

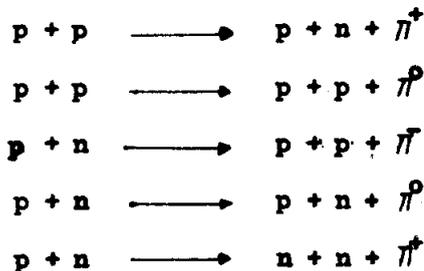
บทที่ 4

อันตรกิริยาระหว่างรังสีคอสมิกกับนิวเคลียสใหญ่ และร่องของอนุภาคพื้นฐาน

4.1 ปฏิกริยาระหว่างรังสีคอสมิกกับนิวเคลียสใหญ่ (Interactions with complex nuclei)

ในการพิจารณาการชนกันของโปรตอนตัวหนึ่งกับนิวเคลียสใหญ่ ๆ เราพิจารณาได้ 2 แบบ แบบแรกคือพิจารณาว่าการชนกันนั้นเป็นการทำปฏิกริยากันระหว่างโปรตอนกับมวลทั้งหมด (total mass) ของ nuclei เมื่อเราพิจารณาว่ามีศูนย์กลางรวมตัวกันเป็นหน่วยเดียวกัน อีกแบบพิจารณาว่าเป็นการชนแบบนิวคลีออนกับนิวคลีออน ซึ่งรวมทั้งการเกิดปฏิกริยาทุติยภูมิที่ตามมาจากนิวเคลียสที่อยู่หนึ่ง กรณีพิจารณาอนุภาคพลังงานสูง ๆ ซึ่งหมายถึงรังสีคอสมิก de Broglie wavelength ของมัน (ของนิวคลีออนที่มากกกกระหน) มีค่าน้อยเมื่อเปรียบกับขนาดของแรงทางนิวเคลียร์ (nuclear force) ดังนั้นพิจารณาการชนกันในแบบหลังจะเหมาะสมกว่า ในการพิจารณาเงื่อนไขที่จะทำให้เกิดมีเมซอน (the threshold of meson production) เราจะต้องพิจารณานิวคลีออนทั้งหลายในนิวเคลียส ซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายกับ Fermi gas, coulomb barrier ของอะตอมและ the exclusion principle แทนที่จะพิจารณาเข้านิวเคลียสอยู่หนึ่งใน the laboratory system เราพิจารณาว่านิวคลีออนบางตัวเคลื่อนที่เข้าหาอนุภาคที่เรายิงเข้าไป ถอนอนุภาคที่เรายิงเข้าไปที่มันเองเป็นนิวเคลียสใหญ่อันหนึ่งด้วยแล้ว (เช่น α - particle) จะทำให้ค่าของพลังงานจลน์ของนิวคลีออนเหล่านั้นก็พอทำให้เกิดมีเมซอนขึ้นมีค่าลดลง การวางที่ 4-1 ได้แสดงบางส่วนของ the threshold energy หน่วยเป็น MeV (Barker, 1949)

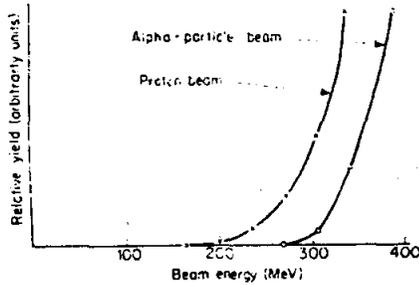
ในการเกิดเมซอนจากอันตรกิริยาระหว่างโปรตอนกับนิวเคลียสที่จะเป็นไปได้คือ



ตารางที่ 4 - 1

| Beam | Target | Products | Threshold MeV |
|----------|-----------------|-----------------------------|---------------|
| γ | P | $\pi^+ + {}^1_0\text{a}$ | 159 |
| γ | C^{12} | $\pi^+ + \text{B}^{12}$ | 161 |
| γ | C^{12} | $\pi^- + \text{N}^{12}$ | 165 |
| P | P | $\pi^+ + \text{D}$ | 300 |
| P | C^{12} | $n + \text{C}^{12}$ | 155 |
| P | C^{12} | $\pi^- + \text{N}^{12} + p$ | 178 |
| α | C^{12} | $\pi^- + \text{F}^{16}$ | 207 |
| OC | C^{12} | $\pi^+ + \text{N}^{16}$ | 202 |

การเกิดเมซอนกับพลังงานของ primary particles สำหรับคาร์บอนโคแสดงไว้ทั้งรูปที่ 4-1



รูปที่ 4 - 1 แสดง Relative product ของเมซอนที่พลังงานในแนว 2 - 10 (MeV) ที่เกิดจากการชนเป็นฟังก์ชันกับ bombarding energy ของโปรตอน และอนุภาคแอลฟา (จาก Jones และ White ปี 1900) รูปที่ได้ทั้งสองไรสเกลทางกัน

นิวเคลียสใหญ่หนึ่ง ๆ ประกอบด้วยโปรตอนและนิวตรอนจำนวนแน่นอน นิวคลีออนเหล่านี้จะมี spin $\frac{1}{2}$ และสอดคล้องกับ Fermi Dirac statistics., และ the exclusion principle มีว่าในแต่ละระดับพลังงานในนิวเคลียสจะไม่มีโปรตอนเกิน 2 ตัว (ซึ่งแต่ละตัวมี spin ตรงกันข้าม) และนิวตรอนเกิน 2 ตัว (ซึ่งแต่ละตัวมี spin ตรงกันข้าม) จำนวนของ quantum states ที่สอดคล้องกับค่าโมเมนตัมที่มีค่าน้อยกว่าค่าโมเมนตัมที่กำหนดให้ค่าหนึ่ง (p) มีค่าเท่ากับปริมาตร (available volume) ใน phase space ในหน่วยของ h^3 ดังนั้นถ้า r_0 คือรัศมีของนิวเคลียสที่บรรจุนิวคลีออนจำนวน A จำนวนของ states ก็กล่าวกำหนดโดย

$$\frac{2}{h^3} \left(\frac{4}{3} \pi r_0^3 A \cdot \frac{4}{3} \pi p^3 \right)$$

ถ้ามีโปรตอนจำนวน Z และนิวตรอนจำนวน A - Z จะได้ค่าโมเมนตัมสูงสุดของโปรตอนและนิวตรอนจาก

$$\text{(สำหรับโปรตอน); } \frac{4}{3} \pi r_0^3 A \frac{4}{3} \pi p_f^3 = \frac{h^3 Z}{2} \quad 4.2$$

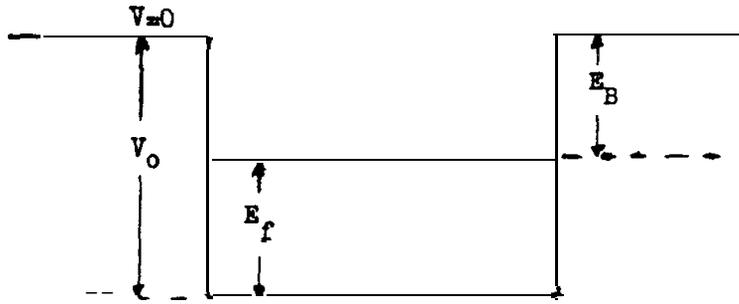
และ

$$\text{(สำหรับนิวตรอน); } \frac{4}{3} \pi r_0^3 A \frac{4}{3} \pi p_f^3 = \frac{h^3 (A - Z)}{2} \quad 4.3$$

แทนค่า $r_0 = 1.38 \times 10^{-13}$ cm ดังนั้นกรณีนิวเคลียสที่มีโปรตอนและนิวตรอนจำนวนเท่า ๆ กันจะได้ $p_f = 216$ MeV/c , i.e. E_f the K.E. = 25 MeV.

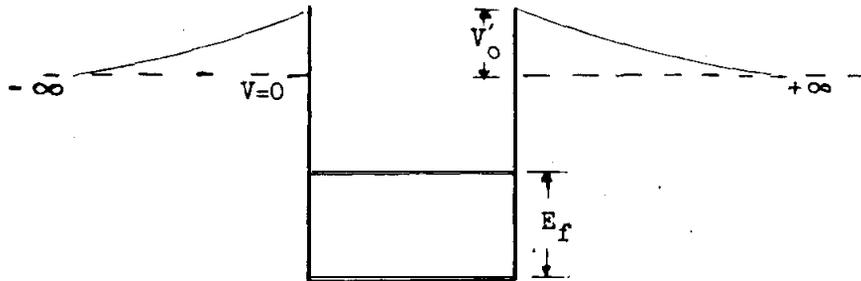
กรณีนิวเคลียสธรรมชาติที่มีจำนวนนิวตรอนมากกว่าโปรตอน the maximum energy state, p_f สำหรับนิวตรอนมีค่ามากกว่าโปรตอน

พลังงานจลน์ของนิวตรอนมีค่าไม่เพียงพอที่จะทำให้มันหลุดออกมาจากนิวเคลียสนั้นได้ นิวตรอนทั้งหลายถูกยึดเหนี่ยวไว้ด้วยกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวอย่างแรงภายในระยะประมาณ 10^{-10} cm และมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเข้าสู่ศูนย์ภายนอกระยะนี้ พลังงานของนิวตรอนในนิวเคลียสเราพอจะเขียนแทนด้วยภาพอย่างสวยงาม ๆ ได้ ดังรูปที่ 4-2



รูปที่ 4 - 2 Energy well ของ neutrons ในนิวเคลียสของความลึกของหลุม V_0 , E_f = พลังงานของนิวตรอนในระดับสูงสุด, E_B คือพลังงานต่ำสุดที่จำเป็นเพื่อให้นิวตรอนในระดับสูงนั้นหลุดออกจากนิวเคลียส

พลังงาน E_B เรียกว่า the binding energy ซึ่งมีค่าเพียงพอที่จะทำให้นิวตรอนตัวหนึ่งซึ่งมีพลังงาน E_f ซึ่งอยู่ในระดับพลังงานสูงสุดในนิวเคลียสหลุดออกจากนิวเคลียสได้ ค่า V_0 สำหรับนิวตรอนใด ๆ ในนิวเคลียสเบา ๆ ซึ่งมี $A \sim 2Z$ จะมีค่าประมาณ 53 MeV (สอดคล้องกับค่า 25 MeV สำหรับ E_f และ 8 MeV สำหรับ E_B) ในกรณีของโปรตอนก็จะมีแรงคูลอมบ์ระหว่างประจุที่เท่ากันและเส้นโค้งของพลังงานมีลักษณะตามรูปที่ 4-3



รูปที่ 4 - 3 Potential well ของโปรตอนในนิวเคลียส E_f แทนระดับพลังงานสูงสุดในนิวเคลียส, V_0 คือค่าคงที่ค่าหนึ่งที่สูงกว่า the coulomb barrier potential energy.

E_f แทนพลังงานสูงสุดของ ระดับที่สอดคล้องกับค่า p_f , E_B คือพลังงานที่ทำให้โปรตอนใน ระดับสูงสุดมีค่า เหมือนโปรตอนที่มีพลังงานจลน์เป็นศูนย์ที่อยู่ห่างจากนิวเคลียสเป็นระยะทางอนันต์ (infinity) ค่าพลังงานที่เกิดจากแรงดึงดูดทำให้หลุมสูงขึ้นคือ V_0 ดังนั้น $V_0 = V_0 + E_B + E_f$

เพื่อเอาชนะหลุมได้โปรตอนในระดับพลังงานสูงสุดจะต้องรับพลังงาน $V_0 + E_B$ มันจึงจะหลุด ออกจากนิวเคลียสได้โดยมีพลังงานจลน์ V_0

การชนกันระหว่าง โปรตอนกับนิวเคลียสใหญ่จะพอที่จะทำให้ เกิดเมซอนตัวหนึ่งขึ้นถ้าใน the centre of mass system ของ โปรตอนที่กำลัง เคลื่อนเข้าหา กับนิวคลีออนเหล่านี้ นิวคลีออนแต่ละตัวจะตอง มีพลังงานจลน์ $m_{77} c^2/2 = 70 \text{ MeV}$, i.e. จะมีโมเมนตัม $p = 370 \text{ MeV}/c$

นิวคลีออนที่มีพลังงานจลน์ 25 MeV จะมีค่า $p_0 = \sqrt{(2 mc^2 E)} = 216 \text{ MeV}$ (เมื่อใช้ non - relativistic approximation) ดังนั้นกรณีโปรตอนที่เข้ามาชนตัวหนึ่งที่มีโมเมนตัม 524 MeV/c ($E = 136 \text{ MeV}$) ชนกับนิวคลีออนที่เคลื่อนที่เข้าหาที่มีโมเมนตัม 216 MeV/c จะมี พลังงานเพียงพอที่จะทำให้เกิดเมซอนตัวหนึ่งขึ้นได้ และหลังจากการชนกันแล้วโมเมนตัมของนิวคลีออน เหล่านั้นจะมีค่าประมาณ

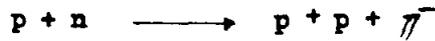
$$\frac{524 - 216}{2} \rightarrow 154 \text{ MeV}/c$$

ซึ่งสอดคล้องกับขนาดของ energy well ซึ่งต่ำกว่า 25 MeV ซึ่งค่าเหล่านี้เพียงพอที่จะเข้าไป อยู่ an occupied state เพื่อทำให้เกิดการปล่อยเมซอนตัวหนึ่งจากนิวเคลียส ดังนั้นถ้าพลังงานใน การชนยิ่งสูงก็ยิ่งจะทำให้เกิดเมซอนได้ง่ายในนิวเคลียสใหญ่ ๆ

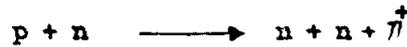
เราจะเห็นได้จากแผนการ 4.1 ว่าสำหรับนิวคลีเอะ ๆ ที่มีจำนวนโปรตอนและนิวตรอนเท่ากัน จะมี positive π - mesons เกิดมาจาก proton interactions กรณีพลังงานต่ำ ๆ the potential barrier จะขออนการสลายตัวของเมซอนประจุบวก (positive mesons) ไว้ เราสังเกตเห็น เนื่องจากมีปฏิกริยาระหว่างนิวเคลียสกับเมซอนประจุบวกนั้นทำให้เมซอนประจุบวกที่ ปล่อยออกมามีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น ส่วนเมซอนประจุลบ (the negative meson) จำนวนหนึ่งถูกปล่อย

อศกษาไทยมีพลังงานจนเป็นศูนย์ ในปี 1948 Occhialini และ Powell ได้ทดลองให้เห็น
 ความสำคัญของสนามคูลอมบ์ (coulomb field) ทั้งกล่าวนี้โดยการศึกษา stars จากนิวเคลียร์
 อิมัลชัน

เราลองมาพิจารณาปฏิกิริยา

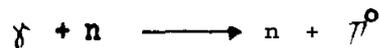
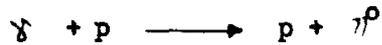
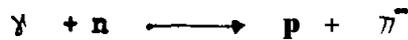
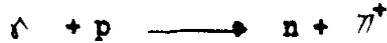


เราจะเห็นว่าหลังการชนกันแล้วเราจะมีโปรตอน 2 ตัวในนิวเคลียส และโปรตอนเหล่านี้จะต้องมี
 พลังงานมากกว่า the Fermi energy (E_f) ในกรณีของปฏิกิริยา



หนึ่งในสองของนิวตรอนที่กล่าวซึ่งเกิดจากการชนกันจะมีพลังงานต่ำกว่า E_f i.e. โดยที่จะเกิดมี
 นิวตรอนใน the low energy state ก่อนจากการชนกันกล่าว ดังนั้นเราพอคาดได้ว่า
 อัตราส่วนของ +/- ที่จะเกิดขึ้นอยู่กับพลังงาน

ในกรณีของการเกิดเมซอนจากรังสีแกมมาในนิวเคลอัส โอกาสที่จะเป็นไปก็คือ



4.4

ทั้งนี้ในกรณีเกิด high energy production จะมีจำนวนเมซอนประจุลบจำนวนพอ ๆ กับ
 แต่ในกรณี low energy collisions เราจะได้ cross section ที่จะเกิดเมซอนประจุลบ
 และเมซอนประจุบวกขึ้นอยู่กับชนิดของเป้า

ตัวอย่างเช่น

6 / 6

ของสารต่อไปนี้

สำหรับ sulphur = 0.86

สำหรับ calcium = 0.58

สำหรับ beryllium = 2.25

สำหรับ lithium = 2.42

สรุปที่กล่าวมาข้างต้นในแง่ qualitative ใ้ค่าเมื่อเมซอนที่ประจุทัวหนึ่งถูกปล่อยออกมา นิวคลีออนตัวหนึ่งจะเปลี่ยนจากโปรตอนไปเป็นนิวตรอนหรือทางตรงกันข้าม เช่นใน Be_9 , the odd neutron สามารถที่จะเปลี่ยนไปเป็นโปรตอนโดยทำให้พลังงานเพิ่มขึ้นเล็กน้อย, หรืออาจเปลี่ยนจากโปรตอนไปเป็นนิวตรอนโดยจะทำให้เปลี่ยนแปลงจากนิวเคลียสเดิมไปเป็น Li_9 แต่ในปฏิกิริยานี้ก็จะให้

π^- - meson ออกมา (มักให้ negative emission)

4.2 อนุภาคพื้นฐาน (Elementary particles)

คนในสมัยโบราณมองว่าสิ่งที่ประกอบกันเป็นโลกเป็นธรรมชาติให้เห็นประกอบมาจาก ดิน, น้ำ, ลม, ไฟ แต่ต่อมาเมื่อคนเรามีความรู้ถึงคุณสมบัติทางเคมี ฐุจกโมเลกุล และอะตอม และในที่สุดก็มาถึงรู้จักถึงอนุภาคที่อยู่ในอะตอมรวมทั้งในนิวเคลียส โดยเฉพาะการพิจารณาอนุภาคพื้นฐาน แยกชนิดของอนุภาคพื้นฐานนี้ ศึกษาบทบาทของมันที่ต่อกันและกัน ซึ่งในปัจจุบันการพิจารณาคุณสมบัติทางเคมีและการวางทิวหรืออภิศง โครงสร้างของอะตอมจะอธิบายในรูปกลศาสตร์ของคลื่น จึงทำให้เข้าใจถึงที่ประกอบกันเป็นของใหญ่ได้ก็ขึ้น อนุภาคพื้นฐานที่เราจะศึกษาเป็นส่วนหนึ่งของเรื่องราวเกี่ยวกับพื้นฐานทั่ว ๆ ไปเท่านั้นซึ่งจริง ๆ แล้วการศึกษอนุภาคพื้นฐานเขามักจะใช้เครื่องเร่งอนุภาคเพื่อวิจัยและศึกษาอนุภาคใหม่ ๆ เพิ่มขึ้น และศึกษาคุณสมบัติของอนุภาคใหม่ ๆ ที่พบ จึงถือว่าฟิสิกส์เกี่ยวกับอนุภาคพื้นฐานเป็นวิชา high - energy physics.

