



대입 과학논술 13 — 원자 구조·주기성

전자 배치 × 유효 핵전하 × 이온화 에너지로 읽는 주기성

컬러 PDF · 개인 영구 소장

이 PDF는 무료 샘플입니다

이 책의 앞표지와 앞 50쪽, 뒤표지를 읽어 보실 수 있습니다. 51쪽부터는 ssbook.kr에서 구매하시면 전체를 보실 수 있습니다.

ssbook.kr/book/nonsul-13

POD 정가 24,000원 → **14,400원** (60%)

ssbook.kr 홈페이지 안내

- **시리즈별 서가** — 인삼 · 오토파지 · 식물성 저탄고지 · 단식 · 생물리학 · 독립영양인간 · 중고등학교 교재 · 채식 · 라이프스타일 · 고대사
- **책마다 고유 주소** — 링크를 보내면 누구나 표지·소개·무료 샘플을 볼 수 있습니다
- **구매** — 회원가입(이메일 인증) 후 카드 결제(쿠키페이) → 내 서재에서 전체 컬러 PDF 내려받기
- **가격** — 종이책 POD 가격의 60%, 전 페이지 컬러 PDF
- **이용 범위** — 개인 영구 소장 가능, 공개 배포·재판매·공유 금지(내려받은 파일에는 구매자 정보가 표시됩니다)
- **책 신청 게시판** — 회원은 자유게시판에서 원하는 책 내용을 신청할 수 있습니다

고등학교 과학 논술 · 기본개념 → 기출 → 답안 패턴 → 실전

원자 구조· 주기성



원자 구조·주기성 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

대학 기출 11문항 · 2010~2025학년도

이광조 지음

MANIA

논술 화학

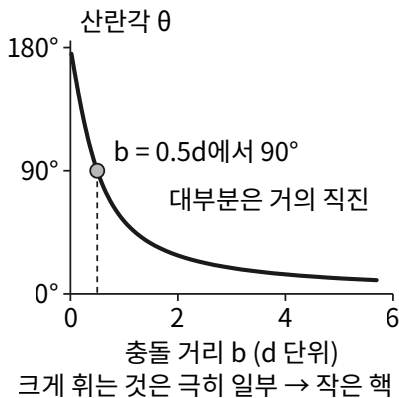
원자 구조·주기성

1부 기본개념편 · 2부 기출문제와 기본개념 · 3부 논술답안작성 패턴분석 · 4부 실전기출문제와 풀이과정

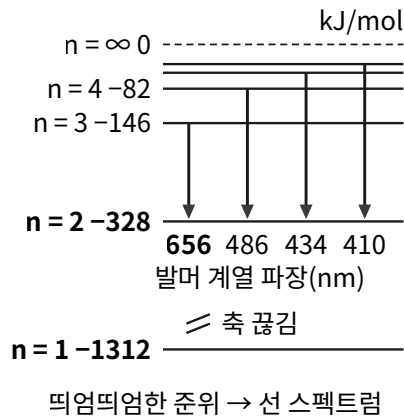
원자 구조·주기성 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

핵심 = 전자 배치 × 유효 핵전하 × 이온화 에너지 | 11문항 · 5개 대학 (2010~2025)

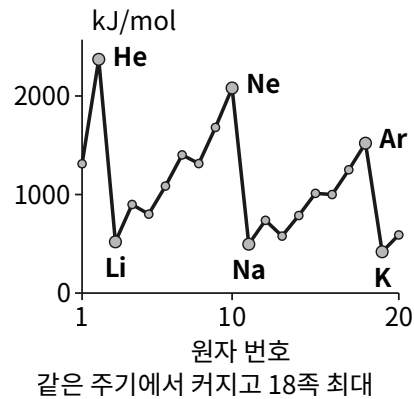
① 알파 입자 산란과 원자핵



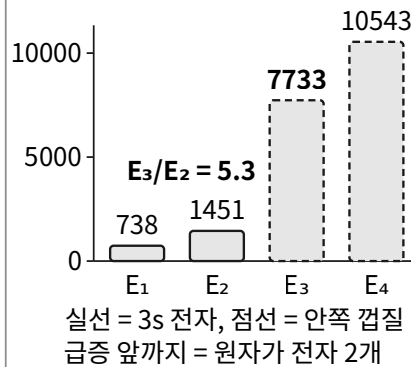
② 수소의 에너지 준위



③ 제1 이온화 에너지의 주기성



④ 순차 이온화 에너지: Mg



한 줄 요약: 전자 배치를 쓰고, 유효 핵전하로 크기와 에너지를 설명한다

그림 1. 원자 구조·주기성 단원의 그림 요약. ① 알파 입자 산란(충돌 거리가 작을수록 크게 휘다 — 원자핵의 발견), ② 수소 원자의 에너지 준위 $E_n = -1312/n^2$ kJ/mol와 발머 계열(656·486·434·410 nm), ③ 원자 번호 1~20의 제1 이온화 에너지(족마다 되풀이되는 톱니 모양), ④ 마그네슘의 순차 이온화 에너지($E_2 \rightarrow E_3$ 에서 5.3배 급증 — 원자가 전자 2개). 산란각·파장·비는 모두 계산했고, 이온화 에너지는 표준값이다.

한 줄 요약: 전자 배치를 쓰고, 유효 핵전하로 반지름과 이온화 에너지의 크기를 설명한다

연결 단원 → 화학 결합·분자 구조(15권) · 분자 간 힘(16권) · 산화·환원(13권) · 화학 전지

차례

기본개념편	11
제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가	12
기본개념편을 열며	14
제 1장 왜 원자 구조인가	16
1.1 불꽃의 색은 왜 원소마다 다른가	18
1.2 돌턴에서 슈뢰딩거까지 — 다섯 개의 원자 모형	19
1.3 원자는 얼마나 작고 텅 비었나	21
1.4 전자 껍질이라는 생각	22
1.5 이 책의 길 — 입자, 빛, 주소, 주기성, 판별	23
제 2장 전자의 발견: 음극선관 속의 빛	25
2.1 진공관에 높은 전압을 걸면	27
2.2 전기장과 자기장에서 휘는 방향	27
2.3 톰슨의 비전하 — 수소 이온보다 1840배	28
2.4 밀리컨의 기름방울 — 전하에는 최소 단위가 있다	30
2.5 톰슨의 건포도 푸딩 모형과 그 한계	31
제 3장 원자핵의 발견: 금박에서 튕겨 나온 알파 입자	34
3.1 실험 장치 — 라듐, 금박, 형광 스크린	36
3.2 예상과 결과 — 종이에 쏜 포탄이 되돌아오다	37
3.3 해석 — 작고 무거운 양전하 덩어리, 원자핵	38
3.4 충돌 거리와 산란각	39
3.5 러더퍼드 모형이 남긴 문제	41
제 4장 양성자·중성자와 동위 원소	43
4.1 양성자와 원자 번호	45
4.2 “질량이 두 배” 수수께끼와 중성자	46
4.3 질량수와 동위 원소 표기	47
4.4 평균 원자량 — 35.5의 비밀	48
4.5 원자핵의 크기 — 핵자는 뽀뽀이 들어찬 공	49
제 5장 빛과 선 스펙트럼: 원자의 지문	52
5.1 빛은 파동이자 알갱이	54
5.2 햇빛과 수소 방전관 — 연속 스펙트럼과 선 스펙트럼	57
5.3 원소의 지문 — 태양에서 먼저 찾은 헬륨	58
5.4 발머의 규칙 — 네 줄이 간단한 식을 따른다	58
5.5 띄엄띄엄한 빛은 띄엄띄엄한 에너지	59
제 6장 보어 모형: 에너지 준위를 계산하다	62
6.1 보어의 가정 — 정해진 궤도와 빛의 방출	64
6.2 에너지 준위 $E_n = -1312/n^2$ kJ/mol	65
6.3 스펙트럼 계열 — 어디로 떨어지느냐에 따라	66
6.4 이온화 에너지 — $n = 1$ 에서 ∞ 로	67
6.5 전자가 하나뿐인 이온 He^+ , Li^{2+}	68
6.6 실험값으로 상수를 검증하기	69
제 7장 오비탈과 양자수: 전자의 주소	72
7.1 보어 모형의 한계	74
7.2 전자는 파동이기도 하다 — 위치는 확률로만	74

7.3 오비탈의 모양 — s, p, d.....	76
7.4 네 양자수 — 전자의 주소.....	77
7.5 수소와 다전자 원자의 에너지 순서.....	79
제 8장 전자 배치 규칙: 쌓음·파울리·훈트	81
8.1 쌓음 원리: 에너지가 낮은 자리부터	83
8.2 파울리 배타 원리: 한 오비탈에 둘, 서로 반대로	84
8.3 훈트 규칙: 같은 에너지면 먼저 하나씩	85
8.4 틀린 배치 고치기: 어느 규칙을 어겼나	87
8.5 바닥 상태와 들뜬 상태, 그리고 홀전자 세기	88
제 9장 전자 배치와 주기율표	91
9.1 멘델레예프의 빈칸과 모즐리의 원자 번호	93
9.2 주기는 껍질, 족은 원자가 전자.....	94
9.3 같은 족은 왜 닮았나	96
9.4 구역과 금속·비금속, 그리고 안정한 이온.....	97
제 10장 가려막기와 유효 핵전하.....	101
10.1 수소의 전자는 핵전하를 그대로 느낀다.....	103
10.2 안쪽 전자는 많이, 같은 껍질 전자는 조금.....	104
10.3 같은 주기와 같은 족에서의 경향.....	106
10.4 하나의 원인, 네 가지 경향.....	108
제 11장 원자 반지름과 이온 반지름	110
11.1 원자 반지름은 약속으로 정한다.....	112
11.2 같은 주기는 작아지고, 같은 족은 커진다.....	113
11.3 양이온은 작아지고, 음이온은 커진다	114
11.4 등전자 이온의 크기	115
11.5 반지름 표로 금속과 비금속을 가려내기	117
제 12장 이온화 에너지와 전기 음성도	119
12.1 이온화 에너지의 정의.....	121
12.2 같은 주기는 커지고, 같은 족은 작아진다.....	122
12.3 두 군데의 역전.....	123
12.4 전기 음성도: 공유 전자쌍을 끄는 힘	125
12.5 전기 음성도 차이와 결합의 성격.....	126
제 13장 순차 이온화 에너지: 원자가 전자를 세는 계단	128
13.1 전자를 하나씩 떼면 늘 더 어려워진다	130
13.2 급증하는 자리는 껍질이 바뀌는 자리	131
13.3 그래프를 그릴 때: 탄소의 여섯 계단	133
13.4 비율로 판정하는 절차와 표 자료 연습	134
제 14장 주기성으로 원소를 가려내다, 그리고 2부로	137
14.1 원소 판별의 다섯 단계.....	139
14.2 이온 결합 물질의 녹는점.....	141
14.3 전도성: 이온이 움직여야 전기가 흐른다.....	142
14.4 금속 결합: 자유 전자의 바다	143
14.5 원자 구조가 쓰이는 곳	144
14.6 기본개념편을 마치며	144
부록 A. 스스로 풀어 보기: 정답과 해설	146
부록 B. 용어 풀이	149

기출문제와 기본개념.....	157
제 2 부 안내: 기출문제와 기본개념의 목차와 순서	158
0. 이 장의 사용법	159
1. 출제 개념.....	160
1.1 원자를 이루는 입자와 원자 모형 — C1 · C2 · C3 · C4 · A1	160
1.2 선 스펙트럼과 보어 모형 — C5 · C6 · A2	161
1.3 오비탈·양자수·전자 배치 — C7 · C8	162
1.4 주기율표와 유효 핵전하 — C9 · C10	162
1.5 원자 반지름과 이온 반지름 — C11 · C12	163
1.6 이온화 에너지·순차 이온화 에너지·전기 음성도 — C13 · C14 · C15	165
1.7 원소 판별과 물질의 성질 — A3 · A4 · A5	166
1.8 그래프 개념도 읽는 법	166
2. 출제 경향.....	169
2.1 문항 하나에 담긴 개념의 수	170
2.2 반복되는 출제 패턴 여섯 가지	171
2.3 학교별 성향	172
논술답안작성 패턴분석	173
제 3 부 안내: 논술답안작성 패턴분석의 목차와 순서	174
3. 답안 작성법	176
3.1 계산형 답안의 틀	176
3.2 서술형 답안의 네 문장 틀	177
3.3 표기와 수치 규칙	178
3.4 시간 배분과 자기 점검	178
3.5 논술 기본 패턴 5가지와 문항별 적용	178
4. 감점 답안과 우수 답안 비교	180
실전기출문제와 풀이과정	185
제 4 부 안내: 실전기출문제와 풀이과정의 목차와 순서	186
5. 기출문제 전반: 경향·개론·기본 개념.....	188
5.1 한눈에 보는 기출 11문항	188
5.2 기출 문제는 이렇게 만들어진단 — 개론	189
5.3 기본 개념 한눈에	189
5.4 이 책의 기출 분석, 이렇게 읽는다	191
6. 출제 문항 분석과 모범답안	192
〈기출문제 1 (연세대 2025년)〉	193
〈기출문제 2 (경희대 2023년)〉	202
〈기출문제 3 (연세대 2022년)〉	213
〈기출문제 4 (연세대 2021년)〉	220
〈기출문제 5 (경희대 2020년)〉	228
〈기출문제 6 (연세대 2019년)〉	239
〈기출문제 7 (연세대 2019년)〉	247
〈기출문제 8 (부산대 2015년)〉	255
〈기출문제 9 (성균관대 2015년)〉	265
〈기출문제 10 (고려대 2012년)〉	274
〈기출문제 11 (경희대 2010년)〉	285

7. 변형·예상 문항	293
8. 강의 연결.....	301
8.1 회차별 학습 확인 체크리스트	301
8.2 강의 구성 시 유의점	302
9. 전체 문제 총평	303
9.1 숫자로 먼저 보기	303
9.2 다섯 가지 총평.....	303
9.3 대학별 한 줄 총평	304
9.4 이렇게 공부하자	305
10. 참고문헌.....	306

그림 목록

그림 1. 그림 요약: 원자 구조·주기성 논제의 네 장면.....	1
그림 2. 제 1장 개념도	16
그림 3. 생활 속 개념도 1.....	17
그림 4. 불꽃 반응 색과 파장	19
그림 5. 원자 모형 다섯 가지	20
그림 6. 원자 세계의 크기 사다리.....	21
그림 7. 제 2장 개념도	25
그림 8. 생활 속 개념도 2.....	26
그림 9. 음극선관과 전기장에서 휘는 음극선	28
그림 10. 기름방울 전하와 기본 전하.....	30
그림 11. 톰슨의 원자 모형.....	32
그림 12. 제 3장 개념도	34
그림 13. 생활 속 개념도 3.....	35
그림 14. 알파 입자 산란 실험 장치.....	36
그림 15. 원자핵 근처를 지나는 알파 입자의 궤적	39
그림 16. 충돌 거리와 산란각	40
그림 17. 제 4장 개념도	43
그림 18. 생활 속 개념도 4.....	44
그림 19. 세 입자의 질량과 전하 비교.....	47
그림 20. 염소의 질량 스펙트럼과 평균 원자량	48
그림 21. 원자핵의 반지름과 질량수.....	50
그림 22. 제 5장 개념도	52
그림 23. 생활 속 개념도 5.....	53
그림 24. 전자기파의 영역과 가시광선	55
그림 25. 파장과 광자 에너지의 반비례	56
그림 26. 연속 스펙트럼과 선 스펙트럼	57
그림 27. 제 6장 개념도	62
그림 28. 생활 속 개념도 6.....	63
그림 29. 수소 원자의 에너지 준위와 스펙트럼 계열.....	65
그림 30. 발머 계열 계산값과 관측값.....	67
그림 31. 수소와 He ⁺ 의 에너지 준위 비교.....	68
그림 32. 제 7장 개념도	72
그림 33. 생활 속 개념도 7	73
그림 34. 수소 1s 오비탈의 점 구름과 반지름 분포.....	75
그림 35. s 오비탈과 p 오비탈의 모양	76
그림 36. 수소와 다전자 원자의 오비탈 에너지 순서.....	79
그림 37. 제 8장 개념도	81
그림 38. 생활 속 개념도 8.....	82
그림 39. 탄소의 오비탈 상자 배치	85
그림 40. 3주기 원소의 홀전자 수	86
그림 41. 규칙을 어긴 세 배치	87
그림 42. 제 9장 개념도	91
그림 43. 생활 속 개념도 9.....	92
그림 44. 원자가 전자 수의 되풀이.....	95
그림 45. 1족 원소의 전자 껍질	96
그림 46. 1~4주기 주기율표와 구역	97
그림 47. 제 10장 개념도	101

그림 48. 생활 속 개념도 10	102
그림 49. 가려막기 모식도	104
그림 50. 2·3주기의 유효 핵전하	106
그림 51. 유효 핵전하의 원인-결과 지도	108
그림 52. 제 11장 개념도	110
그림 53. 생활 속 개념도 11	111
그림 54. 원자 반지름의 주기성	113
그림 55. 원자와 이온의 크기 비교	114
그림 56. 등전자 이온의 반지름	115
그림 57. 제 12장 개념도	119
그림 58. 생활 속 개념도 12	120
그림 59. 제1 이온화 에너지의 주기성	122
그림 60. 이온화 에너지 역전의 이유	123
그림 61. 전기 음성도의 주기성	125
그림 62. 제 13장 개념도	128
그림 63. 생활 속 개념도 13	129
그림 64. 마그네슘의 순차 이온화 에너지	131
그림 65. 탄소의 순차 이온화 에너지	133
그림 66. 이웃 비로 원자가 전자 수 읽기	135
그림 67. 제 14장 개념도	137
그림 68. 생활 속 개념도 14	138
그림 69. 원소 판별 흐름도	139
그림 70. 쿨롱 힘 어림과 녹는점	142
그림 71. 금속 결합과 이온 결정	143
그림 72. 원자 반지름과 제1 이온화 에너지	164
그림 73. 전체 개념 그래프	167
그림 74. 개념별 출제 횟수	168
그림 75. 연도별 출제 문항 수	169
그림 76. 대학별 출제 문항 수	169
그림 77. 판별형 답안의 사슬	176
그림 78. q187 원문 그림 2(이온 반지름)	193
그림 79. 〈연세대 2025〉 개념 그래프	194
그림 80. q187 모범답안 그림(원자 반지름 겹치기)	197
그림 81. 〈경희대 2023〉 개념 그래프	204
그림 82. A~E 판별 근거(q242)	207
그림 83. 등전자 이온과 NaCl·MgO의 크기(q242)	209
그림 84. 〈연세대 2022〉 개념 그래프	214
그림 85. 탄소의 순차 이온화 에너지(q175)	217
그림 86. 〈연세대 2021〉 개념 그래프	221
그림 87. q149 탄소 오비탈 상자 배치	224
그림 88. 오답 ①②③의 오비탈 상자(q220)	229
그림 89. 〈경희대 2020〉 개념 그래프	230
그림 90. 규소와 황의 전자 배치와 반지름(q220)	234
그림 91. A~D의 순차적 이온화 에너지(q220)	236
그림 92. 〈연세대 2019〉 개념 그래프	240
그림 93. 네 실험과 원자 모형의 연표(q116)	243
그림 94. 〈연세대 2019〉 개념 그래프	248
그림 95. q120 Mg 껍질과 순차 이온화 에너지	251
그림 96. 〈부산대 2015〉 개념 그래프	256

그림 97. A~G의 $E_2/E_1(q201)$	259
그림 98. BF_3 와 NF_3 의 루이스 구조식(q201).....	259
그림 99. 규소의 오비탈과 다음 오비탈(q201).....	262
그림 100. 〈성균관대 2015〉 개념 그래프.....	266
그림 101. $q295$ $k = 1440$ 에너지 준위와 세 전이.....	268
그림 102. $q3$ 원문 그림 4-1·4-2(끓는점).....	275
그림 103. 〈고려대 2012〉 개념 그래프.....	276
그림 104. 〈경희대 2010〉 개념 그래프.....	286
그림 105. $q278$ 핵 반지름 곡선과 핵자 하나당 부피.....	288

표 목록

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장.....	12
표 2. 기본개념편 장별 목차와 새로 배우는 개념.....	12
표 3. 제 1장의 개념이 쓰인 기출.....	16
표 4. 원자 모형의 변천.....	20
표 5. 제 2장의 개념이 쓰인 기출.....	25
표 6. 음극선의 성질 다섯 가지와 그 실험 근거.....	31
표 7. 제 3장의 개념이 쓰인 기출.....	34
표 8. 톰슨 모형의 예상과 알파 입자 산란 실험의 실제 결과.....	37
표 9. 제 4장의 개념이 쓰인 기출.....	43
표 10. 원자를 이루는 세 입자.....	46
표 11. 탄소의 동위 원소 세 가지.....	47
표 12. 제 5장의 개념이 쓰인 기출.....	52
표 13. 연속 스펙트럼과 선 스펙트럼의 비교.....	58
표 14. 제 6장의 개념이 쓰인 기출.....	62
표 15. 수소 원자의 스펙트럼 계열.....	66
표 16. 제 7장의 개념이 쓰인 기출.....	72
표 17. 보어 모형과 현대 모형(오비탈 모형) 비교.....	76
표 18. 양자수와 오비탈.....	77
표 19. 제 8장의 개념이 쓰인 기출.....	81
표 20. 원자 번호 1~20의 바닥 상태 전자 배치와 홀전자 수.....	88
표 21. 제 9장의 개념이 쓰인 기출.....	91
표 22. 2·3주기 원소의 원자가 전자 수와 안정한 이온.....	98
표 23. 제 10장의 개념이 쓰인 기출.....	101
표 24. 2주기 원소의 바깥 전자가 느끼는 유효 핵전하(슬레이터 어림, 교과 밖.....	105
표 25. 제 11장의 개념이 쓰인 기출.....	110
표 26. 2·3·4주기 주요 원소의 원자 반지름과 안정한 이온의 반지름(pm).....	116
표 27. 제 12장의 개념이 쓰인 기출.....	119
표 28. 2·3주기 원소의 제1 이온화 에너지(kJ/mol)와 전기 음성도(폴링.....	124
표 29. 제 13장의 개념이 쓰인 기출.....	128
표 30. 3주기 원소 Na·Mg·Al·Si의 순차 이온화 에너지(kJ/mol)와.....	134
표 31. 제 14장의 개념이 쓰인 기출.....	137
표 32. 부산대 2015 문항 2의 자료로 원소 판별하기.....	140
표 33. 이온 결합 물질의 이온 전하, 이온 사이 거리(이온 반지름의 합)와 녹는.....	142
표 34. 2부 목차와 내용.....	158
표 35. 원자 구조를 밝힌 실험과 모형의 변화.....	160
표 36. 수소의 스펙트럼 계열(계산값, $\lambda = 119\,600 \div \Delta E$).....	161
표 37. 네 양자수.....	162
표 38. 주기적 성질을 하나의 원인으로 설명하는 표.....	163
표 39. 순차 이온화 에너지와 이온화 비(kJ/mol).....	165
표 40. 원소 판별 단서 사전.....	166
표 41. 이 책의 기출 문항 목록.....	170
표 42. 대학별 출제 문항.....	170
표 43. 문항별 개념 수와 개념도 최대 층(층이 깊을수록 선수 사슬이 길다).....	171
표 44. 학교별 성향(이 책의 자료 범위 안에서).....	172
표 45. 논술 기본 패턴 다섯 가지와 원자 구조·주기성 답안에서의 쓰는 순서.....	174
표 46. 논술답안작성 패턴분석(3부) 목차와 내용.....	174
표 47. 계산형 답안의 네 줄.....	177

