

## 초강력 레이저에 의한 원자의 이온화의 안정화

### Stabilization of ionization in an intense laser field

권덕희<sup>1</sup>, 이해웅<sup>2</sup>, 이용주<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국원자력연구소, <sup>2</sup>한국과학기술원

hkwon@kaeri.re.kr

최근 수년간 원자의 쿨롱(Coulomb) 인력을 증가하는 전기장을 발생하는 강력한 레이저( $I > 10^{16}$  W/cm<sup>2</sup>)와 상호작용하는 원자계에서 보여지는 많은 흥미로운 비선형 현상들, 예를들면 다중광자 이온화(multiphoton ionization), 임계 이상의 이온화(above-threshold ionization), 고차조화파 발생(high-harmonic generation) 등에 대한 연구가 활발히 진행되어왔다. 또하나의 비선형 현상으로 원자의 이온화의 안정화(stabilization)가 있고, 이 현상은 레이저의 세기가 증가하면서 이온화율이 포화되거나 감소하는 것을 의미한다. 이온화의 안정화는 강력한 레이저에 의해 빠르게 진동하는 틀(Kramers-Henneberger frame)에서 개념적으로 이해되어 왔고, Floquet 이론으로 설명되어 왔으나 근본적인 동력학은 아직도 많은 비밀을 내포하고 있다[1].

본 연구에서는[2] 이온화의 안정화의 양자적인 파속 움직임(wave packet) 및 고전적인 입자의 앙상블(ensemble) 움직임을 비선형 동력학의 관점에서 비교 분석하였다. 원편광의 레이저와 상호작용하는 2차원 원자 모델을 고려하였고 다음식의 슈뢰딩거방정식을 풀었다.

$$i\frac{\partial}{\partial t}|\psi\rangle = \left(\frac{1}{2}p^2 + V(r) + F(t)(x\cos\omega t + y\sin\omega t)\right)|\psi\rangle.$$

여기서 쌍극자근사(dipole approximation)를 사용하였고, 시간에 따라 변하는 레이저의 전기장의 진폭은  $F(t) = F_0 \sin^2(\pi t/2T_{switch})$ 의 관계에 의해 켜지고( $t < T_{switch}$ ) 이후에는( $t \geq T_{switch}$ )  $F_0$ 로 유지된다. 포텐셜  $V(r)$ 은 쿨롱모델의 경우와 소프트코어 모델 ( $V(r) = -1/\sqrt{(r^2 + a^2)}$ ,  $a = 0.8a.u.$ )의 두가지 경우를 비교하였다. 이온화의 안정화가 일어나기 위해서는 광자의 에너지가 초기의 원자의 구속 에너지 보다 크고 폰더모티브(pondermotive) 에너지 보다 작아야 하므로 ( $F_0^2/2\omega^2 \geq \hbar\omega \geq |E_0|$ ), 레이저의 진동수를  $\omega = 2.2$  a.u. (2차원 수소원자의 기저에너지 2 a.u. = 54.4 eV)로 두고 레이저의 전기장의 진폭은  $0 < F_0 < 30.0$  a.u. ( $0 < I < 2.853 \times 10^{19}$  W/cm<sup>2</sup>)의 범위에서 변화시켰다.

그림 1은 레이저의 전기장의 세기의 변화에 따른 이온화율의 변화를 보여준다. 사각형 심볼은 초기 상태가 쿨롱 원자의 기저상태( $\psi_{100}$ ) 일때이고, 원형 심볼은 초기 상태가 쿨롱 원자의 들뜬 상태  $\psi_{322}$  일때이며, 삼각 심볼은 초기에 소프트 코어 원자의 기저상태에 있었을때의 이온화율을 나타낸다. 쿨롱 원자의 경우 레이저의 전기장의 세기  $F_0$ 가 12 a.u. 이상일 때 이온화율이 감소하는 이온화의 안정화가 일어나기 시작하였고, 소프트 코어 원자의 경우  $F_0$ 가 18 a.u. 이상일 때 이온화의 안정화가 일어나기 시작하였다.

이온화의 안정화 영역에서 전자의 고전적 앙상블 움직임을 살펴보면, 쿨롱 원자의 경우 초기에 들뜬 상태  $\psi_{322}$  일 때 앙상블 분포가 한 원형 궤도 주위에 국소화 되지만 초기에 기저 상태  $\psi_{100}$  일때는 국소화되지 않고 퍼지게 된다. 소프트 코어 원자의 경우 초기에 기저 상태에서 한 원형 궤도 주위에 국소화된다. 국소화 되는 원형 궤도는 레이저에 의한 전자의 빠른 진동움직임과 원자핵의 인력에 의한 Kepler 움직임을 비선형 공명에

의해 형성된다.

결론으로 쿨롱 원자의 초기 상태  $\psi_{100}$ 의 고전적 앙상블의 비 국소화된 움직임은 이온화의 안정화가 일어날 때 양자적 파속 움직임이 국소화 되는 것과 상반되는 결과로 이온화의 안정화가 순수한 양자적 움직임의 효과로 나타남을 볼 수 있다. 반면, 초기 상태가 쿨롱 원자의  $\psi_{322}$ 와 소프트 코어 원자의 기저상태일 경우는 양자적 움직임과 고전적 움직임이 서로 대응(correspondence)되게 된다.

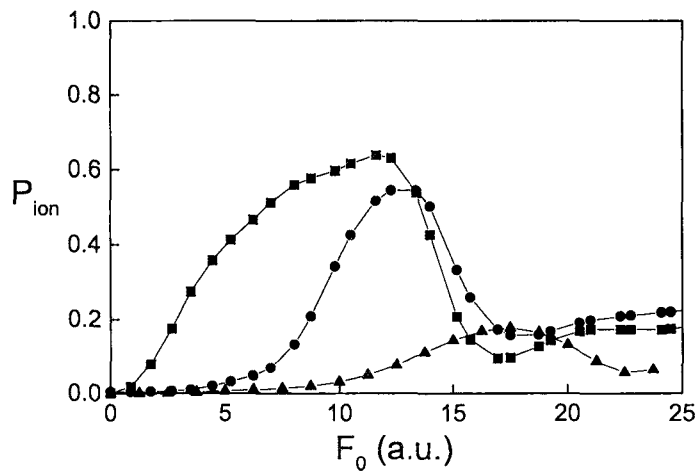


그림 1. 레이저의 전기장의 세기에 따른 이온화율의 변화

References

- [1] M. Protopapas, C. H. Keitel and P. L. Knight, Rep. Prog. Phys. **60**, 389 (1997)
- [2] D. H. Kwon *et al*, Phys. Rev. A **65**, 055401 (2002)