การศึกษอนุภาคพื้นฐานจะพิจารณาแรงพื้นฐาน 4 อย่างที่กระทำต่ออนุภาคคือแรงที่ทำให้เกิด

1. อันตรกิริยาดิว เคลียร์หรือรุนแรง (strong or nuclear interaction)
2. อันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interaction)

3. อันตรกิริยาแบบอ่อน (weak interaction)

4. อันตรกิริยาแบบอ่อนกว่าหรืออันตรกิริยาจากความโน้มถ่วง (gravitational interaction)

และนอกจากนี้ยังศึกษาเกี่ยวกับกฎการอนุรักษ์ ซึ่งไม่เพียงแต่ที่เราจะรู้จักกันในกฎการอนุรักษ์ที่สี่ถึงแปด คือ มวล พลังงาน โมเมนตัมเชิงเส้น - เชิงมุม และประจุไฟฟ้า แต่พิจารณาถึงอย่างอื่นที่เราจะกล่าวต่อไป ในการศึกษาเราจะพิจารณาเนตริกในแง่ของอนุภาคมากกว่าที่จะพิจารณาในแง่ของคลื่น ทั้งนี้เพราะเราศึกษาในแง่ของอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคพื้นฐานเหล่านั้น ส่วนคุณสมบัติของคลื่นจะเป็นตัวกำหนดการเคลื่อนที่ของมันผ่านอวกาศ

4.2.1 อันตรกิริยาทางแม่เหล็กไฟฟ้า

เริ่มพิจารณาจากอนุภาคที่เราจะรู้จักมาแล้วคือ อิเล็กตรอน, โปรตอน, โฟตอน และแอนติพาร์ติเคิล (antiparticles) อีกสองตัวคือ โพสิตรอน (สัญลักษณ์ e^+) และแอนติโปรตอน (สัญลักษณ์ p^-) อนุภาคพื้นฐานเหล่านี้มีคุณสมบัติเฉพาะในตัวของมันแน่นอน เช่น มีประจุไฟฟ้า, มวล เมื่ออยู่นิ่ง, มีค่าโมเมนตัมเชิงมุมภายใน (intrinsic or spin angular momentum) อายุเฉลี่ยก่อนสลายตัวเป็นอนุภาคพื้นฐานอย่างอื่น แค่อนุภาค 5 อย่างที่เรากล่าวถึงนี้เป็นอนุภาคที่มีเสถียรภาพจริง ไม่สลายตัวอายุเฉลี่ยมีค่าอนันต์ ดูตารางที่ 4-2

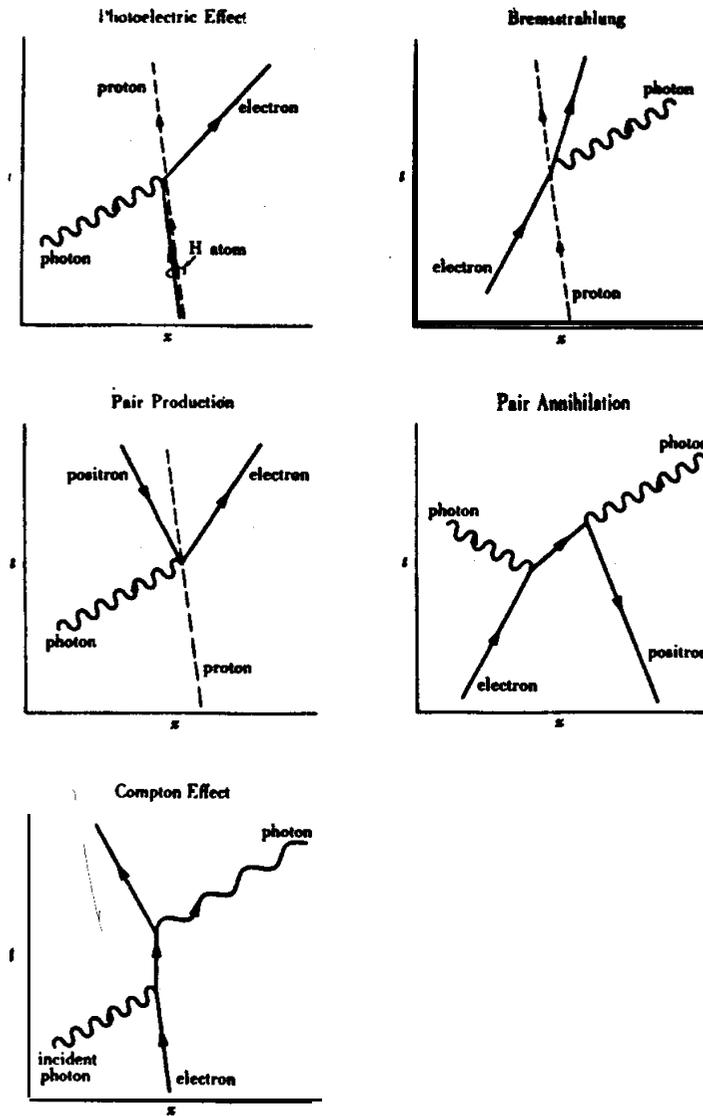
สำหรับอันตรกิริยาทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอนุภาคพื้นฐานเหล่านี้เรา เคยทราบมาแล้ว เช่น อันตรกิริยาระหว่างการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับอนุภาคที่มีประจุหรืออันตรกิริยาระหว่างโฟตอนกับอิเล็กตรอน อันได้แก่

- โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (the photoelectric effect)
- คอมป์ตันเอฟเฟกต์ (the Compton effect)
- การเกิดอิเล็กตรอน - โพสิตรอน (pair production)
- bremsstrahlung
- การหายไปของอิเล็กตรอน - โพสิตรอน (pair annihilation)

ตารางที่ 4 - 2
คุณสมบัติบางประการของอนุภาคพื้นฐานบางตัว

| อนุภาค | มวลเมื่ออยู่นิ่ง m_0 | พลังงานเมื่ออยู่นิ่ง MeV | จำนวนประจุ | Spin, โมเมนตัม เชิงมุม $\times \frac{h}{2}$ | อายุเฉลี่ย |
|-------------------|---------------------------|-----------------------------|------------|--|------------|
| โฟตอน γ | 0 | 0 | 0 | 1 | ∞ |
| อิเล็กตรอน e^- | 1 | 0.511 | - 1 | $\frac{1}{2}$ | ∞ |
| โพสิตรอน e^+ | 1 | 0.511 | + 1 | $\frac{1}{2}$ | ∞ |
| โปรตอน p^+ | 1,836 | 938.256 | + 1 | $\frac{1}{2}$ | ∞ |
| แอนติโปรตอน p^- | 1,836 | 938.256 | - 1 | $\frac{1}{2}$ | ∞ |

เพื่อความง่ายและสะดวกในการศึกษา นักฟิสิกส์จึงคิดรูปแบบ อธิบายอันตรกิริยา เหล่านี้ในโคออร์เดเนตของ space - time โดยให้เวลา (time) อยู่ในแกน y (ordinate) และตำแหน่งในแกน x (abscissa) และเพื่อง่ายแก่ความเข้าใจเราให้ตำแหน่งของอนุภาคอยู่ในมิติเดียว (คล้ายกับว่าศึกษาการชนแบบ head on) ซึ่งปรากฏการณ์จริงแล้วต้องอยู่ใน 3 มิติ แต่มิติเดียวก็พออธิบายได้ เราเรียกเส้นที่อธิบายอนุภาคที่ปรากฏอยู่ในโคออร์เดเนต space - time ว่า world line ถ้าอนุภาคเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ก็จะเส้นตรง เส้นตั้งแทนอนุภาคที่ตำแหน่งไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลาหมายถึงอนุภาคอยู่นิ่ง ถ้าเส้นเอียงจากแนวตั้งจะแทนว่าอนุภาคกำลังเคลื่อนที่มุมระหว่างเส้นกับแนวตั้งมีค่าเพิ่มขึ้นกับอัตราเร็วของอนุภาค เมื่อโฟตอนเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วสูงสุดคือ c จึงใหม่มุมมีค่าสูงสุด



รูปที่ 4-3 กราฟอวกาศ - เวลา ของอันตรกิริยาอีเล็กตรอน - โฟตอน
 เส้นทึบแสดงอีเล็กตรอน, เส้นคดแทนโฟตอน และเส้นขาด
 แทนโปรตอน, โพซิตรอนเคลื่อนที่ไปกับเวลาในอนาคต
 สอดคล้องกับอีเล็กตรอนเคลื่อนที่กลับไปในอดีต

ให้นักศึกษาดูรูปที่ 4-3 ซึ่งเป็นรูปแสดงไคอะแกรม space - time ของอันตรกิริยา อิเล็กตรอนกับโฟตอน เวลาที่อยู่ในรูปนี้มีมาตั้งแต่อดีตไปยังอนาคตที่ค่าเปลี่ยนไปตามการเพิ่มของค่า ออร์ดิเนต (ordinate) ทั้งนี้เราอ่านเหตุการณ์ในกราฟจากข้างล่างขึ้นข้างบน โดยมีรายละเอียดของแต่ละรูปดังนี้

โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟค ไฮโดรเจนอะตอมหนึ่งประกอบด้วยอิเล็กตรอนและโปรตอนหนึ่งตัว ก็ถูกกันไว้ ถูกชนด้วยโฟตอนตัวหนึ่ง หลังอันตรกิริยาแล้ว โฟตอนตัวนั้นหายไปและอิเล็กตรอนและโปรตอนก็กลาวเคลื่อนที่แยกออกจากกันไป คุณลักษณะเหตุการณ์ของ space - time แสดง อันตรกิริยาดังกล่าวโดยที่จุดตัด (vertex) เป็นทรงที่โฟตอนวิ่งเข้ามาชนทำให้อิเล็กตรอนหลุด เป็นอิสระโดยการถูกคลื่นพลังงานของโฟตอนในหมอกไปโดยที่โปรตอนไม่ได้รับการกระทบกระเทือนแต่อย่างใด จำนวนของอิเล็กตรอน (หรือโพซิตรอน) ในอันตรกิริยายังมีค่าคงที่

bremsstrahlung อิเล็กตรอนตัวหนึ่งทำให้เกิดโฟตอนตัวหนึ่งขึ้นมาในการชนกับโปรตอน เป็นอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นทันทีทันใด เช่นกรณีอื่นคือเกิดที่จุดตัดในไคอะแกรมของ space - time ก็กล่าว ซึ่งเป็นทรงที่เส้นโฟตอนเชื่อมกับเส้นอิเล็กตรอน ทำให้เส้นอิเล็กตรอนเฉียงขึ้นไปจากเดิม เป็นตัวชี้ว่าพลังงานและโมเมนตัมของอิเล็กตรอนเปลี่ยนไป ที่จริงแล้วเราควรพิจารณาว่าอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้าไปตัวหนึ่งหายไป (being annihilated) ที่จุดตัดก็กล่าวขณะที่เกิดอิเล็กตรอนตัวที่สองขึ้นมาทันทีที่จุดนี้ (simultaneously created) โดยมีโมเมนตัมและพลังงานทางไป

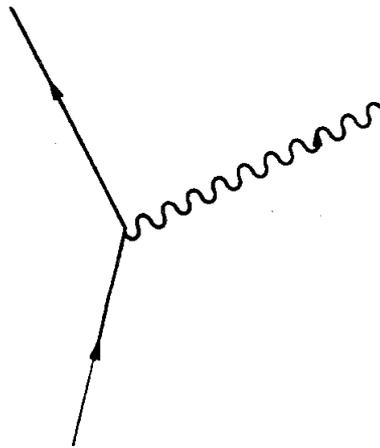
การเกิดอิเล็กตรอน - โพซิตรอนคู่ โฟตอนตัวหนึ่งหายไปโดยมีอิเล็กตรอนและโพซิตรอนเกิดขึ้นมาแทน โดยที่โพซิตรอน (ซึ่งเป็นแอนติพาคีเกิดของอิเล็กตรอน) ในที่นี้แทนด้วยเส้นของอิเล็กตรอน (electron world line) แต่ใช้ลูกศรกลับกัน แอนติพาคีเกิดก็เปรียบเหมือนอิเล็กตรอนแนวเคลื่อนที่กลับไปในอดีต (backward in time) การที่เราเห็นว่าแอนติพาคีเกิดตัวหนึ่งเคลื่อนที่ไปในอนาคต (forward in time) สอดคล้องกับอนุภาคตัวหนึ่งเคลื่อนที่สวนกลับไปในอดีต นี่เป็นการพิจารณาตาม electromagnetic quantum field theory ทั้งนี้เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นกับอนุภาคตัวหนึ่งขึ้นมาสามารถแทนได้ด้วยการหายไปของแอนติพาคีเกิดของตัวเอง ทั้งนี้เราจะเห็นเส้น

อิเล็กตรอนและโฟตอนในอันตรกิริยาการเกิดอิเล็กตรอน - โปซิตรอนมีพื้นฐานของมันก็เหมือนกับในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกและ bremsstrahlung โดยที่เส้นอิเล็กตรอนที่เอียงไปเชื่อมกับเส้นโฟตอนที่สุดตัด ที่เรากล่าวมาที่เราจะเห็นในกรณีอื่น ๆ อีกต่างกันเพียงแต่การวางตัวของเส้นในกราฟอวกาศ - เวลา

การสลายตัวของอิเล็กตรอน - โปซิตรอน อิเล็กตรอนตัวหนึ่งและโปซิตรอนตัวหนึ่งรวมตัวกันทำให้เกิดโฟตอนตัวหนึ่งขึ้นมา โดยทั่วไปแล้วอาจเกิดโฟตอน 2 ตัว หรือมากกว่าขึ้นได้ในอันตรกิริยา ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการอนุรักษ์โมเมนตัม ตามรูปประมุขโฟตอนตัวหนึ่งเกิดขึ้นมาก่อนแล้ว เกิดตัวใหม่อีกขึ้นมา แต่เหตุการณ์ทั้งสองนี้เกิดขึ้นเกือบพร้อม ๆ กัน

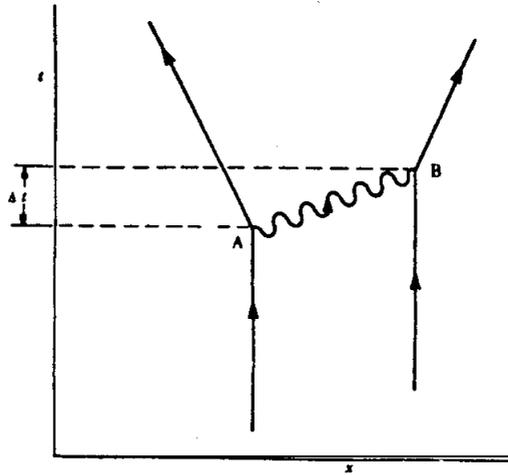
ปรากฏการณ์คอมป์ตัน เป็นเหตุการณ์เดียวที่โฟตอนตัวหนึ่งที่ทำอันตรกิริยากับอนุภาคที่มีประจุแล้วทำให้โฟตอนกระเจิงไป (scattered photon) ในเหตุการณ์ที่เป็นจริงแล้วตามรูปปรากฏการณ์คอมป์ตันเกิดอันตรกิริยาขึ้น 2 ตอน คือ โฟตอนที่มาตกกระทบกับอิเล็กตรอนที่เข้ามา (the incident electron) ทำให้เกิดอิเล็กตรอนตัวกลางตัวหนึ่งขึ้น แล้วอิเล็กตรอนตัวกลางนี้ทำให้เกิดโฟตอนตัวหนึ่งกับอิเล็กตรอนตัวหนึ่งเหมือนกับอันตรกิริยาก่อน ๆ จะเห็นว่าจุดตัด คือจุดในอวกาศ - เวลา ที่เส้นอิเล็กตรอนเชื่อมกับเส้นโฟตอน

