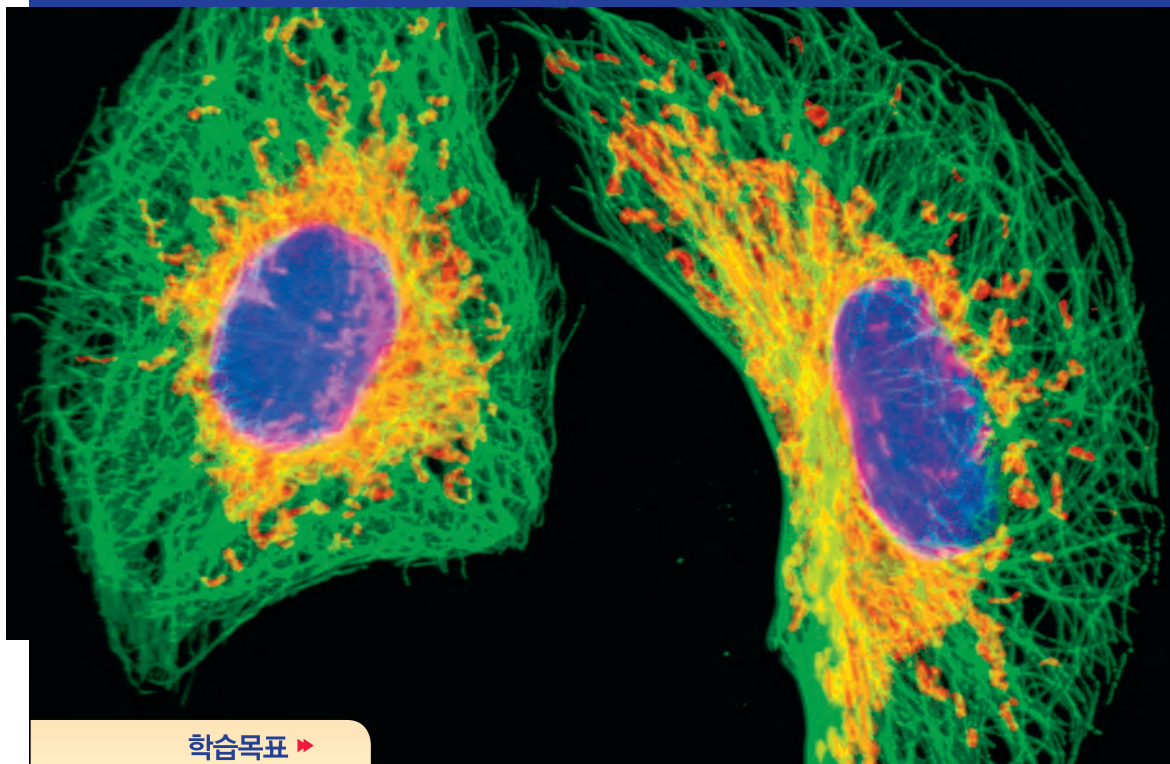


29 원자와 분자

Atoms and Molecules



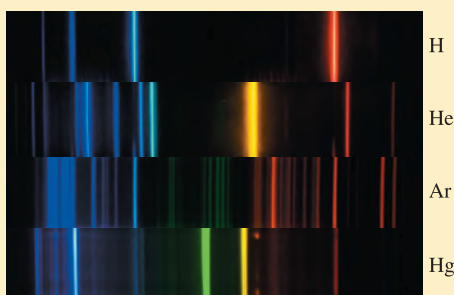
현미경으로 보는 이미지는 아프리카 초록 원숭이의 콩팥 세포이다. 파랑과 녹색 부분은 각각 DNA 핵과 섬유질 액틴을 나타낸다. 무엇이 이들 세포의 다른 부분들이 선명한 색의 차이를 만들어내고 있는가?

학습목표 ▶

양자물리학을 사용하여 원자, 분자 그리고 이들의 스펙트럼의 특성을 이해한다.

원자 모형

발광 가스의 빛이 회절 격자들에 의해 색깔로 분산될 때, 각 원소는 독특한 일련의 파장을 방출한다.



여러분은 어떻게 이 스펙트럼 라인이 원자의 본질에 대한 중요한 단서인지 배우게 될 것이다.

분자

특정 미세 플랑크톤에 특수화된 분자는 빛을 방출할 수 있다. 이 빛나는 파도는 그러한 생물 발광 생물에 의해 발생한다.



원자와는 달리 분자에 의해 방출되는 빛은 광범위한 파장을 포함하고 있는 이유를 배우게 될 것이다.

레이저

이 레이저 광선의 광선은 원자에 의한 광자의 자극적인 방출에서 비롯된다.



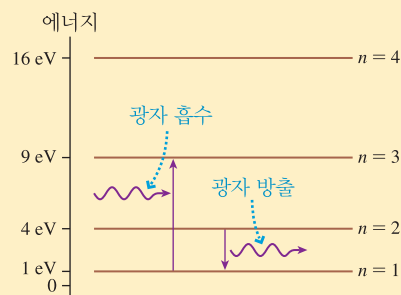
여러분은 원자가 빛을 발산할 때, 원자가 다른 원자들을 자극하여 정확히 같은 파장과 위상의 빛을 발산할 수 있다는 것을 알게 될 것이다.

이 장의 배경 ◀

에너지 준위 모형

28.5절과 28.6절에서는 원자 크기의 시스템의 에너지가 정량화된다는 것을 배웠다. 그러한 시스템의 허용된 에너지는 에너지 준위 모형으로 나타낼 수 있다.

이 장에서는 정량화의 아이디어를 이용하여 원자와 분자의 에너지 준위와 스펙트럼을 자세히 알아보겠다.

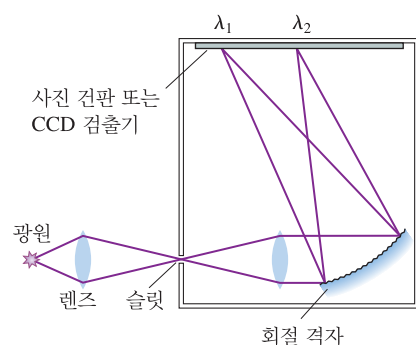


29.1 분광학



현대의 분광기는 손에 쥔 만큼 작다. (색깔이 다르면 다른 방향으로 꺾이게 되어 무지개 색을 보여준다.)

그림 29.1 회절 분광기



빛의 간섭과 회절은 19세기 말에야 잘 이해가 되어, 이를 이용하여 고정밀도로 파장을 측정하는 실용적인 장비가 디자인되었다. 빛의 파장을 측정하는 핵심 기구는 **그림 29.1**에서 보여주는 **분광기(spectrometer)**이다. 분광기의 핵심은 회절 격자인데 빛의 파장이 다르면 회절 격자에 의하여 다른 각도에서 분광되는 것이다.

각 파장은 사진 건판의 다른 위치에 각각 모여진다. 오늘날에는 디지털카메라의 CCD 검출기에 모여진다. 광원에서 나와 검출기에 의하여 기록되는 파장 패턴을 빛의 **스펙트럼(spectrum)**이라 한다.

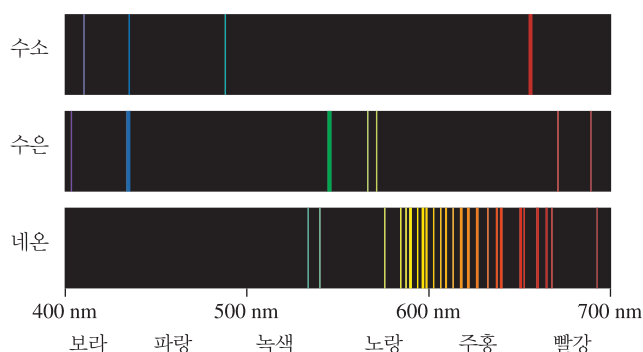
◀25.7절에서 배웠듯이, 태양이나 백열전구의 필라멘트와 같은 뜨겁고 스스로 발광하는 물체는 가능한 모든 파장에서 방출되는 빛에 의해 무지개가 형성되는 **연속 스펙트럼**을 방출한다. 배웠듯이 이 스펙트럼은 물체의 온도에만 의존하며 따라서 물체의 원자에 대한 정보는 포함되지 않는다.

각각의 원자에 의해 방출되고 흡수된 빛에 대해 알기 위해서, 우리는 원자들이 서로 멀리 떨어져 있고 서로 고립되어 있는 저압 가스의 형태로 그것들을 조사할 필요가 있다. 저압 가스로 채워진 유리관에 밀봉된 두 개의 전극에 고전압을 적용하면 가스가 빛나기 시작한다. 전구 필라멘트와 같은 뜨거운 고체 물체와 대조적으로, 가스 방출 튜브에서 방출되는 빛은 특정한 개별 파장을 포함한다. 그러한 스펙트럼을 **이산 스펙트럼**이라고 한다.

그림 29.2는 분광기의 사진 건판 위에 나타나는 스펙트럼의 예이다. **스펙트럼선(spectral line)**이라 하는 불연속 스펙트럼 속의 각 밝은 선은 광원에 의하여 발광되는 빛에서 하나의 특별한 파장을 나타낸다. 불연속 스펙트럼을 선 스펙트럼이라고 하기도 하는데, 그 이유는 검출기에 그렇게 보이기 때문이다. 네온 빛은 친숙한 주홍빛이 나는데, 그 이유는 네온 원자가 발광하는 거의 모든 파장은 주황색과 빨간색으로 감지되는 600~700 nm 파장 범위에 있기 때문이다.

그림 29.2는 수소, 수은 및 네온의 원자 스펙트럼이 서로 매우 다르게 보인다는 것

그림 29.2 400~700 nm 가시광선 영역의 스펙트럼 예이다.



을 보여준다. 사실, 주기율표의 모든 요소는 고유 개별 스펙트럼을 가지고 있다. 각 요소가 고유한 스펙트럼을 방출한다는 사실은 원자 스펙트럼을 요소를 식별하기 위해 “지문”으로 사용할 수 있다는 것을 의미한다. 결과적으로, 원자 분광학은 알려지지 않은 물질의 구성을 분석하고, 대기 오염 물질을 관찰하며, 지구와 다른 행성의 대기를 연구하는 많은 현대 기술의 기초가 된다.

기체 역시 빛을 흡수한다. **그림 29.3(a)**에서 보인 흡수실험에서 백색 광원은 기체가 없는 경우 검출기에 완전히 균일하게 노출된 연속 스펙트럼을 낸다. 기체의 시료가 빛이 지나가는 경로에 있을 때, 기체에 의해서 흡수된 파장은 소실되기 때문에 검출기 상에서 검게 나타난다.

기체는 불연속적인 파장을 방출함과 동시에 불연속적인 파장을 흡수를 한다. 기체의 방출 스펙트럼과 흡수 스펙트럼 사이에는 중요한 차이가 있다. 기체가 흡수한 모든 파장은 역으로 다시 방출된다. 그러나 방출된 모든 파장이 다시 흡수되지는 않는다. 흡수 스펙트럼의 파장은 방출 스펙트럼의 일부분으로 나타난다. 실례로, **그림 29.3(b)**에서 나트륨 원자의 흡수와 방출 스펙트럼을 동시에 보여주고 있다. 모든 흡수 파장은 방출 파장을 포함하고 있지만 흡수가 일어나지 않는 스펙트럼에서 방출 스펙트럼선이 있다.

무엇이 방출과 흡수가 일어나게 하는가? 왜 불연속 스펙트럼인가? 왜 방출은 일어나는데 흡수는 일어나지 않는가? 각 원소가 왜 다른가? 19세기 과학자들은 이러한 의문에 대하여 몹시 고민하며 고군분투하였으나 해답은 얻지 못하였다. 궁극적으로 고전물리학자들은 원자에 대한 이해를 제공해주지 못하였다.

단지 유력한 해결 징후가 예상 밖의 광원에서 나왔다. 수소 원자 이외의 다른 원소에서는 수십 아니 수백 개의 파장을 가진 반면, 수소의 가시광선 스펙트럼, 즉, 400 nm에서 700 nm 사이에는 단지 4개의 스펙트럼선이 있다(**그림 29.2(b)**와 표 29.1 참조). 만일 이러한 스펙트럼이 이해될 수 있다면, 이는 주기율표에서 이해되는 첫 번째 원소이다. 1885년, 돌파구는 저명하고 잘 알려진 과학자가 아니라 스위스 학교 선생인 발머(Johann Balmer)에 의하여 나왔다. 발머는 수소 스펙트럼에서 파장은 단순한 식으로 표현될 수 있음을 보여주었다.

$$\lambda = \frac{91.1 \text{ nm}}{\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)} \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad (29.1)$$

자외선과 적외선 분광의 발달로 최근의 실험 결과는 발머의 결과를 일반화시켰다.

$$\lambda = \frac{91.1 \text{ nm}}{\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)} \quad \left\{ \begin{array}{l} m \text{은 } 1, 2, 3, \dots \text{이며,} \\ n \text{은 } m \text{보다 큰 정수} \\ \text{이다.} \end{array} \right. \quad (29.2)$$

발머 자신은 $m=2$ 일 때 성립되는 최초의 식을 제안했지만, **발머의 식**(Balmer formula)이란 식 (29.2)를 말한다. 이 책의 범위에서 벗어나는 고해상도 준위의 미세부분이 아니

그림 29.3 흡수 스펙트럼 측정

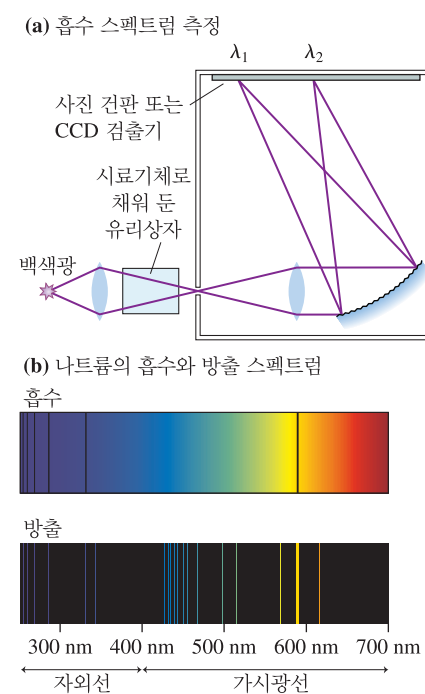


표 29.1 수소 스펙트럼에서 가시광선의 파장

656 nm
486 nm
434 nm
410 nm



천문학의 색 이 성운의 붉은색은 수소 원자에서 나오는 빛의 방출이다. 원자는 중심에 있는 별로부터 나오는 강력한 자외선에 의하여 들뜨게 된다. 원자들은 발머의 식 $m=2$ 와 $n=3$ 으로 예측된 $\lambda=656\text{ nm}$ 인 붉은빛을 방출한다.

라면, 발머의 식은 수소 방출 스펙트럼의 모든 파장을 정확하게 서술할 수 있다.

발머의 식은 소위 경험적인 지식이다. 실험적인 증거를 통하여 얻은 정확한 수학적 표현으로서 물리적인 원리나 법칙에 나온 것은 아니다. 식은 단순하기에 모든 사람들이 동의할 수 있는 것처럼 보이지만 왜 그런지에 대한 설명은 있어야 한다. 그 설명을 발견하는 데는 발머의 발표 이후 30년이란 세월이 걸렸다.

29.2 원자

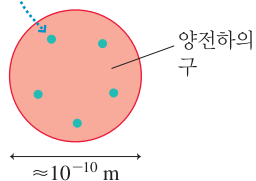
물질에서 나눌 수 없는 최소 단위로 원자라는 개념을 처음 가진 것은 고대 그리스인이었으나, 19세기 초 달톤이나 아보가드로, 그리고 그 외 과학자들이 화학의 법칙을 공식화할 때까지 원자에 대한 실험적 근거는 없었다. 지름이 약 10^{-10} m 인 원자가 존재한다는 것이 1890년에 널리 받아들여졌으나 원자가 눈에 보이지 않는 작은 구 혹은 내부에 어떤 구조를 가진 것인지는 여전히 알려지지 않았다.

1897년 톰슨(J. J. Thomson)에 의하여 발견된 전자는 두 가지를 내포하고 있다. 첫째, 원자는 나눌 수 없는 것이 아니다. 원자는 더 작은 조각으로 구성된다. 전자는 발견된 최초의 원자 구성 입자였다. 둘째, 원자의 성분은 대전 입자들이다. 따라서 원자는 전기력에 의하여 서로 묶여져 있어야 한다는 것이 그럴듯하게 보인다.

몇 년 안에 전자의 질량 m_e 가 측정되어 전자는 가장 작은 원자보다 더 작음이 밝혀졌다. 전자들은 전체 원자에 비하여 작고 가볍기 때문에, 양으로 대전된 부분이 많은 질량을 가지고 대부분의 공간을 차지한다고 생각하는 것이 합리적인 것처럼 보였다(양성자가 아직 알려지지 않았다). 톰슨은 원자란 지름이 약 10^{-10} m 인 양전하의 구형 ‘구름’에 더 작은 음전하가 박혀 있다고 제안하였다. 양전하와 음전하가 완전히 균형을 이루고 있어서 원자는 전체적으로 알짜 전하가 없다. 이러한 모형을 ‘건포도 넣은 푸딩(plum-pudding) 모형’ 혹은 ‘건포도-과자(raisin-cake) 모형’이라고 하였다. 이유는 **그림 29.4**에서 보면 확실하다. 아무튼 톰슨의 모형은 오래 가지 못하였다.

그림 29.4 톰슨의 원자의 건포도-과자 모형

톰슨은 양전하의 구에 음전하의 전자가 박혀 있다고 제안했다.



톰슨의 전자 발견과 거의 동시에 프랑스의 물리학자 베크렐(Henri Becquerel)은 우라늄 결정에서 새로운 형태의 ‘광선’이 나온다는 것을 발표했다. X선 같은 이러한 광선은 필름을 감광시키고 물체를 통과하나, 우라늄에 어떠한 일을 하지 않아도 우라늄으로부터 연속적으로 방출되었다.

톰슨의 옛 학생 중 한 명이었던 러더퍼드(Ernest Rutherford)는 이러한 새로운 광선을 연구하기 시작했다. 그리고 우라늄 결정이 실제로서 두 가지 다른 광선의 빛을 낸다는 것을 재빨리 발견하였다. **베타선(beta rays)**은 우라늄 결정에 의하여 나오는 고속 전자임이 밝혀졌다. **알파선(alpha rays)**, 현재는 알파 입자라 한다)은 헬륨 원자(헬륨 핵의 질량 $m = 6.64 \times 10^{-27}\text{ kg}$)로 구성되었으며, 시료로부터 고속으로 나온다는 것을 확인하였다.

