

21장: 쿨롱 법칙

Coulomb's Law

이번 학기에 배울 내용

1학기에는 역학과 열역학을 배웠다. 이제 2학기에는 **전자기학 (electromagnetism)** 으로 들어간다.

- 전자기력은 원자와 분자를 묶어 물질을 만든다
- 모든 전기·전자 기기, 화학 결합, 그리고 **빛(light)** 의 근원이 전자기력이다
- 자연의 **네 가지 기본 힘(four fundamental forces)** — 중력, 전자기력, 약력, 강력 — 중 하나이다

우리가 일상에서 마주하는 거의 모든 힘(마찰력, 수직항력, 장력, 탄성력)은 사실 미시적으로는 전자기력이다.

전기는 일상 속에 있다

- 겨울철 문손잡이를 잡을 때 **찌릿** 하는 정전기
- 스웨터를 벗을 때 나는 **따닥** 소리와 작은 불꽃
- 마른 날 머리를 빗으면 머리카락이 **곤두서는** 현상
- 하늘에서 내리치는 **번개(lightning)**



이 모든 현상의 배후에는 **전하(electric charge)** 가 있다.

이번 장의 세 가지 핵심 결론

이번 장에서 우리는 다음 세 가지를 배운다.

1. **쿨롱 법칙(Coulomb's law)** : 두 전하 사이에 작용하는 힘의 크기와 방향

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

2. **전하의 양자화(quantization of charge)** : 전하는 기본 전하 e 의 정수배로만 존재한다

$$q = ne$$

3. **전하 보존(conservation of charge)** : 고립계의 알짜 전하는 변하지 않는다

21.1 쿨롱 법칙

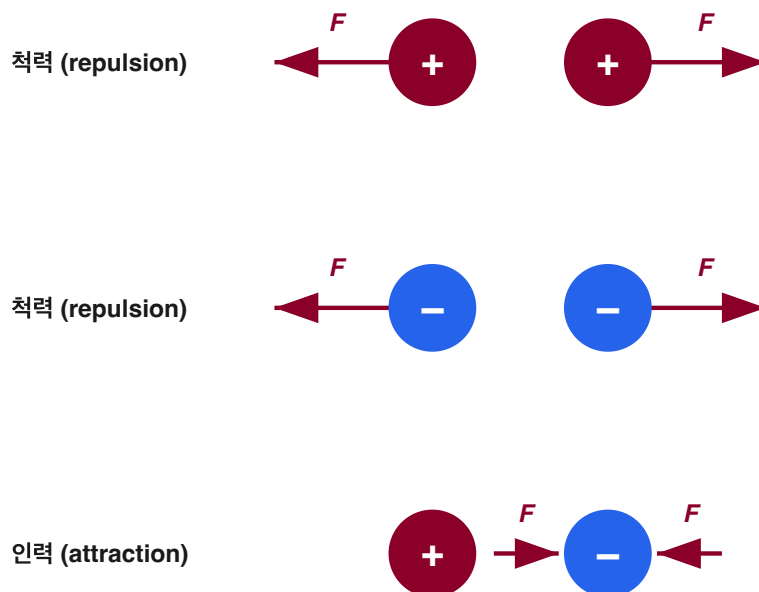
전하에는 두 종류가 있다

전하(electric charge) 는 두 종류가 있다. 양전하(+) 와 음전하(-) 이다.

기본 규칙:

- 같은 부호 의 전하끼리는 서로 밀어낸다 (척력, repulsion)
- 반대 부호 의 전하끼리는 서로 끌어당긴다 (인력, attraction)

같은 부호는 밀치고, 반대 부호는 끌어당긴다



전기적 중성과 잉여 전하

대부분의 물체는 **전기적 중성(electrically neutral)** 이다. 양전하와 음전하의 총량이 정확히 같기 때문이다.

물체를 마찰하면 한쪽에 전하가 쌓여 **대전(charged)** 된다. 이때 쌓인 전하를 **잉여 전하(excess charge)** 라 한다.