ตามความจริงที่สอดคล้องกับทฤษฎีสถนามควอนตัมแล้วอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้าพื้นฐานนี้หมายถึงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นทันทีทันใด ที่ทำให้อนุภาคที่มีประจุตัวหนึ่งหรือปฏิอนุภาคของมันเกิดขึ้น และหายไปหรือเกิดขึ้นทั้งคู่หรือหายไปทั้งคู่ และโฟตอนตัวหนึ่งเกิดขึ้นมาหรือหายไปแทน ให้พิจารณารูปที่ 4-2 เมื่อเส้นอิเล็กตรอนเปลี่ยนทิศทาง เราควรเข้าใจว่าอิเล็กตรอนตัวหนึ่ง (ที่มีโมเมนตัมและพลังงานระดับหนึ่ง) หายไป และเกิดอิเล็กตรอนตัวใหม่ (ที่มีโมเมนตัมและพลังงานที่ต่างเดิม) ขึ้นมาแทน ส่วนในอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างโปรตอนหรือปฏิโปรตอนกับโฟตอนก็จะได้กราฟคล้าย ๆ กัน โดยใช้เส้นที่แทนโปรตอนหรือปฏิโปรตอน และยิ่งกว่านั้นกราฟอันเดียวกันอาจใช้แทนอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างอนุภาคมีประจุใด ๆ กับโฟตอนได้



รูปที่ 4-4 กราฟแสดงอันตรกิริยาทางแม่เหล็กไฟฟ้าเบื้องต้น

อันตรกิริยาที่เราศึกษามาดี เป็นอันตรกิริยาระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับอนุภาคที่มีประจุ ในรูปแบบของกราฟอวกาศ - เวลาเบื้องต้น ที่นี้เราลองมาพิจารณาอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคที่มีประจุ 2 ตัว ดูบ้างว่าจะเป็นอย่างใด ซึ่งตามทฤษฎีฟิสิกส์ดั้งเดิมแล้ว มักจะอธิบายในรูปของสนามและแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอนุภาคทั้งสอง พิจารณารูปที่ 4-5 ซึ่งแสดงการชนแบบผ่านจุดศูนย์กลางระหว่างอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนตัวหนึ่งให้โฟตอนออกมาที่จุด A (ในรูปแบบของ bremsstrahlung ดังรูปที่ 4-3) และอิเล็กตรอนตัวที่สองดูดกลืนโฟตอนดังกล่าวที่จุดตัด B (ในรูปแบบของปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ตามรูปที่ 4-3) อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ทำอันตรกิริยาดังกล่าวนี้จะมีโมเมนตัมและพลังงานเปลี่ยนไปเนื่องจากการแลกเปลี่ยนโฟตอนกัน หมายถึงว่า อิเล็กตรอนแต่ละตัวมีแรงทางแม่เหล็กไฟฟ้ากระทำต่อกัน อนุภาคก็แลกเปลี่ยนกันนี้จะแทนแรงที่อนุภาคทั้งสองกระทำต่อกัน เราเรียกว่า เวอชวลโฟตอน (virtual photon) ซึ่งเราสังเกตไม่ได้ (unobservable) โฟตอนดังกล่าวนี้เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว c กราฟที่แสดงอันตรกิริยาในอวกาศ - เวลา เหมือนรูปที่ 4-5 นี้ เราเรียกว่า ไดอะแกรมของฟิน์แมน (Feynman diagram) ซึ่งฟิน์แมน (R. P. Feynman) เป็นผู้คิดขึ้น เพื่อใช้อธิบายและคำนวณอันตรกิริยาทางอิเล็กโตรไดนามิกส์ระหว่างประจุทางควอนตัม



รูปที่ 4-5 โคอะแกรมของโรเจอร์แมน แสดงอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนสองตัว

แรงคูลอมบ์และแรงทางแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างอื่นระหว่างอนุภาคประจุสามารถอธิบายในรูปของการแลกเปลี่ยนอย่างคงที่ของเวกซ์ลโฟตอน ระหว่างอนุภาคประจุเหล่านั้น แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีความแตกต่างระหว่างเวกซ์ลโฟตอน (ซึ่งเป็นตัวกลางของแรงทางแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างอนุภาคประจุ) กับโฟตอนจริง ๆ (real photons) ทั้งนี้เพราะโฟตอนจริง ๆ สามารถสังเกตได้ (observable) แต่เวกซ์ลโฟตอนสังเกตไม่ได้

ที่นี่เราลองมาพิจารณาว่าอนุภาคที่สังเกตไม่ได้ตัวหนึ่งจะมีบทบาทต่ออันตรกิริยาอย่างไร ก่อนอื่นเราต้องจำไว้ว่า ถ้าอิเล็กตรอนอิสระตัวหนึ่งในสูญญากาศ (empty space) ปล่อยโฟตอนตัวหนึ่งออกมา พลังงานและโมเมนตัมทั้งหมดของระบบจะไม่อนุรักษ์ (นั่นเป็นสาเหตุว่าทำไมอนุภาคที่มีมวลจำเป็นต้องมีการชนแบบ bremsstrahlung) ในทำนองเดียวกันอิเล็กตรอนอิสระตัวหนึ่งไม่สามารถจะดูดกลืนโฟตอนได้ถ้ายังคงให้มีการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัมอยู่ (นั่นเป็นสาเหตุว่าทำไมปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่ออิเล็กตรอนที่หลุดไปเป็นอิสระเริ่มแรกมันต้องถูกยึดเหนี่ยวไว้) ถึงแม้ว่ากฎการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัมจะไม่อนุรักษ์เมื่อพิจารณาแยกแต่ละจุด A และ B พร้อม ๆ กัน แต่กฎการอนุรักษ์ทั้งสองจะยังเป็นจริงอยู่เมื่อพิจารณารวมทั้งระบบ การไม่อนุรักษ์เมื่อ

พิจารณาแยกกันเป็นคุณลักษณะอันหนึ่งทีเรียกว่า สภาวะที่สังเกตไม่ได้ (unobservability) ของ เวลชวลโฟตอน ที่ทำให้กฎการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัมใช้ไม่ได้ในช่วงเวลาหรือระยะที่เกิดการ ปล่อยโฟตอนและการดูดกลืนโฟตอน ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีควันตัม เมื่อทราบโคที่พลังงาน ΔE และ โมเมนตัม Δp ถูกขมมาใช้ในเหตุการณ์การแผ่รังสีในอวกาศและเวลาดังกล่าว (space - time emission) แล้วกลับคืนภายในช่วงเวลาและตำแหน่งที่สอดคล้องกับหลักแห่งความไม่แน่นอนของ ไฮเซนเบิร์ก (the Heisenberg's principle of uncertainty) หมายความว่า ใน ช่วงเวลา $\Delta t \geq \hbar / \Delta E$ และในช่วงระยะ (space interval) $\Delta x \geq \hbar / \Delta p_x$ ดังนั้น พลังงานทั้งหมดของระบบในระหว่างช่วงเวลา Δt จะมีความมากกว่าพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอน ที่กำลังเข้ามาทั้งสองหลักแห่งความไม่แน่นอนจะจำกัดขนาดของพลังงานที่ให้อิม ΔE , (ซึ่งทำให้เกิด ภาวะไม่อนุรักษ์พลังงาน), ให้มีค่าได้ตาม

$$\Delta E \simeq \hbar / \Delta t \quad 4.5$$

ปริมาณ Δt (ตามรูปที่ 4-5) คือ ช่วงเวลาระหว่างการแผ่และการดูดกลืนเวลชวลโฟตอนดังกล่าว ในทำนองเดียวกันความไม่แน่นอนในโมเมนตัมและตำแหน่งมีความสัมพันธ์กันตามสมการ

$$\Delta p_x \simeq \hbar / \Delta x$$

เป็นที่น่าสังเกตว่าพลังงานของเวลชวลโฟตอนมีค่าใด ๆ ก็ได้ อาจเป็นตั้งแต่ศูนย์ถึงค่าอนันต์ที่จะ ถูกสร้างขึ้นได้ ดังนั้นช่วงเวลาและระยะทางที่ตามมาของการปล่อยและการดูดกลืนในเหตุการณ์ ดังกล่าวอาจมีค่าได้ตั้งแต่ศูนย์ ๆ (เกิดอันตรกิริยาในระยะทางสั้น ๆ โดยมีเวลชวลโฟตอนพลังงาน สูง ๆ) ถึงค่ามาก ๆ (ในระยะยาว ๆ แต่โฟตอนพลังงานต่ำ ๆ) ได้

4.2.2 อันตรกิริยารุนแรง

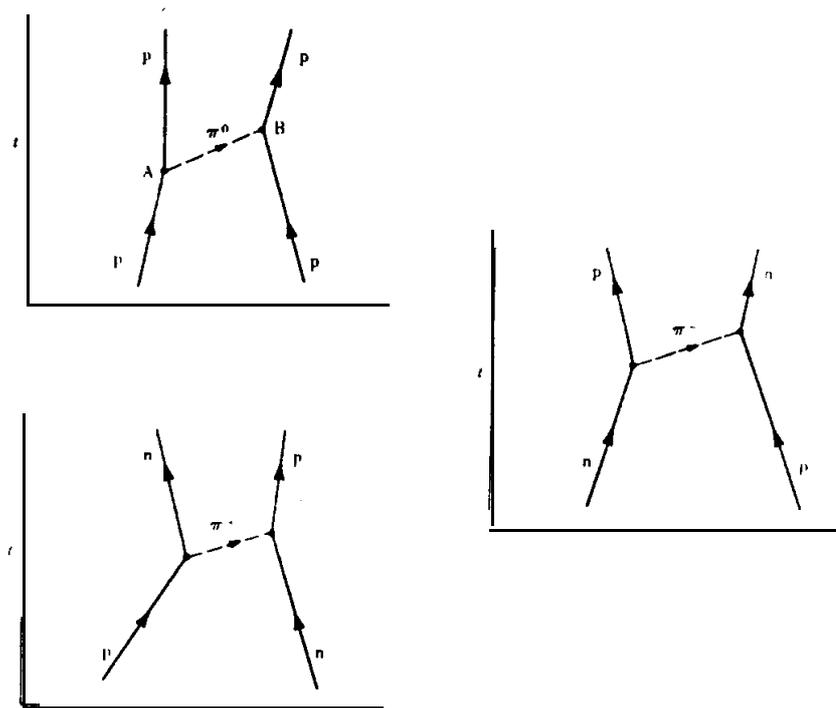
ในหัวข้อ 4.2.1 ทำให้เราทราบว่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างอนุภาคที่มีประจุ 2 ตัว อธิบายได้ด้วยการแลกเปลี่ยนเวลชวลโฟตอน ซึ่งเป็นการพิจารณาในแง่ของแรงกระทำต่อกันในระยะ ยาว (long - range) ซึ่งแรงที่กระทำเป็นสัดส่วนผกผันกับระยะทางกำลังสอง จึงเป็นข้อที่ว่า

เวอชวลโฟตอนซึ่งเป็นอนุภาคสนาม (the virtual field particle) สมมูลเมื่ออยู่ฝั่งเป็นคู่กัน ที่นี้เรามาพิจารณาแรงทางนิวเคลียร์ซึ่งเป็นแรงที่รุนแรงที่กระทำระหว่างโปรตอนและนิวตรอนภายในนิวเคลียส มีคำถามว่าสนามของแรงดังกล่าวนี้จะอธิบายในรูปของการแลกเปลี่ยนอนุภาคสนามได้อย่างไร เพราะแรงนิวเคลียร์ต่างกับแรงแม่เหล็กไฟฟ้ามาก แรงแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ขยายไปทั่วอวกาศ (แปรผันกับ $1/r^2$) แต่แรงนิวเคลียร์จะเป็นคู่กันที่ระยะมากกว่า (ประมาณ) 1.4 fermi แรงนิวเคลียร์จึงเป็นแรงที่กระทำต่อกันในระยะสั้น (short range) อนุภาคที่เป็นตัวกลางแลกเปลี่ยนจะต้องมีคุณสมบัติอะไรบ้าง ? คำถามดังกล่าวนี้ถามและตอบได้โดยนักฟิสิกส์ชาวญี่ปุ่น ชื่อ ยูกาวา (H. Yukawa) ในปี ค.ศ. 1935 (ตั้งเราเคยได้กล่าวมาบ้างแล้วในบทที่ 1) เราลองมาพิจารณากันอีกครั้ง

ตามลัทธิฐานของยูกาวานั้นมีว่า แรงนิวเคลียร์ระหว่างนิวคลีออนจะอยู่ในรูปของการแลกเปลี่ยนตัวกลาง (virtual particles) ซึ่งแทนสนามของแรงนิวเคลียร์นั้น คุณสมบัติที่จำเป็นของอนุภาคเหล่านี้ (π - mesons หรือ pions) พิจารณาได้จากหลักแห่งความไม่แน่นอน เราลองมาพิจารณาอันตรกิริยาทางนิวเคลียร์ระหว่างนิวคลีออนโดยใช้โดอะแกรมของไฟน์แมน ดูตามรูปที่ 4-4 a ลมุดที่ว่าโปรตอนตัวหนึ่งทำให้เกิดเวอชวลไพ - เมซอน ที่ไม่มีประจุ (virtual neutral π - meson, π^0) ตัวหนึ่งขึ้นมาที่จุดตัด A และหลังจากเวลาผ่านไปเล็กน้อย Δt โปรตอนตัวที่สองดูดกลืนไพออนตัวนี้ที่ตำแหน่ง B ระหว่างช่วงเวลา Δt ที่มีไพออนอยู่ที่นี่ หลักอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัมใช้ไม่ได้ (violation) โดยที่การใช้ไม่ได้ดังกล่าวนี้เข้าไปตามหลักแห่งความไม่แน่นอนที่ว่า

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx h$$

โดยที่ ΔE ตอนนี้ก็คือพลังงานที่ขโมยมา "borrowed energy" ระหว่างการแลกเปลี่ยน เมื่อเมซอนตัวนี้ถูกดูดกลืนโดยโปรตอนตัวที่สองที่จุด B ในเวลาต่อมาแล้วพลังงานของระบบก็จะกลับคงเดิมอีกครั้ง เหตุการณ์ที่คล้าย ๆ กันนี้อาจดูได้จากอันตรกิริยาระหว่างโปรตอนกับนิวตรอน ตามรูปที่ 4-4 b, c เป็นที่น่าสังเกตว่าไพออนทั้ง 3 ตัว (π^+ , π^- , π^0 mesons) ซึ่งมีประจุ +1, -1 และ 0 ในหน่วยของประจุอิเล็กตรอน (e) จะอธิบายอันตรกิริยาระหว่างนิวคลีออนชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 4-6 อันตรกิริยาระหว่างนิวคลีออนกับนิวคลีออนโดยผ่านการแลกเปลี่ยน virtual pions π^0 , π^+ และ π^-

ทุกอันตรกิริยาที่รุนแรงระหว่างนิวคลีออนกับนิวคลีออนจะเป็นแรงในระยะสั้นประมาณ 1.4 fermi ซึ่งระยะนี้จะจำกัดระยะการเคลื่อนที่ (R) ของเวกซ์ลเมซอน (virtual meson) ก่อนที่จะมันจะถูกดูดกลืนไป เพื่อสะดวกแก่การเข้าใจเราสมมุติว่าเมซอนนั้นเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วใกล้ความเร็วแสง ($\sim c$) ดังนั้นเมซอนตัวนี้จะคงอยู่ในระหว่างการแลกเปลี่ยนได้ใน ช่วงเวลา Δt ซึ่ง

$$\Delta t = \frac{R}{c} = \frac{1.4 \times 10^{-15} \text{ เมตร}}{3 \times 10^8 \text{ เมตร/วินาที}} = \frac{1 \times 10^{-23}}{2} \text{ วินาที}$$

เราใช้หลักแห่งความไม่แน่นอน เราจะหาพลังงานที่ยอมรับได้

$$\Delta E = \frac{h}{t} = \frac{10 \text{ จูล - วินาที}}{\frac{1}{2} \times 10^{-23} \text{ วินาที}} = 2 \times 10^{-11} \text{ จูล}$$

เมื่อให้พลังงานที่เพียงพอเป็นค่าพลังงานเมื่ออยู่นิ่งของอนุภาคที่มีชื่อว่า the virtual pion ($E_\pi = m_\pi c^2$) เราจะไ้มวลเมื่ออยู่นิ่งของโพออนที่มีค่า

$$m_\pi = \frac{E_\pi}{c^2} \approx \frac{\Delta E}{c^2} = \frac{2 \times 10^{-11} \text{ จูล}}{(3 \times 10^8 \text{ เมตร/วินาที})^2} \approx 2 \times 10^{-26} \text{ กิโลกรัม} \approx 200 m_e$$

ดังนั้นจากเหตุผลที่กล่าวมานี้จึงคาดได้ว่าโพออนที่เป็นตัวกลางหรือตัวที่อนุภาคโปรตอนกับโปรตอนหรือนิวตรอนแลกเปลี่ยน (สนามของแรงนิวเคลียร์) ซึ่งกันและกันมีมวลขนาดประมาณ 200 เท่าของมวลอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นค่าที่สอดคล้องกับคุณสมบัติของแรงทางนิวเคลียร์ที่กล่าว

