



06 통합과학 물리 2 — 호박 구슬과 나침반

원자에서 전자기파까지

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/tonghap-06

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

호박 구슬과 나침반



코넬 개념암기

이야기식

그래프 개념지도

풍부한 그림과 문제들

역사 속 인물과 일화들

ATOMS · CHARGES · FIELDS · CURRENTS ·
MAGNETS · WAVES

호박 구슬과 나침반

문제로 풀어 가는 통합과학 물리 이야기 1

원자에서 전자기파까지 —

통합과학 시리즈 제3권 물리 편, 단양 돌집 과학방의 세 번째 해 (봄~여름)

이광조 박사

판본 v10 · 2026-10-02

호박 구슬과 나침반

문제로 풀어 가는 통합과학 물리 이야기 1

호박 구슬과 나침반

이 책은 중학생과 고등학생, 그리고 물리를 다시 배우고 싶은 어른이 통합과학의 물리 부분을 원자에서부터 차근차근 이해할 수 있도록 네 사람의 대화로 풀어 쓴 교양서입니다. 책 속의 인물과 사건, 시험 점수와 실험 결과는 설명을 위해 지어낸 이야기 속 예시이며, 과학사와 연구 결과는 실제 문헌으로 각 장 끝에 출처를 밝혔습니다. 전기 실험은 건전지(1.5 V)처럼 낮은 전압으로만 하고, 가정용 콘센트·전자레인지·고압선에는 절대 손대지 마십시오. 번개가 칠 때는 넓은 곳과 물가를 피하십시오. 자석은 어린이가 삼키지 않게 하고, 심장 박동기를 쓰는 사람 가까이 두지 마십시오.

차례

머리말 — 원자에서 시작하는 물리	6
일러두기 — 이 책의 짜임	8

제1부 모든 것은 원자에서

1장 세 번째 봄 — 물리는 무엇을 재는가	11
2장 원자라는 생각 — 데모크리토스에서 브라운 운동까지	22
제1부 단원 마무리 — 수능형 문제	49

제2부 원자의 전기적 성질 — 전하

3장 전자의 발견 — 톰슨의 음극선	60
4장 전하의 가장 작은 덩어리 — 밀리컨의 기름방울	74
5장 원자핵의 발견 — 러더퍼드의 금박	84
6장 호박 구슬의 비밀 — 마찰 전기와 전자의 이동	97
7장 번개를 잡은 사람 — 프랭클린과 전하 보존	107
8장 도체와 절연체 — 전자가 자유로운가	120
제2부 단원 마무리 — 수능형 문제	132

제3부 전기력과 전기장

9장 쿨롱의 비틀림 저울 — 전기력의 법칙	143
10장 떨어져 있어도 미는 힘 — 전기장이라는 생각	157
11장 전기력선 — 보이지 않는 장을 그리다	166
12장 전기의 높이 — 전위차와 전압, 그리고 번개	177
제3부 단원 마무리 — 수능형 문제	188

제4부 움직이는 전하가 만드는 자기장

13장 흐르는 전하 — 볼타 전지와 전류	199
14장 옴의 법칙 — 전자는 왜 부딪칠까	212
15장 자석과 나침반 — 오래된 수수께끼	223
16장 외르스테드의 우연 — 전류가 나침반을 돌리다	237
17장 전류가 만드는 자기장 — 직선·원형·솔레노이드	251
18장 자석의 정체 — 원자 속 전자의 운동과 자성체	261
제4부 단원 마무리 — 수능형 문제	273

제5부 전자기력·전자기 유도·전자기파

19장 자기장 속 전류가 받는 힘 — 플레밍 왼손 법칙	285
20장 움직이는 전하가 받는 힘 — 로런츠 힘	300
21장 전동기와 스피커 — 전기로 움직임을	311
22장 전자기 유도 — 패러데이의 발견	321
23장 발전기 — 플레밍 오른손 법칙과 교류	337
24장 전기와 자기가 하나로 — 맥스웰과 헤르츠의 전자기파	347
25장 빛은 전자기파다 — 파장·진동수·속력과 스펙트럼	361
제5부 단위 마무리 — 수능형 문제	374

제6부 원자 속 전자와 빛

26장 원자 속 전자의 궤도 — 보어 모형과 주양자수	385
27장 빛을 내고 빛을 먹는 원자 — 방출과 흡수, 광자	396
28장 빛으로 읽는 원자 — 스펙트럼	406
제6부 단위 마무리 — 수능형 문제	417

제7부 우주와 원소의 기원

29장 원자의 재료는 어디서 왔을까 — 팽창하는 우주와 빅뱅	428
30장 가장 작은 조각들 — 기본 입자와 쿼크	441
31장 처음 3분 — 양성자와 중성자, 그리고 원자핵	456
32장 38만 년 — 전자가 붙잡혀 원자가 되다	466
33장 지구라는 큰 자석과 오로라 — 별에서 온 입자	477
제7부 단위 마무리 — 수능형 문제	490

부록

부록 A 용어 풀이	500
부록 B 교과 연결표	510
부록 C 스스로 풀어 보기 — 정답과 해설	513
부록 D 물리 기본 수치와 단위	523

머리말 — 원자에서 시작하는 물리

물리 교과서를 펴면 흔히 힘과 운동, 공식과 그래프가 먼저 나온다. 그런데 “힘이란 무엇인가?”, “마찰력은 어디서 오는가?”, “자석은 왜 쇠를 당기는가?”를 끝까지 물어 들어가면 결국 한곳에 닿는다. **원자**다. 모든 물질은 원자로 되어 있고, 원자는 양(+)전하를 띤 원자핵과 음(-)전하를 띤 전자로 되어 있다. 전기도, 자기도, 손으로 미는 힘도, 미끄럼틀의 마찰도, 태양 전지의 전기도 모두 이 원자와 그 속의 전하에서 나온다.

그래서 이 책은 순서를 바꾸었다. 교과서 목차를 참고하되, **앞 장의 개념에서 뒤 장의 개념이 자연스럽게 나오도록** 이어 붙였다. 상권은 원자에서 출발해, 원자의 전기적 성질인 **전하**, 전하가 만드는 **전기장**, 전하가 움직이는 **전류**, 움직이는 전하가 만드는 **자기장**, 자기장 속 전류가 받는 **힘**(플레밍 왼손 법칙), 자기장이 변할 때 생기는 **전류**(전자기 유도, 플레밍 오른손 법칙)를 거쳐 **전자기파**에 이른다. 전자기파가 무엇이고 어떤 성질을 가졌는지 안 다음에야 **원자 속 전자의 궤도**와, 전자가 궤도를 옮길 때 그 에너지 차이만큼 **빛을 내거나 흡수한다**는 것을 이해할 수 있다. 그리고 이 모든 것을 손에 쥔 뒤에 우주의 시작 — 빅뱅, 쿼크, 원자핵과 원자의 탄생, **우주 배경 복사** — 를 읽는다. 하권은 다시 원자로 돌아가 원자의 **질량**에서 관성과 중력을, 원자 사이 **전기력**에서 수직항력과 마찰력을 이끌어 낸 뒤, 운동의 법칙과 에너지, 발전과 송전, 빛과 반도체, 원자핵의 에너지로 나아간다.

이 연결이 눈에 보이도록 두 가지 장치를 넣었다. 장마다 첫머리의 **〈이 장의 출발점〉** 상자는 그 장이 기대는 앞 장의 개념과, 그 장에서 새로 세운 개념, 그 개념이 이어질 뒤 장을 보여 준다. 단원(부)마다 시작과 끝에는 **지식 그래프**가 있다. 시작 그래프는 무엇에서 출발하는지를, 끝 그래프는 새로 세운 개념들이 서로 어떻게 이어지고 다음 단원의 어디로 넘어가는지를 화살표로 그렸다.

그리고 장마다 **〈과학의 최전선〉** 상자에 과학이 **아직 밝히지 못한 것**을 적었다. 과학은 다 끝난 지식의 창고가 아니다. 여기까지는 실험으로 확인되었고, 여기서부터는 아직 모르며, 그 빈칸을 두고 어떤 가설이 경쟁하고 어떤 실험이 진행 중인지를 알아야 배운 것을 납득할 수 있고, 다음 질문을 던질 수 있다.

어떤 개념도 “그렇다고 외워라”로 시작하지 않으려 했다. 전기장과 자기장이 정말 있다는 것은 쿨롱의 저울, 외르스테드의 나침반, 패러데이의 코일 같은 **실험과 과학사**로 먼저 보여 준다. 그 실험을 한 사람들의 삶도 한두 쪽씩 담았다. 약국 견습생이던 외르스테드, 제본소 소년이던 패러데이처럼, 위대한 발견은 호기심 많은 보통 사람에게서 나왔다.

이 책의 무대는 충북 단양 남한강 가의 ‘돌집 과학방’이다. 화학 편과 생명 편에서 두 해를 함께한 하린·태오 남매와 두부집 사장 미숙 이모가, 올해는 은퇴한 물리학자 차정우 교수와 서른두 번의 토요일을 보낸다. 장마다 본문 속 문제 두 개와 그 풀이 대화가 있다. 문제를 먼저 풀어 보고, 풀이 대화와 **풀이 그림**을 따라가며 자기 풀이와 견주어 보기 바란다. 장 끝의 〈스스로 풀어 보기〉 정답과 해설은 부록 C에 있다.

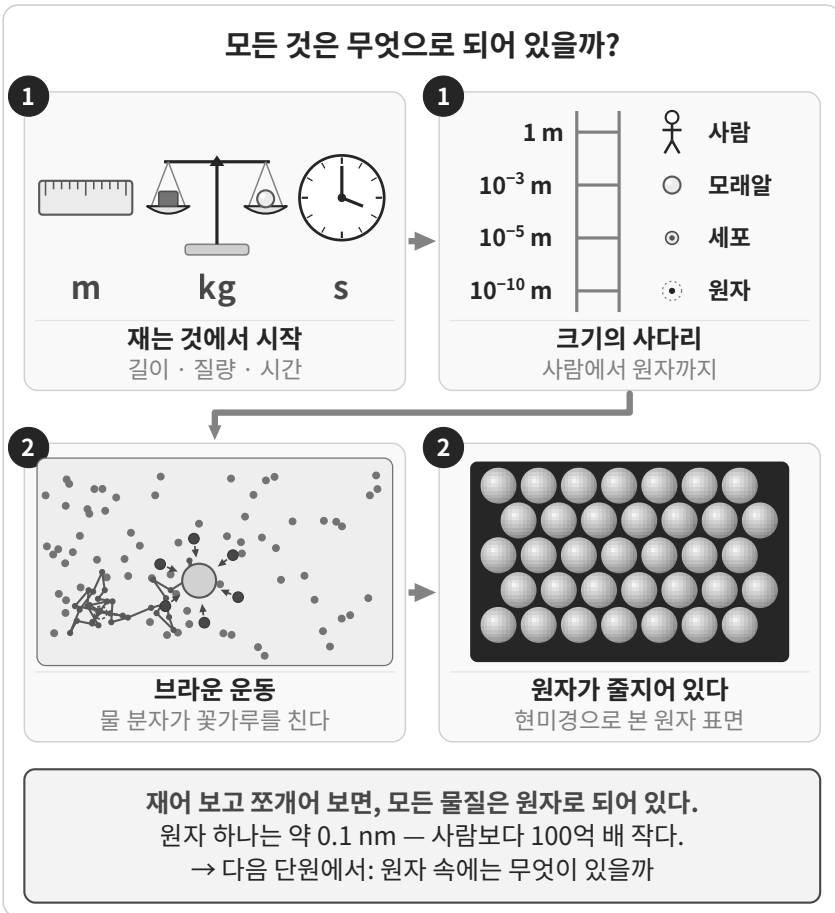
과학사와 연구 결과는 실제 문헌으로 각 장 끝에 출처를 밝혔다. 모든 논문의 DOI는 CrossRef에서 확인했다. 그림은 모두 좌표를 계산해 직접 그렸으며, 전기력선·자기력선과 힘의 방향은 손으로 그리지 않고 물리 법칙으로 계산해 얻었다.

2026년 가을, 이광조

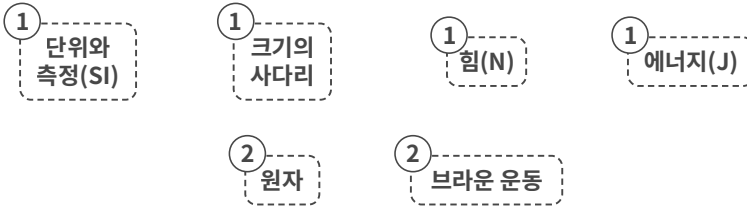
일러두기 — 이 책의 짜임

- **무대와 인물** 충북 단양 남한강 가의 ‘돌집 과학방’에서 은퇴한 물리학자 차 교수(차정우)와 하린·태오 남매, 두부집 ‘소백두부’의 미숙 이모가 함께 묻고 푼다. 인물과 사건, 시험 점수와 실험 결과는 설명을 위해 지어낸 이야기 속 예시이다.
- **단원의 짜임** 단원(부)마다 첫머리에 단원 전체를 한 장에 담은 그림과 〈들어가며〉 지식 그래프가, 마지막 장 끝에 〈정리〉 지식 그래프가 있다.
- **장 첫 쪽** 장마다 첫 쪽에 〈이 장의 출발점〉(앞 장에서 가져올 개념, 이 장에서 세울 개념, 이어질 뒤 장)과 〈기본개념〉(그 장의 핵심 개념을 낱말 하나와 한 문장 정의로 모은 표)을 두고, 본문은 다음 쪽부터 시작한다. 〈기본개념〉을 먼저 익힌 뒤 본문을 읽으면 이해가 쉽다.
- **문제와 풀이** 본문 속 문제는 「문제 7-1」처럼 장 번호와 차례를 붙였고, 바로 뒤의 대화와 풀이 그림이 풀이다. 장 끝 〈스스로 풀어 보기〉의 정답과 해설은 부록 C에 있다.
- **상자와 이야기** 〈오늘의 정리〉는 그 장의 요점을, 〈과학의 최전선〉은 과학이 아직 밝히지 못한 것을 담았다. 과학자 이야기는 발견한 사람의 삶을 삶의 지도·연표와 함께 실었다. 몇몇 장에는 학생이 “왜?”를 끝까지 캐묻고 교수가 최신 이론을 거쳐 아직 모르는 곳까지 함께 가는 〈끝까지 묻기〉가 있다.
- **단원 마무리 〈수능형 문제와 풀이〉** 단원마다 끝에 수능형 문제 다섯 개와 풀이를 실었다. 대학수학능력시험 기출 문제(한국교육과정평가원이 공개한 2028학년도 수능 예시 문항 포함)를 바탕으로 한 변형 문제이며, 평가원의 저작권 때문에 기출 원문은 신지 않았다. 문제마다 붙인 출처 표기는 바탕으로 된 기출의 학년도·과목·번호이고, 문제는 상황·수치·그림·문장을 새로 쓴 것이다.
- **출처** 본문의 작은 위첨자 번호는 각 장 끝 「이 장의 출처」의 번호다. 논문은 DOI를 CrossRef에서 확인했고 APA 7판 양식으로 적었다.
- **부록 A** 용어 풀이, **B** 교과 연결표(2022·2015 개정 교육과정), **C** 스스로 풀어 보기 — 정답과 해설, **D** 물리 기본 수치와 단위.

