

주석



소개

1. Carl Sagan, "Why We Need to Understand Science," *Skeptical Inquirer* 14, no.3 (Spring 1990).

서문

1. Rosenblum and Kuttner, *레퍼런스 X*, p. 5.
2. 같은 책, preface, p. 5, p. 116.
3. 아인슈타인이 막스 보른에게 1947년 3월 3일 쓴 편지에서, “물리학은 시간과 공간의 현실을 표현해야 한다. 먼 거리의 유령 같은 행동과는 관계없이 말이다”라고 했다. 막스 보른에게서 인용되었다, *The Born-Einstein Letters 1916-1955: Friendship, Politics and Physics in Uncertain Times*, by Manjit Kumar (New York: Macmillan, 2005), p. 155, in Kumar, *레퍼런스 K*, p. 312.

1장: 1부, 2부에 대한 소개

1. McEvoy and Zarate, *레퍼런스 A*, p. 3.
2. Scerri, *레퍼런스 D*, p. 229.
3. Gribbin, *레퍼런스 Z*, 삽입된 사진, Quantum Fuzz의 그림 1.1과 동일한 사진에 대한 설명
4. Kumar, *레퍼런스 K*.
5. Bortz, *레퍼런스 B*, pp. 212-27. 유사한 목록(노벨상이 수여된 연도별로 되어 있고, 처음

상이 주어진 1901년부터 시작된다)을 Wikipedia, s.v. "List of Nobel Laureates in Physics," https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Nobel_laureates_in_Physics (last accessed September 22, 2016)에서 찾아볼 수 있다.

2장: 플랑크, 아인슈타인, 보어

1. Andrew Robinson, *The Last Man Who Knew Everything* (New York: Pi, 2006), p. 96.
2. Kumar, 레퍼런스 K, p. 56.
3. 1901년부터 2000년까지 모든 노벨물리학상 수상자와 그 수상 근거의 목록이 Bortz, 레퍼런스 B, pages 212-27에 나와 있다. 업데이트된 목록을 Wikipedia, s.v. "List of Nobel Laureates in Physics," https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Nobel_laureates_in_Physics (last accessed September 22, 2016)에서 찾아볼 수도 있다. 서문에서 언급했듯 이후의 모든 수상의 근거는 이 소스에서 인용했다.
4. 아인슈타인은 입학 시험 중 처음에 수학과 물리학은 잘 치렀으나 역사와 언어는 낙제했다. 결과적으로 취리히 근처 작은 마을의 고등학교를 마치라는 제안을 받았고, 그는 그 학교장의 집에서 하숙하며, 사교적이고 즐거운 시간을 보냈고, 자유롭게 생각을 교환하는 사람이 되었다. 그리고 반에서 수석으로 졸업했다.
5. Kean, 레퍼런스 R, p. 43.

3장: 하이젠베르크, 디랙, 슈뢰딩거

1. Bortz, 레퍼런스 B, p. 55.
2. Kumar, 레퍼런스 K, p. 150.
3. Moore, 레퍼런스 M, p. 272.

5장: 양자역학의 본질적 특징

1. 각 상태는 파동함수로 나타날 수 있고, 그 상태에 대한 이러한 파동함수는 전체 파동함수의 구성요소일 수 있음을 감안하여 체드 오첼리 레퍼런스 L, p. 59,에서 제시하고 있는 포맷과 용어를 변경하고 있다.

6장: 거인들의 격돌

1. 보어는 거시적세계와 초현미경적세계로 구분을 지었다. 전자는 고전물리학이 적용되며, 후자는 양자론이 적용된다. 그러나 여러분이 알아차리게 될 것처럼 이 세상은 거시적 또는 미시적인 양자세계이며, 블랙홀과 같은 매우 거대한 물체를 설명하는 데까지도 양자론의 핵심 이론인 상보성이 필수적으로 적용된다(9장 참고).
2. 출처: Alice Calaprice, *The New Quotable Einstein* (Princeton: Princeton University Press, 2005), p. 89, Kumar의 말 인용, 레퍼런스 K, p. 278.
3. Kumar, 레퍼런스 K, p. 256.
4. 같은 책, p. 271.
5. 같은 책, p. 316.

6. 같은 책
7. 같은 책, p. 295.
8. 같은 책, p. 338.
9. Orzel, 레퍼런스 I, p. 149.
10. 그러나 연구원들은 결과를 %로 보고하지 않았다. 그러므로 우린 번역해야 한다. 오첼, 레퍼런스 I, page 159의 보고 중: “물리학자들은 수를 다루길 좋아하며, 이들이 사용하는 특정 구성인 국소적 숨은 변수(LHV) 처리는 그 결과가 -1과 0 사이의 수로 줄여야 하며 불확정성은 0.014*의 편차(+/-)라고 예측한다.” (* 이 불확정성은 이들의 측정 기구의 정확도에 근거하며 하이젠베르크의 불확정성 원리와는 아무런 관계가 없다.) 오첼은 말을 이어 나간다: “최대 LHV값과 이들의 측정 간의 차이는 측정상의 불확정성보다 9배가 크다. 이것이 우연히 일어날 확률은 1036분의 1이라는 의미다. 1036은 십 억 × 십억 × 십억 × 십억으로, 너무도 큰 수여서 칼 ‘십억 × 십억’ 세이건조차 눈 깜빡이는 순간으로 만들 수도 있을 것이다.” 이것이 앞에서 설명한 벨의 부등식의 %와 어떤 관련이 있는지를 알기 위해선, LHV가 “-1과 0 사이의 수로 줄도록” 하는 것이 -1에서 100%, 0에서 33%의 스케일을 갖는 것에 대응된다는 것을 깨닫게 된다. 이 스케일에서 (60도의 방향차를 가진 필터에 대해) 25% 최소확률은 정확히 +0.125가 될 것이다. 이들이 측정한 +0.126에 매우 근접하며 측정의 불확정성 범위 안이다.
11. 같은 책, p. 162.
12. Kumar, 레퍼런스 K, p. 354.
13. Wikipedia, s.v. “Interpretations of Quantum Mechanics,” https://en.wikipedia.org/wiki/Interpretations_of_quantum_mechanics (accessed August 9, 2016).
14. Wikipedia, s.v. “Many Worlds Interpretation,” https://en.wikipedia.org/wiki/Many-worlds_interpretation (accessed August 9, 2016).
15. Kumar, 레퍼런스 K, p. 358.
16. Wikipedia, s.v. “Interpretations of Quantum Mechanics,” https://en.wikipedia.org/wiki/Interpretations_of_quantum_mechanics (accessed August 9, 2016).
17. Orzel, 레퍼런스 I, p. 89.
18. 같은 책, p. 101.
19. Greene, 레퍼런스 C, p. 212; and Greene, 레퍼런스 AA, p. 224.

7장: 이 모든 것들의 의미는?

1. Galileo Galilei, Il Saggiatore (in Italian) (Rome, 1623); Galilei, The Assayer, Stillman Drake 역, in Discoveries and Opinions of Galileo (Garden City, NY: Doubleday Anchor Books, 1957), pp. 237–38.
2. S. Chandrasekhar, Newton’s Principia for the Common Reader (Oxford: Clarendon, 1995), p. 43.
3. Moore, 레퍼런스 M, p. 196.
4. McEvoy, 레퍼런스 A, p. 3.

