

---

## 빛이란 무엇인가?

**Barry R. Masters**

아주 간단하다 : 빛이 있으라! 그러나 아주 복잡하다. 정녕 빛이란 무엇이란 말인가?

---

추천 참고 목록 ([Reading list of suggested references](#))

---

“하나님이 가라사대 빛이 있으라 하시매  
빛이 있었고” (창세기 1 장 3 절)

“나의 여생동안 빛이 무엇인지 되집어 보며  
살 것이다” (알버트 아인슈타인, 1917 년경)

“지난 50 여년 동안 곱씹어 고민해  
왔음에도 빛이란 무엇인가에 대한 답에 더  
가까이 다가서지 못했다. 물론  
장난꾸러기같은 사람들은 답을 안다고  
생각하겠지만 그들은 자신을 속이고 있는  
것이다.” (알버트 아인슈타인, 1951 년)



북극광, Kshitijr96 에 의해 (자신의 작품) [출처 : CC BY-SA 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)] 위키미디어 커먼스].



눈은 광자 검출기이다. Woodwalker 에 의해 (자신의 작품)  
[출처 : CC BY 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>)]  
위키미디어 커먼스]

빛은 음식을 생성하는 근본적인 에너지 공급원으로서 생명체에게 필수 불가결한 요소이다. 빛은 종교, 창조 이야기, 시, 문학, 언어, 그리고 문화의 중심이다. 빛은 대기권에 발견되는 일출, 일몰, 무지개, 북극광의 아름다움이다. 빛은 시각의 핵심이다 . 빛과 시각은 고대 그리스와 아라비아 시대의 철학자들로부터 시작되는 얽히고 설킨 역사를 가지고 있다. 시각은 빛과 유리나 콘택트 렌즈와 같은 광학적 장비들을 필요로 하며, 레이저 시력 교정 수술은 시력의 정확성을 높여줄 수 있다. 빛은 안과 질병을 진단하고 치료하는데 쓰일 수 있다. 빛은 원자 혹은 분자안의 전자들과의 상호작용으로 탐지될 수

있다. 이는 우리 눈의 망막에 존재하는 광수용체나 사진기안의 반도체로 이루어진 탐지기들이 작동되는 원리이기도 하다.

색깔은 우리의 환경을 풍성하게 하며, 모든 사람들에게 기쁨을 가져다 주며 우리가 살고 있는 집, 도시 그리고 삶에 아름다움을 더해준다. 태양빛, 달빛, 그리고 별빛은 지구상에 살고 있는 모든 사람들에게 유익이 되며 아름다움을 가져다주고 경이로움을 자아내게 한다. 빛은 현대사회를 이루는 기본이 된다. 빛이 생성되며 조절되고 전달되어 검출되기까지의 모든과정은 통신, 제품공정, 의료장비, 공공예술, 빛을 이용한 공연, 생명공학 장비, 교육 프로그램, 실험실 장비들에 이르기까지 모든 과학기술 발전에 근간을 제공한다. 빛은 우주의 창조, 별들안에서의 광물리적 과정들, 그리고 우주에 걸쳐 존재하는 물리적 법칙들의 보편적 특성에 대한 정보의 근원이다. 빛은 분광학의 도구로써 원자와 분자들의 구조에 대한 이론적 그리고 실험적인 지식에 이르게 해 주었다. 빛과 물질과의 상호작용은 양자 역학의 발명과 발전을 가져다 주었다. 빛은 시인들, 철학자들 (기원전 5 세기 전부터), 예술가들, 과학자들, 공학자들의 마음을 사로잡았다. 오늘날 빛은 멀리 떨어져 있는 사람, 문화, 그리고 국가간을 연결하여 인류를 하나의 가족으로 만들어준다. 빛은 우리를 매혹시키고, 자극하고, 연결시켜준다. 아이들은 태양빛이 돋보기에 의해 한곳에 집중되어 불을 붙일수 있다는 사실에 놀란다. 사람들은 망원경이나 현미경을 통해 대우주와 소우주를 들여볼때나 깜짝 놀라게 된다.

