

에너지 혁신소재

초전도체



김찬중/한국원자력연구원

현대에는...

전자의 시대

Electron

전자의 움직임으로 구분한 재료의 종류

- 도체-Conductor
- 반도체-Semi-conductor
- 부도체-Insulator

Electron



도체-Conductor

전도체(구리, 알루미늄 등
금속, 또는 합금)

지휘자

금속의 자유전자



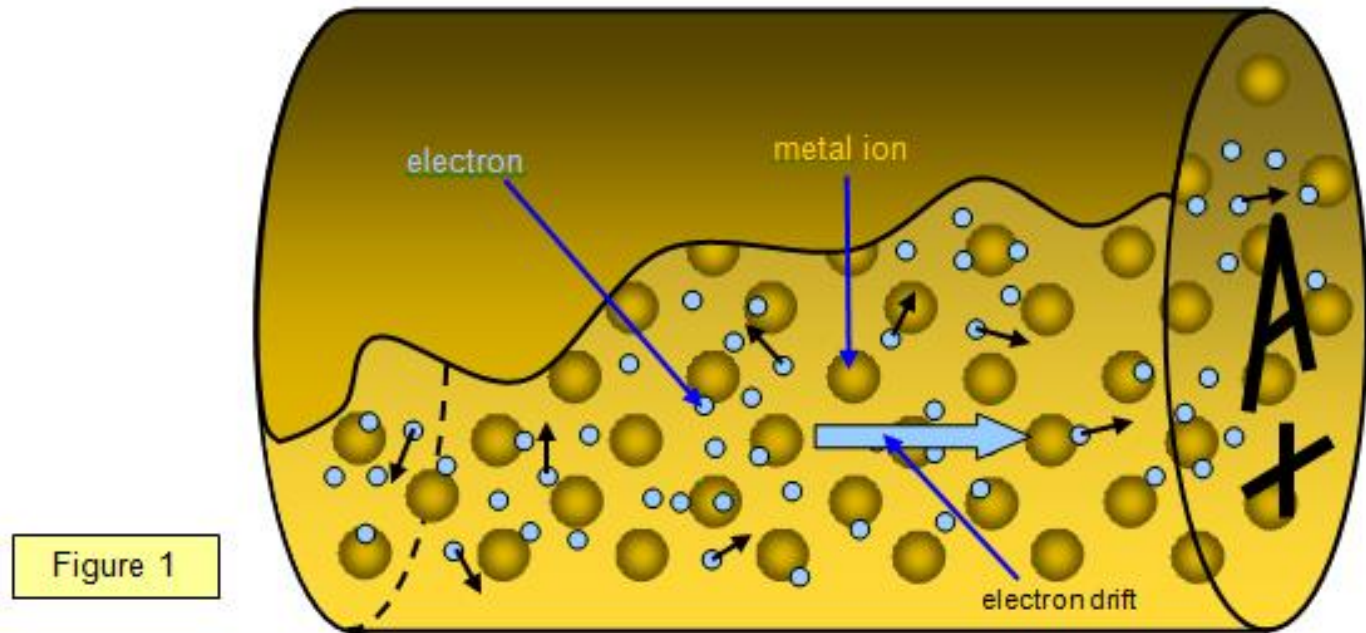
• 음악이 잘 흐르게



• 전기가 잘 흐르게

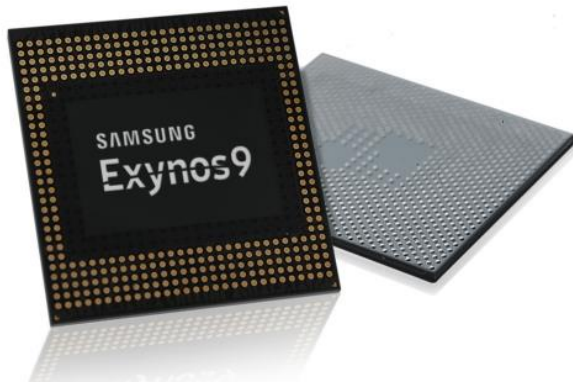


자유전자- Free electrons



- **Metals** atoms have loose **electrons** in the outer shells, which form a 'sea' of delocalised or **free** negative charge around the close-packed positive ions. These loose **electrons** are called **free electrons**. They can move freely throughout the metallic structure.

반도체-Semi-conductor

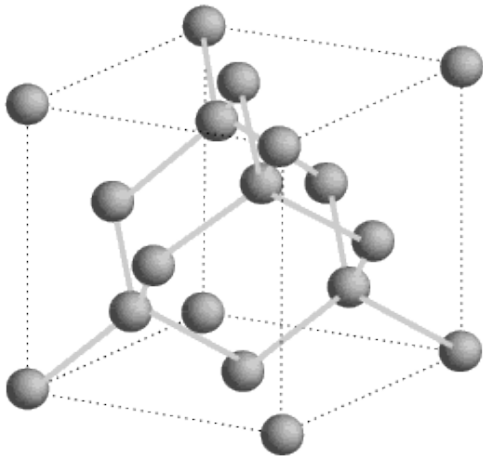


Semiconductors

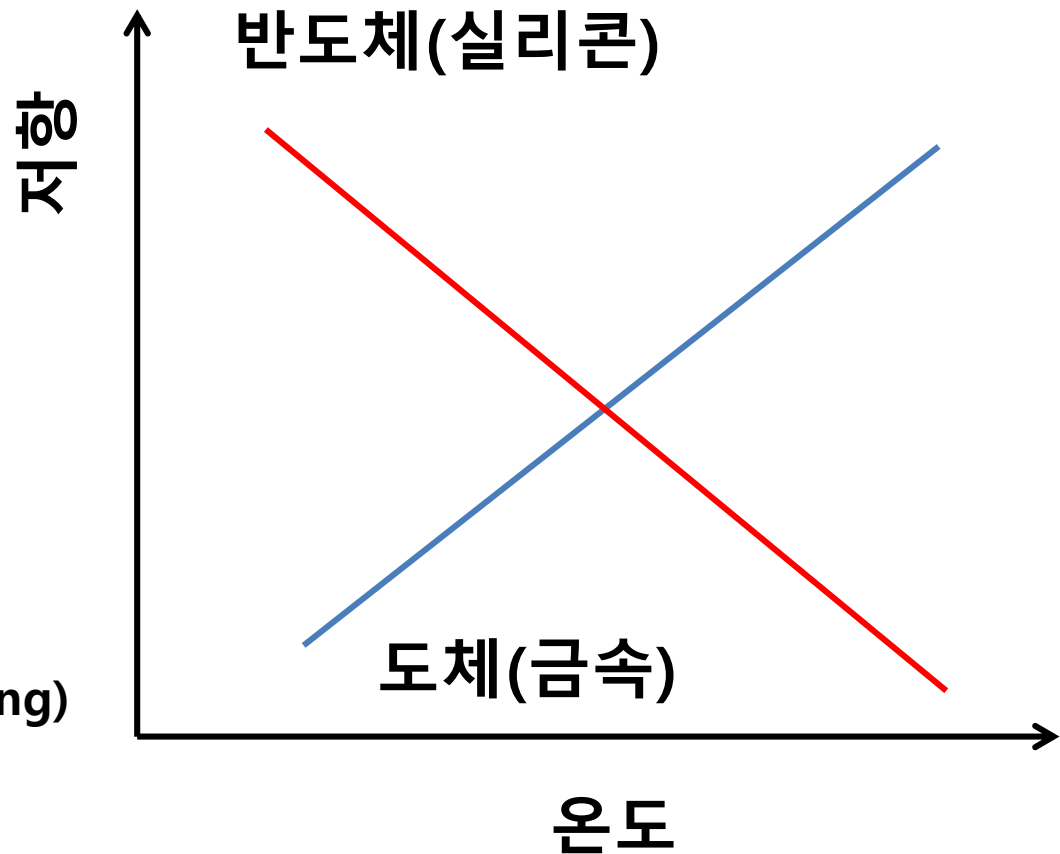
- A **Semiconductor** is a material whose resistivity is between that of a good conductor and a good insulator.
- Examples of materials which are semiconductors are Silicon and Germanium.

