

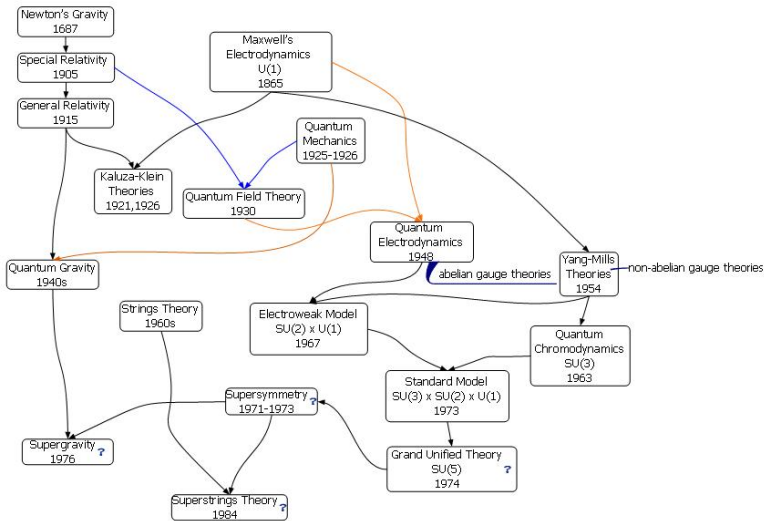
Introduction to Standard Model

ชิโนรัตน์ กอบเดช

CERN Pre School
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5 ตุลาคม พ.ศ. 2553

Theory Framework



- แบบจำลองมาตรฐานใช้อธิบายอะไร

- แบบจำลองมาตรฐานใช้อธิบายอะไร
- แบบจำลองมาตรฐานต้องการข้อมูลหรือตัวแปรอะไร

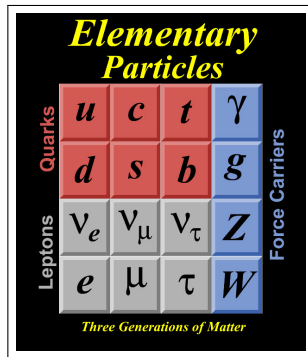
- แบบจำลองมาตรฐานใช้อธิบายอะไร
- แบบจำลองมาตรฐานต้องการข้อมูลหรือตัวแปรอะไร
- แบบจำลองมาตรฐานสามารถทำนายอะไรได้บ้าง

- แบบจำลองมาตรฐานใช้อธิบายอะไร
- แบบจำลองมาตรฐานต้องการข้อมูลหรือตัวแปรอะไร
- แบบจำลองมาตรฐานสามารถทำนายอะไรได้บ้าง
- การทดลองยืนยันแบบจำลองมาตรฐาน

- แบบจำลองมาตรฐานใช้อธิบายอะไร
- แบบจำลองมาตรฐานต้องการข้อมูลหรือตัวแปรอะไร
- แบบจำลองมาตรฐานสามารถทำนายอะไรได้บ้าง
- การทดลองยืนยันแบบจำลองมาตรฐาน

แบบจำลองมาตรฐานใช้อธิบายอันตรกิริยาของอนุภาคมูลฐานอย่างน้อย 61 อนุภาคและ แรง 3 ชนิด

- 12 เฟอร์มิออน ควาร์ก และ เลปตอน
- เวกเตอร์โบซอน γ , W^+ , W^- , Z^0 และ กลูออน
- สเกลาร์โบซอน H



- แบบจำลองมาตรฐานรวมอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า นิวเคลียร์อย่างอ่อน และ นิวเคลียร์อย่างแรง เข้าด้วยกัน
- ใช้ทฤษฎีกลุ่มอธิบาย
 - $U(1)$ อธิบายประจุสูง (hypercharge)

- แบบจำลองมาตรฐานรวมอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า นิวเคลียร์อย่างอ่อน และ นิวเคลียร์อย่างแรง เข้าด้วยกัน
- ใช้ทฤษฎีกลุ่มอธิบาย
 - $U(1)$ อธิบายประจุสูง (hypercharge)
 - $SU(3)$ อธิบาย สี (color)

- แบบจำลองมาตรฐานรวมอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า นิวเคลียร์อย่างอ่อน และ นิวเคลียร์อย่างแรง เข้าด้วยกัน
- ใช้ทฤษฎีกลุ่มอธิบาย
 - $U(1)$ อธิบายประจุสูง (hypercharge)
 - $SU(3)$ อธิบาย สี (color)
 - $SU(2)$ อธิบายไอโซสปิน

- แบบจำลองมาตรฐานรวมอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า นิวเคลียร์อย่างอ่อน และ นิวเคลียร์อย่างแรง เข้าด้วยกัน
- ใช้ทฤษฎีกลุ่มอธิบาย
 - $U(1)$ อธิบายประจุสูง (hypercharge)
 - $SU(3)$ อธิบาย สี (color)
 - $SU(2)$ อธิบายไอโซสปิน
- ใช้ ลากรานเจียนอธิบาย สนามของอนุภาคและอันตรกิริยาต่างๆ

ลากรางเจียนของแบบจำลองมาตรฐาน

$$L_{SM} = L_{EM} + L_{weak} + L_{strong} + L_{Higgs}$$

ลากรางเจียนของแบบจำลองมาตรฐาน (L_{SM}) ประกอบด้วย

- L_{EM} ลากรางเจียนของอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ L_{QED}

ลากรางเจียนของแบบจำลองมาตรฐาน

$$L_{SM} = L_{EM} + L_{weak} + L_{strong} + L_{Higgs}$$

ลากรางเจียนของแบบจำลองมาตรฐาน (L_{SM}) ประกอบด้วย

- L_{EM} ลากรางเจียนของอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ L_{QED}
- L_{weak} ลากรางเจียนของอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างอ่อน

ลากรางเจียนของแบบจำลองมาตรฐาน

$$L_{SM} = L_{EM} + L_{weak} + L_{strong} + L_{Higgs}$$

ลากรางเจียนของแบบจำลองมาตรฐาน (L_{SM}) ประกอบด้วย

- L_{EM} ลากรางเจียนของอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ L_{QED}
- L_{weak} ลากรางเจียนของอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างอ่อน
- L_{strong} ลากรางเจียนของอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างแรง หรือ L_{QCD}

ลากรางเจียนของแบบจำลองมาตรฐาน

$$L_{SM} = L_{EM} + L_{weak} + L_{strong} + L_{Higgs}$$

ลากรางเจียนของแบบจำลองมาตรฐาน (L_{SM}) ประกอบด้วย

- L_{EM} ลากรางเจียนของอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ L_{QED}
- L_{weak} ลากรางเจียนของอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างอ่อน
- L_{strong} ลากรางเจียนของอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างแรง หรือ L_{QCD}
- L_{Higgs} ลากรางเจียนของอันตรกิริยาตามกลไกของฮิกส์

ลากรานเจียนของแบบจำลองมาตรฐาน

$$L_{SM} = L_{EM} + L_{weak} + L_{strong} + L_{Higgs}$$

ลากรานเจียนของแบบจำลองมาตรฐาน (L_{SM}) ประกอบด้วย

- L_{EM} ลากรานเจียนของอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ L_{QED}
- L_{weak} ลากรานเจียนของอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างอ่อน
- L_{strong} ลากรานเจียนของอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างแรง หรือ L_{QCD}
- L_{Higgs} ลากรานเจียนของอันตรกิริยาตามกลไกของฮิกส์

ลากรางเจียนของ QED

L_{EM}

$$L_{EM} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \bar{\Psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\Psi$$

- $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$

ลากรางเจียนของ QED

L_{EM}

$$L_{EM} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \bar{\Psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\Psi$$

- $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$
- $\bar{\Psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\Psi$ เป็นสมการดิแรกสำหรับอนุภาคอิสระสปิน 1/2

ลากรางเจียนของ QED

L_{EM}

$$L_{EM} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \bar{\Psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\Psi$$

- $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$
- $\bar{\Psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\Psi$ เป็นสมการดิแรคสำหรับอนุภาคอิสระสปิน 1/2
- Ψ เป็นฟังก์ชันคลื่นโฟตอน , m เป็น มวล

ลากรางเจียนของ QED

L_{EM}

$$L_{EM} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \bar{\Psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\Psi$$

- $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$
- $\bar{\Psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\Psi$ เป็นสมการดิแรกสำหรับอนุภาคอิสระสปิน 1/2
- Ψ เป็นฟังก์ชันคลื่นโฟตอน , m เป็น มวล
- ∂_μ เป็น อนุพันธ์ย่อย

