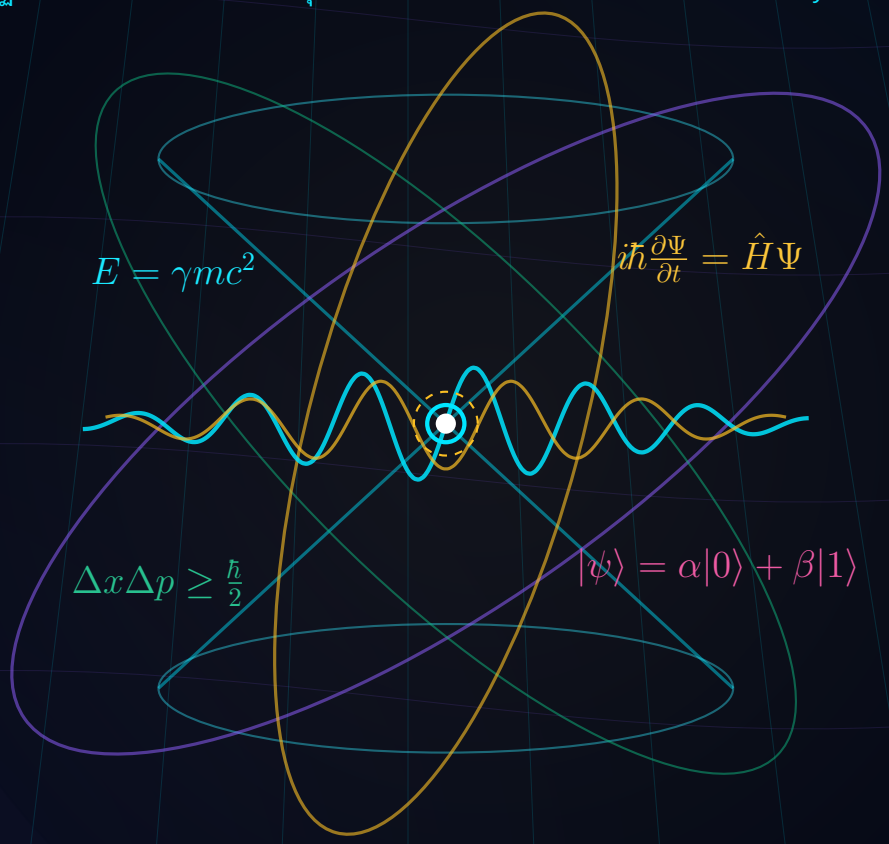
ฟิสิกส์แผนใหม่เชิงคำนวณ
และการจำลองเสมือนจริง

COMPUTATIONAL AND IMMERSIVE MODERN PHYSICS

- บทนำ: สถาปัตยกรรม WebXR, Three.js & Python
- สัมพัทธภาพพิเศษและกาล-อวกาศ
- กลศาสตร์ควอนตัม
- ฟิสิกส์ของอนุภาค
- ฟิสิกส์นิวเคลียร์และปฏิกิริยา
- การคำนวณเชิงควอนตัม
- ดาราศาสตร์ฟิสิกส์

ห้องปฏิบัติการเสมือนจริง 3 มิติ ควบคุมไร้สัมผัส พร้อมโค้ดการคำนวณเชิงตัวเลขภาษา Python



ผศ.ดร.ชีวะ ทัศนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

วท.บ. (ฟิสิกส์ คอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์)

วท.ม. (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ปร.ด. (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ฟิสิกส์แผนใหม่เชิงคำนวณและการจำลองเสมือนจริง

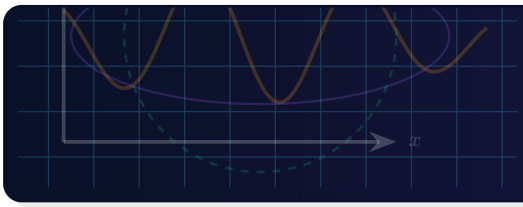
(Computational and Immersive Modern Physics: AR/XR Frameworks and Numerical Python)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชีวะ ทัศนา

วท.บ. (ฟิสิกส์ คอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์)

วท.ม. (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ปร.ด. (ฟิสิกส์ประยุกต์)



คำนำ

ศตวรรษที่ 20 ถือเป็นยุคทองแห่งการปฏิวัติทางฟิสิกส์ เมื่อมโนทัศน์ดั้งเดิมของกลศาสตร์นิวตันและทัศนศาสตร์ดั้งเดิมไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่อัตราเร็วใกล้แสง หรือพฤติกรรมของสสารในระดับอนุภาคย่อยของอะตอมได้ การกำเนิดของ **ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ (Special Relativity)** ของอัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ และ **กลศาสตร์ควอนตัม (Quantum Mechanics)** ของมักซ์ พลังค์, นีลส์ บอร์, แวร์เนอร์ ไฮเซนเบิร์ก และแอร์วิน ชเรอดิงเงอร์ ได้เปิดประตูสู่ความเข้าใจเอกภพในมิติใหม่ที่ลึกซึ้งและน่าอัศจรรย์ใจ

อย่างไรก็ตาม ความท้าทายสำคัญที่สุดในการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์แผนใหม่ คือ **ข้อจำกัดด้านการรับรู้ทางประสาทสัมผัสของมนุษย์** เนื่องจากมนุษย์ดำเนินชีวิตในโลกสามมิติที่มีความเร็วต่ำมากเมื่อเทียบกับความเร็วแสง ทำให้มโนทัศน์อย่างการยืดของเวลา (Time Dilation), การหดสั้นของความยาว (Length Contraction), การซ้อนทับเชิงควอนตัม (Quantum Superposition), และการทะลุผ่านกำแพงศักย์ (Quantum Tunneling) กลายเป็นสิ่งที่ขัดแย้งกับสัญชาตญาณดั้งเดิม

ตำราวิชาการเรื่อง **ฟิสิกส์แผนใหม่เชิงคำนวณและการจำลองเสมือนจริง** เล่มนี้จึงได้รับการออกแบบและสร้างสรรค์ขึ้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวอย่างบูรณาการ โดยนำเอาเทคโนโลยีความจริงเสริมและความจริงขยาย (Augmented and Extended Reality: AR/XR) บนมาตรฐานเว็บเปิด (WebXR Device API และ Three.js) มาผสานเข้ากับพลังการคำนวณทางวิทยาศาสตร์ของภาษา Python (NumPy, SciPy, Matplotlib) ทำให้นักศึกษาไม่เพียงแต่สามารถพิสูจน์สมการเชิงทฤษฎีได้อย่างแม่นยำ แต่ยังสามารถ "มองเห็น", "มีปฏิสัมพันธ์", และ "ทดลองในห้องปฏิบัติการเสมือนจริง 3 มิติ" ได้อย่างไร้ขอบเขต

เนื้อหาในตำราเล่มนี้ประกอบด้วย 7 บทเรียนสำคัญ ได้แก่

1. บทนำ: สถาปัตยกรรมการจำลองเสมือนจริง AR/XR และการคำนวณด้วย Python สำหรับฟิสิกส์แผนใหม่
2. ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษและเรขาคณิตกาล-อวกาศ 4 มิติ
3. กลศาสตร์ควอนตัม ทวิภาวะคลื่น-อนุภาค และแบบจำลองอะตอม
4. ฟิสิกส์ของอนุภาคและแบบจำลองมาตรฐาน (The Standard Model)

5. ฟิสิกส์นิวเคลียร์ กัมมันตภาพรังสี และพลังงานนิวเคลียร์
6. วิทยาการคำนวณเชิงควอนตัม คิวบิต และอัลกอริทึมควอนตัม
7. ดาราศาสตร์ฟิสิกส์ หลุมดำ และจักรวาลวิทยาสมัยใหม่

ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ตำราเล่มนี้จะเป็นสะพานเชื่อมมโนทัศน์ทางฟิสิกส์ชั้นสูงเข้ากับทักษะการคำนวณเชิงตัวเลขและเทคโนโลยีดิจิทัลแห่งอนาคต สำหรับนักศึกษา ครู-อาจารย์ และนักวิจัยทุกท่าน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชีวะ ทัศนา
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี
จังหวัดจันทบุรี

แผนบริหารการสอนประจำวิชา

ข้อมูลทั่วไปของรายวิชา

- **รหัสและชื่อรายวิชา** ฟิสิกส์ 2027 ฟิสิกส์แผนใหม่เชิงคำนวณและการจำลองเสมือนจริง (Computational and Immersive Modern Physics)
- **จำนวนหน่วยกิต** 3 หน่วยกิต (3-0-6) [บรรยาย 3 ชั่วโมง, ศึกษาด้วยตนเอง 6 ชั่วโมงต่อสัปดาห์]
- **หลักสูตรและประเภทของรายวิชา** วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ หมวดวิชาเฉพาะด้านบังคับ
- **อาจารย์ผู้รับผิดชอบรายวิชาและผู้สอน**
  ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชีวะ ทัศนา (chewa.t@rbru.ac.th)
- **ภาคการศึกษา / ชั้นปีที่เรียน** ภาคการศึกษาที่ 2 ชั้นปีที่ 2

คำอธิบายรายวิชา (Course Description)

ศึกษาหลักการพื้นฐานและระเบียบวิธีทางฟิสิกส์แผนใหม่ ได้แก่ ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ สัจพจน์ของไอน์สไตน์ การแปลงลอเรนซ์ พลศาสตร์เชิงสัมพัทธภาพ กลศาสตร์ควอนตัมยุคแรก รังสีวัตถุดำ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ทวิภาวะของคลื่นและอนุภาค หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก สมการชเรอดิงเงอร์และบ่อศักย์ควอนตัม แบบจำลองมาตรฐานในฟิสิกส์อนุภาค อันตรกิริยาพื้นฐาน การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีความจริงเสริมและความจริงขยาย (AR/XR) ในการสร้างห้องปฏิบัติการเสมือนจริง โครงสร้างนิวเคลียส การสลายกัมมันตรังสีและปฏิกิริยานิวเคลียร์ หลักการคำนวณเชิงควอนตัม คิวบิตและควอนตัมเกต ตลอดจนดาราศาสตร์ฟิสิกส์ วิวัฒนาการของดาวฤกษ์ หลุมดำ และจักรวาลวิทยาร่วมกับการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยภาษา Python

วัตถุประสงค์การเรียนรู้ (Course Learning Outcomes: CLOs) ตามอนุกรมวิธานของบลูม

เมื่อสิ้นสุดการเรียนการสอนรายวิชานี้ นักศึกษาสามารถ

1. **CLO 1 [ด้านพุทธิพิสัย: ความเข้าใจ/ความจำ]** อธิบายหลักการ ปรากฏการณ์ และสมการพื้นฐานของทฤษฎีสัมพัทธภาพ กลศาสตร์ควอนตัม ฟิสิกส์นิวเคลียร์ และจักรวาลวิทยาได้อย่างถูกต้อง
2. **CLO 2 [ด้านพุทธิพิสัย: การประยุกต์ใช้/การวิเคราะห์]** คำนวณปริมาณทางกายภาพเชิงสัมพัทธภาพและแก้สมการชเรอดิงเงอร์สำหรับระบบศักย์อย่างง่าย พร้อมทั้งวิเคราะห์พฤติกรรมของอนุภาคได้อย่างเป็นระบบ
3. **CLO 3 [ด้านทักษะพิสัย: การสร้างสรรค์/การคำนวณ]** พัฒนาโค้ดภาษา Python (NumPy, SciPy) เพื่อจำลองการเคลื่อนที่สัมพัทธภาพ การแก้สมการคลื่นควอนตัม และการวิวัฒนาการของระบบดาราศาสตร์ฟิสิกส์ได้
4. **CLO 4 [ด้านทักษะพิสัย: การบูรณาการเทคโนโลยี]** ประยุกต์ใช้เฟรมเวิร์ก WebXR และ Three.js ในการสร้างและออกแบบสื่อการเรียนรู้เชิงเสมือนจริง 3 มิติ (AR/XR) ทางฟิสิกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

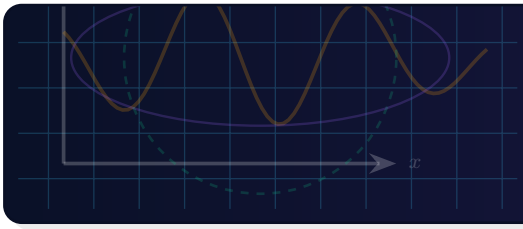
แผนการจัดการเรียนรู้ตลอดภาคการศึกษา

ตาราง แผนการจัดการเรียนรู้และการกระจายเนื้อหารายวิชาฟิสิกส์แผนใหม่

สัปดาห์	บทเรียน	หัวข้อสำคัญและกิจกรรมการเรียนรู้	สอดคล้อง CLO
1–2	บทที่ 1	บทนำ: สถาปัตยกรรมการจำลองเสมือนจริง AR/XR และการคำนวณด้วย Python	CLO 3, 4
3–4	บทที่ 2	สัมพัทธภาพพิเศษ, การแปลงลอเรนซ์, และกรวยแสง 4D	CLO 1, 2, 3
5–6	บทที่ 3	กลศาสตร์ควอนตัม, แบบจำลองอะตอม, สมการชเรอดิงเงอร์ และบ่อศักย์	CLO 1, 2, 3, 4
7–8	บทที่ 4	ฟิสิกส์ ของ อนุภาค, แบบ จำลอง มาตรฐาน, และแผนภาพไฟน์แมน	CLO 1, 2, 4
9–10	บทที่ 5	ฟิสิกส์นิวเคลียร์, การสลายตัว, ฟิชชัน และฟิวชัน	CLO 1, 2, 3, 4
11–12	บทที่ 6	การคำนวณเชิงควอนตัม, ทรงกลมบล็อค, และควอนตัมเกต	CLO 1, 2, 3, 4
13–15	บทที่ 7	ดาราศาสตร์ฟิสิกส์, หลุมดำ, คลื่นความโน้มถ่วง และจักรวาลวิทยา	CLO 1, 2, 3, 4

การวัดและประเมินผลการเรียนรู้

- การประเมินระหว่างภาคเรียน ร้อยละ 60
  - แบบฝึกหัดและรายงานการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วย Python ร้อยละ 20
  - โครงงานพัฒนาสื่อจำลองเสมือนจริง AR/XR ทางฟิสิกส์ ร้อยละ 25
  - การสอบวัดผลกลางภาคเรียน ร้อยละ 15
- การสอบวัดผลปลายภาคเรียน ร้อยละ 40



สารบัญ

คำนำ i

แผนบริหารการสอนประจำวิชา iii

สารบัญภาพ xi

สารบัญตาราง xiii

1 บทนำ: สถาปัตยกรรมเสมือนจริงและการคำนวณด้วย Python 1

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 1 1

1.1 วิวัฒนาการและบทบาทของ WebXR ในการศึกษาฟิสิกส์แผนใหม่ 3

1.2 วงจรชีวิตของ WebXR Session และการเรนเดอร์ 3 มิติ 4

1.3 การควบคุมแบบไร้สัมผัสด้วย MediaPipe Hands 5

1.4 วิศวกรรมลูปประสิทธิภาพสูง ไร้ขยะในหน่วยความจำ 6

1.5 สถาปัตยกรรมการคำนวณเชิงตัวเลขและการจำลองทางวิทยาศาสตร์ด้วย Python 6

1.6 การบูรณาการปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้เชิงลึกในฟิสิกส์เชิงคำนวณ . 7

1.7 แผนผังบูรณาการเทคโนโลยีรายบท 8

1.8 สรุปเครื่องมือและเทคนิคหลักของเทคโนโลยีเสมือนจริง 9

2 ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ 10

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 2 10

2.1 วิกฤตการณ์ฟิสิกส์ดั้งเดิมและการทดลองของไมเคิลสัน-มอร์ลีย์ 13

2.2 สัจพจน์ของไอน์สไตน์ 13

2.3 การแปลงแบบลอเรนซ์ 14

2.4 ผลสืบเนื่องทางจลนศาสตร์ การยืดออกของเวลาและการหดสั้นของความยาว 15

2.4.1 การยืดออกของเวลา 15
2.4.2 การหดสั้นของความยาว 16
2.5 ปริภูมิ-เวลา 4 มิติ และกรวยแสง 17
2.6 พลศาสตร์สัมพัทธภาพ โมเมนตัมและพลังงานรวม 18
2.7 สถาปัตยกรรมการจำลองเสมือนจริง AR/XR 4D Spacetime Visualizer . . 18
2.8 การคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Python การวิเคราะห์ตัวคูณลอเรนซ์ 19
2.9 การประยุกต์ใช้การเรียนรู้เชิงลึกและ PINN ในพลศาสตร์สัมพัทธภาพ . . . 20
2.10 ตัวอย่างการแก้โจทย์เชิงวิเคราะห์ตามระเบียบวิธี P-S-C-T 21
2.11 สรุปสาระสำคัญประจำบท 25
2.12 แบบฝึกหัดท้ายบท 25

3 กลศาสตร์ควอนตัมเบื้องต้น 27
แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 3 27
3.1 การกำเนิดทฤษฎีควอนตัม การแผ่รังสีของวัตถุดำ 30
3.2 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกและคอมป์ตัน 30
3.2.1 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก 31
3.2.2 การกระเจิงคอมป์ตัน 31
3.3 ทวิภาวะคลื่นและอนุภาคและหลักความไม่แน่นอน 31
3.3.1 สมมติฐานเดอบรอยล์ 31
3.3.2 หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก 32
3.4 สมการคลื่นชเรอดิงเงอร์และฟังก์ชันคลื่น 32
3.5 อนุภาคในกล่องศักย์อนันต์ 1 มิติ 33
3.6 ปรากฏการณ์การทะลุผ่านกำแพงศักย์ 34
3.7 สถาปัตยกรรมการจำลองเสมือนจริง AR/XR แบบจำลองอะตอมและออร์บิทัล 3 มิติ 35
3.8 การคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Python Finite Difference Solver 37
3.9 การเรียนรู้เชิงลึกในกลศาสตร์ควอนตัมและการจำลองอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนสปิน 38
3.9.1 โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับสถานะควอนตัม 38
3.9.2 การคำนวณโครงสร้างควอนตัมและอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนแม่เหล็ก 39
3.10 ตัวอย่างการแก้โจทย์เชิงวิเคราะห์ตามระเบียบวิธี P-S-C-T 39
3.11 สรุปสาระสำคัญประจำบท 43
3.12 แบบฝึกหัดท้ายบท 43

4 ฟิสิกส์อนุภาคและแบบจำลองมาตรฐาน 44

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 4 44
4.1 อันตรกิริยามูลฐาน 4 แรงในธรรมชาติ 47
4.2 แบบจำลองมาตรฐาน 47
4.2.1 แฟร์มิออน 47
4.2.2 เกจโบซอน 48
4.2.3 สเกลาร์โบซอน ฮิกส์โบซอน 48
4.3 ฮาดรอนและโครงสร้างควาร์ก 48
4.4 แผนภาพไฟน์แมน 49
4.5 สถาปัตยกรรมการจำลองเสมือนจริง AR/XR 3D Hadron Structure 50
4.6 การคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Python Invariant Mass Reconstruction . . . 50
4.7 การเรียนรู้เชิงลึกในฟิสิกส์พลังงานสูงและการจำแนกเหตุการณ์ของอนุภาค 51
4.7.1 การจำแนกเจ็ตอนุภาคด้วยโครงข่ายคอนโวลูชัน 52
4.7.2 โครงข่ายประสาทแบบกราฟสำหรับการติดตามรอยทาง 52
4.8 ตัวอย่างการแก้โจทย์เชิงวิเคราะห์ตามระเบียบวิธี P-S-C-T 52
4.9 สรุปสาระสำคัญประจำบท 57
4.10 แบบฝึกหัดท้ายบท 57

5 ฟิสิกส์นิวเคลียร์และปฏิกิริยานิวเคลียร์ 58

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 5 58
5.1 สมบัติของนิวเคลียสและพลังงานยึดเหนี่ยว 61
5.2 แบบจำลองหยดของเหลวและสูตรมวลไวซ์แซคเกอร์ 61
5.3 กัมมันตภาพรังสีและสมการลูกโซ่ของเบตแมน 62
5.4 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันและฟิวชัน 63
5.4.1 นิวเคลียร์ฟิชชัน 63
5.4.2 นิวเคลียร์ฟิวชัน 64
5.5 สถาปัตยกรรมการจำลองเสมือนจริง AR/XR Nuclear Chain Reaction Simulator 64
5.6 การคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Python Bateman Decay Chain Solver 65
5.7 ปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้เชิงลึกในฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิวชัน 65
5.8 ตัวอย่างการแก้โจทย์เชิงวิเคราะห์ตามระเบียบวิธี P-S-C-T 66
5.9 สรุปสาระสำคัญประจำบท 69
5.10 แบบฝึกหัดท้ายบท 69

6 การคำนวณเชิงควอนตัมและสารสนเทศควอนตัม 71
แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 6 71
6.1 จากบิตคลาสสิกสู่คิวบิต 73
6.2 ทรงกลมบล็อค 73
6.3 เกตควอนตัม 1 คิวบิต 74
6.4 ระบบหลายคิวบิตและความพัวพันควอนตัม 74
6.5 สถาปัตยกรรมการจำลองเสมือนจริง AR/XR 3D Interactive Bloch Sphere 76
6.6 การคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Python Quantum Statevector Simulator . . 76
6.7 การเรียนรู้เชิงเครื่องควอนตัมและสปินคิวบิตในสถานะของแข็ง 77
6.7.1 การเรียนรู้ของเครื่องเชิงควอนตัม (Quantum Machine Learning) 77
6.7.2 การจำลองคิวบิตสถานะของแข็งและอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนสปิน . 77
6.8 ตัวอย่างการแก้โจทย์เชิงวิเคราะห์ตามระเบียบวิธี P-S-C-T 78
6.9 สรุปสาระสำคัญประจำบท 81
6.10 แบบฝึกหัดท้ายบท 81

7 ฟิสิกส์ดาราศาสตร์และจักรวาลวิทยา 83
แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 7 83
7.1 สมดุลไฮโดรสแตติกและวิวัฒนาการของดาวฤกษ์ 85
7.2 หลุมดำและเรขาคณิตชวาร์ซชิลด์ 86
7.3 จักรวาลวิทยาและสมการฟรีดมันน์ 86
7.4 สถาปัตยกรรมการจำลองเสมือนจริง AR/XR Spacetime Curvature and Lensing 88
7.5 การคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Python Friedmann Universe Expansion . . 88
7.6 การ วิเคราะห์ ระบบ ดาว คู่ และ การ ศึกษา จลนศาสตร์ ดาราศาสตร์ เชิงสังเกตการณ์ 89
7.6.1 วิวัฒนาการของระบบดาวคู่แบบสัมผัสและการเปลี่ยนแปลงคาบการโคจร 89
7.6.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของกระจุกดาวและเทคนิคการวัดแสง 90
7.7 การประยุกต์ใช้การเรียนรู้เชิงลึกในฟิสิกส์ดาราศาสตร์และคลื่นความโน้มถ่วง 90
7.8 ตัวอย่างการแก้โจทย์เชิงวิเคราะห์ตามระเบียบวิธี P-S-C-T 91
7.9 สรุปสาระสำคัญประจำบท 94
7.10 แบบฝึกหัดท้ายบท 94

ก ค่าคงตัวมูลฐานทางฟิสิกส์และคุณสมบัติของอนุภาค 95

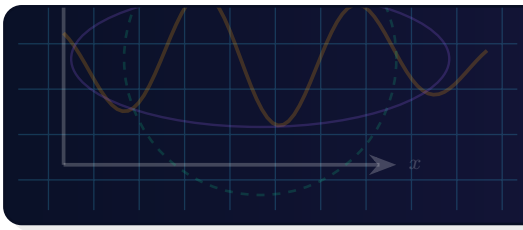
ก.1 ค่าคงตัวมูลฐานทางฟิสิกส์ (CODATA 2026 Recommended Values) . . . 95

ก.2 คุณสมบัติของอนุภาคมูลฐานในแบบจำลองมาตรฐาน 96

บรรณานุกรม 97

ดัชนีสืบค้นคำสำคัญ 100

ประวัติผู้เขียน 102



สารบัญภาพ

1.1 สถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์จำลองเสมือนจริง WebXR ร่วมกับ Three.js และ MediaPipe Hands 4

1.2 ขั้นตอนการตรวจจับพื้นผิว (Hit-Testing) และการตรึงพิกัดเสมือนจริง (Spatial Anchoring) ใน WebXR 5

1.3 โครงข่ายข้อต่อนิ้วมือ 21 จุด 3 มิติ (MediaPipe 21-Joint 3D Hand Landmarks) สำหรับควบคุมการทดลองฟิสิกส์ 5

2.1 ผังการทดลองของไมเคิลสัน-มอร์ลีย์ (Michelson-Morley Experiment) ซึ่งแสดงผลลัพธ์เป็นศูนย์ 13

2.2 การ ทดลอง ทาง ความ คิด เรื่อง นาฬิกา แสง (Light Clock) พิสูจน์ปรากฏการณ์การยืดออกของเวลา 16

2.3 แผนภาพกรวยแสง (Light Cone) แสดงโครงสร้างการส่งผ่านผลเชิงเหตุและผล (Causality) ในปริภูมิ-เวลามินคอฟสกี 17

3.1 สเปกตรัม การแผ่รังสี ของ วัตถุ ดำ ตาม กฎ ของ พลัง ค์ เปรียบ เทียบ กับ วิกฤตการณ์รังสีอัลตราไวโอเลตแบบคลาสสิก 30

3.2 แผนภาพการกระเจิงคอมป์ตัน (Compton Scattering) แสดงการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัมของโฟตอนกับอิเล็กตรอน 31

3.3 ฟังก์ชันคลื่น $\psi_n(x)$ (เส้นทึบ) และความหนาแน่นความน่าจะเป็น $|\psi_n(x)|^2$ (เส้นประ) ของอนุภาคในกล่องศักย์อนันต์ 1 มิติ สำหรับ $n = 1, 2, 3$ 34

3.4 ปรากฏการณ์การทะลุผ่านกำแพงศักย์เชิงควอนตัม (Quantum Tunneling) แสดงการลดทอนของแอมพลิจูดคลื่น 34

4.1 ผังจำแนกอนุภาคมูลฐานในแบบจำลองมาตรฐาน (The Standard Model Particle Grid) 48

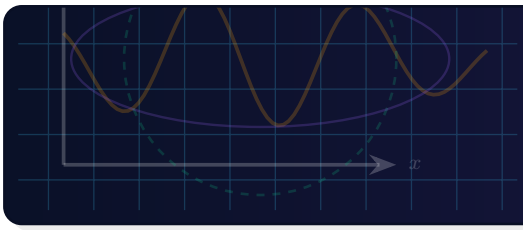
4.2 แบบจำลองโครงสร้างควาร์กและกลูออนภายในโปรตอน แสดงสมดุลประจุสี (Color Neutrality) 49

4.3 แผนภาพไฟน์แมนแสดงการสลายตัวบีตาลบในระดับควาร์ก ($d \to u + W^- \to u + e^- + \bar{\nu}_e$) 49
4.4 แผนภาพไฟน์แมนแสดงการประลัยคู่อิเล็กตรอน-โพซิตรอนกลายเป็นคู่มิวออน ($e^- + e^+ \to \gamma^* \to \mu^- + \mu^+$) 50

5.1 กราฟพลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียสต่อนิวคลีออน (B/A) แสดงความเสถียรสูงสุดที่เหล็ก-56 61
5.2 แผนผังนิวไคลด์ของเซเกร (Segrè Chart) แสดงแถบเสถียรภาพและทิศทางการสลายตัวกัมมันตรังสี 63
5.3 ขั้นตอนการแตกตัวของนิวเคลียสในปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันตามแบบจำลองหยดของเหลว (Liquid Drop Model) 63

6.1 การแทนสถานะของคิวบิตบนทรงกลมบล็อค (Bloch Sphere Representation) 74
6.2 วงจรควอนตัมสำหรับสร้างสถานะพัวพันสมบูรณ์ของเบลล์ (Bell State Preparation) 75
6.3 ผังวงจรควอนตัมเทเลพอร์ต (Quantum Teleportation Circuit) ถ่ายโอนสถานะ $|\psi\rangle$ ไปยังปลายทาง 75

7.1 สภาวะสมดุลไฮโดรสแตติก (Hydrostatic Equilibrium) ของดาวฤกษ์ . . . 85
7.2 โครงสร้างทางเรขาคณิตของหลุมดำชวาร์ซชิลด์ (Schwarzschild Black Hole Anatomy) 86
7.3 วิวัฒนาการของสเกลแฟกเตอร์ $a(t)$ ในแบบจำลองจักรวาลวิทยาต่างๆ แสดงการขยายตัวด้วยความเร่งของเอกภพ ΛCDM 87



สารบัญตาราง

1.1 แผนผังการบูรณาการเทคโนโลยีเสมือนจริง AR/XR และการคำนวณ Python ในตำราฟิสิกส์แผนใหม่ 8

1.2 สรุปเครื่องมือและเทคนิคหลักในการสร้างแบบจำลองฟิสิกส์ด้วย WebXR . 9

2.1 สรุปความสัมพันธ์พื้นฐานในทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ 25

3.1 สรุปความสัมพันธ์พื้นฐานในกลศาสตร์ควอนตัมเบื้องต้น 43

4.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะของ 4 แรงมูลฐานในธรรมชาติ 47

4.2 สรุปโครงสร้างอนุภาคมูลฐานในแบบจำลองมาตรฐาน 57

5.1 สรุปหลักการสำคัญในฟิสิกส์นิวเคลียร์และปฏิกิริยานิวเคลียร์ 69

6.1 สรุปพื้นฐานการคำนวณและสารสนเทศเชิงควอนตัม 81

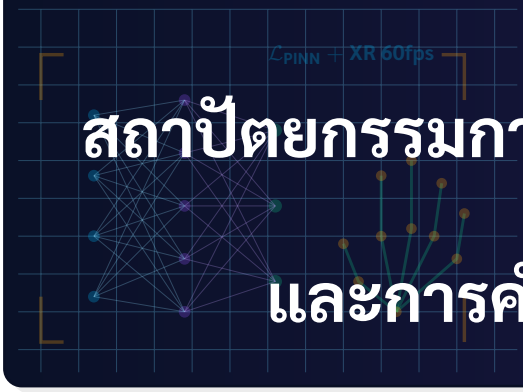
7.1 สรุปความสัมพันธ์พื้นฐานในฟิสิกส์ดาราศาสตร์และจักรวาลวิทยา 94

ก.1 ค่าคงตัวมูลฐานทางฟิสิกส์ตามมาตรฐานสากล CODATA 2026 95

ก.2 คุณสมบัติของอนุภาคมูลฐานในแบบจำลองมาตรฐาน (Standard Model) . 96

บทที่ 1

บทนำ
สถาปัตยกรรมการจำลองเสมือนจริง AR/XR และการคำนวณด้วย Python



แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 1

หัวข้อเนื้อหาประจำบท

1. วิวัฒนาการและบทบาทของ WebXR ในการศึกษาฟิสิกส์แผนใหม่
2. วงจรชีวิตของ WebXR Session และการเรนเดอร์ 3 มิติ
3. การควบคุมแบบไร้สัมผัสด้วย MediaPipe Hands
4. วิศวกรรมลูปประสิทธิภาพสูง ไร้ขยะในหน่วยความจำ (Zero-GC Optimization)
5. สถาปัตยกรรมการคำนวณเชิงตัวเลขและการจำลองทางวิทยาศาสตร์ด้วย Python
6. การบูรณาการปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้เชิงลึกในฟิสิกส์เชิงคำนวณ
7. แผน ผัง บูรณ า การ เทคโนโลยี ราย บท (Curriculum Technology Roadmap)
8. สรุปเครื่องมือและเทคนิคหลักของเทคโนโลยีเสมือนจริง

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. อธิบาย สถาปัตยกรรม และ การ ทำงาน ร่วม กัน ระหว่าง WebXR Device API, Three.js และ Python ได้อย่างถูกต้อง
2. อธิบายหลักการตรวจจับพื้นผิว (Hit-Testing) และการตรึงวัตถุ 3 มิติเชิงพื้นที่ได้อย่างชัดเจน
3. วิเคราะห์การควบคุมท่าทางมือ 21 จุดของ MediaPipe Hands ในการมีปฏิสัมพันธ์กับแบบจำลองฟิสิกส์ได้
4. ออกแบบการจัดการหน่วยความจำแบบ Object Pooling เพื่อรักษาอัตราเฟรมคงที่ 60 FPS ได้
5. ประยุกต์ใช้ไลบรารี NumPy, SciPy และ SymPy ในการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับงานฟิสิกส์ได้อย่างเป็นระบบ
6. อธิบายกรอบแนวคิดของ Physics-Informed Neural Networks (PINNs) และการประยุกต์ใช้ AI ในฟิสิกส์แผนใหม่ได้

กิจกรรมการเรียนการสอน

1. การบรรยายภาพรวมเทคโนโลยีโลกเสมือนจริงและการคำนวณเชิงตัวเลขในฟิสิกส์แผนใหม่
2. กิจกรรมสาธิตการเข้าถึงแบบจำลอง WebXR ผ่านเว็บเบราว์เซอร์บนสมาร์ตโฟนและแท็บเล็ต
3. ปฏิบัติการทดสอบระบบตรวจจับพิกัดมือด้วย MediaPipe Hands เพื่อควบคุมตัวแปรฟิสิกส์แบบไร้สัมผัส
4. ปฏิบัติการเขียนสคริปต์ Python พื้นฐานเพื่อเตรียมชุดข้อมูลและการแก้สมการเชิงอนุพันธ์

สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารคำสอน บทที่ 1 บทนำ สถาปัตยกรรมการจำลองเสมือนจริงและการคำนวณด้วย Python
2. สไลด์บรรยายอิเล็กทรอนิกส์และแผนภาพสถาปัตยกรรมระบบ 3 มิติ
3. ห้องปฏิบัติการเสมือนจริงจำลองบนเว็บเบราว์เซอร์ (WebXR Demonstrator)
4. สภาพแวดล้อมประมวลผล Python (Jupyter Notebook / Google Colab)

การวัดและประเมินผล

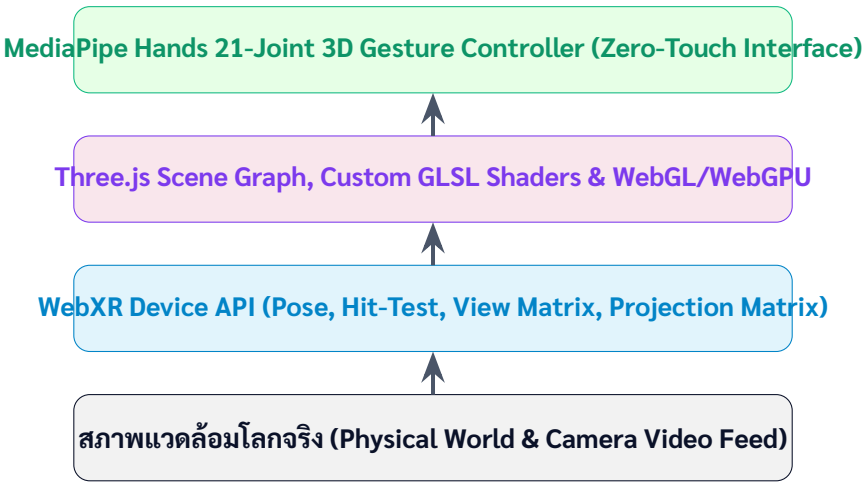
1. การประเมินความสนใจและการมีส่วนร่วมในการอภิปรายและทดลองในชั้นเรียน
2. การประเมินผลสัมฤทธิ์จากการทำใบงานและแบบฝึกหัดประจำบทที่ 1
3. การทดสอบย่อยวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนประจำบทที่ 1

