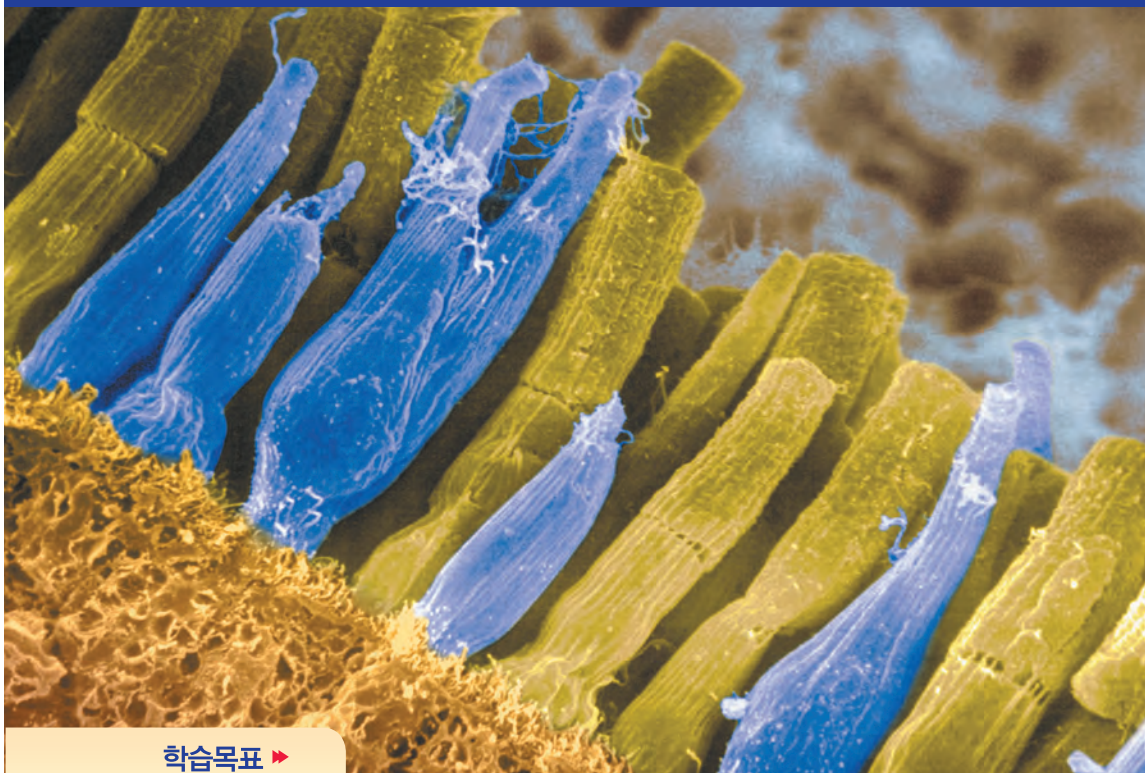


# 28 양자물리학

## Quantum Physics



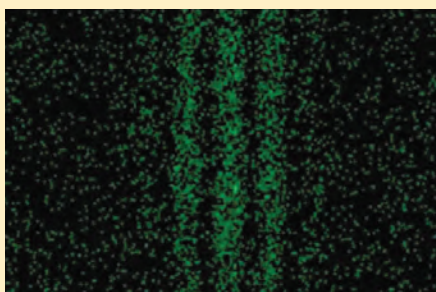
사람의 망막을 전자 현미경으로 찍은 개개의 간상세포(초록)와 추상세포(파랑)의 유사-색상 사진이다. 이런 정교한 미세 정보를 광학 현미경으로 얻기는 불가능하다. 전자 빔으로 얻은 영상에서 더 좋은 분해능이 가능한 이유는 무엇일까?

### 학습목표 ▶

빛과 물질에 대한 에너지 양자화 개념을 이해한다.

### 파동은 입자처럼 행동한다.

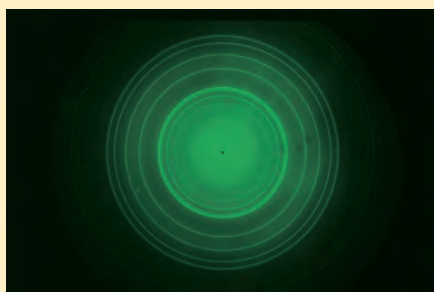
아주 낮은 밀도의 빛이 보여주는 간섭무늬를 보면, 빛이 스크린에 “덩어리”로 부딪치는 것을 보여주고 있다.



빛은 때때로 파동처럼 행동하기도 하고 때때로 입자처럼 행동한다는 것을 배운다.

### 입자는 파동처럼 행동한다.

알루미늄 표적으로부터 나온 이 전자 회절영상은 놀랍게도 입자가 파동성을 가지고 있다는 것을 보여주고 있다.



입자의 파장은 입자의 운동량과 직접적으로 관련되어 있다는 것을 배운다.

### 에너지의 양자화

이 불연속적인 색깔은 헬륨원자 안에 있는 전자가 양자화된 에너지 준위를 전이할 때 방출된 것이다.



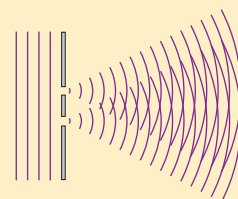
양자계가 광자를 방출하거나 흡수할 때 광자의 에너지와 파장을 계산하는 방법을 배운다.

### 이 장의 배경 ◀

### 이중슬릿 간섭

17.2절에서 두 개의 슬릿으로부터 나온 빛은 간섭을 일으켜 스크린상에 뚜렷한 무늬를 만든다는 것을 배웠다. 이러한 간섭은 빛의 파동성에 대한 명확한 증거이다.

이 장에서, 이중슬릿 간섭 실험은 빛의 새로운 특성과 놀라운 전자의 파동 같은 행동을 밝힐 것이다.



상대성이론을 제외하고 이 책에서 여태까지 배운 것은 1900년대까지 알려진 것들이다. 뉴턴 역학, 열역학, 그리고 전자기 이론은 우리가 고전물리학이라고 부른다. 이것은 다양한 현상에 대한 해석 능력과 아주 많은 응용성을 가지고 있는 인상적인 학문이다.

그러나 1900년대 무렵에 쏟아져 나온 여러 가지 발견들로 인하여 고전물리학은 비록 대단하지만 불완전한 것으로 밝혀졌다. 빛과 물질에 대한 자세한 연구를 통해서 고전물리학이 간단히 설명할 수 없는 놀라운 발견들을 이끌어 내었다. 때때로 빛은 파동처럼 행동하지 않고 입자들의 집단처럼 보일 때가 있다. 다른 실험들은 전자가 때때로 파동처럼 행동한다는 것을 발견하였다. 이러한 발견들은 양자물리학이라는 새롭고 획기적인 빛과 물질에 대한 이론을 가능하게 하였다.

이 장에서는 이상하지만 놀랍고 재미있는 양자 세상을 소개할 것이다. 이전의 장보다는 더 역사적인 접근을 따를 것이다. 새로운 아이디어를 소개하면서, 주요 핵심적인 실험과 이것을 설명하기 위한 이론들의 전개를 기술할 것이다.

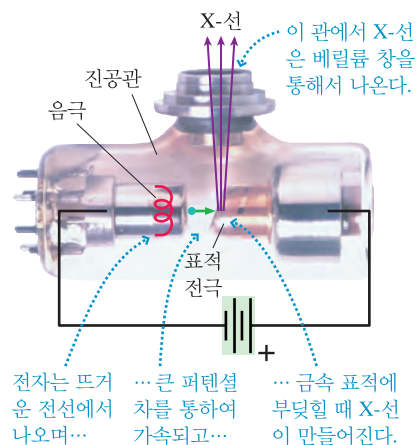
## 28.1 X-선과 X-선 회절

양자물리학의 규칙은 원자나 전자의 크기 수준에 적용된다. 원자의 성질이나 원자 입자들의 물리학을 명확하게 설명하려는 실험들은 고전물리학적 설명을 거부하는 결과들을 가져왔다. 연구자들은 이전에는 전혀 보지 못했던 것, 즉 명확한 설명을 위해서는 새로운 원리나 이론이 필요한 현상들이 관측되었다.

1895년 독일 물리학자 빌헬름 콘라트 뢰트겐(Wilhelm Röntgen)은 전자들이 진공을 어떻게 지나가는지를 조사하고 있었다. 그는 전자를 만들어내는 음극과 금속 전극 표적을 진공관 속에 봉하고, 높은 전압으로 전자들을 음극으로부터 끌어내어 전극 표적에 닿기 전까지 높은 속도로 가속을 시켰다. 어느 날, 그는 우연히 사진 필름이 들어있는 봉투를 진공관 가까이 두게 되었다. 필름은 봉투에 봉해진 상태였지만, 나중에 그는 놀랍게도 그 필름이 빛에 노출된 것을 관측하게 되었다. 진공관으로부터 어떤 종류의 투과하는 복사선이 필름에 노출된 것이다.

뢰트겐은 그 관으로부터 무엇이 나왔는지 전혀 몰랐기 때문에 “미지”의 사물을 나타내는 대수 기호 X를 사용하여 X-선이라 하였다. X-선은 입자건 파동이든 이전에 발견된 어떤 것과도 같지 않았다. 뢰트겐은 X-선을 반사되게 하거나 렌즈로 한 점에 집중시키는 것은 성공하지 못했다. X-선은 입자처럼 직선으로 나아가지만, 대부분의 고체 물질에서는 거의 흡수되지 않고 그대로 통과하였다. 이것은 이전에 알고 있던 입자에서는 전혀 기대할 수 없는 현상이었다. 뢰트겐과 다른 사람들의 실험으로부터 과학자들은 이 미지의 선은, <25.7절>에서 배운 것처럼 아주 짧은 파장을 가지는 전자기파로 결론을 내리게 되었다. 이와 같은 짧은 파장의 파동은 뢰트겐의 장치에서 빠른 전자를 금속 표적에 충돌시킬 때 관측되었다. **그림 28.1**의 현대식 X-선 관의 삽화

그림 28.1 현대식 X-선 관의 작동



처럼, 아직도 X-선은 이런 방법으로 발생된다.

## X-선 영상 BIO

X-선이 사물을 통과하므로, 뢰트겐은 X-선이 사람의 몸 내부 영상을 만드는 데 사용될 수 있음을 알아차렸다. 뢰트겐이 찍은 첫 번째 영상 중 하나는 그의 부인의 손 뼈 영상이었는데, 이것은 새롭게 발견된 X-선을 의학적으로 활용할 수 있는 잠재력을 극적으로 보여주었다. 납이나 뿔속의 광물질처럼 높은 원자 번호의 물질은 X-선을 정지시키는 데 효과적이며; 그림 28.1의 X-선 관의 베릴륨 창이나, 물 혹은 유연한 신체조직의 유기화합물과 같이 원자 번호가 낮은 물질에서는 X-선 세기를 조금 약화시킬 뿐이다. **그림 28.2**의 X-선 영상은 본질적으로 뼈나 신체 밀도가 높은 부분의 그림자로 볼 수 있다. 이것은 이런 조직에서는 X-선이 멈추게 되어 투과를 하지 못해 필름에 노출되지 않기 때문이다. X-선 영상을 필름에 만들어 내는 원리는 뢰트겐 시대 이후에 크게 변하지 않았다.

이러한 X-선 용도는 실용적으로 엄청난 중요성을 가지고 있지만, 이 책에서 더 중요하게 다룰 것은 X-선을 원자 크기 수준의 물질 구조를 조사하는 데 사용하는 것이다.

## X-선 회절

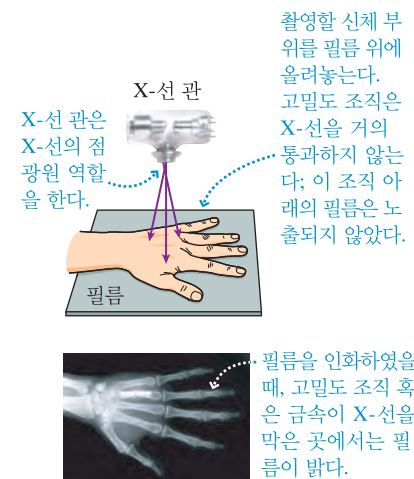
X-선이 짧은 파장의 전자기파라고 결론을 내렸을 시점에, 과학자들은 원자의 크기가 0.1 nm 정도가 된다고 추론하였으며, 고체는 원자들이 규칙적인 결정 격자에 놓여 있다고 제안하였다. 1912년 독일의 과학자 막스 폰 라우에(Max von Laue)는 가시광선이 회절격자로부터 회절 현상이 일어나는 것과 같이 결정을 통과하는 X-선은 “3차원 회절격자”로부터 회절 현상을 겪어야 한다고 주장하였다. 결정에서 나타나는 X-선의 회절 현상은 곧 실험으로 확인되었고, 측정 결과로부터 X-선은 가시광선보다 훨씬 짧은 0.01 nm에서 10 nm까지의 파장을 갖는 전자기파라는 것이 밝혀졌다.

X-선의 회절을 이해하기 위하여 고체에서 원자들의 배열을 살펴보도록 하자. **그림 28.3**은 X-선이 단순입방격자에 부딪치는 것을 보여준다. 이것은 원자들이 층간의 간격이  $d$ 인 평면상에 놓여 있는 단순한 배열이다.

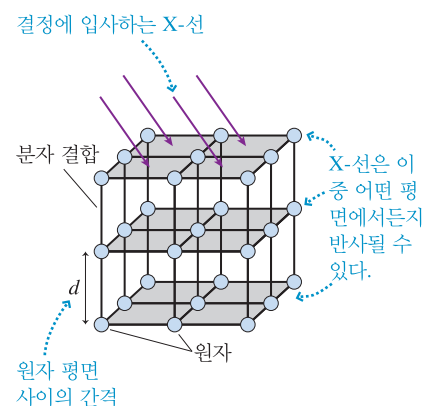
**그림 28.4(a)**는 X-선이 결정에 각도  $\theta$ 로 입사하는 장면을 옆에서 본 그림이다. 대부분의 X-선은 평면을 통과하겠지만, 유리 표면에서 빛이 약간 반사되듯이 X-선의 일부분도 반사가 된다. 반사된 파는 반사각과 입사각이 일치하는 반사 법칙에 맞추어 그림을 그렸다.

그림 28.3에서 보는 바와 같이, 고체 결정은 원자가 놓여 있는 평면이 하나가 아니라 여러 개의 평행한 평면을 가지고 있다. **그림 28.4(b)**와 같이 X-선이 고체를 통과할 때, 파의 일부분은 각각의 평행한 평면에서 반사된다. 고체로부터 반사된 파의 총합은 각각의 원자 평면으로부터 반사된 파를 중첩한 것이다. 대부분의 입사각에 대해

**그림 28.2** X-선 영상 촬영



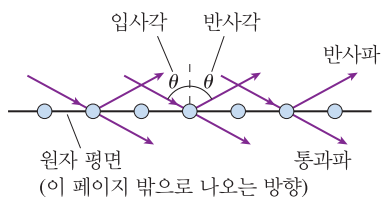
**그림 28.3** 단순입방격자에 입사하는 X-선



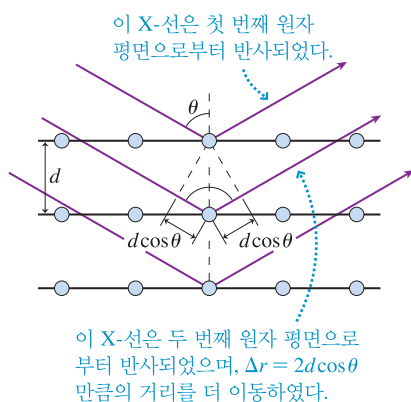


**그림 28.4** 평행한 원자 평면으로부터 X-선 반사

(a) X-선이 하나의 원자 평면을 통과하고 반사된다.



(b) 평행한 평면으로부터 나온 반사파의 간섭



반사된 파들은 서로 위상이 달라지므로 파들의 중첩 결과는 거의 0에 가깝다. 하지만 ◀17.4절의 얇은 막 간섭에서 공부한 바와 같이, 몇 가지 특정한 입사각에 대해서는 반사된 파들의 위상이 같게 된다. 이런 입사각에 대해 반사파들은 서로 보강 간섭을 일으켜 강한 반사를 주게 된다. 이와 같이 몇몇 입사각에서 강한 반사 X-선을 주는 것을 **X-선 회절(X-ray diffraction)**이라고 한다.

