

บทที่ 12
อนุภาคมูลฐาน
ELEMENTARY PARTICLES

วัตถุประสงค์

เมื่อศึกษาบทนี้แล้วจะสามารถ

1. อธิบายทฤษฎีเมซอนของแรงนิวเคลียร์ได้
2. อธิบายคุณสมบัติของอนุภาคมูลฐานต่าง ๆ ได้

อนุภาคมูลฐานที่รู้จักกันส่วนมาก เป็นพวกที่ไม่มีการสลายอย่างรวดเร็ว เกิดขึ้นจากการชนกันเอง ขณะที่มียุคพลังงานสูง เป็นพวกที่มีอายุสั้น จึงไม่ค่อยรู้จักกันดีนัก

12.1 ทฤษฎีเมซอนของแรงนิวเคลียร์ (Meson theory of nuclear forces)

ในปี 1935 นักฟิสิกส์ชาวญี่ปุ่น ชื่อ ยูกาวา เสนอแนะว่าการเกิดกิริยาทางนิวเคลียร์อย่างแรง เป็นผลจากการแลกเปลี่ยนอนุภาคระหว่างนิวคลีออน อนุภาคเหล่านี้คือ ไพออน (pions) บางพวกก็มีประจุ, บางพวกเป็นกลาง พวกที่มีประจุ จะมีค่า $+e$ หรือ $-e$ มีมวลขณะอยู่นิ่งเป็น 273 เท่าของมวลอิเล็กตรอน ไพออนเป็นอนุภาคมูลฐาน เรียกรวม ๆ ว่า เมซอน (mesons) อาจเรียกไพออนว่า ไพ-เมซอน (π -meson)

ตามทฤษฎีของยูกาวา การแลกเปลี่ยนเมซอน จะทำกับนิวคลีออนที่อยู่ใกล้เคียงกัน โดยที่นิวคลีออนเหล่านั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างไร ไม่มีการสูญเสียมวล จึงไม่กระทบกระเทือนต่อหลักการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งมักใช้ในการวัดปริมาณ แต่ถ้าจะให้แม่นยำจริง ๆ แล้ว จะนำหลักความไม่แน่นอนมาใช้ คือ

$$\Delta x \cdot \Delta mv \geq \frac{h}{2\pi}$$

แสดงว่า ผลคูณระหว่างค่าความไม่แน่นอนเกี่ยวกับตำแหน่งกับโมเมนตัม จะต้องมียุคไม่น้อยกว่า $\frac{h}{2\pi}$, เมื่อ h คือค่าคงที่ของพลังค์ อาจเขียนในรูปลักษณะของความไม่แน่นอนของพลังงาน เมื่อวัดในเวลา Δt ได้ว่า

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{2\pi}$$

เวลาที่วัดได้ จะต้องไม่มากกว่า $\frac{h}{2\pi \Delta E}$, ดังนั้น การเกิด, การแลกเปลี่ยน, การหายไปของเมซอน จึงไม่ค่อยมีผลต่อการอนุรักษ์พลังงาน เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

ถ้าจะคิดว่า ΔE มีขนาดเดียวกับพลังงานของมวลขณะที่อยู่นิ่งของไพออน คือ $m c^2$ และไพออนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเกือบเท่าความเร็วของแสงขณะเคลื่อนที่จากนิวคลีออนหนึ่งไปยังอีกนิวคลีออนหนึ่ง (เป็นการสมมติอย่างหยาบมาก เพราะไม่ได้คิดพลังงานจลน์ของไพออน แต่จะพยายามหาค่ามวล m) เวลา Δt ที่ไพออนเกิดขึ้นในนิวคลีออนหนึ่ง แล้วก็ถูกดูดกลืนไปในอีกนิวคลีออนหนึ่ง ย่อมไม่มากกว่า $\frac{R}{c}$, เมื่อ R เป็นระยะทางสูงสุดระหว่างนิวคลีออนที่มีกิริยาต่อกัน