• 전기가 흐르지만 잘 흐르지 않는 소재

움직일 수 있는 전자가 별로 없다



Crystal structure of Si
공유결합(Covalent bonding)

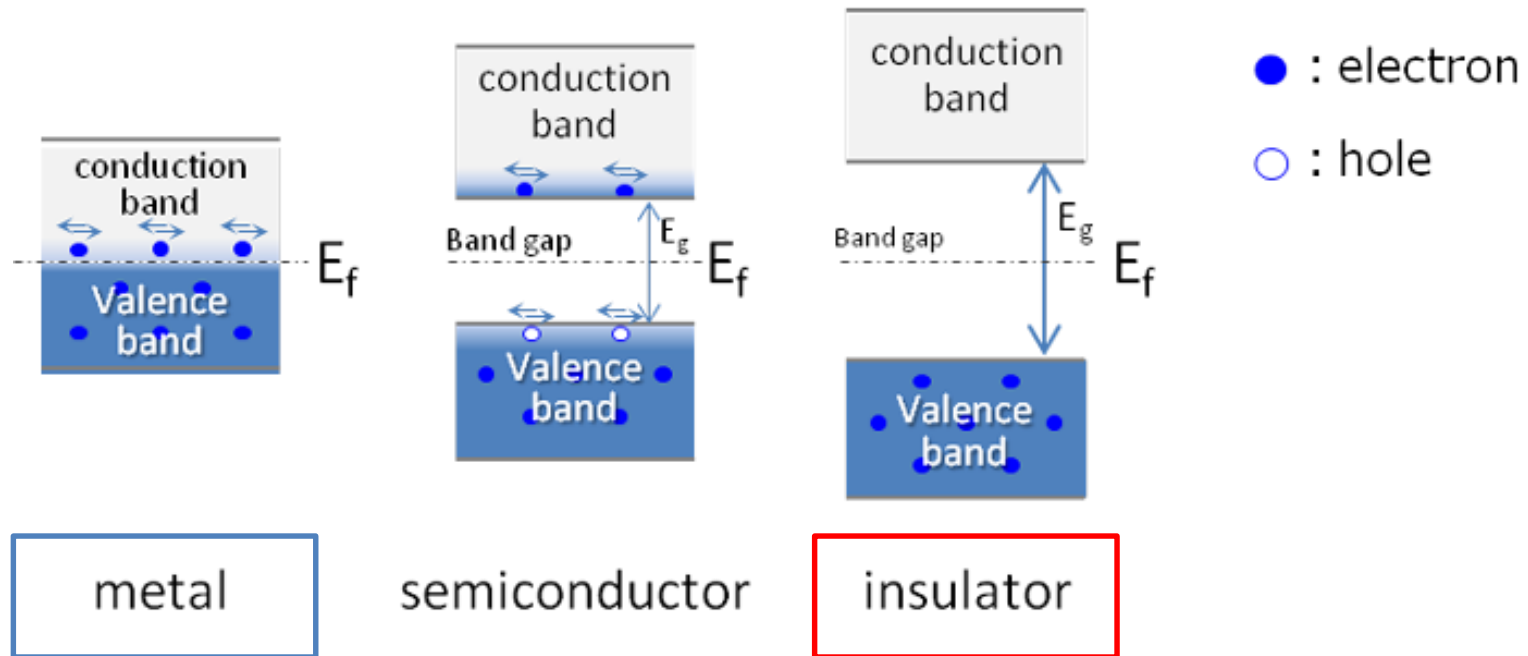


절연체- Insulator



- 플라스틱, 나무, 고무, 세라믹, 유리 등

밴드 갭-Band Gap



- The band gap for insulators is large so very few electrons can jump the gap. Therefore, current does not flow easily in insulators.

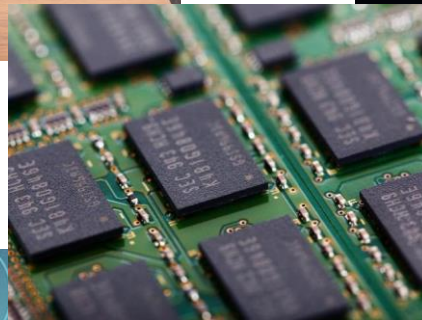
반도체-컴퓨터



컴퓨터



자율주행 자동차



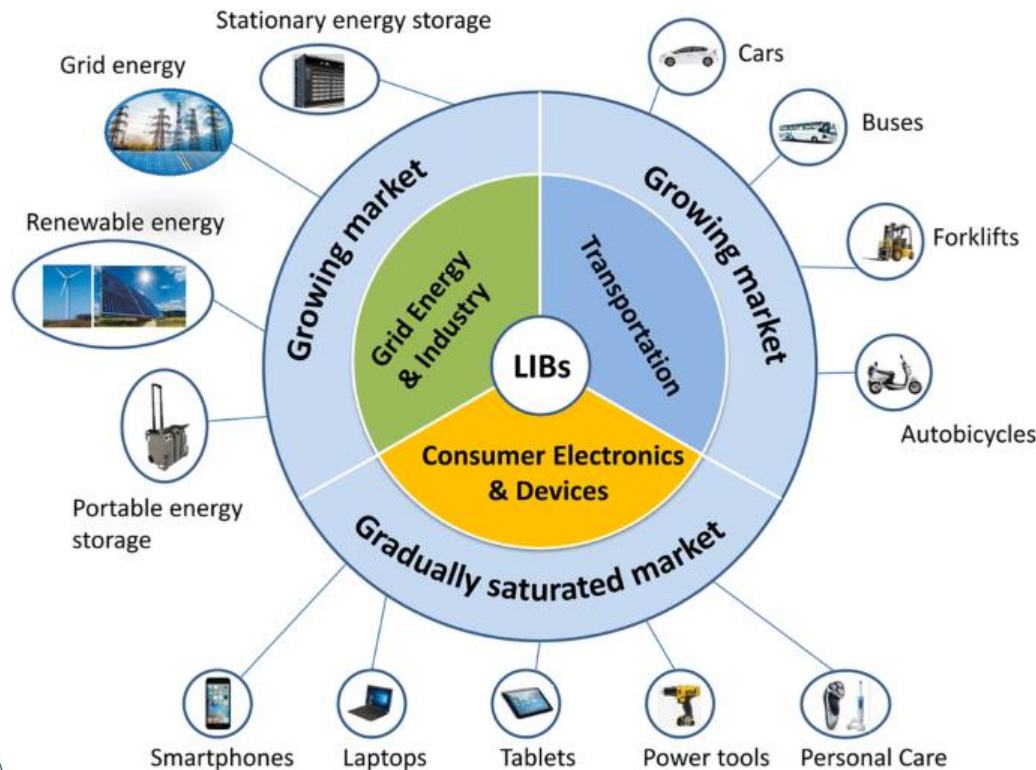
배터리-전기저장



전기저장



직류배터리



전기자동차



초전도란?

초 Super 전도 Conductor

- 저항이 없는 도체. 전기가 엄청나게 흐른다.
- 초전도는 상태(State)를 말한다
- 어느 특정환경이 되면 도체나, 반도체나, 부도체도 초전도 상태에 도달할 수 있다.
- 초전도 상태는 열역학적인 상태변화를 의미한다.
- 예를 들어 물이 얼음으로, 기체가 액체로 변하는 상태변화와 같다

초전도 현상의 발견-카메링 오네스

네덜랜드의 저온 물리학자 오네스는 액체 헬륨을 이용하여 금속의 온도를 측정하던 중에 수은에서 갑자기 저항이 사라지는 현상을 발견하고 초전도 (Superconductivity)라 명명함.



