상대론적 고밀도 플라즈마 연구

DOI: 10.3938/PhiT.22.044

김이종·최일우

Investigation of a Relativistic Overdense Plasma

I Jong KIM and Il Woo CHOI

The research on a relativistic overdense plasma by using ultra-intense laser pulses is one of the most attractive topics not only in high-field science but also in many other applications. Here, we will discuss the recent progress and the current status of proton/ion acceleration, as well as relativistic high-harmonic generation, which are the most prominent topics in relativistic overdense laser-plasma interactions.

서 론

고출력 레이저와 상호작용하는 플라즈마는 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 표적 내의 전자밀도(n_e)가 임계밀도(n_c)보다 큰 경우를 고밀도 플라즈마, 전자밀도가 임계밀도보다 작은 경우를 저밀도 플라즈마라고 정의할 수 있다. 따라서 일반적으로 고밀도 플라즈마 구현에 적합한 표적은 고체 ($n_e \sim 10^{23} \text{ cm}^{-3}$), 저밀도 플라즈마 구현에 적합한 표적은 기체 ($n_e \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)를 들 수 있다. 최근에는 임계밀도 근처에 해당하는 표적들, 예를 들어 기공(foam 또는 porous) 표적 혹은 고밀도 가스 제트 표적 등이 개발되어 있는데, 이들의 밀도는 $\sim 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 의 영역에 있다. 여기서는 주로 레이저와 고밀도 플라즈마

와의 상호작용을 중심으로 논의하고자 한다.

일반적으로 레이저가 고체에 입사하면 임계밀도를 훨씬 뛰어넘는 전자밀도 때문에 레이저가 매질 깊숙이 진행할 수 없다. 하지만 매질의 표면에서 이온화에 의해 다수의 전자가 발생하면, 전자들 간의 충돌에 의한 에너지 흡수보다는 충돌에 의하지 않는 에너지 흡수(resonance absorption, vacuum heating, JxB heating)가 주도적으로 일어나서 레이저 진행 방향으로 MeV 이상의 전자빔이 형성된다.^[1] 이 고밀도 고에너지 전자 흐름은 십억 가우스 이상의 정자기장을 만들어내고, 양성자 및 이온과 분리되면서 TV/m 수준의 강한 정전기장을 만들어 낸다. 이 강한 정전기장은 레이저 펄스폭 정도의 시간 안에 형성되는데, 이 힘은 양성자 및 이온을 끌어당겨 강한 충격파를 만들어 낼 수 있다. 상대론적 영역에서는 전자의 관성이 커져서 임계밀도가 실질적으로 감소하는 효과가 일어나서 레이저 펄스가 더 깊숙이 진행할 수 있는데(relativistic transparency), 두께가 얇은 고체 표적의 경우에는 레이저 펄스가 물질을 투과하는 일이 가능해지고 훨씬 더 효율적으로 레이저 에너지가 흡수될 수 있다. 한편 고체 표면에서 일부의 전자는 레이저 진행 방향으로 진행하지 않고 레이저 전자기장에 의해 격렬한 진동 운동을 할 수 있으므로, 강력한 극초단 엑스선 펄스가 발생할 수 있다. 레이저 집속강도가 10^{23} W/cm^2 수준이 되면 양성자 및 이온도 레이저에 의해 직접적으로 가속되고 복사 반작용 효과가 커져서 한층 더 복잡한 동역학적 양상을 보일 것이다.^[2]

이러한 고밀도 레이저 플라즈마 연구는 크게 두 가지로 요약될 수 있다. 첫째는 고밀도 레이저 플라즈마에서 나타나는 근본적인 물리현상들 이를테면 에너지 흡수 및 반사, 전자 전도, 극한의 전기장 및 자기장 형성, 충격파 및 불안정성(instability), 그리고 복사감쇄(radiation damping) 등과 관련

저자약력

김이종 박사는 2006년 한국과학기술원에서 물리학 박사학위를 받았다. 현재 고등광기술연구소 초강력 레이저연구실에 선임 연구원으로 재직 중이며, 양성자/이온 가속 및 상대론적인 고차 조화파 연구를 수행하고 있다. (ijkim@gist.ac.kr)