역사적으로 빛은 파동으로서, 양자 입자로서 그리고 양자장으로서 이해될 수 있다. 복잡한가? 그렇다! 진실로 "빛이란 무엇인가?"라는 질문은 자주 "빛은 어떻게 행동하는가?"라는 질문으로 우회되게 된다. 좀더 구체적으로, "빛이란 무엇인가?"에 대한 질문은 자주 "빛은 어떻게 진행하고 어떻게 물질과 상호작용하는가?"라는 질문으로 대체 되게된다. 이 에세이에서 나는 20 세기 초 당시 파동-물질 이중성의 핵심 개념의 발원에 대한 부분과 빛-물질 상호작용에 대한 이론을 다루려 한다. 나는 빛의 특성과 빛-물질 상호작용에 대한 이해에 관련된 알버트 아인슈타인의 기념비적인 공헌을 논의할 것이다. 아인슈타인은 상대성 이론과 그의 상대성 이론을 증명해주는 실험적 확인으로 인해 전세계적 유명인이 되었다. 그러나 광학 분야에 대한 그의 기여는 빛에 대한 우리의 이해를 바꾸어 놓았을 뿐 아니라 의료, 원거리 통신, 광기술, 보스-아인슈타인 응축을 통한 근본적인 물리에 대한 연구까지 다양한 분야에서의 응용을 위한 빛 조절 능력을 변화시켜 주었다. 유도 방출에 대한 그의 연구는 우리의 삶을 바꾸어 놓고 있는 레이저가 개발되는데 공헌하였다. 빛에 대한 아인슈타인의 논문들은 루이 드 브로이(Louis de Broglie)와 어빈 슈뢰딩거(Erwin Schrödinger)에게 영향을 주었고 "파동역학"이 발명되도록 해 주었다. 아인슈타인은 공간에서 복사(radiation)의 진행과 복사-물질 상호작용 사이의 틈새를 연결해 주었다. 1905 년과 1916 년에 걸쳐 아인슈타인은 빛 양자의 흡수와 방출에 의한 빛-물질 상호작용을 설명하였고, 이로 인해 형광에 대한 스톡스(Stokes)의 법칙, 자외선 빛에 의한 가스들의 이온화, 광전 효과와 같은 여러 물리적 현상들이 설명되었다. 광전효과에서는 한계 진동수의 복사가 금속 표면에 조사되고 전자가 방출되는 것인데 이 원리는 광증폭 관과 같은 빛 검출기에 구현되고 있다. 아인슈타인의 유도 방출 가설은 레이저 작동의 기본 원리 이다.



왼쪽 : 별 개슬 망원경 (1.8 미터 반사 망원경)에서 얻어진 소용돌이 은하의 스케치. 1865 년 Lord Rosse 에 의해. 2005 년 지상의 키트 정상 국립 천문대 (Kitt Peak National Observatory)의 0.9 미터 망원경과 허블 우주 망원경(Hubble Space Telescope)으로 부터 얻어진 사진들의 NASA/ESA 디지털 합성 사진 (가운데)과 자외선 먼지 속의 은하수(오른쪽)

## 빛과 물질의 상호작용에 대한 초기 실험들

아인슈타인에 의한 빛과 물질의 상호작용에 대한 연구들 이전에 있었던 일들에 대해 먼저 알아보는 것이 흥미로울 뿐 아니라 유익할 것이다. 진행하는 전자기파를 발생시키고, 측정하고, 특성화 하였던 하인리히 헤르츠(Heinrich Hertz)는 1887년 한가지 발견을 하게 되는데 그것은 자외선 빛을 그의 점화극 공명자에 쬐어주었을 때 스파크를 일으키는 용량이 증가되는 것을 관측한 것이었다. 그의 조수였던 빌헬름 할바흐스(Wilhelm Hallwachs)는 1888년 자외선이 중성인 금속을 양전하를 띠게 만든다는 실험으로 이전의 관측을 확증하였다. 1899년 조셉 톰슨(Joseph J. Thomson)은 자외선이 크룩스 관(Crookes tube)안의 금속 판에서의 전자 형성에 어떤 영향을 미치는지에 대해 연구를 하였다. 톰슨은 금속판에서 나오는 전류가 복사의 세기와 진동수에 비례하여 증가한다는 것을 측정하였다. 그는 자외선에 의해 금속에서 전자가 방출된다는 사실을 처음으로 논문을 통해 기술하였다. 1902년에는 키엘 대학교(University of Kiel)에서 일하고 있던 필립 레나드(Philipp Lenard)가 탄소 아크 램프에서 나오는 단파장이 금속 표면에 조사될 때 전자가 방출된다는 것을 입증하였다. 방출된 전자의 수는, 전자의 운동에너지와는 상관없이, 쬐여준 빛의 세기에 따라 증가되었고 특정 복사 진동수 아래로는 어떠한 전자도 방출되지 않았다. 그는 세 가지 다른 진동수에서의 자외선에 의해 알루미늄 판에서 방출되는 전자의 효과에 대해 측정하였다.