5. 모래 한 알이 매우 크다고 여겨지는 곳에서의 커다란 물체의 경우 이것은 차이가 없다. 관계 없다. 가령 타자가 야구공을 치는 걸 본다고 하자. 고전 물리학자나 공학자는 이렇게 말할 것이다. “만약 배트와 관련된 공의 정확한 위치, 날아오는 공의 궤적, 때리는 배트, 공의 회전, 공기의 저항을 말해 주면, 공이 배트에 맞은 후의 정확한 속도와 궤적을 계산하겠습니다.” (결국 이러한 계산으로 우린 달 주변에 로켓을 보낸다.) 그리고 이들은 옳을 것이다. 그러나 원칙적으로 우리 우주의 기초를 알려면 관심을 가질 필요가 있다. 양자물리학자는 이렇게 말할 것이다. “아니오. 애초에 공의 위치와 속도 모두, 또는 공의 회전, 또는 배트의 움직임을 정확히 알 수 없습니다. 그래서 날아 가는 공의 궤적을 정확히 계산할 수 없습니다.” 그리고 양자 물리학자나 공학자는 옳을 것이다! 8장에서 설명한 하이젠베르크의 불확정성이론을 생각해 보자. 수소원자의 상태에서 전자의 위치에 대한 퍼져 있는 확률 구름은 이러한 불확정성이 단지 하나로 나타났을 뿐이고 결정론은 부재한다. 그리고 불확정성이론은 큰 물체에도 적용된다. 물체의 위치와 움직임 모두를 절대적인 확정성을 가지고 알 수 없다

8장: 응용품

1. “Krysta Svore on Quantum Computing,” YouTube video, 28:34, originally presented by Microsoft Research Luminaries, posted by Larry Larson on October 28, 2014, https://youtu.be/kK_pbb66ss (October 5, 2016)
2. 게임의 목적이 물리적인 물체의 정체를 결정하는 것으로 나는 기억한다. 그러나 그는 그것이 특정 단어를 구별하는 것이었다고 기억하고 있는 듯하다.
3. 2007년 12월에, ASCII는 더욱 진보한 UTF-8 코딩시스템에 포함되었다.
4. Gribbin, 레퍼런스 Z, p. 34.
5. Steven Rich and Barton Gellman, “NSA Seeks to Build Quantum Computer That Could Crack Most Types of Encryption,” Washington Post, January 2, 2014.
6. “Krysta Svore on Quantum Computing.”
7. 벨 상태는 큐비트 상태의 이진 조합 네 개로 각각 2진수 조합을 나타낸다. “0, 0”, “0, 1”, “1, 0”, “1, 1”이다.
8. Gribbin, 레퍼런스 Z, pp. 168 and 169.
9. 같은 책, pp. 159–68.
10. 같은 책, p. 180.
11. 같은 책, p. 190.
12. 같은 책, p. 188.
13. Jeffrey Kluger, “Teleportation Is Real and Here’s Why It Matters,” Time, May 30, 2014.
14. Orzel, 레퍼런스 L, p. 184.
15. Wikipedia, s.v. “Quantum Cryptography,” September 13, 2016 (accessed October 4, 2016).

9장: 은하계, 블랙홀, 중력파동, 물질, 자연의 힘, 힉스보손, 암흑 물질, 암흑 에너지, 끈이론

1. Parker, 레퍼런스 CC, particularly Chapter 4.
2. Bojowald, 레퍼런스 FF, p. 19.
3. Toback, 레퍼런스 U, p. 56.
4. Bojowald, 레퍼런스 FF.
5. Greene, 레퍼런스 AA, p. 19.
6. 같은 책, p. 11.
7. 같은 책, p. 20.
8. Michael S. Turner, “Origin of the Universe,” in 레퍼런스 DD, p. 38.
9. Toback, 레퍼런스 U, p. 122.
10. Greene, 레퍼런스 AA, p. 22.
11. Toback, 레퍼런스 U, p. 206.
12. Greene, 레퍼런스 AA, p. 23.
13. 같은 책, p. 21, p. 22.
14. Coles, 레퍼런스 GG, p. 57.
15. 같은 책, p. 58.
16. 같은 책
17. 같은 책
18. 같은 책, p. 57.
19. Wikipedia, s.v. “Universe,” last modified September 11, 2016, <https://en.wikipedia.org/wiki/Universe> (accessed October 14, 2016).
20. Toback, 레퍼런스 U, p. 125.
21. 같은 책, p. 170.
22. 우리가 본 가장 오래된 별에서 빛이 132억 광년 이동한 거리를 마일로 계산함. David Toback, 레퍼런스 U, p. 170에서 광년 제공.
23. Wikipedia, “Universe.”
24. Toback, 레퍼런스 U, p. 211.
25. 같은 책, p. 231.
26. 물체의 크기는 Toback in 레퍼런스 U, Chapters 2 and 3에서 주로 발췌되었다. 이들이 나 타난 시간 프레임은 Turner의 논문 “Origin of the Universe,” in 레퍼런스 DD, pages 40 and 41의 타임라인에서 발췌되었다.
27. Turner, in 레퍼런스 DD, p. 40.
28. 같은 책
29. Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew L. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, vol. 1 (Reading, MA: Addison-Wesley, 1963), pp. 52–11.
30. Turner, in 레퍼런스 DD, p. 40.
31. 같은 책
32. Toback, 레퍼런스 U, p. 211.
33. 같은 책, p. 165.

34. 중력과 4차원 시공간에 대해 읽어 볼만한 좋은 책은 Barry Parker의 책 Einstein's Brainchild—
Relativity Made Relatively Easy (Reference CC) 4장을 읽어 보길 다시금 권장한다.
35. Toback, 레퍼런스 U, pp. 170 and 236.
36. 같은 책, p. 164.
37. 같은 책, p. 188.
38. 같은 책, p. 183.
39. John Gribbin, Quantum Fuzz와 관련된 출판사와의 September 26, 2016의 e-mail 중.
40. Gribbin, 레퍼런스 LI, p. 83.
41. 같은 책에서 그리빈은 다음처럼 적고 있다. 원자의 핵은 바닥상태로 알려진 곳에 최소의 에너지를 가지고 존재하거나, (아원자계의 다른 모든 것들처럼 양자화된) 정해진 특성량의 에너지를 흡수해 다른 에너지 준위로 올려질 수도 있다. 이러한 방법으로 “들뜨면” 조만간 남는 에너지를 아마도 감마선의 형태로 제거하고 바닥상태로 다시 떨어진다. 에너지 준위는 층계의 계단과 같다. 핵이 알맞게 들뜨면 (신난 아이처럼) 하나의 계단에서 다음 계단으로(처음엔 위로, 다음엔 아래로) 점프한다. 호일의 통찰은 만약(그리고 이 경우에만) 베릴륨-8의 핵의 에너지와 들어 오는 헬륨-4의 핵의 합쳐진 에너지에 해당되는 탄소-12 에너지 층계의 한 계단이 있다면, 헬륨-4의 핵과 베릴륨-8의 핵의 충돌에서 들뜬 탄소-12의 핵이 형성될 수 있다는 것이었다. 이것은 마치 층계의 바닥에서 공을 정확한 속력으로 던져 틱겨져 나오지 않고 높은 계단에 머무르게 되는 것과 같을 것이다. 그리고 나서 다시 층계를 부드럽게 굴러 내려오게 된다. 이것이 호일이 예측했던 7.65 MeV 공명이었다. 만약 공명이 존재한다면 베릴륨-헬륨 상호작용은 들뜬 상태에서 탄소 핵을 만들어 내고, 그 뒤엔 초과된 에너지를 발산해 바닥상태로 자리잡게 될 것이다. 그러나 만약 공명이 존재하지 않는다면 어떤 탄소도 없을 것이다. 그리고 우리는 탄소 기반의 생명 형태이니 우리도 여기 없을 것이다.
42. Toback, 레퍼런스 U, p. 164.
43. 같은 책, p. 187.
44. 같은 책, p. 188.
45. 같은 책, p. 160.
46. 같은 책, p. 176.
47. 같은 책, p. 189.
48. Parker, 레퍼런스 CC, pp. 104 and 141.
49. Bortz, 레퍼런스 B, p. 84.
50. Susskind, 레퍼런스 BB, p. 118.
51. Hawking, 레퍼런스 W, p. 87.
52. Toback, 레퍼런스 U, p. 196.
53. 같은 책, p. 4.
54. 같은 책, p. 4.
55. Emily Conover, “Gravitational Waves Caught in the Act,” APS News 25, no. 3, March 2016,