ลากรางเจียนของ QED

L_{EM}

$$L_{EM} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \bar{\Psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\Psi$$

- $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$
- $\bar{\Psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\Psi$ เป็นสมการดิแรกสำหรับอนุภาคอิสระสปิน 1/2
- Ψ เป็นฟังก์ชันคลื่นโฟตอน , m เป็น มวล
- ∂_μ เป็น อนุพันธ์ย่อย
- γ^μ เป็นเมตริกซ์แกมมา ตัวที่ μ

ลากรางเจียนของ QED

L_{EM}

$$L_{EM} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \bar{\Psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\Psi$$

- $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$
- $\bar{\Psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\Psi$ เป็นสมการดิแรกสำหรับอนุภาคอิสระสปิน 1/2
- Ψ เป็นฟังก์ชันคลื่นโฟตอน , m เป็น มวล
- ∂_μ เป็น อนุพันธ์ย่อย
- γ^μ เป็นเมตริกซ์แกมมา ตัวที่ μ

ลากรานเจียนของ QED

- อันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแบบ อาบีเลียน (Abelian)

ลากรานเจียนของ QED

- อันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแบบ อาบีเลียน (Abelian)
- ใช้ $U(1)$

ลากรานเจียนของ QED

- อันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแบบ อาบีเลียน (Abelian)
- ใช้ $U(1)$
- มีการคู่ควบของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า

ลากรานเจียนของ QED

- อันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแบบ อาบีเลียน (Abelian)
- ใช้ $U(1)$
- มีการคู่ควบของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า
- โฟตอน ไม่มีมวล

ลากรานเจียนของ QED

- อันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแบบ อาบีเลียน (Abelian)
- ใช้ $U(1)$
- มีการคู่ควบของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า
- โฟตอน ไม่มีมวล
- ตัวแปรคู่ควบ g

ลากรางเจียนของ QED

- อันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแบบ อาบีเลียน (Abelian)
- ใช้ $U(1)$
- มีการคู่ควบของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า
- โฟตอน ไม่มีมวล
- ตัวแปรคู่ควบ g
- สนามเกจ A_μ

ลากรางเจียนของ QED

- อันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแบบ อาบีเลียน (Abelian)
- ใช้ $U(1)$
- มีการคู่ควบของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า
- โฟตอน ไม่มีมวล
- ตัวแปรคู่ควบ g
- สนามเกจ A_μ
- $D_\mu = \partial_\mu + ieA_\mu$

ลากรางเจียนของ QED

- อันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแบบ อาบีเลียน (Abelian)
- ใช้ $U(1)$
- มีการคู่ควบของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า
- โฟตอน ไม่มีมวล
- ตัวแปรคู่ควบ g
- สนามเกจ A_μ
- $D_\mu = \partial_\mu + ieA_\mu$
- ความแรงสนาม $\alpha_{EM} = \frac{g^2}{4\pi} = \frac{1}{137}$

ลากรางเจียนของ QED

- อันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแบบ อาบีเลียน (Abelian)
- ใช้ $U(1)$
- มีการคู่ควบของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า
- โฟตอน ไม่มีมวล
- ตัวแปรคู่ควบ g
- สนามเกจ A_μ
- $D_\mu = \partial_\mu + ieA_\mu$
- ความแรงสนาม $\alpha_{EM} = \frac{g^2}{4\pi} = \frac{1}{137}$

ลากรางเจียนของ weak

L_{weak}

$$L_{\text{weak}} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^{(a)} F^{(a)\mu\nu} + i\bar{\Psi}_L (\gamma^\mu (D_\mu) - m) \Psi_L$$

- $F_{\mu\nu}^{(a)} = \partial_\mu W_\nu^a - \partial_\nu W_\mu^a - g^w \epsilon_{abc} W_\mu^b W_\nu^c$

ลากรางเจียนของ weak

L_{weak}

$$L_{\text{weak}} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^{(a)} F^{(a)\mu\nu} + i\bar{\Psi}_L (\gamma^\mu (D_\mu) - m) \Psi_L$$

- $F_{\mu\nu}^{(a)} = \partial_\mu W_\nu^a - \partial_\nu W_\mu^a - g^w \epsilon_{abc} W_\mu^b W_\nu^c$
- $\Psi = \Psi_L + \Psi_R$

ลากรางเจียนของ weak

L_{weak}

$$L_{weak} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^{(a)}F^{(a)\mu\nu} + i\bar{\Psi}_L(\gamma^\mu(D_\mu) - m)\Psi_L$$

- $F_{\mu\nu}^{(a)} = \partial_\mu W_\nu^a - \partial_\nu W_\mu^a - g^w \epsilon_{abc} W_\mu^b W_\nu^c$
- $\Psi = \Psi_L + \Psi_R$
- Ψ_L เป็นดับเล็ต (doublet)
มีอันตรกิริยากับแรงนิวเคลียร์อย่างอ่อน $\Psi_L = \frac{1}{2}(1 - \gamma^5)\Psi$

ลากรางเจียนของ weak

L_{weak}

$$L_{weak} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^{(a)}F^{(a)\mu\nu} + i\bar{\Psi}_L(\gamma^\mu(D_\mu) - m)\Psi_L$$

- $F_{\mu\nu}^{(a)} = \partial_\mu W_\nu^a - \partial_\nu W_\mu^a - g^w \epsilon_{abc} W_\mu^b W_\nu^c$
- $\Psi = \Psi_L + \Psi_R$
- Ψ_L เป็นดับเบิลต (doublet)
มีอันตรกิริยากับแรงนิวเคลียร์อย่างอ่อน $\Psi_L = \frac{1}{2}(1 - \gamma^5)\Psi$
- Ψ_R เป็นซิงเกิลต (singlet)
ไม่มีอันตรกิริยากับแรงนิวเคลียร์อย่างอ่อน $\Psi_R = \frac{1}{2}(1 + \gamma^5)\Psi$

ลากรางเจียนของ weak

L_{weak}

$$L_{weak} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^{(a)}F^{(a)\mu\nu} + i\bar{\Psi}_L(\gamma^\mu(D_\mu) - m)\Psi_L$$

- $F_{\mu\nu}^{(a)} = \partial_\mu W_\nu^a - \partial_\nu W_\mu^a - g^w \epsilon_{abc} W_\mu^b W_\nu^c$
- $\Psi = \Psi_L + \Psi_R$
- Ψ_L เป็นดับเบิลต (doublet)
มีอันตรกิริยากับแรงนิวเคลียร์อย่างอ่อน $\Psi_L = \frac{1}{2}(1 - \gamma^5)\Psi$
- Ψ_R เป็นซิงเกิลต (singlet)
ไม่มีอันตรกิริยากับแรงนิวเคลียร์อย่างอ่อน $\Psi_R = \frac{1}{2}(1 + \gamma^5)\Psi$

ลากรานเจียนของ weak

- $D_\mu = \partial_\mu + igT^a W_\mu^a$
- a ผลบวกของเกจโบซอน 3 อนุภาค

ลากรางเจียนของ weak

- $D_\mu = \partial_\mu + igT^a W_\mu^a$
- a ผลบวกของเกจโบซอน 3 อนุภาค
- T^a เป็น $\frac{1}{2}$ คูณกับเมตริกซ์เพาลี

ลากรางเจียนของ weak

- $D_\mu = \partial_\mu + igT^a W_\mu^a$
- a ผลบวกของเกจโบซอน 3 อนุภาค
- T^a เป็น $\frac{1}{2}$ คูณกับเมตริกซ์เพาลี
- W_μ^a เป็นสนามของเกจโบซอนอย่างอ่อน
- อันตรกิริยาเป็นแบบไม่อาบีเลียน (Non-Abelian) ใช้ $SU(2)$

ลากรางเจียนของ weak

- $D_\mu = \partial_\mu + igT^a W_\mu^a$
- a ผลบวกของเกจโบซอน 3 อนุภาค
- T^a เป็น $\frac{1}{2}$ คูณกับเมตริกซ์เพาลี
- W_μ^a เป็นสนามของเกจโบซอนอย่างอ่อน
- อันตรกิริยาเป็นแบบไม่อาบีเลียน (Non-Abelian) ใช้ $SU(2)$
- ϵ_{abc} เป็นค่าคงตัวโครงสร้างสำหรับ $SU(2)$

ลากรางเจียนของ weak

- $D_\mu = \partial_\mu + igT^a W_\mu^a$
- a ผลบวกของเกจโบซอน 3 อนุภาค
- T^a เป็น $\frac{1}{2}$ คูณกับเมตริกซ์เพาลี
- W_μ^a เป็นสนามของเกจโบซอนอย่างอ่อน
- อันตรกิริยาเป็นแบบไม่อาบีเลียน (Non-Abelian) ใช้ $SU(2)$
- ϵ_{abc} เป็นค่าคงตัวโครงสร้างสำหรับ $SU(2)$
- มีการคู่ควบของอนุภาคแบบมือซ้าย

