

## MATERIAŁ W KTÓRYM PRĄD MOŻE PLYNAĆ WIECZNIE



Obraz 1 - źródło: <https://unsplash.com/photos/2mjl2uvz9ic>

Zjawisko nadprzewodnictwa zostało odkryte w 1911 roku przez holenderskiego fizyka Heike Kamerlingha Onnesa. To wydarzenie spowodowało niemalą rewolucję w nauce. Równie ważne było odkrycie nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego, które skutkowało wyścigiem naukowym. Metą jest znalezienie takiego materiału, który wykazuje właściwości nadprzewodzące w warunkach pokojowych. Taki wytwór wywołałoby burzę na rynku, w przemyśle i przede wszystkim w nauce. Jak zostały wykryte nadprzewodniki? Co dzieje się w nadprzewodnikach i czy już się je wykorzystuje?

- Czy rezystancję można pominąć?
- „Rtęć praktycznie zero”
- Jak to działa – teoria BCS
- Tam gdzie kończy się logika, zaczyna się fizyka kwantowa
- Coraz bliżej 20°C
- Wiecznie płynący prąd

## **Czy rezystancję można pominąć?**

Podczas zajęć z fizyki w szkole podstawowej, gimnazjum, a nawet w szkole średniej proszono nas w zadaniach z kinematyki, żeby pominąć opory powietrza. Według autorów zadania, dla spadającej półkilogramowej kuli z jakiejś wysokości, można było założyć, że powietrze nie stoi jej na przeszkodzie. Ma to sens do momentu w którym zawieje tak potężna wichura, że tę kulkę zdmuchnie. Wtedy te opory są nie do pominięcia. Tak też jest w przypadku rezystancji.

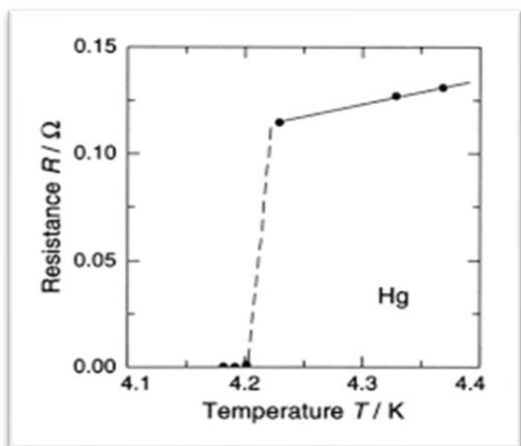
Każdy materiał charakteryzuje się pewną rezystancją, czyli predyspozycją do blokowania przepływu prądu. Dielektryki praktycznie nie przewodzą prądu, czyli ich rezystancja jest bardzo duża. Przewodniki natomiast przewodzą prąd i ich rezystancja jest mała. Dlaczego, więc jest w większości niepomijalna? Jest to spowodowane prawami fizyki (takimi jak prawo Ohma) oraz tym, że po prostu znaczna większość materiałów nie ma tak małej rezystancji. W praktyce zależy to od tego z jak dużą rezystancją ma się do czynienia i co właściwie chce się pominąć.

Rezystancję mierzy się miernikami za pomocą przewodów, które posiadają własny opór. Podczas pomiarów miernik przekłamuje wynik, bo to co na nim widzimy, to nie tylko wartość mierzona, ale także ta niechciana, np. rezystancja sond pomiarowych. Jeżeli mierzona wielkość jest ogromna, to możemy zignorować ten błąd. Problem pojawia się, gdy mierzona rezystancja jest bardzo mała, wtedy rezystancja przewodów nie jest do pominięcia.