- p. 4. <https://www.aps.org/publications/apsnews/201603/waves.cfm> (accessed October 14, 2016).
56. 같은 책
57. Hawking, 레퍼런스 W, p. 105.
58. 같은 책, p. 106.
59. 같은 책, p. 10.
60. “The Swift Gamma-Ray Burst Mission,” NASA, July 6, 2016, <http://swift.gsfc.nasa.gov/> (accessed October 14, 2016).
61. Susskind, 레퍼런스 BB, p. 21.
62. 이것을 “조용한” 폭탄선언이라고 말한 이유는 서스킨드에 따르면, 호킹, 서스킨드, 헤라르뒤스 엇호프트만 호킹이 말했던 것의 의미를 깨달았기 때문이었다. (엣호프트는 자신의 논문지도교수인 마르티니스 펠트만과 함께 “전약 상호작용의 양자 구조를 자세히 설명하여” 1999년 노벨물리학상을 공동 수상했다. 본 장 뒤에서 간략히 나올 예정이다.)
63. Susskind, 레퍼런스 BB, p. 91.
64. Wikipedia, s.v. “Holographic Principle,” last modified October 8, 2016, https://en.wikipedia.org/wiki/Holographic_principle (accessed October 14, 2016). 여기엔 다음과 같은 내용이 나온다: “홀로그래픽 이론은 끈이론의 특성과 양자 중력의 추정적 특성이다. 공간의 부피를 나타내는 것은 지역의 경계선, 가급적 중력적 호라이즌처럼 빛과 같은 경계선에 부호화돼 있다고 간주할 수 있다고 언급한다. 헤라르뒤스 엇호프트에 의해 처음 제안되어, 레오나드 서스킨드에 의해 끈이론으로 제시되었다.”
65. BEC Crew, “Stephen Hawking Just Published a New Solution to the Black Hole Information Paradox: How Black Holes Can Erase Information, But Also Retain It,” Science Alert, January 11, 2016, <http://www.sciencealert.com/stephen-hawking-justpublished-new-solution-to-the-black-hole-information-paradox> (accessed October 14, 2016). Dennis Overbye, “No Escape from Black Holes? Stephen Hawking Points to a Possible Exit,” New York Times, June 6, 2016, http://www.nytimes.com/2016/06/07/science/stephen-hawking-black-holes.html?_r=0 (accessed October 17, 2016).
66. Coles, 레퍼런스 GG, p. 59.
67. 같은 책, p. 60.
68. 같은 책, p. 62.
69. Toback, 레퍼런스 U, p. 156.
70. 같은 책, p. 136, n. 2.
71. 같은 책, p. 206.
72. 같은 책, p. 211.
73. Turner, in 레퍼런스 DD, p. 40.
74. Barnett et al., 레퍼런스 HH, p. 214.
75. Toback, 레퍼런스 U, p. 59.

76. 같은 책, p. 61.
77. Wikipedia, s.v. “Gravitational Lens,” last modified October 12, 2016, https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_lens (accessed October 14, 2016).
78. 같은 책
79. Toback, 레퍼런스 U, p. 168.
80. 같은 책, p. 225.
81. 같은 책, p. 210.
82. 같은 책, p. 211.
83. Wikipedia, s.v. “Supernova Cosmology Project,” last modified July 25, 2016, https://en.wikipedia.org/wiki/Supernova_Cosmology_Project (accessed October 14, 2016).
84. Turner, in 레퍼런스 DD, p. 40.
85. Fred Bortz는 이 기계들의 개발과 이를 이용해 성취한 발견을 청소년을 위한 그의 시리즈인 Exploring the Subatomic World (레퍼런스 EE)에 속한 책인 Understanding the Large Hadron Collider에 순서대로 간략하게 아주 잘 요약하고 있다(그리고 간편히 정보를 얻을 수 있다는 면에서 성인들에게도 잘 맞으리라고 생각된다).
86. Barnett 외, 레퍼런스 HH, p. 134.
87. 같은 책, p. 124.
88. Bortz, 레퍼런스 EE, p. 53, 원형충돌기와 국제선형충돌기가 일본에서 건설될 예정이며 현재 설계 중이라고 언급하고 있다.
89. 달리 주석이 달린 곳을 제외하고 이 자료는 Wikipedia, s.v. “Colliders,” last modified October 1, 2016, <https://en.wikipedia.org/wiki/Collider> (accessed October 14, 2016)에서 발췌되었다.
90. Bortz, 레퍼런스 EE, p. 53. 이 충돌기는 중국 “힉스 공장”으로 묘사되고 있다.
91. 같은 책, “매우” 큰 강입자충돌기가 논의에 막 들어간 초기 단계이다.
92. Wikipedia, s.v. “Large Hadron Collider,” last modified October 12, 2016, https://en.wikipedia.org/wiki/Large_Hadron_Collider (accessed October 14, 2016).
93. Barnett et al., 레퍼런스 HH, p. 226.
94. 같은 책
95. Michael Riordan, Guido Tonelli, and Sau Lan Wu, “The Higgs at Last,” in 레퍼런스 DD, p. 4.
96. Barnett et al., 레퍼런스 HH, p. 215.
97. 같은 책, p. 212.
98. 퀘크, 중성미자, 희스입자를 포함한 표준모형의 많은 입자는 매우 재미있고, 잘 읽히며, 그림으로 잘 표현되어 있는 프레드 보츠의 청소년을 위한 책 시리즈인 Exploring the Subatomic World(레퍼런스 EE)에 각각 설명되어 있다.
99. Bose는 양자역학에 대한 1920년의 초기연구로 알려졌다. 그는 19장에서 설명된 것처럼 초전도성을 설명한다고 현재 우리에게 알려진 “보스-아인슈타인 응축”을 주장했다.
100. Wikipedia, s.v. “Elementary Particle,” last modified October 11, 2016, https://en.wikipedia.org/wiki/Elementary_particle.

- org/wiki/Elementary_particle (accessed October 12, 2016).
101. Lincoln, “The Inner Life of Quarks,” in 레퍼런스 DD, p. 15.
 102. 같은 책, p. 15.
 103. Bortz, 레퍼런스 B, p. 62.
 104. 같은 책, p. 143.
 105. 같은 책, p. 62.
 106. 같은 책, p. 72.
 107. Martin Hirsch, Heinrich Päs, and Werner Porod, “Ghostly Beacons of New Physics,” in 레퍼런스 DD, p. 25.
 108. Bortz, 레퍼런스 B, p. 147.
 109. Barnett, et al., 레퍼런스 HH, p. 212.
 110. Bortz, 레퍼런스 B, p. 145.
 111. Barnett et al., 레퍼런스 HH, p. 212.
 112. 같은 책
 113. Bortz, 레퍼런스 B, p. 92–95.
 114. 파인만은 일반 대중에게 시리즈 강의를 하며 이 방법과 이 도해들 중 몇을 설명했다. 이 강의들은 그의 책 QED—The Strange Theory of Light and Matter(레퍼런스 Q)에 축소해 정리되어 있다.
 115. Bortz, 레퍼런스 B, p. 148.
 116. 같은 책
 117. K. C. Cole, “The Strange Second Life of String Theory,” Quanta Magazine, September 15, 2016, <https://www.quantamagazine.org/20160915-string-theorys-strange-second-life/> (accessed October 17, 2016).

10장: 5부에 대한소개

1. 원자의 중심 개념 하나가 우리를 둘러싼 모든 것을 설명한다는 데서 “간결하다”는 의미이다.
2. Wikipedia, s.v. “Eric Scerri,” last modified September 27, 2016 (accessed October 15, 2016)에 의하면, 세리는 LA 캘리포니아대학교의 강사로, (국제 권위자 리뷰 저널인) Foundations of Chemistry 거의 설립자이자 편집장이며, 주기율표의 역사와 철학에 대한 세계적 권위자이다. 그의 책 The Periodic Table, 레퍼런스 D, p. 247에서 세리는 다음과 같이 적고 있다. “이 장의 목표는 주기율 시스템이 양자역학으로 간략히 설명되는지 아닌지를 정하지 못했다. 상황이 좀 더 미묘하기 때문이다.” 그가 말한 이러한 문맥인 “주기율 시스템은 양자역학으로 간략히 설명된다.”에서 “감축”을 정의하는데 있어 특히 그렇다.” 그는 말을 이어간다. “그건 오히려 감축의 정도인지, 양자역학에 의해 제공된 설명의 정도인지의 문제이다. 대부분의 화학자와 교육자들이 감축은 완전하다고 믿는 듯 보이는 반면, 양자론으로 얼마나 엄격히 설명되는지를 질문해 보는데 아마도 어떤 이익이 있을 수도 있는 것이다. 결국 양자역학이 아직 완전히 주기율표의 세부사항

을 추론할 수는 없다는 것이 그다지 놀라운 사실은 아니다. 주기율표는 양자역학의 현미경적인 세계에서 너무 멀리 떨어진 차원에서 실증적 자료를 모아 놓고 있기 때문이다.”

