



รูปภาพจาก : www.pixabay.com

บทที่ 20 ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค

นักฟิสิกส์ได้พบว่าความรู้ทางฟิสิกส์ทั้งหมดก่อนหน้านี้ไม่เพียงพอที่จะอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระดับนิวเคลียส ในบทนี้จะอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในนิวเคลียส อนุภาคมูลฐาน แบบจำลองมาตรฐาน จักรวาลวิทยา และยังบอกเล่าถึงความพยายามของนักฟิสิกส์ที่จะอธิบายจักรวาลของเรา จนถึงคำถามอีกมากมายที่นักฟิสิกส์ยังอธิบายไม่ได้

สมบัติบางประการของนิวเคลียส (Some Properties of Nuclei)



สมบัติบางประการของนิวเคลียส

เลขอะตอม (The Atomic Number or The Charge Number : Z) คือ จำนวนโปรตอนภายในนิวเคลียส

เลขนิวตรอน (The Neutron Number : N) คือ จำนวนนิวตรอนภายในนิวเคลียส

เลขมวล (The Mass Number : $A = Z + N$) คือ จำนวนนิวคลีออน (Nucleons) ภายในนิวเคลียส (นิวคลีออน คือ โปรตอนและนิวตรอน)

หน่วยมวลอะตอม (The Atomic Mass Unit : u) คือ $\frac{1}{12}$ เท่าของมวล ^{12}C หนึ่งอะตอม นั่นคือ $1 \text{ u} = 1.660539 \times 10^{-27} \text{ kg}$

จาก

$$E = mc^2$$

$$E = (1.660539 \times 10^{-27} \text{ kg})(2.99792 \times 10^8 \text{ m/s})^2$$

$$E = 1.492431 \times 10^{-10} \text{ J}$$

$$E = 931.5 \text{ MeV}$$

$$\therefore \text{มวล } 1 \text{ u} = 1.660539 \times 10^{-27} \text{ kg} = 931.5 \text{ MeV}/c^2$$

เพิ่มเติม

การเขียนสัญลักษณ์ธาตุ X ในทางเคมี คือ ^A_ZX

ไอโซโทป (Isotope) คือ ธาตุชนิดเดียวกัน (เลขอะตอมเท่ากัน) แต่มีเลขมวลต่างกัน เช่น ^{12}C , ^{13}C และ ^{14}C เป็นต้น

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

พิจารณาการยิงอนุภาคแอลฟา (${}^4_2\text{He}$) จากระยะไกลมากๆ ($r \rightarrow \infty$) ด้วยความเร็วขนาด v เข้าใส่อะตอมเพื่อคำนวณหาจุดวกกลับของอนุภาคแอลฟาเมื่อเข้าใกล้นิวเคลียสซึ่งมีจำนวน Z โปรตอน โดยประมาณว่าระยะวกกลับดังกล่าวอยู่ห่างจากนิวเคลียสเป็นระยะ d

จาก

$$\Sigma E_f = \Sigma E_i$$

$$K_f + U_f = K_i + U_i$$

$$(0) + \frac{k(Ze)(2e)}{d} = \frac{1}{2}m_\alpha v^2 + (0)$$

$$d = \frac{4kZe^2}{m_\alpha v^2}$$

จากการคำนวณของ Ernest Rutherford สรุปได้ว่า ขนาดของนิวเคลียสอยู่ในระดับที่น้อยกว่า 10^{-14} m และเรานิยมบอกขนาดของนิวเคลียสในหน่วย fm (Femtometer หรือ Fermi) โดย $\text{fm} = 10^{-15}$ m

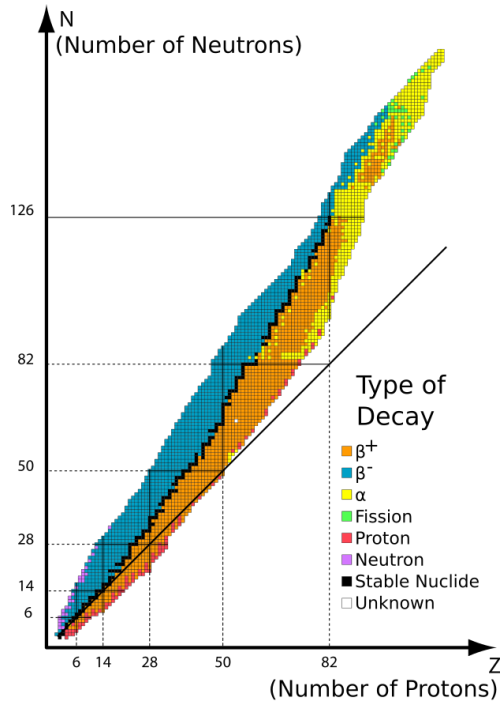
Ernest Rutherford ได้เสนอว่าในนิวเคลียสต้องมีอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าที่เขาเรียกว่า “นิวตรอน (Neutron)” และถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1932 โดย James Chadwick

ปัญหาสำคัญเกี่ยวกับพฤติกรรมของนิวเคลียส คือ เพราะเหตุใดแรงผลัทางไฟฟ้าจึงไม่ทำให้โปรตอนผลักกันออกมาจากนิวเคลียส? แรงอะไรที่ทำหน้าที่ดึงดูดโปรตอนและนิวตรอนให้อยู่ใกล้กันได้มากขนาดนั้น?

จากการทดลองการกระเจิงและพลังงานยึดเหนี่ยวภายในนิวเคลียส ได้พบหลักฐานสำคัญเกี่ยวกับแรงนิวเคลียร์ คือ เป็นแรงดึงดูดที่มีระยะจำกัด แต่มีแรงผลักรุนแรงทำให้นิวคลีออนไม่เข้าใกล้กันกว่า 0.4 fm และแรงนิวเคลียร์ไม่ส่งผลกระทบต่ออิเล็กตรอน

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

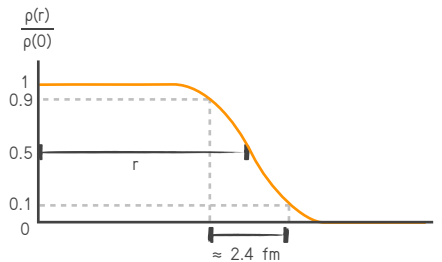
การมีอยู่ของแรงนิวเคลียร์ทำให้เกิดนิวเคลียสที่เสถียรจำนวนมาก ดังกราฟด้านล่าง



รูปภาพจาก : https://en.wikipedia.org/wiki/Stable_nuclide

นับตั้งแต่การทดลองการกระเจิงของรัทเทอร์ฟอร์ด (Rutherford's Scattering Experiments) และการทดลองอื่นๆ อีกจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับนิวเคลียส ได้แสดงให้เห็นว่านิวเคลียสส่วนใหญ่มีรูปร่างเป็นทรงกลม (ไม่ได้เป็นทรงกลมเสมอไป เช่น นิวเคลียสของ ^{224}Ra จะมีลักษณะคล้ายๆ ลูกแพร์) และความหนาแน่นของนิวเคลียสค่อนข้างคงที่

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)



จาก $\rho = \frac{m}{V}$

$$\rho \propto \frac{A}{\frac{4}{3}\pi r^3} \quad ; \quad m \propto A$$

∴

$$r^3 \propto A$$

$$r \propto A^{1/3}$$

$$r = r_0 A^{1/3}$$

จากการทดลองจะได้ $r_0 \approx 1.2 \times 10^{-15} \text{ m}$



ขนาดนิวเคลียส

นิวเคลียสส่วนใหญ่มีรูปร่างเป็นทรงกลม และความหนาแน่นค่อนข้างคงที่ โดยที่

$$r = r_0 A^{1/3}$$

r คือ รัศมีของนิวเคลียส

$$r_0 \approx 1.2 \times 10^{-15} \text{ m}$$

A คือ เลขมวล (The Mass Number : $A = Z + N$)

Problem 20.1

ธาตุไอโซโทป (Isotope) ของ $^{224}_{88}\text{Ra}$ จะมีรัศมีเป็นกี่เท่าของธาตุไอโซโทป (Isotope) ของ $^{28}_{11}\text{Na}$?

Answer : 2

Problem 20.2

นิวเคลียสซึ่งมีรัศมีเป็น $\frac{2}{3}$ เท่าของ $^{27}_{13}\text{Al}$ จะมีเลขมวลเป็นเท่าใด?

Answer : 8

Problem 20.3

นิวเคลียสซึ่งมีรัศมีเป็น $\frac{1}{3}$ เท่าของ $^{189}_{76}\text{Os}$ จะมีเลขมวลเป็นเท่าใด?

Answer : 7

Problem 20.4

ความหนาแน่นของนิวเคลียสจะเป็นเท่าใด เมื่อมวลของนิวคลีออน (Nucleons) เท่ากับ 1.67×10^{-27} kg และ $r_0 = 1.2 \times 10^{-15}$ m?

Answer : 2.3×10^{17} kg/m³

Problem 20.5

จงหาความหนาแน่นของนิวเคลียส ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ ในหน่วย g/cm³ เมื่อมวลนิวเคลียสของ ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ เท่ากับ 39.962591u?

Answer : 0.23×10^{15} g/cm³

Problem 20.6

ความเข้มข้น ($\frac{\text{จำนวนนิวคลีออน}}{\text{ปริมาตร}}$) และความหนาแน่นของ $^{197}_{79}\text{Au}$ เป็นเท่าใด เมื่อ

$r_0 = 1.2 \times 10^{-15} \text{ m}$ และมวลของนิวคลีออน เท่ากับ $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$?

Answer : $1.4 \times 10^{44} \text{ Nucleons/m}^3$ and $2.3 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$

พลังงานยึดเหนี่ยว (Nuclear Binding Energy)



พลังงานยึดเหนี่ยวเนื่องจากแรงนิวเคลียร์ (Nuclear Binding Energy)
พลังงานยึดเหนี่ยวเนื่องจากแรงนิวเคลียร์ (Binding energy ; E_b) เกิดจากนิวคลีออน
ได้มีมวลบางส่วนหายไป และมวลส่วนนั้นได้กลายมาเป็นพลังงานดังกล่าว ตามสมการ

$$E_b = \Delta mc^2 = \Delta m_0(931.5 \text{ MeV})$$

Δm คือ มวลที่หายไปของนิวคลีออนในนิวเคลียส

c คือ อัตราเร็วของแสงในสุญญากาศ

จากการศึกษาพลังงานยึดเหนี่ยวต่อจำนวนนิวคลีออน (E_b/A) พบว่า
นิวเคลียสที่เสถียรส่วนมากจะมีจำนวนนิวคลีออนเป็นจำนวนคู่ และนิวเคลียสที่มี
จำนวนโปรตอนหรือนิวตรอน เท่ากับ 2, 8, 20, 28, 52, 82 เป็นนิวเคลียสที่มีความ
เสถียรเป็นพิเศษ ตัวเลขเหล่านี้ถูกเรียกว่า “Magic Numbers”

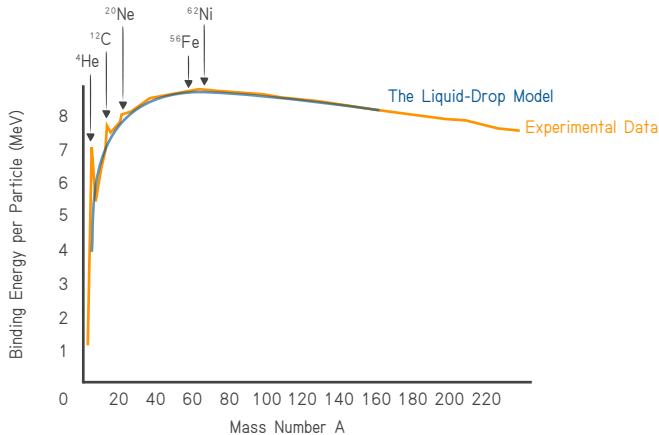
ในปี ค.ศ. 1936 Niels Bohr ได้เสนอแบบจำลองหยดน้ำ (The Liquid-Drop Model) โดยเสนอนิวคลีออนมีพฤติกรรมเหมือนกันโมเลกุลในหยด
ของเหลว ซึ่งมีแรงกระทำกันอย่างรุนแรงและมีการชนกันบ่อยครั้ง โดยพิจารณาได้
ว่าพลังงานยึดเหนี่ยวในนิวเคลียสประกอบด้วย 4 เทอม

$$E_b = \text{Volume}_{\text{Term}} + \text{Surface}_{\text{Term}} + \text{Coulomb}_{\text{Term}} + \text{Asymmetry}_{\text{Term}}$$

$$E_b = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z(Z-1)A^{-1/3} - a_a (A - 2Z)^2 A^{-1/3}$$

เมื่อ a_v , a_s , a_c และ a_a เป็นค่าคงที่

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)



แบบจำลองหยดยังมีปัญหาอยู่ คือ ทำไมจำนวนนิวเคลียสที่เสถียรส่วนมากจึงมีจำนวนนิวคลีออนเป็นเลขคู่ และพฤติกรรมพลังงานยึดเหนี่ยวต่อจำนวนนิวคลีออนของ Magic Numbers

จากปัญหาดังกล่าวนำไปสู่การเสนอแบบจำลองแบบเปลือก (The Shell Model) ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาโดย Maria Goeppert-Mayer ในปี ค.ศ. 1949 และ Hans Jensen ในปี ค.ศ. 1950 โดยเสนอว่าแต่ละนิวคลีออนอยู่ในสถานะพลังงานเป็นชั้นๆ (คล้ายๆ กับระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอม) และมีการชนกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งสถานะของนิวคลีออนในนิวเคลียสอธิบายได้ด้วยชุดเลขควอนตัม (แต่ละระดับพลังงานจะมีได้เพียง 2 โปรตอน(หรือ 2 นิวตรอน) ที่มีสปินตรงข้ามกัน)

ตามแบบจำลองแบบเปลือกนั้นอธิบายว่าการที่นิวเคลียสมีจำนวนนิวคลีออนเป็นจำนวนคู่ ส่งผลให้โมเมนต์เชิงมุมรวมเป็นศูนย์ นิวเคลียสจึงมีความเสถียรมากกว่าเมื่อจำนวนนิวคลีออนเป็นจำนวนคี่ ถึงแบบจำลองดังกล่าวจะอธิบายพฤติกรรมของนิวเคลียสได้ค่อนข้างดีแต่แบบจำลองนิวเคลียสยังคงมีประเด็นให้ต้องศึกษาต่ออีกมาก



ข้อสังเกต

แรงนิวเคลียร์เป็นแรงดึงดูดระหว่างโปรตอนกับโปรตอน นิวตรอนกับนิวตรอน และโปรตอนกับนิวตรอน ซึ่งส่งผลในระยะใกล้มากๆ

แรงนิวเคลียร์ไม่ขึ้นกับขนาดของประจุไฟฟ้า และไม่ขึ้นกับมวล

แรงนิวเคลียร์ทำให้ธาตุและไอโซโทปของบางธาตุมีเสถียรภาพ

นิวเคลียสที่มีจำนวนนิวตรอนมากกว่าโปรตอนในจำนวนที่เหมาะสม จึงจะมีเสถียรภาพ (ถ้าจำนวนนิวตรอนมากเกินไปหรือน้อยเกินไป นิวเคลียสจะไม่มีเสถียรภาพ)

พลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสมีค่าเท่ากับพลังงานที่พอดีทำให้นิวคลีออนทั้งหมดในนิวเคลียสแยกออกจากกัน

นิวเคลียสเสถียรที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนมาก จะเป็นนิวเคลียสที่มีเสถียรภาพสูง

นิวเคลียสที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนมาก อาจเป็นนิวเคลียสที่เสถียรหรือไม่เสถียรก็ได้

แรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างโปรตอนในนิวเคลียสนี้น้อยกว่าแรงนิวเคลียร์ทำให้สามารถยึดเหนี่ยวโปรตอนให้อยู่ในนิวเคลียสได้

มวลพร่อง คือ ส่วนต่างระหว่างมวลรวมของนิวคลีออนทั้งหมดในนิวเคลียสกับมวลของนิวเคลียส



Problem 20.7

พลังงานที่ใช้ในการสร้างทรงกลมรัศมี R ซึ่งมีประจุ Q กระจายสม่ำเสมอ เพื่อเอาชนะพลังงานจากแรงผลัทางไฟฟ้า คือ $U = \frac{3kQ^2}{5R}$ ถ้านิวเคลียส ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ มีโปรตอนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในปริมาตรทรงกลมของนิวเคลียส (มวลนิวเคลียสของ ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ เท่ากับ 39.962591u) จงแสดงว่าพลังงานยึดเหนี่ยวในนิวเคลียสดังกล่าวมีมากพอที่จะเอาชนะพลังงานจากแรงผลัทางไฟฟ้าได้?

Answer : $U = 84.1 \text{ MeV}$ and $E_b = 332 \text{ MeV}$

$\therefore E_b > U$

Problem 20.8

ถ้าการเผาถ่านหิน 1.00 kg ให้พลังงานประมาณ 29.3 MJ จะต้องใช้ถ่านหินจำนวนเท่าใดจึงจะได้พลังงานเทียบเท่ากับพลังงานจากมวลที่หายไปของนิวเคลียส 1.00 g ?