โดยการประมาณอย่างหยาบ ๆ

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx \frac{h}{2\pi}$$

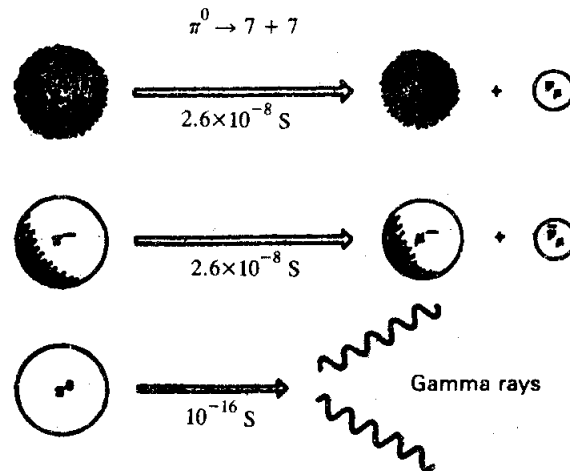
$$m c^2 \cdot \frac{R}{C} \approx \frac{h}{2\pi}$$

$$m \approx \frac{h}{2\pi RC}$$

แรงนิวเคลียร์ เป็นแรงดูระหว่างนิวคลีออนชนิดแรง กระทำอยู่ในช่วงระยะทาง ประมาณ 1.7×10^{-15} เมตร

เมื่อแทนค่า $R = 1.7 \times 10^{-15}$ เมตร จะหาค่า m ได้ประมาณ 2.1×10^{-28} กิโลกรัม นั่นคือ มวลของไพออน มีค่าประมาณ 230 เท่า ของมวลของอิเล็กตรอน

12.2 ไพออนและมิวออน (Pions and Muons)



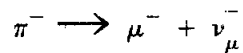
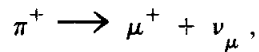
รูปที่ 12.1 แสดงการสลายของไพออนและมิวออน

หลังจากที่งานของยูกาวาลิ้นสุดลงไม่นาน ก็มีผู้ค้นพบอนุภาคที่มีประจุในรังสีคอสมิก กงจะเกิดจากการชนกันระหว่างอนุภาคที่มีพลังงานสูง จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ แล้วปล่อยเมซอนออกมา โดยใช้พลังงานจำนวนหนึ่งเพื่อสร้างอนุภาคนี้ โดยไม่มีผลกระทบกระเทือนต่อการอนุรักษ์พลังงาน การชนระหว่างโปรตอนในรังสีคอสมิก (cosmic ray proton) ที่มีพลังงานสูงจากอวกาศกับนิวคลีไอของออกซิเจนและไนโตรเจนเกิดขึ้นในบรรยากาศ อนุภาคเหล่านี้เมื่อเกิดการกระทำทางนิวเคลียร์ขึ้นแล้ว จะไม่ทำตัวเหมือนธาตุเดิมที่เคยเป็นอยู่ จะไม่ค่อยถูกดูดกลืน แต่จะมีอำนาจทะลุทะลวงเข้าไปในดินเป็นพันพันเมตร

ในปี 1947 ก็พบว่า เมซอนเป็นพวกที่มีการกระทำอย่างอ่อน เรียกมิวออน (muons) หรือมิว-เมซอน (μ -meson) พบในรังสีคอสมิกที่ระดับน้ำทะเล ไม่ได้เป็นผลจากการชนกัน

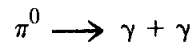
ทางนิวเคลียร์โดยตรง แต่เป็นอนุภาคที่เกิดขึ้น (secondary particles) ที่มาจากการสลายของไพออน

เมื่ออยู่นอกนิวเคลียส ไพออนที่มีประจุ สลายได้ในเวลาเฉลี่ย 2.6×10^{-8} วินาที เป็น มิวออน และนิวตริโน (หรือแอนตินิวตริโน) กับพลังงานจลน์ค่าหนึ่ง



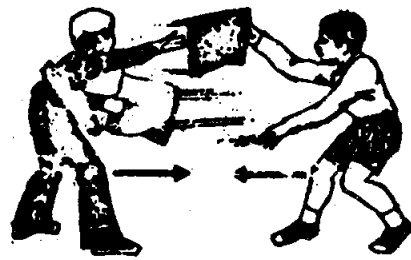
ส่วนหนึ่งของไพออนที่มีประจุ จะสลายไปเป็นอิเล็กตรอน หรือโพซิตรอน กับนิวตริโน หรือแอนตินิวตริโน