- 유리 막대를 비단으로 문지르면 → 유리 막대는 **양(+)** 으로 대전
- 플라스틱 막대를 털가죽으로 문지르면 → 플라스틱 막대는 **음(-)** 으로 대전

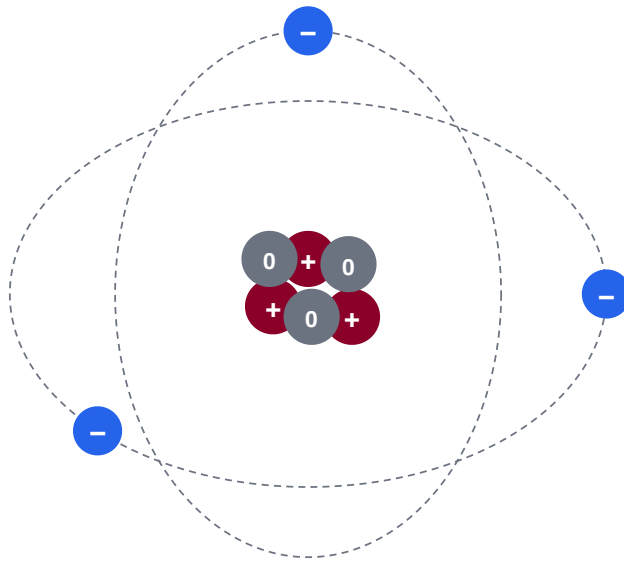
중요한 점: 마찰은 전하를 **만들어내는** 것이 아니라, 한 물체에서 다른 물체로 **옮길** 뿐이다.

원자의 구조

물질을 이루는 원자는 다음으로 구성된다.

- **양성자(proton)** : 전하 $+e$, 원자핵 안에 있음
- **중성자(neutron)** : 전하 0, 원자핵 안에 있음
- **전자(electron)** : 전하 $-e$, 원자핵 주위를 돈다

원자의 구조: 양성자, 중성자, 전자



 양성자 (proton) $+e$

 중성자 (neutron) 0

 전자 (electron) $-e$

여기서 $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C는 **기본 전하(elementary charge)**이다. 양성자와 전자는 부호만 반대이고 전하의 크기는 정확히 같다.

마찰로 전자가 옮겨간다

원자핵 속 양성자는 단단히 묶여 있어 잘 움직이지 못한다. 반면 바깥쪽 **전자(electron)**는 비교적 쉽게 떨어져 나간다.

- 물체가 전자를 **잃으면** → 양전하가 남아 **(+)** 로 대전
- 물체가 전자를 **얻으면** → 음전하가 많아져 **(-)** 로 대전

따라서 모든 대전 현상은 결국 **전자의 이동** 으로 설명된다. 머리카락이 곤두서는 것도, 풍선이 벽에 붙는 것도 전자가 옮겨간 결과이다.

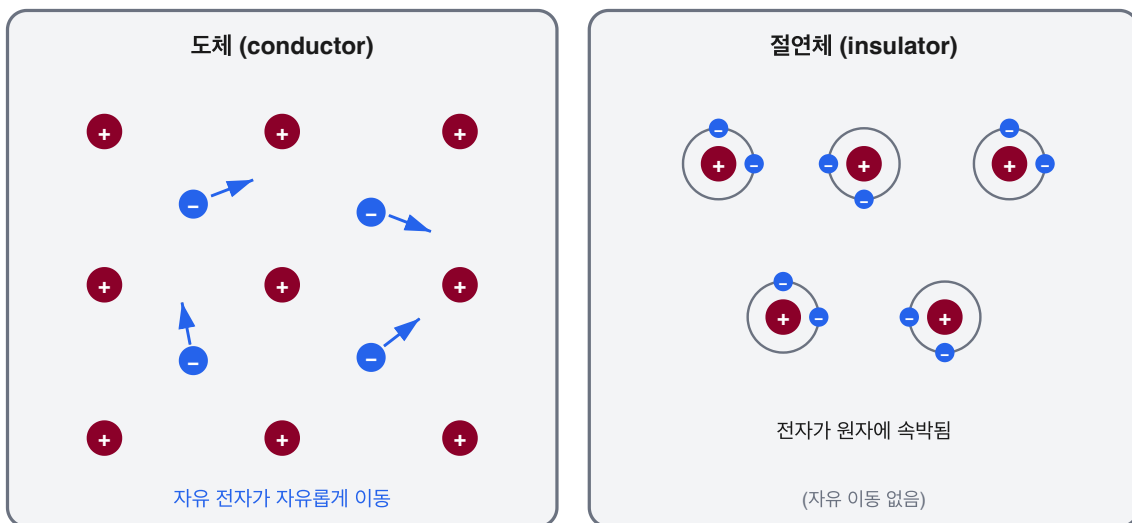


도체와 절연체

물질은 전하가 얼마나 자유롭게 움직일 수 있는가에 따라 나뉜다.