ลากรางเจียนของ weak

- $D_\mu = \partial_\mu + igT^a W_\mu^a$
- a ผลบวกของเกจโบซอน 3 อนุภาค
- T^a เป็น $\frac{1}{2}$ คูณกับเมตริกซ์เพาลี
- W_μ^a เป็นสนามของเกจโบซอนอย่างอ่อน
- อันตรกิริยาเป็นแบบไม่อาบีเลียน (Non-Abelian) ใช้ $SU(2)$
- ϵ_{abc} เป็นค่าคงตัวโครงสร้างสำหรับ $SU(2)$
- มีการคู่ควบของอนุภาคแบบมือซ้าย
- ตัวแปรคู่ควบ g_w

ลากรางเจียนของ weak

- $D_\mu = \partial_\mu + igT^a W_\mu^a$
- a ผลบวกของเกจโบซอน 3 อนุภาค
- T^a เป็น $\frac{1}{2}$ คูณกับเมตริกซ์เพาลี
- W_μ^a เป็นสนามของเกจโบซอนอย่างอ่อน
- อันตรกิริยาเป็นแบบไม่อาบีเลียน (Non-Abelian) ใช้ $SU(2)$
- ϵ_{abc} เป็นค่าคงตัวโครงสร้างสำหรับ $SU(2)$
- มีการคู่ควบของอนุภาคแบบมือซ้าย
- ตัวแปรคู่ควบ g_w

ลากรางเจียนของ QCD

L_{QCD}

$$L_{QCD} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^{(a)} F^{(a)\mu\nu} + \bar{\Psi}^j (i\gamma^\mu (D_\mu)_{jk} - m_{jk}) \Psi_k$$

- $F_{\mu\nu}^{(a)} = \partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a - g^s f_{abc} G_\mu^b G_\nu^c$

ลากรางเจียนของ QCD

L_{QCD}

$$L_{QCD} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^{(a)} F^{(a)\mu\nu} + \bar{\Psi}^j (i\gamma^\mu (D_\mu)_{jk} - m_{jk}) \Psi_k$$

- $F_{\mu\nu}^{(a)} = \partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a - g^s f_{abc} G_\mu^b G_\nu^c$
- G_μ^a เป็นสนามเกจของกลูออน

ลากรางเจียนของ QCD

L_{QCD}

$$L_{QCD} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^{(a)} F^{(a)\mu\nu} + \bar{\Psi}^j (i\gamma^\mu (D_\mu)_{jk} - m_{jk}) \Psi_k$$

- $F_{\mu\nu}^{(a)} = \partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a - g^s f_{abc} G_\mu^b G_\nu^c$
- G_μ^a เป็นสนามเกจของกลูออน
- a ผลบวกของกลูออน 8 อนุภาค

ลากรางเจียนของ QCD

L_{QCD}

$$L_{QCD} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^{(a)} F^{(a)\mu\nu} + \bar{\Psi}^j (i\gamma^\mu (D_\mu)_{jk} - m_{jk}) \Psi_k$$

- $F_{\mu\nu}^{(a)} = \partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a - g^s f_{abc} G_\mu^b G_\nu^c$
- G_μ^a เป็นสนามเกจของกลูออน
- a ผลบวกของกลูออน 8 อนุภาค
- j, k เป็นดัชนีสี = 1, 2, 3

ลากรางเจียนของ QCD

L_{QCD}

$$L_{QCD} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^{(a)} F^{(a)\mu\nu} + \bar{\Psi}^j (i\gamma^\mu (D_\mu)_{jk} - m_{jk}) \Psi_k$$

- $F_{\mu\nu}^{(a)} = \partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a - g^s f_{abc} G_\mu^b G_\nu^c$
- G_μ^a เป็นสนามเกจของกลูออน
- a ผลบวกของกลูออน 8 อนุภาค
- j, k เป็นดัชนีสี = 1, 2, 3
- f_{abc} เป็นค่าคงตัวโครงสร้างสำหรับ $SU(3)$

ลากรางเจียนของ QCD

L_{QCD}

$$L_{QCD} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^{(a)} F^{(a)\mu\nu} + \bar{\Psi}^j (i\gamma^\mu (D_\mu)_{jk} - m_{jk}) \Psi_k$$

- $F_{\mu\nu}^{(a)} = \partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a - g^s f_{abc} G_\mu^b G_\nu^c$
- G_μ^a เป็นสนามเกจของกลูออน
- a ผลบวกของกลูออน 8 อนุภาค
- j, k เป็นดัชนีสี = 1, 2, 3
- f_{abc} เป็นค่าคงตัวโครงสร้างสำหรับ $SU(3)$

ลากรานเจียนของ QCD

- อันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างแรงเป็นแบบไม่อาบีเลียน (Non-Abelian) ใช้ $SU(3)$

ลากรานเจียนของ QCD

- อันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างแรงเป็นแบบไม่อาบีเลียน (Non-Abelian) ใช้ $SU(3)$
- มีการคู่ควบของควาร์ก

ลากรานเจียนของ QCD

- อันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างแรงเป็นแบบไม่อาบีเลียน (Non-Abelian) ใช้ $SU(3)$
- มีการคู่ควบของควาร์ก
- กลูออนไม่มีมวล

ลากรานเจียนของ QCD

- อันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างแรงเป็นแบบไม่อาบีเลียน (Non-Abelian) ใช้ $SU(3)$
- มีการคู่ควบของควาร์ก
- กลูออนไม่มีมวล
- ตัวแปรคู่ควบ g_s

ลากรางเจียนของ QCD

- อันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างแรงเป็นแบบไม่อาบีเลียน (Non-Abelian) ใช้ $SU(3)$
- มีการคู่ควบของควาร์ก
- กลูออนไม่มีมวล
- ตัวแปรคู่ควบ g_s
- $D_\mu = \delta_{jk} \partial_\mu + ig_s \Sigma_a (\lambda_{j,k}^a / 2) G_\mu^a$

ลากรางเจียนของ QCD

- อันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างแรงเป็นแบบไม่อาบีเลียน (Non-Abelian) ใช้ $SU(3)$
- มีการคู่ควบของควาร์ก
- กลูออนไม่มีมวล
- ตัวแปรคู่ควบ g_s
- $D_\mu = \delta_{jk} \partial_\mu + ig_s \Sigma_a (\lambda_{j,k}^a / 2) G_\mu^a$
- λ^a เป็น เมตริกซ์ 3×3 มี 8 เมตริกซ์

ลากรางเจียนของ QCD

- อันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างแรงเป็นแบบไม่อาบีเลียน (Non-Abelian) ใช้ $SU(3)$
- มีการคู่ควบของควาร์ก
- กลูออนไม่มีมวล
- ตัวแปรคู่ควบ g_s
- $D_\mu = \delta_{jk} \partial_\mu + ig_s \Sigma_a (\lambda_{j,k}^a / 2) G_\mu^a$
- λ^a เป็น เมตริกซ์ 3×3 มี 8 เมตริกซ์
- ความแรงสนาม $\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi}$

ลากรางเจียนของ QCD

- อันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างแรงเป็นแบบไม่อาบีเลียน (Non-Abelian) ใช้ $SU(3)$
- มีการคู่ควบของควาร์ก
- กลูออนไม่มีมวล
- ตัวแปรคู่ควบ g_s
- $D_\mu = \delta_{jk} \partial_\mu + ig_s \Sigma_a (\lambda_{j,k}^a / 2) G_\mu^a$
- λ^a เป็น เมตริกซ์ 3×3 มี 8 เมตริกซ์
- ความแรงสนาม $\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi}$

ลากรางเจียนของ Higgs

L_{Higgs}

$$L_{Higgs} = (D_\mu \phi)^\dagger (D^\mu \phi) - V(\phi)$$

- $V(\phi) = -\mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda |\phi^\dagger \phi|^2$ เป็นศักย์ของฮิกส์

ลากรางเจียนของ Higgs

L_{Higgs}

$$L_{Higgs} = (D_\mu \phi)^\dagger (D^\mu \phi) - V(\phi)$$

- $V(\phi) = -\mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda |\phi^\dagger \phi|^2$ เป็นศักย์ของฮิกส์
- ϕ เป็นสนามสเกลาร์เชิงซ้อนของฮิกส์
คู่ควบกับอนุภาคอื่นๆเพื่อให้มวล