최일우 박사는 1997년 한국과학기술원에서 이학박사(물리학) 학위를 받았으며, 한국표준과학연구원과 일본 오사카대학 Institute of laser engineering에서 박사후연구원을 거쳐, 2003년부터 광주과학기술원 고등광기술연구소에 재직 중이다. 주요 연구 분야는 극초단 고출력 레이저를 이용한 엑스선 및 입자빔 발생과 응용이다. (iwchoi@gist.ac.kr)

REFERENCES

- [1] I. W. Choi and N. Hafz, Phys. High Technol. **16**(6), 9 (2007).
- [2] A. Di Piazza, C. Müller, K. Z. Hatsagortsyan and C. H. Keitel, Rev. Mod. Phys. **84**, 1177 (2012).

Fig. 1. Secondary source generation using ultraintense laser. (see Ref. 3)

된 기초 연구이고, 둘째는 현재 가속기를 기반으로 한 양성자 및 이온 치료기와 미래에 본격적으로 경쟁할 수 있는 레이저 기반의 양성자/이온 가속과 관련된 원천기술 개발 연구이다.

본 론

1. 연구단의 주 연구분야

레이저와 고밀도 플라즈마와의 상호작용을 통해서 그림 1에서 보는 것처럼 다양한 종류의 2차 선원들이 발생할 수 있다. 양성자 및 이온, 중성자, 전자 및 양전자, 엑스선 및 감마선 그리고 테라 헤르츠 파 등뿐만 아니라 상대론적인 고차 조화파(relativistic high order harmonics, RHOH) 등이 있다. 또한 극단적인 물리환경들, 예를 들어 고자기장 ($> \text{Mega gauss}$ 이상) 혹은 고전류 ($> 10^8 \text{ A/cm}^2$) 등의 형성이 가능하다. 이들 중에서 현재 연구단에서 주로 관심을 갖고 연구에 집중하고 있는 분야는 양성자 및 이온 가속 그리고 상대론적인 고차 조화파이다.

2. 연구의 필요성

구체적으로 이들 연구의 필요성은 다음과 같이 설명될 수 있다. 첫째 양성자 및 이온 가속의 경우 사용되는 레이저 시스템의 사이즈에 따라 발생할 수 있는 양성자의 에너지가 다르고 이에 따른 적용 영역이 다르다. 일반적으로 100 TW 레이저로부터 발생할 수 있는 양성자의 에너지는 10 MeV 정도이고, 이들은 양성자 radiography (표적의 밀도측정에 사용 가능), Deflectometry (전자기장 측정에 사용), 물질의 isochoric heating, 그리고 다양한 물질 연구 등에 적용될 수 있다. 하지만 레이저 출력이 1 PW가 되면 이로부터 발생할 수 있는 양성자의 최대 에너지는 100 MeV 혹은 그 이상이 될 것으로

Fig. 2. (a) The feasibility of proton & heavy ion therapy using table top laser facility. (Left figure was referenced from Heidelberg Ion Beam Therapy Facility.) (b) Compact heavy ion collider driven by ultraintense laser. (Courtesy from S. V. Bulanov)

기대된다. 이를 이용하면 그림 2(a)와 같이 기존에 양성자 암 치료에 이용하는 사이클로트론 및 싱크로트론^[4]을 대체하여, 향후 실험실 규모의 공간에 설치할 수 있는 차세대 레이저 기반 탁상형 양성자 암치료기를 개발할 수 있을 것이다.^[5] 그리고 레이저 출력이 10 PW 정도가 되면 이로부터 발생 가능한 양성자의 에너지가 GeV 이상이 될 것으로 기대되기 때문에 그림 2(b)와 같이 초강력 레이저를 이용한 소형 양성자 및 이온 충돌기를 구현할 수 있을 것으로 생각된다. 본 연구단은 현재 보유한 1 페타와트급 티타늄 사파이어 레이저를 이용하여, 향후 양성자 암치료에 필요한 200 MeV 정도의 양성자 에너지를 구현할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