ไพออนที่เป็นกลาง ซึ่งมีมวล $264 m_e$ น้อยกว่ามวลของไพออนที่มีประจุ ($273 m_e$) เล็กน้อย สลายได้ในเวลาประมาณ 10^{-16} วินาที เป็นรังสีแกมมาออกมาคู่หนึ่ง

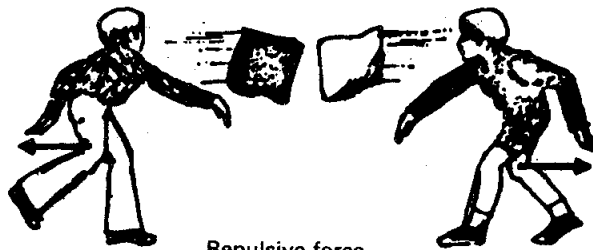


นิวตริโนที่นำไปสู่การสลายของไพออน จะเขียน ν_μ ถ้านำไปสู่การสลายของอนุภาคเบตา จะเขียน ν_e การทดลองต่อมาพบว่า จะเกิดไพออน โดยการยิงโปรตอนที่มีพลังงานสูงเข้าไปในโลหะที่เป็นเป้า การสลายของไพออน จะปล่อยนิวตริโนออกมา มีการศึกษาการกระทำกิริยาของนิวตริโนกับสาร พบว่า เกิดมิวออนอีก ไม่มีอิเล็กตรอนเกิดขึ้น ดังนั้น นิวตริโนที่ปล่อยออกมาในการสลายของไพออนจึงต่างจากที่ปล่อยออกมาจากการสลายโดยการส่งอนุภาคเบตา

มิวออนมีมวล $207 m_e$ (น้อยกว่าไพออน) มีชีวิตยาว 2.2×10^{-6} วินาที มีอำนาจทะลุทะลวง มิวออนบวกและมิวออนลบสลายไปเป็นโพซิตรอน และอิเล็กตรอน กับมีนิวตริโน และแอนตินิวตริโนเกิดขึ้นในแต่ละกรณีด้วย

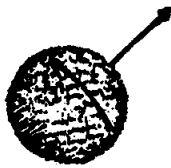
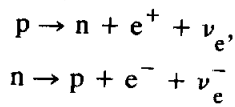