ลากรางเจียนของ Higgs

L_{Higgs}

$$L_{Higgs} = (D_\mu \phi)^\dagger (D^\mu \phi) - V(\phi)$$

- $V(\phi) = -\mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda |\phi^\dagger \phi|^2$ เป็นศักย์ของฮิกส์
- ϕ เป็นสนามสเกลาร์เชิงซ้อนของฮิกส์
คู่ควบกับอนุภาคอื่นๆเพื่อให้มวล
- ϕ มี 4 องค์ประกอบ

$$\phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}, \quad \bar{\phi} = \begin{pmatrix} \bar{\phi}^0 \\ \phi^- \end{pmatrix}$$

ลากรางเจียนของ Higgs

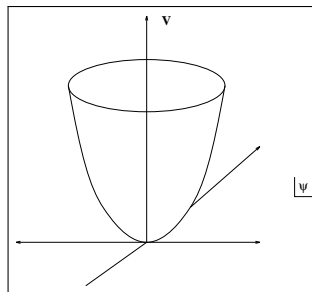
L_{Higgs}

$$L_{Higgs} = (D_\mu \phi)^\dagger (D^\mu \phi) - V(\phi)$$

- $V(\phi) = -\mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda |\phi^\dagger \phi|^2$ เป็นศักย์ของฮิกส์
- ϕ เป็นสนามสเกลาร์เชิงซ้อนของฮิกส์
คู่ควบกับอนุภาคอื่นๆเพื่อให้มวล
- ϕ มี 4 องค์ประกอบ

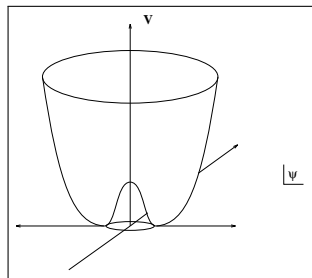
$$\phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}, \quad \bar{\phi} = \begin{pmatrix} \bar{\phi}^0 \\ \phi^- \end{pmatrix}$$

The Higgs Potential



หาก $\mu^2 \leq 0$ จะมีจุดต่ำสุดที่ 0

The Higgs Potential



หาก $\mu^2 > 0$ จุดต่ำสุดไม่ได้อยู่ที่ 0 โดยพบว่าที่จุด 0 ไม่ใช่สถานะพื้น แต่ที่จุดนี้ระบบมีความสมมาตร การเข้าสู่สถานะพื้นต้องมีการแตกสมมาตรนั้นคือเลื่อนจาก 0 เข้าสู่จุดต่ำสุด ในทิศทางใดก็ได้ มีค่าเหมือนแต่กกันต่างเฉพาะที่เฟส

ลากรางเจียนของ Higgs

- การแตกสมมาตรนี้ทำให้เกิด มวลของฮิกส์
- เงื่อนไขการไม่เปลี่ยนแปลงภายใต้ $SU(2)_L \times U(1)$ ทำให้เกิดสนามใหม่
- $SU(2)_L$ ทริปเปิลต W^+, W^0, W^-
- $U(1)$ ซิงเกิลต B^0
- การผสมกันของ W^0 กับ B^0 ทำให้เกิด Z และ γ
- W^+, W^-, Z ได้มวลจาก 3 สนามของฮิกส์

ลากรางเจียนของ Higgs

- การแตกสมมาตรนี้ทำให้เกิด มวลของฮิกส์
- เงื่อนไขการไม่เปลี่ยนแปลงภายใต้ $SU(2)_L \times U(1)$ ทำให้เกิดสนามใหม่
- $SU(2)_L$ ทริปเปิลต W^+, W^0, W^-
- $U(1)$ ซิงเกิลต B^0
- การผสมกันของ W^0 กับ B^0 ทำให้เกิด Z และ γ
- W^+, W^-, Z ได้มวลจาก 3 สนามของฮิกส์
- มี 1 องค์ประกอบที่เหลืออยู่ในรูป

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(\phi^0 + \bar{\phi}^0)$$

ทำให้เกิดอนุภาคโบซอนฮิกส์ สปิน 0 ที่อาจวัดได้

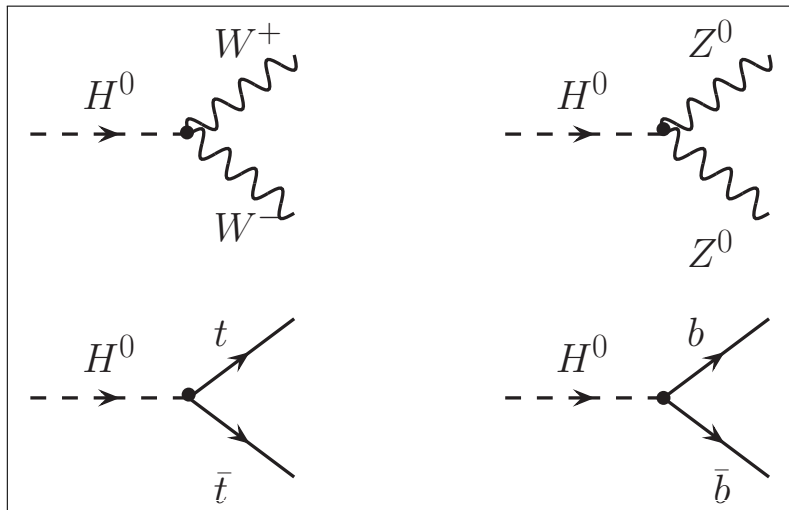
ลากรางเจียนของ Higgs

- การแตกสมมาตรนี้ทำให้เกิด มวลของฮิกส์
- เงื่อนไขการไม่เปลี่ยนแปลงภายใต้ $SU(2)_L \times U(1)$ ทำให้เกิดสนามใหม่
- $SU(2)_L$ ทริปเปิลต W^+, W^0, W^-
- $U(1)$ ซิงเกิลต B^0
- การผสมกันของ W^0 กับ B^0 ทำให้เกิด Z และ γ
- W^+, W^-, Z ได้มวลจาก 3 สนามของฮิกส์
- มี 1 องค์ประกอบที่เหลืออยู่ในรูป

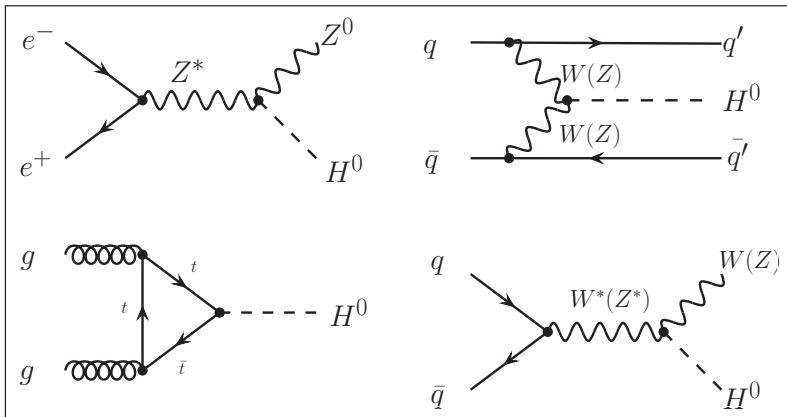
$$\frac{1}{\sqrt{2}}(\phi^0 + \bar{\phi}^0)$$

ทำให้เกิดอนุภาคโบซอนฮิกส์ สปิน 0 ที่อาจวัดได้

Higgs Couplings to Other Particles



How the Higgs can be made



สิ่งที่แบบจำลองมาตรฐานบอก

- ลากรานเจียนสมมาตรภายใต้ $SU(2)_L \times U(1) \times SU(3)$

สิ่งที่แบบจำลองมาตรฐานบอก

- ลากรานเจียนสมมาตรภายใต้ $SU(2)_L \times U(1) \times SU(3)$
- อนุภาคโบซอนในแบบจำลองมาตรฐานไม่มีมวล

สิ่งที่แบบจำลองมาตรฐานบอก

- ลากรานเจียนสมมาตรภายใต้ $SU(2)_L \times U(1) \times SU(3)$
- อนุภาคโบซอนในแบบจำลองมาตรฐานไม่มีมวล
- มวลจะได้มาจากกลไกของฮิกส์

สิ่งที่แบบจำลองมาตรฐานบอก

- ลากรานเจียนสมมาตรภายใต้ $SU(2)_L \times U(1) \times SU(3)$
- อนุภาคโบซอนในแบบจำลองมาตรฐานไม่มีมวล
- มวลจะได้มาจากกลไกของฮิกส์
- มวลของ Z เป็นผลรวมของอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่มีมวลกับโบซอนของอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างอ่อน