- **도체(conductor)** : 전하가 자유롭게 이동 (구리, 알루미늄, 인체, 수돗물)
- **절연체·부도체(insulator)** : 전하가 거의 이동 못 함 (유리, 고무, 플라스틱, 마른 나무)
- **반도체(semiconductor)** : 도체와 절연체의 중간 (규소, 저마늄) — 전자 소자의 핵심 재료
- **초전도체(superconductor)** : 전기 저항이 완전히 0인 물질

도체 vs 절연체



전도 전자와 접지

금속에서는 각 원자의 바깥쪽 전자 일부가 특정 원자에 묶이지 않고 금속 전체를 자유롭게 돌아다닌다. 이를 **전도 전자(conduction electrons)** 라 한다. 도체가 전기를 잘 통하는 이유이다.

대전된 물체를 다른 물체와 떨어뜨려 두면 전하가 그대로 유지된다. 이를 **전기적 고립(electrical isolation)** 이라 한다.

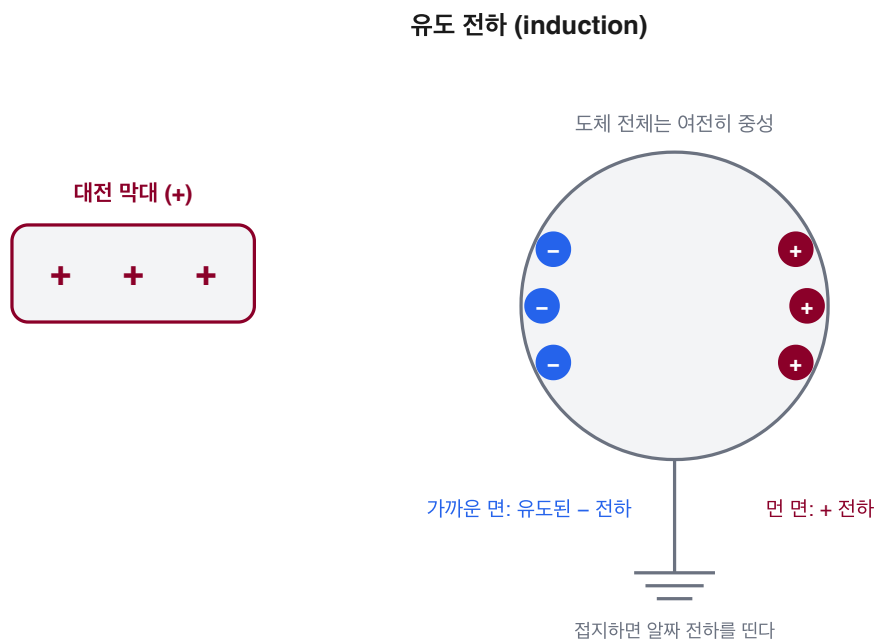
도체를 땅(지구)에 도선으로 연결하면, 지구는 거의 무한한 전하 저장소이므로 잉여 전하가 흘러나가 중성이 된다. 이를 **접지(grounding)** 라 한다.

유도 전하

대전체를 중성 도체 가까이 가져가면, 도체 내부의 전도 전자가 재배치된다.

- 양(+)으로 대전된 막대를 가까이 하면 → 도체의 전자들이 막대 쪽으로 **끌려와** 가까운 면에 모인다
- 가까운 쪽에는 음전하가, 먼 쪽에는 양전하가 남는다

이렇게 생긴 전하를 **유도 전하(induced charge)** 라 한다.



도체 전체로는 여전히 중성이지만, 가까운 쪽 인력이 먼 쪽 척력보다 커서 결국 도체가 막대에 **끌려간다**. 종이 조각이 빗에 붙는 이유이다.