Attractive force

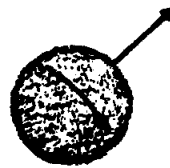


Repulsive force

รูปที่ 12.2 แสดงการแลกเปลี่ยนเมซอนระหว่างนิวคลีออน



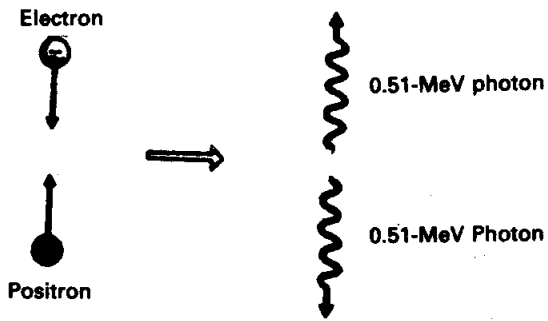
Neutrino



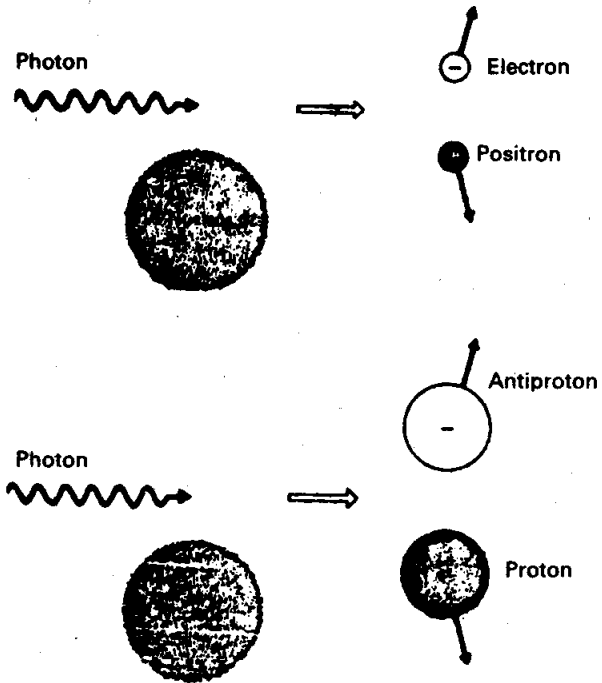
Antineutrino

รูปที่ 12.3 แสดงการสลายของโปรตอนและนิวตรอนในนิวเคลียส

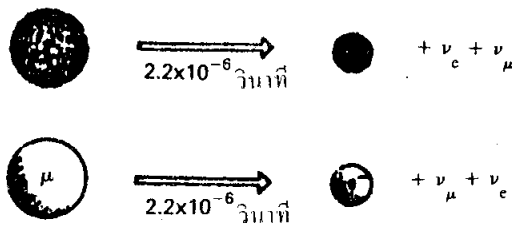
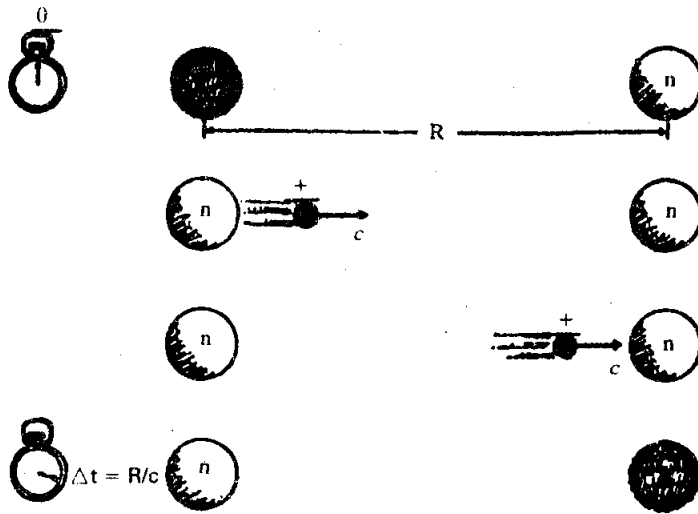
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและมวลสาร



รูปที่ 12.4 การเปลี่ยนแปลงจากมวลสารไปเป็นพลังงาน



รูปที่ 12.5 การเปลี่ยนแปลงจากพลังงานไปเป็นมวลสาร



รูปที่ 12.6 แสดงการสลายของมิวออน

ตารางที่ 12.1 ประเภทของอนุภาคมูลฐาน (CATEGORIES OF ELEMENTARY PARTICLES)

