

Review of the history of superconductivity

Chan-Joong Kim^{a, b, *}

^a Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Korea

^b Superconductor Magnetic Levitation Technology, Ltd., Daejeon, Korea

(Received 13 December 2024; revised or reviewed 20 December 2024; accepted 21 December 2024)

Abstract

It has been over 100 years since Dutch physicist Onnes discovered the phenomenon of superconductivity. About 20 years after the discovery of zero resistance, German physicist Meissner discovered another property of superconductivity, perfect diamagnetism. Zero resistance can bring about revolutionary changes in the transportation and management of electricity, and perfect diamagnetism can be used in magnetic levitation trains, contactless bearings, and magnetic shielding, etc. In 1937, Type II superconductor with high magnetic limits was discovered. The Type II of superconductors led to the industrialization of medical Magnetic resonance image (MRI) and high-magnetic field magnets. In 1960, the tunneling phenomenon, in which electrons move from one conducting layer to the opposite conducting layer through a thin insulating layer in superconductors and semiconductors, was observed and its mechanism was theoretically established by Josephson. Superconducting quantum interference device (SQUID) sensors that utilize the tunneling phenomenon at the Josephson junction are used in a wide range of fields, including medical and geomagnetic detection, and their scope of use is expanding to Quantum computers. In 1986, a high-temperature (T_c) oxide superconductor whose T_c exceeded the superconducting temperature limit of the BSC theory was discovered. Physicists are also making efforts to elucidate the high-temperature superconductivity phenomenon, which is difficult to explain with the BCS theory based on the interaction of phonon vibration and electrons. If a room-temperature superconductor is discovered through exploration on new superconducting materials, the future human life and industry will be innovatively changed by the superconducting technology.

Keywords: superconductivity, zero resistance, perfect diamagnetism, persistence current, critical current field, josephson tunneling, high- T_c superconductor

1. 제로저항(Zero resistance)

초전도(Superconductivity) 현상의 두 가지 특성은 저항이 없는 제로저항(Zero resistance) [1]과 자기장을 반발하는 완전반자성(Perfect diamagnetism)이다 [2]. 초전도 상태에서는 전기가 저항 없이 흐른다. 저항은 전기(에너지)의 손실을 의미한다. 저항이 있는 구리 같은 금속 도체는 저항에 의해 에너지의 일부를 잃는다. 저항 때문에 발전소에서 생산된 전기에너지의 4-5%가 주택이나 공장으로 운송 중 손실된다. 금속인 합금 도체를 저항이 없는 초전도체로 바꾸면 에너지 손실을 줄일 수 있다. 초전도 현상의 제로저항은 모터, 발전기, 전력케이블, 한류기, 변압기 등에 활용된다 [3].

저항 없이 전기가 흐르는 초전도 현상은 네덜란드 라이던 대학의 물리학자 오네스(Heike Kamerlingh Onnes)가 처음 발견했다[1]. 온도에 대한 연구를 하고 있던 오네스는 가장 낮은 온도에서 액화될 것으로 예상되는 헬륨(He)을 연구 대상 물질로 설정했다. 그의 연구팀은 1908년 7월 10일에 헬륨의 액화(4.2K, 섭씨 -269.1도)에 성공했다. 4.2 K은 인간이 얻을 수 있는 가장 낮은 온도였다 [4, 5].

극저온을 얻게 된 연구팀은 온도에 대한 금속의 전기저항의 변화를 측정하는 실험을 진행했다. 액체헬륨을 사용해서 액체 수은(Hg)을 유(U) 자 관에 넣어서 양 끝에 전선을 붙여서

온도를 내리면서 수은의 저항을 측정했다 [1, 5]. 온도가 내려가면서 수은은 고체상태가 되었고, 수은의 저항은 계속 감소했다. 연구자들은 수은에 대한 실험에서 다른 금속에서 볼 수 없는 특별한 현상을 발견했다. 일반적으로 금속들은 온도가 내려가면 저항이 서서히 감소하다가 일정한 값을 갖거나 절대온도 0K 근처에서 제로로 수렴되었는데, 수은의 전기저항은 절대온도 0K가 되기 전인 4.2K에서 제로가 되었다(Fig. 1).

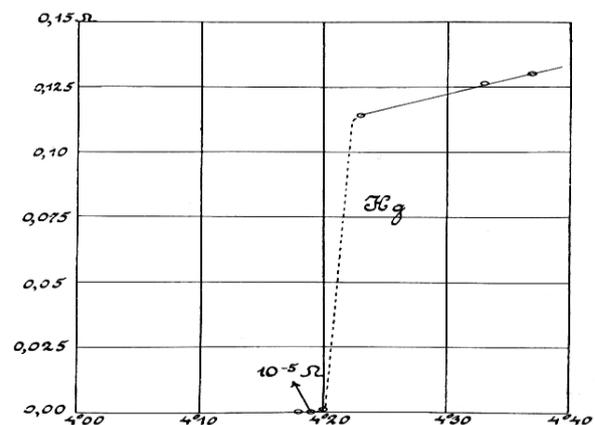


Fig. 1. Temperature-resistance curve of Hg [1].

*Corresponding authors: chanjkim@naver.com

오네스는 헬륨 가스의 액화를 통해 인류가 만들 수 있는 가장 낮은 온도를 만든 업적과 극저온에서 금속의 전기적 성질을 연구한 결과로 1913년에 노벨 물리학상을 받았다. 제로저항은 당시의 물리학 지식으로는 설명이 불가능한 현상이었다. 특정온도에서 저항이 제로가 현상은 초전도(Superconductivity)라고 명명되었다. 이후 추가적인 실험에서 다른 원소에서도 초전도 현상이 발견되었다 [6].

2. 영구전류(Persistent current)

오네스는 저항제로라는 특별한 현상이 에너지 산업을 혁신적으로 바꿀 것이라고 기대했다. 그는 저항이 없는 초전도선(Superconducting wire)으로 만든 폐쇄형(Closed) 회로에 전기를 흘리는 실험을 수행하여 전기손실이 제로가 됨을 확인하고자 했다. 이는 초전도선에 영원히 전기가 흐를 수 있음을 증명하는 실험으로, 1914년에 진행되었다 [7]. 오네스는 납으로 고리 모양의 전기회로를 만들어서 외부에서 자기장을 가해서 납 선에 유도전류가 흐르도록 했다. 외부에서 자기장 변화가 있으면 그것으로 인해 도선에 전류가 유도되는 패러데이(Michael Faraday, 1791 - 1867, 영국의 과학자)의 전자기 유도법칙 [8]을 이용한 실험이었다. 오네스는 납 회로를 액체 헬륨으로 냉각한 다음에 외부에서 회로에 자기장을 가했다. 보통의 도체에서는 전기저항 때문에 1초 정도의 짧은 시간이면 자기장에 의해 유도된 전류가 사라진다.