원자가 깨질 수 있으며 내부 구조를 가지고 있다는 발견은 충격적이었다. 방사능의

발견과 더불어 원자는 안정하지도 않으며, 여러 종류의 대전 입자를 방출할 수도 있음이 현재 알려져 있다.

예제 29.1 알파 입자의 속력

알파 입자의 운동 에너지는 보통 MeV로 기술된다. 8.3 MeV인 알파 입자의 속력은 얼마인가?

풀이 1 eV는 1 V 전위차 속에서 가속되는 전자 1개가 얻은 에너지이다. 일로 환산하면 $1.00 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$ 이다. 우선 에너지를 줄로 환산한다.

$$K = 8.3 \times 10^6 \text{ eV} \times \frac{1.60 \times 10^{-19} \text{ J}}{1.00 \text{ eV}} = 1.3 \times 10^{-12} \text{ J}$$

알파 입자의 질량 $m = 6.64 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 은 본문에서 주어졌다. 구

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = 1.3 \times 10^{-12} \text{ J}$$

$$v = \sqrt{\frac{2K}{m}} = 2.0 \times 10^7 \text{ m/s}$$

이다.

검토 이 속력은 꽤 빠른 편이며, 광속의 7%이다.

첫 번째 핵물리 실험

러더퍼드는 고속의 알파 입자를 사용하면 원자의 내부를 알아볼 수 있음을 알았다. 1909년에 러더퍼드와 그의 학생들은 **그림 29.5**와 같이 대단히 얇은 금속 박편에 알파 입자를 통과시키기 위하여 실험 장치를 설치하였다. 알파 입자는 대전되었고, 지나가게 될 양전하(+)와 음전하(-)로 대전된 얇은 금속 박편으로부터 전기력을 받게 된다. 톰슨의 건포도-과자 모델을 사용하면 알파 입자가 원자의 양전하에 의해 받는 힘은 음의 전자로부터 받는 힘과 거의 상쇄되고, 알파 입자는 약간 편향된다. 실험자들이 처음 관찰한 것도 그러했다.

러더퍼드의 제안에서 그의 학생들은 큰 각으로 편향되는 알파 입자가 있는지를 알기 위하여 실험기구를 설치하였다. 답을 얻는 데는 단지 며칠이 걸렸다. 알파 입자는 큰 각도에서 편향될 뿐 아니라 그중 소수의 몇 개는 반대 방향으로 다시 되돌아왔다.

이 결과를 어떻게 이해할 것인가? **그림 29.6(a)**에서 보면, 톰슨 원자를 통과한 알파

그림 29.5 얇은 금박으로 고속의 알파 입자를 통과시키기 위한 러더퍼드의 실험 장치

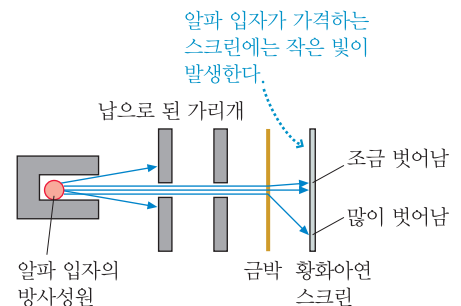
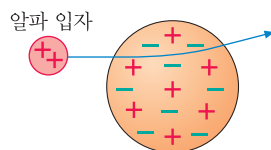


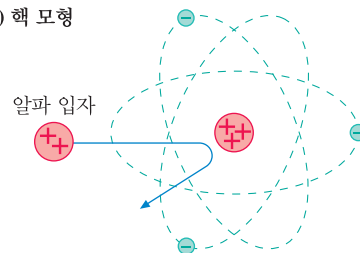
그림 29.6 톰슨 모형에서 알파 입자가 퍼져 있는 전하와 상호작용하는 것은 단단하게 뭉쳐 있는 양전하(+)의 핵과 상호작용하는 것과 다르다.

(a) 톰슨 모형



알파 입자는 톰슨 원자에 의해서 오직 조금만 벗어나는데, 이는 퍼져 있는 양전하에 의한 힘은 음전하에 의한 힘과 거의 상쇄되기 때문이다.

(b) 핵 모형



원자에 양전하의 밀집된 핵이 있다면, 알파 입자는 핵에 아주 가까이 갈 수 있고 아주 강한 미는 힘을 느끼게 된다.

입자는 단지 조금 편향된다. **그림 29.6(b)**에서와 같이 원자가 양전하인 조그마한 중심 핵(core)을 갖는다면 알파 입자 몇 개는 중심핵까지 매우 가까이 도달한다. 전기력은 거리의 제곱에 반비례하므로 가까이 접근하는 것은 매우 큰 힘에 의해 큰 각도로 산란되거나 정반대로 되돌아오게 한다.

알파 입자가 큰 각도로 산란한다는 사실을 발견한 러더퍼드는 원자는 마치 태양계와 같아서, 믿을 수 없을 정도로 작고 무거운 양전하를 띤 핵(nucleus) 주위를 음전하를 띤 전자들이 돌고 있다고 생각했다. 이것이 **원자의 핵 모형(nuclear model of the atom)**이다. 이후 실험으로 밝혀진 바로는 원자핵의 지름은 대략 $1 \times 10^{-14} \text{ m} = 10 \text{ fm}$ ($1 \text{ fm} = 1 \text{ femtometer} = 10^{-15} \text{ m}$)로, 단지 원자 반지름의 0.01 %이다. 원자의 거의 대부분이 텅 빈 공간이다!

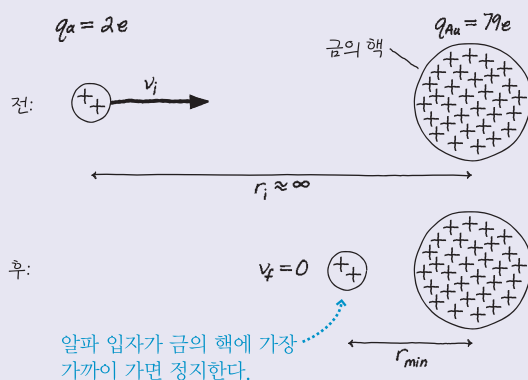
예제 29.2 금을 향해서!

8.3 MeV 알파 입자가 금 원자(원자번호 79)의 핵을 향해 발사되었다. 알파 입자가 핵에 가장 가까이 가는 거리는 얼마인가?

준비 에너지는 전기적인 상호작용에서 보존된다. 알파 입자보다 훨씬 무거운 금의 핵은 움직이지 않는다. 구형으로 분포된 전하의 전기장과 퍼텐셜은 전체 전하를 점전하로 취급함으로써 구할 수 있음을 기억해 보아라. **그림 29.7**은 충돌 전-후 개요도이다. ‘전’ 상태는 알파 입자가 금의 핵에서 멀리 떨어져 있다. ‘후’ 상태에서는 알파 입자가 핵에 가장 가까운 거리에 있다. 운동은 일직선을 따라 들어와서 나간다.

풀이 전기 위치 에너지는 전하 간의 거리가 증가하면 급속하게 감소한다. 따라서 초기에 알파 입자로부터 멀리 떨어져 있는 경우,

그림 29.7 핵과 충돌하는 알파 입자의 전-후 개요도



알파 입자는 초기 운동 에너지만 가지고 있다. 알파 입자가 가장 가까이 갈 경우 입자는 정지하고, 계는 위치 에너지만 가지고 있다. 에너지 보존 법칙 $K_f + U_f = K_i + U_i$ 에서 다음을 얻는다.

$$0 + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_\alpha q_{\text{Au}}}{r_{\min}} = \frac{1}{2} m v_i^2 + 0$$

여기에서 q_α 는 알파 입자 전하이고, 금의 핵은 전하가 q_{Au} 인 점전하로 하였다. r_{\min} 의 해는

$$r_{\min} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2q_\alpha q_{\text{Au}}}{m v_i^2}$$

이다. 알파 입자의 질량은 $m = 6.64 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 이고 전하는 $q_\alpha = 2e = 3.20 \times 10^{-19} \text{ C}$ 이다. 금의 원자번호는 79이므로 $q_{\text{Au}} = 79e = 1.26 \times 10^{-17} \text{ C}$ 이다. 예제 29.1에서 8.3 MeV 알파 입자의 속력은 $v = 2.0 \times 10^7 \text{ m/s}$ 이다. 이러한 정보를 가지고 계산하면,

$$r_{\min} = 2.7 \times 10^{-14} \text{ m}$$

이다. 이 결과는 원자 크기의 1/10,000이다!

검토 예제에서 금 원자의 전자들을 무시했다. 실제로, 전자는 알파 입자의 궤적에 영향을 주지 않는다. 알파 입자는 전자에 비하여 상당히 무겁다. 그리고 전자는 핵의 크기에 비하여 큰 거리에 분포되어 있다. 그래서 알파 입자는 속도의 큰 변화 없이 전자를 쉽게 밀어낸다.

핵 모형 사용

핵 모형은 원자를 형상화하고 이온화와 같은 과정을 이해하는 데 도움을 준다. 예로써, 주기율표의 원소 위치, 즉 원소의 **원자번호(atomic number)**는 궤도를 돌고 있는

(중성 원자에 있는) 전자의 수이며, 핵에 있는 양전하의 단위의 개수이다. 원자번호는 Z 로 나타내며, $Z=1$ 인 수소는 전하 $+1e$ 를 가진 핵 주변을 1개의 전자가 돌고 있다. $Z=2$ 인 헬륨은 전하 $+2e$ 를 가진 핵 주위를 2개의 전자가 돌고 있다. 돌고 있는 전자는 매우 가볍기 때문에 X선 광자나 빠르게 움직이는 전자가 원자의 궤도 전자들 중 하나를 때려 튕겨 나오게 하여서 원자가 양이온이 되게 할 수 있다. 전자 하나를 제거하면 $q_{\text{ion}} = +e$ 로 단일 전하를 띤 이온이 된다. 전자 2개를 제거하면 $q_{\text{ion}} = +2e$ 로 2중으로 전하를 띤 이온이 된다. 이와 같이 **그림 29.8**은 리튬($Z=3$)을 보여준 그림이다.

그림 29.8 리튬 원자($Z=3$)의 다른 이온화 단계



실험을 함에 따라 핵의 양전하는 양전하를 띤 **양성자**(proton)라 하는 아원자 입자와 관련이 있는 것을 알 수 있었다. 양성자의 전하는 $+e$ 이고, 전자의 전하와 크기는 같고 부호는 반대다. 거의 모든 원자의 질량은 핵에서 나오기 때문에 양성자의 질량은 전자의 약 1800배로 $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 이다. 원자번호가 Z 인 원자 핵의 전하는 $+Ze$ 이고, 핵 속에 Z 개의 양성자를 갖는다.

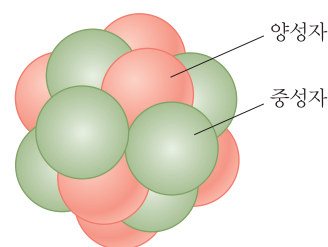
화학 반응을 시키거나 마찰로 물체가 대전될 때, 전자들이 왜 쉽게 이동되는지를 이 원자핵 모형으로 이해할 수 있다. 양성자는 핵에 아주 단단하게 묶여 있고 전자들로 차폐되어 있으나 가장 바깥 궤도의 전자들은 쉽게 이탈한다. 톰슨의 모형에서 부족한 설명이 러더퍼드의 핵 모형은 가지고 있었다.

그러나 문제가 있었다. 원자번호 2인 헬륨은 수소보다 전자와 양성자를 2배나 많이 가지고 있다. $Z=3$ 인 리튬은 양성자와 전자가 각각 3개씩이다. 만일 핵이 Z 개의 양성자와 Z 개의 돌고 있는 전자로 균형을 이루고 있다면, 또한 만일 거의 모든 원자 질량이 핵 속에 있다면 헬륨은 수소보다 2배 무거워야 하고, 리튬은 수소보다 3배 무거워야 한다. 화학적 측정에 의하면 헬륨은 수소보다 4배 무겁고, 리튬은 수소보다 7배 무겁다.

1932년 세 번째 원자 구성 입자가 발견되기 전까지는 이러한 어려움이 풀리지 않았다. 이러한 입자는 근본적으로 양성자와 같으나 전하를 띠고 있지 않아야 한다. 이것을 **중성자**(neutron)라 한다. 중성자는 양성자와 함께 핵 속에 있으면서 원자의 질량에 기여하며 전하는 없다. 30장에서 보겠지만 중성자는 핵을 단단하게 싸매는 ‘아교’ 역할을 한다.

그림 29.9와 같이 핵은 Z 개 양성자와 N 개 중성자로 되어 있으며, 원자의 **질량수** (mass number)는 $A = Z + N$ 이다. 차원이 없는 정수인 질량수는 원자 질량과 같지 않

그림 29.9 원자핵은 양성자와 중성자로 구성된다.



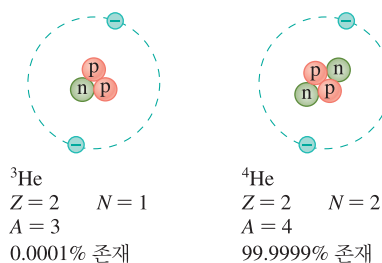
다. 그러나 양성자와 중성자 질량은 둘 다 약 1 u인데, 여기에서

$$1 \text{ u} = 1 \text{ 원자 질량 단위} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

이다. 질량수 A 는 원자 질량 단위로 표현한 질량과 거의 같다. 예를 들면, 2개의 양성자와 2개의 중성자를 갖는 헬륨($A=4$)은 원자 질량이 $m = 6.646 \times 10^{-27} \text{ kg} = 4.003 \text{ u} \approx 4 \text{ u}$ 이다.

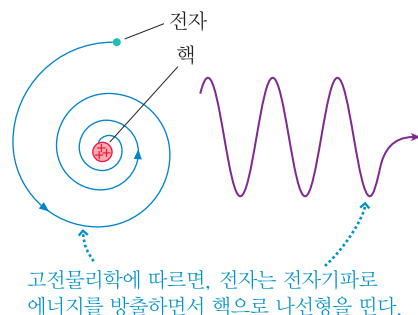
중성자 수는 여러 가지이나 그래도 각각의 경우 다행히 Z 개의 양성자와 결합하여 같은 Z 값을 갖는 일련의 핵들이 있다(곧 이들은 모두가 화학적으로 같은 원소이다). 이러한 일련의 핵을 **동위원소(isotopes)**라 한다. 동위원소는 A_Z 라고 적는데, 질량수 A 는 앞 첨자로 쓴다. 양성자 수 Z 는 실제로는 수를 쓰지 않고 그 원소의 화학 기호를 대신 사용한다. 네온의 대부분의 동위원소는 $Z=10$ 개의 양성자와 $N=10$ 개의 중성자를 갖는다. 그러므로 네온의 경우 질량수는 $A=20$ 이고 ${}^{20}\text{Ne}$ 이라 쓴다. 네온 동위원소 ${}^{22}\text{Ne}$ 는 $Z=10$ 개의 양성자와 $N=12$ 개의 중성자를 갖는다. 헬륨은 **그림 29.10**에서와 같이 두 종류의 동위원소가 있다. 희박한 ${}^3\text{He}$ 은 단지 0.0001%만이 존재한다. 그러나 이 동위원소는 분리되어질 수 있고 과학적 연구에 매우 중요하게 사용된다.

그림 29.10 헬륨의 두 종류의 동위원소. ${}^3\text{He}$ 은 단지 0.0001%만 있다.



29.3 원자 양자화에 관한 보어의 모형

그림 29.11 러더퍼드 원자의 운명



러더퍼드의 원자핵 모형은 원자를 이해하는 데 있어서 매우 중요한 단계였으나 치명적인 두 가지 단점을 가지고 있었다. 맥스웰의 전자기 이론에 따르면 이렇게 궤도를 돌고 있는 전자는 조그마한 안테나로 작용하여 전자기파를 방출한다. **그림 29.11**에서 보듯이, 전자들이 핵 속으로 나선형으로 들어가게 한다! 계산에 의하면 러더퍼드의 원자는 몇 십만 분의 일 초 동안도 지속할 수 없다. 다른 말로 하면, 고전역학과 전자기학 이론에 의하면 핵 주위를 돌고 있는 전자는 고도로 불안정하여 즉시 붕괴됨을 예측할 수 있다. 분명하게 이러한 일은 일어나지 않는다.

19세기 말과 20세기 초에 실험적인 노력은 인상적이었고, 전자의 존재와 양전하를 가진 작은 핵, 그리고 각 원자에서 나오는 불연속 스펙트럼은 의심할 여지가 없다. 이러한 관측을 이해하려는 이론적인 뼈대구성은 실험을 따라잡지 못했다. 새로운 세기가 시작될 무렵까지 물리학자들은 원자 구조를 설명할 수 없었으며, 물질의 안정성을 설명할 수 없었다. 또 불연속적인 스펙트럼 혹은 원소의 흡수 스펙트럼과 방출 스펙트럼이 왜 다른지에 대하여 설명할 수 없었고, X선과 방사능의 근원에 관해서도 설명할 수 없었다.

수년 동안 인식되지는 않았지만, 잃어버린 퍼즐 조각은 1905년 아인슈타인이 소개한 광양자였다. 빛이 광자라 부르는 에너지의 불연속 꾸러미로 되어 있고, 원자가 빛을 방출하고 흡수한다면, 원자 구조는 어떻게 될 것인가? 이것이 덴마크 물리학자 보어(Niels Bohr)가 가졌던 의문이었다.

보어는 태양계 같은 원자가 어떻게 안정하여서 모든 에너지를 방출하지 않는지 이

해하기를 원했다. 그는 광양자가 원자 구조에 심오한 암시를 가지고 있음을 곧 인정했다. 1913년에 보어는 러더퍼드의 핵 원자에 양자화를 더하여 근본적으로 새로운 모형을 제안하였다. **원자에 대한 보어의 모형(Bohr model of the atom)**의 기본적인 가설은 다음과 같다.

보어의 모형 이해

전자는 어떤 허용된 궤도에만 존재할 수 있다.

허용된 궤도가 아닌 여기에는 전자가 존재할 수 없다.

이것은 하나의 정상 상태이다. 이것을 다른 정상 상태이다.

