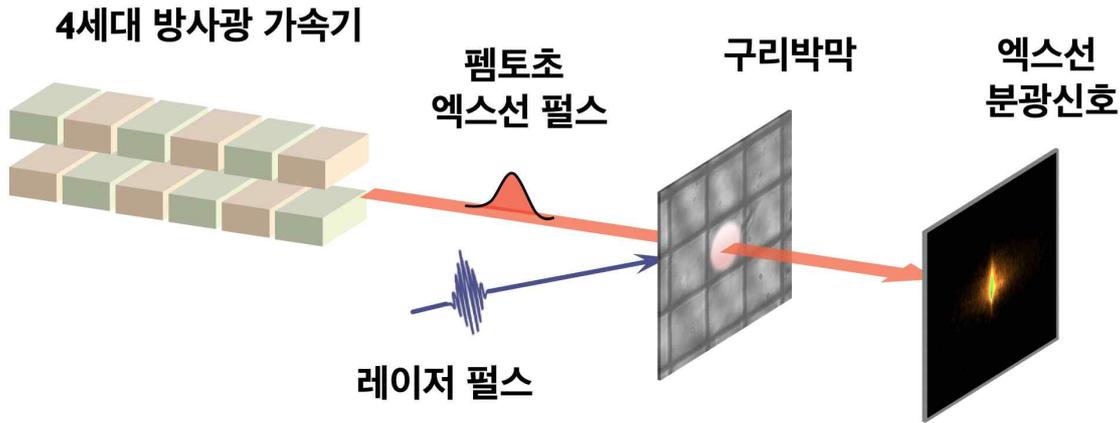


# 금속의 녹는 순간을 포착하다

- 엑스선 레이저 이용해 금속이 녹는 순간의 전자구조 변화 실시간 관측 성공... 핵융합 등 미래 에너지 연구에 기여



▲**펨토초 레이저 분광 실험.** 강력한 레이저 펄스에 의해 구리박막이 녹기 시작하고, 특정시간이 지난 뒤 4세대 방사광 가속기에서 방출된 펨토초 엑스선 펄스를 이용하여 초고속 분광신호를 얻는다.

지스트(광주과학기술원, 총장 김기선) 물리·광학과 조병익 교수 연구팀은 금속이 녹아 고체에서 액체로 변화하는 순간을 실시간으로 관측하는데 성공했다. 극한의 시공간 영역에서 물질의 신물성을 발견하고 핵융합 연구 등 미래 에너지 연구에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

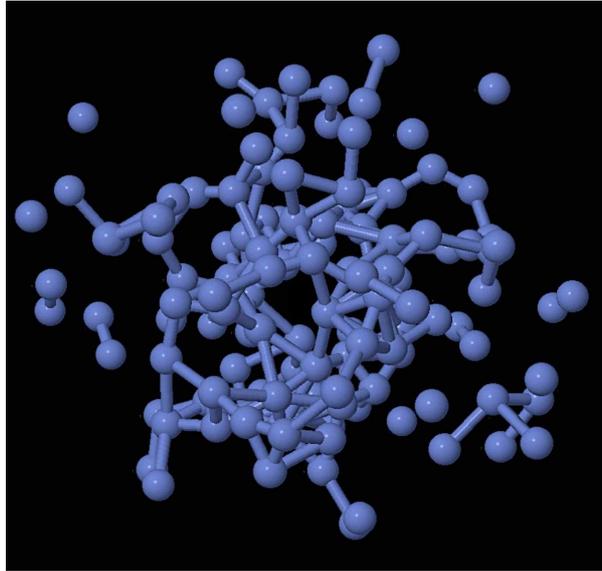
연구팀은 강력한 레이저에 의해 원자간 결합이 변화하며 금속이 녹는 10조분의 1 초의 찰나의 순간을 관측하기 위해 엑스선 자유전자레이저에서 방출되는 펨토초(1천조분의 1초) 엑스선 펄스를 이용하여 녹는 순간의 전자구조 변화에 대한 엑스선 분광 신호를 포착해냈다.

강력한 레이저에 의해 초고온으로 가열된 물질, 특히 금, 은, 구리와 같은 귀금속류가 액체로 변화할 때 순간적으로 원자간 결합이 강화되어 더욱 단단한 상태를 거쳐 액체로 상전이 될 수도 있다는 이론적 예상이 10여 년 전 해외연구진에 의해 보고되었으나, 그러한 현상이 직접적으로 관측된 적은 없었다.