반면 저항이 없는 초전도 물질로 만든 선에는 유도된 전기가 계속해서 흐를 수 있다. 그는 실험을 통해 초전도선에 유도된 전류가 24 시간 동안 감소하지 않고 흐르는 것을 확인했다. 영구전류를 확인하는 방법은 간단하다. 외부 자기장 변화에 의해 유도된 전기가 도선에 흐르면 이 유도전류에 의해 자기장이 발생하므로 이 자기장이 지속되는 지를 확인하면 된다. 자기장 발생을 확인하고자 회로의 밖에 나침반이 설치되었다. 초전도 상태에 있는 납 선에 자기장 변화로 전류가 유도되었고, 이 유도전류에 의한 자기장으로 인하여 남북을 가리키던 나침반이 동서로 흔들렸다. 이로써 손실제로 초전도 회로(Fig. 2)가 검증되었다 [5].

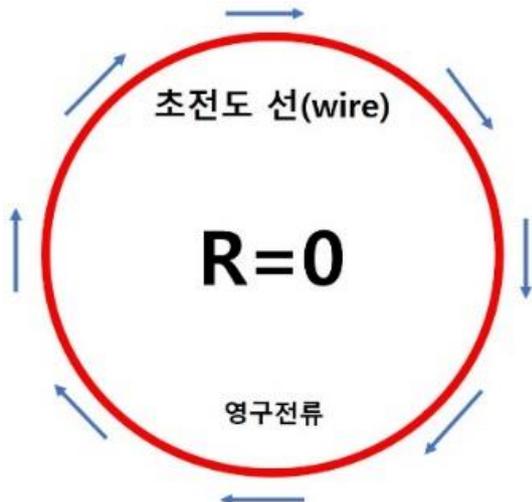


Fig. 2. Persistence current loop.

3. 거대전류(Large current)

전기손실제로 실험의 다음 순서는 무한대의 전기송전을 기대한 실험이었다. 초전도체에 얼마나 많은 전류를 흘릴 수 있는지를 알고자 초전도 물질로 도선을 만들어 전기를 흘려 보았다. 이것이 실현된다면 초전도 기술로부터 엄청난 에너지를 얻을 수 있다. 초전도선을 사용하여 전기를 운송하면 저항으로 인해 발생하는 에너지 손실을 줄일 수 있고, 이는 천문학적인 경제적 이득으로 연결된다. 또한, 구리선을 사용하는 전동기나 발전기, 자석 같은 에너지 기기들을 초전도선으로 제작한다면 기기의 에너지 효율을 높일 수 있다. 초전도선에는 일반 도체보다 전기가 많이 흐르기 때문에 기기를 제작할 때 도선의 길이를 획기적으로 줄일 수 있다. 이는 기기의 소형화를 의미한다. 이런 기대감 속에서 초전도선에 전기량을 증가시키면서 전류를 흘리는 실험을 진행했다.

오네스는 지금까지 누구도 달성하지 못했던 10만 가우스(Gauss) (10 테스라(Tesla), 1 테스라는 만 가우스)의 거대 자기장을 초전도 코일에서 발생시킬 수 있기를 희망했다. 하지만 무한송전 실험에서 오네스는 기대한 만큼의 결과를 얻지 못했다. 초전도선에는 무한의 전기가 흐르지 않았고, 어느 한계 이상의 전기량에서 초전도 현상이 사라졌다. 초전도체에 저항이 발생해서 일반 도선과 유사한 상전도 상태가 되었다.

4. 자기한계(Critical magnetic field)

도체에 전기가 흐르면 전류에 의해 자기장(Magnetic field)이 형성되고, 이 자기장은 저항처럼 작용하여 초전도 전류흐름을 방해한다. 도선에 인가되는 전기량이 크면 도체에 유도되는 자기장도 비례적으로 커져서 어떤 한계 자기장 이상에서는 더 이상 초전도 전류가 흐르지 못한다. 초전도선 전류인가 실험에서도 이런 이유로 초전도선에 전기가 많이 흐르지 못했다. 결국, 그가 기대한 에너지 손실이 없는 장거리 송전이나 코일형태의 강한 자석을 만들 수는 없었다.

초전도체에 흘릴 수 있는 전기량이 주변 자기장에 대해 민감하다는 것을 알게 된 오네스는 초전도 전류 흐름이 자기장에 대해 어떻게 변하는지를 알고자 자기장을 변화시키면서 초전도선에 전류를 흘려 보았다. 실험을 반복하면서 어떤 특정 자기장 이상에서는 초전도 전류가 더 이상 흐르지 않는 것을 발견했다.

초전도체의 상태는 저항이 제로인 초전도 상태와 저항이 있는 상전도 상태로 나누어진다. 저항이 제로인 상태를 초전도 상태(Superconducting state)라 하고 저항이 있는 상태를 정상상태(Normal state)라고 한다(Fig. 3 참조). 초전도 상태가 깨지고 저항이 있는 상전도 상태가 되게 하는 자기장을

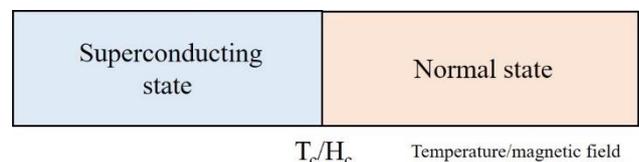


Fig. 3. Phase diagram of Type I superconductors.

임계자기장(Critical magnetic field, H_c)라 한다. 실험에 사용된 금속물질 초전도체의 H_c 는 수 백 가우스(막대자석의 자기장 수준)으로 매우 작았다 [9]. 요약하면, 초전도체는 T_c 와 H_c 이하에서만 저항이 제로이고, 그 이상에서는 일반 도체와 같이 저항이 발생한다.

5. 완전반자성(Perfect diamagnetism)

완전반자성은 제로저항과 더불어 초전도 현상을 대표하는 성질이다. 초전도체의 완전반자성 현상은 오네스가 저항제로 발견한 20년 후인 1933년에 독일의 물리학자 마이스너(F. W. Meissner, 1882-1974)와 그의 제자인 옥센펠트(R. Ochsenfeld)에 의해 처음 발견되었다 [2]. 이 현상을 그의 이름을 따라 “마이스너 효과(Meissner effect)”라 부른다.

