

## เครื่องชนอนุภาคแฮดรอน (Large Hadron Collider) (10 คะแนน)

จงอ่านข้อแนะนำทั่วไปในอีกซองหนึ่งก่อนเริ่มทำข้อสอบ

ในข้อนี้เราจะพิจารณาฟิสิกส์ของเครื่องเร่งอนุภาค LHC (Large Hadron Collider) ที่ CERN ซึ่งเป็นห้องปฏิบัติการฟิสิกส์อนุภาคที่ใหญ่ที่สุดในโลก จุดประสงค์สำคัญของ CERN คือ การทำความเข้าใจถึงกฎพื้นฐานของธรรมชาติ ลำอนุภาค 2 ลำถูกเร่งให้มีพลังงานสูง และเคลื่อนที่สวนกันรอบๆ เครื่องเร่งอนุภาคภายใต้สนามแม่เหล็ก จากนั้นถูกทำให้ชนกัน โปรตอนที่เคลื่อนที่ไปตามเส้นรอบวงของ LHC ไม่ได้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แต่ถูกส่งเข้ามาเป็นกลุ่มๆ เรียกว่า bunch อนุภาคที่เกิดจากการชนกันถูกตรวจจับด้วยเครื่องตรวจจับอนุภาคขนาดใหญ่ ตารางที่ 1 แสดงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับ LHC

วงแหวน LHC	
เส้นรอบวง	26659 m
จำนวนกลุ่ม (bunch) ต่อลำโปรตอนแต่ละลำ	2808
จำนวนโปรตอนต่อ bunch	$1.15 \times 10^{11}$
ลำโปรตอน	
พลังงานของโปรตอนแต่ละตัว	7.00 TeV
พลังงานในกรอบของจุดศูนย์กลางมวล	14.0 TeV

ตารางที่ 1: ตัวเลขแสดงค่าพารามิเตอร์ทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับ LHC

นักฟิสิกส์อนุภาคใช้หน่วยที่สะดวกสำหรับพลังงาน โมเมนตัม และมวล พลังงานวัดในหน่วย อิเล็กตรอนโวลต์ eV โดยนิยาม 1 eV คือพลังงานที่อนุภาคที่มีประจุมูลฐาน  $e$  ได้รับความเร็วจากการเคลื่อนที่ผ่านความต่างศักย์หนึ่งโวลต์ ( $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2/\text{s}^2$ )

โมเมนตัมวัดในหน่วยของ  $eV/c$  และมวลในหน่วยของ  $eV/c^2$  โดยที่  $c$  คืออัตราเร็วของแสงในสุญญากาศ เนื่องจาก 1 eV มีค่าน้อย นักฟิสิกส์อนุภาคจึงมักใช้หน่วย MeV ( $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ), GeV ( $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ) หรือ TeV ( $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$ )

ข้อ A. จะเกี่ยวกับความเร่งของโปรตอนหรืออิเล็กตรอน ข้อ B. จะเกี่ยวกับการระบุชนิดของอนุภาคที่ถูกสร้างขึ้นจากการชนที่ CERN

### ข้อ A. เครื่องเร่งอนุภาค LHC (6 คะแนน)

ความเร่ง:

สมมติว่าโปรตอนถูกเร่งโดยศักย์ไฟฟ้า  $V$  ทำให้ความเร็วของโปรตอนใกล้เคียงกับอัตราเร็วแสง และไม่ต้องคิดพลังงานที่สูญเสียไปจากการแผ่รังสีหรือการชนกับอนุภาคอื่น

**A.1** จงหาสมการแบบไม่ต้องประมาณ (exact) สำหรับความเร็วสุดท้าย  $v$  ของโปรตอนในเทอม- 0.7pt  
ของศักย์ที่ใช้เร่ง  $V$  และค่าคงตัวทางฟิสิกส์

ในอนาคต CERN มีแผนที่จะใช้โปรตอนจาก LHC เข้าชนกับอิเล็กตรอนที่มีพลังงาน 60.0 GeV

- A.2** สำหรับอนุภาคที่มีพลังงานสูงและมวลต่ำ ค่าเบี่ยงเบนของความเร็วสุดท้าย  $v$  จากอัตราเร็วแสง หรือ  $\Delta = (c - v)/c$  มีค่าน้อยมาก จงหาการประมาณลำดับที่หนึ่ง (first order) สำหรับ  $\Delta$  ในรูปของ  $V$  และค่าคงตัวทางฟิสิกส์อื่นๆ แล้วคำนวณ  $\Delta$  เป็นตัวเลขเมื่ออิเล็กตรอนถูกเร่งให้มีพลังงาน 60.0 GeV 0.8pt