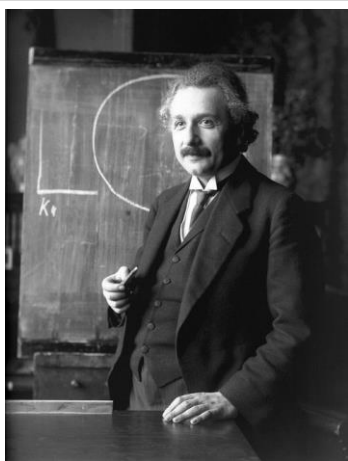
## 아인슈타인의 빛 양자

1905년 아인슈타인은 "빛의 생성과 변형에 관한 체험적 관점에서 (On a Heuristic Viewpoint Concerning the Production and Transformation of Light)"라는 제목의 획기적인 논문을 발표하였는데, 그는 이 논문에서 볼츠만 통계 열역학으로부터 빈(Wien)의 분포 법칙에 의해 표현되는 복사의 엔트로피가 기본 입자로 이루어진 기체 혹은 에너지 양자-각 양자는 해당하는 파동의 진동수에 비례함과 동일한 형태를 가진다는 것을 추론하였다. 아인슈타인은 이 논문에서 "낮은 밀도 [빈의 흑체 복사 공식이 유효한 범위 안에서 ( $h\nu/kT \ll 1$ )]를 가진 단색의 복사가, 열역학적인 의미에서, 크기  $h\nu$ 를 가지는 상호 독립적인 복사 양자로 이루어진 것처럼 행동한다" 라고 기술하였다 (기호  $h$ : 플랑크 상수,  $k$ : 볼츠만 상수,  $T$ : 켈빈 온도,  $\nu$ : 빛의 진동수). 더욱이 "광선이 점광원에서 퍼져나갈 때, 에너지는 증가하는 부피에 연속으로 분포되지 않고, 공간 안에 국소적인 지점에서 에너지 양자의 한정된 수로 이루어지며, 나누어 지지 않은채 이동하며, 완전한 단위체로써만 흡수되며 생성될 수 있다."고 하였다. 아인슈타인은 교차가능하게 에너지 양자(Energiequant)와 빛 양자(Lichtquant)라는 단어들을 사용하였다. 아인슈타인이 추론했던 전파되는 복사에서의 불연속적인 에너지 개념은 맥스웰의 전자기파의 연속적 파동 이론과 모순되었다. 약 십년후 1916년에 아인슈타인은 그의 또 다른 논문 "양자이론에서의 복사의 방출과 흡수 (Emission and Absorption of Radiation in Quantum Theory)" [Deutsche Physikalische Gesellschaft. Verhandlungen **18**, 318.]에서 빛 양자의 운동량 ( $p = h\nu/c$ ) 과 '0' 정지 질량에 관해 논의하였다.

## 광자

미국의 물리화학자 길버트 루이스(Gilbert N. Lewis)는 저널 네이처(*Nature*)에 1926년 게재된 논문에서 *광자(photon)*라는 명칭을 구성하였다. "만약 우리가 빛이 단지 아주 일부분만 방사에너지의 전달체로서 존재하고 나머지 시간에는 원자 내부에서의 중요한 구조적 원소로서 남아있다고 가정한다면, 이러한 가상적인 실체들 중 하나를 빛 입자, 빛 미립자, 빛 양자로서 이야기하는 것은 부적절해 보인다... 나는, 그러므로, 빛은 아니지만 모든 복사 과정의 핵심적인 역할을 하는 이 가상적인 새 원자를 양자라는 명칭으로 부르기로 감히 제안하는 바이다." 1926년 루이스가 광자라는 용어를 제안한 후에 많은 물리학자들은 그것을 아인슈타인의 빛 양자에 대한 이름으로서 받아들였다. 그러나 루이스의 양자에 대한 개념은 아인슈타인의 그것과는 완전히 다른 것이었다. 크라그(H Kragh)가 발견한 것처럼, 양자라는 이름은 1926년 이전에 적어도 네 명의 과학자들에 의해 제안되었었다. 타당성을 가지고 남아있는 루이스의 광자의 유일한 흔적은 그것의 이름뿐이었다. 추가적인 역사적 영감들은 램(Lamb)의 1995년 논문 "반광자 (Anti-photon)" 에서 찾을 수 있다.

## 아인슈타인의 빛 양자 가설은 광전효과를 설명해 준다



알버트 아인슈타인 1921년. F Schmutzer 에 의해 [출처 : 위키미디어 커먼스]

아인슈타인의 그의 빛 양자 개념을 맥스웰의 파동이론으로는 설명할 수 없었던 광전효과를 설명하기 위해 적용하였다. 아인슈타인은 기술하기를 "만약 단파장의 복사선이 ...  $h\nu$ 의 크기를 가지는 에너지 양자로 이루어진 비연속성의 매질인것 처럼 행동한다면, 빛의 방출과 변형을 다스리는 법칙들이 또한 빛이 그러한 에너지 양자인것 처럼 구성된 것인지 조사하는 것이 합당해 보인다."고 하였다.

