

## 초고출력레이저 기술의 전망

Maiman이 루비레이저 발진에 성공하고 나서 50년, 고출력레이저는 멈추지 않고 진보를 계속하고 있다. 그 결과 광에는 한계가 없다는 물리학의 본질에 뿌리내린 한계도전이 현실로 다가왔다. 고출력레이저의 응용분야는 원자와 분자를 광(光)전계 만으로 전리, 파괴할 뿐만 아니라 전자속도를 광속에까지 가속시키는 상대론광학, 그것에 의한 새로운 입자가속기와 레이저에 의한 고(高)에너지물리학으로의 전망, 그리고 실험실 우주물리학에 이르기까지 소개했다. 이들 연구에는 각각 획기적인 아이디어와 연구축적이 필요하고, 이후도 끊임없는 노력이 이어질 전망이다. 본고는 <광기술 컨택트 2010년 1월호> 미래의 광기술 기획특집중 Ueda Ken-ichi(전기통신대학 레이저신세대연구센터)씨가 집필한 '초고출력레이저의 전망'을 전재한 것이며 (주)그린광학의 유정훈 팀장이 번역에 도움을 주었다.

〈편집자 주〉

### 1. 레이저발진에서 50년



그림1. 지금부터 50년 전 Maiman이 루비레이저를 발진시켰다.

2010년은 Maiman이 최초로 루비레이저를 발진시킨 이래 50년째가 되는 해이다(그림1). 레이저발진에 성공해서 바로 레이저광의 고강도성을 실감할 수 있는 일이 일어났다. 레이저 펄스를 볼록렌즈에 집광하면 전압을 걸지 않았는데 공기의

절연파괴가 일어나서 스퍼터가 발생한 것이다. 공기 분자가 이온화되어 발생한 전자는 강력한 레이저광의 전계에서 가속되고, 분자에 충돌해서 전자눈사태를 발생시켜 절연파괴에 이른 것으로 고강도한 광이 만들어내는 최초의 현상이었다.

### 2. 고출력레이저의 역사

레이저강도가 증대하는 역사는 초단펄스 발생의 역사와 겹치는데 1960년대에는 Q스위치에서 Modelock 레이저로 발전하고, 펄스폭도 나노초에서 피코초펄스로 변화했다. 레이저의 고출력화는 에너지를 증대시키는 것이 아니라 펄스폭을 극적으로 단펄스화 하는

것으로 발전했다. 그러나 초단펄스로 되면 레이저 전계(電界)만에서 물질이 파괴되는 한계에 도달해서 그림2와 같이 최고출력이 늘어나 고민하는 시대가 계속 됐다. 이것을 타파한 것이 P. Moulton에 의한 티탄사파이어(Ti<sup>3+</sup>: AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)결정의 개발<sup>2)</sup>과 G. Mourou에 의한 Chirp 펄스증폭(CPA)방식의 발명<sup>3)</sup>이다. 전자는 전자천이와 진동천이가 불가분으로 결합한 Vibronic 광학천이에 의해 700-1100nm라는 광대역 이득을 가지는 고체레이저이고, 개발당초는 파장가변 레이저로서 기대되었지만, 그 후 수펄토초의 초단펄스를 발생할 수 있는 것이 명확히 되었다. 펄토초 펄스를 그대로 증폭하면 바로 레이저에 의한 손상과 비선형현상에 의한 한계에 닿아 초고출력을 얻을 수 없다. CPA방식이란 레이저증폭기의 증폭과정은 100ps이상의 비교적 장(長)펄스에서 에너지증폭을 행하고, 그 후 회절격자쌍을 사용한 펄스압축기에서 1만배 이상으로 펄스압축해서 피크파워를 비약적으로 증대하는 방식이다. 초단펄스광을 증폭해서 파워압축하는 것이 가능하게 되는 것으로 그 후 레이저출력은 증가하여 지금에서는 비교적 소규모의 레이저장치에서도 집광장에서 10<sup>23</sup>W/cm<sup>2</sup>에 도달하려고 하고 있다.