그림 28.4(b)에서 보여주는 것과 같이 특정한 평면에서 반사되는 파는 바로 위층에서 반사된 파와 결합되기 전에 추가로 거리  $\Delta r = 2d \cos \theta$ 만큼 더 이동한다. 여기에서  $d$ 는 두 원자 평면 사이의 거리이다. 만약  $\Delta r$ 이 파장의 정수배가 되면, 두 파가 결합할 때 위상이 일치하게 된다. 그리고, 이웃한 두 평면으로부터 반사된 파의 위상이 일치하면, 나머지 평면으로부터 반사된 모든 반사파와 위상이 일치하여 보강 간섭을 일으켜, 강한 반사를 만들게 된다. 결론적으로 X-선은 입사각  $\theta_m$ 이 **브래그 조건(Bragg condition)**을 충족시킬 때 결정으로부터 반사된다.

$$\Delta r = 2d \cos \theta_m = m\lambda \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (28.1)$$

고체로부터 반사되는 X-선이 보강 간섭을 일으키기 위한 브래그 조건

#### 예제 28.1 X-선 회절 분석

파장이 0.105 nm인 X-선이 단순입방결정에 회절되었다. 회절의 최대치가 31.6°와 55.4°에서 관측되고 그 사이 중간 각도에서는 전혀 관측되지 않았다. 이 회절을 일으키는 원자 평면 간의 거리는 얼마인가?

**준비** 이 두 각도는 브래그 조건을 만족해야 한다. 그런데  $m$ 값을 모르지만, 두 값이 연속적인 정수라는 것은 알고 있다. 식 (28.1)에서  $m$ 값이 증가함에 따라  $\theta_m$ 값은 감소한다. 따라서 31.6°는 큰  $m$ 값에 해당한다. 55.4°는  $m$ , 그리고 31.6°는  $m+1$ 에 해당한다고 하자.

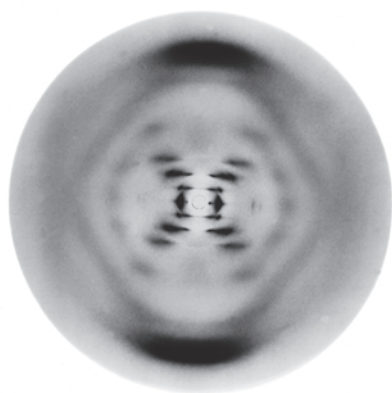
**풀이** 두 가지 회절에 대해서  $d$ 와  $\lambda$ 값은 변하지 않으므로 브래그 조건을 적용하면,

$$\frac{m+1}{m} = \frac{\cos 31.6^\circ}{\cos 55.4^\circ} = 1.50 = \frac{3}{2}$$

따라서 55.4°는 2차 회절이며, 31.6°는 3차 회절이 된다. 이 정보를 이용하여 브래그의 조건을 적용하면

$$d = \frac{2\lambda}{2 \cos \theta_2} = \frac{0.105 \text{ nm}}{\cos 55.4^\circ} = 0.185 \text{ nm}$$

**검토** 원자의 크기는 대략 0.1 nm 정도가 되므로, 결정에서 원자 간의 간격으로 이 값은 합리적이다.



**X로 표시된 점 B10** 로절린드 프랭클린(Rosalind Franklin)은 1953년 DNA의 X-선 회절 무늬를 얻었다. 중앙에 검은 밴드가 겹쳐지는 회절 무늬는 DNA 분자에서 원자들의 배열이 나선 구조를 가지고 있다는 중요한 정보를 제공한다. 이러한 X-선 회절 영상은 DNA 분자의 구조를 밝히는 데 핵심적인 역할을 하는 정보이다.

예제 28.1은 X-선 회절 무늬를 분석하면 이 회절을 만들어 내는 결정에 대한 자세한 정보를 알 수 있다는 것을 보여준다. 예제의 경우 결정의 구조가 간단하기 때문



에 분석도 쉽게 할 수 있었다. 더 복잡한 결정은 더 복잡한 무늬를 만들어 내고, 이 복잡한 무늬를 통하여 결정의 구조를 밝혀낼 수 있다. 과학자들이 원자 및 원자구조에 대한 이론을 발전시켜 감에 따라(현재도 그러고 있지만), X-선은 아주 중요한 도구가 되고 있다. X-선 회절은 단백질과 같은 생물 분자의 3차원 구조를 밝히는 데 널리 사용되고 있다.

## 28.2 광전 효과

◀25.6절에서 빛은 특정한 크기의 에너지 덩어리인 광자로 생각할 수 있다고 소개를 하였다. 아마 여러분들은 이런 생각을 이전에 들어보았겠지만, 이것이 처음 소개되었을 때는 대단히 혁명적인 아이디어였다. 이런 괴상한 아이디어가 널리 받아들여지기 위해서는 결정적인 실험 증거가 필요하였다. 그 증거가 광전 효과 실험 연구에서 제공되었다. 이 놀라운 새로운 개념의 근거와 그것이 미치는 영향을 이 장에서 자세히 보여줄 것이다.

빛의 광자 성질을 보여주는 첫 번째 힌트는 1800년대 후반에 알려졌으며, 음으로 대전된 검전기에 자외선 빛을 쏘이면 전하가 없어진다는 발견이었다. 영국 물리학자 조셉 존 톰슨(J. J. Thomson)은 그림 28.5와 같이 자외선 빛이 검전기로부터 전자를 방출시킨다는 것을 알아내었다. 사물의 표면에 빛을 쬐어주면 전자가 방출되는 현상을 **광전 효과(photoelectric effect)**라 한다. 얼핏 보면 작은 발견일 수 있는 이 발견이 이 장에서 소개하는 새로운 개념으로 진입할 수 있게 해주는 핵심적인 사건이 되었다.

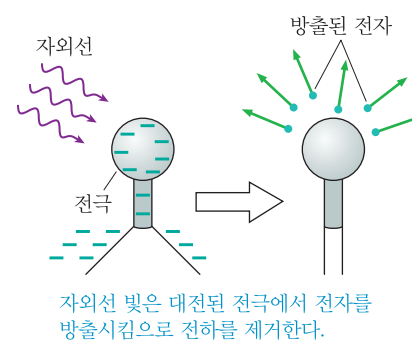
### 광전 효과의 특성

그림 28.6은 두 개의 전극이 마주하며 한 개의 창을 갖고 있는 진공 유리관을 보여준다. 자외선을 음극에 쬐어주면 검전기에 반시계방향(시계방향의 전자 흐름)의 전류가 유지된다. 음극과 양극 사이의 공간에 흐르는 전류는 실제 공간을 따라(도선을 따라 흐르는 것이 아님) 자유롭게 움직이는 전자에 의한 것이며, 도선을 따라 흐르는 전류와 같은 비율로 흐른다. 전극을 어둠 속에 두면 전류는 흐르지 않으며, 전자도 자발적으로 음극으로부터 튀어나오지 않는다. 빛이 전자가 일정한 속도로 음극으로부터 방출되도록 한 것이다.

그림 28.6의 전지는 두 전극 사이에 일정한 퍼텐셜차  $\Delta V$ 를 유지한다. 이 장치를 사용하여 퍼텐셜차, 빛의 파장, 세기 등을 변화시킴에 따라서 전류  $I$ 가 어떻게 변하는가를 조사할 수 있다. 이렇게 하여 다음과 같은 광전 효과의 특성을 밝힐 수 있다.

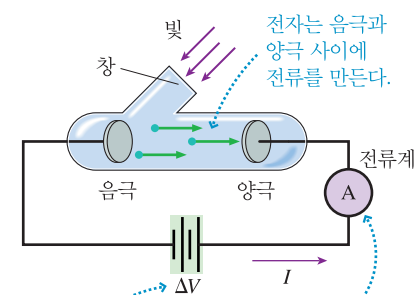
1. 전류  $I$ 는 빛의 세기에 직접적으로 비례한다. 빛의 세기가 두 배가 되면 전류도 두 배가 된다.

그림 28.5 자외선 빛은 대전된 전극에서 전하를 제거한다.



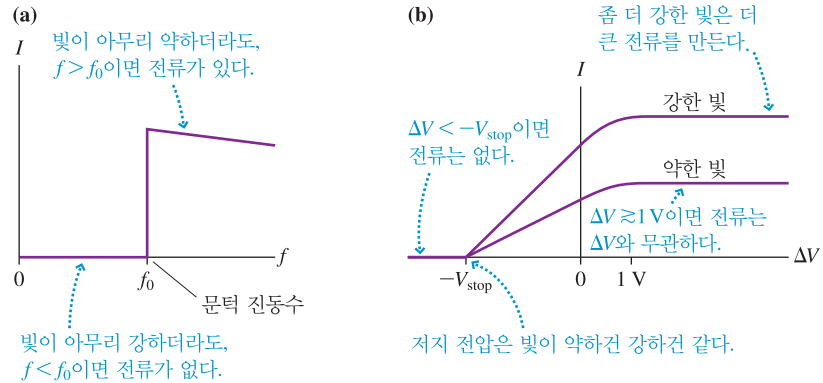
자외선 빛은 대전된 전극에서 전자를 방출시킴으로 전하를 제거한다.

그림 28.6 광전 효과를 위한 실험 장치



퍼텐셜차는 변동시킬 수 있으며, 방향도 바꿀 수 있다.

전류는 퍼텐셜차, 빛의 진동수, 빛의 세기를 변화시킴에 따라서 측정된다.

그림 28.7 광전 전류의 빛의 진동수  $f$  그리고 전지 퍼텐셜차  $\Delta V$ 에 따른 의존성

2. 빛을 비추면 전류는 지체 없이 바로 생성된다.
3. 전자는 빛의 진동수  $f$ 가 문턱 진동수(threshold frequency)  $f_0$ 을 넘어설 때만 방출된다. 그림 28.7(a)가 이 사실을 보여주고 있다.
4. 문턱 진동수  $f_0$ 의 값은 음극을 만든 금속의 종류에 따라 달라진다.
5. 퍼텐셜차  $\Delta V$ 가 양(+)이면[양극이 음극에 대해서 양(+)],  $\Delta V$ 가 증가하더라도 전류는 거의 변하지 않는다. 전지를 바꾸어 퍼텐셜차  $\Delta V$ 가 음(-)으로 되면[양극이 음극에 대해서 음(-)], 전류는 점차 감소하여  $\Delta V = -V_{\text{stop}}$ 에서 전류는 0이 된다.  $V_{\text{stop}}$ 은 저지 전압(stopping potential)이라 한다. 그림 28.7(b)에서 이러한 특성을 보여준다.
6.  $V_{\text{stop}}$ 의 값은 빛이 약하거나 강하든 모두 같다. 더 강한 빛은 더 큰 전류를 흐르게 하지만, 어떤 경우이든  $\Delta V = -V_{\text{stop}}$ 이면 전류는 흐르지 않는다.



수업 영상

## 광전 효과 이해하기

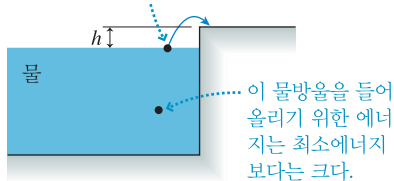
22장에서 전자는 금속에서 전류의 운반자 역할을 하며, 음(-)으로 대전된 입자의 바다에서 자유롭게 움직이는 것으로 배웠다. 전자는 금속 내에 구속되어 있으므로 상온에서 전극으로부터 자발적으로 흘러나오지 않는다.

유용한 비유로서, 그림 28.8과 같이 물이 차 있는 수영장을 생각할 수 있다. 물이 잠잠하면 물 분자는 자발적으로 수영장 밖으로 뛰쳐나오지 않는다. 물 분자를 끄집어내기 위해서, 물 분자를 수영장 가장자리까지 이동시키고 위로 들어올리기 위해서는, 중력에 반하는 일을 해야 한다. 물속에 있는 물 분자를 들어올리기 위해서는 최소한의 에너지가 필요하다. 더 깊은 물속에 있는 물 분자를 제거하기 위해서는 최소에너지보다 더 많은 에너지가 필요하다.

마찬가지로 금속으로부터 전자를 자유롭게 하기 위해서는 최소한의 에너지가 필요하다. 전자를 끄집어내기 위해서는 전자가 탈출할 수 있을 정도의 충분히 큰 속도를 가지도록 전자에 힘을 가해서 일을 해 주어야 한다. 전자를 자유롭게 하는 데 필요한 최소한의 에너지  $E_0$ 를 금속의 일함수(work function)라 한다. 물속 깊은 곳에

그림 28.8 금속 안의 전자에 대한 수영장 비유

한 방울의 물을 수영장 밖으로 들어올리기 위한 최소에너지는  $mgh$ 이다.



있는 물 분자처럼, 어떤 전자는 탈출하는 데 최소한의 에너지  $E_0$ 보다 더 큰 에너지가 필요할 수 있지만 적어도  $E_0$ 의 에너지를 필요로 한다. 표 28.1은 몇 가지 원소에 대한 일함수를 eV 단위로 보여주고 있다(Joule 단위로 변환하려면  $1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$  인 것을 기억하자).

다시 그림 28.6의 광전 효과 실험으로 되돌아가자. 자외선 빛을 음극에 비추면, 전자들은 운동 에너지를 가지고 떠난다. 금속 내부로부터 에너지가  $E_{\text{elec}}$ 인 전자가 탈출할 때  $\Delta E$ 만큼의 에너지를 잃는다면, 전자의 운동 에너지는  $K = E_{\text{elec}} - \Delta E$ 로 된다. 일함수  $E_0$ 는 전자를 탈출시키는 데 필요한 최소한의 에너지이므로, 탈출한 전자의 최대 운동 에너지는 다음과 같다.

$$K_{\text{max}} = E_{\text{elec}} - E_0$$

음극을 떠난 전자는 사방으로 날아간다. 그림 28.9는 양극과 음극사이의 퍼텐셜차  $\Delta V$ 가 변화할 때 일어나는 현상을 보여주고 있다.

- 음극과 양극 사이의 퍼텐셜차가  $\Delta V = 0$ 이라면, 두 판 사이에 전기장은 없다. 일부 전자는 양극에 도달하여 측정 가능한 전류를 생성하겠지만, 많은 전자는 양극에 도달하지 못한다.
- 양극이 양(+)이면, 모든 전자를 양극으로 끌어당긴다.  $\Delta V$ 가 더 증가하더라도 더 이상 전자를 양극으로 도달하게 하지 못하므로 전류  $I$ 도 더 이상 증가하지는 않는다. 이것이 그림 28.7(b)에서  $\Delta V$ 가 양(+)일 때 그래프가 수평으로 되는 이유이다.
- 양극이 음(-)이면, 전자를 밀어낸다. 그러나 음극을 떠나는 전자가 충분한 운동 에너지를 가지고 있으면, 공을 충분히 큰 운동 에너지로 위로 던지면 공이 천장에 닿을 수 있듯이, 전자는 양극에 도달할 수 있다. 양극의 퍼텐셜을 약간 음(-)으로 하면 제일 느린 전자만 되돌아간다. 양극의 퍼텐셜을 점차 더 음(-)으로 하면, 전류는 서서히 감소하여 그림 28.7(b)처럼 저지 전압에서는 모든 전자가 되돌아가서 전류가 멈추게 된다.

에너지보존 법칙을 사용하면 최대 운동 에너지와 저지 전압 사이의 관계가 주어진다.  $\Delta V$ 가 음(-)이면, 그림 28.9의 바닥 그림처럼 전자는 “오르막 가기”를 하여 운동 에너지가 점차 퍼텐셜 에너지로 전환되며 속도가 느려진다. 즉,  $\Delta U = -e\Delta V = -\Delta K$ , 여기에서 전자에 대해서  $q = -e$  그리고 전자가 운동 에너지를 잃기 때문에  $\Delta K$ 는 음(-)이다. 전류가 멈추는  $\Delta V = -V_{\text{stop}}$ 이 되면, 운동 에너지가  $K_{\text{max}}$ 가 되는 제일 빠른 전자는 막 양극에 닿는 순간 되돌아가게 된다. 전자는 운동 에너지를 100% 퍼텐셜 에너지로 전환시키므로,  $\Delta K = -K_{\text{max}}$ 가 된다. 따라서  $eV_{\text{stop}} = K_{\text{max}}$  혹은

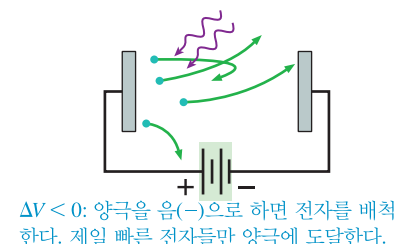
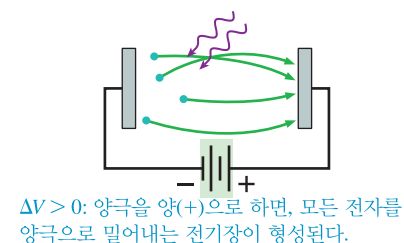
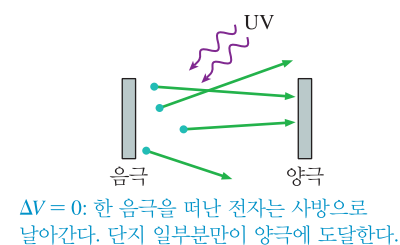
$$V_{\text{stop}} = \frac{K_{\text{max}}}{e} \quad (28.2)$$

다른 말로 표현하면, 저지 전압을 측정하면 전자들의 최대 운동 에너지를 알 수 있다.