3. Wikipedia, “Chemical Element”, last modified October 13, 2016, accessed October 15, 2016.
4. 레퍼런스 D, starting on pp. 183, and p. 205.

11장: 수소 원자 전자의 에너지, 운동량, 그리고 공간상태

1. 사실 각운동량의 제곱이 여기서 논의하는 양자번호 ℓ 을 만든다. 각운동량의 제곱 = $\ell(\ell+1)(\hbar/2\pi)^2$ 다. 여기서 또다시 플랑크 상수가 등장한다.
2. 각운동량의 z 요소는 $m\hbar/2\pi$ 이고 “ m ”은 m 의 벡터가 자기장의 방향에 놓여있는 ℓ 의 벡터 부분만이기 때문에 범위 $-\ell$ 에서 $+\ell$ 까지로 한정된다. ℓ 의 벡터 부분만이므로, m 은 언제나 강도에서 ℓ 의 값과 같거나 작다. 또한 m 의 이 범위는 슈뢰딩거 방정식의 솔루션에서 직접적으로 얻는다. 이 범위 밖에서 m 을 갖는 솔루션은 간단히 말해 없다.

12장: 스피ن 자기력

1. 이것은 Leighton, 레퍼런스 F, p. 668에 “one of the greatest successes of theoretical physics.”로 묘사되어 있다.
2. 같은 연구에서 디랙은 또한 전자와 같으나 음전하보다는 양전하를 띠는, 양전자의 존재를 예측한다. 양전자는 뒤이어 발견되었다. “반물질”로 불리게 되는 것의 첫 등장이었다. 그렇게 불리게 된 이유는 양전자와 접촉된 전자는 큰 에너지를 방출하며 둘 모두가 소멸되기 때문이었다. 리차드 파인만은 9장에서 반물질에 대한 하위섹션에서 설명된 것처럼 반물질에 대한 생각을 재미로 극한까지 발전시켜 보았다.
3. 그리고 여기 또다시 플랑크 상수가 등장한다. 독립적으로 디랙의 계산의 결과로!
4. 스피ن과 자기 모멘트의 더욱 완전한 설명을 위해선, Leighton, 레퍼런스 F, p. 185를 참고 한다.

13장: 배타와 주기율표

1. Leighton, 레퍼런스 F, Figure 7-5, p. 251.
2. 이것은 14장에서 좀 더 설명된다. 좌측으로인 이유는 완성된 p블록 하위껍질 너머에 전자의 수가 더 적으면, 각 전자는 덜 단단히 잡혀 있고 반응으로 더 쉽게 잃을 수 있기 때문이다. 더 위쪽으로인 이유는 각 원자에 대해 배타는 전자가 더욱 단단히 결합된 낮은 에너지 상태를 점유하는 것을 막기 때문이다. (기둥의 훨씬 위쪽에 있는 더 무거운 원자의 전자에 특히 가능한) 바깥쪽의 더 높은 에너지 상태는 그다지 단단히 결합하지 않기 때문이다. 이는 이들 좌편 원자의 가장 바깥쪽의 전자는 (완전히 채워진 안쪽 전자 껍질에 의해) 핵의 양성자가 끌어 당기는 것으로부터 대부분 차단되기 때문이다. 표의 우측 원소의 원자에는 반대가 적용된다. 이 원자들은 에너지 껍질을 완전히 채우는데 더욱 소유욕이 강해지기 때문이다. 껍질이 채워지려는데 가까울수록 더욱 오른쪽의 원소들에 해당된다. 이 경우 더욱 가벼운 원자의 가장 바깥쪽 전자는 핵에 더욱 가까운,

더욱 낮고 더욱 단단히 결합하는 에너지 상태가 가능하고, 그래서 원자는 표의 우편 기둥의 더욱 아래쪽에 위치한 원소에 대해 더욱 소유욕이 강하고 더욱 반응적이다. 이러한 주장은 표의 맨 오른쪽 기둥의 비활성기체 원소의 원자에는 적용되지 않는다.

15장: 화학적 결합의 몇 가지 형태, 예시

1. 화학에서 전자 구조의 이해를 제공하는 양자역학의 중요성은 몇몇 현대의 일반 화학 책에서 강조된다. 가령 레퍼런스 H와 같은 책의 첫 장은 수소원자에 대한 슈뢰딩거의 방정식과 그 솔루션의 설명으로 시작되며, 더 나아가 나머지 원소의 전자 구조와 분자의 형태를 이해하는데 활용된다.
2. 분리된 탄소 원자의 전자 구조는 두개의 점유된 공간 1s 상태(하나는 +스핀을 갖는 전자이고 하나는 -스핀을 갖는 전자의)와 두개의 점유된 공간 2s 상태, 두개의 다른 반이 점유된 2p 상태로 구성된다. 그러나 2s와 2p 상태의 에너지는 서로 너무 가까워서 이 상태들은 가끔 합쳐져, 즉, 하이브리드되어 다른 원자와의 결합에서 전체 에너지를 낮춘다. 이렇게 하면 이들은 총 상태의 같은 총 수를 형성하나 몇몇 공간상태는 이루어졌던 공간상태와는 다른 형태로 되고 다른 각 방향이 된다.
3. Pauling, 레퍼런스 P, p. 111.
4. Private communication with L. Howard Holley, with 레퍼런스 to Martin Chaplin, "Water Structure and Science," London South Bank University, June 22, 2016, <http://www1.lsbu.ac.uk/water/> (accessed October 16, 2016).
5. 이러한 하이브리드화는 위에서 설명한 것처럼 탄소 원자에서 발생하는 것과 어떤 면에서 유사하다.

17장: 절연체, 그리고 보통 금속과 반도체의 전기적 전도

1. Kittel, 레퍼런스 V, p. 159. 전선이나 회로의 저항은 음으로 측정된다. 전선이나 회로에 적용된 전압을, 암페어로 측정되며 결과적으로 흐르는 전류로 나눈 값으로 정의된다. 금속, 절연체, 반도체의 전기 전류에 대한 고유저항은 ohm·cm으로 대개 측정된다. 물질의 길이로 곱하고 단면적으로 나누면 물질의 실제 조각의 저항값이 나온다.
2. 자유 전자에 대한 슈뢰딩거의 솔루션은 Kittel, 레퍼런스 V의 6장에 잘 설명되어 있다.
3. 페르미 레벨까지 점유된 상태의 수는 다루고 있는 금속성 표본에서 원자의 수에 정비례 한다. 작은 샘플이지만 말 그대로 수십억개이다. 표본이 클수록 연속적인 에너지레벨 간의 에너지차이는 더 작아지며 어떤 에너지레벨에도 가능한 상태의 수는 더 많아진다. 그러나 이와 동시에 원자와 전자의 수가 증가되고, 이 상태는 같은 페르미 레벨에 추가적인 전자에 의해 점유된다. 그러므로 금속성 표본의 양과는 별도로 같은 페르미 레벨 및 관련 물리적 특성이 생성된다.
4. Chapter 7 of Kittel, 레퍼런스 V.
5. 같은 책, p. 128.

18장: 나노기술과 5부 소개

1. Rosenblum, 레퍼런스 X, p. 116.
2. Katherine Bourzac, “Nano-Architecture,” MIT Technology Review 118, no. 2 (March/April): 35.
3. Julie Shapiro, “Breakthrough: ‘A Metal That’s (Almost) Lighter Than Air,’” Time, November 2, 2015, p. 25.