Answer : $3.07 \times 10^6 \text{ kg}$

Problem 20.9

ถ้าต้องการให้หลอดไฟ 100 W หนึ่งดวงสว่างเป็นเวลา 1 วัน โดยใช้พลังงานจากปฏิกิริยาฟิชชันโดยการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันแต่ละครั้งให้พลังงาน 200 MeV และประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานนิวเคลียร์เป็นพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 30% จะต้องใช้มวลยูเรเนียม-235 เท่าใด?

Answer : 0.350 mg

Problem 20.10

ถ้าพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของ C^{12} และ C^{13} เท่ากับ 7.7 MeV และ 7.5 MeV ตามลำดับ พลังงานอย่างน้อยที่ใช้ในการแยกนิวตรอนออกจาก C^{13} เป็นเท่าใด?

Answer : 5.1 MeV

Problem 20.11

ปฏิกิริยาฟิชชันของธาตุชนิดหนึ่งให้มวลรวมของธาตุหลังเกิดปฏิกิริยาลดลง 0.025u จะต้องเกิดปฏิกิริยาก็ครั้งในหนึ่งวินาทีจึงจะให้กำลัง 930 W?

Answer : 2.5×10^{14} ครั้ง

Problem 20.12

อนุภาคโปรตอนและดิวเทอรอน (มวลเป็นสองเท่าของโปรตอน และประจุเท่าโปรตอน) ถูกเร่งด้วยความต่างศักย์เท่ากันผ่านเข้าไปในสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉาก ถ้าวงโคจรของโปรตอนมีรัศมีความโค้ง r วงโคจรของดิวเทอรอนจะมีรัศมีความโค้งเท่าใด?

Answer : $\sqrt{2}r$

กัมมันตภาพรังสี (Radioactivity)

หลังจากพบการแผ่รังสีจาก Uranyl Potassium Sulfate Crystals โดยบังเอิญของ Becquerel ในปี ค.ศ. 1896 ได้มีการทดลองโดยนักวิทยาศาสตร์คนอื่นๆ แสดงให้เห็นว่ายังมีสารอื่นๆ ที่แผ่รังสีได้เช่นกัน และ Ernest Rutherford ได้เสนอว่ากัมมันตภาพรังสี (Radioactivity) เป็นผลจากการสลายตัวของนิวเคลียสที่ไม่เสถียร

การสลายตัวของนิวเคลียสที่ไม่เสถียรนั้นไม่ขึ้นกับปัจจัยภายนอก เป็นไปแบบสุ่ม ดังนั้นอัตราการสลายตัวของนิวเคลียสดังกล่าว $\left(\frac{dN}{dt}\right)$ จึงแปรผันตามจำนวนนิวเคลียส (N)

$$\begin{aligned}\frac{dN}{dt} &\propto N \\ \frac{dN}{dt} &= -\lambda N \\ \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} &= -\lambda \int_0^t dt \\ \ln N \Big|_{N_0}^N &= -\lambda t \Big|_0^t \\ \ln\left(\frac{N}{N_0}\right) &= -\lambda t \\ N &= N_0 e^{-\lambda t}\end{aligned}$$

พิจารณาช่วงเวลาที่ทำให้จำนวนนิวเคลียสของกัมมันตรังสีลดลงเหลือครึ่งหนึ่งจากจำนวนเริ่มต้น เรียกว่า “ค่าครึ่งชีวิต (Half-Life : T)” จะได้

$$\begin{aligned}\frac{N_0}{2} &= N_0 e^{-\lambda T} \\ e^{\lambda T} &= 2 \\ \lambda T &= \ln 2\end{aligned}$$

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

กัมมันตรังสี (The Decay Rate or Activity : A) คือ อัตราการสลายตัวของนิวเคลียสของกัมมันตรังสี จะได้

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right|$$

$$A = \lambda N$$

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad ; \quad A_0 = \lambda N_0$$



กัมมันตภาพรังสี (Radioactivity)

จำนวนนิวเคลียสของกัมมันตภาพรังสี (N)

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

N_0 คือ จำนวนนิวเคลียสเริ่มต้นของกัมมันตภาพรังสี

λ คือ ค่าคงที่การสลายตัวของกัมมันตภาพรังสี

t คือ เวลา

ค่าครึ่งชีวิต (Half-Life : T)

$$\lambda T = \ln 2$$

อัตราการสลายตัวของนิวเคลียสของกัมมันตรังสี (The Decay Rate or Activity : R [Decay/s or Bq])

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$$

A_0 คือ อัตราการสลายตัวของนิวเคลียสของกัมมันตรังสีเริ่มต้น ($A_0 = \lambda N_0$)

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

หน่วยของอัตราการสลายตัวของนิวเคลียสของกัมมันตรังสีในระบบ SI คือ Becquerel (Bq) โดย

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ Decay/s}$$

และหน่วยของอัตราการสลายตัวของนิวเคลียสของกัมมันตรังสีที่นิยมใช้ คือ Curie (Ci) โดย

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

หน่วยวัดรังสี

ปริมาณ	หน่วยเดิม	หน่วย SI			
		ชื่อ	สัญลักษณ์	หน่วยฐาน	หน่วยรูปอื่น
กัมมันตรังสี (Activity)	คูรี (Ci)	เบ็กเคอเรล (Becquerel)	Bq	s ⁻¹	-
รังสีที่ทำให้อากาศแตกตัวเป็นไอออน (Exposure)	เร็นต์เกน (R)	คูลอมบ์ต่อกิโลกรัม (Coulomb per kilogram)	C/kg	A·s·kg ⁻¹	-
รังสีที่ถูกดูดกลืน (Absorbed Dose)	แรด (rad)	เกรย์ (Gray)	Gy	m ² ·s ⁻²	J/kg
รังสีสมมูล (Dose Equivalent)	เรม (rem)	ซีเวิร์ต (Sievert)	Sv	m ² ·s ⁻²	J/kg

$$\text{รังสีที่ทำให้อากาศแตกตัวเป็นไอออน (Exposure)} = \frac{\text{ประจุไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาจากรังสีของอากาศที่พิจารณา}}{\text{มวลของอากาศที่พิจารณา}}$$

$$\text{รังสีที่ถูกดูดกลืน (Absorbed Dose)} = \frac{\text{พลังงานที่ตัวกลางได้รับจากรังสี}}{\text{มวลของตัวกลางที่ได้รับพลังงานจากรังสี}}$$

$$\text{รังสีสมมูล (Dose Equivalent)} = (\text{Radiation Quality Factor})(\text{พลังงานทั้งหมดที่รังสีส่งออกมาให้กับเนื้อเยื่อ})$$

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

ปริมาณรังสีจากกิจกรรมต่างๆ

กิจกรรม	ปริมาณรังสี (mSv)
บริเวณห่างจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ประมาณ 80 km เป็นเวลา 1 ปี	0.05
การตรวจทรวงอกด้วยการฉายรังสีเอกซ์ 1 ครั้ง	0.10
การเดินทางโดยเครื่องบินระหว่างเมืองโตเกียวกับเมืองนิวยอร์ก ไปและกลับ 1 ครั้ง	0.19
ระดับปริมาณรังสีภายใน 1 ชั่วโมง ที่ก่อให้เกิดอาการป่วยทางรังสี	1.0
ปริมาณรังสีที่คนหนึ่งได้รับจากสิ่งแวดล้อมโดยเฉลี่ยใน 1 ปี	2.2
การตรวจร่างกายโดยการฉีดเครื่องฉายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (CT Scan) 1 ครั้ง	6.9
ระดับปริมาณรังสีสูงสุดที่สาธารณชนไม่ควรได้รับเกินภายใน 1 ปี	5
ระดับปริมาณรังสีสูงสุดที่อนุญาตให้ผู้ปฏิบัติงานทางรังสีได้รับภายใน 1 ปี	50
ระดับปริมาณรังสีที่ได้รับในครั้งเดียวที่ก่อให้เกิดอาการป่วยทางรังสี	1,000

การได้รับรังสีอย่างเฉียบพลันส่งผลให้เกิดความผิดปกติเกี่ยวกับระบบต่างๆ ในร่างกาย โดยมีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ท้องเสีย ร่วมด้วย จนถึงขั้นช็อก ผิวหนังเสื่อมสภาพ และอาจเสียชีวิตภายใน 3 วัน

การได้รับรังสีแบบเรื้อรังส่งผลให้ร่างกายมีการสะสมรังสีอยู่เรื่อยๆ จะทำให้เกิดโรคต่างๆ เช่น เกิดโรคมะเร็งเม็ดเลือดขาว มะเร็งต่างๆ ต้อกระจก เป็นต้น

รังสียังส่งผลกระทบต่อทางพันธุกรรม (Genetic Effect) เช่น ทำให้เป็นหมัน การมิวเทชัน (Mutation) เป็นต้น

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

อาการป่วยเนื่องจากรังสี

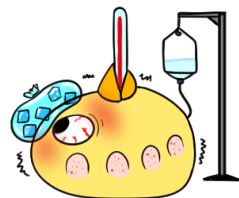
1) ระยะเตือนล่วงหน้า จะมีอาการคลื่นไส้ อาเจียน หายใจไม่สะดวก เพลีย หหมดแรงทรงตัว ผิวน้ำแดง ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อได้รับรังสีในไม่กี่ชั่วโมง

2) ระยะแอบแฝง จะเป็นระยะที่ไม่แสดงอาการ ระบุช่วงเวลาไม่ได้ ขึ้นกับปริมาณรังสีที่ได้รับ

3) ระยะป่วยจริง จะมีไข้ เบื่ออาหาร น้ำหนักลด เลือดออก ผม่วง ซีดออก จ้าอะไรไม่ได้ หหมดความรู้สึก และเสียชีวิต

ปริมาณรังสีในระดับปลอดภัย คือ ปริมาณรังสีที่ได้รับแล้วไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และไม่ทำให้เกิดความผิดปกติในร่างกาย ซึ่งคณะกรรมการว่าด้วยการป้องกันรังสีระหว่างประเทศ (International Commission on Radiological Protection หรือ ICRP) ได้ทำการกำหนดขีดจำกัดของปริมาณรังสี (Dose Limit) สำหรับอวัยวะต่างๆ ไว้ดังนี้

ร่างกาย/อวัยวะ	ประชาชนทั่วไป	ผู้ปฏิบัติการทางรังสี
ปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายได้รับเฉลี่ยต่อปี	1 mSv/ปี	ไม่เกิน 20 mSv เฉลี่ยระยะเวลา 5 ปี ติดต่อกัน และไม่เกิน 50 mSv/ปี
เลนส์ตา, อวัยวะสืบพันธุ์ และไขกระดูก	1 mSv/ปี	ไม่เกิน 150 mSv/ปี
ผิวหนัง, ไทรอยด์, มือ, แขน และขา	50 mSv/ปี	ไม่เกิน 400 mSv/ปี





ข้อสังเกต

กัมมันตภาพรังสี คือ ปรากฏการณ์ที่ธาตุหรือไอโซโทปของธาตุแผ่รังสีออกมาได้เองอย่างต่อเนื่อง

ไอโซโทปของธาตุบางไอโซโทปเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี และบางไอโซโทปเป็นไอโซโทปเสถียร

การแผ่รังสีของธาตุหรือไอโซโทปกัมมันตรังสีเกิดจากการคายพลังงานของนิวเคลียสที่ไม่เสถียร ไม่ใช่การคายพลังงานของอะตอมที่ไม่เสถียร

นิวเคลียสของธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำๆ บางธาตุเป็นนิวเคลียสกัมมันตรังสี

อัตราการแผ่รังสีของธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสีชนิดใดชนิดหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนนิวเคลียสของธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสีชนิดนั้นที่มีอยู่

การแผ่รังสีของธาตุกัมมันตรังสีไม่ขึ้นกับปัจจัยภายนอก

การสลายของนิวเคลียสกัมมันตรังสีเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นแบบสุ่ม ไม่สามารถระบุนิวเคลียสที่จะสลายได้

ครึ่งชีวิต คือ ช่วงเวลาที่ธาตุกัมมันตรังสีจะสลายไปเหลือปริมาณครึ่งหนึ่งของปริมาณเดิม

ครึ่งชีวิตของกัมมันตรังสีไม่ขึ้นกับปัจจัยภายนอก

ธาตุกัมมันตรังสีมีการแผ่รังสีตลอดเวลา



Problem 20.13

นิวเคลียสชนิดหนึ่งสลายตัวโดยมีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 360 นาที ค่าคงที่ของการสลายตัวของนิวเคลียสดังกล่าวเป็นเท่าใด?

Answer : $3.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

Problem 20.14

หลังจากเวลาผ่านไป n เท่าของค่าครึ่งชีวิต จำนวนนิวเคลียสจะเหลืออยู่เป็นกี่เท่าของนิวเคลียสเริ่มต้น?

Answer : $(\frac{1}{2})^n$

Problem 20.15

ธาตุชนิดหนึ่งมีมวล 10.0 g ใช้เวลา 20.0 วัน จึงมีมวลเหลืออยู่ 2.5 g ค่าคงที่ของการสลายตัวเป็นเท่าใด (ในหน่วย day^{-1})?

Answer : 0.0693 day^{-1}

Problem 20.16

อะตอมชนิดหนึ่งมีจำนวน 24×10^{24} อะตอม เมื่อผ่านไป 90 วัน มีจำนวนอะตอมเหลือ 3×10^{24} อะตอม ค่าคงที่ของการสลายตัวเป็นเท่าใด (ในหน่วย day^{-1})?

Answer : 0.023 day^{-1}

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

Problem 20.17

สารกัมมันตภาพรังสีชนิดหนึ่งมีจำนวนนิวเคลียสเริ่มต้น N_0 มีค่าครึ่งชีวิต T เวลาผ่านไปนานเท่าใดนิวเคลียสจึงสลายไป $\frac{3N_0}{4}$ นิวเคลียส?

Answer : $2T$

Problem 20.18

ไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุไอโอดีน-128 มีค่าครึ่งชีวิต 25 นาที ถ้าไอโอดีน-128 เริ่มต้นมีมวล 256 g จะต้องใช้เวลาเท่าใดไอโอดีน-128 จึงจะมวลเหลือ 32 g?

Answer : 75 min

Problem 20.19

ไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุไอโอดีน-128 มีค่าครึ่งชีวิต 25 นาที ถ้าไอโอดีน-128 เริ่มต้นมีมวล 400 mg ไอโอดีน-128 จึงลดลงเหลือ 100 mg เมื่อเวลาผ่านไปเท่าใด?

Answer : 50 min

Problem 20.20

เมื่อนำซากไม้โบราณ 6 g มาวัดปริมาณรังสี พบว่ามีกัมมันตภาพเท่ากับไม้ที่มีชีวิต 2 g ถ้าค่าครึ่งชีวิตของ C-14 เท่ากับ 5,730 ปี ซากไม้ดังกล่าวจะมีอายุอยู่ในช่วงประมาณเท่าใด?

Answer : $5,730 \text{ years} < t < 11,460 \text{ years}$

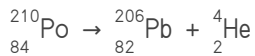
Problem 20.21

ธาตุกัมมันตรังสีชนิดหนึ่งมีมวล 400 g ณ เวลา 9:00 เมื่อถึงเวลา 10:00 ธาตุกัมมันตรังสีดังกล่าวจะเหลือมวล 200 g ณ เวลา 12:00 ธาตุกัมมันตรังสีดังกล่าวจะเหลือมวลเท่าใด?

Answer : 50 g

Problem 20.22

ไอโซโทปของธาตุ $^{210}_{84}\text{Po}$ สลายตัวด้วยครึ่งชีวิตเท่ากับ 138 วัน ตามสมการ



ถ้าเริ่มต้นมี $^{210}_{84}\text{Po}$ จำนวน 8×10^{-4} mol เมื่อทิ้งไว้นาน 276 วัน จะเกิดแก๊สฮีเลียมมวลเท่าใด (กำหนดให้มวล $^4_2\text{He} = 6.65 \times 10^{-27}$ kg)?

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

Answer : 2.4 mg

Problem 20.23

ต้องใช้เวลานานเท่าใด ธาตุกัมมันตรังสีซึ่งมีค่าครึ่งชีวิต 30 ปี จึงจะมีปริมาณเหลือเพียง 10% ของปริมาณเริ่มต้น?

Answer : 100 years

Problem 20.24

ไอโอดีน-131 มีค่าคงที่การสลายตัว เท่ากับ 0.0867 วัน^{-1} ถ้าเริ่มต้นมี ไอโอดีน-131 อยู่ 10.0 g เมื่อเวลาผ่านไป 24.0 วัน จะเหลือไอโอดีน-131 อยู่เท่าใด?

Answer : 1.25 g

Problem 20.25

ธาตุกัมมันตภาพรังสีมีค่าครึ่งชีวิต 1,620 ปี เริ่มต้นมีมวลอยู่ 200 μg เมื่อเวลาผ่านไป 4,860 ปี ธาตุกัมมันตภาพรังสีดังกล่าวจะมีมวลเป็นเท่าใด?