둘째 상대론적인 고차 조화파의 경우, 현재 비상대론적인 레이저와 기체 원자와의 상호작용으로부터 발생하는 고차 조화파의 특성을 뛰어넘을 것으로 기대된다. 이는 고체 표면에서 발생된 고차 조화파의 경우에는 기체 원자에서 발생하는 고차 조화파와 달리, 이온화에 의한 최고 차수의 잘림 위치(cut-off)가 정해져 있지 않고, 입사하는 레이저의 세기에 비례하게 된다. 이 때문에 레이저의 세기가 강해질수록 발생하는 고차 조화파의 세기도 강해지고 최고 차수는 계속해서 증가하여 결국 매우 강한 아토초(attosecond, 10^{-18} s) 혹은zepto초(zeptosecond, 10^{-21} s) 펄스를 발생시킬 수 있는 기반이 된다. 그림 3은 레이저의 강도가 강해질수록 이러한 레이저와의 상호작용으로 발생

REFERENCES

- [3] H. Daido *et al.*, Rep. Prog. Phys. **75**, 056401 (2012).
- [4] Dieter Schardt and Thilo Elsässer and Daniela Schulz-Ertner, Rev. Mod. Phys. **82**, 383 (2010).
- [5] S. V. Bulanov and V. S. Khoroshkov, Plasma Physics Reports **28**, 453 (2002).

하는 펄스의 시간폭이 계속해서 짧아질 수 있음을 예측하고 있다. 이를 통해 발생한 짧은 펄스폭을 가진 펄스를 이용할 경우, 펄스폭에 따라 그 응용 범위가 다르다. 예를 들어 펨토초(femtosecond, 10^{-15} s) 펄스인 경우는 분자의 동역학을 볼 수 있을 만큼 시간 분해능이 가능하고, 아토초 펄스의 경우 원자의 동역학을, 켈토초의 경우에는 원자를 구성하는 핵자(양성자 및 중성자 등) 동역학을 연구할 수 있는 기반이 된다.

3. 국내외 연구 현황

양성자 및 이온 가속의 경우, 국외에는 미국 Los Alamos National laboratory, 영국 Rutherford Appleton laboratory, 프랑스 Laboratoire d'Utilisation des Lasers Intenses 등에서 Nd:glass 레이저 시스템을 이용한 양성자 및 이온 가속 관련 연구를 주도하고 있다. 가장 최근에는 Los Alamos National laboratory에서 Trident laser system을 이용하여 100 MeV 이상의 양성자를 가속하는데 성공하였다. 하지만 나노초의 긴 펄스폭을 가진 Nd:glass 레이저 시스템의 경우 반복률이 시간당 하나의 레이저 펄스를 공급할 수 있는 수준 이하이기 때문에 향후 실질적인 응용 연구에 있어 근본적인 문제점을 갖고 있다. 한편 펨토초의 짧은 펄스폭을 가진 티타늄 사파이어 레이저를 이용하여 양성자 및 이온 가속연구를 수행하는 기관은 일본 Japan Atomic Energy Agency (250 TW급), 프랑스 Laboratoire d'Optique Appliquée (100 TW급), 독일 Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (150 TW급), 독일 Friedrich-Schiller-University Jena (100 TW급), Max-Planck institute for Quantum optics (10 TW급), Max-Born-Institute (100 TW급), 스웨덴 Lund 대학교 (수십 TW급), 미국 Texas Austin (PW급 Ti:sapphire/Nd:glass hybride), Nebraska (200 TW급) 등이다. 최근에는 일본 Japan Atomic Energy Agency에서 얇은 금속 박막(μm 급)에 250 TW급 레이저를 집속하여 40 MeV급의 양성자빔을 얻는데 성공하였다. 국내에는 광주과학기술원 고등광기술연구소, 한국원자력연구소, ETRI 등을 중심으로 고밀도 레이저 플라즈마를 이용한 양성자 및 이온 가속 관련 연구를 수행해오고 있다. 특히 광주과학기술원 고등광기술연구소에서는 최근에 100 TW 레이저 시스템을 이용하여 10 MeV급,^[6,7] PW 레이저 시스템을 이용하여 45 MeV^[8] 급 양성자에 에너지를 얻는데 성공하여, 고에너지 양성자 가속 연구에 있어 세계적인 주도권을 확보할 수 있는 경쟁력을 갖게 되었다.