이는 기존의 엑스선 측정기법의 시간분해능이 약 10 피코초(1000억 분의 1초) 수준에 머물러 있어 원자결합의 변화가 일어나는 1 피코초 미만의 시간영역을 측정하는데 한계가 있었기 때문이다.

본 연구팀은 기존의 시간 한계를 넘기 위해 엑스선 자유전자레이저에서 방출되는 펨토초(1천조분의 1초) 엑스선 펄스를 이용한 초고속 엑스선 분광법을 사용하였다.

연구진은 강력한 레이저를 이용하여 1만도 이상의 초고온으로 구리를 가열하였다. 이때 원자간 결합에 관여하는 전자들 중 약 10% 정도가 들뜬상태로 진입하지만 남은 전자들은 원자핵의 강력한 인력에 더욱 많이 노출되어 더욱 단단히 결속되는 현상이 발생하는 것을 초고속 엑스선 분광법을 이용하여 처음으로 관찰하였다.



▲레이저에 의해 가열된 초고온 물질의 원자간 결합

결합이 더욱 강화된 초고온의 단단한 구리는 수백 펨토초에 걸쳐 유지되다가 이후 서서히 약해진다. 이는 가열된 물질이 녹을 때 원자간 결합이 바로 약화되어 액체로 변화할 것이라는 기존의 통념에 반하는 결과이다.

실제로 레이저 핵융합, 지구 내부 등 극한의 온도, 압력 환경에서는 기존에 알려진 것과는 다른 특이물성들이 많이 나타나는데, 강력한 레이저에 의해 가열된 초고온 물질에 대한 초고속 엑스선 연구를 통해 1만도 이상의 초고온 물질이 순간적이거나 더욱 단단해 질수도 있다는 점은 극한의 특이 물성을 이해할 수 있는 열쇠를 제공하고 있다.

조병익 교수는 “펨토초 엑스선 분광법을 이용하면 초고속 영역에서 원자 결합을 관찰하는 것 외에도 극한의 시공간 영역에서 다양한 특이현상을 관측하는 것이 가능하다”면서, “연구과정에서 축적한 지식과 경험을 바탕으로 핵융합 에너지 연구 등 세계 과학계에서 주도적인 역할을 할 수 있기를 희망한다”고 말했다.

지스트 조병익 교수팀이 수행한 이번 연구는 한국연구재단 중견연구자사업, 선도연구센터사업(SRC) 및 기초과학연구원(IBS) 초강력레이저과학연구단(지스트 캠퍼스 연구단)의 지원을 받아 수행되었으며, 물리학 분야 최고 권위의 학술지 피지컬 리뷰 레터스(Physical Review Letters)에 2021년 10월 22일 온라인 게재되었다.

# 논문의 주요 내용

## 1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Physical Review Letters, (IF 9.161)
- 논문명 : Investigation of Nonequilibrium Electronic Dynamics of Warm Dense Copper with Femtosecond X-Ray Absorption Spectroscopy
- 저자 정보 : 이종원(제1저자, 지스트 졸, 현 포항가속기연구소), 김민주(제1저자, 지스트 졸, 현 표준연구원), 조병익(교신저자, 지스트) 외 13인

## 용어 설명

### 1. 펨토초 엑스선 펄스 (Femtosecond X-ray pulse)

- 1천조분의 1초를 펨토초라 하고, 엑스선이 펨토초의 짧은 시간동안만 펄스 형태로 방출되는 것을 의미한다.

### 2. 엑스선 자유전자 레이저 (X-ray free electron laser)

- 기존의 가장 밝은 엑스선 광원인 3세대 방사광 가속기에 비해 100억배 더 밝은 펨토초 엑스선 펄스를 발생시킬 수 있는 장치로 일명 "4세대 방사광가속기"라고도 불리운다.

### 3. 엑스선 분광 (X-ray spectroscopy)

- 물질에 엑스선을 입사시키면 원자의 에너지준위와 전자구조에 따라 특정파장의 엑스선이 흡수 또는 투과된다. 따라서 엑스선의 흡수량의 변화를 관측하면 원자의 전자구조 변화를 알 수 있다.