2 โครงสร้างอะตอม

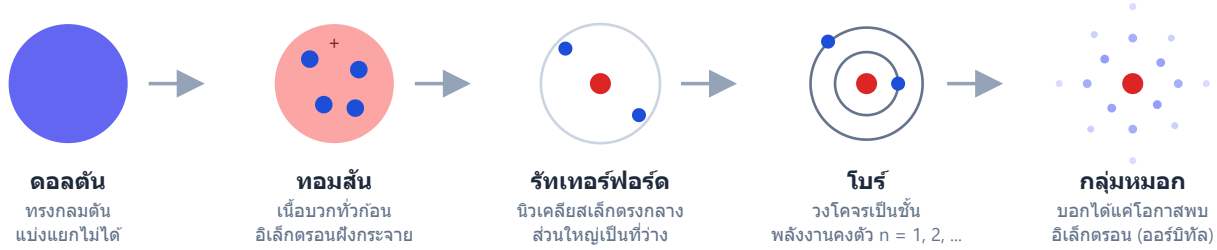
ชีทเรียน+แบบฝึกหัด · ติวเคมี สอวน. ค่าย 1 · สอนสลับฝึกทีละช่วง

1 พัฒนาการแบบจำลองอะตอม

1. พัฒนาการแบบจำลองอะตอม — วิทยาศาสตร์เชื่อการทดลอง ไม่เชื่อความรู้สึก

หัวใจของหัวข้อนี้ไม่ใช่ท่องชื่อคน แต่คือจับคู่ให้ได้ว่า **การทดลองอะไร → หักล้างแบบจำลองไหน → นำไปสู่แบบจำลองใหม่อะไร** ข้อสอบชอบถามแบบให้ผลการทดลองมาแล้วถามว่าสนับสนุนหรือขัดแย้งกับแบบจำลองใด

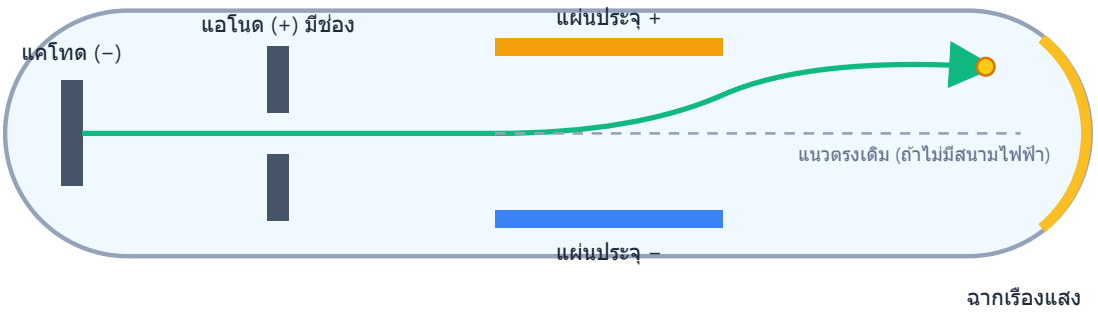
ลำดับ	แบบจำลอง	ใจความสำคัญ	หลักฐาน/การทดลอง	จุดที่ใช้ไม่ได้
1	**ดอลตัน** (Dalton)	อะตอมเป็นทรงกลมตัน แบ่งแยกไม่ได้ สร้างหรือทำลายไม่ได้ อะตอมธาตุเดียวกันเหมือนกันทุกประการ	อธิบายกฎทรงมวลและกฎสัดส่วนคงที่ได้	พบอิเล็กตรอน → อะตอมแบ่งย่อยได้; พบไอโซโทป → ธาตุเดียวกันมวลไม่เท่ากันได้
2	**ทอมสัน** (Thomson)	เนื้ออะตอมเป็นประจุบวกกระจายทั่ว มีอิเล็กตรอนฝังประปราย ("ขนมปังลูกเกด")	หลอดรังสีแคโทด → พบอนุภาคประจุลบ (อิเล็กตรอน) และวัดอัตราส่วนประจุต่อมวล e/m ได้	อธิบายผลการยิงอนุภาคแอลฟาผ่านแผ่นทองคำไม่ได้
3	**รัทเทอร์ฟอร์ด** (Rutherford)	ประจุบวกและมวลเกือบทั้งหมดอัดแน่นใน **นิวเคลียส** ขนาดจิ๋ว อิเล็กตรอนวิ่งอยู่รอบนอก อะตอมส่วนใหญ่เป็นที่ว่าง	ยิงอนุภาคแอลฟาใส่แผ่นทองคำบาง: ส่วนใหญ่ทะลุตรง บางตัวเบนมุมกว้าง นานๆ ทีสะท้อนกลับ	ตามฟิสิกส์คลาสสิก อิเล็กตรอนที่วนรอบต้องคายพลังงานแล้วดิ่งชนนิวเคลียส และอธิบายสเปกตรัมเส้นไม่ได้
4	**โบร์** (Bohr)	อิเล็กตรอนโคจรได้เฉพาะวงที่มี **พลังงานเฉพาะค่า** (quantized) จะดูดหรือคายพลังงานก็ต่อเมื่อกระโดดข้ามระดับ	ทำนายตำแหน่งเส้นสเปกตรัมของไฮโดรเจนได้ตรงเป๊ะ	ใช้ได้เฉพาะระบบอิเล็กตรอนเดียว (H, He^+, Li^{2+}) พังทันทีกับอะตอมหลายอิเล็กตรอน
5	**กลุ่มหมอก** (กลศาสตร์ควอนตัม)	ระบุตำแหน่งแน่นอนของอิเล็กตรอนไม่ได้ บอกได้เพียง **บริเวณที่มีโอกาสพบสูง** เรียกว่า ออร์บิทัล	หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก + สมการชเรอดิงเงอร์	เป็นแบบจำลองที่ใช้ปัจจุบัน



การทดลองใหม่หักล้างแบบจำลองเก่า → ได้แบบจำลองใหม่เสมอ

เทคนิคจำลำดับ: "ตัน → ลูกเกด → นิวเคลียส → วงโคจร → หมอก" — ภาพอะตอมค่อยๆ กลวงขึ้นและเบลอขึ้นตามลำดับเวลา

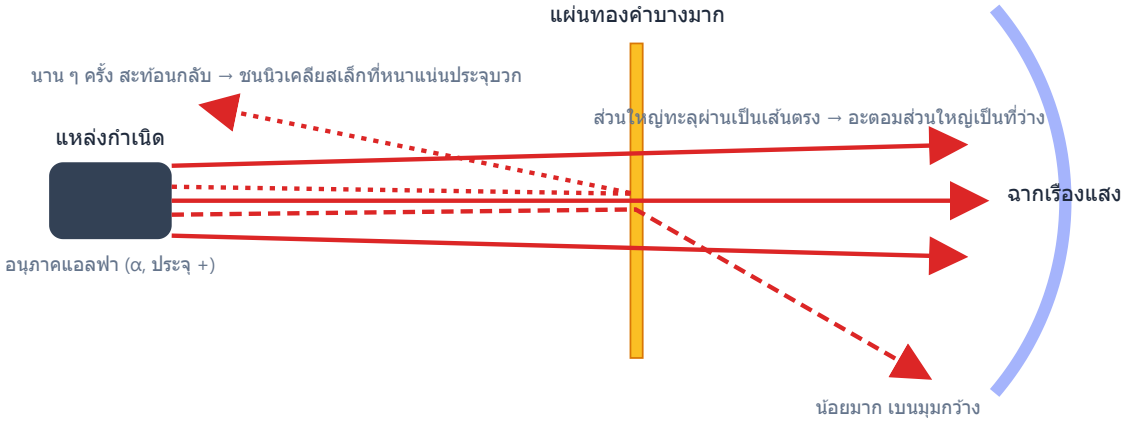
การทดลองหลอดรังสีแคโทดของทอมสัน — สังเกตว่าลำรังสีเบนเข้าหาแผ่นประจุบวก จึงสรุปได้ว่าอนุภาคในรังสีมีประจุลบ:



รังสีแคโทดเบนเข้าหา "แผ่นประจุบวก" → อนุภาคในรังสีมีประจุลบ (อิเล็กตรอน) · ทอมสันวัดอัตราส่วนประจุต่อมวลได้

จุดสอบโปรด — การทดลองของรัทเทอร์ฟอร์ด ต้องแปลผล 3 ข้อนี้ได้ทันทีไม่ต้องคิด:

- แอลฟาส่วนใหญ่ทะลุตรง → อะตอมส่วนใหญ่เป็นที่ว่าง
- แอลฟาบางตัวเบนมุมกว้าง → มีบริเวณประจุบวกหนาแน่นคอยผลัก (แอลฟาเป็นบวก)
- นานๆ ทีสะท้อนกลับมาทางเดิม → มวลเกือบทั้งหมดกระจุกอยู่ในนิวเคลียสที่เล็กมากๆ



✏️ ฝึกทันที 3 ข้อ (ง่าย→ยาก)

ข้อ 1 ★☆☆☆☆

จากการทดลองของรัทเทอร์ฟอร์ดที่ยิงอนุภาคแอลฟาเข้าใส่แผ่นทองคำบาง พบว่าอนุภาคแอลฟาส่วนใหญ่ทะลุผ่านไปเป็นเส้นตรง แต่มีจำนวนน้อยมากที่เบี่ยงเบนเป็นมุมกว้างหรือสะท้อนกลับ ผลการทดลองนี้นำไปสู่ข้อสรุปใด

ก. อะตอมเป็นทรงกลมตันขนาดเล็กที่สุดซึ่งแบ่งแยกอีกไม่ได้
ข. เนื้ออะตอมเป็นประจุบวกกระจายอยู่สม่ำเสมอทั่วทั้งอะตอม และมีอิเล็กตรอนฝังกระจายอยู่
ค. อะตอมส่วนใหญ่เป็นที่ว่าง โดยประจุบวกและมวลเกือบทั้งหมดรวมกันอยู่ในนิวเคลียสขนาดเล็กตรงกลาง
ง. อิเล็กตรอนเคลื่อนที่รอบนิวเคลียสเป็นวงโคจรที่มีระดับพลังงานคงตัว

ข้อ 2 ★★☆☆☆

ในหลอดรังสีแคโทดที่บรรจุแก๊สความดันต่ำ นอกจากรังสีแคโทดแล้วยังพบรังสีอีกชนิดหนึ่งเคลื่อนที่สวนทางผ่านรูของขั้วแคโทดไปยังด้านหลัง เรียกว่ารังสีแคแนล (รังสีบวก) ข้อใดกล่าวถึงความแตกต่างระหว่างรังสีแคแนลกับรังสีแคโทดได้ถูกต้อง

ก. รังสีแคแนลไม่เบี่ยงเบนในสนามไฟฟ้าเพราะเป็นกลางทางไฟฟ้า
ข. รังสีแคแนลเบี่ยงเบนเข้าหาขั้วบวกของสนามไฟฟ้า และค่าประจุต่อมวลคงที่ไม่ขึ้นกับชนิดของแก๊ส
ค. รังสีแคแนลเบี่ยงเบนเข้าหาขั้วลบของสนามไฟฟ้า และค่าประจุต่อมวลเปลี่ยนไปตามชนิดของแก๊สในหลอด
ง. รังสีแคแนลคืออนุภาคชนิดเดียวกับรังสีแคโทดแต่เคลื่อนที่สวนทางกันเท่านั้น

ข้อ 3 ★★☆☆☆

ตารางแสดงสมบัติของอนุภาคมูลฐาน 3 ชนิดในอะตอม

อนุภาค	ประจุสัมพัทธ์	มวลสัมพัทธ์ (u)
X	-1	0.00055
Y	0	1.0087
Z	$+1$	1.0073

อะตอม $^{23}_{11}\mathrm{Na}$ มีอนุภาค Y อยู่กี่ตัว

ก. 11 ตัว
ข. 23 ตัว
ค. 12 ตัว
ง. 34 ตัว

2 อนุภาคมูลฐาน เลขอะตอม เลขมวล

2. อนุภาคมูลฐาน เลขอะตอม เลขมวล

อะตอมประกอบด้วยอนุภาคมูลฐาน 3 ชนิด:

อนุภาค	สัญลักษณ์	ประจุสัมพัทธ์	มวลโดยประมาณ (amu)	ตำแหน่ง
โปรตอน	p	$+1$	≈ 1	ในนิวเคลียส
นิวตรอน	n	0	≈ 1	ในนิวเคลียส
อิเล็กตรอน	e^-	-1	≈ 0.00055 ($\approx \frac{1}{1836}$ ของมวลโปรตอน — เบามากจนตัดทิ้งได้)	รอบนิวเคลียส

อนุภาคเหล่านี้ถูกค้นพบอย่างไร — สามการทดลองที่ข้อสอบชอบอ้าง:

- **หลอดรังสีแคโทด (ทอมสัน)** — พบอิเล็กตรอน และวัด**อัตราส่วนประจุต่อมวล** ได้ $e/m = 1.76 \times 10^8$ C/g ค่านี้คงที่เสมอไม่ว่าเปลี่ยนชนิดแก๊สหรือโลหะขั้ว → อิเล็กตรอนเป็นองค์ประกอบของอะตอมทุกชนิด
- **รังสีแคแนล (รังสีบวก)** — ในหลอดเดียวกัน มีอนุภาคประจุบวกวิ่งสวนทางผ่านรูของขั้วแคโทด เกิดจากแก๊สที่ถูกชนจนเสียอิเล็กตรอน จุดต่างสำคัญ: ค่า q/m ของรังสีแคแนล **เปลี่ยนตามชนิดแก๊ส** (เพราะมวลไอออนแต่ละธาตุไม่เท่ากัน) ต่างจากรังสีแคโทดที่ค่าคงที่ — การศึกษาแนวนี้นำไปสู่การค้นพบโปรตอน
- **การทดลองหยดน้ำมัน (มิลลิแกน)** — วัด**ประจุของอิเล็กตรอน 1 ตัว**ได้โดยตรง $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C เมื่อจับคู่กับ e/m ของทอมสัน จึงคำนวณมวลอิเล็กตรอนได้

ตัวอย่างโจทย์ 2.0 จาก $e/m = 1.76 \times 10^8$ C/g และ $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C จงหามวลอิเล็กตรอน 1 ตัว

วิธีทำ มวล = ประจุ ÷ (ประจุต่อมวล):

$$m = \frac{e}{e/m} = \frac{1.6 \times 10^{-19}}{1.76 \times 10^8} \approx 9.09 \times 10^{-28} \text{ g}$$

ตอบ $\approx 9.09 \times 10^{-28}$ g (คือ 9.09×10^{-31} kg — เบากว่าโปรตอนราว 1836 เท่า สอดคล้องตาราง)

สัญลักษณ์นิวเคลียร์เขียนเป็น ${}^{A}_{Z}X$ โดย

$$A = Z + N$$

- **เลขอะตอม** Z = จำนวนโปรตอน — เป็น "บัตรประชาชน" ของธาตุ ธาตุเดียวกันต้อง Z เท่ากันเสมอ
- **เลขมวล** A = โปรตอน + นิวตรอน (เป็นจำนวนนับของอนุภาคในนิวเคลียส **ไม่ใช่** มวลอะตอมจริงที่มีทศนิยม)
- อะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า: จำนวน $e^- = Z$

ตัวอย่างโจทย์ 2.1 จงหาจำนวนโปรตอน นิวตรอน และอิเล็กตรอนของ $^{40}_{20}\mathrm{Ca}$

วิธีทำ

1. เลขล่างคือ $Z = 20 \rightarrow$ โปรตอน $= 20$
2. นิวตรอน $N = A - Z = 40 - 20 = 20$
3. อะตอมเป็นกลาง → อิเล็กตรอน $= Z = 20$

ตอบ $p = 20,\ n = 20,\ e^- = 20$

✏️ ฝึกทันที 7 ข้อ (ง่าย→ยาก)

ข้อ 4 ★★☆☆☆ แนว BMAT

ไอออน Al^{3+} (เลขอะตอมของ Al = 13) กับอะตอมนีออน (Ne, เลขอะตอม 10) มีสมบัติใดต่อไปนี้เหมือนกัน

ก. จำนวนอิเล็กตรอนเท่ากัน
ข. จำนวนโปรตอนเท่ากัน
ค. เลขมวลเท่ากัน
ง. จำนวนนิวตรอนเท่ากัน

ข้อ 5 ★★★☆☆

พิจารณาข้อความเกี่ยวกับการทดลองหลอดรังสีแคโทดของทอมสันต่อไปนี้ (ก) เมื่อวางสนามไฟฟ้าคร่อมลำรังสี รังสีแคโทดเบี่ยงเบนเข้าหาขั้วไฟฟ้าบวก แสดงว่าอนุภาคในรังสีมีประจุลบ (ข) ค่าประจุต่อมวล (e/m) ที่วัดได้มีค่าเท่าเดิม ไม่ว่าจะเปลี่ยนชนิดของแก๊สในหลอดหรือโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทด แสดงว่าอนุภาคนี้เป็นองค์ประกอบของอะตอมทุกชนิด (ค) การทดลองนี้ทำให้ทอมสันหาค่าประจุของอิเล็กตรอน 1 อนุภาคได้โดยตรง ข้อความชุดใดถูกต้อง

ก. (ก) เท่านั้น
ข. (ก) และ (ข)
ค. (ข) และ (ค)
ง. (ก) (ข) และ (ค)

ข้อ 6 ★★★☆☆

ก่อนการทดลองยิงอนุภาคแอลฟาผ่านแผ่นทองคำบาง รัทเทอร์ฟอร์ดเชื่อตามแบบจำลองอะตอมของทอมสันที่ว่าประจุบวกกระจายเจือจางสม่ำเสมอทั่วทั้งอะตอม ถ้าแบบจำลองของทอมสันถูกต้องจริง ผลการทดลองที่ควรสังเกตได้คือข้อใด

ก. อนุภาคแอลฟาส่วนใหญ่สะท้อนกลับ เพราะเนื้ออะตอมที่มีประจุบวกเต็มทั้งก้อนจะผลักอนุภาคแอลฟาอย่างแรง
ข. อนุภาคแอลฟาเกือบทั้งหมดทะลุผ่านเป็นเส้นตรงหรือเบี่ยงเบนเพียงมุมเล็กน้อย ไม่มีอนุภาคใดสะท้อนกลับ
ค. อนุภาคแอลฟาทั้งหมดถูกดูดกลืนไว้ในแผ่นทองคำ เพราะประจุบวกของอะตอมดูดอนุภาคแอลฟา
ง. อนุภาคแอลฟาจำนวนน้อยมากเบี่ยงเบนเป็นมุมกว้างหรือสะท้อนกลับ เหมือนผลการทดลองจริงทุกประการ

ข้อ 7 ★★★★☆

นักเรียนคนหนึ่งทำการทดลองแบบหยดน้ำมันของมิลลิแกน วัดประจุไฟฟ้าของหยดน้ำมัน 4 หยด ได้ค่าดังนี้ 3.2×10^{-19}, 4.8×10^{-19}, 8.0×10^{-19} และ 1.28×10^{-18} คูลอมบ์ จากข้อมูลชุดนี้ ประจุของอิเล็กตรอน 1 อนุภาคควรมีค่าเท่าใด และหยดที่มีประจุ 8.0×10^{-19} C มีอิเล็กตรอนเกินอยู่กี่ตัว

ก. 1.6×10^{-19} C และ 4 ตัว
ข. 3.2×10^{-19} C และ 2 ตัว
ค. 1.6×10^{-19} C และ 5 ตัว
ง. 8.0×10^{-20} C และ 10 ตัว

ข้อ 8 ★★★★☆

จากการทดลองของทอมสันทราบว่าอิเล็กตรอนมีอัตราส่วนประจุต่อมวล $e/m = 1.76 \times 10^{8}$ คูลอมบ์ต่อกรัม และจากการทดลองหยดน้ำมันของมิลลิแกนทราบว่าประจุของอิเล็กตรอน 1 อนุภาคเท่ากับ 1.6×10^{-19} คูลอมบ์ กำหนด $N_A = 6.02 \times 10^{23}\ \mathrm{mol}^{-1}$ มวลของอิเล็กตรอน 1 อนุภาค และมวลของอิเล็กตรอน 1 โมล มีค่าใกล้เคียงข้อใดมากที่สุด

ก. 9.09×10^{-31} g และ 5.47×10^{-7} g
ข. 9.09×10^{-28} g และ 5.47×10^{-1} g
ค. 2.82×10^{-11} g และ 1.70×10^{13} g
ง. 9.09×10^{-28} g และ 5.47×10^{-4} g

ข้อ 9 ★★★★☆

จากการทดลองหลอดรังสีแคโทดของทอมสัน พบว่าอิเล็กตรอนมีอัตราส่วนประจุต่อมวล $e/m = 1.76 \times 10^{8}$ คูลอมบ์ต่อกรัม ต่อมาเมื่อวิเคราะห์รังสีแคแนลของหลอดที่บรรจุแก๊สไฮโดรเจน พบว่าอนุภาคบวกที่ได้ (โปรตอน) มีอัตราส่วนประจุต่อมวลเท่ากับ 9.58×10^{4} คูลอมบ์ต่อกรัม ถ้าประจุของโปรตอนมีขนาดเท่ากับประจุของอิเล็กตรอนพอดี มวลของโปรตอนเป็นกี่เท่าของมวลอิเล็กตรอน

ก. 5.4×10^{-4} เท่า
ข. ประมาณ 1.8×10^{3} เท่า
ค. ประมาณ 9.2×10^{2} เท่า
ง. ประมาณ 3.7×10^{3} เท่า

ข้อ 10 ★★★★★

ในการทดลองทำนองเดียวกับการวิเคราะห์รังสีบวก (รังสีแคแนล) แบบเดียวกับการทดลองของทอมสัน อนุภาคที่มีประจุจะเบี่ยงเบนในสนามไฟฟ้าได้มากหรือน้อยขึ้นกับอัตราส่วนประจุต่อมวล (q/m) ของอนุภาคนั้น กำหนดให้ใช้มวลโดยประมาณเท่ากับเลขมวล (หน่วย u) และประจุเป็นจำนวนเท่าของประจุมูลฐาน ไอออนคู่ใดต่อไปนี้มีค่า q/m เท่ากัน จึงเบี่ยงเบนในสนามไฟฟ้าเดียวกันได้เท่ากัน

ก. $^{1}\mathrm{H}^{+}$ กับ $^{2}\mathrm{H}^{+}$
ข. $^{2}\mathrm{H}^{+}$ กับ $^{4}\mathrm{He}^{2+}$
ค. $^{3}\mathrm{H}^{+}$ กับ $^{4}\mathrm{He}^{2+}$
ง. $^{1}\mathrm{H}^{+}$ กับ $^{4}\mathrm{He}^{2+}$

3 ไอโซโทป ไอออน และสัญลักษณ์นิวเคลียร์

3. ไอโซโทป ไอโซโทน ไอโซบาร์ และไอออน

สามคำนี้หน้าตาคล้ายจนเด็กสับสนทุกปี ให้จำจากตัวอักษรท้ายของชื่อ:

คำ	สิ่งที่เท่ากัน	สิ่งที่ต่างกัน	ตัวช่วยจำ	ตัวอย่าง
ไอโซ**โทป** (isotope)	Z (โปรตอน) — ธาตุเดียวกัน	A และ N	p = **p**roton เท่ากัน	$^{35}\mathrm{Cl}$ กับ $^{37}\mathrm{Cl}$
ไอโซ**โทน** (isotone)	N (นิวตรอน)	Z และ A	n = **n**eutron เท่ากัน	$^{39}_{19}\mathrm{K}$ กับ $^{40}_{20}\mathrm{Ca}$ (นิวตรอน 20 เท่ากัน)
ไอโซ**บาร์** (isobar)	A (เลขมวล)	Z และ N	a = **a**ss number เท่ากัน	$^{40}\mathrm{Ar}$ กับ $^{40}\mathrm{Ca}$

ไอออน เกิดจากอะตอมรับหรือเสียอิเล็กตรอน — **นิวเคลียสไม่เปลี่ยนเลย** (Z, N เท่าเดิม) เปลี่ยนเฉพาะจำนวน e^-:

- ไอออนบวก (แคตไอออน) ประจุ $+m$ → เสียอิเล็กตรอน: $e^- = Z - m$
- ไอออนลบ (แอนไอออน) ประจุ $-m$ → รับอิเล็กตรอน: $e^- = Z + m$

ตัวอย่างโจทย์ 3.1 จงนับ p, n, e ของ $^{40}_{20}\mathrm{Ca}^{2+}$ และ $^{32}_{16}\mathrm{S}^{2-}$ แล้วบอกว่าไอออนทั้งสองมีอิเล็กตรอนเท่ากับแก๊สเฉื่อยตัวใด

วิธีทำ

1. $^{40}_{20}\mathrm{Ca}^{2+}$: โปรตอน $= 20$, นิวตรอน $= 40 - 20 = 20$, ประจุ $2+$ แปลว่าเสียอิเล็กตรอนไป 2 ตัว → $e^- = 20 - 2 = 18$
2. $^{32}_{16}\mathrm{S}^{2-}$: โปรตอน $= 16$, นิวตรอน $= 32 - 16 = 16$, ประจุ $2-$ แปลว่ารับอิเล็กตรอนมา 2 ตัว → $e^- = 16 + 2 = 18$
3. ทั้งคู่มีอิเล็กตรอน 18 ตัว เท่ากับอาร์กอน (Ar, $Z = 18$) — เรียกว่าเป็น **ไอโซอิเล็กทรอนิก** (isoelectronic) กัน

ตอบ Ca^{2+}: $p = 20, n = 20, e = 18$; S^{2-}: $p = 16, n = 16, e = 18$; ทั้งคู่ไอโซอิเล็กทรอนิกกับ Ar

มวลอะตอมเฉลี่ยจากไอโซโทป

มวลอะตอมในตารางธาตุคือ **ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก** ตามปริมาณที่พบในธรรมชาติ:

$$\bar{m} = \sum(\text{mass} \times \text{fraction})$$

ตัวอย่างโจทย์ 3.2 โบรอนในธรรมชาติมี 2 ไอโซโทป: $^{10}\mathrm{B}$ (มวล 10.0 amu, ปริมาณ 19.9%) และ $^{11}\mathrm{B}$ (มวล 11.0 amu, ปริมาณ 80.1%) จงหามวลอะตอมเฉลี่ย

วิธีทำ

1. เปลี่ยนเปอร์เซ็นต์เป็นเศษส่วน: 0.199 และ 0.801
2. ถ่วงน้ำหนัก:

$$\bar{m} = (10.0)(0.199) + (11.0)(0.801) = 1.99 + 8.811 = 10.801 \approx 10.8 \text{ amu}$$

ตอบ มวลอะตอมเฉลี่ยของโบรอน ≈ 10.8 amu (สังเกตว่าค่าเอียงเข้าหา 11 เพราะ $^{11}\mathrm{B}$ มีสัดส่วนมากกว่า — ใช้เช็กคำตอบแบบเร็วได้เสมอ)

ตัวอย่างโจทย์ 3.3 (โจทย์ย้อนกลับ — แนวโปรดของข้อสอบ) ทองแดงมี 2 ไอโซโทปคือ $^{63}\mathrm{Cu}$ (มวล 63.0) และ $^{65}\mathrm{Cu}$ (มวล 65.0) ถ้ามวลอะตอมเฉลี่ยคือ 63.55 จงหาร้อยละของ $^{63}\mathrm{Cu}$ ในธรรมชาติ

วิธีทำ

1. ให้เศษส่วนของ $^{63}\mathrm{Cu}$ เป็น x ดังนั้นเศษส่วนของ $^{65}\mathrm{Cu}$ คือ $1 - x$
2. ตั้งสมการเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก:

$$63.0x + 65.0(1 - x) = 63.55$$

3. กระจายและจัดรูป:

$$65.0 - 2.0x = 63.55 \quad \Rightarrow \quad x = \frac{65.0 - 63.55}{2.0} = 0.725$$

ตอบ $^{63}\mathrm{Cu}$ มีอยู่ร้อยละ 72.5 (และ $^{65}\mathrm{Cu}$ ร้อยละ 27.5 — บวกกันได้ 100 พอดี เช็กแล้วสบายใจ)

✏️ ฝึกทันที 11 ข้อ (ง่าย→ยาก)

ข้อ 11 ★☆☆☆☆

อะตอมฟอสฟอรัส $^{31}_{15}\mathrm{P}$ มีจำนวนนิวตรอนกี่ตัว

ก. 16 ตัว
ข. 15 ตัว
ค. 31 ตัว
ง. 46 ตัว

ข้อ 12 ★★☆☆☆

ไอออนโบรไมด์ $^{79}_{35}\mathrm{Br}^-$ มีจำนวนโปรตอน นิวตรอน และอิเล็กตรอน ตามลำดับ ตรงกับข้อใด

ก. 35, 44, 36
ข. 35, 44, 34
ค. 35, 79, 36
ง. 36, 43, 36

ข้อ 13 ★★☆☆☆

ไอออน X^{2-} มีจำนวนอิเล็กตรอน 18 ตัว และมีเลขมวลเท่ากับ 32 จำนวนนิวตรอนในนิวเคลียสของธาตุ X เท่ากับข้อใด

ก. 12
ข. 16
ค. 14
ง. 18

ข้อ 14 ★★☆☆☆

ข้อใดเป็นคู่ไอโซโทน (isotone) ซึ่งกันและกัน

ก. ${}^{14}_{6}C$ กับ ${}^{14}_{7}N$
ข. ${}^{16}_{8}O$ กับ ${}^{18}_{8}O$
ค. ${}^{1}_{1}H$ กับ ${}^{2}_{1}H$
ง. ${}^{39}_{19}K$ กับ ${}^{40}_{20}Ca$

ข้อ 15 ★★★☆☆

ไอออนไอโอไดด์ ${}^{127}_{53}I^{-}$ มีจำนวนอนุภาคมูลฐาน (โปรตอน นิวตรอน และอิเล็กตรอน) รวมทั้งหมดกี่อนุภาค

ก. 127 อนุภาค
ข. 180 อนุภาค
ค. 181 อนุภาค
ง. 182 อนุภาค

ข้อ 16 ★★★☆☆

ไอออน X^{3+} มีจำนวนอิเล็กตรอนเท่ากับอะตอมนีออน (เลขอะตอมของ Ne = 10) และนิวเคลียสของ X มีจำนวนนิวตรอนมากกว่าจำนวนโปรตอนอยู่ 1 ตัว สัญลักษณ์นิวเคลียร์ของธาตุ X คือข้อใด

ก. ${}^{21}_{10}X$
ข. ${}^{26}_{13}X$
ค. ${}^{23}_{11}X$
ง. ${}^{27}_{13}X$

ข้อ 17 ★★★★☆

ไอออน X^{2+} มีจำนวนอิเล็กตรอน 18 ตัว และนิวไคลด์ของธาตุ X เป็นไอโซโทน (จำนวนนิวตรอนเท่ากัน) กับนิวไคลด์ ${}^{45}_{21}Sc$ เลขมวลของนิวไคลด์ X นี้เท่ากับข้อใด

ก. 45
ข. 42
ค. 38
ง. 44

ข้อ 18 ★★★★☆ แนว A-level

ในกระบวนการฟอกเลือดด้วยเครื่องไตเทียม (hemodialysis) น้ำยาฟอกเลือดต้องควบคุมความเข้มข้นของไอออนอิเล็กโทรไลต์ให้ใกล้เคียงพลาสมาในเลือด โดยมีทั้งไอออนโพแทสเซียม (K^{+}) และไอออนคลอไรด์ (Cl^{-}) เป็นองค์ประกอบหลัก กำหนดให้ไอออน K^{+} ชนิดหนึ่งในน้ำยานี้มีจำนวนนิวตรอนในนิวเคลียส 20 ตัว และไอออน Cl^{-} ที่อยู่ร่วมกันมีจำนวนอิเล็กตรอนเท่ากับไอออน K^{+} นั้นพอดี ถ้าไอออนคลอไรด์นี้เป็นไอโซโทปของคลอรีนที่พบมากที่สุดในธรรมชาติ (เลขมวล 35) ผลรวมของจำนวนนิวตรอนในไอออน K^{+} และ Cl^{-} เท่ากับข้อใด (กำหนดเลขอะตอม K = 19, Cl = 17)

ก. 36
ข. 37
ค. 38
ง. 39

ข้อ 19 ★★★★☆

กำหนดเลขอะตอม N = 7, O = 8, F = 9, Na = 11, Mg = 12, S = 16, Cl = 17, K = 19, Ca = 20 อนุภาคทุกตัวในข้อใดมีจำนวนอิเล็กตรอนเท่ากันทั้งหมด (isoelectronic)

ก. O^{2-}, F^{-}, Na^{+}, Mg^{2+}
ข. S^{2-}, Cl^{-}, K^{+}, Mg^{2+}
ค. Na^{+}, Mg^{2+}, Cl^{-}, K^{+}
ง. N^{3-}, O^{2-}, Na^{+}, Ca^{2+}

ข้อ 20 ★★★★★

ธาตุ A และธาตุ B รวมตัวกันเป็นสารประกอบไอออนิกสูตร A_2B_3 ประกอบด้วยไอออน A^{3+} และ B^{2-} โดยมีข้อมูลดังนี้ (1) ไอออน A^{3+} มีอิเล็กตรอน 28 ตัว และนิวไคลด์ของ A มีจำนวนนิวตรอนมากกว่าจำนวนโปรตอนอยู่ 7 ตัว (2) ไอออน B^{2-} มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนเหมือนแก๊สมีสกุลคริปทอน (เลขอะตอมของ Kr = 36) และนิวไคลด์ของ B มีจำนวนนิวตรอนมากกว่านิวไคลด์ของ A อยู่ 8 ตัว ผลรวมของเลขมวลของทุกอะตอมใน 1 หน่วยสูตรของ A_2B_3 เท่ากับข้อใด

ก. 354
ข. 372
ค. 378
ง. 390

ข้อ 21 ★★★★★

ไอออน X^{2+} และไอออน Y^{-} มีจำนวนอิเล็กตรอนเท่ากับ 18 ตัวเท่ากัน ถ้าธาตุ X มีเลขมวล 40 และนิวไคลด์ของ X กับนิวไคลด์ของ Y เป็นไอโซโทนกัน (จำนวนนิวตรอนเท่ากัน) เลขมวลของนิวไคลด์ Y เท่ากับข้อใด

ก. 35
ข. 38
ค. 37
ง. 40

4 มวลอะตอมเฉลี่ยจากไอโซโทป

ช่วงฝึกต่อเนื่องจากเนื้อหา "มวลอะตอมเฉลี่ยจากไอโซโทป" ในช่วงที่แล้ว

✏️ ฝึกทันที 9 ข้อ (ง่าย→ยาก)

ข้อ 22 ★☆☆☆☆

โบรอนในธรรมชาติประกอบด้วยไอโซโทป 2 ชนิด คือ ^{10}B (มวล 10.0 u) ร้อยละ 20 และ ^{11}B (มวล 11.0 u) ร้อยละ 80 มวลอะตอมเฉลี่ยของโบรอนเท่ากับข้อใด

ก. 10.5 u
ข. 10.2 u
ค. 10.8 u
ง. 21.0 u

ข้อ 23 ★★☆☆☆

ลิเทียมในธรรมชาติประกอบด้วยไอโซโทป 2 ชนิด คือ ^{6}Li (มวล 6.00 u) และ ^{7}Li (มวล 7.00 u) ถ้ามวลอะตอมเฉลี่ยของลิเทียมเท่ากับ 6.94 u ร้อยละความอุดมสมบูรณ์ของ ^{7}Li เท่ากับข้อใด

ก. ร้อยละ 6
ข. ร้อยละ 94
ค. ร้อยละ 50
ง. ร้อยละ 69.4

ข้อ 24 ★★☆☆☆

คลอรีนในธรรมชาติมีไอโซโทป ^{35}Cl (มวล 35.0 u) และ ^{37}Cl (มวล 37.0 u) ถ้า ^{35}Cl มีความอุดมสมบูรณ์ร้อยละ 75.0 มวลอะตอมเฉลี่ยของคลอรีนเท่ากับข้อใด

ก. 36.0 u
ข. 35.5 u
ค. 36.5 u
ง. 35.2 u

ข้อ 25 ★★★☆☆

ซิลิคอนในธรรมชาติประกอบด้วยไอโซโทป 3 ชนิด คือ ^{28}Si (มวล 28.0 u) ร้อยละ 92, ^{29}Si (มวล 29.0 u) ร้อยละ 5 และ ^{30}Si (มวล 30.0 u) ร้อยละ 3 มวลอะตอมเฉลี่ยของซิลิคอนเท่ากับข้อใด

ก. 28.11 u
ข. 29.00 u
ค. 29.89 u
ง. 28.00 u

ข้อ 26 ★★★☆☆

แกลเลียม (Ga) ในธรรมชาติมีไอโซโทป 2 ชนิด คือ ^{69}Ga (มวล 68.93 u) และ ^{71}Ga (มวล 70.92 u) ถ้ามวลอะตอมเฉลี่ยของแกลเลียมเท่ากับ 69.72 u ร้อยละความอุดมสมบูรณ์ของ ^{69}Ga มีค่าใกล้เคียงข้อใดมากที่สุด

ก. ร้อยละ 60.3
ข. ร้อยละ 39.7
ค. ร้อยละ 50.0
ง. ร้อยละ 69.7

ข้อ 27 ★★★★☆

คลอรีนในธรรมชาติมีไอโซโทป $^{35}\mathrm{Cl}$ ร้อยละ 75 และ $^{37}\mathrm{Cl}$ ร้อยละ 25 ถ้าอะตอมคลอรีนรวมตัวกันเป็นโมเลกุล $\mathrm{Cl_2}$ แบบสุ่มตามสัดส่วนในธรรมชาติ โมเลกุล $\mathrm{Cl_2}$ ที่มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 70 u (ใช้มวลไอโซโทป 35.0 และ 37.0 u) จะมีอยู่ร้อยละเท่าใดของโมเลกุลทั้งหมด

ก. ร้อยละ 37.5

ข. ร้อยละ 75

ค. ร้อยละ 56.25

ง. ร้อยละ 6.25

ข้อ 28 ★★★★☆

เงิน (Ag) ในธรรมชาติมีไอโซโทป 2 ชนิด คือ $^{107}\mathrm{Ag}$ (มวล 107.0 u) และ $^{109}\mathrm{Ag}$ (มวล 109.0 u) ถ้าอัตราส่วนจำนวนอะตอม $^{107}\mathrm{Ag} : {}^{109}\mathrm{Ag} = 13 : 12$ มวลอะตอมเฉลี่ยของเงินเท่ากับข้อใด

ก. 108.00 u

ข. 108.04 u

ค. 107.52 u

ง. 107.96 u

ข้อ 29 ★★★★★

โบรอนธรรมชาติประกอบด้วยไอโซโทป $^{10}\mathrm{B}$ (มวล 10.0 u) และ $^{11}\mathrm{B}$ (มวล 11.0 u) มีมวลอะตอมเฉลี่ย 10.8 u ในงานนิวเคลียร์ต้องการโบรอนเสริมสมรรถนะที่มีมวลอะตอมเฉลี่ย 10.2 u โดยนำโบรอนธรรมชาติมาผสมกับ $^{10}\mathrm{B}$ บริสุทธิ์ จะต้องผสมโบรอนธรรมชาติต่อ $^{10}\mathrm{B}$ บริสุทธิ์ ด้วยอัตราส่วนจำนวนอะตอมเท่าใด

ก. 1 : 3

ข. 3 : 1

ค. 1 : 4

ง. 3 : 4

ข้อ 30 ★★★★★

แมกนีเซียมในธรรมชาติมีไอโซโทป 3 ชนิด คือ $^{24}\mathrm{Mg}$ (มวล 24.0 u), $^{25}\mathrm{Mg}$ (มวล 25.0 u) และ $^{26}\mathrm{Mg}$ (มวล 26.0 u) ถ้า $^{24}\mathrm{Mg}$ มีความอุดมสมบูรณ์ร้อยละ 79.0 และมวลอะตอมเฉลี่ยของแมกนีเซียมเท่ากับ 24.31 u ร้อยละความอุดมสมบูรณ์ของ $^{26}\mathrm{Mg}$ เท่ากับข้อใด

ก. ร้อยละ 11.0

ข. ร้อยละ 10.0

ค. ร้อยละ 21.0

ง. ร้อยละ 5.0

5 สเปกตรัมและแบบจำลองโบร์

4. สเปกตรัมเส้นของไฮโดรเจนและระดับพลังงาน

ก่อนเข้าเรื่องสเปกตรัม ต้องรู้จักคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก่อน — แสงคือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง มีความสัมพันธ์พื้นฐาน:

$$c = \lambda\nu \qquad (c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s})$$

ความยาวคลื่น (λ) กับความถี่ (ν) แปรผกผันกัน และพลังงานโฟตอน $E = h\nu$ จึงสรุปเป็นโซ่เดียว: λ **ยิ่งสั้น** → ν **ยิ่งสูง** → E **ยิ่งมาก** ลำดับพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ต้องจำ (มาก → น้อย):

$$\text{gamma} > \text{X-ray} > \text{UV} > \text{visible} > \text{IR} > \text{microwave} > \text{radio}$$