Dutch physicist Heike Kamerlingh Onnes. In 1911 superconductivity was first observed in mercury. Later, in 1913, he won a Nobel Prize in physics for his research in this area.

초전도_Superconductivity

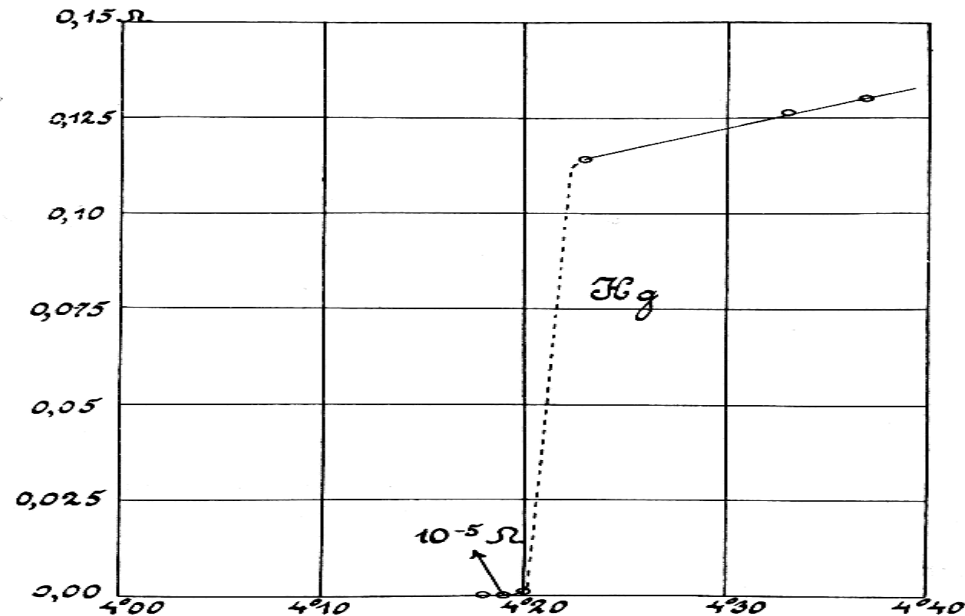
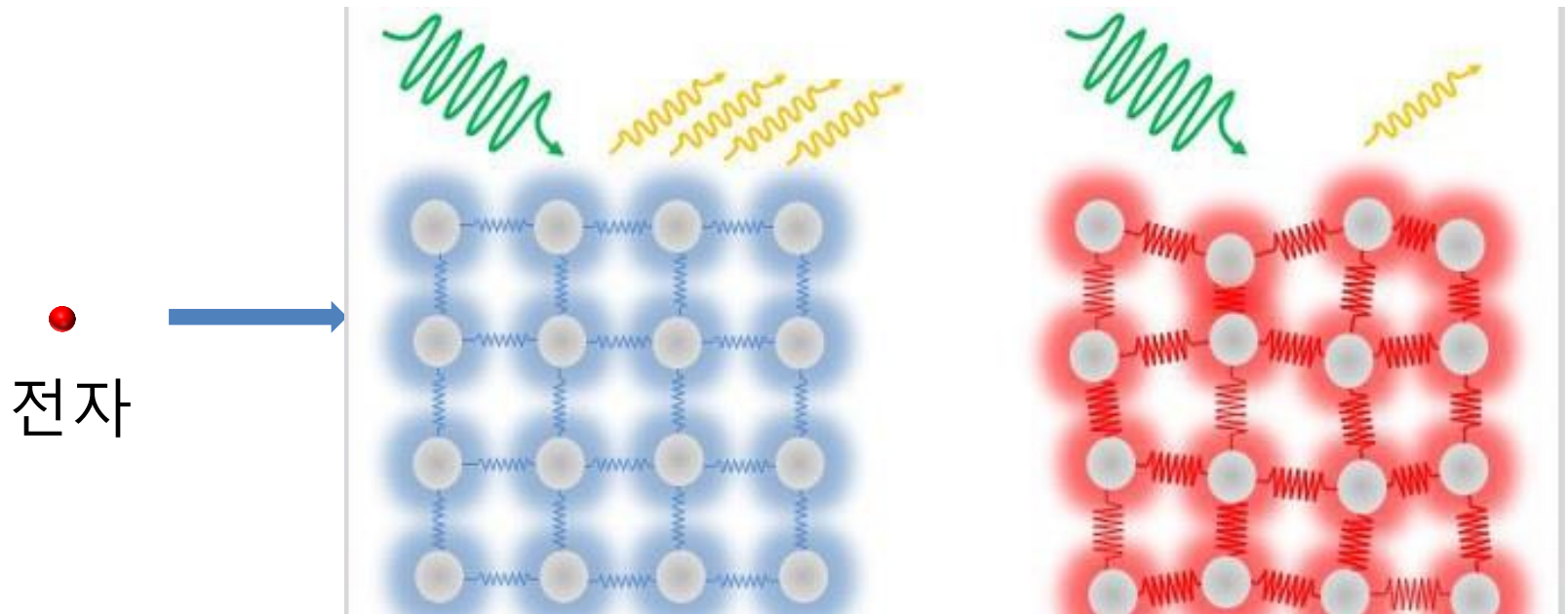


그림. 수은의 온도-저항 곡선

아무도 예상하지 못한 현상. 특정온도에서 수은의 저항이 제로가 되었다. 저항은 진동하는 원자에 전자의 충돌로 발생한다. 온도가 낮지만 원자는 여전히 진동하고 있는데 어떻게 전자가 저항 없이 원자들 사이를 자유롭게 움직일 수 있는가.

저항(Resistivity)이란?

진동(Phonon)하는 원자에 의해 전자(Electron)의 움직임이 방해 받는다



진동하는 원자

저항으로 인해 빛과 열이 발생한다

전자의 운동에너지

$$\frac{1}{2}mv_1^2 \Rightarrow \frac{1}{2}mv_2^2$$



절대온도 0 K가 아니라면 원자들은 진동하고 있다.
전자가 이동할 때 원자들에 충돌한다. 저항 때문에
열이나 빛과 같은 형태로 나타난다.

저항=에너지 손실

저항이 제로인 초전도체

“전기손실 제로와 무한대의 전기송전”



전기를 생산해서 공장이나 주택으로 운송할 때 4-5%의 전기손실이 있게 된다. 대부분의 손실은 도선의 저항에 의한 것이다. 저항이 제로인 초전도체를 전기선으로 사용하면 에너지 손실이 없는 송전이 가능하다.

