

SCPY421 Elementary Particle Physics

วทพส๔๒๑ ฟิสิกส์ของอนุภาคมูลฐาน

Course Description (คำอธิบายรายวิชา)

พลศาสตร์ของอนุภาคมูลฐาน (elementary particle dynamics)

จลนศาสตร์เชิงสัมพัทธภาพ (relativistic kinematics) สมมาตร (symmetries)

สถานะยึดเหนี่ยว (bound states) กฎของไฟน์แมน (Feynman rules)

ไฟฟ้าพลศาสตร์เชิงควอนตัม (quantum electrodynamics)

ไฟฟ้าพลศาสตร์ของควาร์กและฮาดรอน (electrodynamics of quarks and hadrons)

ควอนตัมโครโมไดนามิกส์ (quantum chromodynamics)

อันตรกิริยาอย่างอ่อน (weak interactions) ทฤษฎีเกจ (gauge theories)

เกณฑ์การประเมินผลการศึกษา

Assignments (30%), Midterm Exam (35%) and Final Exam (35%)

Course Outline

1. History of Particle Physics
2. Elementary Particle Dynamics
3. Relativistic Kinematics
4. Symmetries
5. Bound States
6. Feynmann Calculus
7. Dirac Equation
8. Quantum Electrodynamics
9. Electrodynamics of Quarks and Hadrons
10. Quantum Chromodynamics
11. Weak Interactions
12. Gauge Theories

Textbook

David Griffiths, “Introduction to Elementary Particle Physics”,
2nd Revised Edition, Wiley-VHC (2008)

SCPY421 Elementary Particle Physics

วทพส๔๒๑ ฟิสิกส์ของอนุภาคมูลฐาน

บทนำ (Introduction)

“ฟิสิกส์ของอนุภาคมูลฐาน” มีเป้าหมายที่จะตอบคำถาม

อะไรคือ “องค์ประกอบพื้นฐาน” ของสสาร

(ในระดับพื้นฐานที่สุด หรือ ในระดับสเกลที่เล็กที่สุด)

“องค์ประกอบพื้นฐาน” เหล่านั้น มี “อันตรกิริยา” ต่อกันอย่างไร

(ซึ่งจะทำให้รู้ว่า “องค์ประกอบพื้นฐาน” รวมกันเป็น “สสารชนิดต่างๆ” ได้อย่างไร)



เรียก “องค์ประกอบพื้นฐาน” ของสสาร ซึ่ง (เชื่อว่า) “ไม่มีโครงสร้างภายใน” ว่า

“อนุภาคมูลฐาน (elementary particles)”

จากการทดลองพบว่า

ในระดับ “subatomic level”

“อนุภาคมูลฐาน” ซึ่งเป็น “องค์ประกอบพื้นฐาน” ของสสาร “มีเพียงไม่กี่ชนิด”
 (“electrons”, “protons”, “neutrons”, “pi mesons”, neutrinos, ...)

และ “มีขนาดเล็กมากๆ”



เนื้อที่ส่วนใหญ่ของสสารจะเป็น “ที่ว่าง (empty space หรือ vacuum)”

“อนุภาคมูลฐาน” แต่ละชนิดจะมีสมบัติ “indistinguishable”

{ ไม่ใช่แค่ “คล้ายมาก (pretty similar)” แต่ “เหมือนกันทุกประการ (identical)” }

ซึ่งเป็นสมบัติที่ “ไม่มี/ไม่ปรากฏในระดับมหภาพ”

(no analog in the macroscopic world)



ทำให้การศึกษา “อนุภาคมูลฐาน” ง่ายขึ้น

(ในสถานการณ์เดียวกัน “electrons ทุกตัว” จะแสดงพฤติกรรม “เหมือนกัน”)

วิธีการ/แนวทางในการศึกษา

จะเริ่มต้นโดย การ “แนะนำ” อนุภาคมูลฐานชนิดต่างๆ

โดยใช้ “historical perspective” ในการอธิบาย “ที่มา” ของ “อนุภาคมูลฐาน” แต่ละชนิด
ซึ่งจะช่วยให้ “จำ” อนุภาคมูลฐานชนิดต่างๆ ได้ง่ายขึ้น
{เทียบกับการระบุเฉพาะ “ชื่อ” และ “สมบัติต่างๆ (mass, electric charge, spin, ...)”}

จากนั้น จะเป็นการศึกษา “อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคมูลฐาน”

เนื่องจาก
ดังนั้น

อนุภาคมูลฐานมี “ขนาดเล็กมาก”

ไม่สามารถศึกษา “อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคมูลฐาน” ได้โดยตรง

ในการศึกษา “อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคมูลฐาน” จะอาศัยข้อมูลจากการทดลอง 3 รูปแบบคือ

(1) Scattering (2) Decays และ (3) Bound States

Scattering ศึกษาสิ่งที่เกิดขึ้นเมื่อยิงอนุภาคมูลฐาน (ชนิดเดียวกัน หรือต่างชนิดกัน) เข้าชนกัน เช่น ศึกษา “การเปลี่ยนทิศทางของอนุภาค” (โดยการวัด $\text{angle of deflection}$) หรือ ศึกษา “อนุภาคชนิดใหม่ที่เกิดขึ้น” (ในกรณีของ $\text{inelastic scattering}$)

Decays ศึกษา “กระบวนการสลายตัว” ของอนุภาค และ “อนุภาคที่เกิดขึ้นจากการสลายตัว (debris)”

Bound States ศึกษาสมบัติของ “ระบบที่ประกอบด้วยอนุภาคมูลฐานหลายตัวอยู่ร่วมกัน” เช่น “ระดับพลังงานที่เป็นไปได้” และ “กระบวนการเปลี่ยนระดับพลังงาน” ของระบบ

“กระบวนการศึกษาโดยทั่วไป” คือ

- (1) **เดา (guess)** “รูปแบบ” ของ “**อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคมูลฐาน**” (force law) โดยอาศัย “ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง”
- (2) **เลือก** “**ทฤษฎี (theory)**” หรือ “**รูปแบบของกลศาสตร์ (type of mechanics)**” ที่เหมาะสม เพื่อ “อธิบาย-ทำนาย” พฤติกรรมของระบบ
- (3) **เปรียบเทียบ** ระหว่าง “**ผลการทำนายทางทฤษฎี (theoretical predictions)**” กับ “**ผลการทดลอง (experimental results)**”

ทั้งนี้ “รูปแบบ” ของ “**อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคมูลฐาน**” จะต้องนำไปสู่ “**ผล**” ที่สอดคล้องกับ “**General Physical Principles**” ของ “**Special Relativity**” และ “**Quantum Mechanics**” (เนื่องจาก “**อนุภาคมูลฐาน**” จะ “**มีขนาดเล็ก**” และ “**เคลื่อนที่เร็ว**”)

“**The force law**” tells you “**what F is**”,
“**the mechanics**” tells you “**how to use F to determine the motion**”.