표 28.1 여러 가지 금속에 대한 일함수

| 원소   | $E_0$ (eV) |
|------|------------|
| 칼륨   | 2.30       |
| 나트륨  | 2.75       |
| 알루미늄 | 4.28       |
| 텅스텐  | 4.55       |
| 구리   | 4.65       |
| 철    | 4.70       |
| 금    | 5.10       |

그림 28.9 양극과 음극 사이의 퍼텐셜차 효과







**아인슈타인의 “기적의 해”** 알버트 아인슈타인의 나이가 26세가 되었던 1905년에 그는 거의 알려지지 있지 않은 청년이었다. 아인슈타인은 1905년 일 년 동안에 세 가지 서로 다른 분야에서 세 편의 논문을 발표하였다. 그런데 그것들은 각자가 물리학을 혁명적으로 바꿀 만한 것들이었다. 첫째는 상대성이론의 초기 논문이다. 두 번째 논문은 통계 역학을 사용하여 물에 떠있는 조그만 입자의 움직임을 기술하는 브라운 운동 현상을 설명한 것이다. 1905년의 세 번째 논문은 이 장에서 가장 관심을 끌고 있는 빛의 성질에 관한 것이다.

## 아인슈타인의 설명

광전 효과 실험에서 빛을 음극에 쏘이면, 왜 전자는 금속을 즉각 떠나게 되는가? 초창기 연구자들은 고전물리학에 기반을 둔 설명을 제안하였다. 가열된 전극은 자발적으로 전자를 발산한다. 그러므로 빛을 음극에 비추어 가열이 되면 전자를 방출하게 된다고 제안하는 것은 자연스럽다. 그러나 이러한 설명은 실험결과와 부합되지 않는다. 빛이 금속을 가열하기 위해서는 약간의 시간을 필요로 한다. 그러나 우리가 알고 있는 바와 같이 빛이 쏘여지면 전자는 시간지연 없이 즉각적으로 튀어 나온다.

가열 가설은 문턱 진동수도 설명할 수 없다. 문턱 진동수보다 약간 큰 진동수의 빛에 의해 약한 세기의 전류가 발생한다면, 문턱 진동수보다 진동수가 약간 낮고 그 대신 세기가 더 강한 빛을 비추면 전류가 발생되어야 할 것이다(아마 금속이 더 가열될 것이기 때문이다). 이 경우 진동수를 약간 바꾸는 것이 문제가 될 이유가 없다. 그렇지만 실험 증거는 광전 효과에서 아주 날카로운 진동수 문턱치가 존재함을 보여준다.

광전 효과 데이터를 설명하기 위해서 새로운 물리이론이 필요하였다. 현재까지 받아 들여지는 해답은 1905년 알버트 아인슈타인(Albert Einstein) 논문에서 제안되었다. 이 논문에서 그는 실험 데이터의 중요한 특성들을 모두 설명할 수 있는 대단히 단순하고 놀랍도록 대담한 아이디어를 제안하였다.

아인슈타인의 논문은 독일 물리학자 막스 플랑크(Max Planck)의 연구를 확장한 것인데, 플랑크는 [25.7절](#)에서 본 것과 같이 고온에서 빛을 발하는 물체에서 나오는 빛의 스펙트럼을 가열된 물체 내에서 특별한 방법으로 진동하는 발진 원자로 설명할 수 있음을 알아내었다. 진동수  $f$ 로 진동하는 원자의 에너지는 다음 중 하나를 가져야 한다.  $E=0, hf, 2hf, 3hf, \dots$ , 여기에서  $h$ 는 상수이다. 즉, 진동 에너지는 **양자화**(quantized)되어 있다. 상수  $h$ 는 **플랑크 상수**(Planck's constant)로 불린다.

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4.14 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

SI 단위로 된 첫 번째 값이 대부분의 계산에서 사용되는 값이지만, 에너지가 eV 단위로 표기될 때 두 번째 값도 유용할 것이다.

아인슈타인은 플랑크의 생각을 심각하게 받아들인 첫 번째 사람이었다. 아인슈타인은 더 나아가서 전자기파 그 자체가 **양자화되었다**고 제안하였다. 즉, 빛은 실제로 연속적인 파동이 아니라 조그만 에너지 다발 또는 묶음으로 도달한다. 아인슈타인은 각각의 빛 다발을 **빛양자**(light quantum)라고 불렀으며, 한 개의 빛양자 에너지는 빛의 진동수에 바로 비례한다고 가정하였다. 즉, 지금은 **광자**(photon)로 불리는 빛양자의 에너지는

$$E = hf \quad (28.3)$$

진동수가  $f$ 인 광자, 곧 빛양자 하나의 에너지

여기에서  $h$ 는 플랑크 상수이다. 높은 진동수 빛은 높은 에너지 광자들로 구성되어 있

다(높은 에너지 다발들로 구성되어 있다). 이렇게 겹으로는 간단해 보이는 가정으로부터 아인슈타인은 광전 효과의 모든 성질들을 설명할 수 있었다. 그리고 진동수가 다른 전자기파의 여러 가지 다른 성질들도 설명할 수 있었다.

### 예제 28.2 자외선 광자의 에너지 구하기

290 nm의 자외선은 같은 세기의 310 nm 자외선 빛보다 250배나 큰 손상을 세포에 가져온다; 300 nm 근처에 뚜렷한 손상 문턱치가 있다. 300 nm 광자의 에너지는 eV 단위로 얼마인가?

**준비** 광자의 에너지와 진동수 사이의 관계는  $E = hf$ 이다.

**풀이** 파장이 300 nm일 때 진동수는

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{300 \times 10^{-9} \text{ m}} = 1.00 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

$h$ 를 eV·s 단위로 하고 식 (28.3)을 이용하여 에너지를 계산하면

$$E = hf = (4.14 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s})(1.00 \times 10^{15} \text{ Hz}) = 4.14 \text{ eV}$$

**검토** 이 숫자는 그럴 듯해 보인다. 25장에서 물 분자에서 결합 하나를 제거하는 데 4.7 eV 에너지가 필요한 것을 보았다. 이 영역의 에너지를 가지는 광자는 세포에서 복잡한 유기 분자들의 구조에 손상을 가할 수 있을 것이다. 이 문제에서 제기한 바와 같이, 이 손상에는 뚜렷한 문턱치가 존재한다. 대략 4.1 eV보다 큰 에너지를 가지는 광자는 세포의 유전물질을 파괴할 수 있을 것이다. 더 낮은 에너지는 거의 영향을 미치지 못할 것이다.



### 모든 자외선이 똑같이 만들어진 것은 아니다 B10

예제 28.2에 의하면 자외선의 파장이 약간만 달라도 생물학적 영향이 아주 다르다. 일광욕 베드는 거의 전 에너지의 빛을 315 nm보다 더 큰 파장에서 만들어낸다. 이 빛은 세포를 자극하여 멜라닌을 만들어 피부를 그을리게 하지만 단시간에 세포 손상을 일으키지 않는다. 자외선 살균 등에서는 정점이 254 nm에 있는 자외선을 사용하는데, 세포에 손상을 가하거나 죽이기도 한다. 그런 빛에 노출되면 아주 고통스러운 정도로 피부가 타게 된다.

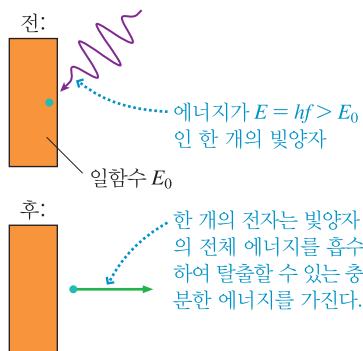
## 아인슈타인의 가설과 광전 효과

빛이 양자화되었다는 아이디어는 지금은 널리 이해되고 받아들여지고 있다. 그러나 아인슈타인이 논문을 발표할 시점에는 이것은 정말 혁명적인 아이디어였다. 우리는 광자모형을 이미 사용하고 있지만, 이론적인 이해를 좀 더 자세히 추구할 필요가 있다. 1905년 논문에서 아인슈타인은 빛양자, 그리고 물질과의 상호 작용에 관한 세 가지 가설을 내놓았다:

1. 진동수  $f$ 인 빛은 각각 에너지가  $E = hf$ 인 이산적인 양자들로 구성되어 있다. 각각의 광자는 빛의 속도  $c$ 로 날아간다.
2. 빛양자는 전부이거나 전무한 방식으로 방출되거나 흡수된다. 물체로부터 1개, 2개, 혹은 3개의 광자가 방출될 수 있지만, 1.5개의 광자가 방출되지는 않는다. 유사하게 금속에서 전자는 반개의 양자는 흡수할 수 없고 단지 정수 개만을 흡수한다.
3. 한 개의 빛양자가 금속에 흡수되었을 때 전체 에너지를 한 개의 전자에만 전달한다.

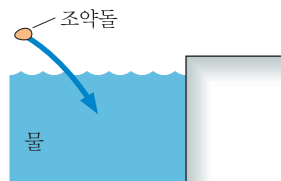
아인슈타인의 가설이 광전 효과에 어떻게 적용되는지 알아보자. 각각의 에너지가

그림 28.10 전자의 방출

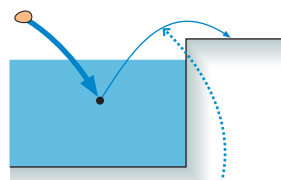


**세상을 다른 빛으로 보기** BIO 식물은 빛 에너지를 화학적 에너지로 전환하기 위하여 광합성을 이용한다. 가시광선 광자는 필요한 분자 전환을 할 수 있는 충분한 에너지를 가지고 있지만, 적외선 광자는 그렇지 못하다. 적외선 광자는 광합성을 일으킬 정도의 충분한 에너지를 가지고 있지 않으므로 흡수되지 않고 그대로 반사된다. 그래서 이 사진에서 나무는 귀신처럼 하얗게 보인다.

그림 28.11 조약돌이 물에 에너지를 전달한다.



고전적으로 조약돌의 에너지는 모든 물 분자들에 나누어진다. 한 개의 조약돌은 아주 조그만 파도를 일으킬 뿐이다.



조약돌의 모든 에너지가 한 방울의 물에 전달될 수 있으면, 그 물방울은 수영장 밖으로 튀어 나갈 것이다.

$hf$ 인 빛이 금속에 비추어지는 것을 급류처럼 쏟아 붓는 광자의 흐름으로 생각하자. 각각의 광자는 한 개의 전자에 흡수되어 에너지  $E_{\text{elec}} = hf$ 를 전달한다. 이것은 다음과 같은 흥미로운 결론을 가져온다:

1. 한 개의 빛양자를 흡수한 전자는 에너지  $E_{\text{elec}} = hf$ 를 갖는다. 그림 28.10에서 전자는 일함수  $E_0$ 보다 더 큰 에너지를 가지면 금속을 탈출할 수 있다. 즉,

$$E_{\text{elec}} = hf \geq E_0 \quad (28.4)$$

다르게 표현하면, 전자의 방출에는 문턱 진동수가 있다.

$$f_0 = \frac{E_0}{h} \quad (28.5)$$

$f$ 가  $f_0$ 보다 약간이라도 작다면, 빛의 세기가 아무리 강하더라도 탈출에 필요한 충분한 에너지를 어떠한 전자도 얻지 못한다. 그러나  $f \geq f_0$ 이면 아무리 약한 빛이라 하더라도 몇 개의 전자를 탈출시키는 데 필요한 충분한 에너지를 전달할 수 있다. 왜냐하면 각각의 광자는 한 개의 전자에 전체 에너지를 전달하기 때문이다. 이러한 문턱치의 정향성은 실제 실험 데이터가 보여주는 그대로이다.

2. 더 강한 빛은 더 많은 수의 광자를 표면에 전달한다. 이것은 더 많은 수의 전자를 탈출하게 하고, 실험에서 관측한 대로 더 많은 전류를 흐르게 한다.
3. 전자의 운동 에너지는 분포도를 가지게 된다. 왜냐하면 각 전자를 탈출시키는 데 필요한 에너지가 다르기 때문이다. 그러나 최대의 운동 에너지는 다음과 같다.

$$K_{\text{max}} = E_{\text{elec}} - E_0 = hf - E_0 \quad (28.6)$$

식 (28.2)에서 설명한 바와 같이, 저지 전압  $V_{\text{stop}}$ 은  $K_{\text{max}}$ 의 측정치이다. 아인슈타인의 이론은 저지 전압과 빛의 진동수가 다음과 같이 주어지는 것으로 예측한다.

$$V_{\text{stop}} = \frac{K_{\text{max}}}{e} = \frac{hf - E_0}{e} \quad (28.7)$$

식 (28.7)에 의하면, 저지 전압은 빛의 세기에 따라서는 변하지 않는다. 빛의 세기가 약해진 강해진 저지 전압은 같다. 이것은 실험 데이터와 일치한다.

4. 만약 각자의 광자가 에너지  $hf$ 를 한 개의 전자에 전달한다면, 그 전자는 즉각 탈출하기에 충분한 에너지를 가지게 된다. 따라서 전류는 지체 없이 즉시 발생하여야 하는데, 이것은 실험에서 관측된 그대로이다.

궁극적으로 아인슈타인의 가설은 광전 효과 실험 데이터에서 관측된 모든 성질을 설명할 수 있다. 이제부터는 빛을 완전히 다른 방법으로 생각해야 한다.

광자 모형을 좀 더 시각적으로 생각하는 데 도움을 주기 위해서 수영장 비유를 다시 생각해보자. 그림 28.11과 같이 조약돌 하나를 수영장에 던지는 것을 생각하자. 조약돌은 물의 에너지를 증가시키나, 그 증가분은 수영장의 모든 분자들에 나누어지게 된다. 물의 에너지 증가분이 작은 물결을 만들 정도는 되지만, 수영장으로부터 물이 튀어 나올 정도는 아니라고 하자. 그런데 조약돌의 전체 에너지가 다른 물과 나눌 필

요 없이 한 방울의 물에 집중된다고 하자. 그 물방울은 수영장 밖으로 빠져 나오는데 충분한 에너지를 쉽게 얻을 수 있다. 빛양자가 전체 에너지를 한 개의 전자에만 전달한다는 아인슈타인의 가설은 조약돌이 전체 에너지를 한 방울의 물에 전달하는 것에 해당한다.

많은 사람들이 추측하듯이 아인슈타인은 1921년에 상대성이론으로 노벨상을 받은 것이 아니라 광전 효과의 설명으로 받았다. 아인슈타인은 확실하게 에너지가 양자화 되었음을 보여주었으며, 또한 빛은 파동성의 간섭 현상을 보여주지만, 동시에 우리가 지금 광자라고 부르는 입자성의 에너지 다발로 빛을 다루어야 한다는 것을 보여주었다. 이것은 양자물리학의 발전에 위대한 첫 번째 단계가 된다.

### 예제 28.3 광전 효과의 문턱 진동수 찾기

나트륨과 알루미늄으로부터 전자를 방출하기 위한 문턱 진동수와 파장은 얼마인가?

**준비** 표 28.1에서 나트륨의 일함수는  $E_0 = 2.75 \text{ eV}$ 이며 알루미늄에 대해서는  $E_0 = 4.28 \text{ eV}$ 이다.

**풀이**  $h$ 를  $\text{eV} \cdot \text{s}$  단위로 하고, 식 (28.5)를 사용하여 계산하면,

$$f_0 = \frac{E_0}{h} = \begin{cases} 6.64 \times 10^{14} \text{ Hz} & \text{나트륨} \\ 10.34 \times 10^{14} \text{ Hz} & \text{알루미늄} \end{cases}$$

진동수로부터 파장을 구하기 위하여  $\lambda = c/f$ 를 사용하면

$$\lambda = \begin{cases} 452 \text{ nm} & \text{나트륨} \\ 290 \text{ nm} & \text{알루미늄} \end{cases}$$

**검토** 광전 효과는 나트륨에서  $\lambda < 452 \text{ nm}$ 일 때 관측 가능하다. 이것은 파랑과 자주의 가시광선을 포함하지만, 빨강, 주황, 노랑, 초록은 해당되지 않는다. 더 큰 일함수를 가지는 알루미늄에 대해서는 파장이  $\lambda < 290 \text{ nm}$ 인 자외선이 필요하다.

### 예제 28.4 전자의 최대 속도 구하기

나트륨에 파장  $300 \text{ nm}$ 의 빛을 비출 때, 전자의 최대 속도와 저지 전압은 얼마인가?

**준비** 방출된 전자의 운동 에너지(그리고 전자를 정지시키기 위해서 필요로 하는 퍼텐셜차)는 들어오는 빛의 에너지  $E = hf$ 와 전자가 방출되는 금속의 일함수  $E_0 = 2.75 \text{ eV}$ 에 의존한다.

**풀이** 빛의 진동수는  $f = c/\lambda = 1.00 \times 10^{15} \text{ Hz}$ 이다. 따라서 각각의 빛양자는 에너지  $hf = 4.14 \text{ eV}$ 를 가진다. 전자의 최대 운동 에너지는

$$\begin{aligned} K_{\max} &= hf - E_0 = 4.14 \text{ eV} - 2.75 \text{ eV} = 1.39 \text{ eV} \\ &= 2.22 \times 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

운동 에너지는  $K = \frac{1}{2}mv^2$ 이다. 여기서  $m$ 은 전자의 질량이며 나트륨의 질량이 아니다. 따라서, 음극을 떠나는 전자의 최대 속도는

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2K_{\max}}{m}} = 6.99 \times 10^5 \text{ m/s}$$

속도를  $\text{m/s}$  단위로 계산하기 위하여  $K_{\max}$ 도 SI 단위인 J로 표기한다.