สิ่งที่แบบจำลองมาตรฐานบอก

- ลากรานเจียนสมมาตรภายใต้ $SU(2)_L \times U(1) \times SU(3)$
- อนุภาคโบซอนในแบบจำลองมาตรฐานไม่มีมวล
- มวลจะได้มาจากกลไกของฮิกส์
- มวลของ Z เป็นผลรวมของอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่มีมวลกับโบซอนของอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างอ่อน
- ความสัมพันธ์ M_W, M_Z ค่าคู่ควบแม่เหล็กไฟฟ้าและค่าคู่ควบนิวเคลียร์อย่างอ่อน
- $\tan(\theta_W) = \frac{g_W}{g}$

สิ่งที่แบบจำลองมาตรฐานบอก

- ลากรานเจียนสมมาตรภายใต้ $SU(2)_L \times U(1) \times SU(3)$
- อนุภาคโบซอนในแบบจำลองมาตรฐานไม่มีมวล
- มวลจะได้มาจากกลไกของฮิกส์
- มวลของ Z เป็นผลรวมของอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่มีมวลกับโบซอนของอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างอ่อน
- ความสัมพันธ์ M_W, M_Z ค่าคู่ควบแม่เหล็กไฟฟ้าและค่าคู่ควบนิวเคลียร์อย่างอ่อน
- $\tan(\theta_W) = \frac{g_W}{g}$
- $M_W = M_Z \cos(\theta_W)$

สิ่งที่แบบจำลองมาตรฐานบอก

- ลากรานเจียนสมมาตรภายใต้ $SU(2)_L \times U(1) \times SU(3)$
- อนุภาคโบซอนในแบบจำลองมาตรฐานไม่มีมวล
- มวลจะได้มาจากกลไกของฮิกส์
- มวลของ Z เป็นผลรวมของอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่มีมวลกับโบซอนของอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างอ่อน
- ความสัมพันธ์ M_W, M_Z ค่าคู่ควบแม่เหล็กไฟฟ้าและค่าคู่ควบนิวเคลียร์อย่างอ่อน
- $\tan(\theta_W) = \frac{g_W}{g}$
- $M_W = M_Z \cos(\theta_W)$

สิ่งที่แบบจำลองมาตรฐานไม่ได้บอก

- ขนาดของค่าคู่ควบเกจ g , g_w , g_s

สิ่งที่แบบจำลองมาตรฐานไม่ได้บอก

- ขนาดของค่าคู่ควบเกจ g , g_w , g_s
- มวลของเฟอร์มิออน (3 เลปตอน, 6 ควาร์ก, 3 นิวตริโน)

สิ่งที่แบบจำลองมาตรฐานไม่ได้บอก

- ขนาดของค่าคู่ควบเกจ g , g_w , g_s
- มวลของเฟอร์มิออน (3 เลปตอน, 6 ควาร์ก, 3 นิวตริโน)
- การผสมควาร์ก (quark mixing)

สิ่งที่แบบจำลองมาตรฐานไม่ได้บอก

- ขนาดของค่าคู่ควบเกจ g , g_w , g_s
- มวลของเฟอร์มิออน (3 เลปตอน, 6 ควาร์ก, 3 นิวตริโน)
- การผสมควาร์ก (quark mixing)
- ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับฮิกส์ เช่น มวลของฮิกส์

สิ่งที่แบบจำลองมาตรฐานไม่ได้บอก

- ขนาดของค่าคู่ควบเกจ g , g_w , g_s
- มวลของเฟอร์มิออน (3 เลปตอน, 6 ควาร์ก, 3 นิวตริโน)
- การผสมควาร์ก (quark mixing)
- ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับฮิกส์ เช่น มวลของฮิกส์
- พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า 26 ตัว ซึ่งค่าเหล่านี้ต้องหาจากการทดลองแล้วใส่ด้วยมือลงไปในทฤษฎี

การทดสอบแบบจำลองมาตรฐาน

สำหรับ Z^0

- ภาคตัดขวาง

การทดสอบแบบจำลองมาตรฐาน

สำหรับ Z^0

- ภาคตัดขวาง
- การคู่ควบกับเลขปตอน

การทดสอบแบบจำลองมาตรฐาน

สำหรับ Z^0

- ภาคตัดขวาง
- การคู่ควบกับเลปตอน
- การทำนายควาร์กชนิด top

การทดสอบแบบจำลองมาตรฐาน

สำหรับ Z^0

- ภาคตัดขวาง
- การคู่ควบกับเลปตอน
- การทำนายควาร์กชนิด top
- พารามิเตอร์มูลฐาน $\text{Sin}^2(\theta_w)$

การทดสอบแบบจำลองมาตรฐาน

สำหรับ Z^0

- ภาคตัดขวาง
- การคู่ควบกับเลปตอน
- การทำนายควาร์กชนิด top
- พารามิเตอร์มูลฐาน $\text{Sin}^2(\theta_w)$

การทดสอบแบบจำลองมาตรฐาน

สำหรับ W^\pm

- การสร้าง W ในอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างอ่อน แบบไม่อาบีเลียน

การทดสอบแบบจำลองมาตรฐาน

สำหรับ W^\pm

- การสร้าง W ในอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างอ่อน แบบไม่อาบีเลียน
- มวลของ W

การทดสอบแบบจำลองมาตรฐาน

สำหรับ W^\pm

- การสร้าง W ในอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างอ่อน แบบไม่อาบีเลียน
- มวลของ W
- การที่มวล W ขึ้นกับมวลของฮิกส์

การทดสอบแบบจำลองมาตรฐาน

สำหรับ W^\pm

- การสร้าง W ในอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างอ่อน แบบไม่อาบีเลียน
- มวลของ W
- การที่มวล W ขึ้นกับมวลของฮิกส์

สำหรับ การผสมควาร์ก และการฝ่าฝืนสมมาตร CP

- การผสม K^0

การทดสอบแบบจำลองมาตรฐาน

สำหรับ W^\pm

- การสร้าง W ในอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างอ่อน แบบไม่อาบีเลียน
- มวลของ W
- การที่มวล W ขึ้นกับมวลของฮิกส์

สำหรับ การผสมควาร์ก และการฝ่าฝืนสมมาตร CP

- การผสม K^0
- การผสม B^0

การทดสอบแบบจำลองมาตรฐาน

สำหรับ W^\pm

- การสร้าง W ในอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างอ่อน แบบไม่อาบีเลียน
- มวลของ W
- การที่มวล W ขึ้นกับมวลของฮิกส์

สำหรับ การผสมควาร์ก และการฝ่าฝืนสมมาตร CP

- การผสม K^0
- การผสม B^0
- พารามิเตอร์ของเมตริกซ์ CKM

การทดสอบแบบจำลองมาตรฐาน

สำหรับ W^\pm

- การสร้าง W ในอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างอ่อน แบบไม่อาบีเลียน
- มวลของ W
- การที่มวล W ขึ้นกับมวลของฮิกส์

สำหรับ การผสมควาร์ก และการฝ่าฝืนสมมาตร CP

- การผสม K^0
- การผสม B^0
- พารามิเตอร์ของเมตริกซ์ CKM

- 1 เขียนลากรางเจียนของอนุภาคอิสระของที่ต้องการ

การใช้ทฤษฎีเกจ

- 1 เขียนลากรางเจียนของอนุภาคอิสระของที่ต้องการ
- 2 เลือกกรุปเกจที่จะใช้

การใช้ทฤษฎีเกจ

- 1 เขียนลากรางเจียนของอนุภาคอิสระของที่ต้องการ
- 2 เลือกกรุปเกจที่จะใช้
- 3 กำหนดการไม่เปลี่ยนแปลงภายใต้ การแปลงของกรุปเกจนั้น

การใช้ทฤษฎีเกม

- 1 เขียนลากรางเจียนของอนุภาคอิสระของที่ต้องการ
- 2 เลือกกรุปเกมที่จะใช้
- 3 กำหนดการไม่เปลี่ยนแปลงภายใต้ การแปลงของกรุปเกมนั้น
- 4 ตรวจสอบดูสนามใหม่ที่มีและอันตรกิริยาที่ต้องการ

การใช้ทฤษฎีเกจ

- 1 เขียนลากรางเจียนของอนุภาคอิสระของที่ต้องการ
- 2 เลือกกรุปเกจที่จะใช้
- 3 กำหนดการไม่เปลี่ยนแปลงภายใต้ การแปลงของกรุปเกจนั้น
- 4 ตรวจสอบสนามใหม่ที่มีและอันตรกิริยาที่ต้องการ
- 5 สังเกตเลขควอนตัมที่ยังคงเดิม