Answer : 25 μg

Problem 20.26

สารกัมมันตภาพรังสีโคบอลต์-60 มีค่าครึ่งชีวิต 5.30 ปี เปอร์เซนต์ของสารกัมมันตรังสีที่เหลืออยู่เมื่อเวลาผ่านไป 15.9 ปี เป็นเท่าใด?

Answer : 12.5 %

Problem 20.27

ไอโซโทปของโซเดียม $^{24}_{11}\text{Na}$ มีค่าครึ่งชีวิต 15 ชั่วโมง เมื่อเวลาผ่านไป 75 ชั่วโมง เริ่มต้นนิวเคลียสของไอโซโทปนี้มีกัมมันตภาพ 5.0 Ci นิวเคลียสของไอโซโทปจะสลายไปประมาณกี่เปอร์เซ็นต์ของจำนวนนิวเคลียสเริ่มต้น?

Answer : 97%

Problem 20.28

ธาตุกัมมันตรังสีชนิดหนึ่งมีจำนวนนิวเคลียสเริ่มต้นเท่ากับ N_0 เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งหนึ่งของครึ่งชีวิตจะมีจำนวนนิวเคลียสเหลืออยู่เท่าใด?

Answer : $\frac{N_0}{\sqrt{2}}$

Problem 20.29

ธาตุกัมมันตภาพรังสีมีจำนวนนิวเคลียส N นิวเคลียส และมีกัมมันตภาพ A mCi ค่าคงที่การสลายตัวในหน่วย s^{-1} เป็นเท่าใด?

$$\text{Answer : } \frac{3.7A \times 10^7}{N} s^{-1}$$

Problem 20.30

สารกัมมันตรังสีชนิดหนึ่งมีกัมมันตภาพ 6.4×10^{12} Bq เมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง กัมมันตภาพรังสีลดลงเหลือ 1.0×10^{11} Bq สารกัมมันตรังสีดังกล่าวมีค่าครึ่งชีวิตเท่าใด?

$$\text{Answer : } 2 \text{ hr}$$

Problem 20.31

ธาตุกัมมันตภาพรังสีจำนวนหนึ่งมีกัมมันตภาพ $1.0 \text{ } \mu\text{Ci}$ และมีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ $1,000 \text{ s}$ จำนวนนิวเคลียสของกัมมันตรังสีขณะนั้นเป็นเท่าใด?

Answer : $5.3 \times 10^7 \text{ Nuclei}$

Problem 20.32

สารกัมมันตรังสีชนิดหนึ่งมีกัมมันตภาพ 256 Ci เมื่อเวลาผ่านไป 6 นาที กัมมันตภาพลดลงเหลือ 32 Ci เมื่อเวลาผ่านไป 8 นาที กัมมันตภาพเป็นเท่าใด?

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

Answer : 16 Ci

Problem 20.33

เรเดียม 223 มีค่าครึ่งชีวิต 11.43 วัน เริ่มแรกมีนิวเคลียส 100 อนุภาค จงหา

a) กัมมันตภาพเริ่มต้น?

b) เมื่อผ่านไป 20 วัน จะมีจำนวนนิวเคลียสอยู่เท่าใด?

Answer : a) 7.02×10^{-5} Bq and b) 30 Nuclei

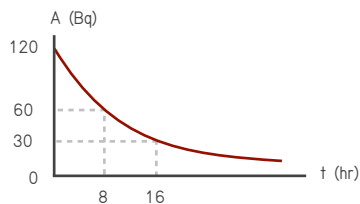
Problem 20.34

ไอโซโทปกัมมันตรังสี มีครึ่งชีวิตเท่ากับ 64.8 h ถ้าสารตัวอย่างมีไอโซโทปชนิดนี้ผสมอยู่ที่เวลาเริ่มต้น วัดกัมมันตภาพได้ 40.0 μCi จงหาจำนวนนิวเคลียสที่สลายตัวไปในสารตัวอย่างนี้ตั้งแต่เวลา 10.0 h ถึง 12.0 h

Answer : 9.48×10^9 Nuclei

Problem 20.35

ในการทดลองวัดการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี ได้ความสัมพันธ์ระหว่างกัมมันตรังสีที่นับได้กับเวลาดังกราฟด้านล่าง จำนวนนิวเคลียสเริ่มต้นของสารกัมมันตรังสีดังกล่าวเป็นเท่าใด?

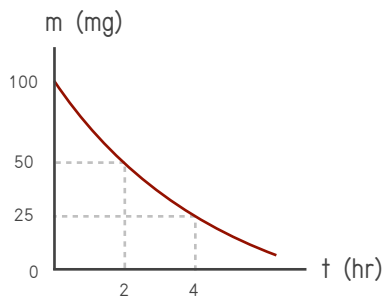


ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

Answer : 5×10^6 Nuclei

Problem 20.36

ในการทดลองวัดปริมาณรังสีจากธาตุกัมมันตรังสีจากธาตุชนิดหนึ่ง พบความสัมพันธ์ระหว่างมวลของธาตุกัมมันตรังสีกับเวลาดังกราฟด้านล่าง เมื่อเวลาผ่านไป 8 ชั่วโมง ธาตุกัมมันตรังสีดังกล่าวจะมีมวลเหลือเท่าใด?



Answer : 6.25 mg

Problem 20.37

ในการทดลองทอยลูกเต๋า 6 หน้า จำนวน 180 ลูก ถ้าในการทอยแต่ละครั้งจะคัดลูกเต๋าทิ้งหน้า 1 แต้มออก ถ้าทอยลูกเต๋าสองครั้ง โดยเฉลี่ยจะต้องคัดลูกเต๋ากี่ลูก?

Answer : 55 ลูก

Problem 20.38

ในการทดลองทอยลูกเต๋า 6 หน้า จำนวน 90 ลูก ถ้าในการทอยแต่ละครั้งจะคัดลูกเต๋าทิ้งหน้า 1 แต้ม และ 2 แต้ม ออก ถ้าทอยลูกเต๋าสองครั้ง โดยเฉลี่ยจะเหลือลูกเต๋ากี่ลูก?

Answer : 40 ลูก

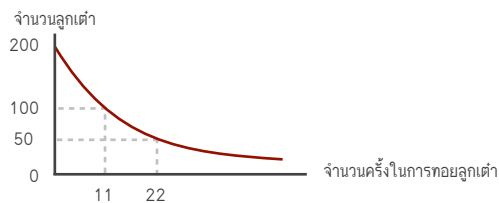
Problem 20.39

ลูกเต๋า 16 หน้า ถูกแต้มสีไว้หนึ่งหน้า จำนวน 100 ลูก เมื่อนำลูกเต๋าดังกล่าวมา ทอย แล้วคัดลูกเต๋าทิ้งทางด้านสีออก จะต้องทอยลูกเต๋าโดยเฉลี่ยกี่ครั้งจึงจะเหลือ ลูกเต๋า 50 ลูก?

Answer : 11

Problem 20.40

ในการทดลองทอยลูกเต๋าซึ่งแต้มสีไว้หนึ่งหน้า โดยในการทอยแต่ละครั้งคัดลูกเต๋าทิ้ง หายด้านที่ถูกแต้มสีออก ได้ทำการทดลองดังกราฟด้านล่าง ลูกเต๋ากี่ใบที่ใช้ในการทดลองเป็นลูกเต๋ากี่หน้า?



Answer : 16

Problem 20.41

ธาตุที่ 1 มีจำนวนอะตอมเป็น 2 เท่าของธาตุที่ 2 แต่ธาตุที่ 1 มีกัมมันตภาพเป็น 3 เท่าของธาตุที่ 2 ค่าครึ่งชีวิตของธาตุที่ 1 จะเป็นกี่เท่าของธาตุที่ 2?

$$\text{Answer : } \frac{2}{3}$$

Problem 20.42

ธาตุที่ 1 มีกัมมันตภาพเริ่มต้น A_1 และธาตุที่ 2 มีกัมมันตภาพเริ่มต้น A_2 ถ้าค่าคงที่การสลายตัวของธาตุที่ 1 เท่ากับ λ_1 และค่าคงที่การสลายตัวของธาตุที่ 2 เท่ากับ λ_2 เวลาผ่านไปนานเท่าใดกัมมันตภาพของธาตุทั้งสองจึงจะเท่ากัน?

$$\text{Answer : } \frac{\ln A_2 - \ln A_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

Problem 20.43

เมื่อเริ่มต้นจำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสี X เป็น 2.5 เท่าของจำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสี Y หลังจากผ่านไป 3.0 วัน จำนวนนิวเคลียส X เป็น 4.2 เท่าของจำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสี Y ถ้าค่าครึ่งชีวิตของนิวเคลียสกัมมันตรังสี Y เป็น 1.6 วัน ค่าครึ่งชีวิตของกัมมันตรังสี X จะเป็นเท่าใด?

Answer : 2.7 days

Problem 20.44

ณ เวลา 10:00 น. จำนวนนิวเคลียสของกัมมันตรังสีชนิดที่ 1 เป็น 2 เท่าของจำนวนนิวเคลียสของกัมมันตรังสีชนิดที่ 2 และ ณ เวลา 14:00 น. จำนวนนิวเคลียสของกัมมันตรังสีชนิดที่ 1 เป็น 5 เท่าของจำนวนนิวเคลียสของกัมมันตรังสีชนิดที่ 2 ถ้าค่าคงที่การสลายตัวของนิวเคลียสของกัมมันตรังสีชนิดที่ 2 เป็น 0.4 h^{-1} ค่าครึ่งชีวิตของนิวเคลียสของกัมมันตรังสีชนิดที่ 1 เป็นกี่ชั่วโมง?

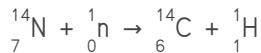
Answer : 4 hr

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

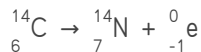
การหาอายุของซากสิ่งมีชีวิตหรือวัตถุโบราณ

$^{12}_6\text{C}$ และ $^{13}_6\text{C}$ เป็นไอโซโทปที่เสถียรซึ่งมีอยู่ในธรรมชาติประมาณ 98.90% และ 1.10% ตามลำดับ ส่วน $^{11}_6\text{C}$ และ $^{14}_6\text{C}$ เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิตประมาณ 20.39 นาที และ 5,730 ปี ตามลำดับ

C-14 เกิดจากนิวตรอนในรังสีคอสมิกชนกับนิวเคลียสของไนโตรเจนในบรรยากาศ ตามสมการ



C-14 จากปฏิกิริยาข้างต้นจะสลายตัวให้ไนโตรเจนกลับมา ตามสมการ



ดังนั้นการเกิด C-14 จึงสมดุลกับการสลายตัวของ C-14

ในขณะที่พืชยังมีชีวิตจะดูดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากอากาศ เพื่อนำไปใช้ในการสร้างเนื้อเยื่อโดยคาร์บอนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ C-14 และ C-12 ดังนั้นสัตว์ที่กินพืชจึงได้รับคาร์บอนทั้งสองไอโซโทป เนื่องจากอัตราส่วนระหว่าง C-14 และ C-12 มีค่าประมาณ 1.30×10^{-12} เกือบคงที่ตลอดเวลา อัตราส่วนระหว่างไอโซโทปทั้งสองในร่างกายของสิ่งมีชีวิตจึงคงที่ด้วย เมื่อสิ่งมีชีวิตตาย การรับคาร์บอนเข้าสู่ร่างกายจะสิ้นสุด และ C-14 จะค่อยๆ สลายไป ส่งผลให้ C-14 ที่อยู่ในซากนั้นจะลดลงเรื่อยๆ จึงสามารถใช้ C-14 ที่เหลือในซากสิ่งมีชีวิตเพื่อคำนวณหาว่าสิ่งมีชีวิตนั้นตายมานานเท่าใด ซึ่งเหมาะกับการใช้หาอายุของซากสิ่งมีชีวิตหรือวัตถุโบราณที่มีอายุไม่เกิน 70,000 ปี แต่เมื่อสิ่งเมื่อ C-14 ลดลงเหลือน้อยมากจนไม่สามารถวัดปริมาณที่เหลือได้ถูกต้อง จะต้องใช้วิธีอื่นในการหาอายุของซากสิ่งมีชีวิตหรือวัตถุโบราณ



Problem 20.45 Challenge

ไม้แท่งหนึ่งมวล 10.0 g มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่ 50% และมีอัตราการสลายตัวของคาร์บอน 14 เท่ากับ 30.0 ครั้งต่อนาที ไม้แท่งนี้จะมีอายุประมาณกี่ปี เมื่อครึ่งชีวิตของคาร์บอน 14 เท่ากับ 5,730 ปี, ปริมาณคาร์บอน 14 ต่อคาร์บอน 12 ในบรรยากาศ เท่ากับ 1.30×10^{-12} ซึ่งประมาณได้ว่าคงที่ตลอดเวลา และคาร์บอน 12 หนึ่งโมเลกุลมีมวลประมาณ $12 \times 1.66 \times 10^{-24}$ g?

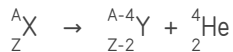
Answer : 7,586 years

กระบวนการสลายตัว (The Decay Processes)

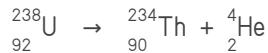


กระบวนการสลายตัว (The Decay Processes)

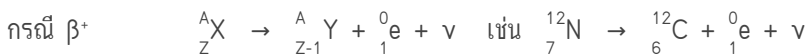
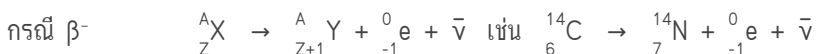
Alpha Decay : อนุภาคแอลฟา คือ นิวเคลียสของฮีเลียม ($\alpha = {}^4_2\text{He}$) ซึ่งเขียนอธิบายการสลายตัวแบบแอลฟาได้ดังนี้



โดยธาตุ X เรียกว่า “The Parent Nucleus” และธาตุ Y เรียกว่า “The Daughter Nucleus” เช่น

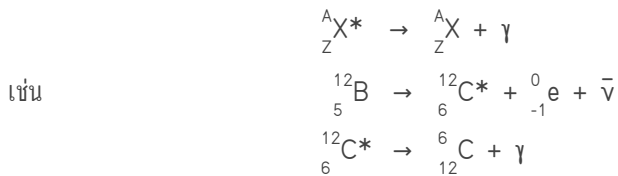


Beta Decay : อนุภาคเบตา คือ อิเล็กตรอน ($\beta^- = {}^0_{-1}\text{e}$) หรือโพซิตรอน ($\beta^+ = {}^0_1\text{e}$) พลังงานสูง ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่นิวเคลียสไม่เสถียรที่มีนิวตรอนมากเกินไป จะสลายให้ตัวให้ β^- และกรณีที่นิวเคลียสไม่เสถียรที่มีโปรตอนมากเกินไป จะสลายให้ตัวให้ β^+ และตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมทั้งในเชิงเส้นและเชิงมุม การสลายตัวแบบเบตาจะต้องเกิดอนุภาค “นิวตริโน (Neutrino : ν)” และ “แอนตินิวตริโน (Anti-Neutrino : $\bar{\nu}$)” ด้วยเสมอ อนุภาสดังกล่าวต้องมีสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า, มวลน้อยมากๆ และมีสปินเป็น $\frac{1}{2}$ จากสมบัติดังกล่าวทำให้อนุภาคนิวตริโนและแอนตินิวตริโนตรวจพบได้ยากมากๆ ซึ่งทำให้เขียนอธิบายการสลายตัวแบบเบตาได้ดังนี้



ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

Gamma Decay : รังสีแกมมา คือ โฟตอน (γ หรือ ${}^0_0\gamma$) พลังงานสูง เกิดขึ้นจากการที่นิวเคลียสอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited State) ซึ่งมีพลังงานสูงเกินไป นิวเคลียสจึงปล่อยพลังงานออกมาเพื่อเปลี่ยนไปยังสถานะพลังงานที่ต่ำกว่า ซึ่งเขียนอธิบายการสลายตัวแบบแกมมาได้ดังนี้



จากสมบัติของอนุภาคทั้งสามนั้นสามารถสรุปความสามารถในการทะลุทะลวงได้ คือ

$$\gamma > \beta > \alpha$$

กฎทางฟิสิกส์เบื้องต้นที่นำมาใช้ในการคำนวณการสลายตัว คือ

- 1) กฎการอนุรักษ์ประจุ ($\Sigma Z_f = \Sigma Z_i$)
- 2) กฎการอนุรักษ์เลขมวล ($\Sigma A_f = \Sigma A_i$)
- 3) กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม ($\Sigma \vec{p}_f = \Sigma \vec{p}_i$ และ $\Sigma \vec{L}_f = \Sigma \vec{L}_i$)
- 4) กฎการอนุรักษ์พลังงาน ($\Sigma E_f = \Sigma E_i$)

ข้อสังเกต

รังสีที่แผ่ออกจากธาตุกัมมันตรังสี เป็นอนุภาคหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อรังสีแผ่ออกจากแหล่งกำเนิด จะถ่ายโอนพลังงานให้สิ่งแวดล้อม และเมื่อตกกระทบวัตถุใดวัตถุหนึ่ง พลังงานจากรังสีจะถ่ายโอนให้กับวัตถุนั้น ทำให้การเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุลหรืออะตอมของวัตถุ แต่ไม่ทำให้วัตถุนั้นหรืออากาศที่อยู่รอบๆ มีการปนเปื้อนรังสี

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

รังสีแอลฟามีมวลมากที่สุด เมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุต่างๆ จะสูญเสียพลังงานได้มากที่สุด จึงทะลุผ่านวัตถุได้น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับรังสีอื่น

รังสีบีตาเกิดจากการสลายของกัมมันตรังสี แต่รังสีแคโทด คือ ลำอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งด้วยความต่างศักย์ในหลอดรังสีแคโทด จึงมีพลังงานต่ำกว่ารังสีบีตา

รังสีส่วนใหญ่ที่แผ่จากธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสี คือ รังสีแอลฟา บีตา และแกมมา นอกจากนี้ยังมีรังสีชนิดอื่นๆ ได้อีก เช่น รังสีนิวตรอน รังสีโปรตอน เป็นต้น

การสลายตัวของนิวเคลียสนั้นเป็นไปแบบสุ่ม ทำให้ในบางครั้งการสลายตัวของนิวเคลียสอาจมีรูปแบบความน่าจะเป็นในการสลายตัวได้มากกว่าหนึ่งแบบ

อนุกรมการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี

ชื่อ	เลขมวล	นิวเคลียสเริ่มต้น	นิวเคลียสสุดท้าย	นิวเคลียสครึ่งชีวิตนานสุด	ค่าครึ่งชีวิตของนิวเคลียสครึ่งชีวิตนานสุด (ปี)
อนุกรมทอเรียม (Thorium Series)	$4n$	$^{232}_{90}\text{Th}$	$^{208}_{82}\text{Pb}$	$^{232}_{90}\text{Th}$	1.39×10^{10}
อนุกรมเนปทูเนียม (Neptunium Series)	$4n + 1$	$^{241}_{94}\text{Pu}$	$^{209}_{83}\text{Bi}$	$^{237}_{93}\text{Np}$	2.25×10^6
อนุกรมยูเรเนียม (Uranium Series)	$4n + 2$	$^{238}_{92}\text{U}$	$^{206}_{82}\text{Pb}$	$^{238}_{92}\text{U}$	4.51×10^9
อนุกรมแอกทีเนียม (Actinium Series)	$4n + 3$	$^{235}_{90}\text{U}$	$^{207}_{82}\text{Pb}$	$^{235}_{92}\text{U}$	7.07×10^8



Problem 20.46

สำหรับปฏิกิริยา ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + X + 3.3 \text{ MeV}$ X คือ อนุภาคใด?