전자의 최대 속도를 알고 있으므로, 식 (28.7)을 이용하여 저지 전압을 구할 수 있다.

$$V_{\text{stop}} = \frac{K_{\max}}{e} = 1.39 \text{ V}$$

양극의 전압  $-1.39 \text{ V}$ 는 제일 빠른 전자를 멈출 수 있을 정도로 충분하며, 전류를 0으로 떨어뜨린다.

**검토**  $K_{\max}$ 를  $\text{eV}$  단위로 표시하면, 저지 전압은  $K_{\max}$ 와 같은 수치를 가진다.  $1.39 \text{ eV}$ 의 운동 에너지를 가지는 전자는 퍼텐셜차  $1.39 \text{ V}$ 의 “오르막”을 거슬러 갈 수 있지만 더 이상은 안 된다.



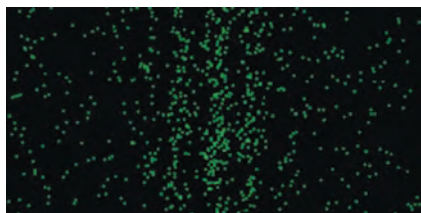
## 28.3 광자

**그림 28.12** 아주 낮은 빛의 세기로 이중슬릿 실험을 수행하였다.

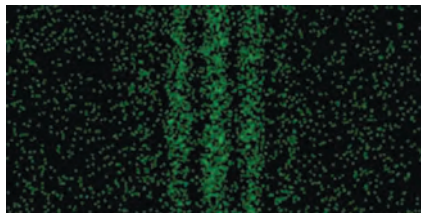
(a) 아주 짧은 시간 후의 영상



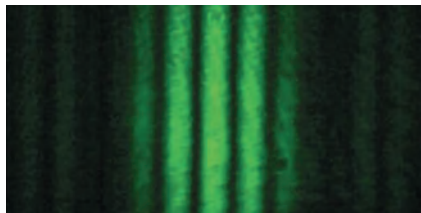
(b) 약간 긴 시간 후의 영상



(c) 점차 형성되어 가는 영상



(d) 아주 긴 시간 후의 영상



지금까지 빛의 광자 성질에 대한 더 이상 부정할 수 없는 증거들을 보았다. 그러나 이것은 중요한 의문을 남겼다: 대체 광자는 무엇인가? 설명을 시작하기 전에 빛의 파동 속성을 가장 극적으로 보여주는 이중슬릿 간섭 실험으로 되돌아가자. 실험 장치를 약간 수정하여 광원과 슬릿 사이에 필터를 넣어서 빛의 세기를 극적으로 줄일 것이다. 영상이 너무 희미하여 맨 눈으로 볼 수 없을 정도이므로, 영상을 시간에 따라 누적하여 만들어 나가는 검출기를 사용한다(이것은 ◀25.6절에서 아주 낮은 세기의 빛을 촬영하는 데 사용한 감지기와 같은 종류이다).

**그림 28.12**는 각각 다른 네 번에 걸쳐 측정된 영상을 보여주고 있다. 초기에는 빛이 검출기에 거의 도달하지 못하므로 빛의 띠가 거의 보이지 않는다. 그 대신 점들만 나타난다. 검출기는 입자성의 물체가 도달한 것을 기록하고 있다.

검출기가 오랫동안 영상을 쌓아감에 따라서 점들의 위치가 완전히 무작위가 아님을 알 수 있다. 점들은 보강간섭 영상이 기대되는 바로 그 자리에 떠오르며 무리를 짓는다. 검출기가 계속 빛을 모아감에 따라 밝고 어두운 주름은 더 뚜렷해진다. 오랜 시간이 지나면 개개의 점들은 겹쳐져서 17장에서 본 빛의 영상과 같은 것이 된다.

개개의 광자가 스크린에 도달함에 따라 만들어진 빛의 점들은 입자의 성질을 갖지만 전체적인 모습은 고전적 입자 개념과 잘 맞물리지 않는다. 고전적 입자는 이중슬릿 장치와 마주치면 둘 중 하나의 슬릿을 통과한다. 빛이 고전적 입자로 구성되어 있다면, 스크린 상에는 두 슬릿을 통과한 지점에 해당하는 두 개의 밝은 영역만 볼 수 있을 것이다. 그 대신 실제 실험에서는 입자성의 점들이 모여 파동성의 간섭영상을 만드는 것을 본다.

이 실험에서는 빛의 세기를 아주 낮추어 한 번에 광자 한 개가 장치를 통과하도록 하였다. 그림 28.12와 같이 파동성의 간섭 현상 결과로 입자성의 광자들이 검출기에 도달한다면, 한 번에 하나의 광자가 실험 장치를 통과한다면 광자는 대체 무엇과 간섭을 일으키는 것일까? 다른 것은 아무것도 없다. 각각의 광자가 다른 광자와 간섭을 일으키는 것이 아니라 자기 자신과 간섭을 일으킨다면, 각각의 광자는 입자성 물체임에도 불구하고 두 개의 슬릿을 모두 통과해야 할 것이다. 이것은 파동만이 할 수 있는 것이다.

이것은 아주 기묘한 것처럼 보인다. 기묘하든 아니든, 이것이 빛이 실제 실험에서 행동하는 양식이다. 때때로 입자성 행동을 보여주기도 하고, 또 어떨 때는 파동성 행동을 보여준다. 우리가 빛이라 부르는 것은 처음 생각했던 것보다 더 이상하고 더 복잡하다. 그리고 서로 모순적으로 보이는 이 성질들은 서로 화해될 것 같지도 않다. 따라서, 자연을 있는 그대로 받아들여야 하며, 자연이 우리의 기대에 부합될 것으로 희망해서는 안 될 것이다. 더구나 앞으로 알게 되겠지만 이러한 파동과 입자의 이중적인 행동은 빛에만 국한되지 않는다.

## 광자 방출률

빛의 광자 속성은 대부분의 경우에 명확하지 않다. 우리가 흔히 사용하는 대부분의 광원에서는 광자가 엄청난 수로 방출되어서 파동성 빛의 중첩만 인지할 수 있다. 이것은 흡사 비가 지붕에 쏟아질 때 빗줄기만 알아챌 수 있지 개개의 빗방울은 인지할 수 없는 것과 같다. 아주 약한 비가 훑날릴 때 개개 물방울이 무작위로 뿌려지듯이 엄청나게 낮은 빛의 세기일 때만 빛은 개개 광자의 흐름으로 보인다.

### 예제 28.5 레이저로부터 매초 얼마나 많은 광자가 방출되는가?

출력 1.0 mW의 레이저 포인트로 광선( $\lambda = 670$  nm)을 스크린에 비춘다. 매초 얼마나 많은 광자가 스크린에 부딪히는가?

**준비** 광선의 출력은 1.0 mW, 또는  $1.0 \times 10^{-3}$  J/s. 즉, 매초  $1.0 \times 10^{-3}$  J의 에너지가 스크린에 도달한다. 이것은 식 (28.3)으로 주어진 개개 광자의 에너지로 도달한다.

**풀이** 광자의 진동수는  $f = c/\lambda = 4.48 \times 10^{14}$  Hz, 따라서 광자 한 개의 에너지는  $E = hf = (6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(4.48 \times 10^{14} \text{ Hz})$ . 매

초 스크린에 도달하는 광자의 수는 매초당 스크린에 도달하는 에너지를 광자 한 개의 에너지로 나눈 것이다.

$$\frac{1.0 \times 10^{-3} \text{ J/s}}{2.97 \times 10^{-19} \text{ J/광자}} = 3.4 \times 10^{15} \text{ 광자/s}$$

**검토** 광자 한 개가 전달하는 에너지의 양은 아주 작으므로, 보통 크기의 출력을 내기 위해서는 엄청나게 많은 광자가 필요하다.

### 개념형 예제 28.6 광자 방출률 비교

빨간색과 파란색 레이저 포인터의 출력이 같다. 매초 방출하는 광자의 수가 더 많은 것은 어느 것인가?

**판단** 빨간색 빛은 파란색보다 더 긴 파장을 가지고 있고, 진동수는 더 낮다. 따라서 빨간색 빛 광자 한 개의 에너지는 파란색 빛 광자의 경우보다 작다. 두 포인터는 매초 방출하는 에너지가 같다. 빨간색 레이저는 더 작은 에너지 덩어리로 방출하므로, 같은 출력

을 내기 위해서는 매초 더 많은 수의 덩어리를 방출하여야 한다. 빨간색 레이저가 매초 더 많은 광자를 방출한다.

**검토** 광자 문턱 진동수를 생각 안했다면 이 결과는 직관에 위배되어 보일 수도 있다. 파장이 다른 빛은 에너지의 크기가 다른 광자로 만들어졌으며, 그 결과 파장이 다른 두 개의 레이저는 출력이 같더라도 광자의 방출률이 달라질 수 있다.

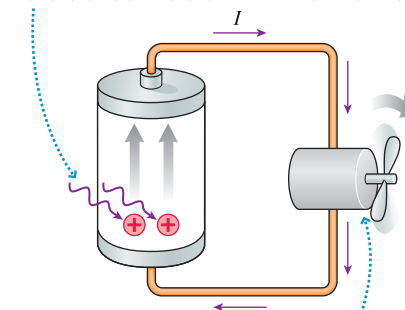
## 광자 검출하기

광전 효과를 직접 사용한 초기의 광자 검출기는 진공관 속에 넣어둔 광택이 나는 금속판으로 구성되어 있다. 빛이 금속판을 비추면, 전자에 의한 전류가 생성되고, 이것으로 경보 장치를 울리게 하거나 빛의 세기를 측정할 수 있다.

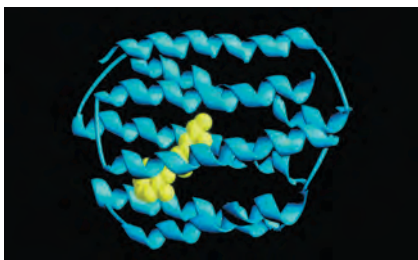
현대적 검출 장치도 유사한 원리로 작동된다. 태양전지에 입사하는 광자는 에너지를 전하 전달자에게 전달하여 높은 에너지 상태로 옮겨가게 한다. 22.3절에서 설명한 바와 같이 배터리의 전하 에스컬레이터 모형을 생각해보자. 태양전지는 배터리와 거의 유사하게 작동한다. **그림 28.13**과 같이 더 높은 퍼텐셜로 옮겨가기 위한 에너지가 화학반응이 아니라 광자로부터 온다. 이 전이가 가능하기 위해 광자의 에너지는 어떤 최소값을 넘어야 한다. 따라서, 광전 효과를 직접 사용하는 장치와 마찬가지로 태

그림 28.13 태양전지의 작동

문턱치보다 더 큰 에너지를 가지는 광자가 모든 에너지를 전하운반자에 전달하면, 이들의 퍼텐셜을 증가시켜 태양전지의 양극으로 들어 올려 준다.



전하운반자가 회로를 따라 “내리막 길”로 간다. 에너지는 유용한 기구를 작동시키는 데 사용된다.



◀ **광자를 보기 BIO** 시각의 기본 원리는 눈의 간상세포와 추상세포의 특별히 적응된 분자에 의해 단일 광자를 감지하는 것이다. 이 영상은 로돕신(파랑) 분자에 레티날(노랑) 분자가 둘러싸여 있는 것을 보여준다. 적절한 크기의 에너지를 가진 광자 한 개가 레티날 분자의 전이를 일으키면, 모양이 변화하여 더 이상 로돕신 분자 '새장'에 꼭맞지 않게 된다. 로돕신은 모양이 변하여 레티날을 배출하고 이 운동이 신경 다발에 전기신호를 흐르게 한다.

양전지에도 문턱 진동수가 존재한다. 가장 많이 사용되는 실리콘 기반 태양전지에서 문턱 에너지는 1.1 eV로, 이것은 가시광선 스펙트럼 영역을 넘어서는 파장 1200 nm의 적외선에 해당한다.

### 예제 28.7 태양전지로부터 전류 찾기

출력 1.0 W의 파장 550 nm 단색광을 실리콘 태양전지에 비추어 회로에 전류가 흐르게 하였다. 이 빛이 만들 수 있는 전류의 최대값은 얼마인가?

**준비** 파장은 실리콘 태양전지에 대해 알려진 문턱 파장 1200 nm보다 짧으므로, 광자는 전하운반자를 흘려가게 할 수 있는 충분한 에너지를 가지고 있다. 모든 광자는 각각의 에너지를 각각 하나의 전하운반자에 전달한다. 매초 흐를 수 있는 전하운반자의 최대의 수는 매초 도달하는 광자의 수와 일치한다.

**풀이** 빛의 출력은  $P = 1.0 \text{ W} = 1.0 \text{ J/s}$ . 빛의 진동수는  $f = c/\lambda = 5.45 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 이므로, 광자 하나의 에너지는  $E = hf = 3.61 \times 10^{-19} \text{ J}$ . 매초 도달하는 광자의 수는  $(1.0 \text{ J/s})/(3.61 \times 10^{-19} \text{ J/광자}) = 2.77 \times 10^{18}$ 이다. 광자마다 최대한 한 개의 전하운반자를 움직

이게 할 수 있으므로 최대 전류는  $2.77 \times 10^{18}$  전자/s이다. 암페어로 표시된 전류는 전자가 지나가는 비율에 전자 하나의 전하를 곱한 것으로

$$I_{\max} = (2.77 \times 10^{18} \text{ 전자/s})(1.6 \times 10^{-19} \text{ C}) = 0.44 \text{ C/s} = 0.44 \text{ A}$$

**검토** 이 풀이의 핵심적인 개념은 한 개의 광자는 에너지를 한 개의 전하운반자에 전한다는 것이다. 모든 광자가 각각의 에너지를 전하운반자에 전달한다고 가정하고 전류를 계산하였다. 실제 태양전지에서 전류는 이 값보다 작다. 왜냐하면, 일부 광자는 반사되고, 또 다른 광자는 소실되어 그들의 에너지를 전하운반자에 전달하지 못하기 때문이다.

디지털카메라에 사용하는 전하결합소자(CCD)나 금속산화물반도체(CMOS) 검출기는 실리콘 기반 미세 광자 검출기로 이루어진 수백만 개의 화소로 구성되어 있다. 화소의 문턱 진동수를 넘어서는 광자가 부딪히면 전자 한 개가 방출된다. 이 전자는 화소에 저장되는데, 누적된 총전하량은 바로 화소에 부딪히는 빛의 세기, 즉 광자의 수에 비례한다. 노출 후 각각의 화소에 누적된 전하를 읽고, 메모리에 그 값을 저장하고, 그 화소는 다음 화면을 위해서 다시 0으로 재조정된다.

## 28.4 물질파

루이 드브로이(Louis-Victor de Broglie) 왕자는 1924년에 프랑스 대학원생이었다. 아인슈타인이 광자를 도입하여 입자와 파동 사이의 차이점을 모호하게 하여 물리학의 세상을 뒤흔든지 19년 만이었다. 드브로이가 이 주제를 생각했을 때, 자연은 일종의 대칭성을 가지는 것으로 보였다. 만약 빛 파동이 입자성을 가지고 있다면, 물질 입

자는 일종의 파동성을 가질 수 없을까? 다른 말로 하면, **물질파**(matter waves)는 존재할 수 없는가?

수행 중에 있는 어떤 실험적 증거도 없이, 드브로이는 광자에 대한 아인슈타인의 방정식  $E=hf$ 와 그의 상대성이론에 대한 아이디어에 관해 일종의 유사성을 추론하였다. 드브로이는 운동량  $p=mv$ 인 물질 입자가 파동성을 가졌다면, 파장은 다음과 같이 주어질 것으로 결론을 내렸다.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad (28.8)$$

움직이는 입자에 대한 드브로이 파장

여기에서  $h$ 는 플랑크 상수이다. 이 파장을 **드브로이 파장**(de Broglie wavelength)이라고 한다.

#### 예제 28.8 전자의 드브로이 파장 구하기

운동 에너지가 1.0 eV인 전자의 드브로이 파장은 얼마인가?

도 이 속도를 낼 수 있다. 드브로이 파장은

**풀이** 운동 에너지가  $K = \frac{1}{2}mv^2 = 1.0 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ 인 전자는 속도가

$$\lambda = \frac{h}{mv} = 1.2 \times 10^{-9} \text{ m} = 1.2 \text{ nm}$$

$$v = \sqrt{\frac{2K}{m}} = 5.9 \times 10^5 \text{ m/s}$$

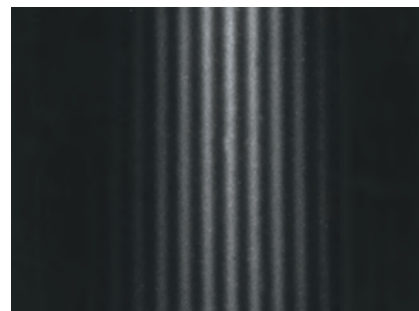
**검토** 전자의 파장은 작지만, X-선 파장보다는 크며 결정에서 원자들 사이의 근사적인 간격 0.1 nm보다 크다. X-선의 회절을 관측할 수 있듯이, 전자가 파동성이 있다면 그것은 쉽게 관측되어야만 한다.