ใหญ่ → เล็ก

ช้า ↓ เร็ว	Classical Mechanics	Quantum Mechanics
	Relativistic Mechanics	Quantum Field Theory

วัตถุที่มี “ขนาดใหญ่” และ “เคลื่อนที่ช้า”
(วัตถุที่พบเห็นในชีวิตประจำวันทั่วไป)

→

“Classical Mechanics”

วัตถุที่มี “ขนาดใหญ่” และ “เคลื่อนที่เร็ว”
(อัตราเร็วเข้าใกล้ “อัตราเร็วของแสง”)

→

“Relativistic Mechanics”

วัตถุที่มี “ขนาดเล็ก” และ “เคลื่อนที่ช้า”
(ขนาดพอๆ กับ “ขนาดของ atom”)

→

“Quantum Mechanics”

วัตถุที่มี “ขนาดเล็ก” และ “เคลื่อนที่เร็ว”

→

“Quantum Field Theory”

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าเราจะ

“ไม่รู้” รูปแบบที่แน่นอนของอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคมูลฐาน

เราก็ยังสามารถ

สรุป “บางอย่าง” เกี่ยวกับ “พฤติกรรมของระบบอนุภาคมูลฐาน” ในภาพรวม ได้

โดยใช้ “General Features” ของ “ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง”

[“Classical Mechanics” หรือ “Relativistic Mechanics” หรือ

“Quantum Mechanics” หรือ “Quantum Field Theory”]

(ซึ่ง “ไม่ขึ้น” กับ “รูปแบบที่แน่นอนของอันตรกิริยา”)

“Classical Mechanics (CM)”

Newtonian หรือ Lagrangian หรือ Hamiltonian formalisms

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d}{dt}(m\mathbf{v})$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) = \frac{\partial L}{\partial q}$$

$$\frac{\partial H}{\partial q} = -\dot{p} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial H}{\partial p} = \dot{q}$$

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}$$

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

$$E_p = mgh$$



ไม่มี “อนุภาคที่มีมวลเป็นศูนย์”

“Mass” is “strictly conserved”. \leftrightarrow

$$\sum_i m_i = \sum_j m_j$$

Classical Mechanics \rightarrow การสลายตัว $\Delta \rightarrow p + \pi$ จะ เกิดขึ้น “ไม่ได้”

(เนื่องจาก $m_\Delta > m_p + m_\pi$)

“Relativistic Mechanics (RM)” หรือ “Special Relativity (SR)”

วัตถุที่มี “ขนาดใหญ่” และ “เคลื่อนที่เร็ว” (อัตราเร็วเข้าใกล้ “อัตราเร็วของแสง”)

$$p = \frac{mu}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = E_k + E_0 = E_k + mc^2$$

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$



มี “อนุภาคที่มีมวลเป็นศูนย์” ได้

(โดยอนุภาคนั้นจะต้องเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเท่ากับอัตราเร็วของแสง)

“Energy” and “momentum” are “always conserved”.

Relativistic Mechanics → การสลายตัว $\Delta \rightarrow p + \pi$ สามารถ “เกิดขึ้นได้”

“Quantum Mechanics (QM)”

วัตถุที่มี “ขนาดเล็ก” และ “เคลื่อนที่ช้า” (ขนาดพอๆ กับ “ขนาดของ atom”)

เราบรรยาย “ระบบ (system)” โดยการระบุ “สถานะ (state)”

เราสามารถระบุ สถานะ “ s ” ของระบบ

โดยใช้ “wave function, ψ_s ” (ใน Schrödinger’s formulation)

หรือใช้ “ket, $|s\rangle$ ” (ใน Dirac’s formulation)

“กระบวนการทางฟิสิกส์ (physical process)”

[ไม่ว่าจะเป็น “การกระเจิง” “การสลายตัว” หรือ “การเกิด bound state”]

ก็คือ “การเปลี่ยนสถานะ (transition)” ของระบบ จากสถานะหนึ่ง ไปยังอีกสถานะหนึ่ง

ลักษณะเฉพาะอย่างหนึ่งของ Quantum Mechanics ก็คือ

The “outcome” is not uniquely determined by the “initial conditions”

“การเปลี่ยนสถานะ” ของ “ระบบที่สมมูล (equivalent) กัน”

จาก “สถานะเริ่มต้น (initial state) แบบเดียวกัน”

[มี “เงื่อนไขเริ่มต้น (initial conditions) แบบเดียวกัน”]

ไม่จำเป็นต้องเหมือนกัน/สามารถเกิดได้หลายแบบ [มีสถานะสุดท้าย (final state) ต่างกัน]

“คำนวณ” ได้เฉพาะ “โอกาส (probability) ที่การเปลี่ยนสถานะแต่ละแบบจะเกิดขึ้น”

สมบัติ “indeterminacy” นี้ จะปรากฏใน/มีผลต่อ “พฤติกรรมของอนุภาค”

เช่น ในการศึกษา การสลายตัวของ “charged pi mesons (หรือ charged pions)” พบว่า



There is “no difference” in the original pions; they’re all “identical”.

It is simply “a fact of nature” that “a given particle can go either way”.

Schrödinger's "Wave" Mechanics

→ "First-Order Time-Dependent Perturbation Theory" ←

โอกาสที่จะเกิดการเปลี่ยนสถานะ (transition probability)

จาก สถานะเริ่มต้น (initial states, "i") ไปยัง สถานะสุดท้าย (final state, "f")
ภายในช่วงเวลา t นับจากเวลาที่ระบบเริ่มถูกรบกวนโดย "perturbation, $H_1(t)$ "

โดยที่ ก่อนถูกรบกวน ระบบอยู่ใน สถานะ "i" 100%

$$[c_n(t=0) = c_n^{(0)} = \delta_{ni}]$$

จะเท่ากับ โอกาสที่จะพบระบบในสถานะสุดท้าย "f"

$$P_{i \rightarrow f}^{(1)}(t) = |c_f^{(1)}(t)|^2 = \frac{1}{\hbar^2} \left| \int_0^t dt \langle \psi_f^{(0)}(\mathbf{r}) | H_1(t) | \psi_i^{(0)}(\mathbf{r}) \rangle e^{i\omega_{fi}t} \right|^2$$

Feynman's "Path Integral" Formulation

$$\text{transition probability} = |\text{transition amplitude}|^2$$

เมื่อ "transition amplitude" คือ "integral" ของปริมาณ

$$\exp\left(\frac{i}{\hbar}S\right)$$

"over all possible paths" จาก "initial state" ถึง "final state"

โดยที่ "S" คือ "classical action": $S = \int_0^T dt L(q(t), \dot{q}(t))$

และ "L" คือ "classical Lagrangian" : $L(q, \dot{q}) = \frac{1}{2}m\dot{q}^2 - V(q)$

“Quantum Field Theory (QFT)”

วัตถุที่มี “ขนาดเล็ก” และ “เคลื่อนที่เร็ว”

เป็นผลจากการรวม (“เงื่อนไข” ของ) Relativity และ Quantum Mechanics เข้าด้วยกัน

ให้ “ผลลัพธ์” (และ “คำทำนาย”) ซึ่ง แต่ละทฤษฎี (โดยลำพัง) ไม่สามารถให้ได้

(1) การมีอยู่ของ “ปฏิยานุภาค” (existence of “antiparticles”)

“มวลของ antiparticle” จะเท่ากับ “มวลของ particle”

แต่จะมี “quantum numbers บางตัว” ที่มีเครื่องหมาย “ตรงข้าม” กับของอนุภาค
(เช่น ประจุไฟฟ้า, “lepton” number, ...)