โดยช่วงตามองเห็นคือ ~400–700 nm (ม่วง 400 nm พลังงานสูงกว่าแดง 700 nm — สอดคล้องเส้นสเปกตรัม H ที่ม่วง 410 nm มาจากการตกจากชั้นสูงกว่าแดง 656 nm)

ทำไมแก๊สไฮโดรเจนร้อนๆ ถึงเปล่งแสงเป็น "เส้นๆ" เฉพาะบางสี ไม่ใช่รุ้งต่อเนื่อง? เพราะอิเล็กตรอนอยู่ได้เฉพาะระดับพลังงานบางค่า เวลาตกจากชั้นสูงลงชั้นต่ำ มันคายพลังงานออกมาเป็นโฟตอนที่มีพลังงาน "เท่ากับผลต่างของสองระดับพอดี" — พลังงานถูกล็อกค่า สีของแสงจึงถูกล็อกตาม นี่คือหลักฐานชิ้นเอกของแบบจำลองโบร์

ข้อสังเกตสำคัญ: ปรากฏการณ์นี้ไม่ได้มีแค่ไฮโดรเจน — **ธาตุทุกชนิดให้สเปกตรัมเส้นเฉพาะตัวไม่ซ้ำใคร** เหมือนลายนิ้วมือ จึงใช้ระบุชนิดธาตุได้ (ต่างจากของแข็งร้อน เช่น ไส้หลอดไฟ ที่เปล่งสเปกตรัมต่อเนื่องเป็นรุ้งเต็มแถบ)

แก๊ส H ถูกกระตุ้นแล้วคายแสงเป็น "เส้น" เฉพาะค่า ไม่ต่อเนื่อง → หลักฐานว่าระดับพลังงานเป็นขั้น (quantized)
4 เส้นที่ตามองเห็น = อนุกรมบัลเมอร์ (อิเล็กตรอนตกลงมาที่ n = 2)

ระดับพลังงานของอะตอมไฮโดรเจน:

$$E_n = -\frac{R_H}{n^2} = -\frac{2.18 \times 10^{-18}}{n^2} \text{ J}$$

- เครื่องหมายลบแปลว่าอิเล็กตรอน **ถูกนิวเคลียสยึดไว้** ($E = 0$ คือหลุดเป็นอิสระที่ $n = \infty$)
- ยิ่ง n มาก พลังงานยิ่งสูงขึ้น (ติดลบน้อยลง) และระดับพลังงานยิ่ง **ถี่ชิดกันขึ้น**

ขยายไปไอออนที่คล้ายไฮโดรเจน (hydrogen-like ion) — สูตรโบร์ใช้ได้กับทุกระบบที่มี**อิเล็กตรอนตัวเดียว** เช่น He^+, Li^{2+} โดยเพิ่มตัวคูณ Z^2:

$$E_n = -R_H \frac{Z^2}{n^2}$$

ผลที่ตามมา: การเปลี่ยนระดับคู่เดียวกัน ไอออนที่ Z สูงกว่าจะคาย/ดูดพลังงาน**มากกว่าเป็น Z^2 เท่า** เช่น He^+ ($Z = 2$) ตกจาก $n = 2$ ลง $n = 1$ คายพลังงาน 4 เท่าของไฮโดรเจน → ความยาวคลื่นจึงสั้นลง 4 เท่า ($121.6/4 \approx 30.4$ nm)

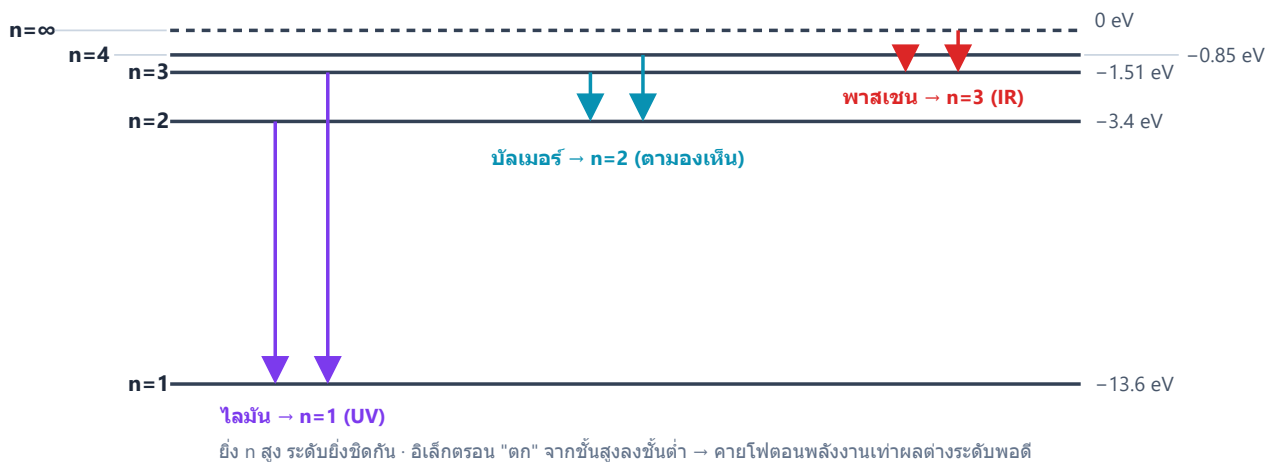
พลังงานโฟตอนที่คาย/ดูด สัมพันธ์กับความถี่และความยาวคลื่น:

$$\Delta E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

โดย $h = 6.626 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$ และ $c = 3.00 \times 10^{8}\ \mathrm{m/s}$

อนุกรมสเปกตรัมที่ต้องรู้ (จำจากชั้นปลายทางที่อิเล็กตรอนตกลงมา):

อนุกรม	ตกลงสู่ n_1	ช่วงคลื่น
Lyman	1	อัลตราไวโอเลต (UV)
Balmer	2	**แสงที่ตามองเห็น**
Paschen	3	อินฟราเรด (IR)



การนับจำนวนเส้นสเปกตรัม — ถ้ากระตุ้นอิเล็กตรอนขึ้นไปถึงชั้น n แล้วปล่อยให้ตกลงมาทุกเส้นทางที่เป็นไปได้ จำนวนเส้นสเปกตรัมทั้งหมดคือจำนวนคู่ของระดับพลังงาน:

$$\text{lines} = \frac{n(n-1)}{2}$$

เช่น กระตุ้นถึง $n = 4$ ได้ $\frac{4\times3}{2} = 6$ เส้น (คือ 4→3, 4→2, 4→1, 3→2, 3→1, 2→1) · ถ้าถามเจาะจงอนุกรม ให้นับเฉพาะเส้นที่ตกสู่ชั้นปลายทางของอนุกรมนั้น เช่น ถึง $n = 4$ อนุกรมบัลเมอร์ (ตกสู่ $n = 2$) มี 2 เส้นคือ 4→2 กับ 3→2

ตัวอย่างโจทย์ 4.1 อิเล็กตรอนของอะตอมไฮโดรเจนตกจาก $n = 3$ ลงมา $n = 2$ จงหาพลังงานที่คายออกมา และความยาวคลื่นของแสง (ตอบเป็น nm) พร้อมระบุอนุกรม

วิธีทำ

1. หาพลังงานแต่ละระดับ:

$$E_3 = -\frac{2.18 \times 10^{-18}}{3^2} = -2.42 \times 10^{-19}\ \mathrm{J}, \qquad E_2 = -\frac{2.18 \times 10^{-18}}{2^2} = -5.45 \times 10^{-19}\ \mathrm{J}$$

2. พลังงานที่คายคือขนาดของผลต่าง (คิดตรงๆ จากสูตรรวบก็ได้):

$$\Delta E = 2.18 \times 10^{-18}\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}\right) = 2.18 \times 10^{-18} \times \frac{5}{36} = 3.03 \times 10^{-19}\ \mathrm{J}$$

3. แปลงเป็นความยาวคลื่นด้วย $\lambda = hc/\Delta E$ — ดูการตัดหน่วยให้ดี:

$$\lambda = \frac{(6.626 \times 10^{-34}\ \cancel{\mathrm{J}}\cdot\cancel{\mathrm{s}}) \times (3.00 \times 10^{8}\ \mathrm{m}/\cancel{\mathrm{s}})}{3.03 \times 10^{-19}\ \cancel{\mathrm{J}}} = 6.56 \times 10^{-7}\ \mathrm{m}$$

4. แปลงหน่วย: $6.56 \times 10^{-7}\ \cancel{\mathrm{m}} \times \dfrac{10^9\ \mathrm{nm}}{1\ \cancel{\mathrm{m}}} = 656\ \mathrm{nm}$ — อยู่ในช่วงตามองเห็น (แสงสีแดง)

ตอบ คายพลังงาน 3.03×10^{-19} J, $\lambda \approx 656$ nm, เป็นเส้นในอนุกรม **Balmer** (ตกลงสู่ $n = 2$)

ตัวอย่างโจทย์ 4.2 ใช้สูตรริดเบิร์ก $\dfrac{1}{\lambda} = R\left(\dfrac{1}{n_1^2} - \dfrac{1}{n_2^2}\right)$ โดย $R = 1.097 \times 10^7\ \mathrm{m}^{-1}$ หาความยาวคลื่นของเส้นแรกในอนุกรม Lyman (ตกจาก $n = 2$ ลง $n = 1$)

วิธีทำ

1. แทนค่า $n_1 = 1, n_2 = 2$:

$$\frac{1}{\lambda} = 1.097 \times 10^7\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2}\right) = 1.097 \times 10^7 \times \frac{3}{4} = 8.23 \times 10^6\ \mathrm{m}^{-1}$$

2. กลับเศษเป็นส่วน:

$$\lambda = \frac{1}{8.23 \times 10^6\ \mathrm{m}^{-1}} = 1.215 \times 10^{-7}\ \mathrm{m} = 121.5\ \mathrm{nm}$$

ตอบ $\lambda \approx 121.5$ nm — สั้นกว่า 400 nm มาก จึงเป็นรังสี UV สมกับที่อนุกรม Lyman อยู่ช่วง UV ทั้งอนุกรม

มุมคิดเร็ว: พลังงานกับความยาวคลื่นสวนทางกัน — ตกจากชั้นไกลๆ ลงชั้นต่ำ = คายพลังงานมาก = คลื่นสั้น ดังนั้นเส้นที่ "คลื่นสั้นที่สุด" ของทุกอนุกรมคือการตกจาก $n = \infty$

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก — หลักฐานว่าแสงเป็น "ก้อนพลังงาน"

แบบจำลองโบร์บอกว่าพลังงานของอิเล็กตรอน**ในอะตอม**ถูกล็อกเป็นค่าเฉพาะ ส่วนปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกคือหลักฐานอีกชิ้นที่บอกว่า**แสงเอง**ก็มาเป็นก้อนพลังงาน (โฟตอน) ไม่ใช่คลื่นต่อเนื่อง

เมื่อฉายแสงลงบนผิวโลหะ อิเล็กตรอนที่ผิวโลหะจะหลุดออกมาได้ก็ต่อเมื่อพลังงานโฟตอนแต่ละตัว ($h\nu$) มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานขั้นต่ำที่ยึดอิเล็กตรอนไว้ เรียกว่า **ฟังก์ชันงาน** (work function, Φ) ซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัวของโลหะแต่ละชนิด:

- **ความถี่ขีดเริ่ม** (threshold frequency, ν_0) คือความถี่ต่ำสุดที่เพิ่งเตะอิเล็กตรอนหลุดได้พอดี (พลังงานจลน์เป็น 0): $\nu_0 = \Phi/h$
- ถ้าความถี่แสงมากกว่า ν_0 พลังงานส่วนเกินจะกลายเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมา:

$$KE_{max} = h\nu - \Phi$$

จุดที่ข้อสอบชอบดัก — ความสว่างกับความถี่ให้ผลต่างกันโดยสิ้นเชิง:

- เพิ่ม**ความสว่าง** (จำนวนโฟตอนต่อวินาทีมากขึ้น) ที่ความถี่เท่าเดิม → ได้อิเล็กตรอนหลุด**จำนวนมากขึ้น** แต่พลังงานจลน์ต่อตัวเท่าเดิม (เพราะพลังงานต่อโฟตอน 1 ตัวไม่เปลี่ยน)
- เพิ่ม**ความถี่** → พลังงานต่อโฟตอนมากขึ้น อิเล็กตรอนที่หลุดจึงมี KE_{max} **มากขึ้น**
- ถ้าความถี่แสงต่ำกว่า ν_0 ต่อให้เพิ่มความสว่างเท่าไรก็ไม่มีอิเล็กตรอนหลุดออกมาเลยสักตัว — ข้อเท็จจริงข้อนี้เองที่ทฤษฎีคลื่นแบบเดิมอธิบายไม่ได้ ต้องใช้แนวคิดโฟตอนของไอน์สไตน์เท่านั้น

หน่วยพลังงานที่นิยมใช้ในระดับอะตอม คือ อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ซึ่งสะดวกกว่าจูลมากเมื่อพลังงานมีขนาดเล็กจิ๋ว: $1\ \text{eV} = 1.602 \times 10^{-19}\ \text{J}$

ตัวอย่างโจทย์ 4.3 โลหะชนิดหนึ่งมีฟังก์ชันงาน $\Phi = 3.20 \times 10^{-19}$ J ฉายแสงความยาวคลื่น 400 nm ลงบนผิวโลหะนี้ จงหาความถี่ขีดเริ่ม และพลังงานจลน์สูงสุดของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมา (ทั้งหน่วยจูลและ eV)

วิธีทำ

1. ความถี่ขีดเริ่ม:

$$\nu_0 = \frac{\Phi}{h} = \frac{3.20 \times 10^{-19}}{6.626 \times 10^{-34}} \approx 4.83 \times 10^{14}\ \text{Hz}$$

2. ความถี่ของแสงที่ฉาย ($\lambda = 400$ nm $= 4.00 \times 10^{-7}$ m):

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.00 \times 10^{8}}{4.00 \times 10^{-7}} = 7.50 \times 10^{14}\ \text{Hz}$$

3. เพราะ $\nu > \nu_0$ จึงเกิดโฟโตอิเล็กทริกได้จริง คำนวณพลังงานจลน์สูงสุด:

$$KE_{max} = h\nu - \Phi = (6.626 \times 10^{-34})(7.50 \times 10^{14}) - 3.20 \times 10^{-19} \approx 1.77 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

4. แปลงเป็น eV:

$$KE_{max} = \frac{1.77 \times 10^{-19}}{1.602 \times 10^{-19}} \approx 1.10\ \text{eV}$$

ตอบ $\nu_0 \approx 4.83 \times 10^{14}$ Hz, $KE_{max} \approx 1.77 \times 10^{-19}$ J ≈ 1.10 eV (Φ นี้เทียบเท่าราว 2.00 eV)

ระวัง: อย่าเผลอเอาความยาวคลื่นของแสงไปเทียบตรง ๆ กับ Φ (หน่วยคนละชนิด) ต้องแปลง Φ กับพลังงานโฟตอนให้อยู่หน่วยเดียวกันก่อนเทียบเสมอ (จูลกับจูล หรือ eV กับ eV)

สมมติฐานเดอบรอยล์ — เมื่ออนุภาคก็มีสมบัติคลื่น

ถ้าแสง (ซึ่งเดิมคิดว่าเป็นคลื่น) มีสมบัติเป็นก้อนอนุภาคได้ เดอบรอยล์เสนอว่ากลับกันก็ต้องจริงเช่นกัน: **อนุภาคทุกชนิดที่เคลื่อนที่มีสมบัติคลื่นกำกับอยู่ด้วย** ความยาวคลื่นนี้คำนวณจากโมเมนตัม:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p}$$

- อนุภาคที่**เบามาก** (เช่นอิเล็กตรอน) มีมวล m เล็กจิ๋ว จึงได้ λ ขนาดใกล้เคียงเส้นผ่านศูนย์กลางอะตอมหรือระยะห่างระหว่างอะตอมในผลึก → สมบัติคลื่นเด่นชัด วัดผลได้จริง
- วัตถุขนาดใหญ่ในชีวิตประจำวัน (ลูกบอล รถยนต์) มีมวลมากกว่าอิเล็กตรอนหลายสิบเลขยกกำลัง แม้เคลื่อนที่เร็ว λ ก็เล็กจนไม่มีทางวัดหรือสังเกตเห็นผลคลื่นได้เลย
- หลักฐานยืนยันจากการทดลองจริง: **การทดลองเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนของเดวิสสัน-เจอร์เมอร์** (Davisson–Germer) ยิงลำอิเล็กตรอนใส่ผลึกนิกเกิล พบแถบการแทรกสอด (interference pattern) แบบเดียวกับที่คลื่นแสงทำกับเกรตติ้ง ยืนยันว่าอิเล็กตรอนมีสมบัติคลื่นจริง

ตัวอย่างโจทย์ 4.4 อิเล็กตรอนตัวหนึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2.0×10^6 m/s จงหาความยาวคลื่นเดอบรอยล์ (กำหนดมวลอิเล็กตรอน $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg) แล้วเทียบกับลูกเบสบอลมวล 0.145 kg ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 40 m/s

วิธีทำ

1. อิเล็กตรอน:

$$\lambda_e = \frac{h}{m_e v} = \frac{6.626 \times 10^{-34}}{(9.11 \times 10^{-31})(2.0 \times 10^6)} \approx 3.64 \times 10^{-10}\ \mathrm{m} = 0.364\ \mathrm{nm}$$

2. ลูกเบสบอล:

$$\lambda_{ball} = \frac{h}{m_{ball} v_{ball}} = \frac{6.626 \times 10^{-34}}{(0.145)(40)} \approx 1.14 \times 10^{-34}\ \mathrm{m}$$

ตอบ $\lambda_e \approx 0.364$ nm (ใกล้เคียงระยะห่างระหว่างอะตอมในผลึก จึงสังเกตการเลี้ยวเบนได้จริง) ส่วน $\lambda_{ball} \approx 1.14 \times 10^{-34}$ m เล็กกว่าขนาดนิวเคลียสหลายล้านล้านเท่า — ไม่มีทางวัดผลคลื่นของลูกเบสบอลได้ในทางปฏิบัติ

ระวัง: สูตรเดอบรอยล์ใช้ได้กับอนุภาคทุกชนิดในหลักการ แต่ "เห็นผลคลื่นจริง" เฉพาะเมื่อ λ มีขนาดใกล้เคียงมิติของสิ่งที่มันปฏิสัมพันธ์ด้วย (เช่น ระยะห่างอะตอมในผลึก) — วัตถุใหญ่จึงดูเหมือน "ไม่มีสมบัติคลื่น" ทั้งที่จริง ๆ มีแต่เล็กเกินจะสังเกต

หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก

หลักการนี้บอกว่า **ไม่มีทางรู้ตำแหน่ง (x) และโมเมนตัม (p, หรือความเร็ว) ของอนุภาคได้แม่นยำพร้อมกันทั้งคู่** ยิ่งวัดตำแหน่งได้แม่นยำมาก (ความไม่แน่นอน Δx เล็ก) ยิ่งไม่แน่นอนเรื่องความเร็ว/โมเมนตัมมาก (ความไม่แน่นอน Δp ใหญ่) และกลับกันก็จริง ความสัมพันธ์เชิงปริมาณคือ:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

นี่ไม่ใช่ข้อจำกัดของเครื่องมือวัด แต่เป็นสมบัติธรรมชาติของสสารระดับควอนตัม — สอดคล้องกับแบบจำลองกลุ่มหมอกที่บอกว่าอิเล็กตรอนไม่มี "วงโคจรแน่นอน" มีเพียงบริเวณที่มีโอกาสพบสูง (ออร์บิทัล) เพราะถ้ารู้ตำแหน่งแน่นอน ความเร็วจะไม่แน่นอนจนกำหนดวงโคจรไม่ได้เลย

ใช้อธิบายว่าทำไมอิเล็กตรอนอยู่ในนิวเคลียสไม่ได้ แต่โปรตอนอยู่ได้ — ถ้าบีบตำแหน่งอนุภาคให้แคบระดับนิวเคลียส ($\Delta x \approx 10^{-15}$ m) ความไม่แน่นอนของความเร็วขั้นต่ำ ($\Delta v = \Delta p/m$) จะแปรผกผันกับมวล อนุภาคเบาอย่างอิเล็กตรอนจึงถูกบีบให้ "ต้องมีความเร็วไม่แน่นอนสูงเกินความเร็วแสง" ซึ่งเป็นไปไม่ได้ทางฟิสิกส์ ส่วนโปรตอนซึ่งหนักกว่าอิเล็กตรอนราว 1836 เท่า ความไม่แน่นอนของความเร็วยังอยู่ในขอบเขตที่เป็นไปได้

ตัวอย่างโจทย์ 4.5 จงประมาณค่าความไม่แน่นอนขั้นต่ำของความเร็ว (Δv_{min}) ถ้าบีบตำแหน่งของ (ก) อิเล็กตรอนไว้ในระยะ $\Delta x = 1 \times 10^{-15}$ m (ขนาดนิวเคลียส) และ (ข) โปรตอนไว้ในระยะเดียวกัน แล้วเทียบทั้งสองค่ากับอัตราเร็วแสง $c = 3.00 \times 10^8$ m/s (กำหนด $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg, $m_p = 1.6726 \times 10^{-27}$ kg)

วิธีทำ

1. หาความไม่แน่นอนของโมเมนตัมขั้นต่ำจากสูตร: $\Delta p_{min} = \dfrac{h}{4\pi\Delta x}$

$$\Delta p_{min} = \frac{6.626 \times 10^{-34}}{4\pi \times 1 \times 10^{-15}} \approx 5.27 \times 10^{-20}\ \mathrm{kg \cdot m/s}$$

2. อิเล็กตรอน: $\Delta v_{min} = \dfrac{\Delta p_{min}}{m_e} = \dfrac{5.27 \times 10^{-20}}{9.11 \times 10^{-31}} \approx 5.79 \times 10^{10}$ m/s

$$\frac{\Delta v_{min}}{c} = \frac{5.79 \times 10^{10}}{3.00 \times 10^8} \approx 193$$

3. โปรตอน: $\Delta v_{min} = \dfrac{\Delta p_{min}}{m_p} = \dfrac{5.27 \times 10^{-20}}{1.6726 \times 10^{-27}} \approx 3.15 \times 10^7$ m/s

$$\frac{\Delta v_{min}}{c} = \frac{3.15 \times 10^7}{3.00 \times 10^8} \approx 0.105$$

ตอบ อิเล็กตรอนต้องมีความไม่แน่นอนของความเร็วสูงกว่าความเร็วแสงถึงราว 193 เท่า ซึ่งเป็นไปไม่ได้ — จึงสรุปได้ว่าอิเล็กตรอนอยู่ในนิวเคลียสไม่ได้ ส่วนโปรตอนต้องการความไม่แน่นอนเพียงราว 10.5% ของความเร็วแสงเท่านั้น ซึ่งเป็นไปได้จริง จึงอยู่ในนิวเคลียสได้

ระวัง: อย่าลืมว่า Δv ที่คำนวณได้เป็นเพียงค่า**ขั้นต่ำ**ตามหลักความไม่แน่นอน (ใช้เครื่องหมาย $\geq$) ไม่ใช่ค่าความเร็วจริงของอนุภาค — โจทย์แนวนี้เน้นให้เปรียบเทียบขนาดว่าเป็นไปได้ทางฟิสิกส์หรือไม่ ไม่ใช่หาความเร็วที่แท้จริง

✏️ ฝึกทันที 26 ข้อ (ง่าย→ยาก)

ข้อ 31 ★☆☆☆☆

ในสเปกตรัมเปล่งออกของอะตอมไฮโดรเจน อนุกรมบัลเมอร์ซึ่งอยู่ในช่วงแสงที่มองเห็นได้ เกิดจากอิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับสูงตกลงมาสิ้นสุดที่ระดับพลังงานใด

ก. $n = 2$

ข. $n = 1$

ค. $n = 3$

ง. $n = \infty$

ข้อ 32 ★★☆☆☆

โฟตอนของแสงสีม่วงมีความยาวคลื่น 400 nm และโฟตอนของแสงสีส้มมีความยาวคลื่น 600 nm ข้อสรุปใดถูกต้อง

ก. โฟตอนทั้งสองมีพลังงานเท่ากัน เพราะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วแสงเท่ากัน

ข. โฟตอนแสงสีส้มมีพลังงานเป็น 1.5 เท่าของโฟตอนแสงสีม่วง

ค. โฟตอนแสงสีม่วงมีพลังงานเป็น 1.5 เท่าของโฟตอนแสงสีส้ม

ง. โฟตอนแสงสีม่วงมีพลังงานเป็น 2.25 เท่าของโฟตอนแสงสีส้ม

ข้อ 33 ★★☆☆☆

กำหนดพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมไฮโดรเจนที่ระดับพลังงาน n เป็น $E_n = -\dfrac{2.18 \times 10^{-18}}{n^2}$ J พลังงานของอิเล็กตรอนที่ระดับ $n = 2$ มีค่าเท่าใด

ก. -1.09×10^{-18} J

ข. $+5.45 \times 10^{-19}$ J

ค. -5.45×10^{-19} J

ง. -8.72×10^{-18} J

ข้อ 34 ★★☆☆☆

เมื่อฉายแสงที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ขีดเริ่ม (threshold frequency) ของโลหะชนิดหนึ่ง แล้วเพิ่มความสว่างของแสงโดยคงความถี่เดิมไว้ ข้อใดถูกต้องเกี่ยวกับอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากผิวโลหะ

ก. จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมามากขึ้น แต่พลังงานจลน์สูงสุดต่อตัวเท่าเดิม

ข. พลังงานจลน์สูงสุดต่อตัวมากขึ้น แต่จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดเท่าเดิม

ค. ทั้งจำนวนอิเล็กตรอนและพลังงานจลน์สูงสุดต่อตัวมากขึ้นตามสัดส่วนความสว่าง

ง. ไม่มีอิเล็กตรอนหลุดออกมาเพิ่มเลย เพราะความถี่ไม่เปลี่ยน

ข้อ 35 ★★☆☆☆

วัตถุ 4 ชนิดต่อไปนี้เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วใกล้เคียงกัน ข้อใดควรมีความยาวคลื่นเดอบรอยล์ ($\lambda = h/mv$) มากที่สุด และเพราะเหตุใด

ก. อิเล็กตรอน เพราะมีมวลน้อยที่สุด ทำให้ λ มากที่สุด

ข. โปรตอน เพราะมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก

ค. อะตอมฮีเลียม เพราะเป็นแก๊สเฉื่อยที่เสถียร

ง. ลูกกอล์ฟ เพราะเคลื่อนที่แล้วมีพลังงานจลน์มากกว่า

ข้อ 36 ★★☆☆☆

ข้อใดอธิบายหลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์กได้ถูกต้องที่สุด

ก. ยิ่งทราบตำแหน่งของอนุภาคแม่นยำมากเท่าใด ยิ่งทราบโมเมนตัม/ความเร็วของอนุภาคนั้นแม่นยำน้อยลงเท่านั้น เป็นสมบัติธรรมชาติของสสาร ไม่ใช่ข้อจำกัดของเครื่องมือวัด

ข. เป็นเพียงข้อจำกัดของเครื่องมือวัดในปัจจุบัน ในอนาคตเมื่อเครื่องมือแม่นยำขึ้นจะวัดตำแหน่งและความเร็วพร้อมกันได้แม่นยำทั้งคู่

ค. ใช้ได้เฉพาะกับอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเท่านั้น อนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าไม่มีผลนี้

ง. บอกว่าตำแหน่งกับพลังงานของอนุภาคไม่สามารถทราบพร้อมกันได้แม่นยำทั้งคู่

ข้อ 37 ★★★☆☆

พิจารณาข้อความเกี่ยวกับสเปกตรัมของอะตอมไฮโดรเจนตามแบบจำลองของโบร์ต่อไปนี้ (ก) สเปกตรัมเปล่งออกของไฮโดรเจนเป็นเส้นสว่างเฉพาะบางความยาวคลื่น เพราะอิเล็กตรอนมีระดับพลังงานได้เฉพาะบางค่าที่ไม่ต่อเนื่อง (ข) ผลต่างพลังงานระหว่างระดับพลังงานที่ติดกัน เช่น $n = 1$ กับ $n = 2$ และ $n = 2$ กับ $n = 3$ มีค่าเท่ากันทุกคู่ (ค) เส้นสเปกตรัมทุกเส้นในอนุกรมไลมัน (ตกลงสู่ $n = 1$) มีพลังงานสูงกว่าเส้นทุกเส้นในอนุกรมบัลเมอร์ (ตกลงสู่ $n = 2$) ข้อความชุดใดถูกต้อง

ก. (ก) และ (ข)

ข. (ข) และ (ค)

ค. (ก) และ (ค)

ง. (ก) (ข) และ (ค)

ข้อ 38 ★★★☆☆

กำหนดพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมไฮโดรเจน $E_n = -\dfrac{2.18 \times 10^{-18}}{n^2}$ J, $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J s และ $c = 3 \times 10^8$ m/s ถ้าต้องการกระตุ้นอิเล็กตรอนของอะตอมไฮโดรเจนจากสถานะพื้นขึ้นไปยังระดับ $n = 2$ ต้องใช้แสงที่มีความยาวคลื่นประมาณเท่าใด และแสงนี้อยู่ในช่วงใด

ก. 122 nm อยู่ในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลต

ข. 91 nm อยู่ในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลต

ค. 122 nm อยู่ในช่วงแสงที่มองเห็นได้

ง. 182 nm อยู่ในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลต

ข้อ 39 ★★★☆☆

โลหะโพแทสเซียมมีฟังก์ชันงานประมาณ 2.30 eV จงคำนวณความถี่ขีดเริ่ม (threshold frequency) ของโลหะนี้ กำหนด $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s และ $1\ \mathrm{eV} = 1.602 \times 10^{-19}$ J

ก. 2.78×10^14 Hz

ข. 5.56×10^14 Hz

ค. 1.11×10^15 Hz

ง. 4.84×10^14 Hz

ข้อ 40 ★★★☆☆

โลหะชนิดหนึ่งมีฟังก์ชันงาน $\Phi = 4.20 \times 10^{-19}$ J ฉายแสงความยาวคลื่น 350 nm ลงบนผิวโลหะนี้ จงหาพลังงานจลน์สูงสุดของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมา กำหนด $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s, $c = 3.00 \times 10^8$ m/s

ก. 5.68×10⁻19 J

ข. 1.48×10⁻19 J

ค. 4.20×10⁻19 J

ง. 9.88×10⁻19 J

ข้อ 41 ★★★☆☆

อิเล็กตรอนตัวหนึ่งเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 1.0×10^6 m/s จงหาความยาวคลื่นเดอบรอยล์ กำหนด $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s และ $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg

ก. 0.727 nm

ข. 0.364 nm

ค. 3.96×10⁻4 nm

ง. 7.27×10^5 nm

ข้อ 42 ★★★☆☆

อิเล็กตรอนตัวหนึ่งมีความยาวคลื่นเดอบรอยล์เท่ากับ 2.00×10^{-10} m จงหาอัตราเร็วของอิเล็กตรอนตัวนี้ กำหนด $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s และ $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg

ก. 1.82×10^6 m/s

ข. 3.64×10^6 m/s

ค. 7.27×10^6 m/s

ง. 3.64×10^3 m/s

ข้อ 43 ★★★☆☆

อิเล็กตรอนตัวหนึ่งถูกจำกัดอยู่ในระยะ $\Delta x = 5.0 \times 10^{-11}$ m (ขนาดออร์บิทัลอะตอมโดยประมาณ) จงประมาณความไม่แน่นอนขั้นต่ำของความเร็ว (Δv_{min}) กำหนด $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$, $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s, $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg

ก. 1.16×10^6 m/s

ข. 5.79×10^5 m/s

ค. 2.31×10^6 m/s

ง. 1.16×10^5 m/s

ข้อ 44 ★★★☆☆

โปรตอนถูกจำกัดอยู่ในระยะ $\Delta x = 2.0 \times 10^{-15}$ m (ขนาดนิวเคลียส) จงประมาณความไม่แน่นอนขั้นต่ำของความเร็ว (Δv_{min}) แล้วเปรียบเทียบกับอัตราเร็วแสง พร้อมสรุปว่าโปรตอนอยู่ในนิวเคลียสได้หรือไม่ กำหนด $m_p = 1.6726 \times 10^{-27}$ kg, $c = 3.00 \times 10^8$ m/s

ก. Δv_min ≈ 1.58×10^7 m/s (~5.3% ของ c) น้อยกว่าอัตราเร็วแสงมาก จึงเป็นไปได้ทางฟิสิกส์ที่โปรตอนจะอยู่ในนิวเคลียส

ข. Δv_min ≈ 1.58×10^7 m/s (~5.3% ของ c) แต่เกินอัตราเร็วแสง จึงเป็นไปไม่ได้ที่โปรตอนจะอยู่ในนิวเคลียส

ค. Δv_min ≈ 5.79×10^10 m/s (~193 เท่าของ c) จึงเป็นไปไม่ได้ที่โปรตอนจะอยู่ในนิวเคลียส

ง. Δv_min ≈ 3.15×10^7 m/s เท่ากับอัตราเร็วแสงพอดี จึงอยู่ในภาวะก้ำกึ่ง

ข้อ 45 ★★★☆☆

กำหนดพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมไฮโดรเจนที่ระดับพลังงาน n เป็น $E_n = -\frac{2.18\times10^{-18}}{n^2}$ J เมื่ออิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจาก $n = 3$ ลงมายัง $n = 2$ จะคายพลังงานออกมาเท่าใด

ก. 3.03×10^{-19} J

ข. 3.63×10^{-19} J

ค. 7.87×10^{-19} J

ง. 1.94×10^{-18} J

ข้อ 46 ★★★☆☆

เส้นสเปกตรัมสีน้ำเงินเขียวเส้นหนึ่งในอนุกรมบัลเมอร์ของไฮโดรเจนมีความยาวคลื่น 486 nm จงหาพลังงานของโฟตอนแสงนี้ 1 โฟตอน กำหนด $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J s, $c = 3 \times 10^{8}$ m/s และ $1\ \text{nm} = 10^{-9}$ m

ก. 4.09×10^{-28} J

ข. 9.67×10^{-32} J

ค. 4.09×10^{-19} J

ง. 4.09×10^{-18} J

ข้อ 47 ★★★☆☆

อะตอมไฮโดรเจนจำนวนมากถูกกระตุ้นให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงาน $n = 4$ เมื่ออิเล็กตรอนคายพลังงานกลับลงมาจนถึงสถานะพื้น จะเกิดเส้นสเปกตรัมที่มีพลังงานต่างกันได้มากที่สุดกี่เส้น

ก. 3 เส้น

ข. 4 เส้น

ค. 12 เส้น

ง. 6 เส้น

ข้อ 48 ★★★★☆

อะตอมไฮโดรเจนคายโฟตอนที่มีพลังงาน 4.58×10^{-19} J เมื่ออิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานลงมาสิ้นสุดที่ระดับ $n = 2$ กำหนดพลังงานของอิเล็กตรอนในระดับ n ของอะตอมไฮโดรเจนคือ $E_n = -\dfrac{2.18 \times 10^{-18}}{n^2}$ J อิเล็กตรอนตกลงมาจากระดับ n เท่าใด และเส้นสเปกตรัมที่ได้อยู่ในช่วงใดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ก. $n = 5$ และอยู่ในช่วงแสงที่มองเห็นได้

ข. $n = 5$ และอยู่ในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลต

ค. $n = 25$ และอยู่ในช่วงแสงที่มองเห็นได้

ง. $n = 3$ และอยู่ในช่วงแสงที่มองเห็นได้

ข้อ 49 ★★★★☆

อะตอมไฮโดรเจนจำนวนมากถูกกระตุ้นให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงาน $n = 5$ เมื่ออิเล็กตรอนคายพลังงานกลับลงมาทุกเส้นทางที่เป็นไปได้ จะเกิดเส้นสเปกตรัมทั้งหมดกี่เส้น และในจำนวนนั้นมีกี่เส้นที่อยู่ในอนุกรมบัลเมอร์ (ช่วงแสงที่มองเห็นได้)

ก. ทั้งหมด 4 เส้น เป็นอนุกรมบัลเมอร์ 1 เส้น

ข. ทั้งหมด 10 เส้น เป็นอนุกรมบัลเมอร์ 4 เส้น

ค. ทั้งหมด 20 เส้น เป็นอนุกรมบัลเมอร์ 3 เส้น

ง. ทั้งหมด 10 เส้น เป็นอนุกรมบัลเมอร์ 3 เส้น

ข้อ 50 ★★★★☆

แสงความยาวคลื่น 250 nm ตกกระทบผิวโลหะชนิดหนึ่ง ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาด้วยพลังงานจลน์สูงสุด 1.50 eV จงหาฟังก์ชันงานของโลหะนี้ในหน่วย eV กำหนด $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s, $c = 3.00 \times 10^{8}$ m/s, $1\ \text{eV} = 1.602 \times 10^{-19}$ J

ก. 3.46 eV

ข. 4.96 eV

ค. 6.46 eV

ง. 1.50 eV

ข้อ 51 ★★★★☆

โลหะชนิดหนึ่งมีฟังก์ชันงาน $\Phi = 3.50 \times 10^{-19}$ J จงหาความยาวคลื่นขีดเริ่ม (threshold wavelength) แล้วพิจารณาว่าแสงสีเขียว ($\lambda \approx 520$ nm) สามารถทำให้เกิดโฟโตอิเล็กทริกกับโลหะนี้ได้หรือไม่ กำหนด $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s, $c = 3.00 \times 10^{8}$ m/s

- **ก.** $\lambda_0 \approx 568$ nm — เกิดโฟโตอิเล็กทริกได้ เพราะ 520 nm สั้นกว่า λ_0 จึงมีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าขั้นต่ำ
- **ข.** $\lambda_0 \approx 568$ nm — เกิดโฟโตอิเล็กทริกไม่ได้ เพราะ 520 nm ยาวกว่า λ_0
- **ค.** $\lambda_0 \approx 284$ nm — เกิดโฟโตอิเล็กทริกไม่ได้ เพราะ 520 nm ยาวกว่ามาก
- **ง.** $\lambda_0 \approx 1136$ nm — เกิดโฟโตอิเล็กทริกได้เสมอไม่ว่าความยาวคลื่นตกกระทบเท่าใด

ข้อ 52 ★★★★☆

อิเล็กตรอนและโปรตอนเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเท่ากัน จงหาอัตราส่วนความยาวคลื่นเดอบรอยล์ของอิเล็กตรอนต่อโปรตอน (λ_e/λ_p) กำหนด $m_p/m_e \approx 1836$

- **ก.** ≈ 1836 เท่า (อิเล็กตรอนมีความยาวคลื่นยาวกว่า)
- **ข.** ≈ 1/1836 เท่า (อิเล็กตรอนมีความยาวคลื่นสั้นกว่า)
- **ค.** ≈ 1836 เท่า แต่โปรตอนมีความยาวคลื่นยาวกว่า
- **ง.** เท่ากันพอดี เพราะอัตราเร็วเท่ากัน

ข้อ 53 ★★★★☆

ถ้าสมมติให้อิเล็กตรอนถูกจำกัดอยู่ในระยะ $\Delta x = 1.0 \times 10^{-14}$ m (ประมาณขนาดนิวเคลียสของธาตุหนัก) จงประมาณ Δv_{min} แล้วเทียบกับอัตราเร็วแสง สรุปว่าเป็นไปได้ทางฟิสิกส์หรือไม่ กำหนด $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg, $c = 3.00 \times 10^{8}$ m/s

- **ก.** Δv_min ≈ 5.79×10^9 m/s (~19.3 เท่าของ c) เกินอัตราเร็วแสงมาก จึงเป็นไปไม่ได้ทางฟิสิกส์
- **ข.** Δv_min ≈ 5.79×10^9 m/s (~1.93 เท่าของ c) เกินอัตราเร็วแสงเล็กน้อย แต่พอเป็นไปได้ในทางทฤษฎี
- **ค.** Δv_min ≈ 3.15×10^7 m/s (~0.11 เท่าของ c) จึงเป็นไปได้ทางฟิสิกส์
- **ง.** Δv_min ≈ 1.16×10^6 m/s (~0.0039 เท่าของ c) จึงเป็นไปได้ทางฟิสิกส์

ข้อ 54 ★★★★★

อะตอมไฮโดรเจนอะตอมหนึ่งมีอิเล็กตรอนอยู่ที่ระดับพลังงาน $n = 4$ อิเล็กตรอนคายพลังงานกลับสู่สถานะพื้น ($n = 1$) โดยปล่อยโฟตอนออกมา 2 โฟตอนตามลำดับ โฟตอนแรกมีพลังงาน 4.09×10^{-19} จูล ความยาวคลื่นของโฟตอนที่สองมีค่าใกล้เคียงข้อใดมากที่สุด กำหนด $E_n = -\dfrac{2.18 \times 10^{-18}}{n^2}$ จูล, $h = 6.63 \times 10^{-34}$ จูล วินาที และ $c = 3 \times 10^{8}$ เมตรต่อวินาที

- **ก.** 122 นาโนเมตร
- **ข.** 97 นาโนเมตร
- **ค.** 103 นาโนเมตร
- **ง.** 487 นาโนเมตร