거시적 기준으로는 빠르지만, 전자를 퍼텐셜차 1 V로 가속하더라

전자, 양성자, 혹은 야구공 같은 물질이 파장을 가진다는 것이 대체 무엇을 의미하는가? 중첩의 원리를 충족하는가? 회절과 간섭 현상은 보여주는가? 놀랍게도 **물질은 파동의 속성이라고 생각했던 모든 성질을 보여준다**. 예를 들어 **그림 28.14**에는 50 keV의 전자가 간격  $1.0 \mu\text{m}$ 의 두 개의 작은 슬릿을 통과할 때 기록된 빛의 세기 문양을 보여준다. 이 문양은 명확히 이중슬릿 간섭 문양이며, 주름 간의 간격은 17장의 빛의 파동이론에서 배운 것에 드브로이 파장을 적용할 때 예측되는 그대로이다. **전자는 파동처럼 행동한다!**

물질파가 실제로 존재한다면, 야구공이나 다른 거시적 물체는 왜 파동성 속성을 보여주지 않을까? 핵심은 파장이다. 17장에서 회절, 간섭, 그리고 다른 파동성 현상은 파가 지나가는 통로의 크기가 파장과 거의 비슷할 때 일어난다는 것을 보았다. 예를 들어 예제 28.8과 같이, 전형적인 전자의 파장은 결정 내부의 원자간 간격보다 약간 더 크다. 따라서, 전자가 물질을 통과할 때, 미시적 슬릿을 통과하는 것과 같은 현상이 일어나 파동성을 관측할 수 있게 된다. 그러나 드브로이 파장은 물체의 질량에 반

그림 28.14 전자에 의한 이중슬릿 간섭 무늬





비례하므로, 거시적 물체의 파장은 전자 파장의 수백만 혹은 수십억 배만큼 작다(즉 거시적 물체의 파장은 물체가 통과하는 통로의 크기보다 매우 작다). 거시적 물체의 파장이 너무 작으므로, 거시적 물체의 파동성은 덜 중요하게 되고 관측되지 않게 된다. 다음의 예가 그것을 보여준다.

### 예제 28.9 연기 입자의 드브로이 파장 구하기

거시적 입자로서 실험에 사용할 만한 제일 작은 입자로 연기 입자를 생각할 수 있다. 이것은 지름이 약  $1\ \mu\text{m}$ 이므로 맨 눈으로는 거의 볼 수 없으며, 현미경의 분해능 극한에 이르는 정도이다. 질량이  $m \approx 10^{-18}\ \text{kg}$ , 지름이  $1\ \mu\text{m}$ 인 연기 입자가 속도  $1\ \text{mm/s}$ 로 아주 느리게 움직일 때 드브로이 파장을 추산하라.

**풀이** 입자의 운동량은  $p = mv \approx 10^{-21}\ \text{kg} \cdot \text{m/s}$ . 이 운동량을 가

지는 입자에 대한 드브로이 파장은

$$\lambda = \frac{h}{p} \approx 7 \times 10^{-13}\ \text{m}$$

**검토** 파장은 입자 크기보다 아주 작으며, 개개의 원자 크기보다도 더 작다. 따라서 이 입자에 대해 파동성 행동을 기대할 수 없다.

앞의 예제와 같이 작은 입자가 아주 느리게 움직이면 파장이 아주 작아 의미 있는 결과를 보여줄 수 없다. 더 큰 입자가 빠르게 움직이더라도 파장은 더 작게 된다. 투수가 던진 공은 파장이 대략  $10^{-34}\ \text{m}$ 가 되므로 타자가 공을 못친 것을 변명하기 위해 공의 파동성을 써먹을 수는 없다. 상상할 수 없을 정도의 작은 파장을 가지는 거시적인 입자에서 파동성 행동을 볼 수 없다고 하여도 전혀 놀라운 일은 아니다.

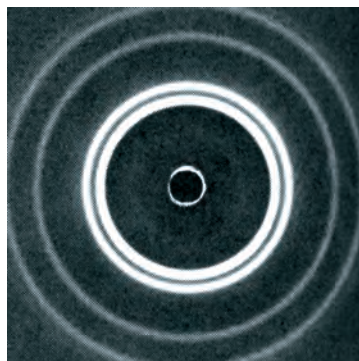
### 물질의 간섭과 회절

드브로이는 실험 데이터 없이 그의 가설을 제안하였지만, 실험적 증거들이 곧 쏟아져 나오게 되었다. **그림 28.15(a)**와 **(b)**는 알루미늄 판막을 통과하는 X-선과 전자에 의해 만들어진 회절 무늬를 보여준다. 그림 28.15로부터 얻을 수 있는 제일 중요한 관측은 전자가 X-선처럼 회절하고 간섭한다는 것이다.

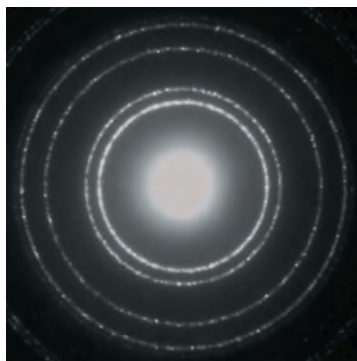
이후의 실험들에서 드브로이의 가설이 다른 물질 입자에 대해서도 잘 적용된다는

**그림 28.15** X-선, 전자, 그리고 중성자가 알루미늄 판막을 통과할 때 만들어진 회절 무늬

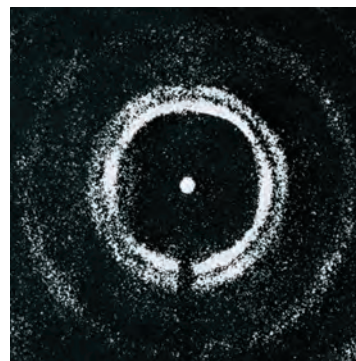
(a) X-선 회절 무늬



(b) 전자 회절 무늬



(c) 중성자 회절 무늬



것이 검증되었다. 중성자는 전자보다 훨씬 더 큰 질량을 가지므로 드브로이 파장이 줄어들지만, 아주 천천히 움직이게 할 수 있다. 아주 작은 속도로 무거운 질량에 대한 효과를 상쇄할 수 있으므로, 중성자의 파장을 전자의 파장만큼 만들 수 있다. **그림 28.15(c)**는 중성자의 회절 무늬를 보여준다. 이것은 X-선과 전자의 회절 무늬와 유사하다. 중성자도 또한 물질파이다. 최근에는 원자와 거대 분자에 대한 간섭과 회절 현상도 관측할 수 있게 되었다.

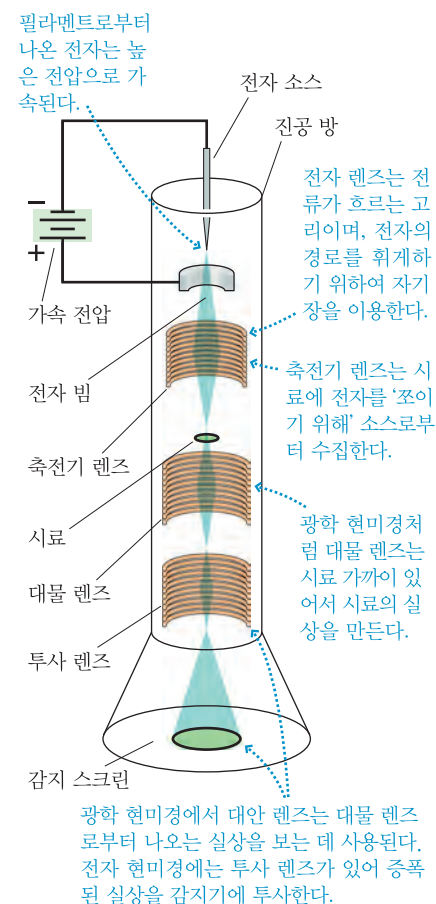
## 전자 현미경

◀19.7절에서 배운 바와 같이 빛의 파동적인 속성은 광학 현미경의 분해능을 제한한다. 분해능이란 두 물체를 분리할 수 있는 최소 거리인데 빛 파장의 반정도이다. 가시광선 영역에서는, 완벽한 렌즈라 하더라도 분해할 수 있는 제일 작은 물체가 대강 200에서 250 nm가 된다. 이 장이 시작할 때 보여준 망막의 그림은 이보다 더 세밀한 모습을 보여준다. 이것은 그 그림을 가시광선이 아닌 전자 빔으로 얻은 것이기 때문이다.

1930년에 개발된 전자 현미경은 광학 현미경과 같은 원리로 작동한다. 전기장이나 자기장이 없으면, 전자는 빛살처럼 직선으로 진공을 날아간다. 전자의 경로는 전기장이나 자기장으로 휘어질 수 있다. 전류가 흐르는 도선 코일은 자기장을 만드는데, 이 자기장에 의해서 전자의 평행한 경로를 휘게 하여 한 점에 교차하도록 할 수 있는데, 이것을 전자 렌즈라고 한다. 유리 렌즈가 빛살을 휘어 한 점에 집중시킬 수 있듯이, 전자 렌즈는 같은 방식으로 전자를 한 점으로 집중시킬 수 있다.

**그림 28.16**은 투과 전자 현미경(TEM)이 어떻게 작동하는지 보여주고 있다. 이것은 단순한 고전물리학이다; 전자는 전기력과 자기력을 받아 뉴턴의 제2법칙에 의해 주어지는 경로를 따라 움직인다. 전자의 궤적을 조절할 수 있는 우리의 능력 때문에 전자 현미경이 광학 현미경을 훨씬 능가하는 배율을 가질 수 있다. 광학 현미경과 마찬가지로 전자 현미경의 분해능도 궁극적으로 파동성 때문에 제한이 가해진다. 전자는 고전적 점 입자가 아니고 파동성을 가지며, 드브로이 파장은  $\lambda = h/p$ 이다.

그림 28.16 전자 현미경



### 개념형 예제 28.10 어느 파장이 짧은가?

첫 번째 전자는 퍼텐셜차  $\Delta V$ 로 가속이 되었다. 그리고 두 번째 전자는 크기가 두 배가 되는 퍼텐셜차에 의해 가속되었다. 어느 전자가 더 짧은 드브로이 파장을 가졌는가?

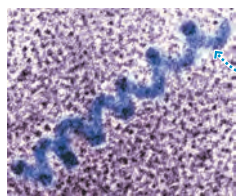
**판단** 파장은 속도의 역에 비례한다. 두 배의 퍼텐셜차로 가속된

전자가 더 빠르게 움직이므로 드브로이 파장이 짧을 것이다.

**검토** 전자 현미경을 만들기 위해서는 고속의 전자가 필요하다. 높은 가속 퍼텐셜차는 높은 속도를 의미하고, 이것은 원칙적으로 더 좋은 분해능을 가능하게 한다.

19.7절에서 최대 분해능을 결정하기 위해 적용되었던 논리는 전자 현미경에도 똑같이 적용된다. 따라서 분해능은 가장 좋은 경우 드브로이 파장의 반이 된다. 널리 사

**그림 28.17** BIO 갑각류 조개의 색소 분자의 TEM 사진



전자 현미경의 엄청난 분해능은 실제 분자구조를 믿을 수 없을 정도로 세밀한 영상으로 보여준다.

20 nm

전체 영상의 크기는 광학 현미경으로 분해할 수 있는 제일 작은 물체의 1/10에 불과하다. 광학 현미경으로는 분자의 구조는 물론이고 개개 분자도 알아볼 수 없다.

용되는 100 kV 가속 퍼텐셜의 경우 드브로이 파장이  $\lambda \approx 0.004$  nm이다(전자가 매우 빨리 움직이므로 전자의 운동량은 상대론을 사용하여 계산하여야 한다). 따라서 전자 현미경의 이론적 분해능은 대략 0.002 nm이다.

실질적으로 전자 렌즈를 만드는 것이 완벽하지 않으므로 전자 현미경의 최고 분해능은 0.07 nm 정도로 제한된다. 이 수치는 지름이 0.1 nm인 개개 원자를 겨우 분해할 정도이다. 이 분해능은 **그림 28.17**에 설명한 바와 같이 광학 현미경의 분해능보다 거의 3000배 정도 나은 것이다. 좋은 광학 현미경은 이론적으로 가능한 극한에서 작동하고 있지만, 전자 현미경은 전자 렌즈를 더 잘 만들어 개선할 수 있는 여지가 아직 남아 있다.

## 28.5 에너지는 양자화된다



컴퓨터 시뮬레이션으로 원자의  $p$  궤도를 보여준다. 이 궤도는 중앙에 노드가 있는 전자의 정상파이다.

드브로이는 물질 입자가 파동성을 가진다는 가설을 제안하였는데, 이것이 옳다는 실험 증거를 보았을 것이다. 이것은 기이할 뿐 아니라, 의미하는 바도 심오하다.

◀16.3절에서 양끝이 고정된 끈 위의 파동은 정상파를 형성한다는 것을 배웠다. 양 끝에서 파동의 반사는 양 방향으로 진행하는 파를 만들고, 반대 방향으로 진행하는 파의 중첩이 정상파를 만든다. 입자에 대해서도 이와 같은 것이 가능할까? “정상 물질파”같은 것이 있는가? 실제로 어쩌면 이미 여러분들은 정상 물질파(화학에서 배운 원자의 전자궤도)에 익숙해 있을지도 모른다.

29장에서 이러한 전자궤도에 대해 더 이야기할 것이다. 이제 정상 물질파에 대한 논의를 훨씬 더 간단한 물리계인 “상자 안에 있는 입자”를 이용하여 논의할 것이다. 간단하게 한 개의 입자가  $x$ 축을 따라 앞뒤로만 움직이는 1차원 운동을 고려할 것이다. “상자”는 두 개의 고정 끝점으로 정의되며, 입자는 **그림 28.18**처럼 양 경계점 사이에서 앞뒤로 튀어나온다. 입자와 상자 끝의 충돌은 완전 탄성으로 운동 에너지의 손실이 없다고 가정한다.

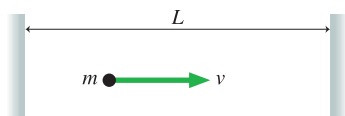
**그림 28.18(a)**는 공이나 먼지입자 같은 고전적 입자가 상자 안에 있는 것을 보여준다. 이 입자는 상자 안에서 일정한 속도로 왕복 운동을 한다. 그러나 입자가 파동성을 가졌다면, 상자 양끝에서 앞뒤로 반사하는 파동을 고려해야 한다. **그림 28.18(b)**에서 반사하는 파동은 정상파를 형성한다. 이 정상파는 양끝이 고정된 끈에서의 정상파와 유사하다.

정상 물질파의 성질에 대해서 무엇을 이야기할 수 있을까? 추론을 위해서 물질파에 대해 아는 것과 정상파에 대해 아는 것을 이용해보자.

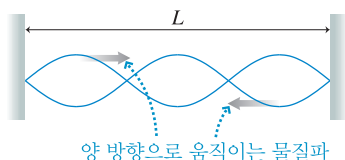
끈 위의 정상파의 경우 몇 가지 가능한 모드가 있다는 것을 알고 있다. 상자 안의 입자에 대해서도 같은 것이 성립된다; 단지 특정한 상태만 가능하다. 16장에서 배운 것처럼, 정상파의 파장은 끈의 길이와 관련이 있다.

**그림 28.18** 질량  $m$ 인 입자가 길이  $L$ 인 상자에 갇혀 있다.

(a) 질량  $m$ 인 고전적 입자는 양 경계점 사이를 앞뒤로 뛰어 다닌다.



(b) 반대 방향으로 진행하는 물질파는 정상파를 만든다.