1.1 วิวัฒนาการและบทบาทของ WebXR ในการศึกษาฟิสิกส์แผนใหม่

มโนทัศน์ในวิชาฟิสิกส์แผนใหม่ เช่น ปริภูมิ-เวลา 4 มิติ ความน่าจะเป็นของออร์บิทัลอิเล็กตรอน โครงสร้างควาร์กภายในฮาดรอน การแตกตัวของนิวเคลียส หรือความพัวพันเชิงควอนตัม เป็นปรากฏการณ์ที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าในชีวิตประจำวัน และขัดแย้งกับสัญชาตญาณดั้งเดิมของมนุษย์ การจัดการเรียนรู้แบบเดิมที่พึ่งพาเพียงสมการบนกระดานดำหรือภาพวาด 2 มิติในหนังสือ จึงสร้างภาระทางพุทธิปัญญา (Cognitive Load) ให้แก่ผู้เรียนอย่างยิ่ง

การนำเทคโนโลยี **ความเป็นจริงขยาย (Extended Reality หรือ XR)** ซึ่งครอบคลุมทั้ง Augmented Reality (AR) และ Virtual Reality (VR) มาผสานเข้ากับการศึกษาวิทยาศาสตร์ จึงเปิดมิติใหม่ในการแปลงนามธรรมทางคณิตศาสตร์ให้กลายเป็นวัตถุเชิงพื้นที่ (Spatial Objects) ที่ผู้เรียนสามารถสำรวจ เดินวนรอบ สังเกตการเปลี่ยนแปลงจากทุกมุมมอง และมีปฏิสัมพันธ์แบบเรียลไทม์

WebXR Device API คือมาตรฐานเว็บสากลที่กำหนดขึ้นโดย World Wide Web Consortium (W3C) เพื่อเปิดทางให้เว็บเบราว์เซอร์ยุคใหม่สามารถสื่อสารโดยตรงกับฮาร์ดแวร์เซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งและการเคลื่อนไหว 6 แกนอิสระ (6-DoF Tracking) ของสมาร์ตโฟน แท็บเล็ต หรือแว่นตาอัจฉริยะ (Head-Mounted Displays) ข้อได้เปรียบสูงสุดของ WebXR คือการเป็นเทคโนโลยีแบบไร้รอยต่อ (Zero-Install) ผู้เรียนเพียงสแกนคิวอาร์โค้ดหรือเปิดลิงก์ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ก็สามารถแปลงพื้นที่จริงในห้องเรียนให้กลายเป็นห้องปฏิบัติการฟิสิกส์เสมือนจริงได้ทันที



ภาพที่ 1.1 สถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์จำลองเสมือนจริง WebXR ร่วมกับ Three.js และ MediaPipe Hands

1.2 วงจรชีวิตของ WebXR Session และการเรนเดอร์ 3 มิติ

หัวใจสำคัญของการทำงานร่วมกับ WebXR Device API ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก

1. **การตรวจสอบความพร้อมของอุปกรณ์ (Device Capability Check)** เบราว์เซอร์จะทำการตรวจสอบว่าระบบฮาร์ดแวร์รองรับการแสดงผลความเป็นจริงเสริมหรือไม่ ผ่านคำสั่ง navigator.xr.isSessionSupported('immersive-ar')

2. **การร้องขอเปิดเซสชันเสมือนจริง (Request Session)** เมื่อผู้ใช้กดปุ่มเข้าสู่โหมดการทดลอง ระบบจะสร้างเซสชันการทำงานแบบ Immersive AR พร้อมทั้งขอสิทธิ์การเข้าถึงฟีเจอร์การตรวจจับระนาบพื้นผิว (hit-test)

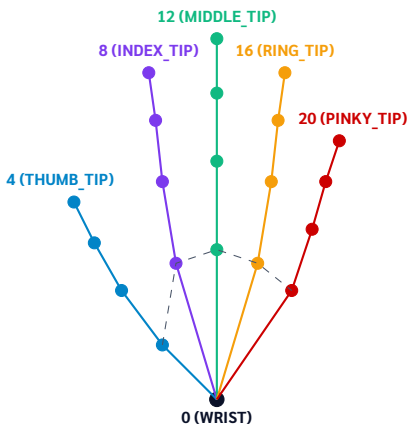
3. **การตรวจจับพื้นผิวและการตรึงพิกัด (Hit-Testing & Spatial Anchoring)** ในระหว่างการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ ระบบจะยิงลำรังสีเสมือน (Virtual Raycast) จากจุดกึ่งกลางหน้าจอไปตกกระทบระนาบพื้นผิวโลกจริง เช่น โต๊ะทดลองหรือพื้นห้อง เพื่อสร้างจุดอ้างอิงพิกัดเสมือน (Anchor Pose Matrix ขนาด 4×4) สำหรับวางอุปกรณ์ทดลองทางฟิสิกส์

4. **วงรอบการแสดงผลแบบซิงโครนัส (Synchronous Render Loop)** ทุกครั้งที่มีการขยับกล้อง ระบบจะเรียกฟังก์ชันผ่าน XRSession.requestAnimationFrame เพื่อรับค่า Projection Matrix และ View Matrix ล่าสุดจากเซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหว นำไปปรับมุมมองของกล้องเสมือนใน Three.js ให้สอดรับกับโลกจริงแบบ 1:1

ภาพที่ 1.2 ขั้นตอนการตรวจจับพื้นผิว (Hit-Testing) และการตรึงพิกัดเสมือนจริง (Spatial Anchoring) ใน WebXR

1.3 การควบคุมแบบไร้สัมผัสด้วย MediaPipe Hands

เพื่อปลดล็อกข้อจำกัดจากการสัมผัสหน้าจอ 2 มิติ ตำราเล่มนี้ได้ผสานการทำงานของ **MediaPipe Hands** ซึ่งเป็นโมเดล Deep Learning ประสิทธิภาพสูงของ Google เข้ากับเว็บแอปพลิเคชัน โมเดลนี้มีความสามารถในการอนุมานพิกัด 3 มิติ (x, y, z) ของข้อต่อนิ้วมือจำนวน 21 จุด (21 3D Hand Landmarks) จากสตรีมวิดีโอของกล้องได้แบบเรียลไทม์



ภาพที่ 1.3 โครงข่ายข้อต่อนิ้วมือ 21 จุด 3 มิติ (MediaPipe 21-Joint 3D Hand Landmarks) สำหรับควบคุมการทดลองฟิสิกส์

รูปแบบท่าทางมือมาตรฐาน (Standard Hand Gestures) ที่นำมาประยุกต์ใช้ในทุกบทเรียน ได้แก่

- **Pinch Gesture (การบีบนิ้วโป้งและนิ้วชี้เข้าหากัน)** คำนวณจากระยะห่างระหว่างจุดที่ 4 (THUMB_TIP) และจุดที่ 8 (INDEX_TIP) ใช้สำหรับ "หยิบ จับ และเคลื่อนย้าย" อนุภาค อะตอม หรือกรอบอ้างอิงในมิติ 3 มิติ

- **Palm Facing (การหงายฝ่ามือขึ้น)** ใช้เวกเตอร์แนวฉากของฝ่ามือ (Normal Vector) เพื่อสร้างแท่นรองรับอนุภาคเสมือนจริง เช่น ใช้เป็นแท่นตรวจจับรังสี หรือแท่นชนอนุภาค

- **Index Pointing (การชี้นิ้วชี้)** ใช้เวกเตอร์ทิศทางจากจุดที่ 5 ไปยังจุดที่ 8 เพื่อใช้เป็นลำเลเซอร์เสมือนในการเลือกสถานะพลังงานควอนตัม (n) หรือปรับสเกลค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพ

1.4 วิศวกรรมลูปประสิทธิภาพสูง ไร้ขยะในหน่วยความจำ

ในการเรนเดอร์กราฟิกเสมือนจริงแบบเรียลไทม์ที่ความถี่ 60 เฟรมต่อวินาที (60 FPS) เบราว์เซอร์มีช่วงเวลาจำกัดเพียง 16.67 มิลลิวินาที ต่อหนึ่งเฟรม ในการประมวลผลฟิสิกส์ การคำนวณตำแหน่ง และการเรนเดอร์ภาพ หากนักพัฒนาเขียนโค้ดที่สร้างอ็อบเจกต์ใหม่ในทุกเฟรม เช่น คำสั่ง new THREE.Vector3() ขยะในหน่วยความจำ (Garbage) จะถูกสะสมอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เบราว์เซอร์ต้องหยุดการทำงานชั่วขณะเพื่อทำความสะอาดหน่วยความจำ (Garbage Collection Pause) ทำให้ภาพจำลองกระตุกและเกิดอาการเมารถเสมือนจริง (Simulator Sickness)

ข้อควรระวัง (Pitfall Alert) กฎเหล็กวิศวกรรมลูปแอนิเมชัน 60 FPS (Zero-GC Loop Engineering)

แนวทางปฏิบัติเพื่อประสิทธิภาพสูงสุดในการพัฒนาสื่อฟิสิกส์เสมือนจริง

- **หลีกเลี่ยงการสร้างอินสแตนซ์ใหม่ในลูป:** ห้ามใช้คำสั่ง new ภายในเมธอด renderLoop หรือ requestAnimationFrame โดยเด็ดขาด

- **ใช้ หน่วย ความ จำ ชั่วคราว ส่วน กลาง (Pre-allocated Scratchpad):** ประกาศเวกเตอร์และเมทริกซ์ชั่วคราวไว้นอกลูปหลัก แล้วใช้เมธอด .copy(), .set(), หรือ .add() ในการคำนวณซ้ำ

- **การ คืน ทรัพยากร หน่วย ความ จำ กราฟิก:** เมื่อ เสร็จ สิ้น การ ทดลอง ต้องเรียกใช้ฟังก์ชัน .dispose() บน Geometry และ Material ทุกชิ้น เพื่อป้องกันหน่วยความจำ VRAM รั่วไหล (VRAM Leaks)

1.5 สถาปัตยกรรม การ คำนวณ เชิง ตัวเลข และ การ จำลอง ทางวิทยาศาสตร์ด้วย Python

ควบคู่ไปกับการเรนเดอร์ 3 มิติเชิงพื้นที่ การคำนวณเชิงตัวเลข (Scientific Numerical Computing) คือเสาหลักที่สองของตำราเล่มนี้ ภาษา Python ได้รับการคัดเลือก

ให้เป็นเครื่องมือหลักในการแก้ปัญหาทางฟิสิกส์ เนื่องจากมีระบบนิเวศของไลบรารีทางวิทยาศาสตร์ที่สมบูรณ์และได้มาตรฐานระดับสากล

เครื่องมือหลักของ Python ที่ใช้ในตำราเล่มนี้ประกอบด้วย

1. **NumPy (Numerical Python)** โครงสร้าง ข้อมูล แบ บอาเรย์ หลาย มิติ (N-dimensional Array) ที่ ประมวล ผล บน หน่วย ความ จำ แบบ ต่อ เนื่อง ด้วย ภาษา C ช่วยให้การคำนวณเวกเตอร์และเมทริกซ์ในทฤษฎีสัมพัทธภาพและกลศาสตร์ควอนตัมทำได้อย่างรวดเร็ว

2. **SciPy (Scientific Python)** โมดูลการคำนวณทางวิทยาศาสตร์ชั้นสูง โดยเฉพาะ scipy.integrate.solve_ivp สำหรับการแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (ODEs) ในการ จำลอง การ สลาย ตัว ของ นิวเคลียส และ แบบ จำลอง จักรวาล วิทยา ตลอด จน scipy.linalg สำหรับการหาค่าเจาะจง (Eigenvalues) ของฮามิลโทเนียนควอนตัม

3. **Matplotlib** การพล็อตและแสดงผลข้อมูลเชิงวิทยาศาสตร์ ทั้งกราฟ 2 มิติระดับตีพิมพ์ และแผนผังการกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงควอนตัม

4. **SymPy (Symbolic Python)** การแก้สมการเชิงสัญลักษณ์ การแปลงพีชคณิต และการหาอนุพันธ์และปริพันธ์เชิงวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของทฤษฎี

1.6 กา รบู รณา การ ปัญญา ประดิษฐ์ และ การ เรียน รู้ เชิง ลึก ใน ฟิสิกส์เชิงคำนวณ

พัฒนาการ ล่าสุด ใน วงการ วิทยาศาสตร์ คำนวณ ยุค ปัจจุบัน คือ การ ผสาน **ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI)** และ **การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning)** เข้ากับการจำลองทางฟิสิกส์ ซึ่งนำไปสู่วิทยาการแขนงใหม่ที่เรียกว่า *การเรียนรู้ของเครื่องเชิงวิทยาศาสตร์ (Scientific Machine Learning: SciML)* หรือ *AI for Science*

กระบวนทัศน์ดั้งเดิมของการเรียนรู้เชิงลึกมักถูกวิจารณ์ว่าเป็น "กล่องดำ (Black Box)" ที่เรียนรู้ความสัมพันธ์ของข้อมูลโดยไม่เข้าใจกฎเกณฑ์ธรรมชาติ แต่ในงานฟิสิกส์แผนใหม่ ได้ มี การ คิดค้น สถาปัตยกรรม **โครง ข่าย ประสาท เทียม ที่ รู้ ฟิสิกส์ (Physics-Informed Neural Networks: PINNs)** ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย Raissi และคณะ (2019) โดยมีหัวใจสำคัญคือการฝังกฎทางฟิสิกส์ เช่น สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (PDEs) และกฎการอนุรักษ์เข้าไปในฟังก์ชันการสูญเสีย (Loss Function) ของโครงข่ายประสาทเทียมโดยตรง

$$\mathcal{L}_{\text{total}} = \mathcal{L}_{\text{data}} + \lambda_{\text{phys}} \mathcal{L}_{\text{physics}} \tag{1.1}$$

เมื่อ $\mathcal{L}_{\text{data}}$ คือผลต่างระหว่างการทำนายของโครงข่ายประสาทกับข้อมูลที่สังเกตได้ $\mathcal{L}_{\text{physics}}$ คือส่วนตกค้าง (Residual) ของสมการฟิสิกส์ เช่น สมการชเรอดิงเงอร์ หรือ

สมการการเคลื่อนที่สัมพัทธภาพ และ λ_{phys} คือค่าน้ำหนักควบคุมดุลยภาพ วิธีการนี้ช่วยให้โมเดลสามารถพยากรณ์พฤติกรรมของระบบควอนตัมและสัมพัทธภาพได้อย่างแม่นยำแม้มีข้อมูลตรวจวัดจำกัด

นอกจากนี้ การผนวกรวมโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกแบบย่อส่วน (Surrogate Models) เข้ากับระบบแสดงผล WebXR บนเว็บเบราว์เซอร์ ยังช่วยลดภาระการคำนวณที่ซับซ้อน ทำให้สามารถเรนเดอร์สนามควอนตัมและวิถีการเคลื่อนที่สัมพัทธภาพได้แบบเรียลไทม์ที่ 60 เฟรมต่อวินาที ซึ่งจะมีการนำเสนอตัวอย่างและการประยุกต์ใช้ในแต่ละบทเรียนต่อไป

1.7 แผนผังบูรณาการเทคโนโลยีรายบท

เพื่อให้นักศึกษา และ อาจารย์ ผู้สอน เห็น ภาพ รวม อย่าง ชัดเจน ว่า จะ มี การนำเทคโนโลยี AR/XR และ Python ไปประยุกต์ใช้อย่างไรในเนื้อหาแต่ละบท ตารางที่ 1.1 แสดงแผนผังการกระจายเทคโนโลยีตลอดทั้งเล่ม

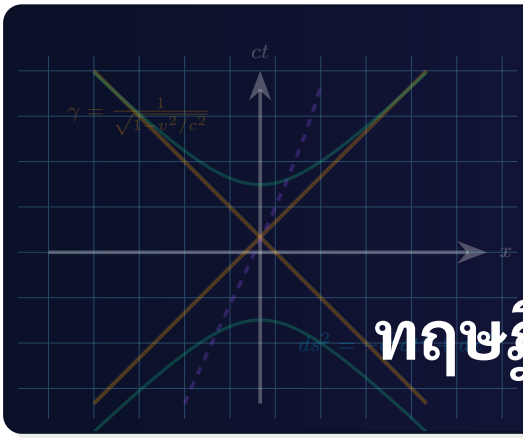
ตารางที่ 1.1 แผนผังการบูรณาการเทคโนโลยีเสมือนจริง AR/XR และการคำนวณ Python ในตำราฟิสิกส์แผนใหม่

บทที่	ชื่อบทเรียน	การจำลองเสมือนจริง AR/XR (WebXR)	การคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Python
2	ทฤษฎี สัม พัทธ ภาพ พิเศษ และ เรขาคณิต กาล-อวกาศ	การจำลอง 4D Spacetime กรวยแสง และการปรับพิกัด LERP Smoothing	การวิเคราะห์ตัวคูณลอเรนซ์ โมเมนตัม และพลังงานเชิงสัมพัทธภาพ
3	กล ศาสตร์ ค วอน ตัม และ โครงสร้าง อะตอม	แบบจำลองอะตอมบอร์ เสมือนจริง WebXR โค้ดเต็ม และออร์บิทัล 3 มิติ	ระเบียบวิธีผลต่างอันตะ (Finite Difference) แก้สมการชเรอดิงเงอร์
4	ฟิสิกส์ ของ อนุภาค และ แบบ จำลอง มาตรฐาน	โครงสร้างควาร์กในแบริออน-มีซอน และการตรึงพิกัดด้วย Hit-Test	การประกอบมวลไม่แปรเปลี่ยน (Invariant Mass) ของอนุภาคฮิกส์
5	ฟิสิกส์ นิวเคลียร์ และ รังสี	การจำลองปฏิกิริยาลูกโซ่นิวเคลียร์ฟิชชันแบบ Cascade 3 มิติ	การแก้ระบบสมการลูกโซ่การสลายตัวของเบตแมนด้วย solve_ivp
6	สารสนเทศ และ การคำนวณเชิงควอนตัม	ทรงกลมบล็อค 3 มิติแบบมีปฏิสัมพันธ์ และการหมุนเวกเตอร์สถานะ	ตัวจำลองเวกเตอร์สถานะควอนตัม (Quantum Statevector Simulator)
7	ดาราศาสตร์ ฟิสิกส์ และจักรวาลวิทยา	กาล-อวกาศโค้งรอบหลุมดำ เลนส์ความโน้มถ่วง และขอบฟ้าเหตุการณ์	การแก้สมการฟรีดมันน์เพื่อจำลองการขยายตัวของเอกภพตามยุคสมัย

1.8 สรุปเครื่องมือและเทคนิคหลักของเทคโนโลยีเสมือนจริง

ตารางที่ 1.2 สรุปเครื่องมือและเทคนิคหลักในการสร้างแบบจำลองฟิสิกส์ด้วย WebXR

เทคโนโลยี / ฟังก์ชัน	เครื่องมือหลัก	หน้าที่ในการศึกษาฟิสิกส์
WebXR Device API	W3C Standard	เชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ AR/VR บนเว็บเบราว์เซอร์โดยตรงโดยไม่ต้องติดตั้งแอปพลิเคชัน
Three.js	WebGL / WebGPU	จัดการฉาก เรนเดอร์วัสดุ แสงเงาแบบ PBR และตาข่ายสามมิติ
MediaPipe Hands	Machine Learning	ติดตามข้อต่อนิ้วมือ 21 จุด เพื่อควบคุมการทดลองแบบไร้การสัมผัส
Zero-GC Loop	Object Pooling	ป้องกันการกระตุกของภาพ รักษาอัตราเฟรมคงที่ 60 FPS
Spatial LERP	$(1-\alpha)\mathbf{x}_0 + \alpha\mathbf{x}_1$	ลดสัญญาณรบกวนจากการตรวจจับตำแหน่งของเซนเซอร์กล้อง AR
Hit-Testing	Raycasting	ตรวจจับระนาบโต๊ะทดลองในโลกจริงเพื่อตรึงแบบจำลอง 3 มิติ



บทที่ 2

ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 2

หัวข้อเนื้อหาประจำบท

1. วิกฤตการณ์ฟิสิกส์ดั้งเดิมและการทดลองของไมเคิลสัน-มอร์ลีย์
2. สัจพจน์ของไอน์สไตน์
3. การแปลงแบบลอเรนซ์
4. ผลสืบเนื่องทางจลนศาสตร์ การยืดออกของเวลาและการหดสั้นของความยาว
5. ปริภูมิ-เวลา 4 มิติ และกรวยแสง
6. พลศาสตร์สัมพัทธภาพ โมเมนตัมและพลังงานรวม
7. สถาปัตยกรรมการจำลองเสมือนจริง AR/XR 4D Spacetime Visualizer
8. การคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Python การวิเคราะห์ตัวคูณลอเรนซ์
9. ตัวอย่างการแก้โจทย์เชิงวิเคราะห์ตามระเบียบวิธี P-S-C-T
10. สรุปสาระสำคัญและแบบฝึกหัดท้ายบท

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. อธิบายข้อจำกัดของกลศาสตร์นิวตันและการทดลองของไมเคิลสัน-มอร์ลีย์ได้อย่างถูกต้อง

2. สรุปสัจพจน์ของไอน์สไตน์ทั้งสองประการ และพิสูจน์ที่มาของการแปลงแบบลอเรนซ์ได้อย่างเป็นระบบ
3. คำนวณปรากฏการณ์การยืดออกของเวลาและการหดสั้นของความยาวได้อย่างแม่นยำ
4. วิเคราะห์โครงสร้างปริภูมิ-เวลา 4 มิติและแผนภาพกรวยแสงได้อย่างถูกต้อง
5. คำนวณความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนตัมสัมพัทธภาพและพลังงานรวม $E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$ ได้อย่างถูกต้อง
6. ออกแบบและพัฒนาสคริปต์ Python เพื่อจำลองการแปลงพิกัดและการพล็อตกราฟตัวคูณลอเรนซ์ $\gamma(v)$ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิจกรรมการเรียนการสอน

1. การบรรยายเชิงทฤษฎีควบคู่กับการอภิปรายผลการทดลองของไมเคิลสัน-มอร์ลีย์
2. กิจกรรมกลุ่มย่อยวิเคราะห์การแปลงลอเรนซ์และการยืดออกของเวลาผ่านการทดลองทางความคิดนาฬิกาแสง
3. ปฏิบัติการจำลองสถานการณ์เสมือนจริง 4D Spacetime Visualizer บนระบบ WebXR
4. ปฏิบัติการเขียนโค้ดภาษา Python จำลองการหดสั้นของความยาวและตัวคูณลอเรนซ์
5. การศึกษาและแก้โจทย์ปัญหาฟิสิกส์สัมพัทธภาพตามระเบียบวิธี P-S-C-T

สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารคำสอน บทที่ 2 ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ
2. สื่อจำลอง 3 มิติปฏิสัมพันธ์เสมือนจริง WebXR 4D Spacetime Visualizer
3. ชุดสคริปต์ภาษา Python คำนวณและพล็อตกราฟพลศาสตร์สัมพัทธภาพ
4. แพลตฟอร์มการจัดการเรียนรู้ดิจิทัล (LMS) และชุดโจทย์ปัญหา P-S-C-T

การประเมินผล

1. การประเมินจากการตอบคำถามและการมีส่วนร่วมในกิจกรรมการเรียนรู้ในชั้นเรียน

2. การตรวจรายงานผลปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ด้วย Python และแบบฝึกหัดท้ายบท
3. การประเมินโครงงานจำลองสถานการณ์ 3 มิติเสมือนจริง WebXR
4. การทดสอบย่อยวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนประจำบทที่ 2

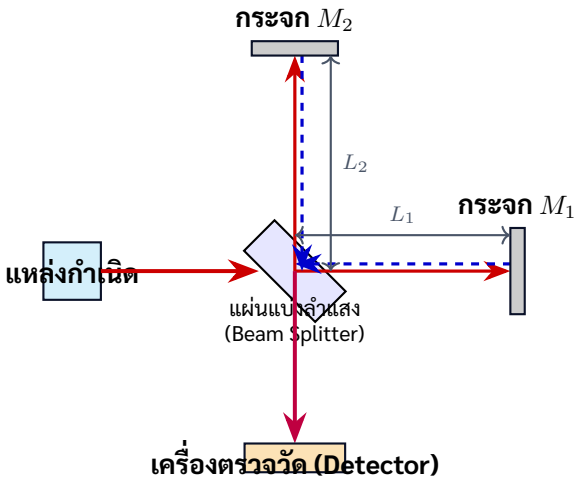
2.1 วิกฤตการณ์ฟิสิกส์ดั้งเดิมและการทดลองของไมเคิลสัน-มอร์ลีย์

ในช่วงปลายคริสต์ศตวรรษที่ 19 ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าของเจมส์ คลาร์ก แมกซ์เวลล์ (James Clerk Maxwell) ระบุว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วในสุญญากาศคงที่เสมอคือ

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \approx 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s} \tag{2.1}$$

ทว่าในกรอบกลศาสตร์ดั้งเดิมของกาลิเลโอและนิวตัน ความเร็วใดๆ ย่อมขึ้นอยู่กับกรอบอ้างอิงเฉื่อย (Inertial Reference Frame) ซึ่งก่อให้เกิดสมมติฐานเกี่ยวกับตัวกลางพาแสงที่เรียกว่า **อีเทอร์เรืองแสง (Luminiferous Aether)**

อัลเบิร์ต ไมเคิลสัน (Albert A. Michelson) และเอ็ดเวิร์ด มอร์ลีย์ (Edward W. Morley) ได้ทำการทดลองอันลือลั่นในปี ค.ศ. 1887 โดยใช้เครื่องแทรกสอดแสง (Interferometer) เพื่อตรวจจับ "ลมของอีเทอร์" (Aether Drift) จากการเคลื่อนที่ของโลกรอบดวงอาทิตย์ ผลลัพธ์ที่ได้ปรากฏเป็น *ศูนย์ (Null Result)* อย่างน่าทึ่ง นั่นคือแสงมีความเร็วเท่าเดิมในทุกทิศทาง โดยไม่ขึ้นกับการเคลื่อนที่ของโลกเลยแม้แต่น้อย



ภาพที่ 2.1 ผังการทดลองของไมเคิลสัน-มอร์ลีย์ (Michelson-Morley Experiment) ซึ่งแสดงผลลัพธ์เป็นศูนย์

2.2 สัจพจน์ของไอน์สไตน์

ในปี ค.ศ. 1905 อัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ ได้เสนอแนวคิดปฏิวัติวงการฟิสิกส์ด้วย **สัจพจน์ของไอน์สไตน์ (Einstein's Postulates)** โดยตั้งสมมติฐานมูลฐาน 2 ข้อ

นิยามที่ 2.1 สัจพจน์สองประการของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ

1. **หลักความสัมพัทธ์ (Principle of Relativity)** กฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์ทั้งปวงย่อมมีรูปแบบทางคณิตศาสตร์เหมือนกันในทุกกรอบอ้างอิงเฉื่อย (Inertial Frames of Reference) ไม่มีกรอบอ้างอิงใดที่มีอภิสิทธิ์เหนือกรอบอื่น
2. **ความคงที่ของอัตราเร็วแสง (Constancy of the Speed of Light)** อัตราเร็วของแสงในสุญญากาศ c มีค่าคงที่สัมบูรณ์เท่ากันเสมอในทุกกรอบอ้างอิงเฉื่อย โดยไม่ขึ้นกับสถานะการเคลื่อนที่ของแหล่งกำเนิดแสงหรือผู้สังเกต

2.3 การแปลงแบบลอเรนซ์

พิจารณากรอบอ้างอิงสองกรอบ S และ S' โดยที่ S' เคลื่อนที่สัมพันธ์กับ S ด้วยความเร็วคงที่ v ในแนวแกน $+x$ โดยสมมติว่าจุดกำเนิด O และ O' ทับกันพอดีที่เวลา $t = t' = 0$ การแปลงพิกัดของกาลิเลโอดั้งเดิม ($x' = x - vt, t' = t$) ไม่สามารถรักษาความคงที่ของ c ได้ ไอน์สไตน์จึงอนุมาน **การแปลงแบบลอเรนซ์ (Lorentz Transformations)** ที่ถูกต้อง

ทฤษฎีบทที่ 2.1 สมการการแปลงแบบลอเรนซ์

การแปลงพิกัดและเวลาระหว่างกรอบ $S(x, y, z, t)$ และกรอบ $S'(x', y', z', t')$ ถูกกำหนดโดย

$$x' = \gamma(x - vt) \tag{2.2}$$
$$y' = y \tag{2.3}$$
$$z' = z \tag{2.4}$$
$$t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right) \tag{2.5}$$

โดยที่ γ คือ **ตัวคูณลอเรนซ์ (Lorentz Factor)**

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}, \quad \beta = \frac{v}{c} \tag{2.6}$$

และการแปลงผกผัน (Inverse Lorentz Transformation) จาก S' กลับสู่ S ทำได้โดยเปลี่ยนเครื่องหมายของ v

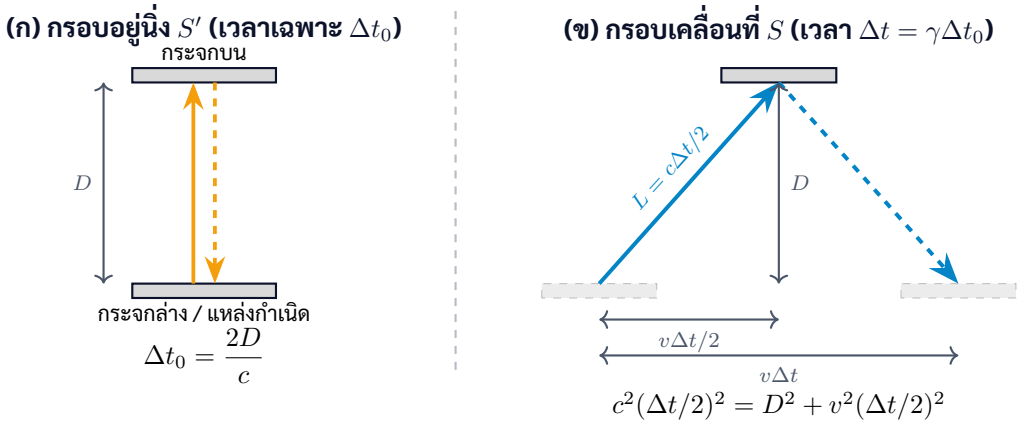
$$x = \gamma(x' + vt') \tag{2.7}$$
$$t = \gamma\left(t' + \frac{vx'}{c^2}\right) \tag{2.8}$$

2.4 ผลสืบเนื่องทางจลนศาสตร์ การยืดออกของเวลาและการหดสั้นของความยาว

2.4.1 การยืดออกของเวลา

ปรากฏการณ์**การยืดออกของเวลา (Time Dilation)** พิจารณานาฬิกาแสงที่อยู่นิ่งในกรอบ S' ช่วงเวลาที่นาฬิกาบันทึกได้ในกรอบที่ตัวเองอยู่นิ่งเรียกว่า **เวลาเฉพาะ (Proper Time, Δt_0)** เมื่อผู้สังเกตในกรอบ S วัดช่วงเวลาของเหตุการณ์เดียวกัน จะพบว่าเวลาเดินช้าลงตามความสัมพันธ์

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0 = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \geq \Delta t_0 \tag{2.9}$$



ภาพที่ 2.2 การทดลองทางความคิดเรื่องนาฬิกาแสง (Light Clock) พิสูจน์ปรากฏการณ์การยืดออกของเวลา

2.4.2 การหดสั้นของความยาว

ปรากฏการณ์**การหดสั้นของความยาว (Length Contraction)** วัตถุที่มีความยาววัดได้ขณะอยู่นิ่งในกรอบของตัวเองเรียกว่า **ความยาวเฉพาะ (Proper Length, L_0)** เมื่อผู้สังเกตที่เคลื่อนที่สัมพันธ์กับวัตถุด้วยความเร็ว v ในแนวขนานกับมิติของวัตถุวัดความยาว จะพบว่าความยาวหดสั้นลง

$$L = \frac{L_0}{\gamma} = L_0\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \leq L_0 \tag{2.10}$$

โปรดสังเกตว่า มิติในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ (y และ z) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวเลย ($L_\perp = L_{0\perp}$)

ข้อควรระวัง (Pitfall Alert) ความเข้าใจผิดเกี่ยวกับความยาวเฉพาะและเวลาเฉพาะ

ผู้เริ่มต้นศึกษามักสับสนว่า "ใครเห็นเวลาช้าลง" หรือ "สิ่งของหดสั้นจริงหรือไม่ทางกายภาพ"

- เวลาเฉพาะ Δt_0 ต้องเป็นเวลาที่วัดจาก **นาฬิกาเรือนเดียวที่อยู่ประจำที่ตำแหน่งเดิมของเหตุการณ์ทั้งสอง** เสมอ
- ความยาวเฉพาะ L_0 ต้องวัดในกรอบอ้างอิงที่วัตถุนั้นอยู่นิ่งสัมพัทธ์
- การหดสั้นไม่ใช่การบีบอัดทางกายภาพของเนื้อสาร แต่เกิดจากคุณสมบัติทางเรขาคณิตของปริภูมิ-เวลา (Spacetime) เมื่อสังเกตจากต่างกรอบอ้างอิง

2.5 ปริภูมิ-เวลา 4 มิติ และกรวยแสง

แฮร์มันน์ มินคอฟสกี (Hermann Minkowski) ได้เสนอการรวมปริภูมิสามมิติเข้ากับเวลาเป็น **กาลอวกาศ 4 มิติ (Spacetime Continuum)** โดยกำหนดพิกัด 4 มิติเป็น $x^\mu = (ct, x, y, z)$ ช่วงปริภูมิเวลาสัมบูรณ์ (Invariant Spacetime Interval) ระหว่างสองเหตุการณ์นิยามโดย

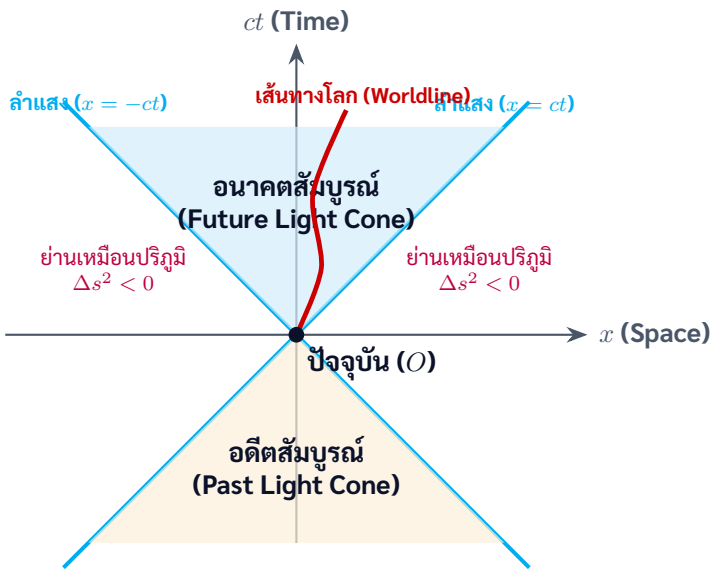
$$\Delta s^2 = c^2\Delta t^2 - \left(\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2\right) \tag{2.11}$$

ค่า Δs^2 มีคุณสมบัติคงตัวแบบลอเรนซ์ (Lorentz Invariant) ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ย่าน

1. $\Delta s^2 > 0$ **เหมือนเวลา (Timelike)** เหตุการณ์ทั้งสองสามารถเชื่อมโยงกันด้วยความสัมพันธ์เชิงเหตุและผล (Causality) ได้

2. $\Delta s^2 = 0$ **เหมือนแสง (Lightlike หรือ Null)** เส้นทางของอนุภาคที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสง (เช่น โฟตอน)

3. $\Delta s^2 < 0$ **เหมือนปริภูมิ (Spacelike)** ไม่มีสัญญาณใดในเอกภพสามารถส่งหากันได้ทัน (ไม่มีความสัมพันธ์เชิงสาเหตุ)



ภาพที่ 2.3 แผนภาพกรวยแสง (Light Cone) แสดงโครงสร้างการส่งผ่านผลเชิงเหตุและผล (Causality) ในปริภูมิ-เวลามินคอฟสกี

2.6 พลศาสตร์สัมพัทธภาพ โมเมนตัมและพลังงานรวม

เมื่อ วัตถุ มี ความเร็ว เข้า ใกล้ อัตราเร็ว แสง นิยาม โมเมนตัม แบ บนิว ตัน $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ จำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงตามทฤษฎีสัมพัทธภาพ เพื่อให้สอดคล้องกับกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมในทุกกรอบเฉื่อย

$$\mathbf{p} = \gamma m_0 \mathbf{v} = \frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \tag{2.12}$$

