เฉลยแบบฝึกหัดที่ 5 ดวงอาทิตย์ — หัวใจของระบบสุริยะ

เอกสารครู — ปล่อยให้นักเรียนหลังเก็บแบบฝึกหัดแล้ว · ว30105 วิทยาศาสตร์โลกและอวกาศ · ม.5 · COSMOS LOG EP05 · ใช้คู่กับแผนการจัดการเรียนรู้ที่ 5

จุดวัดมโนทัศน์ของชุดนี้ — ข้อที่ติดป้าย MC1 MC2 MC3 คือข้อที่ออกแบบมาชนความเข้าใจคลาดเคลื่อนเป้าหมายของแผน 5 โดยตรง ควรดูสถิติทั้งห้องเป็นพิเศษ

MC1 "ดวงอาทิตย์เผาไหม้แบบเคมีเหมือนกองไฟ" → ข้อ 0, 1, 5, 6 · **MC2** "ดวงอาทิตย์เป็นของแข็ง/ของเหลว" → ข้อ 10, 13 · **MC3** "จุดมืดร้อนกว่ารอบข้าง / เย็นเหมือนน้ำแข็ง" → ข้อ Spot the Error, 14

0. ตอบ ข้อ 2 MC1

> ดวงอาทิตย์หลอมนิวเคลียสไฮโดรเจนเป็นฮีเลียม (ฟิวชัน) ที่แกน 15 ล้านเคลวิน มวลที่หายไป ~0.7% แปลงเป็นพลังงานตาม $E = mc^2$ ซึ่งให้พลังงานมากกว่าปฏิกิริยาเคมีหลายล้านเท่า เชื้อเพลิงไฮโดรเจนจึงอยู่ได้ราวหมื่นล้านปี — ตัวลวงข้อ 1 คือ MC1 ตรง ๆ (ในอวกาศแทบไม่มีออกซิเจนให้เผา และเคมีให้พลังงานน้อยเกินไป)

1. MC1

> สิ่งที่เกิดกับสาร: **นิวเคลียสไฮโดรเจน 4 ตัวหลอมรวมเป็นฮีเลียม 1 ตัว — นิวเคลียสเปลี่ยนชนิด**
>
> ที่มาของพลังงาน: **มวลที่หายไป ~0.7% แปลงเป็นพลังงานตาม $E = mc^2$ (มหาศาลต่อกิโลกรัม)**
>
> ถ้าเผาไหม้เคมี: อยู่ได้เพียง **~ หลักหมื่นปี** ก็หมดเชื้อเพลิง

2. 9×10^{16} J

> $E = mc^2 = 1 \times (3 \times 10^8)^2 =$ **9×10^{16} J** — มวลเพียง 1 kg ให้พลังงานราวระเบิดนิวเคลียร์พันลูก

3. ≈ 3.9×10^{26} J

> $m = 4.3$ ล้านตัน $= 4.3 \times 10^6 \times 10^3 = 4.3 \times 10^9$ kg
>
> $E = mc^2 = 4.3 \times 10^9 \times 9 \times 10^{16} \approx$ **3.9×10^{26} J ต่อวินาที** (= กำลังส่องสว่างจริงของดวงอาทิตย์)

4. 6.3×10^{14} J

> $E = 0.007 \times (3 \times 10^8)^2 = 0.007 \times 9 \times 10^{16} =$ **6.3×10^{14} J**

5. MC1

> โลก (และดวงอาทิตย์) ต้องมีอายุอย่างน้อยเท่าหลักฐานที่เก่าที่สุด คือนับพันล้านปี — นานกว่าที่การเผาไหม้เคมีจะหล่อเลี้ยงได้นับแสนเท่า ดังนั้นแหล่งพลังงานของดวงอาทิตย์**ต้องไม่ใช่ปฏิกิริยาเคมี** แต่ต้องเป็นกระบวนการที่ให้พลังงานต่อกิโลกรัมสูงกว่ามหาศาล ซึ่งก็คือ**ฟิวชัน**ที่แปลงมวลเป็นพลังงานโดยตรง

6. ตอบ ข้อ 2 MC1

7.