ชื่อ Name	อนุภาค Particle	อนุภาค เชิงต้าน Anti- particle	มวล Mass in electron masses	เสถียรภาพและภาวะการสลาย Stability and chief decay mode	อายุเฉลี่ย Average lifetime, sec.	ประเภท Category
โฟตอน Photon	γ	(γ)	0	เสถียรภาพ		โฟตอน Photon
นิวตริโน Neutrino	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	เสถียรภาพ		เลปตอน Lepton:
อิเล็กตรอน Electron	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	เสถียรภาพ		
	e^-	e^+	1	เสถียรภาพ		
มิวออน Muon	μ^-	μ^+	207	ไม่เสถียรภาพ, สลายเป็นอิเล็กตรอนบวกสองนิวตริโน	2.2×10^{-6}	
ไพออน Pion	π^+	π^-	273	ไม่เสถียรภาพ, สลายเป็นมิวออนบวกนิวตริโน	2.6×10^{-8}	เมซอน Mesons
	π^0	(π^0)	264	ไม่เสถียรภาพ, สลายเป็นสองรังสีแกมมา	8.9×10^{-17}	
เคเมซอน K meson	K^+	K^-	966	ไม่เสถียรภาพ สลายเป็นมิวออนบวกนิวตริโน หรือเป็นสองหรือสามไพออน	1.2×10^{-11}	
	K_1^0	\bar{K}_1^0	974	ไม่เสถียรภาพ, สลายเป็นสองไพออน	8.7×10^{-11}	
	K_2^0	\bar{K}_2^0	974	ไม่เสถียรภาพ, สลายเป็นสามไพออนหรือเป็นไพออนและนิวตริโนบวกมิวออนหรืออิเล็กตรอน	5.3×10^{-8}	
อีตา เมซอน Eta meson	η^0	(η^0)	1073	ไม่เสถียรภาพ, สลายเป็นสามไพออนหรือสองรังสีแกมมา	10^{-14}	
โปรตอน Proton	p^+	p^+	1836	เสถียรภาพ		แบรีออน Baryons
นิวตรอน Neutron	n^0	\bar{n}^0	1839	ไม่เสถียรภาพในที่ว่างอิสระ, สลายเป็นอิเล็กตรอน, โปรตอนและนิวตริโน	1×10^3	
แลมบ์ดาไฮเปอร์อน Lambda hyperon	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	2182	ไม่เสถียรภาพ, สลายเป็นไพออนบวกนิวตรอน หรือโปรตอน	2.5×10^{-10}	
ซิกมาไฮเปอร์อน Sigma hyperon	Σ^+	Σ^+	2328	ไม่เสถียรภาพ, สลายเป็นไพออนบวกนิวตรอนหรือโปรตอน	8×10^{-11}	
	Σ^-	Σ^-	2341	ไม่เสถียรภาพ, สลายเป็นนิวตรอนบวกไพออน	1.6×10^{-10}	
	Σ^0	Σ^0	2332	ไม่เสถียรภาพสลายเป็นแลมบ์ดาไฮเปอร์อนบวกรังสีแกมมา	10^{-14}	
ไซไฮเปอร์อน Xi hyperon	Ξ^-	Ξ^-	2583	ไม่เสถียรภาพ, สลายเป็นแลมบ์ดาไฮเปอร์อนบวกไพออน	1.7×10^{-10}	
	Ξ^0	Ξ^0	2571	ไม่เสถียรภาพ, สลายเป็นแลมบ์ดาไฮเปอร์อนบวกไพออน	2.9×10^{-10}	
โอเมกาไฮเปอร์อน Omega hyperon	Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	3290	ไม่เสถียรภาพ, สลายเป็นแลมบ์ดาไฮเปอร์อนบวกเคเมซอน หรือเป็นไซไฮเปอร์อนบวกไพออน	10^{-10}	

12.3 โฟตอน (Photons)

ตามที่เราจะรู้จักกัน โฟตอนเป็นควอนตัมของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีลักษณะเสถียรภาพในอวกาศ มีมวลขณะอยู่นิ่งเป็นศูนย์ อาจเป็นไปได้ที่จะคิดว่า การกระทำทางแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างประจุ จะพาโฟตอนไปด้วย เช่นเดียวกับการกระทำอย่างแรงทางนิวเคลียร์ที่ดูถูกนำจากนิวคลีออนหนึ่งไปยังอีกนิวคลีออนหนึ่ง โดยการหมุนเวียนของเมซอนระหว่างนิวคลีออนทั้งสอง

เนื่องจากทั้งเมซอนและโฟตอนมีอยู่จริง น่าคิดว่า แรงโน้มถ่วง และการกระทำอย่างอ่อนอื่น ๆ ก็ควรมีอนุภาคควบคู่ไปด้วย แต่เนื่องจาก แรงโน้มถ่วง ไม่มีการจำกัดระยะทาง สมมติฐาน กราวิตอน (graviton) ก็ควรจะมียุคขณะอยู่นิ่งเป็นศูนย์ เพื่อหลีกเลี่ยงหลักการอนุรักษ์พลังงาน (ดังเช่น โฟตอนมีมวลขณะอยู่นิ่งเป็นศูนย์) กราวิตอน ก็ควรจะมิเสถียรภาพ มีประจุเป็นกลาง และวิ่งไปด้วยความเร็วของแสง ที่ต่างกับโฟตอนก็คือ กราวิตอน มีการกระทำกับสารอย่างอ่อน และยากที่จะวัดได้อย่างถูกต้อง

ควอนตัมของการกระทำอย่างอ่อน เรียกอินเทอร์มีเดียท โบซอน (intermediate boson) มีระยะสั้นกว่าการกระทำอย่างแรงทางนิวเคลียร์ มวลขณะอยู่นิ่งของอินเทอร์มีเดียท โบซอน ใกล้เคียงกับมวลของเมซอน อาจทำให้เกิดประจุ และสลายได้อย่างรวดเร็ว