아인슈타인은 빛이 그가 상정한 '빛 양자'의 방출 혹은 흡수에 의해 물질과 상호작용을 한다고 가정하였고 그 설명하기 골치아픈 광전효과에 대한 새로운 기작이라고 가정하였다. 아인슈타인은 광전효과에 대한 그의 이론은 다음과 같이 묘사하였다 - 빛 양자는 물질의 표면층을 투과하며 빛의 에너지는 전자의 운동에너지로 변환되는데, 즉 빛 양자는 전체 에너지를 단일 전자로 전달한다. 그는 또 "물체 내부의 전자는 그것이 표면에 도착할때까지 운동에너지의 일부를 잃어버릴 것이다." 라고 기술하였다. 추가적으로 그는

금속표면의 전자는 표면을 떠나기 위하여 물질 안에서 전자를 붙들고 있는 인력을 극복하기 위해 일  $\phi$  (일 함수라고 불리는 각 물질들의 함수)을 행할 것이라고 가정하였다. 현대적인 표기법으로는  $eV = h\nu - \phi$  ( $e$ : 전자의 전하,  $V$ : 가장 빠른 광전자를 멈추기 위한 뒤쳐진 퍼텐셜) 이다. 이것이 복사-물질 상호작용의 양자 이론에서의 첫 번째 방정식이다. 아인슈타인의 광전효과에 대한 추론은 아더 휴즈(Arther L. Hughes)가 다양한 금속들로부터 방출되는 광전자들의 최대 속도를 측정함으로써 1912년에 확증됨과 동시에 아인슈타인의 광전효과 방정식이 입증되었다.

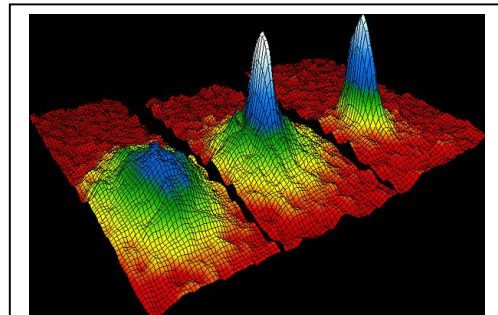
양자 가설에 대한 첫번째 확인은, 복사가 아닌 물리학의 영역에서, 1907년 아인슈타인이 에너지 양자화가 응집 물질에 적용될 수 있음을 설명하고 입증함으로써 이루어졌다. 아인슈타인은 고체 비열의 이론적인 온도 상관성(즉, 온도 감소에 대한 비열의 감소)을 고체가 양자화된 진동 격자라고 모델링함으로써 설명했다. 아인슈타인의 공식은 1910년 월터 네른스트(Walter Nernst)와 그의 조수 프레데릭 린데만(Frederick A. Lindemann)의 실험 결과와 일치하였다.

아인슈타인이 받은 1922년 노벨 물리학상은 그의 광전효과에 대한 1905년 논문을 인용하기를 "그의 이론 물리학에 대한 공로와 특별히 광전효과 법칙을 발견한 것에 대하여"라고 하였다. 아인슈타인이 그의 광전효과 이론을 발전시켰을 당시 세계적인 물리학자들-막스 플랑크 (Max Planck), 헨드릭 로렌츠(Hendrik A. Lorentz), 막스 폰 라우에(Max von Laue), 빌헬름 빈(Wilhelm Wien), 그리고 아놀드 조머펠트(Arnold Sommerfeld)-은 빛이 파동임을 나타내는 빛의 간섭현상 때문에 아인슈타인의 빛 양자 이론을 받아들일 수가 없었다. 플랑크와 로렌츠 둘 다 복사가 물질과 양자화된 과정으로 상호작용한다는 것은 받아들였지만 각각의 빛 양자가 파동으로서 진행한다는 개념은 거부하였다. 주목할 만한 예외는 1909년 엑스레이에서의 국소화된 에너지 양자를 제안하였던 요하네스 스타크(Johannes Stark)였으며 그는 아인슈타인의 빛 양자 가설을 지지하였다. 아인슈타인 스스로는 그의 가설이 실험적인 입증 혹은 반증을 필요로 한다는 것을 깨닫고 1911년 솔베이 회의(Solvay congress)에서 말하기를 "나는 이 개념(빛 양자)의 임시적인 특성을 주장한다" 라고 하였다. 1921년 마우리스 드 브로이(Maurice de Broglie)는 브뤼셀에서 열린 세번째 솔베이 회의에서 물질에 엑스레이 충격 실험과 그에 따른 전자 방출에 대한 그의 분석이 엑스레이가 에너지  $h\nu$ 를 가진다는 가정에 의해 설명될 수 있음을 보고하였다. 그의 형제 루이 드 브로이(Louis de Broglie)는 아인슈타인의 빛과 빛 양자에 관한 논문을 읽고 "드 브로이 물질파 이론"을 유도해 내었다. 어빈 슈뢰딩거(Erwin Schrödinger)는 드 브로이의 발견을 바탕으로 그의 발명품인 "파동 역학"을 발전시켰다.