모든 것은 원자에서



제1부 들어가며 — 무엇에서 출발하나



[] 이 단원에서 세운 개념

[제1부] 단원 들어가며 — 지식 그래프 회색 상자는 앞 단원에서 세운 개념, 점선 상자는 이 단원에서 새로 세운 개념이다. 화살표는 "이 개념이 있어야 저 개념을 이해할 수 있다"는 뜻이고, 원 속 숫자는 그 개념을 세우는 장이다

01

세 번째 봄 — 물리는 무엇을 재는가

새 개념 단위와 측정(SI) · 크기의 사다리 · 힘(N) · 에너지(J)

이어짐 원자 2장 · 쿨롱 법칙 9장 · 일 = 힘 × 거리 12장 · 전력 $P = VI$ 14장 · 자석과 자극 15장

기본개념 이 장의 개념 11개 — 먼저 외우고, 그다음에 읽자

오른쪽 정의를 손이나 종이로 가리고, 단어만 보고 정의를 말해 보자. 막히는 단어는 본문에서 굵은 글씨로 다시 만난다.

1	기본량	길이·질량·시간처럼 다른 물리량을 만드는 바탕이 되는 일곱 가지 양.
2	유도량	속력처럼 기본량을 곱하거나 나누어 만든 양.
3	국제단위계	세계가 함께 쓰기로 약속한 단위 체계.
4	힘	물체를 밀거나 당기는 작용으로, 크기와 방향을 함께 가진 것.
5	뉴턴	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ 를 곱하고 나누어 만든 힘의 단위.
6	에너지	일을 할 수 있는 능력.
7	줄	1 N의 힘으로 물체를 1 m 옮길 때 드는 에너지를 1로 삼는 단위.
8	크기의 사다리	원자핵부터 우주까지 크기를 10배씩 커지는 눈금 위에 늘어놓은 것.
9	10의 거듭제곱	10을 여러 번 곱하거나 나눈 꼴로 아주 크고 작은 수를 쓰는 방법.
10	로그 눈금	한 칸 올라갈 때마다 10배씩 커지는 눈금.
11	밀도	질량을 부피로 나눈 양.

2027년 3월 첫째 토요일, 남한강 가 돌집 과학방에 세 번째 봄이 왔다. 옛 정미소의 나무 문이 열리고 석 교수와 도 교수가 낯선 손님 한 분과 함께 들어섰다. 흰머리를 짧게 깎은 손님은 모서리가 닳은 가죽 가방을 들고 있었다. 두 교수는 하린·태오 남매와 미숙 이모에게 손님을 소개하고는, 잘 부탁한다는 눈인사만 남기고 먼저 떠났다. 손님이 가방을 열자 탁자 위로 꿀빛 구슬 하나와 손때 묻은 나침반이 굴러 나왔다.

차 교수 반갑습니다. 차정우입니다. 대학에서 입자 가속기로 실험하고 전자기 측정을 가르치다 은퇴했지요. 요즘은 소백산천문대에서 별을 보여 주는 자원 해설가로 지냅니다. 올해는 이 과학방에서 물리를 함께 이야기하게 되었어요.

하린 선생님, 이 노란 구슬은 뭐예요? 꼭 사탕 같아요.

차 교수 호박이란다. 먼 옛날 나무의 송진이 땅속에서 오랜 세월 굳어 돌처럼 된 것이지. 이 구슬과 나침반이 올해 우리가 풀 두 수수께끼의 주인공이야. 왜 그런지는 여름이 오기 전에 저절로 알게 될 거란다.

태오 저는 물리학 I 을 골랐어요. 11월이 수능인데, 물리는 결국 공식 외우는 과목 아닌가요?

차 교수 공식은 맨 나중에란다. 물리는 먼저 **재**는 학문이야. 무엇을, 무엇으로, 얼마나 정확히 재는지부터 약속해야 하지. 그리고 우리 이야기는 늘 한곳에서 출발할 거야. 원자에서 시작해 보자꾸나.

미숙 재는 거라면 저도 날마다 해요. 콩 몇 킬로그램, 불리는 시간 몇 시간, 가마솥 물 몇 리터…….

차 교수 바로 그겁니다. 이모님은 이미 물리학자처럼 일하고 계신 셈이지요.

모든 양의 바탕, 일곱 가지 기본량

차 교수 콩의 양은 질량이고 불리는 시간은 시간이지요. 그런데 가마솥 물 1리터는 가로·세로·높이 세 길이를 곱한 부피입니다. 이처럼 다른 양을 만드는 바탕이 되는 양을 **기본량**이라 하고, 기본량을 곱하거나 나누어 만든 양을 **유도량**이라고 해요.

하린 유도량은 예를 들면 뭐가 있어요?

차 교수 속력을 보렴. 달린 거리(길이)를 걸린 시간으로 나누니 단위가 m/s 가 되지? 그래서 속력은 유도량이란단. 세계는 기본량을 일곱 가지로 정해

두었어. 길이·질량·시간·전류·온도·물질의 양·광도인데, 전류는 13장에서 자세히 배운단다¹.

차 교수 이 약속을 **국제단위계(SI, International System of Units)**라고 부른다. 나라마다 다른 자와 저울을 쓰면 과학자끼리 숫자를 주고받을 수 없어서, 세계가 함께 쓰기로 한 단위 체계지¹. 일곱 기본량과 그 단위를 그림 1-1에 모아 두었다.

길이 미터 m	질량 킬로그램 kg	시간 초 s	전류 암페어 A
온도 켈빈 K	물질의 양 몰 mol	광도 칸델라 cd	

[그림 1-1] 일곱 가지 기본량과 SI 기본 단위 길이(m)·질량(kg)·시간(s)·전류(A)·온도(K)·물질의 양(mol)·광도(cd). 다른 모든 물리량의 단위는 이 일곱을 곱하고 나누어 만든다

태오 1 m는 누가 정했어요? 프랑스 어딘가에 쇠막대가 있다던데요.

차 교수 예전엔 그랬지. 지금은 변하지 않는 자연의 상수로 정한다. 빛이 진공에서 1초 동안 가는 거리의 299 792 458분의 1이 1 m야^{1,2}. 빛이 1초에 가는 거리를 정확한 수로 못 박아 둔 거지. 빛이 왜 늘 같은 빠르기로 달리는지는 24장에서 자세히 배운다. 그렇게 정할 수 있었던 건 1972년 레이저로 빛의 빠르기를 아주 정밀하게 잴 실험 같은 노력이 쌓였기 때문이야³.

차 교수 2019년부터는 킬로그램도 금속 덩어리 대신 자연의 상수로 정의한다¹. 일곱 기본 단위가 모두 변하지 않는 상수 위에 올라선 셈이지.

미숙 두부 한 모 무게를 다는 우리 가게 저울 눈금도 결국 그 약속에 닿아 있는 거네요.

차 교수 그렇지요. 다만 모든 상수를 똑같이 잘 재는 것은 아닙니다. 물체끼리 끌어당기는 세기를 정하는 중력 상수 G는 지금도 재기가 가장 어려운 상수로 꼽혀요⁴. 잴 값에는 늘 얼마만큼 믿을 수 있는지가 함께 붙는답니다. 그 이야기는 오늘 끝에 다시 하지요.

태오 시험엔 어떻게 나와요?

차 교수 통합과학은 바로 이 기본량과 단위, 측정에서 출발한단다⁵. 어떤 양이 기본량인지, 유도량의 단위를 기본 단위로 풀면 어떻게 되는지를 자주 묻지.

올해 내내 쓸 두 낱말 — 힘과 에너지

차 교수 단위 이야기를 한 김에, 올해 내내 쓸 낱말 두 개를 약속해 두자꾸나. 첫째는 **힘**이야. 물리에서 힘은 물체를 **밀거나 당기는 것**이란단다. 이모님이 멧돌 손잡이를 미는 것도, 자석이 클립을 당기는 것도 힘이지⁶.

하린 힘에도 단위가 있어요?

차 교수 있지. 힘의 단위는 **뉴턴**, 기호는 **N**이야. 달걀 두 개, 곧 약 100 g을 손바닥에 올리면 손을 누르는 힘이 약 1 N이란단다⁶. 뉴턴은 $\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 를 곱하고 나누어 만든 유도 단위야¹. 그 정확한 뜻은 44장에서 운동 법칙을 배울 때 자세히 풀어 보자.

미숙 힘에는 방향도 있겠네요. 두부 틀을 누를 땐 아래로, 뚜껑을 열 땐 위로 드니까요.

차 교수 바로 그겁니다. 힘은 크기와 방향을 함께 가져서 그림에서는 화살표로 그리지요. 둘째 낱말은 **에너지**입니다. 에너지는 **일을 할 수 있는 능력**이에요. 여기서 ‘일’은 힘을 주어 물체를 옮기는 것인데, 정확한 약속은 12장과 50장에서 자세히 배웁니다. 아궁이의 장작, 충전한 휴대 전화 전지, 굴러가는 수레는 모두 무언가를 움직일 수 있으니 에너지를 가졌지요.

태오 에너지 단위는 줄(J)이죠? 물리학 I에서 봤어요.

차 교수 그래. 에너지의 단위는 **줄**, 기호 J란다¹. 1 N의 힘으로 물체를 1 m 옮기는 데 드는 에너지가 1 J이야. 달걀 두 개를 1 m 들어 올리는 데 약 1 J이 들지⁶.

하린 그러니까 힘은 밀고 당기는 것이고 N으로 재고, 에너지는 일을 할 수 있는 능력이고 J로 잰다는 거죠?

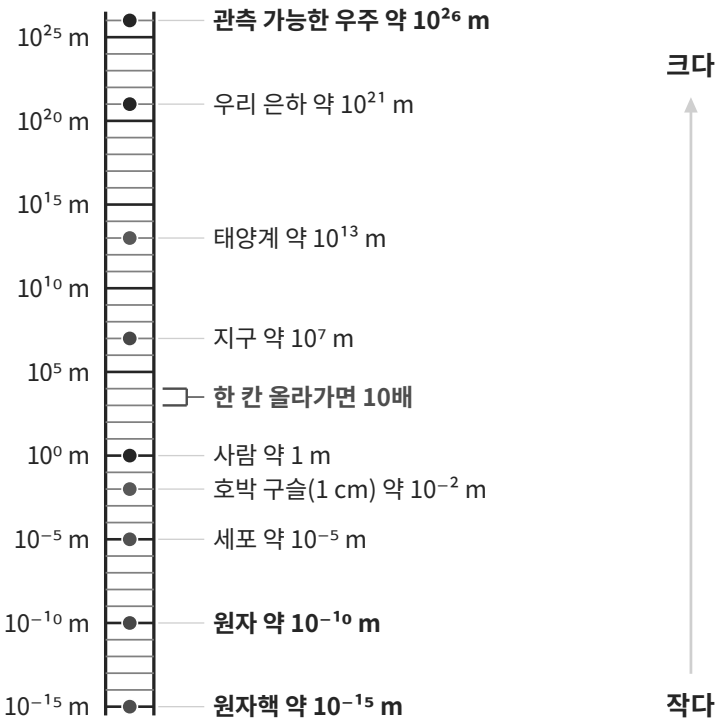
차 교수 잘 정리했구나. 한 가지만 미리 예고해 두마. 손바닥이 달걀을 받치는 힘도 파고들면 원자에서 나온단다. 원자 속 알갱이들이 서로 밀고 당기는 거지. 그 정체는 하권에서 자세히 알아볼 거란다.

크기의 사다리 — 원자핵에서 우주까지

차 교수 이제 길이 하나로 온 세상을 훑어보자꾸나. 이 호박 구슬은 지름이 1 cm쯤이야. 구슬도, 우리 몸도, 저 남한강 물도 모두 원자로 되어 있단다. 원자 하나의 지름은 약 10^{-10} m, 1 m를 백억 조각 낸 크기지⁶.

하린 10^{-10} 은 어떻게 읽어요?

차 교수 “10의 마이너스 10제곱”이라 읽고, 1을 10으로 열 번 나눈 수란다. 반대로 10^{26} 은 1 뒤에 0이 스물여섯 개 붙은 수야. 이렇게 10의 거듭제곱으로 쓰면 아주 작은 것과 아주 큰 것을 한 줄에 세울 수 있지. 그림 1-2를 보렴.



[그림 1-2] 크기의 사다리 한 칸 올라갈 때마다 10배씩 커지는 눈금(로그 눈금) 위에 원자핵(약 10^{-15} m)부터 원자·세포·사람·지구·태양계·은하, 관측 가능한 우주(약 10^{26} m)까지 늘어놓았다. 크기는 대략의 값이다

차 교수 맨 아래 원자핵은 약 10^{-15} ~ 10^{-14} m로 원자보다 10만 배쯤 작단다⁶. 원자 한가운데 있는 이 작은 알갱이는 5장에서 자세히 만날 거야. 맨 위는

빛으로 볼 수 있는 우주 전체로, 약 10^{26} m란다. 우주의 나이는 약 138억 년으로 재어졌지⁷. 우주가 어떻게 시작되었는지는 여름에 29장에서 자세히 이야기하자꾸나.

태오 사다리가 마흔한 칸이네요. 10^{-15} 에서 10^{26} 까지니까요.

차 교수 셈이 빠르구나. 올해 우리는 이 사다리의 두 끝을 자주 오갈 거란다. 오늘 오후에는 아래쪽 원자를 보고, 맨 위 우주는 여름밤 소백산천문대에서 자세히 이야기하자.

하린 그러니까 물리는 원자핵부터 우주까지 전부 재는 거네요. 재려면 같은 자가 있어야 하고요.

차 교수 잘 정리했구나. 모르는 것을 묻고 서로 답하며 배우면 이해가 훨씬 깊어진다는 조사도 있단다⁸. 그러니 올해는 틀려도 좋으니 먼저 말해보렴.

문제 1-1 기본량이 아닌 것

다음 중 기본량이 아닌 것은?

- ① 길이
- ② 질량
- ③ 속력
- ④ 시간
- ⑤ 온도

태오 속력은 자동차 계기판에 바로 나오니까 기본량 같아요. 온도는 손으로 느끼는 거라 재는 양이 아닌 것 같아요. ⑤요.

차 교수 그럴듯하구나. 조건을 다시 읽어 보자. 기본량의 뜻이 무엇이었지?