시뮬레이션: 유도 전하 — 도체/절연체의 전하 재배치와 접지

쿨롱 법칙

두 점전하 q_1, q_2 사이의 거리가 r 일 때, 둘 사이에 작용하는 전기력의 크기는:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^2} = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

여기서 비례 상수는:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$$

ϵ_0 는 **자유 공간의 유전율(permittivity of free space)**, SI 전하 단위는 **쿨롬(coulomb, C)** 이다.

힘의 방향과 작용-반작용

쿨롱 힘은 항상 두 전하를 잇는 **직선 방향** 으로 작용한다.

- 같은 부호: 서로 **밀어내는** 방향 (척력)
- 반대 부호: 서로 **끌어당기는** 방향 (인력)

q_1 이 q_2 에 작용하는 힘 $\vec{F}_{21}$ 과, q_2 가 q_1 에 작용하는 힘 $\vec{F}_{12}$ 는:

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$$

쿨롱 법칙 (Coulomb's law)



크기 $F = k|q_1||q_2|/r^2$, 방향은 두 전하를 잇는 직선

크기가 같고 방향이 반대인 한 쌍이다. 이는 **뉴턴 제3법칙(작용-반작용)** 과 정확히 일치한다.

예제: 두 전하 사이의 힘

전하 $q_1 = +3 \mu\text{C}$, $q_2 = +5 \mu\text{C}$ 가 거리 $r = 0.20 \text{ m}$ 떨어져 있다. 둘 사이의 힘을 구하라.

먼저 단위를 변환한다. $1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$ 이므로 $q_1 = 3 \times 10^{-6} \text{ C}$, $q_2 = 5 \times 10^{-6} \text{ C}$.

쿨롱 법칙에 대입하면:

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2} = (8.99 \times 10^9) \frac{(3 \times 10^{-6})(5 \times 10^{-6})}{(0.20)^2}$$

분자를 계산하면 $(3 \times 10^{-6})(5 \times 10^{-6}) = 15 \times 10^{-12}$, 분모는 $(0.20)^2 = 0.04$:

$$F = (8.99 \times 10^9) \cdot \frac{15 \times 10^{-12}}{0.04} = (8.99 \times 10^9)(3.75 \times 10^{-10})$$

$$\boxed{F \approx 3.37 \text{ N}}$$

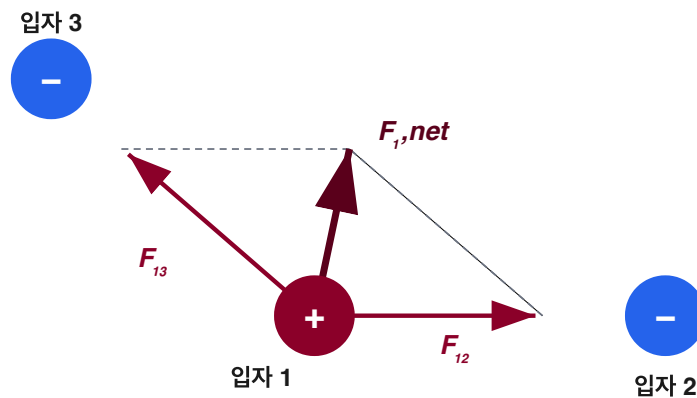
두 전하가 모두 양(+)이므로 서로 밀어내는 **척력**이다.

중첩 원리

전하가 여러 개일 때, 한 전하가 받는 **알짜힘(net force)** 은 나머지 각 전하가 미치는 힘을 **벡터로 더한** 것이다.

$$\vec{F}_{1,\text{net}} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{14} + \dots$$

여러 전하에 의한 알짜힘 = 벡터 합



$$F_{1,\text{net}} = F_{12} + F_{13} \text{ (벡터 합)}$$

주의: 이것은 **벡터 합** 이지 스칼라 합이 아니다! 각 힘의 크기를 그냥 더하면 안 되고, 방향까지 고려해야 한다.

각 쌍의 힘은 다른 전하의 존재와 무관하게 독립적으로 계산한다.

예제: 두 힘의 벡터 합

전하 q_1 이 두 힘을 받는다고 하자. 크기는 각각 $F_{12} = 4.0 \text{ N}$ (오른쪽, $+x$ 방향), $F_{13} = 3.0 \text{ N}$ (위쪽, $+y$ 방향)이고 서로 수직이다.