(2) Pauli’s Exclusion Principle

[ใน non-relativistic quantum mechanics มีสถานะเป็น “สมมุติฐาน (hypothesis)”]

(3) “TCP” Theorem

“physical system” จะ “ไม่เปลี่ยน” ภายใต้ “TCP operation”

“T” = “time reversal” operation เปลี่ยน “ t ” เป็น “ $-t$ ” (ย้อนเวลา)

“C” = “charge conjugation” operation เปลี่ยน “particle” เป็น “antiparticle”

“P” = “parity” operation (reflection through origin) เปลี่ยน “ r ” เป็น “ $-r$ ”

“QFT ในรูปแบบที่สมบูรณ์” → “ยาก” และ “ลึก” (“difficult” and “deep”)

Richard Phillips Feynman [1918-1988, Nobel Prize in Physics 1965 (QED)]

คิดค้น a “beautiful” and “intuitively satisfying” formulation โดยใช้

“Feynman’s Diagrams” และ “Feynman’s Rules”

ซึ่งไม่ยากที่จะเรียน (และนำไปใช้งาน)

[การ “derive” Feynman’s rules (จาก QFT) เป็นอีกเรื่องหนึ่ง → “graduate” level]

ในช่วงทศวรรษ 1960 และ 1970 (~ 1961-1979) เรามี

“Collection of Related Theories”

ซึ่งสามารถบรรยาย “อันตรกิริยาทุกชนิดระหว่างอนุภาคมูลฐาน” ยกเว้น Gravity
{“Gravity” จะ “อ่อนมาก” → ไม่มีบทบาทใน Ordinary Particle Processes}

Quantum Electrodynamics (QED) บรรยาย “Electromagnetic” Interactions

Quantum Flavordynamics (QFD) บรรยาย “Weak” Interactions
[“Glashow–Weinberg–Salam” Theory of “Electroweak” Interaction]

Quantum Chromodynamics (QCD) บรรยาย “Strong” Interactions

ทฤษฎีเหล่านี้ ซึ่งมีพื้นฐานบนแนวคิดที่ว่า

มี “Two” Families of Elementary Particles (“Leptons” กับ “Quarks”)

ถูกเรียกรวมๆ กันว่า “Standard Model” (of Elementary Particles)

“Standard Model” ได้รับความยอมรับโดยทั่วไป (generally accepted/approved)
[ผ่าน every experimental test (จนถึงปัจจุบัน)]

แต่ก็ยัง “ไม่ใช่ทฤษฎีที่สมบูรณ์” (มีอะไรอีกหลายอย่างที่ Standard Model อธิบายไม่ได้)

จุดเด่นอันหนึ่งของ Standard Model คือ

“อันตรกิริยาพื้นฐานทุกชนิด” สามารถ “derive” ได้จาก “หลักการทั่วไปอันเดียวกัน”
ซึ่งก็คือ เงื่อนไขของ “local gauge invariance”

All of the fundamental interactions derive from one general principle,
the requirement of “local gauge invariance”.

“ทฤษฎีที่สมบูรณ์” น่าจะเป็น การ “ขยาย” จาก Standard Model (ไม่ใช่การ “ยกเลิก”)
 (“extensions” of the Standard Model, not its “repudiation”)

รายวิชานี้จะศึกษาเกี่ยวกับ Elementary Particle “Theory”
(→ อาจเรียกชื่อเป็น “Introduction to the Standard Model”)

ส่วนที่เกี่ยวข้องกับ Experimental Methods หรือ Instrumentation จะมีน้อยมาก ๆ

จะพิจารณาเฉพาะ “two most obvious experimental questions”

(1) How Do We “Produce” Elementary Particles?

เรา “ผลิต” อนุภาคมูลฐาน ได้อย่างไร

(2) How Do We “Detect” Elementary Particles?

เรา “ตรวจสอบ/ตรวจจับ” อนุภาคมูลฐาน ได้อย่างไร

(1) How Do We “Produce” Elementary Particles?

เรา “ผลิต” อนุภาคมูลฐาน ได้อย่างไร

“electrons” : ให้ “ความร้อน” กับ “โลหะ” electrons จะหลุดออกมา

“protons” : ดึง electron ออกจาก hydrogen (“ionize” hydrogen)

“exotic particles” (เช่น “muons”, “pions”, “positrons”, “antiproton”, ...) :

สามารถได้จาก “3 แหล่งกำเนิดหลัก” คือ

(i) รังสีคอสมิก (cosmic rays)

(ii) เตปฏิกิริยานิวเคลียร์ (nuclear reactors)

และ (iii) เครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerators)

(i) รังสีคอสมิก { cosmic rays – อนุภาคพลังงานสูงจากนอกโลก (ส่วนมากคือ protons) }

เมื่อ “cosmic rays” ชนกับ “อะตอมที่อยู่ในบรรยากาศชั้นบน (upper atmosphere)”

จะทำให้เกิด “showers of secondary particles”

ซึ่งจะสลายตัว (เนื่องจากไม่เสถียร) ไปเป็นอนุภาคอื่น (ที่เสถียรกว่า)

“อนุภาคที่พบที่ระดับผิวโลก” มักเป็น “muons” หรือ “neutrinos”

“2 ข้อดี” ของ “อนุภาคที่ได้จาก cosmic rays”

(a) “ฟรี” และ (b) สามารถมี “พลังงานสูงมาก” (มากกว่าของอนุภาคที่ผลิตในห้องทดลอง)

“2 ข้อเสีย” ของ “อนุภาคที่ได้จาก cosmic rays”

(a) ความหนาแน่นของอนุภาคน้อย (โอกาสที่อนุภาคจะวิ่งผ่านเข้าไปใน detector น้อย)

และ (b) ไม่สามารถควบคุมได้เลย (completely uncontrollable)



“การทดลองที่เกี่ยวกับ/ต้องใช้ cosmic rays” ต้องอาศัยทั้ง “ความอดทน” และ “โชค”

[“Cosmic experiments” call for “patience” and “luck”.]

(ii) เตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (nuclear reactors)

เมื่อ “radioactive nuclei” เกิดการ “สลายตัว” (“decay” หรือ “disintegrate”)
จะมีการปล่อยอนุภาคออกมาหลายชนิด เช่น

“alpha (α) rays” หรือ “alpha (α) particles”

(“bound state ของ 2 neutrons และ 2 protons” หรือ “nucleus ของธาตุ helium”)

“beta rays” หรือ “beta particles”

(ซึ่งก็คือ “electrons” หรือ “positrons”)

gamma (γ) rays

(ซึ่งก็คือ “photons”)

“neutrons” และ “neutrinos”

(iii) เครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerators)

ถ้าทำการ “เร่ง (accelerate)” อนุภาค (เช่น electrons หรือ protons ซึ่งมีประจุไฟฟ้า) ให้มีพลังงานสูงมากๆ แล้วจัดให้มัน ชนกันเอง หรือ ชนกับ “เป้า (target)” จะทำให้ “เกิดอนุภาคใหม่” ขึ้นได้ {เรียก “อนุภาคที่เกิดขึ้นเนื่องจากการชน” ว่า “debris”}

โดยการจัดวาง “ตัวดูดกลืน (absorbers)” และ “แม่เหล็ก (magnets)” อย่างเหมาะสม จะสามารถแยก “อนุภาคชนิดที่ต้องการศึกษา” ออกจาก “อนุภาคชนิดอื่นๆ ได้”

โดยวิธีการนี้ experimental particle physicists สามารถสร้าง/ผลิต “intense secondary beams of positrons, muons, pions, kaons, B -mesons, antiprotons, and neutrinos” ซึ่งสามารถนำไป “ยิง” เป้าอื่นๆ ต่อได้

โดยทั่วไป

มวลของอนุภาค (ที่ต้องการสร้าง) ยิ่งมาก ยิ่งต้องการพลังงาน (ในการชน) มาก

The heavier the particle (you want to produce), the higher must be the energy of the collision

ดังนั้น

อนุภาคที่มีมวล (น้ำหนัก) น้อย จึง ถูก “ คั่นพบ / สร้างขึ้นได้ ” ก่อน

เมื่อสามารถเร่งอนุภาคให้มีพลังงานสูงขึ้น จึง เริ่มที่จะคั่นพบ / สร้างอนุภาคที่มีมวลมาก

นอกจากนี้ พบว่า

“ การเร่งอนุภาค 2 ตัว ให้มีพลังงานสูง แล้วจัดให้เข้าชนกัน ” จะให้

“ relative collision energy ” ที่สูงกว่า “ การเร่งอนุภาคให้ชนกับอนุภาค / เป้าที่อยู่นิ่ง ”

ซึ่งนำไปสู่

การสร้าง “ เครื่องเร่งอนุภาคชนิดวงกลม (circular accelerators) ” หรือ “ Collider ”

