

Enhanced Relativistic Nonlinear Thomson Scattered radiations with a tightly focused laser beam

이기태, 정상영*, 김동연*, 박성희, 정영욱
한국원자력연구원 양자광학연구부, *포항공과대학교 물리학과
klee@kaeri.re.kr

극초단 펄스는 원자내의 전자의 운동이나 심지어는 원자 핵 내부의 핵자들의 움직임을 관측할 수 있는 거의 유일한 도구라 할 수 있다. 이러한 이유로 많은 과학자들이 고강도 레이저 기술의 개발에 힘입어 펨토초 이하의 극초단 펄스를 만들려는 시도를 하고 있다⁽¹⁾.

레이저를 전자에 입사하면, 전자는 주기 운동을 하며 다시 이로 인해 레이저와 같은 주파수의 전자기파를 발생하게 되는, 즉 Thomson scattering이 발생한다. 이 때 입사한 레이저의 세기가 상대론적인 영역 ($I > 10^{18}$ W/cm²)이 되면 전자는 상대론적인 운동에 의한 비선형적인 주기 운동을 하게 되어 고차조화파를 발생하게 되는데 이를 Relativistic Nonlinear Thomson Scattered (RNTS) radiation이라 부른다.

최근에는 이러한 RNTS radiation을 이용하여 극초단의 펄스를 발생시킬 수 있는 이론적인 연구가 발표되었다. 하지만 강한 세기의 극초단 펄스를 만드는데 필요한 coherent 조건을 만족하기 위해서는 매우 얇은 고체 타겟이나 bunch length가 매우 짧은 전자빔을 사용하여야 하는 어려움이 있다⁽²⁾.

이러한 어려움을 극복하는 방법 중의 하나로는 고에너지의 전자빔에 tightly-focused 레이저빔을 사용하는 것이다. 즉 실제 전자빔이 강한 레이저의 전자기장에 노출되는 공간을 극소화함으로써 매우 짧은 전자빔을 사용하는 것을 피해가는 것이다. 실제 실험에 있어서는 상대론적 세기의 레이저 세기를 만들기 위해서는 강한 집속을 하여야 하므로 이것은 자연스럽게 이루어지는 것이라 할 수 있다. 하지만, 레이저를 강하게 집속하게 되면 기존의 paraxial Gaussian approximation이 더 이상 맞지 않게 된다.

레이저의 집속 크기가 레이저의 파장에 근접하면, 기존의 근사는 더 이상 맞지 않게 되고 Maxwell 방정식 혹은 파동 방정식의 정해를 사용하여야 한다. 하지만 이를 해석적으로 구하는 것은 불가능하므로 expansion parameter인 $\epsilon = 1/w_0$ 으로 근사한 series 해를 사용하게 된다. 이 때 w_0 는 레이저빔의 waist size이다⁽³⁾. 그림 1은 레이저의 파장이 $0.8 \mu\text{m}$ 이고 $w_0 = 1.5 \mu\text{m}$ 인 경우, 집속면에서 레이저 전기장의 각 성분의 contour plot이다. 이 때 레이저는 x 방향으로 선형편광을 가지고 있는 것으로 하였다. 그림에서 보는 것처럼 x 방향의 전기장은 기존의 Gaussian 형태로 잘 나타나지만, paraxial Gaussian 근사 (혹은 0차 근사)에서는 볼 수 없었던 y, z 방향으로의 전기장 성분이 있음을 알 수 있다. 특히 z 방향의 전기장은 x 방향의 전기장과는 위상이 $\pi/2$ 차이가 나기 때문에 비록 레이저의 세기가 작더라도 전자의 운동에 큰 영향을 주게 된다. 또한 x 방향의 고차 성분은 전체 레이저의 크기에는 영향을 주지 않지만, 레이저와 같은 방향으로 거의 빛의 속도로 운동하는 전자의 경우에는 0차 성분의 전기장과 자기장이 상쇄되는 효과로 인해 실제 운동과 그에 따른 RNTS radiation에는 매우 큰 영향을 주게 된다.