หลังจาก Yukawa ได้ทำนายว่าอนุภาคดังกล่าวที่มีมวลอยู่ระหว่างมวลของอิเล็กตรอนและโปรตอนแล้วนักวิทยาศาสตร์ก็เริ่มศึกษามันจริงหรือเปล่า (คำว่าเมซอนมาจากภาษากรีก meson แปลว่า middle) โพออน (virtual pion) ที่กำลังถูกใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนระหว่างนิวคลีออนคู่ใด ๆ เราไม่สามารถสังเกตได้ แต่ถ้าหากเราให้พลังงานที่สูงพอขนาดประมาณหลายร้อย MeV เข้าไปแก่ระบบนิวเคลียร์เราก็สามารถที่จะทำให้เกิดโพออนขึ้นมาได้และเมื่ออนุภาคโพออนเหล่านี้หลุดออกมาจากนิวเคลียสเราก็สามารถสังเกตได้ จากการศึกษาทดลองทำให้คุณสมบัติของอนุภาคที่ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนทางนิวเคลียร์ (the nuclear exchange particles) อันมี π^+ และ π^- (หรือเรียกย่อ ๆ ว่าโพออนที่มีประจุ) ได้ในปี 1947 ส่วนเมซอนที่ไม่มีประจุของกลุ่มเดียวกันนี้ (π^0) ทดลองพบในอีก 3 ปีถัดมา โพออนที่กล่าวมานี้เกิดขึ้นในอันตรกิริยาระหว่างนิวคลีออนพลังงานสูง ๆ เช่น



ตั้งแต่ออกันปี 1940 อันตรกิริยารุนแรงทางนิวเคลียร์ไม่สามารถที่จะควบคุมและศึกษาได้สะดวกเพราะต้องอาศัยจากการแผ่รังสีคอสมิก จนภายหลังมีการสร้างเครื่องเร่งอนุภาคที่สามารถควบคุมและผลิตอนุภาคที่มีพลังงานหลายร้อย MeV ขึ้นได้ จึงทำให้เราสามารถศึกษาโพออนที่มีประจุและไม่มีประจุในห้องปฏิบัติการได้สะดวกและควบคุมได้ จึงทำให้ได้คุณสมบัติต่าง ๆ ของโพออนเหล่านี้ตาม

ตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3

คุณสมบัติของไพออน

| | π^+ | π^- | π^0 |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| มวลเมื่ออยู่นิ่ง, m_0 | 273.3 | 273.3 | 264.3 |
| พลังงานเมื่ออยู่นิ่ง, MeV | 139.58 | 139.58 | 134.97 |
| ประจุ, e | +1 | -1 | 0 |
| Spin, $\times \frac{1}{2}$ | 0 | 0 | 0 |
| โมเมนต์แม่เหล็ก | 0 | 0 | 0 |
| อายุเฉลี่ย, วินาที | 2.55×10^{-8} | 2.55×10^{-8} | 1.8×10^{-16} |
| <p>การสลายตัวที่จะมีได้ (decay modes) มีดังนี้</p> <p>อนุภาค π^+</p> <p>$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ (99.99%)</p> <p>$\pi^+ \longrightarrow e^+ + \nu_e$ (0.01%)</p> <p>อนุภาค π^-</p> <p>$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$</p> <p>$\pi^- \longrightarrow e^- + \bar{\nu}_e$</p> | | | |

| | | |
|----------------|--|----------|
| อนุภาค π^0 | $\pi^0 \longrightarrow \nu + \bar{\nu}$ | (98.8 %) |
| | $\pi^0 \longrightarrow e^+ + e^- + \gamma$ | (1.2 %) |

ในตารางที่ 4-3 ทวีตที่มีอยู่ตรงหัวพอดที่จะมีชื่อว่า เป็นแอนติอนุภาค ก็คือของอนุภาคมัน ๆ

อนุภาคโพออนมีสปิน (spin) เป็นเลขจำนวนเต็ม (0) เหมือนกันกับของโพตอน (1) เป็นที่น่าสังเกตว่า โมเมนตัมเชิงมุมสปิน (spin angular momentum) ที่มีเป็นเลขจำนวนเต็ม จะเป็นลักษณะอันหนึ่งของอนุภาคสนาม (field particles) ซึ่งมีคุณลักษณะดังนี้

1. ในอันตรกิริยาใด ๆ ไม่ว่าจะเป็นการสลายตัวหรือการเจือปนกัน อนุภาคสนามเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นหรือถูกทำลายหายไปก็ได้ และกฎการอนุรักษ์จำนวนก็ไม่ว่าเป็น
2. จะมีอนุภาคสนามจำนวนเท่าใดก็ได้ที่จะอยู่ในสถานะควอนตัม (quantum state) เดียวกัน ไม่ต้องเป็นไปตาม the Pauli exclusion principle

แต่มีความแตกต่างกันอยู่ระหว่าง โฟตอนและโพออนก็คือ โฟตอนเป็นกลางทางไฟฟ้า ส่วนโพออนมีประจุอยู่สามแบบ โฟตอนมีมวลเมื่อยังไม่เป็นศูนย์ ส่วนมวลของโพออนมีค่า finite ที่สอดคล้องกับแรงทางนิวเคลียร์ในระยะสั้น และอีกอย่างก็คือโพออนอิสระมีเสถียรภาพไม่สลายตัว ส่วนโพออนอิสระไม่เสถียร

จากตารางที่ 4-3 จะเห็นว่า π^0 - เมซอนจะสลายตัวโดยผ่านอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า ใช้เวลาประมาณ 10^{-16} วินาที ใช้เวลานานกว่าอันตรกิริยาแรง (นิวเคลียร์) ซึ่งใช้เวลาประมาณ 10^{-23} วินาที แต่อย่างน้อยกว่าเวลาที่นิวตรอนมันสลายตัว ซึ่งใช้เวลาประมาณ 10^3 วินาที (นิวตรอนอิสระสลายตัวจะให้โปรตอน, อิเล็กตรอน และปฏินิวตริโน) และน้อยกว่าเวลาที่โพออนที่มีประจุสลายตัว (ซึ่งใช้เวลาประมาณ 10^{-8} วินาที) เมื่อเปรียบเทียบการสลายตัวของนิวตรอนและโพออนที่มีประจุกับอันตรกิริยาทางนิวเคลียร์ ($\approx 10^{-23}$ วินาที) และอันตรกิริยาทางแม่เหล็กไฟฟ้า ($\approx 10^{-21}$ วินาที) แล้วจะเห็นว่าการสลายตัวของนิวตรอนและโพออนที่มีประจุจะอ่อนกว่า และใช้เวลาช้านานกว่ามาก จากการเปรียบเทียบแบบนี้ทำให้เกิดอันตรกิริยาพื้นฐานแบบอื่นระหว่าง

อนุภาคที่มีอันตรกิริยาอ่อนกว่าแบบรุนแรงและแบบแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นมาที่เรา เรียกว่า อันตรกิริยาแบบอ่อน (weak interaction) ผู้ที่พิจารณาไว้เป็นคนแรกก็คือ เฟอร์มิ (E. Fermi) ในปี ค.ศ. 1940 ในการอธิบายการสลายตัวของอนุภาคเบต้าจากสารกัมมันตภาพรังสี เมื่อเปรียบเทียบกับอันตรกิริยาแบบรุนแรงแล้ว อันตรกิริยาแบบอ่อนจะอ่อนกว่าด้วยตัวร่วม 10^{13} แต่ยังคงมากกว่าที่เกิดจากความโน้มถ่วงธรรมดาด้วยตัวร่วม 10^{27} ดูตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4

อันตรกิริยาพื้นฐาน

| อันตรกิริยา | Relative strength | อนุภาคสนาม |
|---------------|-------------------|--------------|
| รุนแรง | 1 | โฟตอน |
| แม่เหล็กไฟฟ้า | 10^{-2} | โฟตอน |
| แบบอ่อน | 10^{-13} | อนุภาค W (?) |
| ความโน้มถ่วง | 10^{-40} | graviton (?) |

การสลายตัวของโฟตอนจะทำให้เกิดอนุภาคพื้นฐานอื่นขึ้นมา การสลายตัวที่จะเป็นไปได้มาก (99.99 % ของการสลายตัวทั้งหมด) จะโฟตอนภาคใหม่ 2 ตัว คือมิวออน (muons) ซึ่งมี μ^+ กับ μ^- และนิวทริโน (neutrinos) ซึ่งมี ν_μ กับ $\bar{\nu}_\mu$ นิวทริโนทั้งสองตัวนี้เกิดตามมิวออนออกมาและมีลักษณะแตกต่างไปจากที่เกิดตามอิเล็กตรอนออกมา (ν_e และ $\bar{\nu}_e$)

4.2.3 เอกภพของอนุภาค 13 ตัว (A thirteen - particle universe)

เราละอนุภาคมิวออนและนิวตริโนของมันไว้สักครู่ เรามาพิจารณาสมมุติฐานอย่างหนึ่งที่ว่า สักรวาลประกอบด้วยอนุภาคพื้นฐานอย่างอื่นนอกเหนือจากที่เราละไว้เมื่อกี้เท่านั้น จำนวนที่ละกล่าวถึงนี้มีจำนวน 13 ตัว ที่จริงแล้วสักรวาลของเราประกอบด้วยอนุภาคต่าง ๆ ยุ่งยากมากที่จะพิจารณาได้ แต่แบบที่ว่าสักรวาลประกอบด้วยอนุภาค 13 ตัว ดังกล่าวก็พอประมาณได้ว่าเป็นกรณีน้อยที่สุดที่จะประกอบกันเป็นสักรวาลจริง ๆ ได้ อนุภาคทั้ง 13 ตัว แล่ดงไว้ในตารางที่ 4-5

เรียงตามลำดับมวล จะมีกราวิตอน (graviton) ซึ่งเป็นอนุภาคที่ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนในอันตรกิริยาความโน้มถ่วงรวมอยู่ด้วย ถึงแม้ว่าจะไม่พบในการทดลอง แต่จากทฤษฎีทำนายว่ามันมีมวลเมื่ออยู่นิ่งเป็นศูนย์ มีสปินเท่ากับ 2 ที่จริงถ้าจะให้สมบูรณ์เราควรรวมเอาอนุภาคที่ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนในอันตรกิริยาในการสลายตัวของนิวตรอนและโพออนด้วย ตัวนี้ก็คืออนุภาค W ในปัจจุบันนี้ การศึกษาว่ามันมีจริงหรือเปล่าในห้องปฏิบัติการที่มีเครื่องเร่งอนุภาคพลังงานสูงทุกแห่ง แต่เราจะละอนุภาค W ไว้ เนื่องจากสมมุติฐานของเราที่ว่า นิวตรอนและโพออนเป็นอนุภาคที่มีเสถียรภาพ

อนุภาคในตารางที่ 4-5 แยกเป็น 5 กลุ่ม อนุภาคทุกตัวในแต่ละกลุ่มจะมีสปินเท่ากัน และมวลใกล้เคียงกัน เมื่อแยกตามสปินจะได้เป็นพวกมีสปินเป็น $\frac{1}{2}$ (half - integral spins) และจำนวนเต็ม (integral spins)

ก. พวกที่มีสปินเป็น $\frac{1}{2}$ มีพวกที่เรเรียกว่า บาริออน (baryons มาจากภาษากรีกที่ว่า "heavy") มีโอกาสทำอันตรกิริยาได้ทั้ง 4 แบบ ในอันตรกิริยาใด ๆ จำนวนของบาริออนจะต้องมีค่าคงที่เสมอ โดยแต่ละตัวแทนด้วยค่า + 1 ส่วนปฏิบาริออน (antibaryons) แทนด้วยค่า -1 อีกพวกคือเลปตอน (leptons มาจากภาษากรีก "Light") อิเล็กตรอนและโพซิตรอนมีโอกาการทำอันตรกิริยาแบบแม่เหล็กไฟฟ้า, อ่อนและโน้มถ่วง ส่วนอนุภาคนิวตริโนเกิดเฉพาะอันตรกิริยาแบบอ่อน และสันนิษฐานว่ามีแบบความโน้มถ่วงด้วย ในอันตรกิริยาใด ๆ จำนวนทั้งหมดของเลปตอนจะมีค่าคงที่เสมอ ในกฎการอนุรักษ์ของเลปตอนนี้แต่ละตัวเราแทนด้วยค่า + 1 และปฏิเลปตอน (antilepton) แทนด้วยค่า - 1

ย. พวกที่มีสปินเป็นเลขจำนวนเต็ม อนุภาคในกลุ่มนี้คือพวกที่เรียกว่าอนุภาคสนาม หรือควอนตัมสนาม (the field quantum) ซึ่งถูกสร้างหรือถูกทำลายไปในอันตรกิริยาใด ๆ ก็ได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงการอนุรักษ์จำนวน อนุภาคเมซอนมีโอกาสทำอันตรกิริยาได้ทั้ง 4 แบบ กลุ่มโพตอนมีเฉพาะโพตอนและเป็นปฏิอนุภาคของตัวเอง ส่วนกราวิตรอนซึ่งเป็นอนุภาคสนามในแรงแห่งความโน้มถ่วงถึงแม้จะทดลองยังไม่พบ แต่ทางทฤษฎีคาดว่ามันมีสปินเป็น $\frac{1}{2}$ และมวลเมื่ออยู่นิ่งเป็นศูนย์

ส่วนประกอบส่วนใหญ่ของเอกภพเป็นพวกโปรตอน, นิวตรอนและอิเล็กตรอน แรงแห่งความโน้มถ่วง (มีกราวิตรอนเป็นอนุภาคสนาม) มีบทบาทมากในระบบใหญ่ ๆ (macroscopic system) เช่น ระบบสุริยะ, แรงทางแม่เหล็กไฟฟ้า (มีโพตอนเป็นอนุภาคสนาม) มีบทบาทมากในแง่ระบบเล็ก ๆ (microscopic system) เช่น โมเลกุลและอะตอม และแรงทางนิวเคลียร์ (มีโพออนเป็นอนุภาคสนาม) มีบทบาทมากในระบบที่เป็นส่วนของอะตอม (subatomic system) เช่น นิวเคลียส

จากตารางที่ 4-5 อนุภาคนิวตรอน, ปฏินิวตรอนและโพออนที่มีประจุทั้งสองจะเป็นอนุภาคที่มีเสถียรภาพ (ไม่สลายตัว) ในอันตรกิริยาแบบรุนแรงและแม่เหล็กไฟฟ้า แต่จะไม่เสถียรในอันตรกิริยาแบบอ่อน โพออนไม่มีประจุจะเสถียรในอันตรกิริยาแบบรุนแรง แต่ไม่เสถียรในอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนอนุภาคอื่น ๆ ในตารางที่ 4-5 นอกเหนือที่กล่าวมาจะมีเสถียรภาพหมด

ลักษณะของอันตรกิริยารุนแรงพิจารณาจากพลังงานโดยประมาณ 150 MeV (พลังงานเมื่ออยู่นิ่งของโพออน) ซึ่งมีความหมายหนึ่งในลิขของพลังงานเมื่อนิ่งของบาริออน (ประมาณ 1,000 MeV) ส่วนอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานที่เกิดประมาณ 1.5 MeV

ถึงแม้ว่าแบบจำลองของเอกภพประกอบด้วยอนุภาคนับ 13 ตัว แต่น่าสนใจและง่ายยังไม่ถูกต้องตามความจริง เพราะยังมีอนุภาคพื้นฐานอีกมากมายที่มีบทบาทต่อโครงสร้างของสารแต่ค่อนข้างยังไม่แน่นอนในการศึกษา-ทดลองนัก เพราะอนุภาคเหล่านี้อายุสั้นและสังเกตได้ยาก

บทที่ 4 - 5

A Thirteen-particle Universe

| FAMILY | PARTICLE | SYMBOL | ELECTRIC CHARGE, e | SPIN, $\times \hbar$ | REST MASS, REST ENERGY, | | INTERACTION PARTICLE PARTICIPATES IN |
|---------------|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|--------------|---|
| | | | | | m_e | MeV | |
| Baryon | neutron, antineutron | n, \bar{n} | 0 | $\frac{1}{2}$ | 1,639 | 939.5 | strong, electromagnetic, weak, gravitational |
| | proton, antiproton | p^+, p^- | +1, -1 | $\frac{1}{2}$ | 1,836 | 938.2 | |
| Pion | π^+ meson | π^+ | +1 | 0 | 273.3 | 139.6 | strong, electromagnetic, weak, gravitational |
| | π^- meson | π^- | -1 | 0 | 273.3 | 139.6 | |
| | π^0 meson | π^0 | 0 | 0 | 264.3 | 135.0 | |
| Lepton | electron, positron | e^-, e^+ | -1, +1 | $\frac{1}{2}$ | 1 | 0.5110 | electromagnetic, weak, gravitational |
| | neutrino, antineutrino | $\nu_e, \bar{\nu}_e$ | 0 | $\frac{1}{2}$ | 0 | 0 | |
| | photon | γ | 0 | 1 | 0 | 0 | electromagnetic, gravitational |
| | graviton | | 0 | 2 | 0 | 0 | gravitational |

4.2.4 อนุภาคพื้นฐานที่เสถียรและไม่เสถียรในอันตรกิริยาต่าง ๆ

อนุภาคพื้นฐานอิสระมีความแตกต่างกันแน่ ๆ อยู่ 3 อย่างคือ ประจุ, มวลและอายุเฉลี่ย แต่ละตัวอาจมีประจุ $+e, -e, 0$ มีมวลจาก 0 ถึง 4,000 เท่าของมวลอิเล็กตรอน อายุเฉลี่ยอาจตั้งแต่ 10^{-23} วินาทีถึงอนันต์ ถ้าเราจะพิจารณาเป็นกลุ่มตามปฏิกิริยาที่มันสลายตัวจะได้อันนี้