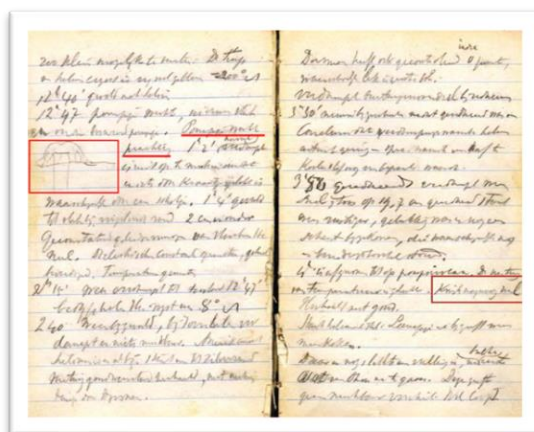
Istnieją materiały, których opór można spokojnie pominąć. Gdy wystawi się je na np. temperatury rzędu zera bezwzględnego ( $-273,15^{\circ}\text{C}$ ), osiągają pomijalnie małą rezystancję, praktycznie zerową. Nazywa się je nadprzewodnikami.

## **„Rtęć praktycznie zero”**

Historię doświadczeń w niskich temperaturach rozpoczął Louis Paul Cailletet (1832-1913), który jako pierwszy skroplił tlen. Skroplona substancja osiąga temperaturę  $-183^{\circ}\text{C}$ . Równie ciekawymi efektami może pochwalić się Carl von Linde (1842-1934), który dzięki procesowi destylacji otrzymał z powietrza ciekły tlen i ciekły azot. Te dwa odkrycia pozwoliły na badanie materiałów w bardzo niskich temperaturach. 10 lipca 1908 roku H. K. Onnes (1853-1926) skroplił hel, który osiąga temperaturę bliską zeru bezwzględnemu. Podczas badań złota i platyny w tej temperaturze okazało się, że im wyższy stopień czystości substancji, tym rezystancja była niższa.



Obraz 2 – wykres rezystancji do temperatury rtęci. W temperaturze 4,2 K widać zerową rezystancję..  
 Źródło: [https://www.researchgate.net/figure/The-resistance-of-mercury-measured-by-Kamerlingh-Onnes\\_fig1\\_335965562](https://www.researchgate.net/figure/The-resistance-of-mercury-measured-by-Kamerlingh-Onnes_fig1_335965562)



Obraz 3 – notatki Onnesa. Po prawej zaznaczony napis "rtęć praktycznie zero". Źródło: <https://snf.ieeecsc.org/sites/ieeecsc.org/files/RN21-S.pdf>

Założono, że jeżeli taki trend będzie się utrzymywał to rezystancja materiału o bardzo dużej czystości może spaść do zera. Do dalszych badań wybrano rtęć ze względu na to, że ten materiał charakteryzuje się wysoką czystością. Słowa „rtęć praktycznie zero” zapisał H. K. Onnes 8 kwietnia 1911 roku w swoim dzienniku po odkryciu, że czysta rtęć w temperaturze 4,2 K (-268,95°C) ma zerową rezystancję. To zdarzenie było pierwszym na świecie podczas którego wykryto nadprzewodnik.

Nie każdy wierzył w odkrycie nadprzewodnictwa. „William Thomson (Lord Kelvin) przewidywał, że w skrajnie niskich temperaturach, elektron przewodzący „przymroziłby się” do atomów. W taki sposób rezystancja przy zerze absolutnym stałaby się nieskończona.” (D. van Delft, P. Kes – The discovery of superconductivity).

### Tam gdzie kończy się logika, zaczyna się fizyka kwantowa

Gdybyśmy chcieli wyjaśnić to zjawisko „na chłopski rozum”, to w pewnym momencie natrafilibyśmy na ślepy zaułek. Dlaczego? Oto przykłady:

Po deszczu auto miałyby problem w przejechaniu przez las z powodu błota. W momencie w którym temperatura spadłaby tak bardzo, że droga zamarzlaby, to auto bez problemu mogłoby przejechać trasę. W materiałach ta analogia nie ma sensu. Temperatura krytyczna, czyli taka w której występuje nadprzewodnictwo, jest różna w zależności od materiału. (YouTube: Smartgasm - Wyjaśnienie nadprzewodnictwa.)