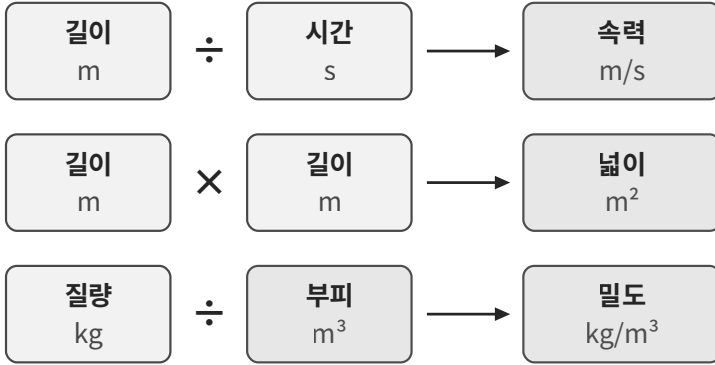
하린 곱하거나 나누어 만든 게 아니라, 다른 양의 바탕이 되는 양이요.

차 교수 그럼 계획은 간단해. 다섯 가지를 하나씩 “다른 양으로 쪼개지나?” 물어보자. 단위를 보면 쉽단다.

하린 길이 m, 질량 kg, 시간 s, 온도 K는 그림 1-1의 일곱 칸에 다 있어요. 속력은 m/s라서 길이를 시간으로 나눈 거고요.

차 교수 그림 1-3처럼 유도량의 단위를 기본 단위로 풀어 보면 한눈에 보인단다.

☐ 기본량 ☐ 유도량



부피 = 길이 × 길이 × 길이(m³)

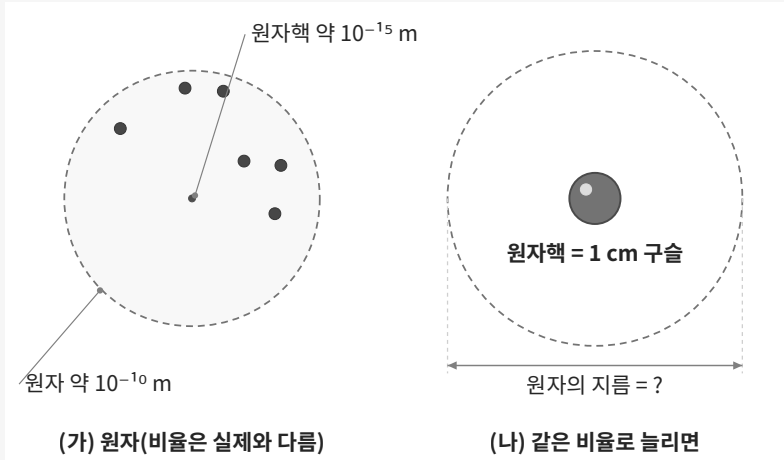
[그림 1-3] 풀이 그림 유도량은 기본량을 곱하고 나누어 만든다. 속력 = 길이 ÷ 시간(m/s), 넓이 = 길이 × 길이(m²), 밀도 = 질량 ÷ 부피(kg/m³)

태오 아, 속력은 계기판에 숫자 하나로 나와도 사실은 두 양을 나눈 거군요. 온도는 온도계로 재는 기본량이고요.

차 교수 그래서 정답은 ③이란다. 되돌아보자. 기본량인지 알고 싶으면 단위를 기본 단위로 쪼개 보면 되지. 이렇게 문제를 이해하고, 계획을 세우고, 풀고, 되돌아보는 네 단계는 수학자 폴리아가 정리한 방법이란단⁹. 올해 모든 문제를 이렇게 풀 거야.

문제 1-2 호박 구슬이 원자핵이라면

그림 1-4처럼 원자핵을 지름 1 cm인 호박 구슬만큼 크게 늘렸다고 하자. 원자의 지름을 약 10^{-10} m, 원자핵의 지름을 약 10^{-15} m로 잡을 때, 같은 비율로 늘린 원자의 지름은 약 얼마인지 구하시오.



[그림 1-4] 문제 1-2의 그림 원자핵(약 10^{-15} m)을 지름 1 cm 구슬로 늘리면 원자(약 10^{-10} m)는 얼마나 커질까

태오 사다리에서 다섯 칸 차이니까, 1 cm에 5를 곱해서 5 cm요.

차 교수 그럴듯하구나. 그런데 사다리 한 칸은 무엇을 뜻했지?

하린 한 칸 올라갈 때마다 10배요. 더하는 게 아니라 곱하는 거예요.

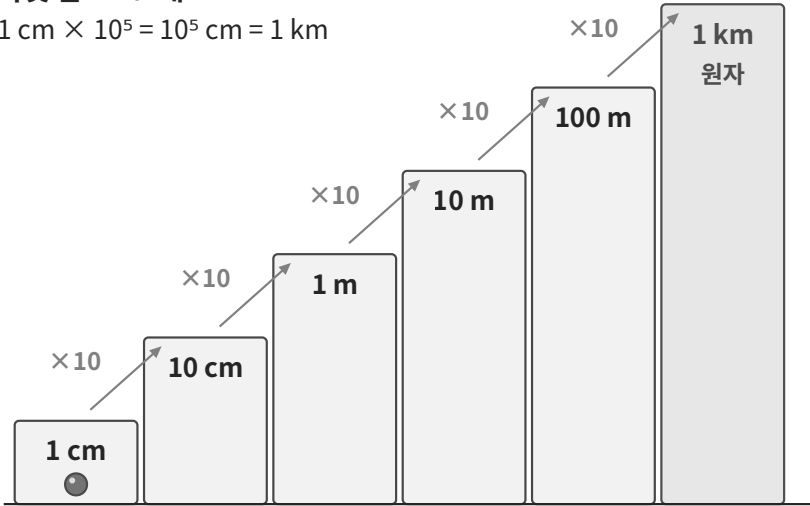
차 교수 그렇지. 계획을 세우자. 먼저 원자가 원자핵의 몇 배인지 구하고, 1 cm에 그만큼 곱하면 된단다. 10의 거듭제곱끼리 나눌 땐 지수를 빼면 돼.

하린 $10^{-10} \div 10^{-15} = 10^{-10+15} = 10^5$. 10만 배예요.

차 교수 그림 1-5처럼 한 칸에 10배씩 다섯 번 올라가 보렴.

다섯 칸 = 10^5 배

$$1\text{ cm} \times 10^5 = 10^5\text{ cm} = 1\text{ km}$$



[그림 1-5] 풀이 그림 1 cm에서 한 칸마다 10배씩 다섯 칸을 오르면 10 cm, 1 m, 10 m, 100 m, 1 km가 된다. 원자핵이 1 cm 구슬이라면 원자의 지름은 약 1 km다

태오 $1\text{ cm} \times 10^5 = 10^5\text{ cm} = 1000\text{ m}$. 1 km네요! 5 cm와는 비교도 안 되는군요.

차 교수 모범 답은 약 1 km란다. 과학방 탁자에 구슬을 두면 원자의 가장자리는 단양 읍내 어딘가까지 가 있는 셈이지.

미숙 그럼 그 1 km 안은 거의 텅 비어 있는 거예요?

차 교수 좋은 질문입니다. 그 안에는 아주 가벼운 전자들이 있을 뿐 거의 비어 있지요. 그런데도 원자의 질량은 거의 다 한가운데 작은 구슬, 원자핵에 모여 있어요. 원자핵은 5장에서, 원자의 질량은 34장에서 자세히 배웁니다.

과학의 최전선 가장 재기 어려운 상수 G

여기까지 밝혀졌다 — 일곱 기본 단위는 모두 변하지 않는 자연의 상수 위에 세워졌고, 빛의 빠르기와 기본 전하 같은 상수는 아예 정확한 값으로 정해 두었다^{1,2}. 물체끼리 끌어당기는 세기를 정하는 중력 상수 G도 비틀림 저울에서 원자 간섭계까지 여러 장치로 30여 년 동안 열 번 넘게 정밀하게 재었다⁴. **아직 모른다** — 그런데 G의 측정값끼리는 각 실험이 스스로 밝힌 오차보다 훨씬 크게 어긋난다. 그래서 G는 다른 기본 상수보다 몇 자릿수나 덜 정밀하게 알려져 있다⁴. 실험실의 쇠공끼리 끄는 힘은 아주 약해서 작은 흔들림이나 온도 변화에도 묻히기 쉽다. 어느 실험에 어떤 숨은 오차가 있는지는 아직 가려지지 않았다. **가설과 연구** — 가장 유력한 생각은 장치마다 알아채지 못한 오차가 숨어 있다는 것이다. 그래서 한 연구진이 원리가 다른 두 방법으로 G를 따로 재어 견주는 실험을 했고¹⁰, 여러 나라가 서로 다른 장치의 결과를 모아 어긋남의 원인을 찾고 있다⁴.

오늘의 정리

- 물리는 재는 데서 시작한다. 다른 양의 바탕인 **기본량** 일곱 가지(길이·질량·시간·온도 등)가 있고, 속력처럼 기본량을 곱하고 나눈 양은 **유도량**이다.
- 세계가 함께 쓰는 단위 약속이 국제단위계(SI)이며, 지금은 빛이 1초에 가는 거리 같은 자연의 상수로 단위를 정의한다.
- **힘**은 물체를 밀거나 당기는 것으로 단위는 뉴턴(N), **에너지**는 일을 할 수 있는 능력으로 단위는 줄(J)이다.
- 10의 거듭제곱으로 쓰면 원자핵(약 10^{-15} m)부터 관측 가능한 우주(약 10^{26} m)까지 한 사다리에 놓인다. 한 칸은 10배다.
- 원자의 지름은 약 10^{-10} m로 원자핵보다 약 10만 배 크다.

스스로 풀어 보기 정답과 해설은 부록 C

1. 다음 중 유도량인 것은?

- ① 질량
- ② 온도
- ③ 시간
- ④ 부피
- ⑤ 물질의 양

2. 지구의 지름은 약 10^7 m, 원자의 지름은 약 10^{-10} m이다. 지구의 지름은 원자 지름의 몇 배인지 10의 거듭제곱으로 쓰고, 풀이 과정을 쓰시오.

이 장의 출처

1. Bureau International des Poids et Mesures. (2019). The International System of Units (SI) (9th ed.). BIPM.
2. Tiesinga, E., Mohr, P. J., Newell, D. B., & Taylor, B. N. (2021). CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2018. Reviews of Modern Physics, 93(2), 025010. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.93.025010>
3. Evenson, K. M., Wells, J. S., Petersen, F. R., Danielson, B. L., Day, G. W., Barger, R. L., & Hall, J. L. (1972). Speed of Light from Direct Frequency and Wavelength Measurements of the Methane-Stabilized Laser. Physical Review Letters, 29(19), 1346–1349. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.29.1346>
4. Rothleitner, C., & Schlamminger, S. (2017). Invited Review Article: Measurements of the Newtonian constant of gravitation, G. Review of Scientific Instruments, 88(11), 111101. <https://doi.org/10.1063/1.4994619>
5. 교육부. (2022). 과학과 교육과정 (교육부 고시 제 2022-33호 [별책 9]). 교육부.
6. Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2018). Fundamentals of physics (11th ed.). Wiley.
7. Planck Collaboration, Aghanim, N., Akrami, Y., Ashdown, M., Aumont, J., Baccigalupi, C., Ballardini, M., Banday, A. J., Barreiro, R. B., Bartolo, N., Basak, S., Battye, R., Benabed, K., Bernard, J., Bersanelli, M., Bielewicz, P., Bock, J. J., Bond, J. R., Borrill, J., . . . Zonca, A. (2020). Planck 2018 results: Cosmological parameters. Astronomy & Astrophysics, 641, A6. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>
8. Hake, R. R. (1998). Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. American Journal of Physics, 66(1), 64–74. <https://doi.org/10.1119/1.18809>
9. Pólya, G. (1945). How to solve it. Princeton University Press.
10. Li, Q., Xue, C., Liu, J., Wu, J., Yang, S., Shao, C., Quan, L., Tan, W., Tu, L., Liu, Q., Xu, H., Liu, L., Wang, Q., Hu, Z., Zhou, Z., Luo, P., Wu, S., Milyukov, V., & Luo, J. (2018). Measurements of the gravitational constant using two independent methods. Nature, 560(7720), 582–588. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0431-5>

02

원자라는 생각 — 데모크리토스에서 브라운 운동까지

출발점 크기의 사다리 1장

새 개념 원자 · 브라운 운동

이어짐 전자 3장 · 원자핵 5장 · 열 = 원자의 무작위 운동 52장

기본개념 이 장의 개념 11개 — 먼저 외우고, 그다음에 읽자

오른쪽 정의를 손이나 종이로 가리고, 단어만 보고 정의를 말해 보자. 막히는 단어는 본문에서 굵은 글씨로 다시 만난다.

1	아토모스	데모크리토스가 ‘더는 쪼갤 수 없는 것’이라 부른 알갱이.
2	브라운 운동	물에 뜬 작은 알갱이가 물 분자에 부딪혀 불규칙하게 떠는 운동.
3	주사 터널링 현미경	바늘과 표면 사이를 건너는 약한 전류로 원자의 높낮이를 읽는 현미경.
4	원자힘 현미경	바늘 끝 원자와 표면 원자 사이의 힘으로 표면을 읽는 현미경.
5	원자	원소의 성질을 지닌 가장 작은 알갱이.
6	원자핵	원자 한가운데에 있는 아주 작고 무거운 부분.
7	전자	원자핵 둘레에 있는 아주 가벼운 알갱이.
8	영점 운동	가장 낮은 에너지 상태에서도 원자가 멈추지 못하고 떠는 운동.
9	대칭	무엇을 바꾸어도 물리 법칙이 그대로인 성질.
10	유의미 공간	물질이 있어 자리·거리·움직임을 썰 수 있는 공간.
11	무의미 공간	물질이 없어 썰 것이 아무것도 없는 공간.

점심으로 미숙 이모가 싸 온 마늘두부를 나누어 먹고 나니, 과학방 서쪽 창으로 봄별이 비스듬히 들어왔다. 빗줄기 속에서 작은 먼지들이 반짝이며 쉬지 않고 오르내렸다. 하린이 손바닥을 빗줄기에 대 보다가 물었다. 오전에 1장에서 차 교수가 크기의 사다리에 올려 준 원자, 10^{-10} m짜리 알갱이가 머릿속을 맴돌았다.

하린 선생님, 원자가 그렇게 작다면 아무도 본 적이 없을 텐데, 있다는 건 어떻게 알아요?

차 교수 오늘 오후의 물음이 바로 그거란다. 오전에 모든 것이 원자로 되어 있다고 했지. 그리고 무엇이든 재야 안다고 했고. 원자에서 시작해 보자꾸나. 그런데 “원자가 있다”는 말이 처음부터 사실로 받아들여진 건 아니야. 생각에서 출발해, 간접 증거를 거쳐, 마침내 직접 보기까지 2,000년이 넘게 걸렸단다.

쪼개고 또 쪼개면 — 데모크리토스와 돌턴

차 교수 두부 한 모를 반으로, 또 반으로 자꾸 자른다고 해 보자. 끝없이 자를 수 있을까?