Answer : Neutron (${}^0_1\text{n}$)

Problem 20.47

จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ${}^{14}_7\text{N} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{15}_7\text{N} + X$ X คือ อนุภาคใด?

Answer : Positron (${}^0_1\text{e}$)

Problem 20.48

จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ $^{198}_{80}\text{Hg}(n,X)^{197}_{79}\text{Au}$ X คือ อนุภาคใด?

Answer : Deuteron (^2_1H)

Problem 20.49

ในการสลายตัวของ $^{14}_6\text{C}$ ได้มีการปล่อยอิเล็กตรอนออกมา 1 ตัว นิวเคลียสใหม่จะมีประจุเป็นกี่เท่าของโปรตอน?

Answer : 7

Problem 20.50

จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + X$ X คือ อนุภาคใด?

Answer : Alpha (${}^4_2\text{He}$)

Problem 20.51

นิวเคลียสของเรเดียม-226 (${}_{88}^{226}\text{Ra}$) มีการสลายตัวโดยการปล่อยอนุภาคแอลฟา 1 ตัว และรังสีแกมมาออกมา จะทำให้เรเดียมกลายเป็นธาตุใด?

Answer : Radon (${}_{86}^{222}\text{Rn}$)

Problem 20.52

จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow \text{X} + 2\alpha + 2\beta^- + 2\gamma$ ธาตุ X มีจำนวนโปรตอนและนิวตรอนเป็นเท่าใด?

Answer : 90 protons and 140 Neutrons

Problem 20.53

เมื่อธาตุ ${}_{83}^{214}\text{Bi}$ สลายตัวให้รังสีเบตาลบ นิวเคลียสของธาตุใหม่เป็นธาตุใด?

Answer : Polonium (${}_{84}^{230}\text{Po}$)

Problem 20.54

ธาตุไอโซโทป $^{238}_{92}\text{Pb}$ สลายตัวแบบอนุกรมได้อนุภาคแอลฟา รวม 8 ตัว อนุภาคเบตา รวม 6 ตัว และได้ไอโซโทปของธาตุใหม่อีก 1 ตัว ไอโซโทปของธาตุใหม่มีเลขมวลและเลขอะตอมเป็นเท่าใด?

Answer : A = 206 and Z = 82

Problem 20.55

จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ $^{210}_{82}\text{Pb} \xrightarrow{\beta, \gamma} \text{X} \xrightarrow{\beta} \text{Y} \xrightarrow{\alpha, \gamma} \text{Z}$ จำนวนนิวตรอนของไอโซโทปของธาตุ Z เป็นเท่าใด?

Answer : 124 Neutrons

Problem 20.56

ถ้าแผ่นตะกั่วหนึ่งแผ่นสามารถกันรังสีแกมมาไม่ให้ผ่านมาได้ 90% ถ้านำแผ่นตะกั่วมาซ้อนกันรังสีแกมมาจำนวน 3 แผ่น ปริมาณรังสีแกมมาจะผ่านไปได้กี่เปอร์เซ็นต์?

Answer : 0.1%

Problem 20.57

จงคำนวณพลังงานน้อยที่สุดในการแยกนิวตรอนออกจากนิวเคลียสของ $^{43}_{20}\text{Ca}$ ในหน่วย MeV เมื่อ มวลนิวเคลียสของ $^{42}_{20}\text{Ca}$ เท่ากับ 41.958618u และ มวลนิวเคลียสของ $^{43}_{20}\text{Ca}$ เท่ากับ 42.958767u?

Answer : 7.93 MeV

Problem 20.58

จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow \text{X} + {}^1_0\text{n}$

กำหนดให้ มวลของ ${}^1_1\text{H} = 1.0078\text{u}$

 มวลของ ${}^1_0\text{n} = 1.0087\text{u}$

 มวลของ ${}^2_1\text{H} = 2.0141\text{u}$

 มวลของ ${}^3_1\text{H} = 3.0160\text{u}$

 มวลของ ${}^4_2\text{He} = 4.0026\text{u}$

 มวลของ ${}^5_2\text{He} = 5.0123\text{u}$

ธาตุ X คือ ธาตุใด และปฏิกิริยาดังกล่าวจะปลดปล่อยพลังงานออกมาเท่าใด?

Answer : 17.51 MeV

Problem 20.59

ในปฏิกิริยา ${}^7_3\text{Li}(p, \alpha){}^4_2\text{He}$ กำหนดให้มวลของ ${}^7_3\text{Li}$, ${}^4_2\text{He}$ และ ${}^1_1\text{H}$ เท่ากับ 7.01600u, 4.00260u และ 1.00794u ตามลำดับ พลังงานจากปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นเท่าใด?

Answer : 17.4563 MeV

Problem 20.60

จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ${}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He}$ เกิดพลังงานขึ้น 2.790 MeV ถ้ามวลของ ${}^{10}_5\text{B}$, ${}^1_0\text{n}$ และ ${}^4_2\text{He}$ เท่ากับ 10.01294u, 1.00866u และ 4.00260u ตามลำดับ มวลของ ${}^7_3\text{Li}$ เป็นเท่าใด?

Answer : 7.016u

Problem 20.61

จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n}$ ถ้าอนุภาคแอลฟาที่มีพลังงานจลน์ 10.0 MeV นิวตรอนจะมีพลังงานจลน์เท่าใด (กำหนดให้มวลของ ${}^9_4\text{Be}$, ${}^4_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}$ และ ${}^1_0\text{n}$ เท่ากับ 9.012186u, 4.002604u, 12.000000u และ 1.008665u ตามลำดับ)?

Answer : 15.7 MeV

Problem 20.62

จากปฏิกิริยา ${}^4_2\text{He} + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H} + (-1.19 \text{ MeV})$ มวลหลังปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงเท่าใด?

Answer : เพิ่มขึ้น 0.00128u

Problem 20.63

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันในดวงอาทิตย์เป็นไปตามสมการ $4\text{}^1_1\text{H} \rightarrow \text{}^4_2\text{He} + 2\text{}^0_1\text{e}$
 พลังงานที่ได้จากไฮโดรเจน 1.00 kg เป็นเท่าใด (กำหนดให้มวลของ $\text{}^1_1\text{H}$, $\text{}^4_2\text{He}$
 และ $\text{}^0_1\text{e}$ เท่ากับ 1.00782u, 4.00260u และ 0.00055u ตามลำดับ)?

Answer : 627 MJ

Problem 20.64 Challenge

จากสมการการสลายตัว ${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + {}_2^4\text{He}$ เมื่อมวลของ ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ เท่ากับ 226.025410u, มวลของ ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ เท่ากับ 222.017578u และ มวลของ ${}_2^4\text{He}$ เท่ากับ 4.002603u ถ้าเดิม ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ อยู่นิ่งๆ จงหาพลังงานจลน์ของอนุภาคแอลฟา หลังการสลายตัวดังกล่าว?

Answer : 4.78 MeV

Problem 20.65 Challenge

นิวเคลียสของ $^{210}_{84}\text{Po}$ ซึ่งมีมวล 209.982857u สลายตัวให้อนุภาคแอลฟาซึ่งมีมวล 4.002603u ถูกใช้ในการผลิตพลังงานให้กับยานอวกาศ ถ้านำ $^{210}_{84}\text{Po}$ จำนวน 0.155 kg มาใช้เป็นเชื้อเพลิง จงหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ยานอวกาศได้รับตอนเริ่มต้น เมื่อประสิทธิภาพจากเชื้อเพลิง เท่ากับ 1.00% , ค่าครึ่งชีวิตของ $^{210}_{84}\text{Po}$ เท่ากับ 138.38 วัน และมวลนิวเคลียสของ $^{206}_{82}\text{Pb}$ เท่ากับ 205.974449u ?

Answer : 223 W

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ (Nuclear Reaction)



ปฏิกิริยานิวเคลียร์ (Nuclear Reaction)

นิวเคลียร์ฟิชชัน (Nuclear Fission) คือ การแตกตัวของนิวเคลียสธาตุหนักกว่าเปลี่ยนไปเป็นนิวเคลียสธาตุเบากว่า

นิวเคลียร์ฟิวชัน (Nuclear Fusion) คือ การรวมตัวของนิวเคลียสธาตุเบากว่าเปลี่ยนไปเป็นนิวเคลียสธาตุหนักกว่า

ข้อสังเกต

นิวตรอนที่ทำให้เกิดฟิชชันมีพลังงานต่ำ เรียกว่า Slow Neutron หรือ Thermal Neutron

ฟิชชันเกิดขึ้นเมื่อ นิวตรอนที่มีพลังงานต่ำเคลื่อนที่ไปพบกับนิวเคลียส ทำให้นิวเคลียสดูดซับนิวตรอนไว้ กลายเป็นนิวเคลียสที่ไม่เสถียร จึงเกิดการแยกออกจากกัน

ปฏิกิริยาลูกโซ่เกิดขึ้นได้ เมื่อนิวตรอนจากฟิชชันครั้งแรกถูกหน่วงให้มีความเร็วลดลงเป็นนิวตรอนพลังงานต่ำ แล้วเคลื่อนที่ไปพบกับนิวเคลียสอื่นๆ ของธาตุหนักที่อยู่รอบๆ ทำให้เกิดฟิชชันครั้งต่อไป

มวลรวมของอนุภาคต่างๆ หลังเกิดฟิวชันน้อยกว่ามวลรวมก่อนเกิดฟิวชัน เพราะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมา

มีบางกรณีที่ฟิวชันให้พลังงานต่อมวลน้อยกว่าฟิชชัน

U-238 เป็นไอโซโทปของยูเรเนียมที่พบได้มากที่สุดในธรรมชาติ (ประมาณ 99.3% ของยูเรเนียมทั้งหมดที่พบ) ซึ่งเป็นไอโซโทปที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาฟิชชัน

U-235 ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้ จะต้องถูกทำการเสริมสมรรถนะ (Enrichment) เพื่อเพิ่มความเข้มข้น เช่น เตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์จะใช้ความเข้มข้นของ

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

U-235 ที่ประมาณ 3-5% แต่ระเบิดนิวเคลียร์จะต้องใช้ความเข้มข้นของ U-235 ที่ประมาณ 90%

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์สามารถสร้างและควบคุมปฏิกิริยาฟิชชันให้เกิดขึ้นในอัตราที่เหมาะสม สามารถถ่ายโอนพลังงานนิวเคลียร์ให้กับน้ำ ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงจนกลายเป็นไอน้ำ ซึ่งจะถูกนำไปใช้หมุนกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับการผลิตไฟฟ้าต่อไป

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในปัจจุบันแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบน้ำความดันสูง (Pressurized Water Reactor : PWR) โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบน้ำเดือด (Boiling Water Reactor : BWR) และโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบน้ำมวลหนักความดันสูง (Pressurized Heavy Water Reactor : PHWR)

น้ำหรือไอน้ำที่ปล่อยออกจากโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ไม่มีสารกัมมันตรังสีปนเปื้อน เพราะมาจากส่วนระบายความร้อนของโรงไฟฟ้าซึ่งไม่มีการสัมผัสกับสารกัมมันตรังสี

รังสีที่ใช้ตรวจวินิจฉัยหรือรักษาโรค ถ่ายโอนพลังงานให้กับส่วนของร่างกายที่ถูกฉาย เมื่อหยุดฉายรังสีจะไม่มีรังสีตกค้างในร่างกาย

การหาอายุของวัตถุโบราณที่มีซากสิ่งมีชีวิตประกอบโดยใช้วิธีการหาปริมาณของ คาร์บอน-14 สามารถใช้ได้กับวัตถุที่มีซากสิ่งมีชีวิตเป็นส่วนประกอบที่มีอายุไม่เกิน 70,000 ปี สำหรับการหาอายุของหินจะใช้วิธีการหาปริมาณของไอโซโทปกัมมันตรังสีชนิดอื่น เช่น โพแทสเซียม หรือ รูบิเดียม เป็นต้น

การปรับปรุงพันธุ์พืชด้วยวิธีการฉายรังสีอาจทำให้พันธุ์พืชมีลักษณะและสมบัติทั้งดีและไม่ดี จำเป็นต้องมีการคัดเลือกเพื่อให้ได้เฉพาะพันธุ์ที่ต้องการ



ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

อันตรกิริยา (Interaction) ของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอม

การกระเจิง (Scattering) คือ การที่นิวตรอนเข้าชนนิวเคลียสของอะตอม ทำให้นิวตรอนเสียพลังงานบางส่วน แต่นิวตรอนยังคงเคลื่อนที่ต่อไปได้ โดยทิศทาง การเคลื่อนที่ของนิวตรอนอาจมีการเปลี่ยนแปลงหลังจากการชนดังกล่าว

การจับ (Capture) คือ การที่นิวตรอนถูกนิวเคลียสของอะตอมจับเข้าไป รวมตัวในนิวเคลียสนั้น ทำให้อะตอมดังกล่าวเปลี่ยนไอโซโทป

ฟิชชัน (Fission) คือ การที่นิวตรอนถูกนิวเคลียสของอะตอมจับเข้าไปรวม ตัวในนิวเคลียสนั้น แต่นิวเคลียสของไอโซปใหม่ที่เกิดขึ้นไม่มีเสถียรภาพเพียงพอ จึงเกิดนิวเคลียร์ฟิชชัน

ระดับความรุนแรงของอุบัติเหตุทางรังสีในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

ทบวงพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency หรือ IAEA) ได้จัดทำมาตรฐานระหว่างประเทศว่าด้วยเหตุการณ์ทาง นิวเคลียร์ (International Nuclear Event Scale หรือ INES) 8 ระดับ ดังนี้

ระดับ 0 การเบี่ยงเบน (Deviation) คือ เหตุการณ์ที่คาดเคลื่อนเล็กน้อย จากการเดินเครื่องโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ตามปกติ ไม่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัย ต่างๆ

ระดับ 1 เหตุผิดปกติ (Anomaly) คือ เหตุการณ์ที่แตกต่างจากเงื่อนไข ตามที่อนุญาตให้เดินเครื่องโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โดยไม่มีผลกระทบต่อความปลอดภัย ไม่มีการปนเปื้อนของสารกัมมันตรังสี หรือผู้ปฏิบัติงานไม่ได้รับปริมาณรังสีเกินกำหนด

ระดับ 2 เหตุขัดข้อง (Incident) คือ เหตุการณ์ซึ่งส่งผลกระทบด้านความ ปลอดภัย แต่ระบบการป้องกันอื่นๆ ยังคงสามารถควบคุมสภาวะผิดปกติอื่นๆ ได้ และ/หรือเหตุการณ์ที่ทำให้ผู้ปฏิบัติงานได้รับรังสีเกินกำหนด และ/หรือเหตุการณ์ที่ ทำให้เกิดการแพร่กระจายของสารกัมมันตรังสีภายในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ซึ่งไม่ได้รับ การออกแบบรับรองไว้ และต้องดำเนินการมาตรการแก้ไข