Podczas badań odkryto, że nadprzewodnictwo jest spowodowane przez pary elektronów. Ale przecież para, która przebiega przez tłum ludzi na zatłoczonym peronie, żeby zdążyć na pociąg, nie trzyma się za rękę, bo to by ich tylko spowalniało. Przebiegają osobno, żeby dotrzeć jak najszybciej do celu. (YouTube: RS Elektronika - Nadprzewodniki)

Żeby zrozumieć nadprzewodnictwo nie można się posługiwać analogiami i domysłami. Jedynym czym można się kierować to wynikami badań i zasadami fizyki kwantowej

### **Jak to działa – teoria BCS**

Poniższe wyjaśnienie działania nadprzewodnictwa jest tak bardzo uproszczone jak to tylko możliwe. Zainteresowanych szczegółami naukowymi odsyłam do bibliografii.



Obraz 4 - od lewej: John Bardeen, Leon Cooper, Robert Shrieffer.

źródło: <https://www.physics.rutgers.edu/grad/601/CM601/talks/bec.pdf>

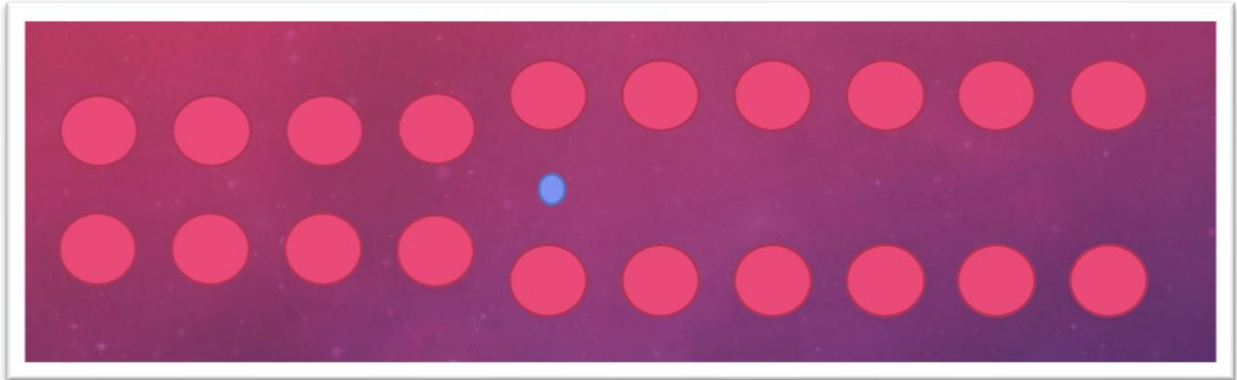
Prąd elektryczny jest spowodowany przepływem elektronów przez materiał. Normalnie, taka pojedyncza cząsteczka ma masę około  $9.109\ 383\ 7015 \times 10^{-31}$  kg, lecz gdy „zważono” elektron przepływający

przez nadprzewodnik wykryto, że jest 2 razy cięższy.

Istnieje zjawisko w którym to 2 elektrony łączą się ze sobą. W takim wypadku pojedynczy elektron nie jest rozpatrywany indywidualnie, tylko jako jedna masa. Taką parę nazywa się parą Coopera. Prawdopodobieństwo wystąpienia takiej pary jest większe w niskich temperaturach.

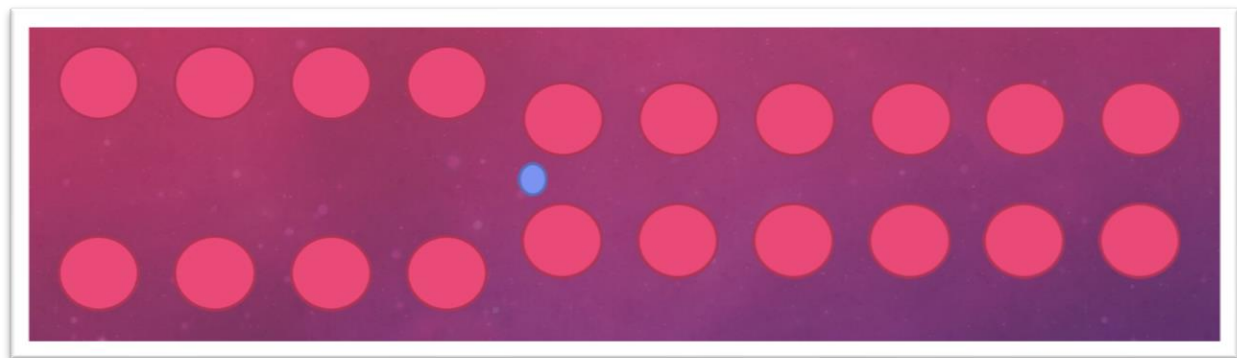
Elektrony w normalnej sytuacji „odbijają” się od atomów co skutkuje występowaniem rezystancji. Zjawisko przemieszczania się par Coopera w nadprzewodniku wygląda w następujący sposób: pierwszy elektron podczas poruszania się obok atomów oddaje energię. Tym sposobem przyciąga atomy. Drugi elektron naprawia to, co zepsuł poprzednik i zabiera energię odpychając te atomy. To wszystko dzieje się bardzo szybko, a elektrony te działają wspólnie. Para elektronowa równocześnie oddaje i zabiera energię i nie obija się o atomy. Rezystancja jest niwelowana – wynosi zero. Ten opis przedstawia teorię BCS, która jest rozwiązaniem problemu przepływu prądu przez nadprzewodnik niskotemperaturowy.