### 아인슈타인의 빛 양자에 대한 의구심과 실험적인 확인

1916년 로버트 밀리컨(Robert A. Millikan)은 레나드의 기존 실험을 확장시키면서 높은 정확성을 가지고 아인슈타인의 광전효과 이론을 실험적으로 증명하였다. 밀리컨은 방출된 전자의 최대 운동에너지가 진동수에 비례함을 보였다. 그의 광방출 정지 전압에 대한 조사된 복사의 진동수 그래프는 아인슈타인에 의해 예견된 선형 의존성을 따랐으며, 다른 종류의 금속들로부터도 플랑크가 1901년 논문에서 계산한 값과 동일한 상수  $h$ 가 얻어졌다. 밀리컨은 또한 광전자의 수가 복사의 세기에 비례함을 보였다. 그럼에도 불구하고, 그는 아인슈타인이 제안한 빛 양자 개념을 거부하였다.

1923년 아서 홀리 컴프턴(Arthur Holly Compton)과 피터 드바이(Peter Debye)가 서로 독립적으로 전자에 의한



보스-아인슈타인응축. 새로운 물질 상태(보스-아인슈타인 응축)의 발견을 확인시켜주는 루비듐 원자 가스상태의 속도 분포 데이터. 왼쪽 : 보스-아인슈타인 응축이 나타나기 직전. 가운데 : 응축이 나타난 직후. 오른쪽 : 심화된 기화 이후 (거의 순수한 응축 샘플을 남기면서). NIST/JILA/CU-Boulder (NIST Image)에 의해. 출처 : 위키미디어 커먼스.



엑스레이 산란에 관련되 논문을 발표하고 나서야 물리학자들을 아인슈타인의 빛 양자를 받아들였다. 컴프턴은 빛에 의한 엑스선과 감마선 산란을 연구하였다. 1923 년 제안된 그의 이론은 산란된 양자의 에너지는 조사된 양자의 에너지보다 작다는 것과 그 차이는 튕겨져 나간 산란 전자의 증가된 운동 에너지에 해당함을 보였다. 컴프턴은 조사된 빔과 산란된 빔사이의 각도와 산란된 빔의 증가된 파장과와의 관계를 나타내는 등식을 유도하였다. 진동수  $\nu$ 의 엑스선 양자는 질량  $m$ 를 가지는 전자에 의해 산란된다. 산란된 전자는 초기상태에서는 움직이지 않는 것으로 가정되고, 복사 양자와 충돌 후에 전자는 튕겨져 나가게 된다. 그는 그리고 나서 산란 과정에 대한 운동량과 에너지는 보존된다고 가정하였고 엑스선 파장의 변화에 대한 그의 산란 방정식을 유도해 내었다:

$$\lambda - \lambda_0 = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$$

컴프턴은 그의 이론을 일련의 정확한 측정들로서 확증하였고 기록하기를 "산란에 대한 이론적인 수치와 실험적인 수치가 아름답게 일치함은 더욱 놀랍다 ... 수치들의 두 세트를 연결해주기 위한 조절가능 상수는 한 개도 없다." 라고 하였다. 그는 또 파장에서의 이동(컴프턴 이동이라고 이름 붙여짐)은 조사된 파장에 독립적임을 발견하였다. 그리고 그는 "엑스선의 산란은 양자 현상이다"라고 결론 내렸다. 더욱이 "그 이론은 상당한 설득력을 가지고 복사 양자가 방향성있는 운동량과 에너지를 동반함을 나타낸다"고 하였다.

### 아인슈타인의 빛 파동-물질 이중성 이론

빛의 파동-입자 이중성의 근원은 아인슈타인의 1909 년 에너지 변동에 대한 기념비적인 논문 ("복사 문제의 현재 상태에 관하여"- "On the Present Status of the Radiation Problem.") 에서 찾을 수 있다. 아인슈타인은 브라우니안 운동에 대한 그의 분석 (1905) 에서 에너지와 운동량의 변동에 관하여 계산하였고, 이러한 분석적 방법을 흑체 복사에 적용하였다. 그는 그의 1905 년 역학적 시스템에 대한 변동 이론을 비역학적 흑체 복사로 일반화 시켰다. 아인슈타인은 온도  $T$ 에서 등온공간속의 부분 부피  $V$  안에 제한된 흑체 복사 에너지 변동에 관하여 조사하였다. 플랑크의 흑체 분포 법칙에서 시작하여 아인슈타인은 에너지 변동에 관한 변동량을 다음과 같이 기술하였다.

$$\langle (E - \langle E \rangle)^2 \rangle = \langle E \rangle h\nu + \frac{c^3 \langle E \rangle^2}{8\pi^2 \nu^2 V}$$