미숙 칼로는 어렵겠쥬. 몇 번 자르면 부스러기가 되니까요.

차 교수 칼 말고 생각으로 자르면요? 옛 그리스의 데모크리토스는 언젠가는 더는 쪼갤 수 없는 알갱이에 닿는다고 생각했습니다. 그 알갱이를 “쪼갤 수 없는 것”이라는 뜻의 아토모스라 불렀지요. 원자를 뜻하는 영어 atom이 여기서 왔어요. 하지만 그는 실험이 아니라 생각으로 그 결론에 이르렀답니다.

태오 돌턴은 화학 편에서 배웠어요. 원소마다 원자의 질량이 다르고, 원자들이 정해진 비율로 결합해서 화합물을 만든다고요.

차 교수 잘 기억하는구나. 19세기 초 돌턴 덕분에 원자는 화학의 섬을 설명하는 훌륭한 도구가 되었지. 그래도 19세기 말까지 “원자는 섬을 편하게 하려는 가정일 뿐, 실제로 있는지는 모른다”는 과학자가 적지 않았단다. 눈에 보이지 않으니까.

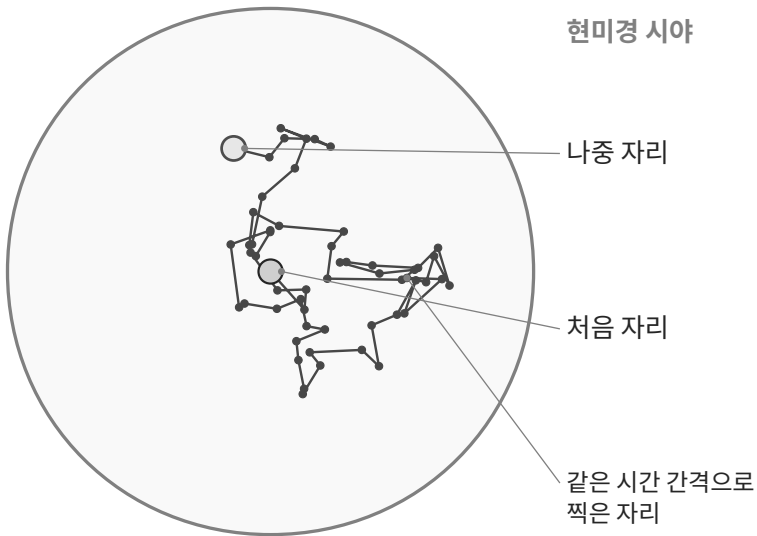
하린 그러면 실제로 있다는 증거는 어디서 나왔어요?

차 교수 하린이 방금 손바닥으로 잡으려던 것과 비슷한 데서 나왔단다.

보이지 않는 발길질 — 브라운 운동

차 교수 19세기 초 영국의 식물학자 브라운은 현미경으로 물에 뜬 꽃가루 속 아주 작은 알갱이들을 보다가, 알갱이들이 멈추지 않고 이리저리 떠는 것을 발견했어. 처음엔 살아 있어서 그런가 했지만, 오래된 돌가루를 물에 띄워도 똑같이 떨어졌지. 이렇게 물에 뜬 작은 알갱이가 불규칙하게 떠는 운동을 그의 이름을 따 **브라운 운동**이라 부른다.

차 교수 수수께끼를 푼 사람은 1905년의 젊은 아인슈타인이야. 물은 쉬지 않고 움직이는 수많은 물 분자로 되어 있고, 분자들이 알갱이를 사방에서 들이받다고 보았지. 알갱이가 충분히 작으면 어느 순간 한쪽에서 더 많이 부딪혀 그쪽으로 밀린다¹.



[그림 2-1] 브라운 운동 현미경으로 물에 뜬 작은 알갱이의 자리를 같은 시간 간격으로 찍어 이으면 이렇게 제멋대로 꺾인 길이 된다. 눈에 보이지 않는 물 분자들이 고르지 않게 들이받기 때문이다(모식도)

하린 그림 2-1처럼 지그재그로요? 먼지가 빗줄기 속에서 춤추는 것도 그런 거예요?

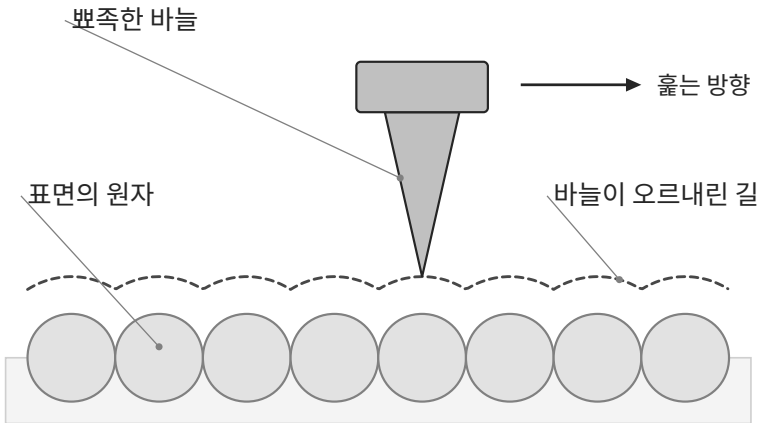
차 교수 빗줄기 속 먼지는 대개 공기의 흐름에 떠밀리는 거라 조금 다르단다. 브라운 운동은 바람이 전혀 없는 물속에서도 멈추지 않지. 아인슈타인이

대단한 건, 알갱이가 일정한 시간 동안 평균 얼마나 멀리 떠돌아가는지를 분자의 크기와 수로 계산할 수 있는 식을 내놓았다는 점이야¹. 그 식을 실험으로 재어 맞추면 분자가 몇 개인지, 얼마나 큰지까지 셀 수 있었지. 원자와 분자가 셈을 위한 가정이 아니라 실제로 있다는 증거가 된 거란다.

태오 보지 않고 센 거네요. 발자국만 보고 동물을 알아내듯이요.

원자를 직접 보다

차 교수 그로부터 80년쯤 지나 드디어 원자를 “직접” 보게 되었어. 1982년 비니히와 로려가 만든 주사 터널링 현미경은 끝이 원자 몇 개만큼 뾰족한 바늘을 표면 바로 위로 훑으며, 바늘과 표면 사이를 건너는 아주 작은 전기의 흐름으로 원자 하나하나의 높낮이를 읽는단다². 1986년에는 바늘 끝 원자와 표면 원자 사이의 힘으로 표면을 읽는 원자힘 현미경도 나왔지³.



[그림 2-2] 원자를 보는 현미경의 원리 뾰족한 바늘이 표면의 원자 줄 위를 지나가며 원자마다 오르내리는 높낮이(점선)를 기록하면, 원자 하나하나가 동그란 봉우리로 그려진다(모식도)

미숙 그림 2-2를 보니 점자 읽는 손가락 같네요. 손끝으로 오돌도돌한 것을 더듬어 읽는 것처럼요.

차 교수 아주 좋은 비유입니다. 그렇게 찍은 사진에서 원자는 지름 약 10^{-10} m, 곧 0.1 nm의 동그란 봉우리로 보여요⁴. 이제 이름을 정확히 붙이자꾸나. **원자**는 원소의 성질을 지닌 가장 작은 알갱이란다. 그리고 데모크리토스의

뜻과 달리 원자도 쪼개져. 가운데 작은 원자핵과 그 둘레의 전자로 되어 있거든⁵. 그 조각들을 누가 어떻게 찾았는지는 3장부터 5장까지 차례로 자세히 알아볼 거란다.

하린 그러니까 원자는 원소의 성질을 가진 가장 작은 알갱이지만, 속에 더 작은 것들이 들어 있다는 거죠?

차 교수 정확해. 물리학자 파인먼은 과학 지식이 모두 사라지고 한 문장만 남길 수 있다면 이렇게 남기겠다고 했단다. “모든 것은 원자로 되어 있다. 원자는 쉬지 않고 움직이며, 조금 떨어져 있으면 서로 당기고 너무 가까이 밀어붙이면 서로 밀어낸다.”⁶ 이 한 문장에 올해 우리가 배울 것이 거의 다 들어 있어.

문제 2-1 브라운 운동이 알려 주는 것

현미경으로 물에 뜬 아주 작은 알갱이를 관찰했더니 바람도 흐름도 없는데 멈추지 않고 불규칙하게 떨었다. 이 관찰로 가장 잘 설명할 수 있는 것은?

- ① 알갱이가 살아 있어 스스로 움직인다.
- ② 물 분자는 가만히 있고 알갱이만 움직인다.
- ③ 물은 쉬지 않고 움직이는 작은 분자들로 되어 있다.
- ④ 알갱이가 클수록 더 크게 쏠린다.
- ⑤ 현미경의 빛이 알갱이를 한쪽으로 민다.

태오 브라운이 처음 생각한 것처럼 살아 있어서 움직이는 거 아닐까요? ①이요.

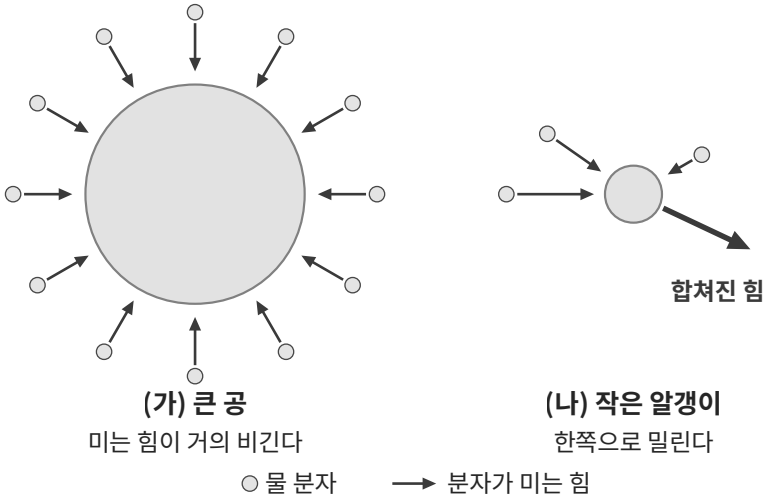
차 교수 그럴듯하구나. 그런데 브라운은 무엇을 물에 띄워 확인했지?

하린 오래된 돌가루요. 돌가루도 똑같이 떨었으니까 살아 있어서는 아니에요.

차 교수 그렇지. 계획을 세우자. 알갱이를 움직이는 것이 알갱이 밖에 있다면 무엇일까? 물속에서 알갱이 둘레에 있는 것은 물 분자뿐이란단다.

태오 물 분자가 가만히 있으면 밀 수가 없으니까, 분자들이 움직이며 부딪힌다는 거네요.

차 교수 그림 2-3처럼 큰 공과 작은 알갱이를 견주어 보렴. 사방에서 부딪히는 수가 많은 큰 공은 밀림이 거의 비기지만, 작은 알갱이는 한쪽이 더 세게 밀리는 순간이 생긴단다.



[그림 2-3] 풀이 그림 (가) 큰 공은 사방에서 아주 많은 분자가 부딪혀 미는 힘이 거의 비긴다. (나) 작은 알갱이는 부딪히는 분자가 적어 어느 순간 한쪽 힘이 더 크고, 알갱이는 합쳐진 힘(굵은 화살표) 쪽으로 밀린다(모식도)

하린 그래서 ④도 틀렸네요. 클수록 오히려 덜 떨어요.

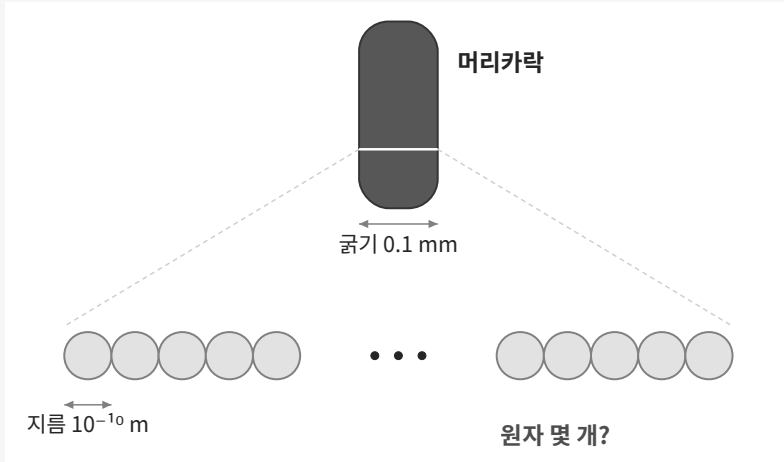
차 교수 그래서 정답은 ③이란다. 되돌아보면, 보이는 알갱이의 떨림이 보이지 않는 분자의 움직임을 알려 준 셈이지.

미숙 사람 많은 시장에서 작은 아이는 이리저리 밀려도 덩치 큰 어른은 꿈쩍 않는 것과 같네요.

차 교수 딱 맞는 비유입니다. 이렇게 풀이 과정을 한 단계씩 따라가 보는 것이 문제 푸는 힘을 빨리 길러 준다는 연구도 있지요⁷.

문제 2-2 머리카락 위의 원자 줄

그림 2-4처럼 굵기 0.1 mm인 머리카락의 폭을 가로질러 원자를 한 줄로 빈틈없이 늘어놓는다고 하자. 원자의 지름을 10^{-10} m로 잡으면 원자 몇 개가 필요한지 10의 거듭제곱으로 구하시오.



[그림 2-4] 문제 2-2의 그림 굵기 0.1 mm인 머리카락의 폭을 가로질러 지름 10^{-10} m인 원자를 한 줄로 늘어놓는다(원자는 크게 그렸다)

하린 0.1을 10^{-10} 으로 나누면 되니까... 10^9 개요?

차 교수 거의 다 왔구나. 조건을 다시 읽어 보렴. 0.1의 단위가 무엇이지?

하린 아, mm예요. 원자는 m로 되어 있으니 단위부터 맞춰야 해요.

차 교수 그렇지. 계획은 두 단계란다. 먼저 0.1 mm를 m로 바꾸고, 그다음 원자 지름으로 나누자. 그림 2-5를 보며 한 칸씩 가 보자꾸나.

태오 1 mm가 10^{-3} m니까 0.1 mm는 10^{-4} m예요. $10^{-4} \div 10^{-10} = 10^6$, 100만 개네요.

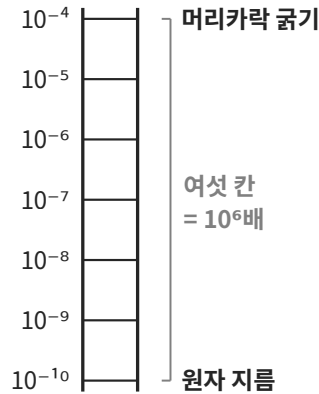
차 교수 모범 답은 10^6 개, 약 100만 개란다. 하린의 10^9 는 단위를 맞추지 않아 1000배 크게 나온 거야.