Skrót „BCS” pochodzi od nazwisk twórców tej teorii – Johna Bardeena (1908-1991), Leona Coopera i Roberta Schrieffera (1931-2019). Teoria została ogłoszona w 1957 roku, a 15 lat później, w 1972 roku, twórcy teorii otrzymali Nagrodę Nobla z fizyki.



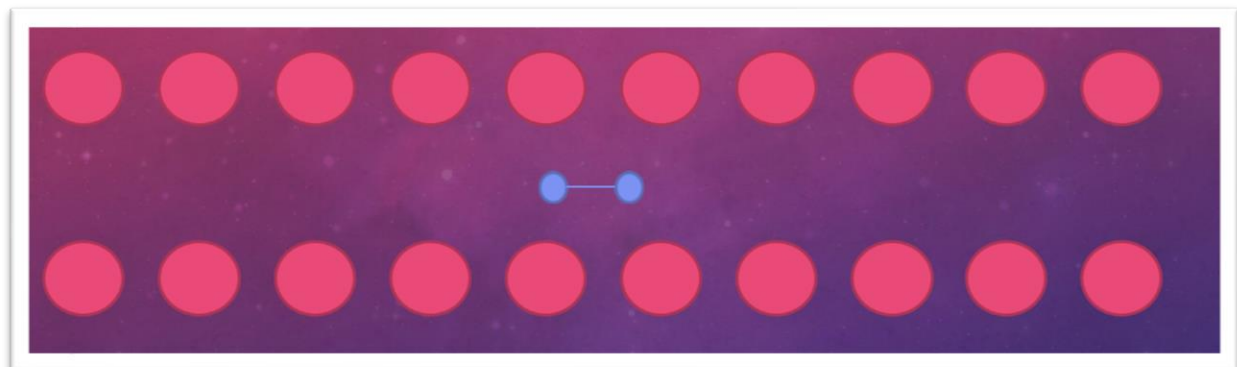
Obraz 5 - przepływający pierwszy elektron. Przyjmuje energię, przyciągając atomy.

Inspiracja grafiki: <https://youtu.be/4j4CfzPr2rg?t=988>



Obraz 6 - przepływający drugi elektron. Przyjmuje energię, oddalając atomy.

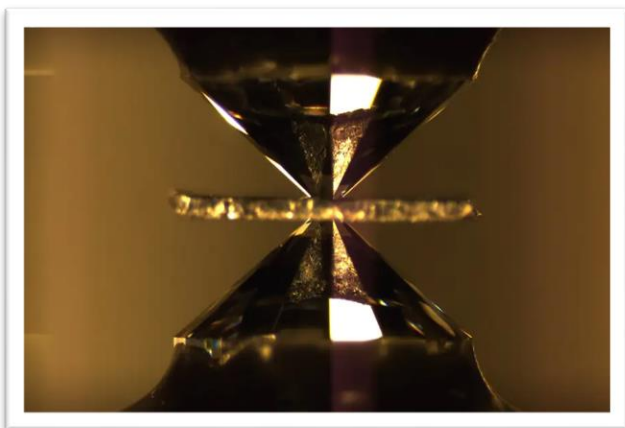
Inspiracja grafiki: <https://youtu.be/4j4CfzPr2rg?t=988>



Obraz 7 - przepływająca para Coopera. Atomy nie zbliżają się ze względu na równoczesne oddziaływanie na atomy.