19장: 초전도체 I

1. 이것은 존 바든의 두번째 노벨상이었다. 첫번째는 23장에 나와 있다. 골프광인 그는 “흠, 노벨상 두 개면 아마 홀인원 하나보다는 낫겠군.”하고 말했다고 보츠, 레퍼런스 B, p. 130에 나온다. 이 훌륭한 역사서적을 통해 이 책에서 언급한 많은 물리학자들의 추가적인 짧은 전기를 좀 더 들려보는 것도 좋을 것 같다.
2. “고온”은 상대적인 의미이다. 더욱 최근에 개발된 “고온” 초전도체는 138 켐빈도*처럼 충분히 높은 온도에서 초전도를 수행한다. 77켈빈도에서 끓는 액체질소에서 냉각될 정도로 높은 온도이며, 현재 MRI 자기 시스템에서 사용되는 초전도체보다 훨씬 높은 온도이다. 그러나 24장의 파트에서 논의된 것처럼 논점은 실용적인 형태로 생산될 수 있는가이며 그 비용은 어느 정도인가이다 (*Wikipedia, s.v. “High-Temperature Superconductivity,” last modified October 20, 2016, https://en.wikipedia.org/wiki/High-temperature_superconductivity (accessed October 22, 2016).
3. 또 다른 흥미롭고 어떤 면에서 양자현상과 유사한 현상이나 현재로선 실용적인 중요성이 전혀 없는 것은 초유동이다. 액체 헬륨은 절대 0도에서 겨우 화씨 4도[섭씨 2도] 높은 온도에서 점성을 잃고, 훨씬 증대된 열 전도성을 보이는 상태로 전이한다. 이는 초전도체가 저항없이 전기를 전도하는 능력과 유사하다. 어떤 거품도 생성하지 않으면서 끓으며, 단지 모든 표면이 충분히 낮은 온도로 유지되도록 하면서 더 낮은 레벨에 이르기 위해 이를 담고 있는 용기의 벽을 타고 올라가게 된다.
4. “Go Ahead for Japanese Maglev,” Maglev, May 16, 2011, <http://www.maglev.net/news/go-ahead-for-japanese-maglev> (accessed October 24, 2016).
5. Rosenblum and Kuttner, 레퍼런스 X, p. 126.
6. MRI는 원래 “핵자기공명(NMR)”이라고 불렸다. (몸을 통해 전달될 때) 원자(예를 들면 인 원자)핵스핀이 체내에서 더 높은 에너지 스핀 상태로 전이를 생성하는 (라디오파 광자에너지에) 정확히 해당되는 주파수의 라디오 전파의 공명이었기 때문이다. (어떤 환자들은 “핵”이란 단어를 방사능과 관련시켰기 때문에, 제조업체는 “MRI 기계”라고 이 장비를 부르기로 결정했다.) 그런 뒤에 이러한 스핀이 낮은 에너지 스핀 상태로 전이되어 돌아갈 때, 조직의 형태와 건강에 대한 정보를 포함한 진동수의 라디오 전파를 발산한다. 이러한 파동의 중심 진동수가 신체가 있는 자기장에 달려있기 때문에, 주요 초전도 배경 자기장을 설정하고 작은 자석을 사용해 x, y, z 방향으로 다양화하여, 이러한 전송된 정보의 비트의 위치는 이들의 x, y, z 위치를 기준으로 (작은 주파수 변화에 의해) “식별될” 수 있다. 이 정보가 컴퓨터를 사용해 모여지면 여러 조직의 위치와 건강상태를 보여주는 이미지를 제공하는데 사용될 수 있다. 이들 x, y, z 자석이 켜지고 끄지는

펄스는 초전도 자석의 높은 자기장에 끌리면 갑작스런 힘을 발생시키며, 이러한 힘의 갑작스런 기계적 충격으로 큰 스타카토음 또는 클릭음, 기이하게 연속되는 클릭음, 짧고 거친 우르릉 소리를 들게 되는 것이다.

7. 자기장의 강도에 대한 감각은 21장에서 제공된다.
8. 이것은 위에서 설명한 기계 자체의 자석에서 나오는 종류의 더 큰 소리 형태 중 하나는 아니다.
9. SQUIDs는 초전도 링 내에 자기장의 흐름* 이 양자화되는 양자 조건을 사용한다. (*흐름 Flux은 자기장의 강도 곱하기 자기장이 통과하는 공간이다.) 자기적 흐름의 각 양자가 링으로 들어가면 링은 전기 전압 신호를 생성한다. 그래서 이러한 양자 또는 이러한 양자의 파편의 수조차도 자기장의 강도의 측정으로 셀 수 있다. 2백만 × 십억 분의 1테슬라(2×10^{-15} T)가 감지된다. 비교를 위해 앞에서 언급한 것처럼 MRI 자석에서 사용되는 일반 자기장과 모터와 발전기에서 강자성 물질로 만들어지는 최대 자기장은 약 2T 정도이고, 일반 냉장고 자석은 약 0.2T 정도를 생성하며, 지구의 자기장은 약 50십만분의 1테슬라(5×10^{-5} T)이다.
10. Stefania Della Penna, Vittorio Pizzella, and Gian Luca Romani, "Impact of Superconducting Devices on Imaging in Neuroscience," Superconductivity News Forum Global Edition (October 29, 2013), <http://snf.ieeeccsc.org/abstracts/cr36-impactsuperconducting-devices-imaging-neuroscience> (accessed September 15, 2016); and S. Della Penna, V. Pizzella, and G. L. Romani, "Impact of Superconducting Devices on Imaging in Neuroscience" (presentation of pre-published plenary paper CR36), Superconductivity News Forum Global Edition (January 17, 2014), <http://snf.ieeeccsc.org/abstracts/crp39-impactsuperconducting-devices-imaging-neuroscience-0> (accessed September 15, 2016).
11. Leyna P. De Haro 외, "Magnetic Relaxometry as Applied to Sensitive Cancer Detection and Localization," Superconductivity News Forum Global Edition (July 2016), <http://snf.ieeeccsc.org/abstracts/st518-magnetic-relaxometry-applied-sensitive-cancer-detection-and-localization> (accessed October 24, 2016).
12. 2016년 9월 16일 Cardiomag의 회장이자 CEO인 Carl H. Rosner와의 개인적 토론 중.
13. IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity News Forum, no. 3 (January 2008).
14. Intelligence Advanced Research Projects Agency, "IARPA Launches Program to Develop a Superconducting Computer," IARPA press release, December 3, 2014, through Superconductivity News Forum Global Edition, http://snf.ieeeccsc.org/sites/ieeeccsc.org/files/HE93_The%20C3%20IARPA%20Program_finally%20announcedfinal%20link.pdf (accessed October 24, 2016).
15. Oleg A. Mukhanov, "Recent Progress in Digital Superconducting Electronics," Superconductivity News Forum Global Edition (July 2015), <http://snf.ieeeccsc.org/abstracts/crp54-recent-progress-digital-superconducting-electronics> (accessed October 24, 2016).

20장: 전력을 위한 융합과 국방을 위한 레이저

1. Institute for Electrical and Electronic Engineers의 잡지에서 Marin Lamonica의 보고, IEEE Spectrum (North America), April 2015, p. 12, and by Kevin Bullis, MIT Technology Review 118, no. 3 (May/June 2015): 13.
 2. Lev Grossman, "A Star Is Born," Time, November 2, 2015, p. 30.
 3. David Kramer, "ITER Cost and Schedule Still Not Pinned Down," Physics Today, January 2016, p. 30.
 4. Thomas Rummel, Beate Kemnitz, Thomas Klinger, and Isabella Milch, "First Plasma in the Superconducting Fusion Device Wendelstein 7-X," Superconductivity News Forum Global Edition (January 2016), http://snf.ieee-csc.org/sites/ieecsc.org/files/documents/snfp/abstracts/HP104_RummelTh_First%20plasma%20in%20W7-X_012016.pdf, and references therein (accessed October 24, 2016).
 5. Grossman, "Star Is Born."
6. 같은 책
7. Rachel Courtland, "Laser Fusion's Brightest Hope: The National Ignition Facility Houses the World's Most Powerful Laser. Is It Enough to Ignite a Fusion Revolution?" IEEE Spectrum, March 27, 2013, <http://spectrum.ieee.org/energy/nuclear/laser-fusionsbrightest-hope> (accessed October 24, 2016).
 8. 이것은 미국이 매 순간 평균적으로 소비하는 전력의 약 1000배 정도이다. 그러나 여기서 전력은 에너지 전달률임을 기억하자. 그리고 이러한 레이저의 에너지는 단지 40억분의 1초에 전달된다. 만약 이들의 에너지가 훨씬 더 느리게 가령 1초 안에 전달되면, 전력은 여전히 충분히 상당할 것이다. 약 2메가와트일 것이고, 만약 이러한 비율로 계속해서 전달된다면 2천 가구를 평균적으로 밝힐 수 있는 정도이다.
 9. Wikipedia, s.v. "National Ignition Facility," last modified September 14, 2016, https://en.wikipedia.org/wiki/National_Ignition_Facility (accessed November 4, 2016).

