

# 결맞음 상대론적 비선형 톰슨산란을 이용한 아토초 x-선 발생

## Generation of attosecond x-ray using coherent Relativistic Nonlinear Thomson scattering

이기태

한국원자력연구소 양자광학기술개발부

klee@kaeri.re.kr

고강도 레이저의 발전으로 상대론적 플라즈마 물리라는 새로운 물리 영역이 개척되었다. 상대론적 플라즈마는 그 자체로 흥미 있는 분야일 뿐만 아니라 잠재적으로 많은 응용 가능성이 있어 더욱 주목을 받고 있다. 이 응용에는 전자, 이온, 양전자 같은 고에너지 입자 발생이나 감마선 발생<sup>(1)</sup> 등이 있다. 또한 초고속의 전자나 핵의 동역학 연구를 가능케 하는 펨토초 이하의 극초단 펄스 발생도 매우 주목받는 응용 분야 중의 하나이다.

펨토초 이하의 x-선을 발생하기 위한 여러 방법들이 제안되었고 실험적으로 구현이 되었다. 이러한 방법에는 Simulated Raman Scattering, 원자 기체와 고강도 레이저의 상호작용에 의한 High-order Harmonic Generation (HHG), 전자의 상대론적 비선형 운동을 이용하는 Relativistic Nonlinear Thomson Scattering (RNTS) 등이 있다. 이 중에서도 HHG는 가장 앞서있는 기술로 이미 수 백 아토초의 펄스를 발생, 측정하였으며, 가장 짧은 것으로는 Paul 등과<sup>(2)</sup> Kienberger 등이<sup>(3)</sup> 달성한 250 아토초이다. 특히 Kienberger 등은 단일 아토초 펄스를 발생시켰다. 하지만 HHG의 경우 조화파간의 위상 동기화의 근본적인 결함 때문에 약 130 아토초가 한계일 것으로 내다보고 있다.

레이저 펄스를 전자에 쬐면 전자는 진동을 하면서 입사 레이저와 같은 파장의 빛을 발산하는 Thomson 산란이 일어난다. 레이저 펄스의 강도를 더욱 증가시켜 다음의 normalized vector potential이 1 이상이 되면, 전자는 상대론적인 비선형 주기 운동을 하게 되어 레이저 펄스의 주파수에 대한 조화파를 발산하게 된다.

$$\alpha_0 = 8.5 \times 10^{-10} \lambda I^{1/2}, \quad (1)$$

RNTS는 이미 오래전에 알려져 왔으며 최근에는 실험적으로 밝혀지고 있다. 하지만 발생하는 조화파의 자세한 특성에 대한 연구는 최근까지 미흡한 상황이었다. 원편광된 고강도 레이저를 이용하여 펨토초 펄스를 만드는 방법이<sup>(4)</sup> 제안이 되기는 하였지만 실현 가능성에 대한 구체적인 연구가 남아있다. Lee 등은<sup>(5)</sup> 전자 하나에 대한 계산을 통하여 RNTS에서 발생하는 조화파의 자세한 특성을 밝혔으며 아토초의 극초단 펄스도 발생할 수 있음을 보였다.

RNTS는 일반적으로 incoherent 특성을 가지고 있다. 실제 실험에서 이를 이용하여 실험 결과에 대한 평가를 하기도 한다. 전자 하나하나에서 아토초 펄스가 발생하더라도 플라즈마 혹은 전자의 무리에서 발생하는 각각의 아토초 펄스가 incoherent한 중첩이 된다면 아토초의 특성은 사라지게 된다. 즉 플라즈마를 이용한 경우에도 단일 전자의 경우에서처럼 아토초 펄스를 발생하기 위해서는 공간적으로 coherent 중첩이 가능한 조건을 구하여야 한다.

Coherent 중첩 조건은 전자와 이온 간의 상호작용을 무시하고 레이저를 planewave로 근사를 함으로써 간단히 구해질 수 있다. 레이저 펄스가 각각의 전자에 도달하는데 걸리는 시간차와 각 전자에서 특정한 방향으로 방