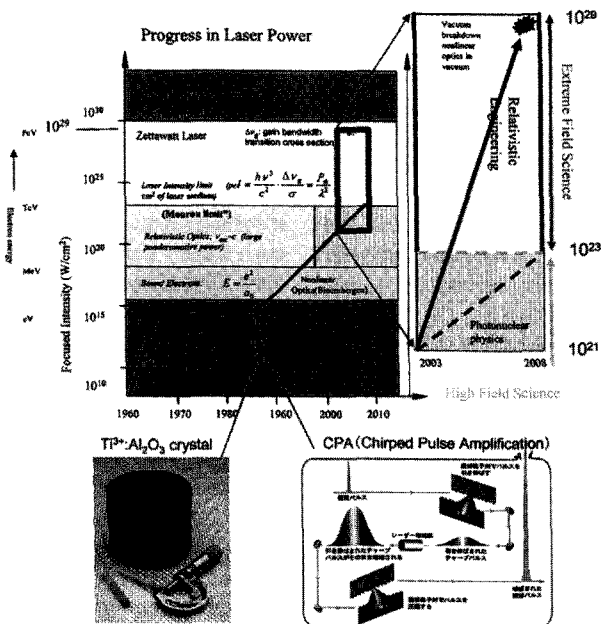


그림2. 초단펄스 고강도레이저와 고강도 레이저물리학의 진보

### 3. 초단펄스 레이저와 고강도 레이저물리

광강도가 높아짐에 따라 광과 물질의 상호작용에 질적 변화가 생겼다. 최초의 질적 변화는 10<sup>18</sup>W/cm<sup>2</sup>에서 생긴다. 이것은 마치 원자 내 전계에 상당하고 레이저전장이 직접 원자의 Potential장벽을 왜곡해 Tunnel이온화에 의해 광전계 위상과 동기한 전자방출이 일어난다. 펄스폭이 전계진동에서 수사이클까지 짧게 되어 가면 그림3과 같이 광의 위상과 동기한 Coherent한 전자가 발생하도록 된다. 광전계가 역위상을 되면, 전자는 광전계에서 돌아가 원래의 원자와 재결합하거나 전자산란을 일으킨다. 희가스조사에 의해 발생하는 고차 고조파는 재결합과정의 결과이다<sup>4)</sup>. 이것들은 고강도 광과학에 의한 원자·분자물리학을 개척하고 아토초과학으로의 입구로 되었다.

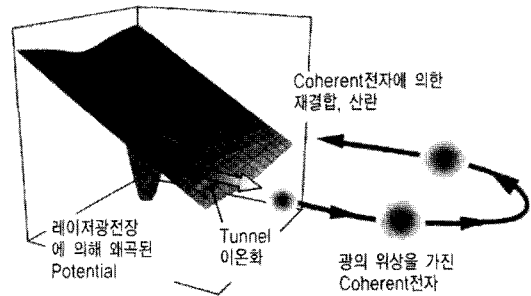


그림3. 레이저 강전장(強電場)에 의해 왜곡된 Potential에서 Tunnel이온화에 의해 Coherent전자가 방출된다.

### 4. 상대론광학과 입자가속

레이저의 고출력화가 진행됨에 따라 플라즈마물리학에도 새로운 시대, 상대론광학이 생겼다. 전자와 전자파의 상호작용은 Lorentz력  $\vec{F} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ 로 표현되지만, 종래는 제1항의 전계작용이 효과적이고, 제2항의 자계효과는 무시할 수 있었다. 하전입자로 구성되어 있는 플라즈마 중에 레이저광이 입사하면 횡파인 전자장에 의해 전자는 광의 진행방향에 직각인 방향으로 진동하는 것 뿐이고 진행방향에 가속되는 것은 없었다. 그러나 고강도레이저에 의한 전자

가속에 의해 광의 반주기 사이에 전자가 광속까지 가속되면 전자는 광의 진행방향으로 가속되고, 그 방향은 항상 전방으로 된다. 이것에 의해 광과 전자가 같은 속도, 광속에서 병주(併走)하는 상대론광학이라는 영역에 도달한다.

상대론광학에 도달한 플라즈마물리의 위력을 발휘한 것은 레이저플라즈마에 의한 단색전자빔의 가속이다. 2004년 9월, Nature지의 표지를 장식한 것은 "Dream Beam"이라는 큰 표제였다. 이 호에는 영국 Rutherford 연구소<sup>5)</sup>, 미국 Lawrence Berkeley 연구소<sup>6)</sup>, 프랑스 광학연구소<sup>7)</sup>에서 발표된 레이저플라즈마에 의한 단색전자빔가속 논문 3개가 동시에 게재되었다. 이것에 일본의 산총연구그룹도 앞장서서 단색전자빔의 발생을 국제회의에서 보고했는데 학술지출판에서는 구미에 앞섰다<sup>8)</sup>. 과학상의 큰 진보가 이와 같이 동시다발적으로 달성되는 것은 자주 있는 것으로서 과학의 진보가 필연적인 것을 증명하고 있다.