โดยที่ m_0 คือมวลนิ่ง (Rest Mass) ของอนุภาค

พลัง งา นรวมสัม พัทธ ภาพ (Total Relativistic Energy, E) ประกอบ ด้วย **พลังงานนิ่ง (Rest Energy, E_0)** และ **พลังงานจลน์สัมพัทธภาพ (K)**

$$E = \gamma m_0 c^2 = K + m_0 c^2 \tag{2.13}$$

ดังนั้น พลังงานจลน์จึงมีค่าเท่ากับ

$$K = (\gamma - 1) m_0 c^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right) m_0 c^2 \tag{2.14}$$

เมื่อ $v \ll c$ สามารถกระจายอนุกรมเทย์เลอร์ $\gamma \approx 1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}$ จะได้ $K \approx \frac{1}{2} m_0 v^2$ ซึ่งสอดคล้องกับกลศาสตร์คลาสสิกของนิวตันอย่างสมบูรณ์แบบ

ความสัมพันธ์พื้นฐานระหว่างพลังงานรวม โมเมนตัม และมวลนิ่ง กำหนดโดย

$$E^2 = (pc)^2 + (m_0 c^2)^2 \tag{2.15}$$

สำหรับอนุภาคที่ไร้มวลนิ่ง เช่น โฟตอน ($m_0 = 0$) สมการจะลดรูปเหลือ

$$E = pc \tag{2.16}$$

2.7 สถาปัตยกรรมการจำลองเสมือนจริง AR/XR 4D Spacetime Visualizer

AR/XR Interactive Simulation การแปลงพิกัดปริภูมิ-เวลา 4 มิติ และกรวยแสงปฏิสัมพันธ์

วัตถุประสงค์การเรียนรู้ผ่าน AR

1. แสดงภาพกรวยแสง (Light Cone) แบบโปร่งใส 3 มิติ ลอยตัวในห้องเรียนจริงผ่าน WebXR

2. ผู้เรียนสามารถเลื่อนแถบควบคุมความเร็ว $\beta = v/c$ ตั้งแต่ 0.00 ถึง 0.99 เพื่อสังเกตการเอียง (Shear / Hyperbolic Rotation) ของแกนพิกัด x' และ ct' เทียบกับแกน x และ ct
3. ตรวจสอบเส้นทางโลก (Worldline) ของอนุภาคความเร็วสูง และสังเกตการหดตัวของยานอวกาศเสมือนจริง

ข้อกำหนดทางเทคนิค (Technical Specification)

- **Shader Pipeline** GLSL Fragment Shader คำนวณไฮเปอร์โบลา $\Delta s^2 = \text{const}$ แบบเรียลไทม์
- **Tracking** MediaPipe Hands ควบคุมการหมุนมุมมองและ Pinch Gesture เพื่อเร่งความเร็วของยาน
- **Performance Target** 60 FPS บนเบราว์เซอร์มือถือ รองรับ WebXR API

2.8 การคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Python การวิเคราะห์ตัวคูณลอเรนซ์

ต่อไปนี้เป็นสคริปต์ Python วิเคราะห์ค่าตัวคูณลอเรนซ์ γ และพลังงานจลน์สัมพัทธภาพเทียบกับค่าคลาสสิก

relativity_kinematics.py – การวิเคราะห์ตัวคูณลอเรนซ์และพลังงานจลน์

```python
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# ค่าคงตัวมูลฐาน
c = 2.99792458e8        # อัตราเร็วแสง (m/s)
m_e = 9.1093837e-31     # มวลนิ่งของอิเล็กตรอน (kg)
eV = 1.602176634e-19    # จูลต่ออิเล็กตรอนโวลต์

# กำหนดช่วงความเร็วสัมพันธ์ beta = v/c จาก 0 ถึง 0.99
beta = np.linspace(0.001, 0.99, 1000)
gamma = 1.0 / np.sqrt(1.0 - beta**2)

# คำนวณพลังงานจลน์สัมพัทธภาพและพลังงานจลน์แบบคลาสสิกหน่วย ( MeV)
K_rel_MeV = (gamma - 1.0) * m_e * c**2 / (1e6 * eV)
K_classical_MeV = 0.5 * m_e * (beta * c)**2 / (1e6 * eV)

# แสดงผลค่าตัวเลขที่สำคัญ
print("=== Relativistic Kinematics Calculation ===")
speeds = [0.1, 0.5, 0.8, 0.9, 0.95, 0.99, 0.999]
for v_rel in speeds:
```

```
    g = 1.0 / np.sqrt(1.0 - v_rel**2)
    k_rel = (g - 1.0) * 0.5109989  # พลังงานจลน์อิเล็กตรอน MeV
    k_cla = 0.5 * 0.5109989 * v_rel**2
    ratio = k_rel / k_cla
    print(f"beta = {v_rel:5.3f} | gamma = {g:7.3f} | K_rel = {k_rel
        :9.4f} MeV | Ratio = {ratio:6.2f}")
```

2.9 การประยุกต์ใช้การเรียนรู้เชิงลึกและ PINN ในพลศาสตร์สัมพัทธภาพ

ในระบบพลศาสตร์เชิงสัมพัทธภาพ สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้แรงภายนอก **F** มีลักษณะไม่เชิงเส้นเนื่องจากตัวคูณลอเรนซ์ $\gamma(v)$ ขึ้นอยู่กับขนาดความเร็วอย่างยิ่งยวด

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{m_0\mathbf{v}}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\right) = \mathbf{F}(\mathbf{r},t) \tag{2.17}$$

การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ไม่เชิงเส้นดังกล่าวด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขดั้งเดิม เช่น Runge-Kutta มักเผชิญปัญหาเสถียรภาพตัวเลขเมื่อความเร็วเข้าใกล้อัตราเร็วแสง ($v \to c$) ปัจจุบันได้มีการนำ **โครงข่ายประสาทเทียมที่รู้ฟิสิกส์ (Physics-Informed Neural Networks: PINNs)** มาประยุกต์ใช้ โดยกำหนดให้โครงข่ายประสาทเทียม $\mathbf{r}_\theta(t)$ ทำนายพิกัดตำแหน่งของอนุภาค และใช้ระบบอนุพันธ์อัตโนมัติ (Automatic Differentiation) คำนวณความเร็ว $\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$ และความเร่ง เพื่อสร้างฟังก์ชันการสูญเสียตกค้างทางกายภาพ

$$\mathcal{L}_{\text{physics}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left\|\frac{d}{dt}\left(\gamma_i m_0 \mathbf{v}_i\right) - \mathbf{F}(\mathbf{r}_i,t_i)\right\|^2 \tag{2.18}$$

นอกจากนี้ การเรียนรู้เชิงลึกยังถูกนำมาพัฒนาเป็นตัวเรนเดอร์แบบประสาท (Neural Relativistic Ray Tracing) เพื่อจำลองปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์เชิงสัมพัทธภาพ เช่น การเลื่อนด็อปเปลอร์ของสี (Doppler Color Shift) และการรวมแสงไปข้างหน้าแบบไฟหน้ารถ (Relativistic Beaming / Searchlight Effect) ในระบบเสมือนจริง WebXR ได้อย่างลื่นไหลที่ 60 เฟรมต่อวินาที

2.10 ตัวอย่างการแก้โจทย์เชิงวิเคราะห์ตามระเบียบวิธี P-S-C-T

ตัวอย่างที่ 2.1 การสลายตัวของมิวออนในบรรยากาศโลก (Muon Decay Paradox)

โจทย์ (Problem)
มิวออน (μ) ก่อตัวขึ้นในชั้นบรรยากาศสตราโตสเฟียร์ที่ระดับความสูง $H = 10$ km เหนือพื้นโลก ด้วยความเร็ว $v = 0.995c$ โดยมิวออนมีอายุขัยเฉลี่ยขณะอยู่นิ่ง (Proper Lifetime) เท่ากับ $\tau_0 = 2.20\,\mu$s

1. ตามการคำนวณแบบคลาสสิก มิวออนจะเคลื่อนที่ได้ระยะทางเท่าใดก่อนสลายตัว และสามารถมาถึงพื้นผิวโลกได้หรือไม่?
2. จากมุมมองของผู้สังเกตบนพื้นโลก (Earth Frame) จงอธิบายว่าเหตุใดจึงตรวจพบมิวออนบนพื้นผิวโลกได้เป็นจำนวนมาก
3. จากมุมมองของมิวออนเอง (Muon Frame) จงอธิบายว่ามิวออนเดินทางมาถึงพื้นโลกได้อย่างไร

ยุทธวิธี (Strategy)

- ในกรอบคลาสสิก ระยะทางคือ $d = v\tau_0$
- ในกรอบโลก เวลาของมิวออนยืดออก $\Delta t = \gamma\tau_0$ ดังนั้นระยะทางที่มิวออนเคลื่อนที่ได้คือ $d = v\Delta t$
- ในกรอบมิวออน ระยะทางความสูง 10 km หดสั้นลง $H' = H/\gamma$ แต่มิวออนมีเวลาสลายตัวเท่าเดิมคือ τ_0

การคำนวณ (Computation)
คำนวณตัวคูณลอเรนซ์สำหรับความเร็ว $v = 0.995c$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(0.995)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-0.990025}} = \frac{1}{\sqrt{0.009975}} \approx 10.0125 \tag{2.19}$$

1. การวิเคราะห์แบบคลาสสิก

$$\begin{aligned} d_{\text{classical}} &= v\tau_0 = (0.995 \times 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}) \times (2.20 \times 10^{-6} \text{ s}) \\ &\approx 656.7 \text{ m} \approx 0.66 \text{ km} \end{aligned} \tag{2.20}$$

เนื่องจาก 0.66 km $\ll 10$ km มิวออนเกือบทั้งหมดจึงควรสลายตัวไปหมดก่อนถึงพื้นโลก ซึ่งขัดแย้งกับข้อเท็จจริงจากการทดลอง

2. การวิเคราะห์ในกรอบโลก (Time Dilation) เวลาชีวิตของมิวออนที่สังเกตจากบนโลกจะยืดออกเป็น

$$\Delta t = \gamma\tau_0 = (10.0125) \times (2.20\,\mu\text{s}) \approx 22.03\,\mu\text{s} \tag{2.21}$$

ระยะทางที่มิวออนเคลื่อนที่ได้ในกรอบโลกจึงเป็น

$$\begin{aligned} d_{\text{Earth}} = v\Delta t &= (0.995 \times 3.00 \times 10^8\ \text{m/s}) \times (22.03 \times 10^{-6}\ \text{s}) \\ &\approx 6576\ \text{m} \approx 6.58\ \text{km} \end{aligned} \tag{2.22}$$

หากพิจารณาการกระจายทางสถิติของอายุขัย $N(t) = N_0 e^{-t/\Delta t}$ จะพบมิวออนจำนวนมากสามารถรอดชีวิตมาถึงสถานีตรวจวัดบนพื้นโลกได้จริง!

3. การวิเคราะห์ในกรอบมิวออน (Length Contraction) ในกรอบที่มิวออนอยู่นิ่ง โลกกำลังพุ่งเข้าหามันด้วยความเร็ว $0.995c$ ระยะทางความหนาของบรรยากาศจะหดสั้นลง

$$H' = \frac{H}{\gamma} = \frac{10\,000\ \text{m}}{10.0125} \approx 998.75\ \text{m} \approx 1.0\ \text{km} \tag{2.23}$$

เวลาที่โลกใช้ในการพุ่งผ่านมิวออนคือ

$$\Delta t' = \frac{H'}{v} = \frac{998.75\ \text{m}}{0.995 \times 3.00 \times 10^8\ \text{m/s}} \approx 3.35\,\mu\text{s} \tag{2.24}$$

ซึ่งใกล้เคียงกับอายุขัย $\tau_0 = 2.20\,\mu\text{s}$ ทำให้มิวออนมีโอกาสชนพื้นโลกได้อย่างสมเหตุสมผล

ข้อคิดทางฟิสิกส์ (Takeaway)

ทั้งสองกรอบอ้างอิงให้ข้อสรุปทางกายภาพเดียวกันคือ "มิวออนตรวจพบบนพื้นผิวโลกได้" โดยกรอบโลกอธิบายด้วยปรากฏการณ์การยืดออกของเวลา (Time Dilation) ขณะที่กรอบมิวออนอธิบายด้วยการหดสั้นของความยาว (Length Contraction) นี่คือความสอดคล้องอย่างงดงามของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ ■

ตัวอย่างที่ 2.2 พลังงานขีดเริ่มเปลี่ยนในการสร้างอนุภาคไพออน (Threshold Energy for Pion Production)

ลำอนุภาคโปรตอนพลังงานสูงจากเครื่องเร่งอนุภาคพุ่งชนเป้าโปรตอนที่อยู่นิ่งในห้องปฏิบัติการเพื่อสร้างไพออนที่เป็นกลางทางไฟฟ้าตามปฏิกิริยา

$$p + p \to p + p + \pi^0 \tag{2.25}$$

กำหนดให้มวลนิ่งของโปรตอน $m_p c^2 = 938.27$ MeV และมวลนิ่งของไพออน $m_{\pi^0} c^2 = 134.98$ MeV

1. จงหาสมการพลังงานรวมขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold Total Energy) E_{th}

และพลังงานจลน์ขีดเริ่มเปลี่ยน K_{th} ของโปรตอนในกรอบห้องปฏิบัติการ

2. คำนวณค่าตัวเลขของ K_{th} ในหน่วย MeV

โจทย์ (Problem)

คำนวณพลังงานจลน์ต่ำสุดที่ต้องให้กับโปรตอนตัวพุ่งชน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสร้างอนุภาคใหม่ π^0 ขึ้นมาได้

ยุทธวิธี (Strategy)

ใช้ปริมาณคงตัวลอเรนซ์ของเวกเตอร์ 4-โมเมนตัมรวม (Mandelstam Invariant s)

$$s = (P_1 + P_2)^2 = E_{\text{tot, CM}}^2/c^2 \tag{2.26}$$

- ในกรอบห้องปฏิบัติการ (Lab Frame) โปรตอนตัวที่สองอยู่นิ่ง $P_2 = (m_p c, \mathbf{0})$ และโปรตอนตัวแรกมี $P_1 = (E/c, \mathbf{p})$

$$s = (P_1 + P_2)^2 = 2m_p^2c^2 + 2\left(\frac{E}{c}\right)(m_p c) = 2m_p^2c^2 + 2m_p E \tag{2.27}$$

- ที่พลังงานขีดเริ่มเปลี่ยนในกรอบจุดศูนย์กลางโมเมนตัม (CM Frame) อนุภาคผลลัพธ์ทั้งหมด (p, p, π^0) จะอยู่นิ่งสัมพัทธ์ซึ่งกันและกัน

$$s = (2m_p + m_{\pi^0})^2c^2 \tag{2.28}$$

การคำนวณ (Computation)

1. เทียบปริมาณคงตัว s ทั้งสองกรอบ

$$\begin{aligned} 2m_p^2c^2 + 2m_pE_{\text{th}} &= (2m_p + m_{\pi^0})^2c^2 \\ &= 4m_p^2c^2 + 4m_pm_{\pi^0}c^2 + m_{\pi^0}^2c^2 \end{aligned} \tag{2.29}$$

แก้สมการหา E_{th}

$$E_{\text{th}} = m_pc^2 + 2m_{\pi^0}c^2 + \frac{m_{\pi^0}^2c^2}{2m_p} \tag{2.30}$$

พลังงานจลน์ขีดเริ่มเปลี่ยนคือ $K_{\text{th}} = E_{\text{th}} - m_pc^2$

$$K_{\text{th}} = 2m_{\pi^0}c^2 + \frac{(m_{\pi^0}c^2)^2}{2m_pc^2} \tag{2.31}$$

2. แทนค่าตัวเลข

$$\begin{aligned} K_{\text{th}} &= 2(134.98\ \text{MeV}) + \frac{(134.98\ \text{MeV})^2}{2(938.27\ \text{MeV})} \\ &= 269.96\ \text{MeV} + \frac{18219.60}{1876.54}\ \text{MeV} \end{aligned}$$

$$= 269.96 \text{ MeV} + 9.71 \text{ MeV} \approx 279.67 \text{ MeV} \tag{2.32}$$

ข้อคิดทางฟิสิกส์ (Takeaway)

มวลของอนุภาค π^0 ที่ต้องการสร้างคือ 134.98 MeV$/c^2$ แต่ต้องใช้พลังงานจลน์ของโปรตอนตัวพุ่งชนถึง 279.67 MeV (มากกว่าสองเท่าของมวลที่สร้างขึ้น) เนื่องจากในกรอบห้องปฏิบัติการ อนุภาคทั้งหมดต้องเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเพื่อรักษาโมเมนตัมรวมของระบบไว้ พลังงานจลน์ส่วนใหญ่จึงสูญเสียไปกับการเคลื่อนที่ของจุดศูนย์กลางมวล นี่คือเหตุผลที่ฟิสิกส์พลังงานสูงในปัจจุบันหันมาใช้เครื่องชนอนุภาคแบบลำอนุภาคปะทะกัน (Colliders) เช่น LHC แทนเครื่องเร่งอนุภาคแบบชนเป้านิ่ง ■

ตัวอย่างที่ 2.3 การปรับค่าพิกัดการแปลงพื้นที่สำหรับ AR Tracking ให้เรียบเนียน (Smooth Interpolation / LERP)

โจทย์ (Problem)

ในการจำลองทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษด้วยระบบ AR เมื่อเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง (เช่น WebXR หรือ MediaPipe Hands) ส่งพิกัดตำแหน่งของกรอบอ้างอิงเฉื่อย $(\mathbf{x}_t, \mathbf{y}_t, \mathbf{z}_t)$ เข้ามาประมวลผลทุกเฟรม มักพบปัญหาการสั่นไหวเล็กน้อยของข้อมูลจากเซนเซอร์ (Jittering / Sensor Noise) ส่งผลให้กรอบอวกาศ-เวลา 4 มิติและกรวยแสงเสมือนสั่นกระตุกจนสูญเสียความสมจริง จงออกแบบตัวกรองทางคณิตศาสตร์ที่คำนวณได้อย่างรวดเร็วในรอบเฟรม 60 FPS เพื่อให้การเคลื่อนที่ราบรื่น

ยุทธวิธี (Strategy)

ใช้ตัวกรองแบบชะลอชี้กำลังหรือการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation – LERP) ระหว่างตำแหน่งปัจจุบัน $\mathbf{P}_{\text{curr}}$ และตำแหน่งเป้าหมาย $\mathbf{P}_{\text{target}}$

$$\mathbf{P}(t + \Delta t) = \mathbf{P}(t) + \alpha\left(\mathbf{P}_{\text{target}} - \mathbf{P}(t)\right) = (1 - \alpha)\mathbf{P}(t) + \alpha\mathbf{P}_{\text{target}} \tag{2.33}$$

โดยที่ $\alpha \in (0, 1]$ คือแฟกเตอร์การผ่อนคลาย (Smoothing Factor)

การคำนวณ (Computation)

หากต้องการให้การตอบสนองมีความหน่วง 95% เข้าสู่เป้าหมายภายในเวลา $T = 0.2$ วินาที ที่ความถี่เฟรม 60 Hz ($\Delta t = 1/60$ s หรือมีจำนวน 12 เฟรม)

$$(1 - \alpha)^{12} \leq 0.05 \implies 1 - \alpha = (0.05)^{1/12} \approx 0.779 \implies \alpha \approx 0.22 \tag{2.34}$$

ดังนั้น การเขียนโค้ด LERP ในลูปแอนิเมชันของ Three.js คือ

$$\mathbf{P}_{\text{curr}}.\text{lerp}(\mathbf{P}_{\text{target}}, 0.22) \tag{2.35}$$

ข้อคิดทางฟิสิกส์และวิศวกรรม (Takeaway)

การคำนวณ LERP แบบเวกเตอร์ใช้การบวกและคูณสเกลาร์เพียง 3 มิติ ซึ่งใช้

เวลาประมวลผลน้อยกว่า 0.001 ms บน CPU จึงไม่กระทบต่อ Frame Budget ของเบราว์เซอร์ แต่สามารถกำจัดความสั่นไหวของเซนเซอร์ AR ในการจำลองการเปลี่ยนกรอบอ้างอิงเฉื่อยได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ■

Active Learning (Concept Check) คำถามทบทวนแนวคิด

1. ยานอวกาศลำหนึ่งมีความเร็วสัมพัทธ์ $0.8c$ เมื่อเทียบกับสถานีอวกาศ หากนักบินอวกาศบนยานยิงแสงเลเซอร์ไปข้างหน้า ผู้สังเกตบนสถานีอวกาศจะวัดอัตราเร็วของลำแสงเลเซอร์ได้เท่าใด?
2. มีเงื่อนไขใดหรือไม่ที่ทำให้เหตุการณ์สองเหตุการณ์เกิดขึ้นพร้อมกันในทุกกรอบอ้างอิงเฉื่อย? จงอธิบายโดยใช้สมการการแปลงลอเรนซ์

2.11 สรุปสาระสำคัญประจำบท

ตารางที่ 2.1 สรุปความสัมพันธ์พื้นฐานในทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ

หัวข้อ	สมการหลัก	ความหมายเชิงกายภาพ
ตัวคูณลอเรนซ์	$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$	สเกลาร์มาตรวัดความเบี่ยงเบนจากกลศาสตร์นิวตัน ($\gamma \geq 1$)
การยืดของเวลา	$\Delta t = \gamma \Delta t_0$	เวลาในกรอบที่วัตถุเคลื่อนที่เดินช้ากว่าเวลาเฉพาะ
การหดสั้นของความยาว	$L = L_0/\gamma$	ความยาวในทิศทางการเคลื่อนที่จะหดสั้นลงเมื่อสังเกตจากกรอบอื่น
ช่วงปริภูมิ-เวลา	$\Delta s^2 = c^2\Delta t^2 - \lvert\Delta \mathbf{r}\rvert^2$	ปริมาณคงตัวลอเรนซ์ จำแนกย่านแสง เวลา และปริภูมิ
โมเมนตัมสัมพัทธภาพ	$\mathbf{p} = \gamma m_0 \mathbf{v}$	กฎอนุรักษ์โมเมนตัมคงรูปในทุกกรอบอ้างอิงเฉื่อย
สมมูลมวล-พลังงาน	$E^2 = (pc)^2 + (m_0c^2)^2$	พลังงานรวมของอนุภาคที่มีมวลและอนุภาคไร้มวล

2.12 แบบฝึกหัดท้ายบท

1. โปรตอนถูกเร่งในเครื่องเร่งอนุภาคจนมีพลังงานจลน์เป็น 3 เท่าของพลังงานนิ่ง จงคำนวณ
   (a) ตัวคูณลอเรนซ์ γ ของโปรตอน
   (b) อัตราเร็วของโปรตอนในรูปสัดส่วนของ c

(c) โม เมน ตัมสัม พัทธ ภาพ ของ โปรตอน ใน หน่วย MeV$/c$ (กำหนด $m_pc^2 \approx 938.27$ MeV)

2. ยานอวกาศยาว 100 m เคลื่อนที่ผ่านสถานีอวกาศด้วยความเร็ว $0.6c$ ผู้สังเกตบนสถานีจะวัดความยาวของยานลำนี้ได้เท่าใด?

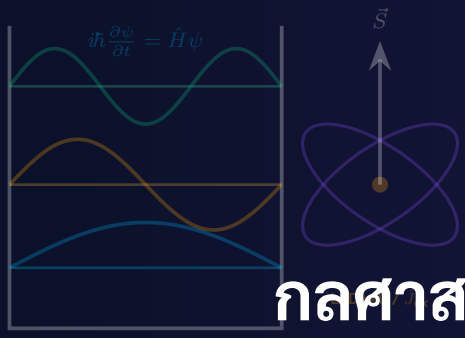
3. จงพิสูจน์ว่าช่วงปริภูมิเวลา $\Delta s^2 = c^2\Delta t^2 - \Delta x^2$ มีค่าเท่าเดิมภายใต้การแปลงลอเรนซ์ ($c^2\Delta t'^2 - \Delta x'^2 = c^2\Delta t^2 - \Delta x^2$)

4. ปรากฏการณ์ด็อปเปลอร์เชิงสัมพัทธภาพ (Relativistic Doppler Effect) สำหรับแสงกาแล็กซีอันไกลโพ้นแห่งหนึ่งมีสเปกตรัมเส้นไฮโดรเจน H_α ($\lambda_0 = 656.3$ nm) ปรากฏที่ความยาวคลื่นที่วัดได้บนโลก $\lambda = 800.0$ nm (เกิดการเลื่อนทางแดง Redshift) จงคำนวณอัตราเร็วในการถอยห่าง v ของกาแล็กซีนี้ในรูปของสัดส่วนอัตราเร็วแสง c

5. ยานอวกาศ A และยานอวกาศ B เคลื่อนที่ออกจากสถานีอวกาศในทิศทางตรงกันข้ามกันด้วยอัตราเร็ว $0.70c$ และ $0.80c$ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับสถานีอวกาศ จงคำนวณ

   (a) อัตราเร็วของยาน B เมื่อสังเกตจากผู้สังเกตบนยาน A ตามทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ

   (b) เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับการคำนวณตามจลนศาสตร์แบบคลาสสิกของกาลิเลโอ



บทที่ 3

กลศาสตร์ควอนตัมเบื้องต้น

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 3

หัวข้อเนื้อหาประจำบท

1. การกำเนิดทฤษฎีควอนตัม การแผ่รังสีของวัตถุดำ
2. ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกและคอมป์ตัน
3. ทวิภาวะคลื่นและอนุภาคและหลักความไม่แน่นอน
4. สมการคลื่นชเรอดิงเงอร์และฟังก์ชันคลื่น
5. อนุภาคในกล่องศักย์อนันต์ 1 มิติ
6. ปรากฏการณ์การทะลุผ่านกำแพงศักย์
7. สถาปัตยกรรมการจำลองเสมือนจริง AR/XR 3D Quantum Orbitals and Tunneling
8. การคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Python Finite Difference Solver
9. ตัวอย่างการแก้โจทย์เชิงวิเคราะห์ตามระเบียบวิธี P-S-C-T
10. สรุปสาระสำคัญและแบบฝึกหัดท้ายบท

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. อธิบายวิกฤตการณ์รังสีอัลตราไวโอเลตและสมมติฐานควอนตัมของมักซ์พลังค์ได้อย่างถูกต้อง
2. วิเคราะห์ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกและสมการพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนได้อย่างแม่นยำ
3. คำนวณความยาวคลื่นเดอบรอยล์และอธิบายทวิภาวะคลื่นและอนุภาคได้อย่างเป็นระบบ
4. ประยุกต์ใช้หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์กในการประเมินพลังงานสถานะพื้นของระบบควอนตัมได้อย่างถูกต้อง
5. แก้สมการชเรอดิงเงอร์ที่ไม่ขึ้นกับเวลาสำหรับอนุภาคในกล่องศักย์อนันต์ 1 มิติได้อย่างถูกต้อง
6. ออกแบบสคริปต์ Python เพื่อหาค่าไอเกนของพลังงานและพล็อตฟังก์ชันคลื่นด้วยวิธี Finite Difference ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิจกรรมการเรียนการสอน

1. การ บรรยาย เชิง ทฤษฎี และ อภิปราย การ กำเนิด ฟิสิกส์ ค วอน ตัม และการแผ่รังสีของวัตถุดำ
2. การวิเคราะห์ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก การกระเจิงคอมป์ตัน และหลักความไม่แน่นอน
3. กิจกรรมจำลองการทะลุผ่านกำแพงศักย์และออร์บิทัลควอนตัม 3 มิติในระบบ WebXR
4. ปฏิบัติการคอมพิวเตอร์เขียนโค้ด Python (NumPy, SciPy) แก้สมการชเรอดิงเงอร์ 1D Box
5. การศึกษาตัวอย่างและการแก้โจทย์ปัญหาเชิงลึกตามขั้นตอน P-S-C-T

สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารคำสอน บทที่ 3 กลศาสตร์ควอนตัมเบื้องต้น
2. สื่อจำลองปฏิสัมพันธ์เสมือนจริง 3D Quantum Orbitals and Tunneling บน WebXR
3. โปรแกรม ภาษา Python จำลอง ระเบียบ วิธี ผล ต่าง อัน สืบ เนื่อง (Finite Difference Method)
4. ชุดแบบฝึกหัดและการประเมินผลโจทย์ปัญหา P-S-C-T ประจำบทที่ 3

การประเมินผล

1. การประเมินผลจากการมีส่วนร่วมในการอภิปรายและการตอบคำถามในชั้นเรียน
2. การตรวจผลงานการเขียนโปรแกรม Python จำลองฟังก์ชันคลื่นควอนตัม
3. การประเมินรายงานการทดลองและแบบฝึกหัดท้ายบท
4. การทดสอบย่อยวัดความรู้ความเข้าใจประจำบทที่ 3

3.1 การกำเนิดทฤษฎีควอนตัม การแผ่รังสีของวัตถุดำ

ในปลายคริสต์ศตวรรษที่ 19 กฎการแผ่รังสีของเรย์ลี-ยีนส์ (Rayleigh-Jeans Law) ซึ่งสร้างขึ้นจากอุณหพลศาสตร์คลาสสิกและทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำนายว่าความหนาแน่นพลังงานของการแผ่รังสีจะพุ่งเข้าสู่อนันต์เมื่อความยาวคลื่นสั้นลงเข้าใกล้ศูนย์ ($\lambda \to 0$ หรือความถี่สูงในย่านรังสีอัลตราไวโอเลต) ปรากฏการณ์ล้มเหลวอย่างร้ายแรงนี้เรียกว่า **วิกฤตการณ์รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet Catastrophe)**

ในปี ค.ศ. 1900 มักซ์ พลังค์ (Max Planck) ได้เสนอสมมติฐานปฏิวัติว่า อะตอมในผนังของโพรงวัตถุดำไม่ได้ดูดกลืนหรือปล่อยพลังงานอย่างต่อเนื่อง แต่กระทำในรูปของก้อนพลังงานไม่ต่อเนื่องเรียกว่า **ควอนตา (Quanta)**

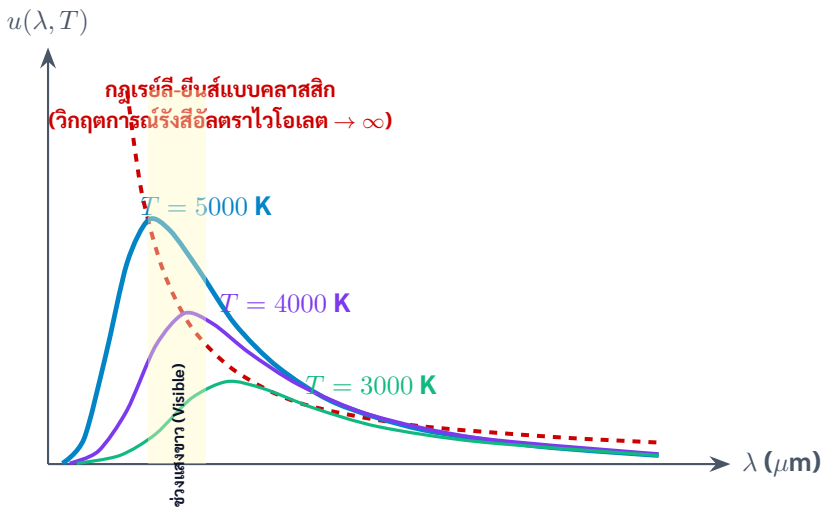
$$E_n = nh\nu = n\hbar\omega, \quad n = 0, 1, 2, 3, \ldots \tag{3.1}$$

โดยที่ $h \approx 6.62607015 \times 10^{-34}$ J · s คือค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's Constant) และ $\hbar = \frac{h}{2\pi}$

กฎการแผ่รังสีของพลังค์สำหรับความหนาแน่นสเปกตรัมของพลังงานคือ

$$u(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \tag{3.2}$$

ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดลองในทุกช่วงความยาวคลื่นอย่างสมบูรณ์แบบ



ภาพ ที่ 3.1 สเปกตรัม การแผ่รังสี ของ วัตถุ ดำ ตาม กฎ ของ พลัง ค์ เปรียบ เทียบ กับ วิกฤตการณ์รังสีอัลตราไวโอเลตแบบคลาสสิก

3.2 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกและคอมป์ตัน

3.2.1 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect) ในปี ค.ศ. 1905 อัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ อธิบายว่าแสงประกอบด้วยอนุภาคพลังงานเรียกว่า **โฟตอน (Photon)** แต่ละโฟตอนมีพลังงาน $E = h\nu$ เมื่อโฟตอนชนกับอิเล็กตรอนในผิวโลหะ จะถ่ายทอดพลังงานทั้งหมดให้อิเล็กตรอนตัวเดียว หากพลังงานนี้มากกว่า **ฟังก์ชันงาน (Work Function, Φ)** ของโลหะ อิเล็กตรอนจะหลุดออกไปพร้อมพลังงานจลน์สูงสุด

$$K_{\text{max}} = h\nu - \Phi = eV_s \tag{3.3}$$

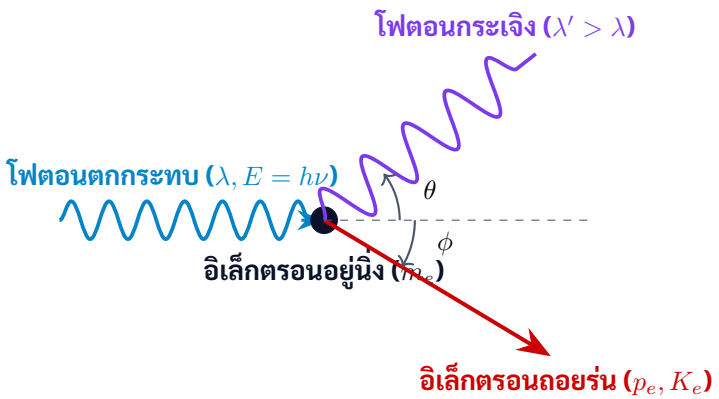
โดยที่ V_s คือความต่างศักย์หยุดยั้ง (Stopping Potential)

3.2.2 การกระเจิงคอมป์ตัน

การกระเจิงคอมป์ตัน (Compton Scattering) ในปี ค.ศ. 1923 อาร์เธอร์ คอมป์ตัน (Arthur H. Compton) พิสูจน์ว่าโฟตอนมีโมเมนตัม $p = \frac{h}{\lambda}$ ผ่านการทดลองยิงรังสีเอกซ์ชนกับอิเล็กตรอนอิสระ ความยาวคลื่นที่กระเจิงไปที่มุม θ จะมีความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นตามสมการ

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta) = \lambda_C(1 - \cos\theta) \tag{3.4}$$

โดยที่ $\lambda_C \approx 2.426 \times 10^{-12}$ m $= 0.02426$ Å เรียกว่า **ความยาวคลื่นคอมป์ตันของอิเล็กตรอน**



ภาพที่ 3.2 แผนภาพการกระเจิงคอมป์ตัน (Compton Scattering) แสดงการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัมของโฟตอนกับอิเล็กตรอน

3.3 ทวิภาวะคลื่นและอนุภาคและหลักความไม่แน่นอน

3.3.1 สมมติฐานเดอบรอยล์

สมมติฐานเดอบรอยล์ (de Broglie Hypothesis) ในปี ค.ศ. 1924 หลุยส์ เดอบรอยล์ (Louis de Broglie) เสนอว่า หากคลื่นแสงสามารถประพฤติตัวเป็นอนุภาค

ได้ อนุภาคของสสาร (เช่น อิเล็กตรอน) ก็ย่อมต้องแสดงสมบัติของคลื่นได้เช่นกัน โดยมีความยาวคลื่น

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\gamma m_0 v} \tag{3.5}$$

สมมติฐานนี้ได้รับการยืนยันอย่างชัดเจนโดยการทดลองการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของเดวิสสันและเกอร์เมอร์ (Davisson-Germer Experiment) ในปี ค.ศ. 1927

3.3.2 หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก

หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก (Heisenberg Uncertainty Principle) แวร์เนอร์ ไฮเซนเบิร์ก (Werner Heisenberg) พิสูจน์ในปี ค.ศ. 1927 ว่า ในระบบควอนตัม เป็นไปไม่ได้โดยหลักการที่จะวัดค่าของปริมาณคู่ควบ (Conjugate Variables) เช่น ตำแหน่งและโมเมนตัม พร้อมกันได้อย่างแม่นยำไร้ขีดจำกัด