ระดับ 3 เหตุขัดข้องรุนแรง (Serious Incident) คือ เหตุการณ์ที่ใกล้ต่อ การเกิดอุบัติเหตุ ซึ่งเหลือเพียงระบบป้องกันขั้นสุดท้ายที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายของ

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

สารกัมมันตรังสีภายในบริเวณโรงไฟฟ้านิวเคลียร์อย่างรุนแรง หรือผู้ปฏิบัติงานได้รับปริมาณรังสีในระดับที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ และ/หรือมีการแพร่กระจายสารกัมมันตรังสีปริมาณเล็กน้อยออกสู่ภายนอกโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์ (กลุ่มบุคคลที่ล่อแหลมต่อเหตุการณ์ได้รับปริมาณรังสีในช่วงน้อยกว่า 0.1 mSv)

ระดับ 4 อุบัติเหตุที่ไม่มีนัยสำคัญต่อภายนอกโรงไฟฟ้า (Accident Without Significant Off-Site Risk) คือ อุบัติเหตุที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อสถานปฏิบัติการนิวเคลียร์ในระดับสำคัญ เช่น แกนเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์หลอมละลายบางส่วน และ/หรือผู้ปฏิบัติงานได้รับปริมาณรังสีเกินเกณฑ์กำหนดทำให้มีโอกาสเสียชีวิตจากเหตุการณ์ดังกล่าวได้สูง และ/หรือมีการแพร่กระจายของสารกัมมันตรังสีออกสู่ภายนอกโรงไฟฟ้า ส่งผลให้บุคคลที่ล่อแหลมต่อเหตุการณ์ได้รับปริมาณรังสี ในช่วง 2 - 3 mSv

ระดับ 5 อุบัติเหตุที่มีผลกระทบต่อภายนอกโรงไฟฟ้า (Accident With Off-Site Risk) คือ อุบัติเหตุที่ก่อให้เกิดความเสียหายรุนแรงต่อสถานปฏิบัติการนิวเคลียร์ และ/หรือมีการแพร่กระจายของสารกัมมันตรังสีออกสู่ภายนอกโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในระดับเทียบเท่ากับกัมมันตภาพของ I-131 ในช่วง 100-1,000 TBq ทำให้ต้องมีการใช้แผนฉุกเฉินบางส่วน

ระดับ 6 อุบัติเหตุระดับรุนแรง (Serious Accident) คือ อุบัติเหตุที่ก่อให้เกิดการแพร่กระจายของสารกัมมันตรังสีออกสู่ภายนอกโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในปริมาณมากในระดับเทียบเท่ากับกัมมันตภาพของ I-131 ในช่วง 100-1,000 TBq และต้องดำเนินการตามแผนฉุกเฉินเต็มรูปแบบ

ระดับ 7 อุบัติเหตุระดับรุนแรงที่สุด (Major Accident) คือ อุบัติเหตุที่ก่อให้เกิดการแพร่กระจายของสารกัมมันตรังสีออกสู่ภายนอกโรงไฟฟ้าในปริมาณมหาศาลในระดับเทียบเท่ากับกัมมันตภาพของ I-131 มากกว่า 10,000 TBq มีผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย และสิ่งแวดล้อมอย่างกว้างขวาง ซึ่งเหตุการณ์ที่รุนแรงในระดับที่ 7 เกิดขึ้น 2 ครั้ง คือ ในปี 1986 โรงไฟฟ้านิวเคลียร์เชอร์โนบีล สหภาพโซเวียต ปริมาณรังสีรั่วไหลมากกว่า 5,300 PBq และในปี 2011 โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟูกูชิม่าไดอิจิ ญี่ปุ่น ปริมาณรังสีรั่วไหลมากกว่า 520 PBq

ฟิสิกส์อนุภาค (Particle Physics)

ฟิสิกส์ในยุคใหม่ได้อธิบายพฤติกรรมของแรงในธรรมชาติ ในมุมมองของการแลกเปลี่ยนอนุภาคสนามของแรง ดังตารางด้านล่าง

Interaction	Relative Strength	Range of Force	Mediating Field Particle	Mass of Field Particle (GeV/c ²)
Nuclear	1	≈ 1 fm	Gluon	0
Electromagnetic	10 ⁻²	∞	Photon	0
Weak	10 ⁻⁵	≈ 10 ⁻³ fm	W [±] , Z ⁰ bosons	80.4, 80.4, 91.2
Gravitational	10 ⁻³⁹	∞	Graviton	0

ในช่วงทศวรรษ 1920s Paul Dirac ได้พัฒนาทฤษฎีควอนตัมเชิงสัมพัทธภาพของอิเล็กตรอน ซึ่งอธิบายต้นกำเนิดของสปินและโมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอนได้สำเร็จ แต่สมการคลื่นเชิงสัมพัทธภาพนั้นต้องการคำตอบของพลังงานเชิงลบ นำไปสู่สมมติฐานของการมีอยู่ของปฏิยานุภาค (Antiparticles) ซึ่งมีมวลและขนาดของประจุเท่ากับอนุภาค แต่มีชนิดของประจุตรงข้ามกัน (ยกเว้น โฟตอน (Photon) และ ไพออน (Pion) ที่เป็นกลางทางไฟฟ้า)

ในปี 1932 Carl Anderson พบว่าคู่อิเล็กตรอน-โพสิตรอน (Electron-Positron) จะถูกสร้างขึ้นจากโฟตอน (Pair Production) และสามารถเกิดกระบวนการย้อนกลับได้ (Annihilation) โดยคู่อิเล็กตรอน-โพสิตรอน จะทำลายกันเองกลายเป็นโฟตอนสองอนุภาคซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกันตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม นั่นเป็นการค้นพบปฏิยานุภาคของอนุภาคที่มีประจุ



ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

ในปี 1935 Hideki Yukawa ได้เสนอว่ามียูภาคใหม่ซึ่งเกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างนิวคลีออนในนิวเคลียสทำให้เกิดแรงนิวเคลียร์ขึ้น โดยเขาได้ทำนายว่าอนุภาคนี้จะมีมวลประมาณ 200 เท่าของมวลอิเล็กตรอน เนื่องจากอนุภาคดังกล่าวมีมวลระหว่างอิเล็กตรอนและโปรตอน จึงเรียกอนุภาคนี้ว่า “เมซอน (Mesons)”

$$\begin{aligned}\text{จาก} \quad \Delta E \Delta t &\geq \frac{\hbar}{2} \\ (mc^2) \left(\frac{d}{c}\right) &\geq \frac{\hbar}{2} \\ mc^2 &\geq \frac{\hbar c}{2d}\end{aligned}$$

เมื่อพิจารณาระยะของแรงนิวเคลียร์ $d \approx 10^{-15} \text{ m}$

$$\begin{aligned}\text{จะได้} \quad mc^2 &\approx 1.6 \times 10^{-11} \text{ J} \\ mc^2 &\approx 100 \text{ MeV} \\ m &\approx 100 \text{ MeV}/c^2 \approx 200m_e\end{aligned}$$

ในปี 1937 Carl Anderson และเพื่อนร่วมงานได้ค้นพบอนุภาคซึ่งมีมวลประมาณ 207 เท่าของมวลอิเล็กตรอน ซึ่งเชื่อกันว่าเป็นอนุภาคเมซอน (Mesons) แต่การทดลองในเวลาต่อมาแสดงให้เห็นว่าอนุภาคดังกล่าวมีอันตรกิริยากับสสารน้อยมากจึงไม่สามารถเป็นอนุภาคสนามสำหรับแรงนิวเคลียร์ได้

ในปี 1947 ได้มีการยืนยันการค้นพบ ไพเมซอน (Pi Meson ; π) หรือเรียกว่า ไพออน (Pion ; π) และเรียกอนุภาคที่ Carl Anderson ในปี 1937 ว่ามิวออน (Muon ; μ)

ไพออน นั้นมี 3 ชนิด คือ π^+ (มีมวล $139.6 \text{ MeV}/c^2$), π^- (เป็นปฏิยานุภาคของ π^+) และ π^0 (มีมวล $135.0 \text{ MeV}/c^2$)

มิวออน นั้นมี 2 ชนิด คือ μ^- และ μ^+ (เป็นปฏิยานุภาคของ μ^-)

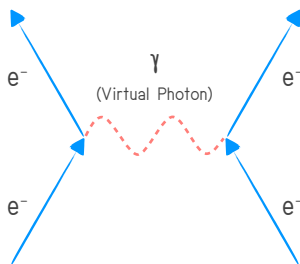
ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

ไพออนและมิวออน เป็นอนุภาคที่ไม่เสถียร เช่น π^- มีอายุประมาณ 2.6×10^{-8} s ก่อนจะสลายตัวตามสมการ $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$ และ μ^- มีอายุประมาณ 2.2×10^{-6} s ก่อนจะสลายตัวตามสมการ $\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$ เป็นต้น

ในปี 1948 Richard Feynman ได้เสนอแผนภาพเพื่ออธิบายพฤติกรรม (Behavior) และอันตรกิริยา (Interaction) ของอนุภาค โดยแกนตั้งของแผนภาพเป็นเวลา และแกนนอนเป็นตำแหน่ง เรียกแผนภาพดังกล่าวว่า “Feynman Diagram” ซึ่งใช้สัญลักษณ์แทนอนุภาค ดังนี้

เฟอร์มิออน (Fermion)	
โฟตอน (Photon)	
กลูออน (Gluon)	
โบซอน (Boson)	

เช่น อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน โดยมีโฟตอน (อนุภาคสนาม) เป็นอนุภาคตัวกลางในการส่งแรงแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างคู่อิเล็กตรอน ดังรูปด้านล่าง



อันตรกิริยาในแผนภาพเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน ทำให้เส้นทางของอิเล็กตรอนเปลี่ยนทิศทางอย่างไม่ต่อเนื่อง ต่างจากเส้นทางจริงซึ่งเป็นเส้นทางโค้งนั้นเพราะมีการแลกเปลี่ยนอนุภาคสนามอย่างต่อเนื่องเป็นจำนวนมาก

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

เมื่อพิจารณาเริ่มต้นที่อิเล็กตรอนทั้งสองตัวอยู่นิ่งๆ ระบบนี้จะมีพลังงานในตอนต้นเป็น $E_i = 2m_e c^2$ ในขณะที่เกิดอันตรกิริยาระบบนี้จะมีพลังงานเป็น $E_f = 2m_e c^2 + hf$ (อาจจะมีการเพิ่มของพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นมาได้อีก) นั่นดูเหมือนว่าจะเป็นกระบวนการละเมิดกฎการอนุรักษ์พลังงาน แต่เมื่อพิจารณาว่าโฟตอนในอันตรกิริยาดังกล่าวมีอายุสั้นมากๆ (Δt น้อยมากๆ) ตามหลักความไม่แน่นอน (The Uncertainty Principle) จะได้

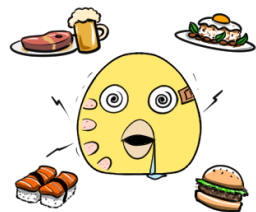
$$\Delta E \geq \frac{\hbar}{2\Delta t}$$

$$\Delta E > hf$$

$$\Delta E > E_\gamma$$

นั่นคือ ความไม่แน่นอนของพลังงานในระบบมากกว่าพลังงานของโฟตอนในอันตรกิริยานี้ การมีอยู่ของโฟตอนจึงไม่ได้ขัดกับกฎการอนุรักษ์พลังงาน

แนวคิดดังกล่าวได้ปฏิวัติวงการฟิสิกส์เป็นอย่างมาก เช่น การอธิบายว่าระบบซึ่งมีนิวคลีออน (Nucleons) สองตัว สามารถเปลี่ยนเป็นนิวคลีออนสองตัวกับโฟตอนหนึ่งตัวได้ เมื่อระบบนั้นกลับสู่สถานะเดิมภายในระยะเวลาที่น้อยมากๆ (คำอธิบายนี้เป็นแบบจำลองเก่าซึ่งพิจารณาโฟตอนเป็นอนุภาคสนามสำหรับแรงนิวเคลียร์ ในแบบจำลองปัจจุบันได้พิจารณา กลูออน (Gluon) เป็นอนุภาคสนามสำหรับแรงนิวเคลียร์) ความผันผวนทางพลังงานดังกล่าวเป็นผลจากการรวมกันของกลศาสตร์ควอนตัม (Quantum Mechanics) และทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ (Special Relativity)



ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

อนุภาคทั้งหมดนอกเหนือจากอนุภาคสนามสามารถแบ่งกว้างๆ ได้สองประเภท คือ แฮดรอน (Hadrons) และเลปตอน (Leptons) เกณฑ์สำหรับการแยกอนุภาคเหล่านี้เป็นประเภทต่างๆ คือ อนุภาคมีปฏิสัมพันธ์กันอันตรกิริยาแบบเข้มหรือไม่ (แรงนิวเคลียร์ระหว่างนิวคลีออนในนิวเคลียสเป็นการแสดงออกเฉพาะของอันตรกิริยาแบบเข้ม แต่เราจะใช้คำว่าแรงเข้มเพื่ออ้างถึงอันตรกิริยาใดๆ ระหว่างอนุภาคที่ประกอบด้วยควาร์ก (Quark))

แฮดรอน (Hadrons) คือ อนุภาคที่โต้ตอบกันด้วยแรงเข้ม (รวมถึงแรงพื้นฐานอื่นๆ) มี 2 ประเภท คือ เมซอน (Mesons) และแบรีออน (Baryons) ซึ่งมีมวลและสปินแตกต่างกัน

เมซอน (Mesons) ทั้งหมดมีสปินเป็นศูนย์หรือเป็นจำนวนเต็ม (0 หรือ 1) และ เมซอนทั้งหมดสลายตัวเป็นอิเล็กตรอน (Electron) โพสิตรอน (Positron) นิวตริโน (Neutrino) และโฟตอน (Photon) (ลักษณะสปิน 0 นี้บ่งชี้ว่าอนุภาคที่ค้นพบโดย Carl Anderson ในปี 1937 คือ มิวออนนั้นไม่ใช่เมซอนเนื่องจากมิวออนมีสปิน $\frac{1}{2}$ และจัดอยู่ในประเภทเลปตอน)

แบรีออน (Baryons) มีมวลเท่ากับหรือมากกว่ามวลของโปรตอน (ในภาษากรีก Baryon แปลว่า “หนัก”) และมีสปินเป็นจำนวนครึ่งเสมอ ($\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$) แบรีออนทั้งหมด (ยกเว้นโปรตอน) จะสลายตัวในลักษณะที่สิ้นสุดท้ายจะมีโปรตอนรวมอยู่ด้วย ตัวอย่างเช่น แบรีออนที่เรียกว่าไฮเปอร์รอน (Hyperon) Ξ^0 สลายตัวไปเป็นแบรีออน Λ^0 ในเวลาประมาณ 10^{-10} s จากนั้น Λ^0 จะสลายตัวไปเป็นโปรตอน และ π^- ในเวลาประมาณ 3×10^{-10} s (ปัจจุบันเชื่อกันว่าแฮดรอนไม่ใช่อนุภาคมูลฐาน แต่ประกอบด้วยหน่วยพื้นฐานกว่าที่เรียกว่าควาร์ก (Quark))



ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

เลปตอน (Leptons) (ในภาษากรีก Leptos แปลว่า “เล็ก” หรือ “เบา”) คือ อนุภาคที่ไม่ได้ตอบกันด้วยแรงเข้ม และมีสปินเป็น $\frac{1}{2}$ จำนวนของเลปตอนที่เรา รู้จักนั้นน้อยมาก ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์เชื่อว่าเลปตอนมีอยู่เพียง 6 ชนิด ได้แก่ อิเล็กตรอน (e^-) มิวออน (μ^-) ทาว (τ^-) และนิวตริโนที่เกี่ยวข้องกับแต่ละตัว (ν_e , ν_μ และ ν_τ) และเลปตอนทั้ง 6 ตัวมีปฏิยานุภาค (Antiparticles) เลปตอนนั้นดูเหมือนจะเป็นอนุภาคมูลฐานอย่างแท้จริง (ไม่มีโครงสร้างและมีลักษณะเป็นจุด ซึ่งต่างจากแฮดรอน)

การศึกษาปัจจุบันระบุว่านิวตริโนมีมวลน้อยมากแต่ไม่เป็นศูนย์ นั้นส่งผลให้นิวตริโนไม่สามารถเดินทางด้วยความเร็วแสงได้ และเนื่องจากมีนิวตริโนจำนวนมากมวลรวมของนิวตริโนอาจเพียงพอที่จะทำให้สสารทั้งหมดในจักรวาลยุบตัวลงเป็นจุดเดียวในที่สุด ซึ่งอาจจะบิดและสร้างจักรวาลใหม่ขึ้นมาโดยสิ้นเชิง ซึ่งเป็นประเด็นที่น่าสนใจและต้องพิจารณากันต่อ