플라즈마에 대한 단색전자빔가속의 기구는 일본의 연구자인 田島가 1979년에 유명한 Tajima, Dawson의 논문<sup>9)</sup>에서 예언한 항적장가속(航跡場加速)이 그 원리이다. 예측부터 25년 후에 훌륭히 달성된 레이저 플라즈마 가속이지만, 그것을 위해서는 광속에서 광과 병주하는 전자가 만들어내는 위상이 배열한 가속전계가 필요했다. 그것을 실현한 것이 상대론광학이다. 광속이라는 속도의 벽에서 모든 입자가 같은 속도로 움직이기 때문에 다종다양한 속도분포를 가지는 하전입자로 구성되는 플라즈마 중에서 입자가속에 필요한 작용을 선택적으로 활용할 수 있게 되었다.

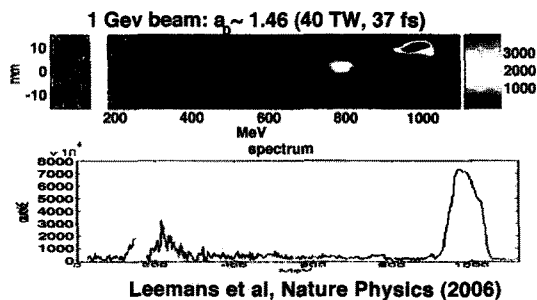


그림4. 레이저 플라즈마가속은 3cm에서 전자를 1GeV까지 가속했다.

2006년에 겨우 3cm의 플라즈마 중에서 그림4에 나타냈듯이 1GeV의 단색전자빔의 가속이 보고되었다<sup>10)</sup>. 실제의 가속거리는 겨우 1cm이기 때문에 1GeV/cm의 거대한 가속전계가 실현된 것을 나타낸다. 종래의 마이크로파 가속에서는 물질의 절연파괴 한계(100MV/m)가 존재한다. TeV가속기에는 거대한 사이즈가 필요로 하고, PeV를 달성하는 것에는 지구보다 큰 궤도가 필요하다. 그러나 플라즈마 중에서는 가속전계에 한계는 없고, Cascade다단가속을 위한 여유를 보아 10GeV/m 가속기가 계획되어 왔다. 종래의 100분의 1에서 1000분의 1 사이즈에서 지금까지 실현 불가능했던 고에너지입자의 탐색이 가능하게 된다. 초고출력레이저가 고에너지 물리학의 기본 틀로 되는 것은 확실할 것이다.

## 5. 초(超)상대론광학과 레이저 소립자물리

세계 각국에서 피크파워가 PW(1015W)를 넘는 레이저가 만들어져 있다. 이 레이저광을 회절한계 스폿에 집광하면 그 집광강도는 1023W/cm<sup>2</sup>에 도달하는 것이 가능하다. 이 레이저강도에서는 전자보다 1800배나 질량이 큰 양자도 광속에 도달하는 초상대론광학의 영역에 도달한다. 플라즈마를 구성하는 전자와 양자, 그리고 레이저광이 같은 속도에서 병주하면 분산 관계를 신경 쓸 필요없는 완전히 새로운 플라즈마물리학이 출현할 것이다. 그뿐만 아니라 진공이 파괴되어 전자/양전자 쌍이 생성하는 Schwinger장(1030W/cm<sup>2</sup>)도 손이 이르는 곳에 오고 있다<sup>11)</sup>. 실제로는 고에너지입자가 동시에 존재하는 것이고, 진공장이 파괴되는 강도는 크게 완화된다고 생각되기 때문에 초상대론광학 시대에는 우주창세기의 물질생성 시물레이션 조차도 가능할지도 모르겠다.