완전반자성 : 마이스너 효과



Walther Meissner
(1882-1974)

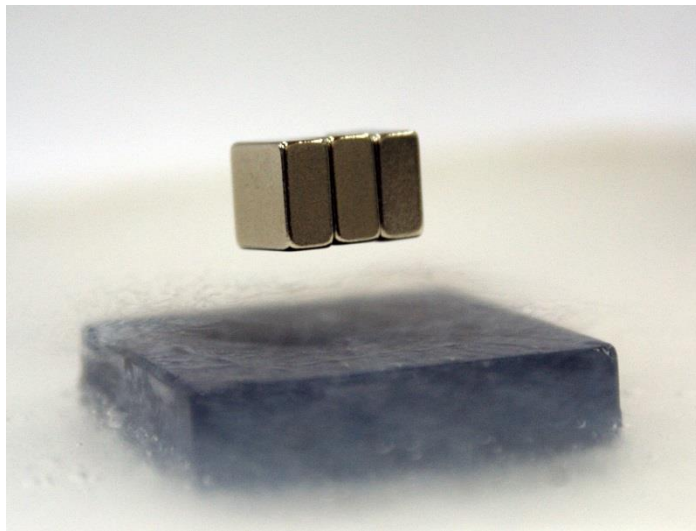


Meissner effect

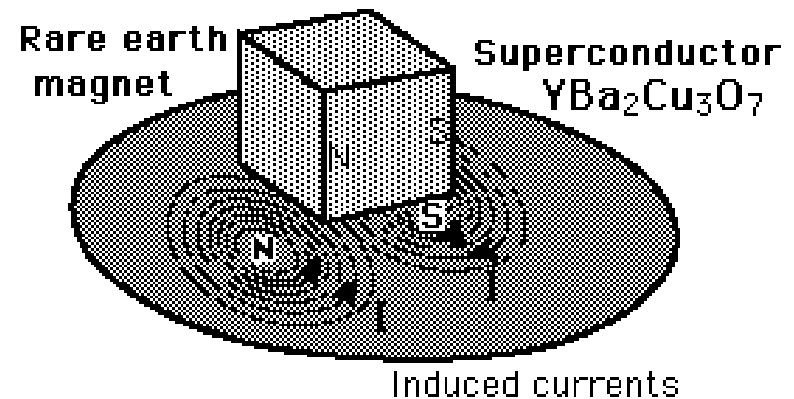
초전도의 완전 반자성 현상은 오네스가 "제로저항"을 발견한 20년 후인 1933년에 독일의 과학자 마이스너(W. Meissner, 1882-1974)와 그의 제자인 옥센펠트(R. Ochsenfeld)의해 처음 발견되었고, 그의 이름을 따라 마이스너 효과라 부른다.

마이스너 효과 - 완전반자성

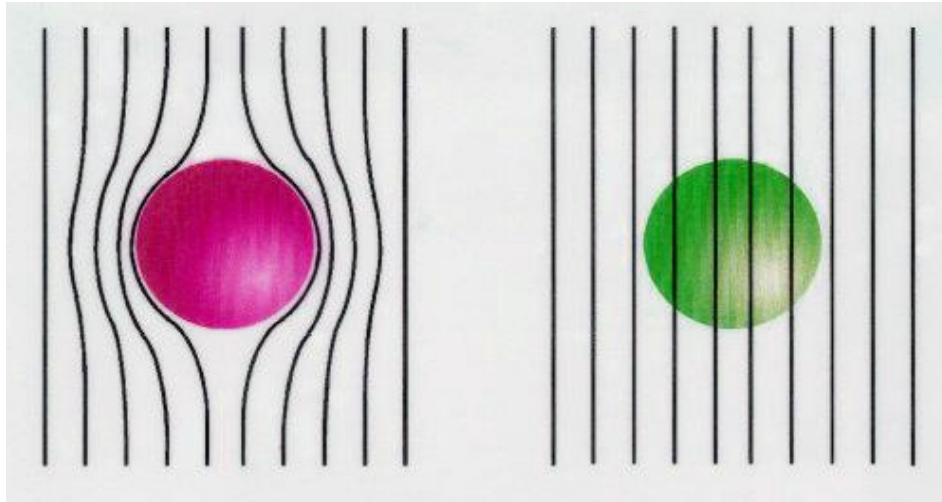
초전도체에 외부 자기장(영구자석)이 다가오면 위해 초전도체에 유도전류(차폐전류라고 부름)가 흐르고, 초전도체에 자기장이 만들어진다. 초전도체는 저항이 없기 때문에 한번 형성된 자장은 사라지지 않고 그대로 유지된다. 초전도체에 형성된 자장과 외부자장이 서로 밀쳐낸다. 그 힘으로 초전도체가 자석 위에서 부상한다.



마이스너 효과



상전도와 초전도 상태



상전도 상태에서는
자기장이 초전도체
안으로 침투한다.

초전도 상태에서는
자기장이 초전도체
안으로 들어가지 못
한다



초전도 상태

정상상태

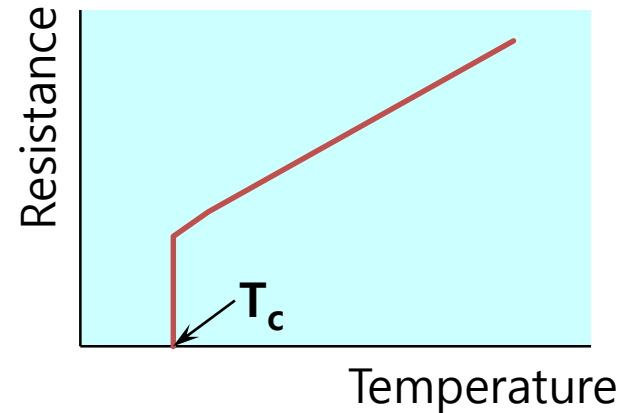
초전도를 대표하는 두 가지 현상

- 저항이 없다

특정온도에서 저항이 사라진다.

100년 전에 네덜란드 과학자

오네스가 발견 - 저온물리의 시작

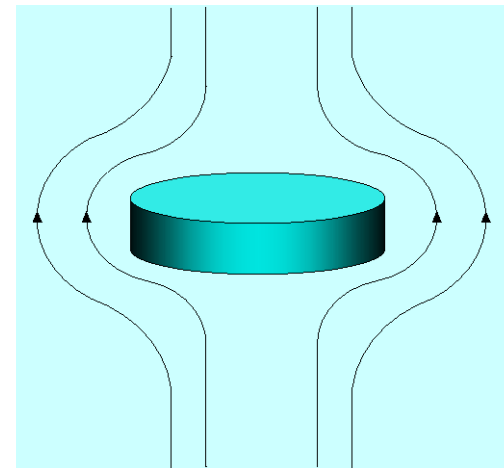


- 완전 반자장: 마이스너 효과

초전도체 내부로 자장이 침투하지

못한다. 완전 반자장으로 인해

초전도체가 자석 위에서 뜬다



바든, 쿠퍼, 슈리퍼(BCS 이론) 초전도 이론



J. Bardeen L. Cooper R. Schrieffer

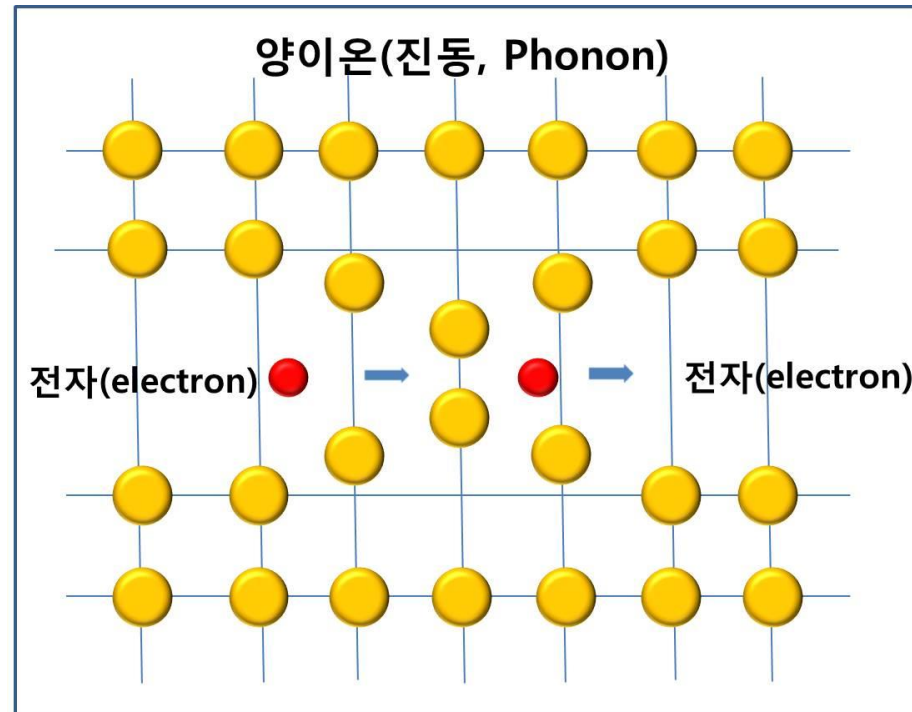
“전자 사이에 작용하는 인력”

교수-박사후-학생

1950년대 초에 미국 일리노이 대학교의 바딘(J. Bardeen, 1908-1991) 교수는 박사후 연구원이었던 쿠퍼(L. Cooper)와 대학원생이었던 슈리퍼(R. Schrieffer)와 함께 초전도 이론에 대한 연구를 진행하고 있었다. 바딘교수는 1956년에 트랜지스터 반도체 연구로 노벨상을 수상한 바가 있는 전자의 움직임에 정통한 물리학자였다.