ข้อ 55 ★★★★★ แนว IChO

ไอออนที่มีอิเล็กตรอนเพียงตัวเดียว (hydrogen-like ion) ของธาตุ X คือ $\mathrm{X}^{(Z-1)+}$ ปลดปล่อยโฟตอนความยาวคลื่น 13.5 nm เมื่ออิเล็กตรอนเปลี่ยนจากระดับพลังงาน $n = 2$ ลงมา $n = 1$ กำหนด $E_n = -R_H \dfrac{Z^2}{n^2}$ โดย $R_H = 2.18 \times 10^{-18}$ J, $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s, $c = 3.00 \times 10^{8}$ m/s จงหาเลขอะตอม Z ของธาตุ X ก่อน จากนั้นหาเลขมวลของไอโซโทปธาตุ X ที่มีจำนวนนิวตรอน 4 ตัว

ก. 6

ข. 7

ค. 8

ง. 9

ข้อ 56 ★★★★★

กำหนดพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมไฮโดรเจน $E_n = -\frac{2.18\times10^{-18}}{n^2}$ J ต่ออะตอม และ $N_A = 6.02 \times 10^{23}\ \mathrm{mol}^{-1}$ พลังงานต่ำสุดที่ต้องใช้เพื่อทำให้อะตอมไฮโดรเจนในสถานะพื้นจำนวน 1 โมล แตกตัวเป็น H^+ กับอิเล็กตรอนทั้งหมด มีค่าใกล้เคียงข้อใดมากที่สุด

ก. 984 kJ

ข. 328 kJ

ค. $1.31 \times 10^{6}\ \mathrm{kJ}$

ง. 1312 kJ

6 การจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบชั้น

5. การจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบชั้น และเวเลนซ์อิเล็กตรอน

การจัดแบบชั้น (shell) คือเวอร์ชันหยาบที่ใช้เร็วในห้องสอบ กติกามี 3 ข้อ:

1. ชั้นที่ n จุอิเล็กตรอนได้สูงสุด $2n^2$ ตัว: ชั้น 1 → 2, ชั้น 2 → 8, ชั้น 3 → 18, ชั้น 4 → 32
2. แต่ **ชั้นนอกสุดห้ามเกิน 8** เสมอ
3. เติมจากชั้นในออกนอก ถ้าเติมชั้นนอกครบ 8 แล้วยังเหลืออิเล็กตรอน ให้ขึ้นชั้นใหม่ก่อน (แล้วชั้นในค่อยกลับมารับเพิ่มทีหลังในธาตุแทรนซิชัน)

- **เวเลนซ์อิเล็กตรอน** = อิเล็กตรอนชั้นนอกสุด → บอก **หมู่** (สำหรับธาตุ representative)
- **จำนวนชั้นที่มีอิเล็กตรอน** → บอก **คาบ**

ตัวอย่างโจทย์ 5.1 ธาตุ X มี $Z = 20$ จงจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบชั้น ระบุหมู่ คาบ และทำนายไอออนที่เสถียร

วิธีทำ

1. เติมทีละชั้น: ชั้น 1 รับ 2 (เหลือ 18) → ชั้น 2 รับ 8 (เหลือ 10) → ชั้น 3 ตามความจุรับได้ 18 แต่ตอนนี้เหลือ 10 ตัว ถ้าใส่หมด ชั้นนอกสุดจะเกิน 8 ไม่ได้! จึงใส่ชั้น 3 แค่ 8 (เหลือ 2) → ชั้น 4 รับ 2
2. ได้ **2, 8, 8, 2**
3. เวเลนซ์อิเล็กตรอน 2 → หมู่ IIA; มี 4 ชั้น → คาบ 4 (ธาตุนี้คือ Ca)
4. เสียอิเล็กตรอน 2 ตัวจะได้ชั้นนอกครบ 8 แบบแก๊สเฉื่อย → เกิด X^{2+} ที่จัดเรียงเป็น 2, 8, 8

ตอบ 2, 8, 8, 2; หมู่ IIA คาบ 4; ไอออนเสถียรคือ X^{2+}

กับดักคลาสสิก: K ($Z = 19$) ต้องเป็น 2, 8, 8, 1 — ไม่ใช่ 2, 8, 9 เพราะชั้นนอกสุดห้ามเกิน 8 นี่คือจุดที่กฎข้อ 2 ทำงาน

ตัวอย่างช่วง $Z > 20$ (วงเล็บท้ายกฎข้อ 3 ทำงานจริง): Zn ($Z = 30$) จัดเป็น **2, 8, 18, 2** (นับเช็ก: $2 + 8 + 18 + 2 = 30$ ✓) — หลัง Ca (2, 8, 8, 2) ธาตุแทรนซิชันคาบ 4 (Sc ถึง Zn) คือช่วงที่ชั้น 3 "กลับมารับอิเล็กตรอนเพิ่ม" จาก 8 จนเต็มความจุ 18 โดยชั้นนอกสุด (ชั้น 4) ยังคงมีราวๆ 2 ตัว พอชั้น 3 เต็มแล้ว ธาตุถัดไปอย่าง Ga ($Z = 31$) จึงเติมต่อที่ชั้นนอกสุด: **2, 8, 18, 3** ($2 + 8 + 18 + 3 = 31$ ✓)

7 เลขควอนตัมและการจัดเรียงแบบออร์บิทัล

6. เลขควอนตัมเบื้องต้น — พิกัด GPS ของอิเล็กตรอน

แบบจำลองกลุ่มหมอกระบุ "ที่อยู่" ของอิเล็กตรอนด้วยเลข 4 ตัว เหมือนที่อยู่บ้าน: จังหวัด → อำเภอ → บ้านเลขที่ → ชื่อผู้อยู่

เลขควอนตัม	สัญลักษณ์	ค่าที่เป็นไปได้	บอกอะไร
หลัก (principal)	n	$1, 2, 3, \ldots$	ระดับพลังงานหลัก / ขนาดออร์บิทัล
โมเมนตัมเชิงมุม (azimuthal)	l	0 ถึง $n-1$	รูปร่างออร์บิทัล: $l = 0, 1, 2, 3$ คือ s, p, d, f
แม่เหล็ก (magnetic)	m_l	$-l$ ถึง $+l$	ทิศการวางตัวของออร์บิทัล
สปิน (spin)	m_s	$+\frac{1}{2}$ หรือ $-\frac{1}{2}$	ทิศทางสปินของอิเล็กตรอน

ผลที่ตามมาแบบนับได้ (ออกสอบบ่อย):

- ซับเชลล์ s, p, d, f มีออร์บิทัลย่อย $1, 3, 5, 7$ ออร์บิทัล → จุอิเล็กตรอนได้ $2, 6, 10, 14$ ตัว
- ระดับ n มีออร์บิทัลรวม n^2 ออร์บิทัล → จุอิเล็กตรอนสูงสุด $2n^2$ ตัว (ที่มาของกฎในหัวข้อ 5 นั่นเอง)

ตัวอย่างโจทย์ 6.1 ที่ระดับ $n = 3$ มีซับเชลล์อะไรบ้าง มีออร์บิทัลรวมกี่ออร์บิทัล และจุอิเล็กตรอนได้สูงสุดกี่ตัว

วิธีทำ

1. l วิ่งจาก 0 ถึง $n - 1 = 2$ → มี $l = 0, 1, 2$ คือซับเชลล์ $3s, 3p, 3d$
2. นับออร์บิทัล: $3s$ มี 1, $3p$ มี 3, $3d$ มี 5 → รวม $1 + 3 + 5 = 9 = n^2$ ✓
3. อิเล็กตรอนสูงสุด $= 2 \times 9 = 18 = 2n^2$ ✓

ตอบ มี $3s, 3p, 3d$; รวม 9 ออร์บิทัล; จุได้สูงสุด 18 อิเล็กตรอน

เช็กชุดเลขควอนตัมว่า "เป็นไปได้" ไหม: เช่น $(n, l, m_l) = (2, 2, 0)$ ผิดทันที เพราะ l ต้องไม่เกิน $n - 1$ ส่วน $(3, 1, -1)$ ถูกต้อง (คือออร์บิทัลหนึ่งใน $3p$)

7. การจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบออร์บิทัล: Aufbau, Pauli, Hund

การจัดแบบละเอียดใช้กฎ 3 ข้อทำงานร่วมกัน:

1. **หลักเอาฟ์เบา (Aufbau):** เติมอิเล็กตรอนจากออร์บิทัลพลังงานต่ำไปสูง ตามลำดับ

$$1s \to 2s \to 2p \to 3s \to 3p \to 4s \to 3d \to 4p \to 5s \to 4d \to 5p \to 6s$$

จุดพลิกคือ $4s$ มาก่อน $3d$ (จำผ่านแผนภาพลูกศรทแยง หรือท่องช่วงหักเลี้ยว "3p 4s 3d 4p" ให้ขึ้นใจ) 2. **หลักการกีดกันของเพาลี (Pauli):** อิเล็กตรอน 2 ตัวในอะตอมเดียวกันมีเลขควอนตัมครบชุดซ้ำกันไม่ได้ → 1 ออร์บิทัลจุได้สูงสุด 2 ตัวและต้องสปินสวนกัน 3. **กฎของฮุนด์ (Hund):** ในซับเชลล์เดียวกัน ให้กระจายอิเล็กตรอนแบบเดี่ยวๆ สปินขนานกันให้ครบทุกออร์บิทัลก่อน แล้วค่อยจับคู่ (เหมือนคนขึ้นรถเมล์ — เลือกนั่งเบาะว่างก่อนไปนั่งเบียดใคร)

สองข้อยกเว้นดังที่ต้องจำ: ความเสถียรพิเศษของซับเชลล์ **ครึ่งเต็ม** (d^5) และ **เต็ม** (d^{10}) ทำให้

- Cr ($Z = 24$): $[\mathrm{Ar}]\, 4s^1 3d^5$ (ไม่ใช่ $4s^2 3d^4$)
- Cu ($Z = 29$): $[\mathrm{Ar}]\, 4s^1 3d^{10}$ (ไม่ใช่ $4s^2 3d^9$)

กฎเหล็กของไอออนธาตุแทรนซิชัน: ตอนเติมใส่ $4s$ ก่อน แต่ตอนดึงออก **ดึงจาก $4s$ ก่อนเสมอ** (ชั้น $n = 4$ อยู่นอกสุด โดนดึงง่ายสุด)

ตัวอย่างโจทย์ 7.1 จงจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบออร์บิทัลของ Fe ($Z = 26$), Fe^{2+} และ Fe^{3+} พร้อมบอกจำนวนอิเล็กตรอนเดี่ยว (unpaired) ของ Fe^{3+}

วิธีทำ

1. Fe มี 26 อิเล็กตรอน เติมตาม Aufbau: $1s^2\, 2s^2\, 2p^6\, 3s^2\, 3p^6\, 4s^2\, 3d^6$ (นับเช็ก: $2 + 2 + 6 + 2 + 6 + 2 + 6 = 26$ ✓) เขียนย่อ $[\mathrm{Ar}]\, 4s^2 3d^6$
2. Fe^{2+} ดึงออก 2 ตัว **จาก $4s$ ก่อน**: $[\mathrm{Ar}]\, 3d^6$
3. Fe^{3+} ดึงเพิ่มอีก 1 ตัวจาก $3d$: $[\mathrm{Ar}]\, 3d^5$ — สังเกตว่าเป็น d ครึ่งเต็มพอดี จึงเสถียรเป็นพิเศษ (นี่คือเหตุผลที่ Fe^{3+} พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ)
4. ตามกฎฮุนด์ $3d^5$ กระจายเดี่ยวครบทั้ง 5 ออร์บิทัล → อิเล็กตรอนเดี่ยว 5 ตัว

ตอบ Fe: $[\mathrm{Ar}]\, 4s^2 3d^6$; Fe^{2+}: $[\mathrm{Ar}]\, 3d^6$; Fe^{3+}: $[\mathrm{Ar}]\, 3d^5$ มีอิเล็กตรอนเดี่ยว 5 ตัว

ตัวอย่างโจทย์ 7.2 ธาตุ A มีการจัดเรียงลงท้ายด้วย $3s^2 3p^4$ จงบอกหมู่ คาบ เวเลนซ์อิเล็กตรอน และไอออนที่เสถียร

วิธีทำ

1. ชั้นนอกสุดคือ $n = 3$ → คาบ 3
2. เวเลนซ์อิเล็กตรอน $= 2 + 4 = 6$ → หมู่ VIA (ธาตุนี้คือ S)
3. รับอีก 2 ตัวจะครบออกเตต → ไอออนเสถียรคือ A^{2-} (จัดเรียงเหมือน Ar)

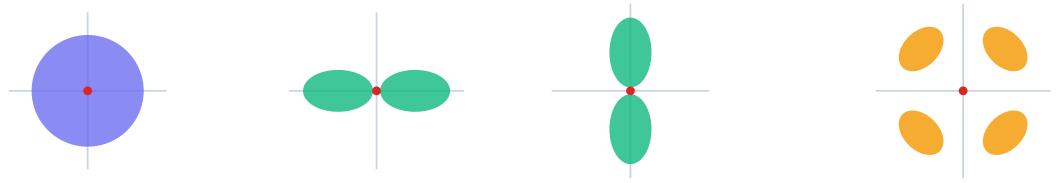
ตอบ หมู่ VIA คาบ 3 เวเลนซ์อิเล็กตรอน 6 ไอออนเสถียร A^{2-}

รูปร่างของออร์บิทัล

ออร์บิทัลไม่ใช่ "วงโคจร" แต่คือ**บริเวณที่มีโอกาสพบอิเล็กตรอนสูง** แต่ละชนิดมีรูปทรงเฉพาะ:

- **ออร์บิทัล s** — ทรงกลมสมมาตรรอบนิวเคลียส (ทุกชั้นมี 1 ออร์บิทัล ยิ่ง n สูง ทรงกลมยิ่งใหญ่ เช่น $2s$ ใหญ่กว่า $1s$)
- **ออร์บิทัล p** — รูปดัมเบล (สองพู) วางตาม 3 แกนตั้งฉากกัน: p_x, p_y, p_z — จึงมีซับเชลล์ละ 3 ออร์บิทัล (เริ่มมีตั้งแต่ n = 2)

- **ออร์บิทัล d** — ส่วนใหญ่เป็นรูปใบโคลเวอร์สี่พู มีซับเชลล์ละ 5 ออร์บิทัล (เริ่มมีตั้งแต่ n = 3) (ระดับค่าย 1 รู้จำนวนกับหน้าตาโดยรวมพอ)



s
ทรงกลมรอบนิวเคลียส
ซับเชลล์ละ 1 ออร์บิทัล

p (แสดงแกน x) **p (แสดงแกน y)**
ดัมเบลสองพู วางตาม 3 แกนตั้งฉาก (x, y, z) → ซับเชลล์ละ 3 ออร์บิทัล

d (ตัวอย่าง 1 ใน 5 แบบ)
ส่วนใหญ่เป็นใบโคลเวอร์ 4 พู
ซับเชลล์ละ 5 ออร์บิทัล

จุดแดงกลาง = นิวเคลียส · พื้นที่สี = บริเวณที่มีโอกาสพบอิเล็กตรอนสูง (ไม่ใช่เส้นทางวิ่ง)

สมบัติแม่เหล็กของอะตอม — ต่อยอดจากการนับอิเล็กตรอนเดี่ยว

- มีอิเล็กตรอนเดี่ยว (unpaired) อย่างน้อย 1 ตัว → **พาราแมกเนติก** (paramagnetic — ถูกสนามแม่เหล็กดูด ยิ่งเดี่ยวมากยิ่งแรง)
- อิเล็กตรอนจับคู่หมดทุกตัว → **ไดอาแมกเนติก** (diamagnetic — ถูกสนามแม่เหล็กผลักอย่างอ่อน)

เช็คเร็ว: Zn $([\mathrm{Ar}]\,4s^2 3d^{10})$ จับคู่หมด → ไดอา · Fe^{3+} $([\mathrm{Ar}]\,3d^5)$ เดี่ยว 5 ตัว → พาราแรง — ข้อสอบชอบให้เรียงลำดับความเป็นพาราแมกเนติก ซึ่งก็คือการเรียงจำนวนอิเล็กตรอนเดี่ยวนั่นเอง

✏️ ฝึกทันที 12 ข้อ (ง่าย→ยาก)

ข้อ 57 ★☆☆☆☆

ระดับพลังงานหลัก $n = 3$ ของอะตอมบรรจุอิเล็กตรอนได้มากที่สุดกี่ตัว

ก. 8 ตัว
ข. 18 ตัว
ค. 32 ตัว
ง. 6 ตัว

ข้อ 58 ★★☆☆☆

อะตอมคลอรีน (Cl) มีเลขอะตอม 17 ในสถานะพื้น อะตอมคลอรีนมีอิเล็กตรอนอยู่ในออร์บิทัลชนิด p ทั้งหมดรวมกี่ตัว

ก. 5 ตัว
ข. 11 ตัว
ค. 6 ตัว
ง. 12 ตัว

ข้อ 59 ★★☆☆☆

ธาตุกำมะถัน (S) มีเลขอะตอม 16 การจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบชั้นในสถานะพื้น และจำนวนเวเลนซ์อิเล็กตรอน ตรงกับข้อใด

ก. 2, 8, 6 และมีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 6 ตัว
ข. 2, 8, 6 และมีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 2 ตัว
ค. 2, 6, 8 และมีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 8 ตัว
ง. 2, 8, 8 และมีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 8 ตัว

ข้อ 60 ★★★☆☆

กำหนดแผนภาพการบรรจุอิเล็กตรอนในออร์บิทัล $2p$ ทั้งสาม (พลังงานเท่ากัน) ของอะตอมออกซิเจน ($2p^4$) 4 แบบ ดังนี้ (ก) (↑↓)(↑↓)( ) (ข) (↑↓)(↑)(↑) (ค) (↑↓)(↑)(↓) (ง) (↑↑)(↑)(↑) แบบใดเป็นการบรรจุอิเล็กตรอนในสถานะพื้นที่ถูกต้อง

ก. แบบ (ก)
ข. แบบ (ข)
ค. แบบ (ค)
ง. แบบ (ง)

ข้อ 61 ★★★☆☆

ธาตุ X มีเลขอะตอม 20 การจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบชั้น (ระดับพลังงานหลัก) ในสถานะพื้นของ X เป็นไปตามข้อใด

ก. 2, 8, 10
ข. 2, 8, 8, 2
ค. 2, 18
ง. 2, 8, 9, 1

ข้อ 62 ★★★☆☆

ธาตุในข้อใดมีจำนวนอิเล็กตรอนเดี่ยว (unpaired electron) ในสถานะพื้นมากที่สุด

ก. $\mathrm{C}\,(Z=6)$
ข. $\mathrm{N}\,(Z=7)$
ค. $\mathrm{O}\,(Z=8)$
ง. $\mathrm{F}\,(Z=9)$

ข้อ 63 ★★★☆☆

ชุดเลขควอนตัม (n, l, m_l, m_s) ในข้อใด เป็นไปไม่ได้ สำหรับอิเล็กตรอนในอะตอม

ก. $n=3,\ l=2,\ m_l=-2,\ m_s=+\frac{1}{2}$
ข. $n=2,\ l=1,\ m_l=0,\ m_s=-\frac{1}{2}$
ค. $n=2,\ l=2,\ m_l=1,\ m_s=+\frac{1}{2}$
ง. $n=4,\ l=0,\ m_l=0,\ m_s=-\frac{1}{2}$

ข้อ 64 ★★★★☆

กำหนดเลขอะตอมของ Mn = 25 ไอออนของแมงกานีสในสารประกอบ $\mathrm{Mn_2O_3}$ มีอิเล็กตรอนเดี่ยว (unpaired electron) ในสถานะพื้นกี่ตัว

ก. 4 ตัว
ข. 5 ตัว
ค. 2 ตัว
ง. 3 ตัว

ข้อ 65 ★★★★☆

กำหนดเลขอะตอม Cr = 24, Mn = 25, Fe = 26, Co = 27 ไอออน $2+$ ของธาตุใดมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบ $3d$ ครึ่งเต็ม (half-filled) ในสถานะพื้น

ก. $\mathrm{Cr^{2+}}$
ข. $\mathrm{Co^{2+}}$
ค. $\mathrm{Fe^{2+}}$
ง. $\mathrm{Mn^{2+}}$

ข้อ 66 ★★★★☆

เหล็ก (Fe) มีเลขอะตอม 26 การจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบออร์บิทัลของไอออน Fe^{2+} ในสถานะพื้นตรงกับข้อใด

ก. $[Ar]\ 3d^6$

ข. $[Ar]\ 3d^4\ 4s^2$

ค. $[Ar]\ 3d^6\ 4s^2$

ง. $[Ar]\ 3d^5\ 4s^1$

ข้อ 67 ★★★★★

ธาตุ X เป็นธาตุเรพรีเซนเททีฟ (ธาตุหมู่หลัก) ในคาบที่ 4 ในสถานะพื้น อะตอมของ X มีจำนวนอิเล็กตรอนที่มีเลขควอนตัมสปิน $m_s = +\frac{1}{2}$ มากกว่าจำนวนอิเล็กตรอนที่มี $m_s = -\frac{1}{2}$ อยู่ 3 ตัว (กำหนดให้อิเล็กตรอนเดี่ยวทุกตัวมีสปินเป็น $+\frac{1}{2}$ ตามกฎของฮุนด์) อะตอม X ในสถานะพื้นมีอิเล็กตรอนที่อยู่ในออร์บิทัลชนิด p (เลขควอนตัม $l = 1$) ทั้งหมดกี่ตัว

ก. 3 ตัว

ข. 9 ตัว

ค. 12 ตัว

ง. 15 ตัว

ข้อ 68 ★★★★★

ไอออน X^{3+} ของธาตุแทรนซิชันชนิดหนึ่งมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนในสถานะพื้นเป็น $[Ar]\ 3d^3$ ถ้านิวไคลด์ของ X มีเลขมวล 52 ข้อสรุปใดถูกต้อง

ก. อะตอม X มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนเป็น $[Ar]\ 3d^3\ 4s^3$

ข. ธาตุ X มีเลขอะตอม 21 และมีนิวตรอน 31 ตัว

ค. อะตอม X ในสถานะพื้นมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนเป็น $[Ar]\ 3d^4\ 4s^2$

ง. อะตอม X ในสถานะพื้นมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนเป็น $[Ar]\ 3d^5\ 4s^1$ และมีนิวตรอน 28 ตัว

8 กัมมันตภาพรังสีและครึ่งชีวิต

8. กัมมันตภาพรังสีและครึ่งชีวิต

นิวเคลียสของไอโซโทปบางชนิดไม่เสถียร (มักเป็นธาตุหนัก หรือสัดส่วนนิวตรอน:โปรตอนผิดปกติ) จึง**สลายตัวเอง**พร้อมปล่อยรังสีออกมา เรียกว่า กัมมันตภาพรังสี

รังสีหลัก 3 ชนิด (เรียงอำนาจทะลุทะลวง: แอลฟา < บีตา < แกมมา):

รังสี	สัญลักษณ์	คืออะไร	ประจุ	อำนาจทะลุทะลวง
แอลฟา	${}^{4}_{2}\mathrm{He}$	นิวเคลียสฮีเลียม	$+2$	ต่ำสุด (กระดาษกั้นได้) แต่ทำให้เกิดไอออนได้มากสุด
บีตาลบ	${}^{0}_{-1}e$	อิเล็กตรอนความเร็วสูง (จากนิวตรอนเปลี่ยนเป็นโปรตอน)	-1	ปานกลาง (แผ่นอะลูมิเนียมกั้นได้)
แกมมา	γ	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ไม่มีมวล	0	สูงสุด (ต้องใช้ตะกั่ว/คอนกรีตหนา)
บีตาบวก (โพซิตรอน)	${}^{0}_{+1}e$	อนุภาคคู่ตรงข้ามของอิเล็กตรอน (จากโปรตอนเปลี่ยนเป็นนิวตรอน)	$+1$	ปานกลาง คล้ายบีตาลบ

การดุลสมการนิวเคลียร์ — ผลรวมเลขมวล (บน) และผลรวมเลขอะตอม (ล่าง) สองข้างต้องเท่ากัน:

- สลายให้แอลฟา: Z ลด 2, A ลด 4 เช่น ${}^{238}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\mathrm{Th} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$
- สลายให้บีตาลบ: Z เพิ่ม 1, A คงเดิม เช่น ${}^{14}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{0}_{-1}e$
- สลายให้บีตาบวก: Z ลด 1, A คงเดิม เช่น ${}^{11}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{11}_{5}\mathrm{B} + {}^{0}_{+1}e$

ทำนายโหมดการสลายตัวจากอัตราส่วนนิวตรอนต่อโปรตอน (n/p) — ธาตุจะเสถียรก็ต่อเมื่อ n/p อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (ธาตุเบา n/p ≈ 1 ธาตุหนัก n/p สูงขึ้นเรื่อยๆ) ถ้าไอโซโทปหลุดจากช่วงนี้ นิวเคลียสจะปรับตัวเองให้เข้าใกล้ค่าที่เสถียรโดยเลือกโหมดสลายที่ "แก้ปัญหาให้ตรงจุด":

- **n/p สูงเกินไป (นิวตรอนเกิน)** → คายบีตาลบ เพราะบีตาลบเปลี่ยนนิวตรอนเป็นโปรตอน ($n \rightarrow p + {}^{0}_{-1}e$) ทำให้ n/p ลดลง
- **n/p ต่ำเกินไป (นิวตรอนขาด/โปรตอนเกิน)** → คายบีตาบวก หรือจับอิเล็กตรอนวงในเข้านิวเคลียส (electron capture) ทั้งสองแบบเปลี่ยนโปรตอนเป็นนิวตรอน ทำให้ n/p เพิ่มขึ้น

ตัวอย่างโจทย์ 8.0 ไอโซโทป $^{22}_{11}\mathrm{Na}$ (n/p = 11/11 = 1.0) เทียบกับธาตุคาบใกล้เคียงที่เสถียรมักมี n/p สูงกว่านี้เล็กน้อย จึงถือว่า Na-22 มีโปรตอนเกิน ควรสลายตัวแบบใด และได้ธาตุใด

วิธีทำ

1. โปรตอนเกิน (n/p ต่ำกว่าปกติ) → ต้องลดโปรตอน เพิ่มนิวตรอน → คายบีตาบวก
2. บีตาบวกทำให้ Z ลด 1: $11 \to 10$ (Ne) โดย A คงเดิมที่ 22

ตอบ $^{22}_{11}\mathrm{Na} \to\ ^{22}_{10}\mathrm{Ne} +\ ^{0}_{+1}e$ (สลายแบบบีตาบวก ได้นีออน-22 — ปฏิกิริยานี้มีจริงและใช้ยืนยันทฤษฎีนี้ได้)

ครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) = เวลาที่สารกัมมันตรังสีสลายจนเหลือ**ครึ่งหนึ่ง**ของเดิม ผ่านไป k ครึ่งชีวิต จะเหลือ:

$$N = N_0 \times \left(\tfrac{1}{2}\right)^k, \qquad k = \frac{t}{t_{1/2}}$$

ตัวอย่างโจทย์ 8.1 ไอโซโทป Na-24 มีครึ่งชีวิต 15 ชั่วโมง ถ้าเริ่มต้นมี 160 g เมื่อผ่านไป 60 ชั่วโมง จะเหลือกี่กรัม

วิธีทำ

1. จำนวนครึ่งชีวิต $k = 60/15 = 4$ รอบ
2. เหลือ $160 \times \left(\tfrac{1}{2}\right)^4 = 160/16 = 10$ g

ตอบ 10 g

เทคนิคเลขสวย: เปอร์เซ็นต์ที่เหลือที่เจอบ่อย — เหลือ 50% = 1 รอบ, 25% = 2, 12.5% = 3, 6.25% = 4 รอบ · ถ้าโจทย์บอก "สลายไป 87.5%" ต้องแปลงเป็น "เหลือ 12.5%" ก่อนเสมอ (กับดักยอดนิยม)

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ 3 แบบที่ต้องจำแนกได้

นอกจากการสลายตัวเองตามธรรมชาติ ยังมีปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่มนุษย์ทำให้เกิด — ข้อสอบชอบให้สมการมาแล้วถามว่าเป็นแบบใด จุดสังเกตอยู่ที่ "หน้าตาของสารตั้งต้น":

แบบ	จุดสังเกตจากสมการ	ตัวอย่าง	ใช้ที่ไหน
การแปรนิวเคลียส (transmutation)	ยิงอนุภาคเล็ก (α, p, n) ใส่นิวเคลียส ได้ธาตุใหม่ + อนุภาคเล็ก	$^{14}_{7}\mathrm{N} +\ ^{4}_{2}\mathrm{He} \to\ ^{17}_{8}\mathrm{O} +\ ^{1}_{1}\mathrm{H}$	การทดลองของรัทเทอร์ฟอร์ด สังเคราะห์ธาตุใหม่
ฟิชชัน (fission)	นิวเคลียส**หนักตัวเดียว** + นิวตรอน → แตกเป็น**สองก้อนขนาดกลาง** + นิวตรอนหลายตัว	$^{235}_{92}\mathrm{U} +\ ^{1}_{0}n \to\ ^{141}_{56}\mathrm{Ba} +\ ^{92}_{36}\mathrm{Kr} + 3\,^{1}_{0}n$	โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ (นิวตรอนที่ได้ไปชนต่อ = ปฏิกิริยาลูกโซ่)

แบบ	จุดสังเกตจากสมการ	ตัวอย่าง	ใช้ที่ไหน
ฟิวชัน (fusion)	นิวเคลียส**เบาสองตัว**หลอมรวมเป็นตัวหนักกว่า	${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}n$	ดวงอาทิตย์ (ต้องการอุณหภูมิ/ความดันสูงมหาศาล)

ทุกแบบใช้กติกาดุลเดิม: ผลรวมเลขมวลและเลขอะตอมสองข้างต้องเท่ากัน — ลองตรวจตัวอย่างฟิชชันดู: เลขมวล $235 + 1 = 141 + 92 + 3(1) = 236$ ✓ เลขอะตอม $92 + 0 = 56 + 36 = 92$ ✓

ระวัง: จุดสับสนคลาสสิกคือ "ฟิชชันแตก ฟิวชันรวม" — จำจากศัพท์: fission = แยก (เหมือน fissure รอยแยก), fusion = หลอมรวม (เหมือน fuse เชื่อม)

กฎความเสถียรของนิวเคลียส — ทำไมนิวเคลียสบางตัว "อยู่ยงคงกระพัน" กว่าตัวอื่น

หัวข้อ n/p ratio ด้านบนบอกภาพกว้างว่านิวเคลียสเสถียรต้องมีอัตราส่วนนิวตรอนต่อโปรตอนอยู่ในช่วงที่เหมาะสม แต่ยังมีกฎย่อยอีก 3 ข้อที่ช่วยทำนายความเสถียรได้ละเอียดขึ้น:

1. **เลขมหัศจรรย์ (magic numbers):** นิวเคลียสที่มีจำนวนโปรตอนหรือนิวตรอนตรงกับค่าใดค่าหนึ่งในชุด **2, 8, 20, 50, 82, 126** จะเสถียรเป็นพิเศษ (คล้ายกับที่อิเล็กตรอนครบออกเตตแล้วเสถียร) ถ้าทั้งโปรตอนและนิวตรอนตรงกับเลขมหัศจรรย์พร้อมกัน เรียกว่า **doubly magic** ยิ่งเสถียรมาก
2. **นิวเคลียสคู่-คู่เสถียรกว่าคี่-คี่:** จับคู่ (pairing) โปรตอนกับโปรตอน และนิวตรอนกับนิวตรอนแยกกันคนละคู่ ทำให้นิวเคลียสที่มีทั้งจำนวนโปรตอนเป็นเลขคู่และนิวตรอนเป็นเลขคู่ (even–even) เสถียรที่สุด รองลงมาคือคู่-คี่หรือคี่-คู่ (even–odd) ส่วนคี่-คี่ (odd–odd) เสถียรน้อยที่สุดและมีอยู่จริงในธรรมชาติเพียงไม่กี่ไอโซโทป
3. **ธาตุหนักมาก ($Z \geq 83$) ไม่มีไอโซโทปเสถียรเลยสักตัว:** ทุกไอโซโทปของทุกธาตุตั้งแต่บิสมัท (Bi, $Z = 83$) เป็นต้นไปเป็นกัมมันตรังสีทั้งหมด (แม้บางไอโซโทปจะมีครึ่งชีวิตยาวมากจนดูเหมือนเสถียร) และมีธาตุ 2 ตัวที่เบากว่านั้นแต่ไม่มีไอโซโทปเสถียรเลยเช่นกันคือ **เทคนีเชียม (Tc, $Z = 43$)** และ **โพรมีเทียม (Pm, $Z = 61$)**

ตัวอย่างโจทย์ 8.0.1 ไอโซโทป ${}^{40}_{20}\mathrm{Ca}$ จัดเป็นนิวเคลียสที่เสถียรที่สุดตัวหนึ่งในธรรมชาติ จงตรวจสอบว่าเข้าข่ายกฎความเสถียรข้อใดบ้าง

วิธีทำ

1. หาจำนวนนิวตรอน: $N = A - Z = 40 - 20 = 20$
2. เทียบกับเลขมหัศจรรย์ $2, 8, 20, 50, 82, 126$: $Z = 20$ ตรงพอดี และ $N = 20$ ตรงพอดีเช่นกัน → เป็น **doubly magic**
3. ทั้ง $Z = 20$ และ $N = 20$ เป็นเลขคู่ → เป็นนิวเคลียสแบบ **even–even** ด้วย

ตอบ ${}^{40}_{20}\mathrm{Ca}$ เข้าข่ายทั้งสองกฎพร้อมกัน (doubly magic และ even–even) จึงอธิบายได้ว่าทำไมแคลเซียม-40 จึงเป็นไอโซโทปที่เสถียรมากและพบมากที่สุดในธรรมชาติ (ราว 97% ของแคลเซียมทั้งหมด)

ระวัง: กฎเลขมหัศจรรย์และกฎคู่-คู่ใช้ **ทำนาย** แนวโน้มความเสถียรเท่านั้น ไม่ใช่กฎตายตัวที่บังคับว่าไอโซโทปนั้นต้องเสถียร 100% — ต้องดูร่วมกับ n/p ratio และข้อยกเว้นเรื่อง $Z \geq 83$, Tc, Pm เสมอ

อนุกรมการสลายตัวกัมมันตรังสี (decay chain)

ไอโซโทปหนักหลายตัว (เช่นธาตุที่ $Z \geq 83$ ตามกฎด้านบน) สลายตัวครั้งเดียวแล้วไม่ได้ไอโซโทปเสถียรทันที ลูกที่ได้ยังคงกัมมันตรังสีต่อ ต้องสลายตัวต่อไปอีกหลายขั้น สลับกันระหว่างแอลฟาและบีตา จนกว่าจะถึงไอโซโทปเสถียรปลายทาง เรียกลำดับการสลายตัวต่อเนื่องนี้ว่า **อนุกรมการสลายตัว (decay series/chain)** แต่ละขั้นมีครึ่งชีวิตของตัวเองแตกต่างกันได้มาก (ตั้งแต่เสี้ยววินาทีไปจนถึงพันล้านปี)

การนับจำนวนอนุภาคที่ปล่อยออกมาตลอดทั้งสาย ใช้หลักการเดียวกับการดุลสมการนิวเคลียร์ทั่วไป แต่คิดรวมทุกขั้นเป็นสมการเดียว: ให้ n_α = จำนวนอนุภาคแอลฟาทั้งหมด, n_β = จำนวนอนุภาคบีตาลบทั้งหมด เทียบไอโซโทปต้นทาง (A_0, Z_0) กับไอโซโทปปลายทางที่เสถียร (A_f, Z_f):

- แอลฟาแต่ละตัวลดเลขมวลลง 4 (ไม่กระทบเลขอะตอม): $A_0 - A_f = 4n_\alpha$
- บีตาลบแต่ละตัวเพิ่มเลขอะตอมขึ้น 1 โดยไม่กระทบเลขมวล ส่วนแอลฟาลดเลขอะตอมลง 2 ต่อตัว: $Z_0 - Z_f = 2n_\alpha - n_\beta$

ตั้งสองสมการนี้แล้วแก้หา n_α กับ n_β ได้พร้อมกัน (หา n_α จากสมการแรกก่อน แล้วแทนค่าลงสมการที่สองเพื่อหา n_β)

ตัวอย่างโจทย์ 8.0.2 ยูเรเนียม-238 ($^{238}_{92}\mathrm{U}$) สลายตัวต่อเนื่องหลายขั้นจนได้ไอโซโทปเสถียรปลายทางคือตะกั่ว-206 ($^{206}_{82}\mathrm{Pb}$) ตลอดทั้งสายปล่อยอนุภาคแอลฟาและบีตาลบรวมกันกี่ตัว

วิธีทำ

1. หาผลต่างเลขมวลและเลขอะตอม: $\Delta A = 238 - 206 = 32$, $\Delta Z = 92 - 82 = 10$
2. หาจำนวนแอลฟาจากผลต่างเลขมวล (แอลฟาเท่านั้นที่กระทบเลขมวล):

$$n_\alpha = \frac{\Delta A}{4} = \frac{32}{4} = 8$$

3. แทนค่า n_α ลงสมการเลขอะตอม แล้วแก้หา n_β:

$$\Delta Z = 2n_\alpha - n_\beta \quad \Rightarrow \quad n_\beta = 2n_\alpha - \Delta Z = 2(8) - 10 = 6$$

ตอบ ตลอดทั้งสาย U-238 → Pb-206 ปล่อยอนุภาคแอลฟา 8 ตัว และบีตาลบ 6 ตัว (ตรวจสอบ: เลขมวลลด $4 \times 8 = 32$ ตรงกับ ΔA ✓ เลขอะตอมเปลี่ยน $-2(8) + 6 = -10$ ตรงกับ ΔZ ✓) — นี่คืออนุกรมยูเรเนียมจริงในธรรมชาติ ซึ่งมีขั้นกลางกว่า 10 ขั้น

จุดสอบโปรด — ขั้นจำกัดอัตรา (rate-limiting step): แม้อนุกรมจะมีหลายขั้น แต่ถ้าขั้นหนึ่งมีครึ่งชีวิตยาวกว่าขั้นอื่น ๆ อย่างมาก (เช่น เป็นพันล้านปี ในขณะที่ขั้นอื่นเป็นวินาทีถึงชั่วโมง) ขั้นนั้นจะเป็นตัวกำหนดอัตราการลดลงของทั้งสายเกือบทั้งหมด เพราะสารตั้งต้นต้อง "รอ" ผ่านขั้นช้าที่สุดก่อนเสมอ ในทางปฏิบัติจึงประมาณอัตราการสลายของทั้งอนุกรมด้วยครึ่งชีวิตของขั้นจำกัดอัตราขั้นเดียวได้ (เหมือนกับที่ U-238 มีครึ่งชีวิตขั้นแรกยาวถึง 4.5×10^9 ปี ในขณะที่ขั้นกลางส่วนใหญ่เร็วกว่านั้นมาก)

ระวัง: อย่าเผลอคิดว่าทุกขั้นในอนุกรมต้องเป็นแอลฟาสลับบีตาเป๊ะ ๆ ลำดับจริงขึ้นกับไอโซโทปแต่ละสาย สิ่งที่ใช้ตั้งสมการได้แน่นอนคือ **ผลรวมของอนุภาคทั้งสาย** เทียบจากจุดเริ่มต้นกับจุดสิ้นสุดเท่านั้น ไม่ใช่ลำดับทีละขั้น

พลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียสและมวลพร่อง

ทำไมนิวเคลียสถึงยึดโปรตอนที่มีประจุบวกเหมือนกันไว้ด้วยกันได้ทั้งที่ควรผลักกัน? คำตอบคือมีแรงนิวเคลียร์อย่างเข้ม (strong force) คอยยึดไว้ และแรงนี้ "ปล่อยพลังงานออกมา" ตอนที่อนุภาคมารวมตัวกันเป็นนิวเคลียส พลังงานที่ปล่อยออกมานี้ทำให้ **มวลของนิวเคลียสน้อยกว่าผลรวมมวลของอนุภาคเดี่ยว ๆ ก่อนรวมตัว** ส่วนต่างของมวลเรียกว่า **มวลพร่อง** (mass defect, Δm):

$$\Delta m = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n + Z \cdot m_e) - m_{atom}$$

โดย m_{atom} คือมวลอะตอมจริงที่วัดได้ (มีทศนิยม) ส่วนพจน์แรกคือผลรวมมวลถ้าอนุภาคทั้งหมดแยกกันอยู่อิสระ ($m_p = 1.00728$ amu, $m_n = 1.00867$ amu, $m_e = 0.00055$ amu ตามตารางธาตุจริง)