$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (28.9)$$

상자 안의 입자의 파장은 같은 공식을 따른다. 그러나 입자를 기술하는 파장은 드브로이 파장 조건  $\lambda = h/p$ 를 만족한다. 파장에 대한 이 두 관계를 등식화하면

$$\frac{h}{p} = \frac{2L}{n} \quad (28.10)$$

식 (28.10)을 운동량  $p$ 에 대해서 풀면,

$$p_n = n \left( \frac{h}{2L} \right) \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (28.11)$$

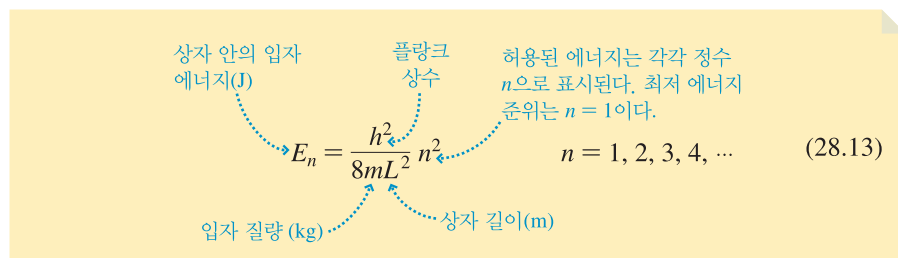
이것은 놀라운 결과이다; 입자의 운동량이 이 식으로 주어지는 특정한 값만을 가질 수 있다는 이야기를 해주고 있다. 다른 값들은 불가능하다. 입자의 에너지는 운동량과 연관되어 있다.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m} \quad (28.12)$$

운동량에 대해서 식 (28.11)을 사용하면, 입자의 에너지가 특정한 값들로 제한되는 것을 알 수 있다.

$$E_n = \frac{1}{2m} \left( \frac{hn}{2L} \right)^2$$

혹은



$$E_n = \frac{h^2}{8mL^2} n^2 \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (28.13)$$

이 결론은 물리학의 가장 중요한 발견 중 하나가 된다. 물질의 파동성 때문에 갇혀 있는 입자는 단지 특정한 에너지만을 가질 수 있다. 이 결론(갇혀 있는 입자는 불연속적인 에너지만을 가질 수 있다)은 에너지의 양자화(quantization)라고 한다. 쉬운 말로, 에너지는 양자화되었다고 한다. 숫자  $n$ 은 양자수(quantum number)라고 불리며, 각각의  $n$ 값은 상자 안 입자의 에너지 준위(energy level)를 나타낸다.

상자 안 입자가 가질 수 있는 제일 낮은 에너지는

$$E_1 = \frac{h^2}{8mL^2} \quad (28.14)$$

이러한 가장 낮은 에너지를 사용하여 다른 가능한 에너지를 표현하면 다음과 같다.

$$E_n = n^2 E_1 \quad (28.15)$$

이 양자화는 고전적 물체의 형태와 뚜렷하게 대비가 된다. 이것은 야구 투수가 야구



수업 영상



공을 10 m/s, 20 m/s, 혹은 30 m/s 등으로만 던질 수 있지, 중간의 다른 속도로는 던질 수 없는 것과 같다. 야구공의 속도는 양자화되어 있지 않지만, 갇혀 있는 전자의 에너지 준위는 양자화되었다. 이 결과는 중요한 의미가 있다.

### 예제 28.11 갇혀 있는 전자의 허용된 에너지 구하기

전자가 원자 크기의 길이 0.19 nm인 공간 영역에 갇혀 있다. 이 전자의 가능한 처음 세 번째 에너지 준위는 얼마인가?

**준비** 이 계를 길이가 0.19 nm인 상자 안에 들어 있는 입자라고 생각하자. 가능한 에너지 준위는 식 (28.13)으로 주어졌다.

**풀이** 전자의 질량은  $m = 9.11 \times 10^{-31}$  kg이다. 따라서 첫 번째 허용된 에너지는

$$E_1 = \frac{h^2}{8mL^2} = 1.7 \times 10^{-18} \text{ J} = 10 \text{ eV}$$

이것이 허용되는 제일 낮은 에너지이다. 다음 두 가지 허용된 에너지는

$$E_2 = 2^2 E_1 = 40 \text{ eV}$$

$$E_3 = 3^2 E_1 = 90 \text{ eV}$$

**검토** 이 에너지 값은 중요하다.  $E_1$ 은 표 28.1에 주어진 어떠한 금속의 일함수보다 더 크다. 전자를 원자 크기의 영역에 갇혀두면 에너지가 상당한 값으로 차이가 나는 상태로 제한된다. 명확히 원자 안의 전자도 양자 취급을 하여야 한다.

식 (28.13)으로 허용된 에너지는 질량  $m$ 과  $L^2$ 에 모두 반비례한다. 에너지 양자화가 의미를 가지기 위해서는  $m$ 과  $L$ 이 모두 작아야 한다. 따라서 야구공에는 아직 고전 물리학이 적용된다. 다음 예제에서 보여주듯이, 오직 원자 크기 수준에서 양자화 효과가 중요해진다.

### 예제 28.12 바이러스의 에너지 준위

30 nm 직경을 가지는 바이러스는 상상할 수 있는 가장 작은 거시적인 입자이다. 바이러스 길이가 약 1.0  $\mu\text{m}$ 인 일차원 상자 안에 갇혀 있을 때 이 바이러스의 기본 양자 에너지는 얼마인가? 바이러스의 밀도는 물의 밀도와 거의 같다.

**모형** 바이러스를 상자 안에 갇혀 있는 입자라고 생각하자.

**풀이** 바이러스의 질량은  $m = \rho V$ , 여기서 부피는  $\frac{4}{3}\pi r^3$ 이다. 간단히 계산하면 30 nm 직경의 바이러스의 질량은  $m = 1.4 \times 10^{-20}$  kg이다. 속박 길이는  $L = 1.0 \times 10^{-6}$  m이다. 식 (28.14)로부터 기

본 양자 에너지는

$$E_1 = \frac{h^2}{8mL^2} = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})^2}{8(1.4 \times 10^{-20} \text{ kg})(1.0 \times 10^{-6} \text{ m})^2} = 3.9 \times 10^{-36} \text{ J} = 2.5 \times 10^{-17} \text{ eV}$$

**검토** 이것은 상상할 수 없을 정도의 작은 에너지이기 때문에  $E_1$ ,  $4E_1$ ,  $9E_1$ 이 분리되지 않는다. 이와 같이 매우 작은 거시적인 입자에 대해서는 허용된 에너지가 완전히 연속적으로 보일 것이며 에너지 양자화를 인식하지 못할 것이다.

원자는 단순한 1차원 상자보다는 확실히 더 복잡하다. 어쨌든 전자도 역시 원자에 “갇혀”있다. 전자의 궤도는 어떤 의미에서 정상파가 되고, 원자에서 전자의 에너지는 양자화되어야 한다. 다음 장에서 보겠지만, 이것은 원자물리학에서 중요한 의미를 가진다.

## 28.6 에너지 준위와 양자 점프

아인슈타인과 드브로이는 파동과 입자의 차이점을 모호하게 하고 에너지를 양자화하는 혁명적인 아이디어를 제안하였다. 그러나 1925년에 완전한 양자물리학 이론을 처음으로 개발한 사람은 오스트리아 물리학자 에르빈 슈뢰딩거(Erwin Schrödinger)였다. 슈뢰딩거의 이론은 이제는 양자역학이라 불린다. 이것은 상자 안의 입자에서부터 원자 안의 전자까지 계의 양자화된 에너지 준위를 계산할 수 있게 해준다. 양자역학은 또 다른 중요한 문제인 양자화된 계가 에너지를 어떻게 얻고 잃는지도 기술한다.

### 에너지-준위 도표

양자역학 이론은 상자 안에 있는 입자처럼 원자와 같은 실제 물리계의 에너지도 양자화되어 있다는 것을 보여주고 있다. 어떤 특정한 에너지만이 가능하고 그 이외의 다른 에너지는 값을 가질 수 없다.

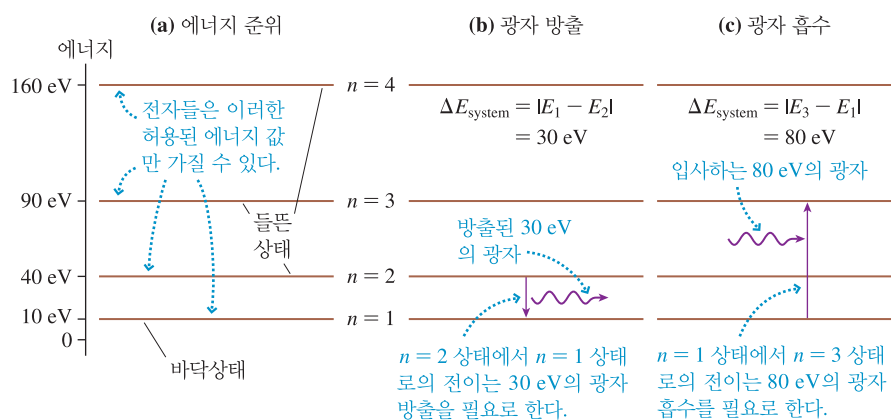
**에너지-준위 도표**(energy-level diagram)는 양자화된 에너지 준위를 시각적으로 보여주는 유용한 표현이다. 예를 들어, **그림 28.19(a)**는 길이 0.19 nm 상자 안에 있는 전자의 에너지-준위 도표이다. 이 에너지 준위는 예제 28.11에서 계산된 것이다. 수직축은 에너지를 나타내지만, 수평축은 크기를 나타내는 것은 아니다. 이것을 각각의 에너지를 단으로 하는 사다리라고 생각하면 도움이 된다. 에너지가  $E_1$ 인 가장 낮은 단은 **바닥상태**(ground state)라고 한다. 그리고 높은 단의 **들뜬상태**(excited state)는 양자수  $n = 2, 3, 4, \dots$ 로 표기한다. 그것이 상자 안의 입자이든, 원자이든, 원자의 핵이든, 양자역학에서는 계가 이 단 중에서 하나에 속해야만 한다.

양자계가 하나의 상태에서 다른 상태로 변하면, 에너지에 변화가 발생하게 된다. 양자물리학에서도 변하지 않는 것은 에너지 보존이다. 즉, 양자 세상에서도 에너지는 보존된다. 하나의 계가 높은 에너지 상태에서 낮은 에너지 상태로 전이를 하면, 여분의 에너지  $\Delta E_{\text{system}}$ 은 어디로든지 가야 한다. 우리가 고려하는 계에서 이 에너지는 일



에르빈 슈뢰딩거, 양자역학 초기 구축자 중의 한 사람

**그림 28.19** 길이 0.19 nm인 상자 안의 전자에 대한 에너지-준위 도표

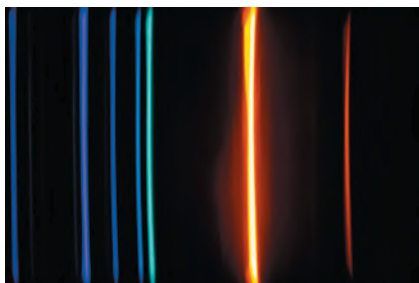


반적으로 방출된 빛 광자로 귀결된다. **그림 28.19(b)**처럼 에너지 준위  $E_i$ 에 있는 양자계가 에너지 준위  $E_f$ 로 “뛰어내리면” 양자계는  $\Delta E_{\text{system}} = |E_f - E_i|$ 라는 에너지를 잃는다. 이 점프는 진동수가

$$f_{\text{photon}} = \frac{\Delta E_{\text{system}}}{h} \quad (28.16)$$

인 광자의 방출에 해당한다.

역으로 그 계가 광자를 흡수하면 **그림 28.19(c)**처럼 높은 에너지 준위로 “뛰어올라갈” 수 있다. 이 경우에도 흡수한 광자의 진동수는 식 (28.16)을 따라야 한다. 이러한 점프를 **전이**(transition) 혹은 **양자전이**(quantum transition)라 한다.



헬륨 가스의 스펙트럼에서는 가능한 전이 에너지에 해당하는 불연속적인 파장을 보여준다.

식 (28.16)은 슈뢰딩거의 양자이론과 아인슈타인의 빛 에너지의 양자화 아이디어를 연결시켜 준다. 아인슈타인에 의하면, 진동수가  $f$ 인 광자는 에너지가  $E_{\text{photon}} = hf$ 이다. 입자가 에너지  $E_i$ 인 초기상태로부터 에너지가 더 낮은  $E_f$ 인 최종 상태로 전이할 때, 에너지가  $E_{\text{photon}} = \Delta E_{\text{system}}$ 인 광자를 계가 방출하면 에너지가 보존된다. 그 광자가 정확하게 그 양의 에너지를 가져가기 위해서는 광자의 진동수가 정확하게 식 (28.16)을 따라야 한다. 다음 장에서 보듯이, 이 광자들은 양자계의 방출 스펙트럼을 형성한다.

마찬가지로, 더 높은 에너지 상태로 입자가 전이할 때도 에너지가 보존될 수 있다. 이 경우 추가로 필요한 에너지는 진동수  $f_{\text{photon}} = \Delta E_{\text{system}}/h$ 인 광자를 흡수하여 얻는다. 이 광자는 정확하게 이 진동수를 가지지 않으면 흡수되지 않는다. 이런 상황 전이에서 흡수된 진동수는 계의 흡수 스펙트럼을 형성한다.

양자물리학이 원자 단위 계의 속성에 대해서 이야기하는 것을 종합하면 다음과 같다.

1. **에너지는 양자화되어 있다.** 단지 특정한 에너지만이 허용되고 나머지 모든 에너지는 금지되었다. 이것은 물질의 파동성에 결과이다.
2. **바닥상태는 안정하다.** 양자계는 가능한 제일 낮은 에너지 상태를 찾는다. 들뜬 상태에 있는 입자는 가만히 두면 바닥상태에 도달할 때까지 점차 낮은 에너지 상태로 뛰어내려서 간다. 바닥상태에 도달하면, 입자가 뛰어내릴 더 낮은 상태가 없다.
3. **양자계는 불연속적인 빛 스펙트럼을 방출하고 흡수한다.** 허용된 에너지 사이의 간격에 해당하는 진동수를 가지는 광자만이 방출되거나 흡수된다. 다른 진동수의 광자는 에너지 보존을 위반하지 않고서는 방출되거나 흡수될 수 없다.

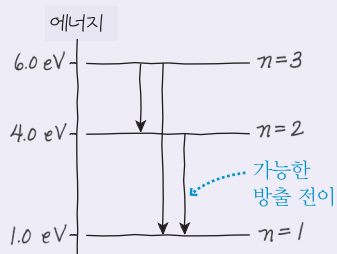
다음 두 장에서 원자와 원자핵의 성질을 이해하기 위하여 이러한 아이디어를 활용할 것이다.

**예제 28.13 양자상태로부터 방출 스펙트럼 결정하기**

양자계에 있는 전자의 허용된 에너지는  $E_1 = 1.0 \text{ eV}$ ,  $E_2 = 4.0 \text{ eV}$ , 그리고  $E_3 = 6.0 \text{ eV}$ 이다. 이 계의 방출 스펙트럼에서 관측할 수 있는 파장은?

**준비** 그림 28.20은 이 계에 대한 에너지-준위 도표를 보여준다. 계가 높은 에너지 상태에서 낮은 에너지 상태로 전이할 때 광자가 방출된다. 세 가지 가능한 전이가 있다.

그림 28.20 계의 에너지-준위 도표와 양자전이



**풀이** 이 계는  $3 \rightarrow 1$ ,  $2 \rightarrow 1$ , 그리고  $3 \rightarrow 2$  전이에서 광자를 방출하며, 그때의 에너지는  $\Delta E_{3 \rightarrow 1} = 5.0 \text{ eV}$ ,  $\Delta E_{2 \rightarrow 1} = 3.0 \text{ eV}$ , 그리고  $\Delta E_{3 \rightarrow 2} = 2.0 \text{ eV}$ .  $f_{\text{photon}} = \Delta E_{\text{system}}/h$ 과  $\lambda = c/f$ 로부터 방출 스펙트럼의 파장은

$$3 \rightarrow 1 \quad f = 5.0 \text{ eV}/h = 1.21 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

$$\lambda = 250 \text{ nm (자외선)}$$

$$2 \rightarrow 1 \quad f = 3.0 \text{ eV}/h = 7.25 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\lambda = 410 \text{ nm (파랑)}$$

$$3 \rightarrow 2 \quad f = 2.0 \text{ eV}/h = 4.83 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\lambda = 620 \text{ nm (오렌지)}$$

**검토**  $3 \rightarrow 2$ 와 같은 에너지 차이가 작은 전이에서는 낮은 광자 에너지가 되고 높은 에너지 차이를 가지는 전이  $3 \rightarrow 1$ 보다 파장은 더 길다.

**28.7 불확정성 원리**

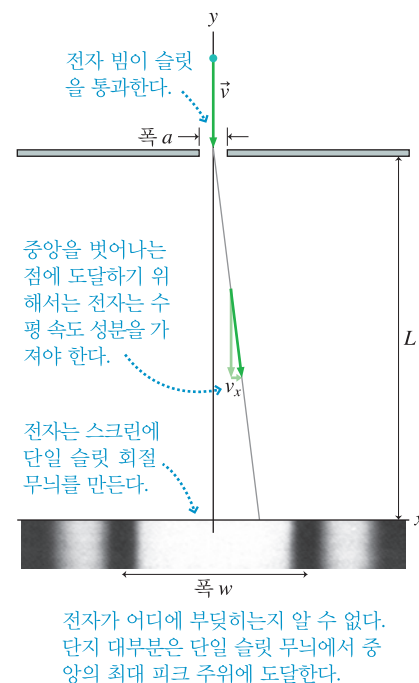
세상에 대한 양자적 관점 중에서 제일 낯선 것은, 우리의 지식에 태생적 한계가 있다는 점이다: 전자와 같은 입자에 대해, 그것이 어디에 있는지 알면 그것이 얼마나 빠르게 움직이는지 정확하게 알 수 없다. 이처럼 직관에 반대가 되는 생각은 물질의 파동 속성 때문에 생긴 것으로 좀 더 자세한 설명이 필요하다.