“200년 전에 완성된 전자기 기본원칙인 쿨롱의 법칙에서는 기본적으로 부호가 같은 전자-전자나 양전하-양전하는 서로 밀쳐내고, 양전하-전자와 같이 다른 전하를 가지는 입자들은 서로 끌어당긴다. 그런데 부호가 같은 전자나 양전자가 서로 잡아 당길 수는 없을까?”

쌍(Pair)를 이루는 전자들



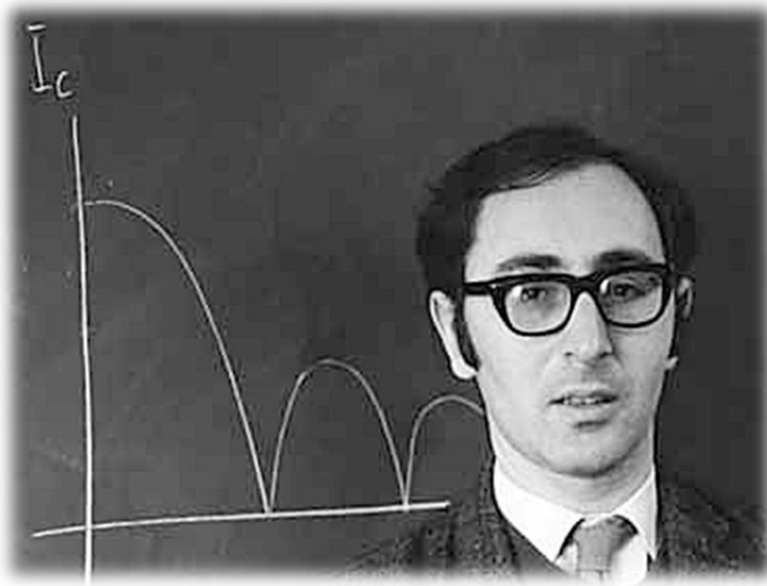
쿠퍼는 같은 전하를 갖는 전자들이 서로 잡아당길 수 있다면 전자들이 쌍(Pair)을 이루어 저항 없이 움직일 수 있는 수학적 모델을 제안했다 (이 전자쌍을 쿠퍼가 제안했다고 하여 Cooper pair라 한다)

BCS 무도회장



[BCS 무도회장입니다. 춤을 추는 데 바닥에 발이 걸리지는 않나요? 그러면 저항이 없이 춤을 출 수 있겠네요. 여기는 벌써 짝이 채워졌네요. 음악에 맞추어 즐겁게 춤을 추고 있는 상대방이 정말 자신의 짝이 맞는 지 확인 해 보세요. 자, 다 함께 BCS 춤을 춥시다. 춤을 추며 이동하면서 자신의 짝이 잘 따라올 수 있도록 무도회장 바닥을 반짝반짝 잘 닦아 주시기 바랍니다]

캠브리지 대학원생 조셉슨



B. D. Josephson

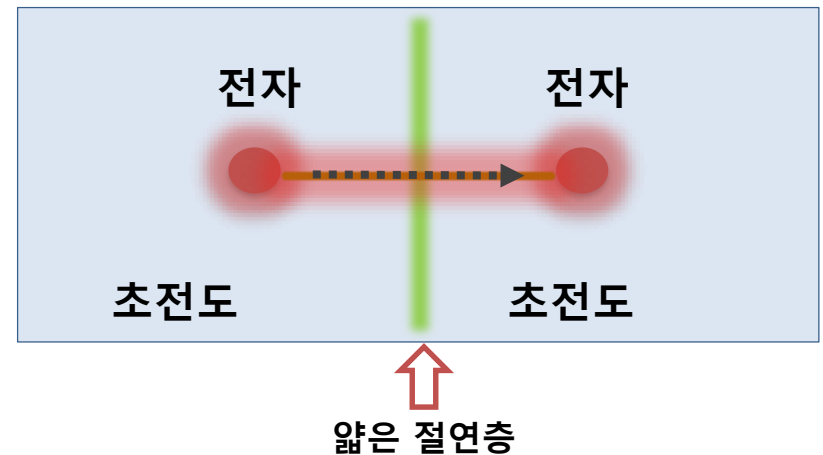
1960년대 초반 영국 케임브리지(Cambridge) 대학의 젊은 대학원생인 조셉슨은 고체에서의 전자의 이동에 대한 연구로 논문 실험을 하고 있었다. 그의 연구 주제는 두 초전도체 사이에 얇은 절연층이 있을 때의 초전도 쿠퍼쌍의 움직임이었다. 그는 실험을 통해 한쪽의 초전도층 전자가 절연층을 통과해서 다른 초전도층으로 이동(터널링, Tunneling)할 수 있다고 생각했다.

조셉슨 터널링(Tunneling)

고전역학에서는 입자가 장벽을 뚫고 지나갈 수 없다. 하지만 양자의 세계에서는 입자가 파동의 성질을 가지기 때문에 입자가 장벽을 뚫고 갈 확률이 있다. 두 개의 초전도 물질 사이에 일반금속이나 완전히 절연체인 물질이 있는 조셉슨 접합(Josephson junction)에서 장벽을 가로질러 전류가 흐른다.

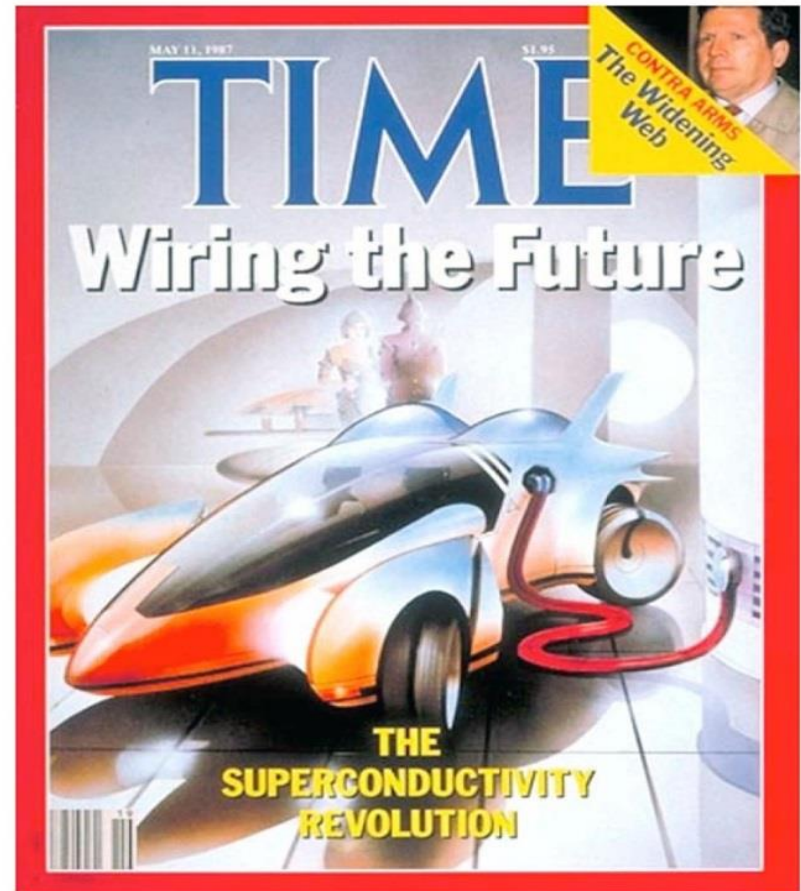


조셉슨 터널링



고온 초전도체의 발견, 초전도 혁명

타임지는 "초전도 기술"을 올해 인류의 생활을 바꾸어 줄 10대 미래기술 중 하나로 선정했다. 미국과 일본 등 선진국들은 초전도기술이 21세기의 에너지, 정보통신, 의료, 교통, 환경 등의 분야에서 혁신적인 기술을 창출해 낼 수 있을 것으로 예상했다.