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2} \tag{3.6}$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับความไม่แน่นอนของพลังงานและเวลา

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \tag{3.7}$$

3.4 สมการคลื่นชเรอดิงเงอร์และฟังก์ชันคลื่น

แอร์วิน ชเรอดิงเงอร์ (Erwin Schrödinger) เสนอสมการคลื่นเพื่ออธิบายสถานะของระบบควอนตัม ฟังก์ชันคลื่น $\Psi(\mathbf{r}, t)$ บรรจุข้อมูลทั้งหมดของระบบ สมการคลื่นชเรอดิงเงอร์ที่ไม่ขึ้นกับเวลาใน 1 มิติคือ

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + V(x)\psi(x) = E\psi(x) \tag{3.8}$$

โดยมักเขียนในรูปตัวดำเนินการฮามิลโทเนียน (Hamiltonian Operator)

$$\hat{H}\psi = E\psi, \quad \hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2}{dx^2} + V(x) \tag{3.9}$$

นิยามที่ 3.1 การแปลความหมายทางความน่าจะเป็นของมักซ์ บอร์น

ค่ามอดุลัสยกกำลังสองของฟังก์ชันคลื่น $|\psi(x)|^2 = \psi^*(x)\psi(x)$ แทน **ความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density)** ในการตรวจพบอนุภาค ณ บริเวณระหว่าง x ถึง $x + dx$

$$P(a \leq x \leq b) = \int_a^b |\psi(x)|^2 dx \tag{3.10}$$

และฟังก์ชันคลื่นที่ยอมรับได้ทางกายภาพต้องเป็นไปตามเงื่อนไขนอร์แมลไลซ์ (Normalization Condition)

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x)|^2 dx = 1 \tag{3.11}$$

3.5 อนุภาคในกล่องศักย์อนันต์ 1 มิติ

พิจารณาปัญหา**อนุภาคในกล่องศักย์อนันต์ 1 มิติ (Particle in a 1D Box)** ของอนุภาคมวล m ในบ่อศักย์ลึกอนันต์

$$V(x) = \begin{cases} 0 & 0 < x < L \\ \infty & \text{บริเวณอื่น} \end{cases} \tag{3.12}$$

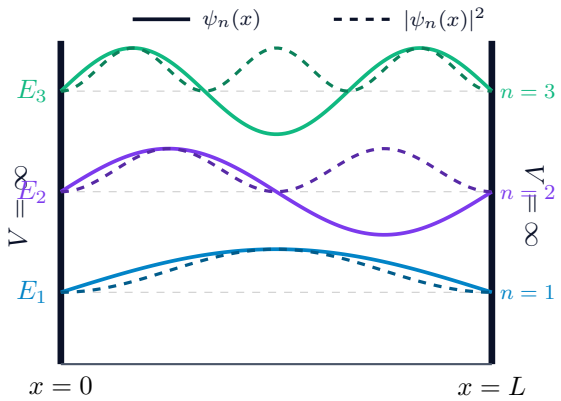
เนื่องจากฟังก์ชันคลื่นต้องเป็นศูนย์ที่ขอบกำแพง $\psi(0) = \psi(L) = 0$ คำตอบของสมการชเรอดิงเงอร์จึงเป็นฟังก์ชันไซน์นิ่ง

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right), \quad n = 1, 2, 3, \ldots \tag{3.13}$$

และระดับพลังงานของอนุภาคจะถูก **ควอนไทซ์ (Quantized)** เป็นค่าไม่ต่อเนื่อง

$$E_n = \frac{n^2\pi^2\hbar^2}{2mL^2} = \frac{n^2h^2}{8mL^2} \tag{3.14}$$

พลังงานต่ำสุดที่ $n = 1$ เรียกว่า **พลังงานสถานะพื้น (Ground State Energy หรือ Zero-Point Energy)** ซึ่งมีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ ($E_1 > 0$) สอดคล้องกับหลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก



ภาพที่ 3.3 ฟังก์ชันคลื่น $\psi_n(x)$ (เส้นทึบ) และความหนาแน่นความน่าจะเป็น $|\psi_n(x)|^2$ (เส้นประ) ของอนุภาคในกล่องศักย์อนันต์ 1 มิติ สำหรับ $n = 1, 2, 3$

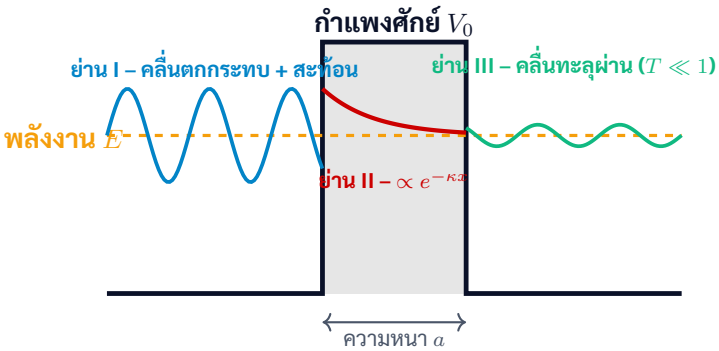
3.6 ปรากฏการณ์การทะลุผ่านกำแพงศักย์

ปรากฏการณ์การทะลุผ่านกำแพงศักย์ (Quantum Tunneling) ในฟิสิกส์ดั้งเดิม หากอนุภาคมีพลังงาน E น้อยกว่าความสูงของกำแพงศักย์ V_0 ($E < V_0$) อนุภาคจะไม่สามารถทะลุผ่านกำแพงไปได้เลย แต่ในกลศาสตร์ควอนตัม ฟังก์ชันคลื่นภายในกำแพง ($0 < x < a$) จะลดรูปเป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลสลายตัว $\psi(x) \propto e^{-\kappa x}$ โดยที่ $\kappa = \frac{\sqrt{2m(V_0-E)}}{\hbar}$

สัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน (Transmission Coefficient, T) โดยประมาณคือ

$$T \approx 16\frac{E}{V_0}\left(1-\frac{E}{V_0}\right)e^{-2\kappa a} \tag{3.15}$$

ปรากฏการณ์นี้เป็นพื้นฐานสำคัญของการสลายตัวให้อนุภาคแอลฟาในนิวเคลียส ฟิวชันในดาวฤกษ์ และกล้องจุลทรรศน์ส่องกราดแบบส่องผ่านอุโมงค์ (Scanning Tunneling Microscope, STM)



ภาพที่ 3.4 ปรากฏการณ์การทะลุผ่านกำแพงศักย์เชิงควอนตัม (Quantum Tunneling) แสดงการลดทอนของแอมพลิจูดคลื่น

3.7 สถาปัตยกรรม การ จำลอง เสมือน จริง AR/ XR แบบ จำลอง อะตอมและออร์บิทัล 3 มิติ

AR/ XR Interactive Simulation การ จำลอง กลุ่ม หมอก อิเล็กตรอน 3 มิติ และแบบจำลองอะตอมของบอร์ใน WebXR

วัตถุประสงค์การเรียนรู้ผ่าน AR

1. แสดงภาพพื้นผิวความน่าจะเป็นเท่ากัน (Isosurface Probability Density $|\psi_{nlm}(r,\theta,\phi)|^2$) ของออร์บิทัลอะตอมไฮโดรเจน ($1s, 2p, 3d, 4f$) ลอยหมุนได้ 360 องศา
2. ผู้เรียนสามารถใช้ระบบจับการเคลื่อนไหวมือ (Hand Tracking) ยืด-หดความกว้างของกล่องศักย์ L และสังเกตการบีบอัดของความยาวคลื่น λ_n และการขยับขึ้นของระดับพลังงาน E_n
3. การจำลองเวฟแพ็กเก็ต (Wavepacket) เคลื่อนที่ชนกำแพงศักย์ โดยแสดงการแบ่งแยกเป็นคลื่นสะท้อนและคลื่นทะลุผ่านแบบ Real-Time Shader
4. ทดลองเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน $n = 1, 2, 3$ ในแบบจำลองอะตอมของบอร์ผ่านสมาร์ตโฟน พร้อมสังเกตวงโคจรและการแผ่โฟตอนเสมือนจริง

ข้อกำหนดทางเทคนิค (Technical Specification)

- **Rendering Engine** Three.js Raymarching Volumetric Cloud Shader บน WebGL 2.0
- **Interaction** WebXR Hit-Test วางฐานจำลองบนโต๊ะเรียนจริง พร้อมการควบคุมด้วยท่าทาง MediaPipe
- **Acoustic Feedback** Web Audio API สังเคราะห์ความถี่เสียงตามค่าระดับพลังงาน E_n

bohr_atom_webxr.html – โค้ดต้นแบบจำลองอะตอมบอร์เสมือนจริงใน WebXR แบบสมบูรณ์

```html
<!DOCTYPE html>
<html lang="th">
<head>
    <meta charset="UTF-8">
    <title>WebXR Bohr Atom Simulator - Dr. Chewa Thassana</title>
    <script src="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/three.js/r128
        /three.min.js"></script>
    <style>
        body { margin: 0; overflow: hidden; font-family: 'Sarabun',
```

```
            sans-serif; }
        #ar-button {
            position: absolute; bottom: 20px; left: 50%;
            transform: translateX(-50%); padding: 12px 24px;
            background: #0284C7; color: white; border: none;
            border-radius: 8px; font-weight: bold; font-size: 16px;
        }
    </style>
</head>
<body>
    <button id="ar-button">เข้าสู่โหมดการทดลอง> AR</button>
    <script>
        let scene, camera, renderer, xrSession = null;
        let electron, nucleus, orbitLines = [];
        let currentLevel = 1;
        const scratchVec = new THREE.Vector3(); // Zero-GC scratchpad

        function initScene() {
            scene = new THREE.Scene();
            camera = new THREE.PerspectiveCamera(70, window.innerWidth/window.innerHeight, 0.01, 20);
            renderer = new THREE.WebGLRenderer({ antialias: true, alpha: true });
            renderer.setSize(window.innerWidth, window.innerHeight);
            renderer.xr.enabled = true;
            document.body.appendChild(renderer.domElement);

            // นิวเคลียสโปรตอน ()
            const nucGeo = new THREE.SphereGeometry(0.06, 32, 32);
            const nucMat = new THREE.MeshStandardMaterial({ color: 0xF59E0B, roughness: 0.2 });
            nucleus = new THREE.Mesh(nucGeo, nucMat);
            nucleus.position.set(0, 0, -1.0);
            scene.add(nucleus);

            // อิเล็กตรอน
            const elecGeo = new THREE.SphereGeometry(0.02, 16, 16);
            const elecMat = new THREE.MeshBasicMaterial({ color: 0x0284C7 });
            electron = new THREE.Mesh(elecGeo, elecMat);
            scene.add(electron);

            // แสงสว่างในฉาก
            const light = new THREE.PointLight(0xffffff, 1.5, 10);
            light.position.set(1, 2, 0);
            scene.add(light);
            scene.add(new THREE.AmbientLight(0x404040));
        }

        let angle = 0;
        function renderLoop(timestamp, frame) {
            angle += 0.03;
            const r = 0.3 * (currentLevel ** 2);
            electron.position.x = nucleus.position.x + r * Math.cos(
```

```
                angle);
            electron.position.z = nucleus.position.z + r * Math.sin(angle);
            electron.position.y = nucleus.position.y;
            renderer.render(scene, camera);
        }

        document.getElementById('ar-button').addEventListener('click', async () => {
            if (navigator.xr) {
                const session = await navigator.xr.requestSession('immersive-ar', {
                    requiredFeatures: ['local-floor']
                });
                renderer.xr.setSession(session);
                renderer.setAnimationLoop(renderLoop);
            } else {
                alert('อุปกรณ์ไม่รองรับ WebXR กรุณาใช้สมาร์ตโฟนที่รองรับ ARCore');
            }
        });

        initScene();
    </script>
</body>
</html>
```

3.8 การ คำนวณ เชิง ตัวเลข ด้วย Python Finite Difference Solver

quantum_well_solver.py – การหาค่าไอเกนของสมการชเรอดิงเงอร์ 1 มิติ

```
import numpy as np
import scipy.linalg as la

def solve_1d_schrodinger(N=500, L=1.0e-9, m=9.10938e-31):
    """แก้สมการชเรอดิงเงอร์
     1 มิติด้วยระเบียบวิธีผลต่างอันตะ (Finite Difference Method)
    N : จำนวนจุดกริด
    L : ความกว้างบ่อศักย์ (m)
    m : มวลอนุภาค (kg)
    """
    hbar = 1.0545718e-34
    eV = 1.6021766e-19

    x = np.linspace(0, L, N)
    dx = x[1] - x[0]

    # สัมประสิทธิ์อนุพันธ์อันดับสอง d^2/dx^2
    t0 = (hbar**2) / (2.0 * m * dx**2)
```

```python

    # สร้างเมทริกซ์ฮามิลโทเนียนไตรไดแอกอนอล (Tridiagonal Hamiltonian)
    H = np.zeros((N, N))
    for i in range(1, N-1):
        H[i, i] = 2.0 * t0
        H[i, i-1] = -1.0 * t0
        H[i, i+1] = -1.0 * t0

    # หาค่าไอเกนและเวกเตอร์ไอเกนสำหรับจุดภายใน
    eigenvalues, eigenvectors = la.eigh(H[1:-1, 1:-1])

    # แปลงพลังงานเป็นหน่วย eV
    E_eV = eigenvalues / eV

    print("=== Finite Difference Quantum Solver Results ===")
    for n in range(5):
        # คำนวณค่าทางทฤษฎี (Analytical)
        E_exact = ((n+1)**2 * np.pi**2 * hbar**2) / (2 * m * L**2) / eV
        diff = abs(E_eV[n] - E_exact) / E_exact * 100
        print(f"State n={n+1} | Numerical: {E_eV[n]:8.4f} eV | Exact: {E_exact:8.4f} eV | Error: {diff:5.3f}%")

solve_1d_schrodinger()
```

3.9 การเรียนรู้เชิงลึกในกลศาสตร์ควอนตัมและการจำลองอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนสปิน

3.9.1 โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับสถานะควอนตัม

การแก้สมการชเรอดิงเงอร์สำหรับระบบที่มีหลายอนุภาค (Many-Body Quantum Systems) เผชิญกับอุปสรรคสำคัญที่เรียกว่า "คำสาปแห่งมิติ (Curse of Dimensionality)" เนื่องจากขนาดของปริภูมิฮิลเบิร์ต (Hilbert Space) ขยายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามจำนวนอนุภาค การนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้เป็นฟังก์ชันคลื่นทดสอบเรียกว่า **Neural Network Quantum States (NQS)** ซึ่งบุกเบิกโดย Carleo และ Troyer (2017) โดยใช้ Restricted Boltzmann Machines (RBM) และต่อยอดสู่โครงข่ายประสาทลึกแบบเฟอร์มิออนิก เช่น **FermiNet** และ **PauliNet**

โครงข่ายเหล่านี้สามารถแทนฟังก์ชันคลื่นต้านสมมาตร (Antisymmetric Wavefunction) ของอิเล็กตรอนหลายตัวตามหลักการกีดกันของเพาลีได้อย่างแม่นยำ และใช้ระเบียบวิธีมอนติคาร์โลเชิงแปรผัน (Variational Monte Carlo: VMC) ในการปรับค่าน้ำหนักของโครงข่ายเพื่อหาพลังงานสถานะพื้น (Ground State Energy) ของโมเลกุลและของแข็งได้อย่างมีประสิทธิภาพเหนือกว่าระเบียบวิธีคลาสสิก

3.9.2 การคำนวณโครงสร้างควอนตัมและอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนแม่เหล็ก

ใน การ ศึกษา สมบัติ ทาง อิเล็กทรอนิกส์ และ แม่ เหล็ก ของ สารประกอบออกไซด์ ของ โลหะ แท รน ซิ ชัน (Transition Metal Oxides) เช่น MnO และ NiO ซึ่งอิเล็กตรอนในวงโคจร $3d$ มีแรงผลักคูลอมบ์เฉพาะที่สูงมาก ทฤษฎีฟังก์ชันความหนาแน่นดั้งเดิม (Standard DFT/LSDA) มักทำนายสมบัติผิดพลาดโดยระบุว่าสารเหล่านี้เป็นตัวนำโลหะ ทั้งที่ความเป็นจริงเป็นฉนวนแม่เหล็กไฟฟ้าขัดกัน (Antiferromagnetic Mott Insulators)

เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว ระเบียบวิธี **LSDA** $+ U$ จึงถูกนำมาใช้ โดยรวมผลของพลังงานคูลอมบ์เฉพาะที่ (On-site Coulomb Repulsion, U) และอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนสปิน (Exchange Interaction, J) เข้าสู่ฮามิลโทเนียน งานวิจัยของชีวะ ทัศนา และคณะ (Thassana et al., 2011, 2012) ได้ทำการคำนวณโครงสร้างแถบพลังงานควอนตัมและศึกษาผลกระทบของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน J และแรงผลักคูลอมบ์ U ต่อโมเมนต์แม่เหล็กของสปิน (Spin Magnetic Moment, μ_s) และโมเมนต์แม่เหล็กของออร์บิทัล (Orbital Magnetic Moment, μ_L) ในผลึก MnO และ NiO ภายใต้สภาวะปกติและการบีบอัดปริมาตร (Volume Compression)

ผลการวิจัยเชิงคำนวณดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ค่าคงตัวอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน J เป็นตัวกำหนดความเสถียรของการจัดเรียงตัวของสปินแบบแอนติเฟร์โรแมกเนติก และการบีบอัดโครงผลึกส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนประจุและการเปลี่ยนแปลงขนาดโมเมนต์แม่เหล็กอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งองค์ความรู้ด้านอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนควอนตัมนี้เป็นรากฐานโดยตรงต่อการออกแบบอุปกรณ์สปินทรอนิกส์ (Spintronics) และการสร้างสปินคิวบิตในคอมพิวเตอร์ควอนตัม

3.10 ตัวอย่างการแก้โจทย์เชิงวิเคราะห์ตามระเบียบวิธี P-S-C-T

ตัวอย่างที่ 3.1 พลังงานสถานะพื้นของอิเล็กตรอนในกล่องศักย์ขนาดอะตอม

โจทย์ (Problem)
อิเล็กตรอนตัวหนึ่งถูกกักขังให้อยู่ในกล่องศักย์ 1 มิติที่มีความกว้าง $L = 0.100$ nm (ขนาดระดับรัศมีอะตอมไฮโดรเจน)

1. จงคำนวณพลังงานในสถานะพื้น ($n = 1$) และสถานะถูกกระตุ้นแรก ($n = 2$) ในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ (eV)
2. หากอิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจาก $n = 2$ ลงสู่ $n = 1$ โฟตอนที่ปล่อยออกมาจะมีความยาวคลื่นเท่าใด และอยู่ในย่านสเปกตรัมใด?
3. จงหาความน่าจะเป็นที่จะตรวจพบอิเล็กตรอนในสถานะพื้นในช่วงกึ่งกลาง

กล่องระหว่าง $x = 0.49L$ ถึง $x = 0.51L$

ยุทธวิธี (Strategy)

- พลังงานระดับควอนไทซ์ $E_n = \frac{n^2h^2}{8m_eL^2}$
- ความยาวคลื่นของโฟตอนคำนวณจาก $\Delta E = E_2 - E_1 = \frac{hc}{\lambda} \implies \lambda = \frac{hc}{\Delta E}$
- ความน่าจะเป็น $P \approx |\psi_1(x_{\text{mid}})|^2 \Delta x$ เมื่อช่วง $\Delta x = 0.02L$ มีขนาดแคบมาก

การคำนวณ (Computation)

1. คำนวณพลังงาน E_1 และ E_2 กำหนดมวลอิเล็กตรอน $m_e = 9.109 \times 10^{-31}$ kg, $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J · s, $L = 1.00 \times 10^{-10}$ m

$$E_1 = \frac{(1)^2(6.626 \times 10^{-34})^2}{8(9.109 \times 10^{-31})(1.00 \times 10^{-10})^2} \approx \frac{4.390 \times 10^{-67}}{7.287 \times 10^{-50}} \approx 6.025 \times 10^{-18} \text{ J} \tag{3.16}$$

แปลงเป็นหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ (1 eV $= 1.602 \times 10^{-19}$ J)

$$E_1 = \frac{6.025 \times 10^{-18}}{1.602 \times 10^{-19}} \approx 37.61 \text{ eV} \tag{3.17}$$

สำหรับสถานะ $n = 2$

$$E_2 = 2^2 \times E_1 = 4 \times 37.61 \text{ eV} \approx 150.44 \text{ eV} \tag{3.18}$$

2. คำนวณความยาวคลื่นโฟตอน λ

$$\Delta E = E_2 - E_1 = 150.44 - 37.61 = 112.83 \text{ eV} = 1.808 \times 10^{-17} \text{ J} \tag{3.19}$$

$$\begin{aligned} \lambda = \frac{hc}{\Delta E} &= \frac{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})}{1.808 \times 10^{-17} \text{ J}} \\ &\approx 1.099 \times 10^{-8} \text{ m} \approx 11.0 \text{ nm} \end{aligned} \tag{3.20}$$

ซึ่งอยู่ในช่วง **รังสีอัลตราไวโอเลตสุญญากาศ (Extreme UV / Soft X-Ray)**

3. ความน่าจะเป็นในการพบอิเล็กตรอนกึ่งกลางกล่อง ฟังก์ชันคลื่นสถานะพื้นคือ $\psi_1(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right)$ ที่จุดกึ่งกลาง $x = 0.5L$

$$|\psi_1(0.5L)|^2 = \frac{2}{L} \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\right) = \frac{2}{L} \tag{3.21}$$

ช่วงกว้าง $\Delta x = 0.51L - 0.49L = 0.02L$

$$P \approx |\psi_1(0.5L)|^2 \Delta x = \left(\frac{2}{L}\right)(0.02L) = 0.04 = 4.0\% \tag{3.22}$$

ข้อคิดทางฟิสิกส์ (Takeaway)

แม้ว่าอิเล็กตรอนจะถูกจำกัดบริเวณในขอบเขตเล็กเพียง 0.1 nm แต่พลังงานต่ำสุดของมันมีค่าสูงถึง 37.6 eV ซึ่งเป็นผลลัพธ์โดยตรงจากสมบัติคลื่นของสสารและหลักความไม่แน่นอน หากระบบคลาสสิก พลังงานต่ำสุดย่อมสามารถเป็นศูนย์ได้ ■

ตัวอย่างที่ 3.2 ตัวแกว่งกวัดฮาร์มอนิกควอนตัมและพลังงานจุดศูนย์ (Quantum Harmonic Oscillator)

พิจารณาอิเล็กตรอนในบ่อศักย์ฮาร์มอนิก 1 มิติ $V(x) = \frac{1}{2}m\omega^2x^2$ โดยมีความถี่เชิงมุมของการแกว่ง $\omega = 1.0 \times 10^{15}$ rad/s

1. จงพิสูจน์โดยใช้หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$ ว่าพลังงานของสถานะต่ำสุดไม่สามารถเป็นศูนย์ได้ และประเมินค่าพลังงานต่ำสุดนี้

2. คำนวณพลังงานสถานะพื้น $E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega$ ในหน่วย eV และหาความยาวคลื่นของโฟตอนที่ถูกดูดกลืนเมื่ออิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจาก $n = 0$ ไปยัง $n = 1$

โจทย์ (Problem)

หาพลังงานสถานะต่ำสุดของตัวแกว่งกวัดควอนตัม และความยาวคลื่นของการเปลี่ยนระดับพลังงานระหว่างสองสถานะแรก

ยุทธวิธี (Strategy)

- พลังงานรวมของตัวแกว่งกวัดคือ $E = K + V = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2}m\omega^2x^2$
- จากหลักความไม่แน่นอน หากอนุภาคหยุดนิ่งที่จุดกึ่งกลาง ($x = 0, p = 0$) จะทำให้ $\Delta x = 0, \Delta p = 0$ ซึ่งละเมิด $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$ ดังนั้น $\Delta p \approx \frac{\hbar}{2\Delta x}$
- พลังงานประมาณการในรูปของ Δx

$$E(\Delta x) \approx \frac{\hbar^2}{8m(\Delta x)^2} + \frac{1}{2}m\omega^2(\Delta x)^2 \tag{3.23}$$

หาค่าต่ำสุดโดย $\frac{dE}{d(\Delta x)} = 0$

การคำนวณ (Computation)

1. อนุพันธ์เทียบกับ Δx เพื่อหาพลังงานต่ำสุด

$$\begin{aligned} \frac{dE}{d(\Delta x)} &= -\frac{\hbar^2}{4m(\Delta x)^3} + m\omega^2\Delta x = 0 \\ (\Delta x)^4 &= \frac{\hbar^2}{4m^2\omega^2} \implies (\Delta x)^2 = \frac{\hbar}{2m\omega} \end{aligned} \tag{3.24}$$

แทนค่า $(\Delta x)^2$ กลับเข้าสู่สมการพลังงาน

$$E_{\text{min}} \approx \frac{\hbar^2}{8m\left(\frac{\hbar}{2m\omega}\right)} + \frac{1}{2}m\omega^2\left(\frac{\hbar}{2m\omega}\right)$$

$$= \frac{1}{4}\hbar\omega + \frac{1}{4}\hbar\omega = \frac{1}{2}\hbar\omega \tag{3.25}$$

ซึ่งตรงกับพลังงานสถานะพื้นแท้จริง (Zero-Point Energy) ของสมการชเรอดิงเงอร์ $E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega$ ที่ $n = 0$

2. คำนวณค่าตัวเลขและสเปกตรัมการดูดกลืน

$$\begin{aligned} E_0 &= \frac{1}{2}\hbar\omega = \frac{1}{2}(1.0546 \times 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s})(1.0 \times 10^{15}\ \text{s}^{-1}) \\ &= 5.273 \times 10^{-20}\ \text{J} = \frac{5.273 \times 10^{-20}}{1.602 \times 10^{-19}}\ \text{eV} \approx 0.329\ \text{eV} \end{aligned} \tag{3.26}$$

ผลต่างพลังงานระหว่างสถานะ $n = 1$ และ $n = 0$ คือ

$$\begin{aligned} \Delta E = E_1 - E_0 &= \left(\frac{3}{2}\hbar\omega\right) - \left(\frac{1}{2}\hbar\omega\right) = \hbar\omega \\ &= 2E_0 \approx 0.658\ \text{eV} = 1.055 \times 10^{-19}\ \text{J} \end{aligned} \tag{3.27}$$

ความยาวคลื่นโฟตอน

$$\begin{aligned} \lambda = \frac{hc}{\Delta E} &= \frac{(6.626 \times 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s})(3.00 \times 10^{8}\ \text{m/s})}{1.055 \times 10^{-19}\ \text{J}} \\ &\approx 1.884 \times 10^{-6}\ \text{m} \approx 1.884\,\mu\text{m} \end{aligned} \tag{3.28}$$

ซึ่งอยู่ในช่วงรังสีอินฟราเรดใกล้ (Near-Infrared, NIR)

ข้อคิดทางฟิสิกส์ (Takeaway)

พลังงานจุดศูนย์ (Zero-Point Energy) $E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega$ ยืนยันว่าในอาณาจักรควอนตัม สสารไม่สามารถหยุดนิ่งสนิทได้อย่างแท้จริง แม้ที่อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ (0 K) ผลการแกว่งนี้ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์คาซิมีร์ (Casimir Effect) และการคงสถานะของเหลวของฮีเลียมเหลวภายใต้ความดันบรรยากาศ ■

3.11 สรุปสาระสำคัญประจำบท

ตารางที่ 3.1 สรุปความสัมพันธ์พื้นฐานในกลศาสตร์ควอนตัมเบื้องต้น

แนวคิดหลัก	สูตร/สมการ	ความสำคัญทางกายภาพ
ควอนตาพลังงานของพลังค์	$E = h\nu = \hbar\omega$	พลังงานถูกดูดกลืนและปลดปล่อยเป็นแพ็กเก็ตไม่ต่อเนื่อง
โฟโตอิเล็กทริก	$K_{\text{max}} = h\nu - \Phi$	หลักฐานยืนยันพฤติกรรมความเป็นอนุภาคของแสง (โฟตอน)
ความยาวคลื่นเดอบรอยล์	$\lambda = h/p$	ทวิภาวะคลื่น-อนุภาคของสสารทุกชนิด
หลักความไม่แน่นอน	$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$	ขีดจำกัดทางธรรมชาติของการวัดค่าควบคู่
สมการชเรอดิงเงอร์	$\hat{H}\psi = E\psi$	สมการพลวัตมูลฐานของการทำนายพฤติกรรมควอนตัม
พลังงานกล่องศักย์ 1D	$E_n = \frac{n^2h^2}{8mL^2}$	ผลเฉลยสถานะกักขังนำไปสู่ระดับพลังงานควอนไทซ์

3.12 แบบฝึกหัดท้ายบท

1. โฟตอนของรังสีเอกซ์พลังงาน 100 keV ชนกับอิเล็กตรอนอิสระและกระเจิงทำมุม 90° กับทิศเดิม จงคำนวณ
   (a) ความยาวคลื่นของโฟตอนก่อนและหลังการกระเจิง
   (b) พลังงานจลน์ที่ถ่ายทอดให้อิเล็กตรอนถอยร่น
2. อนุภาคฝุ่นมวล $1.0\,\mu$g เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1.0 mm/s จงคำนวณความยาวคลื่นเดอบรอยล์ และอธิบายว่าเหตุใดเราจึงไม่สังเกตเห็นสมบัติคลื่นของฝุ่นนี้ในชีวิตประจำวัน
3. สำหรับอนุภาคในกล่องศักย์อนันต์ 1 มิติ ในสถานะ $n = 3$ จงหาจุดที่มีโอกาสตรวจพบอนุภาคมากที่สุด และจุดที่โอกาสพบอนุภาคเป็นศูนย์ (Nodes)
4. อนุภาคพลังงาน $E = 2.0$ eV พุ่งชนกำแพงศักย์สี่เหลี่ยมผืนผ้าความสูง $V_0 = 5.0$ eV และความกว้าง $L = 0.50$ nm จงคำนวณสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านควอนตัม (Transmission Probability T) เมื่ออนุภาคคืออิเล็กตรอน ($m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg)
5. จงแสดงว่าฟังก์ชันคลื่นสถานะพื้นของตัวแกว่งกวัดฮาร์มอนิก $\psi_0(x) = Ae^{-\frac{m\omega}{2\hbar}x^2}$ สอดคล้องกับสมการชเรอดิงเงอร์ไม่อิงเวลา $\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2}{dx^2} + \frac{1}{2}m\omega^2x^2\right)\psi_0 = E_0\psi_0$ พร้อมทั้งหาค่าพลังงาน E_0 และพิสูจน์ว่าค่าคงตัวนอร์แมลไลซ์คือ $A = \left(\frac{m\omega}{\pi\hbar}\right)^{1/4}$

บทที่ 4

ฟิสิกส์อนุภาคและแบบจำลองมาตรฐาน

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 4

หัวข้อเนื้อหาประจำบท

1. อันตรกิริยามูลฐาน 4 แรงในธรรมชาติ
2. แบบจำลองมาตรฐาน
3. ฮาดรอนและโครงสร้างควาร์ก
4. แผนภาพไฟน์แมน
5. สถาปัตยกรรมการจำลองเสมือนจริง AR/XR 3D Hadron Structure
6. การคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Python Invariant Mass Reconstruction
7. ตัวอย่างการแก้โจทย์เชิงวิเคราะห์ตามระเบียบวิธี P-S-C-T
8. สรุปสาระสำคัญและแบบฝึกหัดท้ายบท

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. จำแนก อันตร กิริยา มูลฐาน ทั้ง 4 แรง ใน ธรรมชาติ และ อนุภาค สื่อ แรง (Gauge Bosons) ได้อย่างถูกต้อง

2. อธิบายองค์ประกอบของแบบจำลองมาตรฐาน ทั้งแฟร์มิออน (ควาร์กและเลปตอน) และโบซอนได้อย่างเป็นระบบ
3. วิเคราะห์กฎการอนุรักษ์ในปฏิกิริยาอนุภาค ได้แก่ ประจุไฟฟ้า เลขแบริออน เลขเลปตอน และสเตรนจ์เนสได้อย่างแม่นยำ
4. วาดและตีความแผนภาพไฟน์แมนสำหรับอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงนิวเคลียร์อย่างอ่อนได้อย่างถูกต้อง
5. อธิบายบทบาทของสนามฮิกส์ (Higgs Field) และกลไกการสร้างมวลแก่อนุภาคมูลฐานได้อย่างถูกต้อง
6. พัฒนาโปรแกรม ภาษา Python เพื่อคำนวณการอนุรักษ์ 4-โมเมนตัมและการสร้างมวลคงตัว (Invariant Mass Reconstruction) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิจกรรมการเรียนการสอน

1. การบรรยายเชิงทฤษฎีประกอบสื่อมัลติมีเดียเรื่องแบบจำลองมาตรฐานและอนุภาคมูลฐาน
2. กิจกรรมกลุ่มย่อยวิเคราะห์กฎการอนุรักษ์ในปฏิกิริยาการสลายตัวของอนุภาคและการวาดแผนภาพไฟน์แมน
3. ปฏิบัติการจำลองโครงสร้างควาร์ก 3 มิติ (3D Hadron Structure) บนแพลตฟอร์ม WebXR
4. ปฏิบัติการคอมพิวเตอร์เขียนโค้ด Python เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลการชนและการสร้างมวลคงตัว
5. การศึกษาและแก้โจทย์ปัญหาฟิสิกส์อนุภาคตามระเบียบวิธี P-S-C-T

สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารคำสอน บทที่ 4 ฟิสิกส์อนุภาคและแบบจำลองมาตรฐาน
2. สื่อจำลอง 3 มิติปฏิสัมพันธ์ WebXR 3D Hadron Structure Simulator
3. ชุดสคริปต์ภาษา Python คำนวณมวลคงตัวและจำลองการกระจายของฮิกส์โบซอน
4. แพลตฟอร์มการจัดการเรียนรู้ดิจิทัล (LMS) และชุดโจทย์แบบฝึกหัด P-S-C-T

การประเมินผล

1. การประเมินจากการตอบคำถามและการมีส่วนร่วมในกิจกรรมการเรียนรู้ในชั้นเรียน
2. การตรวจรายงานผลปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ด้วย Python และการวาดแผนภาพไฟน์แมน
3. การประเมินผลงานแบบฝึกหัดท้ายบทและการแก้โจทย์ P-S-C-T
4. การทดสอบย่อยวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนประจำบทที่ 4

4.1 อันตรกิริยามูลฐาน 4 แรงในธรรมชาติ

ในระดับมูลฐาน ปรากฏการณ์ทางกายภาพทั้งหมดในเอกภพถูกควบคุมด้วยอันตรกิริยา 4 แรงหลัก ได้แก่

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะของ 4 แรงมูลฐานในธรรมชาติ

อันตรกิริยา	ความแรงสัมพัทธ์	ระยะทำการ (Range)	อนุภาคสื่อแรง (Mediator)
แรงเข้ม (Strong)	1	$\approx 10^{-15}$ m	กลูออน (g, Gluon) 8 ชนิด
แม่เหล็กไฟฟ้า (EM)	10^{-2}	อนันต์ (∞)	โฟตอน (γ, Photon)
แรงอ่อน (Weak)	10^{-7}	$\approx 10^{-18}$ m	W^+, W^-, Z^0 Bosons
แรงโน้มถ่วง (Gravity)	10^{-39}	อนันต์ (∞)	กราวิตอน (G, Graviton - สมมติฐาน)

4.2 แบบจำลองมาตรฐาน

แบบจำลองมาตรฐาน (The Standard Model) คือทฤษฎีควอนตัมสนาม (Quantum Field Theory) ที่อธิบายอนุภาคพื้นฐานที่เป็นองค์ประกอบของสสารและแรงสื่อสาร (ยกเว้นแรงโน้มถ่วง) อนุภาคในแบบจำลองมาตรฐานแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ตามค่าสปิน ดังนี้