มวลพร่องนี้แปลงเป็น **พลังงานยึดเหนี่ยว** (binding energy, BE) ได้ตามสมการของไอน์สไตน์ $E = mc^2$ โดยสะดวกที่สุดถ้าใช้หน่วยแปลงสำเร็จรูป 1 amu $= 931.5$ MeV/c^2:

$$BE = \Delta m \times 931.5 \text{ MeV}$$

ค่าที่มีความหมายเชิงเปรียบเทียบมากกว่า BE ทั้งก้อนคือ **พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลิออน** (BE_N, binding energy per nucleon):

$$BE_N = \frac{BE}{Z + N}$$

ยิ่งค่านี้สูง นิวเคลียสยิ่งเสถียร (ยึดแน่นเฉลี่ยต่ออนุภาค 1 ตัวมาก) เมื่อพล็อตกราฟ BE ต่อนิวคลิออนเทียบกับเลขมวล จะพบว่า **เหล็ก-56 (^{56}Fe) อยู่จุดสูงสุดของกราฟ** คือเสถียรที่สุดในบรรดาไอโซโทปทั้งหมด — นี่คือเหตุผลว่าทำไมฟิวชันของธาตุเบา (มุ่งเข้าหา Fe-56 จากด้านซ้าย) และฟิชชันของธาตุหนัก (มุ่งเข้าหา Fe-56 จากด้านขวา) จึงคายพลังงานออกมาได้ทั้งคู่

ตัวอย่างโจทย์ 8.0.3 ฮีเลียม-4 (^4_2He) มีมวลอะตอมจริง 4.002602 amu จงหามวลพร่องและพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลิออน

วิธีทำ

1. He-4 มีโปรตอน $Z = 2$ นิวตรอน $N = 4 - 2 = 2$ คำนวณมวลรวมถ้าแยกอนุภาคอิสระ:

$$2(1.00728) + 2(1.00867) + 2(0.00055) = 4.033 \text{ amu}$$

2. มวลพร่อง:

$$\Delta m = 4.033 - 4.002602 \approx 0.03040 \text{ amu}$$

3. พลังงานยึดเหนี่ยวรวม:

$$BE = 0.03040 \times 931.5 \approx 28.32 \text{ MeV}$$

4. พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลิออน (นิวคลิออนรวม $= 2 + 2 = 4$ ตัว):

$$BE_N = \frac{28.32}{4} \approx 7.08 \text{ MeV}$$

ตอบ $\Delta m \approx 0.0304$ amu, $BE \approx 28.3$ MeV, พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลิออน ≈ 7.08 MeV (ค่านี้สูงผิดปกติเมื่อเทียบกับธาตุข้างเคียงในตารางธาตุ ทำให้ He-4 เสถียรเป็นพิเศษ — เป็นเหตุผลที่อนุภาคแอลฟาคืออนุภาค ^4_2He พอดี ไม่ใช่นิวเคลียสอื่น)

ระวัง:

- อย่าลืมนับอิเล็กตรอนรวมเข้าไปด้วยตอนคำนวณมวลรวมแบบแยกอนุภาค (ใช้ m_{atom} ซึ่งเป็นมวล**อะตอมที่เป็นกลาง** ไม่ใช่มวลนิวเคลียสเปล่า ๆ จึงต้องบวกมวลอิเล็กตรอนของ Z ตัวเข้าไปในพจน์แรกด้วยเพื่อให้เทียบกันได้ตรงหน่วย)
- BE_N (พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลิออน) สูงสุดที่ Fe-56 ไม่ใช่ที่ธาตุหนักที่สุดหรือเบาที่สุด — เป็นจุดสูงสุดตรงกลางกราฟ ห้ามสรุปว่า "ยิ่งหนักยิ่งเสถียร" หรือ "ยิ่งเบายิ่งเสถียร" เพราะไม่จริงทั้งคู่

✏️ ฝึกทันที 24 ข้อ (ง่าย→ยาก)

ข้อ 69 ★☆☆☆☆

รังสีชนิดใดต่อไปนี้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ไม่มีประจุและไม่มีมวล จึงมีอำนาจทะลุทะลวงสูงที่สุด

ก. รังสีแอลฟา
ข. รังสีแกมมา
ค. รังสีบีตา
ง. รังสีแคโทด

ข้อ 70 ★★☆☆☆

ไอโซโทปกัมมันตรังสี Na-24 มีครึ่งชีวิต 15 ชั่วโมง ถ้าเริ่มต้นมี Na-24 อยู่ 8.00 กรัม เมื่อเวลาผ่านไป 2.5 วัน จะเหลือ Na-24 อยู่กี่กรัม

ก. 1.00 กรัม
ข. 0.50 กรัม
ค. 2.00 กรัม
ง. 0.25 กรัม

ข้อ 71 ★★☆☆☆

ในปฏิกิริยานิวเคลียร์ ${}^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{30}_{15}\mathrm{P} + \mathrm{X}$ อนุภาค X คือข้อใด

ก. โปรตอน (${}^{1}_{1}\mathrm{H}$)
ข. นิวตรอน (${}^{1}_{0}n$)
ค. อนุภาคบีตาลบ (${}^{0}_{-1}e$)
ง. อนุภาคแอลฟา (${}^{4}_{2}\mathrm{He}$)

ข้อ 72 ★★☆☆☆

ข้อใดกล่าวถึงอนุกรมการสลายตัวกัมมันตรังสี (decay series) ได้ถูกต้อง

ก. ไอโซโทปตั้งต้นทุกตัวสลายตัวได้ไอโซโทปเสถียรภายในขั้นตอนเดียวเสมอ
ข. แต่ละขั้นตอนในอนุกรมอาจมีครึ่งชีวิตแตกต่างกันมาก และขั้นที่มีครึ่งชีวิตยาวที่สุดจะเป็นตัวกำหนดอัตราการลดลงของทั้งสาย
ค. ทุกขั้นตอนในอนุกรมต้องเป็นการสลายตัวแบบแอลฟาเท่านั้น ไม่มีบีตาเกี่ยวข้อง
ง. ไอโซโทปลูกที่เกิดจากการสลายตัวขั้นแรกจะเสถียรทันทีเสมอ ไม่สลายตัวต่อ

ข้อ 73 ★★☆☆☆

ไอโซโทป $^{16}_{8}\mathrm{O}$ จัดเป็นนิวเคลียสที่เสถียรมากเป็นพิเศษเพราะเหตุใด (พิจารณาจากเลขมหัศจรรย์ $2, 8, 20, 50, 82, 126$)

- **ก.** มีทั้งจำนวนโปรตอนและนิวตรอนเท่ากับ 8 ซึ่งเป็นเลขมหัศจรรย์พร้อมกัน (doubly magic)
- **ข.** มีเฉพาะจำนวนโปรตอนเท่ากับเลขมหัศจรรย์ ส่วนนิวตรอนไม่ตรงกับเลขมหัศจรรย์ใดเลย
- **ค.** เป็นนิวเคลียสแบบคี่-คี่ (odd–odd) ซึ่งเสถียรที่สุดตามกฎการจับคู่
- **ง.** เพราะเลขมวลเป็นจำนวนคู่เพียงอย่างเดียว ไม่เกี่ยวข้องกับเลขมหัศจรรย์

ข้อ 74 ★★★☆☆

นิวไคลด์ $^{232}_{90}\mathrm{Th}$ สลายตัวโดยปล่อยอนุภาคแอลฟา 1 อนุภาค จากนั้นนิวไคลด์ที่เกิดขึ้นสลายตัวต่อโดยปล่อยอนุภาคบีตาลบ (β^-) อีก 2 อนุภาคตามลำดับ นิวไคลด์สุดท้ายที่ได้คือข้อใด

- **ก.** $^{228}_{88}\mathrm{Ra}$
- **ข.** $^{228}_{86}\mathrm{Rn}$
- **ค.** $^{224}_{90}\mathrm{Th}$
- **ง.** $^{228}_{90}\mathrm{Th}$

ข้อ 75 ★★★☆☆

ไอโซโทปกัมมันตรังสีชนิดหนึ่งสลายตัวไปร้อยละ 87.5 ของปริมาณเริ่มต้น ในเวลา 24 วัน ครึ่งชีวิตของไอโซโทปนี้เท่ากับข้อใด

- **ก.** 8 วัน
- **ข.** 12 วัน
- **ค.** 6 วัน
- **ง.** 3 วัน

ข้อ 76 ★★★☆☆

ทอเรียม-232 ($^{232}_{90}\mathrm{Th}$) สลายตัวต่อเนื่องหลายขั้นจนได้ไอโซโทปเสถียรปลายทางคือตะกั่ว-208 ($^{208}_{82}\mathrm{Pb}$) ตลอดทั้งสายปล่อยอนุภาคแอลฟาและบีตาลบรวมกันกี่ตัว

- **ก.** 8 ตัว (แอลฟา 6 ตัว บีตาลบ 2 ตัว)
- **ข.** 10 ตัว (แอลฟา 6 ตัว บีตาลบ 4 ตัว)
- **ค.** 14 ตัว (แอลฟา 8 ตัว บีตาลบ 6 ตัว)
- **ง.** 6 ตัว (แอลฟาเท่านั้น 6 ตัว)

ข้อ 77 ★★★☆☆

ยูเรเนียม-235 ($^{235}_{92}\mathrm{U}$) สลายตัวต่อเนื่องหลายขั้นจนได้ไอโซโทปเสถียรปลายทางคือตะกั่ว-207 ($^{207}_{82}\mathrm{Pb}$) ตลอดทั้งสายปล่อยอนุภาคบีตาลบทั้งหมดกี่ตัว

- **ก.** 3 ตัว
- **ข.** 4 ตัว
- **ค.** 7 ตัว
- **ง.** 10 ตัว

ข้อ 78 ★★★☆☆

จงพิจารณาไอโซโทป $^{16}_{8}\mathrm{O}$ และ $^{18}_{9}\mathrm{F}$ ข้อใดถูกต้องเกี่ยวกับความเสถียรของทั้งสอง โดยใช้กฎนิวเคลียสคู่-คู่/คี่-คี่

- **ก.** $^{16}_{8}\mathrm{O}$ เป็นนิวเคลียสคู่-คู่ (even–even) จึงเสถียร ส่วน $^{18}_{9}\mathrm{F}$ เป็นคี่-คี่ (odd–odd) จึงเสถียรน้อยกว่า สอดคล้องกับข้อเท็จจริงที่ F-18 เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี
- **ข.** ทั้งสองไอโซโทปเป็นแบบคู่-คู่เหมือนกัน จึงเสถียรพอ ๆ กัน
- **ค.** $^{18}_{9}\mathrm{F}$ เป็นคู่-คู่จึงเสถียรกว่า $^{16}_{8}\mathrm{O}$ ซึ่งเป็นคี่-คี่
- **ง.** กฎคู่-คู่/คี่-คี่ใช้ไม่ได้กับธาตุเบา ต้องใช้เฉพาะธาตุหนักเท่านั้น

ข้อ 79 ★★★☆☆

ลิเทียม-7 ($^{7}_{3}\mathrm{Li}$) มีมวลอะตอมจริง 7.016003 amu จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลิออน กำหนด $m_p = 1.00728$ amu, $m_n = 1.00867$ amu, $m_e = 0.00055$ amu, 1 amu $= 931.5$ MeV

ก. 5.61 MeV/นิวคลิออน

ข. 5.39 MeV/นิวคลิออน

ค. 7.08 MeV/นิวคลิออน

ง. 8.79 MeV/นิวคลิออน

ข้อ 80 ★★★☆☆ แนว สอวน.

ไอโอดีน-131 ($^{131}_{53}\mathrm{I}$) เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีที่ใช้ในทางการแพทย์เพื่อวินิจฉัยและรักษาโรคต่อมไทรอยด์ โดยสลายตัวให้อนุภาคบีตาลบ (β^-) กลายเป็นนิวไคลด์ Y ที่เสถียร ถ้าไอโอดีน-131 มีครึ่งชีวิต 8 วัน และผู้ป่วยได้รับสาร $^{131}_{53}\mathrm{I}$ เข้าสู่ร่างกายในปริมาณเริ่มต้น 32 มิลลิกรัม เมื่อเวลาผ่านไป 32 วัน จะมีไอโอดีน-131 เหลืออยู่กี่มิลลิกรัม และนิวไคลด์ Y ที่เกิดขึ้นมีเลขอะตอมเท่าใด

ก. เหลือ 4 มิลลิกรัม, เลขอะตอมของ Y เท่ากับ 54

ข. เหลือ 2 มิลลิกรัม, เลขอะตอมของ Y เท่ากับ 53

ค. เหลือ 2 มิลลิกรัม, เลขอะตอมของ Y เท่ากับ 52

ง. เหลือ 2 มิลลิกรัม, เลขอะตอมของ Y เท่ากับ 54

ข้อ 81 ★★★★☆

ไอโซโทปกัมมันตรังสี A สลายตัวให้นิวไคลด์เสถียร B โดยมีครึ่งชีวิต 6 ชั่วโมง เริ่มต้นมีแต่ A บริสุทธิ์เท่านั้น เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง พบว่าอัตราส่วนจำนวนอะตอม B ต่อ A เท่ากับ 7 : 1 เวลาที่ผ่านไปเท่ากับข้อใด

ก. 12 ชั่วโมง

ข. 42 ชั่วโมง

ค. 18 ชั่วโมง

ง. 24 ชั่วโมง

ข้อ 82 ★★★★☆

นักโบราณคดีตรวจชิ้นไม้โบราณชิ้นหนึ่ง พบว่ามีปริมาณ $^{14}\mathrm{C}$ เหลืออยู่ร้อยละ 6.25 ของปริมาณในเนื้อไม้ของต้นไม้ที่มีชีวิต กำหนดครึ่งชีวิตของ $^{14}\mathrm{C}$ เท่ากับ 5,730 ปี และ $^{14}\mathrm{C}$ สลายตัวโดยปล่อยรังสีบีตาลบ อายุของชิ้นไม้และนิวไคลด์ที่เกิดจากการสลายตัวคือข้อใด

ก. 17,190 ปี และได้ $^{14}_{7}\mathrm{N}$

ข. 22,920 ปี และได้ $^{10}_{4}\mathrm{Be}$

ค. 17,190 ปี และได้ $^{14}_{5}\mathrm{B}$

ง. 22,920 ปี และได้ $^{14}_{7}\mathrm{N}$

ข้อ 83 ★★★★☆

สารกัมมันตรังสี X เป็นต้นสายของอนุกรมการสลายตัวที่มีหลายขั้น ขั้นแรก ($\mathrm{X} \rightarrow \mathrm{Y}$) มีครึ่งชีวิตยาวถึง 2.0×10^8 ปี ส่วนขั้นถัดไปทั้งหมดมีครึ่งชีวิตสั้นกว่านี้มาก (ระดับวินาทีถึงชั่วโมง) จึงถือว่าขั้นแรกเป็นขั้นจำกัดอัตรา (rate-limiting step) ของทั้งสาย ถ้าเริ่มต้นมี X บริสุทธิ์ 800 g เมื่อเวลาผ่านไป 6.0×10^8 ปี จะเหลือ X อยู่กี่กรัม (ประมาณจากครึ่งชีวิตของขั้นจำกัดอัตราเพียงขั้นเดียว)

ก. 400 g

ข. 200 g

ค. 100 g

ง. 25 g

ข้อ 84 ★★★★☆

บิสมัท-209 ($^{209}_{83}\mathrm{Bi}$) เคยถูกเข้าใจว่าเป็นไอโซโทปเสถียรที่หนักที่สุด แต่ในปี ค.ศ. 2003 นักวิทยาศาสตร์ตรวจพบว่าแท้จริงแล้วเป็นกัมมันตรังสี (สลายตัวแบบแอลฟาด้วยครึ่งชีวิตยาวมากราว 2×10^{19} ปี) ข้อใดอธิบายข้อเท็จจริงนี้ได้สอดคล้องกับกฎความเสถียรของนิวเคลียสมากที่สุด

ก. ธาตุทุกชนิดที่มี $Z \geq 83$ ไม่มีไอโซโทปเสถียรเลยแม้แต่ตัวเดียว บิสมัทมี $Z = 83$ จึงเข้าข่ายกฎนี้พอดี แม้ครึ่งชีวิตจะยาวมากจนดูเหมือนเสถียรในทางปฏิบัติ

ข. เพราะบิสมัทมีนิวตรอนมากกว่าโปรตอนผิดปกติมากที่สุดในบรรดาธาตุทั้งหมด

ค. เพราะเลขมวล 209 ไม่ใช่เลขมหัศจรรย์ จึงเป็นเหตุผลหลักที่ทำให้ไม่เสถียร

ง. เป็นข้อยกเว้นเฉพาะตัวที่ไม่เกี่ยวข้องกับกฎความเสถียรข้อใดเลย

ข้อ 85 ★★★★☆

เทคนีเชียม (Tc, $Z = 43$) มีอัตราส่วน n/p ที่ดูเหมาะสมใกล้เคียงธาตุข้างเคียงในตารางธาตุ แต่กลับไม่มีไอโซโทปเสถียรแม้แต่ตัวเดียวในธรรมชาติ ข้อใดอธิบายได้ถูกต้องที่สุด

ก. Tc ($Z = 43$) และโพรมีเทียม Pm ($Z = 61$) เป็นข้อยกเว้นพิเศษสองธาตุที่เบากว่า $Z = 83$ แต่ไม่มีไอโซโทปเสถียรเลย ทั้งที่ n/p ratio อยู่ในช่วงที่ควรเสถียรได้

ข. เพราะ Tc มีเลขอะตอม $Z \geq 83$ เช่นเดียวกับบิสมัท

ค. เพราะ Tc เป็นธาตุแทรนซิชัน และธาตุแทรนซิชันทุกตัวไม่มีไอโซโทปเสถียร

ง. เพราะ Tc มีเลขอะตอมเป็นเลขคี่ และธาตุที่มีเลขอะตอมเป็นเลขคี่ทุกตัวไม่มีไอโซโทปเสถียร

ข้อ 86 ★★★★☆

ออกซิเจน-16 ($^{16}_{8}\mathrm{O}$) มีมวลอะตอมจริง 15.994915 amu จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวรวมของนิวเคลียส (ไม่ใช่ต่อนิวคลิออน) กำหนด $m_p = 1.00728$ amu, $m_n = 1.00867$ amu, $m_e = 0.00055$ amu, 1 amu $= 931.5$ MeV

ก. 127.7 MeV

ข. 7.98 MeV

ค. 255.4 MeV

ง. 63.85 MeV

ข้อ 87 ★★★★☆

เหล็ก-56 ($^{56}_{26}\mathrm{Fe}$) มีมวลอะตอมจริง 55.934942 amu จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลิออน กำหนด $m_p = 1.00728$ amu, $m_n = 1.00867$ amu, $m_e = 0.00055$ amu, 1 amu $= 931.5$ MeV

ก. 8.80 MeV/นิวคลิออน (สูงสุดในบรรดาไอโซโทปทั้งหมด สอดคล้องกับที่ Fe-56 เสถียรที่สุด)

ข. 7.98 MeV/นิวคลิออน (เท่ากับค่าของ O-16 พอดี)

ค. 17.6 MeV/นิวคลิออน (คำนวณโดยหารด้วยจำนวนนิวคลิออนครึ่งหนึ่ง)

ง. 4.40 MeV/นิวคลิออน (คำนวณโดยหารด้วย 2 ซ้ำอีกครั้ง)

ข้อ 88 ★★★★☆

ดิวเทอเรียม ($^{2}_{1}\mathrm{H}$) มีมวลอะตอมจริง 2.014102 amu จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลิออน กำหนด $m_p = 1.00728$ amu, $m_n = 1.00867$ amu, $m_e = 0.00055$ amu, 1 amu $= 931.5$ MeV

ก. 1.12 MeV/นิวคลิออน (ต่ำกว่า He-4 มาก แสดงว่าฟิวชันดิวเทอเรียมรวมเป็นฮีเลียมคายพลังงานออกมาได้มาก)

ข. 2.23 MeV/นิวคลิออน (เท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวรวมพอดี)

ค. 7.08 MeV/นิวคลิออน (เท่ากับค่าของ He-4)

ง. 0.56 MeV/นิวคลิออน (หารด้วยจำนวนนิวคลิออนผิดเป็น 4 ตัว)

ข้อ 89 ★★★★★

นิวไคลด์ $^{210}_{84}\mathrm{Po}$ สลายตัวปล่อยอนุภาคแอลฟาได้ $^{206}_{82}\mathrm{Pb}$ โดยมีครึ่งชีวิต 138 วัน ถ้าเริ่มต้นมี Po-210 บริสุทธิ์ 42.0 กรัม เมื่อเวลาผ่านไป 276 วัน จะเกิด Pb-206 ขึ้นกี่กรัม (กำหนดมวลต่อโมลของ Po-210 = 210 g/mol และ Pb-206 = 206 g/mol)

ก. 31.5 กรัม
ข. 10.5 กรัม
ค. 20.6 กรัม
ง. 30.9 กรัม

ข้อ 90 ★★★★★

สารตัวอย่างหนึ่งประกอบด้วยไอโซโทปกัมมันตรังสี 2 ชนิด คือไอโซโทป A ซึ่งมีครึ่งชีวิต 2 วัน และไอโซโทป B ซึ่งมีครึ่งชีวิต 6 วัน โดยที่เวลาเริ่มต้นมีจำนวนอะตอมของ A และ B เท่ากันพอดี เมื่อเวลาผ่านไปนานเท่าใด อัตราส่วนจำนวนอะตอมของ B ต่อ A ที่เหลืออยู่จะเท่ากับ 64

ก. 12 วัน
ข. 36 วัน
ค. 18 วัน
ง. 24 วัน

ข้อ 91 ★★★★★

ไอโซโทปกัมมันตรังสี Y สลายตัวต่อเนื่องหลายขั้น โดยตลอดทั้งสายปล่อยอนุภาคแอลฟา 5 ตัว และบีตาลบ 3 ตัว จนได้ไอโซโทปเสถียรปลายทางคือตะกั่ว-206 ($^{206}_{82}\mathrm{Pb}$) จงหาเลขมวลและเลขอะตอมของไอโซโทปตั้งต้น Y

ก. A = 226, Z = 89
ข. A = 226, Z = 92
ค. A = 226, Z = 95
ง. A = 211, Z = 89

ข้อ 92 ★★★★★

จากข้อมูลพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลิออนที่คำนวณได้: He-4 ≈ 7.08 MeV/นิวคลิออน และ Fe-56 ≈ 8.80 MeV/นิวคลิออน จงพิจารณาปฏิกิริยาฟิวชันที่หลอมรวมนิวเคลียสเบา (เช่น He-4) ให้เกิดเป็นนิวเคลียสที่หนักขึ้นเข้าใกล้ Fe-56 มากขึ้น ข้อใดถูกต้อง

ก. ปฏิกิริยานี้คายพลังงานสุทธิออกมา เพราะผลิตภัณฑ์มีพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลิออนสูงขึ้น (เสถียรขึ้น) มวลส่วนที่หายไปแปลงเป็นพลังงานตาม $E = mc^2$
ข. ปฏิกิริยานี้ดูดพลังงานสุทธิเข้าไป เพราะต้องใช้พลังงานสูงมากในการเอาชนะแรงผลักไฟฟ้าสถิตระหว่างนิวเคลียส
ค. ปฏิกิริยานี้ไม่คายหรือดูดพลังงานเลย เพราะเป็นเพียงการจัดเรียงนิวคลีออนใหม่โดยจำนวนรวมไม่เปลี่ยน
ง. ปฏิกิริยาฟิวชันคายพลังงานเสมอไม่ว่าจะหลอมรวมไปทางทิศทางใดของกราฟพลังงานยึดเหนี่ยว

9 สรุปและจุดพลาดบ่อย

📌 สรุปสูตรและประเด็นต้องจำ

เรื่อง	สูตร/ค่า	หมายเหตุ
เลขมวล	$A = Z + N$	Z = โปรตอน, N = นิวตรอน
อิเล็กตรอนของไอออน	บวก m: $e = Z - m$; ลบ m: $e = Z + m$	นิวเคลียสไม่เปลี่ยน
มวลอะตอมเฉลี่ย	$\bar{m} = \sum(\text{mass} \times \text{fraction})$	เศษส่วนรวมต้องเป็น 1
ระดับพลังงานไฮโดรเจน	$E_n = -\dfrac{2.18 \times 10^{-18}}{n^2}\ \text{J}$	ใช้ได้เฉพาะระบบอิเล็กตรอนเดียว
พลังงานโฟตอน	$\Delta E = h\nu = \dfrac{hc}{\lambda}$	$h = 6.626 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$, $c = 3.00 \times 10^{8}\ \text{m/s}$
สูตรริดเบิร์ก	$\dfrac{1}{\lambda} = R\left(\dfrac{1}{n_1^2} - \dfrac{1}{n_2^2}\right)$	$R = 1.097 \times 10^{7}\ \text{m}^{-1}$
อนุกรมสเปกตรัม	Lyman → $n = 1$ (UV), Balmer → $n = 2$ (visible), Paschen → $n = 3$ (IR)	จำจากชั้นปลายทาง
ความจุชั้น	$2n^2$ แต่ชั้นนอกสุดไม่เกิน 8	ชั้น 1–4: 2, 8, 18, 32
ออร์บิทัลต่อระดับ	n^2 ออร์บิทัล, $2n^2$ อิเล็กตรอน	s, p, d, f จุ $2, 6, 10, 14$
ขอบเขตเลขควอนตัม	$l = 0 \ldots n-1$; $m_l = -l \cdots +l$; $m_s = \pm\frac{1}{2}$	ใช้เช็กชุดเลขว่าเป็นไปได้ไหม
ลำดับ Aufbau	$1s\ 2s\ 2p\ 3s\ 3p\ 4s\ 3d\ 4p\ 5s\ 4d\ 5p\ 6s$	$4s$ มาก่อน $3d$ ตอนเติม
ข้อยกเว้น	Cr: $4s^1 3d^5$, Cu: $4s^1 3d^{10}$	ครึ่งเต็ม/เต็มเสถียรพิเศษ
ไอออนแทรนซิชัน	ดึง $4s$ ออกก่อน $3d$ เสมอ	เช่น Fe^{3+} = $[\text{Ar}]3d^5$
โฟโตอิเล็กทริก	$KE_{max} = h\nu - \Phi, \nu_0 = \Phi/h$	ความสว่าง → จำนวนอิเล็กตรอน; ความถี่ → พลังงานต่อตัว
เดอบรอยล์	$\lambda = h/mv$	เห็นผลชัดเฉพาะอนุภาคเบามาก
ไฮเซนเบิร์ก	$\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$	ยิ่งรู้ตำแหน่งแน่นอน ยิ่งไม่รู้ความเร็ว

เรื่อง	สูตร/ค่า	หมายเหตุ
เลขมหัศจรรย์	$2, 8, 20, 50, 82, 126$	ตรงทั้ง Z และ N = doubly magic
ธาตุกัมมันตรังสีล้วน	$Z \geq 83$ ทุกไอโซโทป, รวม Tc ($Z = 43$), Pm ($Z = 61$)	ไม่มีไอโซโทปเสถียรเลย
นับอนุภาคในอนุกรมสลายตัว	$A_0 - A_f = 4n_\alpha$, $Z_0 - Z_f = 2n_\alpha - n_\beta$	แก้ระบบสมการสองตัวแปร
มวลพร่อง/พลังงานยึดเหนี่ยว	$BE = \Delta m \times 931.5$ MeV	BE ต่อนิวคลิออนสูงสุดที่ Fe-56

⚠ จุดที่เด็กพลาดบ่อย

- **สับสนเลขมวลกับมวลอะตอม** — เลขมวล A เป็นจำนวนเต็มเสมอ (นับก้อนอนุภาค) ส่วนมวลอะตอมในตารางธาตุมีทศนิยมเพราะเป็นค่าเฉลี่ยไอโซโทป วิธีเลี่ยง: เห็นทศนิยมเมื่อไร นั่นคือมวลเฉลี่ย ห้ามเอาไปลบ Z หานิวตรอนตรงๆ
- **นับอิเล็กตรอนไอออนกลับด้าน** — เห็นประจุ $2+$ แล้วเผลอ "บวก" อิเล็กตรอนเพิ่ม วิธีเลี่ยง: ท่องว่า "ประจุบวก = เสียของ" อิเล็กตรอนต้องลดลง แล้วเช็กว่าไอออนบวกต้อง $e < Z$ เสมอ
- **คิดว่าไอออนมีนิวตรอนเปลี่ยน** — การเกิดไอออนแตะแค่อิเล็กตรอน Z กับ N เท่าเดิมทุกกรณี
- **จำอนุกรมสเปกตรัมสลับ** — Balmer เท่านั้นที่ตามองเห็น วิธีเลี่ยง: จำ "ตกลงชั้น 2 เห็นด้วยตา" เพราะเส้น 656 nm (แดง) ที่คำนวณในบทนี้คือ Balmer
- **ลืมว่าพลังงานกับความยาวคลื่นสวนทาง** — คายพลังงานมาก = λ สั้น ไม่ใช่ยาว วิธีเลี่ยง: มองสูตร $\Delta E = hc/\lambda - \lambda$ อยู่ตัวส่วน
- **จัดชั้นนอกสุดเกิน 8** — K เขียน 2, 8, 9 คือผิดคลาสสิก ต้องเป็น 2, 8, 8, 1 วิธีเลี่ยง: ทุกครั้งที่จัดเสร็จ เหลือบดูตัวเลขขวาสุดว่าไม่เกิน 8
- **เขียน Cr/Cu ตาม Aufbau ตรงๆ** — $4s^2 3d^4$ กับ $4s^2 3d^9$ คือคำตอบที่ข้อสอบดักไว้ ต้องเป็น $4s^1 3d^5$ และ $4s^1 3d^{10}$
- **ดึงอิเล็กตรอนไอออนแทรนซิชันจาก $3d$ ก่อน** — ผิด! เติม $4s$ ก่อนแต่ดึง $4s$ ก่อนด้วย วิธีเลี่ยง: จำว่า "เข้าก่อน–ออกก่อน" สำหรับ $4s$
- **ให้ $l = n$ ได้** — ชุดเลขควอนตัมอย่าง $(2, 2, 0)$ เป็นไปไม่ได้ เพราะ l สูงสุดคือ $n - 1$ วิธีเลี่ยง: เช็กเงื่อนไขไล่จาก $n \to l \to m_l$ ทีละชั้นทุกครั้ง
- **ลืมกฎฮุนด์ตอนนับอิเล็กตรอนเดี่ยว** — เช่น $3d^6$ ต้องกาง 5 ช่องแล้วกระจายเดี่ยวก่อนจับคู่ ได้เดี่ยว 4 ตัว ไม่ใช่เอา 6 หาร 2 วิธีเลี่ยง: วาดกล่องออร์บิทัลจริงๆ ทุกครั้ง อย่าคิดในหัว
- **สับสนความสว่างกับความถี่ในโฟโตอิเล็กทริก** — เพิ่มความสว่างไม่ทำให้ KE_{max} เพิ่ม (ได้แค่จำนวนอิเล็กตรอนมากขึ้น) วิธีเลี่ยง: มองสูตร $KE_{max} = h\nu - \Phi$ — ไม่มีตัวแปรความสว่างอยู่ในสูตรเลย
- **ลืมนับอิเล็กตรอนในมวลรวมตอนหามวลพร่อง** — ต้องบวกมวลอิเล็กตรอน Z ตัวด้วยเสมอเพราะ m_{atom} เป็นมวลอะตอมที่เป็นกลาง ไม่ใช่มวลนิวเคลียสเปล่า
- **นับ n_α, n_β ในอนุกรมสลายตัวผิดสมการ** — ใช้แค่ผลต่างเลขมวลหาแอลฟาได้เลย แต่ผลต่างเลขอะตอมต้องคิดทั้งแอลฟาและบีตารวมกัน ($2n_\alpha - n_\beta$) วิธีเลี่ยง: ตั้งสองสมการแยกกันเสมอ อย่าคิดลัดจากสมการเดียว

เฉลยย่อ บทที่ 2

1. ค	2. ค	3. ค	4. ก	5. ข	6. ข	7. ค	8. ง	9. ข	10. ข	11. ก	12. ก	13. ข
14. ง	15. ค	16. ง	17. ง	18. ค	19. ก	20. ค	21. ค	22. ค	23. ข	24. ข	25. ก	26. ก
27. ค	28. ง	29. ก	30. ข	31. ก	32. ค	33. ค	34. ก	35. ก	36. ก	37. ค	38. ก	39. ข
40. ข	41. ก	42. ข	43. ก	44. ก	45. ก	46. ค	47. ง	48. ก	49. ง	50. ก	51. ก	52. ก
53. ก	54. ก	55. ข	56. ง	57. ข	58. ข	59. ก	60. ข	61. ข	62. ข	63. ค	64. ก	65. ง
66. ก	67. ง	68. ง	69. ข	70. ข	71. ข	72. ข	73. ก	74. ง	75. ก	76. ข	77. ข	78. ก
79. ก	80. ง	81. ค	82. ง	83. ค	84. ก	85. ก	86. ก	87. ก	88. ก	89. ง	90. ค	91. ก
92. ก												

เฉลยละเอียด บทที่ 2

ข้อ 1 — ตอบ ค.

อะตอมส่วนใหญ่เป็นที่ว่าง โดยประจุบวกและมวลเกือบทั้งหมดรวมกันอยู่ในนิวเคลียสขนาดเล็กตรงกลาง

> ❶ **ขั้นที่ 1:** อนุภาคแอลฟามีประจุบวกและมีมวลมาก การที่อนุภาคส่วนใหญ่ทะลุผ่านแผ่นทองคำไปเป็นเส้นตรง แสดงว่าภายในอะตอมส่วนใหญ่ต้องเป็น **ที่ว่าง**

> ❷ **ขั้นที่ 2:** การที่อนุภาคจำนวนน้อยมากเบี่ยงเบนเป็นมุมกว้างหรือสะท้อนกลับ แสดงว่ามีบริเวณเล็ก ๆ ที่ประจุบวกและมวลอัดแน่นอยู่ จึงผลักอนุภาคแอลฟา (ประจุบวกด้วยกัน) อย่างแรงได้ รัทเทอร์ฟอร์ดเรียกบริเวณนี้ว่า **นิวเคลียส**

วิเคราะห์ตัวเลือกอื่น:

- "ทรงกลมตันแบ่งแยกไม่ได้" คือแบบจำลองของ **ดอลตัน** ซึ่งถูกล้มไปตั้งแต่ค้นพบอิเล็กตรอน
- "ประจุบวกกระจายสม่ำเสมอ มีอิเล็กตรอนฝัง" คือแบบจำลองของ **ทอมสัน** ซึ่งอธิบายการสะท้อนกลับของอนุภาคแอลฟาไม่ได้ เพราะประจุบวกที่กระจายเจือจางไม่มีแรงผลักมากพอ
- "วงโคจรที่มีระดับพลังงานคงตัว" คือแบบจำลองของ **โบร์** ซึ่งเสนอภายหลังเพื่ออธิบายสเปกตรัมเส้น ไม่ใช่ข้อสรุปจากการทดลองนี้

ข้อ 2 — ตอบ ค.

รังสีแคแนลเบี่ยงเบนเข้าหาขั้วลบของสนามไฟฟ้า และค่าประจุต่อมวลเปลี่ยนไปตามชนิดของแก๊สในหลอด

> **หลักคิด:** รังสีแคแนลเกิดจากอะตอมของแก๊สในหลอดถูกอิเล็กตรอน (รังสีแคโทด) ชนจนอิเล็กตรอนหลุดออก กลายเป็น **ไอออนบวกของแก๊ส** ซึ่งถูกดูดเข้าหาขั้วแคโทด (ขั้วลบ) แล้วบางส่วนทะลุผ่านรูออกไปด้านหลัง

เปรียบเทียบสมบัติ:

- **ประจุ:** รังสีแคแนลมีประจุบวก จึงเบี่ยงเบน **เข้าหาขั้วลบ** ของสนามไฟฟ้า (ตรงข้ามกับรังสีแคโทดที่มีประจุลบซึ่งเบี่ยงเข้าหาขั้วบวก)
- **ค่าประจุต่อมวล (q/m):** รังสีแคแนลคือไอออนของแก๊สแต่ละชนิด มวลจึงต่างกันตามชนิดแก๊ส ค่า q/m จึง **เปลี่ยนไปตามชนิดของแก๊สในหลอด** — ต่างจากรังสีแคโทดที่ได้ค่า e/m เท่าเดิมเสมอเพราะเป็นอิเล็กตรอนเหมือนกันหมด (การทดลองกับแก๊สไฮโดรเจนให้ไอออนบวกที่เบาที่สุด ซึ่งนำไปสู่การค้นพบโปรตอน)

> **ที่มาของตัวลวง:**

- "เบี่ยงเข้าหาขั้วบวกและ q/m คงที่" — สลับสมบัติของรังสีแคโทดมาใส่รังสีแคแนลทั้งสองข้อ (จำสูตร e/m คงที่ของทอมสันมาใช้ผิดอนุภาค)
- "ไม่เบี่ยงเบนเพราะเป็นกลาง" — สับสนกับนิวตรอนหรือรังสีแกมมา รังสีแคแนลเป็นไอออนบวกจึงเบี่ยงเบนในสนามไฟฟ้าแน่นอน
- "อนุภาคเดียวกันแต่สวนทาง" — เข้าใจผิดจากภาพการเคลื่อนที่สวนทางกัน ความจริงเป็นคนละอนุภาค: รังสีแคโทดคืออิเล็กตรอน ส่วนรังสีแคแนลคือไอออนบวกของแก๊สซึ่งมีมวลมากกว่าหลายพันเท่า

ข้อ 3 — ตอบ ค.

12 ตัว

❶ **ขั้นที่ 1:** ระบุอนุภาคจากตาราง — X มีประจุ -1 มวลน้อยมาก คือ **อิเล็กตรอน**, Y ไม่มีประจุ มวลประมาณ 1 u คือ **นิวตรอน**, Z มีประจุ $+1$ มวลประมาณ 1 u คือ **โปรตอน**

❷ **ขั้นที่ 2:** อนุภาค Y (นิวตรอน) ของ $^{23}_{11}\mathrm{Na}$ หาจาก

$$n = A - Z = 23 - 11 = 12$$

ดังนั้นมีนิวตรอน **12 ตัว**

ที่มาของตัวลวง:

- 11 ตัว — สับสนว่า Y คือโปรตอน (ดูมวลใกล้เคียงกันแต่ไม่ดูประจุ) หรืออ่านเลขอะตอมมาตอบตรง ๆ
- 23 ตัว — เอาเลขมวลมาตอบ ลืมหักเลขอะตอมออก
- 34 ตัว — บวก $A + Z = 23 + 11$ แทนที่จะลบ

ระวัง: มวลนิวตรอน (1.0087 u) มากกว่าโปรตอน (1.0073 u) เล็กน้อย — จุดแยกสองอนุภาคนี้ที่ชัดที่สุดคือ **ประจุ** ไม่ใช่มวล

ข้อ 4 — ตอบ ก.

จำนวนอิเล็กตรอนเท่ากัน

หลักคิด: Al^{3+} เสียอิเล็กตรอนไป 3 ตัวจาก $Z = 13$ เหลืออิเล็กตรอน $13 - 3 = 10$ ตัว เท่ากับจำนวนอิเล็กตรอนของ Ne ($Z = 10$) พอดี จึงเป็น **ไอโซอิเล็กทรอนิก** (isoelectronic) กัน ส่วนโปรตอนต่างกันชัดเจน (13 กับ 10) และโจทย์ไม่ได้ให้ข้อมูลเลขมวลของ Al มาเลย จึงเทียบเลขมวล/นิวตรอนไม่ได้อยู่แล้ว

ระวัง: อย่าเข้าใจผิดว่าไอออนบวกมีจำนวนโปรตอนลดลงตามประจุ — การเกิดไอออนกระทบ**เฉพาะอิเล็กตรอน** โปรตอนของ Al ยังคงเป็น 13 เท่าเดิมเสมอไม่ว่าจะอยู่ในรูปไอออนใด

ข้อ 5 — ตอบ ข.

(ก) และ (ข)

ตรวจทีละข้อความ:

(ก) ถูก — เมื่อวางสนามไฟฟ้าคร่อมลำรังสีแคโทด รังสีเบี่ยงเบนเข้าหาแผ่นขั้วบวกเสมอ ประจุชนิดเดียวที่ถูกขั้วบวกดูดคือ **ประจุลบ** จึงสรุปได้ว่าอนุภาคในรังสี (อิเล็กตรอน) มีประจุลบ

(ข) ถูก — ทอมสันทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนทั้งชนิดแก๊สในหลอดและโลหะที่ทำขั้วแคโทด พบว่าค่า e/m ได้เท่าเดิมประมาณ 1.76×10^8 C/g เสมอ แปลว่าอนุภาคนี้ไม่ได้ขึ้นกับชนิดของสาร จึงต้องเป็น **อนุภาคพื้นฐานที่มีอยู่ในอะตอมของทุกธาตุ**

(ค) ผิด — การทดลองหลอดรังสีแคโทดวัดได้เพียง **อัตราส่วนประจุต่อมวล (e/m)** เท่านั้น ยังแยกค่า e กับ m ออกจากกันไม่ได้ ค่าประจุของอิเล็กตรอน (1.6×10^{-19} C) มาจาก **การทดลองหยดน้ำมันของมิลลิแกน** ในภายหลัง แล้วจึงนำมาคำนวณย้อนหามวลอิเล็กตรอนได้

ที่มาของตัวลวง: ผู้เรียนจำนวนมากจำสลับกันว่าทอมสันวัดประจุได้เลย ซึ่งเป็น misconception ที่ข้อสอบชอบนำมาออก — ต้องแยกให้ชัดว่า ทอมสัน = e/m, มิลลิแกน = e

ดังนั้นข้อความที่ถูกคือ **(ก) และ (ข)**

ข้อ 6 — ตอบ ข.