ตอนนี้นักเรียนจะกลับไปพิจารณาลำโปรตอนที่เคลื่อนที่เป็นวงกลมใน LHC

- A.3** จงหาสมการสำหรับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสม่ำเสมอ  $B$  ที่ทำให้ลำโปรตอนเคลื่อนที่เป็นวงกลมใน LHC ได้ สมการนี้ควรประกอบไปด้วยพลังงานของโปรตอน  $E$ , เส้นรอบวง  $L$ , ค่าคงตัวพื้นฐาน และตัวเลข นักเรียนอาจจะใช้การประมาณที่เหมาะสม ถ้าผลของการประมาณนั้นไม่ทำให้เลขนัยสำคัญของคำตอบเปลี่ยนไป 1.0pt  
จงคำนวณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก  $B$  สำหรับพลังงานโปรตอน  $E = 7.00$  TeV ไม่ต้องคำนึงถึงอันตรกิริยาระหว่างโปรตอนด้วยกันเอง

**กำลังของการแผ่รังสี:**

อนุภาคประจุที่ถูกเร่งจะแผ่รังสีในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กำลังของการแผ่รังสี  $P_{\text{rad}}$  ของประจุที่เคลื่อนที่เป็นวงกลมด้วยความเร็วเชิงมุมคงตัว จะขึ้นอยู่กับความเร่ง  $a$ , ค่าประจุ  $q$ , อัตราเร็วแสง  $c$  และค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ  $\epsilon_0$

- A.4** จงใช้การวิเคราะห์หน่วย (dimensional analysis) เพื่อหาสมการสำหรับกำลังของการแผ่รังสี  $P_{\text{rad}}$  1.0pt

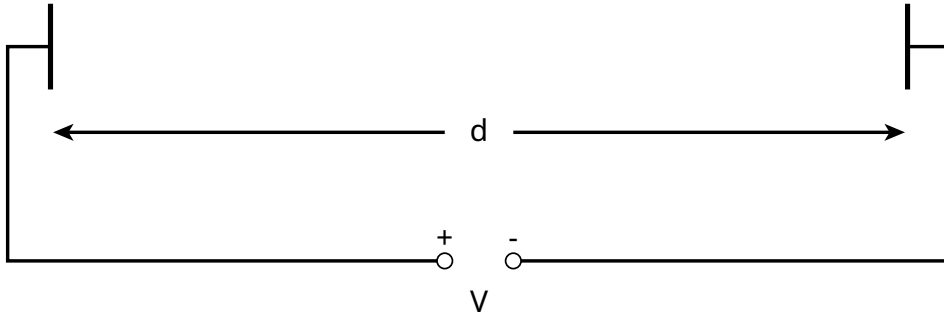
สมการจริงๆ สำหรับกำลังของการแผ่รังสีประกอบด้วยแฟกเตอร์  $1/(6\pi)$  นอกจากนั้น การรวมผลของสัมพัทธภาพจะให้แฟกเตอร์  $\gamma^4$  คุณเพิ่มอีก โดยที่  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$  เพิ่มอีก

- A.5** จงคำนวณหากำลังรวมของการแผ่รังสี  $P_{\text{tot}}$  ทั้งหมดของ LHC สำหรับโปรตอนแต่ละตัวมีพลังงาน  $E = 7.00$  TeV (ดูตารางที่ 1) นักเรียนอาจจะใช้การประมาณที่เหมาะสม 1.0pt

**การเร่งเชิงเส้น (Linear Acceleration)**

ที่ CERN โปรตอนที่อยู่นิ่งจะถูกเร่งโดยเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นที่มีความยาว  $d = 30.0$  m ผ่านความต่างศักย์ไฟฟ้า  $V = 500$  MV ซึ่งมีสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ รูปที่ 1 แสดงเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นประกอบด้วยแผ่นสองแผ่น

- A.6** จงหาเวลา  $T$  ที่โปรตอนใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านสนามนี้ 1.5pt