21장: 자성, 자석, 자기물질, 그리고 그 응용

1. 반자성체는 높은 자기장의 위치에서 밀려나 낮은 자기장의 위치에 자리하며, 밀어내는 강도는 자기장 "변화도"라고 부르는, 자기장이 거리의 변화에 얼마나 많이 변하느냐에 달려 있다.
2. 테슬라는 mks (미터, 킬로그램, 초)단위 국제표준으로, "자기 유도" 즉, 보통 "자기장"으로 언급되는 것의 단위이다. 1테슬라는 10,000가우스에 해당한다. 가우스는 자기장의 cgs (센티미터, 그램, 초)단위이다.
3. Wikipedia, s.v. "Francis Bitter," last modified July 14, 2016, https://en.wikipedia.org/wiki/Francis_Bitter (accessed October 21, 2016).
4. 솔레노이드는 일반적으로 관 구조 둘레에 근접하게 선이 첫번째 층 위에 앞뒤로 유사하게 추가적인 층으로 감겨 있다.

22장: 그래핀, 나노튜브, 그리고 "꿈의" 응용품 한가지

1. Wikipedia, s.v. "Graphene," last modified October 15, 2016, <https://en.wikipedia.org/wiki/Graphene> (accessed October 21, 2016).
2. 같은 책
3. 같은 책
4. Warner et al., 레퍼런스 JJ.
5. Andre K. Geim, "Atomic Scale Legos," *Scientific American* 311 (November 18, 2014): 50-51.
6. "Introducing the Micro-Super-Capacitor: Laser Etched Graphene Brings Moore's Law to Energy Storage," *IEEE Spectrum*, October 2015, pp. 41-45.
7. Katherine Bourzac, "Bend by Design," *Scientific American* 311 (November 18, 2014): 19.
8. John Pavlus, "The Search for a New Machine," *Scientific American* 312 (April 14, 2015): 58-63.
9. Wikipedia, s.v. "Graphite," last modified October 21, 2016, <https://en.wikipedia.org/wiki/Graphite> (accessed October 21, 2016).
10. Wikipedia, s.v. "Fullerene," Wikipedia, last modified October 21, 2016, <https://en.wikipedia.org/wiki/Fullerene> (accessed October 21, 2016).
11. Wikipedia, s.v. "Carbon Nanotube," last modified October 19, 2016, https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_nanotube (accessed October 21, 2016).
12. 같은 책
13. 같은 책
14. 같은 책
15. "Konstantin E. Tsiolkovsky," Aeronautics Learning Laboratory for Science Technology, and Research (ALLSTAR) Network, March 12, 2004 (retrieved June 10, 2015).
16. Bob Hirschfeld, "Space Elevator Gets Lift," TechTV, G4 Media, January 31, 2002, https://web.archive.org/web/20050608080057/http://www.g4tv.com/techtv/vault/features/35657/Space_Elevator_Gets_Lift.html (archived from the original on June 8, 2005; retrieved September 13, 2007): "이 개념은 러시아 작가인 K. E. Tsiolkovsky가 자신의 책 'Speculations about Earth and Sky and on Vesta.'에서 1895년에 처음 소개했다."
17. Wikipedia, s.v. "Space Elevator," last modified October 11, 2016, https://en.wikipedia.org/wiki/Space_elevator (accessed October 21, 2016).
18. Wikipedia, s.v. "Carbon-Fiber-Reinforced Polymer," Wikipedia, June 23, 2016, https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon-fiber-reinforced_polymer last modified October 20, 2016 (accessed October 21, 2016).
19. Wikipedia, s.v. "Boeing 787 Dreamliner," last modified October 20, 2016, https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_787_Dreamliner (accessed October 21, 2016).
20. 보잉은 비행기에 리튬이온 전지를 이용한 새로운 설계를 사용했고 결과는 과열되어 화재의 위험이 있었다. 그 비행기는 당시 비행 금지되었다. 보잉은 전지를 재설계했고, 문제를 해결했다. 리튬이온 전지는 화학 및 재료과학 혁신의 홀륭한 예이다. 이것은 채워

진 원자가 껍질의 바깥쪽 전자의 단위 중량 밀도당 가장 높은 원소를 효과적으로 이용하여 빛을 만들고 전기 및 전자 기기를 위한 강력한 보조용품으로, 이러한 기기엔 전기 및 하이브리드 전기자동차와 보잉 787 드림라이너가 포함된다.

21. 처음엔 워싱턴 DC의 미항공우주박물관과 (여러 곳 중) 디트로이트 지역의 헨리 포드박물관의 IMAX에서 제공되었으나 현재 3-D 블루레이와 DVD로 제공된다. 다음 인터넷 주소로 이 영화의 트레일러를 볼 수 있다. <http://www.youtube.com/watch?v=dpoxMVw1EM4>. 22. Wikipedia, “Boeing 787 Dreamliner.” Wikipedia, s.v. “Airbus A350 XWB,” last modified October 21, 2016, https://en.wikipedia.org/wiki/Airbus_A350_XWB (accessed October 21, 2016).

23장: 반도체와 전자기기의 응용

1. 수많은 형태의 트랜지스터가 있으며 여러 물리적 메커니즘을 사용해 작동된다. 여기선 단지 하나의 형태만을 설명했으나 이들은 모두 한 터미널에의 입력이 다른 터미널을 통한 전류의 흐름을 제어하는 이러한 특성을 갖는다.
2. 레퍼런스 X, p. 119.
3. Charles Q. Choi, “Nitrogen Supercharges Super-Capacitors,” IEEE Spectrum (North America), February 2016, p. 14.
4. 같은 책, p. 9.
5. 같은 책, p. 12.
6. “Survival in the Battery Business,” MIT Technology Review 118, no. 4, July/August 2015, p. 35.
7. “SolarCity’s (\$750 million) Gigafactory,” MIT Technology Review 119, no. 2, March 2016, p. 54.
8. IEEE Spectrum (North America), September 2016, p. 9.

24장: 초전도체 II

1. 액체 질소는 산소를 액화에 의해 상업적으로 분리한 부산물로 얻을 수 있다. 대략 토마토 주스정도의 비용이 듈다. 액체 질소의 끓는점은 77 켈빈도로, 절대 0도에서 일반 상온인 약 300 켈빈도까지의 4분의 1 지점이다.
2. René L. Flükiger, “Advances in MgB₂ Conductors,” Superconductivity News Forum Global Edition, October 2014, <http://snf.ieee-csc.org/abstracts/crp46-advancesmgb2-conductors-annotated-plenary-slide-presentation> (accessed October 24, 2016), on MgB₂ wires and the short review of applications therein.
3. 메가볼트암페어(MVA)의 측정은 전력 흐름의 저항적 요소와 반응적 요소 모두를 고려하는 방법이다. 저항력은 가정의 배열전구나 토스터를 작동시키는데 사용되는 것과 같다. 1MVA는 저항력만의 1메가와트라는 점을 참고한다. 반응력은 대개 전기장 또는 자기장에 들어가거나 거기에서 나오는 에너지가 관련되며 후자는 특히 모터와 발전기에서 발생한다. 1MVA는 미국의 약 1천 가정에 시간 평균적으로 필요한 전력이다