อนุภาคแอลฟาเกือบทั้งหมดทะลุผ่านเป็นเส้นตรงหรือเบี่ยงเบนเพียงมุมเล็กน้อย ไม่มีอนุภาคใดสะท้อนกลับ

หลักคิด: ข้อนี้ถามการ **ทำนายผลจากแบบจำลอง** ไม่ใช่ผลการทดลองจริง — ต้องคิดว่าถ้าประจุบวกกระจายเจือจางทั่วอะตอมตามทอมสัน แรงที่กระทำต่ออนุภาคแอลฟาจะเป็นอย่างไร

1 **ขั้นที่ 1:** ตามแบบจำลองทอมสัน ประจุบวกทั้งหมดของอะตอมเกลี่ยกระจายในปริมาตรทั้งก้อนของอะตอม ความหนาแน่นประจุ ณ จุดใด ๆ จึงต่ำมาก ไม่มีจุดใดที่ประจุและมวลอัดแน่น

2 **ขั้นที่ 2:** อนุภาคแอลฟามีมวลมากและเคลื่อนที่เร็ว เมื่อวิ่งผ่านประจุบวกที่เจือจาง แรงผลักที่ได้รับ ณ แต่ละจุดจะน้อยมาก ผลรวมจึงทำให้เบี่ยงเบนได้เพียง **มุมเล็กน้อย** เท่านั้น — ไม่มีทางเกิดการสะท้อนกลับ เพราะไม่มีศูนย์รวมมวลและประจุที่แรงพอจะหยุดและผลักอนุภาคแอลฟากลับได้

3 **ขั้นที่ 3:** การที่ผลทดลองจริงพบอนุภาคส่วนน้อยสะท้อนกลับเป็นมุมกว้าง จึง **ขัดแย้ง** กับคำทำนายนี้ ทำให้ต้องล้มแบบจำลองทอมสันแล้วเสนอว่าประจุบวกและมวลรวมกันอยู่ในนิวเคลียสเล็ก ๆ แทน

ที่มาของตัวลวง:

- "ส่วนใหญ่สะท้อนกลับ" — เข้าใจผิดว่าประจุบวกยิ่งเต็มทั้งก้อนยิ่งผลักแรง ความจริงประจุที่กระจายเจือจางให้แรง ณ จุดใด ๆ น้อยมาก การสะท้อนกลับต้องอาศัยประจุอัดแน่นเป็นจุดเดียว
- "ถูกดูดกลืน" — ประจุบวกกับประจุบวก **ผลัก** กัน ไม่ดูดกัน
- "เหมือนผลทดลองจริง" — สับสนระหว่างผลทำนายของแบบจำลองทอมสันกับผลการทดลองจริง ซึ่งเป็นคนละสิ่ง ถ้าทำนายได้ตรงจริง รัทเทอร์ฟอร์ดก็ไม่จำเป็นต้องเสนอแบบจำลองใหม่

ข้อ 7 — ตอบ ค.

1.6×10^{-19} C และ 5 ตัว

หลักคิดของมิลลิแกน: ประจุของหยดน้ำมันแต่ละหยดเกิดจากอิเล็กตรอนเกินจำนวน **เต็มจำนวน** ดังนั้นประจุทุกหยดต้องเป็น **จำนวนเท่าของประจุอิเล็กตรอน** ค่าประจุอิเล็กตรอนคือ **ตัวหารร่วมที่มากที่สุด** ของประจุทุกหยด

1 **ขั้นที่ 1:** หาตัวหารร่วมมากของ $3.2, 4.8, 8.0, 12.8$ (หน่วย $\times 10^{-19}$ C)

$$3.2 = 2 \times 1.6 \qquad 4.8 = 3 \times 1.6 \qquad 8.0 = 5 \times 1.6 \qquad 12.8 = 8 \times 1.6$$

ทุกค่าหารด้วย 1.6×10^{-19} ลงตัวเป็นจำนวนเต็ม (2, 3, 5, 8 ตัว) ดังนั้นประจุอิเล็กตรอน $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C

2 **ขั้นที่ 2:** หยดที่มีประจุ 8.0×10^{-19} C มีอิเล็กตรอนเกิน

$$\frac{8.0 \times 10^{-19}}{1.6 \times 10^{-19}} = 5$$

ดังนั้นหยดนี้มีอิเล็กตรอนเกินอยู่ **5 ตัว**

ที่มาของตัวลวง:

- "1.6×10^{-19} C และ 4 ตัว" — หาค่า e ถูกแต่นับผิด ($8.0/1.6 = 5$ ไม่ใช่ 4)
- "3.2×10^{-19} C และ 2 ตัว" — มาจาก misconception ว่าประจุที่ **น้อยที่สุดที่วัดได้** คือประจุอิเล็กตรอน ซึ่งผิด เพราะหยดที่เล็กที่สุดในการทดลองอาจมีอิเล็กตรอนเกินมากกว่า 1 ตัวก็ได้ (และ $8.0/3.2 = 2.5$ ไม่ใช่จำนวนเต็ม จึงขัดแย้งกันเอง)
- "8.0×10^{-20} C" — เป็นตัวหารร่วมจริงแต่ **ไม่ใช่ตัวหารร่วมที่มากที่สุด** หลักการของการทดลองให้เลือกค่ามากที่สุดที่หารประจุทุกหยดลงตัว

ข้อ 8 — ตอบ ง.

9.09×10^{-28} g และ 5.47×10^{-4} g

หลักคิด: นี่คือวิธีที่นักวิทยาศาสตร์หามวลอิเล็กตรอนจริงในประวัติศาสตร์ — ทอมสันวัดได้แค่อัตราส่วน e/m ต่อมามิลลิแกนวัดค่า e ได้โดยตรง จึงนำสองค่ามาหารกันเพื่อแยกหา m

1 ขั้นที่ 1: จาก $\frac{e}{m} = 1.76 \times 10^{8}$ C/g จัดรูปหามวล

$$m = \frac{e}{e/m} = \frac{1.6 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}}{1.76 \times 10^{8}\ \mathrm{C/g}} = 9.09 \times 10^{-28}\ \mathrm{g}$$

(ตรวจหน่วย: C หารด้วย C/g เหลือหน่วย g ถูกต้อง)

2 ขั้นที่ 2: มวลอิเล็กตรอน 1 โมล คูณด้วยเลขอาโวกาโดร

$$9.09 \times 10^{-28}\ \mathrm{g} \times 6.02 \times 10^{23} = 5.47 \times 10^{-4}\ \mathrm{g}$$

อิเล็กตรอน 1 โมลหนักเพียงประมาณ 0.00055 กรัม — เบากว่าโปรตอน 1 โมล (ประมาณ 1 กรัม) ราว 1,800 เท่า สอดคล้องกับที่รู้ว่ามวลอิเล็กตรอนน้อยมากเมื่อเทียบกับนิวเคลียส

ที่มาของตัวลวง:

- "9.09×10^{-28} g และ 5.47×10^{-1} g" — มวลต่ออนุภาคถูก แต่คูณเลขอาโวกาโดรพลาดไป 1,000 เท่า (สับสนกรัมกับกิโลกรัมตอนท้าย)
- "2.82×10^{-11} g" — เผลอ **คูณ** e กับ e/m แทนที่จะหาร ($1.6 \times 10^{-19} \times 1.76 \times 10^{8}$) ตรวจหน่วยจะเห็นว่าได้ C^2/g ซึ่งไม่ใช่หน่วยมวล
- "9.09×10^{-31} g" — จำค่ามวลอิเล็กตรอนในหน่วย **กิโลกรัม** (9.1×10^{-31} kg) มาตอบทั้งที่โจทย์ให้ e/m ในหน่วย C/g จึงผิดหน่วยไป 1,000 เท่า

ข้อ 9 — ตอบ ข.

ประมาณ 1.8×10^3 เท่า

หลักคิด: อัตราส่วนประจุต่อมวลของอนุภาคใด ๆ คือ q/m เมื่อประจุของโปรตอนกับอิเล็กตรอนมีขนาดเท่ากัน ($q_p = q_e = e$) อัตราส่วนของมวลจะหาได้จากการหาร q/m ของสองอนุภาค โดยตัวประจุตัดกันพอดี

ขั้นตอน:

$$\frac{m_p}{m_e} = \frac{e/m_e}{e/m_p} = \frac{1.76 \times 10^8}{9.58 \times 10^4} \approx 1837$$

ดังนั้นมวลโปรตอนเป็นประมาณ 1.8×10^3 เท่า (ประมาณ 1840 เท่า) ของมวลอิเล็กตรอน

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: ค่านี้ตรงกับข้อเท็จจริงที่รู้กันว่าโปรตอนหนักกว่าอิเล็กตรอนราว 1800 เท่า และสอดคล้องกับที่รังสีแคแนลเบี่ยงเบนในสนามไฟฟ้าได้น้อยกว่ารังสีแคโทดมาก เพราะ q/m เล็กกว่ามาก (อนุภาคหนักกว่าที่ประจุเท่ากัน)

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- 5.4×10^{-4} เท่า — หารกลับด้าน ($9.58 \times 10^4 \div 1.76 \times 10^8$) ได้อัตราส่วน m_e/m_p แทน โจทย์ถามมวลโปรตอนเทียบอิเล็กตรอน ต้องได้ค่ามากกว่า 1 เสมอ
- 9.2×10^2 เท่า — เผลอคิดว่าโปรตอนมีประจุ $2e$ จึงหารผลลัพธ์ด้วย 2 โจทย์กำหนดชัดว่าประจุเท่ากัน
- 3.7×10^3 เท่า — คูณ 2 ผิดทิศจากความสับสนเรื่องประจุเช่นเดียวกัน

ข้อ 10 — ตอบ ข.

$^{2}\mathrm{H}^{+}$ กับ $^{4}\mathrm{He}^{2+}$

หลักคิด: คิดค่า q/m ของแต่ละไอออน โดย q = จำนวนประจุมูลฐาน และ m = เลขมวล (u)

1 ขั้นที่ 1: คำนวณทีละตัว

- $^{1}\mathrm{H}^{+}$: $q/m = \frac{1}{1} = 1$
- $^{2}\mathrm{H}^{+}$ (ดิวทีเรียม): $q/m = \frac{1}{2} = 0.5$
- $^{3}\mathrm{H}^{+}$ (ทริเทียม): $q/m = \frac{1}{3} \approx 0.33$
- $^{4}\mathrm{He}^{2+}$ (อนุภาคแอลฟา): $q/m = \frac{2}{4} = 0.5$

2 ขั้นที่ 2: เทียบเป็นคู่ — คู่ที่ q/m เท่ากันคือ $^{2}\mathrm{H}^{+}$ กับ $^{4}\mathrm{He}^{2+}$ (ทั้งคู่ได้ 0.5) เครื่องมือที่แยกอนุภาคด้วย q/m เพียงอย่างเดียวจึงแยกสองไอออนนี้ออกจากกันไม่ได้ — นี่คือเหตุผลเชิงประวัติศาสตร์ที่การวัด e/m อย่างเดียวบอกชนิดอนุภาคไม่ได้ ต้องมีข้อมูลอื่นประกอบ

ที่มาของตัวลวง:

- $^{1}\mathrm{H}^{+}$ กับ $^{2}\mathrm{H}^{+}$ — คิดว่าไอโซโทปของธาตุเดียวกันต้องเหมือนกันทุกอย่าง แต่มวลต่างกัน q/m จึงต่าง (1 กับ 0.5)
- $^{3}\mathrm{H}^{+}$ กับ $^{4}\mathrm{He}^{2+}$ — เห็นเลขมวลใกล้กันแต่ไม่คิดประจุ (0.33 กับ 0.5 ไม่เท่ากัน)
- $^{1}\mathrm{H}^{+}$ กับ $^{4}\mathrm{He}^{2+}$ — คิดว่าประจุมากขึ้นชดเชยมวลได้พอดีเสมอ แต่ $1 \neq 0.5$

ระวัง: ประจุของไอออนคิดจากจำนวนอิเล็กตรอนที่หายไป ส่วนมวลคิดจากเลขมวลทั้งก้อน — สองปริมาณนี้ไม่จำเป็นต้องแปรตามกัน

ข้อ 11 — ตอบ ก.

16 ตัว

หลักคิด: ในสัญลักษณ์นิวเคลียร์ $^{A}_{Z}\mathrm{X}$ เลขบน (A) คือเลขมวล = โปรตอน + นิวตรอน ส่วนเลขล่าง (Z) คือเลขอะตอม = จำนวนโปรตอน

ดังนั้นจำนวนนิวตรอน

$$n = A - Z = 31 - 15 = 16$$

ที่มาของตัวลวง:

- 15 ตัว — ตอบจำนวนโปรตอน (เลขอะตอม) แทนนิวตรอน
- 31 ตัว — ตอบเลขมวลทั้งก้อนโดยไม่หักโปรตอนออก
- 46 ตัว — บวก $31 + 15$ แทนที่จะลบ

ข้อ 12 — ตอบ ก.

35, 44, 36

หลักคิด: จากสัญลักษณ์นิวเคลียร์ $^{A}_{Z}\mathrm{X}^{q}$ — เลขล่างคือโปรตอน เลขบนคือเลขมวล (โปรตอน + นิวตรอน) ส่วนประจุบอกจำนวนอิเล็กตรอนที่ต่างจากโปรตอน

1 **ขั้นที่ 1:** โปรตอน = เลขอะตอม

$$p = 35$$

(ประจุของไอออนไม่มีผลต่อนิวเคลียส — โปรตอนคงเดิมเสมอ)

2 **ขั้นที่ 2:** นิวตรอน = เลขมวล – เลขอะตอม

$$n = 79 - 35 = 44$$

3 **ขั้นที่ 3:** ไอออนลบ 1 คือการ **รับอิเล็กตรอนเพิ่ม 1 ตัว**

$$e = 35 + 1 = 36$$

ดังนั้นได้ โปรตอน 35, นิวตรอน 44, อิเล็กตรอน 36

ที่มาของตัวลวง:

- "35, 44, 34" — คิดทิศประจุกลับ: เข้าใจว่าไอออนลบคือการเสียอิเล็กตรอน จึงลบ 1 แทนที่จะบวก 1 (จุดพลาดยอดนิยม: ประจุลบ = อิเล็กตรอนซึ่งเป็นลบ **เพิ่มขึ้น**)
- "35, 79, 36" — ใช้เลขมวลเป็นจำนวนนิวตรอนตรง ๆ โดยลืมหักโปรตอนออก
- "36, 43, 36" — เอาประจุไปบวกที่โปรตอนแทนอิเล็กตรอน ความจริงการเกิดไอออนเปลี่ยนเฉพาะจำนวนอิเล็กตรอน จำนวนโปรตอนในนิวเคลียสไม่มีวันเปลี่ยนจากการรับ-เสียอิเล็กตรอน

ข้อ 13 — ตอบ ข.

16

❶ **ขั้นที่ 1:** ไอออน X^{2-} เกิดจากอะตอม X **รับอิเล็กตรอนเพิ่ม 2 ตัว** ดังนั้นจำนวนโปรตอนของ X น้อยกว่าจำนวนอิเล็กตรอนของไอออนอยู่ 2

$$p = 18 - 2 = 16$$

❷ **ขั้นที่ 2:** เลขมวล = โปรตอน + นิวตรอน ดังนั้น

$$n = A - p = 32 - 16 = 16$$

ธาตุ X คือกำมะถัน $^{32}_{16}S$ มีนิวตรอน **16 ตัว**

จุดที่พลาดบ่อย:

- ถ้าใช้จำนวนอิเล็กตรอน 18 เป็นจำนวนโปรตอนโดยตรง จะได้ $32 - 18 = 14$ ซึ่งผิด เพราะไอออนมีอิเล็กตรอนไม่เท่าโปรตอน
- ถ้าคิดว่าไอออนลบคือการเสียอิเล็กตรอนแล้วบวกประจุเข้าไป จะได้ $p = 20$ และ $n = 12$ ซึ่งผิด เพราะไอออนลบคือการ **รับ**อิเล็กตรอน

ข้อ 14 — ตอบ ง.

$^{39}_{19}K$ กับ $^{40}_{20}Ca$

นิยาม: ไอโซโทน คือ อะตอมของธาตุต่างชนิดที่มี **จำนวนนิวตรอนเท่ากัน** (จำนวนนิวตรอน = เลขมวล − เลขอะตอม)

ตรวจทีละคู่:

- $^{14}_{6}C$ มีนิวตรอน $14 - 6 = 8$ ส่วน $^{14}_{7}N$ มีนิวตรอน $14 - 7 = 7$ → นิวตรอนไม่เท่ากัน แต่เลขมวลเท่ากัน จึงเป็น **ไอโซบาร์**
- $^{16}_{8}O$ กับ $^{18}_{8}O$ เป็นธาตุเดียวกัน (โปรตอนเท่ากัน) จึงเป็น **ไอโซโทป**
- $^{1}_{1}H$ กับ $^{2}_{1}H$ ก็เป็น **ไอโซโทป** ของไฮโดรเจนเช่นกัน
- $^{39}_{19}K$ มีนิวตรอน $39 - 19 = 20$ และ $^{40}_{20}Ca$ มีนิวตรอน $40 - 20 = 20$ → นิวตรอนเท่ากันและเป็นคนละธาตุ จึงเป็น **ไอโซโทน** ✓

วิธีจำ: ไอโซโท**ป** = **p** (โปรตอน) เท่ากัน, ไอโซโท**น** = **n** (นิวตรอน) เท่ากัน, ไอโซ**บาร์** = เลขมวล (A) เท่ากัน

ข้อ 15 — ตอบ ค.

181 อนุภาค

1 ขั้นที่ 1: แยกนับอนุภาคทีละชนิดจากสัญลักษณ์นิวเคลียร์

- โปรตอน: $p = 53$ (เลขอะตอม)
- นิวตรอน: $n = 127 - 53 = 74$ (เลขมวลลบเลขอะตอม)
- อิเล็กตรอน: ไอออนลบ 1 รับอิเล็กตรอนเพิ่ม 1 ตัว ได้ $e = 53 + 1 = 54$

2 ขั้นที่ 2: รวมทุกอนุภาค

$$p + n + e = 53 + 74 + 54 = 181$$

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: อะตอม I ที่เป็นกลางมีอนุภาครวม $127 + 53 = 180$ (เลขมวล + อิเล็กตรอนที่เท่าโปรตอน) เมื่อรับอิเล็กตรอนเพิ่ม 1 ตัวเป็นไอออนลบ อนุภาครวมต้องเพิ่มขึ้น 1 เป็น 181 พอดี ✓

ที่มาของตัวลวง:

- 180 อนุภาค — นับแบบอะตอมเป็นกลาง ($e = 53$) ลืมอิเล็กตรอนที่รับเพิ่มเข้ามา 1 ตัวจากการเป็นไอออนลบ
- 127 อนุภาค — ตอบเฉพาะอนุภาคในนิวเคลียส (เลขมวล = โปรตอน + นิวตรอน) ลืมนับอิเล็กตรอนทั้งหมด
- 182 อนุภาค — คิดว่าประจุ -1 หมายถึงรับอิเล็กตรอน 2 ตัว หรือเผลอบวกเพิ่มทั้งฝั่งอิเล็กตรอนและโปรตอน ความจริงประจุ -1 คืออิเล็กตรอนมากกว่าโปรตอนเพียง 1 ตัวเท่านั้น

ข้อ 16 — ตอบ ง.

$^{27}_{13}\mathrm{X}$

1 ขั้นที่ 1: X^{3+} เกิดจากอะตอม X **เสียอิเล็กตรอน 3 ตัว** เมื่อไอออนมีอิเล็กตรอน 10 ตัว อะตอม X เดิมจึงมีอิเล็กตรอน (= โปรตอน)

$$p = 10 + 3 = 13$$

2 ขั้นที่ 2: โจทย์บอกนิวตรอนมากกว่าโปรตอน 1 ตัว

$$n = 13 + 1 = 14$$

3 ขั้นที่ 3: เลขมวล $A = p + n = 13 + 14 = 27$ ได้สัญลักษณ์ $^{27}_{13}\mathrm{X}$ (ธาตุนี้คืออะลูมิเนียม)

ที่มาของตัวลวง:

- $^{21}_{10}\mathrm{X}$ — ใช้จำนวนอิเล็กตรอนของไอออน (10) เป็นจำนวนโปรตอนโดยตรง ลืมว่าไอออนบวก 3 คือการเสียอิเล็กตรอนไป 3 ตัว
- $^{26}_{13}\mathrm{X}$ — ได้โปรตอนถูก แต่ใช้ $n = p$ (ลืมเงื่อนไขนิวตรอนมากกว่า 1 ตัว)
- $^{23}_{11}\mathrm{X}$ — คิดสลับทิศเป็น $p = 10 + 1 = 11$ แล้วเอา 3 ไปเป็นส่วนต่างนิวตรอน ($n = 12$) ซึ่งสลับบทบาทของเลข 3 กับเลข 1 ในโจทย์

ข้อ 17 — ตอบ ง.

44

❶ **ขั้นที่ 1:** หาโปรตอนของ X — ไอออน X^{2+} เกิดจากอะตอม X **เสียอิเล็กตรอน 2 ตัว** เมื่อไอออนเหลืออิเล็กตรอน 18 ตัว อะตอมเดิมมีอิเล็กตรอน (= โปรตอน)

$$p_X = 18 + 2 = 20$$

(X คือแคลเซียม)

❷ **ขั้นที่ 2:** หานิวตรอนของ $^{45}_{21}\mathrm{Sc}$

$$n_{\mathrm{Sc}} = 45 - 21 = 24$$

❸ **ขั้นที่ 3:** ไอโซโทนกันหมายถึงจำนวน **นิวตรอน** เท่ากัน ดังนั้น $n_X = 24$ และเลขมวลของ X คือ

$$A_X = p_X + n_X = 20 + 24 = 44$$

นิวไคลด์นี้คือ $^{44}_{20}\mathrm{Ca}$

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: $^{44}_{20}\mathrm{Ca}$ มีนิวตรอน $44 - 20 = 24$ เท่ากับ $^{45}_{21}\mathrm{Sc}$ ที่มี 24 จริง และเป็นคนละธาตุกัน จึงเป็นไอโซโทนกันถูกต้อง ✓

ที่มาของตัวลวง:

- 42 — ใช้จำนวนอิเล็กตรอนของไอออน (18) เป็นจำนวนโปรตอนโดยตรง ได้ $A = 18 + 24 = 42$ ลืมบวกอิเล็กตรอน 2 ตัวที่ไอออนบวกเสียไปคืนก่อน
- 38 — คิดทิศประจุกลับเป็น $p = 18 - 2 = 16$ แล้วเผลอใช้ตัวเลขอื่นปน หรือหลงคิดว่าไอออนบวกคือการรับอิเล็กตรอน
- 45 — สับสน **ไอโซโทน** กับ **ไอโซบาร์** จึงให้เลขมวลของ X เท่ากับของ Sc ทั้งที่สิ่งที่เท่ากันคือจำนวนนิวตรอน ไม่ใช่เลขมวล

ข้อ 18 — ตอบ ค.

38

หลักคิด: ไล่ทีละขั้น (1) นิวตรอนของ K^+ คือ 20 ตัวตามที่โจทย์กำหนดตรงๆ เพราะ**การเกิดไอออนกระทบเฉพาะอิเล็กตรอน ไม่กระทบนิวตรอน** (สังเกตเสริม: ถ้าคิดเลขมวลจาก $A = Z + N = 19 + 20 = 39$ จะพบว่าเป็นไอโซโทป K-39 ที่พบมากในธรรมชาติพอดี — สอดคล้องกับบริบท) (2) หาอิเล็กตรอนของ K^+: เสียอิเล็กตรอนไป 1 ตัวจาก $Z = 19$ เหลือ $19 - 1 = 18$ ตัว (3) Cl^- มีอิเล็กตรอนเท่ากับ K^+ คือ 18 ตัว ตรวจสอบกับ $Z_{Cl} = 17$: รับอิเล็กตรอนมา 1 ตัว $17 + 1 = 18$ ✓ สอดคล้องกัน (4) หานิวตรอนของ Cl^- จากไอโซโทปที่พบมากสุด (เลขมวล 35): $N = 35 - 17 = 18$ (5) รวมนิวตรอนทั้งสองไอออน: $20 + 18 = 38$

ระวัง: การเกิดไอออนกระทบเฉพาะจำนวนอิเล็กตรอน ไม่กระทบโปรตอนหรือนิวตรอนเด็ดขาด ตัวลวง 39 มาจากการอ่านโจทย์ผิด — เผลอตอบเลขมวลของ K^+ ($A = 19 + 20 = 39$) ไปเลยเพราะบังเอิญคำนวณเจอระหว่างทาง โดยลืมไปว่าโจทย์ถามผลรวมนิวตรอนของ**ทั้งสองไอออน** ไม่ใช่เลขมวลของไอออนเดียว ส่วนตัวลวง 36-37 มาจากการเผลอเอาประจุไอออนไปบวก/ลบกับจำนวนนิวตรอนโดยตรง ทั้งที่ประจุไอออนไม่เกี่ยวกับนิวตรอนเลย

ข้อ 19 — ตอบ ก.

$O^{2-},\ F^{-},\ Na^{+},\ Mg^{2+}$

หลักคิด: จำนวนอิเล็กตรอนของไอออน = เลขอะตอม – ประจุ (ไอออนบวกเสียอิเล็กตรอน จึงลบ ส่วนไอออนลบรับอิเล็กตรอน จึงบวก)

ตรวจข้อแรก:

- $O^{2-} : 8 + 2 = 10$
- $F^{-} : 9 + 1 = 10$
- $Na^{+} : 11 - 1 = 10$
- $Mg^{2+} : 12 - 2 = 10$

ทุกตัวมี 10 อิเล็กตรอนเท่ากัน (โครงแบบเดียวกับ Ne คือ $1s^2\ 2s^2\ 2p^6$) → ถูกต้อง ✓

ข้ออื่นมีตัวแปลกปลอม:

- ข้อสอง: $S^{2-} = 18, Cl^{-} = 18, K^{+} = 18$ แต่ $Mg^{2+} = 10$ → ไม่เท่ากัน
- ข้อสาม: $Na^{+} = 10, Mg^{2+} = 10$ แต่ $Cl^{-} = 18, K^{+} = 18$ → ไม่เท่ากัน
- ข้อสี่: $N^{3-} = 10, O^{2-} = 10, Na^{+} = 10$ แต่ $Ca^{2+} = 18$ → ไม่เท่ากัน

ระวัง: อย่าดูแค่ประจุหรือแค่ความใกล้กันในตารางธาตุ ต้องคำนวณจำนวนอิเล็กตรอนจริงทีละตัว

ข้อ 20 — ตอบ ค.

378

หลักคิด: จำนวนอิเล็กตรอนของไอออนต้องแปลงกลับเป็นเลขอะตอม (จำนวนโปรตอน) ก่อนเสมอ: ไอออนบวกเสียอิเล็กตรอน จึงต้อง **บวกประจุกลับ** ส่วนไอออนลบรับอิเล็กตรอน จึงต้อง **ลบประจุออก**

ขั้นตอน:

1. A^{3+} มี 28 อิเล็กตรอน แสดงว่าอะตอม A มีโปรตอน $= 28 + 3 = 31$ (คือแกลเลียม Ga) นิวตรอน $= 31 + 7 = 38$ เลขมวลของ A $= 31 + 38 = 69$ (Ga-69 เป็นไอโซโทปหลักในธรรมชาติจริง)
2. B^{2-} มีอิเล็กตรอนเท่ากับ Kr คือ 36 ตัว แสดงว่าอะตอม B มีโปรตอน $= 36 - 2 = 34$ (คือซีลีเนียม Se) นิวตรอน $= 38 + 8 = 46$ เลขมวลของ B $= 34 + 46 = 80$ (Se-80 เป็นไอโซโทปที่พบมากที่สุดของ Se)
3. ตรวจประจุของสูตร: $2(+3) + 3(-2) = 0$ สอดคล้องกับ A_2B_3 จริง (คือ Ga_2Se_3)
4. ผลรวมเลขมวล $= 2(69) + 3(80) = 138 + 240 = 378$

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: Ga อยู่หมู่ IIIA จึงเกิด $3+$ และ Se อยู่หมู่ VIA จึงเกิด $2-$ ได้จริง ทั้ง Ga-69 และ Se-80 เป็นไอโซโทปธรรมชาติจริง ตัวเลขทุกขั้นสอดคล้องกัน

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- 372 — ใช้จำนวนอิเล็กตรอนของไอออนเป็นเลขอะตอมตรง ๆ โดยไม่ปรับประจุ (ได้ $Z_A = 28$, $A_A = 63$ และ $Z_B = 36$, $A_B = 82$ รวม $126 + 246 = 372$) นี่คือกับดักหลักของข้อนี้
- 354 — ลืมเงื่อนไข "มากกว่านิวไคลด์ของ A อยู่ 8" แล้วใช้นิวตรอนของ B เท่ากับ 38 เท่า A (ได้ $A_B = 72$ รวม $138 + 216 = 354$)
- 390 — ปรับประจุกลับผิดทิศเฉพาะไอออนลบ (คิดว่า B รับอิเล็กตรอนแล้วเลขอะตอมเพิ่ม: $Z_B = 36 + 2 = 38$ ทำให้ $A_B = 38 + 46 = 84$ รวม $138 + 252 = 390$)

ข้อ 21 — ตอบ ค.

37

❶ **ขั้นที่ 1:** หาโปรตอนของ X — ไอออน X^{2+} เสียอิเล็กตรอน 2 ตัว เหลือ 18 ดังนั้น

$$p_X = 18 + 2 = 20$$

(X คือแคลเซียม)

❷ **ขั้นที่ 2:** หานิวตรอนของ X จากเลขมวล 40

$$n_X = 40 - 20 = 20$$

❸ **ขั้นที่ 3:** หาโปรตอนของ Y — ไอออน Y^- รับอิเล็กตรอนเพิ่ม 1 ตัวเป็น 18 ดังนั้น

$$p_Y = 18 - 1 = 17$$

(Y คือคลอรีน)

❹ **ขั้นที่ 4:** ไอโซโทนกันแปลว่านิวตรอนเท่ากัน $n_Y = n_X = 20$ ดังนั้น

$$A_Y = p_Y + n_Y = 17 + 20 = 37$$

ที่มาของตัวลวง:

- 35 — คิด $p_Y = 18$ (ลืมว่าไอออนลบต้องหักอิเล็กตรอนที่รับเข้ามาออก) ร่วมกับ $n = 17$ หรือมาจากการจำว่า Cl มีเลขมวล 35 เสมอโดยไม่ใช้เงื่อนไขไอโซโทน
- 38 — ใช้ $p_Y = 18$ กับ $n = 20$ (พลาดที่ขั้นหาโปรตอนของ Y ขั้นเดียว)
- 40 — สับสนไอโซโทนกับไอโซบาร์ จึงให้เลขมวลของ Y เท่ากับของ X

ระวัง: ทิศของประจุกับอิเล็กตรอนสลับกัน — ไอออนบวก "บวกกลับ" ตอนหาโปรตอน ส่วนไอออนลบ "ลบออก"

ข้อ 22 — ตอบ ค.

10.8 u

หลักคิด: มวลอะตอมเฉลี่ย = ผลรวมของ (มวลไอโซโทป × สัดส่วนร้อยละ)

$$\bar{m} = \frac{(10.0 \times 20) + (11.0 \times 80)}{100} = \frac{200 + 880}{100} = 10.8 \text{ u}$$

สังเกตว่าค่าเฉลี่ยเอียงเข้าหา 11.0 เพราะ ^{11}B มีสัดส่วนมากกว่า

ที่มาของตัวลวง:

- 10.5 u — เอามวลสองไอโซโทปมาเฉลี่ยตรง ๆ $\frac{10+11}{2}$ โดยไม่ถ่วงน้ำหนักด้วยร้อยละความอุดมสมบูรณ์
- 10.2 u — สลับร้อยละของสองไอโซโทป ($10 \times 0.8 + 11 \times 0.2$)
- 21.0 u — บวกมวลสองไอโซโทปโดยไม่หารสัดส่วนเลย

ข้อ 23 — ตอบ ข.

ร้อยละ 94

1 **ขั้นที่ 1:** ตั้งตัวแปร — ให้ ^{7}Li มีสัดส่วน x ดังนั้น ^{6}Li มีสัดส่วน $1 - x$ (สองไอโซโทปรวมกันต้องได้ 100%)

2 **ขั้นที่ 2:** ตั้งสมการมวลอะตอมเฉลี่ย

$$7.00x + 6.00(1 - x) = 6.94$$

3 **ขั้นที่ 3:** แก้สมการ

$$6.00 + 1.00x = 6.94 \qquad x = \frac{6.94 - 6.00}{7.00 - 6.00} = 0.94$$

ดังนั้น ^{7}Li มีความอุดมสมบูรณ์ **ร้อยละ 94**

ตรวจย้อน: $6.00 \times 0.06 + 7.00 \times 0.94 = 0.36 + 6.58 = 6.94$ ✓

สังเกตเชิงเหตุผล: มวลเฉลี่ย 6.94 อยู่ใกล้ 7.00 มาก แสดงว่า ^{7}Li ต้องมีสัดส่วนสูงมาก — ใช้เช็กคำตอบได้ทันทีโดยไม่ต้องคำนวณละเอียด

ที่มาของตัวลวง:

- ร้อยละ 6 — แก้สมการถูกแต่ตอบสลับตัว (นี่คือร้อยละของ ^{6}Li) ต้องอ่านโจทย์ให้ชัดว่าถามไอโซโทปตัวไหน
- ร้อยละ 50 — เข้าใจว่ามวลเฉลี่ยอยู่ระหว่างมวลสองไอโซโทปแปลว่ามีปริมาณเท่ากัน ซึ่งขัดกับการที่ 6.94 เอียงเข้าหา 7.00 อย่างชัดเจน
- ร้อยละ 69.4 — จับตัวเลขมวลเฉลี่ย 6.94 มาแปลงเป็นร้อยละตรง ๆ โดยไม่ได้ตั้งสมการ

ข้อ 24 — ตอบ ข.

35.5 u

❶ **ขั้นที่ 1:** หาร้อยละของอีกไอโซโทปก่อน — เมื่อ $^{35}\mathrm{Cl}$ มีร้อยละ 75.0 ที่เหลือคือ $^{37}\mathrm{Cl}$ ร้อยละ $100 - 75.0 = 25.0$

❷ **ขั้นที่ 2:** คิดค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก

$$\bar{m} = \frac{(35.0 \times 75.0) + (37.0 \times 25.0)}{100} = \frac{2625 + 925}{100} = 35.5 \text{ u}$$

ค่านี้ตรงกับมวลอะตอมของ Cl ในตารางที่ใช้กันคือ 35.5

ที่มาของตัวลวง:

- 36.0 u — เฉลี่ยตรง ๆ $\frac{35+37}{2}$ เหมือนสองไอโซโทปมีปริมาณเท่ากัน
- 36.5 u — สลับร้อยละ ($35 \times 0.25 + 37 \times 0.75$)
- 35.2 u — เข้าใจผิดว่าค่าเฉลี่ยต้องใกล้ 35 มากกว่านี้มาก (เดาจากความรู้สึกโดยไม่คำนวณ หรือคูณสัดส่วนพลาด)

ข้อ 25 — ตอบ ก.

28.11 u

หลักคิด: มวลอะตอมเฉลี่ยคือค่าเฉลี่ย **ถ่วงน้ำหนัก** ด้วยร้อยละความอุดมสมบูรณ์ของทุกไอโซโทป — มี 3 ชนิดก็รวมทั้ง 3 พจน์

❶ **ขั้นที่ 1:** คูณมวลแต่ละไอโซโทปกับร้อยละของมัน

$$\bar{m} = \frac{(28.0 \times 92) + (29.0 \times 5) + (30.0 \times 3)}{100}$$

❷ **ขั้นที่ 2:** คำนวณทีละพจน์

$$= \frac{2576 + 145 + 90}{100} = \frac{2811}{100} = 28.11 \text{ u}$$

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: $^{28}\mathrm{Si}$ มีมากถึงร้อยละ 92 ค่าเฉลี่ยจึงต้องอยู่ใกล้ 28.0 มาก — ค่า 28.11 สมเหตุสมผล (และตรงกับมวลอะตอม Si = 28 ในตารางที่ใช้กัน) ส่วนคำตอบที่ห่างจาก 28 มากควรตัดทิ้งได้ทันที

ที่มาของตัวลวง:

- 29.00 u — เฉลี่ยตรง ๆ $\frac{28+29+30}{3}$ เหมือนทุกไอโซโทปมีปริมาณเท่ากัน ไม่ได้ถ่วงน้ำหนักด้วยร้อยละ
- 29.89 u — สลับร้อยละของไอโซโทปเบาสุดกับหนักสุด ($28 \times 3\% + 29 \times 5\% + 30 \times 92\%$) สังเกตว่าค่าออกมาเอียงไปทาง 30 ซึ่งขัดกับการที่ $^{28}\mathrm{Si}$ มีมากที่สุด
- 28.00 u — ตอบมวลของไอโซโทปที่มีมากที่สุดโดยไม่คิดค่าเฉลี่ย มวลอะตอมเฉลี่ยต้องรวมผลของไอโซโทปส่วนน้อยด้วย จึงมากกว่า 28.0 เล็กน้อย

ข้อ 26 — ตอบ ก.

ร้อยละ 60.3

❶ **ขั้นที่ 1:** ตั้งตัวแปร — ให้ $^{69}\mathrm{Ga}$ มีสัดส่วน x ดังนั้น $^{71}\mathrm{Ga}$ มีสัดส่วน $1-x$ (สองไอโซโทปต้องรวมกันได้ 100%)

❷ **ขั้นที่ 2:** ตั้งสมการค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก

$$68.93x + 70.92(1-x) = 69.72$$

❸ **ขั้นที่ 3:** แก้สมการ

$$70.92 - 1.99x = 69.72 \qquad x = \frac{70.92-69.72}{70.92-68.93} = \frac{1.20}{1.99} \approx 0.603$$

ดังนั้น $^{69}\mathrm{Ga}$ มีความอุดมสมบูรณ์ประมาณ **ร้อยละ 60.3** (ตรวจย้อน: $68.93 \times 0.603 + 70.92 \times 0.397 = 69.72$ ✓)

ที่มาของตัวลวง:

- ร้อยละ 39.7 — แก้สมการถูกแต่ตอบสลับตัว (นี่คือร้อยละของ $^{71}\mathrm{Ga}$) — โจทย์แบบนี้ต้องอ่านให้ชัดว่าถามไอโซโทปตัวไหน
- ร้อยละ 50.0 — เดาจากการที่ 69.72 อยู่ "ระหว่าง" มวลสองไอโซโทปโดยไม่สังเกตว่าค่าเฉลี่ยเอียงเข้าหา 68.93 มากกว่า
- ร้อยละ 69.7 — เอาตัวเลขมวลอะตอมเฉลี่ยมาตอบเป็นร้อยละ (จับตัวเลขในโจทย์มาปนกัน)

ข้อ 27 — ตอบ ค.

ร้อยละ 56.25

❶ **ขั้นที่ 1:** ระบุว่าโมเลกุลมวล 70 เกิดจากไอโซโทปคู่ใด — มวล 70 = 35 + 35 ดังนั้นต้องเป็นโมเลกุลที่อะตอม **ทั้งสองตัว** เป็น $^{35}\mathrm{Cl}$ (คู่ผสม $35 + 37 = 72$ และคู่หนัก $37 + 37 = 74$)

❷ **ขั้นที่ 2:** การจับคู่เป็นแบบสุ่มและอิสระต่อกัน ความน่าจะเป็นที่อะตอมตัวหนึ่งเป็น $^{35}\mathrm{Cl}$ คือ 0.75 ดังนั้นความน่าจะเป็นที่ทั้งสองตัวเป็น $^{35}\mathrm{Cl}$ คือ

$$0.75 \times 0.75 = 0.5625$$

ได้ **ร้อยละ 56.25**

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: โมเลกุลทั้งสามชนิดต้องรวมกันได้ 100%

- มวล 70 (^{35}–^{35}): $0.75^2 = 56.25\%$
- มวล 72 (^{35}–^{37} สลับตำแหน่งได้ 2 แบบ): $2 \times 0.75 \times 0.25 = 37.5\%$
- มวล 74 (^{37}–^{37}): $0.25^2 = 6.25\%$

รวม $56.25 + 37.5 + 6.25 = 100\%$ ✓ (ค่าเฉลี่ยมวลโมเลกุลก็สอดคล้อง: $2 \times 35.5 = 71$ u)

ที่มาของตัวลวง:

- ร้อยละ 75 — ใช้ร้อยละของไอโซโทป $^{35}\mathrm{Cl}$ ตอบตรง ๆ ลืมว่าโมเลกุลต้องอาศัยอะตอม 2 ตัวพร้อมกัน ความน่าจะเป็นจึงต้องคูณกัน
- ร้อยละ 37.5 — คำนวณของโมเลกุลมวล 72 ($2 \times 0.75 \times 0.25$) แล้วตอบผิดชนิด หรือเผลอคูณ 2 เข้าไปทั้งที่คู่ ^{35}–^{35} เหมือนกันทั้งสองตำแหน่ง ไม่มีการสลับให้นับซ้ำ
- ร้อยละ 6.25 — คูณความน่าจะเป็นผิดตัวเป็น 0.25×0.25 ซึ่งเป็นสัดส่วนของโมเลกุลมวล 74

ข้อ 28 — ตอบ ง.