마이스너와 옥센펠트는 고순도의 금속 단결정을 만들어 초전도 상태에서의 자기장 변화 연구하고 있었다. 두 사람은 냉각용기에 액체헬륨을 채우고 초전도 물질인 납(Pb) 또는 니오비움(Nb)로 만든 접시를 넣어 냉각했다. 그리고 그 위에 페라이트(Ferrite)로 만든 가벼운 영구자석을 놓았다. 자석은 접시의 바닥에 닿지 않고 접시 위 임의의 공간에 떠다. 납 접시를 극저온인 액체 헬륨에 넣으면 납의 온도가 떨어져서 납 접시는 저항이 없는 초전도 상태가 된다. 초전도 상태가 된 납 접시는 페라이트 영구자석의 자력을 반발하므로 영구자석이 납 접시 위에 뜨게 된다. 초전도체인 납 접시는 영구자석에서 나오는 자기력선을 통과시키지 않고 밖으로 밀어낸다. 초전도 상태의 물체(납 접시)에 자기장이 통과하지 못하고 배척하는 이유는 납 접시가 초전도 상태에 도달하면 자기장을 완전히 밀쳐내는 완전반자성 상태가 되기 때문이다(Fig. 4).

초전도 상태에서 초전도체 내부에 자기장이 남아 있는지, 자기장이 제로인지는 시편의 자기장을 측정하면 쉽게 알 수 있는데도 불구하고 마이스너가 초전도체의 완전반자성을 알아내기까지 오네스의 저항제로로부터 20년의 긴 시간이 걸렸다. 초전도 현상을 최초로 발견한 오네스의 라이던 대학에서 마이스너의 실험과 유사한 실험이 여러 번 진행되었지만 그때마다 초전도체에 자기장이 조금 남아 있는 결과가 얻어졌었다. 오네스의 연구팀은 초전도 현상이 저항이 제로이라는 점에만 집중하고 있었기 때문이었고, 또한 그 당시

연구팀이 제작한 시료는 마이스너가 제조한 단결정 시료에 비해서 불순물이 상대적으로 많았기 때문이다.

6. 완전도체(Perfect conductor)와의 차이

저항이 제로인 금속이 있다고 생각해 보자. 이런 도체를 완전도체(Perfect conductor)라고 부른다. 완전도체에 외부에서 자기장을 걸어주면 렌츠(Heinrich Friedrich Emil Lenz, 1804-1865, 러시아의 과학자)의 법칙에 의해 도체에 전류가 유도된다 [10]. 이 유도전류는 도선의 표면에서 자속의 변화를 방해하는 방향으로 흐르며, 외부 자기장과 크기는 같고 방향이 반대인 자기장을 만든다. 도선에 유도된 자기장은 외부의 자기장이 도체 내부로 침투하지 못하게 한다. 따라서 완전도체는 외부자기장을 반발하는 힘을 갖는다. 일반 도체에는 자기장이 생기더라도 저항 때문에 곧 소멸한다.

렌츠의 법칙을 저항이 제로인 초전도체에 적용해 보자. 초전도체에 외부 자기장(영구자석)이 다가오면 그 자기장을 상쇄하기 위해 초전도체에 유도전류 (차폐전류(Shielding current)라고 부름)가 생기고, 유도전류에 의해 초전도체에 자기장이 생긴다. 일반 도체에 생성된 자기장은 자체 저항 때문에 시간이 지나면 소멸되지만, 저항이 없는 초전도체에서는 한번 형성된 자기장은 소멸되지 않고 그대로 유지된다. 초전도체에 형성된 이 자기장이 외부 자기장(영구자석이나 전자석의 자기장)을 밀어낸다. 즉 마이스너 효과는 초전도체에 유도된 자기장이 외부 자기장을 반발하기 때문에 생기는 현상이다. 여기까지는 초전도체와 완전도체가 동일하다.

완전도체는 저항이 제로인 도체다. 완전도체는 실제로 존재하지 않는 가상의 도체로 저항제로의 초전도 현상을 설명하기 위해 도입된 개념이다. 완전도체와 초전도체는 둘 다 저항이 제로인 관점에서는 같다. 그런데 도체 내부에 자기장이 이미 있는 경우라면 상황은 달라진다.

도체 내부에 이미 자기장이 존재하는 경우를 생각해 보자. 도체에 자기장을 넣은 다음에 완전도체 상태로 만들어 주면 도체에 들어간 자기장은 외부로 빠져나오지 않고 내부에 그대로 있게 된다. 즉, 완전도체 상태에서 도체 내부에 이미 자기장이 침투해 있는 경우, 내부 자기장 값은 보존된다(일정하다고 표현. 처음에 있던 자기장이 그대로 남아있다). 반면에 초전도체에서는 내부에 존재해 있는 자기장이라도 초전도 상태가 되면 초전도체 밖으로 밀려난다. 따라서 초전도체 내부의 자기장은 제로가 된다. 완전도체는 전기저항만이 제로인 반면 초전도체는 저항제로와 자속제로(완전반자성)을 동시에 갖는다. 따라서 초전도 현상의 완전반자성은 외부에서 인가된 전류에 의해 발생하는 유도 자기장만으로 설명하기 어려운 초전도 고유의 성질이라 할 수 있다.

7. 2종 초전도체(Type II superconductor)

초전도체는 1종과 2종으로 나누어진다. 1종 초전도체는 주로 한가지 원소인 경우가 많아 단원소 초전도체(예: Hg)라고 하고, 2종 초전도체는 여러 원소의 조합으로 구성된 합금형

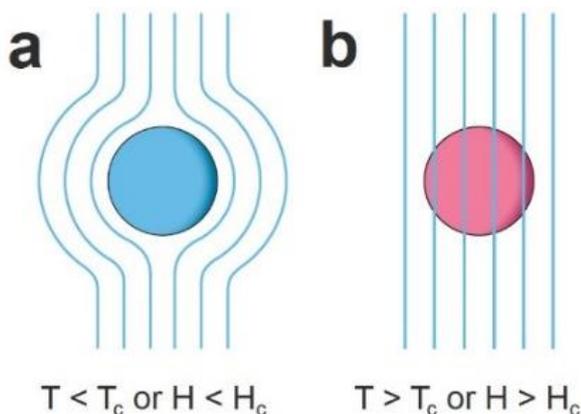


Fig. 4. Magnetic field distribution of (a) superconducting state and (b) normal state of Type I superconductors.