에너지 준위 도형

E_3 $n=3$

E_2 $n=2$

E_1 $n=1$

이 다른 상태들은 들뜬 상태이다.

에너지가 E_1 으로 가장 낮은 상태는 바닥 상태이다. 이것은 안정적이고 여기에 무한히 머물 수 있다.

광자 방출

들뜬 상태의 전자

전자는 에너지가 낮은 정상 상태로 뛰면서 광자를 방출한다.

광자 흡수

접근하는 광자

전자는 광자를 흡수하고 에너지가 더 높은 정상 상태로 뛴다.

충돌 들뜸

접근하는 입자

입자는 에너지를 잃는다.

충돌을 통해 입자는 원자에 에너지를 전달하여 들뜨게 한다.

들뜬 상태에 있는 원자는 낮은 에너지 상태로 뛰는데, 그때마다 광자를 방출한다.

- 원자 속의 전자는 허용된 궤도에만 있다. 이러한 궤도 속의 특별한 배치를 **정상 상태(stationary state)**라 한다.
- 에너지 준위 도형에서 볼 수 있듯이, 각 정상 상태에는 불연속하고 명확한 에너지 E_n 이 있다. 이 원자 에너지는 양자화된다. 정상 상태는 에너지 증가 순으로 **양자수(quantum number) n** 을 붙인다.

$$E_1 < E_2 < E_3 < \dots$$
- 원자는 정상 상태에서 다른 정상 상태로 전이(transition) 혹은 양자 뛴(quantum jump)을 한다. 두 정상 상태 사이의 에너지와 정확하게 에너지가 같은 광자를 방출 혹은 흡수하면서 전이 또는 양자 뛴을 한다.
- 다른 전자와 충돌하거나 **충돌 들뜸(collisional excitation)**이라 하는 과정에 있는 다른 원자와 충돌함으로써 에너지를 흡수하여 원자는 낮은 에너지 상태에서 높은 에너지 상태로 움직인다. 들뜬 원자는 곧 낮은 상태인 아래로 뛴을 하여 최후에는 안정한 바닥 상태에서 끝을 맺는다.

보어의 모형에 함축된 내용은 심오하다. 특히 아래의 내용을 주시해라.

- 물질은 안정하다.** 일단 원자가 바닥 상태에 있으면 원자가 뛰어서 더 낮은 에너지 상태로 가지 않는다. 영원히 바닥 상태에 머무를 수 있다.
- 원자는 불연속 스펙트럼을 방출하거나 흡수한다.** 원자가 에너지 E_i 를 가진 초기 상태에서 에너지 E_f 를 가진 최종 상태로 원자가 뛴 때, 에너지의 보존은 에너지 $E_{\text{photon}} = \Delta E_{\text{atom}} = |E_f - E_i|$ 를 갖는 광자를 방출하거나 흡수할 것을 요구한다. $E_{\text{photon}} = hf$ 이므로, 이 광자는 주파수 $f_{\text{photon}} = \Delta E_{\text{atom}} / h$ 를 가져야 한다. 다른 주파수의 광자는 에너지 보존을 위반하지 않고는 방출되거나 흡수될 수 없다.
- 방출 스펙트럼은 충돌에 의하여 만들어질 수 있다.** 충돌의 에너지로 원자는 들뜬 상태로 뛰어오른다. 원자는 낮은 에너지 상태로 뛰어내릴 때 불연속 방출 스펙트럼에 해당하는 광자를 방출한다.

4. 흡수는 방출 스펙트럼 파장의 일부분이다. 흡수 스펙트럼에서 보이는 모든 선들은 방출에서 역시 보인다. 그러나 많은 방출 선들은 흡수에서는 보이지 않는다는 것을 기억해라. 보어의 모형에 따라 대부분의 원자들은 대부분의 시간을 가장 낮은 에너지 상태인 $n=1$ 인 바닥 상태에 있다. 따라서 흡수 스펙트럼은 단지 원자가 광자를 흡수함으로써 $n=1$ 에서 더 높은 n 의 값으로 뛰는 $1 \rightarrow 2$, $1 \rightarrow 3$, ... 등의 전이만으로 구성된다. $2 \rightarrow 3$ 과 같은 전이는 발견되지 않는다. 왜냐하면 흡수를 하기 위한 어떤 순간적인 시간에 $n=2$ 인 원자는 근본적으로 없기 때문이다. 다시 말하면, 충돌에 의하여 $n=3$ 상태로 들뜬 원자는 $3 \rightarrow 1$ 과 $3 \rightarrow 2$ 전이에 해당하는 광자를 방출할 수 있다. 그렇게 해서 $\Delta E_{\text{atom}} = E_3 - E_1$ 에 해당하는 파장은 방출과 흡수 모두에서 보인다. 그러나 $\Delta E_{\text{atom}} = E_3 - E_2$ 인 광자는 방출에서만 일어난다.



영상 학습
데모

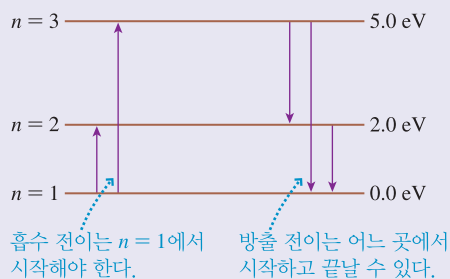
5. 주기율표에서의 각 원소는 유일무이한 스펙트럼을 갖는다. 정상 상태 에너지는 궤도를 돌고 있는 전자의 에너지이다. 전자의 개수가 다른 원소는 다른 안정한 궤도와 다른 정상 상태를 갖는다. 다른 에너지를 가진 상태는 다른 파장의 광자를 방출하고 흡수한다.

예제 29.3 방출과 흡수 스펙트럼에서 파장

어떤 원자는 정상 상태 $E_1 = 0.0 \text{ eV}$, $E_2 = 2.0 \text{ eV}$, $E_3 = 5.0 \text{ eV}$ 를 갖는다고 하자. 이 원자의 흡수 스펙트럼과 방출 스펙트럼에서 어떤 파장이 관측되는가?

준비 그림 29.12는 원자의 에너지 준위 도표를 나타낸다. 광자는 원자가 높은 에너지 상태에서 낮은 에너지 상태로 양자 뿔을 할 때 방출된다. 광자들은 낮은 에너지 준위에서 더 높은 에너지 준위로 양자 뿔을 하면서 흡수된다. 그러나 원자의 대부분은 $n=1$ 인 바닥 상태에 있다. 따라서 흡수 스펙트럼에서 보이는 양자 뿔만이 $n=1$ 상태로부터 시작한다.

그림 29.12 원자의 에너지 준위 도표



풀이 이러한 원자는 $1 \rightarrow 2$ 와 $1 \rightarrow 3$ 전이에 해당하고 에너지가 $\Delta E_{1 \rightarrow 2} = 2.0 \text{ eV}$ 와 $\Delta E_{1 \rightarrow 3} = 5.0 \text{ eV}$ 인 광자를 흡수한다. $f_{\text{photon}} = \Delta E_{\text{atom}}/h$ 와 $\lambda = c/f$ 를 사용하면 흡수 스펙트럼 내의 파장을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} 1 \rightarrow 3 \quad f_{\text{photon}} &= 5.0 \text{ eV}/h = 1.2 \times 10^{15} \text{ Hz} \\ \lambda &= 250 \text{ nm (자외선)} \\ 1 \rightarrow 2 \quad f_{\text{photon}} &= 2.0 \text{ eV}/h = 4.8 \times 10^{14} \text{ Hz} \\ \lambda &= 620 \text{ nm (주황색)} \end{aligned}$$

방출 스펙트럼은 $2 \rightarrow 1$ 과 $3 \rightarrow 1$ 의 양자 뿔에 해당하는 620 nm와 250 nm 파장을 갖는다. 원자가 $n=2$ 상태에 있는 것은 아주 적기 때문에 $2 \rightarrow 3$ 으로 흡수되는 경우는 거의 보이지 않지만, $\Delta E_{3 \rightarrow 2} = 3.0 \text{ eV}$ 를 가진 광자를 방출하며 $3 \rightarrow 2$ 양자 뿔을 하는 것의 파장은 방출 스펙트럼에 포함되어 있다. 똑같은 계산으로 $f_{\text{photon}} = 7.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 와 $\lambda = c/f = 410 \text{ nm}$ 를 얻는다. 따라서 방출 파장은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} 2 \rightarrow 1 \quad \lambda &= 620 \text{ nm (주황색)} \\ 3 \rightarrow 2 \quad \lambda &= 410 \text{ nm (파란색)} \\ 3 \rightarrow 1 \quad \lambda &= 250 \text{ nm (자외선)} \end{aligned}$$

29.4 보어의 수소 원자

보어의 가설은 참신한 아이디어였으나 그래도 여전히 커다란 장애물이 있었다. 어떤 것이 정상 상태인가? 보어의 모형의 모든 것은 이 정상 상태의 존재와, 허용된 전자 궤도는 오직 몇 개만 존재한다는 것에 달려 있다. 고전물리학에서는 그러한 궤도에 대한 아무런 근거를 주지 못한다. 보어의 모형은 정상 상태가 있을 때의 결과를 기술할 수 있는 것이지, 이를 어떻게 찾을 것인가에 관한 것이 아니다. 그러한 상태가 실제로 존재한다면, 이를 찾는 것은 고전물리학의 범주를 벗어난다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 보어는 수소 원자에 대하여 명쾌한 분석을 하였다. 수소 원자는 전자를 하나 가지고 있는 가장 단순한 원자이다. 더군다나 ◀29.1절에서 논의한 바와 같이 발머는 수소 방출 스펙트럼에서 파장을 기술할 아주 간단한 식을 발견하였다. 보어는 노력 끝에 수소 원자에 대한 발머의 식을 유도하였다.

보어는 논문에서 다소 순환적 논리를 사용했다. 그것은 놀랄 일이 아니었다. 그것은 그 당시 다른 방도가 없었기 때문이다. 그러나 우리는 보어의 모형에 대한 역사적인 연구가 아니라 아이디어에 대하여 명쾌하게 설명해야 하기 때문에, 드브로이(de Broglie) 물질파를 사용하여 설명하겠다. 드브로이는 보어 후 11년인 1924년까지 물질파를 제안하지 않았으나, 우리는 전자를 파동으로 다루면 수소 원자를 수월하게 분석할 수 있음을 보이겠다. 그렇게 하면 보어의 모형과 다르지만 같은 결론에 도달하게 되며, 덧붙여서 보어 후의 업적에 대해서도 잘 이해하게 될 것이다.

수소 원자의 정상 상태

그림 29.13은 양성자 주위를 도는 하나의 전자를 가진 러더퍼드 수소 원자이다. 원 궤도의 반지름 r 과 속도 v 를 가정하자. 그리고 양성자는 정지해 있고, 전자는 양성자 주위를 회전하는 것도 가정한다. 양성자는 전자보다 1800배 무겁기 때문에 이는 합리적인 가정이다.

알게 되겠지만 전자는 입자와 파동의 특성을 동시에 가지고 있다. 전자를 우선 대전 입자로 취급하자. 양성자는 전자에 쿨롱 힘을 작용한다.

$$\vec{F}_{\text{elec}} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}, \text{중심 방향} \right) \quad (29.3)$$

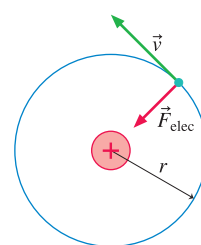
이 힘으로 전자는 중심으로 향한 가속도 $\vec{a}_{\text{elec}} = \vec{F}_{\text{elec}}/m$ 을 받는다. 이 구심력으로 입자는 원운동을 한다. 반지름이 r 이고 속도 v 로 원운동하는 입자의 구심 가속도는

$$a_{\text{elec}} = \frac{F_{\text{elec}}}{m} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m r^2} = \frac{v^2}{r}$$

이 되기 때문에 다음을 얻는다.

$$v^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m r} \quad (29.4)$$

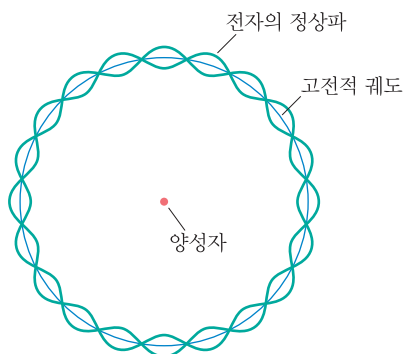
그림 29.13 러더퍼드 수소 원자, 핵 크기를 과장되게 그렸다.



식 (29.4)는 운동의 제약조건이다. 전자가 원운동을 한다면 속력 v 와 반지름 r 은 식 (29.4)를 만족해야 한다. 이러한 제약은 원자에 특별한 것이 아니다. 궤도를 도는 인공위성에서도 유사한 방정식을 보인다.

이제 전자를 드브로이 파로 취급하여 논의해보자. ◀28.5절에서 1차원 상자에 갇혀 있는 입자는 앞과 뒤에서 반사될 때 정상파를 이룬다는 것을 알았다. 정상파는 서로 반대 방향으로 움직이는 2개의 진행파동으로 이루어져 있다, 상자에서 왕복 거리가 파장의 정수배($2L = n\lambda$)일 때, 반대 방향으로 진행하는 2개의 파동은 보강 간섭하여 정상파를 만든다.

그림 29.14 궤도의 원주의 $n = 10$ 전자 정상파



선을 따라 앞뒤로 움직이는 것 대신에, 우리의 파동 같은 입자는 원주 돌레를 돌아간다고 해보자. 만일 파동이 양쪽 방향으로 움직이고, 두 방향으로 진행하며, 한 바퀴 도는 거리가 파장의 정수배라면, 파동들은 상자 속의 입자처럼 정상파를 만들 것이다. 예로써, 그림 29.14는 $n = 10$ 파장을 가진 원주 주위를 도는 정상파를 보여준다.

원형 정상파의 수학적 조건은 1차원 상자의 왕복거리 $2L$ 을 원둘레 $2\pi r$ 로 대체하면 된다. 곧 정상파는 아래와 같을 때 생긴다.

$$2\pi r = n\lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (29.5)$$

그러나 입자의 드브로이 파장은 $\lambda = h/p = h/mv$ 를 갖는다. 즉 드브로이 파의 정상파 조건은

$$2\pi r = n \frac{h}{mv}$$

이다. 그러므로 전자의 속력이

$$v = \frac{nh}{2\pi mr} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (29.6)$$

인 경우에만 정상파 조건이 만족된다. 달리 말하면, 전자는 임의의 속력을 갖지 못하고, 식 (29.6)에서 주어진 불연속 값을 갖는다.

물리량 $h/2\pi$ 는 양자물리학에서 매우 자주 나오기 때문에 이를 보통 특별한 이름으로 부른다. \hbar 라 쓰고 'h 바'라 발음하는 양은 다음과 같이 정의된다.

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 6.58 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

위의 정의를 이용하여 방정식 (29.6)을 다시 쓰면

$$v = \frac{n\hbar}{mr} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (29.7)$$

이다. 식 (29.4)와 같이 이 식은 v 와 r 사이의 또 다른 관계식이다. 이 식은 전자를 파동으로 취급할 때 나오는 제약조건이다.

만일 전자가 입자와 파동으로 동시에 행동한다면 식 (29.4)와 (29.7)로 표현된 구속조건은 만족되어야 한다. 입자라 할 때 얻은 제약조건인 식 (29.4)는 파동이라 할 때 얻은 제약조건인 식 (29.7)과 같아야 한다. 두 식으로부터 다음을 얻는다.

$$v^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m r} = \frac{n^2 \hbar^2}{m^2 r^2}$$

이 식을 풀면, 반지름 r 은

$$r_n = n^2 \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{me^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (29.8)$$

이다. 여기서 반지름 r 이 정수 n 에 따라 변하므로 반지름 r 에 정수 n 을 첨사하였다.

식 (29.8) 오른쪽 항에는 n^2 이외 모두가 물리 상수이다. 이러한 상수를 한데 묶어서 **보어 반지름**(Bohr radius) a_B 라 하며 다음과 같다.

$$a_B = \text{보어 반지름} = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{me^2} = 5.29 \times 10^{-11} \text{ m} = 0.0529 \text{ nm}$$

이러한 정의를 이용하면 전자 궤도의 반지름 식은 다음과 같다.

$$r_n = n^2 a_B \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (29.9)$$

허용된 보어의 수소 원자의 반지름



예로써, $r_1 = 0.053 \text{ nm}$, $r_2 = 0.212 \text{ nm}$, $r_3 = 0.476 \text{ nm}$ 이다.

결국 정상 상태를 발견하였다! 다시 말하면, 전자 궤도의 반지름이 식 (29.9)로 된 값 중 하나인 경우만 수소 원자가 존재한다. $r = 0.100 \text{ nm}$ 와 같은 반지름의 중간값은 존재하지 않는다. 이유는 그 원주를 돌고 있는 정상파를 전자가 만들 수 없기 때문이다. 가능한 궤도는 양자화되고, 정수 n 이 양자수이다.

수소 원자 에너지 준위

수소 원자의 에너지는 전자와 양성자의 운동 에너지와 위치 에너지의 합이다.

$$E = K + U = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{\text{elec}}q_{\text{proton}}}{r} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (29.10)$$

여기서 $q_{\text{elec}} = -e$ 와 $q_{\text{proton}} = +e$ 를 사용하였다.

이제 우리는 정상 상태의 에너지를 찾을 수 있다. 가능한 반지름을 안다면, 식 (29.7)에서부터 가능한 전자 속력은 다음과 같다.

$$v_n = \frac{n\hbar}{mr_n} = \frac{1}{n} \frac{\hbar}{ma_B} = \frac{v_1}{n} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (29.11)$$

여기서 $v_1 = \hbar/ma_B = 2.19 \times 10^6 \text{ m/s}$ 이고, 궤도 $n = 1$ 에서의 전자의 속력이다. 속력은 n 이 증가하면 감소한다.

마지막으로 r 과 v 에 대한 식 (29.9)와 (29.11)을 사용하여 식 (29.10)의 에너지를 결정해보자. 계산은 다소 복잡해도 결과는 다음과 같이 간단하다.

$$E_n = \frac{1}{2}mv_n^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} = -\frac{1}{n^2} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{2a_B} \right) \quad (29.12)$$

이제 다음을 정의하자.