107.96 u

หลักคิด: โจทย์ให้ **อัตราส่วนจำนวนอะตอม** ไม่ใช่ร้อยละ — แปลงเป็นสัดส่วนก่อนโดยใช้ผลรวมของอัตราส่วนเป็นตัวหาร

1 **ขั้นที่ 1:** ผลรวมอัตราส่วน $= 13 + 12 = 25$ ดังนั้นสัดส่วนของ $^{107}\mathrm{Ag} = \frac{13}{25}$ และ $^{109}\mathrm{Ag} = \frac{12}{25}$

2 **ขั้นที่ 2:** คิดค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก

$$\bar{m} = \frac{(107.0 \times 13) + (109.0 \times 12)}{25} = \frac{1391 + 1308}{25} = \frac{2699}{25} = 107.96\ \mathrm{u}$$

สอดคล้องกับมวลอะตอมของ Ag ในตาราง (108) และค่าเฉลี่ยเอียงเข้าหา 107 เล็กน้อยเพราะ $^{107}\mathrm{Ag}$ มีจำนวนอะตอมมากกว่า

ที่มาของตัวลวง:

- 108.00 u — เฉลี่ยตรง ๆ $\frac{107+109}{2}$ โดยไม่ถ่วงน้ำหนักตามอัตราส่วน
- 108.04 u — สลับอัตราส่วนของสองไอโซโทป ($107 \times 12 + 109 \times 13$ หาร 25) — สังเกตว่าค่านี้เกิน 108 ซึ่งขัดกับการที่ไอโซโทปเบามีมากกว่า ใช้ตรวจคำตอบตัวเองได้
- 107.52 u — ใช้ 13 กับ 12 เป็นร้อยละโดยตรง (หารด้วย 100 แทนที่จะหารด้วย 25) แล้วเกลี่ยส่วนที่เหลือผิด

ข้อ 29 — ตอบ ก.

1 : 3

หลักคิด: มวลอะตอมเฉลี่ยของของผสมคือค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักด้วย **สัดส่วนจำนวนอะตอม** ของแต่ละแหล่ง โดยโบรอนธรรมชาติทั้งก้อนคิดเป็นมวลเฉลี่ย 10.8 u ต่ออะตอม และ $^{10}\mathrm{B}$ บริสุทธิ์คิดเป็น 10.0 u ต่ออะตอม

ขั้นตอน:

1. ให้สัดส่วนอะตอมจากโบรอนธรรมชาติเป็น x และจาก $^{10}\mathrm{B}$ บริสุทธิ์เป็น $1-x$:

$$10.8x + 10.0(1-x) = 10.2$$

2. แก้สมการ: $10.0 + 0.8x = 10.2 \Rightarrow x = \dfrac{0.2}{0.8} = 0.25$
3. อัตราส่วนธรรมชาติ : บริสุทธิ์ $= 0.25 : 0.75 = 1 : 3$

ตรวจสอบเชิงเหตุผล (คำนวณย้อนกลับ): โบรอนธรรมชาติ 10.8 u มี $^{10}\mathrm{B}$ อยู่ร้อยละ 20 (จาก $\frac{11.0-10.8}{11.0-10.0} = 0.20$) ถ้าผสม 1 : 3 สมมติมีอะตอมรวม 100 ตัว มาจากธรรมชาติ 25 ตัว (เป็น $^{10}\mathrm{B}$ 5 ตัว, $^{11}\mathrm{B}$ 20 ตัว) และ $^{10}\mathrm{B}$ บริสุทธิ์ 75 ตัว รวมมี $^{10}\mathrm{B}$ 80 ตัวจาก 100 มวลเฉลี่ย $= \frac{80(10.0)+20(11.0)}{100} = \frac{800+220}{100} = 10.2$ u ตรงพอดี

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- 3 : 1 — สลับข้างอัตราส่วน (เอาสัดส่วนของ $^{10}\mathrm{B}$ บริสุทธิ์ขึ้นก่อน) ลองสามัญสำนึก: ต้องการมวลเฉลี่ย 10.2 ซึ่งใกล้ 10.0 มาก แสดงว่าต้องใส่ $^{10}\mathrm{B}$ บริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ ธรรมชาติจึงต้องเป็นฝ่ายน้อย
- 1 : 4 — ไปคำนวณสัดส่วนไอโซโทป $^{11}\mathrm{B} : {}^{10}\mathrm{B}$ ในของผสมสุดท้าย ($20 : 80$) แทนที่จะเป็นอัตราส่วนของสองแหล่งที่นำมาผสม
- 3 : 4 — ใช้กฎคานผิด: หารช่วงห่างด้วยช่วงเต็มแทนช่วงฝั่งตรงข้าม ($(10.8-10.2) : (10.8-10.0) = 0.6 : 0.8 = 3 : 4$) — ตัวส่วนของกฎคานต้องเป็นระยะห่างจากอีกฝั่ง ไม่ใช่ความกว้างทั้งช่วง

ข้อ 30 — ตอบ ข.

ร้อยละ 10.0

หลักคิด: มี 3 ไอโซโทปแต่รู้ร้อยละแล้ว 1 ตัว จึงเหลือตัวแปร 2 ตัวที่ผูกกันด้วยเงื่อนไข "รวมกันได้ 100%" — ตั้งระบบสมการ 2 สมการ

1 **ขั้นที่ 1:** ให้ $^{25}\mathrm{Mg}$ มีสัดส่วน x ดังนั้น $^{26}\mathrm{Mg}$ มีสัดส่วน $1 - 0.790 - x = 0.210 - x$

2 **ขั้นที่ 2:** ตั้งสมการมวลอะตอมเฉลี่ย

$$24.0(0.790) + 25.0x + 26.0(0.210 - x) = 24.31$$

3 **ขั้นที่ 3:** กระจายและรวมพจน์

$$18.96 + 25.0x + 5.46 - 26.0x = 24.31$$

$$24.42 - x = 24.31 \qquad x = 0.110$$

4 **ขั้นที่ 4:** ดังนั้น $^{25}\mathrm{Mg}$ มีร้อยละ 11.0 และ $^{26}\mathrm{Mg}$ มีร้อยละ $21.0 - 11.0 = 10.0$

ตรวจย้อน: $24.0 \times 0.79 + 25.0 \times 0.11 + 26.0 \times 0.10 = 18.96 + 2.75 + 2.60 = 24.31$ ✓

ที่มาของตัวลวง:

- ร้อยละ 11.0 — แก้ระบบสมการถูกทุกขั้น แต่ตอบค่าของ $^{25}\mathrm{Mg}$ แทน $^{26}\mathrm{Mg}$ ที่โจทย์ถาม
- ร้อยละ 21.0 — หยุดที่ $100 - 79 = 21$ แล้วคิดว่าทั้งหมดเป็น $^{26}\mathrm{Mg}$ โดยลืมว่ามี $^{25}\mathrm{Mg}$ แบ่งส่วนนี้อยู่ด้วย
- ร้อยละ 5.0 — เดาว่า $^{25}\mathrm{Mg}$ กับ $^{26}\mathrm{Mg}$ ต้องมีปริมาณใกล้กันหรือหาร 21 แบบคาดคะเน ซึ่งไม่สอดคล้องกับสมการมวลเฉลี่ย

ข้อ 31 — ตอบ ก.

$n = 2$

หลักคิด: อนุกรมสเปกตรัมของไฮโดรเจนจำแนกตามระดับพลังงาน **ปลายทาง** ที่อิเล็กตรอนตกลงไปสิ้นสุด

- อนุกรม**ไลมัน** ตกสู่ $n = 1$ → ช่วงรังสีอัลตราไวโอเลต
- อนุกรม**บัลเมอร์** ตกสู่ $n = 2$ → ช่วงแสงที่มองเห็นได้ ✓
- อนุกรม**พาสเชน** ตกสู่ $n = 3$ → ช่วงรังสีอินฟราเรด

ที่มาของตัวลวง:

- $n = 1$ — สับสนกับอนุกรมไลมัน ซึ่งอยู่ในช่วง UV เพราะช่องพลังงานลงสู่สถานะพื้นกว้างมาก
- $n = 3$ — สับสนกับอนุกรมพาสเชน (อินฟราเรด)
- $n = \infty$ — เข้าใจกลับทาง: $n = \infty$ คือจุดที่อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอม (จุดตั้งต้นที่สูงที่สุด) ไม่ใช่ปลายทางของการตก

ข้อ 32 — ตอบ ค.

โฟตอนแสงสีม่วงมีพลังงานเป็น 1.5 เท่าของโฟตอนแสงสีส้ม

หลักคิด: พลังงานโฟตอน $E = h\nu = \dfrac{hc}{\lambda}$ ดังนั้นพลังงาน **แปรผกผัน** กับความยาวคลื่น — คลื่นยิ่งสั้น พลังงานยิ่งสูง

❶ **ขั้นที่ 1:** เทียบอัตราส่วนพลังงาน (ค่า h กับ c ตัดกันหมด)

$$\frac{E_{400}}{E_{600}} = \frac{hc/\lambda_{400}}{hc/\lambda_{600}} = \frac{\lambda_{600}}{\lambda_{400}} = \frac{600}{400} = 1.5$$

ดังนั้นโฟตอนแสงสีม่วง (คลื่นสั้นกว่า) มีพลังงานเป็น **1.5 เท่า** ของโฟตอนแสงสีส้ม

ตรวจสอบ: คำนวณตรง ๆ ด้วย $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J s, $c = 3 \times 10^{8}$ m/s ได้ $E_{400} \approx 4.97 \times 10^{-19}$ J และ $E_{600} \approx 3.31 \times 10^{-19}$ J อัตราส่วน $= 1.5$ ✓

ที่มาของตัวลวง:

- "สีส้มมีพลังงานเป็น 1.5 เท่า" — คิดกลับทิศว่าความยาวคลื่นมากแปลว่าพลังงานมาก (สับสนระหว่าง $E \propto \lambda$ กับ $E \propto \frac{1}{\lambda}$)
- "พลังงานเท่ากันเพราะอัตราเร็วเท่ากัน" — จริงที่แสงทุกสีเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว c เท่ากันในสุญญากาศ แต่พลังงานขึ้นกับ **ความถี่** ไม่ใช่อัตราเร็ว
- "2.25 เท่า" — เอาอัตราส่วน 1.5 ไปยกกำลังสอง (1.5^2) เพราะจำสับสนกับสูตรที่มีกำลังสอง ซึ่งสูตรพลังงานโฟตอนไม่มี

ข้อ 33 — ตอบ ค.

-5.45×10^{-19} J

❶ **ขั้นที่ 1:** แทน $n = 2$ ในสูตร โดยต้องยกกำลังสองก่อน

$$E_2 = -\frac{2.18 \times 10^{-18}}{2^2} = -\frac{2.18 \times 10^{-18}}{4}$$

❷ **ขั้นที่ 2:** คำนวณ

$$E_2 = -5.45 \times 10^{-19} \text{ J}$$

ที่มาของตัวลวง:

- -1.09×10^{-18} J — หารด้วย $n = 2$ ตรง ๆ โดยลืมยกกำลังสอง
- $+5.45 \times 10^{-19}$ J — ขนาดถูกแต่ทิ้งเครื่องหมายลบ พลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกยึดอยู่ในอะตอมต้องเป็น **ค่าลบ** เสมอ (ค่าศูนย์คือตอนหลุดพ้นจากอะตอมที่ $n = \infty$)
- -8.72×10^{-18} J — เผลอคูณ 4 แทนที่จะหาร

ระวัง: ยิ่ง n มาก พลังงานยิ่ง **สูงขึ้น** (ลบน้อยลงเข้าใกล้ศูนย์) — อย่าตีความว่าตัวเลขขนาดใหญ่แปลว่าพลังงานสูง

ข้อ 34 — ตอบ ก.

จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมามากขึ้น แต่พลังงานจลน์สูงสุดต่อตัวเท่าเดิม

หลักคิด: $KE_{max} = h\nu - \Phi$ ขึ้นกับความถี่ ν เท่านั้น ไม่มีตัวแปรความสว่างอยู่ในสูตรเลย ส่วนความสว่างคือจำนวนโฟตอนต่อวินาที เพิ่มความสว่างจึงเพิ่มจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ ซึ่งแต่ละโฟตอนเตะอิเล็กตรอนได้ 1 ตัว จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดจึงเพิ่มขึ้นตาม แต่พลังงานต่อโฟตอน (และพลังงานจลน์ต่ออิเล็กตรอน 1 ตัว) ไม่เปลี่ยน

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: นี่คือหลักฐานสำคัญที่ทฤษฎีคลื่นแบบเดิมอธิบายไม่ได้ (ทฤษฎีคลื่นทำนายว่าความสว่างมากขึ้นควรทำให้พลังงานต่ออิเล็กตรอนมากขึ้นด้วย) แต่ผลการทดลองจริงยืนยันว่าพลังงานต่อตัวคงที่ ต้องอาศัยแนวคิดโฟตอนของไอน์สไตน์อธิบาย

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- ข้อ 2, 3 ผิด — สับสนว่าความสว่างส่งผลต่อพลังงานต่อตัว ทั้งที่จริงมีผลต่อจำนวนอิเล็กตรอนเท่านั้น
- ข้อ 4 ผิด — ความสว่างที่เพิ่มขึ้นทำให้จำนวนโฟตอนต่อวินาทีมากขึ้น จึงมีอิเล็กตรอนหลุดมากขึ้นจริง

ข้อ 35 — ตอบ ก.

อิเล็กตรอน เพราะมีมวลน้อยที่สุด ทำให้ λ มากที่สุด

หลักคิด: จากสูตร $\lambda = h/(mv)$ เมื่อ v ใกล้เคียงกัน λ จะแปรผกผันกับมวล m — ยิ่งมวลน้อย ยิ่งได้ λ มาก

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: อิเล็กตรอนมีมวลน้อยที่สุดในบรรดาตัวเลือกทั้งหมด (เบากว่าโปรตอน/อะตอมฮีเลียมมาก และเบากว่าลูกกอล์ฟมหาศาล) จึงมี λ มากที่สุด นี่คือเหตุผลที่สมบัติคลื่นของสสารสังเกตเห็นได้ชัดเฉพาะกับอนุภาคเบาอย่างอิเล็กตรอนเท่านั้น

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- ประจุไฟฟ้า (ข้อ 2) ไม่ปรากฏในสูตรเดอบรอยล์เลย ไม่เกี่ยวข้องกับขนาดของ λ
- ความเสถียรทางเคมี (ข้อ 3) เป็นสมบัติคนละเรื่องกับมวลหรือความยาวคลื่น
- ข้อ 4 เข้าใจผิดทิศทาง — พลังงานจลน์ที่มากขึ้นของวัตถุมวลมาก ไม่ได้ทำให้ λ มากขึ้น เพราะ λ ขึ้นกับ mv ไม่ใช่ KE โดยตรง และมวลที่มากกว่ามหาศาลของลูกกอล์ฟทำให้ λ เล็กจิ๋วอยู่ดี

ข้อ 36 — ตอบ ก.

ยิ่งทราบตำแหน่งของอนุภาคแม่นยำมากเท่าใด ยิ่งทราบโมเมนตัม/ความเร็วของอนุภาคนั้นแม่นยำน้อยลงเท่านั้น เป็นสมบัติธรรมชาติของสสาร ไม่ใช่ข้อจำกัดของเครื่องมือวัด

หลักคิด: หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์กคือความสัมพันธ์เชิงปริมาณ $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$ ระหว่างตำแหน่งกับโมเมนตัมของอนุภาคใด ๆ ที่มีสมบัติคลื่น เป็นสมบัติพื้นฐานของธรรมชาติระดับควอนตัม ไม่ใช่ข้อจำกัดทางเทคนิคของเครื่องมือ

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: หลักการนี้ใช้ได้กับอนุภาคทุกชนิดที่มีมวลและความเร็ว ไม่ว่าจะมีประจุหรือไม่ก็ตาม (เพราะมาจากสมบัติคลื่นของสสารตามเดอบรอยล์ ไม่ใช่จากปฏิสัมพันธ์ทางไฟฟ้า) และเป็นข้อจำกัดพื้นฐานที่ไม่มีทางแก้ไขด้วยเทคโนโลยีเครื่องมือใด ๆ

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- ข้อ 2 ผิด — เป็นความเข้าใจผิดที่พบบ่อย หลักการนี้ไม่เกี่ยวกับความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีเลย
- ข้อ 3 ผิด — ไม่จำกัดเฉพาะอนุภาคมีประจุ ใช้ได้กับอนุภาคเป็นกลางด้วย
- ข้อ 4 ผิด — คู่ตัวแปรที่หลักการนี้เกี่ยวข้องโดยตรงคือตำแหน่งกับโมเมนตัม (หรือคู่ที่สมมูลกันอย่างเวลากับพลังงาน) ไม่ใช่ตำแหน่งกับพลังงานตรง ๆ

ข้อ 37 — ตอบ ค.

(ก) และ (ค)

ตรวจทีละข้อความ:

(ก) ถูก — หัวใจของแบบจำลองโบร์คือระดับพลังงานของอิเล็กตรอนมีค่าเฉพาะเป็นขั้น ๆ (quantized) การเปลี่ยนระดับจึงคายโฟตอนได้เฉพาะบางค่าพลังงาน สเปกตรัมจึงเป็น **เส้น** ไม่ใช่แถบต่อเนื่อง ถ้าระดับพลังงานต่อเนื่องได้ทุกค่า สเปกตรัมจะเป็นแถบสีรุ้งต่อเนื่องแทน

(ข) ผิด — พลังงานระดับ n เป็นไปตาม $E_n \propto -\dfrac{1}{n^2}$ ระดับพลังงานจึง **ถี่ขึ้น (ชิดกันมากขึ้น) เมื่อ n สูงขึ้น** เช่น ช่องว่างระหว่าง $n = 1$ กับ $n = 2$ กว้างเป็นสัดส่วน $1 - \frac{1}{4} = \frac{3}{4}$ แต่ระหว่าง $n = 2$ กับ $n = 3$ กว้างเพียง $\frac{1}{4} - \frac{1}{9} = \frac{5}{36}$ ซึ่งแคบกว่ามาก ตัวลวงนี้มาจากการนึกภาพระดับพลังงานเหมือนขั้นบันไดที่สูงเท่ากันทุกขั้น ซึ่งผิด

(ค) ถูก — เส้นไลมันที่พลังงาน**ต่ำสุด**คือ $2 \to 1$: $E = 2.18 \times 10^{-18}\left(1 - \frac{1}{4}\right) = 1.64 \times 10^{-18}$ J ส่วนเส้นบัลเมอร์ที่พลังงาน**สูงสุด**คือ $\infty \to 2$: $E = 2.18 \times 10^{-18} \times \frac{1}{4} = 5.45 \times 10^{-19}$ J — ค่าต่ำสุดของไลมันยังสูงกว่าค่าสูงสุดของบัลเมอร์ประมาณ 3 เท่า ทุกเส้นของไลมันจึงมีพลังงานสูงกว่าทุกเส้นของบัลเมอร์จริง (เหตุผลเชิงภาพ: ช่องว่างพลังงานลงสู่ $n = 1$ กว้างกว่าช่องว่างทั้งหมดที่อยู่เหนือ $n = 2$)

ดังนั้นข้อความที่ถูกคือ **(ก) และ (ค)**

ข้อ 38 — ตอบ ก.

122 nm อยู่ในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลต

❶ **ขั้นที่ 1:** หาพลังงานที่ต้องดูดกลืนเพื่อเปลี่ยนระดับจาก $n = 1$ ไป $n = 2$

$$\Delta E = 2.18 \times 10^{-18} \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) = 2.18 \times 10^{-18} \times \frac{3}{4} = 1.635 \times 10^{-18}\ \mathrm{J}$$

❷ **ขั้นที่ 2:** แปลงพลังงานเป็นความยาวคลื่นด้วย $\lambda = \dfrac{hc}{\Delta E}$

$$\lambda = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^{8}}{1.635 \times 10^{-18}} = 1.22 \times 10^{-7}\ \mathrm{m} = 122\ \mathrm{nm}$$

❸ **ขั้นที่ 3:** ระบุช่วงคลื่น — แสงที่มองเห็นได้อยู่ประมาณ 400–700 nm ค่า 122 nm สั้นกว่ามาก จึงอยู่ในช่วง **รังสีอัลตราไวโอเลต** (สอดคล้องกับที่การเปลี่ยนระดับเกี่ยวกับ $n = 1$ ของไฮโดรเจนคืออนุกรมไลมันซึ่งเป็น UV ทั้งอนุกรม)

ที่มาของตัวลวง:

- 91 nm — ใช้พลังงาน 2.18×10^{-18} J เต็มก้อน (ลืมหักพจน์ $\frac{1}{2^2}$) ซึ่งเป็นพลังงานของการดึงอิเล็กตรอนหลุดออกไปที่ $n = \infty$ ไม่ใช่แค่ขึ้นถึง $n = 2$
- "122 nm ช่วงแสงที่มองเห็นได้" — คำนวณถูกแต่ระบุช่วงผิด เพราะจำว่าสเปกตรัมไฮโดรเจนที่เรียนคือเส้นสีที่มองเห็น ลืมว่านั่นคืออนุกรมบัลเมอร์ (เกี่ยวกับ $n = 2$ ขึ้นไป) ไม่ใช่ไลมัน
- 182 nm — แทนค่าเป็น $1 - \frac{1}{2}$ แทนที่จะเป็น $1 - \frac{1}{2^2}$ (ลืมยกกำลังสองของ n)

ข้อ 39 — ตอบ ข.

5.56×10^14 Hz

หลักคิด: ต้องแปลงฟังก์ชันงานจาก eV เป็นจูลก่อน แล้วใช้ $\nu_0 = \Phi/h$

ขั้นตอน:

1. แปลงหน่วย: $\Phi = 2.30 \times 1.602 \times 10^{-19} \approx 3.68 \times 10^{-19}$ J
2. หาความถี่ขีดเริ่ม:

$$\nu_0 = \frac{\Phi}{h} = \frac{3.68 \times 10^{-19}}{6.626 \times 10^{-34}} \approx 5.56 \times 10^{14}\ \text{Hz}$$

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: ความถี่ระดับ 10^{14} Hz อยู่ในช่วงแสงที่ตามองเห็น/UV ใกล้เคียง ซึ่งสอดคล้องกับฟังก์ชันงานของโลหะแอลคาไลอย่างโพแทสเซียมที่หลุดอิเล็กตรอนได้ง่ายด้วยแสงพลังงานไม่สูงมาก

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- 2.78×10^14 Hz — หารด้วย $2h$ แทนที่จะเป็น h (ผิดตัวประกอบ 2)
- 1.11×10^15 Hz — คูณ Φ ด้วย 2 ก่อนหารด้วย h (ผิดตัวประกอบ 2 กลับด้าน)
- 4.84×10^14 Hz — อ่านค่าฟังก์ชันงานผิดเป็น 2.00 eV แทน 2.30 eV

ข้อ 40 — ตอบ ข.

1.48×10⁻19 J

หลักคิด: ต้องหาพลังงานโฟตอนจากความยาวคลื่นก่อน แล้วลบด้วยฟังก์ชันงานตามสูตร $KE_{max} = h\nu - \Phi = \frac{hc}{\lambda} - \Phi$

ขั้นตอน:

1. ความถี่: $\nu = c/\lambda = (3.00 \times 10^8)/(350 \times 10^{-9}) \approx 8.57 \times 10^{14}$ Hz
2. พลังงานโฟตอน: $E = h\nu = (6.626 \times 10^{-34})(8.57 \times 10^{14}) \approx 5.68 \times 10^{-19}$ J
3. พลังงานจลน์สูงสุด: $KE_{max} = 5.68 \times 10^{-19} - 4.20 \times 10^{-19} \approx 1.48 \times 10^{-19}$ J

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: $KE_{max} > 0$ แสดงว่าเกิดโฟโตอิเล็กทริกได้จริง (พลังงานโฟตอนมากกว่าฟังก์ชันงาน) ค่าที่ได้เล็กกว่าทั้งพลังงานโฟตอนและฟังก์ชันงาน สมเหตุสมผลตามนิยาม

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- 5.68×10⁻19 J — ลืมลบฟังก์ชันงานออก ตอบพลังงานโฟตอนตรง ๆ
- 4.20×10⁻19 J — สับสนตอบค่าฟังก์ชันงานแทนคำตอบที่ถาม
- 9.88×10⁻19 J — บวกพลังงานโฟตอนกับฟังก์ชันงานแทนที่จะลบ

ข้อ 41 — ตอบ ก.

0.727 nm

หลักคิด: ใช้สูตร $\lambda = h/(m_e v)$ โดยตรง แทนค่าและระวังหน่วยให้ครบ

ขั้นตอน:

$$\lambda = \frac{6.626 \times 10^{-34}}{(9.11 \times 10^{-31})(1.0 \times 10^{6})} \approx 7.27 \times 10^{-10}\ \mathrm{m} = 0.727\ \mathrm{nm}$$

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: 0.727 nm มีขนาดใกล้เคียงระยะห่างระหว่างอะตอมในผลึก (ระดับ 0.1–1 nm) จึงเป็นค่าที่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนที่สังเกตได้จริง สอดคล้องกับผลการทดลองเดวิสสัน-เจอร์เมอร์

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- 0.364 nm — คือครึ่งหนึ่งของคำตอบจริง (ผิดตัวประกอบ 2 เช่นเผลอใช้มวลอิเล็กตรอน 2 ตัว)
- 3.96×10⁻4 nm — ใช้มวลโปรตอนแทนมวลอิเล็กตรอนโดยไม่ทันสังเกต ($m_p \approx 1836\, m_e$ ทำให้ λ เล็กลงมหาศาล)
- 7.27×10^5 nm — ลืมใส่เลขยกกำลังของความเร็ว (ใช้ $v = 1.0$ แทน 1.0×10^{6}) ทำให้ผลลัพธ์ผิดหลายเลขยกกำลัง

ข้อ 42 — ตอบ ข.

3.64×10^6 m/s

หลักคิด: จัดสูตร $\lambda = h/(m_e v)$ ใหม่เป็น $v = h/(m_e \lambda)$

ขั้นตอน:

$$v = \frac{6.626 \times 10^{-34}}{(9.11 \times 10^{-31})(2.00 \times 10^{-10})} \approx 3.64 \times 10^{6}\ \mathrm{m/s}$$

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: ค่านี้เร็วกว่าความเร็วของอิเล็กตรอนในข้อก่อนหน้า (1.0×10^{6} m/s ให้ $\lambda = 0.727$ nm) สอดคล้องกับความสัมพันธ์ผกผัน — ความเร็วมากขึ้นทำให้ λ เล็กลง (2.00×10^{-10} m เล็กกว่า 7.27×10^{-10} m)

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- 1.82×10^6 m/s — หารผิดตัวประกอบ 2 (เช่นเผลอใช้ λ เป็น 4.00×10^{-10} m)
- 7.27×10^6 m/s — คูณผิดตัวประกอบ 2 กลับทิศ
- 3.64×10^3 m/s — ลืมเลขยกกำลังของ λ ตอนแทนค่า ทำให้ผลลัพธ์คลาดเคลื่อนหลายเลขยกกำลัง

ข้อ 43 — ตอบ ก.

1.16×10^6 m/s

หลักคิด: ใช้ความไม่แน่นอนขั้นต่ำ (เท่ากรณีเท่ากันพอดี) $\Delta p_{min} = h/(4\pi\Delta x)$ แล้วหา $\Delta v_{min} = \Delta p_{min}/m_e$

ขั้นตอน:

1. $\Delta p_{min} = \dfrac{6.626 \times 10^{-34}}{4\pi \times 5.0 \times 10^{-11}} \approx 1.055 \times 10^{-24}\ \mathrm{kg{\cdot}m/s}$
2. $\Delta v_{min} = \dfrac{1.055 \times 10^{-24}}{9.11 \times 10^{-31}} \approx 1.16 \times 10^{6}\ \mathrm{m/s}$

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: ค่านี้มีขนาดเทียบเคียงได้กับอัตราเร็วจริงของอิเล็กตรอนในอะตอม (ระดับ 10^6 m/s) ซึ่งเล็กกว่าอัตราเร็วแสงมาก จึงเป็นไปได้ทางฟิสิกส์ — สอดคล้องกับที่อิเล็กตรอนอยู่ในอะตอมได้จริง

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- 5.79×10^5 m/s — ลืมตัวประกอบ 2 (เช่นใช้ Δx เป็นสองเท่าของค่าที่ให้)
- 2.31×10^6 m/s — คูณผิดตัวประกอบ 2 กลับทิศ
- 1.16×10^5 m/s — พลาดเลขยกกำลังหนึ่งตำแหน่งตอนคำนวณ

ข้อ 44 — ตอบ ก.

Δv_min ≈ 1.58×10^7 m/s (~5.3% ของ c) น้อยกว่าอัตราเร็วแสงมาก จึงเป็นไปได้ทางฟิสิกส์ที่โปรตอนจะอยู่ในนิวเคลียส

หลักคิด: ใช้ $\Delta p_{min} = h/(4\pi\Delta x)$ แล้วหา $\Delta v_{min} = \Delta p_{min}/m_p$ จากนั้นเทียบกับ c

ขั้นตอน:

1. $\Delta p_{min} = \dfrac{6.626 \times 10^{-34}}{4\pi \times 2.0 \times 10^{-15}} \approx 2.64 \times 10^{-20}\ \mathrm{kg{\cdot}m/s}$
2. $\Delta v_{min} = \dfrac{2.64 \times 10^{-20}}{1.6726 \times 10^{-27}} \approx 1.58 \times 10^{7}\ \mathrm{m/s}$
3. เทียบกับ c: $\dfrac{1.58 \times 10^{7}}{3.00 \times 10^{8}} \approx 0.053$ หรือราว 5.3%

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: 5.3% ของอัตราเร็วแสงยังห่างไกลจากขีดจำกัดสัมพัทธภาพมาก จึงเป็นค่าที่เป็นไปได้จริงทางฟิสิกส์ — อธิบายได้ว่าทำไมโปรตอน (ซึ่งหนักกว่าอิเล็กตรอนราว 1836 เท่า) จึงอยู่ในนิวเคลียสได้ ต่างจากอิเล็กตรอนที่ต้องการ Δv_{min} สูงกว่าความเร็วแสงมาก

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- ข้อ 2 — คำนวณตัวเลขถูกแต่สรุปผิด (5.3% ของ c ไม่ได้ "เกิน" c)
- ข้อ 3 — ใช้มวลอิเล็กตรอนแทนมวลโปรตอนโดยไม่ทันสังเกต ทำให้ได้ค่าที่สูงเกินจริงมาก (นี่คือผลลัพธ์ที่ถูกต้องสำหรับ**อิเล็กตรอน**ในนิวเคลียส ไม่ใช่โปรตอน)
- ข้อ 4 — ตัวเลขและข้อสรุปคลาดเคลื่อนไปจากการคำนวณจริง

ข้อ 45 — ตอบ ก.

3.03×10^{-19} J

1 ขั้นที่ 1: เขียนพลังงานของแต่ละระดับ

$$E_3 = -\frac{2.18 \times 10^{-18}}{3^2} = -\frac{2.18 \times 10^{-18}}{9}\ \text{J} \qquad E_2 = -\frac{2.18 \times 10^{-18}}{2^2} = -\frac{2.18 \times 10^{-18}}{4}\ \text{J}$$

2 ขั้นที่ 2: พลังงานที่คายออกมา คือขนาดของผลต่างพลังงานสองระดับ

$$\Delta E = 2.18 \times 10^{-18}\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}\right) = 2.18 \times 10^{-18}\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{9}\right)$$

3 ขั้นที่ 3: คิดเศษส่วน $\frac{1}{4} - \frac{1}{9} = \frac{9-4}{36} = \frac{5}{36}$

$$\Delta E = 2.18 \times 10^{-18} \times \frac{5}{36} = 3.03 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

จุดที่พลาดบ่อย: ต้องยกกำลังสองของ n เสมอ ถ้าเผลอใช้ $\frac{1}{2} - \frac{1}{3} = \frac{1}{6}$ จะได้ 3.63×10^{-19} J (ผิด) ถ้าบวกเศษส่วนแทนการลบจะได้ 7.87×10^{-19} J (ผิด) และถ้าใช้การเปลี่ยนระดับ $n = 3 \to 1$ จะได้ 1.94×10^{-18} J (ผิดโจทย์)

ข้อ 46 — ตอบ ค.

4.09×10^{-19} J

1 ขั้นที่ 1: แปลงหน่วยความยาวคลื่นให้เป็นเมตรก่อน

$$\lambda = 486\ \text{nm} = 486 \times 10^{-9}\ \text{m} = 4.86 \times 10^{-7}\ \text{m}$$

2 ขั้นที่ 2: ใช้สูตรพลังงานโฟตอน $E = \frac{hc}{\lambda}$

$$E = \frac{6.63 \times 10^{-34}\ \text{J}\cancel{\text{s}} \times 3 \times 10^{8}\ \cancel{\text{m}}/\cancel{\text{s}}}{4.86 \times 10^{-7}\ \cancel{\text{m}}}$$

3 ขั้นที่ 3: คำนวณ

$$E = \frac{1.989 \times 10^{-25}}{4.86 \times 10^{-7}}\ \text{J} = 4.09 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

จุดที่พลาดบ่อย: ถ้าลืมแปลง nm เป็น m (หารด้วย 486 ตรง ๆ) จะได้ 4.09×10^{-28} J ถ้าสับสนกับหน่วยอังสตรอมแล้วใช้ 486×10^{-10} m จะได้ 4.09×10^{-18} J และถ้าเผลอคูณ λ แทนที่จะหาร จะได้ 9.67×10^{-32} J ซึ่งผิดทั้งหมด

ข้อ 47 — ตอบ ง.

6 เส้น

❶ **ขั้นที่ 1:** เส้นสเปกตรัม 1 เส้น เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงาน 1 คู่ (จากระดับสูงลงระดับต่ำ) เมื่อมีอะตอมจำนวนมาก อิเล็กตรอนแต่ละอะตอมอาจเลือกเส้นทางตกต่างกัน จึงต้องนับทุกคู่ที่เป็นไปได้

❷ **ขั้นที่ 2:** นับการเปลี่ยนระดับทั้งหมดจาก $n = 4$ ลงถึง $n = 1$

$$4 \to 3, \quad 4 \to 2, \quad 4 \to 1, \quad 3 \to 2, \quad 3 \to 1, \quad 2 \to 1$$

รวมได้ **6 เส้น**

❸ **ขั้นที่ 3 (สูตรลัด):** จำนวนเส้นมากที่สุดเมื่อเริ่มจากระดับ n คือ

$$\frac{n(n-1)}{2} = \frac{4 \times 3}{2} = 6$$

จุดที่พลาดบ่อย: ตอบ 3 เส้น มาจากการนับเฉพาะเส้นทางตกทีละขั้น ($4 \to 3 \to 2 \to 1$) ลืมว่าอิเล็กตรอนตกข้ามระดับได้ และตอบ 12 มาจากสูตร $n(n-1)$ ที่ลืมหารสอง (นับซ้ำทั้งขาขึ้นขาลง)

ข้อ 48 — ตอบ ก.

$n = 5$ และอยู่ในช่วงแสงที่มองเห็นได้

1 ขั้นที่ 1: พลังงานโฟตอนที่คายออกมาเท่ากับผลต่างพลังงานระหว่างสองระดับ

$$E_{\text{photon}} = E_n - E_2 = 2.18 \times 10^{-18} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

2 ขั้นที่ 2: แทนค่าแล้วแก้สมการหา n

$\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} = \frac{4.58 \times 10^{-19}}{2.18 \times 10^{-18}} = 0.210$

$\frac{1}{n^2} = 0.250 - 0.210 = 0.040 \qquad n^2 = \frac{1}{0.040} = 25$

ดังนั้น $n = 5$ คืออิเล็กตรอนตกจากระดับ $n = 5$ ลงมา $n = 2$

3 ขั้นที่ 3: การตกลงสู่ระดับ $n = 2$ ของไฮโดรเจนคือ **อนุกรมบัลเมอร์** ซึ่งเส้นหลัก (ตกจาก $n = 3$ ถึง 6) อยู่ในช่วงแสงที่มองเห็นได้ (400–700 nm) — เส้น $5 \to 2$ นี้คือเส้นสีม่วงน้ำเงินที่ ~434 nm ดังนั้นอยู่ **ในช่วงแสงที่มองเห็นได้**

ที่มาของตัวลวง:

- "$n = 5$ และอยู่ในช่วง UV" — คำนวณ n ถูก แต่สับสนอนุกรม: การตกลงสู่ $n = 1$ (อนุกรมไลมัน) ต่างหากที่อยู่ในช่วง UV ส่วนการตกลงสู่ $n = 2$ คือบัลเมอร์ซึ่งมองเห็นได้
- "$n = 25$" — ได้ $n^2 = 25$ แล้วลืมถอดรากที่สอง ตอบค่า n^2 แทน n
- "$n = 3$" — จำภาพว่าเส้นมองเห็นได้ของไฮโดรเจนคือ $3 \to 2$ เสมอโดยไม่คำนวณ (ค่าที่ถูกของ $3 \to 2$ คือ $2.18 \times 10^{-18} \times \frac{5}{36} = 3.03 \times 10^{-19}$ J ไม่ตรงกับโจทย์)

จุดสำคัญ: ระดับพลังงานเป็นลบ การคายโฟตอนใช้ขนาดของผลต่าง และต้องแยกให้ได้ว่าอนุกรมไหนตกลงสู่ n ใด (ไลมัน $\to 1$ = UV, บัลเมอร์ $\to 2$ = มองเห็นได้, พาสเชน $\to 3$ = อินฟราเรด)

ข้อ 49 — ตอบ ง.

ทั้งหมด 10 เส้น เป็นอนุกรมบัลเมอร์ 3 เส้น

❶ **ขั้นที่ 1:** จำนวนเส้นสเปกตรัมทั้งหมดเมื่อเริ่มจากระดับ n คือจำนวนคู่ระดับพลังงานทั้งหมดที่อิเล็กตรอนตกได้

$$\frac{n(n-1)}{2} = \frac{5 \times 4}{2} = 10$$

ได้ 10 เส้น

(นับตรง ๆ ก็ได้: จาก 5 ตกไป 4,3,2,1 มี 4 เส้น + จาก 4 มี 3 เส้น + จาก 3 มี 2 เส้น + จาก 2 มี 1 เส้น รวม $4+3+2+1=10$)

❷ **ขั้นที่ 2:** อนุกรมบัลเมอร์คือเส้นที่ตกมา **สิ้นสุดที่** $n=2$ เท่านั้น ได้แก่

$$5 \to 2, \quad 4 \to 2, \quad 3 \to 2$$

รวม **3 เส้น** (ระวัง: เส้น $2 \to 1$ สิ้นสุดที่ $n=1$ เป็นอนุกรมไลมัน ไม่นับ)

ดังนั้นคำตอบคือ ทั้งหมด 10 เส้น เป็นบัลเมอร์ 3 เส้น

ที่มาของตัวลวง:

- "บัลเมอร์ 4 เส้น" — นับเส้น $2 \to 1$ รวมเข้าไปด้วย เพราะเห็นว่าเกี่ยวกับ $n=2$ แต่อนุกรมจำแนกตามระดับ **ปลายทาง** เส้นนี้ปลายทางคือ $n=1$ จึงเป็นไลมัน
- "ทั้งหมด 20 เส้น" — ใช้ $n(n-1) = 5 \times 4$ โดยลืมหารสอง (นับคู่ระดับซ้ำสองรอบ)
- "ทั้งหมด 4 เส้น" — นับเฉพาะการตกทีละขั้น $5 \to 4 \to 3 \to 2 \to 1$ ลืมว่าอิเล็กตรอนตกข้ามหลายระดับในครั้งเดียวได้

ข้อ 50 — ตอบ ก.

3.46 eV

หลักคิด: จัดสูตร $KE_{max} = h\nu - \Phi$ ใหม่เป็น $\Phi = h\nu - KE_{max}$ แล้วแทนค่า (แปลงทุกอย่างเป็น eV ให้สอดคล้องกัน)

ขั้นตอน:

1. ความถี่ของแสง: $\nu = c/\lambda = (3.00 \times 10^8)/(250 \times 10^{-9}) = 1.20 \times 10^{15}$ Hz
2. พลังงานโฟตอน: $E = h\nu = (6.626 \times 10^{-34})(1.20 \times 10^{15}) \approx 7.95 \times 10^{-19}$ J $= 7.95 \times 10^{-19}/1.602 \times 10^{-19} \approx 4.96$ eV
3. ฟังก์ชันงาน: $\Phi = E - KE_{max} = 4.96 - 1.50 = 3.46$ eV

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: Φ ที่ได้ (3.46 eV) น้อยกว่าพลังงานโฟตอน (4.96 eV) สมเหตุสมผล เพราะต้องมีพลังงานเหลือกลายเป็น KE_{max} ได้จริง

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- 4.96 eV — ลืมลบ KE_{max} ออก ตอบพลังงานโฟตอนตรง ๆ
- 6.46 eV — บวก KE_{max} เข้ากับพลังงานโฟตอนแทนที่จะลบ
- 1.50 eV — สับสนตอบค่า KE_{max} ที่โจทย์ให้มาแทนคำตอบที่ถาม

ข้อ 51 — ตอบ ก.