초전도체(예: Nb-Ti, 고온초전도체)다. 초전도체를 1종과 2종으로 구분하는 이유는 두 종류가 초전도 상태에서 상전도 상태로의 변환되는 경로가 다르기 때문이다. 또한 초전도체에 흐르는 전기량이나 자기장 한계도 다르다. 1종은 네덜란드의 오네스가 발견한 수은과 같은 금속 물질이다. 1종 초전도체의 상태변화는 단순하다. T_c 와 H_c 이하에서는 초전도 상태를 유지하지만 그 이상에서는 초전도 상태가 깨진다.

1935년 우크라이나의 슈브니코프(Lev V. Shubnikov)가 두 금속원소를 합하여 만든 납-인듐(Pb-In)에서 매우 높은 자기장에서도 초전도 상태가 유지됨을 발견했다[11]. 이 물질에서는 놀랍게도 2개의 자기장 한계가 존재했으며 두 번째 자기장 한계는 매우 높았다. 이후 러시아의 물리학자인 아브리코소프(Alexei A. Abrikosov, 1928-)가 이런 물질이 왜 높은 자기장에서도 초전도 상태를 유지하는지에 대해 이론적으로 설명함으로써 [12] 2종 초전도체(1종과 차별의 의미로 2종이라고 부름)의 존재가 알려졌다.

1종 초전도체에서는 첫 번째 자기장 한계(H_{c1})에서 초전도 상태가 상전도 상태로 변하지만 2종 초전도체에서는 H_{c1} 을 넘어서도 초전도 상태가 깨지지 않는다. 대신 자기장이 초전도체 안으로 들어와서 (초전도+상전도) 혼합상태를 만든다. 초전도체 안에 들어온 자기장(2차원에서는 점, 3차원 공간에서는 선으로 표시됨)은 한 곳에 고정되어 있지 않고 로렌츠 힘을 받아 움직이는데 이 자기장이 움직이는 곳에서는 초전도 상태가 깨진다(자기장이 있는 곳은 상전도 상태). 하지만 다른 곳은 여전히 초전도 상태가 유지된다. 외부 자기장이 매우 커져 자기장이 두 번째 자기장 한계(H_{c2}) 보다 커지면 초전도 상태가 완전히 깨진다. 다시 설명하면, 첫 번째 자기장 한계까지 자기장이 초전도체로 침투하지 못하지만(여기까지는 1종과 2종이 동일하다) 첫 번째 자기장 한계를 지나면 자기장이 초전도체 안으로 들어간다(Fig. 6(b)). 2종 초전도체는 제법 큰 자기장 환경에서도 여전히 초전도 상태를 유지한다. 자기장이 더 커지면 1종과 마찬가지로 초전도 현상이 완전히 사라져서 상전도 상태가 된다. 2종 초전도체에는 큰 전기를 흘릴 수 있으며 높은 자기장 환경에서 사용이 가능하다. 현재 산업에서 활용되는 대부분의 초전도 물질은 2종 초전도체다 [13].

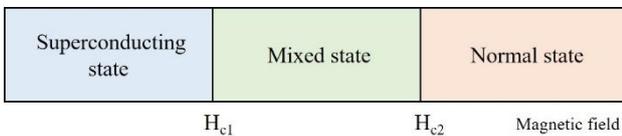


Fig. 5. Phase diagram of Type II superconductors.

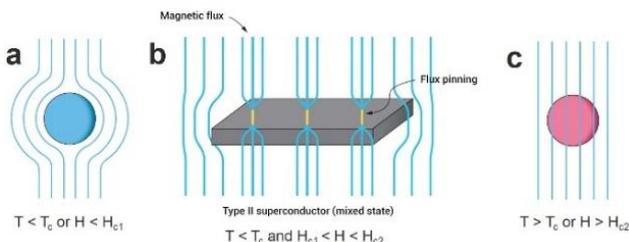


Fig. 6. Magnetic field distribution of (a) superconducting state and (b) mixed state and (c) normal state of Type II superconductors.

8. BCS 이론

오네스에 의해 초전도 현상이 발견된 이후에 초전도 현상의 실체를 밝히고자 많은 연구가 진행되었지만 1950년까지 초전도 현상은 이론적으로 규명하지 못한 채 미완의 숙제로 남아 있었다. 오네스 이후에 초전도 이론에 대한 가장 괄목할 만한 결과를 보고한 과학자는 소비에트의 물리학자인 비탈리 긴스버그(Vitaly Ginzburg, 1916-2009)다. 그는 란다우(Landau)와 함께 1950년에 초전도 기본적인 성질을 설명하는 란다우-긴스버그(GL) 이론을 발표했다 [14].

1950년대 초에 미국 일리노이(University of Illinois) 대학교의 바딘 교수 (John Bardeen, 1908-1991)는 연구원인 쿠퍼(Leon N Cooper, 1930-)와 대학원생이었던 슈리퍼(John Robert Schrieffer, 1931-)와 함께 초전도 이론 연구를 진행하고 있었다.

이들은 초전도 현상이 원자의 진동과 관련이 있음을 인식하고 있었다. 1950년에 초전도체에 동위원소(Isotope, 전자의 배치는 같고, 원자핵의 양자 수는 일정하지만 중성자 수가 다르기 때문에 질량이 다른 원소)를 첨가하면 초전도 임계온도가 변한다는 연구결과가 있었다 [15, 16]. 동위원소는 동일한 원소로서 질량만이 다른 원소다. 동위원소가 초전도 현상에 영향을 준다는 사실은 원소의 중량이 전자의 흐름에 영향을 준다는 의미다. 질량이 변하면 원자의 진동이 달라지고, 이는 원자의 진동과 전자의 움직임이 관계가 있다는 증거가 된다. 초전도 물질에 대한 동위원소 효과는 초전도체의 임계온도가 구성 원소의 동위원소 질량에 따라 변한다는 것을 의미한다. 이는 초전도체의 이온격자와 초전도 현상의 밀접한 관계를 보여주는 예로, 초전도의 전자-포논 상호작용 과정을 뒷받침하는 근거가 된다.

바딘은 전자와 원자 격자진동(Phonon)의 상호작용에 흥미를 갖고 있었다. 원자의 진동과 더불어 바딘이 초전도 현상에 중요한 인자로 생각한 것은 전자들 사이에 작용하는 인력(잡아당기는 힘)이었다. 200년 전에 완성된 전자기의 기본원칙인 쿨롱(Charles-Augustin de Coulomb, 1736-1806, 프랑스의 물리학자)의 법칙(두 전하 사이에서 작용하는 힘은 두 전하 크기의 곱에 비례하고 거리의 제곱에 반비례한다) [17]에서는 기본적으로 부호가 같은 전자-전자나 양전하-양전하는 반발하고, 양전하-전자와 같이 다른 전하를 가지는 입자들은 서로 끌어당긴다. 그들은 부호가 같은 전자나 양전자가 서로 잡아당길 수 있는 환경에 대해 논의했다.