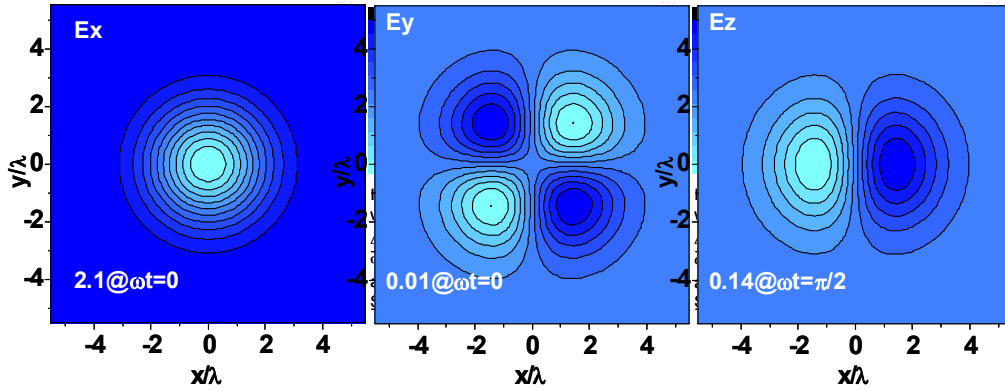


Fig. 1. Contour plots of electric fields at focal position for a linearly polarized laser pulse to the x-axis.

그림 2의 (a)는 레이저장의 series 해의 차수를 증가시키면서 전자의 운동을 계산한 것이며 (b)는 이로 인해 발생하는 RNTS radiation의 고차조화파 스펙트럼이다. 이 때 레이저와 함께 진행되는 전자의 $\gamma = 20$ 이며 레이저의 세기는 $2.8 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ 이다. 이 결과는 레이저장의 고차항은 레이저의 세기 측면에서는 미비하지만, 전자의 운동에 지대한 영향을 주며 특히 RNTS radiation에는 매우 큰 영향을 주는 것을 보여준다.

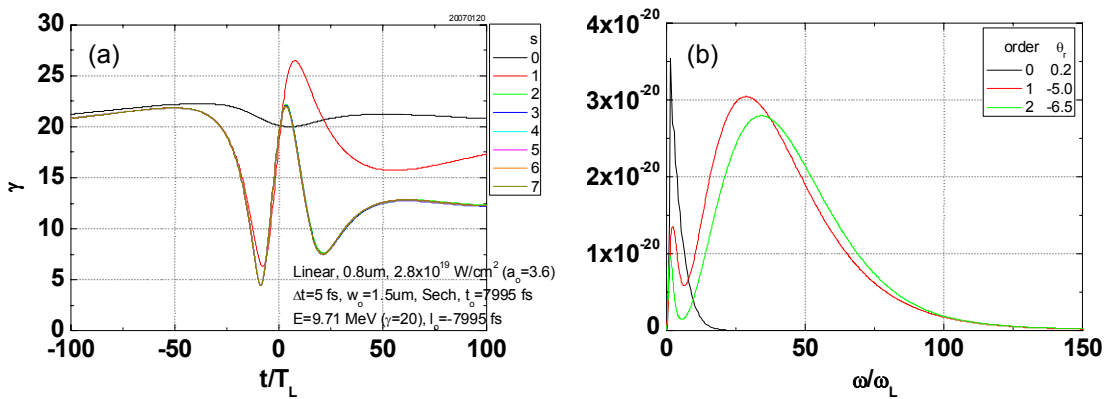


Fig. 2 The variations of (a) dynamics of an electron under an intense laser pulse and (b) its harmonic spectra on the inclusion of higher order terms in the laser fields. (s=0: Gaussian beam, s=1: inclusion of the lowest E_z term, s=2: inclusion of the lowest E_y term and second E_x term, etc.)

1. P. Agostini et al., Rep. Prog. Phys. **67**, 813 (2004).
2. K. Lee et al., Phys. Plasmas **12**, 043107 (2005).
3. Y. I. Salamin, J. Phys. B **38**, 4095 (2005).