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{2a_B} = 13.60 \text{ eV}$$

그러면 수소 원자의 정상 상태의 에너지 준위를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E_n = -\frac{E_1}{n^2} = -\frac{13.60 \text{ eV}}{n^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (29.13)$$

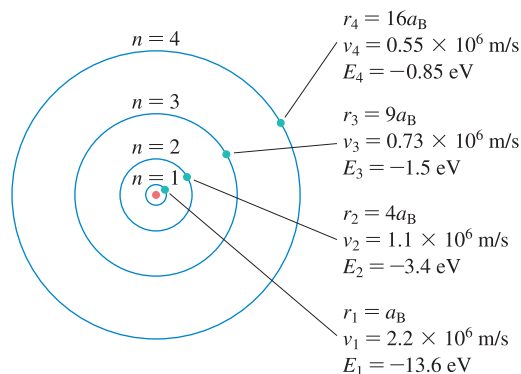
보어의 수소 원자의 허용된 에너지

지금까지 수학적인 계산만 하였다. 그렇게 하여서 무엇을 배웠고, 어디까지 왔는지를 알 필요가 있다. 표 29.2는 양자수 $n=1$ 에서 4까지 r_n , v_n 그리고 E_n 에 대한 값이다. 수소 원자의 정상 상태를 발견한 것이다. 각 상태는 양자수 n 으로 표현된 반지름, 속력, 그리고 에너지를 갖는다. **그림 29.15**에서는 궤도들을 상대적 규모로 아주 생생하게 보여준다. n 이 증가함에 따라 원자의 반지름은 급속하게 증가하고, 전자의 속력은 감소한다.

그림 29.15 보어의 수소 원자에 대한 첫 4 정상 상태 혹은 허용된 궤도

표 29.2 보어의 수소 원자에서 첫 4 상태에 대한 반지름, 속력, 에너지

n	$r_n(\text{nm})$	$v_n(\text{m/s})$	$E_n(\text{eV})$
1	0.053	2.19×10^6	-13.60
2	0.212	1.09×10^6	-3.40
3	0.476	0.73×10^6	-1.51
4	0.847	0.55×10^6	-0.85



예제 29.4 수소 원자의 가능한 전자 속력

수소 원자 속의 전자가 속력 $3.60 \times 10^5 \text{ m/s}$ 를 가질 수 있는가? 가질 수 있다면 에너지와 궤도의 반지름은 얼마인가? 속력 $3.65 \times 10^5 \text{ m/s}$ 인 경우는 어떠한가?

준비 정상 상태에 있기 위하여 전자의 속력은 $v_n = v_1/n$ 이어야 한다. 여기서 $n = v_1/v$ 는 정수이다. v_1/v 가 정수일 때만 v 는 전자의 허용된 속력이다.

풀이 속력 $3.60 \times 10^5 \text{ m/s}$ 일 때 양자수

$$n = \frac{v_1}{v} = \frac{2.19 \times 10^6 \text{ m/s}}{3.60 \times 10^5 \text{ m/s}} = 6.08$$

이 필요하다. 이것은 정수가 아니다. 따라서 전자는 이러한 속력

을 갖지 못한다. 그러나 $v = 3.65 \times 10^5 \text{ m/s}$ 라면

$$n = \frac{2.19 \times 10^6 \text{ m/s}}{3.65 \times 10^5 \text{ m/s}} = 6$$

이 된다. 이 속력이 $n=6$ 으로 들뜬 상태의 전자의 속력이다. 이 상태에서 전자의 에너지는

$$E_6 = -\frac{13.60 \text{ eV}}{6^2} = -0.378 \text{ eV}$$

이고, 궤도 반지름은

$$r_6 = 6^2 a_B = 6^2 (0.0529 \text{ nm}) = 1.90 \text{ nm}$$

이다.

정상 상태 에너지가 왜 음인지를 이해하는 것이 중요하다. 원자에 속박되어 있는 전자와 양성자는 이들을 개개로 분리해낼 때 드는 에너지보다 작은 에너지를 갖는다. 이는 전자와 양성자를 뜯어내기 위하여 추가적으로 일을 해주어야 하기 때문이다.

전자와 양성자가 완전히 분리되고($r \rightarrow \infty$) 정지($v=0$)할 때, 위치 에너지 $U = q_1 q_2 / 4\pi\epsilon_0 r$ 과 운동 에너지 $K = mv^2/2$ 는 0이다. 궤도를 돌고 있는 전자의 운동 에너지는 증가한다. 전자가 수소 원자를 형성하기 위하여 양성자에 가까이 가면 갈수록 위치 에너지는 감소하며 음이 되고, 식 (29.12)를 보면 운동 에너지가 증가하는 것보다 위치 에너지가 더 빨리 감소한다. 원자를 전체적으로 보면 원자의 에너지는 음이다.

각운동량의 양자화

원운동을 하는 입자의 각운동량은 행성이거나 전자인 경우에

$$L = mvr$$

이다. 중심을 향하는 힘은 입자에 돌림힘을 작용하지 않기 때문에 궤도 운동에서 각운동량은 보존된다는 것을 기억해라. 보어는 수소 원자 분석에서 에너지 보존을 사용하였다. 그러나 각운동량 보존은 어떤 역할을 할 것인가?

전자에 대한 드브로이 파가 원주 주위에 정상파를 만들 조건이 식 (29.5)처럼 다음과 같이 주어졌다.

$$2\pi r = n\lambda = n \frac{h}{mv}$$

위 식을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar \quad (29.14)$$

여기서 mvr 은 궤도 운동하는 입자의 각운동량 L 이다. 궤도 운동하는 전자의 각운동은 어떤 정확한 값을 가질 수 없는 것처럼 보인다. 대신 다음 식을 만족해야 한다.

$$L = n\hbar \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (29.15)$$

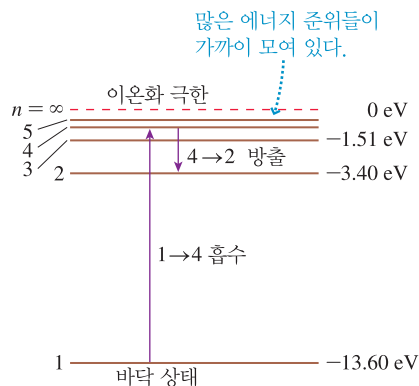
그래서 각운동량도 양자화되었다! 원자의 각운동량은 플랑크 상수 \hbar 의 정수배이어야 한다.

보어는 수소 원자의 각 운동량이 양자화된 것을 정확하게 보여주었다. 그러나 밝혀진 바와 같이, 보어 수소 원자의 각 운동량 식 (29.15)의 정확한 값은 부정확하다. 29.5절에서 주어진 수소 원자의 완전한 양자-기계적 처리가 정확한 값을 산출한다. 하지만 보어의 분석은 수소 원자의 에너지에 대한 정확한 값을 제공한다.

수소 스펙트럼

수소 원자에 대한 가장 중요한 실험적인 증거는 스펙트럼이다. 따라서 보어의 수소 원자에 대한 검증은 스펙트럼을 정확하게 예언할 수 있느냐 하는 것이다. **그림 29.16**

그림 29.16 수소 원자의 에너지 준위 도형



은 수소 원자의 에너지 준위 도형이다. ◀28.6절에서 지적했듯이 에너지는 사다리 계단과 유사하다. 가장 낮은 계단은 $E_1 = -13.60 \text{ eV}$ 인 바닥 상태이다. $E = 0 \text{ eV}$ 인 가장 높은 계단은 $n \rightarrow \infty$ 극한인 수소 원자에 해당한다. 가장 높은 계단을 **이온화 극한** (ionization limit)이라 한다. 원칙적으로 무한한 계단이 있지만 아래의 몇 계단만 그림에 보여주었다. n 이 큰 값을 가진 에너지 준위는 $n = \infty$ 로 표시되어 있는 이온화 극한선 아래 모두 모여 있다.

그림에서 $1 \rightarrow 4$ 전이는 광자를 흡수하고, $4 \rightarrow 2$ 전이는 광자를 방출한다. m 과 n 의 두 양자 상태에서 $n > m$ 이고 E_n 이 더 높은 에너지 상태인 경우, $n \rightarrow m$ 전이는 광자를 방출하고 $m \rightarrow n$ 전이는 광자를 흡수한다.

보어의 원자 양자화의 5번째 가설에 따라 $n \rightarrow m$ 전이에서 방출한 광자의 진동수는

$$f_{\text{photon}} = \frac{\Delta E_{\text{atom}}}{h} = \frac{E_n - E_m}{h} \quad (29.16)$$

이다. 에너지 E_n 과 E_m 에 대하여 식 (29.13)을 사용하면 방출된 광자의 진동수는 다음과 같다.

$$f_{\text{photon}} = \frac{1}{h} \left(\frac{-13.60 \text{ eV}}{n^2} - \frac{-13.60 \text{ eV}}{m^2} \right) = \frac{13.60 \text{ eV}}{h} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

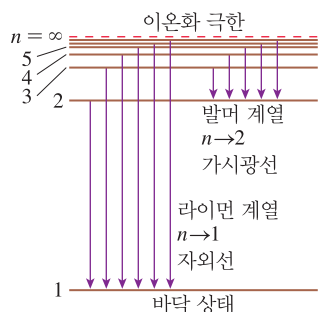
$m < n$ 이기 때문에 $1/m^2 > 1/n^2$ 이고, 따라서 진동수는 양수이다.

진동수보다 실험에서 측정할 수 있는 파장에 보통 관심이 더 많다. $n \rightarrow m$ 양자 뿔에서 방출한 광자의 파장은

$$\lambda_{n \rightarrow m} = \frac{c}{f_{\text{photon}}} = \frac{\lambda_0}{\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)} \quad \begin{matrix} m = 1, 2, 3, \dots \\ n = m + 1, m + 2, \dots \end{matrix} \quad (29.17)$$

이다. 여기서 $\lambda_0 = 91.1 \text{ nm}$ 이다. 이 식은 매우 익숙하다. 바로 식 (29.2)의 발머의 식이다.

그림 29.17 수소 스펙트럼의 라이먼 계열과 발머 계열선을 만드는 전위들



잘 맞지 않는가! 이전의 원자 모형과는 다르게 **보어의 수소 원자 모형은 수소 원자의 불연속 스펙트럼을 정확하게 예측한다.** 그림 29.17은 스펙트럼의 파장을 만드는 2개의 일련의 전이들을 보여준다. $m = 2$ 상태로 끝나는 전이로 이루어진 발머 계열들은 가시 광선의 파장을 준다. 이것은 처음 발머가 분석하였다. $m = 1$ 인 바닥 상태로 끝나는 라이먼 계열들은 스펙트럼의 자외선 영역에 있고, 이것은 한참 후까지 측정되지 못하였다. 이것 및 적외선에 속하는 다른 계열들은 전자의 충돌로 원자가 바닥 상태에서 n 상태로 들뜨게 되는 방전관에서 관측되었다. 이들은 광자를 방출하면서 아래로 붕괴된다. 흡수 스펙트럼에서는 라이먼 계열만 관측되었는데, 그 이유는 기본적으로 활동하지 않는 기체 속의 모든 원자는 바닥 상태에 있기 때문이다.

예제 29.5 은하계의 수소 흡수 파장

천문학자들이 먼 은하계를 볼 때마다 빛의 파장 중 수소의 라이먼 계열 $1 \rightarrow 2$ 전이에 해당하는 파장에서 강력한 흡수가 일어나고 있음을 발견한다. 이러한 흡수는 대폭발(Big Bang)로부터 남겨진 광대한 수소 구름이 별 사이 공간에 짙어 있다는 것을 말해준다. 수소의 $1 \rightarrow 2$ 흡수에 해당하는 파장은 얼마인가?

풀이 식 (29.17)에서 $m = 1$ 이라 두면 수소의 흡수 스펙트럼을 알 수 있다. 천문학자가 본 흡수는 수소의 바닥 상태($m = 1$)에서 첫 들뜬 상태($n = 2$)로의 전이이며 파장은 다음과 같다.

$$\lambda_{1 \rightarrow 2} = \frac{91.1 \text{ nm}}{\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2}\right)} = 122 \text{ nm}$$

검토 파장은 먼 자외선에 해당한다. 지상에서 하는 천문학 연구의 경우 이 스펙트럼을 관측할 수 없는 이유는 대기 중에서 자외선이 강력하게 흡수되어 지면에서 자외선을 관측할 수 없기 때문이다. 그러나 1970년대에 처음 널리 사용되었던 우주 공간에 설치된 망원경으로 천문학자들은 거의 모든 방향에서 122 nm 흡수를 보았다.

29.5 양자역학적인 수소 원자

보어의 수소 원자 분석은 굉장한 성공으로 보였다. 보어는 아인슈타인의 광양자에 대한 생각과 더불어 정상 상태를 소개함으로써 불연속 스펙트럼에 대한 최초의 확실한 이해를 제공하였으며, 특히 수소 스펙트럼의 파장에 대한 발머의 식도 예측해주었다. 러더퍼드의 모형과 달리 보어의 수소는 안정하였다. 정상 상태라는 개념은 분명 무엇인가 근거가 있어 보였다.

그러나 보어는 다른 원자에 대한 스펙트럼을 설명하는 데 실패하였다. 보어의 방법을 사용하여 전자를 2개 가지고 있는 주기율표 두 번째 원소인 헬륨에 대하여 설명하는 것도 어려웠다. 보어는 분명히 올바른 방법으로 나아가고 있지만, 수소 원자에서 더 복잡한 원자로 확장할 수 없었다. 완전하고 정확한 이론이 발견되어야만 했다.

1925년 슈뢰딩거(Erwin Schrödinger)는 이 양자역학의 일반이론, 곧 어떤 계에서 허용된 에너지 준위(즉 정상 상태)를 계산할 수 있는 이론을 소개하였다. 계산은 수소 원자와 같이 단순한 계에서도 수학적으로 어렵다. 따라서 증명 없이 결과만 이용하여 설명하려 한다.

보어의 수소 원자는 양자수 n 으로 묘사된다. 이와 대비하여, 수소 원자에 대한 슈뢰딩거의 양자역학적인 분석은 4개의 양자수로 기술된다.

1. 슈뢰딩거의 발견에 따르면 수소 원자의 에너지는 보어가 발견한 것과 같은 꼴을 한다.

$$E_n = -\frac{13.60 \text{ eV}}{n^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (29.18)$$

정수 n 을 **주양자수**(principal quantum number)라 한다.

2. 전자의 궤도 각운동량 L 은 다음 값을 갖는다.

$$L = \sqrt{l(l+1)} \hbar \quad l = 0, 1, 2, 3, \dots, n-1 \quad (29.19)$$

정수 l 을 **궤도 양자수**(orbital quantum number)라 한다.

3. 전자의 궤도 평면은 기울어질 수 있는데, 그 각도는 불연속적이다. 허용된 각도들은 양자수 m 으로 기술되는데, 이것은 다음 값 중 하나이다.

$$m = -l, -l + 1, \dots, 0, \dots, l - 1, l \quad (29.20)$$

정수 m 을 자기 양자수(magnetic quantum number)라 한다. 이유는 원자가 자기장 속에 있을때 m 이 매우 중요하기 때문이다.

4. 아래에서 언급하겠지만 전자 스핀은 위와 아래의 두 종류를 가지고 있다. 두 방향은 스핀 양자수(spin quantum number) m_s 로 기술하며, 다음 값 중에서 하나를 갖는다.

$$m_s = -\frac{1}{2} \quad \text{혹은} \quad +\frac{1}{2} \quad (29.21)$$

다시 말해서, 수소 원자의 정상 상태들은 각각 4개의 양자수(n, l, m, m_s)를 가지고, 각각의 양자수는 원자의 물리적 특성과 연관되어 있다.

예제 29.6 양자수 목록

에너지 $E = -3.40 \text{ eV}$ 를 갖는 수소 원자의 모든 가능한 상태에 대한 목록을 작성하시오.

풀이 에너지는 주양자수에 관련이 있다. 식 (29.18)로부터 에너지 $E = -3.40 \text{ eV}$ 를 갖는 상태는

$$n = \sqrt{\frac{-13.60 \text{ eV}}{-3.40 \text{ eV}}} = 2$$

라는 주양자수를 갖는다. 주양자수가 $n = 2$ 인 원자는 $l = 0$ 혹은 $l = 1$ 이고, $l \geq 2$ 이상은 없다. $l = 0$ 인 경우, 자기 양자수 m

은 $m = 0$ 이다. $l = 1$ 인 경우, 자기 양자수 m 은 $m = -1, m = 0, m = +1$ 을 갖는다. 각 상태의 스핀 양자수는 $m_s = +\frac{1}{2}$ 혹은 $m_s = -\frac{1}{2}$ 이다. 따라서 가능한 모든 양자수를 정리하면 아래와 같고, 각 상태의 에너지는 모두 같은 에너지를 갖는다.

n	l	m	m_s	n	l	m	m_s
2	0	0	$+\frac{1}{2}$	2	0	0	$-\frac{1}{2}$
2	1	1	$+\frac{1}{2}$	2	1	1	$-\frac{1}{2}$
2	1	0	$+\frac{1}{2}$	2	1	0	$-\frac{1}{2}$
2	1	-1	$+\frac{1}{2}$	2	1	-1	$-\frac{1}{2}$

에너지와 각운동량은 양자화되어 있다

수소는 특별함이 드러났다. 모든 다른 원소의 경우, 허용 에너지는 n 과 l 이 관련이 있고, m 과 m_s 는 관련이 없다. 결과적으로 n 과 l 값으로 정상 상태를 나타내는 것이 유용하다. 양자수 l 의 여러 가지 값은 표 29.3에서와 같은 소문자로 나타낸다. 이러한 기호를 사용하여 수소 원자의 바닥 상태인 $n = 1$ 과 $l = 0$ 은 $1s$ 상태로 표기한다. $3d$ 상태는 $n = 3, l = 2$ 이다.

행은 n , 열은 l 로 표시하는 수소 원자의 에너지 준위 도형이 그림 29.18에 있다. 왼쪽 열은 모든 $l = 0 s$ 상태를 포함하고, 다음 열은 $l = 1 p$ 상태이고, 다음도 마찬가지로이다.