하린 제가 그림 2-5를 공책에 다시 그려 볼게요. 단위부터 맞추기, 꼭 기억할게요.

- ① 단위를 m로 맞춘다
 $1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$
 $0.1 \text{ mm} = 10^{-4} \text{ m}$

- ② 원자 지름으로 나눈다
 $10^{-4} \div 10^{-10}$
 $= 10^{-4+10} = 10^6$

원자 약 100만 개



[그림 2-5] 풀이 그림 ① $1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$ 이므로 $0.1 \text{ mm} = 10^{-4} \text{ m}$. ② $10^{-4} \text{ m} \div 10^{-10} \text{ m} = 10^6$. 머리카락 폭에 원자 약 100만 개가 들어간다

차 교수 그림과 설명을 함께 보면 이해가 깊어진다는 연구가 있단다⁸. 하린이 그리는 풀이 그림이 올해 큰 힘이 될 거야.

끝까지 묻기 원자는 왜 멈추지 않을까 — 움직임, 공간, 그리고 ‘무엇이 있음’

원자는 왜 쉬지 않고, 에너지는 왜 사라지지 않을까

하린 선생님, 아까 파인먼의 문장에서 “원자는 쉬지 않고 움직이며”가 계속 걸려요. 브라운 운동은 원자가 움직인다는 증거였지, 왜 움직이는지는 말해 주지 않았잖아요.

차 교수 날카로운 물음이구나. 오늘 문제를 푸는 것처럼, 답할 수 있는 데까지 한 칸씩 올라가 보자. 첫 칸은 이거야. 원자가 다른 원자와 부딪히면 운동이 사라지는 게 아니라 상대 원자에게 옮겨 간단다. 한쪽이 느려지면 다른 쪽이 그만큼 빨라지지. 운동의 에너지는 이 원자에서 저 원자로 넘겨질 뿐 없어지지 않아. 이것을 에너지 보존 법칙이라 하는데, 52장에서 미끄럼틀과 줄의 실험으로 자세히 배울 거란다.

태오 그런데 공을 굴리면 결국 멈추잖아요. 그건 운동이 없어진 거 아니에요?

차 교수 공이 멈출 때 공의 가지런한 운동은 바닥과 공기의 원자들이 제멋대로 떠는 운동으로 넘어간단다. 그래서 바닥이 아주 조금 따뜻해지지. 마찰로 생기는 열과 뜨거운 국이 식는 일도 결국 원자들의 무작위 운동이 이리저리 옮겨 가는 이야기야. 이것도 52장에서 다룬다⁶.

미숙 돈이 이 지갑에서 저 지갑으로 옮겨 다닐 뿐, 시장 전체의 돈은 그대로인 것과 비슷하네요.

차 교수 좋은 비유입니다. 시장이 문을 닫지 않는 한 돈은 계속 돌지요. 원자들도 서로 에너지를 주고받으며 계속 움직입니다.

하린 그럼 아주 차갑게 하면요? 에너지를 다 빼앗으면 원자가 딱 멈추지 않아요?

차 교수 그럴 것 같지? 그런데 실험은 그렇지 않다고 말한단다. 헬륨은 보통의 압력에서는 아무리 식혀도 고체가 되지 않는 유일한 물질이야. 1936년 런던은 헬륨이 냉각만으로는 굳지 않고, 약 25기압으로 눌러야 고체가 된다고 정리했단다⁹. 물리학자들은 그 까닭을 ‘영점 운동’으로 설명해. 원자 세계를 다루는 양자역학에 따르면 원자는 가장 낮은 에너지 상태에서도 완전히 가만히 있을 수 없고 조금은 떨어야 한단다. 헬륨 원자는 가볍고 서로 당기는 힘이 아주 약해서, 이 떨림만으로도 결정으로 자리 잡지 못하는 거지¹⁰. 양자역학은 26장에서 원자 속 전자 이야기로 자세히 만날 거야.

태오 그러니까 원자가 쉬지 않는 이유가 두 겹이네요. 부딪혀도 운동이 사라지지 않고, 다 빼앗아도 바닥에 남는 떨림이 있고.

차 교수 잘 정리했구나. 여기까지는 실험으로 단단히 확인된 이야기란다.

하린 그런데 선생님, 에너지는 왜 사라지지 않아요? 그냥 그런 규칙이라고 하면 좀 억울해요.

차 교수 억울할 만하지. 그 물음에 놀라운 답을 준 사람이 있단다. 1918년 수학자 뇌터는 물리 법칙에 대칭이 있으면 그와 짝을 이루는 보존되는 양이 반드시 있다는 것을 수학으로 증명했어¹¹. 여기서 대칭이란 무엇을 바꾸어도 법칙이 그대로라는 뜻이야. 오늘 한 실험을 내일 똑같이 해도 같은 법칙이 나온다면, 곧 법칙이 시간에 따라 바뀌지 않는다면, 그 짝으로 에너지가 보존된다는 거지¹¹. 51장에서 다시 만날 이야기란다.

태오 법칙이 시간에 따라 바뀌지 않는다는 것에서 에너지 보존이 나온다고요? 서로 상관없어 보이는데요.

차 교수 처음 들으면 다들 그렇게 말한단다. 비유를 들어 보자. 만약 중력이 월요일엔 약하고 화요일엔 세다면, 월요일에 물을 높이 퍼 올렸다가 화요일에 떨어뜨려 공짜로 에너지를 얻을 수 있겠지? 법칙이 날마다 같으니 그런 공짜가 없는 거야. 뇌터는 이것을 정확한 수학으로 보여 주었다¹¹.

태오 그럼 시간 말고 다른 대칭도 있어요? 서울에서 한 실험을 부산에서 해도 똑같잖아요.

차 교수 바로 그거란다. 자리를 옮겨도 법칙이 같다는 대칭에는 운동량 보존이 짝으로 붙고, 방향을 돌려도 법칙이 같다는 대칭에는 회전하는 운동의 양이 보존된단다. 뇌터의 정리는 이런 짝을 한꺼번에 설명하지¹¹. 운동량 보존은 49장에서 당구공으로 직접 확인해 볼 거야.

미숙 법칙이 어디서나 언제나 같으니까 그만큼 지켜지는 게 생긴다는 거군요. 저울이 장날마다 같아야 장사꾼끼리 셈이 맞는 것처럼요.

차 교수 그렇습니다. 저울이 날마다 달라지면 셈이 맞을 리 없지요.

하린 그럼 한 칸 더요. 법칙은 왜 시간에 따라 안 바뀌어요?

차 교수 여기서 나는 처음으로 솔직하게 말해야겠구나. 그건 모른다. 우리는 법칙이 바뀌지 않는다는 것을 수없이 시험했고, 지금까지 어긋남을 찾지 못했어. 하지만 ‘왜’ 바뀌지 않는지는 어떤 실험도 말해 주지 않는단다. 사다리의 이 칸부터는 확인이 아니라 물음이야.

미숙 장맛이 해마다 같은 건 할머니 손맛 덕인데, 자연의 손맛은 누가 지키는지 모르는 셈이네요.

차 교수 꼭 그렇습니다. 손맛이 같다는 건 맛보아 알지만, 손맛의 주인은 아직 모르지요.

움직인다는 건 대체 무엇일까

태오 선생님, 저는 더 이상한 게 있어요. 계속 ‘움직인다’고 말하는데, 움직인다는 게 정확히 뭐예요?

차 교수 이제 낱말 자체를 묻는구나. 가장 쉬운 답부터 하자. 움직인다는 건 자리가 시간에 따라 바뀌는 거란다. 42장에서 속력과 속도를 그렇게 정의할 거야. 그런데 ‘자리’는 늘 무엇에 대한 자리지. 기차 안에서 컵은 탁자에 대해 가만히 있지만, 철길 옆에 선 사람에게는 빠르게 달린단다.

하린 그럼 컵은 움직여요, 안 움직여요?

차 교수 갈릴레이는 고르게 나아가는 배 안에서는 어떤 실험을 해도 배가 움직이는지 알 수 없다고 보았다. 일정한 속도의 움직임은 기준에 따라 달라질 뿐, 홀로 정해진 값이 없다는 거야. 이것을 갈릴레이의 상대성이라 해¹².

태오 그럼 기준 없이 그냥 ‘공간 속의 진짜 자리’는 없어요? 우주라는 큰 방의 바닥 같은 거요.

차 교수 300년 전 가장 큰 과학자들이 바로 그 문제로 다투었다. 뉴턴은 물질과 상관없이 늘 그대로 있는 ‘절대 공간’이 있고, 참된 움직임은 그 공간에 대한 움직임이라고 생각했어. 그 근거로 물통 실험을 들었지. 물이 든 물통을 줄에 매달아 돌리면 물이 물통과 함께 돌 때 물의 겉이 오목해진단다. 물은 물통에 대해서는 가만히 있는데도 말이야. 뉴턴은 오목한 물이 절대 공간에 대해 도는 증거라고 보았다¹².

미숙 김칫국 그릇을 손으로 빙빙 돌리면 국물 가운데가 움푹 꺼지던데, 그게 그 이야기군요.

차 교수 맞습니다. 그릇에 대해서는 국물이 함께 돌고 있는데도 가운데가 꺼지지요. 뉴턴은 그 움푹함이 무엇에 대한 회전인지 물었고, 눈에 보이는 어떤 물건도 기준이 될 수 없으니 보이지 않는 절대 공간이 기준이라고 답한 겁니다.

하린 그럴듯해요. 그럼 반대한 사람도 있었어요?

차 교수 라이프니츠지. 1715년부터 이듬해까지 뉴턴 편에 선 클라크와 편지를 주고받으며 다투었다¹³. 라이프니츠는 셋째 편지에서 공간은 시간처럼 순전히 상대적인 것이며, 함께 있는 것들 사이의 질서일 뿐이라고 썼어¹³. 물건들이 없으면 그 질서도 없다는 거지. 그보다 앞서 데카르트는 공간이 곧 물질이 차지한 넓이라서 물질 없는 공간은 있을 수 없다고 보았다¹².

태오 그럼 뉴턴의 물통은 어떻게 설명해요?

차 교수 19세기에 마흐가 답을 내놓았다. 물이 오목해지는 건 절대 공간에 대해 돌아서가 아니라, 지구와 먼 별들 같은 우주의 다른 모든 물질에 대해 돌기 때문일 수 있다고 했지¹⁴. 젊은 아인슈타인은 이 생각에 크게 끌려, 물질이 없으면 공간도 있을 수 없어야 한다는 ‘마흐의 원리’를 자기 중력 이론에 담고 싶어 했단다¹⁴.

태오 잠깐만요. 그럼 우주에 다른 건 하나도 없고 물통 하나만 있다면요? 그 물통을 돌리면 물이 오목해져요, 안 해져요?

차 교수 아주 좋은 생각 실험이구나. 뉴턴이라면 절대 공간에 대해 도니 오목해진다고 하겠지. 마흐를 끝까지 따르면 기준이 될 물질이 없으니 ‘돈다’는 말부터 뜻이 없다고 해야 할 거야. 그런데 그런 우주를 만들어 실험할 방법은 없단다. 그래서 이 물음은 지금도 실험이 아니라 이론과 생각으로 다루고 있어¹⁴.

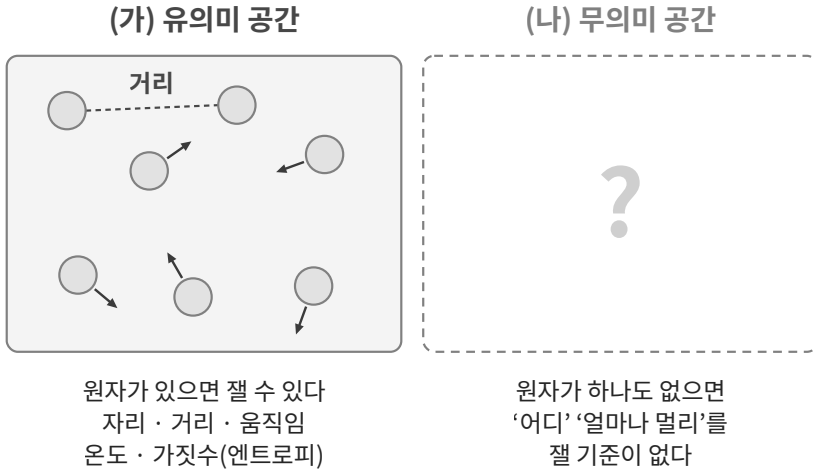
하린 그래서 답았어요?

차 교수 끝내 완전히는 답지 못했단다. 일반 상대성 이론은 물질이 하나도 없는데도 시공간의 구조가 있는 풀이를 허락하거든¹⁴. 홀로 떨어져 도는 물체도 허락하고 말이야. 그래서 공간이 그 자체로 있는 것인지, 물질 사이의 관계일 뿐인지는 철학자와 물리학자 사이에서 오늘도 결론이 나지 않았어. 스탠퍼드 철학 백과사전은 일반 상대성 이론이 두 편 모두를 곤란한 처지에 남겨 두었다고 정리한단다¹⁴.

유의미 공간과 무의미 공간

미숙 교수님은 어느 편이세요? 듣기만 하니 저는 어지러워요.

차 교수 제 생각을 말씀드리지요. 이건 확인된 사실이 아니라 제 관점이라는 걸 먼저 밝혀 둡니다. 저는 공간을 두 가지로 나누어 봅니다. 물질이 있어서 자리와 거리와 움직임, 온도, 엔트로피를 잴 수 있는 공간을 ‘유의미 공간’이라 부르고, 물질이 없어 잴 것이 아무것도 없는 공간을 ‘무의미 공간’이라 부릅니다. 그림 2-6을 보세요.



[그림 2-6] 유의미 공간과 무의미 공간(지은이의 관점을 그린 개념도) (가) 원자가 있으면 원자 사이의 거리, 움직임, 온도, 배치의 가짓수(엔트로피)를 잴 수 있다. (나) 원자가 하나도 없으면 잴 것이 없어 ‘어디’, ‘얼마나 멀리’라는 말이 뜻을 잃는다

하린 그러니까 자리도 거리도 원자와 원자 사이에서 생긴다는 거죠? 원자가 없으면 ‘어디’라고 말할 기준이 없으니까요.

차 교수 그렇단다. 오늘 머리카락 문제에서도 우리는 원자를 줄 세워 거리를 잰지. 재는 일은 언제나 무엇과 무엇 사이를 재는 거야. 그래서 나는 공간이라는 말이 물질이 있어서 비로소 뜻을 갖는다고 생각한단다. 이 생각은 라이프니츠와 마흐의 관계론과 같은 줄기에서 있어^{13,14}.

태오 그런데 선생님, 원자 사이에도 빈 곳이 있잖아요. 5장에서 원자 속도가 대부분 비어 있다고 배운다던데, 그 빈 곳은 무의미 공간이에요?