12.4 เลปตอน (Leptons)

เลปตอน รวมทั้งอิเล็กตรอน, มิวออน และนิวตริโน มีอยู่ 2 ตระกูล ตระกูลหนึ่งก็มีอิเล็กตรอน, โพซิตรอน, ν_e นิวตริโนและ $\bar{\nu}_e$ แอนตินิวตริโน และอีกตระกูลหนึ่ง ประกอบด้วย มิวออนบวกและมิวออนลบ, ν_μ นิวตริโน และ $\bar{\nu}_\mu$ แอนตินิวตริโน กฎการอนุรักษ์ยังใช้ได้กับเลปตอนทั้งสองตระกูล ทุกๆ กระบวนการที่รู้จัก จำนวนเลปตอนของแต่ละชนิดมีค่าคงที่ โดยการใช้เครื่องหมายเลปตอนเป็นบวก และแอนติเลปตอนเป็นลบ

วิธีง่าย ๆ ที่จะใช้กฎการอนุรักษ์ ก็คือ การให้ควอนตัมนัมเบอร์ L และ M กับเลปตอนต่าง ๆ กัน เช่น

$L = +1$	$L = -1$	$M = +1$	$M = -1$
e^-	e^+	$\bar{\mu}$	μ^+
ν_e	$\bar{\nu}_e$	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$

อนุภาคอื่นทุกอนุภาค มี $L = 0$ และ $M = 0$ ตัวอย่างของบางกระบวนการที่มีเลขตอนเกี่ยวข้องอยู่ แสดงว่า L และ M มีค่าคงเดิม เช่น

ไพออนสลาย	π^-	→	$\bar{\mu}$	+	$\bar{\nu}_\mu$		
	$M = 0$		$+1$		-1		
มิวออนสลาย	$\bar{\mu}$	→	e^-	+	ν_μ	+	$\bar{\nu}_e$
	$L = 0$		$+1$		0		-1
	$M = +1$		0		$+1$		0
แฟร์มิออนตกชั้น	γ	→	e^-	+	e^+		
	$L = 0$		$+1$		-1		

หลักการอนุรักษ์อื่น ๆ เช่น พลังงาน, โมเมนตัม, โมเมนตัมเชิงมุม, ประจุไฟฟ้า ย่อมถือได้ว่า ทุกอย่างควรมีลักษณะสมมาตร ดังนั้น L และ M ก็ควรมีลักษณะเช่นเดียวกัน

12.5 เมซอน

(Mesons)

เป็นตัวพาแรงกระทำอย่างแรง (strong interaction) ที่ยึดเหนี่ยวนิวคลีออนไว้ด้วยกันให้เป็นนิวคลีไอ ไม่มีหลักการอนุรักษ์คู่ไปกับจำนวนเมซอนและแอนติเมซอนรวมอยู่ในกระบวนการนี้

12.6 แบรีออน

(Baryons)

นิวคลีออน และอนุภาคหนัก จัดอยู่ในพวกแบรีออน เช่น ในกรณีที่อยู่ในตระกูลเลขตอน, เลขควอนตัม B จะใช้ $+1$ สำหรับแบรีออน และ -1 สำหรับแอนติแบรีออน และยังพบว่า ทุก ๆ กระบวนการ ค่าของ B อนุรักษ์ ตัวอย่างที่สำคัญก็คือ การสลายของนิวตรอน ซึ่งแสดงการอนุรักษ์ของ L

นิวตรอนสลาย ;	n	→	p^+	+	e^-	+	$\bar{\nu}_e$
	$L = 0$		0		$+1$		-1
	$B = +1$		$+1$		0		0

เป็นวิธีที่เป็นไปได้ ที่นิวตรอนสามารถสลาย และยังมีอนุภาค ทั้งพลังงาน และเลขควอนตัม B (เพราะโปรตอน เป็นอนุภาคแบริออนที่เบามาก) ด้วยเหตุผลเดียวกันนี้ ยังอธิบายได้ว่า ทำไมโปรตอนจึงเป็นอนุภาคที่มีเสถียรภาพ ยังไม่มีการสลายที่ไม่เป็นไปตามหลักการอนุรักษ์พลังงานหรือของ B