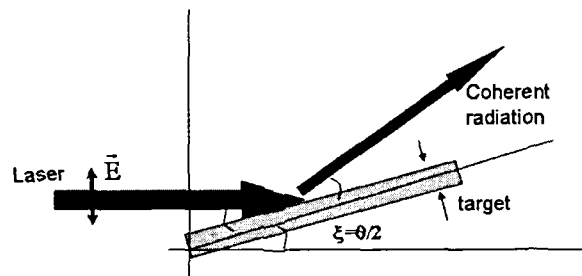


그림 1 결맞음 RNTS 조건

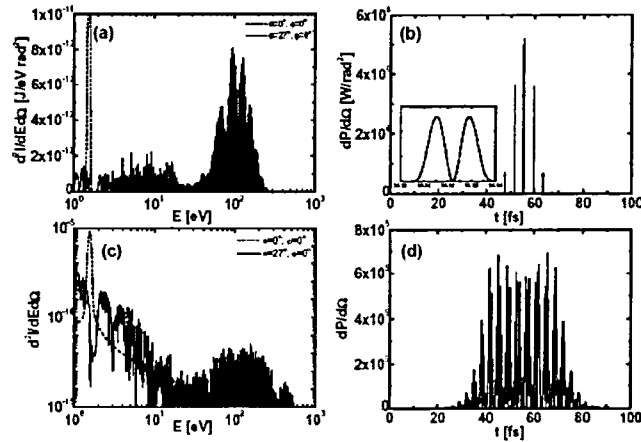


그림 2 Coherent 조건을 사용한 경우와 그렇지 않은 경우 발생하는 RNTS 비교

사선이 진행되는 시간차의 총합이 단일 전자에서 발생하는 펄스폭보다 작다는 조건을 사용하면 그림 [1]에서와 같은 coherent 중첩 조건이 구해진다. 즉 입사한 레이저의 거울 반사 방향으로 coherent하게 중첩된 펄스가 발생한다. 단 이 때 target의 두께,  $T$ 는 다음의 식에 의해 제한을 받는다.

$$T \leq \frac{c \Delta t_{FWHM}^s}{\sin \xi} \quad (2)$$

여기에서  $\Delta t_{FWHM}^s$ 는 단일 전자에서 발생하는 방사선의 펄스폭이다.

그림 [2]는 두께가 7 nm이고 coherent 조건을 사용한 경우 [그림 2. (a), (b)]와 그렇지 않은 경우 [그림 2 (c), (d)]에 발생하는 스펙트럼과 순간 출력을 비교한 것이다. Coherent 조건을 사용한 경우는 높은 에너지의 조화파가 많이 발생하고 단일 전자의 경우 발생하는 펄스폭인 약 7.7 아토초가 유지되지만, 그렇지 않은 경우에는 낮은 에너지 특히 선형 톱슨 산란에 의한 fundamental 에너지의 세기가 매우 높고 펄스폭이 매우 복잡하다는 것을 알 수 있다.

그림 [3]은 실험적으로 구현이 가능한 50 nm 두께의 target 사용한 경우의 분광 스펙트럼, 순간 출력, 그리고 공간 분포이다. Modulation이 뚜렷한 분광 스펙트럼이 나타나고, 25 아토초의 펄스폭을 얻을 수 있음을 보여준다. 그림 [1]에서 나타내는 coherent 조건은 특정한 방향인 거울 반사 방향에 대해서만 만족을 하기 때문에 매우 좁은 각 분포를 가진다.

F  
A

1. D. Umstadter et al, J. Phys. D: Appl. Phys. **36**, R151 (2003).
2. P. M. Paul et al, Science **292**, 1689 (2001).
3. R. Kiengerger et al, Nature **427**, 817 (2004).
4. V. P. Kaplan et al, Phys. Rev. Lett. **88**, 074801 (2002).
5. K. Lee et al., Opt. Express **11**, 309 (2003); K. Lee et al, Phys. Rev. E **67**, 026502 (2003).

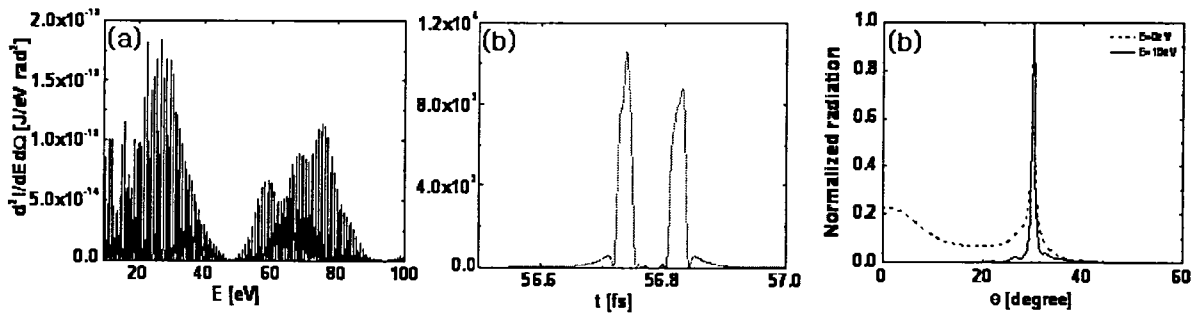


그림 3 두께가 50 nm인 타겟에서 발생하는 RNTS