4. 이어서 10 MVA 발전기가 GE에서 제작되고 테스트되었고, 다른 발전기들이 세계 곳곳에서 만들어지고 테스트되었다. 대표적으로는 일본의 70 MVA와 그 뒤 200 MVA 발전기가 1980년대에 건축되고 테스트되었다. 이 기계들은 전력 생산을 위한 상업적 크기이고 상업적 가동되는 가장 큰 발전기의 크기에 접근하기 시작한다. 보통 약 1000 MVA이다. 그러나 전력업계는 아직 이 기계들 중 하나도 상업적으로 설치하지 않았다. 내용은 이번 장에 이은 “에너지 자원과 지구온난화” 섹션을 참조한다.
5. Mark Stemmle, Frank Schmidt, Frank Merschel, and Matthias Noe, “Ampacity Project—Update on World’s First Superconducting Cable and Fault Current Limiter Installation in a German City Center,” Superconductivity News Forum Global Edition, October 2015, <http://snf.ieecsc.org/abstracts/stp475-ampacity-project-%E2%80%93-update-world%E2%80%99s-first-superconducting-cable-and-fault-current> (accessed October 24, 2016).
6. 예를 들어, 전선에 (상 간 또는 상-지면 간 전기적 연결을 만드는) 합선을 일으키는 나뭇 가지(또는 운 나쁜 다행쥐)에 의해 발생되는 폴트. 이러한 폴트는 해소가 될 때까지 빛이 깜빡이거나 나가게 만든다.
7. 전력은 전기에너지가 생성되거나, 전송되거나, 또는 사용되는 비율이다. 어떤 순간에도 이것은 상 간(또는 가정에선 상-중성 간) 전압 곱하기 상 간(또는 상-중성 간) 전류이다. 전선은 110볼트로 수만 가정에 요구되는 전류를 운반하기 위해 과도하게 두껍고 무거워야 할 것이기 때문에, 같은 전력을 타워에서 타워로 미국내에서 운반하는데 오직 적은 전류와 작은 직경의 경량 전선만 필요토록 하기 위해 변압기가 처음에 (발전기로부터의) 전압을 매우 높은 수준(수십만 볼트)으로 높이기 위해 사용된다. 그런 뒤에 크게 매우 높은 전압의 변압기와 결과적으로 많은 중간 전력의 변압기가 변전소에서 전압을 다시 낮춰 이웃으로 보낼 수 있도록 한다. 그리고 난 뒤 더욱 작은 것이 더 많이 있고, 그 뒤에 더 작은 유입변압기가 이어서 가정에서 사용하는 수준의 전압으로 낮춘다.
8. 이전의 ASC 회의에 관해선, 발표된 논문들은 IEEE Transactions on Applied Superconductivity에서 검토되고 발행된다. 예를 들면, 오레건주 포틀랜드에서 개최된 2012년도 회의는 이 저널 vol. 23, no. 3에 있다.

부록 A

1. 양의 마루에서 다음 양의 마루까지의 거리는 그림 A.1 ©에 나타난 **E**장과 **B**장 사인파동이 모두 같으며 이 거리는 전자기파동의 파장 w 로 정의된다. 전자기파동의 고전적 관점에서 마루값(진폭)은 0까지 어느 값도 가질 수 있으며 파동의 에너지는 상용하여 0까지 어느 값도 가질 수 있다. 그러나 사실 전자기에너지는 양자라 부르는 나누어지지 않는 덩이로 나타난다. 그리고 각 양자의 에너지는 파동의 파장(또는 그와 동등한 진동수)과 관련된다.

부록 B

1. 우린 이제 하나 또는 그 이상의 다른 원소에서부터 원소의 형성이 화학적 과정이 아닌,

- 핵 분열이나 핵 융합에 의해 발생할 수 있다는 것을 안다. (20장에서 논의하고 있다.)
2. 이 책에서 자주 에릭 세리에 의한 자료를 참조하고 있다. 세리 교수는 UCLA에서 화학과 역사, 과학철학을 가르치고 있다. 그는 저널지 Foundations of Chemistry의 편집장이다. 여기선 그의 책 The Periodic Table (레퍼런스 D, p. 45)에서 인용하고 있다.
3. 같은 책, p. 112.
4. Scerri, 레퍼런스 D, p. 112의 표는 이미 다시 그려졌다. 로마숫자 표기의 출처가 멘델레예프인지 세리인지는 명확치 않다.
5. 같은 책, page 112의 맨 끝에서 시작.
6. Kean, 레퍼런스 R, p. 49.
7. 같은 책, p. 50.
8. Scerri, 레퍼런스 D, p. 101.
9. 같은 책, p. xiii.

부록 C

1. 레퍼런스 Z, p. 159–68.
2. 같은 책, p. 161.
3. Philip Schindler et al., “A Quantum Information Processor with Trapped Ions,” New Journal of Physics15 (August 14, 2013): 123012, <http://arxiv.org/abs/1308.3096> (accessed October 24, 2016).
4. 핵자기공명은 의료진단 도구 MRI(자기공명이미징)에서 사용되는 핵심 물리적 과정이다. “핵”은 이 기기의 이름으로 사용되기에 너무 무서운 단어로 생각되었다. 19장에서 제조와 작동의 설명이 나온다.
5. Lieven M. K. Vandersypen et al., “Experimental Realization of Shor’s Quantum Factoring Algorithm Using Nuclear Magnetic Resonance,” Nature 414, no. 6866 (December 20–27, 2001): 883–87.
6. Nanyang Xu et al., “Quantum Factorization of 143 on a Dipolar-Coupling NMR System,” Cornell University Library, arXiv:1111.3726 (November 16, 2011).
7. 원자의 크기는 1 나노미터 = 10^{-9} 미터 = 다임 두께의 백만분의 1임을 참조한다.
8. Michelle Simmons, “Quantum Computing in Silicon and the Limits of Silicon Miniaturization—Michelle Simmons,” YouTube video, 43:27, Tat Institute of Fundamental Research의 이론과학을 위한 국제센터에서 발표된 그래핀, 마조라나 패르미온, 양자컴퓨터의 진보의 만남을 논의하는 부분부터, 2013년 5월 22일 이론과학을 위한 국제센터 포스팅, <https://www.youtube.com/watch?v=gDi3Jl6PuVc> (accessed September 16, 2016). 이것은 이 연구분야의 물리학자와 재료과학자들 간의 연구 그룹의 일부로 발표되었다. 매우 기술적이나, 개발의 역사를 나타낼 뿐 아니라 고려되는 물리시스템과 물질을 만들고 캐릭터화하는데 요구되는 과학적 도구의 복잡성에 대한 개념을 얻기 위해서도 봐둘 가치가 있다.
9. 칩 가공의 한 비표준적 부분에서 주사형 터널현미경(STM)의 바늘 끝의 정전기적 인력

은 실리콘 표면에 붙은 수소의 하나의 원자 굽기의 층에서 6개의 이웃한 원자를 선택적으로 제거하는데 사용된다. 이어진 포스핀 기체와 열에의 노출은 단 하나의 인 원자를 수소 제거에 의해 노출된 실리콘 원자 중 하나로 대체하는 결과를 낳는다. 이는 양자점을 형성한다.