ทุก ๆ แบริออน สลายไปเป็นโปรตอน หรือแอนติโปรตอนได้เช่นเดียวกับการสลายของอะตอมไปยังสภาวะกราวด์

ยังมีทฤษฎีหนึ่งกล่าวว่า มีอนุภาค 3 ชนิด เรียกควาร์ก (quarks) และอีก 3 ชนิด เรียกแอนติควาร์ก (antiquarks) 2 ตัว มีประจุ $-1/3$ เท่าของประจุอิเล็กตรอน และตัวที่ 3 มีประจุ $+2/3$ เท่าของอิเล็กตรอน, มีเลขแบริออน $B = 1/3$, 3 ตัวรวมกัน จะเป็นแบริออนชนิดต่าง ๆ และถ้าเป็นคู่ ควาร์ก-แอนติควาร์ก (quark-antiquark) จะเป็นเมซอนชนิดต่าง ๆ แต่ไม่น่าที่จะเป็นไปได้ เพราะยังไม่เคยพบอนุภาคที่มีประจุเป็นเศษส่วนของประจุอิเล็กตรอน

สรุป

1. ทฤษฎีเมซอนของแรงนิวเคลียร์ได้เสนอแนะโดยนักฟิสิกส์ชาวญี่ปุ่น ชื่อ ยูกาวา สามารถนำมาใช้เป็นความรู้พื้นฐานที่จะศึกษาในชั้นสูงต่อไปได้
2. มีการค้นพบอนุภาคมูลฐานมากมาย บางตัวก็มีเสถียรภาพ บางตัวก็สลายได้ด้วยครึ่งชีวิตต่าง ๆ กัน ล้วนแล้วแต่มีคุณสมบัติต่างกันไป

แบบฝึกหัดบทที่ 12

- 12.1 จงเปรียบเทียบระยะทางที่อนุภาคที่มีชีวิตยาว (life time) = 10^{-23} วินาที เคลื่อนที่ด้วยความเร็วใกล้ความเร็วของแสง กับ เส้นผ่าศูนย์กลางของนิวเคลียส
- 12.2 นิวตรอนจะสลายไปเป็นมิวออนและอิเล็กตรอนได้หรือไม่
- 12.3 โปรตอนตัวหนึ่งเข้าชนโปรตอนอีกตัวหนึ่ง ดังปฏิกิริยา



โปรตอนที่เข้าชนต้องมีพลังงานต่ำสุดเท่าไร

ค่าคงที่ที่ควรทราบ

1 วัน	$= 8.64 \times 10^4$	วินาที
1 ปี	$= 3.15 \times 10^7$	วินาที
1 อิเล็กตรอนโวลต์	$= 1.6021 \times 10^{-19}$	จูล
1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์	$= 1.6021 \times 10^{-13}$	จูล
1 หน่วยมวลอะตอม (เอเอ็มยู)	$= 931.48$	เอเอ็มอีวี
เลขอาโวกาโดร	$= 0.602252 \times 10^{24}$	อะตอมต่อโมล
ประจุของอิเล็กตรอน	$= 1.60210 \times 10^{-19}$	คูลอมบ์
ความเร็วของแสง (c)	$= 2.997925 \times 10^8$	เมตร/วินาที
ค่าคงที่ของพลังค์ (h)	$= 6.6256 \times 10^{-34}$	จูล-วินาที
มวลและพลังงาน		
มวลของโปรตอน	$= 1.67251 \times 10^{-27}$	กิโลกรัม
	$= 938.256$	เอเอ็มอีวี
มวลของนิวตรอน	$= 1.67482 \times 10^{-27}$	กิโลกรัม
	$= 939.550$	เอเอ็มอีวี
มวลของอิเล็กตรอน	$= 9.1091 \times 10^{-31}$	กิโลกรัม
	$= 0.511006$	เอเอ็มอีวี
มวลของไฮโดรเจน	$= 1.67343 \times 10^{-27}$	กิโลกรัม
	$= 1.0078252$	เอเอ็มยู
มวล 1 เอเอ็มยู	$= 1.6604345 \times 10^{-27}$	กิโลกรัม