รูปที่ 1: ภาพวาดคร่าวๆ ของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น

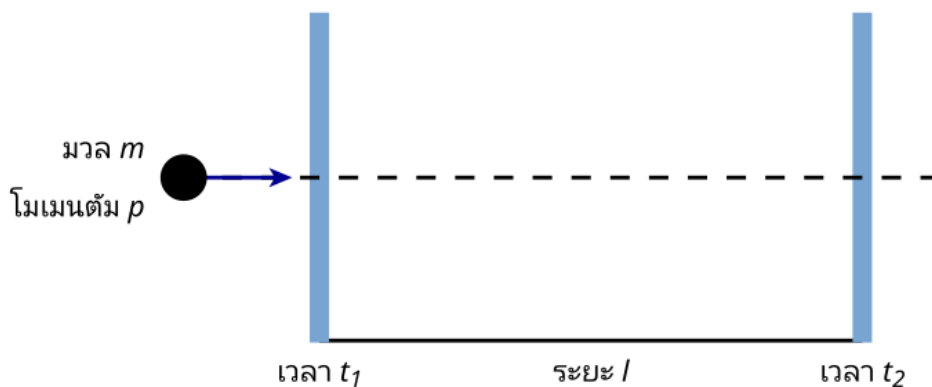
## ข้อ B. การระบุชนิดของอนุภาค (4 คะแนน)

### เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่

การระบุชนิดของอนุภาคพลังงานสูงที่เกิดขึ้นจากการชนนั้นสำคัญต่อการทำความเข้าใจการเกิดอันตรกิริยา วิธีง่ายๆ ในการระบุชนิดของอนุภาคเมื่อนักเรียนรู้โมเมนตัมของมันแล้ว ก็คือการวัดเวลา ( $t$ ) ที่อนุภาคใช้ในการเคลื่อนที่ไประยะ  $l$  ด้วยเครื่องวัดเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (Time-of-Flight หรือ ToF) ตารางที่ 2 แสดงข้อมูลของชนิดและมวลของอนุภาคที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งในการชน

อนุภาค	มวล [ $\text{MeV}/c^2$ ]
ดิวเทรอน (Deuteron)	1876
โปรตอน	938
เคออน (Kaon)	494
ไพออน (Pion)	140
อิเล็กตรอน	0.511

ตารางที่ 2: อนุภาคแต่ละชนิดและมวลของมัน

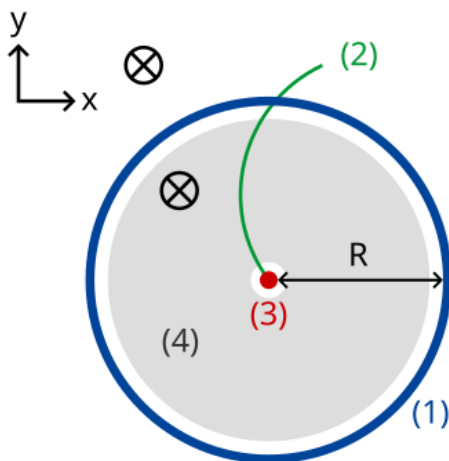


รูปที่ 2: แผนภาพของเครื่องวัดเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (ToF)

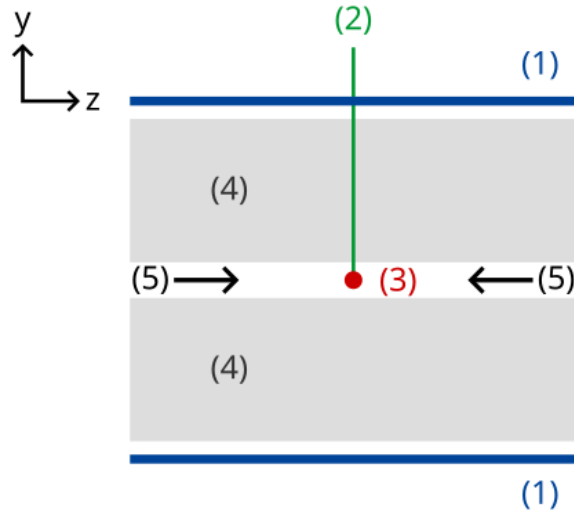
- B.1** จงหามวลหนึ่งของอนุภาค  $m$  ในรูปของโมเมนตัม  $p$  ระยะการเคลื่อนที่  $l$  และเวลาใช้ในการเคลื่อนที่  $t$  สมมติว่าอนุภาคมีประจุมูลฐาน  $e$  เคลื่อนที่ด้วยความเร็วใกล้ความเร็วแสง  $c$  ไปตามแนวตรงในเครื่องวัด ToF และอนุภาคเคลื่อนที่ตั้งฉากกับระนาบทั้งสองของเครื่องวัด (ดูรูปที่ 2) 0.8pt