표 48. 서술형 답안의 문장 틀(주기성 설명)	177
표 49. 논술 기본 패턴 5가지(원자 구조·주기성 답안).....	178
표 50. 문항별 소문항에 적용한 패턴(4부 모범답안의 “논술 패턴” 상자와 같은	179
표 51. 실전기출문제와 풀이과정 전체 문항 목차(학교·연도, 출제 내용, 쓰이는	186
표 52. 대학별 기출 문항 수·연도·소재(문항 번호는 6장의 기출문제 번호)	188
표 53. 학년도별 문항 수와 원문 사정.....	188
표 54. 소문항 25개에 적용한 주 답안 패턴의 분포(결합 패턴은 앞의 것을 주	189
표 55. 기본 개념 한눈에(기출 빈도 순, 같으면 개념 번호 순).....	190
표 56. 문항 한 개의 구성과 읽는 목적.....	191
표 57. 기출문제 1의 개념과 복습 위치.....	194
표 58. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	195
표 59. [표 1] 원소 A~C의 주기, 원자 반지름과 이온 반지름(원문 표를 다	203
표 60. [표 2] 원소 D와 E의 주기와 순차 이온화 에너지(kJ/mol, 원문	203
표 61. 기출문제 2의 개념과 복습 위치.....	204
표 62. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	206
표 63. 기출문제 3의 개념과 복습 위치.....	214
표 64. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	215
표 65. 탄소의 순차 이온화에서 떨어지는 전자와 껍질(값은 표준 이온화 에너지, ...	216
표 66. 기출문제 4의 개념과 복습 위치.....	221
표 67. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	222
표 68. 탄소 원자 전자 여섯 개의 네 양자수(바닥 상태의 한 예)	225
표 69. 원자 A~D의 순차적 이온화 에너지(E_n , kJ/mol).....	229
표 70. 기출문제 5의 개념과 복습 위치.....	230
표 71. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	232
표 72. 이웃한 순차적 이온화 에너지의 비(원문 표로 이 책이 계산).....	235
표 73. 기출문제 6의 개념과 복습 위치.....	240
표 74. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	241
표 75. 네 실험의 관찰 → 해석 → 원자 모형(답안의 뼈대로 쓰는 정리표)	243
표 76. 기출문제 7의 개념과 복습 위치.....	248
표 77. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	250
표 78. 3주기 금속의 순차 이온화 에너지(kJ/mol)와 이웃 값의 비	252
표 79. 2, 3주기 원소 A~G의 성질(원문 표를 다시 조판).....	255
표 80. 기출문제 8의 개념과 복습 위치.....	256
표 81. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	257
표 82. 기출문제 9의 개념과 복습 위치.....	266
표 83. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	267
표 84. 실험 A와 정밀 측정의 비교(라이먼 계열 최장 파장, $2 \rightarrow 1$ 전이;	271
표 85. 기출문제 10의 개념과 복습 위치.....	276
표 86. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	277
표 87. 기출문제 11의 개념과 복습 위치.....	286
표 88. 소문항별 요구 사항과 난이도.....	287
표 89. 인강 회차 구성(제안)	301
표 90. 11개 문항의 규모	303
표 91. 대학별 출제 특징(자료를 구한 범위 안에서).....	304

제 1 부

기본개념편

이 단원의 개념을 처음부터 차근차근. 대화로 묻고 답하며, 숫자를 직접 넣어 계산한다.

원자 구조·주기성

제 1 부 안내: 기본개념편을 어떻게 읽는가

기본개념편은 입자 → 빛 → 전자의 주소 → 주기성 → 원소 판별의 순서로 이어집니다. 앞 장의 결과가 다음 장의 재료가 되므로, 처음 읽을 때는 순서대로 읽는 것이 가장 빠릅니다. 특히 8장의 전자 배치와 10장의 유효 핵전하는 뒤의 모든 주기성 설명이 올라서는 바닥입니다.

1. 전체 길 — 다섯 구간

표 1. 기본개념편의 다섯 구간과 장

구간	장	무엇을 하는가
A. 원자 속으로	1~4장	불꽃놀이의 색에서 출발해 원자 모형이 바뀌어 온 길을 보고, 음극선으로 전자를, 금박 실험으로 원자핵을, 채드윅의 실험으로 중성자를 찾는다. 동위 원소와 평균 원자량, 원자핵의 크기를 계산한다.
B. 빛과 에너지 준위	5~6장	기체 원자가 내는 선 스펙트럼에서 “전자의 에너지는 띄엄띄엄하다”는 결론을 끌어내고, 보어 모형의 에너지 준위로 수소 스펙트럼의 파장과 이온화 에너지를 계산한다.
C. 전자의 주소	7~9장	전자의 위치를 확률로 나타내는 오비탈과 네 양자수를 배우고, 쌍음 원리·파울리 배타 원리·훈트 규칙으로 전자를 배치한 뒤, 그 배치가 주기율표의 족과 주기가 됨을 본다.
D. 주기성	10~13장	가려막기와 유효 핵전하라는 하나의 원인으로 원자 반지름·이온 반지름·이온화 에너지·전기 음성도의 주기적 경향을 설명하고, 순차 이온화 에너지가 급증하는 자리에서 원자가 전자 수를 센다.
E. 판별과 응용	14장	반지름·이온화 에너지·산화수 표로 미지 원소를 가려내고, 이온 결합 물질의 녹는점·전도성과 금속의 퍼짐성까지 원자 구조로 설명한다. 이어서 2부로 간다.

2. 장마다 같은 순서

모든 장은 〈생활 속 개념도〉 → 〈이 장의 출발점〉 → 본문 대화 → 〈문제〉와 풀이 대화 → 〈핵심〉 → 〈스스로 풀어 보기〉 → 이 장의 참고문헌 순서입니다. 장의 첫머리에는 이 장의 개념도와 그 개념이 쓰인 기출 표가 있어, 지금 배우는 개념이 나중에 어떤 문제로 나오는지 미리 볼 수 있습니다. 〈스스로 풀어 보기〉의 정답과 해설은 부록 A에 모아 두었습니다. 막히면 해설을 먼저 보지 말고, 장 안의 해당 그림과 식으로 돌아가 한 번 더 시도하십시오.

3. 장별 목차

표 2. 기본개념편 장별 목차와 새로 배우는 개념

장(쪽)	제목	새로 배우는 개념
기본개념편 제 1장 (16쪽)	왜 원자 구조인가	원자 모형의 변천 · 원자의 크기 · 전자 껍질
기본개념편 제 2장 (25쪽)	전자의 발견: 음극선관 속의 빛	음극선 · 전자의 비전하 · 기본 전하
기본개념편 제 3장 (34쪽)	원자핵의 발견: 금박에서 튕겨 나온 알파 입자	알파 입자 산란 · 원자핵 · 러더퍼드 모형
기본개념편 제 4장 (43쪽)	양성자·중성자와 동위 원소	원자 번호 · 질량수 · 동위 원소 · 평균 원자량 · 핵의 크기
기본개념편 제 5장 (52쪽)	빛과 선 스펙트럼: 원자의 지문	빛의 에너지 · 연속 스펙트럼 · 선 스펙트럼

장(쪽)	제목	새로 배우는 개념
기본개념편 제 6장 (62쪽)	보어 모형: 에너지 준위를 계산하다	에너지 준위 · 바닥 상태와 들뜬 상태 · 스펙트럼 계열 · 수소 유사 이온
기본개념편 제 7장 (72쪽)	오비탈과 양자수: 전자의 주소	확률 분포 · 오비탈 · 네 가지 양자수
기본개념편 제 8장 (81쪽)	전자 배치 규칙: 쌍음·파울리·훈트	쌍음 원리 · 파울리 배타 원리 · 훈트 규칙 · 홀전자
기본개념편 제 9장 (91쪽)	전자 배치와 주기율표	원자가 전자 · 족과 주기 · 금속과 비금속
기본개념편 제 10장 (101쪽)	가려막기와 유효 핵전하	가려막기 효과 · 유효 핵전하 · 주기와 족의 경향
기본개념편 제 11장 (110쪽)	원자 반지름과 이온 반지름	원자 반지름 · 이온 반지름 · 등전자 이온
기본개념편 제 12장 (119쪽)	이온화 에너지와 전기 음성도	제1 이온화 에너지 · 경향의 역전 · 전기 음성도
기본개념편 제 13장 (128쪽)	순차 이온화 에너지: 원자가 전자를 세는 계단	순차 이온화 에너지 · 급증하는 자리 · 원자가 전자 수 판별
기본개념편 제 14장 (137쪽)	주기성으로 원소를 가려내다, 그리고 2부로	원소 판별 절차 · 이온 결합 물질의 녹는점과 전도성 · 금속 결합

4. 이렇게 공부하자

- 처음에는 대화를 소리 내어 읽듯 따라가고, 원소가 나올 때마다 전자 배치를 오비탈 상자로 손으로 그려 본다.
- 장이 끝나면 〈스스로 풀어 보기〉를 먼저 풀고 부록 A로 확인한다.
- 계산이 막히는 장은 4장(평균 원자량), 6장(에너지 준위와 파장), 13장(순차 이온화 에너지의 비)이다. 서술이 막히는 장은 10~12장(유효 핵전하로 경향 설명하기)이다. 이 구간은 두 번 읽는다.
- 기출 표에 나온 문제는 4부에서 만난다. 지금은 “이 개념이 이런 문제에 쓰이는구나” 정도로 훑는다.

기본개념편을 열며

원자 구조는 중학교 과학에서 “원자핵과 전자”로 처음 만나고, 고등학교 화학 I 에서 오비탈·전자 배치·주기적 성질로 넓어지며, 대학 논술에서는 실험사(史)의 해석, 순차 이온화 에너지 표로 원소 찾기, 반지름과 이온화 에너지의 이유 서술이 함께 나오는 단원이다. 이 기본개념편은 중학교 2학년 수준의 지식(원자와 이온, 전하의 인력과 반발, 간단한 비례 계산)만 있으면 끝까지 따라올 수 있도록 쓴 이야기책이다. 외울 경향을 먼저 주지 않고, 왜 그런 경향이 생기는가를 먼저 묻고 그다음에 규칙을 만든다.

등장인물

- 하린·태오 — 남매. 하린은 중학교 2학년, 태오는 논술을 준비하는 고등학교 2학년이다. 돌집 과학 방에서 화학을 배운다. 궁금한 것은 바로 묻고, 태오는 계산을 서두르다 실수도 한다.
- 미숙 이모 — 두부집 사장. 부엌과 가게에서 본 일상의 눈으로 질문한다.
- 석 교수 — 충북 단양 ‘돌집 과학방’의 화학 선생님. 은퇴한 화학·생물 교수로, 설명 대신 질문으로 길을 안내한다.

첫 장면 — 토요일 밤, 강가의 불꽃놀이

단양 강변에서 축제 불꽃놀이가 끝난 토요일 밤, 네 사람은 과학방 마루에 둘러앉았다. 하린은 휴대폰으로 찍은 불꽃 사진을 넘기고 있었다.

- 하린** 교수님, 이것 좀 보세요. 빨간 불꽃, 노란 불꽃, 보라 불꽃이 다 따로 있어요. 불꽃놀이 하는 분들은 색을 어떻게 골라요?
- 석 교수** 화약에 넣는 원소를 바꾼다. 빨강은 스트론튬이나 리튬, 노랑은 나트륨, 청록은 구리를 넣지. 원소마다 내는 색이 정해져 있다.
- 이모** 그건 저도 알아요. 국이 끓어 넘쳐서 가스 불에 떨어지면 불이 노랑게 변하잖아요. 그게 소금 때문이에요?
- 석 교수** 맞아요. 소금 속 나트륨이 내는 노란빛입니다. 파장으로 말하면 589 나노미터쯤이에요.
- 태오** 그런데 왜 원소마다 색이 다른 거예요? 다 같은 불인데요.
- 석 교수** 그 질문이 이 책 전체의 출발점이다. 색은 원자 안에서 전자가 에너지가 높은 자리에서 낮은 자리로 옮겨 갈 때 내놓는 빛이야. 자리 사이의 간격이 원소마다 다르니 색도 다르다.
- 하린** 원자 안에 자리가 있어요? 원자는 그냥 작은 공 아니에요?
- 석 교수** 이백 년 전 돌턴도 그렇게 생각했지. 그런데 백여 년 전부터 실험이 하나씩 그 공을 깨뜨렸다. 유리관 속에서 전자가 나왔고, 금박에 쓴 입자가 튕겨 나오면서 아주 작은 핵이 드러났다.
- 태오** 아, 그거 시험에 나와요. 톰슨, 러더퍼드, 채드윅. 이름만 외우고 있었어요.
- 석 교수** 이름보다 “그 실험이 무엇을 보여 주었나”를 말할 수 있어야 한다. 논술은 바로 그걸 묻는다. 실험 결과에서 원자 모형까지 이어서 써야 점수가 나와.
- 이모** 그럼 주기율표도 이 이야기예요? 우리 애 방에 붙어 있는 그 큰 표요.
- 석 교수** 네, 주기율표는 전자가 들어가는 자리를 차례로 채운 순서표예요. 같은 세로줄에 있는 원소들은 가장 바깥 전자의 모습이 같아서 성질이 닮았어요.
- 하린** 그럼 원자가 크다, 작다 하는 것도 전자 자리로 정해져요?

석 교수 그렇지. 핵이 바깥 전자를 얼마나 세게 당기느냐, 그 사이에 다른 전자가 얼마나 가로막느냐. 이 두 가지로 원자의 크기, 전자를 떼어 내는 데 드는 에너지, 전자를 끌어당기는 힘이 모두 설명된다.

태오 이온화 에너지 표 주고 원소 맞이하라는 문제도 그거죠? 숫자가 갑자기 확 뛰는 데를 찾으려던데요.

석 교수 그건 13장에서 계단처럼 풀어 보자. 숫자가 뛰는 자리는 전자 껍질이 바뀌는 자리다. 그 앞까지 뻗 전자 수가 원자가 전자 수야.

이모 듣기만 해도 어렵네요. 저는 소금이 왜 짝지나 알면 좋겠는데요.

석 교수 마지막 장에서는 소금이 왜 801 °C에서야 녹는지, 알루미늄 포일이 왜 얇게 펴지는지까지 오늘 시작하는 이야기로 설명합니다. 부엌에서 끝나는 이야기에요.

하린 그럼 오늘은 어디서부터 해요?

석 교수 저 불꽃부터 하자. 불꽃의 색이 원자에 대해 무엇을 말해 주는지, 그리고 사람들이 원자를 어떻게 상상해 왔는지부터.

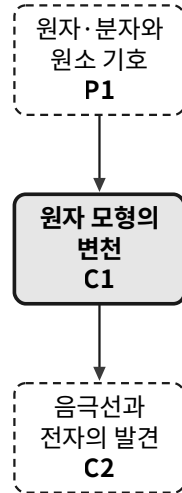
왜 원자 구조인가? **기본개념편 제 1장** (16쪽)은 불꽃놀이의 색에서 출발한다. 원소마다 정해진 색은 원자 안에 정해진 에너지의 자리가 있다는 증거이고, 그 자리를 따라 전자를 채워 넣으면 주기율표가 된다. 그리고 핵이 바깥 전자를 당기는 힘이 원자의 크기와 이온화 에너지를 정한다. 입자의 발견에서 원소의 판별까지 이 한 줄기를 끝까지 따라가는 것이 기본개념편의 즐거리다.

제 1장 왜 원자 구조인가

새 개념 원자 모형의 변천 · 원자의 크기 · 전자 껍질

이어짐 전자 2장 · 원자핵 3장 · 에너지 준위 6장 · 주기율표 9장

이 장의 개념도



 이 장에서 배우는 개념
 앞뒤로 이어지는 개념
 화살표: 먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것

그림 2. 제 1장에서 배우는 개념(C1 원자 모형의 변천)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

이 장의 개념이 쓰인 기출

표 3. 제 1장의 개념이 쓰인 기출 — 학교·연도, 출제 내용, 이 장에서 알아야 할 개념

기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 6 (연세대 2019년) (239쪽)	네 실험으로 밝힌 원자의 구조	C1 원자 모형의 변천

밤하늘의 불꽃놀이

불꽃의 색 = 넣은 원소가 정하는 빛의 파장

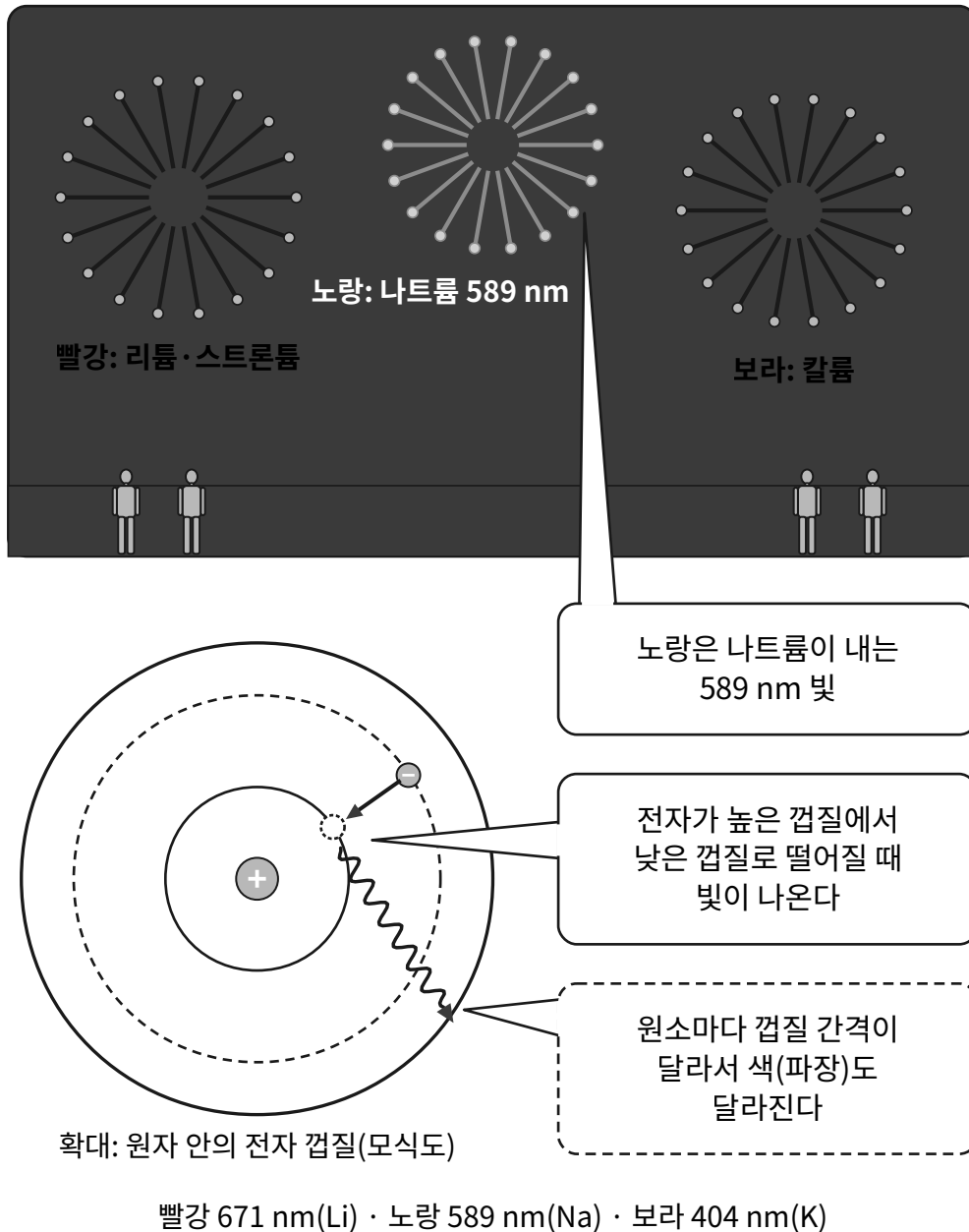


그림 3. 밤하늘의 불꽃놀이 — 불꽃의 색은 화약에 넣은 원소가 정하고, 그 색은 원자 안의 전자가 높은 껍질에서 낮은 껍질로 옮길 때 내놓는 빛이다(모식도, 파장은 대표값)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 불꽃의 색은 넣은 원소마다 정해져 있다(나트륨 노랑 589 nm, 리튬 빨강 671 nm).
2. 색은 전자가 에너지가 높은 껍질에서 낮은 껍질로 옮길 때 내놓는 빛이다.
3. 원소마다 껍질 사이의 간격이 달라서 색이 다르다 — 색은 원자 안 구조를 보여 주는 단서다.

이 장의 출발점

이 장은 중학교 과학의 세 가지만 쓴다. 물질은 원자로 이루어져 있고 원소마다 원자의 종류가 다르다는 것, 양전하와 음전하는 서로 끌어당기고 같은 전하는 밀어낸다는 것, 그리고 빛에는 색(파장)이 있다는 것이다. 10의 거듭제곱(10^{-10} m 같은 표기)을 읽을 줄 알면 계산도 따라올 수 있다.

불꽃놀이가 끝난 다음 날 아침, 석 교수는 과학방 실험대에 알코올램프 대신 작은 가스버너를 켜 두었다. 옆에는 뚜껑에 이름을 적은 흰 가루 병 네 개와 끝이 고리 모양인 금속선이 놓여 있었다.

석 교수 어젯밤 불꽃을 여기서 작게 다시 만들어 보자. 이 금속선 끝을 염산에 씻고 불에 달궈서 깨끗하게 한 뒤, 가루를 조금 문혀 불꽃에 넣는다. 이것을 **불꽃 반응(flame test)**이라고 한다.

하린 와, 노랑게 확 변했어요. 이건 뭐예요?