그림 28.21은 전자가 y축을 따라 폭이  $a$ 인 슬릿을 통과하는 실험을 보여준다. 전자의 파동 속성 때문에 슬릿은 전자를 펼쳐지게 하고 회절 무늬를 만든다.

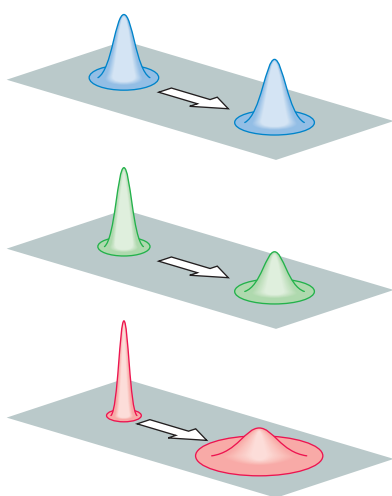
그러나 이 실험을 전자의 위치를 측정하는 실험으로 달리 생각해보자. 전자가 슬릿을 통과하면, 전자의 수평 위치에 관해 어느 정도 알 수 있게 된다. 우리가 아는 것은 완벽하지 않다; 전자가 슬릿 내의 어딘가에 위치하는 것을 알 뿐이다. 불확정성, 즉 우리가 아는 것에 대한 한계를 설정해보자. 수평 방향으로의 불확정성은  $\Delta x = a$ , 슬릿의 폭이 된다.

그러나 슬릿을 통과한 후, 전자는 회절 무늬를 형성하기 위해 펼쳐진다. 이러한 일이 일어나기 위해서는 전자가 속도의 수평성분  $v_x$ 를 가져야 하는데 이 값은 전자마다 다르다. 전자를 슬릿을 통해 보내면 수평 방향 속도의 불확정성이 생긴다. 즉, 전자의 위치에 대한 정보를 증가시키므로써 전자의 속도에 관한 정보에 불확정성이 도입된다.

그림 28.21 불확정성 원리를 보여주는 실험







**당신이 어디에 있는지 알면, 어디로 가고 있는지는 알 수 없다** 양자물리학에서 입자는 파동성을 기술하는 파동 함수로 표현한다. 이 일련의 그림은 세 가지 이동하는 파동 함수의 변화를 시물레이션으로 보여준다. 상단의 그림은 위치가 정밀하게 정의되지 않은 넓게 퍼진 파동 함수를 보여준다. 운동량 불확정성(따라서 속도의 불확정성)은 작다. 그러므로, 파동이 이동함에 따라서 파동이 많이 퍼지지 않는다. 하단의 그림은 초기 위치의 불확정성이 작아 날카로운 피크가 있는 파동을 가지는 입자를 보여준다. 위치의 불확정성이 감소하면 속도의 불확정성이 더 커지게 되어서 파동 함수가 더 빨리 퍼지게 된다.

### 개념형 예제 18.14 불확정성 변화시키기

위의 실험에서 슬릿의 폭을 줄여서 전자의 수평 위치를 좀 더 정확하게 결정하도록 하자. 이것이 회절 무늬에 얼마나 영향을 주는가? 그리고 회절 무늬의 변화는 속도의 불확정성에 얼마나 영향을 주는가?

**판단** 17장에서 단일 슬릿 회절 무늬에서 중앙의 최대치 폭은  $w = 2\lambda L/a$ 로 주어진다. 슬릿을 더 좁게 하면  $a$ 가 감소하고  $w$ 가 증가하므로 중앙의 주름을 더 넓게 한다. 주름이 더 넓어지면 수평 속도의 벌어지는 것이 더 커지게 되어서 수평 속도의 불확정도가 더 커지게 된다.

**검토** 위치에 대한 정보를 개선시키면 속도에 대한 정보를 감소시킨다. 이것이 바로 불확정성 원리의 핵심이다.

우리는 지금까지 불확정성 원리를 특정한 실험을 통하여 논의하였다. 그러나 이것은 일반적인 원리 중의 한 예이다. 1927년 독일 물리학자 베르너 하이젠베르크(Werner Heisenberg)는 어떤 입자에 대해서도 위치의 불확정성  $\Delta x$ 와 운동량  $x$ 성분의 불확정성  $\Delta p_x$ 의 곱은 하한값이 존재한다는 것을 증명하였다. 이것은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi} \quad (28.17)$$

위치와 운동량에 대한 하이젠베르크 불확정성 원리

입자가 어디에 있는지 좀 더 정확하게 알아으로써 위치에 대한 불확정성을 줄이게 되는 것은 속도와 그에 따라 운동량에 대한 불확정성을 증가시킨 결과로써 생긴 것이다. 이 관계를 또 다르게 말하면, 입자의 속도나 운동량을 좀 더 정확하게 알기 위해서는 위치에 대한 불확정성의 증가를 필요로 한다.

불확정성은 실험 측정과 연관이 있다. 더 좋은 과정이나 기술을 이용하면 이러한 불확정성을 줄일 수 있다. 고전물리학에서는 불확정성이 얼마나 작을 것인가에 제한을 두지 않는다. 고전적 입자는 어떤 순간에도 정확한 위치  $x$ 와 정확한 운동량  $p_x$ 를 가지고 있으며, 충분히 주의를 하면 위치  $x$ 와 운동량  $p_x$ 를 정확하게 측정하여  $\Delta x$ 와  $\Delta p_x$ 의 곱이 우리는 원하는 대로 작게 할 수 있다. 따라서 우리의 지식에 대한 근본적인 한계가 없다.

양자세상에서는 그렇게 단순하지 않다. 아무리 현명하더라도, 그리고 실험장치가 얼마나 좋은지에 상관없이  $x$ 와  $p_x$ 를 동시에 임의의 좋은 정밀도로 측정할 수 없다. 어떠한 실험이든 조건  $\Delta x \Delta p_x \geq h/4\pi$ 의 제한을 받는다. 입자의 위치와 운동량은 본질적으로 불확실하다.

왜 그럴까? 물질의 파동성 때문이다! “입자”는 공간에 펼쳐진다. 따라서 단순히 입

자의 위치에 대한 정확한 값이 없다. 위치와 운동량이 정확한 값을 가진다고 믿는 것은 입자에 대한 고전적 개념에 묶여 있기 때문이다. 원자 입자가 어떤지에 대한 생각을 바꾸게 되면, 위치와 운동량에 대한 생각도 바뀌어야 할 것이다.

1차원 “상자” 안에 있는 입자를 다시 고려하여 불확정성을 생각하자.

### 예제 28.15 불확정성 구하기

- 전자가 원자 크기의 폭 0.30 nm 공간 영역에 갇혀 있을 때, 속도의 범위는 얼마인가?
- 지름 1.0  $\mu\text{m}$ 인 먼지 입자( $m \approx 10^{-15} \text{ kg}$ )가 길이 5  $\mu\text{m}$ 인 상자 안에 있다. 입자가 정지해 있는지 확실히 알 수 있는가? 그렇지 않다면, 속도의 범위는 얼마나 될까?

**준비** 입자를 어디에 두는 것은 위치를 어떤 정확도로 결정하는 것을 의미한다. 따라서 속도의 불확정성이 있어야만 한다. 불확정성은 하이젠베르크의 불확정성 원리를 이용하여 구할 수 있다.

**풀이** a. 0.30 nm 공간 영역 내에 있으므로 입자의 정확한 위치는 말할 수 없다. 이것은 전자의 위치를  $\Delta x = 3.0 \times 10^{-10} \text{ m}$  범위 내에서 명시할 수 있음을 의미한다. 불확정성 원리에 의해서 운동량의 최소 불확정성은

$$\Delta p_x = \frac{h}{4\pi \Delta x}$$

이다. 속도의 불확정성은 근사적으로 다음과 같다.

$$\Delta v_x = \frac{\Delta p_x}{m} \approx \frac{h}{4\pi m \Delta x} \approx 2 \times 10^5 \text{ m/s}$$

속도의 평균이 0이므로(좌우로 움직이는 확률이 동일함), 전자가 가지는 속도의 영역은  $-1 \times 10^5 \text{ m/s} \leq v_x \leq 1 \times 10^5 \text{ m/s}$ 이다. 전자의 속도를 이것보다 더 정확하게 명시하는 것은 불가능하다.

- 입자가 상자 안 어딘가에 있는 것으로 알고 있다. 따라서 위치에 대한 정보의 불확정성은 최대한  $\Delta x = L = 5 \mu\text{m}$ 이다. 유한

한  $\Delta x$ 에 대해서는  $\Delta p_x$ 는 0이 될 수 없다. 즉, 입자가 상자 안에서 정지해 있는 것을 확신할 수 없다. 입자를 정지시키기 위해 아무리 노력하더라도, 입자의 운동량에 대한 정보의 불확정성은 근사적으로  $\Delta p_x \approx h/(4\pi \Delta x) = h/(4\pi L)$ . 그 결과, 가능한 속도의 범위는

$$\Delta v_x = \frac{\Delta p_x}{m} \approx \frac{h}{4\pi m L} \approx 1.0 \times 10^{-14} \text{ m/s}$$

입자를 정지시키려고 노력을 하면 가능한 속도의 범위는  $v_x = 0 \text{ m/s}$ 에 중심이 맞추어질 것이다. 따라서 확실히 알 수 있는 것은 입자의 속도가 영역  $-5 \times 10^{-15} \text{ m/s} \leq v_x \leq 5 \times 10^{-15} \text{ m/s}$  내의 어딘가에 있다는 것이다.

**검토** 전자의 속도에 대한 불확정성은 굉장히 크다. 이런 크기에 갇혀 있는 전자에 대해 할 수 있는 최선은, 전자가 시간당 백만 킬로미터 이내의 속도로 움직인다고 말하는 것이다. 불확정성 원리는 전자에 대한 기술 가능성에 현실적이고 실제적인 제한을 가하고 있다. 먼지 입자의 경우에는 상황이 다르다. 입자가 절대적으로 정지해 있다고 할 수는 없다. 그러나 속도가  $5 \times 10^{-15} \text{ m/s}$  이하라고 하는 것은 실용적으로는 입자가 정지해 있다는 것을 의미한다. 이 속도에서는 먼지 입자가 원자 한 개의 거리를 이동하기 위하여 6시간이 걸릴 것이다. 양자적 관점이 원자 크기에는 중요한 의미를 주는 것을 한 번 더 보았지만, 거시적인 물체에 대해서는 우리가 생각하는 방식에 전혀 영향을 주지 않는다.

## 28.8 양자 이론의 응용과 의미

양자 이론은 고전물리학이 적용되는 세상에 살고 있는 우리에게는 너무나 이상하게 보인다. 이 절에서는 양자 이론의 의미와 이 유별난 개념을 확고하게 하는 몇 가지 응용 사례를 다룰 것이다.

### 터널링과 주사 터널링 현미경

입자가 파동의 속성을 가지고 있다는 사실은 단원자 크기 수준의 놀라울 정도로 작은

그림 28.22 주사 터널링 현미경

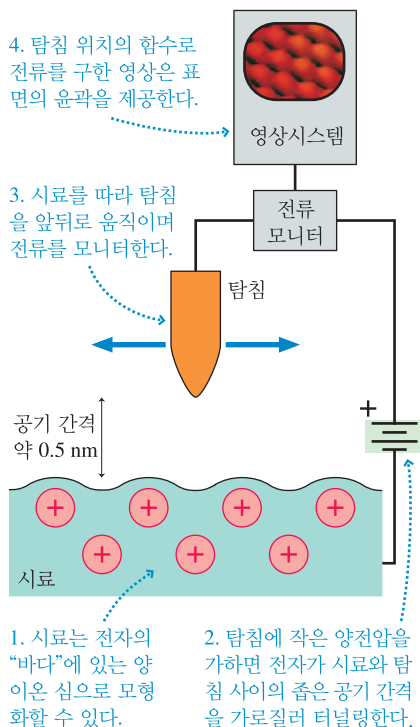
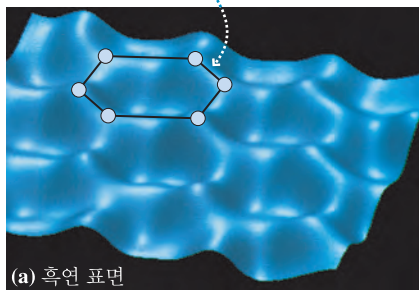
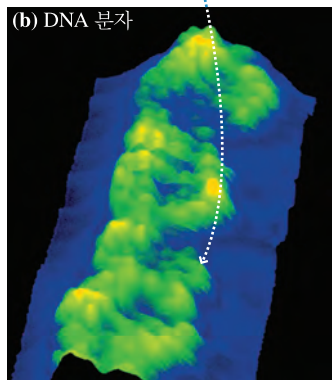


그림 28.23 STM 영상

원자의 육각형 구조가 명확히 보인다.



DNA 분자의 이중 나선 구조가 명확히 보인다.



크기를 영상화하는 것을 가능하게 한다. 주사 터널링 현미경은 이제까지 보아온 다른 현미경과 같은 방식으로 작동하는 것이 아니라, 그 대신 대상의 표면 가까이에서 탐침을 주사하여 고체 표면의 영상을 구축한다.

그림 28.22는 탐침이라고 하는 아주 가느다란 금속 바늘의 침이 고체 시료의 표면 위에 놓여 있는 것을 보여준다. 탐침과 표면 사이의 간격은 대략 원자 지름의 몇 배에 해당하는 0.5 nm 정도이다. 시료에 있는 전자는 양극의 탐침으로 끌리지만, 고전물리학에 따르면 전류는 흐르지 않는다. 왜냐하면 전자는 시료와 탐침 사이의 간격을 건널 수 없기 때문이다; 이것은 하나의 연결되지 않은 회로를 이루고 있다. 광전 효과에서 보듯이, 전자는 시료 내에 갇혀 있어서 자유롭게 시료를 떠날 수 없다.

그러나 전자는 고전적 입자가 아니다. 전자는 파동의 속성을 가지고 있고, 파동에는 날카로운 경계가 있는 것이 아니다. 슈뢰딩거 양자역학의 놀라운 예측은 전자의 파동 함수가 시료의 경계를 넘어서 약간 연장된다는 것이다. 탐침이 표면에 충분히 가까이 접근하여, 전자의 파동 함수 안으로 들어가게 되면 시료에 있던 전자가 어느 순간 탐침으로 옮겨가게 된다. 다르게 말하면, 양자 전자는 시료와 탐침 사이의 간격을 건널 수 있고, 회로에 전류가 흐르게 할 수 있다. 이 과정은 흡사 건너갈 수 없는 산의 장벽을 통과하여 반대쪽에 도달하기 위해 터널을 뚫는 것과 같아 터널링(tunneling)이라 한다. 터널링은 고전물리학의 법칙으로는 완전히 불가능한 현상이다. 그러므로 이것이 일어난다는 것이 양자 아이디어가 실제임을 증명하는 것이다.

전자가 간격을 가로질러 터널링하는 확률은 간격의 크기에 아주 민감하게 의존한다. 이것이 주사 터널링 현미경(scanning tunneling microscope), 혹은 STM을 가능하게 한다. 탐침이 표면 위의 원자나 원자 크기의 돌출 부위 바로 위를 지나가면 간격이 줄어들고 더 많은 전자가 터널링하게 되어 전류가 증가한다. 마찬가지로, 탐침이 원자 크기의 계곡을 지나가게 되면 터널링 확률은 감소하여 전류가 낮아진다. 시료 표면의 영상화를 위해 위치에 따른 전류 데이터가 사용된다.

STM은 개개 원자의 영상화를 허용한 첫 번째 기술이며, 나노 기술에 대한 최근의 관심에 시동을 건 1980년대 발명 중의 하나이다. STM 영상은 원자 크기의 세상에 대한 놀랄만한 시야를 제공한다. 그림 28.23(a)의 STM 영상은 흑연 표면에서 개개의 원자가 육각형으로 정렬되어 있는 모습을 보여준다. 그림 28.23(b)의 DNA 분자 영상은 이중나선 구조의 실제 꼬인 구조를 보여준다. 최근 연구에서는 주사 터널링 현미경과 다른 나노 탐침을 이용하여 DNA 배열을 직접 “읽어” DNA 염기서열을 밝히는 방법을 개발하고자 노력하고 있다.

## 파동-입자 이중성

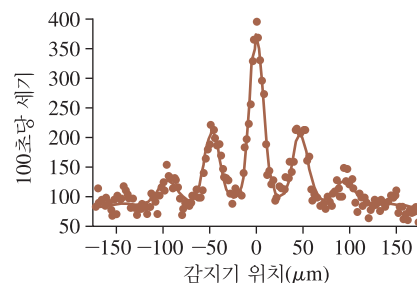
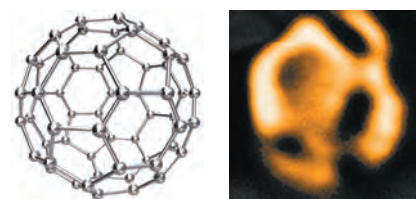
이 장을 통해 공통적으로 다뤄진 주제는, 양자이론에서 우리가 이전에 파동으로 알고 있던 것은 입자 속성을 가지고, 입자로 알고 있던 것은 파동의 속성을 가진다는 것이다. 빛이나 전자의 진정한 속성은 무엇인가? 그들은 입자인가 또는 파동인가?