4.2.4.1 อนุภาคที่เสถียร (stable particles) มีอนุภาค 9 ตัว ที่ไม่สลายตัว

(not decay) ในอันตรกิริยาใด ๆ คือ โปรตอน, แอนติโปรตอน (ในตระกูล baryons), อิเล็กตรอน, แอนติอิเล็กตรอน, นิวทริโนทั้ง 4 ตัว (ในตระกูล leptons) และโฟตอนซึ่งเป็นอนุภาคสนามตัวเก็บที่มีเสถียรภาพ (เราไม่รวม graviton และอนุภาค W เพราะทดลองยังไม่เจอ) ส่วนตัวอื่น ๆ นอกเหนือนี้จะไม่เสถียรโดยจะสลายตัวผ่านอันตรกิริยาฐานแรง, อ่อนหรือแม่เหล็กไฟฟ้า

4.2.4.2 อนุภาคที่ไม่เสถียรในอันตรกิริยาแบบอ่อน ส่วนใหญ่ของอนุภาคพื้นฐาน

สลายตัวในอันตรกิริยาแบบอ่อน เราจะเรียงตามลำดับมวลดังนี้

ก. มิวออน (muons)

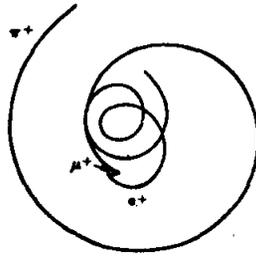
ข. ไพออนมีประจุ (charge pion)

ค. เคออน (kaons) ประจุและไม่มีประจุ

ง. นิวตรอนและแอนตินิวตรอน และไฮเปอรอน (hyperons)

ประจุและไม่มีประจุ

ก. มิวออน มิวออนเกิดจากการสลายตัวของอนุภาคสนามเมซอน จากอันตรกิริยาทางนิวเคลียร์ กลุ่มที่ 4-7 ส่วนนิวทริโนที่เกิดกามาในปฏิกิริยาที่ π^+ และ μ^+ สลายตัวสังเกตไม่พบเพราะไม่ทำให้เกิดร่องรอย (no tracks) คุณสมบัติของมิวออนอยู่ในตารางที่ 4-6



รูปที่ 4-7 รูปถ่ายจาก liquid - hydrogen bubble - chamber แสดง π^+ กำลังสลายตัวให้ μ^+ ซึ่งต่อมาสลายตัวให้ e^+

ตารางที่ 4-6

คุณสมบัติของมิวออน

| | μ^+ | μ^- |
|---------------------------|---|---|
| มวลเมื่ออยู่นิ่ง, m_0 | 206.78 | 206.78 |
| พลังงานเมื่ออยู่นิ่ง, MeV | 105.7 | 105.7 |
| ประจุ | +e | -e |
| Spin, \hbar | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ |
| โมเมนต์แม่เหล็ก | $1.0026 (m_0/m_\mu) \mu_B$ | $-1.0026 (m_0/m_\mu) \mu_B$ |
| อายุเฉลี่ย, วินาที | 2.20×10^{-6} | 2.20×10^{-6} |
| Decay mode | $\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ | $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ |

เป็นที่น่าสังเกตว่า นิวออน - อนุิวออนคู่ที่มีลักษณะคล้ายกับคู่ของ

อิเล็กตรอนและโพซิตรอน เพราะนิวออนมีประจุเหมือนกับอิเล็กตรอนและทำอันตรกิริยากับสสารโดยมีแรงแม่เหล็กไฟฟ้าและไม่เกิดอันตรกิริยาดิวเคิลยร์ แต่ต่างกับอิเล็กตรอนตรงที่ไม่เล็ดยร์ในอันตรกิริยาแบบอ่อนโดยสลายตัวให้อิเล็กตรอนหรือโพซิตรอนและนิวตริโน 2 ตัว อายุเฉลี่ยของมัน (2.2×10^{-6} วินาที) มีค่ามากเมื่อเทียบกับอันตรกิริยาทางนิวเคลียร์ ($\approx 10^{-23}$ วินาที) หรือแม่เหล็กไฟฟ้า ($\approx 10^{-21}$ วินาที) จากการทดลองพบว่านอกจากมันจะสลายตัวแล้วมันประพฤติตัวเหมือนอิเล็กตรอนหนัก

ข. ไพออนมีประจุ คุณสมบัติของมันดูตารางที่ 4-3 ทั้งคู่มีอายุเฉลี่ยเท่ากัน สลายตัวผ่านอันตรกิริยาแบบอ่อน ซึ่งส่วนใหญ่สลายตัวเป็นนิวออนกับนิวตริโน และบ่อยครั้งที่สลายตัวเป็นอิเล็กตรอนกับนิวตริโน จะสังเกตเห็นในตารางที่ 4-3 ว่าไพออนไม่มีประจุจะสลายตัวในเวลาที่เป็นลักษณะของอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นจึงไม่ถือเป็นการสลายตัวในอันตรกิริยาแบบอ่อน

ค. คาออนที่มีประจุและไม่มีประจุ (K - mesons) สังเกตพบหลังจากการพบไพออนเล็กน้อยในปี ค.ศ. 1947 มีคุณสมบัติหลายอย่างคล้ายไพออน และอยู่ในตระกูลเดียวกัน (ตระกูลเมซอน) มีคาออนที่ต่างกัน 4 ตัว แต่ละตัวมีสปีนเป็นคู่กัน มันสลายตัวให้ไพออนหรือเลปตอน โดยอันตรกิริยาแบบอ่อน ตารางที่ 4-7 จะเห็นว่ากาการสลายตัวของคาออนมีได้มากมายกว่าการสลายตัวของไพออนมาก ทั้งนี้เนื่องจากมันมีโอกาสสลายตัวเป็นได้ทั้งไพออนและเลปตอน

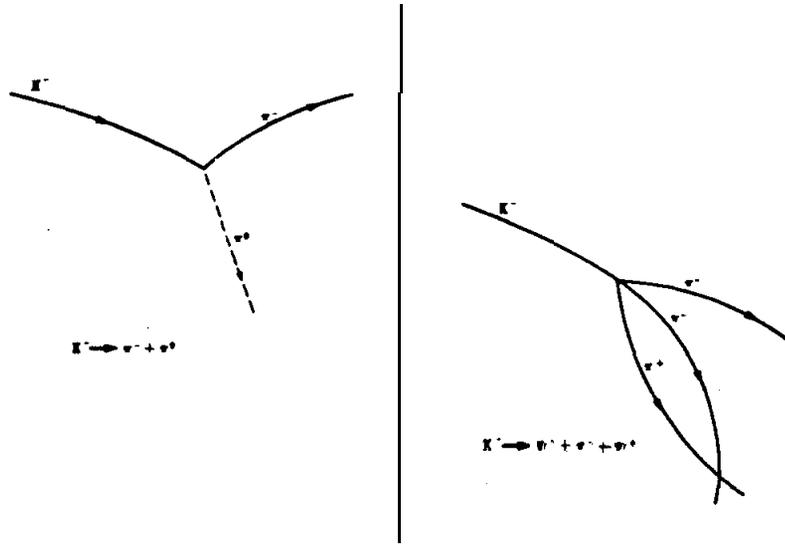
ตารางที่ 4-7

คุณสมบัติของ K - mesons

| SYMBOL* | REST MASS, m. | REST ENERGY, MEV | MEAN LIFE, SEC | MODE OF DECAY | PROBABILITY OF DECAY, % |
|----------------------------------|---------------|------------------|-------------------------|---|-------------------------|
| K ⁺ (K ⁻) | 966.4 | 433.33 | 1.23×10^{-8} | K ⁺ → π ⁺ + π ⁰ | 25 |
| | | | | K ⁺ → π ⁺ + π ⁻ + π ⁺ | 6 |
| | | | | K ⁺ → π ⁺ + π ⁰ + π ⁰ | 2 |
| | | | | K ⁺ → μ ⁺ + ν | 58 |
| | | | | K ⁺ → μ ⁺ + π ⁰ + ν | 6 |
| | | | | K ⁺ → e ⁺ + π ⁰ + ν | 4 |
| K ⁰ (\bar{K}^0) | 374.1 | 437.3 | 0.374×10^{-10} | K ⁰ → π ⁺ + π ⁻ | 88 |
| | | | | K ⁰ → π ⁰ + π ⁰ | 12 |
| | | | 6.3×10^{-7} | K ⁰ → μ ⁺ + π ⁻ + ν | |
| | | | | K ⁰ → μ ⁻ + π ⁺ + ν | |
| | | | | K ⁰ → e ⁺ + π ⁻ + ν | |
| | | | | K ⁰ → e ⁻ + π ⁺ + ν | |
| | | | | K ⁰ → π ⁰ + π ⁰ + π ⁰ | |
| | | | | K ⁰ → π ⁺ + π ⁻ + π ⁰ | |

* The antikaons, K⁻ and \bar{K}^0 , are in parentheses. Their decay modes are similar to the kaons; merely replace all particles with antiparticles.

อย่างไรก็ตามการอธิบายการสลายตัวของเหล่านี้ก็เป็นปัญหาอย่างหนึ่ง ตัวอย่างคือ คาออนตัวหนึ่งบางทีก็สลายตัวให้โพซอน 2 ตัว บางทีก็ให้ 3 ตัว ซึ่งทำให้นักวิชาการอนุรักษ์พาริตี (parity) มาใช้ไม่ได้ ดูรูปที่ 4-8 ซึ่งทำให้เกิดการสลายตัวดังกล่าว



รูปที่ 4-8 การสลายตัวของ K^- - mesons ซึ่งได้มาจากรูปถ่ายใน bubble - chambers

นักศึกษาคงจำได้ว่า พาริตี ได้ว่าหมายถึงการแสดงความสมมูลของการทดลองทางฟิสิกส์เหมือนกับการสะท้อนของกระจกเงา การอนุรักษ์ของพาริตีคล้ายว่าเมื่อทำการทดลองแล้วภาพที่เห็นในกระจกเงา เราไม่สามารถแยกความเป็นซ้ายหรือขวาเสียได้ ในวิชาคว้นตัมแมคานิกส์ พาริตีของอนุภาคใด ๆ นิยามในรูปของฟังก์ชันคลื่น (wave function) $\psi(\vec{r})$ เพื่ออธิบายอนุภาคนั้น ๆ การสะท้อนของตำแหน่งที่อยู่จากจุดเริ่มต้นจะเปลี่ยน \vec{r} เป็น $-\vec{r}$ (เช่น จาก $x \rightarrow -x$, $y \rightarrow -y$ และ $z \rightarrow -z$) ก็จะเหมือนกับการเปลี่ยนภาพขวาเสียไปเป็นภาพซ้ายมือ ถ้าความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (the probability density), $\psi^2(\vec{r})$ ของอนุภาคนั้นมีค่าเหมือนกันไม่ว่าจะใช้ระบบขวามือหรือซ้ายมือ เราจะได้ $\psi(-\vec{r})$ ก็จะเป็นไปได้ 2 อย่าง คือ

$$\psi(-\vec{r}) = \psi(\vec{r}) \quad (\text{even parity})$$

$$\psi(-\vec{r}) = -\psi(\vec{r}) \quad (\text{odd parity})$$

โดยที่พาริตี (even parity) ก็คือ ฟังก์ชันคู่ (even function) และพาริตี (odd parity) ก็คือฟังก์ชันคี่ (odd function) โดยทั่วไปพบว่าอันตรกิริยาใด ๆ พาริตีของระบบจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง หมายถึงว่าถ้าก่อนอันตรกิริยาเป็นคู่ (even) มันจะเป็นคู่หลังอันตรกิริยาด้วย แต่กรณีของ K^- กรณีที่สลายตัวให้ไพออน 2 ตัว เราให้เป็นพาริตีอินทรินสิคคู่ (even intrinsic parity) และ K^- กรณีสลายตัวให้ไพออน 3 ตัว เป็นพาริตีอินทรินสิคคี่ (odd intrinsic parity) ดังนั้นเพื่อให้กฎการอนุรักษ์พาริตีในอันตรกิริยาแบบอ่อนเป็นจริงต้องสมมติว่ามี K^- ที่ต่างกันอยู่ 2 ตัว แต่จากการศึกษาอย่างจริงจังพบว่า K^- มีตัวเดียว และเหมือนกัน

เพื่อแก้ปัญหานี้ ยัง (C.N. Yang) และ ลี (T.D. Lee) ได้ตั้งสมมุติฐานขึ้นในปี ค.ศ. 1956 ว่า พาริตีของ K^- จะไม่อนุรักษ์ในอันตรกิริยาแบบอ่อน ๆ ซึ่งได้รับการยืนยันให้เห็นจริงจากการทดลองหลายอย่าง แต่จะอนุรักษ์ในบางอันตรกิริยา แต่ไม่ใช่แบบอ่อนนี้ จากการที่การอนุรักษ์ของพาริตีไม่เป็นจริงในกรณีนี้หมายถึงว่ามีรูปปรากฏในกระแสแก๊วแล้วย้ายและขวาลจะไม่เหมือนกัน

ข้อแตกต่างอีกสองอย่างที่คาออน (kaons) ต่างไปจากไพออนก็คือ อย่างแรก คาออนไม่มีประจุ จะไม่เหมือนกัน คือ จะมี K^0 และ \bar{K}^0 ส่วนปฏิอนุภาคของ π^0 ก็คือตัวของมันเอง อย่างที่สองคือ คาออนไม่มีประจุ จะไม่สลายตัวในอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า แต่จะสลายตัวในอันตรกิริยาแบบอ่อนมาก ส่วนไพออนไม่มีประจุสลายตัวผ่านอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า

แต่ยังมีส่วนที่คล้ายคลึงกันอยู่คือ คาออนจะเกิดจากนิวคลีออน 2 ตัว ทำอันตรกิริยากันอย่างรุนแรง แต่ต้องทำอันตรกิริยากันในระยะสั้นมาก คาออนและไพออนต่างก็เป็นอนุภาคลำนามในอันตรกิริยานิวเคลียร์ที่รุนแรงเหมือนกัน แต่คาออนมีมวลมากกว่าไพออนประมาณ 3 เท่า ดังนั้นภายในระยะสั้น ๆ ดังกล่าวจึงทำให้นิวคลีออนแลกเปลี่ยนเวอชวลคาออน (virtual kaons) ในระยะอันสั้นมากกว่าแลกเปลี่ยนเวอชวลไพออน (virtual pions) คาออนมีโอกาสที่จะเป็นอนุภาคที่แลกเปลี่ยน (the exchange particle) ของนิวคลีออนในระยะสั้นมาก ๆ ส่วนไพออนจะเป็นในระยะปานกลาง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่พบว่าเมื่อเพิ่มพลังงานของโปรตอน

จากเครื่องเร่งอนุภาคที่เข้าชนเป้าให้มาก อัตราส่วนของการเกิดคาออนต่อโพออนจากโปรตอนมีค่าเพิ่มขึ้น

ง. นิวตรอน, ปฏินิวตรอน, ไฮเปอร์อน (hyperons) ที่มีประจุและไม่มีประจุ อนุภาคในตระกูลบายอนนอกจากโปรตอนแล้วอยู่ในกลุ่มนี้หมด ก็มี นิวตรอน, ปฏินิวตรอน และอนุภาคอีก 4 กลุ่ม คือ แลมบ์ดา (lambda) ซิกมา (sigma) ไช (xi) และโอเมก้า (omega) ซึ่งเรียกรวมชื่อเดียวกัน ไฮเปอร์อนมีมวลมากกว่านิวตรอน อนุภาคเหล่านี้ (นอกจากซิกมาไม่มีประจุ หรือ the neutral sigma particles) สลายตัวโดยอันตรกิริยาแบบอ่อน ดูตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4 - 8

The Hyperons

| | PARTICLE* AND ANTIPARTICLE | REST MASS, m_0 | REST ENERGY, MeV | MEAN LIFE, SEC | PRINCIPAL MODE OF DECAY |
|--------|----------------------------------|---------------------|---------------------|------------------------|---|
| Lambda | $\Lambda^0, \bar{\Lambda}^0$ | 2,183 | 1,115.5 | 2.52×10^{-10} | $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-, \text{ or } n + \pi^0$ |
| Sigma | $\Sigma^+, \bar{\Sigma}^-$ | 2,334 | 1,192.2 | $< 10^{-10}$ | $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$ |
| | $\Sigma^-, \bar{\Sigma}^+$ | 2,327 | 1,189.5 | 0.81×10^{-10} | $\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0 \text{ or } n + \pi^+$ |
| | $\Sigma^-, \bar{\Sigma}^+$ | 2,343 | 1,197.4 | 1.7×10^{-10} | $Z \rightarrow \pi^+ + \pi^+$ |
| Xi | $\Xi^-, \bar{\Xi}^+$ | 2,586 | 1,321 | 1.7×10^{-10} | $\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$ |
| | $\Xi^0, \bar{\Xi}^0$ | 2,673 | 1,315 | 2.9×10^{-10} | $\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$ |
| Omega | $\Omega^-, \bar{\Omega}^+$ | 3,272 | 1,672 | 1.1×10^{-10} | $\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + \pi^-, \text{ or } \Xi^- + \pi^0$ |

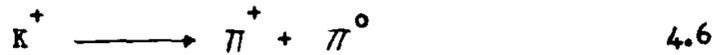
* Note that each particle has a distinct antiparticle. For example, the antiparticle of Σ^- is $\bar{\Sigma}^+$, which is distinct from Σ^+ .