Inspiracja grafiki: <https://youtu.be/4j4CfzPr2rg?t=988>

## Coraz bliżej 20°C



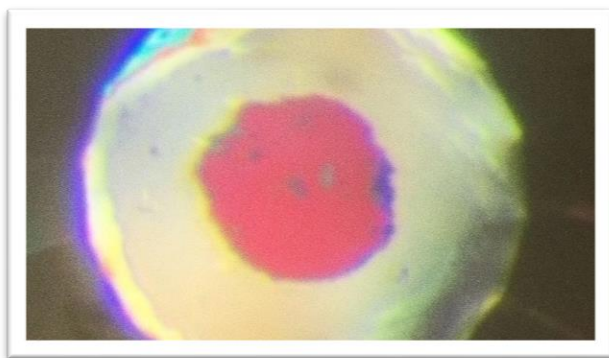
Obraz 8 – komora diamentowa.

Źródło: <https://www.newscientist.com/article/2363376-red-matter-superconductor-could-transform-electronics-if-it-works/>

J. G. Bednorz oraz K. A. Müller (1927-2023) odkryli w 1986 roku pierwszy wysokotemperaturowy nadprzewodnik, a już w 1987 roku otrzymali nagrodę Nobla. Był to związek baru, lantanu, miedzi i tlenu. Właściwości nadprzewodzące wykazywał w temperaturze około -240 stopni Celsjusza. W porównaniu, zwykłe nadprzewodniki potrzebują temperatury -269 stopni. Co ciekawe ten materiał w normalnych warunkach był izolatorem,

co dało sygnał naukowcom, że nadprzewodników nie należy szukać tylko w przewodnikach.

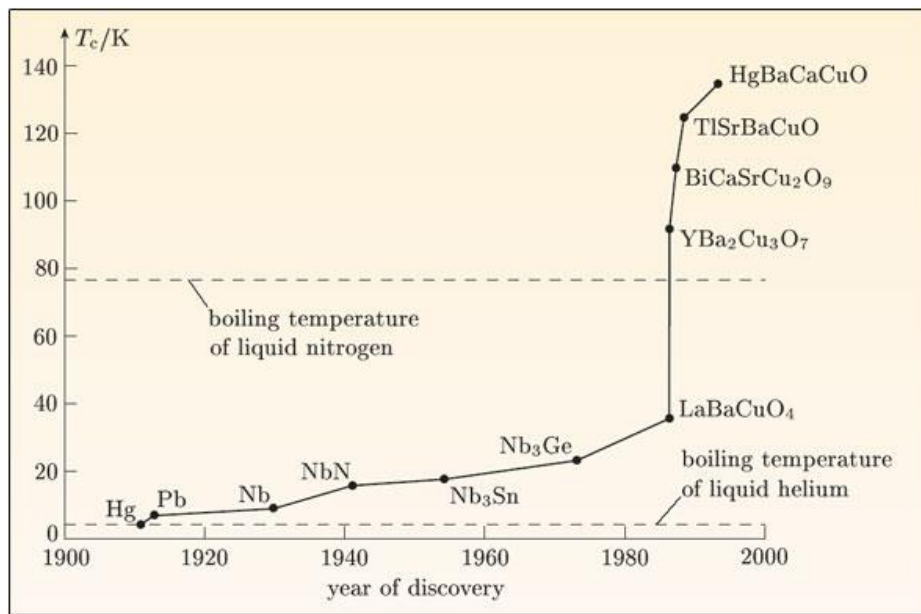
W przypadku takich nadprzewodników teoria BCS nie jest dobrym wytłumaczeniem zjawiska nadprzewodnictwa. 14 października 2020 roku w magazynie „Nature” został opublikowany dokument wykazujący, że otrzymano nadprzewodnik w temperaturach pokojowych. Wykorzystano do tego ogromne ciśnienie, które otrzymano za pomocą komory diamentowej. Prawie 2 lata później magazyn wycofał ten artykuł ze względu na wątpliwości co do wyników. Zespół badawczy nie poddał się. Po ponownych badaniach, w lekko zmienionym składzie, 8 marca 2023 roku wydali kolejny artykuł o tym samym temacie. Artykuł porusza kwestię stworzonego sztucznie materiału składającego się z lutetu, azotu oraz wodoru. Po umieszczeniu go w komorze diamentowej w temperaturze pokojowej, zaczął on wykazywać właściwości nadprzewodzące. Wartość ciśnienia, które powoduje nadprzewodnictwo tego materiału to 1 gigapaskal. Ze względu na jego czerwonawy kolor podczas przykładania ciśnienia nazwano go czerwoną materią.