차 교수 날카롭구나. 원자와 원자 사이의 빈 곳은 양쪽에 원자가 있어서 ‘얼마나 떨어졌나’를 잴 수 있으니 유의미 공간이야. 원자 속 원자핵과 전자 사이도 마찬가지란다. 둘이 서로 당기는 힘이 그 사이에 걸쳐 있으니까. 내가 말하는 무의미 공간은 그 둘레 어디에도 잴 상대가 없는 곳이란단다.

하린 그럼 무의미 공간이 실제로 있기는 해요?

차 교수 그것도 정직하게 말하면, 우리가 찾아가 확인한 적은 없단다. 우주에서 가장 텅 빈 곳에도 열린 기체와 빛이 조금은 지나가거든. 무의미 공간은 생각으로 그어 본 끝의 경계에 더 가깝지.

태오 엔트로피는 처음 듣는 말인데요?

차 교수 52장에서 자세히 배울 낱말이니 미리 맛만 보자. 볼츠만은 엔트로피를 원자들이 놓고 에너지를 나누어 가질 수 있는 배치의 가짓수로 설했단다. 가짓수가 많은 상태일수록 엔트로피가 크고, 계는 거의 언제나 가짓수가 많은 쪽으로 가지¹⁵. 그러니 원자가 하나도 없으면 셀 가짓수도 없겠지?

미숙 가게에 손님이 하나도 없으면 ‘붐빈다’, ‘한산하다’는 말을 할 수가 없는 것과 같네요. 손님이 있어야 어디에 몇 명이 서 있는지 셀 수 있으니까요.

차 교수 바로 그겁니다. 엔트로피도 공간도, 물질이 있어서 뜻을 갖는 개념이라는 게 제 생각입니다. 하나 덧붙이면, 빛도 에너지를 나르는 것이니 여기서 ‘물질’은 빛까지 넓게 잡겠습니다. 우주를 가득 채운 옛 빛 이야기는 32장에서 만날 거예요.

아무것도 없는 공간은 정말 아무것도 아닐까

하린 그런데 선생님, 그럼 아무것도 없는 공간은 정말 아무것도 아니에요? 그냥 ‘무’예요?

차 교수 이제 오늘 가장 어려운 칸에 왔구나. 여기서는 내 생각에 불리한 사실까지 정직하게 꺼내 놓아야 해. 첫째, 현대 물리학의 ‘진공’은 아무것도 없는 상태가 아니란다. 10장에서 배울 장(場)은 공간 곳곳에 퍼져 있는 힘의 판 같은 것인데, 현대 물리학에서는 입자마저 이 장의 떨림으로 본단다. 진공은 그 장들이 에너지가 가장 낮은 상태, 곧 바닥 상태로 있는 것이야¹⁶.

태오 바닥 상태면 아까 헬륨처럼 그래도 조금은 떠나는 거예요?

차 교수 그렇게 이어진단다. 그 흔적을 켜 실험이 있어. 1997년 라모로는 전하가 없는 두 금속판을 아주 가까이 두면 진공 속에서도 서로 당긴다는 카시미르 힘을 켰단다¹⁷. 두 판 사이와 바깥의 진공이 서로 다르게 떨 수 있어서 생기는 힘으로 설명되지. 39장에서 다시 만난다.

하린 둘째는요?

차 교수 둘째는 더 크단다. 2015년 9월 미국의 두 관측소가 멀리서 두 블랙홀이 합쳐지며 보낸 중력파를 처음 직접 잡았어¹⁸. 블랙홀은 빛조차 빠져나오지 못하는 천체이고, 중력파는 시공간 자체가 출렁이며 퍼져 나가는 물결이야. 그 물결은 지구까지 오는 긴 길의 대부분에서 물질이 거의 없는

공간을 지나왔지. 일반 상대성 이론의 예측과 꼭 맞았단다¹⁸. 45장과 55장에서 다시 만날 거야.

태오 그럼 선생님 생각이 깨진 거 아니에요? 물질이 없는 공간도 출렁이니까 무언가 있는 거잖아요.

차 교수 좋은 반론이야. 나는 이렇게 생각한단다. 중력과는 물질이 없는 곳을 지나가지만, 물결을 일으킨 건 블랙홀이라는 엄청난 질량이었고, 그 물결을 켜 것도 거울과 레이저라는 물질이었어. 진공의 장도 금속판이라는 물질을 가까이 두었을 때 비로소 힘으로 드러났지. 그러니 이 사실들은 내 생각을 깨뜨린다고보다, ‘아무것도 없는 공간’이라는 말 자체를 정의하기가 아주 어렵다는 것을 보여 준다고 봐. 장도 시공간의 구조도 없는 진짜 ‘없음’을 우리는 한 번도 재 본 적이 없거든.

하린 그럼 둘 중 누가 맞는지는요?

차 교수 그건 아직 모른다. 내 관점이 틀렸을 수도 있어. 그래서 ‘무의미 공간’이라는 내 말은 결론이 아니라 물음표로 남겨 두는 거란다.

하린 선생님, 아까 입자마저 장의 떨림이라고 하셨잖아요. 물결은 물이 출렁이는 거고 소리는 공기가 떠는 거예요. 그럼 장은 무엇이 출렁이는 거예요?

차 교수 물결과 견주니 물음이 아주 또렷해졌구나. 확인된 것부터 말하자. 입자를 장의 들뜬 상태로 다루는 이론을 양자 장 이론이라 하는데, 오늘날 입자 물리학 전체가 이 틀 위에 서 있고 그 계산은 실험과 놀랄 만큼 잘 맞는단다¹⁹. 여기까지는 단단해.

태오 그럼 장 밑에도 물 같은 게 또 있어요?

차 교수 거기서부터 막힌단다. 장이 맨 밑바닥일 수도 있고, 아닐 수도 있어. 스탠퍼드 철학 백과사전의 양자 장 이론 항목은 이 이론이 그리는 세계가 입자로 된 것인지, 장으로 된 것인지, 아니면 더 낮은 무엇인지를 두고 아직 합의가 없다고 정리한단다. 입자로 보아도, 장으로 보아도 저마다 풀리지 않는 어려움이 남는다는 거야¹⁹.

하린 계산은 맞는데 무엇을 계산하는지는 모른다는 거예요?

차 교수 그렇게 말해도 크게 틀리지 않아. 같은 항목은 진공에 대해서도 묻는단다. 입자가 하나도 없는 바닥 상태인데도 여러 물리량의 값이 0이 되지

않는다면, 그 값을 가진 ‘무엇’은 대체 무엇이나고 말이야¹⁹. 아까 내 ‘무의미 공간’이 걸려 넘어진 바로 그 자리지.

미숙 빈 냄비인 줄 알고 뚜껑을 열었는데 김이 오르는 셈이네요. 무엇이 끓는지는 모르고요.

차 교수 꼭 그렇습니다. 김이 오른다는 건 재었는데, 냄비 속에 무엇이 있는지는 아직 이름만 붙여 두었지요.

태오 빈 공간에서도 무언가 떠다니면, 그 떨림에도 에너지가 있어요?

차 교수 이론은 그렇다고 말한단다. 그 에너지가 우주 전체에 고르게 퍼져 있다면 우주가 부푸는 모습에도 영향을 주어야 하지. 우주가 부풀고 있다는 이야기는 29장에서 자세히 배울 텐데, 1998년과 1999년 두 연구진이 아주 먼 별의 폭발을 관측해 우주가 부푸는 빠르기가 점점 빨라지고 있다는 것을 알아냈단다^{20,21}. 빈 공간 자체의 에너지가 그 원인의 유력한 후보로 꼽혀²².

하린 그럼 수수께끼가 풀린 거네요?

차 교수 거꾸로 더 커졌단다. 빈 공간의 떨림으로 어림한 에너지를 관측에서 얻은 값과 견주면, 이론값이 관측값보다 1 뒤에 0이 120개 붙은 만큼, 곧 10^{120} 배쯤 크게 나와²². 와인버그는 이것을 우주 상수 문제라는 이름으로 정리했지¹⁶. 에너지 대신 질량의 눈금으로 바꾸어 견주면 30자릿수라는 지적도 있지만, 어느 쪽이든 그냥 넘길 수 없는 차이란다²².

미숙 장부에는 콩 한 알을 샀다고 적혀 있는데, 셈을 해 보니 온 세상 콩을 다 산 값이 나온 셈이네요.

태오 그럼 빈 공간의 에너지가 정말 우주를 밀고 있는지는요?

차 교수 모른다. 과학자들은 우주를 점점 빨리 부풀게 하는 무엇에 ‘암흑 에너지’라는 이름만 붙여 두었다. 그것이 빈 공간 자체의 에너지인지, 전혀 다른 무엇인지 아직 가려내지 못했고, 이론이 왜 그토록 크게 빗나가는지도 설명하지 못해^{16,22}.

태오 공간과 엔트로피가 한데 묶인다는 이야기도 있어요?

차 교수 있단다. 1973년 베켄슈타인은 블랙홀의 엔트로피가 그 경계면, 곧 사건의 지평선의 넓이에 비례한다고 제안했어²³. 보통 물건의 엔트로피는 부피를 따라 늘어나는데, 블랙홀은 겉넓이를 따른다는 거야. 1975년 호킹은 양자 효과 때문에 블랙홀이 뜨거운 물체처럼 입자를 내보낸다는 것을 계산으로

보이고, 바깥 물질의 엔트로피와 지평선 넓이의 4분의 1을 합한 값은 줄지 않는다고 정리했단다²⁴. 엔트로피와 공간의 넓이가 한 식에 묶인 거지.

하린 엔트로피가 원자 배치의 가짓수라면, 블랙홀의 가짓수는 무엇을 세는 거예요?

차 교수 바로 거기가 아직 모르는 곳이란단다. 무엇을 세는지 확실히 아는 사람은 없어. 2010년 판 램스동크는 한 걸음 더 나가, 이어진 시공간 자체가 양자 얽힘에서 생겨날지 모른다는 생각을 내놓았어. 이 장의 최전선 상자에 나오는 얽힘 말이야. 두 영역 사이의 얽힘을 풀면 두 영역이 서로 떨어져 나간다는 거지²⁵. 다만 이건 실험으로 확인된 사실이 아니라 가설이란단다. 중력과 양자역학을 하나로 묶는 양자 중력 이론은 아직 완성되지 않았거든²⁶.

미숙 두부가 콩물에서 엉겨 나오듯, 공간이 무언가에서 엉겨 나온다는 거네요. 신기해라.

차 교수 재미있는 그림입니다. 그 콩물이 무엇인지 모른다는 게 문제지요.

시공간 밑에는 무엇이 있을까

하린 공간이 얽힘에서 엉겨 나온다면, 시공간은 맨 밑바닥이 아니라는 거예요?

차 교수 그걸 알아내려는 것이 아까 말한 양자 중력 연구란다. 후보가 여럿인데 가장 널리 연구되는 둘을 소개하마. 하나는 끈 이론이야. 가장 작은 알갱이를 점이 아니라 아주 짧은 1차원 끈으로 보고, 끈이 떠는 방식에 따라 서로 다른 입자가 된다고 보지. 그런데 이 이론이 앞뒤가 맞으려면 공간이 셋이 아니라 아홉 개의 방향을 가져야 한단다²⁷.

태오 아홉이요? 우리는 앞뒤, 좌우, 위아래 셋뿐인데요.

차 교수 그래서 나머지 여섯 방향은 아주 작게 접혀 있다고 보는데, 접는 방법이 엄청나게 많아서 그 가운데 어느 것이 우리 우주인지 고를 원리가 아직 없다는 것이 이 이론의 큰 숙제란다²⁷. 다른 하나는 고리 양자 중력이야. 이쪽은 공간이 매끈하게 이어진 것이 아니라 아주 작은 낱알로 되어 있어서, 넓이와 부피도 계단처럼 띄엄띄엄한 값만 가질 수 있다고 주장하지^{26,27}.

미숙 두부도 멀리서 보면 매끈한데 가까이 보면 콩 알갱이 자국이 있잖아요. 공간도 그럴 수 있다는 거네요.

하린 그럼 어느 쪽이 맞아요?

차 교수 아직 실험으로 가리지 못했단다. 이 이론들이 제 모습을 드러낼 것으로 보는 크기는 플랑크 길이라는, 원자핵보다도 엄청나게 작은 규모야. 지금의 실험 능력에서 너무 멀어서, 양자 중력을 시험한 실험은 아직 없다고 정리된단다²⁷. 고리 양자 중력의 낱알 같은 공간도 실제로 어떻게 관측할 수 있을지 분명하지 않고²⁷.

태오 그럼 공간이 영겨 나온다는 생각은 어디서 나온 거예요?

차 교수 홀로그래피 원리라는 대담한 생각과 이어져 있단다. 카드에 붙은 홀로그램은 납작한 면인데도 입체 그림이 떠오르지? 1995년 서스킨드는 토프트의 제안을 이어받아, 양자역학과 중력을 함께 생각하면 3차원 세계가 2차원 면에 저장된 정보의 상(像)일 수 있다고 주장했어. 면의 아주 작은 넓이마다 정보 한 칸씩이 들어 있다는 거야²⁸. 블랙홀의 엔트로피가 부피가 아니라 겉넓이를 따른다는 베켄슈타인의 결과와 같은 냄새가 나지²³.

하린 그게 확인됐어요?

차 교수 확인된 사실이 아니라 가설이야. 1999년 말다세나는 반 더시터르 공간이라는 특별한 모양의 시공간 속에서 중력을 품은 끈 이론과, 그 경계에서 중력 없이 움직이는 장의 이론이 사실은 같은 것을 다르게 쓴 것이라는 추측을 내놓았단다²⁹. 두 이론이 같다면 어느 쪽 시공간도 맨 밑바닥이 아니고 무언가에서 생겨난 것이라고 해석하는 물리학자들이 있어²⁷. 하지만 그 계산이 우리 우주에도 그대로 들어맞는지는 아직 아무도 모른단다.

시공간이 없으면 움직임은 무엇일까

태오 선생님, 저는 다시 처음 물음으로 돌아갈래요. 움직인다는 건 자리가 시간에 따라 바뀌는 거라고 하셨잖아요. 그런데 시공간이 맨 밑바닥이 아니라면, 그 밑에서 움직임은 뭐예요?

차 교수 태오가 끝까지 붙드는구나. 그 물음은 실제로 양자 중력 연구의 한복판에 있단다. 일반 상대성 이론을 양자 이론의 꼴로 고쳐 쓰는 한 방법에서는, 우주 전체를 나타내는 방정식에 시간이 아예 나오지 않는 꼴이 된단다. 글자 그대로 읽으면 우주의 상태는 전혀 바뀌지 않는 것처럼 보이지. 이것을 ‘시간의 문제’라고 불러²⁷.

하린 시간이 없으면 아무것도 안 움직이잖아요. 그런데 우리는 지금 움직이고 있는게요?

