

고차조화파를 이용하여 발생한 아토초 펄스의 완전한 시간 영역 측정

Complete temporal characterization of attosecond pulses obtained from high-order harmonics

고동혁, 김경택, 박주윤, 남창희

한국과학기술원 물리학과 곁맞는 X선 연구단

dhko@kaist.ac.kr

고출력 극초단 레이저의 개발로 인해 원자나 분자에 강한 레이저장을 가해 고차조화파를 얻을 수 있게 되었다. 강한 레이저장은 원자 혹은 분자의 전자를 속박하는 포텐셜을 왜곡시켜 터널링 이온화가 가능하게 한다. 이렇게 이온화된 전자는 레이저 전기장에 의해 가속운동을 하다가 레이저의 반주기 후에 다시 원자와 재결합함으로써 넓은 주파수 영역의 곁맞는 X선을 발생하게 된다. 이런 현상이 레이저 펄스의 반주기 마다 일어나므로 전자가 재결합할 때 발생하는 X선은 처음에 가해준 레이저 주파수의 홀수 배에 해당하는 주파수 성분만 강하게 남아 곁맞는 고차조화파를 형성하게 된다. 이 같은 고차조화파가 발생하는 3단계 모델은 1993년 Corkum이 제안하였다⁽¹⁾. 고차조화파는 빗살 모양의 넓은 스펙트럼을 가진 곁맞는 X선이기 때문에, 마치 모드락킹된 레이저와 같이 아토초 펄스를 생성하는데 적합하다.

생성된 아토초 펄스의 폭은 불과 수십에서 수백 아토초에 불과하여, 초고속 분광학에 응용될 수 있다. 원자 혹은 분자 내부에서 일어나는 초고속 현상은 그 단위 시간이 아토초에 불과한 경우가 있다. 수소 원자의 전자가 핵 주변을 공전하는 주기는 대략 150 아토초로 알려져 있으며, 오제이 감쇠 현상의 경우 수 펨토초 혹은 이보다 짧은 생존주기를 갖는다. 따라서 이보다 짧은 펄스를 만들어 초고속 현상을 실제로 관찰할 수 있게 된다.

이러한 응용을 위해서는 아토초 펄스의 측정이 필수적이다. 그러나 극자외선 혹은 연엑스선 영역에서는 비선형 현상이 일어나는 적절한 매질을 찾기가 어려워 기존의 알려진 방법을 그대로 적용할 수 없다. 따라서, 고차조화파와 함께 시간 지연된 레이저 펄스를 다른 원자에 집속하여 생성되는 광전자 스펙트럼으로부터 측정에 필요한 정보를 얻는다. 시간 지연된 IR 펄스가 고차조화파로 인해 생성된 광전자의 파동함수와 겹치게 되면 다양한 양자 경로가 형성되어 파동의 간섭이 일어난다. 이로 인해 홀수차의 고차조화파 사이에 짝수차에 해당하는 피크가 형성되고 사이드 밴드라 불리우는 짝수차 피크는 시간 지연된 IR 펄스의 시간 간격에 따라 세기가 변조된다. 아래 그림 1에서 홀수차에 해당하는 고차조화파와 짝수차에 해당하는 사이드밴드를 볼 수 있다. 사이드밴드의 세기는 기본진동수의 두 배로 시간에 따라 진동하며, 진동의 위상이 고차조화파의 위상 정보를 가지고 있다.

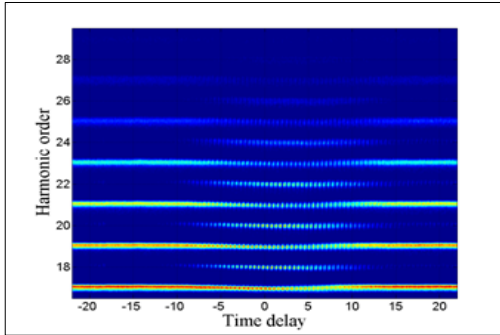


그림 1. 실험에서 얻은 스펙트로그램.

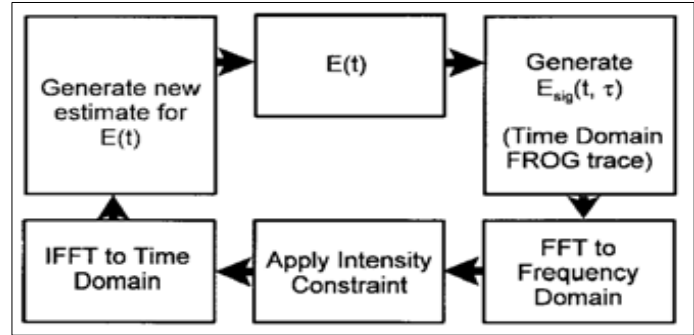


그림 2. FROG-CRAB PCGP 알고리즘.

실험을 통해 얻어진 광전자 스펙트럼을 FROG-CRAB (Frequency-resolved optical gating method for complete reconstruction of attosecond bursts) 방법⁽²⁾으로 분석하면 시간 영역에서 아토초 펄스의 형태를 알아낼 수 있다. FROG-CRAB 방법에서는 강력장 근사 (Strong field approximation) 를 이용하여 광전자 스펙트럼을 아래와 같은 형태의 식으로 표현한다.

$$S(W, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} dt G(t) E_X(t - \tau) e^{i(W + I_p)t} \right|^2$$

$$\text{where } G(t) = \exp \left\{ -i \int_{-\infty}^{\infty} dt' (\mathbf{v} \cdot \mathbf{A}(t') + A(t')^2/2) \right\}$$

여기서 $E_X(t)$ 는 고차조화파, W 는 광전자의 에너지, I_p 는 원자의 이온화 포텐셜, \mathbf{v} 는 전자의 최종 속도, \mathbf{A} 는 레이저의 벡터 포텐셜에 해당한다. 이 식은 일반적인 스펙트로그램의 형태에 해당하기 때문에 FROG 알고리즘을 통해 위상 정보를 얻을 수 있다. 여기서는 PCGP 알고리즘 (Principal component generalized projection algorithm)을 사용하였다. 그림 2에서 이 알고리즘의 개략도를 표시하였다. 이 과정을 여러 번 반복하여 얻은 고차조화파와 사이드밴드의 스펙트로그램이 실험에서 얻은 스펙트로그램과 원하는 오차 이내로 일치하면 고차조화파의 시간 영역 파동 함수를 $E_X(t)$ 로 얻게 되므로 아토초 펄스를 시간 영역에서 측정할 것과 같다.

실험을 통해 얻어진 스펙트럼을 FROG CRAB 방법을 이용하여 레이저 펄스의 에너지에 따른 분석을 수행하였다. 이를 통해 레이저 펄스와 발생된 아토초 펄스 사이의 관계에 대해 보다 명확하게 연구가 가능할 것이다.

1. P. B. Corkum, "Plasma Perspective on Strong-Field Multiphoton Ionization", PRL **71**, 1994-1997 (1993)
2. Y. Mairesse and F. Quere, "Frequency-resolved optical gating for complete reconstruction of attosecond bursts", PRA **71**, 011401 (2005)