การใช้ทฤษฎีเกม

- 1 เขียนลากรางเจียนของอนุภาคอิสระของที่ต้องการ
- 2 เลือกกรุปเกมที่จะใช้
- 3 กำหนดการไม่เปลี่ยนแปลงภายใต้ การแปลงของกรุปเกมนั้น
- 4 ตรวจสอบสนามใหม่ที่มีและอันตรกิริยาที่ต้องการ
- 5 สังเกตเลขควอนตัมที่ยังคงเดิม
- 6 เขียนกฎของฟายน์แมน

การใช้ทฤษฎีเกจ

- 1 เขียนลากรางเจียนของอนุภาคอิสระของที่ต้องการ
- 2 เลือกกรุปเกจที่จะใช้
- 3 กำหนดการไม่เปลี่ยนแปลงภายใต้ การแปลงของกรุปเกจนั้น
- 4 ตรวจสอบสนามใหม่ที่มีและอันตรกิริยาที่ต้องการ
- 5 สังเกตเลขควอนตัมที่ยังคงเดิม
- 6 เขียนกฎของฟายน์แมน

การใช้ทฤษฎีเกจจะช่วยให้การคำนวณสามารถหาค่าได้ หรือ renormalizable ตามทฤษฎีการรบกวน(perturbation theory)

นิยาม

กรุปของเมตริกซ์ยูนิแทรีเชิงซ้อน มิติ $n \times n$
ที่มีเงื่อนไขพิเศษว่าดีเทอร์มิแนนต์ของเมตริกซ์มีค่าเท่ากับ 1

- ยูนิแทรี หมายถึง $U^\dagger = U^{-1}$

นิยาม

กรุปของเมตริกซ์ยูนิแทรีเชิงซ้อน มิติ $n \times n$
ที่มีเงื่อนไขพิเศษว่าดีเทอร์มิแนนต์ของเมตริกซ์มีค่าเท่ากับ 1

- ยูนิแทรี หมายถึง $U^\dagger = U^{-1}$
- U^\dagger คือ สังยุคของเมตริกซ์สลับเปลี่ยน (conjugate transpose matrix)

นิยาม

กรุปของเมตริกซ์ยูนิแทรีเชิงซ้อน มิติ $n \times n$
ที่มีเงื่อนไขพิเศษว่าดีเทอร์มิแนนต์ของเมตริกซ์มีค่าเท่ากับ 1

- ยูนิแทรี หมายถึง $U^\dagger = U^{-1}$
- U^\dagger คือ สังยุคของเมตริกซ์สลับเปลี่ยน (conjugate transpose matrix)
- องศาของความสำเร็จของเมตริกซ์เชิงซ้อน มิติ $n \times n = 2n^2$

นิยาม

กรุปของเมตริกซ์ยูนิแทรีเชิงซ้อน มิติ $n \times n$
ที่มีเงื่อนไขพิเศษว่าดีเทอร์มิแนนต์ของเมตริกซ์มีค่าเท่ากับ 1

- ยูนิแทรี หมายถึง $U^\dagger = U^{-1}$
- U^\dagger คือ สังยุคของเมตริกซ์สลับเปลี่ยน (conjugate transpose matrix)
- องศาของความเสรีของเมตริกซ์เชิงซ้อน มิติ $n \times n = 2n^2$
- เงื่อนไขบังคับของยูนิแทรี n^2 , เงื่อนไขบังคับของดีเทอร์มิแนนต์ 1
- องศาของความเสรีของ $SU(n)$ มีค่าเท่ากับ $2n^2 - n^2 - 1 = n^2 - 1$

นิยาม

กรุปของเมตริกซ์ยูนิแทรีเชิงซ้อน มิติ $n \times n$
ที่มีเงื่อนไขพิเศษว่าดีเทอร์มิแนนต์ของเมตริกซ์มีค่าเท่ากับ 1

- ยูนิแทรี หมายถึง $U^\dagger = U^{-1}$
- U^\dagger คือ สังยุคของเมตริกซ์สลับเปลี่ยน (conjugate transpose matrix)
- องศาของความเสรีของเมตริกซ์เชิงซ้อน มิติ $n \times n = 2n^2$
- เงื่อนไขบังคับของยูนิแทรี n^2 , เงื่อนไขบังคับของดีเทอร์มิแนนต์ 1
- องศาของความเสรีของ $SU(n)$ มีค่าเท่ากับ $2n^2 - n^2 - 1 = n^2 - 1$

กรุปเกจ SU(n)

- เขียนเมตริกซ์แบบเอกซ์โพเนนเชียล $U = \exp(IG)$ และ $U^{-1} = \exp(-IG)$

กรุปเกจ SU(n)

- เขียนเมตริกซ์แบบเอกซ์โพเนนเชียล $U = \exp(IG)$ และ $U^{-1} = \exp(-IG)$
- จากยูนิแทรี $\exp(IG) = \exp(-IG^\dagger)$ ทำให้ $G = G^\dagger$ หรือ G เป็นเมตริกซ์เฮอร์มิเทียน

กรุปเกจ SU(n)

- เขียนเมตริกซ์แบบเอกซ์โพเนนเชียล $U = \exp(IG)$ และ $U^{-1} = \exp(-IG)$
- จากยูนิแทรี $\exp(IG) = \exp(-IG^\dagger)$ ทำให้ $G = G^\dagger$ หรือ G เป็นเมตริกซ์เฮอร์มิเทียน
- สำหรับเมตริกซ์ M ใดๆ $\text{Det}(\exp(M)) = \exp(\text{Tr}(M))$ และเงื่อนไขเมตริกซ์ยูนิแทรีพิเศษ $\text{Det}(U) = 1$ จะได้ $\text{Trace}(G) = 0$

กรุปเกจ $SU(n)$

- เขียนเมตริกซ์แบบเอกซ์โพเนนเชียล $U = \exp(IG)$ และ $U^{-1} = \exp(-IG)$
- จากยูนิแทรี $\exp(IG) = \exp(-IG^\dagger)$ ทำให้ $G = G^\dagger$ หรือ G เป็นเมตริกซ์เฮอร์มิเทียน
- สำหรับเมตริกซ์ M ใดๆ $\text{Det}(\exp(M)) = \exp(\text{Tr}(M))$ และเงื่อนไขเมตริกซ์ยูนิแทรีพิเศษ $\text{Det}(U) = 1$ จะได้ $\text{Trace}(G) = 0$
- G เรียกว่า ตัวก่อกำเนิด (generator) และสามารถเขียนสมาชิกใดๆของ $SU(n)$ ได้เป็น $U = \exp(i\theta_k G_k)$

กรุปเกจ $SU(n)$

- เขียนเมตริกซ์แบบเอกซ์โพเนนเชียล $U = \exp(IG)$ และ $U^{-1} = \exp(-IG)$
- จากยูนิแทรี $\exp(IG) = \exp(-IG^\dagger)$ ทำให้ $G = G^\dagger$ หรือ G เป็นเมตริกซ์เฮอร์มิเทียน
- สำหรับเมตริกซ์ M ใดๆ $\text{Det}(\exp(M)) = \exp(\text{Tr}(M))$ และเงื่อนไขเมตริกซ์ยูนิแทรีพิเศษ $\text{Det}(U) = 1$ จะได้ $\text{Trace}(G) = 0$
- G เรียกว่า ตัวก่อกำเนิด (generator) และสามารถเขียนสมาชิกใดๆของ $SU(n)$ ได้เป็น $U = \exp(i\theta_k G_k)$

ดังนั้นการศึกษาตัวก่อกำเนิด G แบบเฮอร์มิเทียน ที่มี Trace เป็นศูนย์ จะให้ผลเหมือนกับการศึกษาเมตริกซ์ยูนิแทรีพิเศษ U

ตัวอย่าง กลุ่มเกจ SU(n)

SU(2)

- องศาของความสำเร็จ $2^2 - 1 = 3$

ตัวอย่าง กรุ๊ปเกจ SU(n)

SU(2)

- องศาของความสำเร็จ $2^2 - 1 = 3$
- สมาชิกใดๆ เขียนได้เป็น $U = \exp(i\theta_k \sigma_k)$ เมื่อ σ_k คือ เมตริกซ์สปีนของเพาลี มิติ 2×2 ทั้ง 3 แบบ หรือ เรียกว่า เป็นตัวก่อกำเนิด ในกรณีนี้

ตัวอย่าง กรุ๊ปเกจ SU(n)

SU(2)