한편 상대론적인 고차 조화파의 경우 현재까지 전 세계적으로 Multi-keV 수준의 상대론적인 고차 조화파를 발생시킨 사례는 영국 Rutherford Appleton laboratory에서 거대 레이저 시스템인 Nd:glass 레이저를 이용하여 구현된 것이 유일하다. 하지만 Nd:glass 레이저 시스템은 반복률이 너무 낮아서, 고차

Fig. 3. More intense, shorter pulses (see http://www.munich-photonics.de/fileadmin/media/Toshis_Seite/IZEST_Brochure.pdf).

조화파를 본격적으로 응용하는 데 심각한 문제를 가지고 있다. 하지만 현재 광주과학기술원 고등광기술연구소에 이미 구축되어 있는 0.1 Hz 페타와트급 티타늄 사파이어 레이저 시스템을 이용할 경우, 이를 쉽게 극복할 것으로 기대된다. 이미 최근 100 TW 레이저 시스템을 이용한 고차 조화파 실험결과^[9]에서 알 수 있듯이, 기존 ROM에서 발생하는 고차 조화파에 비해서 OFM에서 발생된 고차 조화파의 경우, 훨씬 더 높은 차수와 변환효율을 얻을 수 있음이 입증되었다(ROM과 OFM에 관해서는 상대론적 고차 조화파에서 자세히 논의할 것임). 특히 OFM의 경우 ROM과 비교해서 매우 높은 수준의 세기 대조비(high temporal contrast ratio)를 가진 레이저빔이 필요 없다는 장점을 가지고 있다. 이를 PW 티타늄 레이저 시스템에 적용할 경우, 기존 Nd:glass에서 이루어진 결과를 훨씬 뛰어넘는 결과를 얻게 될 것으로 기대된다. 이를 통해서 향후 Multi-keV 영역에서 매우 강한 아토초 혹은 켈토초 펄스를 만들 수 있는 기반을 제공할 수 있을 것이다.

REFERENCES

- [6] I. W. Choi, I. J. Kim, K. H. Pae, K. H. Nam, C.-L. Lee, H. Yun, H. T. Kim, S. K. Lee, T. J. Yu, J. H. Sung, A. S. Pirozhkov, K. Ogura, H. Daido and J. Lee, Appl. Phys. Lett. **99**, 181501 (2011).
- [7] D. Margarone, O. Klimo, I. J. Kim, J. Prokuepek, J. Limpouch, T. M. Jeong, T. Mocek, J. Psikal, H. T. Kim, J. Proska, K. H. Nam, L. Stolcova, I. W. Choi, S. K. Lee, J. H. Sung, T. J. Yu and G. Korn, Phys. Rev. Lett. **109**, 23801 (2012).
- [8] I. J. Kim, K. H. Pae, C. M. Kim, H. T. Kim, J. H. Sung, S. K. Lee, T. J. Yu, I. W. Choi, C.-L. Lee, K. H. Nam, P. V. Nickles, T. M. Jeong and J. Lee, accepted in Phys. Rev. Lett. (Arxiv:1304.0333) [physics.plasm-ph].
- [9] I. J. Kim, K. H. Pae, C. M. Kim, H. T. Kim, H. Yun, S. J. Yun, J. H. Sung, S. K. Lee, J. W. Yoon, T. J. Yu, T. M. Jeong, C. H. Nam and J. Lee, Nature. Commun. **3**, 1231 (2012).