석 교수 염화 나트륨, 곧 소금이다. 다음은 염화 리튬.

태오 이건 진한 빨강이네요. 다음 병은 염화 칼륨이고... 연한 보라색이에요. 금방 사라지는데요.

이모 마지막 건 초록빛이 도는 파랑이에요. 이건 구리죠? 어제 교수님이 청록은 구리라고 하셨잖아요.

석 교수 맞아요. 네 가루 모두 염소가 들어 있는데 색은 넷 다 다르지요. 그러니 색을 정하는 것은 염소가 아니라 나트륨, 리튬, 칼륨, 구리 쪽이라는 걸 알 수 있어요.

1.1 불꽃의 색은 왜 원소마다 다른가

하린 색이 원소마다 정해져 있다는 건 알겠어요. 그런데 왜 정해져 있어요?

석 교수 오늘의 첫 질문이자 이 책 전체의 질문이다. 불꽃의 열은 원자에 에너지를 준다. 그 에너지를 받은 전자가 원자 안의 높은 자리로 올라갔다가, 곧 원래의 낮은 자리로 떨어지면서 그 차이만큼을 빛으로 내놓는다. 빛의 색은 그 에너지 차이로 정해지지.

태오 그러니까 원소마다 자리와 자리 사이의 간격이 달라서 색이 다르다는 거네요.

석 교수 그렇다. 나트륨의 노란빛은 파장이 589 nm(나노미터, 10^{-9} m)이고, 리튬의 빨간빛은 671 nm다. 파장이 짧을수록 빛 알갱이 하나의 에너지가 크다. 계산은 5장에서 하겠지만 결과만 미리 말하면 589 nm 빛은 1몰당 203 kJ, 671 nm 빛은 178 kJ다.

이모 칼륨의 보라색은 왜 그렇게 흐려요?

석 교수 칼륨은 766 nm의 진한 빨강 선과 404 nm의 보라 선을 함께 낸다. 766 nm는 눈이 거의 느끼지 못하는 빛의 끝자락이라, 우리 눈에는 연한 보라로 보여요. **그림 4**에 네 원소의 대표 선을 무지개 띠 위에 표시했어요. 왼쪽이 파장이 짧은 보라, 오른쪽이 파장이 긴 빨강입니다.

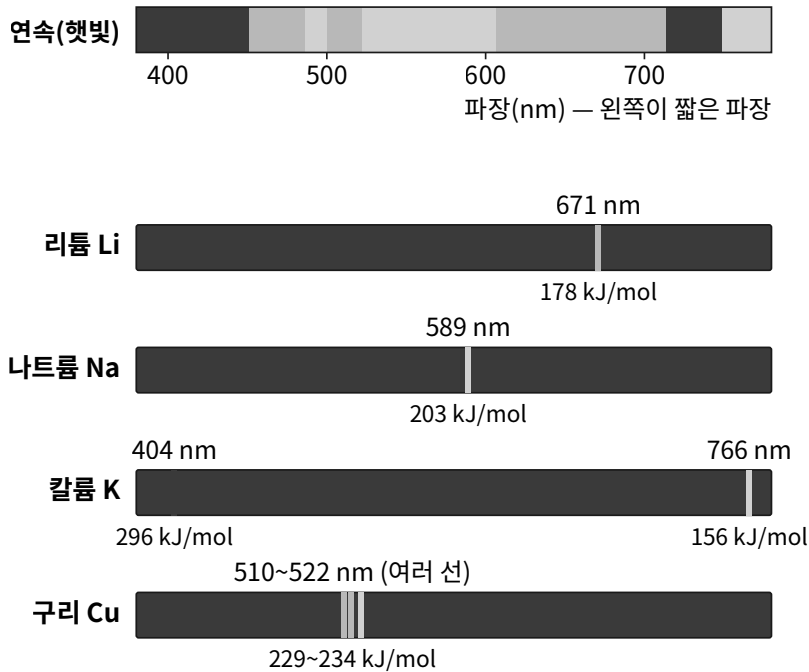


그림 4. 불꽃 반응의 대표 선 — 가시광선 띠(왼쪽이 짧은 파장) 위에 리튬 671 nm, 나트륨 589 nm, 칼륨 404 nm·766 nm, 구리의 청록 영역(510~525 nm 부근의 여러 선)을 표시했다. 아래 숫자는 각 선의 광자 1몰 에너지(kJ/mol)를 $E = 119\,600 \div \lambda(\text{nm})$ 로 계산한 값이다.

하린 선이 띄엄띄엄 몇 개만 있네요. 무지개처럼 다 이어져 있지 않고요.

석 교수 그게 중요한 관찰이다. 원자가 내는 빛은 정해진 몇 개의 파장뿐이다. 이것 **선 스펙트럼**이라고 하고, 5장의 주인공이야. “띄엄띄엄한 빛”은 원자 안의 자리, 곧 전자의 에너지가 띄엄띄엄 정해져 있다는 증거가 된다.

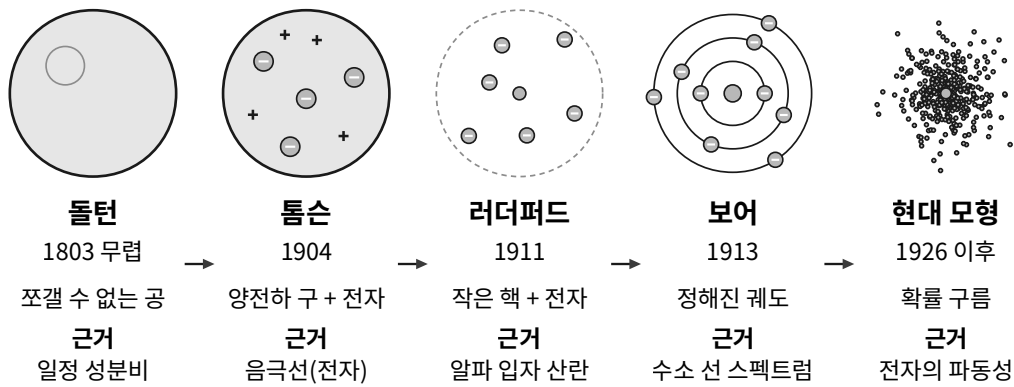
불꽃놀이의 색은 원자만 내는가

나트륨·리튬·칼륨의 불꽃색은 금속 원자가 내는 선이다. 그러나 실제 불꽃놀이의 빨강(스트론튬)·초록(바륨)·파랑(구리)은 불꽃 속에서 잠깐 생기는 SrCl · BaCl · CuCl 같은 작은 분자가 내는 빛이 큰 몫을 한다. 원리는 같다 — 정해진 에너지 차이만큼의 빛이 나온다. 이 장에서는 원자에 집중한다.

1.2 돌턴에서 슈뢰딩거까지 — 다섯 개의 원자 모형

태오 어제 말씀하신 대로, 원자를 그냥 공으로 보면 “안의 자리”라는 말 자체가 안 되잖아요. 원자 모형이 어떻게 바뀌었는지 순서대로 정리해 주세요.

석 교수 좋다. **그림 5**에 다섯 모형을 나란히 그렸다. 각 모형 아래에 연도와, 그 모형을 낳은 실험을 적었어. 모형은 실험 결과를 설명하려고 만든 그림이고, 새 실험이 기존 모형으로 설명되지 않으면 모형이 바뀐다. 이 원칙 하나만 잡으면 순서는 저절로 외워진다.



새 실험이 앞 모형으로 설명되지 않을 때 모형이 바뀌었다 (크기 비율은 실제와 다름)

그림 5. 원자 모형의 변천 — 돌턴(1803 무립, 쪼갤 수 없는 공), 톰슨(1904, 양전하 구 속에 전자가 박힌 모형), 러더퍼드(1911, 작은 핵과 그 둘레의 전자), 보어(1913, 정해진 궤도의 전자), 현대 모형(1926 이후, 전자가 있을 확률을 나타내는 구름). 아래 줄은 각 모형을 낳은 결정적 근거다. 크기 비율은 실제와 다르다(모식도).

- 하린** 맨 처음 돌턴은 그냥 당구공이네요.
- 석 교수** 1803년 무립 돌턴은 화학 반응에서 질량이 일정한 비율로 결합한다는 사실을 설명하려고, 원소마다 질량이 정해진 쪼갤 수 없는 원자를 생각했다. 당시로서는 훌륭한 설명이었다. 그런데 1897년 톰슨이 유리관 속에서 원자보다 훨씬 가벼운 음전하 입자, 곧 전자를 찾아냈다. 원자에서 무언가가 나왔으니 원자는 쪼갤 수 없는 공이 아니었지.
- 태오** 그래서 톰슨 모형은 푸딩 속에 건포도가 박힌 모양이고요. 양전하 반죽 속에 전자가 박혀 있는 거죠.
- 석 교수** 1904년 모형이다. 원자는 전체로 중성이니 음전하인 전자만큼의 양전하가 어딘가에 있어야 하는데, 톰슨은 그것이 원자 전체에 고르게 퍼져 있다고 보았다. 그다음 러더퍼드 연구실에서 금박에 알파 입자를 쏘았더니 극히 일부가 튕겨 나왔다. 퍼진 양전하로는 그렇게 세게 튕길 수 없다. 그래서 1911년, 양전하와 질량이 아주 작은 핵에 모여 있다는 모형이 나왔다. 3장 이야기다.
- 이모** 보어 모형은 학교에서 그리던 그 동심원 그림이네요. 가운데 핵, 둘레에 원 몇 개, 그 위에 점들.
- 석 교수** 네. 러더퍼드 모형에는 큰 약점이 있었어요. 전자가 핵 둘레를 돌면 빛을 내며 에너지를 잃고 핵으로 빨려 들어가야 하거든요. 1913년 보어는 “전자는 정해진 궤도에서만 돌고, 그 궤도에서는 빛을 내지 않는다. 궤도를 옮길 때만 그 차이만큼 빛을 낸다”고 가정했어요. 그러면 원자가 무너지지 않고, 선 스펙트럼도 설명돼요. 6장에서 계산합니다.
- 태오** 마지막 구름 그림은 뭐예요? 전자가 그냥 흐릿하게 퍼져 있는데요.
- 석 교수** 1926년 슈뢰딩거가 전자를 파동처럼 다루는 식을 세운 뒤의 현대 모형이다. 전자가 어디 있는지 정확히 말할 수 없고, 어느 곳에 있을 확률만 말할 수 있다. 그 확률 분포가 **오비탈** 이고, 7장에서 다룬다. 점이 진한 곳은 전자를 발견할 확률이 높은 곳이야. 표 4에 다섯 모형을 정리했다.

표 4. 원자 모형의 변천 — 각 모형의 핵심, 근거가 된 실험, 남긴 문제

모형(연도)	원자의 모습	근거가 된 실험·사실	남긴 문제
돌턴(1803 무립)	쪼갤 수 없는 단단한 공	일정 성분비·배수 비례 법칙	원자에서 전자가 나온다

모형(연도)	원자의 모습	근거가 된 실험·사실	남긴 문제
톰슨(1904)	양전하 구 속에 전자가 박힘	음극선 실험(1897, 전자 발견)	알파 입자의 큰 각 산란
러더퍼드(1911)	작은 핵 + 돌레의 전자	알파 입자 산란 실험	원자가 안정한 이유, 선 스펙트럼
보어(1913)	정해진 궤도의 전자	수소의 선 스펙트럼	전자가 여러 개인 원자의 스펙트럼
현대 모형(1926~)	확률 구름(오비탈)	전자의 파동성, 다전자 원자 스펙트럼	고교 범위에서는 남은 문제 없음

답안에서 자주 틀리는 모형 표현

“보어 모형에서 전자는 핵 돌레를 원운동한다”는 보어 모형의 설명으로는 맞지만, 현대 모형의 설명으로 쓰면 틀린다. 현대 모형에서는 전자의 궤도를 그릴 수 없고 확률 분포만 말한다. 또 “러더퍼드가 전자를 발견했다”, “톰슨이 원자핵을 발견했다”처럼 사람과 발견을 바꿔 쓰는 실수가 많다. 실험 → 발견된 입자 → 모형을 한 줄로 묶어 기억하면 이런 실수가 줄어든다.

하린 마지막 칸이 재밌어요. 모형마다 “남긴 문제”가 다음 모형의 출발점이네요.

석 교수 바로 그거다. 논술에서 “각 실험이 밝힌 원자의 구조를 원자 모형과 연계하여 논하라”는 문제가 나오면, 이 표의 한 줄을 “실험 → 결과 → 결론 → 모형”으로 풀어 쓰면 된다. 실험 이름만 나열하면 감점이야.

1.3 원자는 얼마나 작고 텅 비었나

이모 원자가 작다는 건 알지만, 얼마나 작은지는 감이 안 와요.

석 교수 원자의 반지름은 대략 10^{-10} m, 0.1 nm다. 머리카락 굵기가 약 0.1 mm, 곧 10^{-4} m이니 머리카락 굵기에 원자가 약 백만 개 늘어선다. 그런데 원자 한가운데의 핵은 반지름이 10^{-15} m 정도로, 원자보다 십만 배 작다. **그림 6**에 크기를 로그 눈금으로 늘어놓았다.

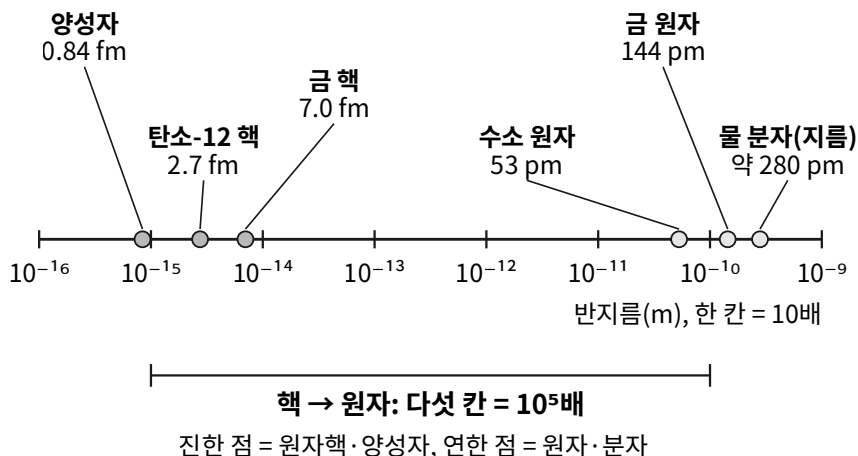


그림 6. 원자 세계의 크기 사다리(로그 눈금, 한 칸이 10배) — 양성자 반지름 0.84 fm, 탄소-12 핵 2.7 fm, 금 핵 7.0 fm, 수소 원자(보어 반지름) 53 pm, 금 원자 144 pm, 물 분자 지름 약 280 pm. 원자와 핵은 눈금 다섯 칸, 곧 10^5 배 차이가 난다($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$, $1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$).

태오 눈금 한 칸이 열 배씩이니 핵에서 원자까지 다섯 칸이면 십만 배네요.

문제 1.1

원자의 반지름을 1.0×10^{-10} m, 원자핵의 반지름을 1.0×10^{-15} m라 하자. (1) 원자 반지름은 핵 반지름의 몇 배인가? (2) 원자 부피는 핵 부피의 몇 배인가? (3) 원자를 반지름 100 m인 경기장만큼 키우면 핵의 반지름은 얼마가 되는가?

태오 (1)은 $1.0 \times 10^{-10} \div 1.0 \times 10^{-15} = 1.0 \times 10^5$, 십만 배요. (2) 부피는 반지름의 세제곱에 비례하니까... 10^5 의 세제곱은 10^8 ... 아니, 10^{15} 요.

석 교수 처음에 10^8 이라고 한 건 지수끼리 더했기 때문이다. $(10^5)^3$ 은 지수를 곱해서 $10^{5 \times 3} = 10^{15}$ 이다. 바로잡았으니 됐다.

하린 (3)은 비율만 같게 하면 되니까 $100 \text{ m} \div 10^5 = 10^{-3} \text{ m}$, 1 mm요. 경기장 한가운데에 반지름 1 mm짜리 구슬 하나!

석 교수 정답이다. 반지름 비 1.0×10^5 , 부피 비 1.0×10^{15} , 경기장 속 핵의 반지름 1 mm. 이런 데도 원자 질량의 99.9 % 이상이 그 구슬에 모여 있다. 전자는 아주 가볍거든. 나머지는 거의 빈 공간이다.

태오 99.9 %는 어떻게 나온 숫자예요? 그냥 외우는 거예요?

석 교수 계산할 수 있다. 금 원자 하나를 보자. 전자는 79개이고 전자 하나의 질량은 9.11×10^{-31} kg이니, 전자 전체는 $79 \times 9.11 \times 10^{-31} = 7.2 \times 10^{-29}$ kg이다. 금 원자 하나의 질량은 $197 \times 1.66 \times 10^{-27} = 3.27 \times 10^{-25}$ kg이다. 나눠 보면 전자 뭉은 $7.2 \times 10^{-29} \div 3.27 \times 10^{-25} = 2.2 \times 10^{-4}$, 곧 0.022 %다. 나머지 99.98 %가 핵에 있다.

하린 질량은 거의 전부 핵에 있고, 부피는 거의 전부 전자 구름이 차지하네요. 완전히 반대예요.

석 교수 그 대비가 원자 구조의 첫인상이다. 화학 반응에서는 핵은 그대로 있고 바깥의 전자만 움직인다. 그래서 화학은 거의 전자의 학문이라고 말하기도 해.

이모 그럼 제 손도, 이 책상도 거의 빈 공간이예요? 그런데 왜 손이 책상을 뚫고 지나가지 못해요?

석 교수 좋은 질문이예요. 손의 원자 바깥에 있는 전자들과 책상 원자 바깥의 전자들이 서로 밀어내기 때문이예요. 비어 있어도 바깥을 둘러싼 음전하 구름끼리는 가까이 갈 수 없어요. 원자의 “크기”란 결국 그 전자 구름의 크기입니다. 이 생각이 11장 원자 반지름의 출발점이에요.

1.4 전자 껍질이라는 생각

하린 그 전자 구름 안에서 전자는 아무렇게나 있어요?

석 교수 아무렇게나는 아니다. 전자는 핵에서 가까운 것부터 몇 개의 무리로 나뉘어 있다. 이 무리를 **전자 껍질**이라고 부른다. 원자 번호 20번까지는 안쪽 껍질부터 2개, 8개, 8개 순서로 채운다고 보면 된다. 정확한 규칙은 8장에서 오비탈로 다시 세운다.

태오 원자 번호가 양성자 수죠? 중성 원자는 전자 수도 같고요.

석 교수 그렇다. **원자 번호**는 핵 속 양성자의 수이고, 중성 원자에서는 전자 수와 같다. 이것이 원소를 정하는 번호야. 원자 번호가 다르면 다른 원소다.

문제 1.2

나트륨(Na, 원자 번호 11) 원자 한 개의 양성자 수와 전자 수를 쓰고, 전자 껍질별 전자 수와 가장 바깥 껍질의 전자 수를 구하라.

하린 양성자 11개, 전자 11개요. 껍질은 2개, 8개 채우고 남은 1개가 세 번째 껍질에 가요. 그러니까 2, 8, 1.

태오 가장 바깥 껍질 전자는 1개예요. 이게 원자가 전자죠?

석 교수 정답이다. 양성자 11, 전자 11, 껍질별 2·8·1, 가장 바깥 껍질 전자 1개. 이 바깥 전자 하나를 **원자가 전자**라고 부르고 9장에서 자세히 다룬다. 나트륨이 불꽃에서 노란빛을 낼 때 움직이는 것도 바로 이 바깥 전자다. 그리고 나트륨이 전자 하나를 쉽게 잃어 Na^+ 가 되는 것도 이 전자 때문이지.

태오 리튬은 3번이니까 2, 1이고, 칼륨은 19번이니까 2, 8, 8, 1이에요. 셋 다 바깥 전자가 하나네요. 아까 불꽃 반응을 한 원소 중 세 개가 같은 꼴이에요.

석 교수 잘 찾았다. 리튬, 나트륨, 칼륨은 주기율표의 같은 세로줄, 1족에 있다. 셋 다 물에 넣으면 격렬하게 반응하고, 셋 다 +1가 이온이 된다. 성질이 닮은 이유가 바깥 껍질의 전자 수가 같기 때문이라는 것, 이것이 주기율표의 비밀이다. 다만 불꽃색은 서로 다르지? 바깥 전자 수는 같아도 껍질의 크기와 간격이 달라서 내는 빛의 파장이 다르다. 닮은 점과 다른 점이 모두 전자 껍질에서 나온다.

이모 소금 속 나트륨이 Na^+ 라는 거죠? 그럼 그 Na^+ 도 불꽃에서 노란빛을 내요?

석 교수 불꽃 속 높은 온도에서 Na^+ 가 전자를 다시 얻어 중성 나트륨 원자가 되고, 그 원자가 노란빛을 냅니다. 그래서 소금이든 탄산수소 나트륨이든 나트륨이 들어 있으면 같은 노랑이 나와요.

1.5 이 책의 길 — 입자, 빛, 주소, 주기성, 판별

태오 이제 전체 지도가 보여요. 원자 속 입자를 찾고, 빛으로 에너지 자리를 채고, 전자의 주소를 정하고….

석 교수 그 주소를 따라 원소를 늘어놓으면 주기율표가 된다. 그다음 “핵이 바깥 전자를 얼마나 세게 당기나”라는 단 하나의 원인으로 원자의 크기, 전자를 떼는 에너지, 전자를 끄는 힘의 경향을 설명한다. 마지막으로 표에 주어진 숫자로 원소를 가려낸다. 입자 → 빛 → 주소 → 주기성 → 판별, 이것이 기본개념편의 길이다.

하린 오늘 불꽃 하나로 그 길이 다 보인다니 신기해요.

석 교수 불꽃의 색이 정해져 있다는 관찰은 19세기 중반 분광학자들이 먼저 했어. 그들은 색을 보고 새 원소를 찾아냈지. 세슘과 루비듐이 그렇게 발견됐다. 그러나 “왜 색이 정해져 있나”에 답한 것은 그로부터 반세기 뒤의 원자 모형이었다. 관찰이 먼저, 설명은 나중이다. 우리도 그 순서로 간다.

이모 색을 보고 원소를 찾았다고요? 어떻게요?

석 교수 1860년 분젠과 키르히호프는 광천수를 증발시켜 얻은 찌꺼기를 불꽃에 넣고, 빛을 프리즘으로 나눠 보았어요. 그때까지 알려진 어느 원소에도 없는 파란 선 두 줄이 보였지요. 그래서 그 원소에 “하늘색”이라는 뜻의 라틴어로 세슘이라는 이름을 붙였습니다. 이듬해에는 짙은 빨강 선으로 루비듐을 찾았고요.