เลขแบรียออน (Baryon Number) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อใดก็ตามที่แบรียออนถูกสร้างขึ้นในการสลายตัวหรือปฏิกิริยานิวเคลียร์ แอนติแบรียออนก็จะถูกสร้างขึ้นด้วย ซึ่งสามารถวัดปริมาณได้โดยกำหนดหมายเลขควอนตัมให้กับอนุภาคแต่ละอนุภาค ซึ่งก็คือหมายเลขแบรียออน (B) โดยแบรียออนมี $B = +1$ และแอนติแบรียออนมี $B = -1$



กฎการอนุรักษ์หมายเลขแบรียออน (B)

“เมื่อใดก็ตามที่เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์หรือการสลายตัว ผลรวมของหมายเลขแบรียออนก่อนกระบวนการจะต้องเท่ากับผลรวมของหมายเลขแบรียออนหลังกระบวนการ”

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

หากเลขแบริออนได้รับการอนุรักษ์ โปรตอนจะต้องเสถียร เช่น การสลายตัวของโปรตอนเป็นโพซิตรอนและไพออนที่เป็นกลางจะเป็นไปตามการอนุรักษ์พลังงาน โมเมนตัม และประจุไฟฟ้า แต่การสลายตัวดังกล่าวไม่เคยถูกสังเกตพบมาก่อน ซึ่งกฎการอนุรักษ์เลขแบริออนจะไม่สอดคล้องกับการสลายตัวนี้ และในขณะนี้สามารถบอกได้เพียงว่าโปรตอนมีครึ่งชีวิตอย่างน้อย 10^{33} ปี (อายุโดยประมาณของจักรวาลคือ 10^{10} ปี) อย่างไรก็ตามบางทฤษฎีได้ทำนายว่าโปรตอนไม่เสถียร และตามทฤษฎีนี้เลขแบริออนไม่ได้รับการอนุรักษ์โดยสมบูรณ์

เลขเลปตอน (Lepton Number) มีกฎการอนุรักษ์สามข้อที่เกี่ยวข้องกับเลขเลปตอน (L_e , L_μ และ L_τ)



กฎการอนุรักษ์เลขเลปตอนของอิเล็กตรอน (L_e)

“เมื่อใดก็ตามที่เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์หรือการสลายตัว ผลรวมของเลขเลปตอนของอิเล็กตรอนก่อนกระบวนการจะต้องเท่ากับผลรวมของเลขเลปตอนของอิเล็กตรอนหลังกระบวนการ”

เลขเลปตอนของมิวออน (L_μ) และทาว (L_τ) มีการอนุรักษ์เช่นกัน

อิเล็กตรอนและนิวตริโนของอิเล็กตรอนจะมีเลขเลปตอนของอิเล็กตรอน $L_e = +1$ แอนติเลปตอน (Antilepton) e^+ และ $\bar{\nu}_e$ จะมีเลขเลปตอนของอิเล็กตรอน $L_e = -1$ และอนุภาคอื่นทั้งหมดจะมี $L_e = 0$ เช่น ในพิจารณาการสลายตัวของนิวตรอน $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

ก่อนการสลายตัวเลขเลปตอนของอิเล็กตรอน คือ $L_e = 0$ หลังจากการสลายตัว จะเป็น $L_e = 0 + 1 + (-1) = 0$ ดังนั้น เลขเลปตอนของอิเล็กตรอนจึงได้รับการอนุรักษ์ (ยังคงมีการอนุรักษ์เลขแบริออน คือ ก่อนการสลายตัว $B = +1$ และหลังการสลายตัว $B = 1 + 0 + 0 = +1$)

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

อนุภาคจำนวนมากที่ค้นพบในช่วงทศวรรษ 1950s เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างโพออนกับโปรตอนและนิวตรอนในชั้นบรรยากาศ ซึ่งอนุภาคกลุ่มนี้ ได้แก่ เคออน (K) แลมบ์ดา (Λ) และซิกมา (Σ) อนุภาคเหล่านี้มีลักษณะพิเศษทั้งในขณะที่ถูกสร้างขึ้นและในขณะที่สลายตัว ดังนั้น อนุภาคเหล่านี้จึงถูกเรียกว่า “อนุภาคแปลก (Strange Particles)”

ลักษณะพิเศษอย่างหนึ่งของอนุภาคแปลก คือ อนุภาคเหล่านี้มักจะถูกสร้างขึ้นเป็นคู่ ตัวอย่างเช่น เมื่อโพออนชนกับโปรตอน ผลลัพธ์ที่มีความเป็นไปได้สูง คือ อนุภาคแปลกที่เป็นกลางสองตัวจะถูกสร้างขึ้น



ปฏิกิริยาซึ่งเกิดอนุภาคแปลกเพียงตัวเดียวเท่านั้นไม่เคยเกิดขึ้น แม้ว่าไม่ขัดกับกฎการอนุรักษ์ที่ทราบก่อนหน้านี้ และพลังงานของโพออนจะเพียงพอที่จะเริ่มต้นปฏิกิริยาก็คตาม

ลักษณะพิเศษที่สองของอนุภาคแปลก คือ แม้ว่าจะเกิดจากปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับอันตรกิริยาแบบเข้มในอัตราสูง แต่อนุภาคเหล่านี้จะไม่สลายตัวเป็นอนุภาคที่โต้ตอบกันด้วยอันตรกิริยาแบบเข้มในอัตราสูง และอนุภาคเหล่านี้ยังสลายตัวช้ามาก ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของอันตรกิริยาแบบเข้ม ครึ่งชีวิตของอนุภาคเหล่านี้อยู่ในช่วง 10^{-10} s ถึง 10^{-8} s ในขณะที่อนุภาคอื่นๆ ส่วนใหญ่ที่โต้ตอบกันด้วยอันตรกิริยาแบบเข้มจะมีอายุสั้นกว่ามาก (ประมาณ 10^{-23} s)



ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

เพื่ออธิบายลักษณะที่ผิดปกติเหล่านี้ของอนุภาคแปลก จึงมีการนำเลขควอนตัมใหม่ที่เรียกว่า “ความแปลก (Strangeness ; S)” มาใช้พร้อมกับกฎการอนุรักษ์เลขความแปลก การผลิตอนุภาคแปลกเป็นคู่ๆ จะดำเนินการทางคณิตศาสตร์โดยกำหนด $S = +1$ ให้กับอนุภาคตัวหนึ่ง และ $S = -1$ ให้กับอีกตัวหนึ่ง และ $S = 0$ ให้กับอนุภาคที่ไม่แปลกทั้งหมด



กฎการอนุรักษ์เลขความแปลก (S)

“ในปฏิกิริยานิวเคลียร์หรือการสลายตัวที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาแบบเข้ม ผลรวมของเลขความแปลกก่อนกระบวนการจะต้องเท่ากับผลรวมของเลขความแปลกหลังกระบวนการ (ในกระบวนการที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาแบบอ่อนเลขความแปลกอาจไม่อนุรักษ์)”

เนื่องจากการสลายตัวของอนุภาคแปลกเกี่ยวข้องกับการสูญเสียอนุภาคแปลกหนึ่งอนุภาค จึงละเมิดกฎการอนุรักษ์เลขความแปลก ด้วยเหตุผลนี้จึงดำเนินไปอย่างช้าๆ ผ่านอันตรกิริยาแบบอ่อน



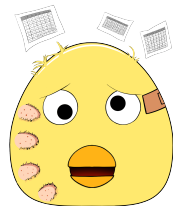
ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

นักฟิสิกส์สังเกตพบอนุภาคจำนวนมากมาย จนนักฟิสิกส์เรียกอนุภาคเหล่านี้ว่า “สวนสัตว์อนุภาค (Particle Zoo)” ซึ่งนำไปสู่คำถามที่น่าสนใจที่ว่า “เป็นไปได้หรือไม่ที่อนุภาคเหล่านี้จะเกิดขึ้นจากอนุภาคเพียงไม่กี่ชนิด?” จึงมีการเสนอมากมายเกี่ยวกับการจำแนกและจัดกลุ่มอนุภาคจากตารางด้านล่าง

	Name	Symbol	Anti particle	Mass (MeV/c ²)	B	L _e	L _μ	L _τ	S	Spin	Life time (s)
Leptons	Electron	e ⁻	e ⁺	0.511	0	+1	0	0	0	$\frac{1}{2}$	Stable
	Electron-Neutrino	ν _e	$\bar{\nu}_e$	< 2 eV/c ²	0	+1	0	0	0	$\frac{1}{2}$	Stable
	Muon	μ ⁻	μ ⁺	105.7	0	0	+1	0	0	$\frac{1}{2}$	2.20×10 ⁻⁶
	Muon-Neutrino	ν _μ	$\bar{\nu}_\mu$	< 0.17	0	0	+1	0	0	$\frac{1}{2}$	Stable
	Tau	τ ⁻	τ ⁺	1,784	0	0	0	+1	0	$\frac{1}{2}$	< 4×10 ⁻¹³
	Tau-Neutrino	ν _τ	$\bar{\nu}_\tau$	< 18	0	0	0	+1	0	$\frac{1}{2}$	Stable
Hadrons (Mesons)	Pion	π ⁺	π ⁻	139.6	0	0	0	0	0	0	2.60×10 ⁻⁸
		π ⁰	Self	135.0	0	0	0	0	0	0	0.83×10 ⁻¹⁶
	Kaon	K ⁺	K ⁻	493.7	0	0	0	0	+1	0	1.24×10 ⁻⁸
		K _S ⁰	$\bar{K}_S^0$	497.7	0	0	0	0	+1	0	0.89×10 ⁻¹⁰
		K _L ⁰	$\bar{K}_L^0$	497.7	0	0	0	0	+1	0	5.2×10 ⁻⁸
	Eta	η	Self	548.8	0	0	0	0	0	0	< 10 ⁻¹⁸
		η'	Self	958	0	0	0	0	0	0	2.2×10 ⁻²¹

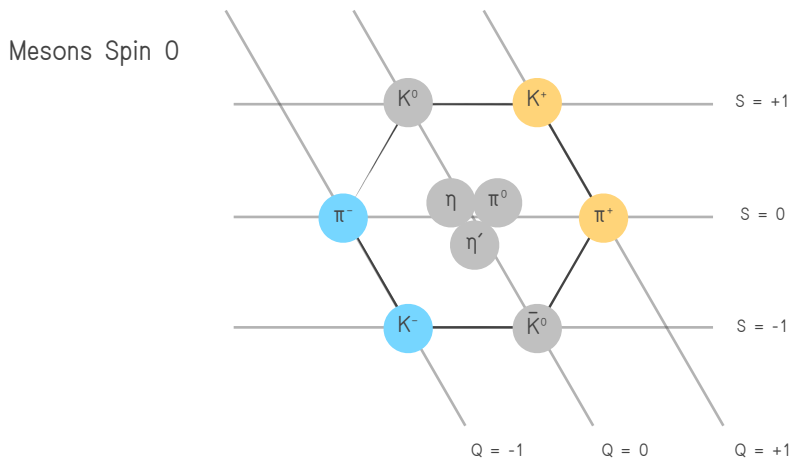
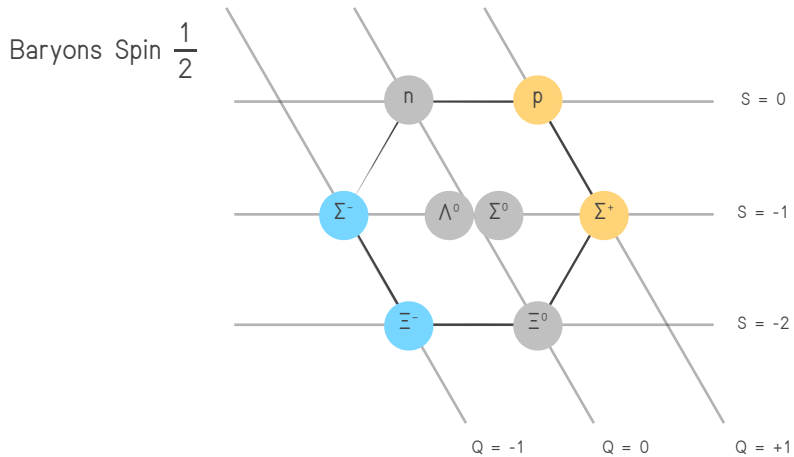
ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

Hadrons (Baryons)	Proton	p	$\bar{p}$	938.3	+1	0	0	0	0	$\frac{1}{2}$	Stable
	Neutron	n	$\bar{n}$	939.6	+1	0	0	0	0	$\frac{1}{2}$	614
	Lambda	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	1,115.6	+1	0	0	0	-1	$\frac{1}{2}$	2.6×10^{-10}
	Sigma	Σ^+	$\bar{\Sigma}^-$	1,189.4	+1	0	0	0	-1	$\frac{1}{2}$	0.80×10^{-10}
		Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	1,192.5	+1	0	0	0	-1	$\frac{1}{2}$	6×10^{-20}
		Σ^-	$\bar{\Sigma}^+$	1,197.3	+1	0	0	0	-1	$\frac{1}{2}$	1.5×10^{-10}
	Delta	Δ^{++}	$\bar{\Delta}^{--}$	1,230	+1	0	0	0	0	$\frac{3}{2}$	6×10^{-24}
		Δ^+	$\bar{\Delta}^-$	1,231	+1	0	0	0	0	$\frac{3}{2}$	6×10^{-24}
		Δ^0	$\bar{\Delta}^0$	1,232	+1	0	0	0	0	$\frac{3}{2}$	6×10^{-24}
		Δ^-	$\bar{\Delta}^+$	1,234	+1	0	0	0	0	$\frac{3}{2}$	6×10^{-24}
	Xi	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	1,315	+1	0	0	0	-2	$\frac{1}{2}$	2.9×10^{-10}
		Ξ^-	$\bar{\Xi}^+$	1,321	+1	0	0	0	-2	$\frac{1}{2}$	1.64×10^{-10}
	Omega	Ω^-	$\bar{\Omega}^+$	1,672	+1	0	0	0	-3	$\frac{3}{2}$	0.82×10^{-10}

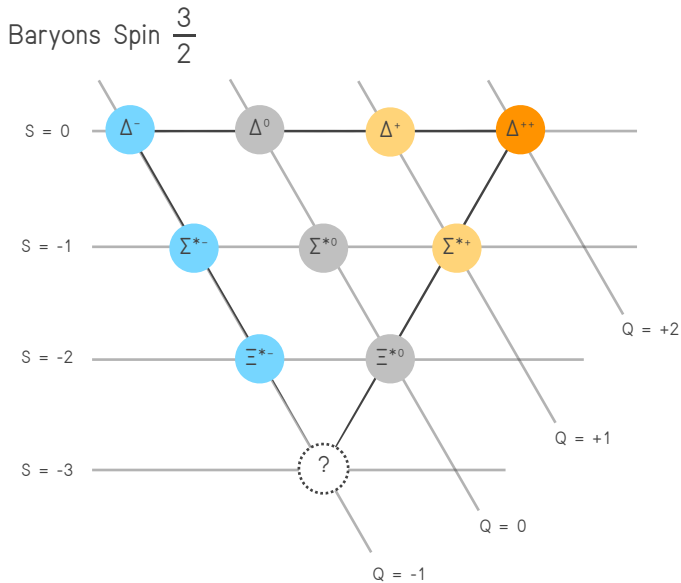


ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

ในปี 1961 Murray Gell-Mann และ Yuval Ne'eman ได้พัฒนารูปแบบการจัดกลุ่มอนุภาคโดยพิจารณาจากประจุและเลขความแปลก เรียกว่า “มรรคแปด (Eightfold Way)” ดังรูปด้านล่าง



ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)



จากแผนภาพด้านบน Gell-Mann ทำนายว่าจะต้องมีอนุภาคซึ่งมีสปิน $\frac{3}{2}$, ประจุ -1 เลขความแปลก -3 และมีพลังงานมวลนิ่งประมาณ 1,680 MeV เรียกว่า “โอเมกาลบ (Omega Minus ; Ω^-)”

ในปี 1963 Gell-Mann และ George Zweig เสนอแบบจำลองสำหรับโครงสร้างของแฮดรอนซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐานสองหรือสามองค์ประกอบที่เรียกว่า “ควาร์ก (Quark)” (Gell-Mann ยืมคำว่า Quark มาจากข้อความ “Three Quarks for Muster Mark” ในหนังสือ Finnegans Wake ของ James Joyce ในแบบจำลองของ Zweig เขาเรียกองค์ประกอบเหล่านี้ว่า “Aces”) ในแบบจำลองนี้มีควาร์กสามประเภท คือ Up (u), Down (d) และ Strange (s) เรียกควาร์กประเภทต่างๆ นี้ว่า “Flavors” แบบจำลองดังกล่าวถูกเรียกว่า “แบบจำลองควาร์กดั้งเดิม (The Original Quark Model)”



แบบจำลองควาร์กดั้งเดิม (The Original Quark Model)

- 1) เมซอนประกอบด้วยควาร์ก 1 ตัวและแอนตี้ควาร์ก 1 ตัว โดยเลขแบรีออนของเมซอนเท่ากับ 0
- 2) แบรีออนประกอบด้วยควาร์ก 3 ตัว
- 3) แอนตี้แบรีออนประกอบด้วยแอนตี้ควาร์ก 3 ตัว