4. 양성자 및 이온 가속

10^{18} W/cm^2 이상의 상대론적인 영역의 세기를 가진 레이저 빔이 표적에 집속될 경우 표적을 구성하고 있는 이온들과 전자의 질량 차이로 인해서 전자는 레이저의 전자기장에 의해 가속되어 표적의 뒷면을 빠져나오게 된다. 이때 표적 뒷면에 묻어있던 수소와 탄소 등의 불순물은 앞서 빠져 나온 고에너지 전자층과 강한 정전기장(electrostatic field)을 형성하게 된다. 이같은 정전기장에 의해 순간적으로 양성자 및 탄소 등의 이온이 레이저의 진행 방향으로 가속된다. 이와 같은 가속 메커니즘은 Target Normal Sheath Acceleration (TNSA)으로 잘 알려져 있고, 지난 십수 년간 많은 연구가 진행되어 왔다(그림 4 참조). TNSA의 실험적 구현을 위해서는 10^{18} W/cm^2 이상의 레이저 세기가 필요하고, 사용되는 표적의 두께가 일반적으로 μm 수준이다. 이때 발생된 양성자 스펙트럼은 지수함수적으로 감소하는 전형적인 연속 스펙트럼의 모습을 형성하고 있고, 전자 에너지는 주로 열전자(thermal electron)에 의한 넓은 분포를 가지게 된다. 이때 레이저 강도에 따른 양성자 에너지 증가(energy scaling)는 $I^{1/2}$ (레이저 세기 I)에 비례하는 모습을 가지게 된다. 한편 이온과 전자층 사이에서 형성되는 정전기장(electrostatic field)과 레이저의 pondermotive 힘과의 균형(balance) 내에 의해 가속되는 양성자는 Radiation Pressure Acceleration(RPA)로 알려져 있다. 이같은 RPA 메커니즘을 구현하기 위해서는 앞서 TNSA에 비해서 훨씬 더 까다로운 실험 조건들을 만족해야 한다. 우선 레이저 세기는 적어도 10^{20} W/cm^2 이상이 되어야 하고, 사용되는 표적의 두께는 수십 nm급 정도로 매우 얇아야 한다. 이때 수십 nm 두께의 표적이 레이저 펄스와 원활한 상호작용을 위해서는, 주펄스(main pulse)보다 시간적으로 앞서 도달하는 자발 증폭 방출(Amplified spontaneous emission, ASE)과 선행 펄스(prepulse) 등에 의해 얇은 표적이 영향을 받지 않을 만큼, 매우 높은 수준의 세기 대조비(high contrast)가 요구된다. 이때 발생하는 양성자 에너지 스펙트럼은, 공간적으로 잘 정의된 전자층을 따라 가속되는 양성자로부터 발생하기 때문에 일반적으로 선평이 좁은 준단일(quasi-monoenergetic) 에너지 양성자 스펙트럼을 가지고, 전자 에너지 스펙트럼 또한 주로 집단 전자(collective electron)들에 의해 폭이 좁은 분포를 가지게 된다. 이때 레이저 세기에 따른 양성자 에너지 증가(energy scaling)는 레이저 세기(I)에 선형으로 비례하는 모습을 가지게 된다.

매우 얇은 표적을 이용하여 양성자를 가속하려면 앞서 언급했던 것처럼 매우 높은 수준의 세기 대조비가 필수적이다. 이를 위해 다양한 실험적인 기술들이 개발되어 왔다. Optical parametric chirped pulse amplification(OPCPA)를 비롯하여, cross polarized wave(XPW), plasma mirror(PM) 등이 대표적

Fig. 4. Two mechanisms of proton/ion acceleration (a) TNSA, (b) RPA (Courtesy from X. Q. Yan).

Fig. 5. Maximum proton energy and its scaling. (see Ref. 8).