이론 물리학자인 푸로히리히(Herbert Fröhlich, 1095-1991, 독일출생 영국의 물리학자)는 긴스버그-란다우(GL)의 초전도 이론 [14]이 발표된 1950년 이전에 이미 전자가 서로 잡아당길 수 있다는 논문을 발표한 바 있었다 [18]. 그는 초전도 현상이 전자와 원자 간의 상호작용에 의한 것으로 보았다. 푸로히리히는 그때까지 발견된 대부분의 초전도체가 상온에서의 저항은 매우 큰 사실에 주목했다. 저항이 큰 금속에서 초전도 현상이 나타내는 것은 원자의 진동과 초전도 현상이 관계하기 때문이라고 생각했다.

원자의 진동과 전자의 상호작용을 살펴보기 전에 전자 사이에 서로 잡아당기는 힘인 인력이 작용한다고 가정해 보자. 하나의 전자가 양이온 상태인 원자를 끌어당겨서 (+) 전하가

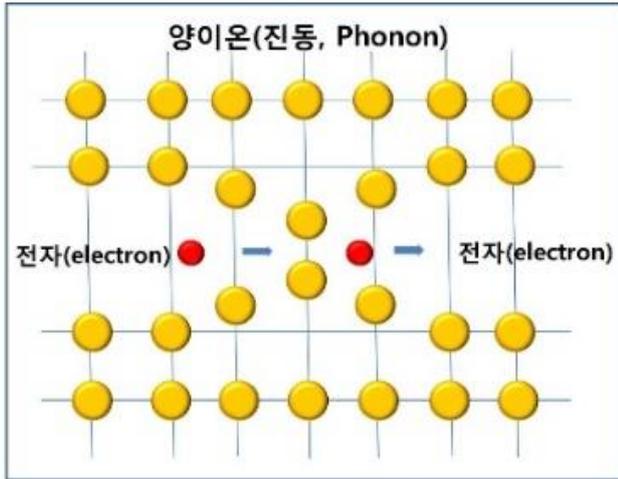


Fig. 7. BCS model based on the interaction between phonon vibration and electrons.

큰 영역을 만들면 그곳으로 다른 전자를 끌어드릴 수 있다. 같은 전하를 가진 전자들이 직접 서로 잡아당길 수는 없지만 전자들 주변에 양전하를 가진 이온들이 둘러싸고 있다면 전자들이 양전하에 밀려서 함께 이동할 수 있다. 그것을 전자와 전자 사이의 인력이라고 할 수 있다. 비상식적인 생각이라고 할 수 있지만 오히려 이런 가정이 초전도 현상을 이론적으로 설명하는 열쇠가 된다.

푸로히리히의 제안을 기반으로 쿠퍼는 동일한 전하를 갖는 전자들이 서로 잡아당길 수 있다면 전자들이 쌍을 이루어 진동하는 원자들 사이로 저항 없이 움직일 수 있음을 제안했다. 이 전자쌍을 쿠퍼가 제안했다고 하여 ‘쿠퍼 페어’(Cooper pair)라고 한다. 슈리퍼는 쿠퍼 전자쌍이 각각의 전자쌍이 아닌 동시에 움직이는 전자쌍 집단에 대한 수학적 모델을 만들었다. 쿠퍼의 전자쌍 모델에 슈리퍼의 수학적 해석이 합쳐져서 초전도 현상을 설명하는 전자-포논 상호반응 모델이 만들어졌다 [19]. 이 이론을 제안자인 바딘(B)-쿠퍼(C)-슈리퍼(S)의 이름 첫 자를 따서 “BCS 이론”이라 부른다. 학계에 발표된 BCS 이론을 학자들의 논쟁과 검토 작업을 거쳐 초전도 현상을 설명할 수 있는 공식적인 이론으로 받아들였다. BCS 이론에 의하면 초전도 현상이 일어나는 온도한계는 30-40K이다. 과학계에서는 초전도 현상을 설명하는 이론이 정립된 것을 받아들였지만, 한편으로는 초전도 현상이 40K 이하의 극저온에서만 일어난다는 사실에 실망감을 표출했다. 바딘, 쿠퍼, 슈리퍼 세 사람은 초전도 이론을 규명한 공로로 1972년에 노벨 물리학상을 받았다.

8. 조셉슨 터널링(Tunneling)-양자소자

두 개의 도체(Conductor) 사이에 전자(Electron)가 이동할 수 없는 얇은 절연층(Insulation layer)이 있다. 입자(Particle)의 성격을 갖는 전자는 이론적으로 절연층을 뚫고 반대편 도체로 이동할 수 없다. 그런데 전자의 운동에너지가 장벽의 에너지보다 작음에도 불구하고 전자가 절연층을 통과하는 실험적인 결과가 보고되었다. 기에버(Ivar Giaever, 노르웨이 출신 과학자, 1928-)가 초전도체-절연층-초전도체(S-I-S)

실험에서 초전도 층에 있던 전자가 절연층을 뚫고 반대편으로 이동할 수 있음을 보였다[20]. 전자가 얇은 벽을 통과하는 현상을 터널링(Tunneling)이라 한다. 터널링은 산에 뚫어 놓은 터널을 통해 자동차가 산 한쪽에서 다른 쪽은 자연스럽게 이동하는 것과 유사하다. 이 현상이 나타날 확률은 매우 작지만, 입자의 질량이 작고 절연층을 이루는 원자층이 충분히 얇다면 터널링 현상이 일어날 수 있다.

1962년 초반 영국 케임브리지(Cambridge) 대학의 22살 박사과정 학생인 조셉슨[Brian David Josephson, 영국의 물리학자, 1940-]은 고체에서의 전자의 이동에 대한 연구를 하고 있었다. 조셉슨의 연구 주제는 두 초전도체 사이에 얇은 절연층이 있을 때의 초전도 전자인 쿠퍼쌍의 움직임이었다. 그는 한 쪽의 초전도층에 있는 전자가 쌍을 이루어 절연층을 통과해서 다른 초전도층으로 이동할 수 있다고 생각했다. 그는 전자를 입자가 아닌 파동으로 보았으며 도체 양쪽의 위상차이가 같다면 전자가 절연층을 뛰어넘어 다른 전도층으로 이동할 수 있다고 보았다. 그는 연구결과를 정리해서 “초전도 터널링에서 가능한 새로운 효과(Possible new effect in superconductive tunneling)”란 제목으로 논문을 “피직스 레터(Physic letter)”에 게재했다 [21].