4.2.4.3 อนุภาคที่ไม่เสถียรในอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า

อนุภาคพื้นฐาน 3 ตัวที่ไม่มีประจุไฟฟ้า คือ π^0, Σ^0 (sigma-zero)

และ $\bar{\Sigma}^0$ (anti - sigma - zero) จะไม่เสถียรในอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า อายุของอนุภาคเหล่านี้จะสั้นกว่า (มาก) อนุภาคที่ละลายตัวจากอันตรกิริยาแบบอ่อน (จากตาราง 4-3) จะมีอายุ $\approx 10^{-16}$ วินาที และสลายตัวโฟตอน 2 ตัวหรือโฟตอน 1 ตัวกับอิเล็กตรอนและโพสิตรอนอย่างละตัว Σ^0 (จากตารางที่ 4-8) จะมีอายุ $< 10^{-14}$ วินาที แล้วสลายตัวโฟตอน $\lambda - zero$ และโฟตอน ส่วน $\bar{\Sigma}^0$ มีอายุเท่ากับอนุภาคของมันแล้วสลายตัวโฟตอน anti - $\lambda - zero$ และโฟตอน

อาจมีคนสงสัยว่าอนุภาคที่กล่าวจะมีอยู่ได้อย่างไรเมื่อมันไม่สามารถเคลื่อนที่ไปในระยะที่พอจะวัดได้ในระยะเวลาอันสั้น ๆ เพื่อให้เข้าใจเราลองมาพิจารณาอนุภาคที่มีมีอายุนานกว่าและเคลื่อนที่ไปได้ระยะทางมากกว่า (ในอันตรกิริยาแบบอ่อน) ๑ คือ



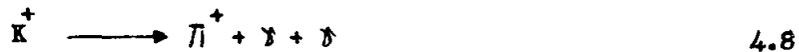
π^0 จะสลายตัวอย่างรวดเร็ว ($<< 10^{-16}$ วินาที) เป็นโฟตอน 2 ตัว

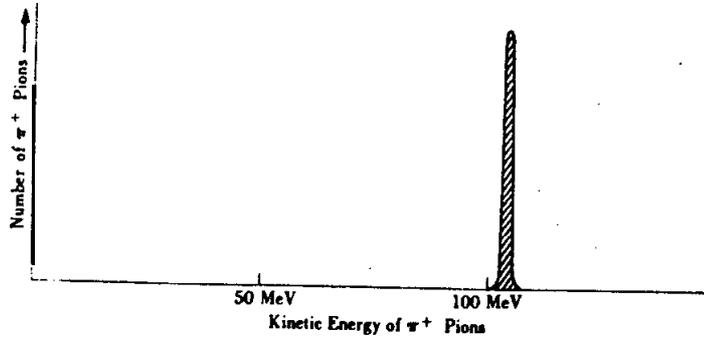


เพื่อใฝ่หายเราพิจารณาการสลายตัวของ K^+ เมื่อเริ่มต้นอยู่ ณ ระยะทาง x ที่ π^0 เคลื่อนที่ไปประมาณได้ถ้าเราสมมุติว่ามันเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็ว $\cdot 10$ เราจะได้

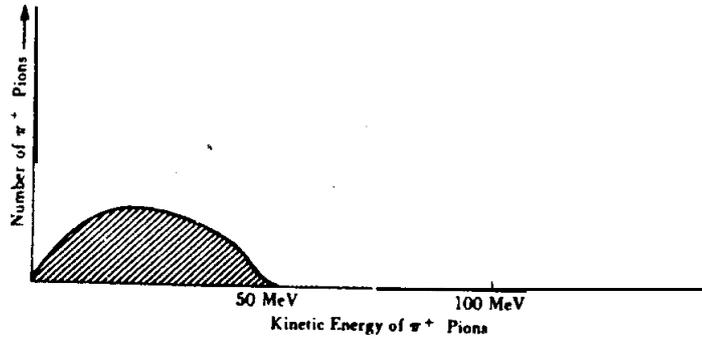
$$\begin{aligned} x &= ct = (3 \times 10^7 \text{ m/sec}) (10^{-16} \text{ sec}) \\ &= 3 \times 10^{-9} \text{ m} = 30 \text{ \AA} \end{aligned}$$

ซึ่งระยะสั้น ๆ ขนาดนี้จะสังเกตเห็นได้ในรูปถ่ายของ bubble chamber และจะปรากฏคล้ายว่าการสลายตัวของ K^+ จะเป็น π^+ กับโฟตอน 2 ตัวโดยคร่าว





(a)



(b)

รูปที่ 4-9 การกระจายพลังงานจลน์ของ π^+ - mesons ในการสลายตัวของ K^+ - mesons (a) เกิดขึ้น 2 ชั้น คือ $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ แล้ว $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ (b) เกิดขึ้นเดี่ยวโดยตรงจาก $K^+ \rightarrow \pi^+ + \gamma + \gamma$

จึงมีการทดลองอย่างอื่นที่จะมุ่งให้เห็นว่าเป็นการสลายตัวเป็น 2 ชิ้น ตามสมการ 4.6, 4.7 ไม่ใช่
 ชิ้นเดียวแบบ 4.8 โคมพิจารณาว่าในการสลายตัวตามสมการ 4.6 จะทำให้เกิดอนุภาคพลังงาน
 และโมเมนตัมเมื่อ π^+ ที่เกิดมีพลังงานค่าหนึ่ง (fixed energy) และ π^0 ที่เกิดก็มีพลังงาน
 ค่าหนึ่งเหมือนกัน ดังนั้นถ้า K^+ สลายตัว 2 ชิ้น (สมการ 4.6, 4.7) แล้ว การกระจายของพลังงาน
 ของอนุภาค π^+ ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเหมือนรูปที่ 4-9a ในทางตรงข้ามถ้าการสลายตัวของ K^+
 มีชิ้นเดียวให้ 3 อนุภาค คือ π^+ และโพตอน 2 ตัว ตามสมการ 4.8 จะทำให้ π^+ สามารถที่จะมีการ
 กระจายของพลังงานของมัน, โมเมนตัม ใต้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งยังคงทำให้พลังงานมีค่าอนุภาคได้ (ให้คิด
 ถึงเรื่อง alpha decay) ถ้านิวเคลียสสลายตัวให้อนุภาค 2 ตัว อนุภาคแต่ละตัวจะมีพลังงานเป็น
 monoenergetic แต่ถาสลายตัวให้อนุภาค 3 ตัว อนุภาคแต่ละตัวจะมีพลังงานเป็นค่า continuous)
 จึงทำได้ ดังรูปที่ 4-9 b จากการทดลองปรากฏว่าได้รูปลักษณะคล้ายรูปที่ 4-9 a ดังนั้นจึงมี
 จะมีชีวิตอยู่ไม่นานพอที่จะเคลื่อนที่ไปให้เห็นแก่ทิศทางที่จะทำให้ เราแยกให้เห็นได้จากภาพของกล้อง
 อนุภาค Σ^0 และ Σ^{\pm} ก็อธิบายในลักษณะเดียวกัน

4.2.4.4 อนุภาคที่ไม่เสถียรในอันตรกิริยารุนแรง

ส่วนใหญ่ของอนุภาคพื้นฐานที่กล่าวมาแล้วจะสลายตัวโดยอันตรกิริยาแบบอ่อน
 โดยมีช่วงชีวิตยาวกว่า เวลาในอันตรกิริยาฉับพลัน (อันตรกิริยาฉับพลันใช้ $\approx 10^{-23}$ วินาที)
 ส่วนการสลายตัวโดยอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้ามีช่วงอายุประมาณ 10^{-16} วินาที ซึ่งจะเป็นครึ่งจาก
 การพิจารณาจากการแจกแจงพลังงานของอนุภาคที่เกิดขึ้น (the product particles)

อนุภาคหลายตัวมีช่วงอายุสั้นกว่า 10^{-16} วินาที ซึ่งค้นพบเมื่อไม่กี่ปีมานี้เอง
 ช่วงอายุก็ขนาดเทียบได้กับอันตรกิริยาฉับพลัน คือ $\approx 10^{-23}$ วินาที อายุไม่ยาวพอที่จะทำให้เกิด
 ร่องรอยที่วัดได้ ดังนั้นจะเป็นจริงหรือไม่พิจารณาได้จากการทดลองสังเกตการแจกแจงพลังงานของ
 อนุภาคที่เกิดขึ้นที่สังเกตได้ก่อนการสลายตัว ซึ่งเมื่อทำการทดลองพบว่าได้กราฟดังรูปที่ 4-7 a
 โดยได้กราฟที่มียอดแหลม หรือเรโซแนนซ์ (sharp peak or resonance) อนุภาคที่เกี่ยวข้องกับ
 อนุภาคที่ให้กราฟดังกล่าวนี้เรียกว่า อนุภาคเรโซแนนซ์ (resonance particles) ได้มีการ
 รวบรวมอนุภาคเรโซแนนซ์จำนวนมากไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 ก่อนอื่นเรามาศึกษาว่ามันมีอยู่จริง
 ได้อย่างไร?

พิจารณาการสลายตัวของอนุภาคตัวหนึ่งซึ่งในที่สุดให้อนุภาคตัวอื่นตาม 3 ทิศ กล้วย ๆ การสลายตัวของ K^+ (ตามแผนการ 4.6, 4.7 และ 4.8) ให้อนุภาคตัวนั้นสลายตัวเป็นอนุภาคทั้งสามโดยตรง การกระจายของพลังงานของอนุภาคตัวใดตัวหนึ่งจากอนุภาคที่เกิดขึ้นมาจะมีค่าค่อนข้างและกว้าง (broad) ดังรูปที่ 4-9 b ในทางตรงข้ามถ้าอนุภาคตัวแรกในขั้นแรกสลายตัวเป็นอนุภาคสองตัวแล้วอนุภาคตัวหนึ่งสลายให้อนุภาคตัวอื่นอีก 2 ตัว การกระจายพลังงานของอนุภาคที่ไม่สลายตัวจะมีการแคบ (sharp) ดังกราฟในรูป 4-9 a พิจารณาหลักแห่งความไม่แน่นอน, $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$ แล้ว ΔE ที่ได้จะไม่เป็น infinitely sharp แต่ ΔE จะแผ่ขยายไปบ้าง เราพิจารณาการกระจายของพลังงานจลน์ของ π^+ (ใน K^+ decay) เมื่ออายุของ $\pi^0 \approx 10^{-16}$ วินาที ดังนี้

$$\begin{aligned}\Delta E &= \frac{\hbar}{\Delta t} = (10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec}) / (10^{-16} \text{ sec}) \\ &= 10^{-18} \text{ J} = 6 \text{ eV}\end{aligned}$$

เมื่อพลังงานของ π^+ มีค่าประมาณ 100 MeV ดังนี้

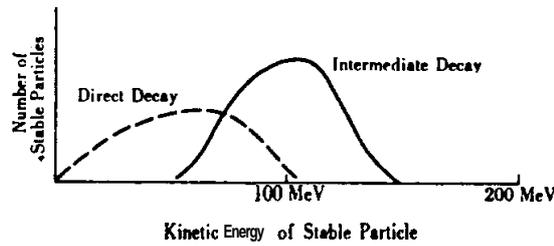
$$\begin{aligned}\frac{\Delta E}{E} &= (6 \times 10^{-6} \text{ MeV}) / (10^2 \text{ MeV}) \\ &= 6 \times 10^{-8}\end{aligned}$$

ดังนั้นเส้นที่ได้จึงค่อนข้าง sharp (เพราะ ΔE น้อย จึงทำให้ E แน่นยิ่งขึ้น) จะเห็นได้ว่าถ้าช่วงเวลาของอนุภาคตัวกลาง (π^0) ยิ่งสั้น ยิ่งทำให้พลังงานจลน์ยิ่งกว้าง (เพราะ ΔE ยิ่งมาก ทำให้ E ยิ่ง broad) พบในที่สุดถ้ากว้างมากเกินไปจนทำให้เส้นโค้งในรูปที่ 4-9 a เปลี่ยนเป็นรูป 4-9 b ก็จะเป็นการสลายตัวโดยตรงหรือเป็นร่องจึกกว่าอนุภาคตัวกลาง (π^0) ไม่มีจริง

สำหรับช่วงเวลา 10^{-23} วินาที จะทำให้พลังงานของอนุภาคตัวกลางแผ่กว้างเป็น

$$\begin{aligned}\Delta E &= (10^{-34} \text{ J} \cdot \text{mea}) / (10^{-23} \text{ sec}) \\ &= 10^{-11} \text{ J} = 60 \text{ MeV}\end{aligned}$$

ถ้าอนุภาคที่เกิดออกมาที่มีพลังงานจลน์เฉลี่ย 100 MeV เช่นโค้งการกระจายพลังงานของการสลายตัว โดยตรงโดยตรงและการสลายตัวโดยมีตัวกลางจะมีลักษณะ ดังรูปที่ 4-10 เช่นโค้งเรโซแนนซ์กว้างขึ้น แต่ก็ยังพอเห็นความแตกต่างจากการสลายตัวเป็นอนุภาค 3 ตัวโดยตรงได้ จึงพิจารณาความกว้างของมัน นี้จากสมมุติฐานว่ามีอนุภาคตัวกลางดังกล่าวในช่วงเวลาอันสั้นมาก



รูปที่ 4-10 การกระจายพลังงานจลน์ของการสลายตัวเป็นอนุภาค 3 ตัว โดยตรง (Direct decay) และการสลายตัวเป็น 2 ชั้น (two - step decay) การมีอายุเฉลี่ยของ the intermediate resonance particle มีค่าประมาณ 10^{-23} วินาที ซึ่งจะเป็นผลให้ resonance curve แคบกว่าขึ้น แต่ก็พอแยกออกจากการสลายตัวโดยตรงได้

สำหรับคุณสมบัติของ resonance particles ในตระกูลเมซอน (ซึ่งค่าโมเมนตัมเชิงมุมเป็นเลขจำนวนเต็มเท่าของ \hbar) จากการวงที่ 4-9 ส่วนตระกูล baryons (ซึ่งค่าโมเมนตัมเชิงมุมเป็น half - integral ของ \hbar) จากการวงที่ 4-10 มีทฤษฎีต่าง ๆ ที่เสนอขึ้นมาเพื่อจำแนกและอธิบาย resonance particles แต่ยังไม่มิตฤษฎีใดได้ผลสำเร็จที่สมบูรณ์ ปัญหาที่เป็นอยู่จนถึงปัจจุบันนี้ก็ ห่าอย่างไรจึงจะจัด resonance particles ลงไปร่วมกับอนุภาคพื้นฐานอื่น ๆ ได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 4 - 9

Properties of Meson Resonances

| Symbol and Charge | Isospin Strangeness | Spin Parity | Mass (MeV) | Full Width (MeV) | Main Decay Modes | Branching Ratios (%) |
|-------------------|---------------------|----------------|--------------|------------------|------------------------------------|----------------------|
| η^0 | 0, 0 | 0 ⁻ | 548.9 ± 0.5 | ~ 10 | $\pi^+ \pi^- \pi^0$ | 25.0 ± 1.6 |
| | | | | | $3\pi^0 \rightarrow \pi^0 2\gamma$ | 30.8 ± 2.3 |
| | | | | | $\pi^+ \pi^- \gamma$ | 5.5 ± 1.? |
| κ^0 | ½, 1 | 0 ⁺ | 725 ± 2 | ≤ 12 | 2γ | 38.6 ± 2.7 |
| | | | | | Kπ | 100 |
| ρ^\pm | | | | | 2π | 100 |
| ρ^0 | 1, 0 | 1 ⁻ | 765 ± 3 | 124 ± 4 | 4π | < 5 |
| | | | | | πγ | < 2 |
| ω^0 | 0, 0 | 1 ⁻ | 782.8 ± 0.5 | 12.0 ± 1.7 | $e^+ e^-$ | 65 ± 10 ¹ |
| | | | | | $\pi^+ \pi^- \pi^0$ | 88 |
| K^* | ½, 1 | 1 ⁻ | 891.4 ± 0.8 | 49 ± 2 | $\pi^+ \pi^- \gamma$ | 3.2 |
| | | | | | Neutrals ($\pi^0 \gamma$) | 12 ± 2 |
| | | | | | $\mu^+ \mu^-$ | -0.10 |
| | | | | | $e^+ e^-$ | -0.01 |
| | | | | | Kπ | 100 |
| K^{*0} | | | | | Kππ | < 0.2 |
| K^{*0} | | | | | κπ | < 0.2 |
| X^0 | 0, 0 | 0 ⁻ | 958.6 ± 1.6 | 14 | η2π | 76 ± 4 |
| | | | | | $\pi^+ \pi^- \gamma$ | 24 ± 4 |
| 4^+ | 0, 0 | 1 ⁻ | 1019.5 ± 0.3 | 3.3 ± 0.6 | $K_1^0 K_2^0$ | 38 ± 3 |
| | | | | | $K^+ K^-$ | 30 ± 3 |
| | | | | | πρ → 3π | 32 ± 8 |
| | | | | | ρπ | 100 |
| $A_1^{\pm, 0}$ | 1, 0 | 1 ⁺ | 1072 ± 8 | 125 | K \bar{K} | < 5 |
| | | | | | ωπ | -100 |
| $B^{\pm, 0}$ | 1, 0 | ≥ 1s | 1220 | 125 ± 17 | ππ | 30 |
| | | | | | K \bar{K} | 10 |
| | | | | | 4π | 50 |
| | | | | | ππ | ~ 100 |
| f | 0, 0 | 2 ⁺ | 1253 ± 20 | 118 ± 16 | 4π | 4 |
| | | | | | K \bar{K} | 4 |
| D | 0, 0 | ? | 1286 ± 6 | 40 ± 10 | K $\bar{K}\pi$ | 100 |
| $A_2^{\pm, 0}$ | 1, 0 | 2 ⁺ | 1324 ± 9 | 90 ± 10 | ρπ | 91 |
| | | | | | K \bar{K} | 5.5 1.5 |
| | | | | | ηπ | 3.6 3.0 |
| K^* | ½, 1 | 2 ⁺ | 1405 ± 8 | 95 ± 11 | Kπ | |
| f' | 0, 0 | 2 ⁺ | 1500 | 80 | $K_1 K_1$ | |
| | | | | | KK*(890) | |