$\lambda_0 \approx 568$ nm — เกิดโฟโตอิเล็กทริกได้ เพราะ 520 nm สั้นกว่า λ_0 จึงมีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าขั้นต่ำ

หลักคิด: ความยาวคลื่นขีดเริ่มหาได้จาก $\lambda_0 = c/\nu_0 = hc/\Phi$ แล้วเทียบกับความยาวคลื่นที่ตกกระทบ — ยิ่งความยาวคลื่น**สั้นกว่า** ยิ่งพลังงานโฟตอน**สูงกว่า** (สวนทางกัน) จึงต้องมีความยาวคลื่นตกกระทบ $\leq \lambda_0$ เท่านั้นจึงเกิดโฟโตอิเล็กทริกได้

ขั้นตอน:

1. หาความถี่ขีดเริ่ม: $\nu_0 = \Phi/h = (3.50 \times 10^{-19})/(6.626 \times 10^{-34}) \approx 5.28 \times 10^{14}$ Hz
2. แปลงเป็นความยาวคลื่น: $\lambda_0 = c/\nu_0 = (3.00 \times 10^8)/(5.28 \times 10^{14}) \approx 5.68 \times 10^{-7}\ \mathrm{m} = 568$ nm
3. เทียบกับแสงสีเขียว 520 nm: เพราะ $520 < 568$ (สั้นกว่า) จึงมีพลังงานโฟตอนมากกว่าฟังก์ชันงาน → เกิดโฟโตอิเล็กทริกได้

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: 568 nm อยู่ในช่วงแสงเหลือง-เขียวของสเปกตรัมที่ตามองเห็น เป็นค่าฟังก์ชันงานที่สมเหตุสมผลสำหรับโลหะทั่วไป (ไม่ต้องใช้ UV ก็เตะอิเล็กตรอนหลุดได้)

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- ข้อ 2 — สลับทิศการเทียบ ความยาวคลื่นสั้นกว่าคือพลังงานสูงกว่า ไม่ใช่ยาวกว่า จึงสรุปผิด
- ข้อ 3 — คำนวณ λ_0 ผิดตัวประกอบ 2 (ได้ครึ่งหนึ่งของค่าจริง) แล้วสรุปผิดทิศด้วย
- ข้อ 4 — คำนวณ λ_0 ผิดตัวประกอบ 2 (ได้สองเท่าของค่าจริง) และอ้างเกินจริงว่าเกิดได้เสมอโดยไม่มีเงื่อนไข

ข้อ 52 — ตอบ ก.

≈ 1836 เท่า (อิเล็กตรอนมีความยาวคลื่นยาวกว่า)

หลักคิด: จากสูตร $\lambda = h/(mv)$ เมื่อ v เท่ากัน อัตราส่วนความยาวคลื่นจะแปรผกผันกับอัตราส่วนมวล

ขั้นตอน:

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_p} = \frac{h/(m_e v)}{h/(m_p v)} = \frac{m_p}{m_e} \approx 1836$$

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: อิเล็กตรอนเบากว่าโปรตอนมาก จึงมีความยาวคลื่นยาวกว่ามากที่อัตราเร็วเท่ากัน — สอดคล้องกับที่การทดลองเลี้ยวเบนจริงทำกับอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่าโปรตอนมาก เพราะ λ ของโปรตอนสั้นเกินกว่าจะสังเกตการเลี้ยวเบนได้ง่ายในสภาวะเดียวกัน

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- ข้อ 2 — สลับตัวเศษตัวส่วนในสูตร (คิดว่ามวลมากทำให้ λ มากตาม ซึ่งผิด เพราะ λ แปรผกผันกับมวล)
- ข้อ 3 — ได้ตัวเลขถูกแต่สรุปทิศทางผิด (อ้างว่าโปรตอนคลื่นยาวกว่า ทั้งที่อัตราส่วนบอกว่าอิเล็กตรอนยาวกว่า)
- ข้อ 4 — ลืมว่ามวลต่างกันมาก แม้อัตราเร็วเท่ากันก็ทำให้ λ ต่างกันมหาศาลตามอัตราส่วนมวล

ข้อ 53 — ตอบ ก.

Δv_min ≈ 5.79×10^9 m/s (~19.3 เท่าของ c) เกินอัตราเร็วแสงมาก จึงเป็นไปไม่ได้ทางฟิสิกส์

หลักคิด: ใช้ $\Delta p_{min} = h/(4\pi\Delta x)$ แล้วหา $\Delta v_{min} = \Delta p_{min}/m_e$ เทียบกับ c

ขั้นตอน:

1. $\Delta p_{min} = \dfrac{6.626 \times 10^{-34}}{4\pi \times 1.0 \times 10^{-14}} \approx 5.27 \times 10^{-21}\ \mathrm{kg{\cdot}m/s}$
2. $\Delta v_{min} = \dfrac{5.27 \times 10^{-21}}{9.11 \times 10^{-31}} \approx 5.79 \times 10^{9}\ \mathrm{m/s}$
3. เทียบกับ c: $5.79 \times 10^9 / 3.00 \times 10^8 \approx 19.3$ เท่า

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: อิเล็กตรอนต้องมีความไม่แน่นอนของความเร็วสูงกว่าอัตราเร็วแสงถึงเกือบ 20 เท่า ซึ่งเป็นไปไม่ได้ตามทฤษฎีสัมพัทธภาพ (ไม่มีวัตถุใดเคลื่อนที่เร็วกว่าแสง) จึงสรุปว่าอิเล็กตรอนไม่สามารถถูกจำกัดอยู่ในระยะขนาดนิวเคลียสได้ นี่คือเหตุผลทางฟิสิกส์ที่สนับสนุนว่าอิเล็กตรอนไม่ได้อยู่ในนิวเคลียส

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- ข้อ 2 — คำนวณอัตราส่วนกับ c ผิดพลาด (หารเลขยกกำลังผิดตำแหน่งได้ 1.93 แทน 19.3)
- ข้อ 3 — ใช้มวลโปรตอนแทนมวลอิเล็กตรอนโดยไม่ทันสังเกต (นี่คือผลลัพธ์ที่ถูกต้องสำหรับโปรตอน ไม่ใช่อิเล็กตรอน)
- ข้อ 4 — ใช้ Δx ผิดค่า (สลับไปใช้ขนาดออร์บิทัลอะตอม 5.0×10^{-11} m แทนขนาดนิวเคลียสที่โจทย์กำหนด)

ข้อ 54 — ตอบ ก.

122 นาโนเมตร

หลักคิด: การคาย 2 โฟตอนตามลำดับหมายถึงอิเล็กตรอนตกลงมา 2 ขั้นผ่านระดับกลางระดับหนึ่ง ต้องใช้พลังงานโฟตอนแรก **ระบุระดับกลาง** ให้ได้ก่อน แล้วจึงคำนวณความยาวคลื่นของการตกขั้นที่สอง

ขั้นตอน:

1. หาระดับกลาง n_k จากโฟตอนแรก ($4 \to n_k$): พลังงานแต่ละระดับ $E_4 = -\dfrac{2.18 \times 10^{-18}}{16} = -1.36 \times 10^{-19}$ J และ $E_2 = -\dfrac{2.18 \times 10^{-18}}{4} = -5.45 \times 10^{-19}$ J ลองตรวจ $4 \to 2$: $\Delta E = E_4 - E_2 = (-1.36 + 5.45) \times 10^{-19} = 4.09 \times 10^{-19}$ J ตรงกับโจทย์พอดี ดังนั้นระดับกลางคือ $n = 2$
2. โฟตอนที่สองคือการตก $2 \to 1$: $E_1 = -2.18 \times 10^{-18}$ J $\Delta E = E_2 - E_1 = (-5.45 \times 10^{-19}) - (-2.18 \times 10^{-18}) = 1.635 \times 10^{-18}$ J
3. ความยาวคลื่น: $\lambda = \dfrac{hc}{\Delta E} = \dfrac{(6.63 \times 10^{-34})(3 \times 10^8)}{1.635 \times 10^{-18}} \approx 1.22 \times 10^{-7}$ m $= 122$ nm

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: การตก $2 \to 1$ คือเส้นแรกของอนุกรมไลมัน (อัลตราไวโอเลต) ซึ่งค่ามาตรฐานคือประมาณ 121.6 nm สอดคล้องกับคำตอบ และพลังงานโฟตอนที่สอง (1.635×10^{-18} J) มากกว่าโฟตอนแรกมาก สมเหตุสมผลเพราะช่องว่างพลังงานระดับล่างกว้างกว่ามาก

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- 97 nm — คำนวณจากการตก $4 \to 1$ ทีเดียว ($\Delta E = 2.04 \times 10^{-18}$ J) ลืมว่าโจทย์ให้คายเป็น 2 โฟตอน ถามเฉพาะโฟตอนที่สอง
- 103 nm — คิดว่าระดับกลางคือ $n = 3$ แล้วคำนวณ $3 \to 1$ โดยไม่ตรวจว่าพลังงานโฟตอนแรกตรงกับ $4 \to 3$ หรือไม่ (จริง ๆ $4 \to 3$ ให้เพียง 1.06×10^{-19} J ไม่ตรงกับโจทย์)
- 487 nm — เอาพลังงานโฟตอนแรก ($4 \to 2$, เส้นในอนุกรมบัลเมอร์) มาคำนวณความยาวคลื่น ทั้งที่โจทย์ถามโฟตอนที่สอง

ข้อ 55 — ตอบ ข.

7

หลักคิด: ขั้นที่ 1 หา Z จากพลังงานโฟตอน: $\Delta E = R_H Z^2 \left(\dfrac{1}{1^2} - \dfrac{1}{2^2}\right) = \dfrac{hc}{\lambda}$ แทนค่า $\lambda = 13.5 \times 10^{-9}$ m ได้ $\Delta E = \dfrac{(6.626 \times 10^{-34})(3.00 \times 10^8)}{13.5 \times 10^{-9}} \approx 1.472 \times 10^{-17}$ J ดังนั้น $Z^2 = \dfrac{1.472 \times 10^{-17}}{(2.18 \times 10^{-18})(0.75)} \approx 9.0$ จึงได้ $Z = 3$ (คือธาตุลิเทียม, Li) ขั้นที่ 2 ไอโซโทปที่มีนิวตรอน 4 ตัว มีเลขมวล $A = Z + N = 3 + 4 = 7$ ซึ่งตรงกับ Li-7 ไอโซโทปที่พบมากในธรรมชาติจริง

ระวัง: สูตรโบร์แบบขยาย $E_n = -R_H Z^2/n^2$ ใช้ได้เฉพาะไอออน/อะตอมที่มีอิเล็กตรอนตัวเดียวเท่านั้น (H, He^+, Li^{2+} ...) ห้ามลืมคูณ Z^2 เพราะถ้าลืมจะได้ $Z = 1$ (เข้าใจผิดว่าเป็น H ธรรมดา) แล้วคำตอบข้อสุดท้ายจะกลายเป็น $A = 1 + 4 = 5$ ซึ่งไม่มีในตัวเลือกเลย — เป็นสัญญาณเตือนว่าคิดผิดตั้งแต่ขั้นแรก

ข้อ 56 — ตอบ ง.

1312 kJ

1 ขั้นที่ 1: สถานะพื้นของไฮโดรเจนคือ $n = 1$

$$E_1 = -\frac{2.18 \times 10^{-18}}{1^2} = -2.18 \times 10^{-18}\ \mathrm{J}$$

การทำให้แตกตัวเป็น H^+ คือการดึงอิเล็กตรอนออกไปที่ $n = \infty$ ซึ่ง $E_\infty = 0$

2 ขั้นที่ 2: พลังงานที่ต้องใช้ต่อ 1 อะตอม

$$\Delta E = E_\infty - E_1 = 0 - (-2.18 \times 10^{-18}) = 2.18 \times 10^{-18}\ \mathrm{J}$$

3 ขั้นที่ 3: คิดต่อ 1 โมล โดยคูณเลขอาโวกาโดร

$$2.18 \times 10^{-18}\ \frac{\mathrm{J}}{\cancel{\mathrm{atom}}} \times 6.02 \times 10^{23}\ \frac{\cancel{\mathrm{atom}}}{\mathrm{mol}} = 1.312 \times 10^6\ \mathrm{J/mol}$$

4 ขั้นที่ 4: แปลงหน่วยเป็นกิโลจูล

$$1.312 \times 10^6\ \cancel{\mathrm{J}} \times \frac{1\ \mathrm{kJ}}{1000\ \cancel{\mathrm{J}}} = 1312\ \mathrm{kJ}$$

(ค่านี้คือพลังงานไอออไนเซชันลำดับที่ 1 ของไฮโดรเจน ประมาณ 1312 kJ/mol ตรงกับค่าจริงในตาราง)

จุดที่พลาดบ่อย: 984 kJ มาจากการคิดแค่การเปลี่ยนระดับ $n = 1 \to 2$ ซึ่งได้เพียง $\frac{3}{4}$ ของพลังงานทั้งหมด (อิเล็กตรอนยังไม่หลุดจากอะตอม) ส่วน 1.31×10^6 kJ มาจากการลืมแปลง J เป็น kJ

ข้อ 57 — ตอบ ข.

18 ตัว

หลักคิด: จำนวนอิเล็กตรอนสูงสุดในระดับพลังงานหลัก n เท่ากับ $2n^2$

$$2n^2 = 2 \times 3^2 = 2 \times 9 = 18$$

จึงบรรจุอิเล็กตรอนได้มากที่สุด 18 ตัว

(มาจากออร์บิทัลย่อย $3s$ จุ 2, $3p$ จุ 6 และ $3d$ จุ 10 รวม $2 + 6 + 10 = 18$)

ที่มาของตัวลวง:

- 8 ตัว — สับสนกับกติกา "ชั้นนอกสุดมีได้ไม่เกิน 8" ซึ่งใช้กับเวเลนซ์อิเล็กตรอน ไม่ใช่ความจุเต็มของชั้น
- 32 ตัว — ใช้ $2n^2$ ของ $n = 4$ (นับชั้นผิด)
- 6 ตัว — คูณ $2n = 2 \times 3$ โดยลืมยกกำลังสอง

ข้อ 58 — ตอบ ข.

11 ตัว

หลักคิด: โจทย์ถามอิเล็กตรอนในออร์บิทัล p **ทุกระดับพลังงานรวมกัน** ไม่ใช่เฉพาะชั้นนอกสุด จึงต้องเขียนการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบออร์บิทัลให้ครบก่อน

1 **ขั้นที่ 1:** จัดเรียงอิเล็กตรอน 17 ตัวของ Cl ตามหลักเอาฟ์บาว

$$\mathrm{Cl} : 1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^5$$

(ตรวจนับ: $2 + 2 + 6 + 2 + 5 = 17$ ✓)

2 **ขั้นที่ 2:** เก็บเฉพาะออร์บิทัลชนิด p ซึ่งมี 2 ชุด คือ $2p^6$ และ $3p^5$

$$6 + 5 = 11$$

ได้ 11 ตัว

ที่มาของตัวลวง:

- 5 ตัว — นับเฉพาะ $3p^5$ ชั้นนอกสุดชั้นเดียว ลืมว่า $2p$ ก็เป็นออร์บิทัลชนิด p เช่นกัน
- 6 ตัว — นับเฉพาะ $2p^6$ ที่เต็มชุด หรือจำความจุสูงสุดของ subshell p มาตอบโดยไม่ดูโจทย์
- 12 ตัว — คิดว่า $3p$ ต้องเต็ม 6 ตัวเหมือน $2p$ $(6 + 6)$ โดยไม่ตรวจนับอิเล็กตรอนจริงของ Cl ซึ่งขาดอีก 1 ตัวจึงจะเต็ม

ข้อ 59 — ตอบ ก.

2, 8, 6 และมีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 6 ตัว

1 **ขั้นที่ 1:** เติมอิเล็กตรอน 16 ตัวจากชั้นในออกนอก — ชั้น K จุ 2, ชั้น L จุ 8 ใช้ไป $2 + 8 = 10$ เหลือ $16 - 10 = 6$ ตัว เข้าชั้น M

ได้การจัดเรียง **2, 8, 6**

2 **ขั้นที่ 2:** เวเลนซ์อิเล็กตรอนคือจำนวนอิเล็กตรอนใน **ชั้นนอกสุด** = 6 ตัว (S จึงอยู่หมู่ VIA คาบ 3 และมักรับอิเล็กตรอน 2 ตัวเกิดเป็น S^{2-})

ที่มาของตัวลวง:

- "เวเลนซ์ 2 ตัว" — สับสนเวเลนซ์อิเล็กตรอนกับจำนวนอิเล็กตรอนที่ต้องรับเพิ่มให้ครบออกเตต $(8 - 6 = 2)$
- "2, 6, 8" — เรียงลำดับความจุชั้นผิด (ชั้น L ต้องเต็ม 8 ก่อนจึงขึ้นชั้น M ได้)
- "2, 8, 8" — นับอิเล็กตรอนเกินมา 2 ตัว (นี่คือการจัดเรียงของ Ar ที่ $Z = 18$ ไม่ใช่ S)

ข้อ 60 — ตอบ ข.

แบบ (ข)

หลักคิด: การบรรจุอิเล็กตรอนในออร์บิทัลที่พลังงานเท่ากัน (degenerate) ต้องเป็นไปตามกฎ 2 ข้อพร้อมกัน

- **กฎของฮุนด์:** อิเล็กตรอนจะเข้าออร์บิทัลว่างทีละตัวโดยมี **สปินขนานกัน** ให้มากที่สุดก่อน แล้วจึงเริ่มจับคู่
- **หลักการกีดกันของเพาลี:** อิเล็กตรอน 2 ตัวในออร์บิทัลเดียวกันต้องมี **สปินตรงข้ามกัน**

ตรวจทีละแบบ (อิเล็กตรอน $2p^4$ = 4 ตัวใน 3 ออร์บิทัล):

- **(ก) ผิด** — จับคู่ 2 คู่ทั้งที่ยังมีออร์บิทัลว่าง ขัดกฎของฮุนด์ (การจับคู่โดยไม่จำเป็นทำให้แรงผลักระหว่างอิเล็กตรอนสูงขึ้น พลังงานจึงไม่ต่ำสุด) — เป็นสถานะกระตุ้น ไม่ใช่สถานะพื้น
- **(ข) ถูก ✓** — จับคู่เพียง 1 คู่ตามจำเป็น ($4 - 3 = 1$ คู่) และอิเล็กตรอนเดี่ยว 2 ตัวที่เหลือมีสปินขนานกัน (↑ ทั้งคู่) ครบทั้งกฎฮุนด์และเพาลี
- **(ค) ผิด** — จำนวนอิเล็กตรอนต่อออร์บิทัลถูก แต่อิเล็กตรอนเดี่ยว 2 ตัวมีสปิน **สวนกัน** (↑ กับ ↓) ขัดกฎของฮุนด์ที่ให้สปินรวมมากที่สุด
- **(ง) ผิด** — ออร์บิทัลแรกมีอิเล็กตรอน 2 ตัวสปิน **เหมือนกัน** (↑↑) ซึ่งขัดหลักการกีดกันของเพาลีโดยตรง แบบนี้เป็นไปไม่ได้เลยไม่ว่าสถานะใด

ระวัง: แยกให้ชัดว่า (ก)(ค) เป็นแบบที่ "เป็นไปได้แต่ไม่ใช่สถานะพื้น" ส่วน (ง) เป็นแบบที่ "เป็นไปไม่ได้เลย" — ข้อสอบชอบถามแยกสองกรณีนี้

ข้อ 61 — ตอบ ข.

2, 8, 8, 2

❶ **ขั้นที่ 1:** จำนวนอิเล็กตรอนสูงสุดในแต่ละชั้นเท่ากับ $2n^2$ ได้แก่ ชั้น K = 2, L = 8, M = 18, N = 32 แต่มีข้อกำหนดเพิ่มว่าชั้นนอกสุดมีอิเล็กตรอนได้ไม่เกิน 8

❷ **ขั้นที่ 2:** เติมอิเล็กตรอน 20 ตัวทีละชั้น: ชั้น K ใส่ 2, ชั้น L ใส่ 8 เหลืออิเล็กตรอน $20 - 10 = 10$ ตัว

❸ **ขั้นที่ 3:** ชั้น M แม้จุได้ถึง 18 แต่สำหรับธาตุช่วงนี้จะรับเพียง 8 ก่อน แล้วอิเล็กตรอน 2 ตัวถัดไปเข้าชั้น N เพราะเมื่อเทียบเป็นออร์บิทัล ระดับ $4s$ มีพลังงานต่ำกว่า $3d$ จึงถูกเติมก่อนตามหลักเอาฟ์บาว

ได้การจัดเรียงเป็น **2, 8, 8, 2** ธาตุนี้คือ Ca มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 2 อยู่หมู่ IIA คาบ 4

จุดที่พลาดบ่อย: คำตอบ 2, 8, 10 มาจากการยัดอิเล็กตรอนที่เหลือทั้งหมดลงชั้น M เพราะเห็นว่าจุได้ 18 ซึ่งขัดกับลำดับพลังงาน $4s < 3d$

ข้อ 62 — ตอบ ข.

N $(Z = 7)$

❶ **ขั้นที่ 1:** เขียนการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบออร์บิทัลของแต่ละธาตุ

- C: $1s^2\ 2s^2\ 2p^2$
- N: $1s^2\ 2s^2\ 2p^3$
- O: $1s^2\ 2s^2\ 2p^4$
- F: $1s^2\ 2s^2\ 2p^5$

❷ **ขั้นที่ 2:** ตามกฎของฮุนด์ อิเล็กตรอนใน $2p$ (มี 3 ออร์บิทัลพลังงานเท่ากัน) จะเข้าออร์บิทัลละ 1 ตัวโดยมีสปินขนานกันก่อน แล้วจึงเริ่มจับคู่

❸ **ขั้นที่ 3:** นับอิเล็กตรอนเดี่ยว

- C $(2p^2)$: กระจาย 2 ออร์บิทัล → เดี่ยว **2** ตัว
- N $(2p^3)$: กระจายครบ 3 ออร์บิทัล → เดี่ยว **3** ตัว
- O $(2p^4)$: ตัวที่ 4 ต้องจับคู่ 1 คู่ → เดี่ยว **2** ตัว
- F $(2p^5)$: จับคู่ 2 คู่ → เดี่ยว **1** ตัว

ดังนั้น N มีอิเล็กตรอนเดี่ยวมากที่สุดคือ 3 ตัว ซึ่งสอดคล้องกับความเสถียรพิเศษของโครงแบบ $2p$ ครึ่งเต็ม

ระวัง: อย่าคิดว่ายิ่งอิเล็กตรอนมากยิ่งมีอิเล็กตรอนเดี่ยวมาก เพราะหลังจาก $2p^3$ อิเล็กตรอนที่เพิ่มเข้ามาจะไปจับคู่ ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนเดี่ยวลดลง

ข้อ 63 — ตอบ ค.

$n = 2,\ l = 2,\ m_l = 1,\ m_s = +\frac{1}{2}$

เงื่อนไขของเลขควอนตัมแต่ละตัว:

- เลขควอนตัมหลัก: $n = 1, 2, 3, \ldots$
- เลขควอนตัมโมเมนตัมเชิงมุม: $l = 0, 1, 2, \ldots, n-1$ (ค่ามากสุดคือ $n-1$ เสมอ)
- เลขควอนตัมแม่เหล็ก: $m_l = -l, \ldots, 0, \ldots, +l$
- เลขควอนตัมสปิน: $m_s = +\frac{1}{2}$ หรือ $-\frac{1}{2}$

ตรวจทีละชุด:

- $n = 3, l = 2$: ได้ เพราะ l ไปได้ถึง $3 - 1 = 2$ (ออร์บิทัล $3d$) และ $m_l = -2$ อยู่ในช่วง -2 ถึง $+2$ → ใช้ได้
- $n = 2, l = 1$: ได้ (ออร์บิทัล $2p$) และ $m_l = 0$ อยู่ในช่วง -1 ถึง $+1$ → ใช้ได้
- $n = 2, l = 2$: **ผิด** เพราะเมื่อ $n = 2$ ค่า l มีได้แค่ 0 กับ 1 เท่านั้น (l ต้องไม่เกิน $n - 1 = 1$) ออร์บิทัล "$2d$" จึงไม่มีอยู่จริง ✓
- $n = 4, l = 0$: ได้ (ออร์บิทัล $4s$) และ m_l ต้องเป็น 0 → ใช้ได้

เกร็ดเพิ่ม: หลักการกีดกันของเพาลีกล่าวว่าอิเล็กตรอนสองตัวในอะตอมเดียวกันจะมีเลขควอนตัมทั้งสี่ซ้ำกันทุกตัวไม่ได้ นี่คือเหตุผลที่หนึ่งออร์บิทัลบรรจุอิเล็กตรอนได้สูงสุด 2 ตัวที่สปินตรงข้ามกัน

ข้อ 64 — ตอบ ก.

4 ตัว

❶ **ขั้นที่ 1:** หาประจุของไอออนแมงกานีสจากสูตรออกไซด์ ใน $\mathrm{Mn_2O_3}$ ออกซิเจนมีประจุ -2 จำนวน 3 ตัว รวม -6 ดังนั้น Mn 2 ตัว ต้องรวมกันเป็น $+6$ คือ $\mathrm{Mn^{3+}}$

❷ **ขั้นที่ 2:** จัดเรียงอิเล็กตรอนของอะตอม Mn (25 อิเล็กตรอน)

$$\mathrm{Mn} : [\mathrm{Ar}]\ 4s^2\ 3d^5$$

❸ **ขั้นที่ 3:** เกิดไอออน $\mathrm{Mn^{3+}}$ โดยดึงอิเล็กตรอนออก 3 ตัว — ต้องดึงจาก $4s$ ออกก่อน 2 ตัว แล้วจึงดึงจาก $3d$ อีก 1 ตัว

$$\mathrm{Mn^{3+}} : [\mathrm{Ar}]\ 3d^4$$

(เหลืออิเล็กตรอน $25 - 3 = 22$ ตัว คือ $18 + 4$)

❹ **ขั้นที่ 4:** บรรจุอิเล็กตรอน $3d^4$ ตามกฎของฮุนด์ — ออร์บิทัล $3d$ มี 5 ออร์บิทัล อิเล็กตรอน 4 ตัวจึงแยกกันอยู่ออร์บิทัลละ 1 ตัว ไม่มีการจับคู่

ดังนั้นมีอิเล็กตรอนเดี่ยว **4 ตัว**

ที่มาของตัวลวง:

- 5 ตัว — มาจากคิดประจุผิดเป็น $\mathrm{Mn^{2+}}$ (เหมือนออกไซด์สูตร MnO) ซึ่งได้ $3d^5$ หรือจากการนับอิเล็กตรอนเดี่ยวของ **อะตอม** Mn ที่มี $3d^5$ โดยลืมว่าโจทย์ถามไอออน
- 2 ตัว — มาจากการดึงอิเล็กตรอนทั้ง 3 ตัวออกจาก $3d$ โดยไม่ดึง $4s$ ก่อน ได้ $[\mathrm{Ar}]\ 3d^2\ 4s^2$ ซึ่งผิดหลักการเกิดไอออนของโลหะแทรนซิชัน
- 3 ตัว — สับสนว่าจำนวนอิเล็กตรอนเดี่ยวเท่ากับประจุของไอออน ซึ่งไม่มีความสัมพันธ์กันโดยตรง

ข้อ 65 — ตอบ ง.

Mn^{2+}

หลักคิด: subshell $3d$ มี 5 ออร์บิทัล ครึ่งเต็มคือ $3d^5$ (ออร์บิทัลละ 1 ตัวครบทั้ง 5) และการเกิดไอออนบวกของโลหะแทรนซิชันต้องดึงอิเล็กตรอน **ออกจาก $4s$ ก่อน $3d$ เสมอ**

1 ขั้นที่ 1: เขียนการจัดเรียงอิเล็กตรอนของอะตอมแต่ละธาตุ

- Cr (24): [Ar] $3d^5\ 4s^1$ (ข้อยกเว้นครึ่งเต็ม)
- Mn (25): [Ar] $3d^5\ 4s^2$
- Fe (26): [Ar] $3d^6\ 4s^2$
- Co (27): [Ar] $3d^7\ 4s^2$

2 ขั้นที่ 2: เกิดไอออน $2+$ โดยดึงอิเล็กตรอนออก 2 ตัว เริ่มจาก $4s$

- Cr^{2+}: ดึง $4s^1$ แล้วต้องดึง $3d$ อีก 1 → [Ar] $3d^4$
- Mn^{2+}: ดึง $4s^2$ พอดี → [Ar] $3d^5$ ✓ **ครึ่งเต็ม**
- Fe^{2+}: → [Ar] $3d^6$
- Co^{2+}: → [Ar] $3d^7$

ตรวจนับ Mn^{2+}: อิเล็กตรอน $25 - 2 = 23 = 18 + 5$ ✓ นี่คือเหตุผลหนึ่งที่ Mn^{2+} เป็นไอออนที่เสถียรและพบบ่อยของแมงกานีส

ที่มาของตัวลวง:

- Cr^{2+} — จำได้ว่า Cr เป็นข้อยกเว้น $3d^5$ จึงเหมารวมว่าไอออนก็ $3d^5$ ด้วย แต่การดึงอิเล็กตรอน 2 ตัว ($4s^1$ + $3d$ อีก 1) ทำให้เหลือ $3d^4$
- Fe^{2+} — สับสนกับข้อเท็จจริงว่า Fe^{3+} ต่างหากที่เป็น $3d^5$ ครึ่งเต็ม ส่วน Fe^{2+} คือ $3d^6$
- Co^{2+} — นับอิเล็กตรอน d ของอะตอมผิด หรือดึงอิเล็กตรอนออกจาก $3d$ แทน $4s$

ข้อ 66 — ตอบ ก.

$[\mathrm{Ar}]\ 3d^6$

❶ **ขั้นที่ 1:** จัดเรียงอิเล็กตรอนของอะตอม Fe (26 อิเล็กตรอน) ตามหลักเอาฟ์บาว โดยเติมจากออร์บิทัลพลังงานต่ำไปสูง

$$1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 4s^2\ 3d^6 \quad = \quad [\mathrm{Ar}]\ 4s^2\ 3d^6$$

❷ **ขั้นที่ 2:** เมื่อโลหะแทรนซิชันเกิดเป็นไอออนบวก อิเล็กตรอนที่หลุดออก **ก่อน** คืออิเล็กตรอนในออร์บิทัล $4s$ ไม่ใช่ $3d$ เพราะเมื่อ $3d$ มีอิเล็กตรอนแล้ว ออร์บิทัล $4s$ จะกลายเป็นระดับพลังงานสูงกว่าและอยู่ชั้นนอกสุด

❸ **ขั้นที่ 3:** Fe^{2+} มีอิเล็กตรอน $26 - 2 = 24$ ตัว โดยดึงออกจาก $4s$ ทั้ง 2 ตัว

$$\mathrm{Fe}^{2+} : [\mathrm{Ar}]\ 3d^6$$

จุดที่พลาดบ่อย:

- $[\mathrm{Ar}]\ 3d^4\ 4s^2$ มาจากการดึงอิเล็กตรอนออกจาก $3d$ ก่อน (สลับลำดับการหลุด)
- $[\mathrm{Ar}]\ 3d^6\ 4s^2$ คือการจัดเรียงของอะตอม Fe ที่เป็นกลาง (ลืมดึงอิเล็กตรอนออก 2 ตัว)
- $[\mathrm{Ar}]\ 3d^5\ 4s^1$ มาจากการนำแนวคิดเสถียรภาพแบบครึ่งเต็ม (half-filled) มาใช้ผิดที่ ซึ่งใช้กับกรณี Cr ที่เป็นอะตอม ไม่ใช่กติกาการดึงอิเล็กตรอนของไอออน

ข้อ 67 — ตอบ ง.

15 ตัว

หลักคิด: อิเล็กตรอนที่จับคู่กันในออร์บิทัลเดียวกันมีสปิน $+\frac{1}{2}$ กับ $-\frac{1}{2}$ หักล้างกันพอดี ดังนั้นผลต่างของจำนวนอิเล็กตรอนสองสปิน = **จำนวนอิเล็กตรอนเดี่ยว (unpaired)** ทั้งหมด โจทย์จึงบอกว่า X มีอิเล็กตรอนเดี่ยว 3 ตัวในสถานะพื้น

ขั้นตอน:

1. ธาตุคาบ 4 ที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยว 3 ตัว มีได้ 3 ธาตุ: V ($[\mathrm{Ar}]\ 4s^2 3d^3$), Co ($[\mathrm{Ar}]\ 4s^2 3d^7$) และ As ($[\mathrm{Ar}]\ 4s^2 3d^{10} 4p^3$)
2. แต่โจทย์กำหนดว่า X เป็น **ธาตุเรพรีเซนเททีฟ** — V และ Co เป็นธาตุแทรนซิชัน จึงตัดออก เหลือ X = สารหนู (As, $Z = 33$)
3. การจัดเรียงอิเล็กตรอนของ As: $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 4s^2\ 3d^{10}\ 4p^3$
4. นับอิเล็กตรอนใน p ($l = 1$) ทั้งหมด: $2p^6 + 3p^6 + 4p^3 = 6 + 6 + 3 = 15$ ตัว

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: As อยู่หมู่ VA มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน $4s^2 4p^3$ อิเล็กตรอนเดี่ยว 3 ตัวใน $4p$ ตามกฎฮุนด์ สอดคล้องกับเงื่อนไขผลต่างสปิน = 3 พอดี และ $Z = 33$ อยู่คาบ 4 จริง

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- 12 ตัว — เลือก X เป็น V หรือ Co (ลืมเงื่อนไขธาตุหมู่หลัก) ซึ่งมี p อิเล็กตรอนเพียง $2p^6 + 3p^6 = 12$ ตัว เพราะอิเล็กตรอนเดี่ยวของมันอยู่ใน $3d$ ไม่ใช่ $4p$
- 3 ตัว — นับเฉพาะ $4p^3$ ชั้นนอกสุด ลืมว่าโจทย์ถามอิเล็กตรอน p **ทั้งหมด** ทุกระดับพลังงาน
- 9 ตัว — นับ $3p^6 + 4p^3$ โดยตกหล่น $2p^6$ ของชั้นใน

ข้อ 68 — ตอบ ง.

อะตอม X ในสถานะพื้นมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนเป็น $[\mathrm{Ar}]\ 3d^5\ 4s^1$ และมีนิวตรอน 28 ตัว

❶ **ขั้นที่ 1:** นับอิเล็กตรอนของไอออน — $[\mathrm{Ar}]\ 3d^3$ มีอิเล็กตรอน $18 + 3 = 21$ ตัว

❷ **ขั้นที่ 2:** X^{3+} เสียอิเล็กตรอนไป 3 ตัว อะตอม X จึงมีอิเล็กตรอน $21 + 3 = 24$ ตัว → เลขอะตอม 24 คือ **โครเมียม (Cr)**

❸ **ขั้นที่ 3:** จัดเรียงอิเล็กตรอนของอะตอม Cr — ตรงนี้คือกับดักของข้อ เพราะ Cr เป็น **ข้อยกเว้นของหลักเอาฟ์บาว**: โครงแบบ $3d$ ครึ่งเต็มเสถียรกว่า จึงเป็น

$$\mathrm{Cr} : [\mathrm{Ar}]\ 3d^5\ 4s^1$$

ไม่ใช่ $[\mathrm{Ar}]\ 3d^4\ 4s^2$ ตามเอาฟ์บาวแบบเถรตรง

(ตรวจสอบย้อนกลับ: เกิด Cr^{3+} โดยดึงอิเล็กตรอน $4s$ 1 ตัวและ $3d$ 2 ตัว เหลือ $3d^3$ ตรงกับโจทย์)

❹ **ขั้นที่ 4:** นิวตรอน $= 52 - 24 = 28$ ตัว → ข้อที่ถูกคือ $[\mathrm{Ar}]\ 3d^5\ 4s^1$ และนิวตรอน 28 ตัว

ที่มาของตัวลวง:

- $[\mathrm{Ar}]\ 3d^3\ 4s^3$ — เอาอิเล็กตรอน 3 ตัวที่คืนให้ไอออนไปยัดใน $4s$ ทั้งหมด แต่ออร์บิทัล s จุได้สูงสุด 2 ตัวเท่านั้น โครงแบบนี้เป็นไปไม่ได้
- เลขอะตอม 21 นิวตรอน 31 — ลืมบวกอิเล็กตรอน 3 ตัวที่ไอออนเสียไป (ใช้ 21 เป็นเลขอะตอมโดยตรง)
- $[\mathrm{Ar}]\ 3d^4\ 4s^2$ — จัดตามเอาฟ์บาวแบบเถรตรง ไม่รู้ข้อยกเว้นครึ่งเต็มของ Cr

---

ข้อ 69 — ตอบ ข.

รังสีแกมมา

หลักคิด: รังสีจากการสลายกัมมันตรังสีมี 3 ชนิดหลัก เรียงอำนาจทะลุทะลวงจากน้อยไปมาก: แอลฟา < บีตา < แกมมา

- **แอลฟา** ($^4_2\mathrm{He}$): เป็นนิวเคลียสฮีเลียม มีมวลมากและประจุ $+2$ → ทะลุทะลวงต่ำสุด (กระดาษกั้นได้) แต่อำนาจทำให้แตกตัวเป็นไอออนสูงสุด
- **บีตา** ($^0_{-1}e$): เป็นอิเล็กตรอนความเร็วสูง มีมวลน้อยและประจุ -1 → ทะลุทะลวงปานกลาง (แผ่นอะลูมิเนียมบางกั้นได้)
- **แกมมา** (γ): เป็น **คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า** ไม่มีมวล ไม่มีประจุ → ทะลุทะลวงสูงสุด ต้องใช้ตะกั่วหรือคอนกรีตหนากั้น ✓

ที่มาของตัวลวง:

- แอลฟา — จำสลับด้าน: แอลฟาเด่นเรื่องทำให้เกิดไอออน ไม่ใช่ทะลุทะลวง
- บีตา — เป็นอนุภาคมีประจุ ไม่ใช่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
- รังสีแคโทด — คือลำอิเล็กตรอนในหลอดสุญญากาศจากการทดลองของทอมสัน ไม่ใช่รังสีจากการสลายกัมมันตรังสี

ข้อ 70 — ตอบ ข.

0.50 กรัม

❶ **ขั้นที่ 1:** แปลงเวลาให้เป็นหน่วยเดียวกันก่อน

2.5 วัน $= 2.5 \times 24 = 60$ ชั่วโมง

❷ **ขั้นที่ 2:** หาจำนวนครึ่งชีวิตที่ผ่านไป

$n = \dfrac{60}{15} = 4$ ครึ่งชีวิต

❸ **ขั้นที่ 3:** มวลที่เหลือลดลงครึ่งหนึ่งทุกครึ่งชีวิต

$$8.00 \xrightarrow{15\text{ h}} 4.00 \xrightarrow{30\text{ h}} 2.00 \xrightarrow{45\text{ h}} 1.00 \xrightarrow{60\text{ h}} 0.50$$

จึงเหลือ 0.50 กรัม

หรือใช้สูตร $m = \dfrac{m_0}{2^n} = \dfrac{8.00}{2^4} = \dfrac{8.00}{16} = 0.50$ กรัม

ที่มาของตัวลวง:

- 1.00 กรัม — นับครึ่งชีวิตผิดเป็น 3 ครั้ง (มักเกิดจากนับลูกศรพลาดหรือหาร $60/15$ ผิด)
- 2.00 กรัม — ใช้เลข 2.5 จากโจทย์มาปัดเป็น 2 ครึ่งชีวิตโดยลืมแปลงวันเป็นชั่วโมง
- 0.25 กรัม — หารครึ่งเกินไป 1 ครั้ง (คิดเป็น 5 ครึ่งชีวิต)

จุดที่ต้องระวังที่สุดในข้อนี้คือ **หน่วยเวลาไม่ตรงกัน** (วัน กับ ชั่วโมง) ซึ่งเป็นกับดักยอดนิยมของข้อสอบครึ่งชีวิต

ข้อ 71 — ตอบ ข.

นิวตรอน ($^{1}_{0}n$)

หลักคิด: สมการนิวเคลียร์ต้องดุลทั้ง **เลขมวล (A)** และ **เลขอะตอม (Z)** — ผลรวมสองข้างของสมการต้องเท่ากัน

1 **ขั้นที่ 1:** ดุลเลขมวล

$$27 + 4 = 30 + A_X \qquad A_X = 31 - 30 = 1$$

2 **ขั้นที่ 2:** ดุลเลขอะตอม

$$13 + 2 = 15 + Z_X \qquad Z_X = 15 - 15 = 0$$

3 **ขั้นที่ 3:** อนุภาคที่มี $A = 1$ และ $Z = 0$ คือ **นิวตรอน** $^{1}_{0}n$

(ปฏิกิริยานี้คือการทดลองประวัติศาสตร์ที่ทำให้ได้ไอโซโทปกัมมันตรังสีสังเคราะห์ตัวแรก คือ P-30)

ที่มาของตัวลวง:

- โปรตอน — ได้ $A = 1$ ถูก แต่ดุลเลขอะตอมพลาด (ถ้า X เป็นโปรตอน ผลรวม Z ขวาจะเป็น $15 + 1 = 16 \neq 15$)
- บีตาลบ — จำภาพว่าปฏิกิริยานิวเคลียร์มักปล่อยบีตา แต่บีตามี $A = 0$ ซึ่งทำให้เลขมวลไม่ดุล ($30 \neq 31$)
- แอลฟา — เห็นแอลฟาอยู่ฝั่งซ้ายจึงคิดว่าต้องออกมาฝั่งขวาด้วย ถ้าเป็นเช่นนั้นเลขมวลขวาจะเป็น $30 + 4 = 34 \neq 31$

ข้อ 72 — ตอบ ข.