조셉슨은 고체에서 초전도 전자쌍의 터널링 현상을 발견한 공로로 1973년에 에사키(Leo Esaki, 1925-, 일본의 물리학자, 게르마늄(Ge)의 p-n 접합 다이오드에서 터널링 현상 발견 [22]), 기에버와 공동으로 노벨 물리학상을 수상했다. 기에버는 초전도 접합에서 터널링 현상을 최초로 발견하였으며 [20], S-I-S 접합 실험을 통한 초전도체의 에너지 간격(Gap)의 측정했다 [23-24]. 기에버는 초전도 전자의 터널링 현상의 실험적 결과를 제시했고, 조셉슨은 파동함수의 위상개념을 도입하여 초전도 전자쌍이 어떤 조건에서 절연층을 통과하는지를 이론적으로 설명했다.

터널링 현상은 넓은 분야에 걸쳐 응용되고 있다. 조셉슨 접합을 이용한 기기 중 가장 대표적인 장치는 미세한 자기장을 정밀하게 측정하는 초전도 양자 간섭기(SQUID: Superconducting Quantum Interference Device [25])다(Fig. 9). SQUID는 인류가 만든 자기 센서 중 감도가 가장 뛰어나다. 인간의 몸에는 혈액이 흐르고, 혈액에는 나트륨과 염소 이온이 포함되어 있다. 인간의 신경은 전자의 움직임을 이용해서 신호를 뇌로 전달한다. SQUID는 뇌에서 발생하는 작은 자기

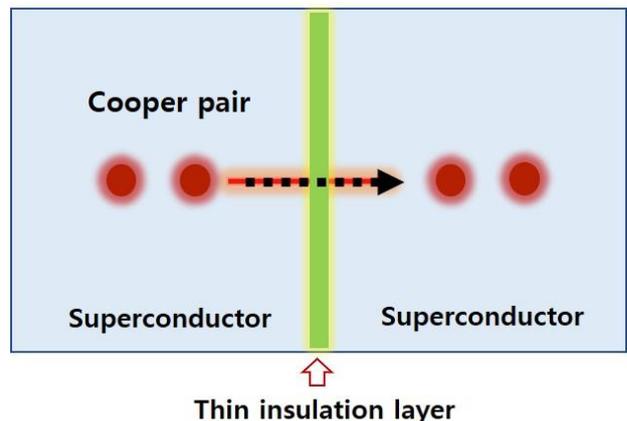


Fig. 8. Tunneling of Cooper pair in S-I-S junction.

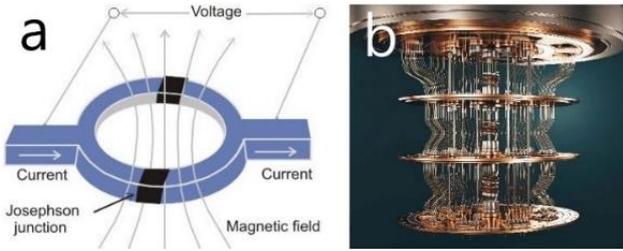


Fig. 9. (a) Superconducting Quantum Interference Device (SQUID) [27] and superconductor quantum computer [28].

신호를 감지한다. 간질 등 뇌기능에 이상이 있을 경우 비정상 세포에서는 정상 세포와는 다른 형태의 뇌파가 발생한다. SQUID는 이런 뇌파의 차이를 구분해 준다. 심장에서도 전기흐름에 따른 자기장이 발생한다. 심장에서 발생하는 생체자기 신호는 뇌보다 100 배 정도 크다. SQUID는 뇌 과학 및 인지과학 연구에서 중요한 수단이 되고 있다. SQUID를 이용하면 부정맥에 의한 돌연사의 조기 진단이나 태아 심장 기능의 이상 유무를 기존의 심전도보다 정밀하게 진단할 수 있다.

뇌파나 심자도 이외에도 신개념의 양자간섭소자는 절대온도 0도 근처에서의 온도 측정, 중력파의 검출, 채광 후보지의 예측, 물 또는 산을 통한 통신 등 광범위한 분야에 응용되고 있다 [26]. SQUID로 약 50 마이크로 테슬라인 지구 자기장의 100억 분의 1 정도의 작은 자기 신호까지 검출할 수 있다. SQUID를 이용한 자기 검출기는 재료의 자기적 특성 측정, 현미경, 고감도 DNA 및 항체 검사 등에 활용되고 있다. 이 밖에도 지하수, 유전 및 광물 탐사 등을 위한 장치가 개발되고 있으며, 폭발물 탐지 및 잠수함 탐지 등 군사적 응용분야도 활용이 가능하다.

초전도 양자간섭소자와 더불어 조셉슨 디바이스(Device)를 이용한 메모리 소자의 개발에 거는 대한 기대도 크다. 조셉슨 디바이스는 초전도 전자의 흐름을 이용한다. 초전도 전류는 저항이 없이 흐르기 때문에 전력소비량이 반도체 소자인 실리콘의 100분의 1 정도로 작다. 현대는 정보통신 반도체의 세상이다. 메모리 반도체에 많은 회로를 집적하려면 회로의 선 폭을 수십 나노미터(Nanometer, 10^{-9} meter)크기로 만들어 주어야 한다. 저항이 작을수록 많은 회로를 집적할 수 있다. 저항이 제로인 초전도소자를 이용하면 많은 회로를 집적할 수 있다. 또한 저항 제로인 초전도 전자의 움직이는 속도는 반도체보다 20-50배 빠르다. 조셉슨 소자를 다이오드나 트랜지스터로 만들어 스위칭 소자(Switching device)로 사용한다면 초고속 컴퓨터를 개발할 수 있다.

9. 고온초전도체(High- T_c Superconductor)

카멜린 오네스가 1911년 수은에서 초전도 현상을 발견한 이후 1973년까지 초전도 임계온도는 23.3K에서 멈추어 있었고, 그 후 10년이 지나도 이 기록은 0.1K도 전진하지 못했다. 초전도 연구를 선도해 왔던 미국 IBM에서는 터널링 현상을 이용한 초전도 컴퓨터 연구가 중단되었고 연구자들은 BCS 이론의 장벽(BCS 이론에서 정의한 초전도 임계온도 30-40K) 앞에서 연구의 진척이 없었다.



Fig. 10. Oxide superconductors prepared by a powder synthesis method (Diameter of the samples is 25 mm).