성분으로 나누면:

$$F_x = 4.0 \text{ N}, \quad F_y = 3.0 \text{ N}$$

알짜힘의 크기:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{(4.0)^2 + (3.0)^2} = \sqrt{25} = 5.0 \text{ N}$$

방향($+x$ 축 기준 각도):

$$\theta = \tan^{-1} \frac{F_y}{F_x} = \tan^{-1} \frac{3.0}{4.0} \approx 37^\circ$$

알짜힘은 크기 5.0 N , $+x$ 축에서 약 37° 위쪽 방향이다.

시뮬레이션: 쿨롱 힘 놀이터 — 전하를 움직이며 힘의 크기·방향 관찰

전류

전하가 도선을 따라 흐르면 **전류(electric current)**가 된다. 전류는 어떤 단면을 단위 시간당 지나가는 전하의 양으로 정의한다.

$$i = \frac{dq}{dt}$$

- 단위: 암페어(ampere, A) = 1 C/s
- 시간 dt 동안 전하 dq 가 한 점을 지나가는 비율

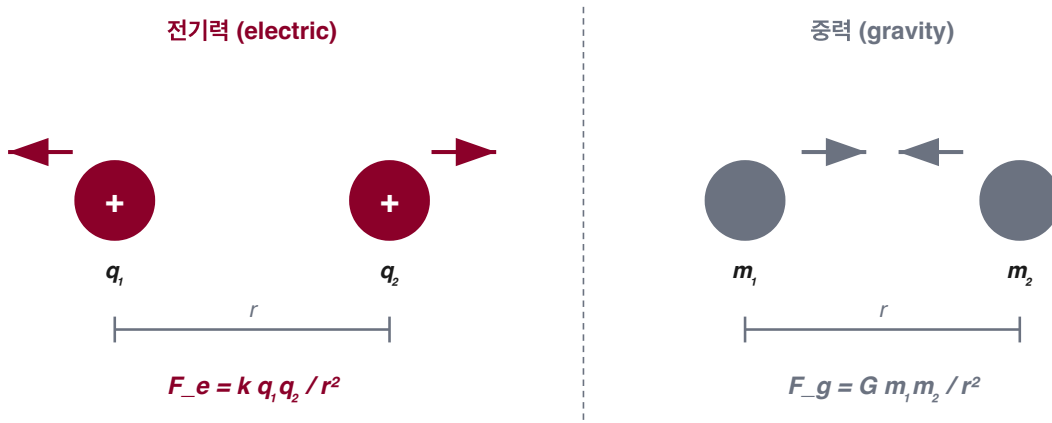
전류와 전하의 흐름은 다음 장들(전기장, 전위, 회로)에서 본격적으로 다룬다. 여기서는 전하가 움직이면 전류가 된다는 점만 기억하자.

쿨롱 힘과 중력의 비교

쿨롱 법칙과 뉴턴의 **만유인력 법칙(law of gravitation)** 은 형태가 똑같은 **역제곱 법칙(inverse-square law)** 이다.

$$F_e = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}, \quad F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

쿨롱 법칙 vs 만유인력: 같은 역제곱 구조



둘 다 거리의 제곱에 반비례 ($1/r^2$),
단 전기력은 인력·척력 모두 가능

차이점:

- 중력은 항상 **인력** 뿐이지만, 전기력은 인력과 척력 둘 다 있다
- 같은 거리에서 전기력이 중력보다 **압도적으로 강하다**

두 힘의 세기 비교

수소 원자에서 전자와 양성자 사이의 전기력과 중력의 비를 구해 보자.
두 힘 모두 $1/r^2$ 이므로 거리 r 이 약분된다.

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{k|q_1||q_2|/r^2}{Gm_1m_2/r^2} = \frac{k e^2}{G m_e m_p}$$

값을 대입하면 ($e = 1.6 \times 10^{-19}$ C, $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg,
 $m_p = 1.67 \times 10^{-27}$ kg, $G = 6.67 \times 10^{-11}$):