10. Michelle Simmons, “Practical Quantum Computing Applications” (public presentation given at Science at the Shine Dome under the auspices of the Australian Academy of Sciences, session “Atomic-Scale Electronics”), the speech is available at “Atomic-Scale Electronics for Quantum Computing: Prof. Michelle Simmons—Science at the Shine Dome 15,” YouTube video, 14:42, posted by the Australian Academy of Science, May 28, 2015, <https://www.youtube.com/watch?v=hg2UUdQm26s&index=7&list=PL9DfjTxCPaXIJZgp6kBprILssqAEAnY8> (accessed September 16, 2016).
11. 모든 광자는 본질적으로 전자기적이며 편광된다. 이들의 조그만 전기장은 부록 A의 그림 A.1 ⑤에 관련 논의에서 묘사된 바와 같이 공간에서 시간에 따라 하나의 방향에서 번갈아 움직인다. 모든 편광 확률은 어느 두 개의 수직의 편광상태의, 예를 들면 수직과 수평 편광의 조합으로 나타날 수 있다.
12. 하나의 특정 논리 게이트인 (고정 비트로는 불가능한) CNOT 게이트는 (예를 들어) 오직 두번째 제어 큐비트가 (0과 반대인) 1 상태일 경우에만 목적 큐비트를 뒤집어서 동작된다. 또 다른 경우에서 이 프로세스를 특별하게 만드는 것은 두개의 큐비트가 CNOT 작동에서 얹히게 되어, 함께 연결돼 이들의 네 개의 소위 벨 상태 중 하나를 큐비트가 나중에 서로 얼마나 멀리 물리적으로 떨어지는 것과는 관계없이 나타낼 수 있다는 점이다.
13. 레퍼런스 Z, p. 161.
14. SQUIDs는 또한 예를 들어 심장의 기능을 모니터링하는 방법으로 매우 작은 자기장의 발견을 위해 사용되어 왔다. 19장에서 설명되었다.
15. M. Steffan, D. P. DiVincenzo, J. M. Crow, T. N. Theis, and M. B. Ketchen, “Quantum Computing: An IBM Perspective,” IBM Journal of Research and Development 55, no. 5, paper 13.
16. D-Wave.com을 통해 D-Wave는 언론에 공개했다: The Quantum Computing Company, “D-Wave Systems Breaks the 1000 Qubit Quantum Computing Barrier,” D-Wave Systems, Inc., June 22, 2015, <http://www.dwavesys.com/press-releases/d-wave-systems-breaks-1000-qubit-quantum-computing-barrier>.
17. 저온은 섭씨 단위로 편리하게 표현되나, (성취 가능한 가장 낮은 온도인) 절대 0도와 열음이 어느 온도인 273 켈빈도 사이의 켈빈 단위가 편리하다. 이러한 SQUID 기반 컴퓨터는 절대 0도에서 1도 위인 1켈빈도 근처에서 보통 동작한다.
18. Jeremy Hsu, “Google’s First Quantum Computer,” posted September 12, 2014, published in Superconductivity News Global Edition, September 22, 2014, <http://snf.ieee.org/pages/googles-first-quantum-computer> (accessed October 24, 2016); and “Progress in Quantum Computer Error Correction,” Superconductivity News Global Edition, June 2, 2014, <http://snf.ieee.org/pages/progress-in-quantum-computer-error-correction>

- snf.ieee.org/pages/progress-quantum-computer-error-correction (accessed October 24, 2016).
19. Lillian Childress, Ronald Walworth, and Mikhail Lukin, "Atom-like Crystal Defects: From Quantum Computers to Biological Sensors," Physics Today, October 2014, pp. 38-43.
 20. 같은 책, p. 41.

부록 D

1. Richtmyer, 레퍼런스 G, p. 167.
2. 바닥상태의 원자는 전자에 의해 점유된 가장 낮은 에너지 상태로, 배타가 요구하는 것처럼 스핀과 공간상태 조합마다 오직 하나의 전자만을 가짐을 기억한다.
3. 원소의 원자의 반경이 결정될 수 있는 한 방법은 그 원소 결정으로부터 x선 회절에 의해서이다. 특정 각도에서 x선은 결정의 x선 파장과 원자간 간격에 따른 방식으로 강도가 증가되어 그 결정에서 반사된다.
4. 하지만 가끔 아연, 카드뮴, 수은은 전이금속으로 간주되지 않기도 한다.

레퍼런스

- A. McEvoy, J. P., and Oscar Zarate. *Introducing Quantum Theory*. Cambridge, UK: Icon Books, 2004.
- B. Bortz, Alfred B. *Physics: Decade by Decade. Twentieth Century Science*. New York: Facts on File, 2007.
- C. Greene, Brian. *The Fabric of the Cosmos*. New York: Vintage Books, 2004.
- D. Scerri, Eric R. *The Periodic Table*. New York: Oxford University Press, 2007.
- E. Fine, Leonard W., and Herbert Beall. *Chemistry for Engineers and Scientists*. Orlando, FL: Saunders College Publishing, 1990.
- F. Leighton, Robert B. *Principles of Modern Physics*. New York: McGraw-Hill, 1959.
- G. Richtmyer, F. K., E. H. Kennard, and T. Lauritsen. *Introduction to Modern Physics*. New York: McGraw-Hill, 1955.
- H. Housecroft, Christine E., and Alan G. Sharpe. *Inorganic Chemistry*. 3rd ed. Edinburgh Gate, Harlow, England: Pearson Education, 2008.
- I. Sachs, Oliver. *Uncle Tungsten: Memories of a Chemical Boyhood*. New York: Alfred A. Knopf, 2001.
- J. Morrish, Allan H. *The Physical Principles of Magnetism*. New York: John Wiley & Sons, 1965.
- K. Kumar, Manjit. *Quantum: Einstein, Bohr, and the Great Debate about the Nature of Reality*. New York: Norton, 2010.
- L. Orzel, Chad. *How to Teach Physics to Your Dog*. New York: Scribner, 2009.
- M. Moore, Walter. *Schrödinger: Life and Thought*. Cambridge, UK, and New York: Cambridge University Press, 1992.
- N. Gordin, Michael D. *A Well-Ordered Thing: Demitrii Mendeleev and the Shadow of the Periodic Table*. New York: Basic Books, Perseus Books Group, 2004.
- O. Strathern, Paul. *Mendeleyev's Dream: The Quest for the Elements*. London, UK: Penguin Books, 2000.
- P. Pauling, Linus. *The Nature of the Chemical Bond*. 3rd ed. Ithaca, NY: Cornell University Press, 1960.
- Q. Feynman, Richard. *QED: The Strange Theory of Light and Matter*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1985.

- R. Kean, Sam. *The Disappearing Spoon, and Other True Tales of Madness, Love, and the History of the World from the Periodic Table of the Elements*. New York: Little, Brown, 2010.
- S. Gribbin, John. *In Search of Schrödinger's Cat: Quantum Physics and Reality*. New York: Bantam Books, 1984.
- T. Kuhn, Thomas S. *The Structure of Scientific Revolutions*. 50th anniv. ed. Chicago: University of Chicago Press, 2012.
- U. Toback, David. *Big Bang, Black Holes, No Math*. Dubuque, IA: Kendall Hunt, 2013.
- V. Kittel, Charles. *Introduction to Solid State Physics*. 6th ed. New York: Wiley & Sons, 1986.
- W. Hawking, Stephen. *A Brief History of Time*. New York: Bantam Books, 1988.
- X. Rosenblum, Bruce, and Fred Kuttner. *Quantum Enigma: Physics Encounters Consciousness*. New York: Oxford University Press, 2011.
- Y. Schumacher, Benjamin. *Quantum Mechanics: The Physics of the Microscopic World*. Chantilly, VA: Great Courses, 2009. DVD.
- Z. Gribbin, John. *Computing with Quantum Cats*. Amherst, NY: Prometheus Books, 2014.
- AA. Greene, Brian. *The Hidden Reality: Parallel Universes and the Deep Laws of the Cosmos*. New York: Alfred A. Knopf, 2011.
- BB. Susskind, Leonard. *The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics*. New York: Back Bay Books, 2008.
- CC. Parker, Barry. *Einstein's Brainchild: Relativity Made Relatively Easy*. Amherst, NY: Prometheus Books, 2007.
- DD. "Extreme Physics." Special issue, *Scientific American* 22, no. 2 (Summer 2013).
- EE. Bortz, Fred. *Exploring the Subatomic World*. 7 vols. New York: Cavendish Square, 2015–2016. Some volumes of this series are coauthored with B. H. Fields.
- FF. Bojowald, Martin. *Once Before Time: A Whole Story of the Universe*. New York, Vintage Books, 2010.
- GG. Coles, Peter. *Cosmology: A Very Short Introduction*. New York: Oxford University Press, 2001.
- HH. Barnett, R. Michael, Henry Muhy, and Helen R. Quinn. *The Charm of Strange Quarks*. New York: Springer-Verlag, 2000. II. Gubser, Steven S. *The Little Book of String Theory*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2010.
- JJ. Warner, Jamie H., Franziska Schaffel, Alicja Bachmatiuk, and Mark H. Rummel. *Graphene: Fundamentals and Emergent Applications*. New York: Elsevier, 2013.
- KK. Wiggins, Arthur W., and Charles M. Wynn. *The Human Side of Science* Amherst, NY: Prometheus Books, 2016.
- LL. Gribbon, John. *13.8: The Quest to Find the True Age of the Universe and the Theory of Everything*. New Haven, CT: Yale University Press, 2016.