): Za rozwinięcie metod schładzania i pułapkowania atomów światłem laserowym



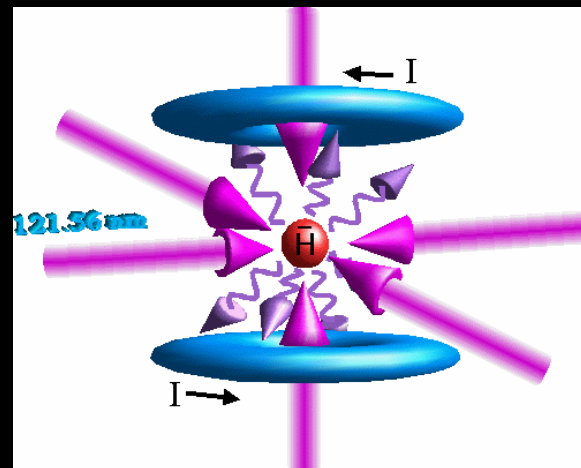
Steven Chu (USA)



Claude Cohen-Tannoudji
(Francja)



William D. Phillips (USA)



Nagroda Nobla z fizyki (2001): Za wytworzenie kondensatów Bosego-Einsteina w rozrzedzonym gazie atomów alkalicznych



Eric A. Cornell (USA)



Wolfgang Ketterle (Niemcy)



Carl E. Wieman (USA)