> ① **แกน (core)** · ② **เขตแผ่รังสี (radiative zone)** · ③ **เขตพาความร้อน (convective zone)**
> ④ **โฟโตสเฟียร์ (photosphere)** · ⑤ **โครโมสเฟียร์ (chromosphere)** · ⑥ **โคโรนา (corona)**

8.

> เขตแผ่รังสี: พลังงานเดินทางเป็น**โฟตอน (รังสี)** ถูกชน-ดูดกลืน-ปล่อยซ้ำนับครั้งไม่ถ้วน กว่าจะหลุดออกใช้เวลา**นับแสนปี**
> เขตพาความร้อน: **ก๊าซร้อนลอยตัวขึ้น เย็นลงแล้วจมกลับ** หมุนวนเป็นวงจรเหมือนน้ำเดือดในหม้อ พาพลังงานขึ้นสู่ผิว

9. แกน > โคโรนา > โครโมสเฟียร์ > โฟโตสเฟียร์

> แกน (15 ล้าน K) > โคโรนา (1–3 ล้าน K) > โครโมสเฟียร์ (~10,000 K) > โฟโตสเฟียร์ (~5,500 K) — จุดสังเกตที่นักเรียนมักพลาด: ชั้นบรรยากาศนอกสุดกลับร้อนกว่าผิว

10. โฟโตสเฟียร์ MC2

> ผิวที่ตาเห็นคือ**โฟโตสเฟียร์** — แต่ไม่ใช่ "พื้นผิวแข็ง" แบบผิวโลก มันคือชั้นพลาสมาบาง ๆ ที่แสงเริ่มหลุดออกสู่อวกาศได้ ถ้าตกลงไปจะไม่มีอะไรให้เหยียบ เพราะดวงอาทิตย์เป็นพลาสมาทั้งดวง ไม่มีส่วนใดเป็นของแข็งหรือของเหลว

11. ตอบ ข้อ 1

> **สุริยุปราคาเต็มดวง** — ดวงจันทร์บังโฟโตสเฟียร์ที่จ้าพอดี จึงเห็นโครโมสเฟียร์เป็นวงแหวนสีแดงและโคโรนาเป็นรัศมีสีขาวรอบเงาดำ

12.

> ตามสามัญสำนึก ยิ่งไกลจากแหล่งความร้อน (แกน) ควรยิ่งเย็นลง — แต่โคโรนากลับร้อนกว่าผิวหลายร้อยเท่า เหมือนยิ่งถอยห่างกองไฟแล้วยิ่งร้อน
> ปัจจุบันยังเป็น**ปริศนาที่วิจัยอยู่ (coronal heating problem)** — สันนิษฐานว่าเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กและคลื่นพลาสมา ยาน Parker Solar Probe ถูกส่งไปเก็บข้อมูลในโคโรนาโดยตรงเพื่อตอบคำถามนี้

13. ตอบ ข้อ 3 MC2

> ดวงอาทิตย์เป็น**พลาสมาทั้งดวง** — ร้อนจัดจนอิเล็กตรอนหลุดจากอะตอม ไม่มีของแข็ง/ของเหลว/หินที่อุณหภูมิระดับนี้ (ข้อ 1, 2, 4 คือ MC2 ในรูปแบบต่าง ๆ)

Spot the Error MC3

> ผิด 3 จุด: จุดมืดไม่ได้ "ร้อนที่สุด" · ไม่ได้ "เย็นเหมือนน้ำแข็ง" · ไม่ใช่ "ไม่มีแสงออกมาเลย"
> ที่ถูกต้อง: จุดมืด**เย็นกว่า**รอบข้างราว 1,500 K → อุณหภูมิ ≈ 5,500 − 1,500 = **4,000 K** ซึ่งยังร้อนจัดและเปล่งแสงอยู่ — แต่**หรี่กว่าฉากรอบข้างที่สว่างจ้า จึงดูมืดโดยเปรียบเทียบ** (ถ้าตัดจุดมืดมาลอยเดี่ยว ๆ มันจะสว่างกว่าดวงจันทร์เพ็ญเสียอีก)