แต่ละขั้นตอนในอนุกรมอาจมีครึ่งชีวิตแตกต่างกันมาก และขั้นที่มีครึ่งชีวิตยาวที่สุดจะเป็นตัวกำหนดอัตราการลดลงของทั้งสาย

หลักคิด: ไอโซโทปหนักหลายตัว (โดยเฉพาะธาตุที่ $Z \geq 83$) สลายตัวครั้งเดียวแล้วยังไม่ได้ไอโซโทปเสถียรทันที ต้องผ่านหลายขั้นสลับแอลฟา/บีตาต่อเนื่องกันจนถึงปลายทางที่เสถียร แต่ละขั้นมีครึ่งชีวิตของตัวเองซึ่งต่างกันได้มาก

ตรวจทีละข้อความ:

- ข้อ 2 ถูก — ขั้นที่มีครึ่งชีวิตยาวที่สุด (ขั้นจำกัดอัตรา, rate-limiting step) จะเป็นคอขวดที่กำหนดอัตราการลดลงของทั้งสายเกือบทั้งหมด เพราะสารต้อง "รอ" ผ่านขั้นช้าที่สุดก่อนเสมอ เช่นอนุกรม U-238 ที่ขั้นแรกมีครึ่งชีวิตยาวถึง 4.5×10^9 ปี

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- ข้อ 1 ผิด — ถ้าสลายขั้นเดียวจบก็ไม่เรียกว่า "อนุกรม" การสลายตัว อนุกรมหมายถึงต้องผ่านหลายขั้นจริง
- ข้อ 3 ผิด — อนุกรมจริงมีทั้งแอลฟาและบีตาลบสลับกันไปตามความจำเป็นเพื่อปรับ n/p ratio ให้เข้าใกล้ช่วงเสถียร ไม่ใช่แอลฟาล้วน
- ข้อ 4 ผิด — ตรงข้ามกับความหมายของอนุกรม ไอโซโทปลูกขั้นแรกมักยังไม่เสถียรและต้องสลายตัวต่อ

ข้อ 73 — ตอบ ก.

มีทั้งจำนวนโปรตอนและนิวตรอนเท่ากับ 8 ซึ่งเป็นเลขมหัศจรรย์พร้อมกัน (doubly magic)

หลักคิด: ต้องหาจำนวนนิวตรอนก่อน แล้วเทียบทั้งจำนวนโปรตอนและนิวตรอนกับชุดเลขมหัศจรรย์

ขั้นตอน:

1. $Z = 8, N = A - Z = 16 - 8 = 8$
2. เทียบกับเลขมหัศจรรย์ $2, 8, 20, 50, 82, 126$: ทั้ง $Z = 8$ และ $N = 8$ ตรงกับ 8 พอดี

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: เพราะทั้งโปรตอนและนิวตรอนตรงกับเลขมหัศจรรย์พร้อมกัน จึงเป็น doubly magic ซึ่งอธิบายได้ว่าทำไม O-16 จึงเป็นไอโซโทปที่พบมากที่สุดของออกซิเจนในธรรมชาติ (ราว 99.76%) และเสถียรมากเป็นพิเศษ

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- ข้อ 2 ผิด — ทั้ง Z และ N ตรงกับเลขมหัศจรรย์พร้อมกัน ไม่ใช่แค่ตัวใดตัวหนึ่ง
- ข้อ 3 ผิด — $Z = 8$ และ $N = 8$ ต่างเป็นเลขคู่ทั้งคู่ จึงเป็นนิวเคลียสแบบคู่-คู่ (even–even) ซึ่งเสถียรที่สุดตามกฎการจับคู่ ไม่ใช่คี่-คี่ (คี่-คี่คือแบบที่เสถียรน้อยที่สุด)
- ข้อ 4 ผิด — เลขมวลเป็นเลขคู่จริง แต่เหตุผลหลักของความเสถียรพิเศษคือการตรงกับเลขมหัศจรรย์ทั้งสองค่าพร้อมกัน

ข้อ 74 — ตอบ ง.

$^{228}_{90}\mathrm{Th}$

หลักการดุลสมการนิวเคลียร์: ผลรวมเลขมวล (A) และผลรวมเลขอะตอม (Z) ก่อนและหลังสลายตัวต้องเท่ากัน

- ปล่อยแอลฟา ($^{4}_{2}\mathrm{He}$): A ลด 4, Z ลด 2
- ปล่อยบีตาลบ ($^{0}_{-1}e$): A เท่าเดิม, Z **เพิ่ม** 1 (นิวตรอนเปลี่ยนเป็นโปรตอน)

1 **ขั้นที่ 1:** ปล่อยแอลฟา 1 อนุภาค

$$^{232}_{90}\mathrm{Th} \rightarrow {}^{228}_{88}\mathrm{Ra} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

ได้ $A = 232 - 4 = 228$, $Z = 90 - 2 = 88$

2 **ขั้นที่ 2:** ปล่อยบีตาลบตัวที่ 1: $Z = 88 + 1 = 89$ (ได้ $^{228}_{89}\mathrm{Ac}$)

3 **ขั้นที่ 3:** ปล่อยบีตาลบตัวที่ 2: $Z = 89 + 1 = 90$ โดยเลขมวลคงเดิมตลอด

นิวไคลด์สุดท้ายคือ $^{228}_{90}\mathrm{Th}$ — สังเกตว่ากลับมาเป็นธาตุทอเรียมเหมือนเดิมแต่เป็น **ไอโซโทป** ที่เบาลง 4 หน่วย

ที่มาของตัวลวง:

- $^{228}_{88}\mathrm{Ra}$ — หยุดคิดหลังปล่อยแอลฟา ลืมนับการสลายตัวบีตาอีก 2 ครั้ง
- $^{228}_{86}\mathrm{Rn}$ — misconception ว่าบีตาทำให้เลขอะตอม **ลด** 1 (คิดสลับทิศ) จึงได้ $88 - 2 = 86$
- $^{224}_{90}\mathrm{Th}$ — ได้เลขอะตอมถูก แต่เข้าใจผิดว่าบีตาทำให้เลขมวลลดลงด้วย ความจริงบีตามีเลขมวลเป็น 0 เลขมวลจึงไม่เปลี่ยน

ข้อ 75 — ตอบ ก.

8 วัน

❶ **ขั้นที่ 1:** จุดสำคัญ — โจทย์ให้ปริมาณที่ **สลายไป** ไม่ใช่ที่เหลือ ต้องแปลงก่อน

สลายไป 87.5% แปลว่าเหลือ $100 - 87.5 = 12.5\%$

❷ **ขั้นที่ 2:** เขียนสัดส่วนที่เหลือเป็นกำลังของ $\frac{1}{2}$

$$12.5\% = \frac{12.5}{100} = \frac{1}{8} = \frac{1}{2^3}$$

ดังนั้นเวลาผ่านไป **3 ครึ่งชีวิต** ($100\% \to 50\% \to 25\% \to 12.5\%$)

❸ **ขั้นที่ 3:** หาครึ่งชีวิต

$$t_{1/2} = \frac{24}{3} = 8$$

ได้ครึ่งชีวิต 8 วัน

ตรวจย้อน: เริ่ม 100% ผ่านไป 8, 16, 24 วัน เหลือ 50%, 25%, 12.5% → สลายไป 87.5% ตรงโจทย์ ✓

ที่มาของตัวลวง:

- 12 วัน — เอา 87.5% ไปตีความคร่าว ๆ ว่าประมาณ 75% (เหลือ 25% = 2 ครึ่งชีวิต) ได้ $24/2 = 12$
- 6 วัน — เผลอคิดว่าเหลือ $\frac{1}{16}$ (4 ครึ่งชีวิต) ได้ $24/4 = 6$ — มักเกิดจากหลงนับขั้นการหารครึ่งเกินไป 1 ครั้ง
- 3 วัน — ได้จำนวนครึ่งชีวิต 3 ถูกต้อง แต่ตอบจำนวนครั้งแทนที่จะเอาไปหารเวลา (สับสนระหว่าง "จำนวนครึ่งชีวิต" กับ "ครึ่งชีวิต")

ข้อ 76 — ตอบ ข.

10 ตัว (แอลฟา 6 ตัว บีตาลบ 4 ตัว)

หลักคิด: อนุภาคแอลฟาลดเลขมวลลง 4 ต่อตัว (ไม่กระทบเลขอะตอม) ส่วนบีตาลบเพิ่มเลขอะตอมขึ้น 1 ต่อตัว (ไม่กระทบเลขมวล) ตั้งสมการสองตัวจากผลต่างเลขมวลและเลขอะตอมระหว่างต้นทาง-ปลายทาง

ขั้นตอน:

1. หาผลต่าง: $\Delta A = 232 - 208 = 24, \Delta Z = 90 - 82 = 8$
2. หาแอลฟาจากผลต่างเลขมวล (มีแอลฟาเท่านั้นที่กระทบเลขมวล): $n_\alpha = \Delta A/4 = 24/4 = 6$
3. แทนค่าลงสมการเลขอะตอม: $\Delta Z = 2n_\alpha - n_\beta \Rightarrow n_\beta = 2(6) - 8 = 4$

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: เลขมวลลด $4 \times 6 = 24$ ตรงกับ ΔA ✓ เลขอะตอมเปลี่ยน $-2(6) + 4 = -8$ ตรงกับ ΔZ ✓ รวมอนุภาคทั้งสาย $6 + 4 = 10$ ตัว — ตรงกับอนุกรมทอเรียมจริงในธรรมชาติซึ่งมีขั้นกลางหลายขั้น

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- 8 ตัว (บีตา 2 ตัว) — ตั้งสมการเลขอะตอมผิดเป็น $n_\beta = \Delta Z - n_\alpha$ แทนที่จะเป็น $2n_\alpha - \Delta Z$
- 14 ตัว (แอลฟา 8 บีตา 6) — สับสนกับตัวเลขของอนุกรมยูเรเนียม-238 ที่ให้แอลฟา 8 บีตา 6
- 6 ตัว (แอลฟาเท่านั้น) — ลืมว่าเลขอะตอมเปลี่ยนไปด้วย จึงต้องมีบีตาลบร่วมด้วยเพื่อให้ดุลสมการ

ข้อ 77 — ตอบ ข.

4 ตัว

หลักคิด: ต้องหาจำนวนแอลฟาก่อนจากผลต่างเลขมวล แล้วจึงย้อนกลับไปหาบีตาลบจากผลต่างเลขอะตอม

ขั้นตอน:

1. ผลต่าง: $\Delta A = 235 - 207 = 28, \Delta Z = 92 - 82 = 10$
2. $n_\alpha = \Delta A/4 = 28/4 = 7$
3. $n_\beta = 2n_\alpha - \Delta Z = 2(7) - 10 = 4$

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: เลขมวลลด $4(7) = 28$ ✓ เลขอะตอมเปลี่ยน $-2(7) + 4 = -10$ ✓ ตรงกับอนุกรมยูเรเนียม-235 จริงในธรรมชาติ (แอลฟา 7 บีตา 4)

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- 7 ตัว — ตอบจำนวนแอลฟาแทนที่จะเป็นบีตา (สลับกันว่าโจทย์ถามอะไร)
- 10 ตัว — ใช้ ΔZ ตรง ๆ เป็นคำตอบโดยไม่ลบผลของแอลฟาออกก่อน
- 3 ตัว — คำนวณ $2n_\alpha - \Delta Z$ ผิดเป็น $\Delta Z - n_\alpha = 10 - 7 = 3$ สลับสูตร

ข้อ 78 — ตอบ ก.

$^{16}_{8}\mathrm{O}$ เป็นนิวเคลียสคู่-คู่ (even–even) จึงเสถียร ส่วน $^{18}_{9}\mathrm{F}$ เป็นคี่-คี่ (odd–odd) จึงเสถียรน้อยกว่า สอดคล้องกับข้อเท็จจริงที่ F-18 เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี

หลักคิด: ตรวจว่าจำนวนโปรตอนและนิวตรอนของแต่ละไอโซโทปเป็นเลขคู่หรือคี่ แล้วเทียบกฎ (คู่-คู่เสถียรที่สุด, คี่-คี่เสถียรน้อยที่สุด)

ขั้นตอน:

1. $^{16}_{8}\mathrm{O}$: $Z = 8$ (คู่), $N = 16 - 8 = 8$ (คู่) → even–even
2. $^{18}_{9}\mathrm{F}$: $Z = 9$ (คี่), $N = 18 - 9 = 9$ (คี่) → odd–odd

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: O-16 เป็น even–even (และ doubly magic ด้วย) จึงเสถียรมาก ส่วน F-18 เป็น odd–odd ซึ่งตามกฎควรเสถียรน้อยที่สุด — ตรงกับข้อเท็จจริงจริงที่ F-18 เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี (สลายตัวแบบบีตาบวก ครึ่งชีวิตประมาณ 110 นาที) ที่ใช้ทำสารเภสัชรังสีสำหรับการสแกน PET ($^{18}\mathrm{F}$-FDG)

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- ข้อ 2, 3 ผิด — คำนวณ/จำแนกความเป็นคู่-คี่ผิด ทำให้สรุปกลับด้านหรือคลาดเคลื่อนจากข้อเท็จจริง
- ข้อ 4 ผิด — กฎคู่-คู่/คี่-คี่ใช้ได้กับนิวเคลียสทุกขนาด ไม่จำกัดเฉพาะธาตุหนัก ตัวอย่าง O-16 กับ F-18 ก็เป็นธาตุเบาทั้งคู่

ข้อ 79 — ตอบ ก.

5.61 MeV/นิวคลิออน

หลักคิด: หามวลรวมถ้าอนุภาคแยกกันอิสระ (Z โปรตอน + N นิวตรอน + Z อิเล็กตรอน) ลบด้วยมวลอะตอมจริงได้มวลพร่อง แล้วแปลงเป็นพลังงานและหารด้วยจำนวนนิวคลิออน

ขั้นตอน:

1. Li-7: $Z = 3, N = 7 - 3 = 4$ มวลรวมแยกอนุภาค: $3(1.00728) + 4(1.00867) + 3(0.00055) = 7.05817$ amu
2. มวลพร่อง: $\Delta m = 7.05817 - 7.016003 \approx 0.04217$ amu
3. พลังงานยึดเหนี่ยวรวม: $BE = 0.04217 \times 931.5 \approx 39.28$ MeV
4. ต่อนิวคลิออน (7 ตัว): $BE_N = 39.28/7 \approx 5.61$ MeV ต่อนิวคลิออน

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: ค่า 5.61 MeV/นิวคลิออน ต่ำกว่า He-4 (7.08) และ Fe-56 (8.79) สอดคล้องกับตำแหน่งของ Li-7 บนกราฟพลังงานยึดเหนี่ยว ซึ่งอยู่ในช่วงธาตุเบาที่ยังไม่ถึงจุดสูงสุด

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- 5.39 MeV/นิวคลิออน — ลืมนับมวลอิเล็กตรอน 3 ตัวรวมในมวลแยกอนุภาค (ใช้แค่ $3m_p + 4m_n$) ทำให้มวลพร่องคลาดเคลื่อน
- 7.08 MeV/นิวคลิออน — สับสนกับค่าของ He-4
- 8.79 MeV/นิวคลิออน — สับสนกับค่าของ Fe-56

ข้อ 80 — ตอบ ง.

เหลือ 2 มิลลิกรัม, เลขอะตอมของ Y เท่ากับ 54

หลักคิด: ขั้นที่ 1 หาจำนวนครึ่งชีวิตที่ผ่านไป: $k = t/t_{1/2} = 32/8 = 4$ รอบ ปริมาณที่เหลือ $= 32 \times (1/2)^4 = 32/16 = 2$ มิลลิกรัม ขั้นที่ 2 การสลายให้อนุภาคบีตาลบทำให้เลขอะตอมเพิ่มขึ้น 1 (นิวตรอนในนิวเคลียสเปลี่ยนเป็นโปรตอน) $Z_Y = 53 + 1 = 54$ ซึ่งตรงกับธาตุซีนอน (Xe) โดยเลขมวลคงเดิมที่ 131

ระวัง: ตัวลวง 'เลขอะตอม 52' มาจากการสลับทิศไปคิดว่าบีตาลบทำให้เลขอะตอมลดลง (สลับกับบีตาบวก) ส่วน 'เลขอะตอม 53' มาจากการเข้าใจผิดว่าบีตาลบไม่เปลี่ยนเลขอะตอมเลย ส่วนตัวลวง '4 มิลลิกรัม' มาจากการนับจำนวนครึ่งชีวิตผิดเป็น 3 รอบแทนที่จะเป็น 4 รอบ

ข้อ 81 — ตอบ ค.

18 ชั่วโมง

หลักคิด: ทุกอะตอม A ที่สลายไปจะกลายเป็น B หนึ่งอะตอม (อัตราส่วนโมล 1 : 1) ดังนั้นจำนวนอะตอมรวม $A + B$ คงที่เท่ากับจำนวน A เริ่มต้น

1 **ขั้นที่ 1:** แปลงอัตราส่วนเป็นสัดส่วนของ A ที่เหลือ — เมื่อ $B : A = 7 : 1$ ให้คิดจำนวนรวมเป็น $7 + 1 = 8$ ส่วน

สัดส่วนของ A ที่เหลือต่อ A เริ่มต้น $= \frac{1}{8}$

2 **ขั้นที่ 2:** เขียนเป็นกำลังของ $\frac{1}{2}$

$$\frac{1}{8} = \frac{1}{2^3}$$

แสดงว่าผ่านไป 3 ครึ่งชีวิต

3 **ขั้นที่ 3:** คำนวณเวลา

$$t = 3 \times 6 = 18$$

ได้ 18 ชั่วโมง

ตรวจย้อน: เริ่ม 8 ส่วน → เหลือ A = 4, 2, 1 ส่วนที่เวลา 6, 12, 18 ชั่วโมง ขณะนั้น B = $8 - 1 = 7$ ส่วน ได้ $B : A = 7 : 1$ ✓

ที่มาของตัวลวง:

- 42 ชั่วโมง — เห็นเลข 7 ในโจทย์แล้วคิดว่าผ่านไป 7 ครึ่งชีวิต (7×6) โดยไม่แปลงอัตราส่วนเป็นสัดส่วนที่เหลือ
- 12 ชั่วโมง — ตีความอัตราส่วน 7 : 1 ผิดว่าเหลือ A ประมาณ $\frac{1}{4}$ (2 ครึ่งชีวิต) — พลาดจากการใช้ $\frac{1}{7}$ แล้วปัดเป็นกำลังของสองที่ใกล้เคียง
- 24 ชั่วโมง — คิดว่าเหลือ $\frac{1}{16}$ (4 ครึ่งชีวิต) มักมาจากการเผลอบวกส่วนเป็น $7 + 1$ แล้วหารครึ่งต่ออีกครั้งเกินไป 1 ขั้น

ระวัง: โจทย์อัตราส่วนแม่-ลูกต้องแปลงเป็น "เศษส่วนของสารตั้งต้นที่เหลือ" ก่อนเสมอ ห้ามใช้ตัวเลขอัตราส่วนตรง ๆ

ข้อ 82 — ตอบ ง.

22,920 ปี และได้ $^{14}_{7}\mathrm{N}$

❶ **ขั้นที่ 1:** หาจำนวนครึ่งชีวิตจากสัดส่วนที่เหลือ

$$6.25\% = \frac{6.25}{100} = \frac{1}{16} = \frac{1}{2^4}$$

ดังนั้นผ่านไป **4 ครึ่งชีวิต** ($100\% \to 50\% \to 25\% \to 12.5\% \to 6.25\%$)

❷ **ขั้นที่ 2:** คำนวณอายุ

$$t = 4 \times 5{,}730 = 22{,}920$$

ได้อายุ 22,920 ปี

❸ **ขั้นที่ 3:** ดุลสมการการสลายตัวบีตาลบ — บีตาลบ ($^{0}_{-1}e$) ทำให้เลขมวลคงเดิม แต่เลขอะตอม **เพิ่ม 1** (นิวตรอนเปลี่ยนเป็นโปรตอน)

$$^{14}_{6}\mathrm{C} \to {}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{0}_{-1}e$$

คำตอบคือ **22,920 ปี และได้** $^{14}_{7}\mathrm{N}$

ที่มาของตัวลวง:

- 17,190 ปี — นับครึ่งชีวิตผิดเป็น 3 ครั้ง (มักเกิดจากคิดว่า $6.25\% = \frac{1}{8}$)
- $^{10}_{4}\mathrm{Be}$ — เอาการสลายแบบแอลฟามาใช้ (A ลด 4, Z ลด 2) ทั้งที่โจทย์ระบุว่าเป็นบีตา
- $^{14}_{5}\mathrm{B}$ — รู้ว่าบีตาไม่เปลี่ยนเลขมวล แต่คิดทิศผิดว่าเลขอะตอม **ลด** 1

ข้อ 83 — ตอบ ค.

100 g

หลักคิด: เพราะขั้นแรกเป็นขั้นจำกัดอัตรา (ช้ากว่าขั้นอื่นมาก) อัตราการลดลงของ X ทั้งสายจึงประมาณได้ด้วยครึ่งชีวิตของขั้นแรกขั้นเดียว เหมือนการสลายตัวอันดับหนึ่งปกติ

ขั้นตอน:

1. จำนวนครึ่งชีวิตที่ผ่านไป: $k = \dfrac{6.0 \times 10^8}{2.0 \times 10^8} = 3$ รอบ
2. มวลที่เหลือ: $N = N_0(1/2)^k = 800 \times (1/2)^3 = 800/8 = 100$ g

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: ผ่านไป 3 ครึ่งชีวิตพอดี (สอดคล้องกับ "เหลือ 12.5%" ที่เจอบ่อย) $800 \times 0.125 = 100$ g ตรงกัน

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- 400 g — คิดว่าผ่านไปเพียง 1 ครึ่งชีวิต ($k = 1$) ลืมหารเวลาจริงด้วยครึ่งชีวิต
- 200 g — คิดผิดเป็น $k = 2$ (หารเวลาผิดหรือปัดเศษผิด)
- 25 g — คิดว่า $k = 5$ (สับสนกับตัวเลขอื่นในโจทย์ เช่นเอา 6.0/1.2 ผิด)

ข้อ 84 — ตอบ ก.

ธาตุทุกชนิดที่มี $Z \geq 83$ ไม่มีไอโซโทปเสถียรเลยแม้แต่ตัวเดียว บิสมัทมี $Z = 83$ จึงเข้าข่ายกฎนี้พอดี แม้ครึ่งชีวิตจะยาวมากจนดูเหมือนเสถียรในทางปฏิบัติ

หลักคิด: กฎความเสถียรของนิวเคลียสระบุชัดว่าทุกไอโซโทปของธาตุที่มี $Z \geq 83$ เป็นกัมมันตรังสีทั้งหมด ไม่มีข้อยกเว้น แม้บางไอโซโทปจะมีครึ่งชีวิตยาวมากจนดูเหมือนเสถียรในการใช้งานจริง

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: บิสมัท-209 มี $Z = 83$ ตรงตามเกณฑ์ $Z \geq 83$ พอดี ครึ่งชีวิตที่ยาวถึง 2×10^{19} ปี (นานกว่าอายุจักรวาลมาก) ทำให้ก่อนหน้านี้ตรวจวัดการสลายตัวไม่ได้ จึงเข้าใจผิดว่าเสถียร แต่ในทางทฤษฎีตามกฎ $Z \geq 83$ แล้วมันต้องเป็นกัมมันตรังสีเสมอ ซึ่งภายหลังพิสูจน์ได้จริงด้วยเครื่องมือที่ไวพอ

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- ข้อ 2 — n/p ratio ของบิสมัทไม่ได้ผิดปกติที่สุดในบรรดาธาตุทั้งหมด และไม่ใช่เหตุผลหลักที่กฎข้อนี้ใช้อ้างอิง
- ข้อ 3 — 209 ไม่ใช่เลขมหัศจรรย์จริง แต่นี่ไม่ใช่สาเหตุหลักที่ทำให้ไม่เสถียร (มีไอโซโทปเสถียรอื่นจำนวนมากที่เลขมวลก็ไม่ใช่เลขมหัศจรรย์เช่นกัน) กฎที่อธิบายตรงประเด็นที่สุดคือ $Z \geq 83$
- ข้อ 4 — ตรงข้ามกับความจริง เพราะกรณีนี้สอดคล้องกับกฎ $Z \geq 83$ อย่างชัดเจน ไม่ใช่ข้อยกเว้น

ข้อ 85 — ตอบ ก.

Tc ($Z = 43$) และโพรมีเทียม Pm ($Z = 61$) เป็นข้อยกเว้นพิเศษสองธาตุที่เบากว่า $Z = 83$ แต่ไม่มีไอโซโทปเสถียรเลย ทั้งที่ n/p ratio อยู่ในช่วงที่ควรเสถียรได้

หลักคิด: กฎ n/p ratio และเลขมหัศจรรย์เป็นแนวโน้มทั่วไปที่ใช้ทำนายความเสถียรได้ในกรณีส่วนใหญ่ แต่มีข้อยกเว้นเฉพาะตัวสองธาตุที่ต้องจำแยกไว้ต่างหาก คือ Tc ($Z = 43$) และ Pm ($Z = 61$) ซึ่งไม่มีไอโซโทปเสถียรเลยแม้จะเบากว่า $Z = 83$ มาก

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: ข้อยกเว้นนี้เป็นข้อเท็จจริงเชิงประจักษ์ (มาจากผลการสำรวจไอโซโทปทั้งหมดในธรรมชาติ) ไม่ได้อธิบายได้ครบถ้วนจาก n/p ratio เพียงอย่างเดียว จึงต้องจำเป็นกรณีพิเศษแยกจากกฎทั่วไป

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- ข้อ 2 ผิด — $Z = 43$ น้อยกว่า 83 มาก ไม่เข้าเกณฑ์กฎ $Z \geq 83$
- ข้อ 3 ผิด — เป็นการเหมารวมที่ผิด ธาตุแทรนซิชันส่วนใหญ่ (เช่น Fe, Cu, Zn, Mo) มีไอโซโทปเสถียรตามปกติ มีเพียง Tc เท่านั้นในกลุ่มนี้ที่เป็นข้อยกเว้น
- ข้อ 4 ผิด — ธาตุเลขอะตอมคี่จำนวนมาก (เช่น Na, Al, P, Cl) มีไอโซโทปเสถียรตามปกติ ไม่ใช่ทุกธาตุเลขคี่จะไม่มีไอโซโทปเสถียร

ข้อ 86 — ตอบ ก.

127.7 MeV

หลักคิด: หามวลรวมแยกอนุภาค ลบด้วยมวลอะตอมจริงได้มวลพร่อง แล้วคูณด้วย 931.5 MeV

ขั้นตอน:

1. $Z = 8, N = 16 - 8 = 8$: มวลรวมแยกอนุภาค $= 8(1.00728) + 8(1.00867) + 8(0.00055) = 16.13200$ amu
2. มวลพร่อง: $\Delta m = 16.13200 - 15.994915 \approx 0.13709$ amu
3. พลังงานยึดเหนี่ยวรวม: $BE = 0.13709 \times 931.5 \approx 127.7$ MeV

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: ต่อนิวคลิออน (16 ตัว) จะได้ $127.7/16 \approx 7.98$ MeV/นิวคลิออน ซึ่งสูงกว่า He-4 (7.08) แต่ต่ำกว่า Fe-56 (8.79) ตรงตามแนวโน้มบนกราฟพลังงานยึดเหนี่ยวที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามเลขมวลจนถึงจุดสูงสุดที่ Fe-56

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- 7.98 MeV — นี่คือค่า**ต่อนิวคลิออน** ไม่ใช่พลังงานยึดเหนี่ยว**รวม**ที่โจทย์ถาม (สับสนสองปริมาณนี้)
- 255.4 MeV — คำนวณถูกแล้วคูณ 2 ผิดพลาดเพิ่มอีกครั้ง
- 63.85 MeV — คำนวณถูกแล้วหาร 2 ผิดพลาดเพิ่มอีกครั้ง

ข้อ 87 — ตอบ ก.

8.80 MeV/นิวคลิออน (สูงสุดในบรรดาไอโซโทปทั้งหมด สอดคล้องกับที่ Fe-56 เสถียรที่สุด)

หลักคิด: หามวลรวมแยกอนุภาค ($Z = 26, N = 56 - 26 = 30$) ลบด้วยมวลอะตอมจริง แปลงเป็นพลังงาน แล้วหารด้วยจำนวนนิวคลิออนทั้งหมด (56 ตัว)

ขั้นตอน:

1. มวลรวมแยกอนุภาค: $26(1.00728) + 30(1.00867) + 26(0.00055) = 56.46368$ amu
2. มวลพร่อง: $\Delta m = 56.46368 - 55.934942 \approx 0.52874$ amu
3. พลังงานยึดเหนี่ยวรวม: $BE = 0.52874 \times 931.5 \approx 492.5$ MeV
4. ต่อนิวคลิออน: $492.5/56 \approx 8.80$ MeV/นิวคลิออน

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: ค่านี้สูงกว่า He-4 (7.08) และ O-16 (7.98) ทุกตัว ตรงกับข้อเท็จจริงที่เป็นที่รู้จักกันดีว่า Fe-56 อยู่จุดสูงสุดของกราฟพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลิออน คือเสถียรที่สุดในบรรดาไอโซโทปทั้งหมด

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- 7.98 MeV/นิวคลิออน — สับสนกับค่าของ O-16
- 17.6 MeV/นิวคลิออน — หารพลังงานยึดเหนี่ยวรวมด้วยจำนวนนิวคลิออนผิด (ใช้ 28 แทน 56 เช่นหารด้วย $Z + N$ ที่คิดผิดครึ่งหนึ่ง)
- 4.40 MeV/นิวคลิออน — คำนวณถูกแล้วหารด้วย 2 เพิ่มอีกครั้งโดยไม่มีเหตุผล

ข้อ 88 — ตอบ ก.

1.12 MeV/นิวคลิออน (ต่ำกว่า He-4 มาก แสดงว่าฟิวชันดิวเทอเรียมรวมเป็นฮีเลียมคายพลังงานออกมาได้มาก)

หลักคิด: ดิวเทอเรียมมี $Z = 1, N = 2 - 1 = 1$ คำนวณมวลพร่องและพลังงานยึดเหนี่ยวตามขั้นตอนปกติ แล้วหารด้วยจำนวนนิวคลิออน (2 ตัว)

ขั้นตอน:

1. มวลรวมแยกอนุภาค: $1(1.00728) + 1(1.00867) + 1(0.00055) = 2.01650$ amu
2. มวลพร่อง: $\Delta m = 2.01650 - 2.014102 \approx 0.00240$ amu
3. พลังงานยึดเหนี่ยวรวม: $BE = 0.00240 \times 931.5 \approx 2.234$ MeV
4. ต่อนิวคลิออน (2 ตัว): $2.234/2 \approx 1.12$ MeV/นิวคลิออน

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: ค่า 1.12 MeV/นิวคลิออน ต่ำกว่า He-4 (7.08) มาก แสดงว่าดิวเทอเรียมเสถียรน้อยกว่ามาก เมื่อดิวเทอเรียมหลอมรวมเป็นฮีเลียม (ฟิวชัน) ผลิตภัณฑ์จะมีพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลิออนสูงขึ้นมาก จึงคายพลังงานส่วนต่างออกมามหาศาล — สอดคล้องกับที่ปฏิกิริยาฟิวชันของไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานหลักของดวงอาทิตย์

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- 2.23 MeV/นิวคลิออน — สับสนค่าพลังงานยึดเหนี่ยว**รวม**กับค่า**ต่อนิวคลิออน** (บังเอิญมีตัวเลขใกล้เคียงกันเพราะนิวคลิออนมีแค่ 2 ตัว)
- 7.08 MeV/นิวคลิออน — สับสนกับค่าของ He-4
- 0.56 MeV/นิวคลิออน — หารพลังงานยึดเหนี่ยวรวมด้วยจำนวนนิวคลิออนผิด (ใช้ 4 แทน 2)

ข้อ 89 — ตอบ ง.

30.9 กรัม

❶ **ขั้นที่ 1:** หาจำนวนครึ่งชีวิต

$n = \dfrac{276}{138} = 2$ ครึ่งชีวิต

❷ **ขั้นที่ 2:** หามวล Po-210 ที่เหลือและที่สลายไป

เหลือ $= \dfrac{42.0}{2^2} = 10.5$ กรัม และสลายไป $= 42.0 - 10.5 = 31.5$ กรัม

❸ **ขั้นที่ 3:** จุดสำคัญ — มวล Po ที่สลายไป **ไม่ได้** กลายเป็น Pb ทั้งหมด เพราะแต่ละอะตอมที่สลายจะแตกเป็น Pb-206 กับอนุภาคแอลฟา (มวล 4) ต้องคิดผ่านจำนวนโมล

mol ของ Po ที่สลาย $= \dfrac{31.5}{210} = 0.150$ mol

❹ **ขั้นที่ 4:** จากสมการ ${}^{210}_{84}\mathrm{Po} \rightarrow {}^{206}_{82}\mathrm{Pb} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$ อัตราส่วนโมล Po : Pb = 1 : 1

มวล Pb $= 0.150 \times 206 = 30.9$ กรัม

ที่มาของตัวลวง:

- 31.5 กรัม — misconception ที่พบบ่อยที่สุด คือคิดว่ามวล Po ที่หายไปเท่ากับมวล Pb ที่เกิด ลืมว่ามวลส่วนหนึ่ง ($0.150 \times 4 = 0.6$ กรัม) หลุดออกไปเป็นอนุภาคแอลฟา
- 10.5 กรัม — สับสนเอามวล Po **ที่เหลือ** มาตอบแทนมวล Pb ที่เกิด
- 20.6 กรัม — คิดจำนวนครึ่งชีวิตผิดเป็น 1 ครั้ง (สลายไป 21.0 กรัม ได้ $\frac{21.0}{210} \times 206 = 20.6$ กรัม)

ข้อ 90 — ตอบ ค.

18 วัน

หลักคิด: ไอโซโทปทั้งสองสลายตัวพร้อมกันแต่คนละอัตรา A สลายเร็วกว่า (ครึ่งชีวิตสั้นกว่า) จึงเหลือน้อยกว่า อัตราส่วน N_B/N_A จะโตขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลา ต้องเขียนจำนวนที่เหลือของแต่ละตัวเป็นฟังก์ชันของเวลาแล้วตั้งสมการอัตราส่วน

ขั้นตอน:

1. ให้จำนวนอะตอมเริ่มต้นเป็น N_0 เท่ากันทั้งคู่ ที่เวลา t (วัน):

$$N_A = N_0\left(\tfrac{1}{2}\right)^{t/2}, \qquad N_B = N_0\left(\tfrac{1}{2}\right)^{t/6}$$

2. อัตราส่วน:

$$\frac{N_B}{N_A} = \left(\tfrac{1}{2}\right)^{t/6-t/2} = 2^{t/2-t/6} = 2^{t/3}$$

3. ตั้งสมการ $2^{t/3} = 64 = 2^6$ ได้ $\dfrac{t}{3} = 6$ ดังนั้น $t = 18$ วัน

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: ที่ $t = 18$ วัน A ผ่านไป $18/2 = 9$ ครึ่งชีวิต เหลือ $N_0/512$ ส่วน B ผ่านไป $18/6 = 3$ ครึ่งชีวิต เหลือ $N_0/8$ อัตราส่วน $\dfrac{N_0/8}{N_0/512} = \dfrac{512}{8} = 64$ ตรงตามโจทย์พอดี

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- 12 วัน — เข้าใจผิดว่าอัตราส่วนขึ้นกับผลต่างจำนวนครึ่งชีวิตแบบ $t/2$ อย่างเดียว ($2^{t/2} = 64 \Rightarrow t = 12$) โดยลืมว่า B ก็สลายตัวไปด้วย (ที่ 12 วัน อัตราส่วนจริงเป็นเพียง $2^4 = 16$)
- 36 วัน — ใช้เลขชี้กำลัง $t/6$ ของ B ($2^{t/6} = 64$) สลับบทบาทของสองไอโซโทป
- 24 วัน — จำนวนครึ่งชีวิตรวมของสองตัว ($6 + 2$ ครึ่งชีวิต) ซึ่งไม่ใช่วิธีคิดอัตราส่วนที่ถูกต้อง

ข้อ 91 — ตอบ ก.

A = 226, Z = 89

หลักคิด: เป็นโจทย์ย้อนกลับของการนับอนุภาคในอนุกรม ต้องแก้สมการหาไอโซโทปตั้งต้นจากไอโซโทปปลายทางและจำนวนอนุภาคที่ปล่อยออกมา

ขั้นตอน:

1. เลขมวล: แอลฟาแต่ละตัวลดเลขมวลลง 4 ดังนั้นเลขมวลตั้งต้น $A_0 = A_f + 4n_\alpha = 206 + 4(5) = 226$
2. เลขอะตอม: แอลฟาลดเลขอะตอม 2 ต่อตัว บีตาลบเพิ่มเลขอะตอม 1 ต่อตัว ดังนั้น $Z_0 = Z_f + 2n_\alpha - n_\beta = 82 + 2(5) - 3 = 89$

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: ย้อนไปข้างหน้า: $A_0 = 226 \rightarrow A_f = 226 - 4(5) = 206$ ✓ และ $Z_0 = 89 \rightarrow Z_f = 89 - 2(5) + 3 = 82$ ✓ ธาตุที่ $Z = 89$ คือแอกทิเนียม (Ac) ดังนั้น Y คือ $^{226}_{89}\mathrm{Ac}$ ซึ่งเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีจริงที่มีอยู่ในธรรมชาติ

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- A=226, Z=92 — ลืมลบผลของบีตาลบออกจากเลขอะตอม ใช้แค่ $2n_\alpha$ $(82 + 10 = 92)$
- A=226, Z=95 — บวกผลของบีตาลบผิดทิศ (บวกแทนที่จะลบ: $82 + 10 + 3 = 95$)
- A=211, Z=89 — ลืมคูณ 4 ให้ n_α ตอนหาเลขมวล เผลอบวก n_α ตรง ๆ $(206 + 5 = 211)$

ข้อ 92 — ตอบ ก.

ปฏิกิริยานี้คายพลังงานสุทธิออกมา เพราะผลิตภัณฑ์มีพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลิออนสูงขึ้น (เสถียรขึ้น) มวลส่วนที่หายไปแปลงเป็นพลังงานตาม $E = mc^2$

หลักคิด: พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลิออนคือตัวชี้วัดความเสถียรของนิวเคลียส ปฏิกิริยานิวเคลียร์ใด ๆ ที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่านี้**สูงขึ้น**จะคายพลังงานสุทธิออกมา (มวลรวมหลังปฏิกิริยาน้อยกว่าก่อนปฏิกิริยา ส่วนต่างแปลงเป็นพลังงานตาม $E = mc^2$)

ตรวจสอบเชิงเหตุผล: He-4 (7.08 MeV/นิวคลิออน) เสถียรน้อยกว่า Fe-56 (8.80 MeV/นิวคลิออน) การหลอมรวมนิวเคลียสเบาเข้าใกล้ Fe-56 บนกราฟจึงเพิ่มความเสถียรเฉลี่ยต่อนิวคลิออน คายพลังงานออกมาได้ — เป็นกลไกเดียวกับที่ดวงอาทิตย์ผลิตพลังงานจากฟิวชันไฮโดรเจนเป็นฮีเลียมและธาตุที่หนักขึ้น

ระวัง (ที่มาตัวลวง):

- ข้อ 2 — แม้ต้องใช้พลังงานกระตุ้น (activation energy) สูงมากเพื่อเอาชนะแรงผลักในช่วงเริ่มต้น แต่นั่นเป็นคนละเรื่องกับพลังงานสุทธิของปฏิกิริยา เมื่อพิจารณาพลังงานที่คายออกมาจากมวลพร่องรวมทั้งหมดแล้ว ปฏิกิริยานี้คายพลังงานสุทธิออกมามากกว่าที่ใช้ไปมาก
- ข้อ 3 — ผิดหลักการพื้นฐาน เพราะพลังงานยึดเหนี่ยวที่เปลี่ยนไปสะท้อนถึงมวลที่เปลี่ยนไปจริง ไม่ใช่แค่การจัดเรียงใหม่ที่ไม่มีผลทางพลังงาน
- ข้อ 4 — ผิด เพราะถ้าหลอมรวมไปทางด้านหนักกว่า Fe-56 (เกินจุดสูงสุดของกราฟ) จะทำให้ BE ต่อนิวคลิออนลดลง กลายเป็นต้องดูดพลังงานเข้าไปแทน ไม่ใช่คายพลังงานเสมอ