이고, 현재 연구단에서는 이들 중 double plasma mirror (DPM)를 이용하여 세기 대조비의 향상을 이루었다.^[10] DPM으로부터 얻어진 고대조비 레이저 펄스는 표적 챔버 안에서 비축 포물 거울(off-axis parabolic mirror)에 의해 집속된 후 표적에 입사된다. 양성자 에너지 스펙트럼을 측정하기 위하여 자석(magnet)과 전극(electrode)으로 이루어진 톰슨 파라볼라(Thomson parabola) 이온 분석기를 이용하였다. 이때 포물선 모양을 가진 이온 궤적(ion trace)을 형광판(phosphor screen)을 가진 microchannel plate(MCP)로 세기를 증폭하고 Charge couple device(CCD)를 이용하여 실시간으로 영상을 촬영한다.

양성자 및 이온 검출 시스템을 이용하여 얻어진 양성자의 실험결과는 그림 5와 같다. 그림에서 x축은 레이저의 강도를, y축은 최대 양성자 에너지를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이, 표적의 두께가 10, 20, 30 nm와 같이 얇은 경우, 레이저 강도가 낮은 영역에서는 양성자 에너지가 레이저 강도의 제곱근에 비례하여 증가하지만, 이후 특정한 레이저 강도를 넘어서면 레이저 세기에 대해 선형으로 비례하는 모습을 나타내고 있다. 이는 앞서 언급한 것처럼 양성자 가속 메커니즘이 TNSA에서 RPA로 전이되는 양상을 보여주고 있다. 한편 50, 70, 100 nm와 같이 표적이 상대적으로 두꺼운 경우는, 실험에 적용된

REFERENCES

- [10] I. J. Kim, I. W. Choi, S. K. Lee, K. A. Janulewicz, J. H. Sung, T. J. Yu, H. T. Kim, H. Yun, T. M. Jeong, J. Lee, Appl. Phys. B 104, 81 (2011).

Fig. 6. Schematic diagram of relativistic high-order harmonic generation.

레이저 강도 전체 영역에 대해 양성자 에너지가 레이저 강도의 제곱근에 비례하여 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 전형적인 TNSA 가속 메커니즘에서 나타나는 일반적인 특성에 해당한다. 이로부터 처음으로 TNSA와 RPA가 동시에 작동하는 복합 가속(hybrid acceleration) 메커니즘을 관측하는데 성공하였다. 향후 레이저 세기를 더욱 증가시켜 100 MeV 이상의 양성자 빔구현을 통해 실질적인 레이저 기반 양성자 암치료를 위한 양성자-바이오 기초기술을 선도하고자 한다.

5. 상대론적 고차 조화파

그림 6과 같이 레이저장이 고체 표적의 표면 위로 입사할 경우, 시간적으로 먼저 입사한 자발 증폭 방출(ASE)나 선행 펄스 혹은 주펄스(main pulse)의 앞부분에 의해 발생한 플라즈마 내에서 상대적으로 가벼운 전자층이 레이저 진동수에 따라 플라즈마-진공 교차지점(plasma vacuum interface)을 기준으로 앞뒤로 진동하게 된다. 이때 앞뒤로 진동하는 전자층의 빠르기는 빛의 속도에 가까워지고, 시간적으로 연이어 입사하는 주펄스를 반사시키게 된다. 이때 반사하는 레이저빔은 빛의 속도에 가깝게 움직이는 전자층에서 반사했기 때문에 상대론적인 도플러 천이(relativistic Doppler shift)를 겪는다. 그리고 반사된 레이저빔이 얻게 되는 진동수 천이의 최대값은 로렌츠 인자(Lorentz factor, γ)의 제곱에 비례하는 $\sim 4\gamma^2$ 를 따르고, 진동수와 푸리에 변환관계(Fourier relation)에 있는 시간, 다시 말해서 반사한 레이저빔이 가질 수 있는 펄스폭의 최소값은 $1/4\gamma^2$ 에 비례하게 된다. 따라서 반사한 레이저빔은 입사한 레이저장의 펄스폭보다 짧아지게 되고, 진동수 천이 정도에 따라 아토초 심지어는 펨토초 펄스폭을 가진 레이저 펄스도 발생시킬 수 있다.

현재 레이저와 고체 표적으로부터 발생하는 고차 조화파에는

Fig. 7. (a) CWE mechanism, (b) ROM mechanism.