이 식에서  $\langle \rangle$  은 통계적 평균을 나타내고,  $E$  는  $\nu$ 와  $\nu + d\nu$  사이 주파수의 복사 에너지,  $c$  는 진공에서의 빛의 속도이다. 이 식은 아인슈타인의 흑체 복사에 대한 변동 공식으로 알려져 있다. 그는 통계역학적 분석으로 부터 식의 오른쪽 항 첫번째 부분이 복사의 양자적 특성을 나타낸다고 추론하였다. 평균에너지에 선형적으로 비례하는 이 첫번째 항은 빈의 법칙이 성립하는 고 진동수 한계영역에서 발견된다. 아인슈타인은 복사, 특히 그것의 에너지 변동은 독립된 입자의 가스상태-즉, 에너지  $h\nu$ 를 가지는 빛 양자-와 일치한다고 결론을 내렸다. 그는 차원해석으로부터 위 식의 오른쪽 두번째 항 (평균에너지의 제곱에 비례)이 파동의 간섭으로부터 기인한다고 추론하였다. 이 항은 저 진동수 복사의 한계영역에서 얻어진다. 아인슈타인은 흑체 안의 복사가 다양한 크기, 위상, 그리고 극성상태를 가지는 수 많은 기준 모드로 이루어져 있으며 그것들이 많은 방향으로 진행한다고 상상하였다. 그는 흑체내의

부분 공간에서의 변동이 다른 평면파들 사이의 간섭으로부터 발생할수 있다고 생각하였다. 1909 년 아인슈타인은 "이론물리학의 다음 단계는 빛이 일종의 파동과 방출 이론의 결합이라고 해석될수 있다는 이론으로 이끌어 줄 것이다."라고 기술하였다.

### 아인슈타인의 유도 방출 이론

아인슈타인은 빛 양자를 생각해낸후 9 년 뒤 빛과 물질의 상호작용, 구체적으로는 원자의 에너지 상태들 사이의 전이와 이러한 과정에서의 빛 양자의 역할에 대한 문제로 회귀하였다. 1916 년 그는 그의 기념비적인 논문 "양자 이론에서의 방사선의 방출과 흡수" 에서 자극된 혹은 유도된 방출을 상정하였다. 이 논문은 양자 물리에 통계적 접근을 도입한 것이기 때문에 중요한 위치를 차지한다. 이 논문은 그의 "A 와 B 상수"라 불리는 개념과 유도 방출 과정에 대한 예견을 포함하고 있다. 그 당시 빛 양자의 흡수와 방출에 의해 조절되는 에너지 전이에 대한 개념은 물리학자들 사이에서 일반적으로 받아들여 지지는 않았다. 수소 원자에 대한 보어 (Bohr)의 이론은 광자라는 것에 대한 개념을 이용하지 않았다. 사실 보어는 1920 년대 초반 까지 그 개념을 받아들이기를 거부하였다. 1900 년에 양자이론을 설립했다고 여겨지는 막스 플랑크 조차도 보어가 수소 원자의 에너지 준위를 양자화 하였던 1913 년 전까지 양자화의 실체를 받아들이지 않았다는 것은 주목할만 하다.



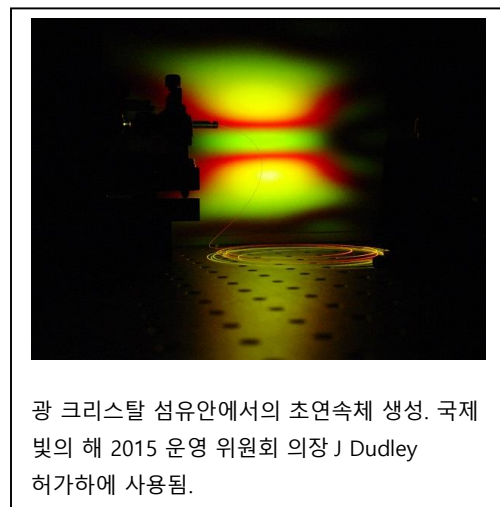
첫 번째 루비 레이저 분해되어지다.

아인슈타인은 복사장이 원자에서 에너지의 소실과 획득을 야기할 수 있다고 판단했다. 그는 원자에서의 낮고 높은 두 에너지 상태, 그리고 그 두 에너지 상태 차이와 동일한 에너지를 가지는 빛에 의한 흡수와 방출이 일어나는 두 에너지 상태 사이의 전이를 가정했다. 만약 원자가 광자를 흡수한다면 전자 에너지는 광자의 에너지에 의해 증가되고 원자는 들뜬 에너지 상태가 될 것이다. 들뜬 에너지 상태에 있는 원자는 자발적으로 광자를 방출하고 낮은 전자 에너지 상태 혹은 바닥 에너지 상태로 존재하게 된다. 방출된 광자의 에너지는 들뜬 전자 에너지 상태와 바닥 전자 에너지 상태의 에너지 차이와 동일하다. 원자의 들뜬 상태로부터의 자발적인 방출은 조사되는 빛이 없을 때에 일어날 수 있다. 유도된 방출에서는 들뜬 상태에 있는 원자가 전자기장과 상호작용하여 들뜬 에너지 상태에서부터 낮은 에너지 상태로 전자 전이를 일으키게 된다. 이 때 두 상태 사이의 에너지 차이는 전자기장으로 전달된다. 이 과정에서는 생성된 광자는 조사된 전자기장안의 광자와 진동수, 위상, 극성, 그리고 진행 방향이 동일하다.