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{(8.99 \times 10^9)(1.6 \times 10^{-19})^2}{(6.67 \times 10^{-11})(9.11 \times 10^{-31})(1.67 \times 10^{-27})}$$

$$\boxed{\frac{F_e}{F_g} \approx 2.3 \times 10^{39}}$$

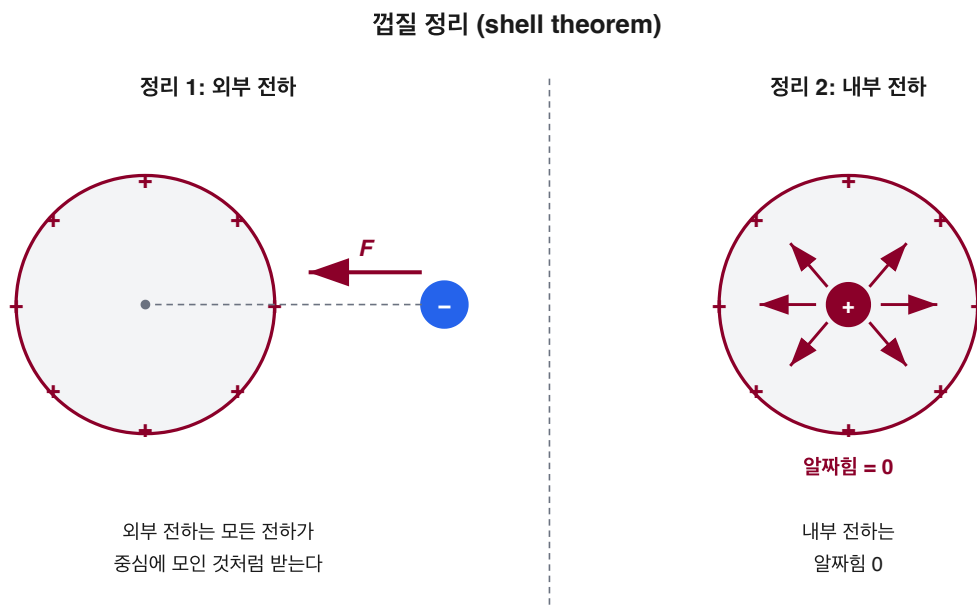
전기력이 중력보다 약 10^{39} 배 강하다! 원자와 분자를 묶는 것은 사실상 전적으로 전자기력이다.

껍질 정리

쿨롱 법칙은 점전하 사이의 힘이지만, 균일하게 대전된 **구 껍질 (spherical shell)** 에도 두 가지 중요한 정리가 성립한다.

껍질 정리 1 : 균일하게 대전된 구 껍질이 껍질 **바깥** 의 전하에 미치는 힘은, 껍질의 모든 전하가 **중심에 모여 있는 것처럼** 작용한다.

껍질 정리 2 : 균일하게 대전된 구 껍질 **내부** 에 있는 전하가 받는 알짜 힘은 **0** 이다.



이는 뉴턴이 중력에서 증명한 껍질 정리와 똑같다. 도체 구의 잉여 전하는 서로 밀어내어 **바깥 표면에 균일하게** 분포한다.

예제: 동일한 두 도체구의 전하 나눔

동일한 두 도체구가 있다. 구 A는 전하 $+Q$, 구 B는 중성(0)이다. 두 구를 도선으로 잠깐 연결했다 떼면 각 구의 전하는?

- 도선으로 연결되면 전하가 자유롭게 이동할 수 있다
- 두 구는 **모양과 크기가 똑같으므로** 대칭이다
- 평형 상태에서 전하는 대칭에 의해 **똑같이** 나뉜다

전하 보존에 의해 총 전하는 $+Q$ 로 일정하므로:

$$q_A = q_B = \frac{Q + 0}{2} = +\frac{Q}{2}$$

각 구는 $+Q/2$ 를 갖는다. 만약 B가 처음에 $-Q$ 였다면 총합이 0이므로 둘 다 중성이 된다.

21.2 전하의 양자화

전하는 덩어리로만 존재한다

자연의 모든 전하는 **기본 전하(elementary charge)** e 의 정수배로만 나타난다.

$$q = ne, \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

전하는 연속적인 양이 아니라 e 단위로 **양자화(quantized)** 되어 있다.

- 가능: $+10e, -6e, +1e$ 같은 정수배
- 불가능: $3.57e$ 처럼 e 의 정수배가 아닌 값

물체의 전하를 바꾸는 것은 전자를 한 개, 두 개씩 더하거나 빼는 것이다.