태오 지문으로 범인을 찾는 거랑 똑같네요. 5장 제목이 “원자의 지문”인 게 그래서군요.

핵심 원자 구조를 공부하는 4단계

1. 관찰에서 출발한다: 원소마다 불꽃색(선 스펙트럼)이 정해져 있다 → 원자 안에 정해진 에너지의 자리가 있다.
2. 모형은 실험을 설명하는 그림이다: 돌턴 → 톰슨(전자) → 러더퍼드(핵) → 보어(에너지 준위) → 현대 모형(오비탈). 각 모형은 앞 모형이 설명하지 못한 실험 때문에 바뀌었다.
3. 크기를 수로 잡는다: 원자 반지름 약 10^{-10} m, 핵 약 10^{-15} m, 반지름 비 10^5 , 부피 비 10^{15} . 질량은 거의 다 핵에 있다.
4. 원자 번호 = 양성자 수 = 중성 원자의 전자 수. 전자는 껍질에 2, 8, 8개 순서로 채우고, 가장 바깥 껍질의 전자가 원소의 성질을 정한다.

스스로 풀어 보기

1. 마그네슘(Mg, 원자 번호 12) 원자의 전자 수와 껍질별 전자 수를 쓰라.
2. 금 원자의 반지름이 144 pm, 금 원자핵의 반지름이 7.0 fm일 때, 원자 반지름은 핵 반지름의 약 몇 배인가? ($1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$, $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$)
3. 톰슨 모형이 러더퍼드 모형으로 바뀌게 된 실험 결과를 한 문장으로 쓰라.
4. 불꽃 반응에서 리튬(671 nm)과 나트륨(589 nm) 중 광자 하나의 에너지가 더 큰 쪽은 어느 것이며, 그 까닭은 무엇인가?

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 원자 모형 변천은 4부에서 바로 서술 문제로 나온다. **기출문제 6**(연세대 2019) (239쪽)은 음극선, 선 스펙트럼, 금박 실험, 중성자 발견의 네 실험을 제시문으로 주고 “각 실험이 밝힌 원자의 구조를 원자 모형과 연계하여” 논하게 한다. 표 4의 한 줄을 실험 → 결과 → 결론 → 모형의 순서로 풀어 쓰는 연습이 그대로 답안이 된다. **기출문제 9**(성균관대 2015) (265쪽)는 불꽃의 색처럼 원자가 내는 빛의 에너지를 수소와 He^+ 의 에너지 준위로 계산하게 하는데, 그 계산은 5·6장에서 준비한다.

이 장의 참고문헌

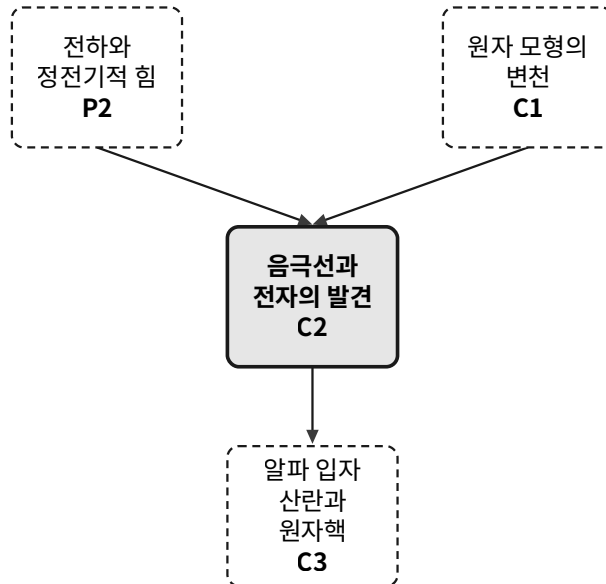
- Bohr, N. (1913). On the constitution of atoms and molecules. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 26(151), 1–25. <https://doi.org/10.1080/14786441308634955>
- Brown, T. L., LeMay, H. E., Jr., Bursten, B. E., Murphy, C. J., Woodward, P. M., & Stoltzfus, M. W. (2018). Chemistry: The central science (14th ed.). Pearson.
- Kirchhoff, G., & Bunsen, R. (1860). Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen. Annalen der Physik, 186(6), 161–189. <https://doi.org/10.1002/andp.18601860602>
- Rutherford, E. (1911). The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 21(125), 669–688. <https://doi.org/10.1080/14786440508637080>
- Thomson, J. J. (1904). On the structure of the atom. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 7(39), 237–265. <https://doi.org/10.1080/14786440409463107>

제 2장 전자의 발견: 음극선관 속의 빛

새 개념 음극선 · 전자의 비전하 · 기본 전하

이어짐 원자핵 3장 · 원자 모형 1장

이 장의 개념도



 이 장에서 배우는 개념
 앞뒤로 이어지는 개념
 화살표: 먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것

그림 7. 제 2장에서 배우는 개념(C2 음극선과 전자의 발견)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

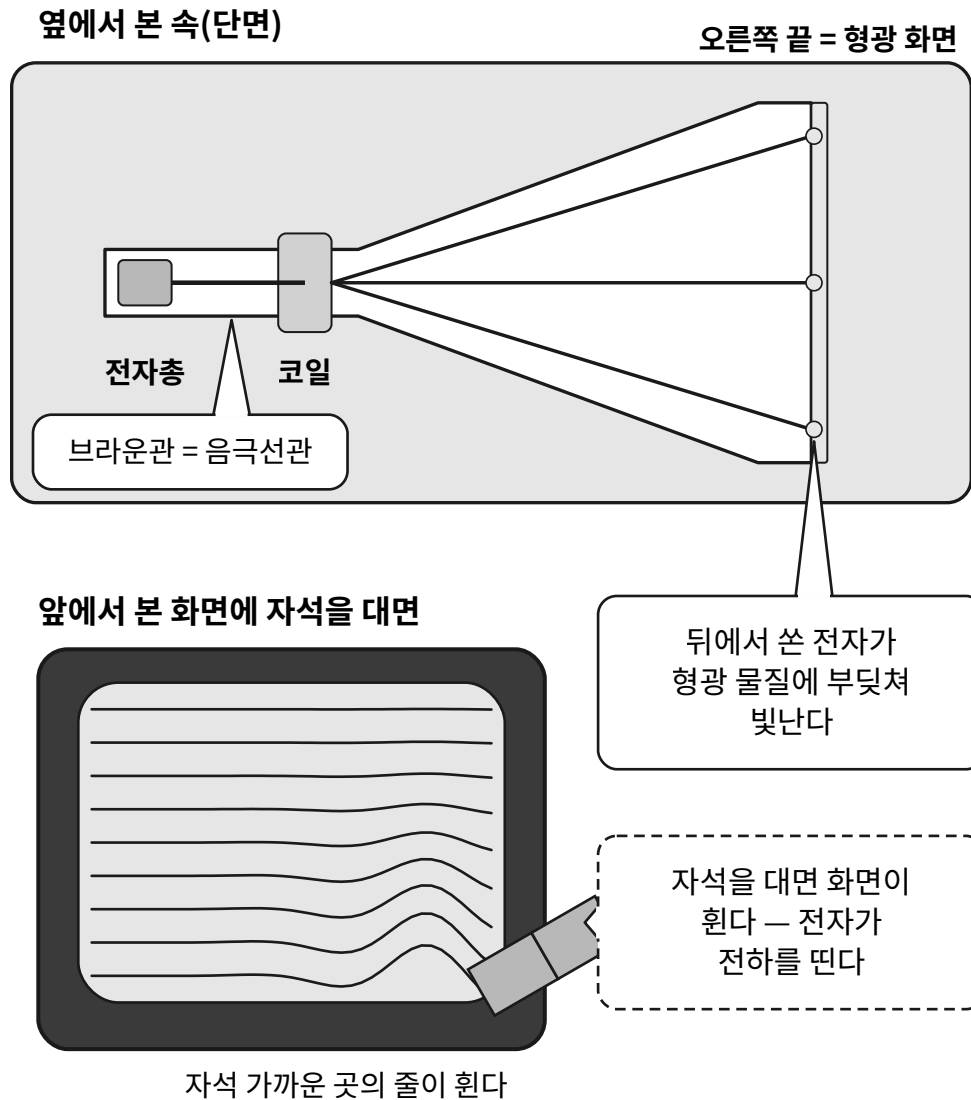
이 장의 개념이 쓰인 기출

표 5. 제 2장의 개념이 쓰인 기출 — 학교·연도, 출제 내용, 이 장에서 알아야 할 개념

기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 6 (연세대 2019년) (239쪽)	네 실험으로 밝힌 원자의 구조	C2 음극선과 전자의 발견

옛날 브라운관 텔레비전

뒤가 볼록한 상자 속에 음극선관이 들어 있다



자석 가까운 곳의 줄이 휘다

지금은 쓰지 않는 기술(얇은 평면 화면으로 바뀜)

전자의 질량은 수소 원자의 약 1/1840

그림 8. 할머니 댁의 옛날 브라운관 텔레비전 — 뒤쪽 전자총에서 나온 전자가 화면 안쪽의 형광 물질에 부딪쳐 빛나고, 자석을 대면 전자의 길이 휘어 화면이 일그러진다(모식도, 지금은 평면 화면으로 바뀐 기술)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 브라운관은 음극선관을 이용한 장치였다.
2. 전자는 음전하를 띠어 전기장과 자기장에서 휘다.
3. 전자의 질량은 수소 원자의 약 1/1800이다.

이 장의 출발점

기본개념편 제 1장 (16쪽)의 원자 모형 변천에서 톰슨 모형(1904)의 자리를 기억해 두자. 이 장에서는 같은 전하는 밀어내고 다른 전하는 끌어당긴다는 것, 전하의 단위가 쿨롱(C)이라는 것, 그리고 비례식 정도의 계산을 쓴다. 자기장 속에서 움직이는 전하가 받는 힘의 방향은 물리 시간의 내용이므로, 여기서는 “왼다”는 사실만 쓴다.

토요일 오후, 이모가 커다란 상자 하나를 과학방에 들고 왔다. 시골 할머니 댁 창고에서 나온, 뒤가 볼록한 옛날 텔레비전이었다. 화면 유리는 볼록했고, 뒷덮개 틈으로 긴 유리 목이 보였다.

이모 버리기 전에 애들 보여 주려고 가져왔어요. 우리 어릴 땐 다 이런 텔레비전이었거든요.

하린 뒤가 왜 이렇게 길어요? 요즘 텔레비전은 얇은데요.

석 교수 이 안에 길쭉한 진공 유리관이 들어 있어서 그렇다. 이 관을 **브라운관**이라고 불렀지. 관 뒤쪽 끝에서 전자를 쏘아 앞쪽 화면에 맞히는 장치다. 오늘 배울 **음극선관**을 그대로 텔레비전으로 만든 거야. 이 상자 하나에 원자 이야기의 첫 장이 들어 있다.

태오 전자를 쏜다고요? 전자가 발견되기 전에는 그게 뭔지도 몰랐을 거 아니에요.

석 교수 그렇지. 처음에는 “음극에서 나오는 무언가”라고만 해서 음극선이라고 불렀다. 그것이 빛인지, 입자인지 이십 년 넘게 논쟁했어. 오늘은 그 논쟁을 실험 하나하나로 끝내 보자.

2.1 진공관에 높은 전압을 걸면

석 교수 유리관 양 끝에 금속판을 붙이고 공기를 거의 다 빼낸 뒤, 수천 볼트의 전압을 건다. 전지의 음극(-)에 연결한 쪽이 **음극**, 양극(+)에 연결한 쪽이 **양극**이다. 그러면 음극 맞은편 유리벽이 초록빛으로 빛난다. 음극에서 무언가가 나와 유리에 부딪친다는 뜻이지.

하린 그게 빛이 아니라 입자인지는 어떻게 알아요?

석 교수 하나씩 보자. 첫째, 관 중간에 금속 십자가를 세우면 유리벽에 십자가 모양의 또렷한 그림자가 생긴다. 음극선이 음극에서 나와 곧게 나아간다는 증거다. 둘째, 관 안에 아주 가벼운 바람개비를 놓으면 음극선을 맞고 양극 쪽으로 굴러간다.

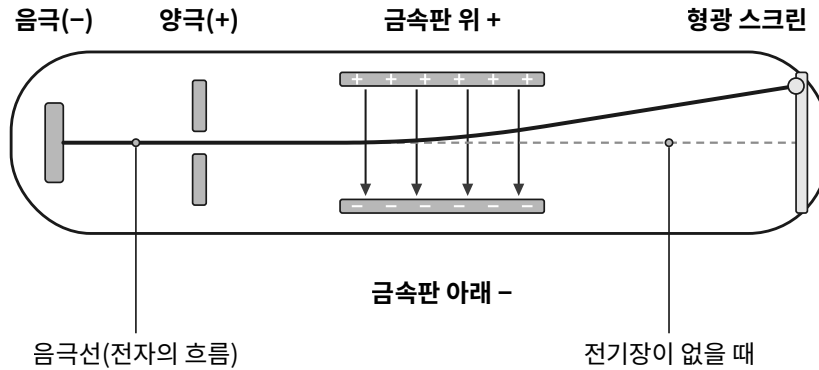
태오 바람개비를 밀었으면 질량이 있는 거네요. 빛은 질량이 없으니까 입자다!

석 교수 교과서는 그렇게 설명한다. 다만 이 실험은 해석에 주의가 필요해. 음극선이 바람개비 날개를 데워서 생기는 열 효과도 함께 작용한다는 지적이 있다. 그래서 “입자다”라는 결론은 다음 실험, 곧 전기장과 자기장에서 휘는 모습으로 더 확실해진다. 시험 답안에는 교과서의 해석인 “질량을 가진 입자의 흐름”을 쓰면 된다.

2.2 전기장과 자기장에서 휘는 방향

석 교수 **그림 9**를 보자. 음극선이 지나가는 길 위아래에 금속판 두 장을 놓고, 위판에 +, 아래판에 -를 걸었다. 음극선은 어느 쪽으로 휘까?

진공 유리관(공기를 거의 다 뺀), 양 끝에 높은 전압



음전하 입자는 + 판에 끌려 위로 휜다

그림 9. 음극선관의 단면(모식도) — 음극(-)에서 나온 음극선이 양극(+)의 구멍을 지나 직진하다가, 두 금속판 사이의 전기장에서 + 판 쪽(위)으로 휘어 형광 스크린의 위쪽에 닿는다. 점선은 전기장이 없을 때의 경로다. 음전하를 띤 입자는 + 판에 끌리고 - 판에 밀린다.

하린 다른 전하끼리 끌어당기니까... 음극에서 나왔으니 음전하일 것 같고, 그러면 + 판 쪽, 위로요.

석 교수 맞다. 실제로 음극선은 + 판 쪽으로 휜다. 이것이 음극선이 **음전하**를 띤다는 직접적인 증거다. 자석을 가까이 대도 휜다. 전하를 띤 입자가 움직이면 자기장 속에서 힘을 받기 때문이다.

이모 그래서 옛날에 텔레비전 화면에 자석을 대면 색이 번지고 일그러졌군요. 애들이 장난치다 혼났었는데.

석 교수 맞아요. 화면에 그림을 그리는 전자가 자석 때문에 엉뚱한 곳에 떨어진 거예요. 이 텔레비전도 원리는 같아요. 뒤쪽의 전자총에서 나온 전자를 관 목에 감긴 코일의 자기장으로 위아래, 좌우로 휘게 해서 화면 전체를 한 줄씩 훑게 했습니다.

휜 방향을 쓸 때의 흔한 실수

“음극선은 음극에서 나왔으니 - 판 쪽으로 휜다”는 답이 의외로 많다. 휜 방향은 출발한 곳이 아니라 입자의 전하가 정한다. 음전하는 + 판에 끌린다. 또 알파 입자(양전하)는 같은 전기장에서 반대쪽, 곧 - 판 쪽으로 휘고, 질량이 전자의 약 7300배라서 훨씬 덜 휜다. 방향(전하의 부호)과 휜 정도(비전하의 크기)를 따로 따져 쓰자.

태오 그럼 휜 정도를 재면 뭘 알 수 있어요?

석 교수 거기서 1897년 톰슨의 실험이 나온다. 전하가 클수록 많이 휘고, 질량이 클수록 덜 휜다. 그러니 휜 정도는 질량 대 전하가 아니라 **전하 대 질량의 비**, 곧 e/m 에 달려 있다. 이것을 **비전하**(specific charge)라고 한다.

2.3 톰슨의 비전하 — 수소 이온보다 1840배

석 교수 톰슨은 전기장과 자기장을 함께 걸어 두 힘이 맞비기게 해서 입자의 속력을 구하고, 전기장만 걸었을 때 휜 정도에서 e/m 을 계산했다. 오늘날의 값은 $e/m = 1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$ 이다.

- 태오** 두 힘이 맞비기면 속력이 나온다는 건 어떻게요?
- 석 교수** 이건 물리 시간 내용이라 교과 밖 심화로 결과만 보자. 전기장 E 가 주는 힘은 eE , 자기장 B 가 속력 v 로 움직이는 전하에 주는 힘은 evB 다. 두 힘이 반대 방향으로 같으면 $eE = evB$ 이니 e 가 지워지고 $v = E/B$ 만 남는다. 예를 들어 $E = 1.0 \times 10^4 \text{ V/m}$, $B = 5.0 \times 10^{-4} \text{ T}$ 일 때 음극선이 휘지 않고 곧게 갔다면 $v = 1.0 \times 10^4 \div 5.0 \times 10^{-4} = 2.0 \times 10^7 \text{ m/s}$, 빛의 속력의 약 7 %다. 속력을 알고 나면 전기장만 걸었을 때 얼마나 휘는지에서 e/m 을 구할 수 있다.
- 하린** 전하를 모르는데도 속력이 나온다니 신기해요. 양쪽에 e 가 똑같이 있어서 지워지는 거네요.
- 하린** 숫자가 커서 감이 안 와요. 큰 거예요?
- 석 교수** 비교 대상이 있어야 한다. 당시 전기 분해로 알려진 가장 큰 비전하는 수소 이온, 곧 양성자의 것이었다. 양성자의 전하는 전자와 크기가 같은 $1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 이고 질량은 $1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 이니, $e/m = 1.60 \times 10^{-19} \div 1.673 \times 10^{-27} = 9.56 \times 10^7 \text{ C/kg}$ 이다.
- 태오** $1.76 \times 10^{11} \div 9.56 \times 10^7$ 을 하면... 1.84×10^3 , 약 1840배네요.
- 석 교수** 전하의 크기가 같다면, 비전하가 1840배라는 것은 질량이 $1/1840$ 이라는 뜻이다. 실제로 양성자 질량 $\div$ 전자 질량은 $1.673 \times 10^{-27} \div 9.11 \times 10^{-31} = 1836$ 이다. 톰슨 시대에는 전하가 같은지 몰랐지만, 아주 가벼운 입자이거나 아주 큰 전하를 가진 입자라는 결론은 피할 수 없었다.
- 이모** 음극에 쓰는 금속을 바꾸면 그 값이 달라지지 않아요?
- 석 교수** 좋은 질문이에요. 톰슨은 음극을 알루미늄, 백금 등으로 바꾸고 관 속에 남은 기체도 공기, 수소, 이산화 탄소 등으로 바꿔 보았는데, e/m 은 늘 같았어요. 어떤 물질에서 나와도 같은 입자라는 뜻이지요. 그래서 이 입자는 모든 원자에 공통으로 들어 있는 부품이라는 결론이 나왔습니다. 이 입자가 **전자**예요.
- 태오** 전자라는 이름은 톰슨이 붙였어요?
- 석 교수** 아니다. 1891년 아일랜드의 물리학자 스톨리가 전기 분해에서 드러나는 전하의 최소 단위에 “electron”이라는 이름을 먼저 붙였다. 톰슨 자신은 이 입자를 “미립자”라고 불렀는데, 나중에 스톨리의 이름이 입자 자체의 이름이 되었지. 이름은 먼저 있었고, 그 이름에 맞는 입자를 톰슨이 실험으로 보여 준 셈이다.
- 이모** 그 시절엔 음극선이 빛이라는 사람도 있었다면서요. 그 사람들은 왜 그렇게 생각했어요?
- 석 교수** 음극선이 얇은 금속박을 뚫고 지나가는 것을 본 독일의 헤르츠와 레나르트 같은 학자들은, 단단한 입자라면 금속을 통과할 수 없다고 보고 일종의 파동이라고 생각했어요. 그런데 전기장에서 휘다는 것이 분명해지자 논쟁이 끝났지요. 빛은 전기장에서 휘지 않으니까요. 지금 보면 둘 다 일리가 있었어요. 전자는 아주 작아서 얇은 금속박 정도는 뚫고 지나가거든요. 이 “통과”는 3장의 금박 실험에서 다시 중요해집니다.

문제 2.1

전자의 비전하 $e/m = 1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$ 이고 기본 전하 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 이다. 전자 한 개의 질량을 구하고, 양성자 질량 $1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 과 비교하라.

태오 $m = e \div (e/m)$ 이니 $1.60 \times 10^{-19} \div 1.76 \times 10^{11} = 2.82 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 이에요.

- 석 교수** 잠깐, 단위를 보자. $C \div (C/kg)$ 는 kg 이지만, $C \times (C/kg)$ 는 C^2/kg 이다. 나눠야 할 것을 곱했다. 다시 해 봐.
- 태오** 아, 나눠야죠. $1.60 \times 10^{-19} \div 1.76 \times 10^{11} = 0.909 \times 10^{-30} = 9.09 \times 10^{-31} kg$ 이에요.
- 하린** 양성자와 비교하면 $1.673 \times 10^{-27} \div 9.09 \times 10^{-31} = 1.84 \times 10^3$. 양성자가 약 1840배 무거워요.
- 석 교수** 정답이다. 전자의 질량 $9.09 \times 10^{-31} kg$ (정밀한 값 $9.11 \times 10^{-31} kg$), 양성자의 약 1/1840이다. 단위로 계산하는 습관 덕분에 태오의 첫 답이 10^{22} 배 넘게 틀렸다는 걸 바로 잡았지. 계산 문제에서 단위는 가장 싼 계산 도구다.