4.2.1 แฟร์มิออน

แฟร์มิออน สปิน $s = 1/2$ เป็นอนุภาคที่สร้างสสาร เป็นไปตามหลักการกีดกันของเพาลี (Pauli Exclusion Principle) แบ่งออกเป็น 3 ยุค (Generations) ดังนี้

- **ควาร์ก (Quarks)** มีประจุเศษส่วนและมีประจุสี (แดง เขียว น้ำเงิน) ประกอบด้วย
  - รุ่นที่ 1 ได้แก่ อัพ ($u, +2/3e$) และ ดาวน์ ($d, -1/3e$)
  - รุ่นที่ 2 ได้แก่ ชาร์ม ($c, +2/3e$) และ สเตรนจ์ ($s, -1/3e$)
  - รุ่นที่ 3 ได้แก่ ท็อป ($t, +2/3e$) และ บอตทอม ($b, -1/3e$)
- **เลปตอน (Leptons)** ไม่มีประจุสี ไม่ทำอันตรกิริยาอย่างเข้ม ประกอบด้วย
  - รุ่นที่ 1 ได้แก่ อิเล็กตรอน (e^-) และ อิเล็กตรอนนิวทริโน (ν_e)

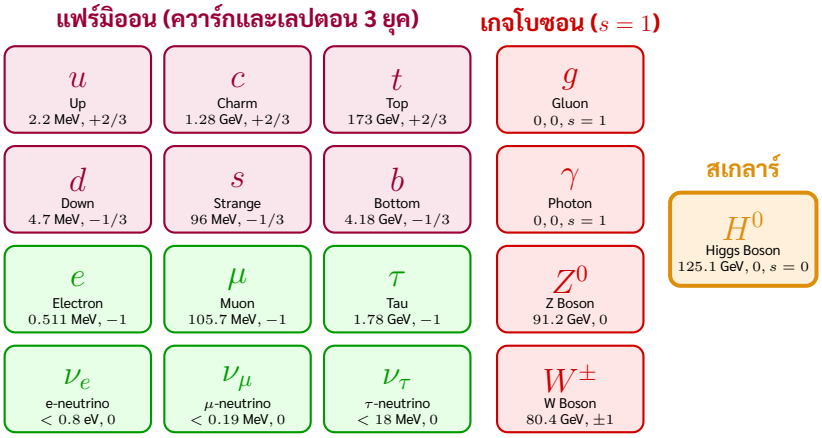
- รุ่นที่ 2 ได้แก่ มิวออน (μ^-) และ มิวออนนิวทริโน (ν_μ)
- รุ่นที่ 3 ได้แก่ ทาว (τ^-) และ ทาวน์นิวทริโน (ν_τ)

4.2.2 เกจโบซอน

เกจโบซอน สปิน $s = 1$ อนุภาคสื่อแรงตามสมมาตรเกจ $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ ได้แก่ โฟตอน (γ), กลูออน (g), โบซอนเวกเตอร์ $W^\pm$ และ Z^0

4.2.3 สเกลาร์โบซอน ฮิกส์โบซอน

ฮิกส์โบซอน สปิน $s = 0$ ค้นพบที่เซิร์น (CERN LHC) ในปี ค.ศ. 2012 มวลประมาณ 125.1 GeV$/c^2$ ทำหน้าที่ให้มวลแก่อนุภาคผ่านกลไกการทำลายสมมาตรทางไฟฟ้า-อ่อนอย่างเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Symmetry Breaking)



ภาพที่ 4.1 ผังจำแนกอนุภาคมูลฐานในแบบจำลองมาตรฐาน (The Standard Model Particle Grid)

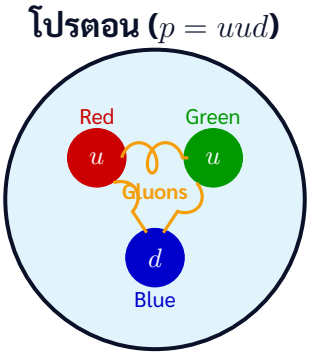
4.3 ฮาดรอนและโครงสร้างควาร์ก

ฮาดรอนและโครงสร้างควาร์ก เนื่องจากปรากฏการณ์ **การกักขังประจุสี (Color Confinement)** ในทฤษฎีควอนตัมโครโมไดนามิกส์ (QCD) ควาร์กเดี่ยวไม่สามารถปรากฏอยู่อย่างอิสระได้ ควาร์กจึงต้องรวมตัวกันเป็นกลุ่มที่ประจุสีรวมเป็นกลาง เรียกว่า **ฮาดรอน (Hadrons)** ดังนี้

1. **แบริออน (Baryons)** ประกอบด้วย 3 ควาร์ก (qqq) เช่น
   - โปรตอน (p) มีโครงสร้างควาร์กเป็น uud (ประจุรวม $= +2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$)

- นิวตรอน (n) มีโครงสร้างควาร์กเป็น udd (ประจุรวม $= +2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$)

2. **เมซอน (Mesons)** ประกอบด้วยควาร์กและแอนติควาร์ก ($q\bar{q}$) เช่น ไพออนบวก ($\pi^+ = u\bar{d}$)



ภาพที่ 4.2 แบบจำลองโครงสร้างควาร์กและกลูออนภายในโปรตอน แสดงสมดุลประจุสี (Color Neutrality)

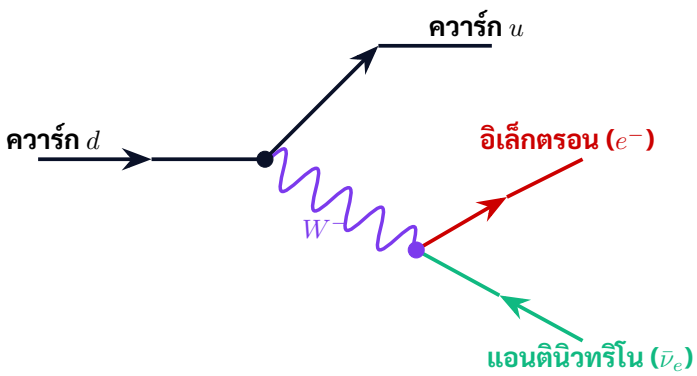
4.4 แผนภาพไฟน์แมน

แผนภาพไฟน์แมน (Feynman Diagrams) ริชาร์ด ไฟน์แมน (Richard P. Feynman) ได้ประดิษฐ์แผนภาพเชิงภาพที่ทรงอานุภาพเพื่อคำนวณแอมพลิจูดการกระเจิงของอนุภาคในทฤษฎีควอนตัมสนาม ตัวอย่างคลาสสิกคือ **การสลายตัวบีตาลบ (Beta-minus Decay)** ของนิวตรอนเป็นโปรตอน

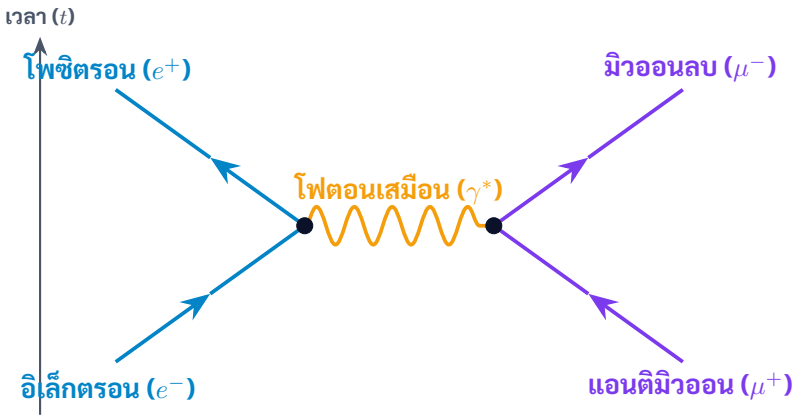
$$n \to p + e^- + \bar{\nu}_e \tag{4.1}$$

ในระดับควาร์ก ปฏิกิริยานี้คือควาร์กดาวน์เปลี่ยนเป็นควาร์กอัพผ่านการปลดปล่อยโบซอนเสมือน W^-

$$d \to u + W^- \to u + e^- + \bar{\nu}_e \tag{4.2}$$



ภาพที่ 4.3 แผนภาพไฟน์แมนแสดงการสลายตัวบีตาลบในระดับควาร์ก ($d \to u + W^- \to u + e^- + \bar{\nu}_e$)



ภาพที่ 4.4 แผนภาพไฟน์แมนแสดงการประลัยคู่อิเล็กตรอน-โพซิตรอนกลายเป็นคู่มิวออน ($e^- + e^+ \to \gamma^* \to \mu^- + \mu^+$)

4.5 สถาปัตยกรรมการจำลองเสมือนจริง AR/XR 3D Hadron Structure

AR/XR Interactive Simulation การจำลองโครงสร้าง 3D ควาร์ก-กลูออนและเครื่องเร่งอนุภาคชนกัน

วัตถุประสงค์การเรียนรู้ผ่าน AR

1. แสดงการจัดเรียงควาร์ก 3 มิติ ภายในโปรตอน นิวตรอน และไพออน พร้อมสนามพลังสี (Flux Tube / Color String) เชื่อมต่อกัน
2. เมื่อผู้เรียนใช้มือจำลองดึงควาร์กตัวหนึ่งออกจากกลุ่ม พลังงานศักย์ของเส้นแรงกลูออนจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง ($V(r) = \sigma r$) จนกระทั่งเกิดปรากฏการณ์ **String Breaking** กลายเป็นคู่ควาร์ก-แอนติควาร์กใหม่
3. การจำลองเหตุการณ์ชนกันของโปรตอนในเครื่องตรวจวัด ATLAS / CMS ที่ LHC พร้อมร่องรอยการกระจายตัวของอนุภาคในระบบพิกัดทรงกระบอก

4.6 การคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Python Invariant Mass Reconstruction

ในฟิสิกส์พลังงานสูง เมื่ออนุภาคที่ไม่เสถียร (เช่น ฮิกส์โบซอน H^0) สลายตัวอย่างรวดเร็วเป็นสองโฟตอน ($H^0 \to \gamma_1 + \gamma_2$) นักฟิสิกส์จะคำนวณ **มวลคงตัว (Invariant Mass, M)**

$$M^2c^4 = (E_1 + E_2)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2c^2 = 2E_1E_2(1 - \cos\theta) \tag{4.3}$$

invariant_mass_higgs.py – การวิเคราะห์สเปกตรัมมวลคงตัวของฮิกส์โบซอน

```python
import numpy as np

def simulate_higgs_reconstruction(num_events=100000):
    """จำลองการวัดมวลคงตัวจากการสลายตัวของฮิกส์โบซอนเป็น 2 โฟตอน
    M_Higgs = 125.1 GeV, การแจกแจงแบบ Breit-Wigner ร่วมกับ Gaussian Detector Resolution
    """
    np.random.seed(42)
    m_higgs_true = 125.1  # GeV/c^2
    gamma_width = 0.004   # ความกว้างธรรมชาติของฮิกส์ (GeV)
    resolution = 1.5      # ความคลาดเคลื่อนของเครื่องตรวจวัด (GeV)

    # สุ่มเหตุการณ์สัญญาณ (Signal Events)
    sig_mass = np.random.normal(m_higgs_true, resolution, int(num_events * 0.05))

    # สุ่มสัญญาณพื้นหลังแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Background Events)
    bg_mass = np.random.exponential(scale=35.0, size=int(num_events * 0.95)) + 100.0

    # รวมข้อมูลทั้งหมด
    total_data = np.concatenate([sig_mass, bg_mass])
    total_data = total_data[(total_data >= 110.0) & (total_data <= 140.0)]

    counts, bin_edges = np.histogram(total_data, bins=60, range=(110, 140))
    peak_bin = np.argmax(counts)
    peak_mass = 0.5 * (bin_edges[peak_bin] + bin_edges[peak_bin+1])

    print(f"=== Higgs Invariant Mass Analysis ===")
    print(f"Total detected events in [110, 140] GeV: {len(total_data)}")
    print(f"Reconstructed Peak Mass: {peak_mass:.2f} GeV/c^2 (Expected: 125.10 GeV/c^2)")

simulate_higgs_reconstruction()
```

4.7 การ เรียน รู้ เชิง ลึก ใน ฟิสิกส์ พลังงาน สูง และ การ จำแนก เหตุการณ์ของอนุภาค

ในการทดลองการชนกันของอนุภาคโปรตอนที่เครื่องเร่งอนุภาคขนาดใหญ่ LHC อัตราการชนกันของโปรตอนเกิดขึ้นสูงถึง 40 ล้านครั้งต่อวินาที (40 MHz) ก่อให้เกิดกระแสข้อมูลปริมาณมหาศาลระดับเพตาไบต์ต่อวินาที ซึ่งเกินขีดความสามารถที่ระบบบันทึก

ข้อมูลดั้งเดิมจะจัดเก็บได้ทั้งหมด การประยุกต์ใช้ **ปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning in HEP)** จึงกลายเป็นหัวใจสำคัญในการคัดกรองข้อมูลแบบเรียลไทม์ (Level-1 and High-Level Trigger Systems)

4.7.1 การจำแนกเจ็ตอนุภาคด้วยโครงข่ายคอนโวลูชัน

เมื่อ ค วาร์ ก และ กลู ออ นพ ลัง งาน สูง กระเด็น ออก จาก จุด ชน จะ เกิด กระบวนการฮาดรอนไนเซชัน (Hadronization) กลายเป็นกลุ่มละอองอนุภาคที่พุ่งเป็นลำ เรียกว่า **เจ็ต (Jet)** การแยกแยะว่าเจ็ตนั้นกำเนิดมาจากควาร์กบอตทอม (b-tagging) ควาร์กท็อป หรือกลูออน สามารถทำได้โดยแปลงพลังงานที่สะสมในเซลล์ของเครื่องตรวจวัดแคลอริมิเตอร์ (Calorimeter Towers) ให้กลายเป็นภาพ 2 มิติ (Calorimeter Images) จากนั้นใช้ **โครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Networks: CNNs)** ในการสกัดคุณลักษณะเชิงพื้นที่เพื่อจำแนกประเภทของเจ็ตด้วยความแม่นยำสูงกว่าการใช้ตัวแปรคลาสสิกอย่างมีนัยสำคัญ

4.7.2 โครงข่ายประสาทแบบกราฟสำหรับการติดตามรอยทาง

ข้อมูลรอยทางของอนุภาคที่มีประจุในอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ (Tracking Detectors) มีลักษณะเป็นจุดพิกัดใน 3 มิติที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเหมาะอย่างยิ่งกับการแทนด้วยโครงสร้างกราฟ (Graph Structure) โดยจุดตรวจวัด (Hits) ทำหน้าที่เป็นจุดยอด (Nodes) และรอยต่อของวิถีอนุภาคทำหน้าที่เป็นเส้นเชื่อม (Edges) การใช้ **โครงข่ายประสาทแบบกราฟ (Graph Neural Networks: GNNs)** ช่วยแก้ปัญหาการประกอบรอยทางของอนุภาค (Track Reconstruction) ท่ามกลางเหตุการณ์ซ้อนทับ (Pile-up Events) นับร้อยเหตุการณ์ในการชนรอบเดียวได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

4.8 ตัวอย่างการแก้โจทย์เชิงวิเคราะห์ตามระเบียบวิธี P-S-C-T

ตัวอย่างที่ 4.1 พลังงานปลดปล่อยในการสลายตัวของไพออนนิ่ง

โจทย์ (Problem)
ไพออนบวก (π^+) ขณะอยู่นิ่ง เกิดการสลายตัวผ่านอันตรกิริยาอย่างอ่อนเป็นมิวออนบวกและมิวออนนิวทริโน

$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu \tag{4.4}$$

กำหนดมวลนิ่ง $m_\pi = 139.57$ MeV$/c^2$, $m_\mu = 105.66$ MeV$/c^2$ และสมมติให้นิวทริโนไร้มวล ($m_\nu \approx 0$)

1. จงคำนวณโมเมนตัมของมิวออนและนิวทริโนที่เกิดขึ้น

2. จงหาพลังงานจลน์ของมิวออน

ยุทธวิธี (Strategy)

เนื่องจากไพออนตั้งต้นอยู่นิ่ง โมเมนตัมรวมตั้งต้นเป็นศูนย์

$$\mathbf{p}_\mu + \mathbf{p}_\nu = 0 \implies |\mathbf{p}_\mu| = |\mathbf{p}_\nu| = p \tag{4.5}$$

การอนุรักษ์พลังงานรวมสัมพัทธภาพ

$$E_\pi = m_\pi c^2 = E_\mu + E_\nu = \sqrt{(pc)^2 + (m_\mu c^2)^2} + pc \tag{4.6}$$

การคำนวณ (Computation)

จัดรูปสมการเพื่อหา pc

$$m_\pi c^2 - pc = \sqrt{(pc)^2 + (m_\mu c^2)^2} \tag{4.7}$$

$$(m_\pi c^2)^2 - 2(m_\pi c^2)(pc) + (pc)^2 = (pc)^2 + (m_\mu c^2)^2 \tag{4.8}$$

$$pc = \frac{(m_\pi c^2)^2 - (m_\mu c^2)^2}{2m_\pi c^2} \tag{4.9}$$

แทนค่าตัวเลขในหน่วย MeV

$$\begin{aligned} pc &= \frac{(139.57)^2 - (105.66)^2}{2(139.57)} = \frac{19479.78 - 11164.04}{279.14} \\ &= \frac{8315.74}{279.14} \approx 29.79 \text{ MeV} \end{aligned} \tag{4.10}$$

ดังนั้น โมเมนตัมของทั้งสองอนุภาคคือ $p \approx 29.79$ MeV$/c$
พลังงานรวมของมิวออนคือ

$$\begin{aligned} E_\mu &= \sqrt{(pc)^2 + (m_\mu c^2)^2} = \sqrt{(29.79)^2 + (105.66)^2} \\ &\approx \sqrt{887.44 + 11164.04} \approx 109.78 \text{ MeV} \end{aligned} \tag{4.11}$$

พลังงานจลน์ของมิวออนคำนวณจาก

$$K_\mu = E_\mu - m_\mu c^2 = 109.78 - 105.66 = 4.12 \text{ MeV} \tag{4.12}$$

ข้อคิดทางฟิสิกส์ (Takeaway)

พลังงานปลดปล่อยทั้งหมดของปฏิกิริยานี้คือ $Q = (m_\pi - m_\mu)c^2 \approx 33.91$ MeV ทว่ามิวออนได้รับพลังงานจลน์ไปเพียง 4.12 MeV เท่านั้น พลังงานส่วนใหญ่ถึง 29.79 MeV (คิดเป็น 88%) ถูกถ่ายทอดไปให้นิวทริโนที่ไร้มวล นี่คือลักษณะเฉพาะของการอนุรักษ์โมเมนตัมในระบบอนุภาคสัมพัทธภาพ ■

ตัวอย่างที่ 4.2 การสลายตัวของอนุภาคฮิกส์โบซอนและมวลไม่แปรเปลี่ยน

ที่เครื่องชนอนุภาคขนาดใหญ่ LHC ที่เซิร์น (CERN) อนุภาคฮิกส์โบซอน H^0 ที่ถูกสร้างขึ้นจากการชนของโปรตอน สามารถสลายตัวไปเป็นโฟตอนพลังงานสูง 2 อนุภาคตามปฏิกิริยา

$$H^0 \to \gamma_1 + \gamma_2 \tag{4.13}$$

เครื่องตรวจวัดอนุภาคคาโลริมิเตอร์ (Calorimeter) ตรวจวัดพลังงานของโฟตอนทั้งสองได้ $E_1 = 70.0$ GeV และ $E_2 = 56.5$ GeV โดยแนวการเคลื่อนที่ของโฟตอนทั้งสองทำมุมเปิดต่อกัน $\theta = 150.0°$

1. จงพิสูจน์ความสัมพันธ์ของมวลไม่แปรเปลี่ยน (Invariant Mass) ของระบบโฟตอนคู่

$$M_{\gamma\gamma}c^2 = \sqrt{2E_1E_2(1-\cos\theta)} \tag{4.14}$$

2. คำนวณมวลไม่แปรเปลี่ยน $M_{\gamma\gamma}c^2$ ในหน่วย GeV และเปรียบเทียบกับมวลของอนุภาคฮิกส์ที่วัดได้ในระดับสากล (125.1 GeV$/c^2$)

โจทย์ (Problem)

คำนวณมวลนิ่งของอนุภาคแม่ที่สลายตัวจากพลังงานและมุมเปิดของโฟตอนลูกสองอนุภาค

ยุทธวิธี (Strategy)

- โฟตอนเป็นอนุภาคไร้มวล มี $m_\gamma = 0$ ดังนั้น $E_i = p_i c$ เวกเตอร์ 4-โมเมนตัมของโฟตอนแต่ละตัวคือ $P_i = (E_i/c, \mathbf{p}_i)$ โดยที่ $P_i^2 = (E_i/c)^2 - |\mathbf{p}_i|^2 = 0$
- 4-โมเมนตัมรวมของระบบโฟตอนคู่คือ $P_{\text{tot}} = P_1 + P_2$
- มวลไม่แปรเปลี่ยนคำนวณจากสเกลาร์ลอเรนซ์ $P_{\text{tot}}^2 = M_{\gamma\gamma}^2 c^2$

$$P_{\text{tot}}^2 = (P_1+P_2)^2 = P_1^2 + P_2^2 + 2P_1\cdot P_2 = 0+0+2\left(\frac{E_1E_2}{c^2} - \mathbf{p}_1\cdot\mathbf{p}_2\right) \tag{4.15}$$

- เนื่องจาก $\mathbf{p}_1\cdot\mathbf{p}_2 = |\mathbf{p}_1||\mathbf{p}_2|\cos\theta = \left(\frac{E_1}{c}\right)\left(\frac{E_2}{c}\right)\cos\theta$

การคำนวณ (Computation)

1. พิสูจน์สูตรมวลไม่แปรเปลี่ยน

$$M_{\gamma\gamma}^2c^2 = 2\left[\frac{E_1E_2}{c^2} - \frac{E_1E_2}{c^2}\cos\theta\right] = \frac{2E_1E_2}{c^2}(1-\cos\theta)$$

$$M_{\gamma\gamma}c^2 = \sqrt{2E_1E_2(1-\cos\theta)} \tag{4.16}$$

2. แทนค่าตัวเลข

$$\begin{aligned} \cos(150.0^\circ) &= -\frac{\sqrt{3}}{2} \approx -0.8660 \\ 1 - \cos(150.0^\circ) &= 1 - (-0.8660) = 1.8660 \end{aligned} \tag{4.17}$$

คำนวณมวล

$$\begin{aligned} M_{\gamma\gamma}c^2 &= \sqrt{2 \times (70.0\ \text{GeV}) \times (56.5\ \text{GeV}) \times 1.8660} \\ &= \sqrt{2 \times 3955 \times 1.8660} = \sqrt{14760.06} \approx 121.5\ \text{GeV} \end{aligned} \tag{4.18}$$

ซึ่งสอดคล้องกับพีคมวลของอนุภาคฮิกส์โบซอน (Higgs Boson Resonance Peak) ที่มีค่าเฉลี่ยประมาณ 125.1 GeV$/c^2$ ภายในขอบเขตความคลาดเคลื่อนเชิงสถิติของการทดลอง ATLAS และ CMS

ข้อคิดทางฟิสิกส์ (Takeaway)

อนุภาคฮิกส์โบซอนมีอายุขัยสั้นมากเพียง 1.6×10^{-22} s จึงไม่สามารถตรวจวัดรอยทาง (Track) ของมันได้โดยตรง แต่นักฟิสิกส์อนุภาคค้นพบมันได้จากการพล็อตกราฟการแจกแจงมวลไม่แปรเปลี่ยน $M_{\gamma\gamma}$ ของโฟตอนคู่จำนวนนับล้านคู่ แล้วมองหา "ยอดพีคส่วนเกิน (Bump/Resonance)" เหนือระดับสัญญาณพื้นหลัง (Background) ■

ตัวอย่างที่ 4.3 การแปลงพิกัดและวางแท่นตรวจวัดอนุภาคด้วย WebXR Hit-Test (WebXR Spatial Reticle Transformation)

ในเซสชัน WebXR Augmented Reality การวางแบบจำลองเครื่องตรวจวัดอนุภาคหรือแบบจำลองฮาดรอน 3 มิติลงบนโต๊ะทดลองในโลกจริง อาศัยระบบตรวจจับระนาบพื้นผิวด้วยลำรังสีเสมือน (XR Hit-Testing) ซึ่งระบบจะส่งเมทริกซ์การแปลงพิกัดขนาด 4×4 แบบ Column-Major

$$\mathbf{M}_{\text{hit}} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.19}$$

กำหนดให้เวกเตอร์ตำแหน่งของกล้องบนแว่น AR หรือสมาร์ตโฟนคือ $\mathbf{p}_{\text{cam}} = (0.00, 1.60, 0.00)$ m และทิศทางการมอง (Gaze Unit Vector) ของผู้สังเกตคือ $\hat{\mathbf{v}} = (0.60, -0.30, -0.7416)$

1. จงอธิบายระเบียบวิธีสลายเมทริกซ์ (Matrix Decomposition) ใน Three.js เพื่อแยกเวกเตอร์ตำแหน่ง **t**, ควอเทอร์เนียนการหมุน **q**, และสเกล **s**

2. หากลำรังสีการมองกระทบระนาบโต๊ะทดลองที่ระยะห่างเชิงเส้นตามแนว

สายตา $d = 1.80$ m จงคำนวณเวกเตอร์พิกัด 3 มิติ $\mathbf{p}_{\text{hit}}$ ในระบบอ้างอิงของโลกเสมือน (World Coordinates) ที่ต้องนำโมเดลเครื่องตรวจวัดไปวาง

โจทย์ (Problem)
คำนวณตำแหน่ง 3 มิติในโลกจริงที่เส้นสายตาตัดกับระนาบโต๊ะทดลองเพื่อปักหมุดวัตถุเสมือนใน WebXR
ยุทธวิธี (Strategy)

- ตำแหน่งตกกระทบของการยิงรังสี (Ray Casting) คำนวณจากสมการเส้นตรงพาราเมตริก

$$\mathbf{p}_{\text{hit}} = \mathbf{p}_{\text{cam}} + d\hat{\mathbf{v}} \tag{4.20}$$

- ตรวจสอบว่า $\hat{\mathbf{v}}$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย $|\hat{\mathbf{v}}|^2 = (0.60)^2 + (-0.30)^2 + (-0.7416)^2 \approx 0.36 + 0.09 + 0.55 = 1.00$
- ใน Three.js การ อัปเดต ตำแหน่ง ของ Mesh ทำได้ โดยตรง ผ่าน เมธอด mesh.position.copy(pHit) หรือใช้ mesh.matrix.fromArray(hitPoseMatrix)

การคำนวณ (Computation)
1. คำนวณพิกัดแต่ละแกน

$$\begin{aligned} x_{\text{hit}} &= x_{\text{cam}} + dv_x = 0.00 + (1.80\ \text{m})(0.60) = +1.08\ \text{m} \\ y_{\text{hit}} &= y_{\text{cam}} + dv_y = 1.60 + (1.80\ \text{m})(-0.30) = 1.60 - 0.54 = +1.06\ \text{m} \\ z_{\text{hit}} &= z_{\text{cam}} + dv_z = 0.00 + (1.80\ \text{m})(-0.7416) \approx -1.335\ \text{m} \end{aligned} \tag{4.21}$$

ดังนั้น เวกเตอร์ตำแหน่งที่ตกกระทบคือ

$$\mathbf{p}_{\text{hit}} = (1.08, 1.06, -1.335)\ \text{m} \tag{4.22}$$

2. การ จัด วาง ระนาบ สัมผัส (Surface Normal Alignment) ความ สูง $y_{\text{hit}} = 1.06$ m สอดคล้องกับความสูงระดับโต๊ะทดลองมาตรฐาน (ประมาณ 1.0 m จากพื้นห้อง) เมทริกซ์การหมุนจะปรับเวกเตอร์แนวฉากของเป้าเล็ง (Reticle) ให้ขนานกับเวกเตอร์แนวฉากของพื้นผิวโต๊ะ $\hat{\mathbf{n}} = (0, 1, 0)$ โดยอัตโนมัติ
ข้อคิดทางฟิสิกส์และวิศวกรรม (Takeaway)
การคำนวณพิกัดสัมบูรณ์ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน 3 มิติช่วยให้นักศึกษาฟิสิกส์สามารถเชื่อมโยงแนวคิดคณิตศาสตร์เวกเตอร์และเมทริกซ์เข้ากับการทำงานจริงของฮาร์ดแวร์เซนเซอร์ LiDAR และกล้อง Stereo Tracking ในอุปกรณ์ AR ได้อย่างเป็นรูปธรรม ■

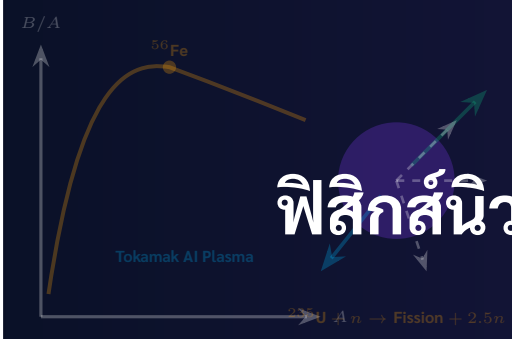
4.9 สรุปสาระสำคัญประจำบท

ตารางที่ 4.2 สรุปโครงสร้างอนุภาคมูลฐานในแบบจำลองมาตรฐาน

กลุ่มอนุภาค	สมาชิกหลัก	คุณลักษณะทางฟิสิกส์
ควาร์ก (Quarks)	u, d, c, s, t, b	มีประจุไฟฟ้าเศษส่วนและประจุสี ทำอันตรกิริยาอย่างเข้ม
เลปตอน (Leptons)	$e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$	ไม่มีประจุสี ทำอันตรกิริยาไฟฟ้าและอย่างอ่อน
เกจโบซอน	$\gamma, g, W^\pm, Z^0$	อนุภาคสื่อแรงสปิน 1 ตามทฤษฎีเกจ
ฮิกส์โบซอน	H^0	อนุภาคสเกลาร์สปิน 0 ให้มวลแก่อนุภาค
มวลคงตัว	$M^2c^4 = (\sum E_i)^2 - (\sum \mathbf{p}_i)^2c^2$	เครื่องมือสร้างอนุภาคที่สลายตัวอย่างรวดเร็ว

4.10 แบบฝึกหัดท้ายบท

1. จงระบุว่าปฏิกิริยาอนุภาคต่อไปนี้สามารถเกิดขึ้นได้หรือไม่ หากเกิดไม่ได้ให้ระบุกฎการอนุรักษ์ที่ถูกละเมิด
   (a) $p \to e^+ + \pi^0$
   (b) $\pi^- + p \to K^0 + \Lambda^0$
   (c) $\mu^- \to e^- + \gamma$
2. จงเขียนโครงสร้างควาร์กของอนุภาคแอนติโปรตอน ($\bar{p}$) และแอนตินิวตรอน ($\bar{n}$) พร้อมตรวจสอบประจุไฟฟ้ารวม
3. ในการสลายตัวของ Z^0 โบซอนที่อยู่นิ่งเป็นคู่อิเล็กตรอน-โพซิตรอน ($Z^0 \to e^- + e^+$) จงคำนวณพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน (กำหนด $M_Z \approx 91.19$ GeV$/c^2$)
4. อนุภาคแลมบ์ดา (Λ^0) สลายตัวผ่านอันตรกิริยาอย่างอ่อนตามปฏิกิริยา $\Lambda^0 \to p + \pi^-$ จงวิเคราะห์การอนุรักษ์ประจุไฟฟ้า เลขแบริออน เลขเลปตอน สปิน และเลขสเตรนจ์เนส (ΔS) พร้อมอธิบายว่าเหตุใด $\Delta S = 1$ จึงยอมรับได้ในอันตรกิริยานี้
5. จงร่างแผนภาพไฟน์แมน (Feynman Diagram) ในระดับควาร์กสำหรับการสลายตัวบีตาลบของนิวตรอน $n \to p + e^- + \bar{\nu}_e$ โดยระบุบทบาทของเกจโบซอน W^- และการเปลี่ยนเฟลเวอร์ของควาร์ก ($d \to u$) อย่างละเอียด



บทที่ 5

ฟิสิกส์นิวเคลียร์และปฏิกิริยานิวเคลียร์

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 5

หัวข้อเนื้อหาประจำบท

1. สมบัติของนิวเคลียสและพลังงานยึดเหนี่ยว
2. แบบจำลองหยดของเหลวและสูตรมวลไวซ์แซคเกอร์
3. กัมมันตภาพรังสีและสมการลูกโซ่ของเบตแมน
4. ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันและฟิวชัน
5. สถาปัตยกรรมการจำลองเสมือนจริง AR/XR Nuclear Chain Reaction Simulator
6. การคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Python Bateman Decay Chain Solver
7. ตัวอย่างการแก้โจทย์เชิงวิเคราะห์ตามระเบียบวิธี P-S-C-T
8. สรุปสาระสำคัญและแบบฝึกหัดท้ายบท

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. อธิบายองค์ประกอบของนิวเคลียส คำนวณมวลบกพร่อง และพลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียสได้อย่างถูกต้อง

2. วิเคราะห์ กราฟ พลังงาน ยึด เหนี่ยว ต่อ นิว คลี ออน (B/A) และ อธิบาย เสถียรภาพของนิวเคลียสได้อย่างแม่นยำ
3. คำนวณมวลและพลังงานยึดเหนี่ยวด้วยสูตรมวลกึ่งเชิงประจักษ์ของไวซ์แซคเกอร์ได้อย่างเป็นระบบ
4. จำแนกกลไกการสลายตัวของกัมมันตรังสีชนิดแอลฟา บีตา และแกมมาได้อย่างถูกต้อง
5. แก้สมการการสลายตัวลูกโซ่กัมมันตรังสีของเบตแมนด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขใน Python ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
6. อธิบาย เงื่อนไข วิกฤต ของ ปฏิกิริยา ลูก โซ่ ฟิช ชัน และ สภา วะ ฟิว ชัน ตามเกณฑ์ของลอว์สันได้อย่างถูกต้อง

กิจกรรมการเรียนการสอน

1. การ บรรยาย เชิง ทฤษฎี ประกอบ การ อภิปราย เรื่อง พลังงาน ยึด เหนี่ยว นิวเคลียสและแบบจำลองหยดของเหลว
2. กิจกรรมกลุ่มย่อยวิเคราะห์ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันและฟิวชัน และเกณฑ์ความเสถียรของนิวเคลียส
3. ปฏิบัติ การ จำลอง สถานการณ์ ปฏิกิริยา ลูกโซ่ นิวเคลียร์ Nuclear Chain Reaction Simulator ในระบบ WebXR
4. ปฏิบัติการคอมพิวเตอร์เขียนโปรแกรม Python แก้สมการอนุพันธ์ลูกโซ่การสลายตัวของเบตแมน
5. การศึกษาและแก้โจทย์ปัญหาฟิสิกส์นิวเคลียร์ตามระเบียบวิธี P-S-C-T

สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารคำสอน บทที่ 5 ฟิสิกส์นิวเคลียร์และปฏิกิริยานิวเคลียร์
2. สื่อจำลอง 3 มิติปฏิสัมพันธ์ WebXR Nuclear Chain Reaction Simulator
3. ชุดสคริปต์ภาษา Python (SciPy solve_ivp) จำลองการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีลูกโซ่
4. แพลตฟอร์มการจัดการเรียนรู้ดิจิทัล (LMS) และชุดโจทย์แบบฝึกหัด P-S-C-T

การประเมินผล

1. การประเมินจากการตอบคำถามและการมีส่วนร่วมในกิจกรรมการเรียนรู้ในชั้นเรียน

2. การตรวจรายงานผลปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ด้วย Python และแบบฝึกหัดท้ายบท
3. การประเมินผลการทดลองจำลองสถานการณ์เสมือนจริงใน WebXR
4. การทดสอบย่อยวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนประจำบทที่ 5

5.1 สมบัติของนิวเคลียสและพลังงานยึดเหนี่ยว

นิวเคลียสอะตอมประกอบด้วยโปรตอน Z ตัว และนิวตรอน N ตัว รวมกันเป็นเลขมวล $A = Z + N$ รัศมีของนิวเคลียสโดยประมาณคือ