식 (29.19)의 양자 조건은 $n > l$ 을 요구하기 때문에 s 상태는 $n = 1$ 에서 시작하고, p 상태는 $n = 2$ 에서 시작하며, d 상태는 $n = 3$ 에서 시작한다. $n = 1$ 혹은 $n = 2$ 는

표 29.3 양자수 l 을 나타내기 위해 사용되는 기호들

l	기호
0	s
1	p
2	d
3	f

$l=2$ 를 가질 수 없으므로 가장 낮은 d 상태는 $3d$ 이다. 에너지 준위 도형에서 보면 에너지 준위가 l 과 관련이 없는 수소에서 $3s$, $3p$, 그리고 $3d$ 는 모두 같은 에너지를 갖는다. 그림 29.18은 단지 각각의 l 값에 대하여 첫 몇몇의 에너지 준위를 보여주고 있고, $n \rightarrow \infty$ 로 가면서 무한히 많은 에너지 준위가 $E=0$ 아래 함께 모여 있다. $E=0$ 에서 점선은 원자의 이온화 극한인데, 이것은 수소 원자의 전자가 무한대로 멀리 떨어져서 H^+ 이온을 만들게 하는 에너지이다.

고전적으로, 궤도를 돌고 있는 전자의 각운동량 L 은 어떤 값도 가질 수 있다. 그러나 양자역학에서는 그렇지 않다. 식 (29.19)에서 보면, 전자의 궤도 각운동량은 양자화된다. 궤도 각운동량의 크기는 아래의 불연속값 중의 하나이다.

$$L = \sqrt{l(l+1)}\hbar = 0, \sqrt{2}\hbar, \sqrt{6}\hbar, \sqrt{12}\hbar, \dots$$

여기서 l 은 정수이다. 보어의 원자에서도 양자화된 각운동량을 역시 예측하였으나 예측한 값은 정확하지 않았다. L 에 대한 양자역학적인 예측은 더욱 복잡하나, 실험적인 관측과 일치한다.

특히 재미있는 예측은 수소의 바닥 상태 $l=0$ 에서는 각운동량이 없다는 것이다. 각운동량이 없다면, 고전 입자는 궤도를 돌지 않는다. 그러나 양자역학적 입자는 그럴 필요가 없다.

전자 스핀

◀24.8절에서 전자는 고유의 자기 쌍극자 모멘트를 만드는데, 북극과 남극을 가진 작은 막대 자석의 역할을 한다고 배웠다. 자기 모멘트와 관련하여, 전자는 또한 전자스핀(electron spin)이라고 불리는 고유의 각운동량을 가지고 있다. 양자역학의 초창기에, 전자는 자신의 회전축으로 자전하는 아주 작은 음전하의 공으로 생각하였다. 이렇게 생각하면 전자는 자기 쌍극자 모멘트와 스핀 각운동량을 가질 수 있다. 그러나 회전하는 공은 상대성이론과 다른 물리적 법칙을 어길 수 있다. 오늘날 우리가 알고 있는 한, 전자는 참으로 고유의 자기 쌍극자 모멘트와 각운동량을 가지고 있는 점 입자이다.

가능한 스핀 양자수가 $m_s = \pm \frac{1}{2}$ 이라는 것은 전자 고유의 자기 쌍극자가 $+z$ 방향과 $-z$ 방향을 향한다는 것을 의미한다. 이러한 두 스핀의 방향을 스핀 위(spin up)와 스핀 아래(spin down)라 한다. 또한 스핀 위를 \uparrow 로 표시하고, 스핀 아래를 \downarrow 로 표시한다. 다음 절에서 이러한 표기법을 사용할 것이다.

그림 29.18 수소 원자의 에너지 준위 도형

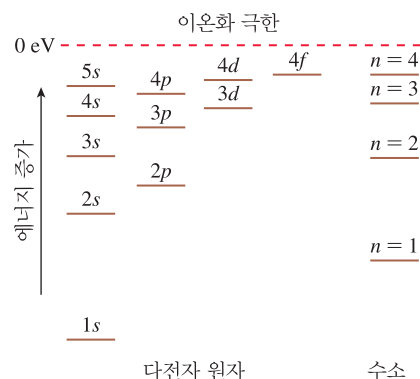
	l	0	1	2	3
	기호	s	p	d	f
		이온화 극한			
n	$E = 0 \text{ eV}$	$4s$	$4p$	$4d$	$4f$
4	-0.85 eV	$3s$	$3p$	$3d$	
3	-1.51 eV				
2	-3.40 eV	$2s$	$2p$		
1	-13.60 eV	$1s$			

바닥 상태

29.6 다전자 원자

수소 원자의 양자역학적 풀이는 실험적 근거와 일치한다. 보어의 수소 원자도 그렇다. 슈뢰딩거의 양자역학은 Z 개의 전자가 Z 개의 양성자로 이루어진 핵 주위를 도는

그림 29.19 다전자 원자의 전자에 대한 에너지 준위 도형



원자, 즉 다전자 원자(multielectron atom)의 정상 상태와 에너지 준위를 계산할 수 있다는 것이다. 다전자 원자는 단순히 1개의 전자를 가진 수소에 비해 전자의 에너지 준위가 양자수 n 과 l 로 이루어져 있다는 것이 다르다. 곧 수소의 $2s$ 와 $2p$ 상태는 같은 에너지를 가지고 있지만, 다전자 원자는 이 둘의 에너지가 다르다는 것이다. 이 차이는 단일전자 수소 원자에서는 존재하지 않는 전자-전자 상호작용에 기인한다.

그림 29.19는 다전자 원자의 전자에 대한 에너지 준위 도형이다(이것을 그림 29.18의 수소 원자의 에너지 준위와 비교하여 보아라). 비교를 위해, 수소 원자의 에너지는 그림의 오른쪽 가장자리에 나타내었다. 특히 이 도형의 두 가지 특징은 다음과 같다.

1. 각각의 n 에 대하여, l 이 증가함에 따라 에너지는 증가하는데, l 이 최대가 되면 에너지는 수소의 경우에 해당되는 n 상태의 에너지에 근접한다. l 값이 작은 경우는 수소의 해당되는 상태보다 에너지가 작다.
2. 에너지가 증가함에 따라 다른 n 의 상태는 에너지가 교대한다. 예를 들면, $3s$ 와 $3p$ 상태는 $4s$ 상태보다 낮은 에너지를 가지나, $3d$ 상태의 전자 에너지는 이보다 약간 높다. 이러한 내용은 원소 주기율표의 중요한 의미를 포함하고 있다.

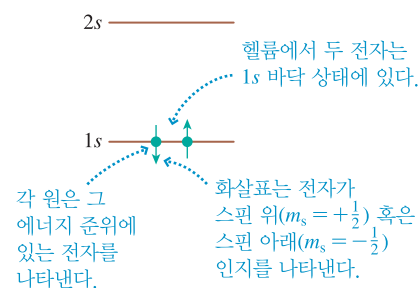
파울리 배타 원리

양자계의 바닥 상태는 정의상 가장 낮은 에너지 상태이다. Z 전자들과 Z 양성자들로 이루어진 원자의 바닥 상태는 무엇인가? $1s$ 상태가 가장 낮은 에너지를 갖기 때문에, 바닥 상태는 모든 Z 전자들이 $1s$ 상태에 있는 것처럼 생각된다. 그러나 이러한 생각은 실험적 증거와 일치하지 않는다.

1925년 오스트리아 물리학자 파울리(Wolfgang Pauli)는 양자계에서 2개의 전자는 같은 양자 상태로 있을 수 없다는 가설을 세웠다. 다시 말하면 **2개의 전자는 같은 양자수(n, l, m, m_s)를 가질 수 없다**. 만일 전자가 어떤 상태에 있다면, 이 전자는 다른 모든 전자를 그 상태에서부터 밀어낸다. 이것을 **파울리의 배타 원리(exclusion principle)**라 한다. 이것은 물질 특성에 관한 심오한 진술임이 밝혀진다.

배타 원리는 전자가 하나 있는 수소에는 적용되지 않는다. 그러나 $Z=2$ 전자를 가진 헬륨의 경우, 두 전자는 다른 양자 상태에 있어야 한다. 이것은 어렵지 않다. $1s$ 상태는 $l=0$ 이고, 가능한 자기 양자수는 $m=0$ 이다. 그러나 m_s 는 $-\frac{1}{2}$ 과 $+\frac{1}{2}$ 인 두 상태가 있다. 만일 첫 번째 전자가 스핀 아래 $1s(1, 0, 0, -\frac{1}{2})$ 상태에 있다면, 두 번째 $1s$ 상태의 전자는 스핀 위 $(1, 0, 0, +\frac{1}{2})$ 에 있게 된다. 이러한 내용을 도식적으로 **그림 29.20**에 나타냈는데, ‘에너지 사다리’의 계단의 진한 점은 전자를 나타내고, 화살표는 스핀 아래와 스핀 위를 나타낸다.

그림 29.20 헬륨의 바닥 상태



헬륨 전자의 m_s 가 서로 다른 부호를 갖는다면, 파울리의 배타 원리는 이 두 전자가 같은 $1s$ 상태에 있는 것을 막지 않는다. 따라서 이것이 바닥 상태라는 예측이 가능하다. 원자가 차지한 에너지 준위 도형을 **전자 배열(electron configuration)**이라 한다. 헬륨의 바닥 상태의 전자 배열은 $1s^2$ 이다. 위의 첨자는 $1s$ 에너지 준위에 2개의 전자

가 있다는 것을 나타낸다.

상태 $(1, 0, 0, -\frac{1}{2})$ 과 $(1, 0, 0, +\frac{1}{2})$ 은 $n=1$ 인 두 상태이다. 헬륨의 바닥 상태는 이러한 상태에 각각 전자가 하나씩 있다. $n=1$ 의 가능한 모든 상태가 채워져 있다. 결론적으로 전자 배열 $1s^2$ 는 **빡찬 껍질**(closed shell)이라 한다.

다음 원소는 $Z=3$ 개의 전자를 가진 리튬이다. 처음 2개 전자는 m_s 가 반대부호를 가지고 있는 $1s$ 상태에 있다. 제3의 전자는 어떻게 될까? $1s^2$ 껍질은 닫혀 있다. $n=1$ 인 양자 상태는 더 이상 없다. 제3의 전자가 선택할 수 있는 상태는 다음 에너지 상태인 $n=2$ 이다. 그림 29.19에서 보면, 같은 n 에서 낮은 l 상태는 높은 l 상태보다 낮은 에너지를 갖는다. 리튬의 $2s$ 상태는 $2p$ 상태보다 에너지가 낮다. 따라서 리튬의 제3의 전자의 바닥 상태는 $2s$ 가 될 것이다. **그림 29.21**에서는 스핀 위인 $2s$ 전자의 전자 배열을 보여주고 있다. 그러나 똑같이 스핀 아래도 될 수 있을 것이다. 리튬의 바닥 상태 전자 배열은 $1s^2 2s$ 이다. 이러한 전자 배열은 $1s$ 에 전자 2개, $2s$ 에 전자 1개를 가지고 있다.

원소의 주기율표

19세기는 화학자들이 새로운 원소를 발견하여 원소의 화학적 특성을 연구하는 시대였다. 이 세기는 근거가 아직 불확실한 원자 모형과 원소가 얼마나 많은지에 대해서 아무런 확신이 없는 상태에서 열렸다. 그러나 화학은 재빨리 성장하였고, 그렇게 하여 세기의 중엽에는 수백 종까지는 아니지만 수십 종의 원소가 있는 것이 확실해졌다.

러시아 화학자 멘델레예프(Dmitri Mendeléeve)는 화학적인 특성이 규칙적으로 반복되는 특성에 기초한 원소의 주기적인 배열을 1867년에 제안하였다. 그는 분명하게 ‘간격’을 지적하면서 가설에 따라 아직 발견되지 않는 원소가 존재한다는 것을 제안하였다. 빠진 원소의 예측된 특성도 예언하였다. 이어지는 원소의 발견으로 멘델레예프의 체계화에 확신을 주었는데, 이것이 바로 원소의 주기율표로 알려지게 된다.

다전자 원자에 대한 양자역학적인 이론의 위대한 업적 중 하나는 주기율표의 구조를 설명할 수 있다는 것이다. 그림 29.19의 에너지 준위 도형의 확장된 버전인 **그림 29.22**의 에너지 준위 도형을 보면 이러한 구조를 이해할 수 있다. 헬륨과 리튬처럼, 큰 Z 값을 가진 원자는 파울리의 배타 원리와 상충되지 않는 범위에서 가장 낮은 에너지 준위에 Z 개의 전자를 놓아둡으로써 구성할 수 있다.

헬륨과 리튬의 s 상태는 각각 스핀 위와 스핀 아래라는 2개의 전자를 갖는다. 그러나 Z 가 더 큰 원자에 채워질 큰 각운동량 상태에는 2개보다 많은 전자가 들어갈 수 있다. 궤도 양자수 l 값에 대하여 자기 양자수 m 은 $2l+1$ 개 가능한 값을 갖는다. 이들 값의 각각에 대하여 스핀 양자수 m_s 값은 2개가 가능하다. 그림 29.22의 각각의 에너지 준위에는 부속껍질(subshell)이라 하는 $2(2l+1)$ 개의 다른 상태가 있다. 표 29.4는 각 부속껍질 안의 상태 수를 보여준다. 부속껍질의 각 상태는 그림 29.22에서 색

그림 29.21 리튬의 바닥 상태

$1s$ 상태는 2개의 전자만 저장할 수 있으므로 리튬의 세 번째 전자는 $2s$ 상태에 있어야 한다.

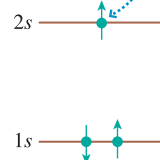


그림 29.22 얼마나 많은 전자가 각 부속껍질을 차지하는지를 보여주는 에너지 준위 도형

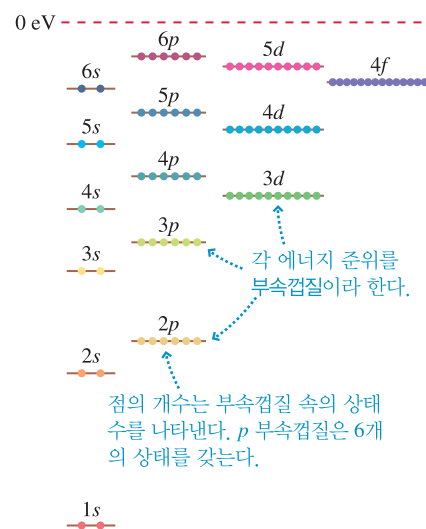


표 29.4 원자의 각 부속껍질의 상태 수

부속껍질	l	상태 수
s	0	2
p	1	6
d	2	10
f	3	14

그림 29.23 원소의 주기율표. 원소는 그림 29.22의 에너지 준위 도형의 상태에 따라 색깔로 코드화되어 있다.

1 1s H																	2 1s He
3 2s Li	4 2s Be											5 B	6 C	7 N 2p N	8 O 2p O	9 F	10 Ne
11 3s Na	12 3s Mg	전이원소										13 Al	14 Si	15 P 3p P	16 S 3p S	17 Cl	18 Ar
19 4s K	20 4s Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn 3d Mn	26 Fe 3d Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As 4p As	34 Se 4p Se	35 Br	36 Kr
37 5s Rb	38 5s Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc 4d Tc	44 Ru 4d Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb 5p Sb	52 Te 5p Te	53 I	54 Xe
55 6s Cs	56 6s Ba	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re 5d Re	76 Os 5d Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi 6p Bi	84 Po 6p Po	85 At	86 Rn
87 7s Fr	88 7s Ra	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh 6d Bh	108 Hs 6d Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn						
란탄족		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu 4f Eu	64 Gd 4f Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
악티늄족		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am 5f Am	96 Cm 5f Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		
내부 전이원소																	

깔 있는 점으로 나타났다. 색깔 있는 점들은 그림 29.23의 주기율표에 해당되는데, Z 가 증가함에 따라 부속껍질에 채워지는 것을 보여주기 위해 색깔로 코드화되어 있다.

그림 29.23의 주기율표를 만들기 위하여 그림 29.22를 사용할 수 있다. 리튬은 $1s$ 상태에 2개의 전자를 가지며 $2s$ 상태에 1개의 전자를 가진다는 것을 알고 있다. 전자가 4개인 베릴륨($Z=4$)이 다음에 온다. 4번째 전자가 차지할 $2s$ 부속껍질 안에는 빈 상태가 여전히 있다. 따라서 베릴륨의 $2s$ 부속껍질은 닫히고, 전자 배열은 $1s^2 2s^2$ 이다.

Z 가 증가함에 따라 다음 6개의 전자는 $2p$ 부속껍질을 차지한다. 붕소에서 네온까지 원소가 주기율표 2번째 행에 배치된다. 네온은 $2p$ 부속껍질을 완전히 채우며, 바닥 상태의 배치는 $1s^2 2s^2 2p^6$ 이다.

$3s$ 부속껍질이 채워지면 나트륨과 마그네슘이 된다. $3p$ 부속껍질을 채우면 주기율표의 3행에 있는 알루미늄에서 아르곤이 된다.

주기율표 4행은 복잡해지기 시작한다. 아르곤의 $3p$ 부속껍질이 채워지면 칼륨으로 시작하여 $3d$ 부속껍질이 채워지기 시작할 것이라고 예상할 수 있다. 그러나 그림 29.22의 에너지 준위 도형을 보면 $3d$ 상태가 $4s$ 상태보다 약간 더 높은 것을 알 수 있다. 바닥 상태가 파울리의 배제 원칙과 일치하는 가장 낮은 에너지 상태이므로 칼륨은 $3d$ 상태를 채우는 것보다 $4s$ 상태를 채우는 것이 더 유리하다고 생각한다. 칼슘에서 $4s$ 상태가 채워진 후 스칸듐(Sc)에서 아연(Zn)까지 10가지 전환 요소가 $3d$ 부속껍질의 10개 상태를 채운다.

같은 형태를 5행에 적용하면, 전자는 $5s$, $4d$, $5p$ 부속껍질을 차례로 채운다. 6행의

경우, 첫 번 $6s$ 상태를 채운 후 $4f$ 부속껍질이 에너지가 가장 낮아서 $5d$ 상태 전에 $4f$ 부속껍질이 채워지기 시작한다. $4f$ 부속껍질에 해당하는 원소, 즉 란타넘에서 이터븀은 란탄족 원소로 알려져 있다. 이들은 전통적으로 주기율표의 나머지에서부터 분리된 행에 그려 넣는다. 7행도 똑같은 형태를 따른다.

그러므로 완전한 주기율표는 다전자 원자의 에너지 준위 도형에 파울리의 배타 원리를 적용함으로써 만들 수 있다.

예제 29.7 비소의 바닥 상태

비소의 바닥 상태의 전자 배열을 예측하시오.