## 6. 실험실 우주물리학

2009년에는 오사카레이저를 중심으로 한 국제팀이 고강도레이저를 사용해서 블랙홀 근방의 X선 발생물리를 재현하는 실험을 행해 실험실 우주물리학이 현실의 것으로 되었다<sup>12)</sup>. 이것은 그림5와 같이 블랙홀을 중심으로 가지는 연성계(連星系)와 반성(伴星)에서 블랙홀 주위에 형성된 강착(降着)원반에 물질이 이끌어져 그곳에서 광전리(光電離)되어 강력한 X선을 발생하는 과정을 실험실에서 재현한 것이다. 관측된 X선 스펙트럼은 종래 해석과는 달리 새로운 X선발생기구의 연구가 필요한 것을 나타냈다. 지금까지 관측의 대상이어서도 실제로 조건을 변화시키면서 그 물리법칙을 점검하는 것은 불가능했던 우주물리학이 초고출력레이저에 의해 가능하게 되었다. 이것에 의해 처음으로 우주현상의 참된 물리과정을 연구할 수 있도록 되었고, 그것이 검증 가능한 물리학의 일부로 된 것을 의미한다.

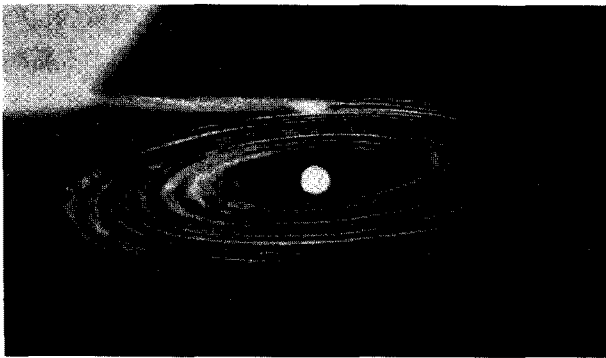


그림5. 실험실 우주물리학의 개막  
블랙홀 근방 물리의 실험적 시뮬레이션

## 7. 새로운 시대의 고출력 레이저기술

2009년에는 미국 NIF(National Ignition Facility)가 완성되고, 인류가 만든 레이저로서는 최대출력 4.2MJ(1.06 $\mu$ m), 1.5MJ(355nm)를 발생하는 레이저가 있다. 이것을 OPCPA(광학적 Parametric 증폭기)에 의한 Chirp펄스증폭의 여기원에 사용할 수 있으면 10fs펄스에서 1MJ 출력을 발생하는 것도 원리적

으로는 가능하게 된다. 이 펄스를 1 $\mu$ m에 집광할 수 있으면 그 광강도는 10<sup>28</sup>W/cm<sup>2</sup>라는 초고강도를 실현한다. 즉 100PW라는 피크파워 레이저를 만들 수 있으면 Big bang 직후의 소립자쌍 생성의 물리 검증도 결코 꿈이 아닌 상황으로 인류는 달려 왔다.

참된 레이저에 의한 소립자물리학을 개척하려고 하면 반복이 높은 레이저이고, 상기의 고강도레이저를 실현할 필요가 있다. 핵융합은 1shot에서 완료하는 물리과정이지만, 고에너지물리학은 많은 데이터를 축적해서 비로소 현상(現象)을 확정할 수 있는 물리연구이기 때문이다.

그것을 위한 고체레이저의 혁명적인 연구가 일본에서 진행되었다<sup>13)</sup>. 그림6에 나타난 세라믹레이저 개발이 그것이다. 중국, 한국, 일본에서 오랜 역사와 문화를 가지고 있는 세라믹이 현대과학 지식을 도입하여 완전투명 세라믹으로 만드는 것이 가능하게 되었다. 나노결정을 원재료로 한 세라믹기술은 지하 깊숙이 진행하고 있는 것과 매우 닮은 결정합체 과정인 고상(固相)결정성장을 제어, 완전투명 세라믹을 실현했다. 본래 다결정체인 투명세라믹의 Grain경계층의 두께는 수 옴스트롬 이하까지 얇게 되고, 산란손실과 잔유흡수손실은 시판되어 있는 최고품질의 단결정보다 우수하다. 바로 이것이 결정의 물리적, 기계적, 열적, 광학적 성질을 유지하면서 글라스 사이즈 확대성, 생산성을 실현한 고체레이저의 혁명이다. PW레이저의 장래, EW(10<sup>18</sup>W)레이저를 실현하는 것에는 거대한 결정레이저가 불가결하고, 일본이 개발한 세라믹레이저가 그것을 가능하게 한다고 생각된다. 실제 그 우수한 성능을 인정한 미국정부는 평균출력에서 100kW를