아인슈타인은 열적 평형 상태에서의 원자 집합체를 가정하였다. 그는 윗 에너지 상태와 아래 에너지 상태를 가지며, 두 상태 사이의 에너지 차이와 동일한 에너지를 가지는 광자의 흡수 혹은 방출에 의한 전이과정을 가정하였다. 이때 윗 상태와 아래 상태에 있는 원자 수는 일정하다. 열적 평형 상태에서는 단위 시간당 동일한 수의 원자들이 복사를 흡수 혹은 방출할 것이다.

아인슈타인은 그리고 나서 전이과정의 두 가지 방식을 구분하였다. 첫번째는 외부적인 영향이 없는 상황에서 복사 방출이 일어나는 때이다. 그는 이 과정을 러더포드(Rutherford)의 방사능 붕괴 법칙에 비유했다. 현대적인 용어로 이 과정은 자발적 방출이라하며 외부적인 복사가 존재하지 않을 때 일어나며 "아인슈타인의 A 계수"에 의해 나타내진다. 결과적으로 생성되는 광자는 어떠한 방향으로도 방출 될 수 있다. 두번째 전이 방식은 원자와 입사된 복사 사이의 상호작용에 기인한다. 아인슈타인은 입사 복사의 효과가 복사 밀도와 비례하며 상태들 사이의 전이를 야기한다고 가정하였다. 아인슈타인은 낮은 상태로 부터 높은 상태로의 에너지 전이 속도는 높은 상태에서 낮은 상태로의 에너지 전이 속도와 동일해야 한다는 미시적 가역성의 원리가 평형에서의 복사에 적용될 수 있다고 가정하였다. 아인슈타인은 유도 방출과정이 복사장에서 평형을 이루는 원자의 에너지 준위들이 볼츠만 분포에 의해 주어짐과 동시에 플랑크 복사 법칙과 일치하기 위해 일어남을 필요로 하였다. 만약 유도 방출에 대한 아인슈타인 계수가 '0' 이라면 열적 평형 상태에서의 상태들의 볼츠만 분포는 없을 것이다. 열적 평형 상태에서 에너지를 얻는 원자들의 수는 에너지를 잃는 수와 동일해야 한다. 그는 유도되는 흡수와 방출의 확률이 동일하다는 것을 이끌어 내었다. 아인슈타인의 계수는 복사 밀도에 독립적이다.

아인슈타인은 미리 앞을 내다보면서 양자 가설(새로운 양자 역학)과 일치하는 전기동역학과 역학의 새로운 설명이 있었다라면 아인슈타인 계수 A 와 B 가 계산될 수 있다고 제안하였다 이 예견은 1927 년 디랙(Dirac)이 그의 양자역학적 설명을 첫번째 논문에서 아인슈타인 B 계수를, 두번째 논문에서는 아인슈타인 A 계수를 유도하기위해 사용하였을때 이루어졌다.



광 크리스탈 섬유안에서의 초연속체 생성. 국제 빛의 해 2015 운영 위원회 의장 J Dudley 허가하에 사용됨.

아인슈타인의 유도 방출 개념에 대한 실험적 검증은 아인슈타인이 이론적으로 예견한 다음 수십년이 지나고 나서야 이루어졌다. 베르톨로띠(Bertolotti)의 기사 ('왜 레이저는 그리도 늦게 개발 되었는가?' 기사 참고 the ICO Newsletter, January 2010, Number 82)는 그토록 긴 기다림에 대한 설명을 하였다. 1954 년 고든(Gordon), 자이거(Zeiger), 그리고 타운즈(Townes)는 마이크로파 영역에서 작동하는 메이저 (maser, 복사 유도 방출에 의한 마이크로파 증폭)를 개발하였다. 그리고 1960 년 테오도르 마이만(Theodore H. Maiman)은 첫 레이저의 부품으로써 루비 크리스탈에서의 유도 방출을 생성하였다. 1964 년 노벨 물리학상은 레이저에 대한 공로로서 타운즈(Charles H.

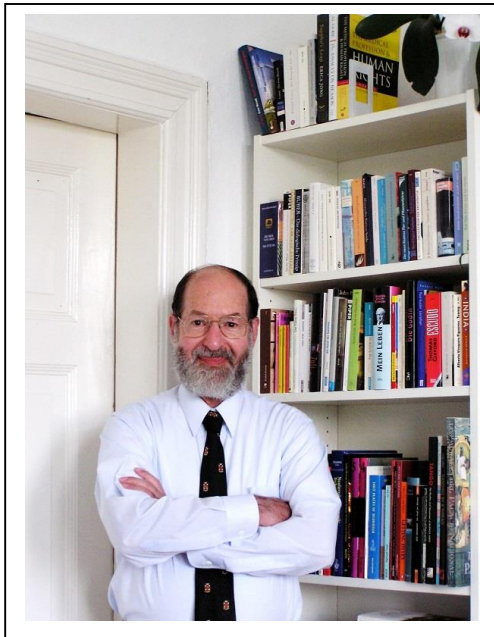
Townes), 바소프(Nicolay G. Basov), 프로호로프(Aleksandr M. Prokhorov)에게 공동 수여 되었다.