2.4 밀리컨의 기름방울 — 전하에는 최소 단위가 있다

- 하린** e/m 은 비율이잖아요. e 자체는 어떻게 잴어요?
- 석 교수** 1909년부터 밀리컨이 잰 방법이 유명하다. 분무기로 아주 작은 기름방울을 뿌리고, 위아래 두 금속판 사이에 떨어뜨린다. 방울들은 공기 중에서 마찰로 전자를 얻거나 X선을 띄어 전하를 띤다. 판에 전압을 걸어 전기력이 중력과 맞비기게 하면, 방울이 공중에 멈춘다. 그때의 전압과 방울의 질량으로 방울 하나의 전하를 계산할 수 있다.
- 이모** 왜 하필 기름이에요? 물방울을 뿌리면 더 쉬울 것 같은데요.
- 석 교수** 처음에는 물방울로도 해 봤어요. 그런데 물방울은 몇 초 만에 증발해서 질량이 계속 줄어드니 계산이 맞지 않았지요. 시계 기름처럼 잘 증발하지 않는 기름을 쓰면 한 방울을 몇 시간씩 붙잡아 두고 전하가 바뀌는 순간까지 관찰할 수 있었어요. 실험은 이런 작은 선택에서 성패가 갈립니다.
- 하린** 한 방울을 몇 시간이나 들여다봤다고요? 끈기가 대단하네요.
- 태오** 방울마다 전하가 다르겠네요. 전자를 몇 개 얻었는지에 따라서요.
- 석 교수** 바로 그 점이 핵심이다. 수많은 방울의 전하를 잴더니 모두 어떤 값의 정수배였다. 그 최소 단위가 **기본 전하** $e = 1.60 \times 10^{-19} C$ 이다. **그림 10**에 기름방울 다섯 개의 전하를 막대로 그렸다.

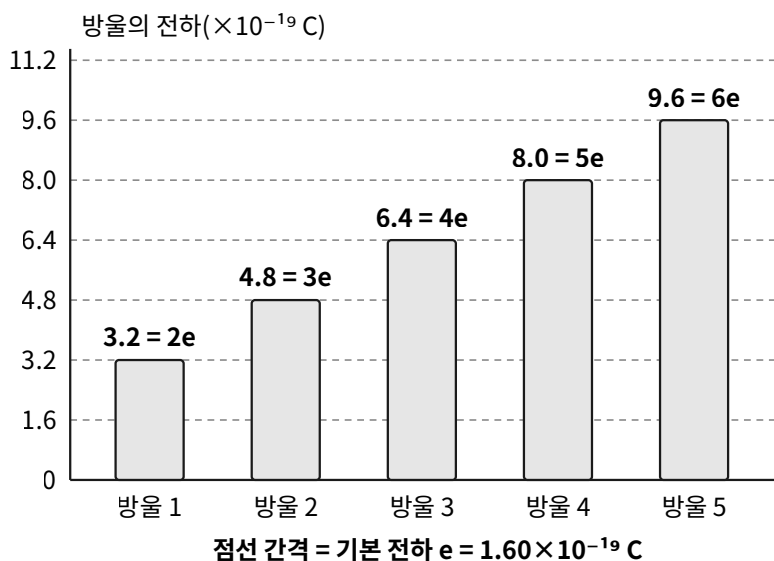


그림 10. 기름방울의 전하(예시 자료) — 다섯 방울의 전하 3.2, 4.8, 6.4, 8.0, 9.6($\times 10^{-19} C$)은 모두 $1.60 \times 10^{-19} C$ 의 2, 3, 4, 5, 6배다. 가로 점선은 $1.60 \times 10^{-19} C$ 간격이다. 전하가 연속적인 값이 아니라 띄엄띄엄한 값만 가진다는 것을 보여 준다.

이모 막대 끝이 모두 점선 위에 딱 걸리네요. 중간에 걸친 막대가 하나도 없어요.

석 교수 그게 “전하는 쪼갤 수 없는 알갱이로 되어 있다”는 증거예요. 전자 반 개 같은 건 없으니까요. 그리고 e 를 알면 톰슨의 e/m 으로 전자의 질량을 계산할 수 있어요. 문제 2.1이 바로 그 계산이었지요.

문제 2.2

어떤 실험에서 세 기름방울의 전하가 각각 4.8×10^{-19} C, 8.0×10^{-19} C, 6.4×10^{-19} C로 측정되었다. 이 자료에서 생각할 수 있는 가장 큰 기본 전하의 값과, 각 방울이 가진 전자의 수를 구하라.

하린 세 값이 모두 같은 수로 나누어떨어져야 해요. 차이를 보면 $8.0 - 6.4 = 1.6$, $6.4 - 4.8 = 1.6$ 이에요. 그러니까 1.6×10^{-19} C요.

태오 그럼 $4.8 \div 1.6 = 3$ 개, $8.0 \div 1.6 = 5$ 개, $6.4 \div 1.6 = 4$ 개예요.

석 교수 정답이다. 기본 전하는 1.6×10^{-19} C, 전자 수는 차례로 3개, 5개, 4개. 하나 더 생각해 보자. 이 세 값만 있으면 0.8×10^{-19} C도 세 값을 모두 나누지 않을까?

하린 $4.8 \div 0.8 = 6$, $8.0 \div 0.8 = 10$, $6.4 \div 0.8 = 8 \cdots$ 나누어떨어지네요!

석 교수 그래서 문제에서 “가장 큰 값”이라고 했다. 측정한 방울이 적으면 진짜 단위의 절반도 답이 될 수 있다. 밀리컨은 수백 개의 방울을 재서, 1.6×10^{-19} C보다 작은 간격이 한 번도 나오지 않는다는 것을 확인했다. 자료가 많아야 결론이 단단해진다. 이건 논술의 자료 해석 문제에서도 똑같다.

표 6에 지금까지 본 음극선의 성질과 그 근거를 정리했다.

표 6. 음극선의 성질 다섯 가지와 그 실험 근거

관찰한 현상	실험	알게 된 성질
십자가의 또렷한 그림자	관 속 장애물	음극에서 나와 직진한다
바람개비가 굴러감	관 속 바람개비	질량을 가진 입자의 흐름이다(교과서의 해석)
+ 판 쪽으로 휜	금속판 사이 전기장	음전하를 띤다
자석을 대면 휜	자기장	전하를 띤 입자가 움직이고 있다
음극 금속·기체를 바꿔도 e/m 이 같음	톰슨의 비전하 측정	모든 원자에 공통인 입자다

2.5 톰슨의 건포도 푸딩 모형과 그 한계

태오 전자가 모든 원자에 들어 있으면, 원자는 어떻게 생긴 거예요?

석 교수 원자는 전체로 전하가 0이다. 그러니 전자의 음전하만큼 양전하가 어딘가에 있어야 하지. 톰슨은 1904년, 양전하가 원자 전체에 고르게 퍼진 공 속에 전자가 박혀 있다고 생각했다. 그림 11가 그 모형이다. 영국 사람들은 이걸 건포도가 박힌 푸딩에 빗대어 불렀다.

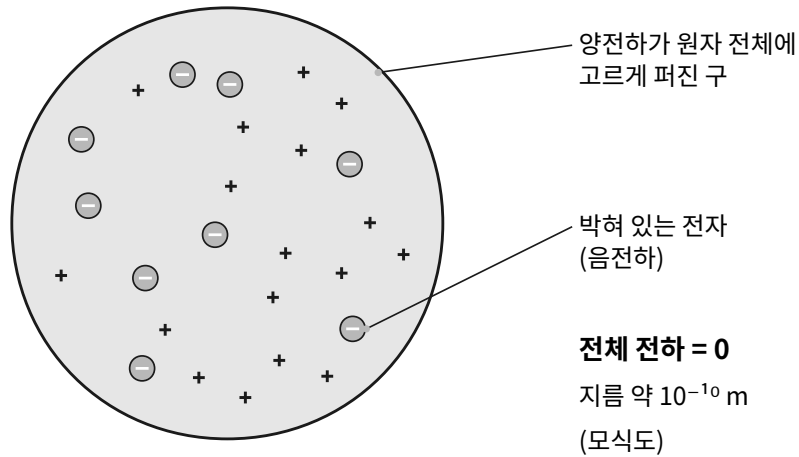


그림 11. 톰슨 모형(1904, 모식도) — 양전하가 원자 전체(지름 약 10^{-10} m)에 고르게 퍼져 있고, 그 속에 전자들이 박혀 전체 전하가 0이 된다. 양전하가 퍼져 있으므로 원자 안 어디에서도 강한 전기력이 생기지 않는다고 예상되었다.

하린 그럴듯해 보이는데요. 뭐가 문제였어요?

석 교수 이 모형에서는 양전하가 넓게 퍼져 있으니, 원자 안 어디에서도 강한 전기력이 생기지 않는다. 그래서 원자를 향해 빠른 입자를 쏘면 거의 휘지 않고 통과해야 한다. 그런데 1909년 무렵 러더퍼드의 제자들이 금박에 알파 입자를 쏘았더니 일부가 거꾸로 튕겨 나왔다. 퍼진 양전하로는 결코 만들 수 없는 결과였지. 그 이야기는 3장에서 계산까지 해 보자.

이모 그래도 톰슨 모형이 틀렸다고 쓸모없는 건 아니죠?

석 교수 물론이예요. “원자는 더 작은 부품으로 되어 있다”, “그 부품 중 하나는 모든 원자에 공통인 가벼운 음전하 입자다”라는 두 가지는 지금도 그대로 맞아요. 모형은 틀린 부분만 고쳐 가며 다음 모형으로 넘어갑니다.

태오 논술 답안에는 그럼 “음극선 실험으로 전자가 발견되었고, 이를 바탕으로 톰슨 모형이 제안되었다”까지 쓰면 되는 거죠?

석 교수 거기에 “음극선이 전기장에서 + 극 쪽으로 휘므로 음전하를 띤 입자임을 알았다”처럼 실험 결과에서 결론으로 가는 근거 한 줄을 꼭 넣어라. 채점 기준은 “실험 → 결과 → 결론 → 모형”의 연결을 본다. 근거 없는 결론은 반쪽 점수다.

오늘날의 정밀한 값

전자의 질량 9.109×10^{-31} kg, 기본 전하 1.602×10^{-19} C, 비전하 1.759×10^{11} C/kg이다. 이 책은 계산을 쉽게 하려고 9.11×10^{-31} kg, 1.60×10^{-19} C, 1.76×10^{11} C/kg을 쓴다. 문제에서 값을 주면 반드시 주어진 값을 쓴다. 밀리컨이 1913년에 발표한 값은 약 1.59×10^{-19} C로 지금 값보다 0.6 % 정도 작았는데, 계산에 쓴 공기의 점성 값이 조금 틀렸기 때문으로 알려져 있다. 측정의 정밀도는 실험 장치만이 아니라 함께 쓰는 다른 상수에도 달려 있다.

핵심 전자의 발견을 서술하는 4단계

1. 실험: 진공관의 음극에서 나온 음극선이 직진하고(그림자), 전기장에서 + 판 쪽으로, 자기장에서도 휘다.
2. 결론 1: 음극선은 음전하를 띤 입자의 흐름이다. 음극 금속이나 기체를 바꿔도 e/m 이 같으므로 모든 원자에 공통인 입자, 곧 전자다.
3. 결론 2: $e/m = 1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$ 은 수소 이온의 약 1840배 $\rightarrow$ 전자의 질량은 수소 원자의 약 $1/1840$. 밀리컨의 기름방울로 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 를 얻어 $m = e \div (e/m) = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$.
4. 모형: 원자는 중성이므로 양전하가 함께 있다 $\rightarrow$ 톰슨 모형(양전하 구 속의 전자). 이 모형은 알파 입자 산란을 설명하지 못한다.

스스로 풀어 보기

1. 음극선이 전기장에서 + 판 쪽으로 휘는 현상으로부터 알 수 있는 음극선의 성질을 쓰라.
2. 어떤 입자의 비전하가 $9.56 \times 10^7 \text{ C/kg}$ 이고 전하가 $1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 일 때 질량을 구하라. 이 입자는 무엇이라고 짐작할 수 있는가?
3. 기름방울 네 개의 전하가 3.2, 9.6, 6.4, 4.8($\times 10^{-19} \text{ C}$)일 때 기본 전하를 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 라 하면, 각 방울의 전자 수는 몇 개인가?
4. 톰슨이 음극의 금속과 관 속 기체를 바꿔 가며 e/m 을 잰 까닭은 무엇이며, 그 결과가 원자 구조에 대해 말해 주는 것은 무엇인가?

정답과 해설은 부록 A에 있다.

이 장의 음극선 실험은 4부 **기출문제 6**(연세대 2019) (239쪽)의 제시문 (ㄱ)으로 그대로 나온다. 진공 유리관 양 끝에 전압을 걸어 생긴 음극선이 전기장에서 휘는 장면을 주고, 그 실험이 밝힌 원자의 구조를 원자 모형과 연계해 쓰게 한다. 위 핵심 상자의 1~4단계를 한 문단으로 이어 쓰면 (ㄱ)에 대한 답이 된다. 같은 문항의 (ㄷ) 금박 실험은 3장에서, (ㄹ) 중성자 발견은 4장에서 준비한다. 네 실험을 모두 준비한 뒤에는 실험의 순서와 모형의 순서를 연표 하나로 묶어 두면 답안의 뼈대가 바로 선다.

이 장의 참고문헌

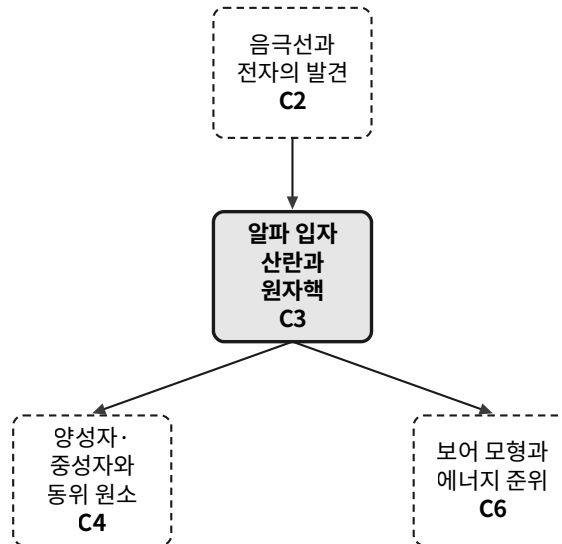
- Brown, T. L., LeMay, H. E., Jr., Bursten, B. E., Murphy, C. J., Woodward, P. M., & Stoltzfus, M. W. (2018). Chemistry: The central science (14th ed.). Pearson.
- Millikan, R. A. (1913). On the elementary electrical charge and the Avogadro constant. Physical Review, 2(2), 109–143. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.2.109>
- Thomson, J. J. (1897). Cathode rays. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 44(269), 293–316. <https://doi.org/10.1080/14786449708621070>
- Thomson, J. J. (1904). On the structure of the atom. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 7(39), 237–265. <https://doi.org/10.1080/14786440409463107>

제 3장 원자핵의 발견: 금박에서 튕겨 나온 알파 입자

새 개념 알파 입자 산란 · 원자핵 · 러더퍼드 모형

이어짐 양성자·중성자 4장 · 보어 모형 6장

이 장의 개념도



 이 장에서 배우는 개념
 앞뒤로 이어지는 개념
 화살표: 먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것

그림 12. 제 3장에서 배우는 개념(C3 알파 입자 산란과 원자핵)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

이 장의 개념이 쓰인 기출

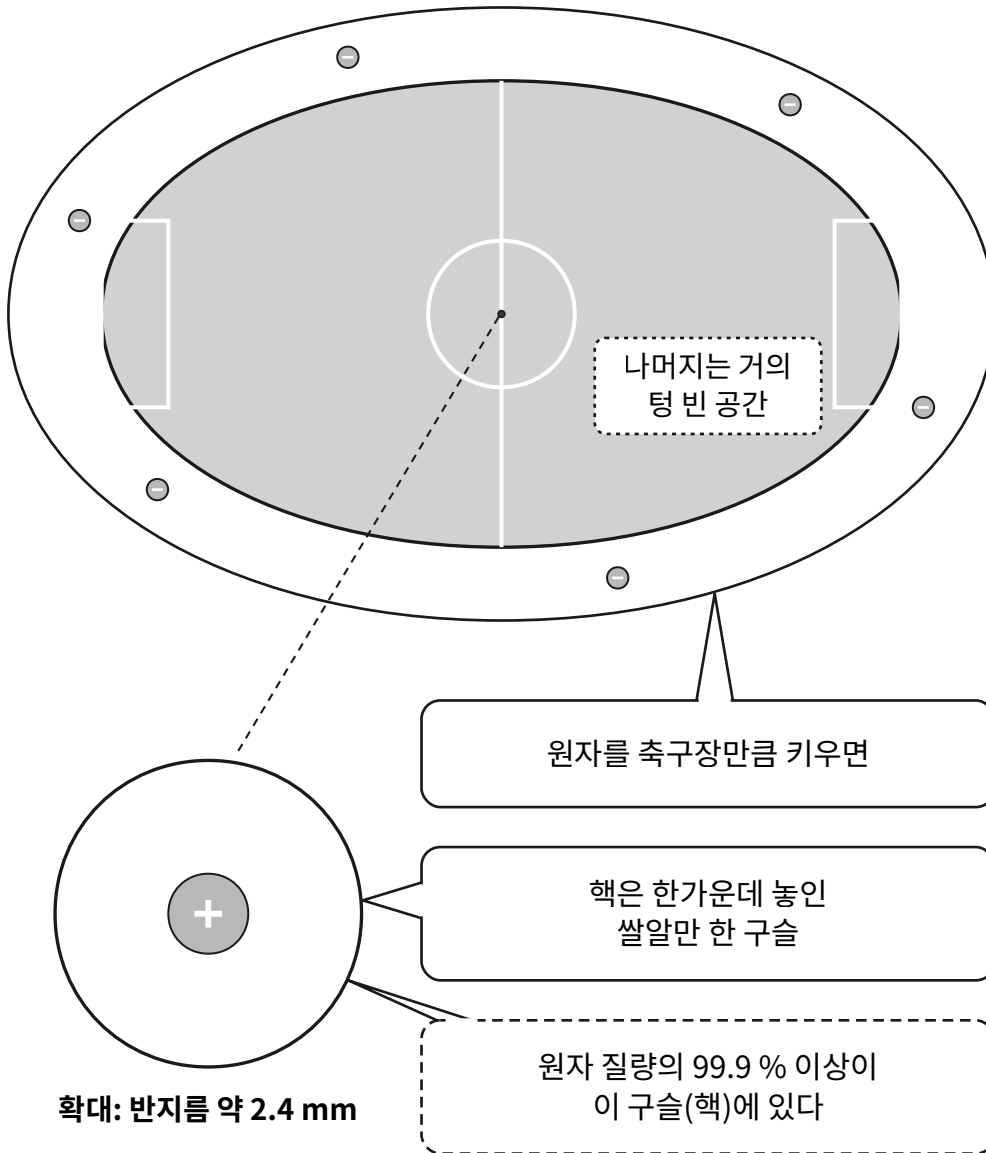
표 7. 제 3장의 개념이 쓰인 기출 — 학교·연도, 출제 내용, 이 장에서 알아야 할 개념

기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 6 (연세대 2019년) (239쪽)	네 실험으로 밝힌 원자의 구조	C3 알파 입자 산란과 원자핵
기출 11 (경희대 2010년) (285쪽)	원자핵의 크기와 핵자의 쌓임	C3 알파 입자 산란과 원자핵

축구장 한가운데의 구슬

금 원자를 반지름 50 m 경기장으로 키우면

경기장 = 원자 · 관중석 근처의 점 = 전자



$$\text{금 원자 } 144 \text{ pm} \div \text{금 핵 } 7.0 \text{ fm} \approx 2.1 \times 10^4 \text{ 배}$$

그림 13. 축구장 한가운데의 구슬 — 금 원자를 반지름 50 m 경기장만큼 키우면 원자핵은 센터 서클 한가운데 놓인 반지름 약 2.4 mm의 구슬이 되고, 질량의 99.9 % 이상이 그 구슬에 있다(모식도, 크기는 계산값)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 원자의 대부분은 빈 공간이다.
2. 질량과 양전하는 아주 작은 핵에 모여 있다.
3. 그래서 알파 입자는 대부분 통과하고 극히 일부만 크게 휘거나 튕긴다.

이 장의 출발점

기본개념편 제 2장 (25쪽)의 결론, 곧 원자 속에는 가벼운 음전하 입자인 전자가 있고 원자는 전체로 중성이라는 것과 톰슨 모형(양전하가 퍼진 구 속의 전자)을 쓴다. 같은 전하끼리는 밀어내며 그 힘은 가까울수록 급격히 커진다(거리의 제곱에 반비례)는 사실, 그리고 $1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$, $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ 단위를 쓴다. 산란각 계산에 나오는 $\tan$ 값은 문제에서 주거나 계산기로 구한다.

과학방 마당에는 지난주 비로 생긴 웅덩이가 있었다. 태오가 작은 돌맹이를 던지자, 물 위에 떠 있던 낙엽들 사이로 대부분의 돌이 그대로 빠져 들어갔는데, 한 번은 웅덩이 바닥의 큰 돌에 맞아 튕고 튀어 올랐다.

태오 교수님, 방금 봤어요? 대부분 그냥 들어가는데 한 번은 튕겨 나왔어요. 바닥에 뭔가 단단한 게 있나 봐요.

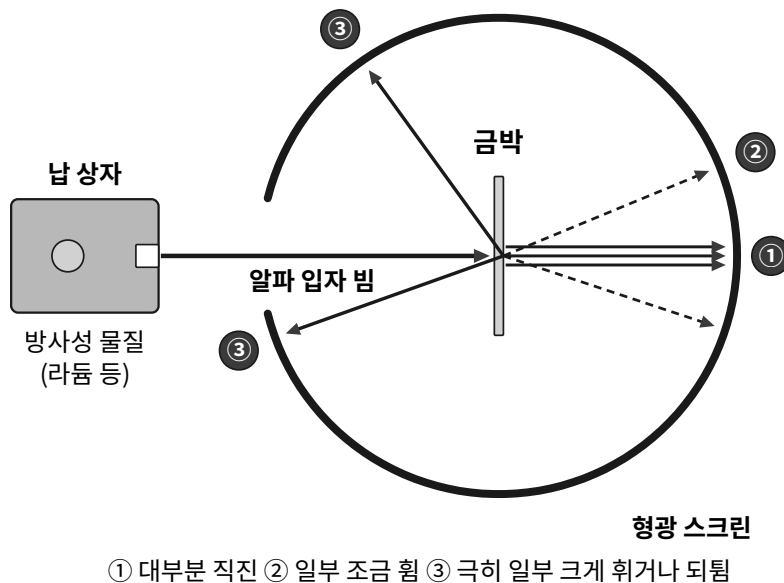
석 교수 그게 바로 오늘 이야기다. 물속이 보이지 않아도, 던진 돌이 어떻게 튀는지를 보면 바닥에 무엇이 있는지 짐작할 수 있지. 1909년 무렵 러더퍼드의 연구실에서는 원자를 향해 아주 빠른 돌맹이를 던졌다. 그 돌맹이가 **알파 입자**다.

하린 원자에 돌을 던져요? 원자는 보이지도 않는데요.