Cover Page, Time Magazine (May 11, 1987)

초전도의 역사

노벨상을 받은 연도

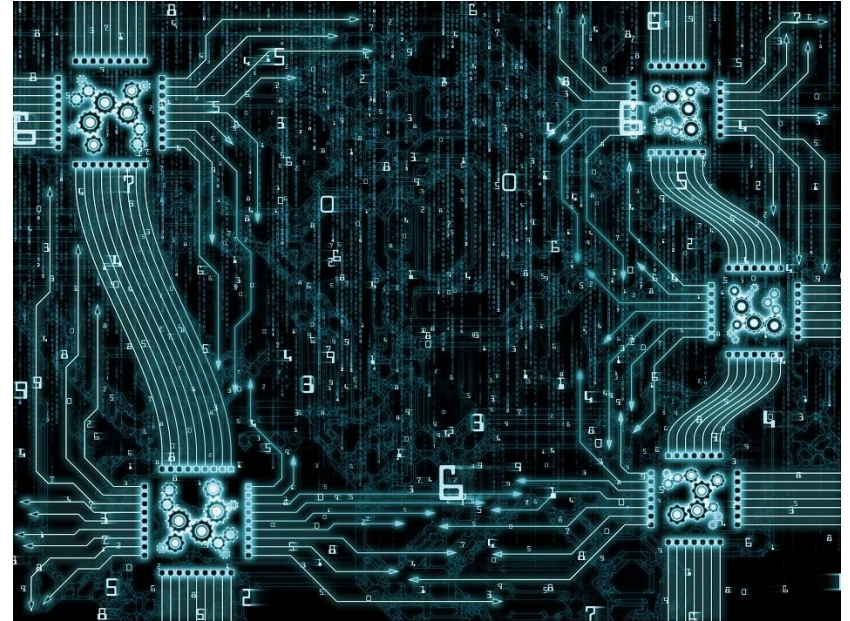
- 1908 H. Kermmerlingh Onnes (네덜란드) – 헬륨의 액화 성공 1913
- 1911 4.2 K, 수은(Hg)에서 초전도성 발견
- 1933 Meissner & Oschenfeld – 완전반자성 발견
- 1957 BCS theory – 초전도 현상을 설명 1972
- 1957 Abrikosov – 타입 2 초전도체 예견 2003
- 1962 Josephson 효과 1973
- 1986 Bednorz, Muller – 산화물 고온 초전도체 합성 1987
- 2001 MgB_2 (39K) 금속화합물 초전도체 합성

초전도체 어디에 사용되나?

저항이 없는 디바이스- 슈퍼 컴퓨터



열이 발생

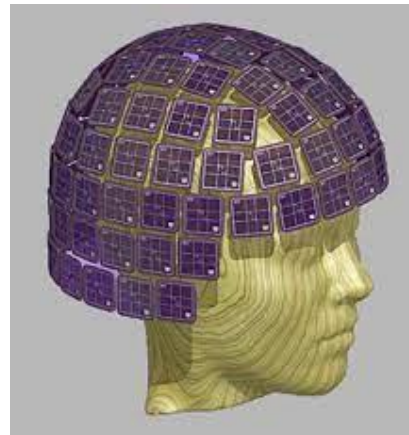


나노 테크놀로지

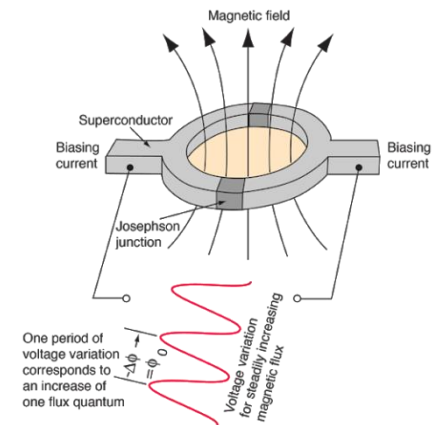
- 컴퓨터를 장시간 사용하면 저항에 의한 열이 발생
- 초전도는 저항이 없으므로 열이 발생하지 않음
- 회로에 많은 정보를 집적할 수 있다.

심장이나 뇌에 발생하는 전자기 검출 센서 -SQUID

MEG : MagnetoEncephaloGraphy



SQUID sensor

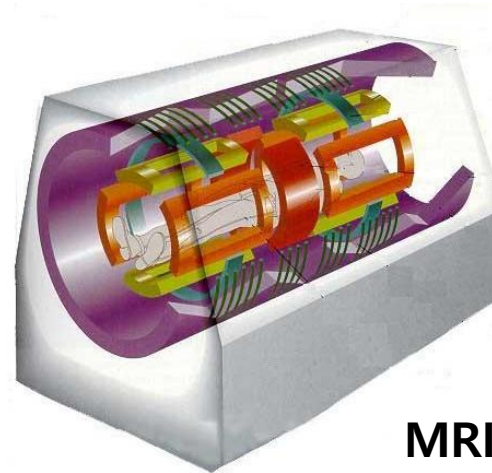


- 인체에는 전기가 흐른다.
- 심장이나 뇌 발작을 자기력 검출로 진단하는 장치

MRI : 의료기기

초전도 선을 감아서 자석을 만든다. 자석의 강한 자장을 인체에 가하면 인체의 수분 중의 수소가 자장에 반응한다. 이 현상을 핵자기공명이라고 한다. 공명으로 나온 시그날을 받아 화상을 만든다.