고전물리학의 대상은 입자이거나 파동이며, 그 중간이라는 것은 없다. 행성이나 야구공은 입자이거나 입자들의 집단이며, 소리나 빛은 명백히 파동이다. 입자는 뉴턴 법칙에 의해서 주어진 궤적을 따라 움직인다; 파동은 중첩의 원리를 따르며 간섭 현상을 보인다. 빛이 때때로 입자처럼 행동하고, 더 이상한 것은, 물질이 때때로 파동처럼 행동한다는 것을 보여주는 부정할 수 없는 증거가 나오기 전까지는 입자-파동의 이분법은 명백한 것처럼 보였다.

처음에는 빛과 물질은 파동이면서 입자라고 생각할 수 있다. 그러나 이 생각은 성립되지 않는다. 입자다운 것과 파동다운 것의 기본적 정의는 서로 배타적이다. 두 개의 음파는 서로 지나갈 수 있고, 합치면 더 큰 진폭을 가지는 하나의 음파가 된다; 그러나 두 개의 야구공은 그렇게 할 수 없다. 빛과 물질은 파동도 아니고 입자도 아니라고 결론을 내리는 것이 더 유리해 보인다. 우리의 오감으로 직접 접근할 수 없는 원자나 그 구성체의 미시적 크기에서는 입자와 파동에 대한 고전적 개념은 단순히 너무 제한적이어서 자연의 불가사의를 설명할 수 없다.

물질과 빛은 파동성과 입자성 둘 다 가지고 있지만, 이들은 한 번에 하나씩만 그 모습을 보여준다. 간섭과 같은 파동성을 측정하는 실험을 설치하면, 광자나 전자는 파동처럼 행동하고 입자처럼 행동하지는 않는다. 입자를 쳐다보는 실험에서 광자와 전자는 입자처럼 행동하며 파동처럼 행동하지는 않는다. 빛과 물질의 두 가지 측면은 직소 퍼즐의 두 조각처럼 서로 보완적이다. 파동모형도 입자모형도 혼자로서는 빛이나 물질에 대한 적절한 모습을 제공할 수 없다. 그러나 이 둘을 합치면 자연의 가장 난해하지만 가장 근본적인 구성 요소를 이해하는 기초를 제공한다. 이 양면적인 견해를 파동-입자의 이중성이라고 한다.

200년 이상 동안, 과학자나 비과학자 모두 시계처럼 작동하는 뉴턴 물리학의 우주가 실체에 대한 근본적 기술이라고 생각하였다. 그러나 아인슈타인의 상대성이론과 함께 파동-입자의 이중성은 뉴턴 세계관의 기본적 가정들을 손상시킨다. 고전물리학의 확실성과 예측가능성은 확률과 불확정성이 핵심적 역할을 하는 새로운 우주(양자 물리학적 우주)에 자리를 양보하였다.



**버키볼의 이중성** 원자 크기의 구조물을 다루기 위해서는 입자와 파동성 견해 사이를 수시로 전환하여야 한다. 탄소 원자 60개는 상단 왼쪽 그림과 같은 C<sub>60</sub>분자, 버키볼(buckminsterfullerene)을 만든다. 상단 오른쪽의 STM 영상은 개개의 탄소 원자를 볼 수 있는 입자성의 모습이다. C<sub>60</sub>분자는 그것을 구성하는 개개 원자를 보여주는 그림을 그릴 수 있지만, 파동의 성질도 보여준다. 아래 그래프가 보여주는 것처럼 C<sub>60</sub>빔을 격자를 통해서 내 보내면, 광파와 비슷한 회절 무늬를 만든다.

### 종합형 예제 28.16 자기 공명 영상 B10

24장에서 영구 자석의 자성은 전자의 고유 자기 모멘트가 스스로 작은 나침반 바늘처럼 행동하기 때문에 생긴다고 배웠다. 양성자도 고유 자기 모멘트를 가지고 있으며, 이것이 의학에서 응용되는 자기 공명 영상(MRI)의 기본이다.

나침반 바늘은 자기장에 정렬되는 것을 선호하지만, 바늘은 자기장 방향에 따라 어떤 방향으로든 향할 수 있다. 양성자의 자기 모멘트는 그렇지 않다. 양자물리학에서는 양성자의 에너지는 양자화되어야 한다고 말한다. 자기장 내에 있는 양성자는 두 가지 에너지 준위만 있으므로 가능한 방향도 두 가지이다:

$$E_1 = -\mu B \quad \text{자기 모멘트가 자기장과 정렬}$$

$$E_2 = +\mu B \quad \text{자기 모멘트가 자기장과 반대로 정렬}$$

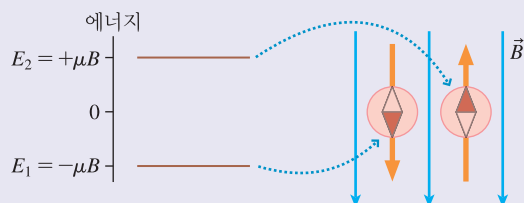
여기서  $\mu$ 는 양성자의 자기 모멘트이며 그 값은  $\mu = 1.41 \times 10^{-26}$  J/T이다. **그림 28.24**는 두 가지 에너지 상태를 보여준다. 나침반의 바늘처럼 자기 모멘트는 자기장과 정렬되기를 원한다. 그래서 정렬된 상태가 낮은 에너지 상태가 된다.

인간의 신체 조직은 대부분 물로 되어 있다. 각각의 물 분자는 두 개의 수소를 가지고 있으며, 이들의 핵은 양성자 하나로 되어



그림 28.24 자기장 안에 있는 양성자의 에너지 준위

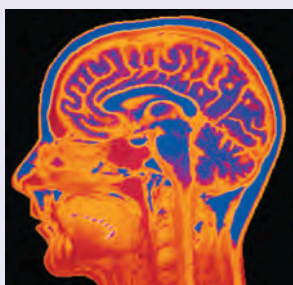
양자역학은 양성자의 에너지를 ... 자기장과 정렬되거나 혹은 반  
두 가지 상태로 제한한다 ... 대로 정렬된 상태에 대응된다.



있다. 자기장 내의 양성자는 두 가지 양자 상태 중 하나에 존재한다. 적절한 에너지의 광자로 인하여 양성자는 한 상태에서 다른 상태로 양자 점프를 하고 자기 모멘트의 방향을 바꿀 수 있다. 두 상태 사이의 에너지 차이는 작다. 이 에너지 차이에 대응하는 상대적으로 작은 진동수의 광자는 전자기 스펙트럼의 라디오파 영역에 속한다. 광자는 라디오파를 방출하는 탐침에서 제공되며, 탐침이 적절한 진동수에 맞추어지면, 파동은 양성자의 에너지 준위와 공명을 이룬다. 이것 때문에 자기 공명 영상이라는 이름이 주어졌다.

낮은 에너지의 광자 흡수율은 수소 원자의 밀도에 비례한다. 수소의 밀도는 조직의 종류에 따라 달라진다. 따라서 다른 조직들을 보여주는 MRI 영상은 광자가 양성자의 두 양자 상태사이를 양자 점프시키는 비율이 신체 부위에 따라서 어떻게 변화하는지를 측정하여 만들어진다. 그림 28.25처럼 신체 부위에 따라서 흡수율을 보여주는 그림은 환자의 신체를 가로지르는 단면 영상이 된다.

그림 28.25 MRI 영상이 환자 두 뇌의 한 단면을 보여준다.



- MRI 환자를 강한 자기장을 만드는 솔레노이드 코일에 놓는다. 자기장의 세기가 2.00 T일 때, 탐침 코일의 진동수는 얼마로 맞추나? 만들어진 광자의 파장은?
- 균일한 자기장 내에서는, 신체 내의 모든 양성자가 같은 진동수의 광자를 흡수할 것이다. 신체의 영상을 만들기 위하여, 자기장은 각 점마다 다르도록 디자인되었다. 각 점마다 자기장이 다르므로, 각 점에서는 광자를 흡수하는 유일한 진동수가 정해진다. 실제 과정은 복잡하지만, 간단하게 자기장이 신체축,  $x$ 축을 따라서 변하는 경우를 생각하자. 특별히 자기장의 세기가 테슬라 단위로  $B = 2.00 + 1.60x$ 로 주어졌다고 가정하자. 여기에서  $x$ 는 기준점으로부터의 거리를 미터 단위로 표시한 것이다. 탐침 코일은 먼저 기준점의 공명 진동수에 맞춘다. 진동수가 증가

함에 따라 시작 진동수보다 높은 4.7 MHz에서 강한 신호가 관측되었다. 이렇게 강한 신호를 만드는 조직은 신체 중에서 기준점으로부터 얼마나 떨어져 있는가?

**준비** 광자의 에너지가 두 상태의 에너지 차이로 주어졌을 때, 높은 에너지 상태로 양자 점프가 일어나서 광자는 흡수가 될 것이다. 광자의 에너지  $E_{\text{photon}}$ 는 두 상태 사이의 에너지 차  $\Delta E_{\text{system}} = 2\mu B$ 로 주어져야 한다.

**풀이** a. 2.00 T에서, 두 양성자 상태 사이의 에너지 차는

$$E_{\text{system}} = E_2 - E_1 = 2\mu B = 2(1.41 \times 10^{-26} \text{ J/T})(2.00 \text{ T}) \\ = 5.64 \times 10^{-26} \text{ J}$$

이것은  $3.5 \times 10^{-7} \text{ eV}$ 에 불과한 아주 작은 에너지이다. 광자는  $E_{\text{photon}} = hf = E_{\text{system}}$ 라는 조건이 성립되면 흡수된다. 따라서 광자의 진동수는

$$f = \frac{\Delta E_{\text{system}}}{h} = \frac{5.64 \times 10^{-26} \text{ J}}{6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}} \\ = 85.1 \times 10^6 \text{ Hz} = 85.1 \text{ MHz}$$

이것은 파장  $\lambda = c/f = 3.52 \text{ m}$ 에 해당한다.

- 기준점( $x = 0 \text{ m}$ )에서 자기장은 2.00 T이고, 이 점에서 탐침의 진동수는 a에서 구한 85.1 MHz이다. 강한 신호는 이 진동수 위 4.7 MHz, 즉 89.8 MHz이다. 이 강한 신호를 만드는 지점에서 자기장을 구하기 위하여  $E_{\text{photon}} = hf = E_{\text{system}} = 2\mu B$ 를 풀면,

$$B = \frac{hf}{2\mu} = 2.11 \text{ T}$$

신호의 위치를 구하기 위하여 문제에서 주어진 자기장-거리 공식을 사용하면

$$B = 2.11 \text{ T} = 2.00 + 1.60x \\ x = 0.069 \text{ m}$$

따라서 기준점 위 6.9 cm에서 강한 밀도의 양성자가 있다.

**검토** 기대한 바와 같이 탐침 코일의 진동수는 전자기 스펙트럼의 라디오파 영역에 있다. (b)에서 구한 강한 신호는 더 높은 진동수가 되고, 이것은 더 높은 자기장 그리고 양(+)의  $x$ 값에 해당한다. 진동수는 원래 진동수와 약간 다르므로, 기준점에 가까운 것으로 나타났다.

이것이 간단한 MRI 모형이지만, 몇 가지 핵심적인 요소가 있다: 위치마다 자기장이 달라서, 신체 부위마다 다른 양성자 에너지 준위를 만들 수 있도록 한다. 라디오파에 맞추어진 광자는 두 양성자 에너지 준위 사이에 양자 점프를 유발하고 이를 측정하여 각 부위의 양성자 밀도를 측정한다.



문제의 난이도는 I(쉬움)에서 IIII(도전)으로 구분하였다. INT로 표시된 문제는 지난 장의 내용이 복합된 문제이고, BIO는 생물학적 또는 의학적인 관심 분야를 의미한다.



QR 코드를 스캔하여 이 장의 문제를 해결하는 데 도움이 되는 영상 학습 풀이를 시작하십시오.

## 연습문제

### 28.1 X-선과 X-선 회절

- I 파장 0.12 nm의 X-선이 결정으로부터  $68^\circ$ 의 입사각에서 1차 회절이 일어난다. 2차 회절은 몇 도에서 일어날까?
- I 원자 층간의 간격이 0.175 nm인 결정에서 X-선 회절이 일어난다. 2차 회절이  $45.0^\circ$ 에서 일어난다. 1차 회절은 몇 도에서 일어날까?
- II 파장 0.085 nm의 X-선이 원자 층간의 간격이 0.18 nm인 결정에서 회절을 보인다. 얼마나 많은 회절 차수가 관측되는가?

### 28.2 광전 효과

- I 파장이 388 nm 이하인 빛을 금속에 쬔었을 때 전자가 방출되지만, 파장이 더 클 때는 전자가 나오지 않는다. 금속의 일함수는?
- II 가시광선의 전 영역에서 반응하는 광탐지기를 디자인할 필요가 있다. 음극의 최대 일함수는 얼마인가?
- II 아연은 일함수가 4.3 eV이다.
  - 아연 표면으로부터 전자가 방출할 수 있는 빛의 최대 파장은?
  - 4.7 eV의 광자를 표면을 쬔아서 전자가 방출되었다. 전자의 가능한 최고 속도는?

### 28.3 광자

- I 흑연에서 층간의 간격은 대략 0.25 nm이다. 이 파장을 가지는 X-선의 에너지는 얼마인가?
- I 눈에는 최고의 흡수가 437 nm, 533 nm, 그리고 564 nm에서 일어나는 세 가지 종류의 추상세포가 있다. 이 파장에 해당하는 광자의 에너지는?
- I 550 nm는 가시광선의 평균 파장이다.
  - 550 nm 파장을 가지는 광자의 에너지는?
  - 전형적인 백열전등은 초당 1 J의 가시광선 에너지를 내놓는다. 초당 방출되는 광자의 수는?

- II 0.25초 지속되는 빛 섬광을 감지하기 위하여 실리콘 태양전지 회로를 사용한다. 그 회로가 안정적으로 감지할 수 있는 최소 전류는  $0.42 \mu\text{A}$ 이다. 태양전지에 도달하는 모든 광자가 전체 에너지를 전하수송기에 전달한다면, 감지할 수 있는 550 nm 빛 섬광의 최소 출력은 얼마인가?

### 28.4 물질파

- I a. 속도 30 m/s, 질량 200 g인 야구공의 드브로이 파장을 추정하십시오.  
b. 드브로이 파장이 0.2 nm인 질량 200 g인 야구공의 속도는?
- II 드브로이 파장이 1.0 nm인 전자의 운동 에너지는 얼마인가(eV 단위)?
- II 원자핵의 지름이 대략 10 fm( $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ )이다. 드브로이 파장이 10 fm인 양성자의 운동 에너지는 얼마인가(MeV 단위)?

### 28.5 에너지는 양자화된다

- III 1차원 상자 안에 있는 전자의  $n=1$  에너지 준위가 파장 600 nm인 광자의 에너지와 같다. 상자의 길이는?
- II 1차원 상자 안에 갇혀있는 전자의 첫 번째 가능한 에너지와 두 번째 가능한 에너지의 차이는  $1.0 \times 10^{-19} \text{ J}$ 이다. 상자의 길이는 얼마인가?
- III 3개의 전자가 길이가 1 nm인 1차원 퍼텐셜 우물 안에 갇혀있다. 이 계의 바닥상태 에너지(최소 에너지)는 얼마인가?

### 28.6 에너지 준위와 양자 점프

- II 어떤 양자계의 허용된 에너지는 1.0 eV, 2.0 eV, 4.0 eV, 그리고 7.0 eV이다. 이 계의 방출 스펙트럼에서 나타날 수 있는 파장은 무엇인가?
- II 그림 P28.18은 어떤 양자계의 에너지 준위 도표이다. 이 계의

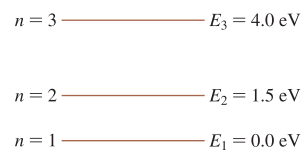


그림 P28.18

방출 스펙트럼에서 나타날 수 있는 파장은 무엇인가?

19. **III** 어떤 양자계의 허용된 에너지는  $0.0 \text{ eV}$ ,  $1.5 \text{ eV}$ ,  $3.0 \text{ eV}$ , 그리고  $6.0 \text{ eV}$ 이다. 이 계의 방출 스펙트럼에서 나타날 수 있는 파장은 무엇인가?

### 28.7 불확정성 원리

20. **II** 전자가 상자 안에 갇혀 있다. 전자의 속도가  $10 \text{ m/s}$ 보다 더 크지 않다는 것을 확신하기 위해서 상자의 길이가 최소한 얼마가 되어야 하는가?
21. **II** 하이젠베르크의 불확정성 원리를 사용하여 지름이  $15 \text{ fm}$ 인 원자핵에 갇혀있는 전자의 최소 결합에너지를 계산하여라.