석 교수 그래서 결과로만 추리한다. 원자 안을 직접 본 사람은 없다. 대신 던진 입자가 어디로 튕었는지를 수십만 번 세어서 원자 안의 모습을 그렸다. 오늘은 그 추리를 따라가 보자.

3.1 실험 장치 — 라듐, 금박, 형광 스크린

석 교수 그림 14가 장치를 위에서 본 모식도다. 라듐 같은 방사성 원소는 알파 입자를 내놓는다. 알파 입자는 헬륨 원자에서 전자 두 개를 뺀 것, 곧 헬륨의 원자핵이다. 전하는 +2, 질량은 전자의 약 7300배야.



① 대부분 직진 ② 일부 조금 휜 ③ 극히 일부 크게 휘거나 되튬

그림 14. 알파 입자 산란 실험 장치(위에서 본 모식도) — 납 상자 속 방사성 물질에서 나온 알파 입자 빔이 두께 약 $0.4 \mu\text{m}$ 의 금박에 부딪힌다. 금박을 둘러싼 형광 스크린에 입자가 닿을 때마다 작은 빛이 번쩍이며, 이를 현미경으로 세었다. 대부분은 직진하고(①), 일부는 조금 휘며(②), 극히 일부는 크게 휘거나 되튬다(③).

- 하린** 납 상자는 왜 있어요?
- 석 교수** 알파 입자가 사방으로 나오니까, 작은 구멍 하나로만 나가게 해서 가는 빔을 만드는 거다. 빔은 아주 얇게 두드려 편 금박에 부딪친다. 금은 잘 퍼지는 금속이라 두께 0.4 μm , 원자 약 1400겹까지 얇게 만들 수 있었다. 금박 둘레에는 황화 아연을 바른 형광 스크린이 있어서, 알파 입자가 닿는 자리마다 작은 섬광이 번쩍인다. 가이거와 마스든은 어두운 방에서 현미경으로 그 섬광을 하나하나 쫓았다.
- 이모** 하필 금을 쓴 이유가 비싸서 그런 건 아니죠?
- 석 교수** 두 가지 이유가 있어요. 하나는 금이 모든 금속 중에서 가장 얇게 퍼진다는 것이예요. 박이 얇아야 알파 입자가 원자 여러 겹에 부딪쳐 뒤죽박죽 휘는 일이 줄어들고, 한 번의 큰 힘을 볼 수 있지요. 다른 하나는 금 원자의 핵이 무겁고 전하가 커서(+79) 힘이 뚜렷하다는 것이예요. 나중에는 은, 구리, 알루미늄 박으로도 실험해서 핵의 전하가 클수록 많이 휘다는 것도 확인했습니다.
- 하린** 장치 안은 진공이에요? 공기가 있으면 알파 입자가 공기에 부딪칠 것 같은데요.
- 석 교수** 맞다. 알파 입자는 공기 중에서 몇 cm만 가도 멈춘다. 그래서 장치 전체를 상자에 넣고 공기를 뺐다. 2장의 음극선관과 마찬가지로, 원자 속을 보는 실험은 대부분 진공 속에서 했다.
- 태오** 2장의 텔레비전 화면이랑 같은 원리네요. 입자가 부딪치면 빛나는 물질.
- 석 교수** 그렇다. 형광 물질은 입자 하나하나를 눈에 보이게 해 주는 창이었다. 다만 섬광이 아주 희미해서, 관찰자는 어두운 방에서 30분쯤 눈을 적응시킨 뒤에야 셀 수 있었다. 한 사람이 1분 넘게 집중하기 어려워 두 사람이 번갈아 쫓다고 해. 수십만 개의 섬광을 그렇게 손으로 쫓다는 것을 기억하자. 3×10^{-6} 처럼 작은 확률은 이런 끈질긴 세기 없이는 얻을 수 없다.

3.2 예상과 결과 — 종이에 쓴 포탄이 되돌아오다

- 석 교수** 먼저 예상부터 해 보자. 톰슨 모형이 맞다면, 금 원자 속의 양전하는 원자 전체에 퍼져 있다. 알파 입자가 원자를 지날 때 받는 전기력은 어떨까?
- 하린** 양전하가 퍼져 있으니까 어느 쪽에서나 비슷하게 밀어서... 힘이 별로 안 셀 것 같아요.
- 태오** 전자는 너무 가벼워서 무거운 알파 입자를 휘게 하지도 못하고요. 볼링공이 탁구공에 부딪친다고 방향이 바뀌진 않잖아요.
- 석 교수** 둘 다 맞다. 톰슨 모형으로 계산하면 원자 하나를 지날 때 휘는 각도는 1°의 수십분의 1 정도이고, 1400겹을 지나도 몇 도를 넘기 어렵다. 그러니 “모든 알파 입자가 거의 곧게 통과한다”가 예상이었다. 실제 결과를 표 8에 나란히 놓았다.

표 8. 톰슨 모형의 예상과 알파 입자 산란 실험의 실제 결과

관찰 항목	톰슨 모형의 예상	실제 결과	결과가 말하는 것
대부분의 알파 입자	거의 곧게 통과	거의 곧게 통과	원자의 대부분은 빈 공간이다
일부 알파 입자	아주 조금만 휜	큰 각도로 휜	아주 강한 전기력이 생기는 곳이 있다
극히 일부	되튀는 것은 없음	90°보다 크게 휘거나 되튀	양전하와 질량이 아주 작은 곳에 모여 있다
휘는 빈도와 각도	해당 없음	각도가 클수록 급격히 드물	그 작은 곳(핵)이 원자 크기보다 훨씬 작다

- 이모** 거꾸로 튕겨 나온 게 있었다는 거죠? 그게 그렇게 놀라운 일이에요?

석 교수 러더퍼드가 훗날 회고하기를, “얇은 휴지에 15인치 포탄을 쏘는데 그것이 되돌아와 나를 맞힌 것만큼 믿기 어려웠다”고 했어요. 무겁고 빠른 알파 입자를 되돌려 보내려면 그 입자보다 무거운 무언가가, 아주 가까운 거리에서 아주 센 힘으로 밀어야 하거든요. 퍼진 양전 하로는 그런 힘이 안 나옵니다. 1909년 가이거와 마스든의 첫 보고에서는 백금박에 쏜 알파 입자 약 8000개 중 1개가 90°보다 크게 되튀었다고 했어요.

3.3 해석 — 작고 무거운 양전하 덩어리, 원자핵

석 교수 러더퍼드는 1911년 이 결과를 이렇게 정리했다. 원자의 양전하와 질량의 거의 전부는 원자 한가운데 아주 작은 곳에 모여 있다. 이것이 **원자핵**이다. 전자는 그 둘레의 넓은 공간에 있고, 원자의 대부분은 빈 공간이다.

하린 그러면 결과 세 가지가 다 설명돼요. 대부분은 빈 공간을 지나니까 직진하고, 핵 근처를 지나면 휘고, 핵에 거의 정면으로 다가가면 튕겨 나오고요.

석 교수 그렇다. 핵이 작기 때문에 핵 가까이 가는 입자는 드물다. 그래서 크게 휘는 입자가 극히 적은 것이다. 또 양전하가 한곳에 모여 있으니, 아주 가까이 다가가면 거리의 제곱에 반비례하는 반발력이 엄청나게 커진다. 그 힘이 알파 입자를 되돌려 보낸다.

태오 그럼 전자는 핵 둘레 어디에 어떻게 있어요? 러더퍼드 모형 그림에서는 그냥 흩어져 있던데요.

석 교수 날카로운 질문이다. 러더퍼드 모형은 핵이 있다는 것까지만 말하고, 전자가 어떻게 놓여 있는지는 말하지 못했다. 알파 입자 산란은 무거운 핵만 보는 실험이라 가벼운 전자의 배치에 대해서는 아무것도 알려 주지 않거든. 전자의 배치는 빛, 곧 스펙트럼으로 알아낸다. 5장부터 그 이야기가 시작된다.

이모 핵이 알파 입자보다 무거워야 되한다고 하셨잖아요. 금 핵은 얼마나 무거워요?

석 교수 금의 원자핵은 알파 입자보다 약 49배 무거워요. 질량수로 197 대 4니까요. 탁구공이 볼링공에 부딪쳐 튕겨 나오는 셈이지요. 반대로 전자는 알파 입자의 1/7300이라, 볼링공 앞의 먼지처럼 아무 영향도 못 줍니다. 그래서 산란을 일으키는 것은 전자가 아니라 핵이라고 결론지을 수 있어요.

하린 휘는 정도로 핵의 전하도 알 수 있어요?

석 교수 그렇다. 같은 에너지의 알파 입자라도 핵의 전하가 클수록 d가 커져서 더 많이 휘다. 그래서 여러 금속박의 산란 빈도를 비교하면 핵의 전하를 어림할 수 있다. 러더퍼드는 핵의 전하가 원자량의 대략 절반쯤 되는 기본 전하의 배수라고 어림했고, 그 값이 주기율표의 순서 번호와 같다는 것은 1913년 모즐리의 X선 실험으로 확정됐다. 그 번호가 4장의 원자 번호다.

문제 3.1

금 원자의 반지름은 144 pm, 금 원자핵의 반지름은 7.0 fm이다. 원자 반지름은 핵 반지름의 몇 배인가? 또 금 원자를 반지름 50 m인 경기장만큼 키우면 핵의 반지름은 몇 mm인가?

태오 144 pm는 144×10^{-12} m이고 7.0 fm는 7.0×10^{-15} m예요. 나누면 $144 \div 7.0 = 20.6$, 지수는 $10^{-12} \div 10^{-15} = 10^3$. 그러니까 $20.6 \times 10^3 = 2.06 \times 10^4$, 약 2.1×10^4 배요.

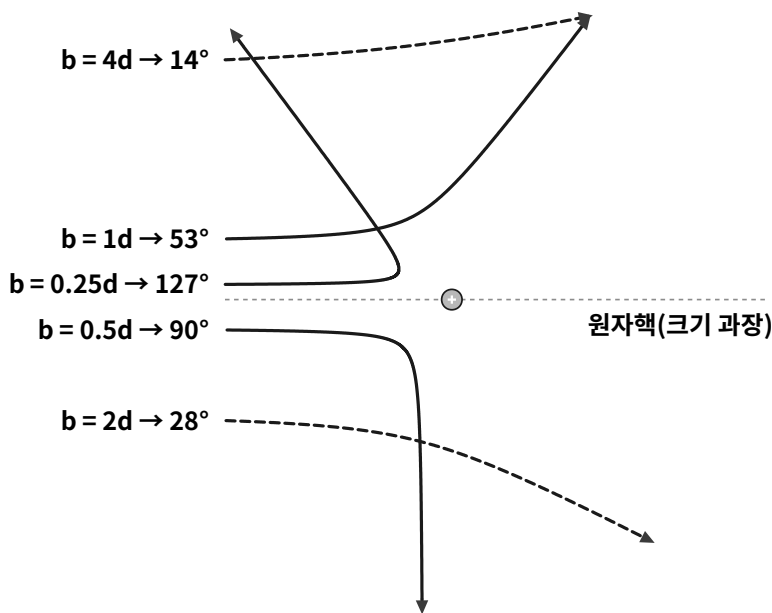
하린 경기장은 $50 \text{ m} \div 2.06 \times 10^4 = 2.43 \times 10^{-3} \text{ m}$, 약 2.4 mm예요. 쌀알만 하네요.

석 교수 정답이다. 금 원자 반지름은 핵 반지름의 약 2.1×10^4 배, 경기장 비유에서 핵의 반지름은 약 2.4 mm. **기본개념편 제 1장** (16쪽)에서 어림한 10^5 배보다 작은 것은 금 핵이 큰 핵이기 때문이다. 수소처럼 가벼운 원자는 핵이 훨씬 작아서 비가 더 커진다.

3.4 충돌 거리와 산란각

석 교수 이제 “얼마나 가까이 지나가면 얼마나 휘나”를 그림으로 보자. 알파 입자가 핵을 향해 날아갈 때, 처음 진행 방향의 직선과 핵 사이의 수직 거리를 **충돌 거리** b 라고 한다. b 가 0이면 정면으로 다가가는 것이고, b 가 클수록 멀리 비껴 지나가는 것이다.

알파 입자는 왼쪽에서 들어온다 · 왼쪽 글자 = 충돌 거리 $\rightarrow$ 산란각



실선 $b \leq d$, 점선 $b > d$ (d = 정면 충돌 때 가장 가까운 거리)

그림 15. 원자핵 근처를 지나는 알파 입자의 궤적 다섯 개 — 쿨롱 반발력만 작용할 때의 쌍곡선 궤적을 충돌 거리 $b = 0.25d, 0.5d, 1d, 2d, 4d$ 에 대해 계산해 그렸다(d 는 정면 충돌 때 가장 가까이 다가가는 거리). b 가 작을수록 크게 휘고, $b = 0.5d$ 이면 정확히 90° 휘다. 핵 크기는 과장했다(크기 비율 아님).

하린 가까이 지나간 것일수록 크게 꺾이네요. 맨 안쪽 것은 거의 되돌아가요.

석 교수 그 관계를 식으로 쓰면 $\tan(\theta/2) = d/(2b)$ 이다. θ 는 산란각, d 는 알파 입자가 핵을 향해 정면으로 다가갈 때 멈추는 거리야. 이 식은 대학 물리에서 유도하니 교과 밖 심화로 두고, 결과만 **그림 16**에 그렸다.

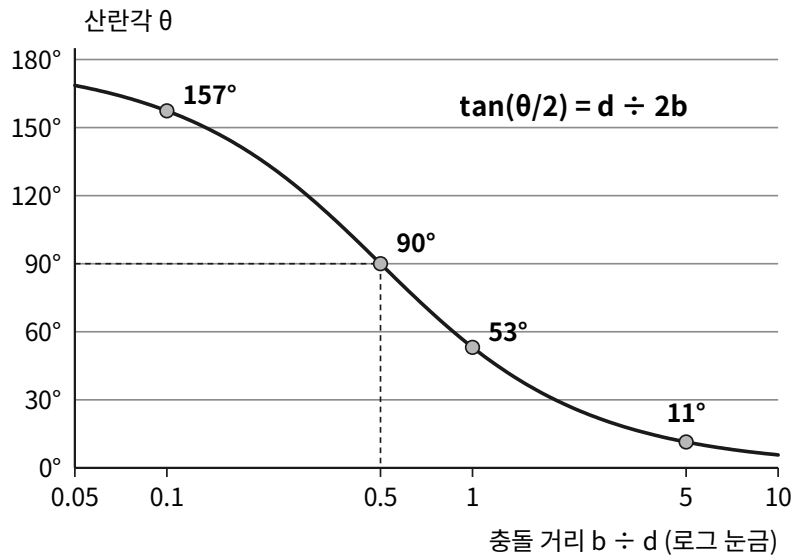


그림 16. 충돌 거리 b 와 산란각 θ 의 관계 — $\tan(\theta/2) = d/(2b)$ 로 계산한 곡선(가로축은 b/d , 로그 눈금). $b/d = 0.05$ 에서 169°, 0.1에서 157°, 0.5에서 90°, 1에서 53°, 5에서 11°, 10에서 6°이다. 충돌 거리가 조금만 커져도 산란각이 급격히 작아진다.

태오 b/d 가 0.5면 $\tan(\theta/2) = 1$ 이니까 $\theta/2 = 45^\circ$, $\theta = 90^\circ$. b/d 가 5면 $\tan(\theta/2) = 0.1$, $\theta/2 = 5.7^\circ$, $\theta = 11.4^\circ$ 요.

석 교수 잘 대입했다. 표로 확인하면 $b/d = 0.1$ 에서 157°, 1에서 53°다. 이 곡선이 말하는 것은, 크게 휘려면 b 가 d 정도로 아주 작아야 한다는 것이다. 7.7 MeV(메가전자볼트, 에너지 단위)의 알파 입자가 금 핵에 정면으로 다가가면 d 는 약 30 fm까지 줄어든다. 금 원자의 반지름 144 pm의 약 5000분의 1에 불과한 거리다. 그러니 원자 안의 아무 곳이나 지나서는 크게 휘 수 없고, 핵 바로 옆을 지나는 극히 일부만 크게 휘다.

이모 그런데 정면으로 와도 30 fm에서 멈춘다면, 알파 입자가 핵에 닿지는 않네요? 금 핵 반지름이 7 fm라면서요.

태오 그러면 $d = 30$ fm일 때 90° 휘려면 b 가 15 fm여야 하네요. $b/d = 0.5$ 니까요. 그런데 금 원자 반지름이 144 pm이면 15 fm는 그 1만분의 1 정도예요.

석 교수 그렇다. 알파 입자가 원자 하나를 지날 때 그 1만분의 1 거리 안쪽으로 들어갈 확률은 넓이로 따져 $(1/10^4)^2 = 10^{-8}$ 정도다. 그러니 90° 넘게 휘는 입자는 원자 수천 겹을 지나도 아주 드물 수밖에 없지. 숫자 몇 개로 “드물다”를 이렇게 설명할 수 있으면 논술에서 한 단계 높은 답이 된다.

석 교수 날카로워요. 맞아요, 이 실험의 알파 입자는 금 핵에 닿기 전에 되돌아갑니다. 그래서 산란이 쿨롱 법칙만으로 정확히 설명됐고, 러더퍼드는 이 결과에서 핵의 크기가 30 fm보다 작다는 상한을 얻었지요. 핵이 몇 fm인지는 더 빠른 입자를 쏜 뒤의 실험으로 알게 됐습니다.

문제 3.2

두께 0.40 μm 의 금박은 금 원자 약 1400겹에 해당한다. 원자 한 겹을 지날 때 알파 입자가 핵의 단면(반지름 7.0 fm)에 맞을 확률을 (핵 반지름 ÷ 원자 반지름)²으로 어렵하고(원자 반지름 144 pm), 금박 전체를 지날 때 핵에 정면 가까이 맞을 확률을 구하라.

하린 한 겹에서는 $(7.0 \times 10^{-15} \div 144 \times 10^{-12})^2$ 이예요. 괄호 안이 4.86×10^{-5} 이니까 제곱하면 2.36×10^{-9} 요.

태오 1400겹이니깐 곱하면 $1400 \times 2.36 \times 10^{-9} = 3.3 \times 10^{-6}$. 약 30만 개 중 1개예요.

석 교수 정답이다. 약 3×10^{-6} , 30만 개에 하나꼴이다. 이 어림은 원자를 원판으로 보고 겹치지 않는다고 놓은 모식적인 계산이라는 점을 꼭 밝혀야 해. 실제로 90° 보다 크게 휘는 비율은 알파 입자의 에너지와 박의 두께에 따라 달라진다. 그래도 “크게 휘는 입자는 극히 드물다”는 실험 결과와 자릿수의 감각이 맞다는 것이 중요하다.

3.5 러더퍼드 모형이 남긴 문제

하린 그럼 러더퍼드 모형으로 끝난 거예요? 핵이 있고 전자가 돌레를 돌고.

석 교수 큰 문제가 하나 남았다. 원운동하는 전하는 전자기파, 곧 빛을 내며 에너지를 잃는다는 것이 당시 물리학의 결론이었다. 그렇다면 핵 돌레를 도는 전자는 빛을 내며 에너지를 잃고 나선을 그리며 핵으로 떨어져야 한다. 고전 물리학으로 계산하면 수소 원자의 전자가 핵에 떨어지는 데 약 10^{-11} 초, 1000억분의 1초쯤 걸린다.

태오 그런데 원자는 멀쩡하잖아요. 이 책상도 안 무너지고요.

석 교수 그래서 모형이 또 바뀌어야 했다. 게다가 전자가 나선으로 떨어지면서 내는 빛은 파장이 연속적으로 변해야 하는데, 실제 원자는 띄엄띄엄한 선 스펙트럼만 낸다. 이 두 가지 모순을 해결한 것이 1913년의 보어 모형이고, 그 재료인 선 스펙트럼을 5장에서, 보어의 계산을 6장에서 본다.

이모 핵 속은요? 양전하가 한곳에 모였다면 그 안은 어떻게 생겼어요?

석 교수 그게 4장 이야기예요. 핵 속의 양전하를 띤 입자, 양성자가 1919년에, 전하가 없는 입자, 중성자가 1932년에 발견됩니다. 그러고 나서야 원자핵의 질량이 왜 양성자 수만으로는 맞지 않는지가 풀려요.

금박 실험 답안의 흔한 실수

“알파 입자가 원자핵에 부딪쳐 튕겨 나왔다”는 표현은 정확하지 않다. 알파 입자는 핵에 닿기 전에 전기적 반발력으로 되돌아간다. “원자핵의 강한 양전하에 의한 반발력 때문에 크게 휘거나 되튀었다”라고 써야 한다. 또 “원자핵은 음전하를 띤다”, “전자에 부딪쳐 휘었다”는 틀린 답이다. 양전하인 알파 입자를 밀어낸 것은 같은 양전하인 핵이다.

실험에서 모형까지 한 문단으로

태오 실제 답안으로는 어떻게 써요? 저는 쓰다 보면 실험 설명만 길어지고 결론이 짧아져요.

석 교수 한 문단에 네 문장이면 충분하다. “얇은 금박에 알파 입자를 쏘았더니 대부분은 그대로 통과했으나 극히 일부는 큰 각도로 휘거나 되튀었다. 대부분이 통과한 것은 원자의 대부분이 빈 공간이기 때문이고, 극히 일부가 크게 휘는 것은 양전하와 질량이 아주 작은 부피에 모여 강한 반발력을 주는 부분이 있기 때문이다. 이 부분이 원자핵이다. 따라서 원자는 중심의 작은 원자핵과 그 돌레의 전자로 이루어져 있다는 러더퍼드 모형이 제안되었다.” 결과 두 가지를 결론 두 가지와 짝지어 쓰는 것이 핵심이야.

하린 결과 하나에 결론 하나씩 짝을 맞추는 거네요. “대부분 통과 → 빈 공간”, “일부 되튐 → 작고 무거운 양전하 핵”.

핵심 알파 입자 산란 실험을 서술하는 4단계

1. 실험: 얇은 금박에 알파 입자(He 원자핵, +2)를 쏘고 형광 스크린의 섬광으로 산란각을 센다.
2. 결과: 대부분 직진, 일부는 큰 각도로 휜, 극히 일부는 되튐(1909년 보고: 약 8000개 중 1개, 백금박).
3. 결론: 원자의 대부분은 빈 공간이고, 양전하와 질량은 아주 작은 핵(원자 반지름의 약 $1/10^4 \sim 1/10^5$)에 모여 있다. 크게 휘려면 핵 바로 옆을 지나야 하므로 드물다($\tan(\theta/2) = d/(2b)$).
4. 모형과 한계: 러더퍼드 모형(1911, 작은 핵 + 돌레의 전자). 원운동하는 전자가 빛을 내며 핵으로 떨어져야 한다는 문제와 선 스펙트럼을 설명하지 못해 보어 모형으로 넘어간다.