โดยที่ อนุภาคจะถูกควบคุมให้ “ เคลื่อนที่เป็นวงกลม ” ภายใน “ loop ” หรือ “ ring ”

ในกรณีที่ต้องการจัดให้

“particles” ขนกับ “antiparticles” จะสามารถ “ใช้ loop/ring เดียวกัน” ได้
(เช่น “electrons” กับ “positrons” หรือ “protons” กับ “antiprotons”)

ทั้งที่เนื่องจาก

ภายใต้สนามแม่เหล็ก (magnetic field, B) อันเดียวกัน สามารถจัดให้
“particles” เคลื่อนที่เป็น “วงกลม” ใน “แนวเดียวกัน” แต่ “ทิศตรงข้าม” กับ “antiparticles”
(ระลึกว่า “particles” กับ “antiparticles” จะมีประจุไฟฟ้า “ตรงข้ามกัน”)

จาก $F_B = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ และ $q_{\bar{p}} = -q_p$ จะได้ว่า ถ้า $\mathbf{v}_{\bar{p}} = -\mathbf{v}_p$ แล้ว $F_B(p) = F_B(\bar{p})$
เนื่องจาก $F_B \perp \mathbf{v}$ ดังนั้น ทั้ง “particles” และ “antiparticles” จะเคลื่อนที่เป็น “วงกลม”
โดยมี F_B ทำหน้าที่เป็น “แรงสู่ศูนย์กลาง (centripetal force, F_C)”

ในกรณีที่จัดให้ $\mathbf{B} \perp \mathbf{v}$ จะได้ว่า $F_B = qvB = F_C = ma_C = m \left(\frac{v^2}{r} \right)$

เมื่อ “อนุภาคที่มีประจุ” เคลื่อนที่โดย “มีความเร่ง”

จะมี การ “สูญเสีย/ปลดปล่อยพลังงาน” โดย กระบวนการ “แผ่รังสี (radiation)”
(ปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของ “คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า”)

ในกรณีของ “การเคลื่อนที่เป็นวงกลม” เรียกกระบวนการนี้ว่า “Synchrotron Radiation”
(ซึ่งมี “ความเร่งสู่ศูนย์กลาง” แน่ๆ และ อาจมี “ความเร่งในแนวการเคลื่อนที่” ด้วย)

“ผลของ Synchrotron Radiation” จะทำให้

ประสิทธิภาพของ circular accelerator ในการ “เร่ง (เพิ่มพลังงานให้กับ)”

อนุภาคที่ “มีมวลน้อย” [เช่น electrons ($m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$)] ลดลงอย่างมาก
(สำหรับ อนุภาคที่ “มีมวลมาก” จะมี “ความเร่งน้อยกว่า” → “สูญเสียพลังงานน้อยกว่า”)



ใช้ เครื่องเร่งอนุภาคชนิด “วงกลม” (“circular” accelerators) กับ อนุภาคที่ “มีมวลมาก”

ใช้ เครื่องเร่งอนุภาคชนิด “เส้นตรง” (“linear” accelerators) กับ อนุภาคที่ “มีมวลน้อย”
(อนุภาคจะเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง จากปลายด้านหนึ่ง ไปยังปลายอีกด้านหนึ่ง)

โดยทั่วไป

พลังงานในการชน “ยิ่งมาก” อนุภาค (ที่ถูกยิงเข้าหากัน) จะ “ยิ่งเข้าใกล้กัน” มากขึ้น

The “higher” the energy of the collision, the “closer” the two particles come to one another.

ดังนั้น

ในการศึกษา interactions “at very short range” (เมื่ออนุภาค “อยู่ใกล้กันมากๆ”)

จำเป็นต้องใช้ “อนุภาคที่มีพลังงานสูง” (ยิงเข้าใส่กัน)

(To probe “small distances”, you need “high energies”.)

นี่คือ เหตุผลหนึ่งที่ particle physicists สนับสนุนการสร้าง “เครื่องเร่งอนุภาคพลังงานสูง”

หมายเหตุ ในการศึกษา “วัตถุ” ต้องเลือกใช้ “เครื่อง/ตัวตรวจสอบ (probe)” ที่เหมาะสม

ตัวอย่างเช่น ในการศึกษา “อนุภาค A” โดยการยิงด้วย “อนุภาค B” (ทำหน้าที่ “probe”)

“de Broglie’s wavelength ของอนุภาค B” ต้องเล็กกว่า “ขนาดของอนุภาค A”

(มิฉะนั้น จะไม่สามารถ “เห็น” รายละเอียดของอนุภาค A)

จาก $\lambda_B = \frac{h}{p_B}$ จะได้ว่า p_B ต้องมี “ค่าโต” ซึ่งก็คือ ต้องใช้อนุภาคที่มี “พลังงานสูง”

ในปัจจุบัน (2014)

“Large Hadron Collider (LHC)” เป็น “เครื่องเร่งอนุภาคชนิดวงกลม” หรือ “Collider” ที่มี “ขนาดใหญ่ที่สุด” และ (สามารถเร่งอนุภาคในกลุ่ม Hadron ให้) “มีพลังงานมากที่สุด” (the world’s “largest” and “most powerful” particle collider)

Large ↔ “loop” หรือ “ring” หรือ “beam-line” ของ LHC มี “ขนาดใหญ่” [วางตัวอยู่ใน “อุโมงค์วงกลม (circular tunnel)” ที่มี “เส้นรอบวง 27 กิโลเมตร” โดยอยู่ที่ระดับความลึก (จากพื้นดิน) ระหว่าง 50 เมตร ถึง 175 เมตร]

Hadron ↔ LHC ถูกออกแบบสำหรับเร่งอนุภาคในกลุ่ม Hadron [ในปัจจุบัน ใช้เร่ง “proton (p)” และ “nucleus ของตะกั่ว (lead, Pb⁸²⁺)”]

Collider ↔ LHC เป็น “เครื่องเร่งอนุภาคชนิดวงกลม” หรือ “Collider” เร่งอนุภาค 2 กลุ่ม ให้เคลื่อนที่เป็นวงกลม ในทิศทางตรงข้ามกัน แล้วจัดให้ “ชนกัน”

→ จัดสร้างโดย “CERN (European Organization for Nuclear Research)” ระหว่างปี 1998 ถึง 2008 ในบริเวณพรหมแดนระหว่างฝรั่งเศสกับสวิตส์เซอร์แลนด์

“LHC” เป็นเครื่องเร่งอนุภาค “เครื่องล่าสุด” ของ “CERN Accelerator Complex”
ซึ่งประกอบด้วย “เครื่องเร่งอนุภาคหลายเครื่อง/หลายชนิด”
ที่ถูกออกแบบให้ “ทำงานร่วมกัน/ต่อเนื่องกัน”

Linear Particle Accelerators : LINAC 2 และ LINAC 3

[LINAC 2 สำหรับเร่ง proton และ LINAC 3 สำหรับเร่ง ions (nucleus ของตะกั่ว)]

Low-Energy Ion Ring (LEIR) [สำหรับ ions]

Proton Synchrotron Booster (PSB) [สำหรับทั้ง proton และ ions]