14. MC3

> บริเวณจุดมืดมี**สนามแม่เหล็กความเข้มสูง**พุ่งทะลุผิว สนามนี้**ขัดขวางการพาความร้อน** (ก๊าซร้อนหมุนวนขึ้นมาไม่ได้ตามปกติ) พลังงานจากภายในจึงขึ้นมาเติมน้อยลง บริเวณนั้นเย็นกว่ารอบข้างราว 1,500 K

15. ≈ 499 s ≈ 8.3 นาที

> $t = s/v = (1.496 \times 10^8 \text{ km})/(3 \times 10^5 \text{ km/s}) \approx 499$ s
>
> 499/60 ≈ **8.3 นาที** — ตรงตามที่โจทย์ให้ตรวจสอบ

16. ≈ 3×10^5 s ≈ 83 ชม. ≈ 3.5 วัน

> $t = (1.496 \times 10^8)/500 = 2.992 \times 10^5 \approx \mathbf{2.99 \times 10^5}$ **s**
>
> ÷ 3,600 ≈ **83.1 ชั่วโมง** ÷ 24 ≈ **3.5 วัน**

17. ≈ 3.5 วัน

> แสงแฟลร์มาถึงใน 8.3 นาที (เป็น “สัญญาณเตือน”) แต่ก้อน CME ตามมาอีก ~3.5 วัน — เวลาเตรียมตัว ≈ **3.5 วัน**
>
> ตัวอย่างการเตรียม: สั่งดาวเทียมเข้าโหมดปลอดภัย/หันเกราะรับ · เลื่อนการเดินอวกาศของนักบินอวกาศ · การไฟฟ้าลดโหลด/เตรียมแยกหม้อแปลงป้องกันกระแสเหนี่ยวนำ · เตือนสายการบินเส้นทางขั้วโลกเปลี่ยนเส้นทาง (ตอบ 2 อย่างใดก็ได้)

18.

> ออโรรา: อนุภาคมีประจุถูกสนามแม่เหล็กโลก**เบี่ยงไปที่ขั้ว** ชนกับก๊าซในบรรยากาศชั้นบนจนเปล่งแสง
>
> ดาวเทียม/GPS: อนุภาคพลังงานสูงทำลายวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และรบกวนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่สัญญาณ GPS ต้องเดินทางผ่าน
>
> ไฟฟ้าดับ: สนามแม่เหล็กโลกที่แปรปรวนรุนแรง**เหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้า**ในสายส่งยาว ๆ จนหม้อแปลงไหม้ — ที่ควิเบก พ.ศ. 2532 ไฟดับ ~9 ชั่วโมง กระทบคน 6 ล้านคน

19. ตอบ ข้อ 2 (11 ปี)

> วัฏจักรสุริยะ (solar cycle) ~**11 ปี** — จำนวนจุดมืดน้อยสุด (solar minimum) ไปมากสุด (solar maximum) แล้ววนกลับ

20.

> ปี 2402 มีแค่โทรเลข — ยังลุกไหม้ทั้งระบบ แต่วันนี้ (แนวคำตอบ อย่างน้อย 3 ด้าน): **ดาวเทียมสื่อสาร/GPS เสียหายวงกว้าง** การนำทาง การบิน ธุรกรรมการเงินที่พึ่งเวลา GPS ล่ม · **โครงข่ายไฟฟ้าพังเป็นลูกโซ่** หม้อแปลงขนาดใหญ่ไหม้ ใช้เวลาผลิตทดแทนเป็นเดือน–ปี ไฟอาจดับนานหลายเดือน · **อินเทอร์เน็ต/ระบบธนาคาร/โรงพยาบาลหยุดชะงัก** ความเสียหายประเมินระดับ**ล้านล้านดอลลาร์** · นักบินอวกาศ/ผู้โดยสารเที่ยวบินขั้วโลกได้รับรังสีสูง