차 교수 그래서 물리학자들은 그 방정식에서 움직임을 되찾을 길을 찾고 있단다. 일반 상대성 이론에서는 켈 수 있는 양이 한 점에 홀로 붙은 값이 아니라 무엇과 무엇 사이의 관계로 정해져야 한다는 결과가 있어. 그래서 우주 밖의 시계가 아니라 우주 안의 한 부분이 다른 부분에 대해 어떻게 바뀌는지로 시간과 움직임을 읽자는 생각이 나왔지²⁷.

미숙 우리 부엌엔 시계가 없어서, 콩물이 끓어오르는 걸 보고 간수 넣을 때를 알거든요. 콩물이 시계인 셈이죠.

차 교수 아주 좋은 비유입니다. 바깥 시계 없이 콩물과 간수의 관계로 때를 읽는 것, 그게 그 생각의 알맹이예요. 다만 그 길이 정말 끝까지 이어지는지는 아직 모릅니다. 그러니 시공간 밑에서 움직임이란 무엇이나는 태오의 물음에 내가 할 수 있는 대답은 이것뿐이란단다. 모른다. 지금 살아 있는 어떤 물리학자도 확실한 답을 갖고 있지 않아.

태오 모른다는 대답을 오늘날 몇 번째 듣는지 모르겠어요.

차 교수 그때마다 사다리의 다른 칸에서 들은 거란다. 아래 칸의 모름과 위 칸의 모름은 무게가 다르지.

하린 선생님, 그럼 아까 말씀하신 유의미 공간은 이 최신 생각들과 어떻게 만나요?

차 교수 다시 정리해 보자. 이걸 여전히 내 관점이란단다. 얽힘에서 공간이 생긴다는 가설과, 관계로 시간을 읽자는 생각은 관계가 먼저이고 공간과 시간은 나중이라는 점에서 라이프니츠의 관계론, 그리고 내 유의미 공간과 닮았어^{13,25}. 실제로 양자 중력에서 어떤 방법이 성공하느냐가 공간이 그 자체로 있다는 생각과 관계일 뿐이라는 생각 가운데 한쪽에 힘을 실어 줄 수 있다는 논의도 있단다²⁷. 그런데 반대쪽 근거도 같은 무게로 놓아야 해. 그 가설들에서 관계를 맺는 것은 원자가 아니라 양자 상태라는 더 낫선 무엇이야. 그리고 빈 공간에 정말 에너지가 있어서 우주를 밀고 있다면, 물질이 하나도 없는 공간도 그 자체로 무언가를 지닌 셈이니 내 관점에는 불리하지²².

태오 그럼 선생님 생각은 맞는 거예요, 틀린 거예요?

차 교수 아직 어느 쪽으로도 판가름 나지 않았단다. 그래서 내 관점은 결론이 아니라, 이 물음들을 내다보는 창문 하나로 남겨 둔다.

왜 아무것도 없지 않고 무엇이 있을까 — 그리고 고백

하린 선생님, 그럼 맨 끝 물음은요. 애초에 왜 원자든 장이든 무엇이 있어요? 아무것도 없을 수도 있었잖아요.

차 교수 사다리의 꼭대기에 올라왔구나. 그 물음을 처음 또렷하게 던진 사람도 라이프니츠란다. 1714년의 글에서 그는 모든 것에는 충분한 이유가 있어야 한다는 원리에서 출발해, 그렇다면 첫 물음은 왜 아무것도 없지 않고 무엇이 있느냐는 것이라고 썼어. 없음이 있음보다 더 단순하고 쉬운데도 말이야³⁰. 훗날 하이데거는 이것을 철학의 가장 근본적인 물음이라 불렀단다³¹.

태오 과학은 그 물음에 답을 못 해요?

차 교수 어떤 물리학자들은 양자 진공에서 입자가 생겨날 수 있으니 이것이 답이라고 말하기도 해. 그런데 철학자들은 되묻는단다. 그건 이미 장과 법칙이 있는 진공에서 입자가 왜 생겼느냐에 대한 답이지, 장도 법칙도 없는 ‘없음’에 대한 답은 아니지 않느냐고³¹.

하린 아, 아까 진공이 ‘아무것도 없음’이 아니라고 하신 것과 이어지네요.

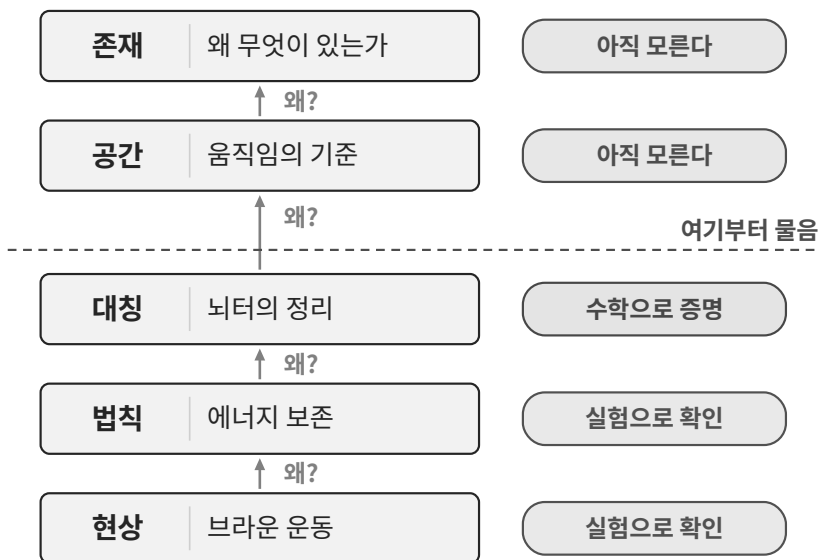
차 교수 그렇지. 과학은 무엇이 ‘어떻게’ 움직이는지를 놀랄 만큼 정확하게 말한단다. 중력파의 모양을 미리 계산해 두고 그대로 잡아낼 만큼 말이야¹⁸. 하지만 ‘무엇이 있는가’, ‘왜 있는가’를 묻는 순간 우리는 철학의 오래된 갈래인 존재론, 그리고 눈에 보이는 세계 너머의 바탕을 묻는 형이상학과 만나게 된단다.

미숙 장독이 비어 있으면 왜 비었는지는 물을 수 있는데, 장독이 왜 있느냐고 물으면 장독 만든 사람한테 가야 하는 것과 비슷하네요.

차 교수 그 물음이 바로 과학의 손이 닿는 끝자락입니다.

하린 오늘 너무 높이 올라와서 어디까지 왔는지 모르겠어요.

차 교수 그럼 오늘 우리가 오른 사다리를 그림 2-7로 정리해 보자. 아래 칸일수록 실험으로 단단히 확인되었고, 위로 갈수록 가설과 물음이 많아진단다.



아래에서 위로 “그건 왜요?”를 거듭한다

[그림 2-7] 질문의 사다리 현상(브라운 운동) → 법칙(에너지 보존) → 대칭(뇌터) → 공간(움직임의 기준) → 존재(왜 무엇이 있는가). 아래 두 칸은 실험으로 확인되었고, 대칭에서 보존이 나온다는 것은 수학으로 증명되었으며, 그 위는 아직 모르는 물음이다

태오 그런데 ‘공간’ 칸 하나에 오늘 이야기가 너무 많이 들어 있어요. 장, 빈 공간의 에너지, 시공간, 그 밀바탕까지요.

차 교수 그래서 그 칸만 크게 펼쳐 그림 2-8에 따로 그려 두었던다. 층마다 확인된 것과 아직 모르는 것을 나란히 놓았어. 위층으로 갈수록 왼쪽 칸은 비어 가고 오른쪽 칸만 남지.

	확인된 것	아직 모르는 것
움직임·시간	—	시공간 밑에서 움직임은 무엇인가?
시공간의 바탕	실험 없음	끈·고리·얽힘·홀로그래피 (가설)
시공간	휘고 출렁인다 (중력파 검출)	맨 밑바닥인가, 생겨난 것인가?
빈 공간	카시미르 힘 측정, 우주 팽창이 빨라짐	에너지 어림이 관측의 10^{120} 배
장(場)	입자는 장의 들뜸 — 계산이 실험과 맞다	장은 무엇의 출렁임인가?

아래 층에서 위 층으로 갈수록 더 깊은 바탕을 묻는다

[그림 2-8] ‘공간’ 칸을 펼친 물음의 층(개념도) 장, 빈 공간, 시공간, 시공간의 바탕, 움직임과 시간으로 올라갈수록 확인된 것(왼쪽)은 줄고 아직 모르는 것(오른쪽)이 남는다. 끈 이론·고리 양자 중력·홀로그래피는 실험으로 확인되지 않은 가설이다

하린 결국 선생님도 모르시는 거네요.

차 교수 그래, 고백하마. 움직임이 무엇인지, 공간이 무엇인지, 왜 아무것도 없지 않고 무엇이 있는지, 우리 과학은 아직 모른다. 나도 모르고, 지금 살아 있는 어떤 물리학자도 확실히 알지 못해.

태오 그럼 과학을 왜 배워요? 맨 밑바닥을 모르는데요.

차 교수 모르는 곳이 어디인지 정확히 알기 때문에 배우는 거란다. 오늘 우리는 브라운 운동에서 출발해 에너지 보존, 대칭, 공간, 장과 진공, 시공간의 바탕, 존재까지 올라왔어. 그 길의 아래 칸들은 수많은 실험이 떠받치고 있지^{1,18}. 그리고 어디서부터 가설이고 어디서부터 철학인지 선을 그을 수 있게 되었지. 모르는 것을 아는 척 늘어놓기만 하면, 과학은 웃을 입을 척 걸어가는 별거벗은 임금님의 행렬이 되고 말아. 모르는 것을 모른다고 말하는 게 과학을 정직하게 지키는 길이란단.

하린 그래도 조금 허전해요. 원자가 쉬지 않고 움직인다는 문장에서 시작했는데, 끝에 가서는 ‘움직인다’는 낱말도 모르겠다니까요.

차 교수 그 허전함이 오늘 얻은 것이란다. 파인먼의 한 문장은 여전히 맞아. 원자는 쉬지 않고 움직이고, 우리는 그 움직임을 정확하게 계산할 수 있지^{4,6}. 다만 그 문장이 기대고 있는 바탕, 곧 움직임과 공간과 있음이 무엇인지는 아직 열린 물음이라는 걸 알게 된 거야. 바탕을 모르면서도 그 위에 이토록 튼튼한 집을 지을 수 있다는 것, 그게 과학의 놀라운 점이기도 하단다.

하린 그럼 저는 공책 맨 위 칸에 물음표를 그려 둘게요.

미숙 그 물음표가 내일 두부보다 더 든든하겠네요.

차 교수 그 물음표가 여러분이 과학을 계속할 이유가 되었으면 좋겠구나.

미숙 그런데 교수님, 이 많은 원자는 처음에 다 어디서 왔어요? 콩도 밭에서 오고 두부도 콩에서 오잖아요.

차 교수 아주 큰 물음입니다. “원자의 재료는 어디서 왔을까”는 우주가 막 생겨난 때의 이야기라서, 원자 속 전자와 빛을 먼저 알아야 제대로 풀 수 있어요. 그래서 여름에 29장부터 32장까지 자세히 다루겠습니다. 다음 주에는 먼저 원자 속을 들여다보지요. 창고에 있는 옛 TV가 그 열쇠입니다.

과학의 최전선 원자 속 세계는 ‘무엇’일까

여기까지 밝혀졌다 — 원자와 그보다 작은 세계의 움직임은 양자역학이라는 이론이 놀랄 만큼 정확하게 예측한다. 멀리 떨어진 두 알갱이 가운데 하나를 재면 다른 쪽의 결과가 맞춰져 나오는 ‘얽힘’도 1982년 빛 알갱이 실험과 2015년 1.3 km 떨어진 두 전자 실험에서 이론대로 확인되었다^{32,33}. **아직 모른다** — 예측은 맞는데, 재기 전의 원자 속 세계가 ‘실제로 어떤 모습인가’를 어떻게 이해할지는 물리학자들 사이에 아직 합의가 없다³³. 여러 해석이 같은 실험 결과를 내놓기 때문에 실험만으로 가리기가 어렵다. **가설과 연구** — 잭 때 비로소 결과가 정해진다는 생각, 가능한 결과가 모두 실재한다는 생각 등 여러 해석이 겨루고 있다. 과학자들은 2015년 실험처럼 빈틈을 하나씩 막은 더 엄격한 조건에서 얽힘을 시험하며 실마리를 찾고 있다³³. 양자역학의 원자 이야기는 26장에서 자세히 만난다.

오늘의 정리

- 데모크리토스는 생각으로 “조깅 수 없는 알갱이”를 떠올렸고, 돌턴은 원자로 화학 반응의 비율을 설명했다.
- 물에 뜬 작은 알갱이가 멈추지 않고 떠는 **브라운 운동**을 아인슈타인이 물 분자의 충돌로 설명하면서(1905), 원자·분자가 실제로 있다는 증거가 되었다.
- 주사 터널링 현미경·원자힘 현미경으로 원자를 하나하나 볼 수 있다. 원자의 지름은 약 10^{-10} m(0.1 nm)다.
- 원자는 원소의 성질을 지닌 가장 작은 알갱이이며, 원자핵과 전자로 되어 있다(3~5장에서 자세히).
- 원자의 재료가 어디서 왔는지는 우주 초기 이야기로, 29~32장에서 다룬다.
- 공간은 물질이 있어 자리·거리·움직임·엔트로피를 잴 수 있는 **유의미 공간**과 잴 것이 없는 **무의미 공간**으로 나누어 볼 수 있다(지은이의 관점). 움직임과 공간이 무엇인지, 왜 무엇이 있는지는 과학이 **아직 모른다**.

스스로 풀어 보기 정답과 해설은 부록 C

1. 원자에 대한 설명으로 옳은 것은?
 - ① 데모크리토스가 실험으로 처음 발견했다.
 - ② 지름이 약 10^{-15} m이다.
 - ③ 더 작은 알갱이로 전혀 나눌 수 없다.
 - ④ 원자핵과 전자로 되어 있다.
 - ⑤ 현재까지 어떤 현미경으로도 볼 수 없다.
2. 같은 물에 지름이 다른 두 알갱이를 띄웠더니 작은 알갱이가 더 활발하게 떨었다. 그 까닭을 물 분자의 충돌로 설명하시오.