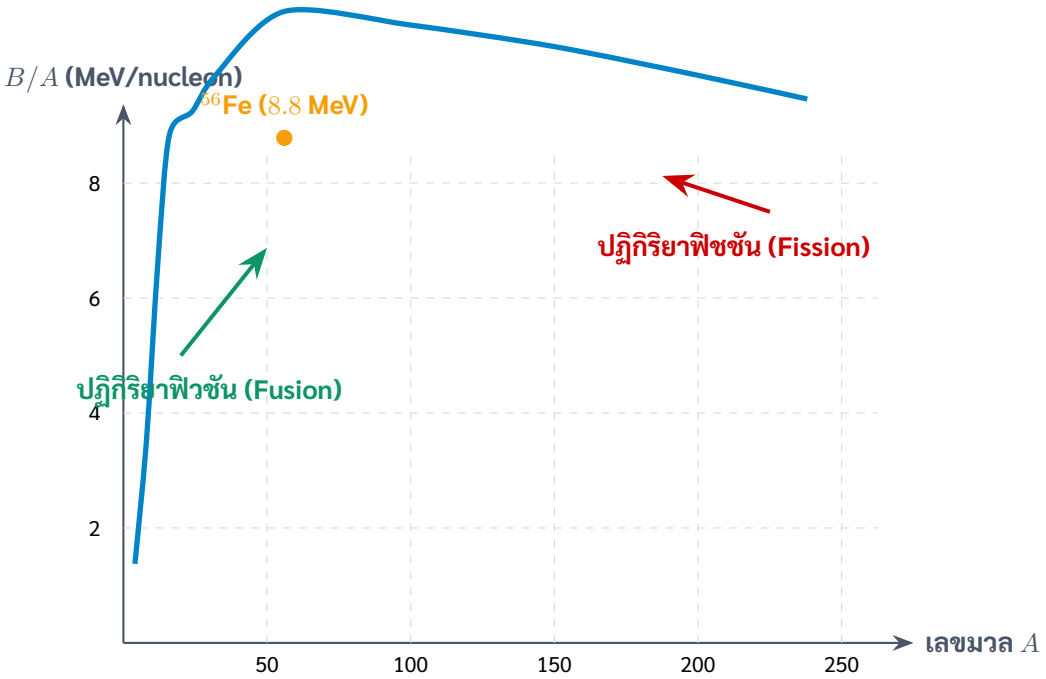
$$R \approx R_0 A^{1/3}, \quad R_0 \approx 1.2\ \text{fm} = 1.2 \times 10^{-15}\ \text{m} \tag{5.1}$$

เมื่อนิวคลีออนอิสระมารวมตัวกันเป็นนิวเคลียส มวลของนิวเคลียส $M(A, Z)$ จะน้อยกว่าผลรวมมวลของนิวคลีออนเดี่ยวเสมอ ผลต่างนี้เรียกว่า **มวลบกพร่อง (Mass Defect, Δm)**

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - M(A, Z) \tag{5.2}$$

พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาในกระบวนการรวมตัวนี้เรียกว่า **พลังงานยึดเหนี่ยว (Binding Energy, B)**

$$B = \Delta m \cdot c^2 = [Zm_p + (A - Z)m_n - M(A, Z)]\, c^2 \tag{5.3}$$



ภาพที่ 5.1 กราฟพลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียสต่อนิวคลีออน (B/A) แสดงความเสถียรสูงสุดที่เหล็ก-56

5.2 แบบจำลองหยดของเหลวและสูตรมวลไวซ์แซคเกอร์

แบบจำลองหยดของเหลวและสูตรมวลไวซ์แซคเกอร์ (Semi-Empirical Mass Formula, SEMF) เสนอโดย คาร์ล ฟรีดริช ฟอน ไวซ์แซคเกอร์ (Carl Friedrich von

Weizsäcker) โดยมองนิวเคลียสเสมือนหยดของเหลวที่มีแรงตึงผิวและประจุไฟฟ้า

$$B(A,Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_a \frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta(A,Z) \tag{5.4}$$

โดยที่ค่าคงที่จากการทดลองโดยประมาณคือ

- $a_v \approx 15.8$ MeV (พจน์ปริมาตร)
- $a_s \approx 18.3$ MeV (พจน์พื้นที่ผิว)
- $a_c \approx 0.714$ MeV (พจน์แรงผลักคูลอมบ์)
- $a_a \approx 23.2$ MeV (พจน์อสมมาตร)
- $\delta(A,Z)$ คือพจน์การจับคู่ (Pairing Term) มีค่าเป็น $+a_p A^{-1/2}$ สำหรับคู่-คู่, 0 สำหรับคี่-คู่, และ $-a_p A^{-1/2}$ สำหรับคี่-คี่

5.3 กัมมันตภาพรังสีและสมการลูกโซ่ของเบตแมน

กัมมันตภาพรังสีและสมการลูกโซ่ของเบตแมน (Bateman Equations) กฎการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีชนิดเดียวคือ

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 2^{-t/t_{1/2}} \tag{5.5}$$

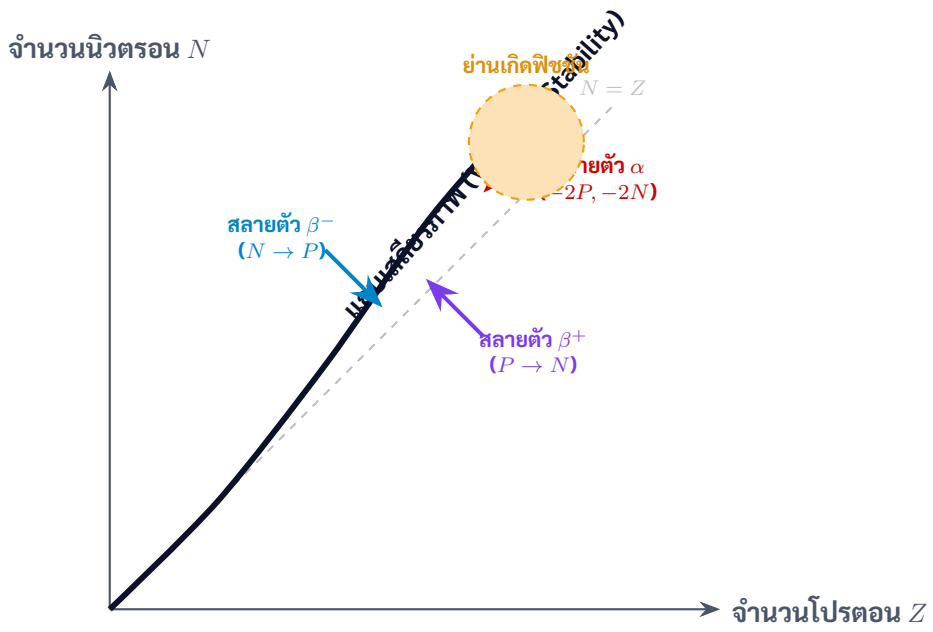
โดยที่ $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$ คือค่าคงตัวการสลายตัว (Decay Constant)

ในกรณีการสลายตัวต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ ($N_1 \xrightarrow{\lambda_1} N_2 \xrightarrow{\lambda_2} N_3 \xrightarrow{\lambda_3} \dots$)

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1, \quad \frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2, \quad \frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \tag{5.6}$$

แฮร์รี เบตแมน (Harry Bateman) ได้แก้สมการเชิงอนุพันธ์นี้ในรูปผลเฉลยแม่นตรง

$$N_n(t) = \sum_{i=1}^{n} c_i e^{-\lambda_i t}, \quad c_i = N_1(0) \left[\prod_{j=1}^{n-1} \lambda_j\right] \prod_{j=1, j\neq i}^{n} \frac{1}{\lambda_j - \lambda_i} \tag{5.7}$$



ภาพที่ 5.2 แผนผังนิวไคลด์ของเซเกร (Segrè Chart) แสดงแถบเสถียรภาพและทิศทางการสลายตัวกัมมันตรังสี

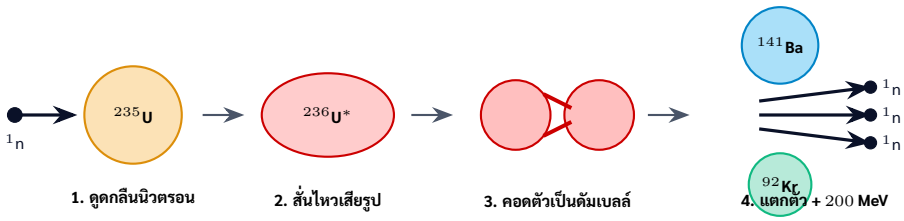
5.4 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันและฟิวชัน

5.4.1 นิวเคลียร์ฟิชชัน

นิวเคลียร์ฟิชชัน (Nuclear Fission) เมื่อยูเรเนียม-235 จับนิวตรอนช้า (Thermal Neutron) จะเกิดการแตกตัวให้นิวเคลียสขนาดกลางและนิวตรอนความเร็วสูง 2–3 ตัว เช่น

$$^{235}_{92}\text{U} + ^{1}_{0}\text{n} \rightarrow ^{236}_{92}\text{U}^* \rightarrow ^{141}_{56}\text{Ba} + ^{92}_{36}\text{Kr} + 3^{1}_{0}\text{n} + Q \tag{5.8}$$

พลังงานปลดปล่อย $Q \approx 200$ MeV ต่อการฟิชชันหนึ่งครั้ง



ภาพที่ 5.3 ขั้นตอนการแตกตัวของนิวเคลียสในปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันตามแบบจำลองหยดของเหลว (Liquid Drop Model)

5.4.2 นิวเคลียร์ฟิวชัน

นิวเคลียร์ฟิวชัน (Nuclear Fusion) ปฏิกิริยารวมตัวของนิวเคลียสเบา เช่น วงจรดิวเทอเรียม-ทริเทียม (D-T)

$$^{2}_{1}\text{H} + ^{3}_{1}\text{H} \rightarrow ^{4}_{2}\text{He} + ^{1}_{0}\text{n} + 17.6\ \text{MeV} \tag{5.9}$$

เกณฑ์ของลอว์สัน (Lawson Criterion) ระบุเงื่อนไขการจุดระเบิดฟิวชันแบบพึ่งพาตัวเอง (Ignition)

$$n \cdot T \cdot \tau_E \geq 3 \times 10^{21}\ \text{keV} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3} \tag{5.10}$$

โดยที่ n คือความหนาแน่นของพลาสมา, T คืออุณหภูมิ, และ τ_E คือเวลาการกักเก็บพลังงาน

5.5 สถาปัตยกรรม การ จำลอง เสมือน จริง AR/ XR Nuclear Chain Reaction Simulator

AR/XR Interactive Simulation การจำลองปฏิกิริยาลูกโซ่นิวเคลียร์ฟิชชัน 3 มิติ แบบ Real-Time

วัตถุประสงค์การเรียนรู้ผ่าน AR

1. แสดง ก้อน มวล ยูเรเนียม ^{235}U เสริม สมรรถนะ ใน รูป ทรง ลูกบาศก์ 3 มิติ ลอยตัวในห้องจริง
2. เมื่อผู้เรียนยิงนิวตรอนเข้าสู่ก้อนมวล ระบบจะทำการจำลองการแตกตัวแบบ Monte Carlo Particle Cascade แบบ 60 FPS
3. ผู้ เรียน สามารถ เลื่อน แท่ง ควบคุม นิวตรอน (Control Rods) ที่ ทำ จาก แคดเมียม หรือ โบรอน เข้า-ออก เพื่อ สังเกต ค่าตัว คูณ การ คูณ จำนวนนิวตรอนประสิทธิผล k_{eff} ดังนี้
   - $k_{\text{eff}} < 1$ หมายถึง สภาวะต่ำกว่าวิกฤต (Subcritical) ปฏิกิริยามอดดับลง
   - $k_{\text{eff}} = 1$ หมายถึง สภาวะวิกฤต (Critical) เครื่องปฏิกรณ์เดินเครื่องด้วยกำลังคงที่
   - $k_{\text{eff}} > 1$ หมายถึง สภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical) ปฏิกิริยาทวีคูณอย่างรวดเร็ว

5.6 การคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Python Bateman Decay Chain Solver

nuclear_bateman_decay.py – การแก้สมการลูกโซ่การสลายตัวกัมมันตรังสี

```python
import numpy as np
from scipy.integrate import solve_ivp

def bateman_odes(t, N, lambdas):
    """ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ลูกโซ่กัมมันตรังสี
    : N1 -> N2 -> N3 เสถียร()
    """
    l1, l2 = lambdas
    dN1_dt = -l1 * N[0]
    dN2_dt = l1 * N[0] - l2 * N[1]
    dN3_dt = l2 * N[1]
    return [dN1_dt, dN2_dt, dN3_dt]

# กำหนดค่าครึ่งชีวิต
t_half_1 = 5.0   # วันธาตุแม่ ( A)
t_half_2 = 12.0  # วันธาตุลูก ( B)
l1 = np.log(2.0) / t_half_1
l2 = np.log(2.0) / t_half_2

N0 = [1.0e6, 0.0, 0.0]  # จำนวนอะตอมเริ่มต้น
t_span = (0.0, 50.0)    # จำลองเป็นเวลา 50 วัน
t_eval = np.linspace(0, 50, 200)

sol = solve_ivp(bateman_odes, t_span, N0, args=([l1, l2],), t_eval=
    t_eval)

# หาเวลาที่ธาตุลูก B มีปริมาณสูงสุด (Secular / Transient Equilibrium Peak)
max_idx = np.argmax(sol.y[1])
t_peak = sol.t[max_idx]
N2_max = sol.y[1][max_idx]

print("=== Nuclear Decay Chain Simulation ===")
print(f"Decay constant lambda_1: {l1:.4f} day^-1 | lambda_2: {l2:.4f}
    day^-1")
print(f"Peak daughter (B) activity occurs at t = {t_peak:.2f} days
    with N_B = {N2_max:.0f} atoms")
```

5.7 ปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้เชิงลึกในฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิวชัน

ในฟิสิกส์นิวเคลียร์ยุคใหม่ การสร้างแบบจำลองโครงสร้างนิวเคลียสของไอโซโทปที่ไม่เสถียร (Exotic Nuclei) ที่อยู่ห่างไกลจากแนวเสถียรภาพ (Drip Lines) เป็นความท้าทาย

อย่างยิ่ง โครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึก (Deep Neural Networks) ถูกนำมาฝึกฝนกับฐานข้อมูลมวลนิวเคลียสจากการทดลอง เพื่อทำนาย **มวลพร่อง (Mass Excess)** และพลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียส ซึ่งให้ความแม่นยำทางสถิติสูงกว่าสูตรกึ่งเชิงประจักษ์ของไวซ์แซกเกอร์อย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ ในเทคโนโลยีพลังงานนิวเคลียร์ฟิวชัน เครื่องปฏิกรณ์แบบ **โทคาแมก (Tokamak)** จำเป็นต้องกักเก็บพลาสมาอุณหภูมิหลายสิบล้านองศาเซลเซียสไว้ด้วยสนามแม่เหล็กรูปวงแหวน (Toroidal Magnetic Field) ความไร้เสถียรภาพทางแม่เหล็กพลศาสตร์ (MHD Instabilities) เช่น โหมดการฉีกขาด (Tearing Modes) มักนำไปสู่ปรากฏการณ์พลาสมาแตกระเบิด (Plasma Disruption) ซึ่งสร้างความเสียหายต่อผนังเตาปฏิกรณ์

ปัจจุบัน สถาบันวิจัยชั้นนำของโลกได้นำ **การเรียนรู้แบบเสริมกำลังเชิงลึก (Deep Reinforcement Learning: DRL)** มาใช้ควบคุมขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้านับสิบชุดแบบเรียลไทม์ (มิลลิวินาทีต่อมิลลิวินาที) เช่น งานวิจัยของ DeepMind ร่วมกับสถาบันวิจัยพลาสมา EPFL (Degrave et al., 2022) บนเครื่องโทคาแมก TCV ซึ่งพิสูจน์ให้เห็นว่า AI สามารถเรียนรู้วิธีปรับเปลี่ยนรูปร่างของพลาสมาและควบคุมเสถียรภาพได้อย่างอัตโนมัติ เปิดศักราชใหม่ของการผลิตพลังงานฟิวชันสะอาดสู่อนาคต

5.8 ตัวอย่างการแก้โจทย์เชิงวิเคราะห์ตามระเบียบวิธี P-S-C-T

ตัวอย่างที่ 5.1 พลังงานปลดปล่อยและการสูญเสียมวลในปฏิกิริยาฟิชชันของ U-235

โจทย์ (Problem)
พิจารณาปฏิกิริยาฟิชชันของ ^{235}U โดยนิวตรอนพลังงานต่ำ

$$^{235}_{92}\text{U} + ^{1}_{0}\text{n} \rightarrow ^{141}_{56}\text{Ba} + ^{92}_{36}\text{Kr} + 3^{1}_{0}\text{n} \tag{5.11}$$

กำหนดมวลอะตอมในหน่วยมวลอะตอม (u)

- $M(^{235}\text{U}) = 235.0439299$ u
- $M(^{1}\text{n}) = 1.0086649$ u
- $M(^{141}\text{Ba}) = 140.914411$ u
- $M(^{92}\text{Kr}) = 91.926156$ u

(กำหนดค่าสมมูลมวล-พลังงาน $1\ \text{u} \cdot c^2 = 931.494$ MeV)

1. จงคำนวณมวลบกพร่องของปฏิกิริยานี้ในหน่วย u
2. จงหาพลังงานปลดปล่อย Q ในหน่วย MeV

3. หากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ใช้ ^{235}U บริสุทธิ์ 1.0 kg เกิดฟิชชันสมบูรณ์ จะปลดปล่อยพลังงานทั้งหมดกี่เมกะวัตต์-วัน (MW·day)?

ยุทธวิธี (Strategy)

- มวลบกพร่อง $\Delta M = M_{\text{ตั้งต้น}} - M_{\text{ผลิตภัณฑ์}}$
- พลังงานปลดปล่อย $Q = \Delta M \times 931.494$ MeV
- จำนวนนิวเคลียสใน 1.0 kg คำนวณจาก $N = \frac{m}{M_{\text{mol}}} N_A$

การคำนวณ (Computation)

1. คำนวณมวลตั้งต้นและมวลผลผลิต

$$M_{\text{in}} = M(^{235}\text{U}) + M(^{1}\text{n}) = 235.043930 + 1.008665 = 236.052595 \text{ u} \quad (5.12)$$

$$\begin{aligned} M_{\text{out}} &= M(^{141}\text{Ba}) + M(^{92}\text{Kr}) + 3M(^{1}\text{n}) \\ &= 140.914411 + 91.926156 + 3(1.008665) = 235.866562 \text{ u} \end{aligned} \quad (5.13)$$

ผลต่างมวลคือ

$$\Delta M = 236.052595 - 235.866562 \approx 0.186033 \text{ u} \quad (5.14)$$

2. คำนวณค่า Q

$$Q = 0.186033 \text{ u} \times 931.494 \text{ MeV/u} \approx 173.29 \text{ MeV} \quad (5.15)$$

(หากรวมพลังงานจากการสลายตัวบีตาของผลผลิตฟิชชันเพิ่มเติม จะได้ประมาณ 200 MeV)

3. พลังงานจาก ^{235}U ปริมาณ 1.0 kg

$$N = \frac{1000 \text{ g}}{235 \text{ g/mol}} \times 6.022 \times 10^{23} \text{ nuclei/mol} \approx 2.563 \times 10^{24} \text{ nuclei} \quad (5.16)$$

พลังงานรวมในหน่วยจูล

$$E_{\text{total}} = N \times (173.29 \text{ MeV}) \times (1.602 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}) \approx 7.115 \times 10^{13} \text{ J} \quad (5.17)$$

แปลงเป็นหน่วยเมกะวัตต์-วัน (1 MW · day $= 10^6$ W $\times 86400$ s $= 8.64 \times 10^{10}$ J)

$$E = \frac{7.115 \times 10^{13} \text{ J}}{8.64 \times 10^{10} \text{ J/(MW} \cdot \text{day)}} \approx 823.5 \text{ MW} \cdot \text{day} \quad (5.18)$$

ข้อคิดทางฟิสิกส์ (Takeaway)

ยูเรเนียมเพียง 1 kg ปลดปล่อยพลังงานความร้อนเทียบเท่ากับการเผาไหม้ถ่านหินคุณภาพสูงมากกว่า 2500 ตัน นี่คือพลังอันมหาศาลของแรงนิวเคลียร์อย่างเข้มเมื่อเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาเคมีดั้งเดิม ■

ตัวอย่างที่ 5.2 การคำนวณค่า Q-Value และการกระจายพลังงานในปฏิกิริยาฟิวชัน D-T (D-T Fusion)

ปฏิกิริยาฟิวชันเทอร์โมนิวเคลียร์หลักที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ฟิวชันระดับนานาชาติ ITER คือปฏิกิริยาระหว่างดิวเทอเรียม ($^2_1$H) และทริเทียม ($^3_1$H)

$$^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0\text{n} \tag{5.19}$$

กำหนดมวลนิวเคลียส $m(^2\text{H}) = 2.014102$ u, $m(^3\text{H}) = 3.016049$ u, $m(^4\text{He}) = 4.002603$ u, $m_n = 1.008665$ u และ $1\ \text{u} \cdot c^2 = 931.494$ MeV

1. จงคำนวณค่าพลังงานปลดปล่อยสุทธิ Q-Value ของปฏิกิริยาในหน่วย MeV
2. ในกรอบที่อนุภาคตั้งต้นเคลื่อนที่ช้ามากจนโมเมนตัมรวมของระบบเป็นศูนย์ จงคำนวณการแบ่งสันปันส่วนพลังงานจลน์ให้กับอนุภาคแอลฟา (K_α) และนิวตรอน (K_n)

โจทย์ (Problem)
คำนวณพลังงานรวมที่ปลดปล่อยและสัดส่วนพลังงานจลน์ของแต่ละอนุภาคหลังเกิดปฏิกิริยาฟิวชัน
ยุทธวิธี (Strategy)

- มวลพร่องเชิงปฏิกิริยา $\Delta m = [m(^2\text{H}) + m(^3\text{H})] - [m(^4\text{He}) + m_n]$
- ค่า $Q = \Delta m \cdot c^2$
- กฎอนุรักษ์โมเมนตัม $\mathbf{p}_\alpha + \mathbf{p}_n = 0 \implies p_\alpha = p_n = p$
- พลังงานจลน์แบบไม่สัมพัทธภาพ $K = \frac{p^2}{2m}$ ดังนั้น $\frac{K_\alpha}{K_n} = \frac{m_n}{m_\alpha} \approx \frac{1}{4}$
- $K_\alpha + K_n = Q \implies K_n = \frac{m_\alpha}{m_\alpha + m_n} Q, \quad K_\alpha = \frac{m_n}{m_\alpha + m_n} Q$

การคำนวณ (Computation)
1. คำนวณมวลพร่องและ Q-Value

$$\begin{aligned} m_{\text{reactants}} &= 2.014102\ \text{u} + 3.016049\ \text{u} = 5.030151\ \text{u} \\ m_{\text{products}} &= 4.002603\ \text{u} + 1.008665\ \text{u} = 5.011268\ \text{u} \\ \Delta m &= 5.030151\ \text{u} - 5.011268\ \text{u} = 0.018883\ \text{u} \end{aligned} \tag{5.20}$$

คำนวณค่า Q

$$Q = (0.018883\ \text{u}) \times (931.494\ \text{MeV/u}) \approx 17.589\ \text{MeV} \approx 17.59\ \text{MeV} \tag{5.21}$$

2. การแบ่งพลังงานจลน์

$$K_n = \left(\frac{4.002603}{4.002603 + 1.008665} \right) \times 17.589\ \text{MeV}$$

$$= \left(\frac{4.002603}{5.011268}\right) \times 17.589 \text{ MeV} \approx 0.7987 \times 17.589 \text{ MeV} \approx 14.05 \text{ MeV} \tag{5.22}$$

และสำหรับอนุภาคแอลฟา

$$K_\alpha = Q - K_n = 17.589 - 14.048 \approx 3.54 \text{ MeV} \tag{5.23}$$

ข้อคิดทางฟิสิกส์ (Takeaway)
พลังงานร้อยละ 80 ของปฏิกิริยา (14.05 MeV) ตกไปอยู่นิวตรอนที่ไม่มีประจุไฟฟ้า นิวตรอนเหล่านี้จะทะลุผ่านสนามแม่เหล็กกักกันพลาสมาออกไปชนกับผนังผ้าห่ม (Blanket) เพื่อเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นความร้อนสำหรับผลิตไอน้ำปั่นกังหัน ขณะที่อนุภาคแอลฟาประจุ $+2$ จะถูกกักไว้ในสนามแม่เหล็กเพื่อคอยถ่ายทอดความร้อนกลับเข้าสู่พลาสมา (Alpha Heating) เพื่อรักษาอุณหภูมิฟิวชันให้คงอยู่ต่อไป ■

5.9 สรุปสาระสำคัญประจำบท

ตารางที่ 5.1 สรุปหลักการสำคัญในฟิสิกส์นิวเคลียร์และปฏิกิริยานิวเคลียร์

กระบวนการ	สมการ / สูตร	ความสำคัญทางฟิสิกส์
พลังงานยึดเหนี่ยว	$B = \Delta m \cdot c^2$	มาตรวัดเสถียรภาพของนิวเคลียสอะตอม
SEMF	$B \approx a_v A - a_s A^{2/3} - \dots$	อธิบายสมบัติมวลนิวเคลียสด้วยแบบจำลองหยดของเหลว
การสลายตัวกัมมันตรังสี	$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$	พลวัตเชิงสถิติของการเปลี่ยนรูปนิวเคลียสที่ไม่เสถียร
ฟิชชันนิวเคลียร์	$^{235}\text{U} + \text{n} \rightarrow$ Products $+ 200$ MeV	การแตกตัวของนิวเคลียสหนักปลดปล่อยพลังงานสูง
ฟิวชันนิวเคลียร์	$^{2}\text{H} +^{3}\text{H} \rightarrow^{4}$ He $+ \text{n} + 17.6$ MeV	แหล่งกำเนิดพลังงานของดาวฤกษ์และเตาปฏิกรณ์ในอนาคต

5.10 แบบฝึกหัดท้ายบท

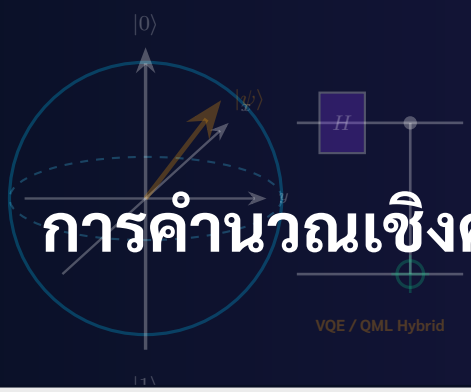
1. จงคำนวณพลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียสต่อนิวคลีออนของ $^4_2$He กำหนดมวลอะตอม $M(^4\text{He}) = 4.002603$ u, $m_p = 1.007276$ u, $m_n = 1.008665$ u

2. ไอโซโทปกัมมันตรังสีชนิดหนึ่งมีกิจกรรมกัมมันตรังสีลดลงเหลือ 12.5% ของค่าเริ่มต้นในเวลา 18 วัน จงหาครึ่งชีวิตและค่าคงตัวการสลายตัวของไอโซโทปนี้

3. จงอธิบายบทบาทของสารหน่วงนิวตรอน (Moderator) และแท่งควบคุม (Control Rods) ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ฟิชชัน

4. ไอโซโทปคาร์บอน-14 ($^{14}_{6}$C) สลายตัวให้อนุภาคบีตาลบด้วยครึ่งชีวิต $T_{1/2} = 5730$ ปี ตัวอย่างไม้โบราณที่ขุดพบมีกิจกรรมกัมมันตรังสีของ ^{14}C เพียง 25.0% เมื่อเทียบกับไม้มีชีวิตในปัจจุบัน จงประเมินอายุของโบราณวัตถุชิ้นนี้

5. จงอธิบายเกณฑ์ของลอว์สัน (เกณฑ์ของลอว์สัน $n\tau_E \geq 10^{20}$ m^{-3}s) สำหรับการจุดระเบิดพลาสมาฟิวชัน (Fusion Ignition) และเปรียบเทียบการกักขังพลาสมาด้วยสนามแม่เหล็ก (Magnetic Confinement – Tokamak) กับการกักขังด้วยความเฉื่อย (Inertial Confinement – Laser Fusion)



บทที่ 6

การคำนวณเชิงควอนตัมและสารสนเทศควอนตัม

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 6

หัวข้อเนื้อหาประจำบท

1. จากบิตคลาสสิกสู่คิวบิต
2. ทรงกลมบล็อค
3. เกตควอนตัม 1 คิวบิต
4. ระบบหลายคิวบิตและความพัวพันควอนตัม
5. สถาปัตยกรรม การ จำลอง เสมือน จริง AR/ XR 3D Interactive Bloch Sphere
6. การคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Python Quantum Statevector Simulator
7. ตัวอย่างการแก้โจทย์เชิงวิเคราะห์ตามระเบียบวิธี P-S-C-T
8. สรุปสาระสำคัญและแบบฝึกหัดท้ายบท

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. อธิบายความแตกต่างพื้นฐานระหว่างบิตดั้งเดิมและคิวบิตในระบบควอนตัมได้อย่างถูกต้อง
2. วิเคราะห์และแทนสถานะควอนตัมบนทรงกลมบล็อคได้อย่างแม่นยำ

3. คำนวณการดำเนินการของเกตควอนตัมเดี่ยว (Pauli, Hadamard) ด้วยเมทริกซ์เอกภาพได้อย่างเป็นระบบ
4. อธิบายความพัวพันเชิงควอนตัมและการสร้างสถานะเบลล์ด้วยเกต CNOT ได้อย่างถูกต้อง
5. วิเคราะห์โพรโทคอลการเคลื่อนย้ายควอนตัมทางไกล (Quantum Teleportation) ได้อย่างเป็นขั้นตอน
6. พัฒนาโปรแกรมภาษา Python เพื่อจำลองวงจรควอนตัมและการวัดค่าความน่าจะเป็นของ Statevector ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิจกรรมการเรียนการสอน

1. การบรรยายหลักการคำนวณเชิงควอนตัมและการแทนสถานะคิวบิตบนทรงกลมบล็อค
2. กิจกรรมกลุ่มย่อยวิเคราะห์การแปลงเมทริกซ์ของเกตควอนตัมและการสร้างความพัวพันเชิงควอนตัม
3. ปฏิบัติการจำลอง 3 มิติเชิงปฏิสัมพันธ์ 3D Interactive Bloch Sphere บน WebXR
4. ปฏิบัติการเขียนโค้ด Python เพื่อพัฒนา Quantum Statevector Simulator และจำลองการวัด
5. การศึกษาและแก้โจทย์ปัญหาคอมพิวติงควอนตัมตามระเบียบวิธี P-S-C-T

สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารคำสอน บทที่ 6 การคำนวณเชิงควอนตัมและสารสนเทศควอนตัม
2. สื่อจำลอง 3 มิติปฏิสัมพันธ์ WebXR 3D Interactive Bloch Sphere Simulator
3. ชุดสคริปต์ภาษา Python (NumPy) จำลองการคูณเทนเซอร์และวงจรเกตควอนตัม
4. แพลตฟอร์มการจัดการเรียนรู้ดิจิทัล (LMS) และชุดแบบฝึกหัด P-S-C-T

การประเมินผล

1. การประเมินจากการตอบคำถามและการมีส่วนร่วมในกิจกรรมการเรียนรู้ในชั้นเรียน
2. การตรวจรายงานผลปฏิบัติการคอมพิวเตอร์เขียนโปรแกรม Statevector ด้วย Python
3. การประเมินผลงานแบบฝึกหัดท้ายบทและการแก้โจทย์ P-S-C-T
4. การทดสอบย่อยวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนประจำบทที่ 6

6.1 จากบิตคลาสสิกสู่คิวบิต

จากบิตคลาสสิกสู่คิวบิต (Classical Bits vs. Qubits) ในระบบคอมพิวเตอร์แบบดั้งเดิม หน่วยย่อยของสารสนเทศคือ **บิต (Bit)** ซึ่งมีค่าได้เพียงสองสถานะคือ 0 หรือ 1 เท่านั้น ทว่าในกลศาสตร์ควอนตัม หน่วยย่อยของข้อมูลเรียกว่า **คิวบิต (Qubit)** ซึ่งเป็นระบบควอนตัมสองระดับ (Two-Level Quantum System) ที่สามารถอยู่ในสภาวะ **การซ้อนทับเชิงเส้น (Superposition)** ดังนี้

$$|\psi\rangle = \alpha\,|0\rangle + \beta\,|1\rangle \tag{6.1}$$

โดยที่ $|0\rangle = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}$ และ $|1\rangle = \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}$ คือสถานะฐานเชิงคำนวณ (Computational Basis States) ส่วน $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$ คือแอมพลิจูดความน่าจะเป็น ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขนอร์แมลไลเซชัน

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \tag{6.2}$$

เมื่อทำการวัดค่าคิวบิต ฟังก์ชันคลื่นจะยุบตัวลง (Wavefunction Collapse) โดยจะวัดได้ผลลัพธ์เป็น 0 ด้วยความน่าจะเป็น $|\alpha|^2$ หรือได้ 1 ด้วยความน่าจะเป็น $|\beta|^2$

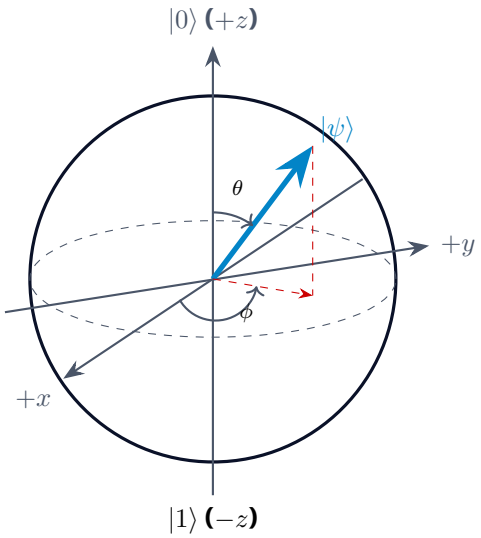
6.2 ทรงกลมบล็อค

ทรงกลมบล็อค (Bloch Sphere) เนื่องจากเงื่อนไข $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ และเฟสรวมภายนอกไม่มีผลต่อการวัด เราจึงสามารถเขียนสถานะของ 1 คิวบิตให้อยู่ในรูปพิกัดเชิงขั้วบนพื้นผิวทรงกลมหน่วยหนึ่งมิติได้ดังนี้

$$|\psi\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)|0\rangle + e^{i\phi}\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)|1\rangle \tag{6.3}$$

โดยที่ $0 \le \theta \le \pi$ และ $0 \le \phi < 2\pi$

- ขั้วเหนือ ($\theta = 0$) แทนสถานะ $|0\rangle$
- ขั้วใต้ ($\theta = \pi$) แทนสถานะ $|1\rangle$
- เส้นศูนย์สูตร ($\theta = \pi/2$) แทนสถานะซ้อนทับที่มีความน่าจะเป็นเท่ากัน เช่น $|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$ เมื่อ $\phi = 0$



ภาพที่ 6.1 การแทนสถานะของคิวบิตบนทรงกลมบล็อค (Bloch Sphere Representation)

6.3 เกตควอนตัม 1 คิวบิต

เกตควอนตัม 1 คิวบิต (Single-Qubit Quantum Gates) การเปลี่ยนแปลงสถานะของคิวบิตต้องรักษาขนาดความน่าจะเป็นรวมเป็น 1 เสมอ การดำเนินการจึงต้องเป็นไปตาม **เมทริกซ์เอกภาพ (Unitary Matrix, U)** โดยที่ $U^\dagger U = I$

เกตเดี่ยวพื้นฐานที่สำคัญประกอบด้วย

1. **เกตเพาลี (Pauli Gates)**

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad Y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \tag{6.4}$$

โดยที่เกต X ทำหน้าที่เสมือนเกต NOT ทางควอนตัม ($X|0\rangle = |1\rangle, X|1\rangle = |0\rangle$)

2. **เกตฮาดามาร์ด (Hadamard Gate, H)** ทำหน้าที่สร้างสถานะซ้อนทับเท่ากัน

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \implies H|0\rangle = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}} = |+\rangle, \quad H|1\rangle = \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} = |-\rangle \tag{6.5}$$

6.4 ระบบหลายคิวบิตและความพัวพันควอนตัม

ระบบหลายคิวบิตและความพัวพันควอนตัม (Quantum Entanglement) สถานะของระบบ 2 คิวบิตแสดงด้วยผลคูณเทนเซอร์ (Tensor Product)

$$|\Psi\rangle = c_{00}|00\rangle + c_{01}|01\rangle + c_{10}|10\rangle + c_{11}|11\rangle \tag{6.6}$$

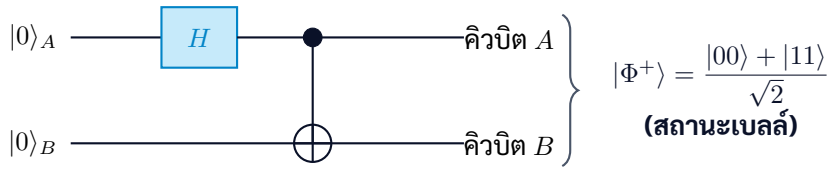
เกตควบคุม NOT (Controlled-NOT, CNOT) มี 2 อินพุตคือ คิวบิตควบคุม (Control) และคิวบิตเป้าหมาย (Target) หากคิวบิตควบคุมเป็น 1 จะทำการกลับค่าคิวบิตเป้าหมาย

$$\text{CNOT} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \tag{6.7}$$

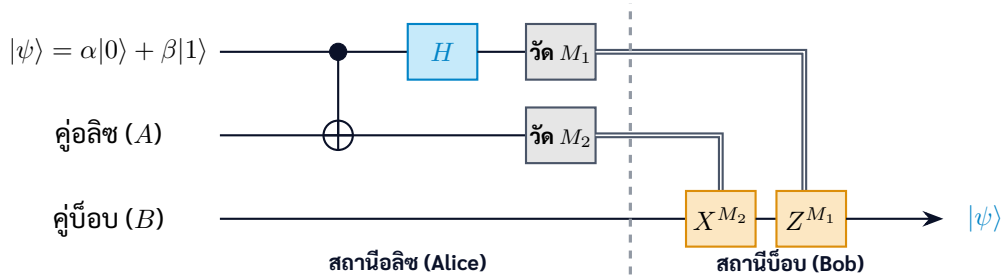
เมื่อนำเกต H มากระทำกับคิวบิตแรก แล้วส่งต่อเข้าเกต CNOT จะสร้าง **สถานะพัวพันสมบูรณ์ (Maximally Entangled Bell State)**

$$\left|\Phi^+\right\rangle = \text{CNOT}(H \otimes I)\left|00\right\rangle = \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}} \tag{6.8}$$

สถานะนี้ไม่สามารถแยกตัวประกอบออกเป็นสถานะของคิวบิตเดี่ยวได้ ($|\Phi^+\rangle \neq |\psi_A\rangle \otimes |\psi_B\rangle$) การวัดค่าที่คิวบิตตัวแรกจะกำหนดผลลัพธ์ของคิวบิตตัวที่สองในทันที แม้ทั้งคู่จะอยู่ห่างกันคนละฟากของเอกภพ!