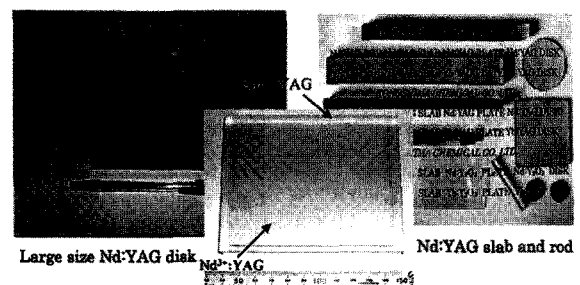


그림6. 결정과 글라스의 이점을 가진 대형 세라믹레이저

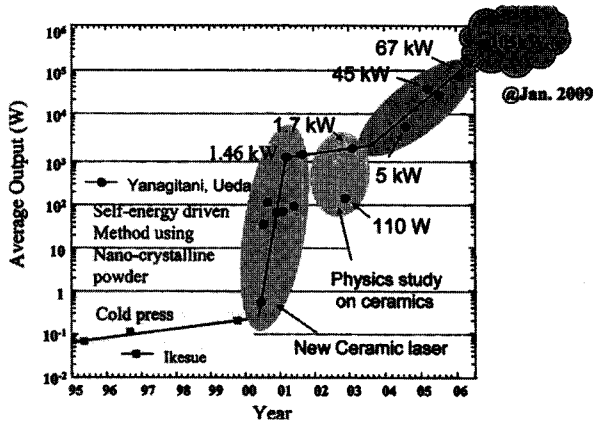


그림7. 일본이 개발한 세라믹레이저 고출력화의 역사

넘은 LD여기고체레이저의 개발에 일본제 세라믹레이저를 채용하여 실현했다. 그림7은 세라믹레이저의 고출력화의 진행을 나타낸 것이지만, 모두 일본제인 레이저세라믹이고, 지금도 다른 나라에서는 달성할 수 없는 일본 스탠더드이다.

## 8. 맺음말

Maiman이 시작해서 루비레이저 발전에 성공한 이래 50년, 고출력레이저는 멈추지 않고 진보를 계속하고 있다. 그 결과 광에는 한계가 없다는 물리학의 본질에 뿌리내린 한계도전이 현실로 다가왔다. 고출력레이저의 응용분야는 원자와 분자를 광(光)전계만으로 전리, 파괴할 뿐만이 아니라 전자속도를 광속에까지 가속시키는 상대론광학, 그것에 의한 새로운 입자가속기와 레이저에 의한 고(高)에너지물리학으로의 전망, 그리고 실험실 우주물리학에 이르기까지 소개했다. 이들 연구에는 각각 획기적인 아이디어와 연구축적이 필요하고, 이후도 끊임없는 노력이 이어질 것이다. 그리고

그것은 그만큼 보람있는 과학의 대상이 탄생되는 것을 의미한다. 마지막으로 이들 연구 중에 일본연구자가 담당해온 역할이 결코 적지않은 것도 반드시 전하고 싶은 사항으로서 소개했다. 다음의 50년에는 레이저과학, 그리고 레이저를 응용한 과학이 점점 발전할 것이기 때문에 차세대를 담당하는 젊은 연구자, 기술자에 거는 기대가 크다.

## 참고문헌

- 1) T. Maiman, *Nature*, 187, 493 (1960).
- 2) P. Moulton, *JOSA B*, 3, 125 (1986).
- 3) D. Strickland and G. Mourou, *Opt, Comm*, 56, 212 (1985).
- 4) P. Corkum, *Phys. Rev. Lett*, 71, 1994 (1993).
- 5) S. Magles, C. Murphy, et al, *Nature*, 431, 541 (2004).
- 6) C. Geddes, Cs. Toth, et al, *Nature*, 431, 541 (2004).
- 7) J. Faure, Y. Gline, *Nature*, 431, 541 (2004).
- 8) E. Miure, K. Koyama et al, *Appl. Phys. Lett*, 86, 251501 (2006).
- 9) T. Tajima and J. Dawson, *Phys. Rev. Lett*, 43, 267 (1979).
- 10) W. Leemans et al, *Nature Physics*, 2, 696 (2006).
- 11) G. Mourou, T. Tajima, S. Bulanov, *Rev. Modern Physics*, 78, 309 (2006).
- 12) S. Fujioka et al, *Nature Physics*, 5, 821 (2009).
- 13) 植田憲一, *応用物理*, 77, 111 (2008).