21. (ก) 7.48×10^4 s ≈ 20.8 ชม. (ข) 4 เท่า

> (ก) $t = (1.496 \times 10^8)/2{,}000 =$ **7.48×10^4 s** ÷ 3,600 ≈ **20.8 ชั่วโมง** (ไม่ถึงวันเดียว!)
> (ข) อัตราเร็ว ×4 → เวลาเหลือ 1/4: จาก ~83 ชม. เหลือ ~20.8 ชม. — เวลาเตรียมตัวหดสั้นลง **4 เท่า**

22.

> โคโรนามี**อุณหภูมิสูงแต่เบาบางมาก** (ความหนาแน่นต่ำกว่าบรรยากาศโลกนับล้านล้านเท่า) — อนุภาคแต่ละตัวเร็วจัด (อุณหภูมิสูง) แต่มี<u>จำนวนน้อย</u> ปริมาณความร้อนที่ชนแล้วถ่ายเทให้ยานจริงจึงน้อย เกราะคาร์บอนของ Parker เจออุณหภูมิเพียง ~1,400°C ซึ่งวัสดุทนได้
> บทเรียนสำคัญ: **"อุณหภูมิ" กับ "ปริมาณความร้อน" ไม่ใช่สิ่งเดียวกัน** (เทียบ: มือลอยในเตาอบ 200°C ได้ครู่หนึ่ง แต่จุ่มน้ำเดือด 100°C ไม่ได้เลย)

23. ดาวยักษ์แดง → ดาวแคระขาว · ไม่เป็นซูเปอร์โนวาเพราะ 1 $M_\odot$ < 8 $M_\odot$

> อีกราว 5 พันล้านปี เมื่อไฮโดรเจนที่แกนหมด ดวงอาทิตย์จะพองเป็น**ดาวยักษ์แดง (red giant)** ใหญ่จนกลืนวงโคจรดาวพุธ-ดาวศุกร์ (และอาจถึงโลก) จากนั้นสลัดเปลือกนอกเป็นเนบิวลาดาวเคราะห์ เหลือแกนกลางเป็น**ดาวแคระขาว (white dwarf)** ที่ค่อย ๆ เย็นลง
> มัน**ไม่ระเบิดเป็นซูเปอร์โนวา** เพราะเกณฑ์จาก EP04: ต้องมีมวลตั้งต้นมากกว่า ~8 $M_\odot$ — ดวงอาทิตย์มีเพียง 1 $M_\odot$ จึงจบชีวิตอย่างสงบ

24. ไม่มืดทันที — สว่างต่ออีกนับแสนปี

> พลังงานที่เปล่งออกจากผิว "ตอนนี้" คือพลังงานที่ออกจากแกนเมื่อ**นับแสนปีก่อน** (โฟตอนต้องชน-ดูดกลืน-ปล่อยซ้ำตลอดทางในเขตแผ่รังสี) — ต่อให้ฟิวชันหยุดวินาทีนี้ พลังงานที่ "ค้างท่อ" อยู่จะยังทยอยออกมา ผิวจึงสว่างเกือบปกติต่ออีกนับแสนปี แล้วชาวโลกยังรู้ช้าไปอีก 8.3 นาทีตามเวลาเดินทางของแสงด้วย

เฉลยแผนที่หลักการ (หน้า 10) — ① **ฟิวชัน** · **15** ล้านเคลวิน · **ฮีเลียม** · $E = mc^2$ · ② เขต**แผ่รังสี** → เขต**พาความร้อน** → ชั้น**โฟโตสเฟียร์** · สถานะ**พลาสมา** · ③ **เย็น**กว่ารอบข้าง · สนาม**แม่เหล็ก** · วัฏจักร **11** ปี · เห็น**ออโรรา** · CME เดินทาง ~**3.5** วัน