Obraz 9 - czerwona materia.

Źródło: <https://www.gearrice.com/update/the-red-matter-is-the-superconductor-of-the-future-that-will-revolutionize-science/>

W oczy rzuca się fakt, że ostatni artykuł wydany został w tym roku. Nie należy ignorować tego, że wycofanie pierwszego wspomnianego artykułu nastąpiło po około dwóch latach. Odkrycia po jakimś czasie mogą okazać się błędne, dlatego należy do takich spraw podchodzić z ostrożnością. Nie zmienia to faktu, że badania nad nadprzewodnikami nadal trwają, a ciśnienia w których są wykrywane nadprzewodniki maleją. Ludzkość doszła do momentu, w którym temperatura występowania nadprzewodnictwa, to temperatura pokojowa. Przyszłość kształtuje się pozytywnie.



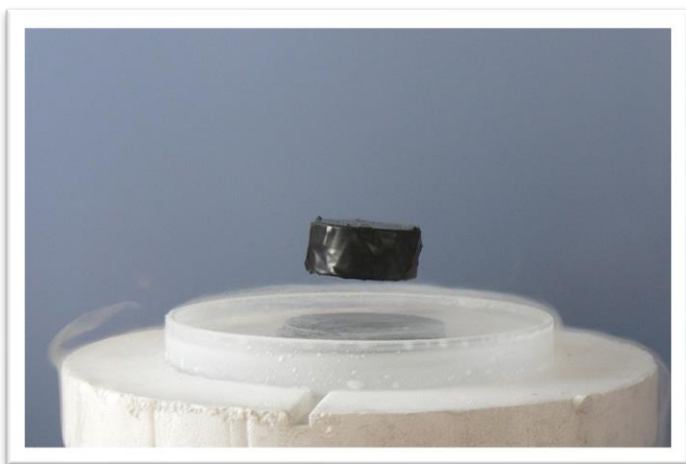
Obraz 10 - temperatury krytyczne nadprzewodników odkrytych na przestrzeni lat.

Źródło: <https://aiimpacts.org/historic-trends-in-the-maximum-superconducting-temperature/>

## Wiecznie płynący prąd

Zaryzykuję stwierdzeniem, że odkrycie względnie taniego nadprzewodnika, w którym prąd przepływa bez oporów spowodowałoby globalną rewolucję energetyczną. Taka technologia zmniejszyłaby dramatycznie ceny energii elektrycznej, wpłynęłaby bardzo pozytywnie na klimat i niesamowicie przyspieszyłaby rozwój cywilizacji, a osoba, która by to wynalazła stałaby się sławą. Zakładając, że mamy nadprzewodnik, który wykazuje swoje właściwości w temperaturze około 20°C i nie potrzeba mu wysokich ciśnień, to do czego by nam się przydał?

Można by skorzystać z efektu Meissnera. Polega on na wyparciu przez materiał pola magnetycznego. Pole zostaje wypchnięte przez pojawienie się prądu w wierzchniej warstwie



Obraz 11 - efekt Meissnera.

Źródło: <https://www.britannica.com/science/type-II-superconductor>

nadprzewodnika. Przez interakcję tego prądu z polem magnetycznym tworzy się siła, która unosi nadprzewodnik. W takim przypadku można zaobserwować lewitację magnetyczną.