ตารางที่ 4 - 10

Properties of Baryon Resonances

| Symbol | Isospin strange- ness | Spin Parity | Mass (MeV) | Full Width (MeV) | Main Decay Modes | Branching Ratios (%) |
|-------------|-----------------------------|--------------------|------------------|---------------------|------------------------|----------------------------|
| $N_{3/2}^*$ | $\frac{3}{2}, 0$ | $\frac{3}{2}^+$ | 1236.0 ± 0.4 | 120.0 1.5 | πN | 100 |
| $V_{1/2}^*$ | $\frac{1}{2}, 0$ | $\frac{3}{2}^-$ | 1518 ± 10 | 120 | πN | 75 |
| | | | | | $\pi\pi N$ | |
| | | | | | $\pi N_{3/2}^*$ (1236) | |
| $N_{3/2}^*$ | $\frac{3}{2}, 0$ | | 1560 ± 20 | $2'0 \pm 20$ | $\pi\pi N$ | |
| $N_{1/2}^*$ | $\frac{1}{2}, 0$ | $\frac{3}{2}^+$ | 1688 | 100 | πN | 85 |
| | | | | | $\pi\pi N$ | |
| | | | | | KA | |
| | | | | | ηN | <2 |
| $N_{3/2}^*$ | $\frac{3}{2}, 0$ | $\frac{7}{2}^+$ | 1924 | 170 | πN | <67 |
| | | | | | ΣK | |
| | | | | | $\pi N_{3/2}^*$ (1236) | |
| $N_{1/2}^*$ | $\frac{1}{2}, 0$ | $\frac{5}{2}^-$ | 2190 | ~ 200 | πN | -4.0 |
| | | | | | $K\Lambda$ | |
| $N_{3/2}^*$ | $\frac{3}{2}, 0$ | $\frac{5}{2}^-$ | 2360 | ~ 200 | πN | ~ 15 |
| | | | | | Others | |
| $N_{1/2}^*$ | $\frac{1}{2}, 0$ | $\frac{7}{2}^+$ | 2645 ± 10 | ~ 200 | πN | |
| | | | | | ηN | |
| $N_{3/2}^*$ | $\frac{3}{2}, 0$ | $\frac{9}{2}^+$ | 2825 | 260 | πN | |
| Y_1^* | 1, -1 | $\frac{3}{2}^+$ | 1382.7 ± 0.5 | 44 ± 2 | $\pi\Lambda$ | 90 ± 2 |
| | | | | | $\pi\Sigma$ | 10 ± 2 |
| Y_0^* | 0, -1 | $\frac{1}{2}^-$ | 1405 | 35 ± 5 | $\pi\Sigma$ | ~ 100 |
| | | | | | $\pi\pi\Lambda$ | <1 |
| Y_0^* | 0, -1 | $\frac{3}{2}^-$ | 1518.9 ± 1.5 | 16 ± 2 | $\pi\Sigma$ | 55 ± 7 |
| | | | | | KN | 29 ± 4 |
| | | | | | $\pi\pi\Lambda$ | 16 ± 2 |
| Ξ^* | $\frac{1}{2}, -2$ | $\frac{3}{2}^+$ | 1529.7 ± 0.9 | 7.5-c 1.0 | $\Xi\pi$ | 100 |
| Y_1^* | 1, -1 | $\geq \frac{3}{2}$ | 1660 ± 10 | 44 ± 5 | KN | 15 |
| | | | | | $\pi\Sigma$ | 30 |
| | | | | | $\pi\Lambda$ | 5 |
| | | | | | $\pi\pi\Sigma$ | 30 |
| | | | | | $\pi\pi\Lambda$ | 20 |
| Y_1^* | 1, -1 | $\frac{5}{2}^-$ | 1762 ± 17 | 75 ± 7 | RN | 60 |
| | | | | | $\pi\Lambda$ | 16 |
| | | | | | $\pi\Sigma$ | ≤ 3 |
| | | | | | $\pi Y_1^*(1385)$ | 10 |
| | | | | | $\pi Y_0^*(1520)$ | 10 |
| Y_0^* | 0, 1 | $\frac{1}{2}^+$ | 1815 | 70 | RN | 80 |
| | | | | | $\pi\Sigma$ | <10 |
| | | | | | $\pi\pi\Lambda$ | <15 |
| | | | | | $\eta\Lambda$ | ? |
| Ξ^* | a, -2 | $\frac{3}{2}^-$ | 1816 ± 3 | 16 ± 4 | $\pi\Xi^*$ | 25 |
| | | | | | $K\Lambda$ | 65 |
| | | | | | $\pi\Xi$ | 5 |
| | | | | | $\pi\pi\Xi$ | 5 |
| Ξ^* | $\frac{1}{2}, -2$ | $\frac{5}{2}^+$ | 1933 ± 16 | 140 ± 35 | $\pi\Xi$ | |

4.2.5 A thirty - four - particle universe

แบบจำลองอนุภาคสี่สามตัวของจักรวาล เราได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.2.4 โดยที่สมมุติว่าอนุภาคทั้ง 13 ตัว ดังกล่าวมีเสถียรภาพเมื่อมันเป็นอิสระไม่สลายตัวโดยอันตรกิริยาใด ๆ กฎการอนุรักษ์มวล - พลังงาน, โมเมนตัมเชิงเส้น, โมเมนตัมเชิงมุม, ประจุไฟฟ้า, เลขบารยอน (baryon number) และเลขเลปตอน (lepton number) เป็นจริงในอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้าและแบบรุนแรง แต่จากการทดลองพบว่าแบบจำลองง่าย ๆ แบบนี้ยังไม่ถูกต้องเพียงพอเพราะอนุภาค 4 ตัว ของกลุ่มอนุภาค 13 ตัวนี้ จะสลายตัวโดยอันตรกิริยาแบบอ่อน (มีนิวตรอน, แอนตินิวตรอน, π^+ และ π^-) และมีอีกตัวหนึ่งสลายตัวในอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า (คือ π^0) นอกจากนี้ยังมีอนุภาคพื้นฐานอื่นอีกเป็นจำนวนมาก ซึ่งได้มีการสำรวจพบ ซึ่งสลายตัวในอันตรกิริยาแบบใดแบบหนึ่ง (ไม่รวมอันตรกิริยาจากความโน้มถ่วง) ซึ่งจำเป็นต้องมีแบบจำลองแบบใหม่ขึ้นมาเพื่ออธิบายอนุภาคจำนวนมากมายเหล่านี้ และอันตรกิริยาต่าง ๆ ในหัวข้อ 4.5 มีหลายทฤษฎีที่ได้มีผู้เสนอขึ้นมา แต่ถึงปัจจุบันยังไม่มีแบบจำลองใดอันเดียวที่เหมาะสมที่สุดในการอธิบาย แต่ต่อไปนี่เราจะลองศึกษาแบบจำลองแบบง่าย ๆ แบบหนึ่ง ซึ่งได้รวบรวมอนุภาคพื้นฐานต่าง ๆ ยกเว้นพวกที่มีอายุสั้นมาก ๆ (the resonance particles) ซึ่งได้มีผู้พัฒนาขึ้นมาในปี ค.ศ. 1953 โดย เจลล์ - แมนน์ (M. Gell - Mann) และยังมีคนอื่นที่คิดขึ้นมาเหมือนกันคือ นากาโน (T. Nakanano) กับ นิชิจิมา (N. Nishijima) ที่ทำให้การอธิบายอันตรกิริยาดิวเคิลียร์ต่าง ๆ ค่อนข้างสอดคล้องกับการทดลองได้ดี

ตารางที่ 4-11 เป็นอนุภาคบารยอน (baryons) ซึ่งจะสลายตัวหรือเสถียรในอันตรกิริยาต่าง ๆ ดังที่เคยกล่าวมาแล้ว จัดแสดงมวลและประจุไฟฟ้าบารยอน แต่ละตัวจะมีปฏิบารยอนที่มีมวลและอายุเฉลี่ยเท่ากัน แต่มีประจุตรงกันข้าม เป็นที่น่าสังเกตว่าบารยอนและปฏิบารยอนทุกตัวจะมีประจุที่เป็นหนึ่งหน่วยประจุหรือเป็นศูนย์ อนุภาคพวกนี้จะจัดตัวเป็น 5 พวกที่แตกต่างกันตามมวล โดยมีคู่หนึ่งที่เป็นนิวตรอน, โปรตอน, แลมบ์ดา (λ) ตัวหนึ่ง, ซิกมา (σ) 3 ตัว ไซ (xi) 2 ตัว และโอเมกา (ω) อีก 1 ตัว เมื่อมันทำอันตรกิริยาทางนิวเคลียร์ที่รุนแรง

ภาพที่ 4 - 11

อนุภาครายอน (Baryons)

| Mass, m_0 | ISOTOPIC SPIN | BARYON ELECTRIC CHARGE | | | ANTIBARYON ELECTRIC CHARGE | | | | | | |
|-------------|---------------|------------------------|-------------|----------------|----------------------------|-------------|------------|---|----|----|----|
| | | -e | 0 | +e | -e | 0 | +e | | | | |
| 3,270 | 0 | Ω^- | | | | | Ω^+ | | | | |
| 2,580 | $\frac{1}{2}$ | Σ^- | Σ^0 | | | Σ^+ | Σ^+ | | | | |
| 2,330 | 1 | Σ^- | Σ^0 | Σ^+ | Σ^- | Σ^0 | Σ^+ | | | | |
| 2,180 | 0 | | Λ^0 | | | Λ^0 | | | | | |
| 1,840 | $\frac{1}{2}$ | | n | p ⁺ | p ⁻ | \bar{n} | | | | | |
| | | -3 | -2 | -1 | 0 | | | 0 | +1 | +2 | +3 |
| | | strangeness | | | | strangeness | | | | | |

อนุภาคในแต่ละกลุ่มก็จะอยู่ในสถานะ (states) ต่าง ๆ กัน ตัวอย่างเช่น นิวตรอนและโปรตอน ก็จะเป็น 2 สถานะที่ต่างกันของกลุ่มอนุภาคที่เรียกว่านิวคลีออน ตัวที่จะแจ้งว่าแต่ละกลุ่มมีกี่สถานะ ก็คล้าย ๆ กับในเรื่องอนุภาคตัวหนึ่งมีสถานะย่อยเกิดขึ้นเนื่องจากมีสนามแม่เหล็กผ่านเข้ามา (magnetic substates) จากที่มีค่าเลขควอนตัมโมเมนตัมเชิงมุมทั้งหมด (total angular momentum quantum number) & ค่าหนึ่ง ที่เราจะกล่าวถึงนี่ก็คือ ไอโซโทปิกส์สปินทั้งหมด (total isotopic spin นิยมเรียกย่อ ๆ ว่า isospin) และสถานะต่าง ๆ ที่เกี่ยวพัน ตัวอย่าง คล้าย ๆ กับอนุภาคตัวหนึ่งเกิดมี 2 & + 1 สถานะที่เป็นไปได้ เมื่อมี 1 & 1 ค่า ก็คือ กรณีนิวคลีออนมี 2 สถานะ เป็นโปรตอนและนิวตรอนซึ่งพิจารณาได้จากว่านิวคลีออนมีเลขควอนตัม ไอโซโทปิกส์สปินทั้งหมด (total isotopic spin quantum number) เป็น $\frac{1}{2}$ ดังนั้นเรา อาจกล่าวได้ตามทฤษฎีควอนตัมว่า โปรตอนจะมีองค์ประกอบของไอโซโทปิกส์สปิน (the isotopic spin "component") + $\frac{1}{2}$ และนิวตรอนจะมีองค์ประกอบดังกล่าวเป็น - $\frac{1}{2}$ ในทำนองเดียวกัน อนุภาคในกลุ่มบาริออนจะมีไอโซโทปิกส์สปินทั้งหมดของกลุ่มตัว และแต่ละตัวจะมีหนึ่งองค์ประกอบของไอโซโทปิกส์สปินดังกล่าว ในตารางที่ 4-8 จะแสดงเลขควอนตัมไอโซโทปิกส์สปินทั้งหมดของแต่ละกลุ่ม

ศนี้ก็มาพิจารณาถึงอนุภาคเมซอนซึ่งสลายตัวโดยวัตรกริยาแบบอ่อนหรือแม่เหล็กไฟฟ้าได้
 ๙๓๖ ได้ตามมวล ดังตารางที่ 4-12 กลุ่มโพออนมี 3 อนุภาค ดังนั้นจึงมีไอโซโทปกลั่นทั้งหมดเป็น
 1 คาออนมี 2 อนุภาค (K^+ และ K^0) ดังนั้นจึงมีไอโซโทปกลั่นทั้งหมดเป็น $\frac{1}{2}$ ศูนย์กึ่งกลางของ
 กลุ่มโพออนอยู่ที่เส้นแบ่งอนุภาคออกจากปฏิอนุภาค

เพื่ออธิบายเหตุการณ์ประหลาด (strange events) ซึ่งมีการทดลองพบ (และ
 ไม่พบ) ในการเกิดอนุภาคในกลุ่มไฮเปอร์อน (hyperons) และ K - mesons ในปี
 ค.ศ. 1953 นักวิทยาศาสตร์ชื่อ เพียส (A. Pais) ได้แนะนำเลขควอนตัม (quantum

ตารางที่ 4 - 12

| Mass, m_e | Isotopic spin | MESON ELECTRIC CHARGE | | |
|-------------|---------------|-----------------------|---------|------------------------|
| | | +e | 0 | -e |
| 970 | $\frac{1}{2}$ | K^+ | K^0 | $\overline{K^0}$ K^- |
| 270 | 1 | π^+ | π^0 | π^- |
| | | +1 | 0 | -1 |
| | | strangeness | | |

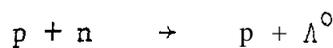
number) ใหม่ขึ้นมา ซึ่งเรียกว่า เลขสเตรนจ์เนสส์ (strangeness number, S.) เขา
 ได้พบว่าในวัตรกริยานิวเคลียร์ใด ๆ ค่าสเตรนจ์เนสส์ทั้งหมดจะมีค่าอนุรักษ์เสมอ อีกหนึ่งปีต่อมา
 เจลลี่ - แมน และ ดิชิลมา ได้แสดงให้เห็นว่าความรู้เกี่ยวกับสเตรนจ์เนสส์มีความสัมพันธ์อย่าง
 ใกล้ชิดกับไอโซโทปกลั่น เราจะพิจารณาวัตรกริยานิวเคลียร์ในรูปของสเตรนจ์เนสส์มากกว่า
 จะพิจารณาในรูปของไอโซโทปกลั่นทั้งนี้เพราะสะดวกและง่ายกว่า

เลขสเตรนจ์เนสส์ตัวหนึ่ง ๆ มีค่ากำหนดไว้ในแต่ละกลุ่มทั้ง 5 ของตระกูลบาร์ยอน และ
 ในแต่ละกลุ่มทั้งสองของตระกูลเมซอนซึ่งพิจารณาจากจำนวนประจุของศูนย์กึ่งกลาง (centre of char

ไปแทนที่ในตำแหน่งอนุภาคนั้น ๆ ประจุของกลุ่มยักกลางของกลุ่มอนุภาคปกติ (normal or nonstrange group) ของแต่ละตระกูล เช่น กลุ่มปกติของตระกูลบาริออนจะเห็นได้ชัดคือโปรตอนกับนิวตรอน จะมีศูนย์กลางประจุอยู่ที่ $+\frac{1}{2}$ พิจารณาอนุภาคในกลุ่มต่อไปในตระกูลบาริออนคือ Λ^0 ซึ่งมีตัวเดียว มีศูนย์กลางประจุเป็นศูนย์ แลम्บ์ดาตัวนี้จะมีประจุไปทางซ้ายเป็นจำนวน $\frac{1}{2}$ หน่วยประจุจากศูนย์กลางประจุของกลุ่มอนุภาคปกติ (โปรตอน - นิวตรอน) ดังนั้นจึงมีเลขสี่แตรังสีเนลล์ (S_Λ) = 2 X (ประจุ ที่แทนที่จากศูนย์กลางประจุของกลุ่มธรรมดา) = 2(- $\frac{1}{2}$) = - 1 ตัวเลข 2 นั้นเอามาคูณเพื่อจะทำให้เลขสี่แตรังสีเนลล์มีค่าเป็นเลขจำนวนเต็ม ส่วนอนุภาคอีกมา 3 ตัว มีศูนย์กลางประจุอยู่ที่เดียวกับอนุภาคแลम्บ์ดาที่ไม่มีประจุ คืออยู่ที่ 0 ดังนั้นจึงมีเลขสี่แตรังสีเนลล์ (S_Σ) = - 1 ส่วนไฮ (xi) ทั้ง 2 ตัว มีศูนย์กลางประจุอยู่ที่ - $\frac{1}{2}$ จึงมีเลขสี่แตรังสีเนลล์ (S_Ξ) = 2(- 1) = - 2 ตัวสุดท้าย คือโอเมก้า มีศูนย์กลางประจุอยู่ที่ - 1 จึงมีค่า S_Ω = 2(- $\frac{3}{2}$) = - 3 จะเห็นว่าเลขสี่แตรังสีเนลล์ของอนุภาคทุกกลุ่มบาริออนมีค่าเป็น 0 หรือ ลบ ส่วนของอนุภาคทุกกลุ่มปฏิบาริออนจะมีค่าเป็นศูนย์หรือบวก