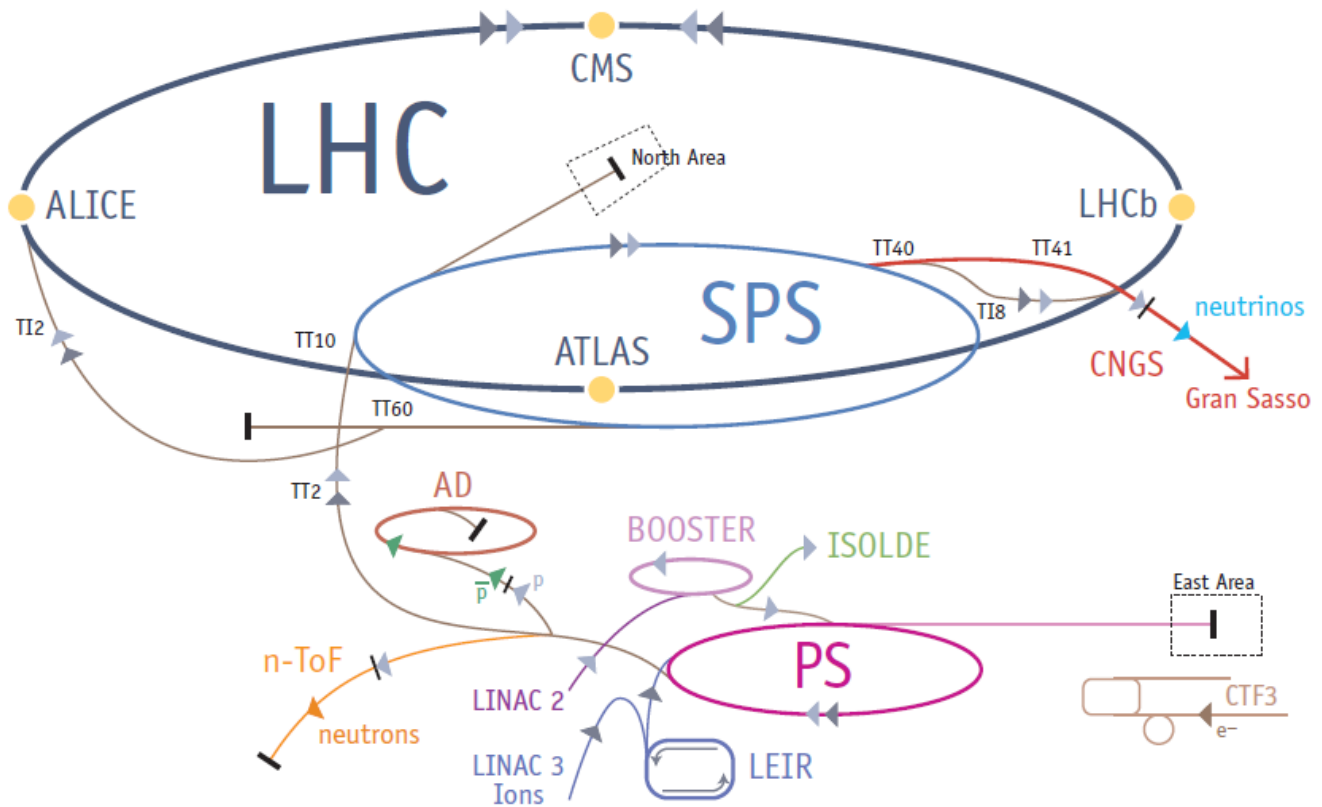
Proton Synchrotron (PS) [สำหรับทั้ง proton และ ions]

Super Proton Synchrotron (SPS) [สำหรับทั้ง proton และ ions]

Large Hadron Collider (LHC) [สำหรับทั้ง proton และ ions]

เครื่องเร่งอนุภาคแต่ละเครื่อง จะเร่งอนุภาคให้มีพลังงานสูงขึ้น
ก่อนจะส่งต่อไปให้กับเครื่องเร่งอนุภาคเครื่องถัดไป
ซึ่งจะเร่งให้อนุภาคมีพลังงานสูงขึ้นอีก

“CERN Accelerator Complex”



ในกรณีของ Large Hadron Collider (LHC)

อนุภาคจะถูกควบคุมให้ “เคลื่อนที่เป็นวงกลม” โดยใช้ “Superconducting Magnets”

ทำให้ LHC เป็น “the largest cryogenic system in the world”

และเป็น “one of the coldest places on Earth”

(1) Superconducting “Dipole” Magnets จำนวน 1232 ตัว

มีขนาดใหญ่ที่สุด แต่ละตัว ยาวประมาณ 15 เมตร และหนักประมาณ 35 ตัน

ทำหน้าที่ควบคุมอนุภาคให้ “เคลื่อนที่เป็นวงกลม”

(2) Superconducting “Quadrupole” Magnets (392 ตัว แต่ละตัว ยาว 5–7 เมตร)

ทำหน้าที่ “focus ลำอนุภาค” ให้มี “ขนาดเล็กที่สุด” ที่ “collision points”

[“บีบ (squeeze)” อนุภาคในลำอนุภาคให้อยู่ใกล้กัน เพื่อเพิ่มโอกาสในการชน]

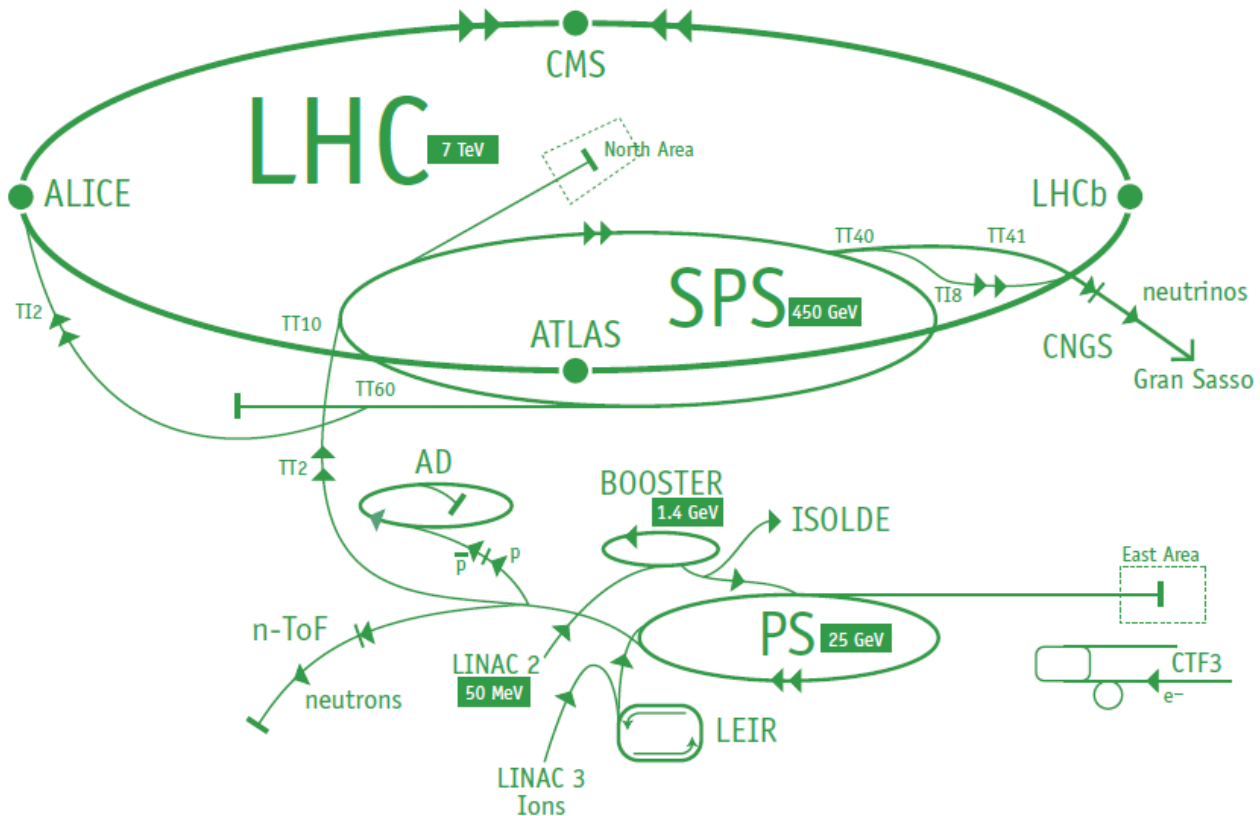
นอกจากนี้ ยังมี การใช้ “Correction” Magnets ขนาดเล็ก ชนิดต่างๆ หลายพันตัว