스스로 풀어 보기

1. 알파 입자 산란 실험에서 “대부분의 알파 입자가 금박을 그대로 통과했다”는 결과로부터 알 수 있는 원자의 구조를 쓰라.
2. $\tan(\theta/2) = d/(2b)$ 를 이용하여 $b = 2d$ 일 때 산란각을 구하라. ($\tan 14^\circ = 0.25$)
3. 알파 입자를 휘게 한 것이 전자가 아니라 원자핵이라고 판단할 수 있는 근거를 질량으로 설명하라.
4. 러더퍼드 모형이 설명하지 못한 사실 두 가지를 쓰라.

정답과 해설은 부록 A에 있다.

4부의 **기출문제 6**(연세대 2019) (239쪽)은 제시문 (ㄷ)으로 금박 실험을 주고, 이 실험이 밝힌 원자의 구조를 원자 모형과 연계해 쓰게 한다. 핵심 상자의 1~4단계가 그대로 답의 뼈대다. **기출문제 11**(경희대 2010) (285쪽)은 톰슨과 러더퍼드의 실험 이야기를 제시문으로 주고 원자핵의 크기를 묻는데, 핵의 반지름이 질량수의 세제곱근에 비례한다는 관계는 다음 장에서 이어서 계산한다. 두 문항 모두 “대부분 통과 → 빈 공간, 극히 일부 되튐 → 작고 무거운 양전하 핵”이라는 짚을 먼저 세워 두면, 나머지 소문항의 계산과 서술이 그 위에 자연스럽게 올라간다.

이 장의 참고문헌

- Brown, T. L., LeMay, H. E., Jr., Bursten, B. E., Murphy, C. J., Woodward, P. M., & Stoltzfus, M. W. (2018). Chemistry: The central science (14th ed.). Pearson.
- Geiger, H., & Marsden, E. (1909). On a diffuse reflection of the α -particles. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 82(557), 495–500. <https://doi.org/10.1098/rspa.1909.0054>
- Geiger, H., & Marsden, E. (1913). The laws of deflexion of α particles through large angles. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 25(148), 604–623. <https://doi.org/10.1080/14786440408634197>
- Rutherford, E. (1911). The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 21(125), 669–688. <https://doi.org/10.1080/14786440508637080>

제 4장 양성자·중성자와 동위 원소

새 개념 원자 번호 · 질량수 · 동위 원소 · 평균 원자량 · 핵의 크기

이어짐 물 계산 · 원자 번호와 주기율표 9장

이 장의 개념도

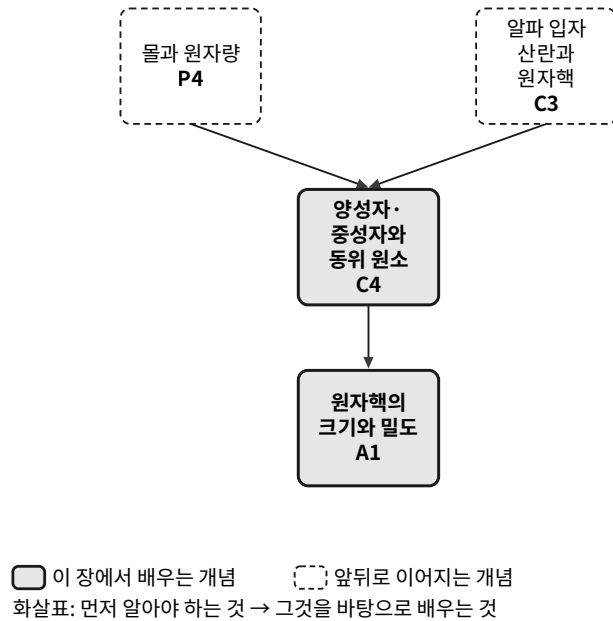


그림 17. 제 4장에서 배우는 개념(C4 양성자·중성자와 동위 원소, A1 원자핵의 크기와 밀도)과 그 앞뒤 연결. 진한 칸이 이 장에서 배우는 개념이고, 점선 칸은 먼저 알아야 하는 개념이나 이어서 배우는 개념이다. 화살표는 “먼저 알아야 하는 것 → 그것을 바탕으로 배우는 것” 방향이다.

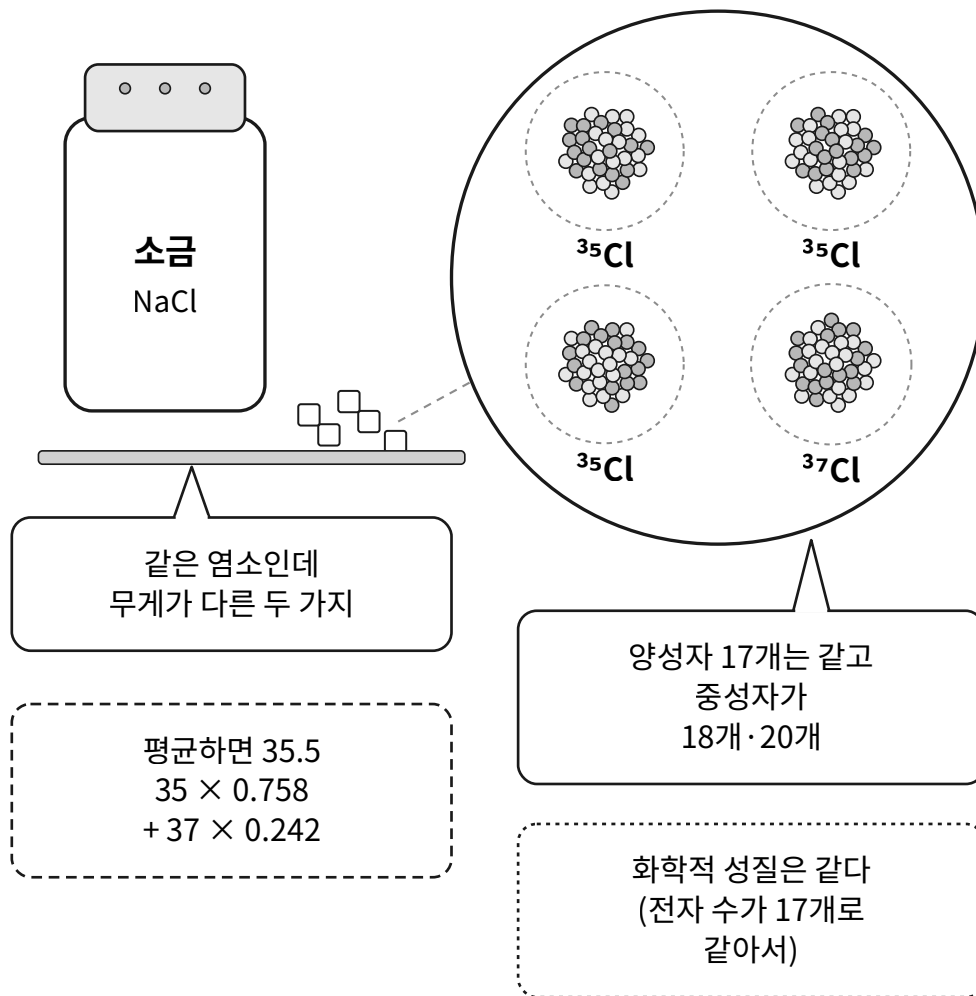
이 장의 개념이 쓰인 기출

표 9. 제 4장의 개념이 쓰인 기출 — 학교·연도, 출제 내용, 이 장에서 알아야 할 개념

기출(학교·연도, 쪽)	어떤 문제였나	이 장에서 알아야 할 개념
기출 4 (연세대 2021년) (220쪽)	탄소의 동위 원소와 바닥 상태 전자 배치	C4 양성자·중성자와 동위 원소
기출 6 (연세대 2019년) (239쪽)	네 실험으로 밝힌 원자의 구조	C4 양성자·중성자와 동위 원소
기출 11 (경희대 2010년) (285쪽)	원자핵의 크기와 핵자의 쌓임	C4 양성자·중성자와 동위 원소; A1 원자핵의 크기와 밀도

식탁 위의 소금통

같은 염소인데 무게가 다른 두 가지가 섞여 있다



^{35}Cl 75.8 % · ^{37}Cl 24.2 % (35.5짜리 염소 원자는 없다)

확대 원: 염소 원자 4개 중 3개는 ^{35}Cl , 1개는 ^{37}Cl

점선 원 = 전자 구름, 크기 비율 아님(모식도)

그림 18. 식탁 위의 소금통 — 소금 속 염소 원자 네 개 중 약 세 개는 ^{35}Cl , 한 개는 ^{37}Cl 이다. 양성자는 둘 다 17개이고 중성자가 18개와 20개로 다르다(모식도, 존재 비율 75.8 % : 24.2 %)

이 그림에서 꼭 볼 것

1. 동위 원소는 양성자 수가 같고 중성자 수가 다르다.
2. 평균 원자량 35.5는 존재 비율로 가중 평균한 값이다.
3. 전자 수가 같으므로 두 염소의 화학 반응은 거의 같다.

이 장의 출발점

기본개념편 제 3장 (34쪽)의 결론, 곧 원자의 질량과 양전하가 아주 작은 원자핵에 모여 있다는 것을 쓴다. 그리고 물의 뜻(입자 6.02×10^{23} 개의 묶음)과 원자량(탄소-12 원자 하나의 질량을 12로 놓은 상대 질량), 백분율로 가중 평균을 내는 계산을 쓴다. 부피는 반지름의 세제곱에 비례한다는 것도 필요하다.

일요일 점심, 이모가 과학방에 김밥을 싸 왔다. 하린이 소금통을 기울이다가 라벨을 들여다보았다.

하린 교수님, 소금통에 “염화 나트륨 99 %”라고 써 있어요. 그런데 교과서 주기율표에는 염소 원자량이 35.5라고 되어 있잖아요. 원자는 쪼갤 수 없으면서, 0.5는 뭐예요? 반쪽짜리 원자가 있어요?

석 교수 좋은 질문이다. 35.5라는 숫자 하나에 오늘 배울 것이 다 들어 있다. 답부터 말하면, 염소 원자는 한 가지가 아니다. 무게가 다른 두 가지 염소가 섞여 있고, 35.5는 그 평균이다.

태오 같은 염소인데 무게가 다르다고요? 그럼 그게 다른 원소 아니에요?

석 교수 원소를 정하는 것은 무게가 아니라 원자 번호, 곧 핵 속 양성자의 수다. 무게가 다른 까닭은 핵 속에 또 다른 입자, 중성자가 있기 때문이야. 오늘은 핵 속을 들여다보자. 지난 시간에 핵이 있다는 것까지 왔으니, 이제 핵이 무엇으로 되어 있는지 볼 차례다.

4.1 양성자와 원자 번호

석 교수 1913년 모즐리는 여러 원소에 전자를 쏘아 나오는 X선의 진동수를 잰다. 진동수의 제곱근이 주기율표의 순서 번호에 정확히 비례해서 커졌어. 이 순서 번호가 핵의 양전하 크기, 곧 핵 속 양전하 입자의 수와 같다는 것이 드러났다. 이것이 **원자 번호**다.

하린 그 전에는 주기율표를 뭘로 줄 세웠어요?

석 교수 원자량 순서였다. 그런데 몇 군데에서 순서가 뒤집혔지. 아르곤(원자량 39.9)이 칼륨(39.1)보다 무거운데, 성질로 보면 아르곤이 앞에 와야 했다. 원자 번호로 세우자 아르곤 18, 칼륨 19로 깔끔하게 정리됐다. 원소의 순서를 정하는 것은 질량이 아니라 핵의 전하라는 증거다.

태오 양성자는 언제 발견됐어요?

석 교수 1919년 러더퍼드가 질소 기체에 알파 입자를 쏘았더니 수소의 원자핵이 튀어나왔다. 알파 입자가 질소 핵에 부딪쳐 핵을 바꾸고 수소 핵을 내보낸 것이다. 질소 핵 속에 수소 핵이 들어 있었다는 뜻이지. 러더퍼드는 이 수소 핵이 모든 원자핵의 공통 부품이라고 보고 **양성자**(proton)라고 이름 붙였다. 전하는 +1, 곧 $+1.60 \times 10^{-19}$ C이고, 질량은 1.673×10^{-27} kg이다.

이모 원자 번호가 양성자 수라면, 중성 원자는 전자 수도 같은 거죠? 지난주에 나트륨은 11, 11이었잖아요.

석 교수 네, 맞아요. 원자 번호 = 양성자 수 = 중성 원자의 전자 수. 이 등식이 이 장의 첫 번째 열쇠예요. 이온은 전자 수만 달라져요. Na^+ 는 양성자 11개, 전자 10개지요.

4.2 “질량이 두 배” 수수께끼와 중성자

- 태오** 그런데 이상한 게 있어요. 헬륨은 원자 번호 2니까 양성자 2개인데, 헬륨 원자의 질량은 수소의 약 4배잖아요. 나머지 2만큼은 뭐예요?
- 석 교수** 바로 그것이 1920년대의 수수께끼였다. 거의 모든 원자가 양성자 수에서 기대하는 질량의 두 배 남짓이었거든. 탄소는 양성자 6개인데 질량은 12, 산소는 8개인데 16이다. 러더퍼드는 핵 속에 양성자와 질량이 비슷하면서 전하가 없는 입자가 있을 것이라고 예상했다.
- 하린** 전하가 없으면 찾기가 어렵겠네요. 전기장에서도 안 휘고 형광 스크린에서도 잘 안 보일 테니까요.
- 석 교수** 그래서 1932년에야 찾았다. 채드윅은 베릴륨에 알파 입자를 쏘았을 때 나오는, 투과력이 아주 큰 정체불명의 방사선을 조사했다. 이 방사선을 파라핀(수소가 많은 물질)에 쏘이자 빠른 양성자가 튀어나왔다. 튀어나온 양성자와 질소 핵의 속력을 비교해 보니, 그 방사선은 빛이 아니라 양성자와 질량이 거의 같은 중성 입자의 흐름이어야 했다. 그 입자가 **중성자(neutron)**다.
- 태오** 당구공으로 생각하면 되겠네요. 같은 무게의 공끼리 정면으로 부딪치면 맞은 공이 같은 속력으로 튀어 나가잖아요.
- 이모** 중성자가 발견되기 전에는 그 나머지 무게를 뭐라고 생각했어요?
- 석 교수** 핵 속에 양성자가 질량수만큼 들어 있고, 남는 양전하를 전자 몇 개가 상쇄한다고 보는 사람이 많았어요. 헬륨이라면 양성자 4개와 전자 2개가 핵에 있다는 식이지요. 그런데 이 생각으로는 질소 핵의 회전 성질 같은 실험 결과가 맞지 않았어요. 중성자가 발견되자 핵은 양성자와 중성자로 되어 있다는 지금의 그림으로 정리됐습니다.
- 석 교수** 좋은 비유다. 빛으로는 그렇게 큰 속력을 양성자에 줄 수 없다는 계산이 결정적이었다. 반응식으로 쓰면 ${}^9\text{Be} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} + \text{중성자}$ 다. **표 10**에 세 입자를 정리하고, **그림 19**에 질량과 전하를 비교했다.

표 10. 원자를 이루는 세 입자 — 발견자·연도·질량·전하

입자	발견(연도)	질량(kg)	상대 질량	전하(기본 전하 단위)	있는 곳
전자	톰슨(1897)	9.11×10^{-31}	1/1836	-1	핵 바깥
양성자	러더퍼드(1919)	1.673×10^{-27}	1	+1	핵 속
중성자	채드윅(1932)	1.675×10^{-27}	1.001	0	핵 속

상대 질량(양성자 = 1)			전하
 양성자	1	1	+1
 중성자	1.001	1.001	0
 전자	← 막대가 거의 보이지 않는다	1/1836	-1

원자의 질량은 사실상 양성자와 중성자가 정한다

그림 19. 원자를 이루는 세 입자의 질량과 전하 — 양성자 질량을 1로 놓으면 중성자는 1.001, 전자는 1/1836(막대가 거의 보이지 않는다). 전하는 양성자 +1, 중성자 0, 전자 -1이다. 원자의 질량은 사실상 양성자와 중성자가 정한다.

이모 전자 막대는 아예 안 보이네요. 그러니 원자의 무게는 핵이 다 정한다는 거군요.

석 교수 그래서 양성자 수와 중성자 수를 더한 값을 **질량수**라고 부르고, 원자의 질량을 대충 나타내는 데 써요. 전자 질량은 양성자의 1/1836이라 질량수에 넣지 않습니다.

4.3 질량수와 동위 원소 표기

석 교수 이제 원자 하나를 기호로 쓰는 법이다. 원소 기호 왼쪽 위에 질량수, 왼쪽 아래에 원자 번호를 쓴다. 탄소 원자라면 ^{12}C . 중성자 수는 질량수 - 원자 번호 = $12 - 6 = 6$ 이다.

태오 그럼 원자 번호는 같은데 질량수가 다른 원자가 있다는 거죠? 그게 동위 원소고요.

석 교수 그렇다. 원자 번호가 같아서 같은 원소인데 중성자 수가 달라 질량수가 다른 원자들을 **동위 원소**라고 한다. 탄소에는 세 가지가 있다. **표 11**를 보자.

표 11. 탄소의 동위 원소 세 가지

동위 원소	양성자	중성자	전자(중성 원자)	자연계 존재 비율	특징
^{12}C	6	6	6	약 98.9 %	원자량의 기준(정확히 12)
^{13}C	6	7	6	약 1.1 %	안정, 핵자기 공명 분석에 쓰임
^{14}C	6	8	6	아주 적음(약 10^{-10} %)	방사성(반감기 약 5730년), 연대 측정

하린 전자 수는 셋 다 6개로 같네요.

석 교수 그것이 두 번째 열쇠다. 화학 반응은 바깥 전자가 하는 일이니, 전자 수가 같은 동위 원소들은 화학적 성질이 거의 같다. ^{12}C 로 된 이산화 탄소와 ^{13}C 로 된 이산화 탄소는 똑같이 광합성에 쓰이고 똑같이 석회수를 뿌영게 만든다. 다른 것은 질량, 그리고 ^{14}C 처럼 핵이 불안정해서 방사선을 내는 성질 정도다.

이모 고고학에서 탄소 연대 측정이라고 하는 게 그 ^{14}C 예요?

석 교수 네. 살아 있는 생물은 공기 중의 ^{14}C 를 일정한 비율로 받아들이다가, 죽으면 더 받아들이지 못해요. 몸속의 ^{14}C 는 약 5730년마다 절반씩 줄어드니, 남은 양을 재면 죽은 지 얼마나 됐는지 알 수 있지요. 전자 배치가 아니라 핵이 다르기 때문에 생기는 성질이에요.

태오 화학적 성질이 “거의” 같다고 하셨는데, 완전히 같지는 않아요?

석 교수 질량 차이가 크면 조금 달라진다. 가장 극적인 예가 수소다. 보통 수소 ^1H 와 중성자가 하나 더 있는 중수소 $^2\text{H}(\text{D})$ 는 질량이 두 배 차이 난다. 그래서 중수소로 된 물, 곧 중수(D_2O)는 밀도가 약 1.11 g/mL, 끓는점이 101.4 °C로 보통 물과 조금 다르고, 반응 속도도 느려진다. 무거운 원소의 동위 원소는 질량 차이의 비율이 작아서 이런 차이가 거의 드러나지 않는다.

4.4 평균 원자량 — 35.5의 비밀

석 교수 이제 하린의 처음 질문으로 돌아가자. 염소에는 ^{35}Cl 과 ^{37}Cl 두 동위 원소가 있고, 자연에서 각각 75.8 %, 24.2 %의 비율로 섞여 있다. 이 비율은 **질량 분석기**로 잰다. 원자를 이온으로 만들어 전기장으로 가속한 뒤 자기장에서 휘게 하면, 무거운 이온일수록 덜 휘어서 질량별로 갈라진다. **그림 20**가 그 결과다.

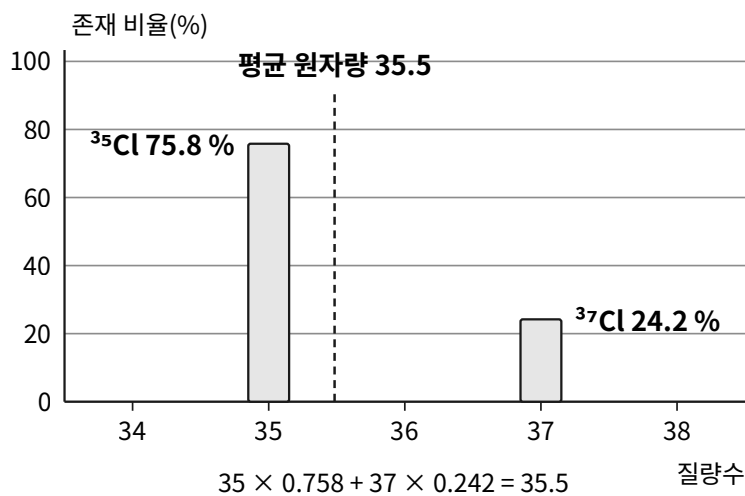


그림 20. 염소의 질량 스펙트럼(모식도) — 질량수 35와 37의 위치에 존재 비율 75.8 %와 24.2 %의 막대가 선다. 두 값을 비율로 가중 평균하면 $35 \times 0.758 + 37 \times 0.242 = 35.5$ 이며(세로 점선), 이것이 주기율표의 원자량이다. 평균 값 35.5인 염소 원자는 하나도 없다.

문제 4.1

염소의 동위 원소 ^{35}Cl 과 ^{37}Cl 의 존재 비율은 각각 75.8 %, 24.2 %이다. 각 동위 원소의 원자량을 질량수와 같다고 보고 염소의 평균 원자량을 구하라. 또 ^{35}Cl 과 ^{37}Cl 의 양성자 수와 중성자 수를 쓰라.

태오 그냥 평균 내면 $(35 + 37) \div 2 = 36$ 이요.

석 교수 그렇게 하면 두 동위 원소가 반반 섞여 있다는 가정이 된다. 실제로는 ^{35}Cl 이 세 배쯤 많다. 많은 쪽에 무게를 더 주어야지.

태오 아, 가중 평균이요. $35 \times 0.758 + 37 \times 0.242 = 26.53 + 8.954 = 35.48$, 반올림하면 35.5예요.

하린 양성자는 둘 다 17개고, 중성자는 $35 - 17 = 18$ 개, $37 - 17 = 20$ 개예요.