Magnetic Resonance Image, MRI

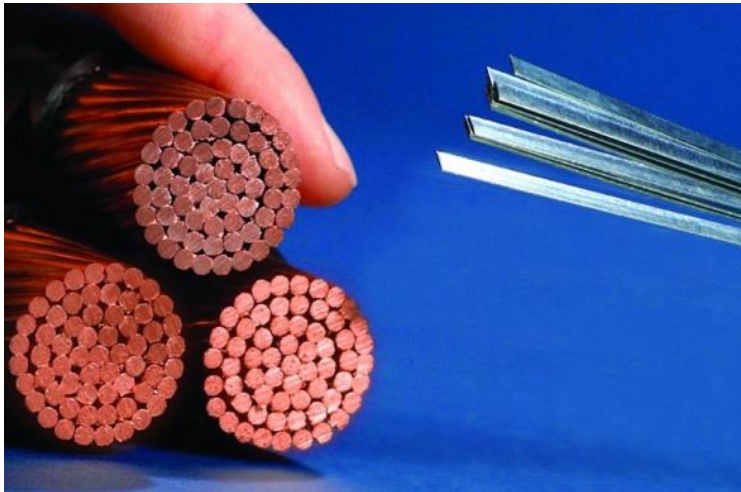


MRI 초전도 자석

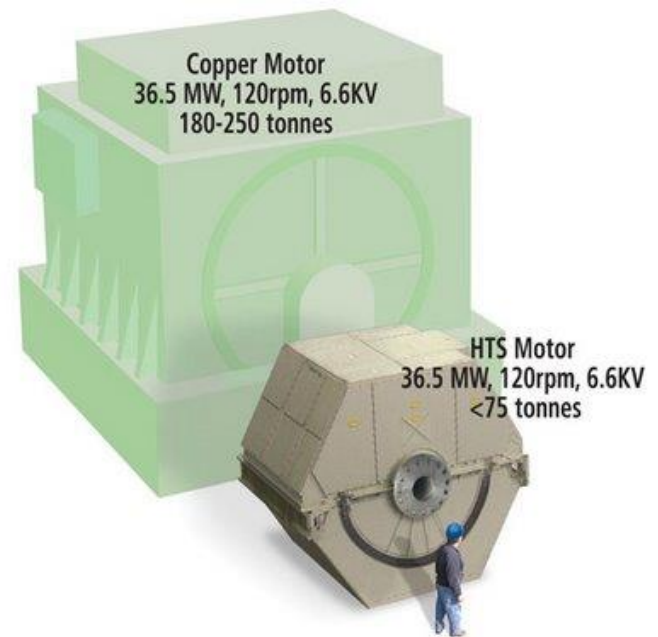
기기의 부피를 줄인다

전력기기(모터, 발전기, 송전선, 한류기 등)

Current density of
Copper Wire: 5-10 A/mm²
Superconductor Wire: >200 A/mm²



구리선과 초전도선의 크기 비교

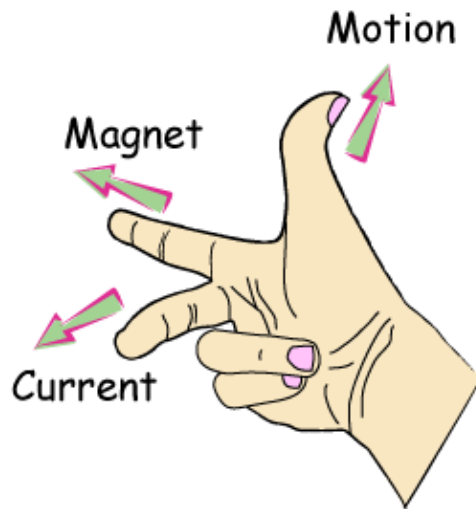


초전도 모터

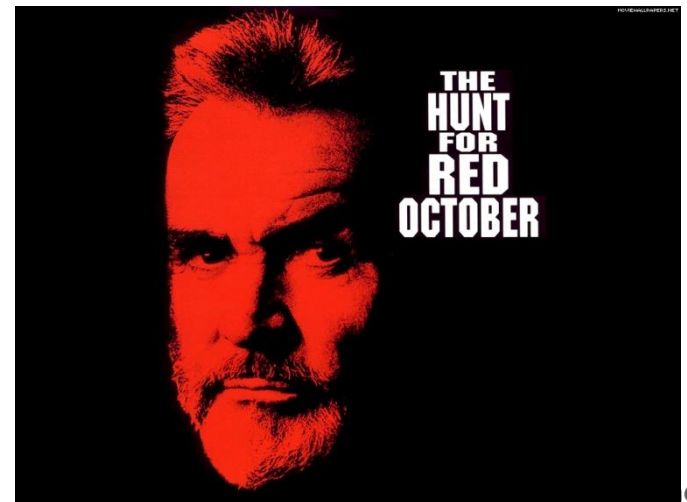
소리가 나지 않고 움직이는 잠수함

소리가 나지 않아 레이더에 잡히지 않은 잠수함. 초전도 원리로 배를 움직이면 소리가 나지 않는다.

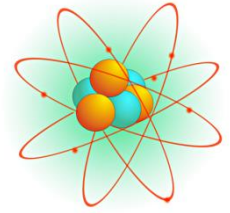
Noiseless, not detected by radar



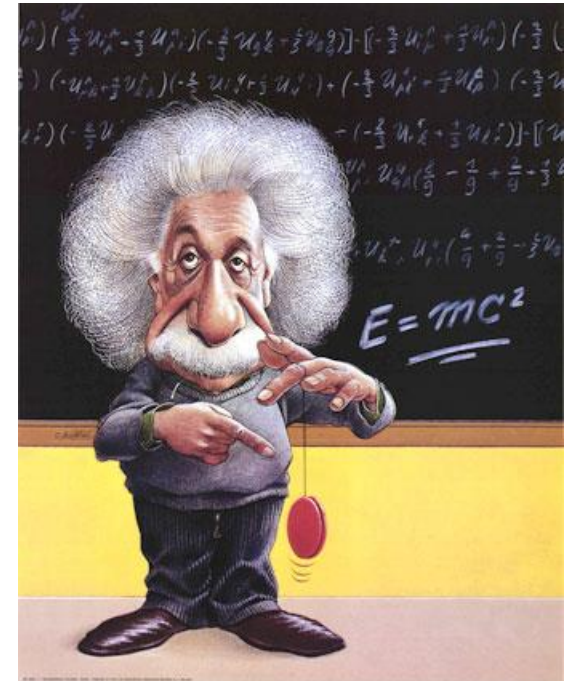
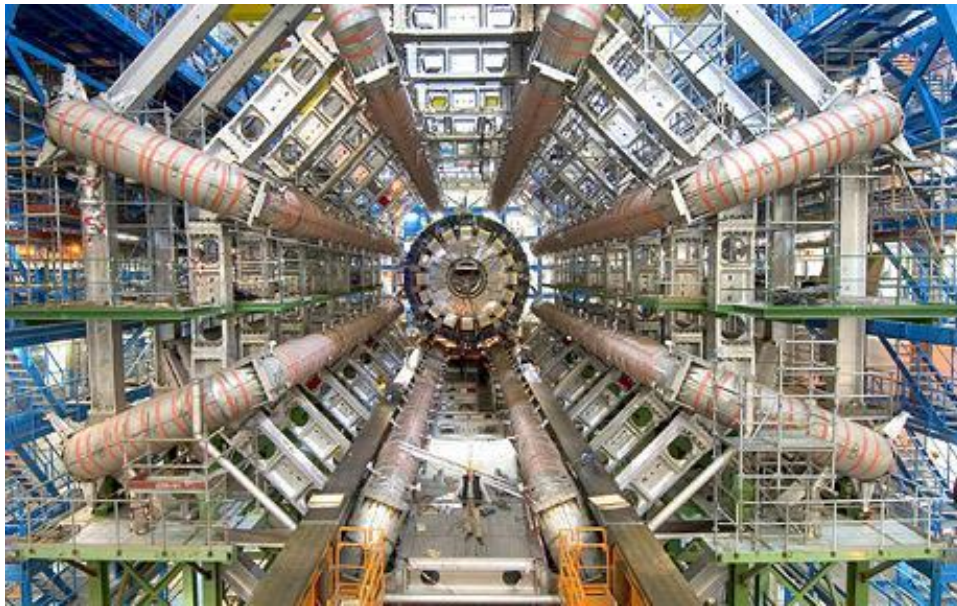
전기-자기-힘 법칙



입자가속기: 소립자 연구



강력한 초전도자석을 만들어 자장 속에서 입자를 가속시킨다. 가속기를 이용해서 물질을 구성하고 있는 소립자의 존재를 확인한다.