그림 7과 같이 두 가지 메커니즘이 널리 알려져 있다. 첫째 비상대론적인(non-relativistic) 영역에서 전자기장과 플라즈마 진동(plasma oscillation) 간의 위상 정합(phase matching)에 의해 발생하는 coherent wake emission(CWE)이 있다. CWE를 실험적으로 구현하기 위해서는 반드시 10^{-10} 이상의 고대조비 레이저빔이 필요하고, CWE에 의해 발생하는 고차 조화파의 최대 차수는 타겟의 플라즈마 진동수(plasma frequency)에 의해서 정해진다. 따라서 CWE 메커니즘으로 발생하는 고차 조화파의 최대 차수는 일반적으로 20차를 넘지 못한다. 하지만 ROM(Relativistic oscillating mirror) 메커니즘에 의해 발생하는 고차 조화파는 플라즈마-진공 경계 상에서 매우 빠르게 진동하는 전자층에서 반사하는 레이저빔에 의해 형성된다. ROM 역시 실험적인 구현을 위해서는 반드시 10^{-10} 이상의 고대조비 레이저빔이 필요하고, 이 때문에 $1\ \mu\text{m}$ 미만의 매우 짧은 플라즈마 밀도구배 길이(plasma density scaling length)를 형성해야 한다. 하지만 이 경우는 CWE와 달리 고차 조화파의 최대 차수가 로렌츠 인자(γ)의 제곱에 비례하므로, 입사하는 레이저빔이 강해질수록 발생하는 고차 조화파의 차수도 계속해서 커지게 된다.

최근에 우리는 기존의 ROM과는 전혀 다른 조건에서 상대론적인 고차 조화파를 발생시키는데 성공하였다. 가장 큰 차이점은 기존 고차 조화파 발생에서 반드시 적용되었던 고대조비 레이저를 사용하지 않고, 일반적인 대조비를 가진 레이저를 사용하여, 기존 ROM보다 훨씬 우수한 고차 조화파 스펙트럼을 얻는데 성공하였다. 그림 8(a)는 이중 플라즈마 거울(DPM)을 사용하여 매우 높은 세기 대조비를 가진 레이저로부터 얻어진 결과이다. 그림에서 보듯이 고차 조화파 스펙트럼의 기울기는 ROM 메커니즘에서 예측하는 $n^{-8/3}$ 를 매우 잘 따르고 있음을 확인할 수 있다. 측정된 고차 조화파의 최대 차수(잘림위치, cut off)는 43차 정도이다. 반면 이중 플라즈마 거울을 사용하지 않은, 낮은 세기 대조비를 가진 레이저로부터 얻어진 고차 조화파의 최대 차수는 고대조비 레이저를 사용한 결과보다 훨씬 높은 164차까지 확장되어 있다. 164차는 4.9 nm에 해당하

Fig. 8. (a) HOH spectrum obtained with DPM (b) HOH spectrum obtained without DPM. (see Ref. 9)

고, 물투과창 (2.3 - 4.4 nm) 영역에 매우 가깝다. 또한 잘림 위치의 확장뿐만 아니라 변환효율 역시 훨씬 높다. 이를 설명하기 위해서 기존의 ROM이 아닌 새로운 메커니즘을 개발하였다.