ภาพที่ 6.2 วงจรควอนตัมสำหรับสร้างสถานะพัวพันสมบูรณ์ของเบลล์ (Bell State Preparation)



ภาพที่ 6.3 ผังวงจรควอนตัมเทเลพอร์ต (Quantum Teleportation Circuit) ถ่ายโอนสถานะ $|\psi\rangle$ ไปยังปลายทาง

6.5 สถาปัตยกรรมการจำลองเสมือนจริง AR/XR 3D Interactive Bloch Sphere

AR/XR Interactive Simulation การจำลองทรงกลมบล็อคและเกตควอนตัม 3 มิติ ผ่าน WebXR

วัตถุประสงค์การเรียนรู้ผ่าน AR

1. แสดงภาพทรงกลมบล็อคโปร่งใสลอยอยู่เหนือโต๊ะเรียนจริง พร้อมเวกเตอร์สถานะ $|\psi\rangle$ สีทอง
2. ผู้เรียนใช้มือแตะเลือกเกต X, Y, Z, H เพื่อดูการหมุน (Unitary Rotation) ของเวกเตอร์สถานะรอบแกนต่างๆ แบบเรียลไทม์
3. จำลองการวัดผล (Measurement Button) โดยเวกเตอร์สถานะจะยุบตัวกระโดดขึ้นขั้วเหนือ $|0\rangle$ หรือขั้วใต้ $|1\rangle$ ตามสัดส่วนความน่าจะเป็นจริง

6.6 การคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Python Quantum Statevector Simulator

quantum_gate_simulator.py – ตัวจำลองเกตควอนตัมและสถานะเบลล์

```python
import numpy as np

# กำหนดสถานะฐาน
ket0 = np.array([[1.0], [0.0]], dtype=complex)
ket1 = np.array([[0.0], [1.0]], dtype=complex)

# กำหนดเมทริกซ์เกตพื้นฐาน
I = np.eye(2, dtype=complex)
X = np.array([[0, 1], [1, 0]], dtype=complex)
Z = np.array([[1, 0], [0, -1]], dtype=complex)
H = (1.0 / np.sqrt(2.0)) * np.array([[1, 1], [1, -1]], dtype=complex)

# เกต CNOT 4x4
CNOT = np.array([
    [1, 0, 0, 0],
    [0, 1, 0, 0],
    [0, 0, 0, 1],
    [0, 0, 1, 0]
], dtype=complex)

# สร้างสถานะเริ่มต้น |00> = |0> (x) |0>
psi00 = np.kron(ket0, ket0)

# ขั้นที่ 1: ใส่เกต H ให้คิวบิตที่ 1 -> (H (x) I) |00>
```

```python
H_kron_I = np.kron(H, I)
step1 = np.dot(H_kron_I, psi00)

# ขั้นที่ 2: ใส่เกต CNOT -> Bell State |Phi+>
bell_phi_plus = np.dot(CNOT, step1)

print("=== Quantum Bell State Preparation ===")
print("Reconstructed Statevector |Phi+>:")
labels = ["|00>", "|01>", "|10>", "|11>"]
for i in range(4):
    prob = np.abs(bell_phi_plus[i, 0])**2
    print(f"{labels[i]}: Amp = {bell_phi_plus[i, 0]:.4f} | Prob = {
        prob:.4f}")
```

6.7 การเรียนรู้เชิงเครื่องควอนตัมและสปินคิวบิตในสถานะของแข็ง

6.7.1 การเรียนรู้ของเครื่องเชิงควอนตัม (Quantum Machine Learning)

การบูรณาการระหว่างปัญญาประดิษฐ์และการประมวลผลเชิงควอนตัมก่อให้เกิดสาขาวิชาใหม่คือ **การเรียนรู้ของเครื่องเชิงควอนตัม (Quantum Machine Learning: QML)** ในยุคของคอมพิวเตอร์ควอนตัมขนาดกลางที่มีสัญญาณรบกวน (Noisy Intermediate-Scale Quantum: NISQ) อัลกอริทึมแบบผสมผสานคลาสสิก-ควอนตัม (Hybrid Classical-Quantum Algorithms) มีบทบาทนำอย่างโดดเด่น

โดยเฉพาะอย่างยิ่ง **วงจรควอนตัมที่มีตัวแปรเสริม (Parameterized Quantum Circuits: PQC)** ซึ่งทำหน้าที่เสมือนโครงข่ายประสาทเทียมเชิงควอนตัม (Quantum Neural Networks: QNN) โดยมีมุมการหมุนของเกต $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots)$ เป็นพารามิเตอร์ที่สามารถปรับค่าได้ ตัวอย่างสำคัญได้แก่ อัลกอริทึม **Variational Quantum Eigensolver (VQE)** ซึ่งคอมพิวเตอร์ควอนตัมทำหน้าที่เตรียมสถานะ $|\psi(\boldsymbol{\theta})\rangle$ และวัดค่าคาดหมายของฮามิลโทเนียน $\langle \hat{H} \rangle_{\boldsymbol{\theta}}$ ขณะที่คอมพิวเตอร์คลาสสิกใช้ระเบียบวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization) เช่น Gradient Descent เพื่อค้นหาพลังงานสถานะพื้นของโมเลกุลเคมีและโครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุ

6.7.2 การจำลองคิวบิตสถานะของแข็งและอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนสปิน

หนึ่งในแพลตฟอร์มฮาร์ดแวร์ควอนตัมที่มีศักยภาพในการขยายขนาดสู่ระดับล้านคิวบิตคือ **สปินคิวบิตในสถานะของแข็ง (Solid-State Spin Qubits)** ซึ่งใช้

สปินของอิเล็กตรอนเดี่ยวที่ถูกกักขังในจุดควอนตัม (Semiconductor Quantum Dots) หรือสารประกอบผลึกออกไซด์ การดำเนินการเกตควอนตัมสองคิวบิต เช่น เกต SWAP และ $\sqrt{\text{SWAP}}$ อาศัยการควบคุม **อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนแบบไฮเซนเบิร์ก (Heisenberg Exchange Interaction)**

$$\hat{H}_{\text{exchange}} = -J(t)\,\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2 \tag{6.9}$$

เมื่อ $J(t)$ คือค่าคงตัวอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามเวลาผ่านการควบคุมแรงดันเกตไฟฟ้า ซึ่งเชื่อมโยงโดยตรงกับผลการศึกษาวิจัยเชิงทฤษฎีและคำนวณของชีวะ ทัศนา และคณะ (Thassana et al., 2011, 2012) เกี่ยวกับอิทธิพลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน J และแรงผลักคูลอมบ์ U ต่อความเสถียรของสปินอิเล็กตรอนในสารประกอบออกไซด์ การทำความเข้าใจพฤติกรรมของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนสปินในระดับควอนตัมจึงเป็นกุญแจสำคัญในการควบคุมความแม่นยำ (Gate Fidelity) และการลดสัญญาณรบกวนจากการสูญเสียสภาพความเชื่อมแน่น (Decoherence) ในคอมพิวเตอร์ควอนตัมยุคถัดไป

6.8 ตัวอย่างการแก้โจทย์เชิงวิเคราะห์ตามระเบียบวิธี P-S-C-T

ตัวอย่างที่ 6.1 การคำนวณความน่าจะเป็นของการวัดค่าคิวบิตหลังผ่านเกตฮาดามาร์ด

โจทย์ (Problem)
คิวบิตตั้งต้นอยู่ในสถานะ $|\psi_i\rangle = \sqrt{\frac{3}{4}}\,|0\rangle + \frac{1}{2}\,|1\rangle$

1. จงตรวจสอบว่าสถานะนี้ผ่านการนอร์แมลไลซ์หรือไม่ และหาพิกัดมุม θ และ ϕ บนทรงกลมบล็อค
2. หากส่งคิวบิตนี้เข้าสู่เกตฮาดามาร์ด H จงหาสถานะสุดท้าย $|\psi_f\rangle = H\,|\psi_i\rangle$
3. จงคำนวณความน่าจะเป็นที่จะวัดได้ผลลัพธ์เป็น $|0\rangle$ และ $|1\rangle$ ตามลำดับ

ยุทธวิธี (Strategy)

- นอร์แมลไลเซชัน $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$
- พิกัดบล็อค $\cos(\theta/2) = \alpha$, $\sin(\theta/2) = \beta$
- การคูณเมทริกซ์ $|\psi_f\rangle = H\,|\psi_i\rangle$
- ความน่าจะเป็น $P(0) = |\,\langle 0|\psi_f\rangle\,|^2$, $P(1) = |\,\langle 1|\psi_f\rangle\,|^2$

การคำนวณ (Computation)

1. ตรวจสอบเงื่อนไขนอร์แมลไลซ์และหามุมบล็อค

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = \left(\sqrt{\frac{3}{4}}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{3}{4} + \frac{1}{4} = 1.0 \quad \text{(ถูกต้อง)} \tag{6.10}$$

เนื่องจากแอมพลิจูดเป็นจำนวนจริงบวกทั้งคู่ ดังนั้น $\phi = 0$ และ

$$\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{\sqrt{3}}{2} \implies \frac{\theta}{2} = 30^\circ \implies \theta = 60^\circ \text{ (หรือ } \pi/3 \text{ rad)} \tag{6.11}$$

2. คำนวณการดำเนินการของเกตฮาดามาร์ด

$$|\psi_f\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}+1}{2} \\ \frac{\sqrt{3}-1}{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}+1}{2\sqrt{2}} \\ \frac{\sqrt{3}-1}{2\sqrt{2}} \end{pmatrix} \tag{6.12}$$

3. คำนวณความน่าจะเป็นในการวัดค่า

$$P(0) = \left|\frac{\sqrt{3}+1}{2\sqrt{2}}\right|^2 = \frac{4+2\sqrt{3}}{8} = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{4} \approx 0.933 = 93.3\% \tag{6.13}$$

$$P(1) = \left|\frac{\sqrt{3}-1}{2\sqrt{2}}\right|^2 = \frac{4-2\sqrt{3}}{8} = \frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{4} \approx 0.067 = 6.7\% \tag{6.14}$$

ตรวจสอบผลรวมความน่าจะเป็น $P(0) + P(1) = 0.933 + 0.067 = 1.00$ สมบูรณ์

ข้อคิดทางฟิสิกส์ (Takeaway)

เกตฮาดามาร์ดทำหน้าที่หมุนเวกเตอร์สถานะบนทรงกลมบล็อค โดยเกิดการแทรกสอดเชิงสร้างสรรค์ในแอมพลิจูดของ $|0\rangle$ ทำให้ความน่าจะเป็นเพิ่มขึ้นจากเดิม 75% กลายเป็น 93.3% นี่คือกลไกพื้นฐานที่อัลกอริทึมควอนตัมใช้เพื่อขยายคำตอบที่ถูกต้อง (Quantum Interference Amplification) ■

ตัวอย่างที่ 6.2 การสร้างสถานะพัวพันเบลล์และการจำลองด้วย Qiskit (Bell State Generation)

ในการสื่อสารเชิงควอนตัม สถานะพัวพันเบลล์ (Bell State) $|\Phi^+\rangle = \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}$ เป็นทรัพยากรหลักสำหรับการส่งสถานะทางไกล (Quantum Teleportation) และการเข้ารหัสลับควอนตัม

1. จงแสดงขั้นตอนการแปลงสถานะเมื่อเริ่มต้นจากสถานะคิวบิตคู่ $|\psi_0\rangle = |00\rangle$ ผ่านเกตฮาดามาร์ดบนคิวบิต 0 และตามด้วยเกต CNOT ($0 \to 1$)

2. หากอลิซ (Alice) ทำการวัดคิวบิตที่ 0 ในฐานเชิงคำนวณและได้ผลลัพธ์เป็น 1 จงหาความน่าจะเป็นที่บ็อบ (Bob) จะวัดคิวบิตที่ 1 ได้ผลลัพธ์ 1 พร้อมอธิบายปรากฏการณ์ความพัวพันเชิงควอนตัม (Quantum Entanglement)

3. จงเขียนโค้ดภาษา Python ด้วยเฟรมเวิร์ก Qiskit เพื่อสร้างและรันวงจรนี้

โจทย์ (Problem)
แสดงคณิตศาสตร์การสร้างสถานะเบลล์ การวัดสถานะพัวพัน และการจำลองด้วย Qiskit
ยุทธวิธี (Strategy)

- สถานะเริ่มต้น $|\psi_0\rangle = |0\rangle \otimes |0\rangle = |00\rangle$
- ขั้นที่ 1 ใช้เกต $H \otimes I$ บนคิวบิตแรก ได้ผลคือ $|\psi_1\rangle = (H|0\rangle) \otimes |0\rangle = \left(\frac{|0\rangle+|1\rangle}{\sqrt{2}}\right) \otimes |0\rangle = \frac{|00\rangle+|10\rangle}{\sqrt{2}}$
- ขั้นที่ 2 ใช้เกต CNOT โดยให้คิวบิตแรกเป็นตัวควบคุม (Control) และคิวบิตที่สองเป็นเป้าหมาย (Target) CNOT $|00\rangle = |00\rangle$, CNOT $|10\rangle = |11\rangle$

การคำนวณ (Computation)
1. การแปลงสถานะ

$$|\psi_2\rangle = \text{CNOT}_{0\to1}|\psi_1\rangle = \frac{\text{CNOT}|00\rangle + \text{CNOT}|10\rangle}{\sqrt{2}} = \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}} = |\Phi^+\rangle \tag{6.15}$$

2. ผลของการวัดค่า เมื่ออลิซวัดคิวบิต 0 ได้สถานะ $|1\rangle$ สถานะรวมของระบบ 2 คิวบิตจะยุบตัวลง (Wavefunction Collapse) สู่

$$|\psi_{\text{collapsed}}\rangle = |11\rangle \tag{6.16}$$

ดังนั้น ความน่าจะเป็นที่บ็อบจะวัดคิวบิต 1 แล้วได้สถานะ $|1\rangle$ คือ 100% ($P = 1.0$) ทันที แม้ว่าบ็อบจะอยู่ห่างออกไปคนละซีกจักรวาลโดยไม่มีการส่งสัญญาณคลาสสิกระหว่างกัน
3. สคริปต์จำลองด้วย Qiskit

Listing 6.1 การสร้างสถานะเบลล์ด้วย Qiskit

```python
from qiskit import QuantumCircuit
from qiskit.quantum_info import Statevector

# สร้างวงจรควอนตัม 2 คิวบิต
qc = QuantumCircuit(2)
qc.h(0)          # ใส่เกต Hadamard ที่คิวบิต 0
qc.cx(0, 1)      # ใส่เกต CNOT ควบคุมโดยคิวบิต 0 ส่งผลต่อคิวบิต 1

```

```
# คำนวณ Statevector
psi = Statevector.from_instruction(qc)
print("Bell State Vector:", psi.data)
# ผลลัพธ์: [0.7071+0j, 0, 0, 0.7071+0j] สอดคล้องกับ (|00> + |11>)/sqrt(2)
```

ข้อคิดทางฟิสิกส์ (Takeaway)
ความพัวพันเชิงควอนตัมไม่สามารถนำมาใช้ส่งข้อมูลได้เร็วกว่าแสง (No-Signaling Theorem) เนื่องจากผลการวัดของอลิซเป็นแบบสุ่มอย่างแท้จริง บ็อบจำเป็นต้องได้รับข้อมูลคลาสสิกจากอลิซเพื่อถอดรหัสสารสนเทศเสมอ ■

6.9 สรุปสาระสำคัญประจำบท

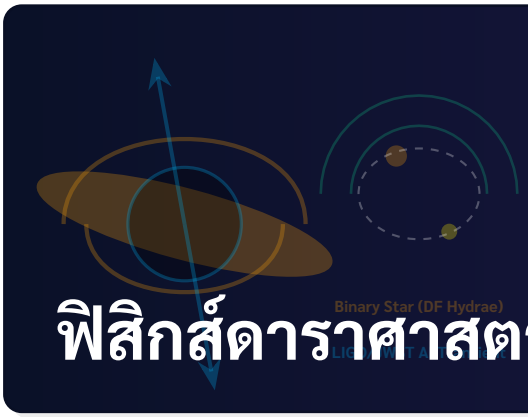
ตารางที่ 6.1 สรุปพื้นฐานการคำนวณและสารสนเทศเชิงควอนตัม

มโนทัศน์	สัญลักษณ์ / สูตร	ความสำคัญ
คิวบิต (Qubit)	$\|\psi\rangle = \alpha\|0\rangle + \beta\|1\rangle$	หน่วยข้อมูลควอนตัมที่รองรับการซ้อนทับ
ทรงกลมบล็อค	$\|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}\|0\rangle + e^{i\phi}\sin\frac{\theta}{2}\|1\rangle$	การแสดงสถานะ 1 คิวบิตเชิงเรขาคณิตสามมิติ
เกตฮาดามาร์ด	$H = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1 & 1\\ 1 & -1\end{pmatrix}$	สร้างการซ้อนทับเท่ากันและก่อให้เกิดการแทรกสอดควอนตัม
เกต CNOT	$\|c,t\rangle \to \|c, c\oplus t\rangle$	เกตสองคิวบิตที่จำเป็นสำหรับการสร้างความพัวพัน
สถานะเบลล์	$\|\Phi^+\rangle = \frac{\|00\rangle+\|11\rangle}{\sqrt{2}}$	ความสัมพันธ์ควอนตัมที่ไม่สามารถแยกส่วนได้

6.10 แบบฝึกหัดท้ายบท

1. จงคำนวณผลลัพธ์ของ $H \cdot X \cdot H$ และอธิบายความหมายในรูปของเกตเพาลีอื่น
2. จงพิสูจน์ว่าสถานะ $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle)$ เป็นสถานะพัวพันสมบูรณ์ (Singlet State)
3. จงร่างวงจรควอนตัมสำหรับการส่งสถานะทางไกล (Quantum Teleportation) พร้อมอธิบายบทบาทของการส่งข้อมูลคลาสสิก 2 บิต
4. จงเขียนเมทริกซ์ของเกตเฟสควอนตัม $S = \begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & i\end{pmatrix}$ และเกต $T = \begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & e^{i\pi/4}\end{pmatrix}$ พร้อมแสดงว่า $T^2 = S$ และ $S^2 = Z$
5. ในขั้นตอนการกระจายกุญแจรหัสลับเชิงควอนตัม (BB84 Quantum Key Distribution – QKD) หากมีผู้ดักฟัง (Eve) เข้ามาวัดสถานะคิวบิตในฐานที่ไม่ถูกต้อง จง

คำนวณอัตราความผิดพลาดของบิตควอนตัม (Quantum Bit Error Rate – QBER) ที่ Alice และ Bob จะตรวจพบได้



บทที่ 7

ฟิสิกส์ดาราศาสตร์และจักรวาลวิทยา

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 7

หัวข้อเนื้อหาประจำบท

1. สมดุลไฮโดรสแตติกและวิวัฒนาการของดาวฤกษ์
2. หลุมดำและเรขาคณิตชวาร์ซชิลด์
3. จักรวาลวิทยาและสมการฟรีดมันน์
4. สถาปัตยกรรมการจำลองเสมือนจริง AR/XR Spacetime Curvature and Lensing
5. การคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Python Friedmann Universe Expansion
6. ตัวอย่างการแก้โจทย์เชิงวิเคราะห์ตามระเบียบวิธี P-S-C-T
7. สรุปสาระสำคัญและแบบฝึกหัดท้ายบท

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. อธิบายสภาวะสมดุลไฮโดรสแตติกในโครงสร้างภายในของดาวฤกษ์ได้อย่างถูกต้อง
2. วิเคราะห์สถานะสุดท้ายของดาวฤกษ์ (ดาวแคระขาว ดาวนิวตรอน) และขีดจำกัดจันทรเศขรได้อย่างแม่นยำ
3. คำนวณรัศมีชวาร์ซชิลด์และการยืดของเวลาเนื่องจากความโน้มถ่วงใกล้หลุมดำได้อย่างถูกต้อง

4. อธิบายหลักการตรวจวัดคลื่นความโน้มถ่วงจากการรวมตัวของหลุมดำคู่ได้อย่างเป็นระบบ
5. ประยุกต์ใช้กฎของฮับเบิล-เลอแมทร์และสมการฟรีดมันน์ในการอธิบายพลศาสตร์การขยายตัวของเอกภพได้อย่างถูกต้อง
6. พัฒนาสคริปต์ภาษา Python เพื่อจำลองการขยายตัวของสเกลแฟกเตอร์ $a(t)$ ในแบบจำลอง ΛCDM ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิจกรรมการเรียนการสอน

1. การบรรยายเชิงทฤษฎีและอภิปรายเรื่องวิวัฒนาการของดาวฤกษ์และการกำเนิดหลุมดำ
2. กิจกรรมกลุ่มย่อยวิเคราะห์สมการฟรีดมันน์และเรขาคณิตความโค้งของกาลอวกาศ
3. ปฏิบัติการจำลองความโค้งของปริภูมิและการหักเหของแสงจากแรงโน้มถ่วง (Gravitational Lensing) บน WebXR
4. ปฏิบัติการคอมพิวเตอร์เขียนโปรแกรม Python จำลองการวิวัฒน์ของเอกภพตามแบบจำลอง ΛCDM
5. การศึกษาและแก้โจทย์ปัญหาฟิสิกส์ดาราศาสตร์ตามระเบียบวิธี P-S-C-T

สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารคำสอน บทที่ 7 ฟิสิกส์ดาราศาสตร์และจักรวาลวิทยา
2. สื่อจำลอง 3 มิติปฏิสัมพันธ์ WebXR Spacetime Curvature and Lensing Simulator
3. ชุดสคริปต์ภาษา Python จำลองการขยายตัวของเอกภพฟรีดมันน์
4. แพลตฟอร์มการจัดการเรียนรู้ดิจิทัล (LMS) และชุดแบบฝึกหัด P-S-C-T

การประเมินผล

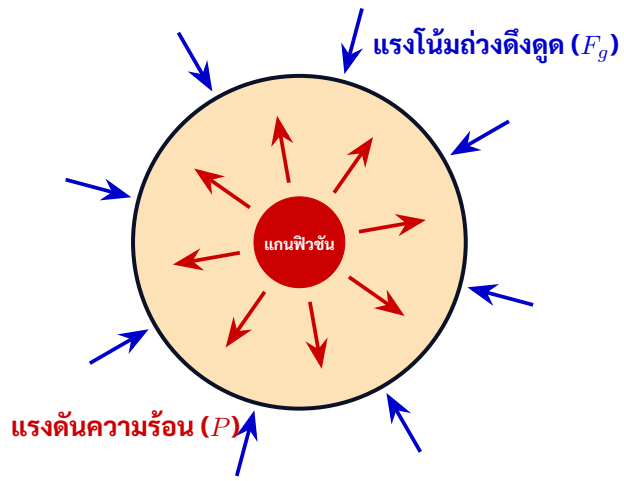
1. การประเมินจากการตอบคำถามและการมีส่วนร่วมในกิจกรรมการเรียนรู้ในชั้นเรียน
2. การตรวจรายงานผลปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ด้วย Python และแบบฝึกหัดท้ายบท
3. การประเมินผลงานการจำลองแบบจำลองจักรวาลวิทยา 3 มิติ
4. การทดสอบย่อยวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนประจำบทที่ 7

7.1 สมดุลไฮโดรสแตติกและวิวัฒนาการของดาวฤกษ์

ดาวฤกษ์ดำรงสถานะเสถียรอยู่ได้ด้วยความสมดุลระหว่างแรงโน้มถ่วงที่พยายามดึงดูดมวลสารเข้าสู่ศูนย์กลาง กับแรงดันจากความร้อนและรังสีนิวเคลียร์ฟิวชันจากแกนกลาง เรียกว่า **สมดุลไฮโดรสแตติก (Hydrostatic Equilibrium)**

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM(r)\rho(r)}{r^2} \tag{7.1}$$

โดยที่ $M(r) = \int_0^r 4\pi r'^2 \rho(r') dr'$ คือมวลสะสมภายในรัศมี r



ภาพที่ 7.1 สภาวะสมดุลไฮโดรสแตติก (Hydrostatic Equilibrium) ของดาวฤกษ์

เมื่อดาวฤกษ์เผาผลาญเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่แกนกลางจนหมด แรงดันความร้อนจะหยุดลง ดาวฤกษ์จะยุบตัวลงตามมวลตั้งต้น ได้แก่

1. **ดาวแคระขาว (White Dwarf)** พยุงตัวด้วย **ความดันดีเจเนอเรซีของอิเล็กตรอน (Electron Degeneracy Pressure)** ตามหลักการกีดกันของเพาลี มวลสูงสุดที่เป็นไปได้คือ **ขีดจำกัดจันทรเศขร (Chandrasekhar Limit)**

$$M_{\text{Ch}} \approx 1.44 M_\odot \tag{7.2}$$

2. **ดาวนิวตรอน (Neutron Star)** หากมวลเกิน $1.44 M_\odot$ อิเล็กตรอนจะรวมตัวกับโปรตอนกลายเป็นนิวตรอน พยุงตัวด้วยความดันดีเจเนอเรซีของนิวตรอน มวลสูงสุดอยู่ที่ขีดจำกัด TOV (Tolman-Oppenheimer-Volkoff Limit) $\approx 2.1 - 2.3 M_\odot$

3. **หลุมดำ (Black Hole)** หากมวลสารตกค้างมากกว่าขีดจำกัด TOV ไม่มีแรงใดในเอกภพสามารถต้านทานแรงโน้มถ่วงได้ ดาวจะยุบตัวลงสู่ภาวะเอกฐาน (Singularity)

7.2 หลุมดำและเรขาคณิตชวาร์ซชิลด์

หลุมดำและเรขาคณิตชวาร์ซชิลด์ (Schwarzschild Black Holes) ตามทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของไอน์สไตน์ คาร์ล ชวาร์ซชิลด์ (Karl Schwarzschild) ได้หาผลเฉลยแม่นตรงสำหรับปริภูมิ-เวลารอบมวลทรงกลมสถิตที่ไม่มีประจุและไม่หมุน

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{R_s}{r}\right) c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{R_s}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \tag{7.3}$$

โดยที่ R_s คือ **รัศมีชวาร์ซชิลด์ (Schwarzschild Radius)** ซึ่งเป็นตำแหน่งของ **ขอบฟ้าเหตุการณ์ (Event Horizon)** ดังนี้

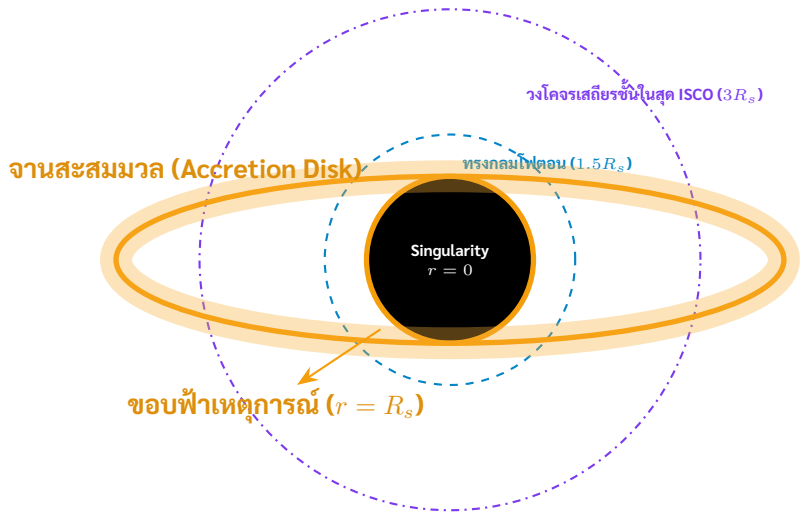
$$R_s = \frac{2GM}{c^2} \tag{7.4}$$

ไม่มีสิ่งใดแม้กระทั่งแสงสามารถหลุดรอดออกจากภายในขอบฟ้าเหตุการณ์ได้

การยืดของเวลาเนื่องจากแรงโน้มถ่วงสำหรับผู้สังเกตที่ระยะห่าง r สัมพันธ์กับเวลาเฉพาะที่ระยะอนันต์คือ

$$\Delta t(r) = \frac{\Delta t_\infty}{\sqrt{1 - \frac{R_s}{r}}} \tag{7.5}$$

เมื่อ $r \to R_s$ เวลาจะหยุดเดินในสายตาของผู้สังเกตภายนอก ($\Delta t \to \infty$)



ภาพที่ 7.2 โครงสร้างทางเรขาคณิตของหลุมดำชวาร์ซชิลด์ (Schwarzschild Black Hole Anatomy)

7.3 จักรวาลวิทยาและสมการฟรีดมันน์

จักรวาลวิทยาและสมการฟรีดมันน์ (Friedmann Cosmology) เอ็ดวิน ฮับเบิล (Edwin Hubble) และจอร์จ เลอแมทร์ (Georges Lemaître) ค้นพบว่าดาราจักรส่วนใหญ่

กำลังเคลื่อนที่ถอยห่างออกจากเราด้วยความเร็วแปรผันตรงกับระยะทาง

$$v = H_0 d \tag{7.6}$$

โดยที่ $H_0 \approx 70$ km $\cdot$ s^{-1} $\cdot$ Mpc^{-1} คือค่าคงตัวของฮับเบิล (Hubble Constant)

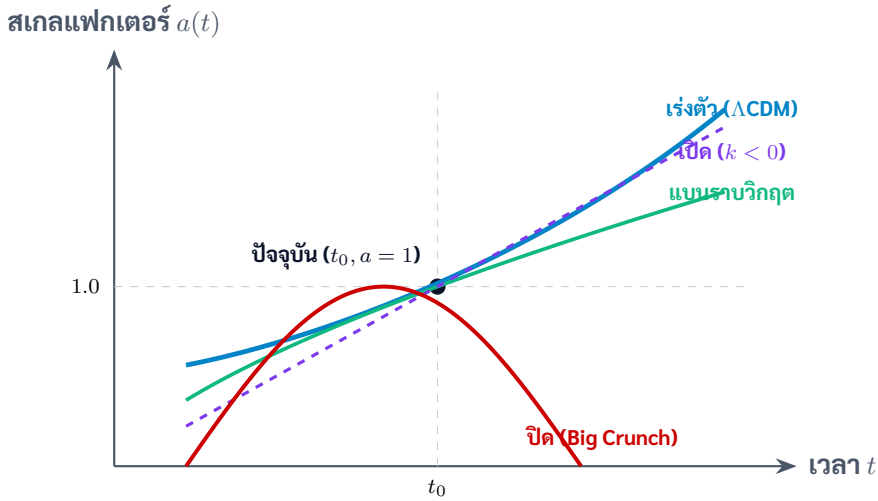
ตาม แบบ จำลอง FLRW (Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker Metric) พลวัตการขยายตัวของเอกภพถูกกำหนดด้วย **สเกลแฟกเตอร์** $a(t)$ ผ่านสมการฟรีดมันน์

$$H^2(t) = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3} \tag{7.7}$$

และสมการความเร่ง

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3P}{c^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3} \tag{7.8}$$

การสังเกตการณ์ซูเปอร์โนวา Type Ia ในปี ค.ศ. 1998 ยืนยันว่าเอกภพกำลังขยายตัวด้วยความเร่ง ($\ddot{a} > 0$) ขับเคลื่อนโดย **พลังงานมืด (Dark Energy / Cosmological Constant Λ)** ซึ่งครองสัดส่วนประมาณ 68% ของพลังงานทั้งหมดในเอกภพ



ภาพที่ 7.3 วิวัฒนาการของสเกลแฟกเตอร์ $a(t)$ ในแบบจำลองจักรวาลวิทยาต่างๆ แสดงการขยายตัวด้วยความเร่งของเอกภพ ΛCDM

7.4 สถาปัตยกรรม การ จำลอง เสมือน จริง AR/ XR Spacetime Curvature and Lensing

AR/XR Interactive Simulation การจำลองการบิดโค้งของปริภูมิเวลาและเลนส์โน้มถ่วงรอบหลุมดำ 3 มิติ

วัตถุประสงค์การเรียนรู้ผ่าน AR

1. แสดงหลุมดำมวลยิ่งยวดพร้อมจานสะสมมวล (Accretion Disk) เรืองแสง และปรากฏการณ์เงาหลุมดำ (Black Hole Shadow)
2. ใช้ GLSL Custom Shader จำลองการหักเหของเส้นทางแสง (Gravitational Lensing) จากดวงดาวพื้นหลังรอบขอบฟ้าเหตุการณ์
3. ผู้เรียนสามารถโยนดาวเคราะห์หรืออนุภาคเสมือนเข้าสู่วงโคจร เพื่อสังเกตปรากฏการณ์เลื่อนไปข้างหน้าของจุดใกล้ศูนย์กลางที่สุด (Perihelion Precession) และการถูกฉีกขาดจากแรงไทดัล (Spaghettification)