- องศาของความสำเร็จ $2^2 - 1 = 3$
- สมาชิกใดๆ เขียนได้เป็น $U = \exp(i\theta_k \sigma_k)$ เมื่อ σ_k คือ เมตริกซ์สปีนของเพาลี มิติ 2×2 ทั้ง 3 แบบ หรือ เรียกว่า เป็นตัวก่อกำเนิด ในกรณีนี้
- ใช้ในอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างอ่อน
- นำไปสู่โบซอนแบบ W^+ , W^- , W^0

ตัวอย่าง กรุ๊ปเกจ SU(n)

SU(2)

- องศาของความสำเร็จ $2^2 - 1 = 3$
- สมาชิกใดๆ เขียนได้เป็น $U = \exp(i\theta_k \sigma_k)$ เมื่อ σ_k คือ เมตริกซ์สปีนของเพาลี มิติ 2×2 ทั้ง 3 แบบ หรือ เรียกว่า เป็นตัวก่อกำเนิด ในกรณีนี้
- ใช้ในอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างอ่อน
- นำไปสู่โบซอนแบบ W^+ , W^- , W^0

ตัวอย่าง กลุ่มเกจ SU(n)

SU(3)

- องศาของความสำเร็จ $3^2 - 1 = 8$

ตัวอย่าง กรุ๊ปเกจ SU(n)

SU(3)

- องศาของความสำเร็จ $3^2 - 1 = 8$
- สมาชิกใดๆ เขียนได้เป็น $U = \exp(i\theta_k \lambda_k)$ เมื่อ λ_k คือ เมตริกซ์สปีนของเกลมานน์ มิติ 3×3 ทั้ง 8 แบบ หรือ เรียกว่า เป็นตัวก่อกำเนิด ในกรณีนี้

ตัวอย่าง กรุปเกจ SU(n)

SU(3)

- องศาของความสำเร็จ $3^2 - 1 = 8$
- สมาชิกใดๆ เขียนได้เป็น $U = \exp(i\theta_k \lambda_k)$ เมื่อ λ_k คือ เมตริกซ์สปีนของเกลมานน์ มิติ 3×3 ทั้ง 8 แบบ หรือ เรียกว่า เป็นตัวก่อกำเนิด ในกรณีนี้
- ใช้ในอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างแรง
- นำไปสู่กลุ่มอ่อนทั้ง 8

ตัวอย่าง กรุปเกจ SU(n)

SU(3)

- องศาของความสำเร็จ $3^2 - 1 = 8$
- สมาชิกใดๆ เขียนได้เป็น $U = \exp(i\theta_k \lambda_k)$ เมื่อ λ_k คือ เมตริกซ์สปีนของเกลมานน์ มิติ 3×3 ทั้ง 8 แบบ หรือ เรียกว่า เป็นตัวก่อกำเนิด ในกรณีนี้
- ใช้ในอันตรกิริยานิวเคลียร์อย่างแรง
- นำไปสู่กลุ่มอ่อนทั้ง 8

ทำไมจึงใช้แผนภาพฟายน์แมน ?

- การคำนวณทางพีสิคส์อนุภาคและแบบจำลองมาตรฐานจะใช้กลศาสตร์สัมพัทธภาพ เช่น ปฏิยานุภาคได้มาจากเงื่อนไขที่ว่าสมการคลื่นต้องไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อคิดแบบสัมพัทธภาพ

ทำไมจึงใช้แผนภาพฟายน์แมน ?

- การคำนวณทางพีสิคส์อนุภาคและแบบจำลองมาตรฐานจะใช้กลศาสตร์สัมพัทธภาพ เช่น ปฏิยานุภาคได้มาจากเงื่อนไขที่ว่าสมการเคลื่อนต้องไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อคิดแบบสัมพัทธภาพ
- การคำนวณสมาชิกเมตริกซ์ตามทฤษฎีการรบกวนทำได้ค่อนข้างยาก ต้องใช้ผลรวมตามลำดับเวลาของอนุภาคจริง (on mass shell) และพบว่าการสร้างและสลายตัวของอนุภาคจริง โม่เมนตัมและพลังงานไม่อนุรักษ์

ทำไมจึงใช้แผนภาพฟายน์แมน ?

- การคำนวณทางพีสิคส์อนุภาคและแบบจำลองมาตรฐานจะใช้กลศาสตร์สัมพัทธภาพ เช่น ปฏิยานุภาคได้มาจากเงื่อนไขที่ว่าสมการเคลื่อนต้องไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อคิดแบบสัมพัทธภาพ
- การคำนวณสมาชิกเมตริกซ์ตามทฤษฎีการรบกวนทำได้ค่อนข้างยาก ต้องใช้ผลรวมตามลำดับเวลาของอนุภาคจริง (on mass shell) และพบว่าการสร้างและสลายตัวของอนุภาคจริง โมนเมนต์ัมและพลังงานไม่อนุรักษ์

ข้อดีในการใช้แผนภาพฟายน์แมน

- โดยทางเทคนิคแล้ว กฎของฟายน์แมน คือ การกระจายแบบอนุกรมกำลัง ของพารามิเตอร์คู่ควบ (coupling parameter)

กฎของฟายน์แมน

ข้อดีในการใช้แผนภาพฟายน์แมน

- โดยทางเทคนิคแล้ว กฎของฟายน์แมน คือ การกระจายแบบอนุกรมกำลัง ของพารามิเตอร์คู่ควบ (coupling parameter)
- ซึ่งวิธีนี้จะมีประโยชน์ก็ต่อเมื่อพารามิเตอร์นี้มีค่าน้อย เพราะทำให้เทอมอันดับสูง เข้าสู่ศูนย์ และสามารถประมาณค่าสมาชิกเมตริกซ์ได้โดยใช้แผนภาพฟายน์แมน พื้นฐานก็เพียงพอแล้ว

กฎของฟายน์แมน

ข้อดีในการใช้แผนภาพฟายน์แมน

- โดยทางเทคนิคแล้ว กฎของฟายน์แมน คือ การกระจายแบบอนุกรมกำลัง ของพารามิเตอร์คู่ควบ (coupling parameter)
- ซึ่งวิธีนี้จะมีประโยชน์ก็ต่อเมื่อพารามิเตอร์นี้มีค่าน้อย เพราะทำให้เทอมอันดับสูง เข้าสู่ศูนย์ และสามารถประมาณค่าสมาชิกเมตริกซ์ได้โดยใช้แผนภาพฟายน์แมน พื้นฐานก็เพียงพอแล้ว
- แก้ปัญหาการไม่อนุรักษโมเมนตัมและพลังงาน โดยเสนอสถานะระหว่างกลาง ที่มีอนุภาคเสมือน (Virtual particles or off mass shell)

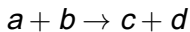
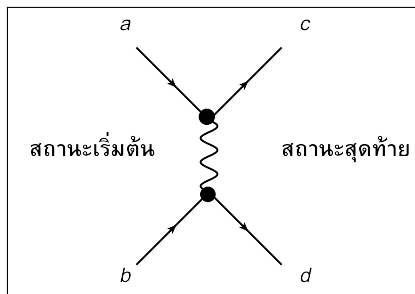
กฎของฟายน์แมน

ข้อดีในการใช้แผนภาพฟายน์แมน

- โดยทางเทคนิคแล้ว กฎของฟายน์แมน คือ การกระจายแบบอนุกรมกำลัง ของพารามิเตอร์คู่ควบ (coupling parameter)
- ซึ่งวิธีนี้จะมีประโยชน์ก็ต่อเมื่อพารามิเตอร์นี้มีค่าน้อย เพราะทำให้เทอมอันดับสูง เข้าสู่ศูนย์ และสามารถประมาณค่าสมาชิกเมตริกซ์ได้โดยใช้แผนภาพฟายน์แมน พื้นฐานก็เพียงพอแล้ว
- แก้ปัญหาการไม่อนุรักษโมเมนตัมและพลังงาน โดยเสนอสถานะระหว่างกลาง ที่มีอนุภาคเสมือน (Virtual particles or off mass shell)

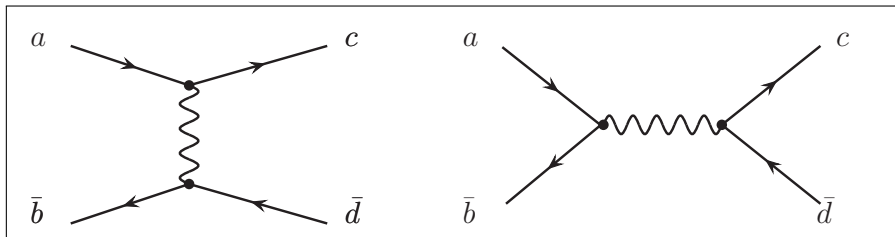
หลักการวาดแผนภาพฟายน์แมน

1. จากซ้ายไปขวาในแผนภาพแสดงถึงเวลาโดยเริ่มกระบวนการทางด้านซ้าย (initial state) แล้วไปสิ้นสุดทางขวา (final state)