그림 9는 매우 긴 저밀도 플라스마 내에서 형성되는 oscillatory flying mirror (OFM)의 형성과 이로부터 발생하는 고차 조화파를 보여주고 있다. 우선 시간적으로 앞서 도달하는 자발 증폭 방출(ASE)과 선행 펄스에 의해 표적 앞에 매우 긴 저밀도 플라스마가 형성된다. 이후 레이저의 주펄스가 저밀도 플라스마를 진행할 때, 레이저빔의 pondermotive 힘에 의해 레이저 빔의 진행 방향으로 전자들이 밀려 올라가면서 비교적 높은 밀도를 가진 전자층(electron sheet)을 형성하게 된다. 이후 pondermotive 힘의 방향이 바뀌면서 전자층 역시 진행 방향을 거슬러 움직이게 되고 매우 짧은 시간 내에 빛의 속도에 가까워진다. 이후 원래의 저밀도 플라스마 안으로 사라질 때까지 이러한 전자층에서 반사하는 레이저장은 상대론적인 도플러 효과로 인해서 높은 진동수 성분들을 포함하게 된다. 그리고 이 같은 전자층은 레이저의 펄스폭 내에서 여러 개가 형성된다. 최종적으로는 이러한 다수의 전자층(multiple electron sheet)들에서 반사하는 레이저장으로부터 상대론적인 고차 조화파가 발생하게 된다. 특히 이같은 과정에서 발생된 전자층은 기본적으로 레이저 진동수에 의한 진동 운동(oscillating motion)뿐만 아니라, 레이저장의 pondermotive 힘에 의한 비행 운동(flying motion)을 포함하고 있기 때문에, oscillatory flying mirror (OFM) 메커니즘으로 명칭을 정의하였다. 이러한 OFM 메커니즘에 의해 발생하는 상대론적인 고차 조화파는 기존의 ROM으로 발생한 고차 조화파에 비해 두 가지 중요한 이점들을 가지고 있다. 첫째는 OFM 메커니즘은 ROM에 비해서 전자층의 이동속도가 훨씬 빠르기 때문에 로렌츠 인자(γ)가 크다. 이 때문에 고차 조화파의 잘림 위치가 훨씬 더 높게 형성된다. 둘째 OFM 메커니즘에서 나타나는 전자층은 그 개수가 여러 개인 반면, ROM의 경우에는 표적 표면 주위에서 진동하기 때문에

Fig. 9. Formation of OFMs and RHHG in a long underdense plasma. (see Ref. 9)

1개의 전자층만이 형성된다. 이 같은 차이 때문에 고차 조화파의 변환효율이 ROM에 비해서 훨씬 높다. 향후 페타와트 레이저를 이용하여 얻을 수 있는 매우 강한 multi-keV 수준의 상대론적인 고차 조화파를 통해 single shot attosecond/zeptosecond spectroscopy를 할 수 있는 기반을 열고자 한다.

결론

초강력 레이저를 이용한 상대론적 고밀도 플라스마 연구에 대한 소개와 현재까지 본 연구단에서 중점적으로 추진하고 있는 양성자 및 이온 가속, 그리고 상대론적인 고차 조화파 발생에 대한 내용을 중심으로 살펴보았다. 특히 탁상형 수준의 레이저 시스템을 이용한 차세대 양성자 암치료기의 개발 가능성으로 각광받고 있는 양성자 및 이온 가속 연구, 원자 및 이온을 구성하는 핵자(양성자 및 중성자 등) 동역학을 연구할 수 있는 아토초 및 켈토초 펄스로서의 가능성으로서 주목받고 있는 상대론적인 고차 조화파는 현재 전 세계적으로 활발히 연구되고 있다. 또한 레이저의 강도와 에너지가 증가함에 따라, 고밀도 플라스마 관련 연구는 이전에는 생각하지 못했던 영역까지 그 범위를 확장하고 있는 중이다. 그 중에서도 실험실 규모의 공간에서 천문학적 현상에서나 접할 수 있는 극한적인 물리 조건들을 만들어 왔는데, 이는 실험실 천체물리학(laboratory astrophysics)으로 불리고 있다. 예를 들어 레이저로 유도된 collisionless shock, wake waves, magnetic line reconnection, radiation pressure, relativistic rotator 뿐만 아니라, 레이저 유도 전자-양전자-감마선 플라스마, 쿼크-글루온 연구를 위한 레이저 유도 충돌기 등이 그것이다. 앞으로 레이저 기반의 광학 및 원자 물리학 분야뿐만 아니라, 입자 및 핵물리학 분야의 전문가들과 함께 새롭고 융합적인 아이디어들을 공유하고, 실제적인 공동연구를 할 수 있는 기반 시설이 되길 바란다.