7.5 การคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Python Friedmann Universe Expansion

friedmann_cosmology.py – การจำลองการขยายตัวของเอกภพ Lambda-CDM

```python
import numpy as np
from scipy.integrate import solve_ivp

# พารามิเตอร์จักรวาลวิทยาปัจจุบัน (Planck Collaboration 2018)
H0 = 67.4          # km/s/Mpc
H0_per_s = H0 * 1000.0 / (3.08567758e22)  # แปลงเป็น 1/s
H0_per_Gyr = H0_per_s * (3.15576e16)       # แปลงเป็น 1/Gyr (~0.0689 Gyr^-1)

Omega_m = 0.315    # สสารสสารปกติ ( + สสารมืด)
Omega_r = 9.0e-5   # รังสีโฟตอน ( + นิวทริโน)
Omega_L = 0.685    # พลังงานมืดค่าคงตัวจักรวาลวิทยา ()

def friedmann_ode(t, a):
    """
    da/dt = H0 * sqrt( Omega_r/a^2 + Omega_m/a + Omega_L * a^2 )สำหรับเอกภพที่แบนราบทางเรขาคณิต
     (k = 0)
    """
    if a <= 0:
        return 0
    term = (Omega_r / a**2) + (Omega_m / a) + (Omega_L * a**2)
```

```
    return H0_per_Gyr * np.sqrt(max(term, 0))

# คำนวณย้อนหลังจากปัจจุบัน a=1 (t=13.8 Gyr)
t_span = (0.01, 25.0)  # เวลาตั้งแต่ 10 ล้านปีถึง  25 พันล้านปี
a0 = [0.001]
t_eval = np.linspace(0.01, 25.0, 300)

sol = solve_ivp(friedmann_ode, t_span, a0, t_eval=t_eval)

# หาอายุเอกภพเมื่อ a = 1.0 ปัจจุบัน()
curr_idx = np.argmin(np.abs(sol.y[0] - 1.0))
t_age = sol.t[curr_idx]

print("=== Friedmann Cosmological Simulation ===")
print(f"Current Hubble Constant H0: {H0} km/s/Mpc")
print(f"Calculated Age of Universe (a=1): {t_age:.2f} Billion Years (
    Gyr)")
```

7.6 การ วิเคราะห์ ระบบ ดาว คู่ และ การ ศึกษา จลนศาสตร์ดาราศาสตร์เชิงสังเกตการณ์

7.6.1 วิวัฒนาการของระบบดาวคู่แบบสัมผัสและการเปลี่ยนแปลงคาบการโคจร

ระบบดาวคู่แบบสัมผัส (Contact Binary Systems) ชนิด W UMa เป็นระบบดาวฤกษ์มวลใกล้เคียงกันสองดวงที่โคจรรอบจุดศูนย์กลางมวลร่วมในระยะประชิดอย่างยิ่ง จนกระทั่งบรรยากาศชั้นนอกของดาวทั้งสองล้นทะลักผ่านกลีบโรช (Roche Lobes) เกิดเป็นซองก๊าซร่วม (Common Convective Envelope) ห่อหุ้มดาวทั้งสองดวงไว้ด้วยกัน การศึกษาระบบดังกล่าวช่วยให้นักดาราศาสตร์ฟิสิกส์เข้าใจกลไกการถ่ายโอนมวลสาร พลศาสตร์แรงโน้มถ่วง และการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมผ่านลมดาวฤกษ์ (Magnetic Stellar Wind Braking)

งานวิจัยของชีวะ ทัศนา และคณะ (Thassana et al., 2014, 2016) ได้ทำการศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับวิวัฒนาการของระบบดาวคู่แบบสัมผัส **DF Hydrae (DF Hya)** โดยใช้เทคนิคการวัดแสงด้วยอุปกรณ์รับภาพซีซีดี (CCD Photometry) เพื่อสร้างเส้นโค้งแสง (Light Curves) และวิเคราะห์เวลาแสงสว่างน้อยที่สุด (Minima Times) ผ่านไดอะแกรม $O-C$ (Observed minus Calculated Diagram)

ผลการวิเคราะห์พบว่าคาบการโคจรของ DF Hydrae มีการเปลี่ยนแปลงในอัตราที่วัดได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นหลักฐานเชิงสังเกตการณ์ของการถ่ายโอนมวลสารระหว่างดาวปฐมภูมิและดาวทุติยภูมิ ตลอดจนการมีอยู่ของวัตถุสมาชิกดวงที่สามที่มีอันตรกิริยาแรงโน้มถ่วงรบกวนระบบ การสร้างแบบจำลองวงโคจรดังกล่าวต้องอาศัยการแก้

สมการกลศาสตร์ฟ้าควบคู่กับการปรับแก้เชิงสัมพัทธภาพของเวลาเดินทางของแสง (Light Travel-Time Effect: LTTE)

7.6.2 การ วิเคราะห์ คุณสมบัติ ทาง กายภาพ ของ กระจุก ดาว และ เทคนิคการวัดแสง

นอกจาก ระบบ ดาว คู่ การ ศึกษา กระจุก ดาว เปิด (Open Clusters) และ กระจุก ดาว ทรง กลม (Globular Clusters) เช่น M3, M35, M67 และ M45 (กระจุก ดาว ลูกไก่) ถือเป็นกุญแจสำคัญในการทดสอบทฤษฎีวิวัฒนาการของดาวฤกษ์ งานวิจัยของชีวะ ทัศนา และคณะ (Thassana et al., 2012, 2015; ทัศนา, 2558) ได้นำเทคนิคโฟโตเมทรีซีซีดี มาวิเคราะห์แผนภาพสี-ความสว่าง (Color-Magnitude Diagram: CMD) และประยุกต์ใช้ วิธีการเทียบเส้นไอโซโครน (Isochrone Fitting) เพื่อกำหนดอายุและอุณหภูมิประสิทธิผล ของกระจุกดาวได้อย่างแม่นยำ ซึ่งสอดคล้องกับระเบียบวิธีวิเคราะห์ข้อมูลดาราศาสตร์ และตำแหน่งดาว (Astrometry) ที่นำเสนอในตำรา *คู่มือวิเคราะห์ข้อมูลดาราศาสตร์เบื้องต้น* (ทัศนา, 2557)

7.7 การประยุกต์ใช้การเรียนรู้เชิงลึกในฟิสิกส์ดาราศาสตร์และคลื่นความโน้มถ่วง

การค้นพบคลื่นความโน้มถ่วง (Gravitational Waves) ในปี ค.ศ. 2015 จากการรวมตัวของหลุมดำคู่ (GW150914) โดยหอสังเกตการณ์ LIGO/Virgo ได้เปิดยุคใหม่แห่ง *ดาราศาสตร์พหุพาหะ (Multi-Messenger Astronomy)* ทว่าสัญญาณการกระเพื่อมของปริภูมิเวลาที่ตรวจวัดได้บนโลกมีขนาดความเครียด (Strain, h) เล็กมากในระดับ 10^{-21} ซึ่งจมอยู่ใต้สัญญาณรบกวนเครื่องวัด (Instrumental Noise)

การประยุกต์ใช้ **โครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน 1 มิติและ 2 มิติ (1D/2D CNNs)** ช่วยให้ระบบสามารถประมวลผลข้อมูลอนุกรมเวลา (Time-Series Strain Data) ได้เร็วกว่าระเบียบวิธี Matched Filtering แบบดั้งเดิมหลายพันเท่า งานวิจัยของ George และ Huerta (2018) แสดงให้เห็นว่าการเรียนรู้เชิงลึกสามารถตรวจจับสัญญาณการรวมตัวของหลุมดำและดาวนิวตรอนได้แบบเรียลไทม์ (มิลลิวินาที) พร้อมทั้งประมาณค่าพารามิเตอร์ของมวลหลุมดำและสปินได้อย่างแม่นยำ

นอกจากนี้ ในภารกิจสำรวจอวกาศยุคปัจจุบัน เช่น กล้องโทรทรรศน์อวกาศเจมส์เวบบ์ (JWST) ปัญญาประดิษฐ์ถูกนำมาใช้ในการกำจัดสัญญาณรบกวนของภาพถ่ายดาราศาสตร์อินฟราเรด (Deep Deconvolution) และการตรวจจับดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ (Exoplanets) จากสัญญาณการบดบังแสงของดาวฤกษ์แม่ (Transit Method) โดยอัตโนมัติ

7.8 ตัวอย่างการแก้โจทย์เชิงวิเคราะห์ตามระเบียบวิธี P-S-C-T

ตัวอย่างที่ 7.1 รัศมีชวาร์ซชิลด์และการยืดของเวลาใกล้หลุมดำใจกลางทางช้างเผือก

โจทย์ (Problem)
หลุมดำมวลยิ่งยวด ซาจิททาเรียส เอ สตาร์ (Sgr A*) ณ ใจกลางดาราจักรทางช้างเผือก มีมวลประมาณ $M = 4.15 \times 10^6 M_\odot$ (โดยมวลดวงอาทิตย์ $M_\odot \approx 1.989 \times 10^{30}$ kg)

1. จงคำนวณรัศมีชวาร์ซชิลด์ R_s ของหลุมดำนี้ในหน่วยกิโลเมตร
2. หากยานสำรวจอวกาศลอยนิ่งอยู่ที่ระยะห่าง $r = 1.20R_s$ เวลาที่ผ่านไป 1.0 ชั่วโมง บนยาน จะเทียบเท่ากับเวลากี่ชั่วโมงสำหรับผู้สังเกตที่อยู่ห่างไกลบนโลก?

ยุทธวิธี (Strategy)

- รัศมีชวาร์ซชิลด์ $R_s = \frac{2GM}{c^2}$
- การ ยืด ของ เวลา เนื่องจาก แรง โน้ม ถ่วง $\Delta t_\infty = \Delta t(r)\sqrt{1 - \frac{R_s}{r}}$ หรือ $\Delta t(r) = \frac{\Delta t_\infty}{\sqrt{1 - R_s/r}}$
  (ข้อควรระวัง เวลาเฉพาะ $\Delta\tau = \Delta t(r)$ บนยานเดินช้ากว่าเวลาของผู้สังเกตไกลโพ้น $\Delta t_\infty = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{1 - R_s/r}}$)

การคำนวณ (Computation)
1. คำนวณรัศมีชวาร์ซชิลด์

$$M = (4.15 \times 10^6) \times (1.989 \times 10^{30}\ \text{kg}) \approx 8.254 \times 10^{36}\ \text{kg} \tag{7.9}$$

$$R_s = \frac{2(6.674 \times 10^{-11}\ \text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2})(8.254 \times 10^{36}\ \text{kg})}{(2.998 \times 10^8\ \text{m/s})^2} \tag{7.10}$$

$$\approx \frac{1.1018 \times 10^{27}}{8.988 \times 10^{16}} \approx 1.226 \times 10^{10}\ \text{m}$$

$$\approx 1.226 \times 10^7\ \text{km} \approx 12.26\ \text{ล้านกิโลเมตร} \tag{7.11}$$

(ข้อสังเกต รัศมีชวาร์ซชิลด์นี้มีขนาดประมาณ 0.082 AU ซึ่งเล็กกว่าวงโคจรของดาวพุธรอบดวงอาทิตย์!)

2. คำนวณการยืดของเวลา ที่ระยะ $r = 1.20R_s$

$$\sqrt{1 - \frac{R_s}{r}} = \sqrt{1 - \frac{1}{1.20}} = \sqrt{1 - 0.8333} = \sqrt{0.1667} \approx 0.4082 \tag{7.12}$$

เวลาบนยาน $\Delta\tau = 1.0$ ชั่วโมง

$$\Delta t_\infty = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{1 - R_s/r}} = \frac{1.0\ \text{hr}}{0.4082} \approx 2.45 \text{ ชั่วโมง} \approx 2 \text{ ชั่วโมง } 27 \text{ นาที} \tag{7.13}$$

ข้อคิดทางฟิสิกส์ (Takeaway)
สนามโน้มถ่วงมหาศาลทำให้โครงข่ายปริภูมิเวลาบิดโค้งอย่างรุนแรง เวลาบนยานที่อยู่ใกล้ขอบฟ้าเหตุการณ์เพียง $1.2R_s$ จะเดินช้ากว่าเวลาของผู้สังเกตภายนอกมากกว่า 2.4 เท่า และหากยานขยับเข้าใกล้ขอบฟ้าเหตุการณ์ $r \to R_s$ เวลาภายนอกจะผ่านไปอย่างรวดเร็วจนเข้าสู่อนันต์ ■

ตัวอย่างที่ 7.2 คลื่นความโน้มถ่วงและการสูญเสียพลังงานของระบบดาวคู่นิวตรอน (Gravitational Radiation)

ในปี ค.ศ. 1974 รัสเซลล์ ฮัลส์ (Russell Hulse) และโจเซฟ เทย์เลอร์ (Joseph Taylor) ค้นพบระบบพัลซาร์คู่ PSR B1913+16 ซึ่งประกอบด้วยดาวนิวตรอน 2 ดวงที่มีมวลใกล้เคียงกันคือ $M_1 \approx M_2 \approx 1.44M_\odot \approx 2.86 \times 10^{30}$ kg โคจรรอบกันที่ระยะกึ่งแกนเอกเฉลี่ย $a \approx 1.95 \times 10^9$ m (ประมาณ 5 เท่าของระยะห่างโลก-ดวงจันทร์) โดยมีคาบการโคจร $P_b \approx 7.75$ ชั่วโมง $\approx 2.79 \times 10^4$ s

1. จงคำนวณกำลังการแผ่คลื่นความโน้มถ่วง (Gravitational Wave Luminosity) L_{GW} ตามสูตรควอดรูโพลของไอน์สไตน์สำหรับวงโคจรวงกลมสมมติ

$$L_{\text{GW}} = \frac{32}{5}\frac{G^4}{c^5}\frac{M_1^2 M_2^2 (M_1 + M_2)}{a^5} \tag{7.14}$$

2. คำนวณ L_{GW} ในหน่วยวัตต์ (W) และเปรียบเทียบกับกำลังการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมดของดวงอาทิตย์ ($L_\odot \approx 3.828 \times 10^{26}$ W)

โจทย์ (Problem)
คำนวณอัตราการสูญเสียพลังงานในรูปของคลื่นความโน้มถ่วงจากระบบดาวคู่ขนาดกะทัดรัด
ยุทธวิธี (Strategy)

- ค่าคงตัวทางฟิสิกส์ $G = 6.674 \times 10^{-11}$ m^{3}kg^{-1}s^{-2}, $c = 2.998 \times 10^8$ m/s
- มวลรวม $M_1 + M_2 = 2 \times (2.86 \times 10^{30}\ \text{kg}) = 5.72 \times 10^{30}$ kg
- คำนวณสเกลาร์สัมประสิทธิ์ $\frac{32}{5}\frac{G^4}{c^5}$ และตัวแปรมวล-ระยะทาง

การคำนวณ (Computation)
1. คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟิสิกส์

$$G^4 = (6.674 \times 10^{-11})^4 \approx 1.984 \times 10^{-40}\ \text{m}^{12}\text{kg}^{-4}\text{s}^{-8}$$

$$c^5 = (2.998 \times 10^8)^5 \approx 2.424 \times 10^{42}\ \mathrm{m^5 s^{-5}}$$
$$\frac{32}{5}\frac{G^4}{c^5} = 6.4 \times \frac{1.984 \times 10^{-40}}{2.424 \times 10^{42}} \approx 5.238 \times 10^{-82}\ \mathrm{m^7 kg^{-4} s^{-3}} \tag{7.15}$$

2. คำนวณพจน์มวลและระยะทาง

$$\begin{aligned} M_1^2 M_2^2 (M_1 + M_2) &= (2.86 \times 10^{30}\ \mathrm{kg})^4 \times (5.72 \times 10^{30}\ \mathrm{kg}) \\ &\approx (6.69 \times 10^{121}) \times (5.72 \times 10^{30}) \approx 3.827 \times 10^{152}\ \mathrm{kg^5} \\ a^5 &= (1.95 \times 10^9\ \mathrm{m})^5 \approx 2.815 \times 10^{46}\ \mathrm{m^5} \end{aligned} \tag{7.16}$$

3. กำลังการแผ่คลื่นความโน้มถ่วงรวม

$$\begin{aligned} L_{\mathrm{GW}} &\approx (5.238 \times 10^{-82}) \times \frac{3.827 \times 10^{152}}{2.815 \times 10^{46}} \\ &= (5.238 \times 10^{-82}) \times (1.359 \times 10^{106}) \approx 7.12 \times 10^{24}\ \mathrm{W} \end{aligned} \tag{7.17}$$

(เมื่อรวมผลกระทบจากความรีของวงโคจร $e \approx 0.617$ ค่าที่แท้จริงจะสูงขึ้นเป็นประมาณ 7.35×10^{24} W)

4. เปรียบเทียบกับดวงอาทิตย์

$$\frac{L_{\mathrm{GW}}}{L_\odot} = \frac{7.12 \times 10^{24}\ \mathrm{W}}{3.828 \times 10^{26}\ \mathrm{W}} \approx 0.0186 = 1.86\% \tag{7.18}$$

กำลังของคลื่นความโน้มถ่วงที่แผ่ออกมามีค่าเทียบเท่ากับเกือบ 2% ของพลังงานแสงสว่างทั้งหมดของดวงอาทิตย์!

ข้อคิดทางฟิสิกส์ (Takeaway)

การสูญเสียพลังงานมหาศาลนี้ส่งผลให้วงโคจรของระบบดาวพัลซาร์ค่อยๆ แคบลง และคาบการโคจรลดลงอย่างต่อเนื่องในอัตรา $\dot{P}_b \approx -2.42 \times 10^{-12}$ s/s ซึ่งตรงกับคำทำนายของสัมพัทธภาพทั่วไปอย่างแม่นยำระดับ 99.7% ถือเป็นหลักฐานทางอ้อมชิ้นแรกที่พิสูจน์การมีอยู่จริงของคลื่นความโน้มถ่วง และทำให้ฮัลส์กับเทย์เลอร์ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1993 ■

7.9 สรุปสาระสำคัญประจำบท

ตารางที่ 7.1 สรุปความสัมพันธ์พื้นฐานในฟิสิกส์ดาราศาสตร์และจักรวาลวิทยา

หัวข้อ	สมการหลัก	ความหมายทางกายภาพ
สมดุลไฮโดรสแตติก	$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM\rho}{r^2}$	เสถียรภาพโครงสร้างของดาวฤกษ์
ขีดจำกัดจันทรเศขร	$M_{\text{Ch}} \approx 1.44 M_\odot$	มวลสูงสุดของดาวแคระขาว
รัศมีชวาร์ซชิลด์	$R_s = \frac{2GM}{c^2}$	ขอบเขตขอบฟ้าเหตุการณ์ของหลุมดำ
กฎของฮับเบิล	$v = H_0 d$	เอกภพกำลังขยายตัวอย่างเป็นเอกรูป
สมการฟรีดมันน์	$H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$	สมการพลวัตการขยายตัวของเอกภพ

7.10 แบบฝึกหัดท้ายบท

1. หากโลกถูกบีบอัดจนกลายเป็นหลุมดำ จงคำนวณรัศมีชวาร์ซชิลด์ของโลก กำหนดมวลโลก $M_E \approx 5.972 \times 10^{24}$ kg

2. ดาราจักรแห่งหนึ่งอยู่ห่างจากโลก 100 Mpc จะมีความเร็วในการถอยห่างจากโลกเท่าใดตามกฎของฮับเบิล กำหนด $H_0 = 70$ km/s/Mpc

3. จงอธิบายว่าเหตุใดความดันดีเจเนอเรซีของอิเล็กตรอนจึงไม่สามารถพยุงดาวที่มีมวลมากกว่า $1.44 M_\odot$ ได้ (เชื่อมโยงกับทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษเมื่อความเร็วอิเล็กตรอนเข้าใกล้ c)

4. แสงจากซูเปอร์โนวาประเภท Ia ที่ตรวจวัดได้มีค่าการเลื่อนทางแดงของจักรวาล (Cosmological Redshift) $z = 1.0$ จงคำนวณตัวคูณสเกลของเอกภพ $a(t)$ ในขณะที่แสงนั้นถูกเปล่งออกมาเมื่อเทียบกับปัจจุบัน ($a_0 = 1$)

5. จงอธิบายความแตกต่างระหว่างพลังงานมืด (Dark Energy) และสสารมืด (Dark Matter) พร้อมทั้งระบุหลักฐานเชิงสังเกตการณ์ที่สนับสนุนการมีอยู่ของทั้งสององค์ประกอบในแบบจำลองมาตรฐานทางจักรวาลวิทยา ΛCDM

ภาคผนวก ก

ค่าคงตัวมูลฐานทางฟิสิกส์และคุณสมบัติของอนุภาค

ก.1 ค่า คงตัว มูลฐาน ทาง ฟิสิกส์ (CODATA 2026 Recommended Values)

ตารางที่ ก.1 ค่าคงตัวมูลฐานทางฟิสิกส์ตามมาตรฐานสากล CODATA 2026

ปริมาณ (Quantity)	สัญลักษณ์	ค่าเชิงตัวเลข	หน่วย (SI Units)
อัตราเร็วของแสงในสุญญากาศ	c	$299\,792\,458$	$\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$ (นิยามแม่นตรง)
ค่าคงตัวของพลังค์	h	$6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$	$\mathrm{J} \cdot \mathrm{s}$ (นิยามแม่นตรง)
ค่าคงตัวพลังค์ลดรูป	$\hbar = h/2\pi$	$1.054\,571\,817 \times 10^{-34}$	$\mathrm{J} \cdot \mathrm{s}$
ประจุมูลฐาน	e	$1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$	C (นิยามแม่นตรง)
มวลนิ่งของอิเล็กตรอน	m_e	$9.109\,383\,7015 \times 10^{-31}$	kg (0.511 MeV$/c^2$)
มวลนิ่งของโปรตอน	m_p	$1.672\,621\,9237 \times 10^{-27}$	kg (938.272 MeV$/c^2$)
มวลนิ่งของนิวตรอน	m_n	$1.674\,927\,4980 \times 10^{-27}$	kg (939.565 MeV$/c^2$)
หน่วยมวลอะตอม	1 u	$1.660\,539\,0666 \times 10^{-27}$	kg (931.494 MeV$/c^2$)
ค่าคงตัวโบลต์ซมันน์	k_B	$1.380\,649 \times 10^{-23}$	$\mathrm{J} \cdot \mathrm{K}^{-1}$ (นิยามแม่นตรง)
ค่าคงตัวแรงโน้มถ่วงสากล	G	$6.674\,30 \times 10^{-11}$	$\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{kg}^{-1} \cdot \mathrm{s}^{-2}$
สภาพยอมของสุญญากาศ	ε_0	$8.854\,187\,8128 \times 10^{-12}$	$\mathrm{F} \cdot \mathrm{m}^{-1}$
สภาพให้ซึมได้ของสุญญากาศ	μ_0	$1.256\,637\,0621 \times 10^{-6}$	$\mathrm{N} \cdot \mathrm{A}^{-2}$

ก.2 คุณสมบัติของอนุภาคมูลฐานในแบบจำลองมาตรฐาน

ตารางที่ ก.2 คุณสมบัติของอนุภาคมูลฐานในแบบจำลองมาตรฐาน (Standard Model)

อนุภาค	สัญลักษณ์	มวลนิ่ง (mc^2)	ประจุ (e)	สปิน
เลปตอน (Leptons)				
อิเล็กตรอน	e^-	0.511 MeV	-1	$1/2$
มิวออน	μ^-	105.66 MeV	-1	$1/2$
ทาว	τ^-	1776.86 MeV	-1	$1/2$
อิเล็กตรอนนิวทริโน	ν_e	< 0.8 eV	0	$1/2$
มิวออนนิวทริโน	ν_μ	< 0.19 MeV	0	$1/2$
ทาวนิวทริโน	ν_τ	< 18.2 MeV	0	$1/2$
ควาร์ก (Quarks: Current Quark Mass)				
อัพ	u	≈ 2.16 MeV	$+2/3$	$1/2$
ดาวน์	d	≈ 4.67 MeV	$-1/3$	$1/2$
ชาร์ม	c	≈ 1.27 GeV	$+2/3$	$1/2$
สเตรนจ์	s	≈ 93.4 MeV	$-1/3$	$1/2$
ท็อป	t	$\approx$ 172.69 GeV	$+2/3$	$1/2$
บอตทอม	b	≈ 4.18 GeV	$-1/3$	$1/2$
เกจโบซอนและสเกลาร์ (Gauge & Scalar Bosons)				
โฟตอน	γ	0	0	1
กลูออน	g	0	0	1
W โบซอน	$W^\pm$	80.377 GeV	± 1	1
Z โบซอน	Z^0	91.188 GeV	0	1
ฮิกส์โบซอน	H^0	125.10 GeV	0	0

บรรณานุกรม

[1] ชีวะ ทัศนา. (2569). *ฟิสิกส์แผนใหม่เชิงคำนวณและการจำลองเสมือนจริง*. จันทบุรี: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี.

[2] ชีวะ ทัศนา. (2569). *คณิตศาสตร์ สำหรับ ฟิสิกส์ (Mathematics for Physics)*. จันทบุรี: มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี.

[3] ชีวะ ทัศนา. (2557). *คู่มือ วิเคราะห์ ข้อมูล ดาราศาสตร์ เบื้อง ต้น*. จันทบุรี: มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี.

[4] ชีวะ ทัศนา. (2558). การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของกระจุกดาวเปิด M45 ด้วยเทคนิคซีซีดีโฟโตเมทรี. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี*, 2(1), 45–56.

[5] Thassana, C., Mkrtichian, D., & Komonjinda, S. (2016). Evolution of contact binary-star: Orbital period change of DF Hydrae. *Journal of Physics: Conference Series*, 901(1), 012028.

[6] Thassana, C., & Komonjinda, S. (2014). Orbital period study of contact binary star DF Hydrae. *Proceedings of the 9th National Conference on Physics and Astronomy*, 112–116.

[7] Thassana, C., A-thuek, S., & Samphao, T. (2012). Age and temperature of globular-open star clusters case study: M3, M35 and M67. *Siam Physics Congress 2012 (SPC 2012)*, 88–92.

[8] Thassana, C., T-Thienprasert, J., & Limpijumnong, S. (2011). Magnetic properties of NiO and MnO by LSDA+U. *Advanced Materials Research*, 214, 275–279.

[9] Thassana, C., T-Thienprasert, J., & Limpijumnong, S. (2012). Effect of exchange interaction J on magnetic moment of MnO. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 324(8), 1560–1565.

[10] Thassana, C., & Limpijumnong, S. (2013). The Coulomb interaction and volume compression effect on spin and orbital magnetic moment of NiO. *Physica B: Condensed Matter*, 420, 24–29.

[11] Chanthamalee, J., Puckdee, W., & Thassana, C. (2025). Characterization of multi-stress tolerant PGPR from orchard soils in Chanthaburi Province, Thailand. *Proceedings of the 37th Annual Meeting of the Thai Society for Biotechnology (TSB 2025)*, 354–361.

[12] Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 378, 686–707.

[13] Carleo, G., & Troyer, M. (2017). Solving the quantum many-body problem with artificial neural networks. *Science*, 355(6325), 602–606.

[14] Pfau, D., Spencer, J. S., Matthews, A. G., & Foulkes, W. M. C. (2020). Ab initio solution of the many-electron Schrödinger equation with deep neural networks. *Physical Review Research*, 2(3), 033429.

[15] Baldi, P., Sadowski, P., & Whiteson, D. (2014). Searching for exotic particles in high-energy physics with deep learning. *Nature Communications*, 5(1), 4308.

[16] Degrave, J., Felici, F., Buchli, J., Neunert, M., Tracey, B., Carpanese, F., ... & Riedmiller, M. (2022). Magnetic control of tokamak plasmas through deep reinforcement learning. *Nature*, 602(7897), 414–419.

[17] Biamonte, J., Wittek, P., Pancotti, N., Rebentrost, P., Wiebe, N., & Lloyd, S. (2017). Quantum machine learning. *Nature*, 549(7671), 195–202.

[18] George, D., & Huerta, E. A. (2018). Deep learning for real-time gravitational wave detection and parameter estimation with LIGO data. *Physical Review D*, 97(4), 044039.

[19] Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2018). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics* (10th ed.). Cengage Learning.

[20] Tipler, P. A., & Llewellyn, R. A. (2012). *Modern Physics* (6th ed.). W. H. Freeman and Company.

[21] Griffiths, D. J., & Schroeter, D. F. (2018). *Introduction to Quantum Mechanics* (3rd ed.). Cambridge University Press.

[22] Griffiths, D. J. (2008). *Introduction to Elementary Particles* (2nd ed.). Wiley-VCH.

[23] Taylor, E. F., & Wheeler, J. A. (1992). *Spacetime Physics: Introduction to Special Relativity* (2nd ed.). W. H. Freeman.

[24] Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). *Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary Edition*. Cambridge University Press.

[25] Carroll, S. M. (2019). *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity*. Cambridge University Press.

[26] Ryden, B. (2016). *Introduction to Cosmology* (2nd ed.). Cambridge University Press.

[27] Particle Data Group (Workman, R. L., et al.). (2024). Review of Particle Physics. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2022(8), 083C01.

[28] W3C Immersive Web Working Group. (2025). *WebXR Device API*. World Wide Web Consortium (W3C Recommendation). https://www.w3.org/TR/webxr/

[29] Lugaresi, C., et al. (2019). MediaPipe: A Framework for Building Perception Pipelines. *arXiv preprint arXiv:1906.08172*.

[30] Harris, C. R., et al. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825), 357–362.

[31] Virtanen, P., et al. (2020). SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), 261–272.

ดัชนีสืบค้นคำสำคัญ

Bateman Solver, 65
Black Hole AR, 88
Bloch Sphere AR, 76
Bohr Atom AR, 35

CCD Photometry, 89
CODATA, 95
Cosmology Solver, 88

Deep Reinforcement Learning, 65
DF Hydrae, 89

FermiNet, 38
Fission AR, 64

Garbage Collection, 6
Graph Neural Networks, 51

Hadron AR, 50
Hand Tracking, 5
Hit-Test, 4

Jet Tagging, 51

LHC, 50
LIGO, 90
LSDA+U, 38

Matplotlib, 6, 19
MediaPipe, 1, 5

Neural Network Quantum States, 38
NumPy, 6, 19

Physics-Informed Neural Networks, 7
PINN, 7
PINN ในสัมพัทธภาพ, 20
Python, 1, 19, 37, 50, 65, 76, 88

Quantum Machine Learning, 77
Quantum Orbitals AR, 35

SciPy, 6, 37
SEMF, 61
Solid-State Spin Qubits, 77
Spatial Computing, 1
Statevector, 76

Three.js, 1

Variational Quantum Eigensolver, 77

WebXR, 1, 18, 35, 50, 64, 76, 88
WebXR Session, 4

Zero-GC, 6

กฎของฮับเบิล, 86
กรวยแสง, 17
กระจุกดาว, 89
กลศาสตร์ควอนตัม, 27
กล้อง STM, 34
กัมมันตภาพรังสี, 62
การกระเจิงคอมป์ตัน, 30
การกักขังประจุสี, 48
การคำนวณควอนตัม, 71
การจำลอง AR, 18
การจำลองเสมือนจริง, 1
การซ้อนทับควอนตัม, 73
การยืดออกของเวลา, 15
การวัดตำแหน่งดาว, 89

การสลายตัวบีตา, 49
การหดสั้นของความยาว, 15
การเรียนรู้เชิงลึก, 7, 20
การเรียนรู้เชิงลึกในดาราศาสตร์, 90
การเรียนรู้เชิงลึกในฟิสิกส์อนุภาค, 51
การแปลความหมายของบอร์น, 32
การแปลงแบบลอเรนซ์, 14
ขอบฟ้าเหตุการณ์, 86
ครึ่งชีวิต, 62
คลื่นความโน้มถ่วง, 90
ความดันดีเจเนอเรซี, 85
ความพัวพันควอนตัม, 71, 74
ความยาวคลื่นเดอบรอยล์, 31
ควาร์ก, 44, 47
คิวบิต, 71, 73
ค่าคงตัวมูลฐาน, 95
จักรวาลวิทยา, 83
ชเรอดิงเงอร์, 27
ช่วงปริภูมิเวลา, 17
ตัวคูณลอเรนซ์, 14
ทรงกลมบล็อค, 71, 73
ทวิภาวะคลื่น-อนุภาค, 31
ทันเนลลิง, 34
นิวคลีออน, 61
ปัญญาประดิษฐ์ในฟิสิกส์, 7
ปัญญาประดิษฐ์ในฟิสิกส์นิวเคลียร์, 65
พลังค์, 27
พลังงานนิ่ง, 18
พลังงานมืด, 86
พลังงานยืดเหนี่ยว, 58
ฟังก์ชันคลื่น, 32
ฟิชชัน, 58, 63
ฟิวชัน, 58, 63
ฟิสิกส์ดาราศาสตร์, 83
ฟิสิกส์นิวเคลียร์, 58
ฟิสิกส์อนุภาค, 44
มวลคงตัว, 50
มวลบกพร่อง, 61
มินคอฟสกี, 17
ระดับพลังงานควอนไทซ์, 33
ระบบดาวคู่แบบสัมผัส, 89
รัศมีชวาร์ซชิลด์, 86
วัตถุดำ, 30
วิกฤตการณ์รังสีอัลตราไวโอเลต, 30
สถานะเบลล์, 74
สมการชเรอดิงเงอร์, 32
สมการฟรีดมันน์, 83, 86
สมการเบตแมน, 62
สมดุลไฮโดรสแตติก, 85
สมมูลมวล-พลังงาน, 18
สสารมืด, 86
สัจพจน์ของไอน์สไตน์, 13
สัมพัทธภาพพิเศษ, 10
หลักความไม่แน่นอน, 31
หลุมดำ, 83, 86
อนุภาคในกล่อง, 33
อันตรกิริยามูลฐาน, 47
อันตรกิริยาแลกเปลี่ยน, 38
อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนสปิน, 77
อีเทอร์, 13
ฮาดรอน, 48
ฮิกส์โบซอน, 44
เกณฑ์ของลอว์สัน, 63
เกต CNOT, 74
เกตควอนตัม, 74
เกตฮาดามาร์ด, 74
เพาลีเมทริกซ์, 74
เมซอน, 48
เลปตอน, 47
เวลาเฉพาะ, 15
แบบจำลองมาตรฐาน, 44
แบบจำลองหยดของเหลว, 61
แบริออน, 48
แผนภาพไฟน์แมน, 49
แฟร์มิออน, 47
แรงนิวเคลียร์, 47
โทคาแมก, 65
โฟโตอิเล็กทริก, 30
โมเมนตัมสัมพัทธภาพ, 18
ไมเคิลสัน-มอร์ลีย์, 13
ไอน์สไตน์, 10

ประวัติผู้เขียน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชีวะ ทัศนา

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี
อีเมล chewa.t@rbru.ac.th
เว็บไซต์วิชาการ https://science.rbru.ac.th

ประวัติการศึกษา

- **ปร.ด. (ฟิสิกส์ประยุกต์)**
  Ph.D. in Applied Physics
- **วท.ม. (ฟิสิกส์ประยุกต์)**
  M.Sc. in Applied Physics
- **วท.บ. (ฟิสิกส์ คอมพิวเตอร์ และอิเล็กทรอนิกส์)**
  B.Sc. in Physics, Computer and Electronics

ภาระงานสอนประจำ

- ฟิสิกส์แผนใหม่ (Modern Physics)
- คณิตศาสตร์ สำหรับ ฟิสิกส์ (Mathematics for Physics)
- ฟิสิกส์ เชิง คำนวณ และ การ จำลอง ด้วย คอมพิวเตอร์ (Computational Physics)
- ปฏิบัติ การ ฟิสิกส์ ขั้น สูง (Advanced Physics Laboratory)

ความเชี่ยวชาญและงานวิจัยที่สนใจ

- การจำลองปรากฏการณ์ฟิสิกส์เสมือนจริง ด้วย WebXR, AR และ Spatial Computing
- ระเบียบ วิธี เชิง ตัวเลข และ วิทยา การ คอมพิวเตอร์ ค วอน ตัม (Quantum Computing & Simulation)
- การ พัฒนา ระบบ Active Learning และสื่อจำลองเชิงโต้ตอบ 60 FPS บนเว็บและคลาวด์
- การประยุกต์ปัญญาประดิษฐ์ (AI) ในการ วิเคราะห์ ข้อมูล ฟิสิกส์ และ การ สร้างสื่อการเรียนรู้ขั้นสูง