หลักการวาดแผนภาพฟายน์แมน

สำหรับ กระบวนการ $a + \bar{b} \rightarrow c + \bar{d}$ ที่มีปฏิยานุภาค \bar{b} และ \bar{d}



หลักการวาดแผนภาพฟายน์แมน

2. ทุกเส้นในแผนภาพแทนอนุภาค หรือ ปฏิยานุภาค

สปิน 0	ฮิกส์	
สปิน $\frac{1}{2}$	ควาร์กและเลปตอน	
สปิน 1	γ, W^\pm, Z^0	
	กลูออน	

จุดที่เกิดอันตรกิริยา คือจุดที่เส้น 3 เส้นพบกันเรียกว่าจุดยอด (vertex) เขียนแทนด้วย \bullet และที่จุดนี้มีแฟกเตอร์ของค่าคู่ควบ (coupling constant) g

หลักการวาดแผนภาพฟายน์แมน

3. เส้นด้านนอก(external line) จะแทนอนุภาคหรือปฏิยานุภาคที่จัดได้ว่าเป็นอนุภาคจริง ๆ โดยทิศทางของลูกศรจะระบุว่าเป็นอนุภาคหรือปฏิยานุภาค

- ในกรณีของอนุภาค

การเคลื่อนที่เข้าหัวลูกศรจะชี้ไปทางจุดยอด



การเคลื่อนที่ออกหัวลูกศรจะชี้ออกจากจุดยอด



- ในกรณีของปฏิยานุภาค

การเคลื่อนที่เข้าหัวลูกศรจะชี้ออกจากจุดยอด



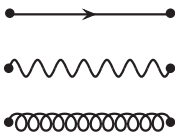
การเคลื่อนที่ออกหัวลูกศรจะชี้ไปทางจุดยอด



หลักการวาดแผนภาพฟายน์แมน

เส้นด้านใน(internal line) หรือ พรอพาเกเตอร์(propagator) เป็นอนุภาคที่พบในช่วงระหว่างกลาง หรือ เรียกว่า อนุภาคเสมือน (Virtual particles) แต่ละพรอพาเกเตอร์จะให้เทอม $\frac{1}{q^2 - m^2}$

- $q^2 = E^2 - \vec{p}^2$ มวลอนุภาคเสมือน (off-shell)
- m^2 มวลอนุภาคจริง (on-shell)



หลักการวัดแผนภาพฟายน์แมน

จาก

หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก

$$\Delta E \Delta t \sim \hbar$$

สามารถหาระยะและเวลาในการเกิดอนุภาคเสมือนได้

- เวลา $\Delta t \sim \frac{\hbar}{\Delta E} = \frac{\hbar}{\Delta mc^2} = \frac{1}{\Delta m}$
- ระยะ $R = c\Delta t = \frac{\hbar}{\Delta mc} = \frac{1}{\Delta m}$

เมื่อ $\hbar = c = 1$ เป็นหน่วยธรรมชาติ

หลักการวาดแผนภาพฟายน์แมน

4. ที่แต่ละจุดยอดในทุกแผนภาพต้องมีการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัมโดยเขียนในรูปของ $(2\pi)^4 \delta^4(p_1 + p_2 + p_3)$ เมื่อ k_i เป็นโมเมนตัม 4 มิติ

- p เครื่องหมายเป็นบวกหากลูกศรของเส้นนั้นพุ่งเข้าหาจุดยอด
- p เครื่องหมายเป็นลบหากลูกศรของเส้นนั้นพุ่งเข้าหาจุดยอด

ซึ่งเตลต้าฟังก์ชันจะเป็นศูนย์หากผลรวมของโมเมนตัมที่เข้าสู่จุดยอดไม่เท่ากับโมเมนตัมที่ออกจากจุดยอด เงื่อนไขนี้ทำให้มั่นใจได้ว่าการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัมที่แต่ละจุดยอด

หลักการวางแผนภาพฟายน์แมน

5. ตรวจสอบปริมาณต่างๆที่อนุรักษ์ของกระบวนการนั้นๆ เช่น การอนุรักษ์ parity ในอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า และ นิวเคลียร์อย่างแรง สมมาตรของอนุภาคที่ เหมือนกันทุกประการ

การใช้กฎของฟายน์แมน

กระบวนการต่างๆ ในฟิสิกส์อนุภาคปริมาณหลักที่สามารถวัดและคำนวณได้ คือ

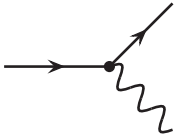
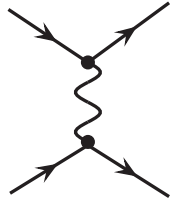
- อัตราการสลายตัว (decay rate, Γ)
- ภาคตัดขวาง (cross section, σ)

ซึ่งในการหาต้องใช้ค่าแอมพลิจูดและปริภูมิเฟส

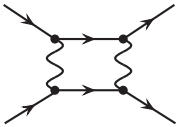
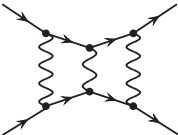
- แอมพลิจูด (A) หรือ สมาชิกเมตริกซ์ (M_{fi}) หาได้จากการใช้กฎของฟายน์แมน โดยแอมพลิจูดบอกข้อมูลทางพลศาสตร์ เช่น ความแรงการคู่ควบ
- ปริภูมิเฟส หรือ ความหนาแน่นสถานะสุดท้าย $\rho(E_f)$ บอกข้อมูลทางจลนศาสตร์ เช่น มวล พลังงาน โมเมนตัม และให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการว่าสามารถที่จะเกิดขึ้นได้หรือไม่

อัตราการสลายตัว

อัตราการสลายตัว คือความน่าจะเป็นต่อหนึ่งหน่วยเวลาที่อนุภาคใดๆจะสลายตัว ซึ่งจะขึ้นกับแอมพลิจูดยกกำลังสอง แต่เนื่องจากแอมพลิจูดขึ้นกับค่าคู่ควบ ดังนั้นอัตราการสลายตัวจึงขึ้นกับค่าคู่ควบด้วย

อัตราการสลายตัว $\propto g^2$	 A Feynman diagram showing a fermion line (solid line with an arrow) entering from the left and interacting with a boson line (wavy line) that branches off to the right. The interaction is represented by a black dot on the fermion line.
อัตราการสลายตัว $\propto g^4$	 A Feynman diagram showing two fermion lines (solid lines with arrows) interacting via a boson exchange (wavy line). The fermion lines cross each other, and the boson line connects the two interaction vertices (black dots).

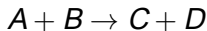
อัตราการสลายตัว

อัตราการสลายตัว $\propto g^8$	
อัตราการสลายตัว $\propto g^{12}$	

ในทฤษฎีการรบกวนที่ g มีค่าน้อย การคำนวณจึงไม่ต้องใช้แผนภาพฟายน์แมนทั้งหมด ใช้เพียงที่ กำลังของ g ต่ำๆ

อัตราการเกิดอันตรกิริยา

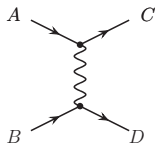
หากมีแผนภาพฟายน์แมนหลายภาพสอดคล้องกับสถานะเริ่มต้นและสถานะสุดท้ายที่เหมือนกัน



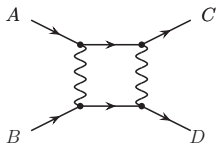
อัตราการเกิดอันตรกิริยาเป็นการรวมกันของแอมพลิจูดแบบอาพันธ์(coherent)

coherent sum

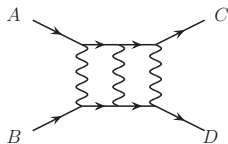
อัตราการเกิดอันตรกิริยา $\propto |A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n|^2$



A_1



A_2



A_3

อัตราการสลายตัว

หากในการสลายตัวของอนุภาคซึ่งสถานะสุดท้ายสามารถมีได้หลายแบบ

$$A \rightarrow B + C \quad \text{แอมพลิจูด } A_1$$

$$A \rightarrow D + E + F \quad \text{แอมพลิจูด } A_2$$

⋮

อัตราการเกิดอันตรกิริยาเป็นการรวมกันของแอมพลิจูด
แบบอนาพันธ์ (incoherent)

incoherent sum

$$\text{อัตราการเกิดอันตรกิริยา} \propto |A_1|^2 + |A_2|^2 + |A_3|^2 + \dots + |A_n|^2$$