1986년 스위스 아이비엠 추리히 연구소(IBM Zurich Research Laboratory)의 고체물리연구실의 물리(Karl Alexander Müller, 1927-, 스위스의 물리학자)와 베드노르츠(Johannes Georg Bednorz, 1950-, 독일의 물리학자)는 산화바륨(BaO)과 산화구리(CuO), 산화란타넘(La_2O_3)을 혼합해서 산화물을 제조하는 실험을 진행했다. 수 많은 시행착오를 거쳐 두 사람은 원료물질을 적당한 비율로 섞어서 분말을 얻어서 900도 부근에서 열을 가해 페로브스카이트(Perovskite) 구조를 가지는 새로운 물질을 만들었다. 합성된 물질 시료에 대해 온도를 내려가면서 전기저항을 측정하던 중 35K 부근에서 저항강하를 발견했다. 실험 결과를 재현하고자 바륨/란타넘(Ba/La) 비율을 조금씩 바꾸어서 제조한 시편들의 전기저항을 측정해 본 결과, 특정한 화학조성에서 초전도 임계온도가 급격히 상승했다. 그들이 만든 물질의 초전도 임계온도는 이전에 학계에 보고된 어떤 물질보다 높았다. 이들은 연구결과는 독일 물리학회지인 Z. Phys.에 게재했다 [29].

이 연구결과는 물리학적으로 매우 중요한 의미를 가진다. 1959년에 발표되어 1972년에 노벨 물리학상을 수상한 BCS 이론은 초전도 현상을 완벽하게 설명했다고 인정받은 이론이다.

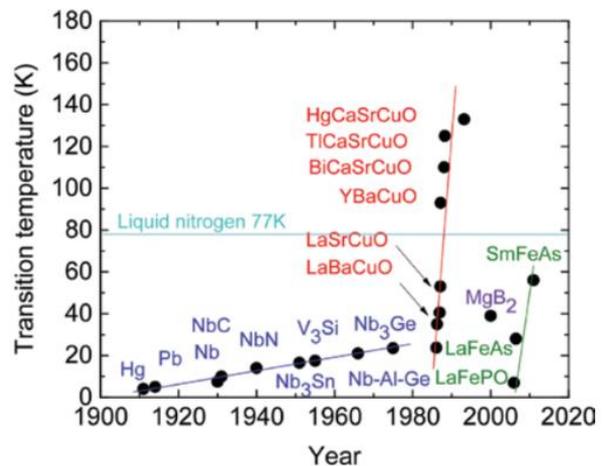


Fig. 11. Increase of T_c after the discovery of high- T_c superconductors [3].



Fig. 12. Meissner effect of a YBCO superconductor (Diameter of the sample is 40 mm).

물리학계에서는 BCS 이론의 노벨상 수상으로 초전도 현상의 모든 비밀이 풀린 것으로 인정해 왔다. 완벽하고 아름답다는 평을 들어온 BCS 이론이 규정한 초전도 임계온도의 한계는 30-40K였다. 이는 30-40K이상에서 초전도 현상을 나타내는 물질은 우주에 존재하지 않음을 의미한다. BCS 이론은 섭씨 영하 243도 이하에서나 초전도 현상을 볼 수 있다고 했다. 놀랍게도 베드노르츠와 물러가 만든 초전도체의 임계온도는 35K 부근이었다. 이는 과학자들이 동의한 BCS 초전도 임계온도 한계가 부근이었다.

이들의 논문 이후에 초전도 임계온도가 93K인 Y-계 초전도체가 발견되었고 [30], 이후에 100K가 넘는 초전도 물질들이 속속 발견되었다 [31-34](Fig. 11). BCS 초전도 온도한계를 뛰어넘는 초전도물질의 발견은 과학자들이 알지 못하는 초전도 현상의 새로운 비밀이 존재하거나 완전하다고 평가되었던 BCS 이론의 수정을 의미한다. 이후에 전 세계의 내노라는 물리학자들은 상온 초전도체 연구에 도전하게 된다. 베드노르츠와 물러는 고온 초전도체를 발견한 공로로 논문을 발표한 불과 1년 후인 1987년에 노벨 물리학상을 수상했다. 과학자들은 높은 온도에서 초전도가 되는 산화물 초전도체를 기존의 초전도체와 구별해서 고온초전도체(High temperature superconductor)라고 명명했다(액체질소 온도로 냉각한 YBCO 초전도체의 마이스너 효과(Fig. 12 참조)). 고온산화물 초전도체의 발견 이후에 금속간화합물로는 온도가 가장 높은 MgB_2 ($T_c=39K$)[35]와 철계 초전도체 [36] 등이 발견되었으며, 압력을 가한 수소화화물에서 상온에 가까운 초전도 임계온도가 보고되었다 [37-38].

9. 결 론

네덜란드 물리학자 오네스가 수은에서 저항이 제로가 되는 초전도 현상을 발견한 지 100년이 넘었다. 제로저항 발견 20여년 후에는 독일 물리학자 마이스너가 초전도 현상의 또 다른 성질인 완전반자성을 발견했다. 저항제로는 전기의 수송과 관리에 혁신적인 변화를 가져올 수 있고, 완전반자성은 자기부상열차, 무접촉 베어링과 자기차폐 등에 활용될 수 있다.

높은 자기 한계를 갖는 2중 초전도체의 발견은 의료용 MRI나 고자기장 자석의 산업화를 이끌었다. 초전도체-

절연체-초전도체 접합에서 터널링 현상을 이용하는 SQUID 센서는 의료 및 지자기 검출 등 광범위한 분야에서 사용되고 있으며, 그 사용범위가 양자 컴퓨터로 확대되고 있다.

포논 진동과 전자의 상호작용을 기반으로 하는 BCS 이론으로 설명이 어려운 고온 초전도 현상을 규명하기 위한 물리학자들이 노력도 진행 중이다. 새로운 초전도 물질탐구의 연구를 통해 상온 초전도체가 발견된다면 초전도 기술로 인해 미래 인류의 생활과 산업이 혁신적으로 바뀔 것으로 예상된다.