풀이 주기율표에서 비소(As)는 $Z=33$ 이므로 33개의 전자가 있다. 비소는 4행에 있으며, 전이원소 첫 번째 그룹이다. 아르곤($Z=18$)은 $3p$ 부속껍질을 채웠다. 갈륨($Z=20$)은 $4s$ 부속껍질을 채운다. 아연($Z=30$), 즉 다음 10개 원소는 $3d$ 부속껍질을 채웠다. $4p$ 부속껍질은 갈륨($Z=31$)으로 채우기 시작한다. 비소는 이 그룹의 세 번째 원소이다. 그래서 비소는 3개의 $4p$ 전자를 가지게 될 것이다. 비소의 바닥 상태 배치는

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^3$$

이 된다.

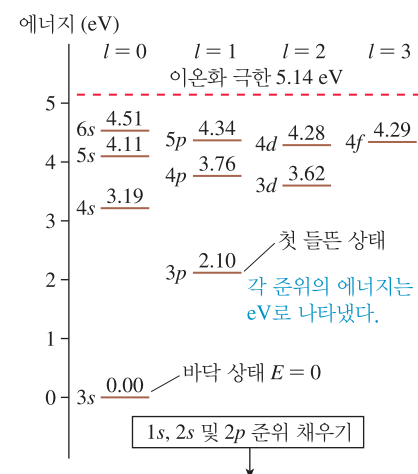
29.7 들뜬 상태와 스펙트럼

주기율표는 원소의 바닥 상태에 대한 정보를 체계화한다. 이러한 바닥 상태는 화학적으로 대단히 중요한데, 왜냐하면 대부분의 원자는 바닥 상태에 있기 때문이다. 원자가(valence), 결합, 활성화 등의 모든 화학적인 생각은 이러한 바닥 상태의 원자 구조의 결과이다. 주기율표는 원자의 들뜬 상태에 대해서는 아무것도 이야기하지 않는다. 원자의 스펙트럼을 이해하는 열쇠는 바로 들뜬 상태로, 다음 주제는 스펙트럼이다.

들뜬 상태를 설명하기 위해 다전자 원자인 나트륨($Z=11$)을 사용한다. 나트륨의 바닥 상태의 전자 배열은 $1s^2 2s^2 2p^6 3s$ 이다. 첫 번째 10개의 전자는 $1s$, $2s$, $2p$ 부속껍질을 완전히 채운다. 전자들은 서로 단단하게 묶여 네온 핵을 만든다. $3s$ 전자는 좀 더 높은 에너지 준위로 쉽게 들뜨게 될 수 있는 원자가전자(valence electron)이다. 만약 이 전자가 $3p$ 상태로 들뜨면, 전자 구성을 $1s^2 2s^2 2p^6 3p$ 로 쓴다.

나트륨의 들뜬 상태는 원자가전자를 더 높은 에너지 준위로 올라가게 하여서 만들어진다. 네온 핵 속에 있는 전자들은 변함이 없다. **그림 29.24**는 나트륨의 바닥 상태와 몇 개의 들뜬 상태를 보여주는 에너지 준위 도형이다. 네온 핵의 $1s$, $2s$, $2p$ 상태는 도형에서 보이지 않는다. 이 상태는 꼭 차 있어서 변함이 없다. 따라서 원자가 전자에게 유용한 상태만 보여준다. 바닥 상태의 에너지를 0으로 하였음을 주목해라. 이전에 우리가 발견했듯이 0 에너지는 가장 편리한 곳에 놓을 수 있다. 이렇게 하면 들뜬 상태의 에너지는 그 상태의 에너지가 바닥 상태보다 얼마나 높은지 말해준다. 이온화 극

그림 29.24 나트륨 원자의 $3s$ 바닥 상태와 몇 개의 들뜬 상태



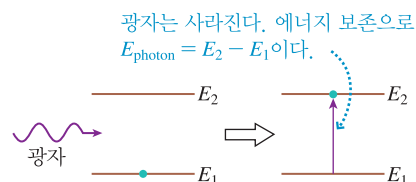
한은 원자의 이온화 에너지 값에서 일어나는데, 나트륨은 5.14 eV이다.

흡수에 의한 들뜸

그대로 두면 원자는 가장 낮은 에너지 바닥 상태에 있을 것이다. 원자는 어떻게 들뜬 상태가 되는가? 들뜬 상태로 되는 과정을 **들뜸(excitation)**이라 한다. 여기에는 두 가지의 기본적인 열개, 즉 흡수와 충돌이 있는데 우선 흡수에 의한 들뜸을 생각해보자.

기본적인 보어의 모형의 가정 중 하나는 원자가 에너지 E_1 인 한 정상 상태에서 진동수 $f_{\text{photon}} = \Delta E_{\text{atom}}/h$ 인 광자를 흡수하여 좀 더 높은 에너지 상태 E_2 로 뛸 수 있다는 것이다. 이러한 과정은 **그림 29.25**에서 보여준다. 스펙트럼에 관심을 가지고 있기 때문에 파장으로 이것을 아래와 같이 다시 쓰면 편리하다.

그림 29.25 광자 흡수에 의한 들뜸



$$\lambda = \frac{c}{f_{\text{photon}}} = \frac{hc}{\Delta E_{\text{atom}}} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{\Delta E_{\text{atom}}} \quad (29.22)$$

만일 ΔE_{atom} 가 전자볼트 단위라면 $hc = 1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}$ 를 사용한 마지막 식으로부터 파장을 구할 수 있는데, 단위는 나노미터이다.

식 (29.22)에 의한 모든 양자 뿔은 실제로 원자에서 일어나지 않는다. 원자 속의 전자들이 광파와 어떻게 상호작용하고 있는지에 대한 양자역학적인 분석은 전이가 다음의 **선택 규칙(selection rule)**을 만족하지 않으면 안 된다. 궤도 양자수 l 을 가진 상태에서 전이(흡수 혹은 방출)는 궤도 양자수가 원래의 상태에서 ± 1 만큼 차이 나는 상태로만 가능하다.

$$\Delta l = l_2 - l_1 = \pm 1 \quad (29.23)$$

방출과 흡수에 관한 선택 규칙

예제 29.8 나트륨에서 흡수 분석하기

나트륨의 흡수 스펙트럼에서 가장 긴 파장 2개는 무엇인가? 이들은 어떤 전이들인가?

준비 흡수 전이는 항상 바닥 상태에서 시작한다. ± 1 만큼 변경되는 전환만 허용된다.

풀이 그림 29.24에서 보인 것과 같이 나트륨의 바닥 상태는 $3s$ 이다. s 상태($l=0$)에서 시작하여 선택 규칙은 단지 p 상태($l=1$)로 이동한 것만 허락한다. 가장 낮은 들뜬 상태는 $3p$ 상태이다. $3s \rightarrow 3p$ 는 허용된 전이이다($\Delta l = 1$). 따라서 이것이 가장 긴 파장이다. 그림 29.24로부터 이 전이에 대해서는 $\Delta E_{\text{atom}} = 2.10 \text{ eV} - 0.00 \text{ eV} = 2.10 \text{ eV}$ 이다. 해당 파장은 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{2.10 \text{ eV}} = 590 \text{ nm}$$

(반올림 때문에 위의 계산은 $\lambda = 590 \text{ nm}$ 를 사용하였다. 실험적 값은 실제로 589 nm이다.)

다음 들뜬 상태는 $4s$ 이다. 그러나 $3s \rightarrow 4s$ 로 전이는 선택 규칙에 의하여 허용되지 않는다. 다음 허용된 전이는 $3s \rightarrow 4p$ 이고, $\Delta E_{\text{atom}} = 3.76 \text{ eV}$ 이다. 이 전이의 파장은 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{3.76 \text{ eV}} = 330 \text{ nm}$$

검토 그림 29.3(b)에서 앞서 보인 바와 같이 나트륨 스펙트럼을 본다면 589 nm와 330 nm가 흡수 스펙트럼에서 가장 긴 파장들이다.

충돌에 의한 들뜸

1.0×10^6 m/s의 속도로 달리는 전자는 2.85 eV의 운동 에너지를 갖는다. 이 전자가 바닥 상태 나트륨 원자와 충돌하면 에너지 일부는 원자를 들뜨게 하여 더 높은 에너지 상태로 이동하게 한다. 이 상태가 $3p$ 상태이다. 이 과정을 원자의 **충돌 들뜸** (collisional excitation)이라 한다.

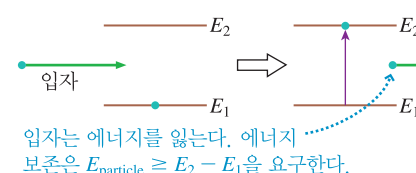
충돌 들뜸은 근본적으로 흡수 들뜸과는 다르다. 흡수에서는 광자가 사라진다. 결과적으로 모든 광자 에너지는 원자로 이동된다. 에너지 보존 법칙은 $E_{\text{photon}} = \Delta E_{\text{atom}}$ 를 요구한다. 이와 대비하여, 전자는 충돌 들뜸 후 여전히 남아 있고, 또한 약간의 운동 에너지를 가질 수 있다. 즉, 전자는 모든 에너지를 원자에 주지 않는다. 전자가 2.85 eV라는 입사 운동 에너지를 가지면 2.10 eV가 나트륨 원자로 이동되어 이 원자를 $3p$ 상태로 들뜨게 하고, 속력 5.1×10^5 m/s와 운동 에너지 0.75 eV를 가지고 충돌에서 떠나간다.

원자를 들뜨게 하기 위하여 입사하는 전자(혹은 다른 물질 입자)의 에너지는 ΔE_{atom} 를 초과해야 한다. 즉, $E_{\text{particle}} \geq \Delta E_{\text{atom}}$ 이다. 원자를 들뜨게 하는 데는 문턱 에너지가 있다. 그러나 에너지의 상한은 없다. 이 모든 것이 에너지 보존과 관계 있다.

그림 29.26은 이러한 생각을 도형으로 보여준다.

전자에 의한 충돌 들뜸은 형광등, 가로등, 네온사인과의 전기 방전에서 주요하게 사용되는 들뜸 방법이다. 가스는 전등 속에서 압력(≈ 1 mmHg)으로 밀봉된다. 관 끝에 있는 전극 사이에 걸린 꽤 높은 고전압(≈ 1000 V)이 가스를 이온화시키고, 이온과 전자는 전류를 만든다. 전자는 전기장 속에서 가속되어 수 eV의 운동 에너지를 얻고, 이 에너지의 약간이 충돌에 의해 가스 원자로 이동된다.

그림 29.26 전자 충돌에 의한 들뜸



개념형 예제 29.9 수소의 들뜸이 가능한가?

11.4 eV 운동 에너지를 가진 전자는 수소 원자와 충돌하여 수소 원자가 발머 계열의 현저한 빨간색 선($\lambda = 656$ nm, $E_{\text{photon}} = 1.89$ eV)을 방출하게 할 수 있을까?

이유 전자는 전이의 위 상태로 들뜨게 할 수 있는 충분한 에너지를 가져야 한다. 운동 에너지가 11.4 eV인 전자의 에너지는 656 nm 파장을 가진 광자 에너지 1.89 eV보다 충분히 크다. 그러나 들뜸의 에너지와 광자의 에너지를 혼동하면 안 된다. 발머 계열에서 빨간색 스펙트럼선은 $\Delta E_{\text{atom}} = 1.89$ eV인 $n = 3 \rightarrow 2$ 양자 펄에서 방광된다. 이러한 방출을 일으키기 위하여 전자는 바닥 상태

로부터 원자를 들뜨운다($n = 1$ 에서 $n = 3$ 준위까지). 그림 29.16으로부터 필요한 들뜸 에너지는

$$\Delta E_{\text{atom}} = E_3 - E_1 = (-1.51 \text{ eV}) - (-13.60 \text{ eV}) = 12.09 \text{ eV}$$

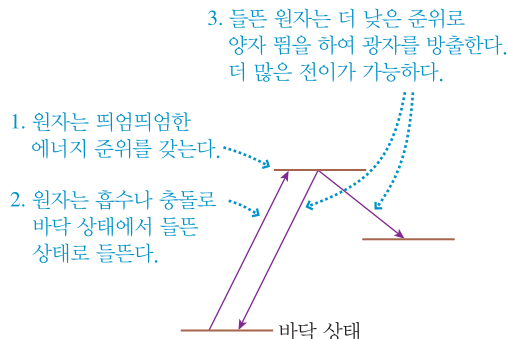
이다. 전자는 원자를 방출이 일어날 수 있는 상태까지 들뜨울 수 있는 충분한 에너지를 가지고 있지 않다.

검토 흡수 스펙트럼에 관한 논의에서 보여준 것과 같이, 모든 원자의 들뜸은 바닥 상태에서 시작한다. 양자 펄은 선택 규칙에 의하여 허용된 두 상태에서 시작하고 끝날 수 있다.

방출 스펙트럼

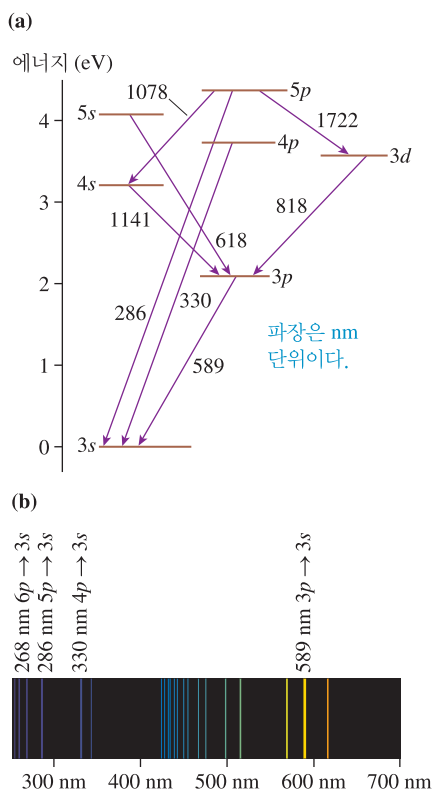
빛의 흡수는 중요한 과정이다. 그러나 관심을 끄는 것은 빛의 방출이다. 방출을 이해하는 것은 **그림 29.27**에 보여준 세 가지의 생각에 달려 있다. 양자역학으로부터 원자

그림 29.27 방출 스펙트럼 발생



의 에너지 준위를 결정하면 방출 스펙트럼은 이를 사용하여 즉시 예측할 수 있다. 낮은 에너지 상태로 양자 뿔을 하고 광자를 방출하기 전에, 원자가 얼마나 오래 들뜬 상태에 남아 있을 수 있는가 질문할 수 있다. 전자가 정확히 어디에 위치해 있는가 하는 것은 불확정성 원리에 의해 알 수 없는 것과 마찬가지로, 어떤 특별한 원자가 얼마나 오래 들뜬 상태를 유지하는지는 알 수 없다. 그러나 광자를 방출하기 전 원자가 들뜬 상태에서 보내는 평균시간을 결정할 수 있으며, 그 상태의 수명(lifetime)이라 한다. 들뜬 상태의 전형적인 수명은 수 나노초이다.

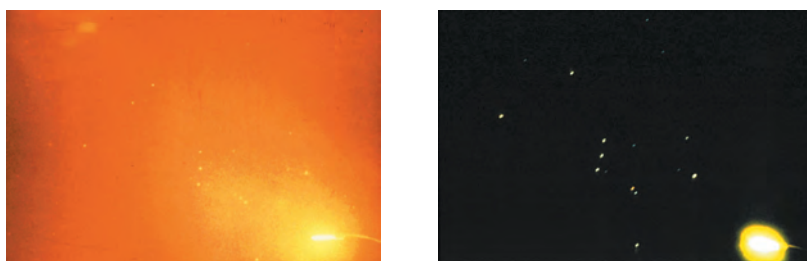
그림 29.28 나트륨의 방출 스펙트럼



예를 들면, 그림 29.28(a)는 나트륨의 방출 스펙트럼에서 관측된 전이들과 파장들을 보여준다. 이 도형은 각 파장들이 잘 정의된 두 에너지 준위 사이의 양자 뿔을 나타내는 것을 지적해준다. 선택 규칙 $\Delta l = \pm 1$ 은 나트륨 스펙트럼에서 잘 따른다는 것을 주의하여라. 5p 준위는 3s, 4s, 혹은 3d로 양자 뿔을 하고, 3p 혹은 4p로는 양자 뿔을 하지 않는다.

그림 29.28(b)는 분광기에 기록된 나트륨의 방출 스펙트럼을 보이고 있다[이러한 스펙트럼에서 보이는 많은 선들은 더 높은 들뜬 상태에서 시작한 것으로 그림 29.28(a)의 제한된 에너지 준위 도형에서는 볼 수 없다]. 스펙트럼을 에너지 준위 도형과 비교하면, 589 nm, 330 nm, 286 nm, 268 nm에서 스펙트럼선은 일련의 선들을 형성하는데, 이는 $np \rightarrow 3s$ 전이에는 여러 가능성이 있기 때문이다. 이들은 나트륨 스펙트럼의 두드러진 특성들이다.

나트륨 방출에서 가장 뚜렷한 것은 밝은 노란색이다. 이는 $3p \rightarrow 3s$ 전이에서 방출되는 589 nm 광자에 의해서 만들어진 것이다. 이는 나트륨을 시험하기 위해서 화학에서 사용된 불꽃 시험의 기초이다. 샘플은 분젠버너에 설치되어 있고, 밝은 노란색 방전은 나트륨이 있다는 것을 나타낸다. 589 nm 방출은 보통 나트륨 증기가 담긴 가로등이 내는 핑크빛 노란색 방전에 있다. 이는 나트륨 증기 속에서 전기 방전을 일으킴으로써 방출된다. 대부분의 전기 가로등은 빛의 출력을 높이기 위하여 고압 램프를 사용한다. 이런 고압은 Na_2 분자를 형성하게 하며, 이 분자는 핑크색 빛을 방출한다.



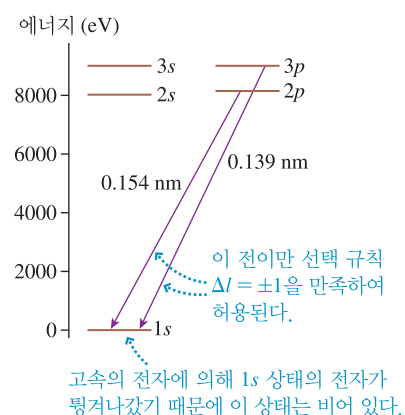
▲ **빛 보기** 천문학 관측소 가까이 있는 몇몇 도시는 저압 나트륨 빛을 사용한다. 이는 나트륨의 현재하게 노란 589 nm 빛을 방출한다. 도시 가로등의 방전은 천문학자에게는 심각한 문제이다. 그러나 나트륨으로부터 방출되는 589 nm 빛은 쉽게 나트륨 필터로 제거할 수 있다. 이 필터는 589 nm 노란 나트륨 빛 이외의 모든 빛을 통과하는 간섭필터이다. 왼쪽 사진은 나트륨 가로등 가까이 있는 하늘을 보인 것이고, 오른쪽은 나트륨 필터로 본 하늘이다. 왼쪽 사진에서는 오리온자리가 거의 보이지 않지만, 오른쪽 사진에는 보인다.