석 교수 정답이다. 평균 원자량 35.5, 양성자 17개씩, 중성자 18개와 20개. 실제 동위 원소의 원자량(34.969, 36.966)으로 계산하면 35.45가 나온다. 질량수로 어림한 35.48과 차이가 아주 작아서, 고교 문제는 보통 질량수로 계산한다. 그리고 하린이 처음에 걱정한 반쪽짜리 원자는 없다. 35.5짜리 염소 원자는 단 하나도 없고, 35와 37만 있다.

태오 그럼 염소 분자 Cl_2 를 질량 분석기에 넣으면 막대가 몇 개 나와요?

석 교수 생각해 보자. 두 원자가 $^{35}\text{Cl}-^{35}\text{Cl}$, $^{35}\text{Cl}-^{37}\text{Cl}$, $^{37}\text{Cl}-^{37}\text{Cl}$ 로 짝지을 수 있으니 질량 70, 72, 74의 세 막대가 선다. 비율은 $0.758 \times 0.758 = 0.575$, $2 \times 0.758 \times 0.242 = 0.367$, $0.242 \times 0.242 = 0.059$ 이다. 가장 작은 것을 1로 놓으면 약 9.8 : 6.3 : 1, 흔히 9 : 6 : 1로 어림한다. 가운데 짝에 2를 곱한 것은 ^{35}Cl 이 첫째 자리에 오는 경우와 둘째 자리에 오는 경우가 둘 있기 때문이다.

하린 확률 계산이랑 똑같네요. 동전 두 개를 던질 때 앞뒤가 나오는 경우가 두 가지인 것처럼요.

이모 결국 학교 반 평균 점수 같은 거네요. 반 평균이 75.5점이어도 75.5점 받은 학생은 없을 수 있잖아요.

석 교수 딱 그 비유예요. 그래서 시험에서 “염소 원자 하나의 질량은 35.5이다”라고 쓰면 틀립니다. “염소의 평균 원자량은 35.5이다”라고 써야 해요.

질량수와 원자량을 섞어 쓰지 말자

질량수는 양성자와 중성자의 개수를 더한 정수(^{35}Cl 이면 35)이고, 원자량은 ^{12}C 를 12로 놓은 상대 질량(^{35}Cl 이면 34.969)이다. 평균 원자량은 여러 동위 원소의 원자량을 존재 비율로 가중 평균한 값(염소 35.45)이다. 문제에서 “원자량은 질량수와 같다고 보라”고 하면 질량수로 계산하고, 동위 원소의 원자량을 주면 그 값을 쓴다.

문제 4.2

^{12}C 원자 1개의 질량은 1.99×10^{-23} g이다. (1) ^{12}C 12 g 속의 원자 수, 곧 아보가드로수를 구하라. (2) 자연의 탄소가 ^{12}C 와 ^{13}C 두 가지로만 이루어져 있고 평균 원자량이 12.01이라면, ^{12}C 의 존재 비율은 몇 %인가? (각 동위 원소의 원자량은 질량수와 같다고 본다)

하린 (1)은 $12 \div 1.99 \times 10^{-23} = 6.03 \times 10^{23}$ 개예요. 물에서 배운 6.02×10^{23} 이랑 거의 같아요.

태오 (2)는 ^{12}C 를 x %라 하면 ^{13}C 가 $(100 - x)$ %니까 $12x + 13(100 - x) = 1201$. 정리하면 $1300 - x = 1201$, $x = 99$. ^{12}C 가 99 %, ^{13}C 가 1 %요.

석 교수 둘 다 정답이다. 아보가드로수 6.03×10^{23} (주어진 질량 값의 반올림 때문에 6.02와 끝자리가 다르다), ^{12}C 99 %, ^{13}C 1 %. (2)에서 식의 오른쪽을 12.01이 아니라 1201로 쓴 것은 양변에 100을 곱해 백분율을 그대로 쓴 것이다. 이렇게 하면 소수 계산이 줄어 실수가 적다. 실제 존재 비율 98.9 %와도 잘 맞는다.

4.5 원자핵의 크기 — 핵자는 뽀뽀이 들어찬 공

태오 3장에서 금 핵이 7.0 fm라고 했잖아요. 핵의 크기는 질량수랑 어떤 관계예요?

석 교수 고에너지 전자를 핵에 쏘아 산란을 낸 실험들에서, 핵의 반지름이 $R = R_0 A^{1/3}$ 으로 거의 맞는다는 것이 알려졌다. A는 질량수, R_0 은 약 1.2 fm다. **그림 21**가 그 곡선이다.

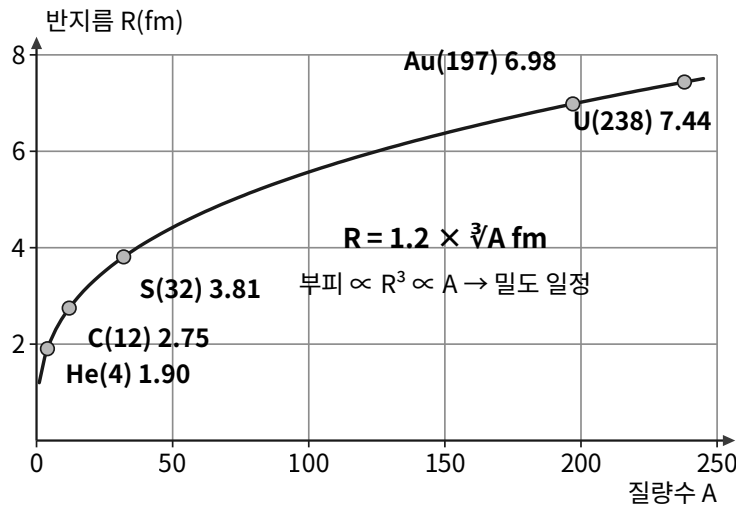


그림 21. 원자핵의 반지름 $R = 1.2 A^{1/3} \text{ fm}$ — 질량수 A 가 1부터 240까지 커질 때의 계산 곡선과 He($A = 4$) 1.90 fm, C(12) 2.75 fm, S(32) 3.81 fm, Au(197) 6.98 fm, U(238) 7.44 fm. 질량수가 8배(He → S)가 되면 반지름은 2배가 된다.

하린 세제곱근이면... 질량수가 8배가 되면 반지름은 2배네요. 헬륨 4에서 황 32로 가면 8배니까 1.90 fm에서 3.81 fm로 딱 두 배예요.

석 교수 그렇다. 그럼 부피는?

태오 부피는 반지름의 세제곱이니 $2^3 = 8$ 배요. 질량수도 8배인데... 아, 부피가 질량수에 정비례하네요!

석 교수 그게 이 식의 핵심이다. $R^3 \propto A$ 이니 부피 $\propto$ 질량수, 곧 핵자(양성자와 중성자를 함께 부르는 말) 하나가 차지하는 부피가 어느 핵에서나 같다. 구슬을 상자에 채우면 구슬 수에 비례해서 부피가 커지듯, 핵자는 서로 거의 눌리지 않는 공처럼 뽁뽁이 들어차 있다는 뜻이다. 그래서 핵의 밀도는 거의 일정하다. 핵자 하나의 질량 $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 을 반지름 1.2 fm 구의 부피로 나누면 약 $2.3 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$ 이다.

이모 2.3×10^{17} 이면 감이 안 오는데요. 물은 1000 kg/m^3 이잖아요.

석 교수 물보다 2×10^{14} 배, 이백조 배 뽁뽁해요. 각설탕 하나 크기(1 cm^3)에 핵 물질을 채우면 2억 톤이 넘습니다. 중성자별이 바로 이런 밀도의 별이에요. 원자가 거의 빈 공간이라는 3장의 결론과 함께 생각하면, 질량이 얼마나 한곳에 몰려 있는지 실감이 나지요.

핵자를 붙잡는 힘

양성자끼리는 전기적으로 밀어내는데도 핵이 흩어지지 않는 것은 아주 가까운 거리(수 fm)에서만 작용하는 강한 끌림, 곧 핵력 때문이다. 중성자는 전기적 반발 없이 핵력만 보태 핵을 안정하게 한다. 무거운 핵일수록 중성자가 양성자보다 많은 까닭이다(^{197}Au : 양성자 79, 중성자 118). 핵력은 교과 밖 심화다.

원자 구조·주기성 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가?

전자 배치를 쓰고, 유효 핵전하로 반지름과 이온화 에너지의 크기를 설명한다

1부 기본개념편

14개 장 · 장마다 생활 속 개념도 한 쪽과 개념 지도

3부 논술답안작성 패턴분석

설명·비교·판별·계산·해결 5가지 답안 틀, 감점 답안과 우수 답안 비교

2부 기출문제와 기본개념

기출 11문항(2010~2025학년도)이 쓰는 개념을 그래프로

4부 실전기출문제와 풀이과정

대학 원문 그대로 + 모범답안(공식 해설 기반 11문항) · 변형 문항

이 책의 차례 — 1부 기본개념편

1. 왜 원자 구조인가
2. 전자의 발견: 음극선관 속의 빛
3. 원자핵의 발견: 금박에서 튕겨 나온 알파 입자
4. 양성자·중성자와 동위 원소
5. 빛과 선 스펙트럼: 원자의 지문
6. 보어 모형: 에너지 준위를 계산하다
7. 오비탈과 양자수: 전자의 주소

8. 전자 배치 규칙: 쌓음·파울리·훈트
9. 전자 배치와 주기율표
10. 가려막기와 유효 핵전하
11. 원자 반지름과 이온 반지름
12. 이온화 에너지와 전기 음성도
13. 순차 이온화 에너지: 원자가 전자를 세는 계단
14. 주기성으로 원소를 가려내다, 그리고 2부로

한 단원씩 깊게, 25권으로 완성하는 고교 과학 논술 — 시리즈 전 25권 (테두리가 이 책)

논술 마스터 시리즈 · 생물 12권 (01~12)



논술 매니아 시리즈 · 화학 13권 (13~25)



함께 보면 좋은 권: 화학 결합·분자 구조(15권) · 분자 간 힘(16권) · 산화·환원(13권) · 화학 전지



개념 → 기출 → 답안 → 실전, 한 단원을 끝까지.

대학 논술 원문과 공식 해설로 검증한 풀이, 생활 속 개념도와 개념 그래프로 읽는 고교 과학 논술 교재입니다.

값 24,000원

실린 기출 문항의 저작권은 각 대학에 있습니다.

값 24000 원

53430



ISBN 979-11-23065-12-0

이어서 읽으시려면

대입 과학논술 13 — 원자 구조·주기성 — 전체 310쪽

ssbook.kr/book/nonsul-13

판매가 **14,400원** (POD 정가 24,000원)

- 전 페이지 컬러 PDF · 개인 영구 소장
- 카드 결제 즉시 내 서재에서 내려받기
- 공개 배포·재판매 금지

발간 도서 목록

다음 쪽부터 과학과영성출판사가 발간한 책 전체 목록(표지·가격·특징)을 안내합니다.

총 69종 · 판매가는 POD 정가의 60% · 컬러 PDF · 개인 영구 소장

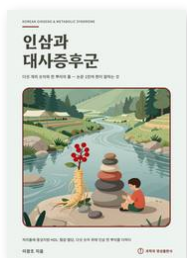
인삼 (6)



만병통치 인삼의 신경내분비시스템
하나의 인삼뿌리는 어떻게 온몸의 스위치를 건드리는가
17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/ginseng-neuroendo



인삼과 당뇨
공복혈당·당화혈색소·합병증을 개선하는 인삼
17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/ginseng-diabetes



인삼과 대사증후군
허리둘레·중성지방·HDL·혈압·혈당을 개선하는 인삼치유의 과학적 원리
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/ginseng-metabolic



인삼과 아토피
금산 아토피 마을에서 어린이 임상시험 설계까지
17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/ginseng-atopy



인삼과 암치유
실험실에서 진료실까지, 1,300편의 논문이 말하는 것
18,500원 → **11,100원**
ssbook.kr/book/ginseng-cancer



인삼의 임상연구
최신연구와 방법론
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/ginseng-clinical

오토파지 (2)



스스로를 먹는 몸
오토파지, 자가포식, 세포가 자기를 고쳐 쓰는 법
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/eating-self



오토파지와 암
세포는 스스로를 먹는다
17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/autophagy-cancer

식물성 저탄고지 (11)



뇌신경 4+2축과 성격유형 그리고 식물성 저탄고지
도파민 · 세로토닌 · 노르에피네프린 · 아세틸콜린 + 글루타메이트 · 가바
20,000원 → **12,000원**
ssbook.kr/book/brain-axes



당뇨를 개선하는 식물성 저탄고지
혈당·당화혈색소·체중을 함께 관리하는 식물성 케톤식 가이드
17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-diabetes



고혈압을 개선하는 식물성 저탄고지
혈압·체중·혈관 건강을 함께 관리하는 식물성 케톤식 가이드
17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-hypertension



비만을 개선하는 식물성 저탄고지
체중·허리둘레·체지방을 함께 관리하는 식물성 케톤식 가이드
17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-obesity



뇌전증을 개선하는 식물성 저탄고지
뇌전증 환자와 보호자를 위한 논문 근거 기반 식물성 저탄고지 식단
23,000원 → **13,800원**
ssbook.kr/book/pkd-epilepsy



우울증을 개선하는 식물성 저탄고지
소화관과 장·뇌 축, 에너지 대사를 살피는 식물성 케톤식의 원리와 실천
17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-depression



자폐를 개선하는 식물성 저탄고지
일곱 갈래 기전이 한 점에서 만난다
23,000원 → **13,800원**
ssbook.kr/book/pkd-autism



아토피를 개선하는 식물성 저탄고지
피부 장벽과 면역, 장 건강을 살피는 식물성 케톤식의 원리와 실천
19,000원 → **11,400원**
ssbook.kr/book/pkd-atopy



치매를 개선하는 식물성 저탄고지
뇌 에너지 대사와 인슐린 신호, 혈관 건강을 살피는 식물성 케톤식의 원리와 실천
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/pkd-dementia



암을 개선하는 식물성 저탄고지
치료 중 체중 유지와 근육 보존, 영양 상태를 함께 살피는 식물성 케톤식 가이드
17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-cancer



관절염을 개선하는 식물성 저탄고지
염증 신호와 체중 부하, 대사 건강을 살피는 식물성 케톤식의 원리와 실천
17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/pkd-arthritis

단식 (1)



40일간 굶는 몸의 시간표
카힐의 40일 연구, 혈당과 케톤과 자가포식을 중심으로
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/fasting-40days

생물리학 (4)



발끝의 강

피의 흐름에서 발바닥까지, 땅과 몸 사이에서 확인된 것과 아직 모르는 것

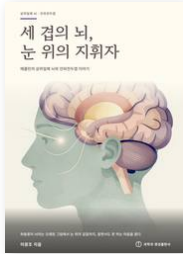
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/river-toes



보이지 않는 99%, 부항 자국 아래에서 벌어지는 일

부항과 미세혈관에 대한 열다섯 번의 강의

17,000원 → **10,200원**
ssbook.kr/book/cupping99



세 겹의 뇌, 눈 위의 지휘자

매클린의 삼위일체 뇌와 안와전두엽 이야기

18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/triune-brain



광유전

빛으로 세포를 제어하는 기술 — 원리·실험·회로·치료

42,000원 → **25,200원**
ssbook.kr/book/optogenetics

독립영양인간 (2)



이암블리코스의 피타고라스적 삶에 관하여

그리스어 원전 완역 · 테일러 판 전면 수록

18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/iamblichus



홍산문화의 수행상에서 한국 선도까지

요하의 흙인형 · 우하량의 여신 · 해명경 · 태을금 화종지 다섯 갈래를 한자리에 놓다

26,000원 → **15,600원**
ssbook.kr/book/hongsan

중고등학교 교재 (30)



대입 과학논술 01 — 유전 암호·전사·번역

대학 기출로 완성하는 분자생물학의 중심원리

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-01



대입 과학논술 03 — 멘델 유전·감수분열·가계도

분리·독립 × 감수 분열 × 확률의 곱 — 기출 22문항으로 읽는 유전

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-03



대입 과학논술 05 — 재조합 DNA·생명공학

제한 효소의 인식·절단 × 조각 길이로 위치 추론 × 재조합·판별 실험 설계

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-05



대입 과학논술 07 — 세포막·소기관·물질수송

인지질의 벽과 단백질의 문 — 물질은 기울기를 따라 흐른다

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-07



대입 과학논술 08 — 호르몬·항상성·배설

감지하고, 신호를 보내고, 되돌린다 — 혈당에서 콩팥까지 항상성

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-08



대입 과학논술 09 — 면역·백신

몸은 기억한다 — 염증 반응에서 백신과 집단 면역까지

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-09



대입 과학논술 10 — 세포호흡·광합성·에너지 대사

포도당 한 분자의 ATP 장부 — 미토콘드리아와 엽록체

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-10



대입 과학논술 11 — 신경계·활동 전위
펄프가 기울기를 만들고, 통로가 열리고 닫히며 신호가 생긴다

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-11



대입 과학논술 12 — 생태·진화·생물 다양성

에너지는 흐르고 물질은 돈다 — 개체군에서 종 분화까지

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-12



대입 과학논술 13 — 원자 구조·주기성

전자 배치 × 유효 핵전하 × 이온화 에너지로 읽는 주기성

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-13



대입 과학논술 14 — 화학 결합·분자 구조·극성

원자가 전자 세기 × 전자쌍 반발 × 쌍극자 벡터 합

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-14



대입 과학논술 15 — 분자 간 힘·수소 결합·계면

극성 × 분자 간 힘의 서열 × 계면 에너지로 읽는 물질

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-15



대입 과학논술 16 — 유기 화학·생체 분자·고분자

유기 화학·생체 분자·고분자 논제 해설

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-16



대입 과학논술 17 — 화학양론·농도

몰 × 반응식 계수비 × 농도 환산으로 푸는 화학 계산

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-17



대입 과학논술 18 — 산화·환원과 산화수

산화·환원과 산화수 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-18



대입 과학논술 19 — 산·염기·pH·완충

평형(K) × 몰수 계산 × 부피 보정으로 푸는 산·염기

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-19



대입 과학논술 20 — 반응 속도

넘어야 할 언덕 — 반감기에서 촉매, 반응 메커니즘까지

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-20



대입 과학논술 21 — 화학 평형

평형 상수 K × 반응 지수 Q × 르샤틀리에로 읽는 화학 평형

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-21



대입 과학논술 22 — 열화학·엔탈피·자유 에너지

열화학 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가

25,000원 → **15,000원**
ssbook.kr/book/nonsul-22



대입 과학논술 23 — 용액·총괄성·상평형

용액·총괄성·상평형 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가

24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-23



대입 과학논술 24 — 기체

기체 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가

24,000원 → **14,400원**

ssbook.kr/book/nonsul-24



대입 과학논술 25 — 화학 전자·전기 분해

화학 전자·전기 분해 논제는 무엇을 묻고, 어떻게 답하는가

24,000원 → **14,400원**

ssbook.kr/book/nonsul-25



01 통합과학 화학 1 — 소금과 별

원자에서 원소의 기원·주기율표까지

18,000원 → **10,800원**

ssbook.kr/book/tonghap-01



02 통합과학 화학 2 — 꽃은 왜 녹슬까

결합에서 반응·산과 염기까지

18,000원 → **10,800원**

ssbook.kr/book/tonghap-02



03 통합과학 생명과학 1 — 배추는 왜 숨이 죽을까

분자에서 세포·효소·에너지까지

18,000원 → **10,800원**

ssbook.kr/book/tonghap-03



04 통합과학 생명과학 2 — 늑대가 돌아오자

유전 정보에서 진화·생태계까지

18,500원 → **11,100원**

ssbook.kr/book/tonghap-04



05 통합과학 물리 1 — 미끄럼틀은 왜 따뜻해질까

원자에서 힘과 에너지까지

22,000원 → **13,200원**

ssbook.kr/book/tonghap-05



06 통합과학 물리 2 — 호박 구슬과 나뭇잎

원자에서 전자기파까지

24,000원 → **14,400원**

ssbook.kr/book/tonghap-06



07 통합과학 지구과학 1 — 구름은 왜 떨어지지 않을까

대기·기압·복사 에너지로 읽는 날씨

21,000원 → **12,600원**

ssbook.kr/book/tonghap-07



08 통합과학 지구과학 2 — 단양의 돌은 바다였다

원자에서 암석·판·지구의 역사까지

20,000원 → **12,000원**

ssbook.kr/book/tonghap-08

채식 (5)



사상체질과 채식

이제마의 사상·권도원의 팔체질·황제내경을 영양학과 분자생물학으로 다시 읽다

21,000원 → **12,600원**

ssbook.kr/book/sasang-veg



체질과 심리신경내분비

사상·팔체질·황제내경과 Big5·MBTI를 몸의 언어로 다시 읽다

18,000원 → **10,800원**

ssbook.kr/book/constitution-neuro

역사 속의 채식인

채식의 역사를 사람들의 이야기로 읽다

교보문고 판매

ssbook.kr/book/veg-history

채식이야기

채식에 관한 이야기

교보문고 판매

ssbook.kr/book/veg-story

우리 몸은 채식을 원한다

몸이 채식을 원하는 이유

교보문고 판매

ssbook.kr/book/body-wants-veg

라이프스타일 (3)



아주 쉬운 회춘의 원리

노화의 12가지 특징과 식이를 통한 회춘

18,000원 → **10,800원**

ssbook.kr/book/rejuvenation



피부는 안에서 만들어진다

콜라겐·아쿠아포린·자가포식과 식물성 케톤식

18,400원 → **11,000원**

ssbook.kr/book/skin-inside

과학과 초월의 길목에서

과학과 영성이 만나는 자리

교보문고 판매

ssbook.kr/book/science-transcend

고대사 (5)



동아시아 1만 년의 기후와 땅

한반도에서 본 홀로세의 기후와 지형 변화

25,000원 → **15,000원**

ssbook.kr/book/climate-ea-1



고려 서경(西京)의 위치를 추정하다 1권 방법편

여덟 가지 방법으로 동아시아 고전 지명을 좌표로 옮기기

25,000원 → **15,000원**

ssbook.kr/book/seogyong-1



고전의 지명을 좌표로 옮기다 제1권 기초편

동아시아 고전 지명의 계량적 위치 추정 (제1~7장)

21,000원 → **12,600원**

ssbook.kr/book/geonames-1



고전의 지명을 좌표로 옮기다 제2권 기법편

동아시아 고전 지명의 계량적 위치 추정 (제8~16장)

24,000원 → **14,400원**

ssbook.kr/book/geonames-2



고전의 지명을 좌표로 옮기다 제3권 적용편

동아시아 고전 지명의 계량적 위치 추정 (적용 사례)

25,000원 → **15,000원**

ssbook.kr/book/geonames-3