Taką lewitację już dziś wykorzystują pociągi Maglev. Dzięki silnemu polu magnetycznemu

wytwarzanemu w nadprzewodnikach, pociąg może się unosić i osiągać szybkości rzędu 600 km/h. Przejechanie takim pociągiem ze Szczecina do Warszawy zajęłoby tylko godzinę.

Lewitacja magnetyczna znalazłaby zastosowanie w mechanice. Łożyska beztarciowe wyeliminowałyby problem zużycia materiałów.

Przesył energii elektrycznej jest obarczony stratami. Przewody ciągną się na grube kilometry, więc rezystancja tych przewodów jest duża. W nadprzewodniku nie byłoby z tym problemów. Dzięki braku rezystancji prąd elektryczny płynąłby przez przewody z elektrowni do naszych domów praktycznie bez strat.

W tranzystorach, szybkość włączania i wyłączania jest kluczowa, szczególnie w zadaniach typu sterowanie silnikiem. Brak oporów przełożyłoby się na szybkość ich działania, a tym samym rewolucję na rynku półprzewodnikowym.

Nadprzewodniki znalazłyby, a poniekąd już znajdują, zastosowanie w każdej dziedzinie naszego życia. W elektronice, energetyce, mechanice, kosmologii, transporcie. Do wynalezienia nadprzewodnika działającego w warunkach pokojowych jeszcze daleko, ale prace nadal trwają. Przyszłość dzieje się na naszych oczach. Materiał w którym, w normalnych warunkach, prąd mógłby płynąć wiecznie jest i będzie nadal poszukiwany.





Obraz 12 – porównanie klasycznych przewodów z przewodem stworzonym z nadprzewodnika.

Źródło: <https://forbot.pl/blog/elektromagnesy-nadprzewodnikowe-bittera-i-wybuchowe-id52378>



Obraz 13 – pociąg Maglev.

Źródło: <https://www.globaltimes.cn/page/202107/1229097.shtml>

## **Bibliografia**

- Bushwick, S. (2023, Marzec 10). Controversy Surrounds Blockbuster Superconductivity Claim. *Scientific American*.
- Crane, L. (2023, Marzec 8). 'Red matter' superconductor could transform electronics – if it works. *New Scientist*.
- Dirk van Delft, P. K. (2011, Luty 8). The discovery of superconductivity. *Europhysics News*.
- E. Snider, N. D.-G. (2020, Październik 14). Room-temperature superconductivity in a carbonaceous sulfur hydride. *Nature*.
- Encyclopaedia Britannica. (brak daty). Louis-Paul Cailletet. *Encyclopaedia Britannica*.
- Encyclopaedia Britannica. (brak daty). Meissner effect. *Encyclopaedia Britannica*.
- Europhysics news. (brak daty). The liquefaction of helium. *Europhysics news*.
- Hora, A. (2023, Marzec 10). The 'red matter' is the superconductor of the future that will revolutionize science. *Gearrice*.
- IEEE CSC Council on Superconductivity. (2011). The Notebooks of Kamerlingh Onnes. *Centennial Symposium Lecture*.
- J. Bardeen, L. N. (1957). *Theory of Superconductivity*. University of Illinois, Urbana, Illinois: Department of Physics.
- N. Dasenbrock-Gammon, E. S.-S. (2023, Marzec 8). Evidence of near-ambient superconductivity in a N-doped lutetium hydride. *Nature*.
- Nature. (2022, Wrzesień 26). Retraction Note: Room-temperature superconductivity in a carbonaceous sulfur hydride. *Nature*.
- NIST. (brak daty). *The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty*. Witryna sieci Web NIST: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?me>
- Papanelopoulou, F. (2013, Październik 9). Louis Paul Cailletet: The Liquefaction of oxygen and the emergence of low-temperature research. *National Library of Medicine*.
- Science Focus. (brak daty). How it works: EDS Maglev Trains. *Science Focus*.
- Science History Institute. (2017, Grudzień 11). Carl von Linde. *Science History Institute*.
- Wogan, T. (2012, Listopad 2). Improved diamond-anvil cell allows higher pressures than ever before. *physicsworld*.

*Opracował i napisał: Siwiela Marcel*