{“sextupole”, “octupole”, “decapole” magnets }

เพื่อช่วยในการปรับ “ตำแหน่ง” และ “ขนาด” ของลำอนุภาค

จำนวน Magnets ทั้งหมดของ LHC คือ 9539 ตัว

LHC สามารถเร่ง “proton” ให้มีพลังงานสูงถึง 7 TeV (7×10^{12} eV)



สำหรับกรณีของ “nucleus ของตะกั่ว, Pb^{82+} ,” $\rightarrow 2.76 \text{ TeV per nucleon}$

Lead ions are produced from a highly purified lead sample heated to a temperature of about 500°C. The lead vapour is ionized by an electron current. Many different charge states are produced with a maximum around Pb^{29+} . These ions are selected and accelerated to 4.2 MeV/u (energy per nucleon) before passing through a carbon foil, which strips most of them to Pb^{54+} . The Pb^{54+} beam is accumulated, then accelerated to 72 MeV/u in the Low Energy Ion Ring (LEIR), which transfers them to the PS. The PS accelerates the beam to 5.9 GeV/u and sends it to the SPS after first passing it through a second foil where it is fully stripped to Pb^{82+} . The SPS accelerates it to 177 GeV/u then sends it to the LHC, which accelerates it to 2.76 TeV/u.

ข้อมูลจาก CERN Website: “www.cern.ch”

(2) How Do We “Detect” Elementary Particles?

เรา “ตรวจสอบ/ตรวจจับ” อนุภาคมูลฐาน ได้อย่างไร

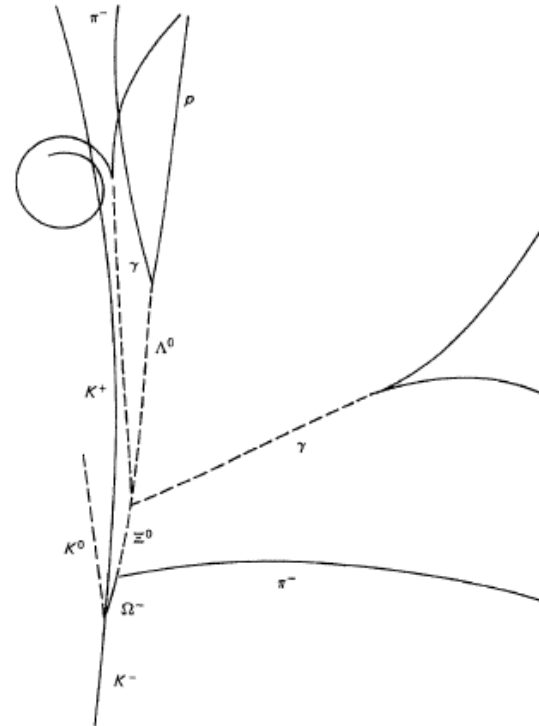
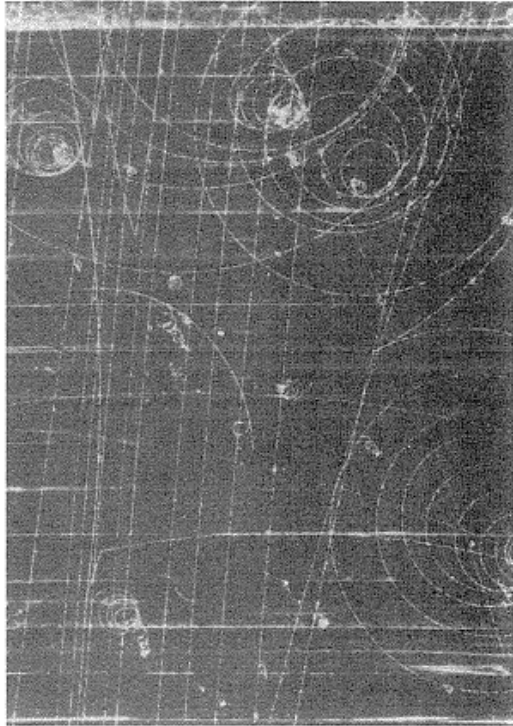
ในปัจจุบัน มี “เครื่องตรวจจับอนุภาค (Detectors)” มากมายหลายชนิด

Geiger counters, cloud chambers, bubble chambers, spark chambers,
drift chamber, photographic emulsions, Cerenkov counters,
scintillators, photomultipliers,

“กลไกในการตรวจจับ (Detection Mechanisms)” ของเครื่องตรวจจับอนุภาค

หลักการทำงานของเครื่องตรวจจับอนุภาค (ส่วนใหญ่) จะมีพื้นฐานอยู่บนความจริงที่ว่า เมื่อ “อนุภาคที่มีพลังงานสูงและมีประจุไฟฟ้า (high-energy charged particles)” เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปใน (ตัวกลางของ) เครื่องตรวจจับอนุภาค (detectors) จะทำให้เกิด “ionization” ของ “อะตอมของตัวกลาง” ที่อยู่ตามเส้นทางที่ “มัน” เคลื่อนที่ผ่าน “ionized atoms ที่เกิดขึ้น” (ตามเส้นทางที่อนุภาคเคลื่อนที่) จะทำหน้าที่เป็น “ต้นกำเนิด (seeds)” ของ การเกิด “droplets” (ใน “cloud” chamber) หรือ “bubbles” (ใน “bubble” chamber) หรือ “sparks” (ใน “spark” chamber) ทำให้เรา เห็น “เส้นทางการเคลื่อนที่” หรือ “track” ของอนุภาค

“อนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า” จะไม่ทำให้เกิด ionization จึง ไม่มี/ไม่ทิ้ง “track” ให้เราเห็น โดยการวิเคราะห์ “tracks” ของ charged particles (ใช้ conservation of energy and momentum ที่แต่ละ “vertex”) จะระบุ “เส้นทาง” และ “ชนิด” ของ neutral particles ได้



Discovery of Ω^- : “Actual” bubble chamber photograph (ซ้าย) และ
 “Line diagram” of the relevant tracks (ขวา)

สามารถระบุ “เส้นทาง” และ “ชนิด” ของ 5 neutral particles : K^0, Ξ^0, Λ^0 และ 2γ

Four Major Detectors /Experiments ของ Large Hadron Collider (LHC)

(1) ALICE (A Large Ion Collider Experiment)

สำหรับศึกษา “lead-ion collisions” ซึ่งทำให้เกิด “quark-gluon plasma”

(2) ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus)

เป็น “large” and “general-purpose” particle detector สำหรับการศึกษากลศาสตร์ในวงกว้าง ตั้งแต่ ค้นหา “Higgs boson” ถึง “supersymmetry (SUSY)” และ “extra dimensions”

(3) CMS (Compact Muon Solenoid)

เป็น “large” and “general-purpose” particle detector เหมือนกับ ATLAS แต่ใช้ “different technical solutions and design”

(4) LHCb (Large Hadron Collider beauty) experiment

สำหรับศึกษา “ความไม่สมมาตร (asymmetry)” ของ “matter” และ “antimatter” ซึ่งพบใน interactions ระหว่าง “B-particles” (มี “b quark” เป็นองค์ประกอบ)

Three Minor Detectors /Experiments ของ Large Hadron Collider (LHC)

(1) LHCf (Large Hadron Collider forward) experiment

ศึกษาอนุภาคที่เกิดขึ้น “ในทิศทางของลำอนุภาค” ใน proton-proton collisions
อยู่ใกล้ ATLAS

(2) TOTEM (TOTAL Elastic and diffractive cross section Measurement)