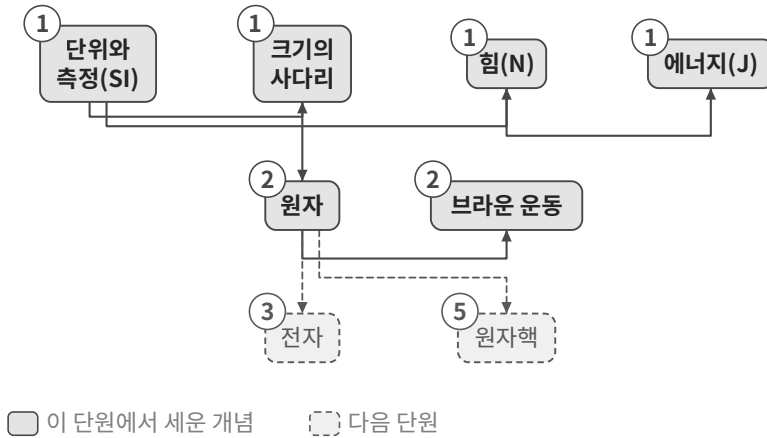
이 장의 출처

1. Einstein, A. (1905). Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. Annalen der Physik, 322(8), 549–560. <https://doi.org/10.1002/andp.19053220806>
2. Binnig, G., Rohrer, H., Gerber, C., & Weibel, E. (1982). Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy. Physical Review Letters, 49(1), 57–61. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.57>
3. Binnig, G., Quate, C. F., & Gerber, C. (1986). Atomic Force Microscope. Physical Review Letters, 56(9), 930–933. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.930>

4. Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2018). *Fundamentals of physics* (11th ed.). Wiley.
5. Tipler, P. A., & Llewellyn, R. A. (2012). *Modern physics* (6th ed.). W. H. Freeman.
6. Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (2011). *The Feynman lectures on physics* (New millennium ed., Vols. 1–3). Basic Books. (Original work published 1963)
7. Sweller, J., & Cooper, G. A. (1985). The Use of Worked Examples as a Substitute for Problem Solving in Learning Algebra. *Cognition and Instruction*, 2(1), 59–89. https://doi.org/10.1207/s1532690xc0201_3
8. Mayer, R. E., & Moreno, R. (2003). Nine Ways to Reduce Cognitive Load in Multimedia Learning. *Educational Psychologist*, 38(1), 43–52. https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_6
9. London, F. (1936). On condensed helium at absolute zero. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A - Mathematical and Physical Sciences*, 153(880), 576–583. <https://doi.org/10.1098/rspa.1936.0024>
10. Hallock, R. (2015). Is solid helium a supersolid?. *Physics Today*, 68(5), 30–35. <https://doi.org/10.1063/PT.3.2782>
11. Noether, E. (1971). Invariant variation problems. *Transport Theory and Statistical Physics*, 1(3), 186–207. <https://doi.org/10.1080/00411457108231446>
12. Hoefer, C., Huggett, N., & Read, J. (2021). Absolute and relational space and motion: Classical theories. In E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/spacetime-theories-classical/>
13. Leibniz, G. W., & Clarke, S. (2017). Exchange of papers between Leibniz and Clarke (J. Bennett, Trans.; 원서 1715–1716). *Early Modern Texts*. <https://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/leibniz1715.pdf>
14. Huggett, N., Hoefer, C., & Read, J. (2021). Absolute and relational space and motion: Post-Newtonian theories. In E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (첫 판 2006). <https://plato.stanford.edu/entries/spacetime-theories/>
15. Lebowitz, J. L. (1993). Boltzmann's Entropy and Time's Arrow. *Physics Today*, 46(9), 32–38. <https://doi.org/10.1063/1.881363>
16. Weinberg, S. (1989). The cosmological constant problem. *Reviews of Modern Physics*, 61(1), 1–23. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.61.1>
17. Lamoreaux, S. K. (1997). Demonstration of the Casimir Force in the 0.6 to 6 μ m Range. *Physical Review Letters*, 78(1), 5–8. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.5>
18. Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Abernathy, M. R., Acernese, F., Ackley, K., Adams, C., Adams, T., Addesso, P., Adhikari, R. X., Adya, V. B., Affeldt, C., Agathos, M., Agatsuma, K., Aggarwal, N., Aguiar, O. D., Aiello, L., Ain, A., Ajith, P., . . . LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration (2016). Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Physical Review Letters*, 116(6), 061102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>
19. Kuhlmann, M. (2026). Quantum field theory. In E. N. Zalta & U. Nodelman (Eds.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (첫 판 2006). <https://plato.stanford.edu/entries/quantum-field-theory/>
20. Riess, A. G., Filippenko, A. V., Challis, P., Clocchiatti, A., Diercks, A., Garnavich, P. M., Gilliland, R. L., Hogan, C. J., Jha, S., Kirshner, R. P., Leibundgut, B., Phillips, M. M., Reiss, D., Schmidt, B. P., Schommer, R. A., Smith, R. C., Spyromilio, J., Stubbs, C., Suntzeff, N. B., & Tonry, J. (1998). Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. *The Astronomical Journal*, 116(3), 1009–1038. <https://doi.org/10.1086/300499>
21. Perlmutter, S., Aldering, G., Goldhaber, G., Knop, R. A., Nugent, P., Castro, P. G., Deustua, S., Fabbro, S., Goobar, A., Groom, D. E., Hook, I. M., Kim, A. G., Kim, M. Y., Lee, J. C., Nunes, N. J., Pain, R., Pennypacker, C. R., Quimby, R., Lidman, C., . . . Project, T. S. C. (1999). Measurements of Ω and Λ from 42 High - Redshift Supernovae. *The Astrophysical Journal*, 517(2), 565–586. <https://doi.org/10.1086/307221>
22. Carroll, S. M. (2001). The Cosmological Constant. *Living Reviews in Relativity*, 4(1), 1. <https://doi.org/10.12942/lrr-2001-1>
23. Bekenstein, J. D. (1973). Black Holes and Entropy. *Physical Review D*, 7(8), 2333–2346. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.7.2333>

24. Hawking, S. W. (1975). Particle creation by black holes. *Communications In Mathematical Physics*, 43(3), 199–220. <https://doi.org/10.1007/BF02345020>
25. Van Raamsdonk, M. (2010). Building up spacetime with quantum entanglement. *General Relativity and Gravitation*, 42(10), 2323–2329. <https://doi.org/10.1007/s10714-010-1034-0>
26. Rovelli, C. (2004). *Quantum gravity*. Cambridge University Press.
27. Weinstein, S., & Rickles, D. (2024). Quantum gravity. In E. N. Zalta & U. Nodelman (Eds.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (첫 판 2005). <https://plato.stanford.edu/entries/quantum-gravity/>
28. Susskind, L. (1995). The world as a hologram. *Journal of Mathematical Physics*, 36(11), 6377–6396. <https://doi.org/10.1063/1.531249>
29. Maldacena, J. (1999). The Large-N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity. *International Journal of Theoretical Physics*, 38(4), 1113–1133. <https://doi.org/10.1023/A:1026654312961>
30. Leibniz, G. W. (2017). *Principles of nature and grace based on reason* (J. Bennett, Trans.; 원서 1714). *Early Modern Texts*. <https://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/leibniz1714a.pdf>
31. Sorensen, R. (2022). Nothingness. In E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (첫 판 2003). <https://plato.stanford.edu/entries/nothingness/>
32. Aspect, A., Dalibard, J., & Roger, G. (1982). Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers. *Physical Review Letters*, 49(25), 1804–1807. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.1804>
33. Hensen, B., Bernien, H., Dréau, A. E., Reiserer, A., Kalb, N., Blok, M. S., Ruitenberg, J., Vermeulen, R. F. L., Schouten, R. N., Abellán, C., Amaya, W., Pruneri, V., Mitchell, M. W., Markham, M., Twitchen, D. J., Elkouss, D., Wehner, S., Taminiau, T. H., & Hanson, R. (2015). Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres. *Nature*, 526(7575), 682–686. <https://doi.org/10.1038/nature15759>

제1부 정리 — 개념은 이렇게 이어진다



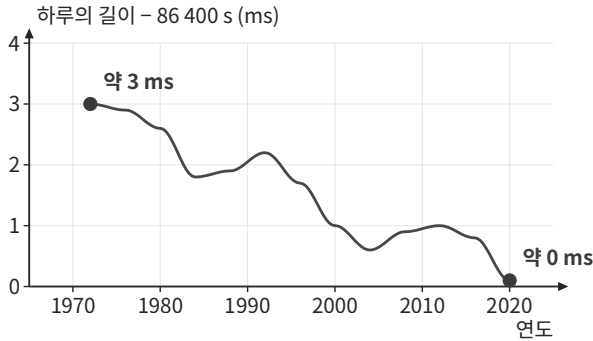
[제1부] 단원 마무리 — 지식 그래프 이 단원에서 세운 개념이 서로 어떻게 이어지고(파란 화살표), 다음 단원의 어떤 개념으로 넘어가는지(금색 점선) 보여 준다. 원 속 숫자는 그 개념을 세운 장이다

제1부 단원 마무리 — 수능형 문제

이 단원(1~2장)에서 배운 것으로 풀어 보자. 실제 수능 기출과 평가원 예시 문항을 바탕으로 상황·수치·그림·문장을 새로 쓴 문제다(출처는 바탕이 된 문항). 먼저 혼자 풀고, 다음 쪽 풀이에서 확인하자.

1. 출처: 2028학년도 수능 예시문항(통합과학) 2번 변형

그래프는 원자시계로 잰 하루의 길이(지구가 한 번 자전하는 데 걸린 시간)가 86 400 s보다 얼마나 길었는지를 연도에 따라 나타낸 것이다. 하린, 태오, 미숙이 그래프를 보고 이야기를 나누었다.



[문제 1] 원자시계로 잰 하루의 길이 - 86 400 s(단위 ms, 모식) 1972년 무렵 약 3 ms, 2020년 무렵 약 0 ms

하린 하루의 길이를 1000분의 1초까지 견주려면, 지구의 자전과 상관없이 정한 1초가 따로 있어야 해.

태오 1초를 하루의 86 400분의 1로 정했다면, 1972년 무렵의 1초는 2020년 무렵의 1초보다 조금 길었겠네.

미숙 그래프를 보니 지구는 1972년부터 2020년까지 점점 느리게 돌아갔네요.

제시한 내용이 옳은 사람만을 있는 대로 고른 것은?

- ① 하린 ② 태오 ③ 하린, 태오 ④ 하린, 미숙 ⑤ 태오, 미숙

2. 출처: 2028학년도 수능 예시문항(통합과학) 3번 변형

표는 미숙의 두부 가게에 있는 물체 A, B, C의 질량과 부피를 잰 결과이다.

물체	질량	부피
A 두부 한 모	420 g	400 cm ³
B 식용유 한 병	0.92 kg	1 L
C 굵은소금 한 덩이	54 g	25 mL

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

< 보 기 >

- ㄱ. 밀도는 C가 가장 크다.
 ㄴ. 부피는 질량과 같은 기본량이다.
 ㄷ. B의 밀도를 SI 단위로 나타내면 0.92 kg/m³이다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

3. 출처: 2028학년도 수능 예시문항(통합과학) 9번 변형

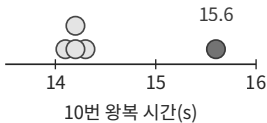
다음은 태오가 실에 매단 추(진자)로 한 탐구 활동이다.

(가) 줄 길이가 0.5 m인 진자가 10번 왕복하는 시간을 초시계로 다섯 번 재었더니 14.1 s, 14.3 s, 15.6 s, 14.2 s, 14.2 s였다.

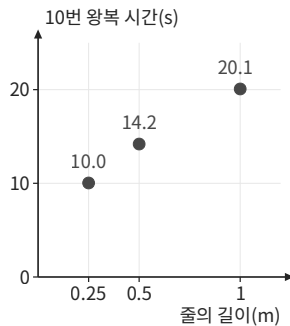
(나) 다섯 값 가운데 실수로 늦게 누른 하나를 빼고 나머지 네 값의 평균을 구하였다.

(다) 줄 길이를 0.25 m, 1.0 m로 바꾸어 (가)~(나)를 반복하고 결과를 그래프로 나타내었다.

(가) 줄 길이 0.5 m, 다섯 번 측정



(나) 줄 길이별 평균



[문제 3] (가) 줄 길이 0.5 m일 때 다섯 번 잰 10번 왕복 시간, (나) 줄 길이별 10번 왕복 시간의 평균

고등학교 통합과학 · 전 8권

이야기로 읽고, 그림으로 이해하고, 문제로 확인하는 통합과학

이 책 · 물리편 2

호박 구슬과 나침반

물리는 무엇을 재는가라는 물음에서 시작해 원자라는 생각, 전자와 원자핵의 발견, 전하와 전기력까지 이야기로 풀어 갑니다.

통합과학 8권 한눈에 보기



1 화학편 1
원자·원소·법



2 화학편 2
결합과 물질



3 생명편 1
분자와 세포



4 생명편 2
유전과 진화



5 물리편 1
힘과 운동



6 물리편 2 · 이 책
전하와 전기력



7 지구과학편 1
공기·물·날씨



8 지구과학편 2
원소·암석·지구

과학과영성출판사

이광조 지음

값 24,000원

값 24000 원
53420



9 791123 106531 1
ISBN 979-11-23065-31-1

이어서 읽으시려면

06 통합과학 물리 2 — 호박 구슬과 나침반 — 전체 526쪽

ssbook.kr/book/tonghap-06

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 진로실까지, 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)



발골의 강
 피의 흐름에서 발바닥까지, 명과 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
~~10,000원~~ → **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 전편 수록
~~10,000원~~ → **10,800원**
ssbook.kr/book/iamblichus



홍산문화의 수행상에서 한국 선도까지
요하의 흙인형 · 우하랑의 여신 · 해명경 · 태을금
화중지 다섯 갈래를 한자리에 놓다
~~26,000원~~ → **15,600원**
ssbook.kr/book/hongsan

중고등학교 교재 (30)



대입 과학논술 01 — 유전 암호·전사·번역
대학 기술로 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 — 기술 22문
항으로 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 콩
팥까지 항상성
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-08



대입 과학논술 09 — 면역·백신
몸은 기억한다 — 염증 반응에서 백신과 집단 면역
까지
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-09



대입 과학논술 10 — 세포호흡·광합성·에너지대사
포도당 한 분자의 ATP 장부 — 미토콘드리아와 엽록체
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-10



대입 과학논술 11 — 신경계·활동전위
펄프가 기울기를 만들고, 통로가 열리고 닫히며 신호가 생긴다
~~24,000원~~ → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-11



대입 과학논술 12 — 생태·진화·생물다양성
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



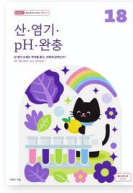
대입 과학논술 16 — 유기 화학·생체 분자·고분자
유기 화학·생체 분자·고분자 논제 해설
24,000원 → **14,400원**
ssbook.kr/book/nonsul-16



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 × 르사틀리에로 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 — 못은 왜 녹슬까
결합에서 반응·산과 염기까지
18,000원 → **10,800원**
ssbook.kr/book/tonghap-02



03 통합과학 생명과학 1 — 배추는 왜 숨이 죽을까
본자에서 세포·호소·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 뒤통해질까
원자에서 힘과 에너지까지
~~22,000원~~ → **13,200원**
ssbook.kr/book/tonghap-05



06 통합과학 물리 2 — 호박 구슬과 나침반
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 영
양학과 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

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/seogyyeong-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