쿼크와 분수 전하

양성자나 중성자를 이루는 더 작은 입자인 **쿼크(quark)** 는 사실 $\pm\frac{1}{3}e$, $\pm\frac{2}{3}e$ 같은 **분수 전하** 를 갖는다.

그러나 쿼크는 항상 여러 개가 묶여 있어 **단독으로 검출되지 않는다**. 자유 입자로 관측되는 전하는 언제나 e 의 정수배이다. 그래서 e 를 기본 전하로 둔다.

(예: 양성자 = 두 개의 up 쿼크 $+\frac{2}{3}e$ 와 한 개의 down 쿼크 $-\frac{1}{3}e \rightarrow$ 합 $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1e$.)

전하는 입자의 성질이다

전하는 따로 떼어낼 수 있는 **물질** 이 아니라, 질량처럼 입자가 지닌 하나의 **성질** 이다.

전하가 양자화되어 있다면, 왜 우리는 일상에서 그 알갱이성을 느끼지 못할까? 기본 전하가 너무 작기 때문이다.

- 100 W 전구에는 매초 약 10^{19} 개의 기본 전하가 드나든다
- 너무 많은 수가 흐르므로 알갱이성은 전혀 드러나지 않고 **연속** 처럼 보인다

마치 모래사장을 멀리서 보면 매끈해 보이지만 가까이 보면 모래 알갱이인 것과 같다.

21.3 전하 보존

전하는 생성도 소멸도 되지 않는다

전하 보존 법칙(law of conservation of charge) : 고립계의 알짜 전하는 항상 일정하다.

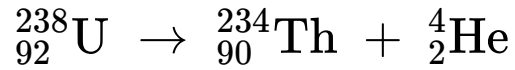
유리 막대를 비단으로 문지르는 경우:

- 유리 막대는 $+q$ 로 대전
- 비단은 정확히 $-q$ 로 대전
- 알짜 전하의 변화는 0

전하가 새로 생긴 것이 아니라, 전자가 유리에서 비단으로 **옮겨갔을** 뿐이다.

핵반응에서의 전하 보존

전하 보존은 원자핵 반응에서도 엄격하게 성립한다. **알파 붕괴(alpha decay)**의 예:



여기서 아래 첨자는 양성자 수(즉 전하)이다. 양변의 전하를 비교하면:

- 좌변: 92
- 우변: $90 + 2 = 92$

좌변과 우변의 알짜 전하가 정확히 같다. 전하가 보존된다.

쌍소멸과 쌍생성

입자 물리학에서도 전하 보존은 깨지지 않는다.

쌍소멸(annihilation) : 전자(e^-)와 양전자(e^+)가 만나 빛(감마선 γ)으로 사라진다.

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$$

전하: 좌변 $(-e) + (+e) = 0$, 우변 $0 + 0 = 0 \rightarrow$ 보존.

쌍생성(pair production) : 감마선이 전자-양전자 쌍으로 바뀐다.

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+$$

전하: 좌변 0, 우변 $(-e) + (+e) = 0 \rightarrow$ 보존. 입자는 항상 **부호가 반대인 쌍**으로 생기거나 사라진다.

Review & Summary

핵심 개념

- **쿨롱 법칙** : 두 점전하 사이의 힘은 전하 크기의 곱에 비례하고 거리의 제곱에 반비례한다

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

- **벡터·중첩** : 여러 전하가 있으면 알짜힘은 각 힘의 **벡터 합** 이다
- **전하의 양자화** : 전하는 e 의 정수배로만 존재한다 ($q = ne$)
- **전하 보존** : 고립계의 알짜 전하는 변하지 않는다 (전하는 이동할 뿐)

핵심 공식과 상수

개념	공식 / 값
쿨롱 법칙	$F = k q_1 q_2 /r^2$
쿨롱 상수	$k = 1/(4\pi\epsilon_0) = 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$
유전율	$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$
기본 전하	$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
전하의 양자화	$q = ne$
전류	$i = dq/dt$

기억할 것:

- 같은 부호는 척력, 반대 부호는 인력 — 힘은 두 전하를 잇는 직선 방향
- 전기력의 작용-반작용: $\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$ (뉴턴 제3법칙)
- 전기력은 중력보다 약 10^{39} 배 강하다
- 마찰·핵반응·쌍생성 어디서나 전하는 **보존** 된다