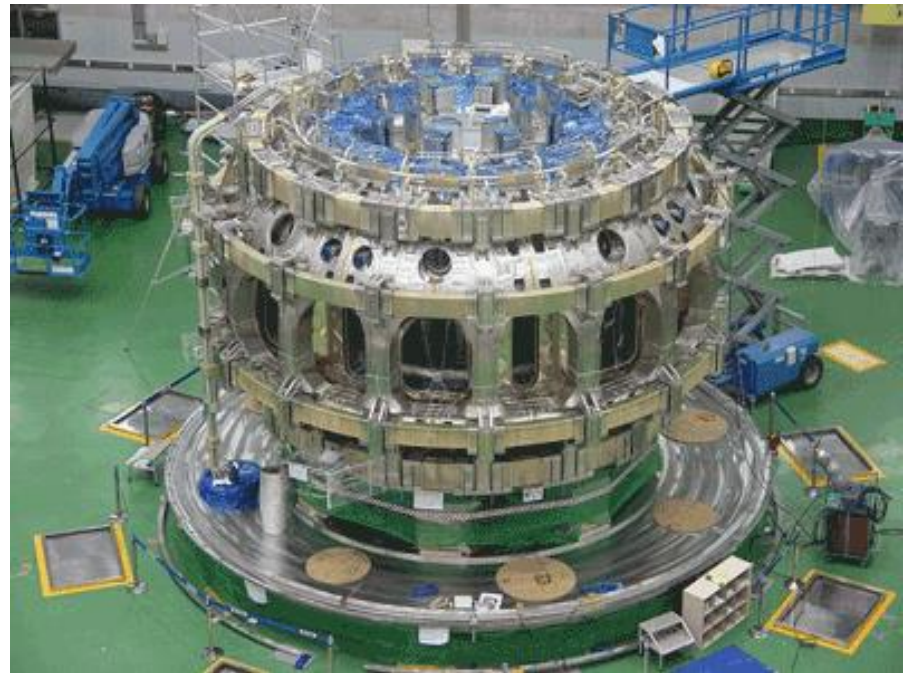
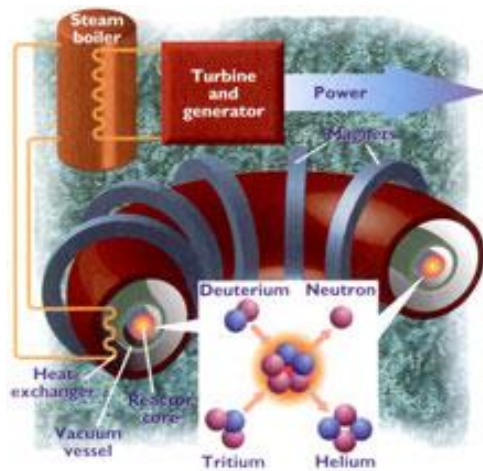
초전도 입자 가속기

핵융합: 인공태양 에너지



태양이 에너지를 만드는 원리로 전기를 만드는 장치. 두 수소원자가 결합하여 헬륨을 만든다. 이 때 융합에 의해 열이 발생한다. 이 열을 플라즈마 형태로 가두어 두려면 초전도 자석의 강자장이 필요하다. 이 원리를 이용해 열을 생성하는 장치를 만든다.

핵융합 장치



초전도 케이블(전선)



초전도 선에 흘릴 수 있는 전류량은 구리의 수 백배이다. 거대한 빌딩이 전기를 공급하려면 수 많은 전류 케이블이 필요하다. 이 구리선들을 작은 굵기의 초전도 선 하나로 대체할 수 있다.



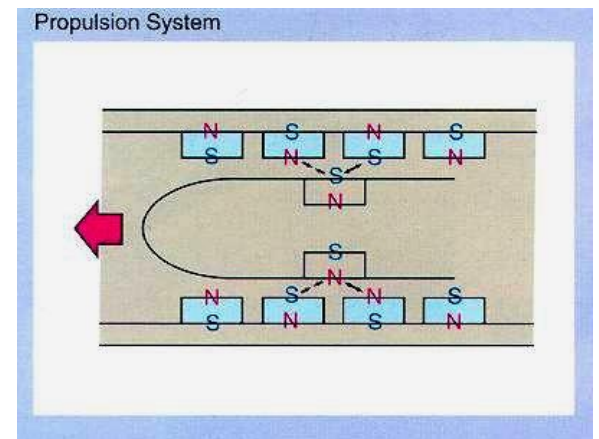
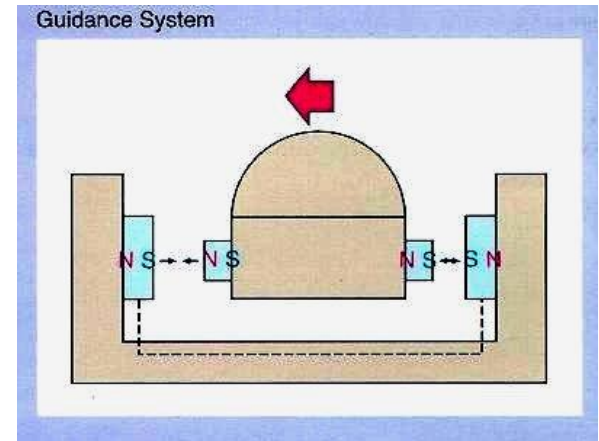
초전도 자기부상열차

600 Km/h

공중에 떠서 달린다. 안락하다. 빠르다. 전자석을 사용하는 열차(중국, 독일)와 초전도 자석(일본)을 사용하는 열차가 있다. 열차 내에 초전도 자석이, 레일에 전자석이 위치한다.

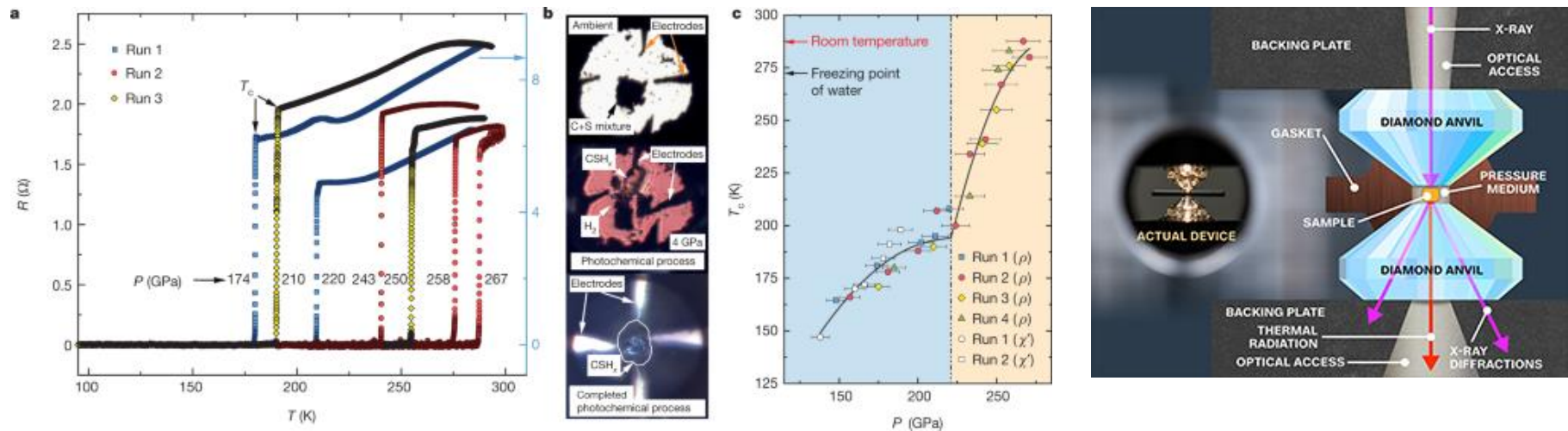


자기부상열차



2020 상온 초전도체 – 수소 화합물

Room-temperature superconductivity in a carbonaceous sulfur hydride



- 초고압을 가하면 상온에서 초전도 현상이...