REFERENCES

- [1] H. Kamerling Onnes, "The resistance of pure mercury at helium temperatures," *Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden*, no. 120b, 1911.
- [2] W. Meißner and R. Ochsenfeld, "Ein neuer effekt bei supraleitfähigkeit," *Naturwissenschaften*, vol. 21, no. 44, pp. 787-788, 1933.
- [3] A. Bussmann-Holder and H. Keller, "High-temperature superconductors: underlying physics and applications," *Z. Naturforsch B*, pp. 1-13, 2019, <https://doi.org/10.1515/znb-2019-0103>.
- [4] H. Kamerling Onnes, "The liquefaction of helium," *Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden*, no. 108, 1908, and Rudolf de Bruyn Ouboter, "Heike Kamerlingh Onnes's discovery of superconductivity," *Scientific American*, vol. 276, no. 3, pp. 98-103, 1997.
- [5] H. Kamerling Onnes, "The liquefaction of helium," *Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden*, no. 108, 1908, and D. van Delft, "History and significance of the discovery of superconductivity by Kamerlingh Onnes in 1911," *Physica C*, vol. 479, pp. 30-35, 2012.
- [6] B. T. Matthias, T. H. Geballe, and V. B. Compton, "Superconductivity," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 35, no.1, pp. 1-20, 1963.
- [7] H. Kamerling Onnes, *Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden*, no. 139f, 1914, and D. van Delft and P. Kes, "The discovery of superconductivity," *Phys. Today*, vol. 63, no. 9, pp. 38-42, 2010.
- [8] "Faraday's law of electromagnetic induction," Accessed: Dec. 11, 2024, [online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Faraday%27s_law_of_induction.
- [9] H. Kamerling Onnes, *Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden*, no. 139f, 1914.
- [10] "Lenz's Law," Accessed: Dec. 11, 2024, [online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Lenz%27s_law.
- [11] L. V. Shubnikov, V. I. Khotkevich, Yu. D. Shepelev, and Yu. N. Ryabinin, "Magnetic properties of superconducting metals and alloys," *ZH. Eksp. Toer. Fiz.*, vol. 7, no. 2, 221-237, 1937.
- [12] A. A. Abrikosov, "On the magnetic properties of superconductors of the second group," *Soviet Phys. JETP.*, vol. 5, no. 6, pp. 1174-1182, 1957.
- [13] H. E. Kunzler, E. Buehler, F. S. L. Hsu, and J. H. Wernick, "Superconductivity in Nb_3Sn at high current density in a magnetic field of 88 kgauss," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 6, no. 3, pp. 89-91, 1961.
- [14] V. L. Ginzburg and L. D. Landau, "On the theory of superconductivity," *J. Exp. Theor. Phys. Moscow*, vol. 20, no. 12, pp. 1064, 1950.
- [15] E. Maxwell, "Isotope effect in the superconductivity of Mercury," *Phys. Rev.*, vol. 78, pp. 477, 1950.
- [16] C. A. Reynolds, B. Serin, W. H. Wright, and L. B. Nesbitt, "Superconductivity of isotope of mercury," *Phys. Rev.*, vol. 78, pp. 487, 1950.
- [17] "Coulomb's law," Accessed: Dec. 11, 2024, [online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Coulomb%27s_law.
- [18] H. Fröhlich, "Theory of the superconducting state. I. The ground state at the absolute zero of temperature," *Phys. Rev.*, vol. 79, no. 5, pp. 845-856, 1950.
- [19] J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer, "Theory of Superconductivity," *Phys. Rev.*, vol. 108, no. 5, pp. 1175-1204, 1957.
- [20] I. Giaever, "Electron tunneling between two superconductors," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 5, no. 10, pp. 464-466, 1960.
- [21] B. D. Josephson, "Possible new effects in superconductive tunneling," *Phys. Letts.*, vol. 1, no. 7, pp. 251-253, 1962.
- [22] I. Esaki and Y. Miyahara, "A new device using the tunneling process in narrow p-n junction," *Solid. State Electron.*, vol. 1, no. 1, pp. 13-14, 1960.

- [23] I. Giaever, "Energy gap in superconductors measure by electron tunneling," *Phys. Rev. Letts.*, vol. 5, no. 4, pp. 147-148, 1960.
- [24] I. Giaever and K. Megerle, "Study of superconductors by electron tunneling," *Phys. Rev.*, vol. 122, no. 4, pp. 1101-1111, 1961.
- [25] A. Kraft, C. Rupprecht, and Y-C Yam, "Superconducting quantum interference device (SQUID)," *UBC PHYSIC 502 PROJECT*, pp. 1-6, 2017.
- [26] J. C. Gallop and B. W. Pettley, "SQUID and their applications," *J. Phys. E: Scientific Instruments*, vol. 9, pp. 417-429, 1976.
- [27] "A basic SQUID Magnetometer," Accessed: Dec. 11, 2024, [online]. Available: DOI:10.13140/RG.2.2.17984.66564 (Image: Adapted from).
- [28] "An IBM Quantum computer based on superconducting qubits," Accessed: Dec. 11, 2024, [online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/An-IBM-Quantum-computer-based-on-superconducting-qubits_fig1_346360124 (Image adapted from).
- [29] J. G. Bednorz and K. A. Müller, "Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system," *Z. Phys. B, Cond. Matt.*, vol. 64, no. 1, pp. 189-193, 1986.
- [30] M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang, and C. W. Chu, "Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, no. 9, pp. 908-910, 1987.
- [31] H. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi, and T. Asano, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 27, no. 2, pp. L209, 1988.
- [32] J. M. Tarascon, W. R. McKinnon, P. Narboux, D. M. Hwang, B. G. Bagley, L. H. Green, G. W. Hull, Y. LePage, N. Stoffel, and M. Giroud, *Phys. Rev. B*, vol. 38, no. 13, pp. 8885-8892, 1988.
- [33] A. Schilling, M. Cantoni, J. D. Guo, and H. R. Ott, "Superconductivity above 130 K in the Hg-Ba-Ca-O system," *Nature*, vol. 363, no. 6, pp. 56-58, 1993.
- [34] C. W. Chu, L. Gao, F. Chen, Z. J. Huang, R. L. Meng, and Y. Y. Xue, "Superconductivity above 150 K in $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+d}$ at high pressures," *Nature*, vol. 365, pp. 323-325, 1993.
- [35] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, and J. Akimitsu, "Superconductivity at 39 K in magnesium diboride," *Nature*, vol. 410, pp. 63-64, 2001.
- [36] Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano, and H. Hosono, "Iron-Based Layered Superconductor $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ ($x = 0.05-0.12$) with $T_c = 26$ K," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 130, pp. 3296, 2008.
- [37] N. W. Ashcroft, "Hydrogen dominant metallic alloys: high temperature superconductor?" *Phys. Rev. Lett.*, vol. 92, pp. 187002, 2004.
- [38] M. Somayazulu, M. Ahart, A. K. Mishra, Z. M. Geballe, M. Baldini, Y. Meng, V.V. Strushkin, and R. J. Hemley, "Evidence for superconductivity above 260 K in Lanthanum Superhydride at megabar pressure," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 122, pp. 027001, 2019.