ในปี 1964 นักวิทยาศาสตร์จาก The Brookhaven National Laboratory ได้พบอนุภาค Ω^- จากการวิเคราะห์ Bubble-Chamber Photographs และยืนยันสมบัติตามที่ Gell-Mann ทำนายไว้

ในปี 1967 เนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนบางอย่างในการทำนายอัตราการสลายตัวในบางการทดลอง นักฟิสิกส์หลายคนได้เสนอว่าหากมีเลปตอน 4 ประเภท (ตามความเข้าใจในเวลานั้น) ก็ควรมีควาร์กประเภทที่ 4 ตามความสมมาตรในธรรมชาติ และเรียกควาร์กนี้ว่า Charmed (c) ซึ่งมีประจุเป็น $+\frac{2e}{3}$ และได้เสนอเลขควอนตัมใหม่ขึ้นมา เรียกว่า “เสน่ห์ (Charm ; C)” โดยที่ Charmed มี $C = +1$, Anti-Charmed มี $C = -1$ และควาร์กอื่นๆ มี $C = 0$

เสน่ห์ (Charm) นั้นคล้ายกับ ความแปลก (Strangeness) คือ มีการอนุรักษ์เลขเสน่ห์ในอันตรกิริยาแบบเข้มและแม่เหล็กไฟฟ้า แต่อาจไม่มีการอนุรักษ์เลขเสน่ห์ในอันตรกิริยาแบบอ่อน



ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

ในปี 1974 Burton Richter จาก The Stanford Linear Accelerator (SLAC) และในปี 1976 Samuel Ting จาก The Brookhaven National Laboratory ได้พบหลักฐานการมีอยู่ของ Charmed Quark โดยการพบ Heavy Meson เรียกว่าอนุภาค J/ψ มีมวลประมาณ $3,100 \text{ MeV}/c^2$ ซึ่งมากกว่าเมซอนอื่น มีอายุนานกว่าอนุภาคอื่นๆ ที่มีอันตรกิริยาแบบเข้ม และอนุภาสดังกล่าวยังมีสมบัติสอดคล้องกับการรวมกันระหว่าง Charmed (c) กับ Anti-Charmed ($\bar{c}$)

เนื่องจากควาร์กมีสปิน $\frac{1}{2}$ เช่นเดียวกับอิเล็กตรอน จึงคาดว่าควาร์กจะต้องเป็นไปตามหลักการกีดกัน (The Exclusion Principle) แต่กลับมีบางกรณีที่มีการละเมิดหลักการดังกล่าว เช่น Ω^- (sss) ซึ่งประกอบด้วย Strange 3 ตัว หรือ Δ^{++} (uuu) ซึ่งประกอบด้วย Up 3 ตัว หรือ Δ^- (ddd) ซึ่งประกอบด้วย Down 3 ตัว เห็นได้ว่าอนุภาคเหล่านี้ประกอบด้วยควาร์ก 3 ตัว ซึ่งมีสปินเท่ากันจึงขัดกับหลักการกีดกัน (The Exclusion Principle)

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว นักฟิสิกส์ได้เสนอว่าควาร์กควรมีสมบัติเพิ่มเติมเรียกว่า ประจุสี (Color Charge) โดยกำหนดให้ควาร์กมีประจุสีเป็น Red, Green และ Blue ส่วน Anti-Quark มีประจุสีเป็น Antired, Antigreen และ Antiblue ประจุสีดังกล่าวทำหน้าที่เป็นเลขควอนตัม ดังนั้นเพื่อให้เป็นไปตามหลักการกีดกัน ควาร์กทั้งสามตัวในแบรีออนจะต้องมีสีที่แตกต่างกัน และทำให้ผลรวมของประจุสีเป็นกลาง (สีขาว)

ทฤษฎีที่อธิบายอันตรกิริยาระหว่างประจุสีเรียกว่า “Quantum Chromodynamics (QCD)” ทฤษฎีดังกล่าวอธิบายว่าควาร์กแต่ละตัวมีประจุสีซึ่งเปรียบได้กับประจุไฟฟ้า และแรงเข้มระหว่างควาร์กมักถูกเรียกว่าแรงสี (Color Force)



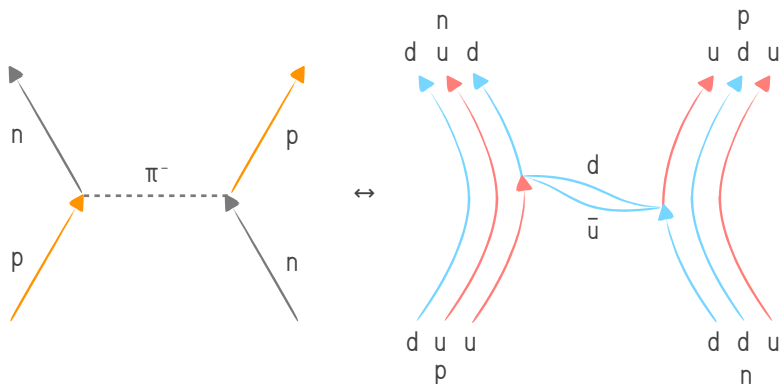
ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

แรงนิวเคลียร์เป็นผลจากแรงเข้มระหว่างควาร์ก โดยมีกลูออน (Gluons) เป็นตัวกลางของแรงเข้ม เมื่อควาร์กมีการคายหรือดูดกลืนกลูออน ประจุสีของควาร์กอาจเปลี่ยนไป

ประจุสีของควาร์กนั้นคล้ายกับประจุไฟฟ้า คือ ควาร์กที่มีประจุสีเหมือนกันจะผลักกัน ควาร์กที่มีประจุสีต่างกันจะดึงดูดกัน แต่ความเข้มของแรงจะน้อยกว่าการดึงดูดระหว่างควาร์กที่มีประจุสีตรงข้ามกัน

แรงนิวเคลียร์ระหว่างแฮดรอนซึ่งมีประจุเป็นกลางนั้นไม่ได้เป็นศูนย์ แต่มีขนาดเล็กน้อยมากๆ เนื่องจากยังคงมีแรงในลักษณะที่คล้ายกับแรงระหว่างขั้วคู่ไฟฟ้า (Electric Dipoles)

ตาม QCD สามารถใช้ Feynman Diagram อธิบายอันตรกิริยาทางนิวเคลียร์ในรูปแบบของควาร์กและกลูออนได้ ดังรูปด้านล่าง



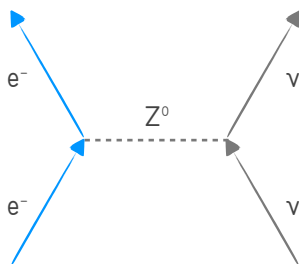
ในปี 1975 นักวิจัยจาก Stanford University ได้รายงานหลักฐานที่ชัดเจนสำหรับ Tau Lepton (τ) ซึ่งมีมวล $1,784 \text{ MeV}/c^2$ และเป็น Lepton ประเภทที่ 5 (มี Tau-Neutrino เป็น Lepton ประเภทที่ 6) นักฟิสิกส์จึงเสนอว่าควรมีควาร์กประเภทที่ 5 และ 6 เรียกว่า Top (t) และ Bottom (b)

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

ในปี 1977 นักวิจัยจาก The Fermi National Laboratory ภายใต้การดูแลของ Leon Leder-man รายงานการค้นพบ Υ Meson (Upsilon Meson) ซึ่งมีองค์ประกอบเป็น Bottom (b) กับ Anti-Bottom ($\bar{b}$)

ในปี 1979 Sheldon Glashow, Abdus Salam และ Steven Weinberg ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์จากการพัฒนาทฤษฎีที่รวมแรงแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงอ่อนเข้าด้วยกัน เรียกว่า “Electroweak Theory” โดยมีสมมติฐานที่ว่าแรงอ่อนและแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสองแง่มุมที่แตกต่างกันของแรงเดียวกัน เมื่ออนุภาคมีพลังงานสูงมาก (มากกว่า 246 GeV) แรงทั้งสองจะรวมเป็นแรงเดียวกัน ดังนั้นหากอุณหภูมิสูงพอ (ประมาณ 10^{15} K) แรงแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงอ่อนจะรวมกันเป็นแรงไฟฟ้าอ่อน (Electroweak Force) ทฤษฎีดังกล่าวได้ทำนายมวลของ W และ Z ที่ประมาณ 82 GeV/c² และ 93 GeV/c² ตามลำดับ

ในปี 1983 Carlo Rubbia ได้ค้นพบอนุภาค W^+ , W^- และ Z^0 ซึ่งเป็นอนุภาคตัวกลางของแรงอ่อน (Weak Force) จาก Proton-Antiproton Collider ตามแผนภาพด้านล่าง (Electron and a Neutrino Interacting)



ในปี 1995 นักวิจัยจาก The Fermi National Laboratory ได้ประกาศการค้นพบ Top ซึ่งมีมวล 173 GeV/c² และคาดว่าเป็นควาร์กประเภทสุดท้าย

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

ปัจจุบันนักฟิสิกส์เชื่อว่าควาร์กมี 6 ประเภท ดังตารางด้านล่าง

Name	Symbol	Spin	Charge	Baryon Number	Strangeness	Charm	Bottomness	Topness
Up	u	$\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
Down	d	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
Strange	s	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$	-1	0	0	0
Charmed	c	$\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	+1	0	0
Bottom	b	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	+1	0
Top	t	$\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	+1
Anti-Up	$\bar{u}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	0
Anti-Down	$\bar{d}$	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	0
Anti-Strange	$\bar{s}$	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	+1	0	0	0
Anti-Charmed	$\bar{c}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	0	-1	0	0
Anti-Bottom	$\bar{b}$	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	0	0	-1	0
Anti-Top	$\bar{t}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	-1

ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์เชื่อว่าอนุภาคมูลฐานที่แท้จริงมี 3 ประเภท ได้แก่ เลปตอน ควาร์ก และอนุภาคสนาม อนุภาคทั้ง 3 ประเภทนี้ยังจำแนกได้อีกว่าเป็นเฟอร์มิออน (Fermions) ซึ่งมีสปินเป็นจำนวนครึ่ง (เลปตอนและควาร์ก) และโบซอน (Boson) ซึ่งมีสปินเป็นจำนวนเต็ม (อนุภาคสนาม)

แรงอ่อนเชื่อกันว่าเกิดจากอนุภาคสนาม W^+ , W^- และ Z^0 ซึ่งอนุภาคเหล่านี้มีประจุแบบอ่อน (Weak Charge) คล้ายกับควาร์กที่มีประจุสี อนุภาคมูลฐานสามารถมีมวล ประจุไฟฟ้า ประจุสี และประจุแบบอ่อนได้

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

การรวมกันระหว่าง Electroweak Theory และ QCD เรียกว่า “แบบจำลองมาตรฐาน (The Standard Model)” แม้ว่าแบบจำลองมาตรฐานจะไม่รวมแรงโน้มถ่วง แต่ในปัจจุบันนักฟิสิกส์ได้รวมแรงโน้มถ่วงเข้าไปในแบบจำลองมาตรฐานด้วย เนื่องจากคาดหวังว่าในอนาคตจะมีการรวมแรงโน้มถ่วงเข้าในทฤษฎีได้สำเร็จ

แบบจำลองมาตรฐานยังไม่สามารถอธิบายปัญหาในจักรวาลได้ทั้งหมด เช่น เหตุใดโฟตอนจึงไม่มีมวล แต่ทำไม W และ Z กลับมีมวล ทั้งที่เป็นอนุภาคสนามเช่นเดียวกัน และแรงแม่เหล็กไฟฟ้ากับแรงอ่อนมีความคล้ายกันมากที่พลังงานสูง ทำให้เกิดคำถามถึงที่มาของมวล จากปัญหาดังกล่าวจึงมีการเสนออนุภาคที่เรียกว่า Higgs Boson ซึ่งเป็นกลไกในการทำลายสมมาตรของ Electroweak ทำให้แบบจำลองมาตรฐานได้มีการดัดแปลงเพื่อรวม Higgs Boson เพิ่มเข้าไปดังรูปด้านล่าง

Three Generations of Matter (Fermions)						Interactions/Force Carriers (Bosons)								
I			II			III		Vector Bosons		Scalar Bosons		Tensor Bosons		
mass	charge	spin	$\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.27 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.76 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.11 \text{ GeV}/c^2$	0	Strong	0	H	0	G	
			$+\frac{2}{3}$	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{2}{3}$	0	0	0						0
			$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$						2
Quarks	u	c	t	gluon	higgs	graviton								
	up	charm	top											
Leptons	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	0	0	Electromagnetic	1	photon	0	Z	0	W	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	0	0								0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$								1
Leptons	d	s	b											
	down	strange	bottom											
Leptons	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.777 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.188 \text{ GeV}/c^2$	0	0	Weak	1	Z boson	0	W	0	W	
	-1	-1	-1	0	0	0								0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$								1
Leptons	e	μ	τ											
	electron	muon	tau											
Leptons	$< 0.8 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.3692 \text{ GeV}/c^2$	± 1	± 1	Weak	1	W boson	0	W	0	W	
	0	0	0	0	0	0								0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$								1
Leptons	ν_e	ν_μ	ν_τ											
	electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino											
Gauge Bosons														

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

ในปี 2000 The Fermi National Laboratory ประกาศหลักฐานการทดลองสำหรับทาวนิวตริโน และนักวิทยาศาสตร์จาก CERN ได้ประกาศหลักฐานของ Quark-Gluon Plasma (เป็นสถานะของสสารที่ควาร์กหลุดพ้นจากนิวตรอนและโปรตอน) จากการชนกันของนิวเคลียสตะกั่ว ในปัจจุบันยังคงมีการทดลองเพื่อข้อมูลที่ชัดเจนในการยืนยันการมีอยู่ของ Quark-Gluon Plasma

ในปี 2012 CERN ได้ประกาศการค้นพบอนุภาคชนิดใหม่ที่มีสมบัติสอดคล้องกับ Higgs Boson ซึ่งมีมวล $125-127 \text{ GeV}/c^2$ นั้นเป็นช่วงที่คาดการณ์ไว้อย่างทฤษฎีโดยใช้แบบจำลองมาตรฐาน



ข้อสังเกต

โปรตอนและนิวตรอนไม่ใช่อนุภาคมูลฐาน

ปฏิยานุภาคของอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า ยังคงเป็นกลางทางไฟฟ้าเช่นเดียวกันกับคู่อนุภาค แต่มีสมบัติทางควอนตัมบางอย่างที่แตกต่างจากคู่อนุภาค

แรงเข้มไม่ใช่แรงนิวเคลียร์ แต่เป็นแรงที่ยึดเหนี่ยวควาร์กให้อยู่รวมกันในนิวคลีออน ส่วนแรงนิวเคลียร์เป็นแรงยึดเหนี่ยวให้นิวคลีออนอยู่รวมกันในนิวเคลียส โดยแรงนิวเคลียร์เป็นผลข้างเคียงที่เกิดจากแรงเข้ม

แรงอ่อนไม่ใช่แรงนิวเคลียร์ เพราะไม่เกี่ยวข้องกับการยึดเหนี่ยวกันระหว่างนิวคลีออนในนิวเคลียส แต่เป็นแรงที่เกี่ยวข้องกับการสลายให้บีตา

แรงเข้มเป็นแรงที่มีค่าความแรงมากที่สุดในแรงพื้นฐานทั้ง 4 แรง



จักรวาลวิทยา (Cosmology)

ในปี 1912 Vesto Melvin Slipher ได้รายงานว่าในการใช้เทคนิค Doppler Shifts เพื่อวัดความเร็วของกาแล็กซี เขาพบแล็กซีส่วนใหญ่กำลังเคลื่อนที่ออกจากโลกด้วยอัตราเร็วสูงหลายล้านไมล์ต่อชั่วโมง

ช่วงปลายทศวรรษ 1920s Edwin P. Hubble ได้ยืนยันว่าจักรวาลทั้งหมดกำลังขยายตัว ตั้งแต่ปี 1928 ถึงปี 1936 พวกเขาสังเกตการณ์ไปจนถึงขีดจำกัดของกล้องโทรทรรศน์ขนาด 100 นิ้ว

Hubble และ Milton Humason ได้ทำงานที่ Mount Wilson in California ด้วยกล้องโทรทรรศน์ขนาด 200 นิ้ว เพื่อพิสูจน์การขยายตัวของจักรวาล

ในช่วงทศวรรษ 1940s Hubble ได้แสดงให้เห็นว่าอัตราเร็วที่กาแล็กซีเคลื่อนตัวออกจากโลกเพิ่มขึ้นตามกฎของฮับเบิล (Hubble's Law)

$$v = HR$$

v คือ อัตราเร็วของกาแล็กซีที่กำลังเคลื่อนตัวออกจากโลก

H คือ ค่าคงที่ของฮับเบิล (Hubble constant) โดย $H \approx 22 \times 10^{-3} \text{ m/(s} \cdot \text{ly)}$