그래도 질문은 남아있다 - 빛이란 무엇인가? 아인슈타인은 광자를 진동수  $\nu$ , 파수 벡터  $k$ , 에너지  $h\nu$ , 그리고 운동량  $hk$  를 가지는 전자기파 상태로서 생각하였다. 광자는 정지 질량이 없는 입자이며, 하나의 스핀 상태를 가지며, 두 개의 극성 상태를 가진다. 1924 년 아인슈타인은 다음과 같이 썼다-"컴프턴 실험의 긍정적 결과는 복사가 에너지 전달 측면 뿐 아니라 운동량 측면에서도 분절된 에너지의



발사체처럼 행동한다는 것을 증명해 준다." 그래서 시간이 경과된 후에 우리는 다음과 같은 진술로 다시 돌아 온다 - "복사는 마치 ...로 이루어 진것 처럼 ...하게 행동한다." 이 진술은 빛이 무엇인가가 아닌 오히려 빛은 어떻게 행동하는가를 다루고 있다. 비록 우리는 원래 질문에 대답하지는 못했을지도, 빛에 대해 더욱 풍부해진 우리의 이해가 우리의 삶에 아름다움을 가져가 주고 있으며 우리의 세상을 변화시키고 있다. 고맙다 빛이여.

베리 매스터즈, 독립 학자, 캠브리지, 메사추세츠, 미국



베리 매스터즈 교수는 이스라엘 바이츠만 과학 연구소에서 박사학위를 받았고, 플로리다 주립대에서 석사학위를, 브루클린 폴리테크닉 대학에서 학사학위를 받았다. 매스터즈 교수는 메사추세츠 공과대학교 (MIT) 생물 공학과에서 방문 과학자로, 하버드 대학교 과학역사학과에서 방문 연구원으로, 베른 대학교 안과에서 방문 교수로, 건강과학 통합서비스 대학 해부학및 세포학과 교수로 일하였다. 그는 미국 고등 과학 미국 협회, 미국 광학회, SPIE 의 정회원으로 활동하고 있다. 1999-2000 년 동안 매스터즈 교수는 미국 고등 과학 협회의 의회 과학 공학 회원이었으며 미국 의회 입법 담당 차관보로 일하였다. 그는 1999 년 뵤케 박사와 함께 그들의 연구 "각막에 대한 공초점 현미경" 에 대한 공로로 안과 연구를 대한 보그트 상(안과분야 연구에서 스위스의 가장 권위 있는 상)을 수상하였다. 매스터즈 교수는 86 편의 연구 논문과 143 편의 북 챕터/프로시딩 논문을

저술 하였다. 그는 10 편의 책의 편집자로서 대표적인 저술로 'Noninvasive Diagnostic Techniques in Ophthalmology; Confocal Microscopy and Multiphoton Excitation Microscopy: the Genesis of Live Cell Imaging; Handbook of Biomedical Nonlinear Optical Microscopy (공편집자 : Peter So)' 를 출간하였다. 그는 캠브리지 대학 출판사에 출판될 '초해상도 광학 현미경: 증대된 해상도와 명암을 위한 탐구' 에 관한 새 책을 저술 중이다. 그는 세계를 돌아다니며 책임감 있는 연구 수행, 생의학적 윤리, 비평적 사고, 그리고 생의학 광기술에 대해 강연한다.

[Translator (역자)]

---



박종강은 2015 년 듀크 (Duke) 대학에서 박사학위(물리화학)를 마치고 2016 년 현재 메사추세츠 공과대학교 (MIT) 생물 공학과의 Peter So 그룹에서 박사후 연구원으로 일하고 있다. 최근 관심 연구분야는 비선형 광학과 압축감지 이론을 이용해 기존의 광학 이미징의 한계를 극복 및 뇌신경 신호전달 체계를 이해하는 것이다. 자세한 경력은 <https://www.linkedin.com/in/jongkangpark> 에서 찾을 수 있다.

Jong Kang Park received B. Sc. (2004) and M. Sc. (2008) in chemistry from Yonsei University, Korea. After completing his master degree, Jong worked at the Natural Science Research Institute of Yonsei University from 2008 to 2009 as a research associate. He completed his Ph.D (2015) in the areas of nonlinear optics and multiphoton imaging under the advisement of Prof. Michael Therien and Prof. Warren Warren at Duke University. He is currently working as a postdoctoral associate in Peter So lab at MIT.

---