วัด “effective size” หรือ “cross-section” ของ “proton”
อยู่ใกล้ CMS

(3) MoEDAL (Monopole and Exotics Detector At LHC)

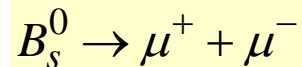
เพื่อค้นหา “magnetic monopole (อนุภาคที่มี magnetic charge)”
และ “highly ionizing Stable Massive Particles (SMPs)”
(ซึ่งทำนายโดย Theories beyond the Standard Model)
อยู่ใกล้ LHCb

“ผลงานสำคัญ” ของ Large Hadron Collider (LHC)

→ การค้นพบ/สังเกตเห็น “ χ_b (3P) bottomonium meson” ←
(“meson” ที่มี “bottom หรือ beauty quark” เป็นองค์ประกอบ)
จาก “proton-proton collision”

22 ธันวาคม 2011

→ การค้นพบ/สังเกตเห็น “การสลายตัวของ B_s meson ไปเป็น 2 muons” ←
ซึ่งมีโอกาที่จะเกิดขึ้นได้น้อยมาก



8 พฤศจิกายน 2012

→ การค้นพบ “Higgs boson” ←

4 กรกฎาคม 2012

“ATLAS” และ “CMS” ประกาศการค้นพบ

“อนุภาค boson ชนิดใหม่” ที่มี “มวล” อยู่ระหว่าง “125-126 GeV/c²”
ซึ่ง “สอดคล้องกับ (consistent with)” มวลของ “Higgs boson/particle”

14 มีนาคม 2013

“CERN” ยืนยันว่า “อนุภาค boson ที่ถูกค้นพบ” คือ “Higgs boson/particle”

“แนวคิดเกี่ยวกับ Higgs bosons และ Higgs fields” เกิดขึ้นโดย นักวิทยาศาสตร์หลายคน

Gerald Guralnik, C. R. Hagen และ Tom Kibble ในฤดูใบไม้ผลิ ปี 1963

François Englert และ Robert Brout ในเดือนสิงหาคม 1964

Peter Higgs ในเดือนตุลาคม 1964

เพื่ออธิบาย “กลไกของการเกิดมวลของอนุภาคมูลฐาน”

“กลไกของการเกิดมวลของอนุภาคมูลฐาน” ซึ่งนิยมเรียกเป็น

“Higgs” mechanism

จึงถูกเรียกเป็นชื่อต่างๆ อีกหลายชื่อ เช่น

“Brout–Englert–Higgs” mechanism

“Englert–Brout–Higgs–Guralnik–Hagen–Kibble” mechanism

“Anderson–Higgs” mechanism,

“Anderson–Higgs–Kibble” mechanism,

“Higgs–Kibble” mechanism (โดย Abdus Salam)

“ABEGHHK'tH” mechanism (โดย Peter Higgs)

[จาก Anderson, Brout, Englert, Guralnik, Hagen, Higgs, Kibble และ 't Hooft]

8 ตุลาคม 2013

Peter Higgs และ François Englert ได้รับรางวัล “2013 Nobel Prize in Physics”

“for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of the mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN’s Large Hadron Collider”.

Robert Brout (นักฟิสิกส์ทฤษฎี ชาวอเมริกัน-เบลเยียม) ถึงแก่กรรม 3 พฤษภาคม 2011

“Nobel prize” จะมอบให้กับ “บุคคล” (ไม่ให้กับ “กลุ่มบุคคล” หรือ “องค์กร”) ที่ยัง “มีชีวิต”
โดยในแต่ละสาขา จะมีผู้ได้รับรางวัลไม่เกิน 3 คน/ปี

“หน่วย” ของปริมาณต่างๆ ที่ใช้ในวิชา Particle Physics

เนื่องจาก “ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคมูลฐาน/อะตอม/นิวเคลียส” จะมี “ขนาดเล็กมากๆ”

→ ไม่เหมาะที่จะใช้ “หน่วยที่ใช้ใน Macroscopic Physics” {เมตร (m), จูล (J), ...} ซึ่ง “ใหญ่เกินไป” ทำให้ “ค่าของปริมาณต่างๆ” เมื่อวัดในหน่วยเหล่านี้ “เล็กมาก”

เช่น “มวลของ electron” : $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ kg

“หน่วยของพลังงาน” ที่เหมาะสม คือ “electron-volt (eV)” และ “its derivatives” {เช่น keV (10^3 eV), MeV (10^6 eV), GeV (10^9 eV) และ TeV (10^{12} eV)}

“atomic physics” จะมี typical energies อยู่ในช่วง “eV”

สำหรับ “nuclear physics” และ “particle physics” หน่วย “eV” จะ “เล็กเกินไป”

“nuclear physics” จะมี typical energies อยู่ในช่วง “keV”

“particle physics” จะมี typical energies อยู่ในช่วง “MeV”, “GeV” หรือ “TeV”

พลังงาน 1 eV \equiv พลังงานที่เพิ่มขึ้นของ electron เมื่อถูกเร่งผ่าน “ความต่างศักย์ 1 โวลต์”

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

จากความสัมพันธ์ $E = \gamma mc^2$ หรือ $E_0 = mc^2$ (จาก “special relativity”) จะได้ว่า

→ สามารถเลือก “หน่วยของมวล” เป็น “MeV/c²” หรือ “GeV/c²” ←

สำหรับ “proton” จะได้ว่า “พลังงานที่สมมูล (equivalent) กับมวลของ proton” คือ

$$E_p = m_p c^2 = (1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 1.5 \times 10^{10} \text{ J}$$

$$E_p = \frac{1.5 \times 10^{-10}}{1.6 \times 10^{-19}} \text{ eV} = 0.938 \times 10^9 \text{ eV} = 0.938 \times 10^3 \times 10^6 \text{ eV} = 938 \text{ MeV}$$

นั่นคือ สามารถระบุ “มวลของ proton” เป็น

$$m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} = 938 \text{ MeV}/c^2$$

จากความสัมพันธ์ $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$ (จาก “special relativity”) จะได้ว่า

→ สามารถเลือก “หน่วยของโมเมนตัม (เชิงเส้น)” เป็น “MeV/c” หรือ “GeV/c” ←

“Particle Physicists” นิยมที่จะ

เขียน “สมการต่างๆ” ในรูปแบบที่

ไม่มี “ c (speed of light in vacuum)” และ “ \hbar (reduced Planck’s constant)”

โดยการเลือกใช้ “Natural Units” → เลือกใช้ “หน่วยของปริมาณต่างๆ” ที่จะเป็นผลให้
ทั้ง “ c ” และ “ \hbar ” ต่างก็ “มีค่าเป็น 1” และ “ไม่มีหน่วย (dimensionless)”

$$c = \hbar = 1$$

ซึ่งหมายความว่า

(1) เลือกที่จะวัด “เวลา” เป็น “เมตร (m)”

(2) เลือก “หน่วยของเวลา” เป็น “เวลาที่แสงใช้ในการเดินทางเป็นระยะทาง 1 เมตร”

(3) เลือกที่จะวัด “มวล” และ “พลังงาน” เป็น “ส่วนกลับ (inverse) ของเมตร (m^{-1})”

(4) เลือก “หน่วยของพลังงาน” เป็น “พลังงานของ photon ที่มีความยาวคลื่น 2π เมตร”

(ใน “ตอนจบ” จะเปลี่ยนเป็น “conventional units” โดยการใส่ “ c ” และ “ \hbar ” กลับเข้าไป)

Verification of Statements (1) & (2)

เนื่องจาก

“ c ” คือ “อัตราเร็ว” ของ “แสง (คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า)” ใน “สุญญากาศ

$$c \equiv \frac{\text{distance travel by light}}{\text{corresponding time}} = 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{m}}{(3 \times 10^8)^{-1} \text{s}} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}'}$$