R คือ ระยะห่างระหว่างโลกกับกาแล็กซีที่กำลังเคลื่อนตัวออกจากโลก

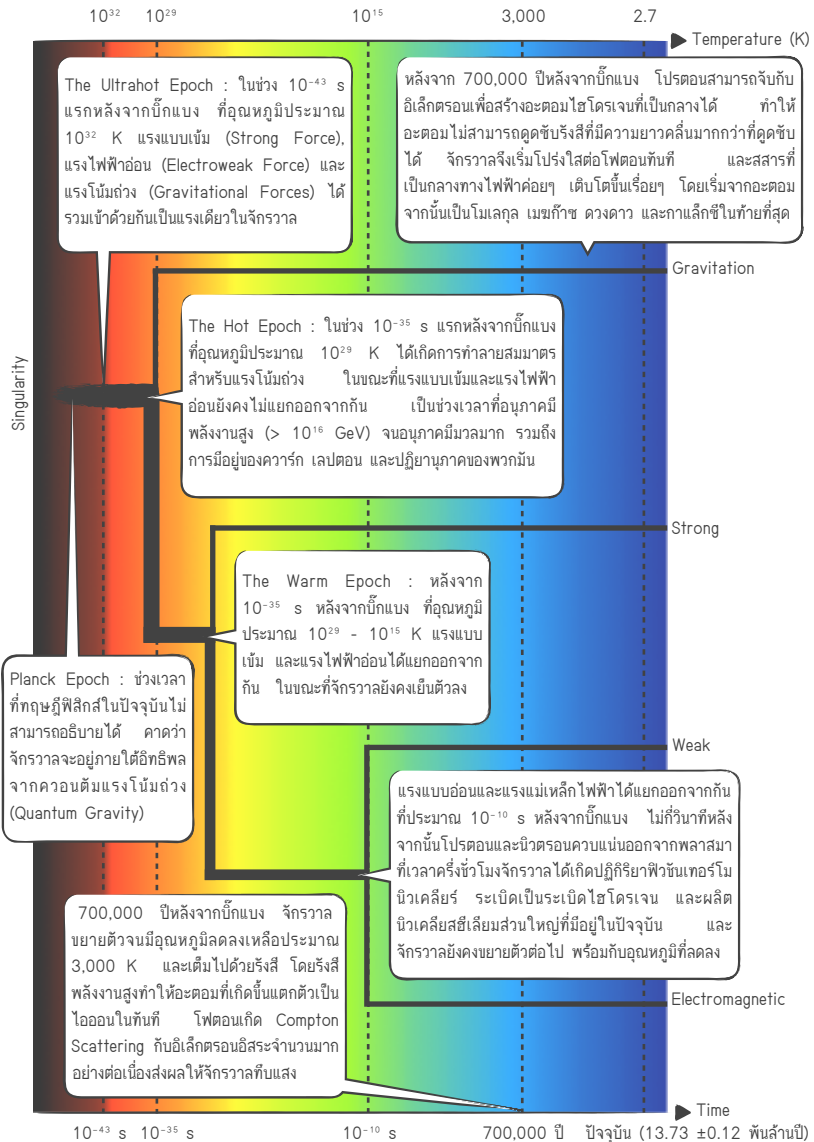
ในช่วงทศวรรษ 1950s และ 1960s Allan R. Sandage ใช้กล้องโทรทรรศน์ขนาด 200 นิ้ว ที่ Mount Palomar เพื่อวัดความเร็วของกาแล็กซีที่ระยะห่างจากโลกถึง 6,000 ล้านปีแสง การวัดเหล่านี้แสดงให้เห็นว่ากาแล็กซีที่อยู่ห่างไกลเหล่านี้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 10,000 km/s ซึ่งเร็วกว่าที่กฎของฮับเบิลทำนายไว้ จากผลการวัดนี้ชี้ให้เห็นว่าเมื่อ 1,000 ล้านปีก่อนจักรวาลต้องขยายตัวเร็วกว่านี้ จึงสรุปได้ว่าจักรวาลกำลังขยายตัวด้วยอัตราที่ลดลง

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

ในปัจจุบันนักดาราศาสตร์และนักฟิสิกส์กำลังพยายามกำหนดอัตราการขยายตัวของจักรวาล หากความหนาแน่นมวลเฉลี่ยของจักรวาลน้อยกว่าค่าความหนาแน่นวิกฤต $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \approx 10^{-26} \text{ kg/m}^3$ จักรวาลจะขยายตัวออกด้วยอัตราที่ลดลงแต่ยังคงขยายตัวไปจนเป็นระยะอนันต์ หากความหนาแน่นเฉลี่ยเกินค่าวิกฤต การขยายตัวจะหยุดลงในที่สุดและจักรวาลจะเริ่มหดตัว ซึ่งอาจนำไปสู่สถานะความหนาแน่นสูงตามด้วยการขยายตัวอีกครั้ง ในสถานการณ์นี้จะทำให้จักรวาลมีการหดและขยายตัวสลับไปมา

ในปี 1965 Arno A. Penzias และ Robert W. Wilson จาก Bell Laboratories ได้พบสัญญาณพื้นหลังรบกวนในการทดสอบเครื่องรับคลื่นไมโครเวฟที่หาสาเหตุไม่ได้ ความเข้มของสัญญาณรบกวนดังกล่าวค่อนข้างสม่ำเสมอไม่ว่าจะหันเสาอากาศไปในทิศทางต่างๆ Penzias และ Wilson พบว่าที่ Princeton University ได้มีการทำนายรังสีที่เหลือจากบิกแบง และกำลังวางแผนทำการทดลองเพื่อยืนยันทฤษฎีบิกแบง Penzias และ Wilson ได้ประกาศว่าพวกเขาได้พบคลื่นไมโครเวฟพื้นหลังที่เข้ากันได้กับรังสีที่แผ่จากวัตถุดำ (Blackbody) ที่อุณหภูมิ 3 K ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิที่คาดการณ์ไว้ของจักรวาลในปัจจุบันหลังจากบิกแบง และเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า “รังสีไมโครเวฟพื้นหลังของเอกภพ (Cosmic Microwave Background ; CMB)” เนื่องจาก Penzias และ Wilson ทำการวัดที่ความยาวคลื่นเดียว จึงไม่สามารถยืนยันได้อย่างสมบูรณ์ว่ารังสีดังกล่าวเป็นรังสีของวัตถุดำอุณหภูมิ 3 K การทดลองจากกลุ่มอื่นๆ ในเวลาต่อมา ได้ผลลัพธ์ยืนยันว่ารังสีดังกล่าวเป็นรังสีของวัตถุดำที่อุณหภูมิ 2.7 K ตัวเลขนี้อาจเป็นหลักฐานที่ชัดเจนที่สุดสำหรับทฤษฎีบิกแบง ทำให้ Penzias และ Wilson ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี 1978 (ทฤษฎีบิกแบง (The Big Bang Theory) ได้อธิบายว่าจักรวาลนั้นมีจุดเริ่มต้น โดยเริ่มต้นขึ้นจากภาวะเอกฐาน (Singularity) เมื่อประมาณ 14,000 ล้านปีก่อน)

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)



ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

ในปี 1989 NASA ได้ส่งดาวเทียม COBE (Cosmic Background Explorer) ซึ่งสามารถวัดความยาวคลื่นต่ำกว่า 0.1 cm ข้อมูลจากการวัดดังกล่าว ทำให้ทีมวิจัยได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี 2006

จากการสังเกตการณ์ทางดาราศาสตร์บ่งชี้ว่าในดวงดาวและกลุ่มก๊าซที่ส่องสว่างมีปริมาณของสสารที่ไม่ส่องสว่างมากกว่าปริมาณของสสารที่ส่องสว่างประมาณ 20 ถึง 30 เท่า แม้สสารมืด (Dark Matter) จะเป็นองค์ประกอบใหญ่ที่มองไม่เห็น หากคำนวณความหนาแน่นของจักรวาลจะได้ค่าน้อยกว่า ρ_c ถึง 10 เท่า นักฟิสิกส์ได้มีการเสนอแนวคิดมากมายเกี่ยวกับมวลที่หายไป เช่น มวลที่หายไปอาจเกิดจากอนุภาคแปลกๆ เช่น Axions, Photinos และ Superstring Particle ยังมีการเสนอว่ามวลที่หายไปนั้น คือ มวลหนึ่งของนิวตริโน (Neutrino) การทดลองในปัจจุบันเพื่อตอบปัญหาดังกล่าวได้ถูกออกแบบมาเพื่อวัดพลังงานนิ่งของ นิวตริโนซึ่งจะมีผลต่อการคาดการณ์ขนาดของจักรวาล

ในปี 1998 การสังเกตซูเปอร์โนวาประเภทหนึ่งที่มีความสว่างสัมบูรณ์ (Absolute Brightness) คงที่ เมื่อรวมความสว่างที่ปรากฏ (Apparent Brightness) และค่าการเลื่อนทางแดง (Redshift) ของแสงจากการระเบิดเหล่านี้เข้าด้วยกัน ทำให้สามารถระบุระยะทางและความเร็วของการเคลื่อนตัวออกจากโลกได้นำไปสู่ข้อสรุปที่ว่าจักรวาลกำลังขยายตัวด้วยอัตราที่เพิ่มขึ้น และการสังเกตของกลุ่มอื่นๆ ก็นำไปสู่การตีความในแบบเดียวกัน

เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว นักฟิสิกส์ได้เสนอแนวคิดพลังงานมืด (Dark Energy) ซึ่งเป็นพลังงานที่อยู่ในสุญญากาศของอวกาศ ในช่วงแรกของจักรวาลแรงโน้มถ่วงมีอิทธิพลเหนือพลังงานมืด เมื่อจักรวาลขยายตัวและแรงโน้มถ่วงระหว่างกาแล็กซีมีขนาดเล็กลงเนื่องจากระยะห่างระหว่างกันมากขึ้น พลังงานมืดจึงมีความสำคัญมากขึ้น พลังงานมืดส่งผลให้เกิดแรงผลักซึ่งทำให้อัตราการขยายตัวของจักรวาลเพิ่มขึ้น

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

ในปี 2001 Wilkinson Microwave Anisotropy Probe ถูกส่งขึ้นสู่อวกาศเพื่อสังเกตความแตกต่างของอุณหภูมิในจักรวาลในระดับ μK

ในปี 2009 The Planck Satellite ได้ทำการวัดรังสีพื้นหลังของจักรวาลด้วยความไวที่สูงกว่ายาน Wilkinson

ผลจากการวัดของยาน Wilkinson และ The Planck Satellite ได้ยืนยันรังสีพื้นหลังของจักรวาลที่สอดคล้องกับอุณหภูมิ 2.7 K

แม้ว่าจะมีหลักฐานยืนยันในระดับหนึ่งเกี่ยวกับจุดเริ่มต้นของจักรวาล แต่เราไม่มีความชัดเจนว่าจักรวาลจะมีจุดจบเป็นอย่างไร จักรวาลจะขยายตัวต่อไปตลอดกาลหรือไม่ หรือสักวันหนึ่งจักรวาลจะยุบตัวลงแล้วขยายตัวอีกครั้ง หรือบางทีอาจจะเกิดการหดและขยายตัวสลับไปมาอย่างไม่มีที่สิ้นสุด คำตอบของคำถามเหล่านี้ยังคงไม่มีข้อสรุป และข้อโต้แย้งที่น่าตื่นเต้นนี้ก็ยังคงดำเนินต่อไป

ในขณะที่นักฟิสิกส์อนุภาคได้สำรวจอาณาจักรของสิ่งที่เล็กมากๆ ทางด้านนักจักรวาลวิทยาก็ได้สำรวจประวัติศาสตร์จักรวาลย้อนไปถึงระดับไมโครวินาทีแรกๆ ของบิกแบง การสังเกตเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคสองอนุภาคชนกันในเครื่องเร่งอนุภาคเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการสร้างสถานการณ์ที่เหมือนกับช่วงเวลาแรกๆ ในประวัติศาสตร์จักรวาลขึ้นมาใหม่ ภัยแล้งสำคัญในการทำความเข้าใจจักรวาลในยุคแรกอาจเป็นการทำความเข้าใจพฤติกรรมของอนุภาคมูลฐานก็เป็นไปได้



ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

ความเข้าใจของเราเกี่ยวกับฟิสิกส์นั้นยังห่างไกลจากความสมบูรณ์ ฟิสิกส์อนุภาคต้องเผชิญกับคำถามมากมาย ทำไมจึงมีปฏิสสารน้อยมากในจักรวาล? เป็นไปได้หรือไม่ที่จะรวมทฤษฎีของแรงเข้มและแรงไฟฟ้าอ่อนเข้าด้วยกัน? เหตุใดควาร์กและเลปตอนจึงก่อตัวเป็นสามรูปแบบคล้ายกัน? มิวออนเหมือนกับอิเล็กตรอนหรือไม่ นอกจากความแตกต่างของมวล หรือมีความแตกต่างที่ละเอียดอ่อนอื่นๆ ที่ยังไม่ถูกตรวจพบ? ทำไมอนุภาคบางอนุภาคจึงมีประจุในขณะที่อนุภาคอื่นๆ เป็นกลาง? ทำไมควาร์กจึงมีประจุเป็นเศษส่วน? อะไรเป็นตัวกำหนดมวลขององค์ประกอบพื้นฐานของสสาร? ควาร์กที่แยกตัวออกมาสามารถมีอยู่ได้หรือไม่? ทำไมอิเล็กตรอนและโปรตอนจึงมีประจุเท่ากันทุกประการเมื่ออนุภาคหนึ่งเป็นอนุภาคมูลฐานและอีกอนุภาคหนึ่งสร้างขึ้นจากอนุภาคที่เล็กกว่า?

คำถามที่สำคัญและชัดเจนที่ยังมีอยู่คือ เลปตอนและควาร์กมีโครงสร้างพื้นฐานหรือไม่? เราสามารถจินตนาการถึงระดับโครงสร้างที่ลึกลงไปอีกจำนวนไม่สิ้นสุดได้อย่างไรหากเลปตอนและควาร์กเป็นองค์ประกอบขั้นสุดท้ายของสสาร? นักวิทยาศาสตร์หวังว่าจะสร้างทฤษฎีขั้นสุดท้ายเกี่ยวกับโครงสร้างของสสารได้เช่นเดียวกับที่ไอน์สไตน์เคยฝันไว้ ทฤษฎีนี้ซึ่งเรียกกันว่าทฤษฎีของทุกสิ่ง (The Theory of Everything) เป็นการผสมผสานระหว่างแบบจำลองมาตรฐาน (The Standard Model) และทฤษฎีควอนตัมของแรงโน้มถ่วง (Quantum Theory of Gravity)

ทฤษฎีสตริง (String Theory) เป็นความพยายามที่จะรวมแรงพื้นฐานทั้งสี่เข้าด้วยกันโดยจำลองอนุภาคทั้งหมดเป็นโหมดการสั่นสะเทือนเชิงปริมาณต่างๆ ของสิ่งๆ หนึ่งซึ่งเป็นเส้นที่เล็กมากๆ ความยาวทั่วไปของเส้นดังกล่าวมีขนาดเท่ากับ $\sqrt{\frac{Gh}{c^3}} \approx 10^{-33} \text{ cm}$ โดยโหมดการสั่นแต่ละโหมดของสตริงจะสอดคล้องกับอนุภาคพื้นฐานที่แตกต่างกันในแบบจำลองมาตรฐาน (The Standard Model) ปัจจุบันที่ซับซ้อนอย่างหนึ่งในทฤษฎีสตริงคือ ต้องใช้ปริภูมิ-เวลา (Space-Time) ถึง 10 มิติ แต่ทฤษฎีสตริงก็มีแนวโน้มที่ดีในการรวมแรงโน้มถ่วงเข้ากับแรงอื่นๆ

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)

อีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ทฤษฎีสตริงมีความซับซ้อน คือ นักทฤษฎีสตริงไม่สามารถขึ้นานักทดลองได้ว่าจะต้องมองหาอะไรในการทดลอง เนื่องจากความยาวของพลังค์นั้นเล็กมากจนไม่สามารถทำการทดลองกับสตริงได้โดยตรง

คำทำนายของทฤษฎีสตริงที่เรียกว่า “สมมาตรยิ่งยวด (Supersymmetry หรือ SUSY)” แสดงให้เห็นว่าอนุภาคพื้นฐานทุกตัวมีซูเปอร์พาร์ตเนอร์ (Superpartner) ที่ยังไม่ได้มีการสังเกต เชื่อกันว่าซูเปอร์สมมาตรคือสมมาตรที่ขาดหายไป (เช่น สมมาตรของ Electroweak ที่ขาดหายไปที่พลังงานต่ำ) และมวลของซูเปอร์พาร์ตเนอร์อยู่เหนือขีดความสามารถในการตรวจจับโดยเครื่องเร่งอนุภาคในปัจจุบัน

ทฤษฎี M (M-Theory) ซึ่งเป็นทฤษฎี 11 มิติ ซึ่งอิงจากเมมเบรน (membranes) ที่มากกว่าสตริง และจะเป็นทฤษฎีสตริงหากย่อจาก 11 มิติลงมาเป็น 10 มิติ



ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค (Nuclear Physics and Particle Physics)



Pinfist : มัธยมศึกษาตอนปลาย และอุดมศึกษา