**B.2** จงคำนวณระยะขั้นต่ำ  $l$  ของเครื่องวัด ToF ที่จะทำให้นักเรียนสามารถแยกแยะอนุภาค-  
เคออน (Kaon) จากอนุภาคไพออน (Pion) ได้อย่างชัดเจน ถ้าโมเมนตัมของอนุภาคทั้งสอง-  
เท่ากับ  $1.00 \text{ GeV}/c$  เพื่อให้เห็นการแยกกันได้อย่างชัดเจน ความต่างของเวลาที่ใช้ในการ-  
เคลื่อนที่ต้องมากกว่า 3 เท่าของความละเอียดในการวัดเวลาของเครื่องวัด ความละเอียด-  
ของเครื่องวัด ToF คือ  $150 \text{ ps}$  ( $1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$ ) 0.7pt

ต่อจากนี้ไป อนุภาคที่เกิดขึ้นในเครื่องวัด LHC จะถูกวิเคราะห์ในเครื่องวัด 2 ขั้นตอน ประกอบไปด้วยเครื่องวัดวิถี-  
การเคลื่อนที่ และเครื่องวัด ToF ภาพที่ 4 แสดงการติดตั้งเครื่องวัดในระนาบหน้าตัดและในแนวขนานกับลำโปร-  
ตอน เครื่องวัดเป็นท่อโดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่บริเวณที่ลำโปรตอนชนกัน เครื่องวัดวิถีการเคลื่อนที่จะบันทึกเส้น-  
ทางของอนุภาคที่เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก โดยสนามแม่เหล็กบริเวณนี้มีทิศขนานกับลำโปรตอน รัศมี  $r$  ของวิถี-  
การเคลื่อนที่จะใช้หาโมเมนตัมในแนวตั้งฉาก  $p_T$  ของอนุภาค เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่คือเวลาที่อนุภาคที่เกิดจาก-  
การชนเคลื่อนที่ไปถึงท่อของเครื่องวัด ToF เนื่องจากเรารู้เวลาที่เกิดการชน เครื่องวัด ToF จึงมีเพียงหนึ่งท่อและอยู่ถัด-  
ออกไปจากเครื่องวัดวิถีการเคลื่อนที่ สำหรับข้อนี้ นักเรียนอาจจะสมมติว่าอนุภาคทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการชนเคลื่อน-  
ที่ตั้งฉากกับลำโปรตอน ซึ่งหมายความว่าอนุภาคที่เกิดขึ้นไม่มีโมเมนตัมในแนวขนานกับลำโปรตอน



ภาพระนาบหน้าตัด



ภาพแนวขนาน  
กับลำโปรตอน

- (1) - ท่อ ToF
- (2) - วิถีการเคลื่อนที่
- (3) - ตำแหน่งการชน
- (4) - เครื่องวัดหรือโพรงวัดวิถีการเคลื่อนที่
- (5) - ลำโปรตอน
- ⊗ - สนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3: การติดตั้งชุดเครื่องวัดเพื่อระบุชนิดของอนุภาค ที่มีเครื่องวัดวิถีการเคลื่อนที่และเครื่องวัด ToF  
เครื่องวัดนี้เป็นท่อที่ล้อมรอบตำแหน่งตรงกลางที่เกิดการชน ช้าย: ภาพระนาบหน้าตัดตั้งฉากกับแนวลำโปร-  
ตอน ขวา: ภาพแนวขนานกับลำโปรตอน อนุภาคเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับแนวลำโปรตอน

**B.3** จงหามวลอนุภาคในรูปของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก  $B$ , รัศมี  $R$  ของท่อ ToF, รัศมี  $r$  ของวิธีการเคลื่อนที่, เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่  $t$ , และค่าคงตัวพื้นฐาน 1.7pt

มีการตรวจพบอนุภาค 4 ชนิดและต้องการที่จะระบุว่ามันคืออนุภาคอะไร ถ้าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในโพรงวัดวิถีเท่ากับ  $B = 0.500 \text{ T}$  รัศมีของท่อ ToF เท่ากับ  $3.70 \text{ m}$  และค่าที่วัดได้มีดังต่อไปนี้ ( $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ )

อนุภาค	รัศมี $r$ [m]	เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (ToF) $t$ [ns]
A	5.10	20
B	2.91	14
C	6.06	18
D	2.32	25

**B.4** จงระบุชนิดของอนุภาคทั้ง 4 โดยการคำนวณมวลของแต่ละอนุภาค 0.8pt