X선

X선은 수천 볼트 전위차에서 가속된 고속 전자가 금속 표적을 부딪칠 때 만들어질 수 있다고 28장에서 언급했다. 원자의 원자가전자를 들뜨우는 기체 방전관의 경우와는 달리 고속 포물체는 표적 원자의 내부 껍질에 들어가 거기에 있는 전자를 튕겨내고 내부 껍질에 빈자리를 만든다. **그림 29.29**의 구리의 경우, 더 높은 껍질에 있는 전자가 양자 뒹을 하여 이 빈자리를 채우며, 이 과정 중 광자가 방출된다.

구리와 철처럼 무거운 원소에서, 내외 껍질 사이의 에너지 차이는 대단히 크다. 전형적으로 10 keV이다. 결국 광자의 에너지는 $E_{\text{photon}} \approx 10 \text{ keV}$ 이고 파장은 $\lambda \approx 0.1 \text{ nm}$ 이다. 고에너지 광자는 쥘트겐에 의해서 발견된 X선이다. X선 광자의 에너지는 가시광선 광자의 경우보다 약 10,000배나 크며 파장은 10,000배 작다. 그럼에도 불구하고, 기본적인 물리학은 같다: 원자 속 전자가 양자 뒹을 경험했을 때 광자가 방출된다.

그림 29.29 구리 원자에서 X선 발생



29.8 분자

양자역학은 원자에 적용한 것과 마찬가지로 분자에도 적용된다. 그러나 분자는 내부에 에너지를 저장할 수 있는 내부 모드를 가지고 있기 때문에 더 복잡하다. 특히 분자는 질량 중심에 대해 회전할 수 있으며, 각 원자는 마치 작은 용수철인 것처럼 앞뒤로 진동할 수 있다. 이러한 내부 운동은 무시하고, 전자와 전자 에너지 준위를 살펴보자.

분자에 대한 양자역학적인 분석으로 아래와 같은 일반적인 결론을 얻는다.

- 에너지는 양자화된다. 전자는 단지 어떤 허용된 에너지 준위에서만 존재할 수 있다.
- 에너지 준위의 수는 놀라울 만큼 많고 서로 아주 밀접하게 모여 있어서, 허용되는 에너지띠 형태로 모여져 있다고 할 수 있다.
- 열적 평형 상태에서 거의 모든 분자는 가장 낮은 에너지 준위에 있다.

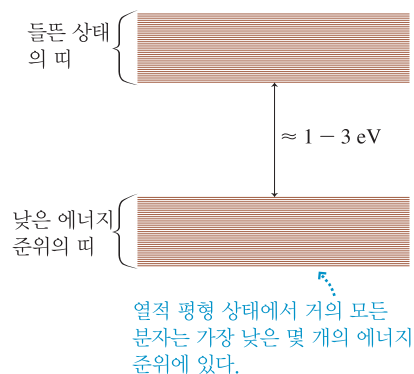
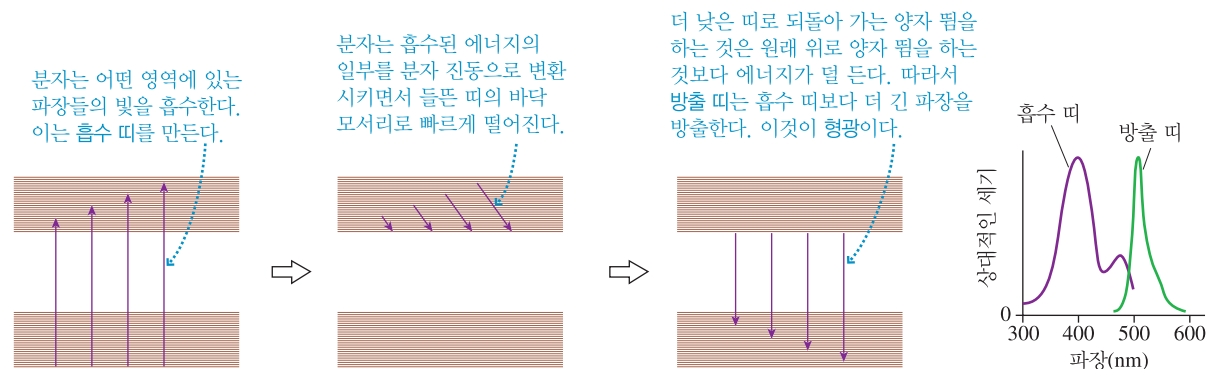
그림 29.30 중간 크기 분자의 분자 에너지 준위 도형

그림 29.30은 중간 크기의 총괄적인 분자 에너지 준위 도형을 보여준다. 원자가 잘 정의된 바닥 상태를 가진다면, 분자들은 낮은 에너지 준위에서 넓은 띠를 갖는다. 수소 원자의 $2s$ 상태의 경우에는 하나하나의 들뜬 상태가 있는 것과 비교하여, 분자의 경우에는 하나하나의 들뜬 에너지 준위가 있다. 방대하게 많은 허용 에너지 준위가 있음에도 불구하고 거의 모든 분자들은 대부분의 시간을 가장 낮은 에너지 준위에서 보낸다.

그림 29.31은 분광학의 두 가지 중요한 현상인 흡수와 형광을 설명하기 위하여 에너지 준위 도형을 사용한다. 원자의 흡수 스펙트럼은 불연속 스펙트럼선으로 구성되어 있는 반면, 분자는 연속적인 흡수 띠를 갖는다. 더 높은 진동수(짧은 파장)의 빛을 흡수하고 더 낮은 진동수(긴 파장)의 빛을 방출하는 것을 **형광(fluorescence)**이라고 한다. 형광은 분자에서 일어나고, 원자에서는 일어나지 않는다. 왜냐하면 분자는 흡수 에너지의 일부를 원자의 진동 에너지로 변환시켜 분자의 열에너지를 증가시킬 수 있기 때문이다.

그림 29.31 분자 흡수와 형광

형광은 중요한 곳에 매우 많이 응용된다. 생물학에서 형광 염료는 현미경 조직 샘플을 착색하는 데 사용된다. 29장의 맨 앞 사진에서 세포는 세 가지의 다른 염료로 착색되었다. 그 중 하나인 파란색은 핵에 흡수된 것이며, 다른 녹색은 액틴(actin)에 의한 것이다. 빨간색 염료는 다른 세포 구성물에 흡수되었다. 우리가 볼 수 없는 자외선을 쬔 때, 각 염료는 특징적인 색깔의 형광을 낸다.

많은 생물 분자들은 형광을 낸다. 좋은 예가 엽록소, 즉 광합성을 일으키게 하는 식물의 녹색 안료이다. 파란색 빛 혹은 자외선에 조사되었을 때 엽록소는 예기치 못한



◀ **흰색보다 더 흰색** 세탁세제는 눈에 보이지 않는 자외선을 흡수하여 볼 수 있는 가시파장의 넓은 띠의 형광을 내는 염료를 포함하고 있다. 즉, 백색광을 발산한다. 태양광은 UV를 포함하고 있기 때문에 야외에서 흰색 옷은 흰색을 반사시킬 뿐만 아니라 백색광보다 하얀 형광을 낸다. “곧 흰색보다 더 희다.” 사진에서 소녀의 셔츠가 UV광으로 조사되었을 때 어떻게 빛나는지를 볼 수 있다(심지어 머리와 치아도 위와 같은 방법으로 형광을 낸다).

어두운 빨간색의 형광을 낸다. 이러한 엽록소의 특징은 바다의 미시적 식물인 식물성 플랑크톤의 농도를 측정하기 위하여 해양생물학자들에 의해서 사용된다.

아주 최근에 과학자들은 해파리 종으로부터 형광 단백질을 분리해 냈다. 자외선을 비출 때 이 단백질은 녹색 형광을 내기 때문에 GFP(green fluorescent protein)라고 별명을 붙였다. GFP는 유전학에서 중요한 도구가 되었다. 왜냐하면 살아 있는 세포 속에서 발현되는 유전자를 설명하는 데 사용되기 때문이다. 연구하고자 하는 유전자에 해파리의 GFP 유전자를 주입하는 방식으로 한다. 유전자가 활동할 때 세포는 유전자에서 암호화된 보통의 단백질과 함께 GFP를 만든다. 만일 세포를 자외선 하에서 관찰하면 GFP로부터 나오는 밝은 녹색 빛은 그 유전자가 작동했다는 것을 나타낸다. 그 유전자가 활동하지 않으면 그 세포는 어둡다. **그림 29.32**는 그 예를 보여준다.

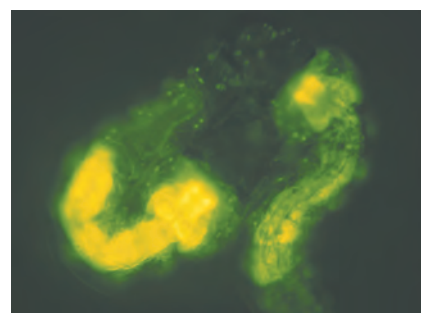
GFP의 색깔은 생물발광을 생각나게 해준다. 반딧불의 반짝거림이나, 심해의 물고기가 녹색으로 빛나는 것은 이와 연관이 있다. 생물발광은 실제로 화학발광의 형태이다. 화학발광은 화학반응으로 빛을 생성한다. 어떤 화학반응은 반응 분자가 들뜬 상태에 있게 한다. 이러한 분자들은 낮은 에너지 준위로 이동함으로써 빛을 발광한다. 이는 마치 분자들이 좀 더 짧은 파장의 빛을 흡수한 것과 같다. 발광된 빛은 형광과 똑같은 스펙트럼을 가지고 있다. 그러나 분자들이 들뜨는 방법에는 차이가 있다. 많은 색깔의 빛을 내는 발광 스틱은 화학발광의 한 예이다.

생물발광은 생물 기관에서의 화학발광이다. 몇몇 생화학적 반응, 예를 들어 때때로 유기체의 촉매반응은 분자들을 들뜬 상태로 만든다. 그리고 분자가 낮은 상태로 이동함으로써 빛이 나온다. 반딧불에서의 반응은 루시페라아제(luciferase)라는 흥미로운 이름을 가진 효소가 관여한다. 해파리의 경우 GFP의 근원인 에쿼린 빅토리아(Aequorin Victoria)가 생물발광 반응을 통해 실제로 파란색 빛을 만든다. 파란색 빛은 녹색 형광 단백질에 의해 흡수되는데, **그림 29.31**의 흡수곡선에서 예측하는 것과 같으며 녹색을 발광한다. 어두운 해양에서 봤을 때 해파리는 괴상한 녹색 빛을 낸다.



수업 영상

그림 29.32 BIO 모기 유충에서 특이한 염색체로 표현되는 녹색 형광 단백질이 보인다.

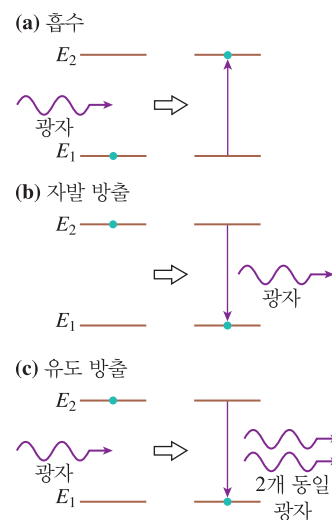


29.9 유도 방출과 레이저

우리는 원자가 광자를 흡수함으로써 낮은 에너지 준위 E_1 에서 높은 에너지 준위 E_2 로 뛰어오를 수 있음을 보았다. **그림 29.33(a)**는 그 과정을 보여준다. **그림 29.33(b)**와 같이 준위 2에 도달하면 원자는 준위 1로 되돌아가는 것과 동일한 에너지의 광자를 방출한다. 이러한 전이는 자발적으로 일어나기 때문에 **자발 방출(spontaneous emission)**이라고 한다.

1917년 아인슈타인은 상태 2의 원자가 상태 1로 전환할 수 있는 두 번째 메커니즘을 제안했다. **그림 29.33(c)**의 왼쪽에는 들뜬 상태 2에 있는 원자에 접근하는 광자를 보여준다. 아인슈타인에 따르면, 만약 광자의 에너지가 두 상태 사이의 에너지 차이 $E_2 - E_1$ 과 정확하게 동일하다면, 이 들어오는 광자는 원자를 유도하여 $2 \rightarrow 1$ 전

그림 29.33 방사 전이의 세 가지 형태



이를 만들어서 광자를 방출할 수 있다. 이 과정을 **유도 방출(stimulated emission)**이라고 한다.

이 과정에서 입사 광자는 흡수되지 않으므로 두 개의 광자가 있다. 그리고 흥미롭게도, 방출된 광자는 입사 광자와 동일하다. 이것은 두 개의 광자가 원자를 떠나면서 정확히 같은 주파수와 파장을 가지고 있고, 정확히 같은 방향으로 이동하고, 정확히 서로 위상이 맞음을 의미한다. 즉, 유도 방출은 **첫 번째 광자의 정확한 복제인 두 번째 광자를 생성한다**.

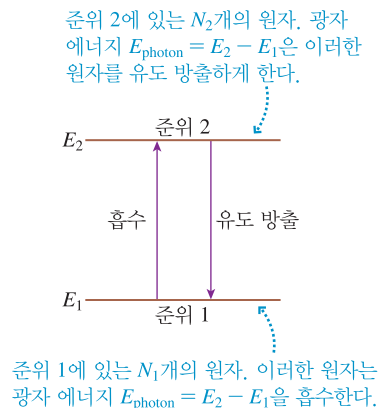
유도된 방출은 대부분의 실제 상황에서는 중요하지 않다. 원자는 거의 모든 시간을 바닥 상태에서 보내는데, 이로 인해 보통의 상황에서는 유도 방출이 거의 일어나지 않는다. 그러나 1960년에 과학자들은 유도 방출을 사용하여 혁신적인 새로운 장치인 레이저를 만드는 방법을 발견했다.

레이저



장관을 이루는 레이저쇼는 결맞은 레이저 빛의 세 가지 주요 특성을 가지고 있다. 레이저는 대단히 강력하고, 색은 극도로 순수하고, 레이저빔은 퍼짐 정도가 굉장히 좁다.

그림 29.34 에너지 준위 1에 있는 개수는 N_1 이고 에너지 준위 2에 있는 개수는 N_2 이다.



레이저(laser, light amplification by the stimulated emission of radiation)란 복사장의 유도 방출에 의한 광 증폭이란 말의 영어 단어들의 첫 글자들을 딴 것이다. 레이저는 무엇인가? 레이저란 근본적으로 유도 방출을 써서 고도로 결맞은 단색광인 빔을 만드는 장치이다. **결맞은 빛(coherent light)**은 전자기파의 상태들이 같은 위상, 같은 방향, 같은 진폭을 가지는 빛을 말한다. 레이저빔은 결맞기 때문에 한 점으로 강력하게 집속시킬 수 있고, 통신을 위하여 빠르게 변조될 수 있다.

레이저가 어떻게 동작되는지를 간단하게 알아보자. **그림 29.34**는 낮은 에너지 준위 E_1 과 높은 에너지 준위 E_2 를 가지고 있는 원자의 어떤 계를 나타낸다. 준위 1에는 원자가 N_1 개 있고, 준위 2에는 원자가 N_2 개 있다고 가정하자. 이들은 가만히 두면 모든 원자들은 자발 방출 $2 \rightarrow 1$ 때문에 즉시 준위 1로 가게 된다. 이를 막기 위해서 전기 방전과 같은 어떤 들뜨게 하는 열개를 통해 준위 2에 있는 들뜬 원자들을 지속적으로 만든다고 상상해보자.

진동수가 $f = (E_2 - E_1)/h$ 인 광자를 이러한 원자 무리에 입사시키자. 정확한 진동수를 가지고 있기 때문에 광자는 준위 1에 있는 원자에 흡수될 것이다. 다른 가능성은 준위 2에 있는 원자가 유도 방출을 일으키는 것이다. 보통은 $N_2 \ll N_1$ 이고, 따라서 흡수가 유도 방출보다 훨씬 많다. 비록 몇 개의 광자가 유도 방출로 생성되지만, 준위 1에 있는 많은 양의 원자에 의해 즉시 흡수될 것이다.

만약 모든 원자가 준위 2에 정렬하게 하여 $N_1 = 0$ 이 되게 하면 어떻게 될 것인가? 그러면 입사 광자는 처음 만나는 원자를 유도 방출시킬 것이다. 처음에는 진동수 f 인 광자가 하나 있었으나 지금은 2개가 된다. 이것은 들뜬 원자 2개와 부딪쳐서 다시 유도 방출을 일으킬 것이다. 그러면 광자는 4개가 된다. **그림 29.35**에서 보여주는 것과 같이, 모든 N_2 원자들이 진동수 f 인 광자를 방출할 때까지 연쇄반응(chain reaction)이 일어난다.

유도 방출에 있어서 방출된 각각의 광자는 입사 광자와 동일하다. 그림 29.35의 연쇄반응은 단순히 진동수가 f 인 N_2 개의 광자를 방출하는 것이 아니라, 같은 위상을 가지며 같은 방향으로 진행하는 동일한 광자 N_2 개를 방출한다. 실제적인 장비에서처럼 N_2 가 큰 수이면 초기의 광자 1개는 모두 결맞은 엄청난 빛의 펄스로 증폭될 것이다!

그림 29.35 유도 방출은 들뜬 원자의 무리에서 광자 생산의 연쇄반응을 일으킨다.