เรามาพิจารณากลุ่มเมซอนทั้ง 2 โฟออน หรือกลุ่มอนุภาคปกติมีศูนย์กลางประจุอยู่ที่ศูนย์ เราให้เลขสี่แตรังสีเนลล์เป็นศูนย์คาออน (kaons) มีศูนย์กลางประจุอยู่ที่ $+\frac{1}{2}$ จึงมีค่า $S_K = 2(+ \frac{1}{2}) = 1$ ส่วนปฏิคาออนมีศูนย์กลางประจุอยู่ที่ - $\frac{1}{2}$ จึงมี $S_{\bar{K}} = 2(- \frac{1}{2}) = - 1$

จากการพิจารณากฎการอนุรักษ์สี่แตรังสีเนลล์ในอันตรกิริยารุนแรง ทำให้เราสามารถศึกษาผลที่ได้จากการทดลอง ดังตัวอย่างดังนี้ กรณีผลผลิตที่ได้ตามมา (associated production) เมื่อเครื่องเร่งอนุภาคผลิตอนุภาคที่มีพลังงานขนาด GeV จึงทำให้เกิดอันตรกิริยาที่มีอนุภาค ไฮเปอรอน และคาออนจำนวนมากขึ้นได้ แต่บางอันตรกิริยาที่คิดว่าจะเกิด (เพราะการอนุรักษ์ที่ เคยทราบว่ามีค่าอนุรักษ์) กลับไม่พบ ดูตัวอย่างปฏิกิริยา



ซึ่งน่าจะพบเมื่อใช้โปรตอนพลังงานสูงพอ ทั้งนี้เพราะมวล - พลังงาน, โมเมนตัมเชิงเส้น -

เชิงมุม, ประจุ และเลขบาริออน (baryon number) ทั้งหลายต่างมีค่าอนุรักษ์ แต่อันตรกิริยา
นี้ไม่พบ ทั้งนี้เพราะเราลองมาพิจารณาการอนุรักษ์เลขตรงสีเนลล์ดูพบว่า

$$\begin{array}{l} p+n \quad \rightarrow \quad p + \Lambda^0 \\ \text{strangeness : } 0+0 \quad \rightarrow \quad 0 - 1 \end{array}$$

เลขตรงสีเนลล์ของปฏิกิริยาย้ายมือเป็นศูนย์ แต่ขวามือเป็น -1 ในทำนองเดียวกันอันตรกิริยาที่ทำให้
เกิด K^- - เมซอนประจุบวก (kay - plus meson) ขึ้นตัวเดียวก็ไม่เกิดขึ้น ตัวอย่างอันหนึ่งก็คือ

$$p + p \quad \rightarrow \quad p + n + K^+$$

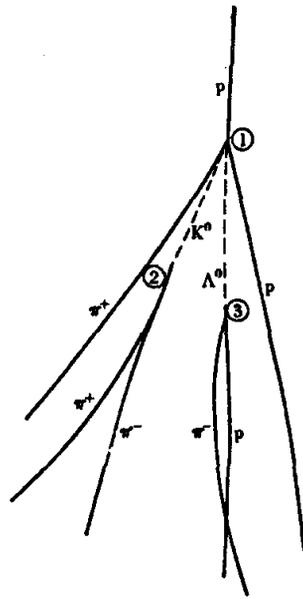
สาเหตุก็เหมือนตัวอย่างก่อน กล่าวคือ ไม่มีการอนุรักษ์ในเลขตรงสีเนลล์

$$\begin{array}{l} p + p \quad \rightarrow \quad p + n + K^+ \\ \text{strangeness : } 0+0 \quad \rightarrow \quad 0 + 0 + 1 \end{array}$$

เมื่ออันตรกิริยานิวเคลียร์ส่วนมากที่คนทำให้เกิดนั้นเกิดจากการเร่งอนุภาคที่มีเลขตรงสีเนลล์เป็น
ศูนย์ ดังนั้นเลขตรงสีเนลล์ทั้งหมดที่จะทำปฏิกิริยากัน (ย้ายมือส่งมาร) มีค่าเป็นศูนย์ สิ่งจำเป็นที่ผล
ที่เกิดจากอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ต้องมีอนุภาคเลขตรงสี (strange particle) มากกว่าหนึ่งตัว
เพียส์ (Pais) ได้เรียกผลนี้ว่า ผลิตผลที่ได้ตามมา (associated production) ตัวอย่าง
ของปรากฏการณ์นี้ดูรูปที่ 4-9 ซึ่งให้ปฏิกิริยา

$$\begin{array}{l} p + p \quad \rightarrow \quad \Lambda^0 + K^0 + p + \pi^+ \\ \text{strangeness : } 0+0 \quad \rightarrow \quad -1 + 1 + 0 + 0 \end{array}$$

จะเห็นว่ามีอนุภาคเลขตรงสี 2 ตัว ที่มีเลขตรงสีเนลล์ เครื่องหมายตรงกันข้ามกัน โดยแลมบ์ดา
ที่ไม่มีประจุ (Λ^0) มี $S = -1$ และ K^0 (kay - zero) มี $S = +1$ เกิดขึ้นในปฏิกิริยา



รูปที่ 4-11 รูปถ่ายใน a bubble - chamber แสดงโปรตอน
ขนาด 2.85 GeV ชนกับโปรตอนตัวหนึ่งทำให้เกิด K^0
และ Λ^0 อนุภาค K^0 สลายตัวให้ไพออน 2 ตัว

นี่ทำให้เส้นตรงสีเส้นนี้มีค่าอนุรักษ

หลังจากเกิดขึ้นมาแล้ว Λ^0 และ K^0 จะแยกจากกันไป และกลายเป็นอนุภาคอิสระ เมื่อพิจารณาตามกฎการอนุรักษอื่น ๆ แล้ว อนุภาคทั้งสองสามารถที่จะสลายตัวเป็นอนุภาคตัวอื่น ๆ ได้ ตัวอย่างเช่น

$$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$$

แต่ความสัมพันธ์นี้มีค่าเส้นตรงสีไม่อนุรักษ

$$\begin{array}{l} \Lambda^0 \rightarrow p + \pi^- \\ -1 \rightarrow 0 + 0 \end{array}$$

สังเกตว่าไม่น่าจะเกิดขึ้น ถ้าสเตรงส์เนสส์มีค่าอนุรักษ์ในทุกอันตรกิริยาแล้ว หมายถึงว่า Λ^0 ตัวนี้ เป็นอนุภาคที่มีเสถียรภาพอย่างสมบูรณ์ แต่จากการทดลองดังรูปที่ 4-9 ปรากฏว่าอันตรกิริยา ดังกล่าวมันเกิดขึ้นได้ คือ มันสลายตัวเป็นโปรตอนหนึ่งตัวกับไพออนประจุลบหนึ่งตัว แต่เป็น อันตรกิริยาที่ใช้ช่วงเวลาช้านาน ซึ่งหมายถึงว่าเป็นอันตรกิริยาแบบอ่อน

จากตัวอย่างที่ปรากฏให้เห็นนี้แสดงว่าการอนุรักษ์เลขสเตรงส์เนสส์ (strangeness number) ใช้ได้ในบางอันตรกิริยา แต่ใช้ไม่ได้กับอันตรกิริยาแบบอ่อนซึ่งสอดคล้องกับการทดลอง สรุปลงว่าการอนุรักษ์สเตรงส์เนสส์จะใช้กับอันตรกิริยาแบบรุนแรงและแม่เหล็กไฟฟ้า แต่ไม่ใช้กับ แบบอ่อน

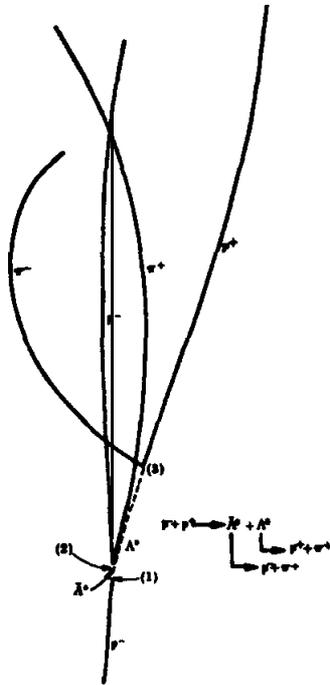
การอนุรักษ์สเตรงส์เนสส์จึงบังคับไม่ให้อนุภาคไฮเปอร์อน (hyperons) และคาออน (kaons) สลายตัวในช่วงเวลานิวเคลียร์ (nuclear times) ดังนั้นอนุภาคเหล่านี้จะสลายตัว ผ่านอันตรกิริยาแบบอ่อน (มาก) ซึ่งทำให้สเตรงส์เนสส์ทั้งหมดมีค่าเปลี่ยนไปอันนี้จะเป็นกฎทั่ว ๆ ไปที่พบจากการทดลอง ซึ่งสรุปได้ว่า การสลายตัวในอันตรกิริยาแบบอ่อนจะทำให้ค่าสเตรงส์เนสส์ มีค่าเป็นศูนย์หรือเปลี่ยนไปหนึ่งหน่วย

$$\text{ในอันตรกิริยาแบบรุนแรงหรือแม่เหล็กไฟฟ้า} \quad \Delta S = 0$$

$$\text{ในอันตรกิริยาแบบอ่อน} \quad \Delta S = 0 \text{ หรือ } \pm 1$$

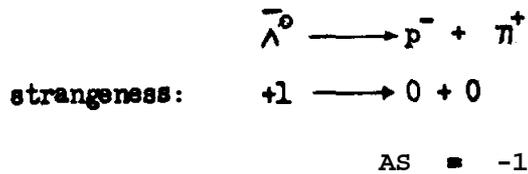
ตัวอย่างเช่น การสลายตัวของ $K^- = \text{mesons}$ (ตามรูปที่ 4-6 a) ตามสมการ

$$\begin{array}{rcl} K^- & \rightarrow & \pi^- + \pi^0 \\ \text{strangeness} & : & -1 \rightarrow 0 + 0 \\ AS & = & +1 \end{array}$$



รูปที่ 4-12 แสดง antiproton พลังงานขนาด 3.3 GeV เข้าไปใน a bubble chamber จากทางด้านขวามือโปรตอนตัวหนึ่งทำอันตรกิริยา (1) ให้ hyperon (Λ^0) และ antihyperon ($\bar{\Lambda}^0$) แล้ว Λ^0 สลายตัวให้โปรตอนและ π^+ อีก (3) และ $\bar{\Lambda}^0$ สลายตัวให้ antiproton และ π^+ อีก (2)

ในตัวอย่างตามรูปที่ 4-12 the anti - lambda-zero สลายตัวตามสมการ



อีกตัวอย่างหนึ่ง คือการสลายตัวในอันตรกิริยาที่ $\Delta S = 0$ ในการสลายตัวของไพออน



ทั่วไปที่เรากล่าวมาข้างแล้วคือ the baryon number ซึ่งกำหนดให้มีค่า

- + 1 สำหรับนิวคลีออนและ hyperons
- 0 สำหรับอนุภาคทุกตัวที่เบากว่า
- 1 สำหรับแอนตินิวคลีออนและ antihyperons

จาก the antiparticle theory of Dirac ได้บอกเราอนุภาคทุก ๆ ตัวจะมี antiparticle ของตัวเองหนึ่งตัว โดยที่สำหรับ antiparticle แล้วจะมีเครื่องหมายของประจุ, โมเมนตัมเชิงเหล็ก, isotopic spin ในส่วน z (I_z), strangeness number (S) และ baryon number (B) เป็นเครื่องหมายตรงข้ามกับอนุภาคของมัน ความสัมพันธ์ระหว่างประจุ, $q / |e|$ ของอนุภาค และ isotopic spin ในส่วน z กำหนดโดยสมการ

$$\frac{q}{|e|} = I_z + \frac{B}{2} + \frac{S}{2} \tag{4.9}$$

กึ่งเต็มกรวยโปรตอน

$$\frac{q}{|e|} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{0}{2} = 1$$

สำหรับแอนติโปรตอน

$$\frac{q}{|e|} = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2} + 0 = -1$$

สำหรับ π^+ - meson ซึ่งมีค่า $I_z = 1$

$$\frac{q}{|e|} = 1 + \frac{0}{2} + \frac{0}{2} = 1$$

หน้า 4 - 13

| NAME | PAR-TICLE | ANTI-PAR-TICLE* | STRANGE-NESS | SPIN, $\times \hbar$ | ELEC. CHGE., e | REST MASS, m_0 | REST ENERGY, MEV | MEAN LIFE, SEC | PRINCIPAL DECAY MODE |
|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------|----------------------|------------------|------------------|------------------|--|---|
| BARYON FAMILY | | | | | | | | | |
| Hyperons: | | | | | | | | | |
| omega | Ω^- | Ω^+ | -3 | $\frac{1}{2}$ | -1 | 3,272 | 1,672 | 1.1×10^{-10} | $\Xi^0 + \pi^-,$ or $\Xi^- + \pi^0$ |
| xi | Ξ^0, Ξ^- | Ξ^+, Ξ^0 | -2 | $\frac{1}{2}$ | 0 | 2,566 | 1,321 | 1.7×10^{-10} | $\Lambda^0 + \pi^-,$ or $\Sigma^0 + \pi^0$ |
| sigma | $\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-$ | $\Sigma^-, \Sigma^0, \Sigma^+$ | -2 | $\frac{1}{2}$ | -1 | 2,573 | 1,315 | 2.0×10^{-10} | $\Lambda^0 + \pi^-,$ or $n + \pi^0$ |
| lambda | Λ^0 | Λ^+ | -1 | $\frac{1}{2}$ | 0 | 2,343 | 1,197 | 1.7×10^{-10} | $n + \pi^-,$ or $p + \pi^0$ |
| Nucleons: | | | | | | | | | |
| neutron | n | \bar{n} | 0 | $\frac{1}{2}$ | 0 | 1,839 | 939.5 | 1.0×10^8 | $p + e^- + \bar{\nu}_e$ |
| proton | p^+ | \bar{p}^- | 0 | $\frac{1}{2}$ | +1 | 1,636 | 938.3 | ∞ | |
| MESON FAMILY | | | | | | | | | |
| kaon | K^0 | \bar{K}^0 | +1 | 0 | 0 | 974 | 490 | 0.67×10^{-10} | $\pi^+ + \pi^-$ |
| pion | $K^+, K^-, \pi^0, \pi^+, \pi^-$ | $K^-, K^+, \pi^0, \pi^-, \pi^+$ | +1, 0, 0, 1, -1 | 0, 0, 1, 0, 0 | +1, 0, +1, -1, 0 | 966, 273, 140 | 494, 140 | $0.53 \times 10^{-8}, 2.6 \times 10^{-8}, 2.618 \times 10^{-16}$ | $\pi^+ + \pi^-, \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e, \mu^+ + \nu_\mu, \mu^+ + \nu_\mu, \mu^+ + \nu_\mu$ |
| LEPTON FAMILY | | | | | | | | | |
| muon | μ^- | μ^+ | 0 | $\frac{1}{2}$ | -1 | 207 | 106 | 2.2×10^{-6} | $e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ |
| electron | e^- | e^+ | 0 | $\frac{1}{2}$ | -1 | 1 | 0.51 | ∞ | |
| μ^- neutrino | ν_μ | $\bar{\nu}_\mu$ | 0 | $\frac{1}{2}$ | 0 | 0 | 0 | ∞ | |
| e^- neutrino | ν_e | $\bar{\nu}_e$ | 0 | $\frac{1}{2}$ | 0 | 0 | 0 | ∞ | |
| PHOTON | γ | γ (self) | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | ∞ | |

* The antiparticle has the same rest mass, angular momentum, and lifetime as the particle. Its baryon number, lepton number, strangeness number and electric charge are of opposite sign to that of the particle.

สูตรการคำนวณ $I = \frac{1}{2} \hbar$ สำหรับอนุภาคที่มีสปิน $\frac{1}{2}$ และ $I = 0$ สำหรับอนุภาคที่มีสปินเป็นจำนวนเต็ม
 สูตรการคำนวณ $I = \frac{1}{2} \hbar$ สำหรับอนุภาคที่มีสปิน $\frac{1}{2}$ และ $I = 0$ สำหรับอนุภาคที่มีสปินเป็นจำนวนเต็ม
 สูตรการคำนวณ $I = \frac{1}{2} \hbar$ สำหรับอนุภาคที่มีสปิน $\frac{1}{2}$ และ $I = 0$ สำหรับอนุภาคที่มีสปินเป็นจำนวนเต็ม
 สูตรการคำนวณ $I = \frac{1}{2} \hbar$ สำหรับอนุภาคที่มีสปิน $\frac{1}{2}$ และ $I = 0$ สำหรับอนุภาคที่มีสปินเป็นจำนวนเต็ม

สรุปได้ว่า

ในอันตรกิริยาพื้นฐานใด ๆ ต้องสอดคล้องกับกฎการอนุรักษ์ดังต่อไปนี้

1. การอนุรักษ์บารีออน
2. การอนุรักษ์เลปตอน (lepton แต่ละตัวใช้ค่า + 1 ส่วน antilepton ใช้ค่า - 1)
3. การอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม
4. การอนุรักษ์ประจุ
5. การอนุรักษ์มวล - พลังงาน
6. การอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงเส้น

และอันตรกิริยาแบบรุนแรงกับแม่เหล็กไฟฟ้าต้องอนุรักษ์กฎต่อไปนี้ด้วยคือ

7. การอนุรักษ์สี่แตรงสี่เนลล์
 8. การอนุรักษ์พาริตี
-