ดังนั้น

การเลือก “ c ” ให้ “ไม่มีหน่วย” และ “มีค่าเป็น 1”

ก็คือ

การเลือกที่จะวัด “เวลา” เป็น “เมตร (m)”

และ

เลือก “หน่วยของเวลา” เป็น “เวลาที่แสงใช้ในการเดินทางเป็นระยะทาง 1 เมตร”

[ระยะทาง 3×10^8 m ใช้เวลาเดินทาง 1 s \rightarrow ระยะทาง 1 m ใช้เวลาเดินทาง $(3 \times 10^8)^{-1}$ s]

(วัด “เวลา” เป็น “จำนวนเท่า” ของ “เวลาที่แสงใช้ในการเดินทางเป็นระยะทาง 1 เมตร”)

Verification of Statement (3)

จาก “Einstein–Planck” formula, $E_{\text{photon}} = hf = \left(\frac{h}{2\pi}\right)(2\pi f) = \hbar\omega = \hbar\left(\frac{2\pi}{T}\right)$,

เมื่อ “ f ” คือ “ความถี่ (frequency)” และ “ T ” คือ “คาบ (period)”

จะได้

$$\hbar = \frac{E}{\omega} = \left(\frac{1}{2\pi}\right)ET$$

ดังนั้น การเลือก “ \hbar ” ให้ “ไม่มีหน่วย” ก็คือ

การเลือกที่จะวัด “พลังงาน” เป็น “ส่วนกลับของเวลา” หรือ “ส่วนกลับของเมตร (m^{-1})”

จาก Einstein’s “energy–mass” formula, $E = mc^2$, จะได้ $c^2 = \frac{E}{m}$

ดังนั้น การเลือก “ c ” ให้ “ไม่มีหน่วย” \rightarrow “ c^2 ” ก็จะมี “ไม่มีหน่วย” ด้วย ก็คือ

การเลือกที่จะวัด “มวล” ใน “แบบเดียว” กับการวัด “พลังงาน”
[เป็น “ส่วนกลับของเวลา” หรือ “ส่วนกลับของเมตร (m^{-1})”]

Verification of Statement (4)

โดยใช้ความสัมพันธ์

$$c = f\lambda \text{ เมื่อ “}\lambda\text{” คือ “ความยาวคลื่น (wavelength)”}$$

จะสามารถเขียน “Einstein–Planck” formula, $E_{\text{photon}} = hf$, ในเทอมของ “ λ ” ได้เป็น

$$E_{\text{photon}}(\lambda) = \frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{2\pi} \frac{2\pi}{\lambda} = \hbar c \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)$$

ดังนั้น “พลังงาน” ของ “photon” ที่มี “ความยาวคลื่น 2π เมตร” คือ

$$E_{\text{photon}}(\lambda = 2\pi \text{ m}) = \hbar c$$

นั่นคือ การเลือกให้ ทั้ง “ c ” และ “ \hbar ” ต่างก็ “มีค่าเป็น 1” ก็คือ

การเลือกให้ “พลังงานของ photon ที่มีความยาวคลื่น 2π เมตร” มีค่าเป็น “1”

หรือ

เลือก “หน่วยของพลังงาน” เป็น “พลังงานของ photon ที่มีความยาวคลื่น 2π เมตร”

(วัด “พลังงาน” เป็น “จำนวนเท่า” ของ “พลังงานของ photon ที่มี $\lambda = 2\pi \text{ m}$ ”)

ปริมาณทางฟิสิกส์ที่มีการเลือกใช้หน่วยที่มีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก (เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณอื่นๆ) คือ “ประจุไฟฟ้า (electric charge)”

Physical Quantity	SI Units (หรือ MKSA)	cgs-Gaussian Unit (G)
ความยาว – length (l)	m	cm = 10^{-2} m
มวล – mass (m)	kg	g = 10^{-3} kg
เวลา – time (t)	s	s
แรง – force (F)	kg • (m/s ²) ≡ N (<u>N</u> ewton)	g • (cm/s ²) ≡ dyne 1 dyne = 10^{-5} N
พลังงาน – energy (E)	N • m ≡ J (<u>J</u> oule)	dyne • cm ≡ erg 1 erg = 10^{-7} J
ประจุไฟฟ้า – Charge (q)	C (<u>C</u> oulomb)	statcoulomb หรือ esu (<u>e</u> lectro <u>s</u> tatic <u>u</u> nit) 1 C = 3×10^9 esu

ซึ่งเป็นผลจาก การเลือกเขียน “Coulomb’s Law” ในรูปแบบที่ต่างกัน

$$\text{SI} \rightarrow F_{\text{Coulomb}} (\text{SI}) = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{Qq}{r^2} \quad \text{โดยที่ } [Q] = [q] = \text{C}, [r] = \text{m} \text{ และ } [F] = \text{N}$$

$$\text{G} \rightarrow F_{\text{Coulomb}} (\text{G}) = \frac{Qq}{r^2} \quad \text{โดยที่ } [Q] = [q] = \text{esu}, [r] = \text{cm} \text{ และ } [F] = \text{dyne}$$

และ การกำหนดให้

$$\begin{aligned} &\text{ขนาดของแรงระหว่าง “ประจุไฟฟ้า 1 esu”} \\ &2 \text{ ประจุ ที่อยู่ห่างกัน 1 cm} \end{aligned} = 1 \text{ dyne} = 10^{-5} \text{ N}$$

$$\text{แทน } F = 10^{-5} \text{ N}, \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \text{ และ } r = 10^{-2} \text{ m} \text{ ลงใน } F_{\text{Coulomb}}(\text{SI})$$

$$\text{จะได้ว่า ในกรณีที่ } Q = q \rightarrow Q = q = \left(\frac{1}{3 \times 10^9} \right) \text{C} = 1 \text{ esu} \quad \text{หรือ} \quad 1 \text{C} = 3 \times 10^9 \text{ esu}$$

$$\rightarrow \text{elementary charge : } e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C} = 4.8 \times 10^{-10} \text{ esu}$$

นอกจากนี้ ยังมีการใช้ระบบหน่วยที่เรียกว่า “Heaviside-Lorentz (HL)” ซึ่งเลือกเขียน “Coulomb’s Law” ในรูป

$$F_{\text{Coulomb}} (\text{HL}) = \left(\frac{1}{4\pi} \right) \frac{Qq}{r^2}$$

ดังนั้น

$$Q_{\text{HL}} = \sqrt{4\pi} Q_{\text{G}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0}} Q_{\text{SI}}$$

“Constant” (หรือ “Parameter”) ตัวหนึ่ง ที่มักปรากฏในสมการทาง Atomic, Nuclear และ Particle Physics คือ

“fine structure” constant (α) ซึ่ง “ไม่มีหน่วย (dimensionless)”

$$\alpha \equiv \frac{e^2}{(4\pi\epsilon_0)\hbar c} (\text{SI}) = \frac{e^2}{\hbar c} (\text{G}) = \frac{e^2}{4\pi} (\text{HL with } c = \hbar = 1) = \frac{1}{137}$$

SCPY421 Elementary Particle Physics

วทฟส๔๒๑ ฟิสิกส์ของอนุภาคมูลฐาน

Homework 01

1. บรรยายหลักการ-วิธีการ ‘สร้าง’ หรือ ‘ผลิต’ (produce) elementary particles ชนิดต่างๆ
2. บรรยายหลักการ-วิธีการ ‘วัด’ หรือ ‘ตรวจสอบ’ (detect) elementary particles ชนิดต่างๆ
3. บรรยายเปรียบเทียบ ‘หน่วย (units)’ ที่ใช้ใน Particle Physics กับที่ใช้ในฟิสิกส์สาขาอื่นๆ