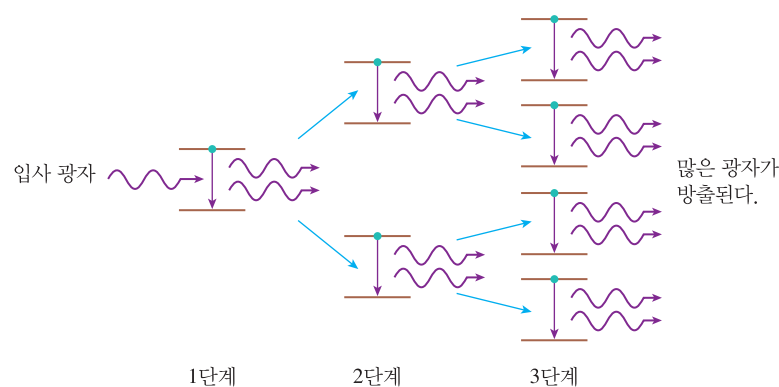
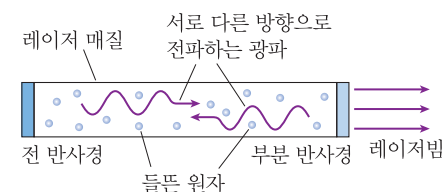


그림 29.35의 연쇄반응은 개념을 명확하게 표현하지만, 증폭을 일으키기 위해 모든 원자가 준위 2에 있어야 할 필요는 없다. 필요한 것은 오직 $N_2 > N_1$ 이 되어서 유도 방출이 흡수를 능가하게 하는 것이다. 이러한 상황을 **밀도 반전**(population inversion)이라 한다. 유도 방출은 양 끝에 서로 마주하는 2개의 거울이 있는 **광학 공진기**(optical cavity) 속에 레이저를 일으키는 매질인 빛을 방출하는 원자의 샘플을 넣어두면 유지된다. 그림 29.36에서 보듯이, 광자는 앞뒤로 오가면서 매질의 원자와 반복적으로 상호작용한다. 이러한 반복적인 상호작용은 빛의 세기가 커지게 하기 위해 필요하다. 두 거울 중 하나가 빛을 부분적으로 통과시킨다면 빛은 레이저빔으로 나오게 된다.

그림 29.36 광학 공진기 속에서 레이저 발진이 일어난다.



의학에서 레이저

레이저가 발명된 거의 직후 레이저는 의학에서 응용되었다. 출력이 약한 레이저빔도 렌즈로 집속시키면 아주 좁은 곳을 가열시킬 수 있다. 출력이 더 강력한 레이저는 조직을 문자적으로 증발시켜 조직을 자를 수 있다. 이는 스테인리스강 메스를 빛으로 대신한 것이다. 레이저의 열은 핏줄과 모세혈관을 봉합하기 때문에 레이저를 사용하는 외과 수술은 대단히 정밀할 뿐 아니라 기존의 수술보다 피를 적게 흘리는 이로운 점이 있다.

의학에서 보통 레이저를 사용하는 것은 동맥에서 찌꺼기를 제거하여 심장마비나 졸도의 위험을 줄이는 것이다. 이런 과정에서 광섬유는 동맥을 지나 해당 위치까지 도달한다. 강력한 레이저빔은 광섬유를 통해 발사되어 찌꺼기를 조심스럽게 증발시킨다. 광섬유를 통과한 레이저빔은 광역학적 치료법(photodynamic therapy)으로 암세포를 죽이는 데도 사용된다. 이 경우 빛에 민감한 화학물질을 혈관에 주입해서 암세포



포가 이것을 주로 흡수하게 한다. 광섬유를 중앙 가까이 두고, 빛에 민감한 화학물질을 활성화시키는 데 필요한 딱 맞는 파장으로 쏘여서 암세포를 죽인다. 이 과정들은 공격을 최소화하고, 또 기존의 수술에서는 접근할 수 없던 곳에도 접근할 수 있다.

◀ **레이저 비전 BIO** 레이저를 기반으로 한 라식(LASIK) 수술은 눈의 부정확한 굴절률로부터 오는 근시 혹은 원시와 같은 시력 결점을 보정할 수 있다. 19장에서 보았듯이 눈이 초점을 맞추는 중요한 능력이 각막의 표면에서 나온다. 라식에서는 우선 특수한 칼로 각막에 작은 절편을 만들고 방해되지 않도록 이를 접는다. 컴퓨터로 제어된 자외선 레이저는 각막 조직을 매우 조심스럽게 증발시켜 원하는 모양을 만든다. 그리고 접어 두었던 절편을 다시 그 자리에 덮는다. 이러한 과정은 단지 몇 분만 걸리고, 눈 속에 떨어뜨릴 단 몇 방울의 마취약만 필요하다.

종합형 예제 29.10 소형 형광 발광

22장과 25장에서 보통의 백열전구가 어떻게 작용하는지를 배웠다. 전류가 필라멘트를 달구어 하얗고 따뜻한 불빛을 낸다. 이러한 빛은 대단히 비효율적이다. 곧 백열전구에 가한 전력 100 W에 비해 가시광선으로 사용되는 비율은 단지 몇 와트(W)일 뿐이다.

여러 해 동안 사무실과 상가 건물에서는 빛을 내는 다른 형태인 형광등을 사용하였다. 최근에는 보통의 램프 소켓에 돌려서 넣을 수 있는 소형 형광전구가 주택에 보급되기 시작하였다. 이러한 전구는 전기 에너지를 빛에너지로 바꾸는 데 있어서 백열전구보다 4배 정도 효율이 높다.

형광전구의 유리관 속에는 아주 조금의 수은이 있는데, 전구를 켤 때 증기 형태로 존재한다. 가시광선을 만드는 것은 세 가지 과정을 통해 일어난다. 첫째, 유리관 양쪽에 100 V 전압을 가한다. 그러면 증기 속에 있는 자유전자에 운동 에너지가 전달되고, 이 전자들은 수은 원자와 충돌하여 충돌 들뜸을 통해 수은 원자가 들뜨게 한다. 둘째, 들뜬 원자는 낮은 에너지 상태로 떨어지면서 UV 광자를 방출한다. 마지막으로, UV광자는 유리관 내에 입혀진 인광물질을 두드리고, 그리하여 가시광선의 형광이 나오게 한다. 이것이 바로 형광전구에서 나오는 빛이다.

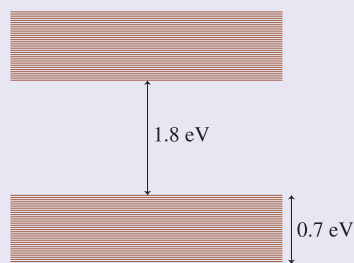
a. 전자와의 충돌로 들뜨게 된 수은 원자는 양자 뿔을 통해 바닥 상태로 되돌아 가면서 파장이 185 nm인 광자를 방출한다. 만



일 전자가 정지 상태에서 출발한다면, 충분한 운동 에너지를 얻어 이렇게 들뜨게 하기 위해서는 최소한 얼마의 거리를 이동해야 하는가? 60 cm의 긴 관 양극 사이에는 120 V가 걸려 있다.

- b. 충돌로 들뜨게 된 후, 원자는 때때로 첫 번째 광자 하나를 방출하면서 높은 에너지 준위에서 중간 에너지 준위로 이동하고, 그리고 나서 두 번째 광자 하나를 방출하면서 중간 에너지 준위에서 바닥 상태로 이동하며 총 2개의 광자를 방출한다. 원자가 바닥 상태보다 7.79 eV 높은 상태로 들떴다. 254 nm 파장의 광자를 하나 방출하고, 그리고 나서 두 번째 광자를 방출한다. 두 번째 광자의 파장은 무엇인가?
- c. 인광물질 속에 있는 분자의 에너지 준위 도형이 **그림 29.37**에 그려져 있다. UV광자로 들뜬 후, 형광에 의해서 인광물질이 방출하는 파장의 범위는 무엇인가?

그림 29.37 인광물질 분자의 에너지 준위 도형



준비 전자와의 충돌을 통해 수은 원자가 바닥 상태에서 들뜬 상태로 들떴는데, 이때 원자의 에너지가 ΔE_{atom} 만큼 증가되었다. 그 다음 원자는 파장이 185 nm인 광자를 방출하면서 바닥 상태로 충돌 들뜸이 일어나기 위해서는 입사 전자의 운동 에너지는 ΔE_{atom} 와 같거나 높아야 한다. 즉, 파장이 185 nm인 광자의 에너지와 같

거나 높아야 한다는 것이다. 자유전자는 유리관 내의 전위차에 의하여 가속되어 운동 에너지를 얻는다. 에너지 보존 법칙을 사용하여 전자가 ΔE_{atom} , 즉 들뜨기 위하여 필요한 최소한의 운동 에너지를 얻기 위하여 이동해야 할 거리를 구한다.

문항 b에서 원자의 들뜸 에너지, 즉 7.79 eV는 광자 에너지로 변환된다. 만일 파장이 254 nm인 첫 번째 광자 에너지를 구할 수 있다면, 나머지 에너지는 두 번째 광자가 갖는다. 이로부터 해당 파장을 구할 수 있다.

그림 29.31을 조사해보면, 형광이 일어나는 동안의 양자 뿔은 들뜬 상태의 띠 제일 아래에서 시작한다. 그러나 낮은 에너지 띠 어느 곳에서도 끝날 수 있다. 에너지의 범위가 방출된 광자의 파장의 범위를 준다.

풀이

- a. 전자의 최소 운동 에너지는 나중에 방출되는 파장이 185 nm인 광자의 에너지와 같다. 이 에너지는

$$K_{\min} = \Delta E_{\min} = E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{185 \text{ nm}} = 6.7 \text{ eV}$$

이다. 여기서 식 (29.22)에 있는 hc 값을 사용하였다.

1 eV는 전자가 1 V 전위차에서 가속될 때 얻은 운동 에너지를 기억해라. 지금의 경우, 전자는 6.7 eV의 운동 에너지를 얻어야 한다. 그래서 전자는 6.7 V 전위차로 가속되어야 한다. 형광전구의 유리관은 60 cm 거리에 총 120V의 전압 강하, 즉 2.0 V/cm만한 전기장이 걸려 있다. 따라서 6.7 V의 전위차로 가속될 때 전자가 이동해야 할 거리는 다음과 같다.

$$\Delta x = \frac{6.7 \text{ V}}{2.0 \text{ V/cm}} = 3.4 \text{ cm}$$

- b. 첫 번째 방출된 광자가 갖는 에너지는 다음과 같다.

$$E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{254 \text{ nm}} = 4.88 \text{ eV}$$

두 번째 광자에게 남겨주는 에너지는 $7.79 \text{ eV} - 4.88 \text{ eV} = 2.91 \text{ eV}$ 이고, 이 광자의 파장은 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{hc}{E_{\text{photon}}} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{2.91 \text{ eV}} = 426 \text{ nm}$$

- c. 위쪽에 있는 에너지 띠의 바닥에서 아래에 있는 에너지 띠의 정상까지 양자 뿔을 할 동안 방출되는 광자의 에너지는 1.8 eV이고, 해당되는 파장은 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{hc}{E_{\text{photon}}} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{1.8 \text{ eV}} = 690 \text{ nm}$$

낮은 에너지 띠까지 이동하는 것에 해당하는 광자의 에너지는 $1.8 \text{ eV} + 0.7 \text{ eV} = 2.5 \text{ eV}$ 이고, 해당 파장은 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{hc}{E_{\text{photon}}} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{2.5 \text{ eV}} = 500 \text{ nm}$$

곧 이러한 인광물질은 UV광자를 흡수한 후 파장이 500~690 nm인 가시광선을 방출한다.

검토 문항 a에 있어서, 원자를 충돌로 들뜨게 하기 위한 충분한 에너지를 얻기 전에 전자는 유리관 길이의 단지 일부분만 이동한다는 것은 합리적으로 보인다. 수은 원자와 충돌하기 전에 전자가 유리관의 길이 전체를 이동해야 한다면 전구는 대단히 비효율적일 것이다. 문항 b와 c에서 광자의 파장은 합리적으로 보인다. 특히 인광물질에 의하여 방출된 파장의 범위는 가시영역 스펙트럼의 반보다 약간 넓다. 즉 녹색에서 빨간색 범위에 있으며 파란색과 보라색 부분은 빠져 있다. 작은 형광전구의 유리관은 세 가지 다른 인광물질을 가지고 있는데, 이들은 방출파장의 영역이 다른 영역에 있고 백색광의 전 스펙트럼을 낸다. 인광물질의 혼합 비율을 약간 변경하면 '차가운 흰색 전구'에서 '따뜻한 흰색 전구'로 구별된다.

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 시작하시오.

연습문제

29.1 분광학

- I 그림 29.2와 표 29.1은 수소의 가시 스펙트럼에서 첫 번째 4선들의 파장을 보여준다.
 - 이 파장에 대한 발머의 식 n 과 m 값을 결정하시오.
 - 스펙트럼에서 다섯 번째 선의 파장을 예측하시오.
- I 파셴 계열은 발머 계열과 유사하지만 $m = 3$ 이다. 파셴 계열에서 첫 번째 3개의 파장을 계산하시오. 이것은 전자기 스펙트럼에서 어느 부분인가?

29.2 원자

- I 아래의 원자 혹은 이온에서 얼마나 많은 전자, 양성자, 그리고 중성자가 있는가?

(a) ^{19}K (b) $^{23}\text{Mg}^{++}$ (c) $^{51}\text{Fe}^{++}$
- I 다음을 가진 원자나 이온을 원소기호로 적으시오.
 - 전자 2개, 양성자 3개, 중성자 3개
 - 전자 6개, 양성자 7개, 중성자 7개

29.3 원자 양자화에 관한 보어의 모형

- I 운동 에너지 2.0 eV를 갖는 $n = 3$ ————— $E_3 = 4.0 \text{ eV}$ 전자는 그림 P29.5에 보인 에너지 준위 도형의 원자와 충돌한다. $n = 2$ ————— $E_2 = 1.5 \text{ eV}$ $n = 1$ ————— $E_1 = 0.0 \text{ eV}$
 - 전자가 원자를 들뜬 상태로 **그림 P29.5** 차올릴 수 있는가? 이유가 무엇인가? 이유가 없다면 왜 그런가?
 - 문항 a의 답이 예라면 충돌 후에 전자의 운동 에너지는 무엇인가?
- III 어떤 단순한 원자의 허용된 에너지는 0.0 eV, 4.0 eV, 그리고 6.0 eV이다. $1.6 \times 10^6 \text{ m/s}$ 의 속력으로 움직이고 전자가 이것과 충돌하여 원자를 들뜨운다. 충돌 후 전자의 최소 그리고 최대 속력은 얼마인가?

29.4 보어의 수소 원자

- I 어떤 단순한 원자의 허용된 에너지는 1.0 eV, 3.0 eV, 그리고 5.0 eV이다. $1.6 \times 10^6 \text{ m/s}$ 의 속력으로 움직이고 전자가 이것과 충돌하여 원자를 들뜨운다. 충돌 후 전자의 최소 그리고 최대 속력은 얼마인가?
- II 수소로부터 파장이 1870 nm인 적외선이 방출된다. 이 빛을 발산하는 전환에 관련된 두 상태의 양자수는 몇 개인가?
- I a. 수소 원자의 $n = 1, 2, 3$ 상태에서 전자의 드브로이 파장을 계산하시오. 표 29.2를 이용하시오.
b. 이 정지 상태들 각각에 대한 궤도의 원주가 n 드브로이 파장들과 정확하게 동일하다는 것을 수치로 보이시오.
c. $n = 3$ 궤도에서 드브로이의 서있는 파동을 그리시오.
- I 수소 원자의 $n = 5$ 상태에서부터 방출될 수 있는 모든 가능한 광자의 파장을 결정하시오.

29.5 양자역학적인 수소 원자

- II 모든 양자수를 고려했을 때, $n = 1$ 인 수소 원자는 얼마나 많은 양자 상태를 가지고 있는가? 그리고 $n = 2$ 는 어떠한가? $n = 3$ 일 때는 어떠한가? 각 상태에 대한 양자수 표를 만드시오.
- II 수소 원자의 에너지는 바닥 상태 에너지보다 12.09 eV 높다. \hbar 의 배수로서, 이 원자가 가질 수 있는 가장 큰 각운동량은 얼마인가?
- III 수소 원자에 각운동량은 $4.70 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 이다. 이 원자가 가질 수 있는 최소 에너지는 eV로 얼마인가?

29.6 다전자 원자

- II Si, Ge, 그리고 Pb의 바닥 상태 전자 배열을 예측하시오.
- II a. 어떤 원소가 처음으로 3s 부속껍질을 완전히 채우는가?
b. 어떤 원소가 처음으로 5d 부속껍질을 완전히 채우는가?
- I 이러한 전자 배열이 무엇이 잘못되었는지 설명하시오.
 - $1s^2 2s^2 2p^8 3s^2 3p^4$
 - $1s^2 2s^3 2p^4$

29.7 들뜬 상태와 스펙트럼

17. I 속력이 5.00×10^6 m/s인 전자가 원자와 충돌한다. 충돌은 원자를 바닥 상태(0 eV)에서 3.80 eV의 에너지 상태로 들뜨운다. 충돌 후 전자의 속력을 구하시오.
18. II 나트륨을 4s 상태로 들뜨울 수 있는 최소한의 빛의 파장을 구하시오.
19. I a. $4p \rightarrow 4s$ 전이가 나트륨에서 허용되는가? 그렇다면 파장은 무엇인가? 그렇지 않다면 그 이유는 무엇인가?
b. $3d \rightarrow 4s$ 전이가 나트륨에서 허용되는가? 그렇다면 파장은 무엇인가? 그렇지 않다면 그 이유는 무엇인가?

29.8 분자

20. I 에너지 준위 도형이 그림 P29.20에서 보인 것과 같은 분자에 2.7 eV 광자를 조사한다. 분자가 방출할 수 있는 빛의 최대 파장을 구하시오.

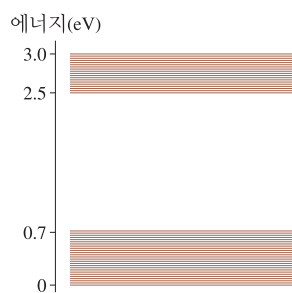


그림 P29.20

29.9 유도 방출과 레이저

21. II 0.50 mW 헬륨-네온 레이저는 파장 633 nm인 가시광선 레이저빔을 방출한다. 초당 얼마나 많은 광자를 방출하는가?
22. II 루비 레이저는 10 ns의 강력한 광 펄스를 방출한다. 이 레이저의 파장은 690 nm이고 출력은 500 mJ이다.
a. 각 펄스당 얼마나 많은 광자가 방출되는가?
b. 레이저가 작동될 10 ns 동안 광자는 초당 얼마의 수가 나오는가?